

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина

На правах рукописи



УШЕНКИН Виктор Андреевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

**ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

Научный консультант
доктор технических наук
ГУСЕВ С.И.

Рязань 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 Анализ проблемы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	20
1.1 Сравнительный анализ технологий обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	20
1.2 Анализ алгоритмов и технологий бортового сжатия радиолокационной и оптической информации, первичной и геометрической наземных обработок радиолокационных данных.....	37
1.3 Анализ алгоритмов и технологий обработки интерферометрических изображений.....	63
1.4 Анализ алгоритмов и технологий объединения информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	80
1.5 Актуальные направления исследований по созданию новых методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	85
Основные результаты.....	89
2 Методы и алгоритмы бортового сжатия радиолокационной и оптической информации и уточнения угловых измерений оптико-электронных приборов по результатам анализа радиолокационных данных.....	90
2.1 Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм с уменьшенными потерями...	91
2.2 Алгоритм бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений с уменьшенными потерями.....	101
2.3 Метод уточнения углов рысканья и тангажа на основе оценивания доплеровского центроида путем амплитудного анализа изображений, полученных при первичной обработке космических радиоголограмм.....	113

2.4 Метод уточнения угла крена при радиометрической обработке радиолокационных изображений на основе статистического амплитудно-дифференциального анализа.....	128
Основные результаты.....	140
3 Метод и алгоритмы геодезической привязки, геометрической обработки и объединения радиолокационных изображений с привлечением оптических данных.....	141
3.1 Алгоритм уточнения геодезической привязки радиолокационного изображения на основе геометрического совмещения с опорным оптическим снимком.....	141
3.2 Эффективная организация массовых координатных преобразований при геометрической обработке радиолокационных изображений.....	158
3.3 Алгоритм высокоскоростного совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений с привлечением стереофотограмметической информации.....	165
3.4 Метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальных стереофотограмметических данных.....	170
Основные результаты.....	187
4 Метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметической информации.....	189
4.1 Объединение низкодетальной стереофотограмметической информации с целью повышения точности опорных данных для интерферометрической обработки.....	189
4.2 Предварительная обработка интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметической информации.....	194
4.3 Предварительное развертывание фазы на основе анализа сюжета интерферометрического изображения.....	206

4.4 Окончательное высокоточное развертывание фазы на интерферометрическом изображении с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации.....	213
Основные результаты.....	232
5 Алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	234
5.1 Алгоритм нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах.....	234
5.2 Алгоритм объединения стереофотограмметрических и интерферометрических цифровых моделей местности с привлечением электронных карт.....	263
5.3 Алгоритм объединения радиолокационных и оптических изображений на основе выделения важных объектов.....	269
5.4 Алгоритм объединения радиолокационных и оптических спектрозональных изображений на основе раскраски.....	275
Основные результаты.....	282
6 Экспериментальное подтверждение эффективности методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	284
6.1 Экспериментальное подтверждение эффективности методов и алгоритмов бортового сжатия радиолокационной и оптической информации и уточнения угловых измерений оптико-электронных приборов по результатам анализа радиолокационных данных.....	284
6.2 Экспериментальное подтверждение эффективности метода и алгоритмов геодезической привязки, геометрической обработки и объединения радиолокационных изображений с привлечением оптических данных.....	311
6.3 Экспериментальное подтверждение эффективности метода обработки интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации.....	320

6.4 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритмов объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	335
6.5 Программная реализация методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.....	348
Основные результаты.....	350
Заключение.....	353
Список литературы.....	356
Приложение.....	395

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Создание космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в видимом и радиодиапазонах спектра определено Федеральными космическими программами и Гособоронзаказами России как приоритетное направление оперативного получения объективной информации по наблюдаемым объектам природного и антропогенного происхождения.

В данном стратегически важном для России направлении космической деятельности центральное место отводится созданию передовых бортовых средств получения данных от оптико-электронных и радиолокационных систем ДЗЗ и наземных комплексов их приема и обработки. Системный анализ этих двух классов систем ДЗЗ показывает, что процессы получения и обработки оптических и радиолокационных изображений имеют много общего, но и ряд принципиальных различий. *Общность* процессов проявляется в сходстве бортовой навигационной и другой командно-измерительной аппаратуры, а также в очень схожих принципах наземной обработки и формирования информационных продуктов. *Различия* технологий получения и обработки оптической и радиолокационной информации обусловлены прежде всего принципиально разными физическими принципами формирования данных в оптико-электронных и радиолокационных системах ДЗЗ.

В то же время каждый из видов систем ДЗЗ имеет свои преимущества и ограничения.

Оптико-электронные системы формируют изображения объектов земной поверхности, привычные для человека и не искаженные мультиплексивным шумом, как это происходит в радиолокации из-за когерентного характера сигнала. Кроме того, они могут вести съемку в nadir без геометрических искажений высотных объектов и загораживания одних объектов другими, что особенно важно при наблюдении горной местности и городской застройки.

Радиолокационные системы могут вести съемку независимо от погодных условий (в том числе при наличии облачности) и времени суток, имеют возмож-

ность регистрировать не только интенсивность, но также фазу и поляризацию электромагнитного излучения и за счет более высокой проникающей способности радиоволны позволяют наблюдать земную поверхность, скрытую лесными массивами, или объекты, размещенные в укрытиях, непрозрачных в видимом диапазоне. Кроме того, на точность геодезической привязки изображений, сформированных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, слабее влияют погрешности измерения угловой ориентации космического аппарата (КА).

Сопоставляя выявленные преимущества проанализированных систем ДЗЗ, можно сделать вывод, что оптико-электронные и радиолокационные системы дополняют друг друга. Совместное использование радиолокационных и оптико-электронных данных позволяет объединить их преимущества и парировать недостатки. Это подтверждается запуском КА ДЗЗ, на которых одновременно установлены и оптико-электронная, и радиолокационная съемочные аппаратуры: например, японского аппарата «ALOS-1» и российских аппаратов серии «Метеор-М».

Таким образом, возникает актуальная задача совместной обработки информации от обоих видов космических систем. Под *совместной обработкой* понимается обработка информации, сформированной космическими системами радиолокационного наблюдения Земли, с привлечением изображений и производных продуктов космических систем оптико-электронного наблюдения. Такая постановка рассматриваемой проблемы нацелена на расширение функциональных возможностей и повышение радиометрического и геометрического качества информационных продуктов, получаемых при наземной обработке. Решению указанной актуальной задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

При этом вопросы создания оптико-электронной и радиолокационной съемочной аппаратуры в диссертации не рассматриваются, акцент делается на обработке информации, сформированной различными видами космических систем ДЗЗ.

В диссертации предлагаются новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Охватываются все основные этапы обработки информации, начиная с бортового

сжатия, продолжая первичной и стандартной наземными обработками и заканчивая высокоуровневой и тематической наземными обработками в части формирования цифровых моделей высот и объединения различных видов информации. Предлагаемые решения нацелены на повышение эффективности использования материалов космической съемки Земли на федеральном, региональном и отраслевом уровнях.

Степень разработанности темы. В настоящее время в мире создано и проектируется множество космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Методы и алгоритмы бортовой и наземной обработок во многом определяют основные тактико-технические характеристики выходных информационных продуктов таких систем.

В России созданием космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и их составных частей занимаются следующие предприятия ракетно-космической отрасли:

- Ракетно-космический центр «Прогресс» (высокодетальные оптико-электронные системы «Ресурс-ДК, П, ПМ», «Аист-2Д, 2Т», системы специального назначения, радиолокационные системы серии «Обзор-Р») [1];
- Корпорация «ВНИИЭМ» (высокодетальные оптико-электронные системы в интересах Союзного государства, гидрометеорологические системы оптико-электронного и радиолокационного наблюдения серии «Метеор-М») [2, 3];
- НПО имени С.А. Лавочкина (системы глобального оптико-электронного наблюдения серий «Электро-Л», «Электро-М», «Арктика-М», малые оптико-электронные и радиолокационные КА ДЗЗ серии «Беркут» и «Беркут-РСА») [4];
- НПО машиностроения (радиолокационные системы серии «Кондор») [5];
- Центральный НИИ машиностроения (проект «Сфера», малые оптико-электронные КА ДЗЗ серии «Грифон» и др.) [6, 7];
- Корпорация «Российские космические системы», включая Научный центр оперативного мониторинга Земли (разработка целевой аппаратуры, радиолиний и средств наземной обработки информации для КА ДЗЗ, эксплуатация КА ДЗЗ) [8–10];

- Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева (системы наблюдения с международной космической станции);
- НИИ точных приборов (разработка радиолокационной целевой аппаратуры для КА серий «Метеор-М» и «Обзор-Р», радиолиний и наземной инфраструктуры обработки информации для КА ДЗЗ) [11, 12];
- Ростовский-на-Дону НИИ радиосвязи (разработка радиолокационной целевой аппаратуры для КА серии «Метеор-М» и радиолиний для КА ДЗЗ) [13];
- Концерн радиостроения «Вега» и НПП «Пульсар» (разработка радиолокационной целевой аппаратуры) [5, 14];
- НПП «ОПТЭКС», НПО «Лептон», ЛОМО, Красногорский завод имени С.А. Зверева (разработка оптико-электронной целевой аппаратуры) [15–18].

Кроме того, вопросами обработки информации от космических систем радиолокационного и/или оптико-электронного наблюдения Земли занимаются коллективы Института космических исследований РАН, Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Института систем обработки изображений – Самара (в структуре Курчатовского института), фирмы «Ракурс», АО «АЭРОКОН», Ижевского радиозавода, концерна «Алмаз-Антей», НИЦ космической гидрометеорологии «Планета», Госцентра «Природа», Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева и его филиала НИИ космических систем имени А.А. Максимова, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, МГУ, МФТИ, МГТУ имени Н.Э. Баумана, МАИ, НГУ, ЮЗГУ, УлГТУ, Муромского института ВлГУ имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, ПГУТИ, СамГТУ, РГРТУ, различных ведомственных организаций и др. [5, 8, 10, 15, 19–32].

Наиболее весомый вклад в развитие систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и средств обработки информации в таких системах внесли академики РАН Л.М. Зеленый, А.А. Петрукович, В.А. Сойфер, члены-корреспонденты РАН А.Г. Аншаков, В.С. Верба, А.А. Лутовинов и крупные отечественные ученые Г.С. Кондратенков, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов, Е.А. Лупян,

С.А. Барталев, Д.М. Ермаков, Р.Н. Ахметов, Л.А. Макриденко, С.Э. Зайцев, В.В. Хартов, Е.М. Твердохлебова, М.Ю. Достовалов, Л.Б. Неронский, А.И. Захаров, В.В. Сергеев, В.А. Фурсов, П.К. Кузнецов, Л.А. Школьный, Е.Ф. Толстов, А.Н. Детков, В.В. Асмус, О.В. Горячkin, В.В. Костров, А.Г. Ташлинский, И.В. Москатиньев, Е.А. Костюк и др.

За рубежом созданием систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и обработкой информации в таких системах занимаются космические агентства США (NASA), Канады (CSA), Евросоюза (ESA), Франции (CNES), Германии (DLR), Италии (ISA), Японии (JAXA), Китайской Народной Республики (CNSA), Республики Корея (KARI), Индии (ISRO) и других государств, научно-образовательные организации (Калифорнийский университет в Сан-Диего, США; Делфтский технический университет, Нидерланды и др.), а также частные фирмы и корпорации: Lockheed Martin, Maxar Technologies, Ball Aerospace & Technologies, NV5 Geospatial Software (США), Airbus Defence & Space, Spot Image (Евросоюз), ICEYE (Финляндия), Sarmap SA, GAMMA Remote Sensing (Швейцария), PCI Geomatics (Канада), ОАО «Пеленг» (Беларусь) и др.

В рамках перечисленных организаций наибольший вклад в развитие систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли и средств обработки информации внесли зарубежные ученые R.A. Schowengerdt, R.M. Goldstein, C.L. Werner, H.A. Zebker, M. Costantini, D.C. Ghiglia, L.A. Romero, C.W. Chen, I.G. Cumming, W. Xu, C. Prati, F. Rocca, R.F. Hanssen, J. Mittermayer, A. Moreira и др.

Работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов профильных организаций служат базой для исследований в рамках настоящей диссертационной работы. Вместе с тем можно выделить ряд перспективных, мало исследованных научных направлений, подлежащих развитию в настоящей диссертации.

Во-первых. Размещение радиолокационной и оптико-электронной съемочных аппаратур на одном КА ДЗЗ увеличивает объем целевой информации, подлежащей передаче на Землю, при ограниченной пропускной способности радиолинии. Следовательно, требуется более сильное бортовое сжатие целевой информации перед ее передачей по радиолинии. Поэтому актуальны исследования по со-

зданию новых алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений, отличающихся меньшим уровнем искажений информации при заданной степени сжатия.

Во-вторых. Зарубежные технологии первичной наземной обработки радиолокационной информации в первую очередь ориентированы на высокую точность измерительной информации об орбитальном движении и угловой ориентации КА и съемочной аппаратуры. Базовые методы и алгоритмы уточнения измерительной информации путем анализа радиолокационных данных разработаны, однако развиваются в основном применительно к авиационным системам, имеющим свои особенности. В то же время в условиях импортозамещения российский технологический уровень пока не обеспечивает необходимую стабильность точностных характеристик аппаратуры. В связи с этим необходимы исследования по развитию методов уточнения угловой ориентации КА и съемочной аппаратуры, измеренной оптико-электронными приборами, по результатам анализа радиолокационной информации с учетом особенностей космических систем наблюдения с целью повышения точности и скорости первичной обработки.

В-третьих. С учетом указанных выше особенностей отечественной аппаратуры, а также в связи с отсутствием отечественного опорного растрового радиолокационного покрытия земной поверхности и наличием только оптического покрытия актуальны исследования по созданию новых алгоритмов уточнения геодезической привязки радиолокационных изображений по опорным оптическим снимкам. Поскольку геометрическая обработка, включающая геодезическую привязку, является основным видом наземной обработки, необходимы исследования по повышению ее скорости.

В-четвертых. Из-за отсутствия аналога надирной оптической съемки на радиолокационных изображениях всегда присутствуют дефекты, вызванные перепадами высот наблюдаемых объектов: сверхъяркие области переналожения радиосигналов и области радиотени. Известны алгоритмы, позволяющие уменьшить количество таких дефектов за счет объединения изображений, полученных с восходящего и нисходящего витков орбиты, однако они требуют наличия высокоточной

и высокодетальной цифровой модели высот наблюдаемых объектов. В то же время, в отличие от ряда зарубежных стран, в России отсутствует собственная высококачественная глобальная цифровая модель высот и в основном используются лишь низкодетальные зарубежные данные, имеющиеся в открытом доступе. Таким образом, актуальна разработка метода объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты в условиях низкой детальности опорной стереофотограмметрической цифровой модели высот, сформированной зарубежными оптико-электронными космическими системами.

В-пятых. Наличие фазы в радиолокационном сигнале позволяет измерять высоты объектов земной поверхности по двум изображениям одной местности, снятым с близких параллельных орбит, с помощью интерферометрической обработки. Однако на точность измерения высот влияет ряд негативных факторов: погрешности знания пространственной базы, вызванные неточностью и/или нестабильностью измерительной информации, характерными для отечественной аппаратуры; фазовые искажения, вызванные пространственной неоднородностью состояния земной атмосферы; разрывы фазы, вызванные резкими изменениями высот наблюдаемых объектов. В то же время доступна опорная информация о высоте в виде низкодетальных стереофотограмметрических глобальных цифровых моделей высот, сформированных зарубежными оптико-электронными системами, которую можно использовать для повышения точности интерферометрической обработки. Известные технологии интерферометрической обработки применяют эту информацию лишь на отдельных этапах, поэтому необходима разработка метода интерферометрической обработки, учитывающего низкодетальную стереофотограмметрическую информацию на всем тракте преобразования пары радиолокационных изображений в цифровую модель высот.

В-шестых. Наличие фазы в радиолокационном сигнале также позволяет регистрировать малые (сантиметровые) смещения объектов за период между двумя съемками с помощью дифференциальной интерферометрической обработки. Однако двухпроходная дифференциальная интерферометрия перестает быть все-погодной из-за неустранимого негативного влияния атмосферных искажений фа-

зы, основными источниками которых являются водяной пар и облачность. Синхронное проведение оптико-электронной и радиолокационной съемок потенциально позволяет выявить облачность по оптическому изображению и отбраковать наиболее искаженные атмосферой участки на дифференциальном интерферометрическом изображении. В настоящее время наиболее качественные результаты сегментации облачности обеспечивает аппарат искусственного интеллекта, а именно, сверточные нейронные сети. Однако известные нейросетевые архитектуры требуют большого объема вычислений, что ограничивает их применение лишь наземным сегментом. В то же время перспективен перенос сегментации облачности на борт КА, чтобы он мог заранее оценить облачную обстановку по результатам оптической съемки и при неблагоприятной обстановке отказаться от энергозатратной радиолокационной съемки. Поэтому необходима оптимизация известных нейросетевых архитектур с целью многократного сокращения объема вычислений при сохранении качества сегментации облачности.

B-седьмых. Недостатки радиолокационной информации могут быть существенно уменьшены за счет объединения разнородных данных: радиолокационных и оптических изображений, интерферометрических и стереофотограмметрических цифровых матриц высот. Данные вопросы мало исследованы, поэтому актуальна разработка новых алгоритмов объединения разнородной информации.

Цель диссертации состоит в улучшении радиометрического и геометрического качества и увеличении скорости формирования информационных продуктов космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли за счет совместной обработки информации от таких систем.

Задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели:

- системный анализ проблемы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ и выбор перспективных направлений совершенствования методико-алгоритмической базы такой обработки;
- создание алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений с уменьшенными потерями;

- разработка методов уточнения угловой ориентации радиолокационного космического аппарата, измеренной оптико-электронными приборами, на основе амплитудного анализа формируемых радиолокационных изображений;
- создание вычислительно эффективных алгоритмов геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями;
- разработка метода объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты в условиях низкой детальности опорной высотной информации от оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- создание метода высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот с привлечением низкодетальной высотной информации от оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- разработка вычислительно эффективного алгоритма нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах;
- создание алгоритмов объединения разнородной информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ;
- проведение экспериментальных исследований с целью подтверждения эффективности разработанных методов и алгоритмов.

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что в ней предложены и исследованы новые методы и алгоритмы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ, позволяющие улучшить радиометрическое и геометрическое качество и увеличить скорость формирования информационных продуктов таких систем.

Конкретно на защиту выносятся следующие новые научные положения и результаты.

1. Алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений земной поверхности с потерями на основе блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования (для радиоголограмм) и нейросетевых моделей (для оптических изображений), позволяющие при заданной степени сжатия уменьшить

уровень искажений до 5% по сравнению с известными детерминированными алгоритмами.

2. Методы уточнения угловой ориентации космического аппарата с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и результатов амплитудного анализа радиолокационных изображений, позволяющие оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой 1,5' и на 28 % сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа.

3. Алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями, позволяющие повысить точность оценки координат объектов в среднем до 4 м и значительно сократить время формирования стандартных информационных продуктов.

4. Метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем, позволяющий в среднем в 6 раз уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ.

5. Метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот на основе анализа сюжета интерферометрического изображения и привлечения низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем наблюдения Земли, позволяющий в среднем в 10 раз уменьшить среднеквадратическую ошибку определения высот по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

6. Алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах, позволяющий примерно в 22 раза сократить объем вычислений по сравнению с известной архитектурой «U-Net» при сохранении высокой точности сегментации.

7. Алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли, позволяющие

примерно на 3 % уменьшить среднеквадратическую ошибку измерения высоты по сравнению с лучшей из объединяемых цифровых моделей местности, примерно на 10 % снизить потери информативности объединяемых изображений и представить радиолокационные изображения в естественных цветах.

Теоретическая и практическая значимость диссертации состоит в том, что в ней изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ и на этой основе созданы программные средства обработки спутниковой информации, получившие внедрение на практике, которое вносит значительный вклад в повышение эффективности использования спутниковых данных в России на федеральном, отраслевом и региональном уровнях.

Методы исследования. Теоретические результаты получены с использованием методов системного анализа, цифровой обработки сигналов, оптимизации, линейной алгебры, математической статистики, теории графов и искусственного интеллекта.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» в части:

- пункта 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;
- пункта 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации».

Реализация и внедрение. Диссертационная работа включает результаты исследований, выполненных в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина (НИИ «Фотон» РГРТУ) в рамках ОКР по созданию

космической системы ДЗЗ «Обзор-Р» № 1, предусмотренной Федеральными космическими программами на 2006–2015 и 2016–2025 годы, космической системы ДЗЗ «Обзор-Р» № 2, а также в рамках НИР «Нейроборт-РГРТУ» по заказу АО «ЦНИИмаш» в интересах Роскосмоса и НИР «Интеграция-СГ» в интересах Союзного государства. Результаты диссертационной работы в виде программных комплексов получили внедрение на практике, что подтверждается Актами от ведущих предприятий ракетно-космической отрасли России, специализирующихся в области космических исследований Земли:

- АО «РКЦ «Прогресс»;
- АО «ЦНИИмаш»;
- АО «Российские космические системы»;
- «НИИ КС имени А.А. Максимова» – филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева».

Результаты выполненных исследований опубликованы в учебных пособиях и использованы также в учебном процессе РГРТУ.

Акты приведены в приложении к диссертации.

Апробация работы. По основным положениям и результатам исследований диссертации сделаны доклады:

- на международных конференциях «Гагаринские чтения» (Москва, 2014), «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» (Москва, 2016, 2017, 2025), «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2017, 2023), «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2015), «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015), «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2016, 2017, 2021, 2022, 2024, 2025), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2025), международном семинаре по современным материалам и технологиям в авиационной промышленности СМТАI (Москва, 2016);

- на всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014, 2015, 2016, 2017), «Актуаль-

ные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2015, 2017, 2024), «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2014, 2015, 2016, 2017, 2021, 2022, 2023, 2025), «Актуальные проблемы современной науки и производства» (Рязань, 2021).

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, математическим и имитационным моделированием, экспериментальными исследованиями, сопоставлением с альтернативными подходами и практическим внедрением спроектированных комплексов обработки информации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 100 работ, в том числе:

- 25 статей (23 в журналах по списку ВАК, также включенных в Белый список);
 - 2 коллективные монографии;
 - 1 патент на изобретение;
 - 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ;
 - 2 учебных пособия;
 - 65 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Все работы приведены в списке литературы.

Личный вклад соискателя по опубликованным материалам заключается в следующем:

- в работах [33–54] соискателем выполнен анализ алгоритмов и технологий обработки информации в космических системах радиолокационного наблюдения Земли;
- в работах [55–61] соискателем проведен сравнительный анализ технологий обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли;
- в работах [62–64] соискателем предложен алгоритм бортового сжатия радиоголограмм с уменьшенными потерями;
- в работе [65] соискателем разработан алгоритм бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений с уменьшенными потерями;

- в работе [66, 67] соискателем предложен метод уточнения углов рысканья и тангажа на основе оценивания доплеровского центроида;
- в работах [66–68] соискателем реализован метод уточнения угла крена при радиометрической обработке радиолокационных изображений;
- в работах [35, 58, 66, 69–73] соискателем предложены вычислительно эффективные алгоритмы уточнения привязки и геометрических трансформаций радиолокационных изображений на основе аппроксимации массовых координатных преобразований;
- в работах [35, 58, 74] соискателем разработан метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и привлечения низкодетальной опорной стереофотограмметрической модели высот;
- в работах [35, 58, 75–91] соискателем предложен метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации;
- в работах [65, 92–99] соискателем разработан алгоритм нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях;
- в работах [58, 100–103] соискателем предложены алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли;
- работы [104–132] выполнены соискателем без соавторов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и приложения. Ее объем составляет 403 с., в том числе 355 с. основного текста, 18 таблиц, 68 рисунков, 39 с. списка литературы из 330 наименований, 9 с. приложения.

1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

В главе сопоставляются технологические схемы обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Выполняется анализ существующих методов и алгоритмов бортовой обработки радиолокационной и оптической информации. Анализируются известные методы и алгоритмы первичной, стандартной, высокоуровневой и тематической наземных обработок радиолокационной информации. Выполняется анализ известных алгоритмов совместной обработки радиолокационной и оптической информации. Выявляются проблемные вопросы, и определяются направления научных исследований по созданию новых методов и алгоритмов совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли.

1.1 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ЦЕЛЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

1.1.1 Общность технологий обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Вне зависимости от типа космической системы наблюдения Земли в ней выделяются космический и наземный сегменты.

Космический сегмент образует КА, включающий платформу, системы управления движением, электропитания и термостабилизации, измерительные приборы, целевую аппаратуру, систему сбора, хранения и бортовой обработки информации, бортовую аппаратуру радиолиний для связи с Землей. В ходе съемки информация, сформированная целевой аппаратурой, поступает в систему сбора,

подвергается при необходимости бортовой обработке и затем хранится до очередного сеанса ее сброса на Землю по радиолинии.

Наземный сегмент образует сеть пунктов приема, обработки и распространения информации. Каждый пункт содержит наземную аппаратуру радиолинии и, как правило, программно-аппаратные комплексы обработки информации. В некоторых пунктах информация может лишь приниматься, а затем передаваться для обработки посредством наземной связи в более крупные пункты. Обработанная информация архивируется в оперативном или долговременном архивах либо выдается потребителям через инфраструктуру ее распространения.

Вычислительные мощности на борту КА сильно ограничены. Поэтому в настоящее время целевая информация обычно подвергается минимальной бортовой обработке. Как правило, это сжатие с целью увеличения пропускной способности радиолинии и упаковка в формат, наиболее удобный для передачи на Землю. В перспективе с увеличением производительности вычислительных средств возможен перенос на борт отдельных, наиболее простых операций, выполняемых в настоящее время в наземном сегменте.

В рамках наземной обработки целевой информации принято выделять несколько основных стадий (ГОСТ Р 59079-2020 [133]):

- распаковка данных, принятых по радиолинии, и запись целевой и сопутствующей служебной информации в некотором формате (уровень 0);
- первичная обработка (уровень 1) – формирование изображения из распакованных данных в системе координат съемочного устройства (реального или виртуального), его геодезическая привязка и радиометрическая коррекция;
- стандартная обработка (уровень 2) – формирование стандартных продуктов из полученного на предыдущей стадии изображения путем геометрических преобразований в ту или иную систему координат;
- высокоуровневая обработка (уровень 3) – формирование производных (базовых) продуктов ДЗЗ на основе совместной обработки разнородной или разновременной информации более низких уровней либо на основе пространственно-го объединения данных более низкого уровня;

– тематическая обработка (уровень 4) – формирование тематических информационных продуктов ДЗЗ на основе данных более низкого уровня с целью решения некоторой тематической задачи или сквозной задачи, общей по своему типу для нескольких тематических областей.

Перечисленные стадии и уровни обработки являются общими и для радиолокационных, и для оптико-электронных систем, но каждая стадия в зависимости от вида наблюдения имеет свои особенности, рассматриваемые ниже.

1.1.2 Особенности технологий бортовой обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Тип целевой информации накладывает свои особенности на базовую технологию обработки данных ДЗЗ.

Подходы к бортовому сжатию целевой информации в оптико-электронных и радиолокационных системах принципиально отличаются. Целевая информация в оптико-электронных системах – это фрагменты изображения в виде частично перекрывающихся сканов или кадров, как правило, отдельно по каждому спектральному каналу. Фрагментация обусловлена ограничением на число фотодиодов в отдельной линейке или матрице. Поскольку каждый фрагмент обладает всеми свойствами оптического изображения, для сжатия целевой оптической информации применяются вычислительно наиболее эффективные алгоритмы сжатия изображений с потерями, в основе которых лежит предположение, что яркость от пикселя к пиксели чаще всего изменяется плавно. Потери обычно относительно невелики и обусловлены квантованием коэффициентов, описывающих отклонение изменений яркости пикселей от плавного закона [134].

Целевая информация в радиолокационных системах – это одна или несколько радиоголограмм, представляющих собой матрицы отсчетов принятых широкополосных эхо-сигналов. Широкополосность эхо-сигналов обусловлена модуляцией зондирующих радиоимпульсов и эффектом Доплера из-за орбитального движения космического аппарата относительно наблюдаемых объектов. Из-за широкополосности эхо-сигналов в них сильно выражены как низкие, так и высокие частоты. Это не позволяет эффективно применять к радиоголограммам алгоритмы сжатия.

тия изображений. В то же время для радиоголограмм допустим гораздо больший уровень потерь при сжатии, поскольку при последующем синтезе из них радиолокационного изображения отношение сигнал-шум существенно повышается. Поэтому основной подход к бортовому сжатию радиоголограмм – квантование отсчетов эхо-сигналов с целью уменьшения числа бит для цифрового представления каждого отсчета [135].

1.1.3 Особенности технологий первичной наземной обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Процедура формирования единого изображения из распакованных данных, принятых с борта, также существенно отличается в оптико-электронных и радиолокационных системах ДЗЗ.

В оптико-электронных системах основное содержание этой процедуры составляет «сшивка» отдельных сканов или кадров в единое изображение [136, 137] с последующим совмещением изображений, полученных для разных спектральных каналов [138, 139].

В радиолокационных системах принятая с борта информация является не изображением, а зарегистрированным радиосигналом, поэтому основу первичной обработки составляет синтез радиолокационного изображения из радиоголограммы [140]. Для радиолокаторов низкого разрешения он может быть ограничен сжатием эхо-сигналов в направлении дальности – сокращением их длительности за счет знания закона модуляции зондирующего радиоимпульса. Для радиолокаторов высокого и среднего разрешения он дополняется также синтезом апертуры антенны – сокращением размера импульсного отклика радиолокатора в направлении полета (азимутальном направлении) на основе знания модуляции частоты эхо-сигналов, обусловленной эффектом Доплера. Синтез радиолокационного изображения из радиоголограммы является методически и вычислительно наиболее сложной операцией первичной обработки, превосходя по сложности процедуры формирования единого оптического изображения.

В широкозахватных режимах съемки радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) могут формировать сразу несколько радиоголограмм,

каждая из которых соответствует некоторой парциальной полосе съемки. В таких режимах при первичной обработке требуется также «сшивка» радиолокационных изображений, синтезированных из каждой радиоголограммы, в единый растр, но эта процедура существенно проще, чем в оптико-электронных системах, поскольку все «сшиваемые» изображения формируются одной и той же радиолокационной аппаратурой, а не различными фотолинейками, матрицами или оптико-электронными приборами, имеющими разные параметры внутреннего ориентирования на КА.

Аналогом спектральных каналов оптико-электронных систем в радиолокации являются поляризации излученного и принятого сигналов. Наиболее распространена линейная поляризация в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Различные комбинации поляризаций при излучении и приеме образуют до четырех поляризационных каналов радиолокационного изображения [141]. Их геометрическое совмещение друг с другом также существенно проще, чем совмещение спектральных каналов в оптических системах.

Радиолокационные системы являются активными и сами подсвечивают наблюдаемый участок земной поверхности когерентным излучением, это позволяет регистрировать не только амплитуду, но и фазу отраженного сигнала. В то же время оптико-электронные системы регистрируют отраженное или рассеянное излучение Солнца либо собственное тепловое излучение объектов – некогерентных источников электромагнитных волн, для которых бессмысленно регистрировать фазу. Поэтому, если единственным продуктом первичной обработки оптических данных является изображение уровня 1 с действительным сигналом, то для результатов первичной обработки радиолокационных данных вводится два подуровня: уровень 1А – комплексное изображение, необходимое для ряда специфических обработок, и уровень 1Б – действительное амплитудное изображение, предназначенное для просмотра и последующей обработки без учета фазы.

Комплексное изображение уровня 1А оставляют в системе координат, полученной на выходе его синтеза из радиоголограммы, чтобы не допустить искажений фазы сигнала, которые могут возникнуть при геометрических преобразованиях.

ях. В то же время при формировании амплитудного изображения уровня 1Б выполняются небольшие геометрические преобразования: убирается возможное зеркальное отражение объектов на изображении, а также приводится к квадратному виду проекция пикселя на горизонтальную земную поверхность.

И в оптико-электронных, и в радиолокационных системах в ходе первичной обработки изображения подвергаются относительной радиометрической коррекции – устранению неоднородности коэффициентов зависимости кода яркости пикселя от некоторой физической характеристики наблюдаемого объекта по полю снимка. В оптике в качестве такой величины могут выступать энергетическая яркость, ее спектральная плотность или радиационная температура [142–144]. В радиолокации такой величиной является абсолютная или удельная эффективная площадь рассеяния (ЭПР) [145].

Несмотря на общность задачи, относительная радиометрическая коррекция в оптике и радиолокации выполняется совершенно по-разному.

В оптике радиометрическая неоднородность обусловлена различной чувствительностью фотоэлементов в линейке или матрице. Каждому фотоэлементу однозначно соответствует конкретный столбец или пиксель скана или кадра. Поэтому для радиометрической обработки не требуется измерительная информация о движении и угловой ориентации КА.

В радиолокации радиометрическая неоднородность обусловлена направленностью антенны радиолокатора, которая наиболее ярко подсвечивает центр полосы съемки и значительно слабее – края. При этом коэффициент усиления антенны является функцией угла визирования, в то время как приемный тракт радиолокатора измеряет лишь наклонную дальность объектов. В связи с этим координаты пикселя определяют лишь удаленность объекта и время его наблюдения радиолокатором, а для расчета угла визирования и соответствующего ему коэффициента усиления антенны требуется измерительная информация о движении и угловой ориентации КА, также необходимо знание внутреннего ориентирования антенны радиолокатора на КА. Таким образом, радиометрическая коррекция изображений в радиолокационных системах значительно сложнее, чем в оптико-электронных.

1.1.4 Особенности технологий стандартной (геометрической) наземной обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Формирование стандартных продуктов путем геометрических преобразований является наиболее схожим этапом наземной обработки информации в оптико-электронных и радиолокационных системах ДЗЗ, однако и здесь имеются свои особенности.

Сходство обусловлено тем, что геометрическая обработка изображений для обоих видов систем сводится к формированию стандартного продукта уровня 2А, геокодированного в картографическую проекцию без учета перепадов высот наблюдаемых объектов, и стандартного продукта уровня 2Б, ортотрансформированного в картографическую проекцию с привлечением опорной информации о перепадах высот наблюдаемых объектов.

Особенности же обусловлены отличием геометрических моделей радиолокационного и оптико-электронного наблюдения, в которых искажающие факторы проявляются по-разному.

Основным искажающим фактором в оптико-электронных системах являются погрешности знания угловой ориентации съемочной аппаратуры. Оптическую съемку возможно выполнять в надир, минимизируя тем самым негативное влияние перепадов высот наблюдаемых объектов. Именно при таких условиях съемки более сложно формируемый продукт уровня 2Б может быть заменен продуктом уровня 2А. Также искажающими факторами могут выступать ошибки временной привязки пикселей изображения и погрешности измерения орбитального движения КА.

Основным искажающим фактором в радиолокационных системах являются погрешности знания перепадов высот наблюдаемых объектов. Если для оптических систем при угле съемки 45° они с единичным коэффициентом переходят в геометрические искажения и ослабляются до нуля по мере приближения к съемке в надир, то для радиолокационных систем они либо с околоединичным коэффициентом переходят в геометрические искажения при углах съемки $40\text{--}50^\circ$, либо начинают многократно усиливаться по мере приближения к съемке в надир. Под

углами, близкими к 90° , при которых в радиолокации геометрические искажения минимальны, съемка не ведется из-за массового загораживания более далеких объектов более близкими. Указанная особенность сильно ограничивает применение продуктов уровня 2A, сформированных радиолокационными системами. Единственный смысл их формирования – предоставление вместе с описанием модели высотных искажений потребителю, у которого есть более точная модель высот, чем в пункте обработки информации из состава космической системы.

В то же время угловая ориентация не оказывает влияния на геодезическую привязку и геометрическую обработку радиолокационных изображений. Она учитывается лишь при синтезе изображения из радиоголограммы и его радиометрической коррекции в процессе первичной обработки. Ошибки временной привязки строк радиолокационного изображения и погрешности измерения орбитального движения влияют на геометрическую обработку информации в радиолокационных системах в той же степени, что и в оптико-электронных.

По-разному в оптике и радиолокации проявляются наложения один объектов на другие и затенения.

В оптике в один пиксель изображения, представленного в системе координат датчика, попадают объекты, расположенные вдоль луча визирования под определенным углом, при этом виден, как правило, ближайший объект, а более далекие оказываются загорожены им. Из-за этого при строгом ортотрансформировании оптического изображения сложной пересеченной местности на нем появляются пропуски данных (рисунок 1.1). Если же ортотрансформирование реализуется по обратному закону геометрического соответствия и для ускорения обработки не выполняется трассировка лучей с целью проверки загораживания одних объектов другими, на ортотрансформированном изображении возникает дублирование объектов, когда более близкий объект оказывается и на своем месте, и на месте всех объектов, которые он загородил. Избежать появления указанного негативного эффекта можно путем выполнения оптической съемки в надир.



Рисунок 1.1 – Геокодированное оптическое изображение высотного здания (слева) и пропуски данных на результате ортотрансформирования (справа)

В радиолокации в один пиксель изображения, представленного в системе координат « дальность – азимут », попадают все объекты, расположенные на одной дальности, но под разными углами визирования поперек трассы КА. Из-за этого радиолокатор регистрирует эхо-сигналы от всех них, а пиксель изображения получается сверхъярким. При ортотрансформировании данный пиксель «растягивается» в отрезок линии, длина которого определяется перепадом высот объектов, попавших в этот пиксель. Совокупность отрезков, полученных из «растянутых» соседних пикселей, расположенных вдоль столбца радиолокационного изображения, образует на результате ортотрансформирования сверхъяркую и размытую область переналожения сигналов. В то же время объектам, загороженным другими, на радиолокационном изображении соответствуют темные участки, содержащие лишь фоновый шум. При ортотрансформировании они сохраняются, лишь несколько уменьшаясь в размерах. Таким образом, на ортотрансформированном радиолокационном изображении отсутствуют пропуски данных или дублирования объектов, но имеются области переналожения сигналов и темные участки радиотеней без полезного сигнала (рисунок 1.2). Причем избежать их появления не представляется возможным. Площадь областей переналожения сигналов увеличивается по мере приближения к съемке в надир, а площадь участков радиотени – по мере удаления от нее.

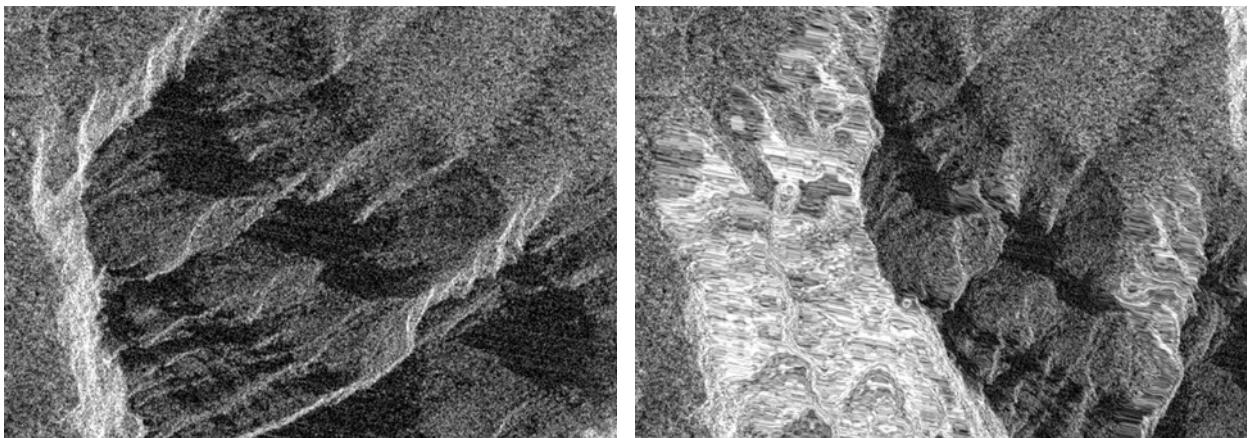


Рисунок 1.2 – Геокодированное радиолокационное изображение горной местности (слева) и области переналожения и затенения на результате ортотрансформирования (справа)

На оптических изображениях также присутствуют теневые области, но они связаны не с геометрической моделью съемки, а с моделью освещения, поскольку оптические системы являются пассивными. При этом за счет рассеянного света в теневых областях полезный сигнал присутствует, хотя и существенно ослаблен. Для выявления теневых областей на оптических изображениях необходимы сведения об угле Солнца в момент съемки. Зависимость от внешнего освещения является одним из основных недостатков оптико-электронных систем ДЗЗ.

1.1.5 Особенности технологий высокогоуровневой наземной обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Рассмотренные выше особенности оптических и радиолокационных данных порождают отличия их высокогоуровневой обработки.

Основными видами высокогоуровневой обработки данных от оптико-электронных систем ДЗЗ являются формирование мозаичных изображений на основе объединения частично перекрывающихся снимков [146] и формирование мультивременных композитных изображений для мониторинга изменений на участке земной поверхности.

Данные виды высокогоуровневой обработки применимы и для радиолокационных систем, однако особенности радиолокации порождают необходимость в выполнении дополнительных видов высокогоуровневой обработки.

Невозможность получить в результате одной съемки радиолокационное изображение пересеченной местности без переналожений сигналов и радиотеней привела к появлению нового вида обработки – объединению разновременных перекрывающихся изображений, снятых с разных ракурсов, с целью минимизации площади областей переналожения и радиотени на результате объединения. Для решения этой задачи дополнительно привлекается модель высот наблюдаемого участка земной поверхности.

Когерентный характер радиолокационных сигналов, хотя и позволяет регистрировать фазу, приводит к искажению амплитуды в виде высокочастотного мультиплексивного шума, вызванного явлением интерференции. Такой шум принято называть спектральным шумом. Для борьбы с ним обычно применяются низкочастотная фильтрация или некогерентное накопление, приводящие к снижению пространственного разрешения радиолокационных изображений. Для сохранения детальности изображений можно фильтрацию шумов в пространстве заменить фильтрацией во временной области и из нескольких разновременных перекрывающихся снимков сформировать радиолокационное изображение со сниженным уровнем шума [147]. Для оптико-электронных систем такая обработка неактуальна из-за отсутствия на изображениях существенного уровня шума.

Наконец, сложность радиолокационных изображений для восприятия человеком порождает необходимость еще одного вида высокоуровневой обработки – объединения радиолокационных изображений с более привычными для человека оптическими снимками видимого диапазона.

1.1.6 Особенности технологий тематической наземной обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Одной из типовых тематических задач, решаемых с использованием данных ДЗЗ, является картографирование. В рамках этой задачи по данным ДЗЗ с высокой степенью автоматизации составляются на весь мир или отдельные регионы (районы) цифровые модели высот (ЦМВ). Модель, на которой представлены высоты всех типов объектов, принято называть цифровой моделью местности (ЦММ). Также может применяться термин «цифровая модель поверх-

ности», являющийся буквальным переводом английского термина «digital surface model». Модель, на которой представлено только пространственное распределение высот рельефа, принято называть цифровой моделью рельефа (ЦМР). Поскольку системы ДЗЗ наблюдают все типы объектов, их тематическим продуктом являются ЦММ, а ЦМР получают путем постобработки ЦММ с исключением искусственных высотных объектов (зданий, сооружений и т.п.) и лесного покрова.

Для формирования ЦММ в рамках задачи картографирования в оптико-электронных и радиолокационных системах используются принципиально разные подходы. В оптико-электронных системах это стереофотограмметрия – наблюдение участка земной поверхности под разными углами с получением двух или трех изображений (стереопары или триплета), для которых на основе корреляционного анализа строится карта пространственного распределения геометрических рассогласований (карта диспаратностей), пересчитываемая в дальнейшем на основе модели съемки в ЦММ [148–150]. При стереофотограмметрической обработке возникают три основные проблемы: облачность, малоконтрастные объекты и загораживание одних объектов другими. Облачность и тени от нее необходимо автоматически детектировать и отбраковывать, в противном случае на ЦММ появляются области с высотными искажениями. Для малоконтрастных объектов (например, водной поверхности) корреляционный анализ не может правильно найти значение диспаратности. Загораживание одних объектов другими приводит к пропускам или снижению детальности ЦММ. Эта проблема решается путем замены стереопары на триплет, в котором один из снимков является надирным и не содержит загораживаний, а два других снимка получены с отклонением от надира в противоположные стороны. В отсутствие облачности применение триплетов позволяет полностью исключить пропуски данных, в противном случае требуется проведение нескольких разновременных стереосъемок с последующим объединением полученных на их основе ЦММ.

В радиолокационных системах возможно формирование ЦММ на основе подхода, близкого к стереофотограмметрии, – радарграммии [151]. Однако он применяется крайне ограниченно из-за негативного влияния спектрального шума на

точность и детальность получаемых ЦММ. Для формирования радарграммической ЦММ приемлемого качества требуется проведение большого числа съемок одного и того же участка земной поверхности с разных витков орбиты, формирование большого количества пар изображений с последующим совместным анализом построенных карт диспаратности с целью исключения из них погрешностей, внесенных спекл-шумом.

Основным подходом к формированию ЦММ в космических радиолокационных системах ДЗЗ является интерферометрия [152]. В ее основе лежит сопоставление фаз сигналов двух комплексных радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголограмм, полученных с близких квазипараллельных орбит. Такие изображения называются интерферометрической парой, а разность орбит (интерферометрическая база) должна укладываться в так называемую интерферометрическую «трубку». Съемка интерферометрической пары может вестись одним аппаратом при повторных пролетах над заданным участком земной поверхности на разных витках орбиты (двухпроходная интерферометрия). Если имеется спутниковая группировка, то двухпроходная съемка может быть выполнена двумя однотипными КА с сокращением времени между пролетами. Наилучшие же результаты обеспечивает синхронная съемка одним КА с двумя пространственно разнесенными радиолокаторами на борту или летящими рядом (в «тандеме») двумя радиолокационными КА. При синхронной съемке зондирующие импульсы излучает один радиолокатор, а эхо-сигналы принимают оба радиолокатора.

Разность фаз сигнала в одноименных пикселях изображений интерферометрической пары включает несколько составляющих, одной из которых является топографическая фаза, квазипропорциональная высоте наблюдаемого объекта. Задача интерферометрической обработки – вычленение топографической фазы для ее последующего пересчета в высоту и устранение всех остальных составляющих разности фаз. Наиболее проблемной составляющей являются атмосферные искажения фазы, обусловленные пространственными вариациями изменения метеопараметров за период между съемками двух изображений. При синхронной интерферометрической съемке они полностью исключаются, а при двухпроходной ин-

терферометрии являются одним из основных источников ошибок определения высот.

Другой проблемой интерферометрии является восстановление абсолютных значений топографической фазы, в то время как из-за периодического характера фазы изначально известны лишь относительные значения, свернутые по модулю 2π . Перед пересчетом в высоту к свернутым значениям необходимо прибавить некоторое целое количество периодов волны излучения. Эта задача, называемая развертыванием фазы, является некорректно поставленной, поскольку имеет бесконечное множество решений, из которых необходимо выбрать единственное соответствующее истинным высотам наблюдаемых объектов. Данный выбор обычно осуществляют на основе ряда эвристических критериев, которые строго выполняются преимущественно для равнинной местности, а при наличии большого количества высотных объектов с резкими границами нарушаются, приводя к ошибкам определения высоты, кратным периоду неоднозначности, составляющему обычно в зависимости от условий интерферометрической съемки порядка 20–100 м.

Несмотря на перечисленные проблемы, радиолокационная интерферометрия обеспечивает более высокую точность формирования ЦММ, чем радарграмметрия. Кроме того, она имеет ряд преимуществ перед стереофотограмметрией, применяемой в оптико-электронных системах. Во-первых, интерферометрия лучше работает с малоконтрастными объектами. Во-вторых, она более устойчива к негативному влиянию облачности. Синхронная интерферометрия является всепогодной и позволяет строить ЦММ в районах, практически круглый год закрытых облачностью. При двухпроходной интерферометрии наличие облачности приводит к ошибкам определения высоты величиной в единицы или десятки метров, но это всё равно гораздо лучше, чем при стереофотограмметрии, которая вместо высоты объекта наблюдения выдает высоту загораживающего его облака, составляющую сотни метров или единицы километров. В то же время стереофотограмметрия, особенно в случае обработки триплетов, обеспечивает более качественный результат в горной местности и для высотной городской застройки, где при радиоло-

кационной интерферометрии возникает множество переналожений, затенений и ошибок развертывания фазы.

Двухпроходная интерферометрическая радиолокационная съемка и последующий анализ разности фаз позволяют не только формировать ЦММ, но и выявлять малые, сантиметровые смещения отдельных наблюдаемых объектов, что принципиально невозможно в оптико-электронных системах. Выявление таких смещений актуально при решении тематических задач мониторинга чрезвычайных ситуаций и состояния различного вида объектов: просадок грунта, деформации зданий и т.п. Указанный процесс называется дифференциальной интерферометрической обработкой и заключается в вычислении составляющей разности фаз, обусловленной смещениями наблюдаемых объектов в направлении наклонной дальности. Для устранения не нужной в данном случае топографической фазы две съемки могут быть выполнены с одной и той же траектории движения КА (с околонулевой базой) либо может привлекаться опорная модель высот.

Главная проблема дифференциальной интерферометрии – атмосферные искажения фазы. Их нельзя устраниТЬ при съемке, которая в задаче выявления смещений обязана быть асинхронной. В отличие от обычной интерферометрии здесь атмосферные искажения приводят к меньшим ошибкам, составляющим обычно единицы сантиметров. Однако эти ошибки являются основным ограничителем точности двухпроходной дифференциальной интерферометрии – практически единственного применения радиолокационных систем ДЗЗ, не являющегося все-погодным.

Точность дифференциальной интерферометрии может быть существенно повышена за счет снижения оперативности. Для этого радиолокационные съемки одного и того же участка земной поверхности проводят регулярно в течение нескольких месяцев. В результате образуются десятки интерферометрических пар, на которых атмосферные искажения проявляются по-разному из-за изменения погодных условий. Если предположить, что малые смещения объектов происходят регулярно с постоянной скоростью, то путем статистической обработки множества интерферометрических пар можно исключить атмосферные искажения как

случайно изменяющуюся составляющую и оставить фазу смещений как систематическую составляющую. В результате достигается точность определения скорости сверхмалых смещений порядка 1 мм/год [153–156]. Однако такая статистическая обработка не применима в случае смещений, произошедших разово в результате чрезвычайной ситуации, например, землетрясения.

Наконец, одной из распространенных тематических задач, решаемых с помощью данных ДЗЗ, являются обнаружение и/или классификация различных объектов. В оптико-электронных системах наилучшие результаты классификации получают по данным гиперспектральной аппаратуры, формирующей изображение, состоящее из нескольких сотен узких спектральных каналов, по которым можно оценить спектральную характеристику наблюдаемого объекта и отличить различные виды объектов по малейшим отклонениям их спектральных кривых. В радиолокационных системах наилучшие результаты классификации получают с использованием всех 4 возможных поляризаций сигнала и применением поляриметрической обработки. Известно большое количество поляриметрических декомпозиций, позволяющих выделить из суммарного радиолокационного сигнала составляющие, соответствующие различным типам элементарных отражателей: Паули, Крогагера, Фримана–Дурдена и др. [157–173]. На основе полученных декомпозиций выполняются поляриметрические классификации объектов: Клода–Потье, Фримана–Дурдена–Уишарта и др. [174–176].

1.1.7 Технологические схемы обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Рассмотренные общие и отличительные черты технологий обработки информации в оптико-электронных и радиолокационных космических системах ДЗЗ схематично представлены на рисунках 1.3 и 1.4.

Более подробный анализ алгоритмов и технологий, применяемых на отдельных этапах бортовой и наземной обработки информации, приводится в следующих параграфах.

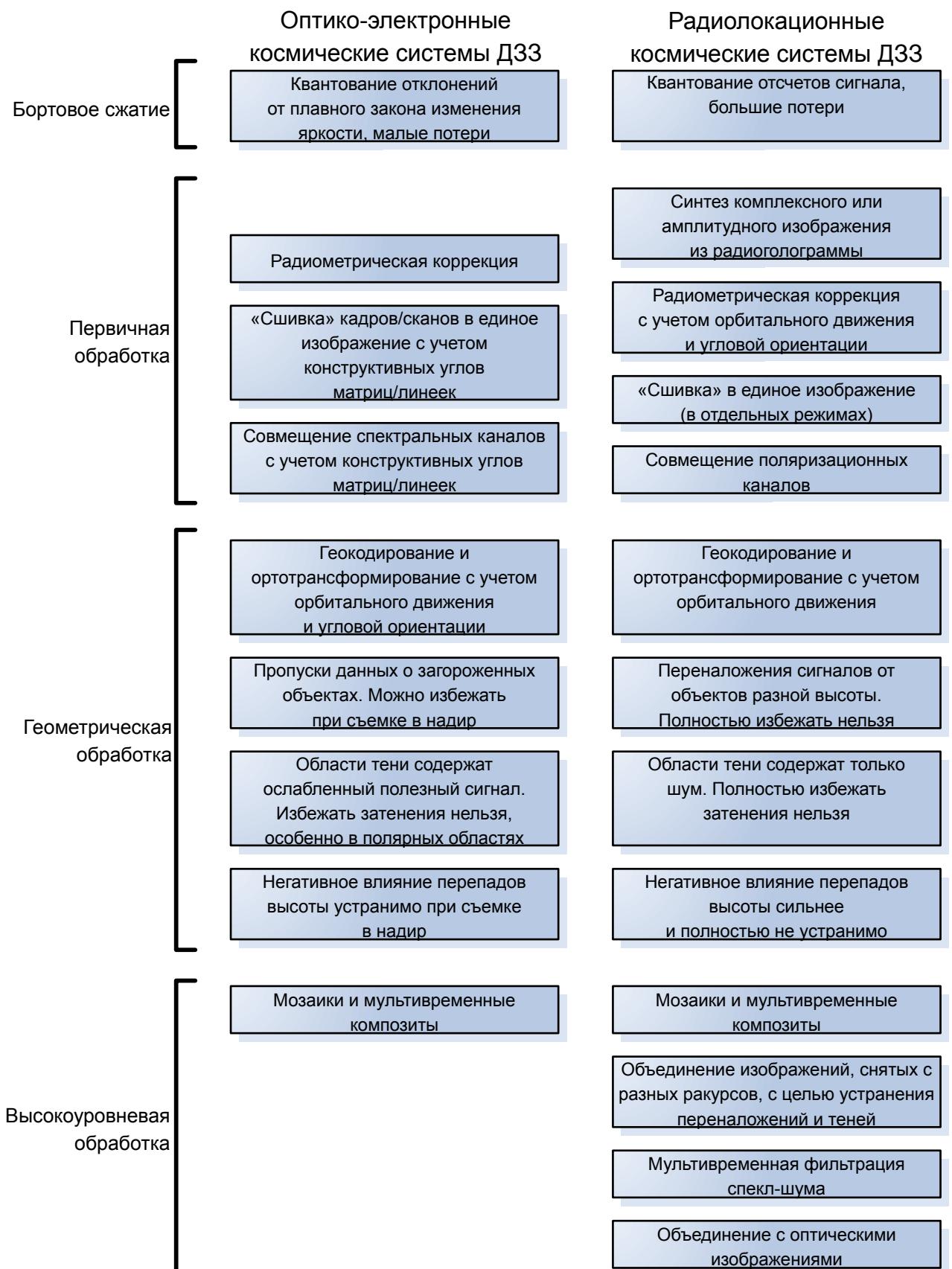


Рисунок 1.3 – Технологические схемы бортовой, первичной, геометрической и высокоуровневой обработок информации в оптико-электронных и радиолокационных космических системах Д33

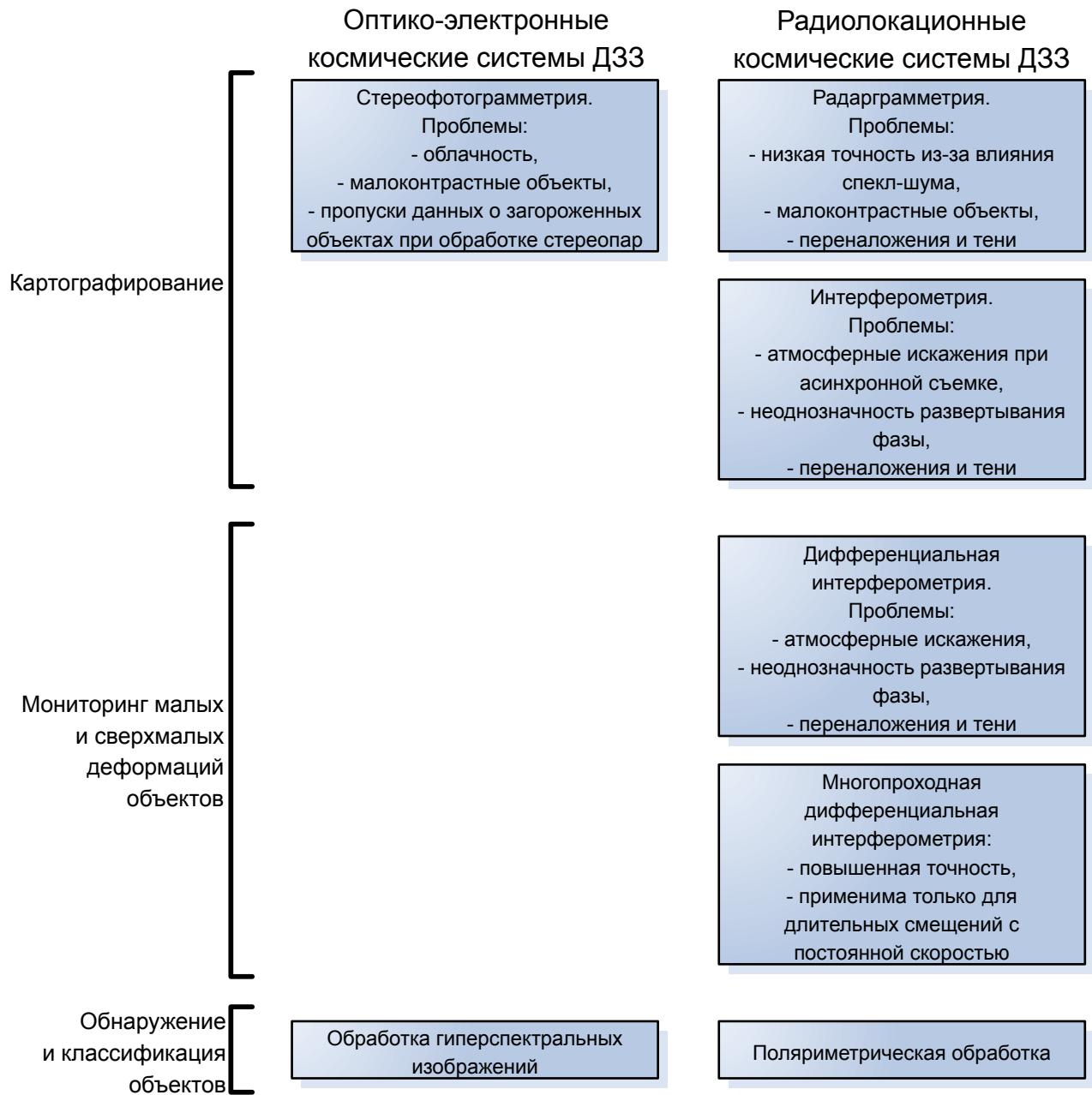


Рисунок 1.4 – Технологические схемы тематических обработок информации в оптико-электронных и радиолокационных космических системах ДЗ3

1.2 АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ БОРТОВОГО СЖАТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРВИЧНОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НАЗЕМНЫХ ОБРАБОТОК РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

1.2.1 Анализ алгоритмов и технологий бортового сжатия целевой информации в оптико-электронных космических системах ДЗ3. В связи с повышением

детальности съемки наблюдается регулярный рост объемов целевой информации, формируемой космическими системами ДЗЗ. Для обеспечения приемлемой оперативности ее передачи наземному сегменту при ограниченной пропускной способности радиолинии необходимо предварительное сжатие данных на борту КА.

Современные требования к степени сжатия целевой информации таковы, что методы сжатия изображений без потерь ее не обеспечивают. В связи с этим на борту современных оптико-электронных КА применяются вычислительно эффективные алгоритмы сжатия с умеренными потерями: дифференциальная импульсно-кодовая модуляция и JPEG2000 [134]. В первом алгоритме квантуются отличия данных от показаний модели, предсказывающей их значения по предыдущим отсчетам (строкам). В простейшем случае это разность текущих и предыдущих данных. В алгоритме JPEG2000 квантуются коэффициенты вейвлет-преобразования, описывающие отличия изображения на более высоком уровне детализации от более низкого уровня. Квантованные данные имеют неравномерное распределение и дополнительно сжимаются путем энтропийного кодирования: по Хаффману или арифметического. Потери, внесенные традиционными алгоритмами сжатия, приводят к неестественно выглядящим искажениям изображения, снижающим его пригодность для дешифрации.

Также в последние годы в связи с активным развитием методов искусственного интеллекта появились исследования по применению искусственных нейронных сетей в задаче сжатия изображений с потерями. Предложен критерий качества сжатых изображений, учитывающий не только величину внесенных искажений, но и их «естественность» для человека, – индекс структурного сходства [177]:

$$Q_{usc} = \frac{(2\mu_a\mu_b + 0,0001 L_a^2)(2\sigma_{ab} + 0,0009 L_a^2)}{(\mu_a^2 + \mu_b^2 + 0,0001 L_a^2)(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + 0,0009 L_a^2)}, \quad (1.1)$$

где a и b – одноканальные изображения (исходное и сжатое с потерями), μ и σ^2 – математическое ожидание и дисперсия яркости пикселей соответствующего изображения, σ_{ab} – ковариация яркостей на изображениях, L_a – ширина диапазона возможных значений яркости на изображении.

Абсолютное большинство работ по нейросетевому сжатию изображений с потерями основано на применении так называемых автокодировщиков – результата объединения кодировщика и декодировщика в единую нейронную сеть с целью их совместного машинного обучения. Объем и структура данных на входе и выходе автокодировщика идентичны, но на стыке кодировщика и декодировщика передается сигнал с меньшим количеством отсчетов, которые к тому же дополнительно квантуются. Это обеспечивает сжатие информации. При обучении нейронной сети добиваются минимального отличия изображения на выходе автокодировщика от изображения, поданного на вход. Это обеспечивает малый уровень потерь. После обучения автокодировщик разбивается на две части, одна из которых используется для сжатия, а другая – для распаковки сжатых данных.

Для автокодировщика в разных работах выбираются различные нейросетевые архитектуры на основе многослойных персепtronов [178], слоев нормализации данных [179], сверточных [180] и рекуррентных [181] нейронных сетей.

Для управления степенью нейросетевого сжатия изображений используются два основных подхода. В первом подходе [178, 180] обучается несколько автокодировщиков, отличающихся объемом информации, проходящей через центральную часть сети, а в процессе сжатия изображений выбирается тот или иной из обученных кодировщиков. Во втором подходе [179, 181] обучается один автокодировщик, выполняющий сжатие с максимальной степенью. В процессе сжатия запускается автокодировщик целиком. Результат кодировщика записывается в выходной поток, а результат декодировщика вычитается из исходного изображения. Полученная разность описывает потери при сжатии. Если они недопустимо велики, то полученное разностное изображение подается на вход автокодировщика. Процесс повторяется, до тех пор пока на очередной итерации разность сигналов на входе и выходе автокодировщика не станет достаточно близка к нулю. При этом с каждой новой итерацией объем данных в выходном потоке увеличивается, т.е. снижается степень сжатия.

Результат кодировщика с потерями может быть подвергнут дополнительному сжатию без потерь. Наибольшую степень такого сжатия для случайных данных в настоящее время обеспечивают нейросетевые алгоритмы на основе архитектур-транс-

формеров [182], рекуррентных [183, 184] и полносвязных [184] слоев. Это достигается ценой существенного увеличения объемов вычислений и расходуемой памяти при сжатии по сравнению с детерминированными алгоритмами.

В основе нейросетевого сжатия без потерь лежит использование искусственной нейронной сети для предсказания следующего отсчета сигнала по уже известным отсчетам. Предсказание носит вероятностный характер, т.е. выходом нейронной сети является функция плотности апостериорной вероятности значений следующего отсчета. Нейросетевое предсказание позволяет уменьшить энтропию по сравнению с исходным сигналом и за счет этого более эффективно его сжать на основе арифметического кодирования.

Комбинирование нейросетевых подходов к сжатию изображений с потерями и последующего нейросетевого сжатия без потерь позволяет для заданной степени сжатия получить сопоставимую с JPEG2000 среднеквадратическую величину искажений, но при этом обеспечить их большую «естественность» для человека по критерию (1.1) [178–181].

Несмотря на перспективность технологий искусственного интеллекта, высокие требования к производительности и объему памяти вычислительных средств, предъявляемые известными нейросетевыми алгоритмами сжатия изображений, не позволяют их применять на борту оптико-электронных КА ДЗЗ.

1.2.2 Анализ алгоритмов и технологий бортового сжатия целевой информации в радиолокационных космических системах ДЗЗ. Рассмотренные выше алгоритмы сжатия изображений к радиоголограммам не применимы, поскольку последние содержат широкополосный сигнал со значительной высокочастотной составляющей и высокой энтропией. Сжатие радиоголограмм основано на квантовании действительной и мнимой составляющих отсчетов комплексного сигнала.

Квантование отсчетов может быть неадаптивным и блочно-адаптивным. В первых радиолокационных КА ДЗЗ применялось неадаптивное квантование, когда каждая из квадратурных составляющих комплексного отсчета единообразно кодировалась 2–4 битами. При этом как таковая бортовая обработка могла не выпол-

няться, а просто снижалась разрядность аналого-цифрового преобразователя принимающего радиолокатором сигнала.

Неадаптивное квантование отличается наиболее высокими искажениями сжимаемой радиоголограммы. В наибольшей степени они проявляются при съемке радиометрически неоднородных участков земной поверхности, содержащих и яркие, и темные объекты большой площади. В этом случае сигнал от темных объектов может попросту обнулиться. Данная проблема решается применением блочно-адаптивного квантования (БАК). В рамках каждого блока сигнал сначала нормализуется, коэффициенты нормализации записываются в выходной поток, а затем выполняется квантование нормализованного сигнала. БАК применяется для сжатия целевой информации в большинстве радиолокационных космических систем, запущенных в мире, начиная со второй половины 80-х гг. прошлого века [185].

Известны различные варианты БАК: независимое квантование действительной и мнимой квадратурных составляющих; представление комплексного сигнала в показательной форме и отдельное квантование амплитуды и фазы; представление сигнала в виде вектора на комплексной плоскости и последующее векторное квантование; применение двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) к сигналу в блоке с последующим квантованием отсчетов спектра [186–189].

Наибольшее распространение и применение в космических системах получил первый вариант БАК как разумный компромисс между качеством сжатия и вычислительной эффективностью. В соответствии с центральной предельной теоремой действительный сигнал каждой из квадратурных составляющих комплексного сигнала имеет нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием [190]. Нормализация сигнала в данном варианте БАК заключается в его делении на полученную в пределах блока оценку среднеквадратического отклонения (СКО). Нормализованный сигнал в теории должен иметь стандартное нормальное распределение. Реальное распределение может несколько отклоняться от теоретического из-за достаточно небольших размеров блока, но квантователи обычно строятся исходя из теоретической оценки распределения.

Рассмотрим процесс квантования сигнала x квадратурной составляющей, нормализованного в пределах блока. Для квантования числовая ось делится на N_{yp} частей с помощью пороговых значений t_k , где $k=0, N_{yp}$, $t_0=-\infty$, $t_{N_{yp}}=\infty$ и $t_k < t_{k+1}$. Значению сигнала x при бортовом сжатии ставится в соответствие k -й уровень квантования, если $t_k < x \leq t_{k+1}$. При наземной распаковке сжатой радиоголограммы k -му уровню квантования ставится в соответствие значение \bar{x}_k . Обычно это математическое ожидание исходных значений x , которым сопоставлен соответствующий уровень квантования:

$$\bar{x}_k = \frac{\int_{t_k}^{t_{k+1}} x \exp(-x^2/2) dx}{\int_{t_k}^{t_{k+1}} \exp(-x^2/2) dx}. \quad (1.2)$$

Средний квадрат ошибки квантования равен:

$$D_{\text{кв}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=0}^{N_{yp}-1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (x - \bar{x}_k)^2 \exp(-x^2/2) dx. \quad (1.3)$$

В классическом варианте БАК применяется квантователь Ллойда–Макса, в котором пороговые значения t_k выбираются так, чтобы минимизировать (1.3). При этом N_{yp} выбирается равным степени двойки, что позволяет закодировать один отсчет квантованного сигнала $\log_2 N_{yp}$ битами.

Однако вероятности, что значение исходного сигнала будет отнесено к соответствующему уровню квантования, могут отличаться для разных уровней. Вероятность для k -го уровня вычисляется как

$$P_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \exp(-x^2/2) dx. \quad (1.4)$$

Энтропия квантованного сигнала может быть выражена через P_k как

$$H_{\text{кв}} = - \sum_{k=0}^{N_{yp}-1} P_k \log_2 P_k. \quad (1.5)$$

Обычно значение энтропии (1.5) оказывается меньше, чем $\log_2 N_{yp}$, что потенциально позволяет дополнительно сжать адаптивно квантованную радиограмму с помощью энтропийного кодирования, что было реализовано в алгоритме FDBAQ, разработанном для радиолокационной космической системы ДЗЗ «Sentinel-1» и использующем кодирование по Хаффману [191].

Из (1.3), (1.4) и (1.5) видно, что и средний квадрат ошибки квантования, и энтропия квантованного сигнала зависят от выбранных пороговых значений t_k . Поэтому в случае применения дополнительного энтропийного кодирования квантователь Ллойда–Макса перестает быть оптимальным: минимизируя $D_{\kappa\sigma}$, он увеличивает $H_{\kappa\sigma}$. Таким образом, необходима оптимизация интегрального показателя, зависящего и от $D_{\kappa\sigma}$, и от $H_{\kappa\sigma}$.

Для построения квантователя Ллойда–Макса, заключающегося в нахождении значений t_k , имеются вычислительно эффективные алгоритмы, но они перестают работать при изменении критерия оптимизации. В общем случае задача подбора оптимальных пороговых значений t_k для квантователя требует большого объема вычислений, особенно для больших значений N_{yp} . Поэтому в алгоритме FDBAQ сократили число степеней свободы при решении оптимизационной задачи, выбрав квантование с постоянным шагом $\Delta t = t_{k+1} - t_k = const$, $k = \overline{1, N_{yp} - 2}$. Оптимизируемым показателем в FDBAQ выбрано отношение сигнал-шум квантования $Q = -10 \lg D_{\kappa\sigma}$, нормированное средней длиной кода Хаффмана $L_{Xa\phi} \approx H_{\kappa\sigma}$. Таким образом, построение квантователя для выбранного числа уровней квантования N_{yp} сводится к нахождению $\Delta t = \text{argmax} \frac{-10 \lg D_{\kappa\sigma}(\Delta t)}{L_{Xa\phi}(\Delta t)}$.

Строится несколько квантователей для различных значений N_{yp} . Конкретный квантователь выбирается на борту КА в зависимости от уровня принятого сигнала по отношению к априорно известному уровню теплового шума.

Очевидно, что отказ от сокращения числа степеней свободы при оптимизации и построение квантователя с переменным шагом между соседними пороговыми значениями способны дополнительно уменьшить потери для заданной степени

сжатия. Однако этот вопрос в литературе не исследован. Кроме того, в известных процедурах построения квантователя не учитывается тот факт, что отношение сигнал-шум повышается в ходе синтеза радиолокационного изображения из радиоголограммы. Причем величина этого повышения зависит от параметров режима съемки, в частности, длины синтезированной апертуры антенны. Для режимов съемки, в которых отношение сигнал-шум при наземной обработке повышается значительно, в оптимизируемом интегральном показателе можно отдать предпочтение уменьшению энтропии за счет контролируемого увеличения потерь. Для широкозахватных режимов, в которых длина синтезируемой апертуры сокращается пропорционально расширению полосы съемки, целесообразно, наоборот, минимизировать потери, жертвуя значением энтропии. Эта проблема также не исследована.

1.2.3 Анализ алгоритмов и технологий формирования изображений из радиоголограмм при первичной наземной обработке информации в космических системах ДЗЗ. Радиоголограмма, переданная с борта КА, подлежит наземной обработке с целью синтеза из нее радиолокационного изображения.

Перед анализом алгоритмов и технологий синтеза изображения рассмотрим процесс формирования радиоголограммы целевой аппаратурой КА ДЗЗ. В процессе орбитального движения радиолокатор выполняет боковой обзор: периодически излучает вбок и вниз радиоимпульсы, а между излучениями принимает эхо-сигналы, записываемые в виде комплексных отсчетов в отдельную строку радиоголограммы [140]. Каждый эхо-сигнал занимает десятки тысяч отсчетов. Начальная позиция эхо-сигнала в строке радиоголограммы определяется промежутком времени τ между началом излучения радиоимпульса и началом приема эхо-сигнала. Величину τ принято называть быстрым временем. Время η начала излучения радиоимпульса, которому соответствуют эхо-сигналы, записываемые в строку радиоголограммы, принято называть медленным или азимутальным временем. Таким образом, абсолютное время приема отсчета эхо-сигнала является суперпозицией величин η и τ , однозначно связанных с номерами строки и столбца радиоголограммы, в которые помещается принятый отсчет.

Величина быстрого времени τ позволяет рассчитать так называемую измеренную наклонную дальность $R = c\tau/2$ в предположении, что сигнал распространяется по прямой линии со скоростью c света в вакууме. В реальности удаленность объекта оказывается несколько ниже из-за замедления и искривления траектории распространения радиосигнала в нижних слоях земной атмосферы. Разница между измеренной и истинной дальностью называется атмосферной задержкой ΔR_{atm} , величина которой зависит от погодных условий, высоты наблюдаемого объекта и угла съемки.

Разрешение радиолокатора по дальности ограничено длительностью излучаемых радиоимпульсов. Чтобы обойти это ограничение, применяют модуляцию импульсов и последующее их сжатие по дальности. В этом случае разрешение радиолокатора по дальности повышается до длительности сжатого импульса. Наиболее распространена линейная частотная модуляция (ЛЧМ), отличающаяся компактной автокорреляционной функцией в виде кардинального синуса

$$\text{sinc } x = \begin{cases} 1, & x=0, \\ \frac{\sin \pi x}{\pi x}, & x \neq 0. \end{cases}$$

Также может применяться фазокодовая манипуляция (ФКМ). Частота дискретизации принимаемых сигналов $f_{\text{дискр}}$ выбирается так, чтобы с запасом в 10–20 % было выполнено условие теоремы Котельникова. Диапазон значений τ , в течение которого ведется прием, рассчитывается на борту КА ДЗЗ с учетом измерительной информации и ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) радиолокатора в угломестной плоскости.

Ширина ДНА в другом направлении – в азимутальной плоскости – определяет разрешение радиолокатора по азимуту, т.е. вдоль направления полета КА. Из-за большой высоты, на которой движутся КА ДЗЗ, диаметр пятна на земной поверхности, подсвечиваемого одним радиоимпульсом, составляет сотни метров или единицы километров. Это не позволяет выполнять детальную радиолокационную съемку без применения специальных мер.

Такой мерой является искусственный синтез апертуры антенны радиолокатора. Для этого повышается частота повторения радиоимпульсов. Пока КА пролетает на орбите расстояние, сопоставимое с диаметром подсвечиваемого пятна,

РСА успевает излучить несколько тысяч радиоимпульсов, эхо-сигналы от которых записываются в соседние строки радиоголограммы. За счет движения КА ДЗЗ относительно объектов на земной поверхности возникает эффект Доплера, благодаря которому средняя частота соседних эхо-сигналов от одного и того же объекта несколько отличается. По данному сдвигу частоты (доплеровскому сдвигу) становится возможным отделить друг от друга эхо-сигналы, отраженные объектами, размещенными в разных частях подсвечиваемого пятна, и многократно повысить разрешение по азимуту.

Таким образом, импульсный отклик РСА представляет собой совокупность нескольких тысяч эхо-сигналов, смещенных по частоте и записанных в строки радиоголограммы на немного разные позиции τ из-за изменения наклонной дальности наблюдаемого объекта при полете КА ДЗЗ – миграции по каналам дальности. В случае применения ЛЧМ-импульсов импульсный отклик РСА имеет вид, представленный на рисунке 1.5.

Аналитически импульсный отклик РСА можно описать выражением:

$$s_u(m, n) = C_u w_\tau \left(\tau_n - \frac{2 R(\eta_m + \tau_n)}{c} \right) w_\eta(\eta_m + \tau_n - t_u) \times \\ \times \exp \left(j\pi K_\tau \left(\tau_n - \frac{2 R(\eta_m + \tau_n)}{c} \right)^2 \right) \exp \left(-j \cdot 2 \pi f_0 \frac{2 R(\eta_m + \tau_n)}{c} \right), \quad (1.6)$$

где C_u – комплексная константа, зависящая от ЭПР наблюдаемого объекта, мощности передатчика и чувствительности приемника; $w_\tau(\tau)$ – огибающая излученного ЛЧМ-импульса; $w_\eta(t)$ – огибающая сигнала в направлении азимута, равная квадрату ДНА РСА (поскольку направленность антенны действует и при излучении, и при приеме); t_u – момент времени, когда антenna направлена строго на наблюдаемый объект; K_τ – скорость изменения частоты излученных ЛЧМ-импульсов; f_0 – несущая (рабочая) частота радиоимпульсов, m, n – номера строки и столбца радиоголограммы, τ_n и η_m – быстрое и медленное времена, соответствующие mn -му пикселю, j – мнимая единица.

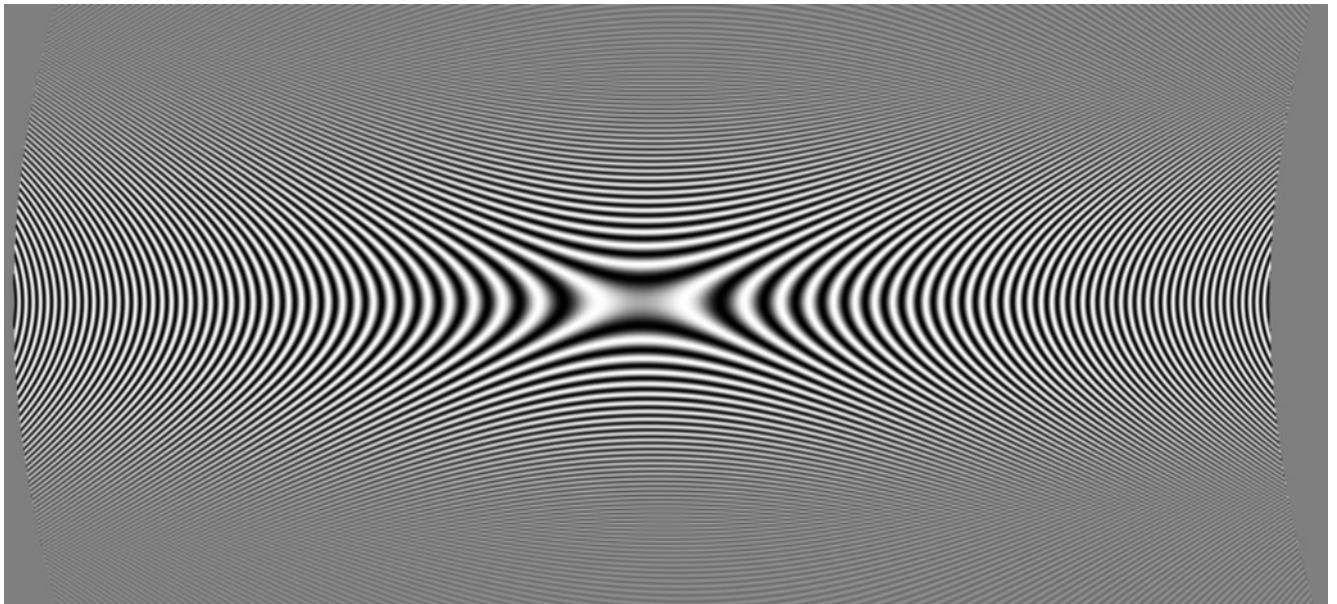


Рисунок 1.5 – Импульсный отклик РСА (действительная квадратурная составляющая комплексного сигнала)

Сигнал радиоголограммы представляет собой суперпозицию импульсных откликов на множество наблюдаемых объектов (рисунок 1.6) в сочетании с искажениями, возникающими в приемопередающем тракте радиолокатора и при рассмотренном выше бортовом сжатии с потерями.

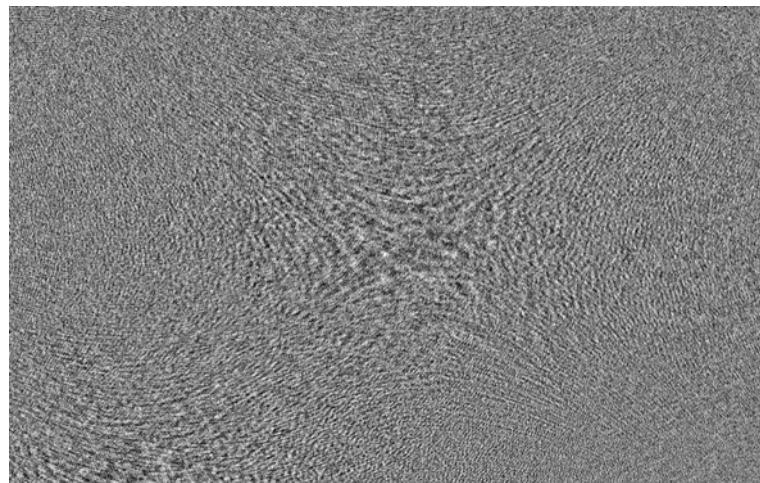


Рисунок 1.6 – Пример сигнала радиоголограммы (действительная квадратурная составляющая)

Процесс синтеза высокодетального изображения из радиоголограммы называется фокусировкой и включает три основных этапа: сжатие по дальности, устра-

нение миграции по каналам дальности и сжатие по азимуту. Известно множество алгоритмов фокусировки, отличающихся способами устранения миграции по каналам дальности и сжатия по азимуту: Range Doppler [192–195], Chirp Scaling [196–199], SPECAN [200, 201], Extended Chirp Scaling [202–204], Range Migration [205, 206]. В перечисленных алгоритмах для устранения миграции по каналам дальности используются следующие способы: передискретизация сигнала радиоголограммы, представленного во временной области по дальности и в частотной области по азимуту; линейное частотное масштабирование; преобразование Столта [207]. Сжатие по азимуту выполняется либо путем согласованной фильтрации, либо путем гармонического анализа.

При синтезе радиолокационного изображения геометрический центр результата сжатия импульсного отклика (1.6) переносится в пиксель, соответствующий дальности на траверзе $R_{\perp} = \min R(t)$ и времени максимального сближения РСА с наблюдаемым объектом $t_{\perp} = \operatorname{argmin} R(t)$. Этот процесс выполняется автоматически в ходе фильтрации сигнала на основе выявления его нулевой доплеровской частоты. Таким образом, система координат радиолокационного изображения изменяется по отношению к радиоголограмме с (η, τ) на (t_{\perp}, R_{\perp}) .

Сжатый импульсный отклик РСА имеет форму двумерной sinc-функции и аналитически описывается выражением [140]:

$$\begin{aligned} s_{u \text{ cж}}(m, n) = & C_u A_{\phi \text{ ок}} \operatorname{sinc}\left(K_{\tau} T\left(\tau - \frac{2R_{\perp n}}{c}\right)\right) \operatorname{sinc}(f_{umn}(t - t_{\perp m})) \times \\ & \times \exp(j \cdot 2\pi f_{\phi u}(t - t_{\perp m})) \exp\left(-j \cdot 2\pi f_0 \frac{2R_{\perp n}}{c}\right), \end{aligned} \quad (1.7)$$

где $A_{\phi \text{ ок}}$ – коэффициент усиления амплитуды сигнала при фокусировке, T – длительность радиоимпульса, f_{umn} – частота повторения радиоимпульсов, $f_{\phi u}$ – доплеровский центроид (средний доплеровский сдвиг частоты).

Sinc-функция имеет острый основной лепесток, от которого расходятся в разные стороны боковые лепестки меньшей интенсивности. Для снижения уровня

боковых лепестков применяют аподизацию спектра сигнала в ходе фокусировки радиоголограммы, при этом незначительно расширяется основной лепесток.

Рассмотренная технология формирования радиоголограммы и синтеза из нее изображения применяется в маршрутном (полосовом) режиме съемки, который является основным для космических радиолокаторов. При этом обеспечивается пространственное разрешение порядка 2–5 м при ширине полосы съемки в несколько десятков километров и длине радиоголограммы, ограниченной только объемом бортовой памяти КА и запасом электроэнергии для проведения съемки.

Для достижения метрового и субметрового разрешения применяется съемка коротких кадров в прожекторном режиме, когда КА ДЗЗ перенацеливает антенну радиолокатора на центр наблюдаемого участка. При этом увеличивается длина синтезированной апертуры, но возникает нарушение теоремы Котельникова при дискретизации эхо-сигналов со значительными доплеровскими сдвигами частоты. В связи с этим синтез изображения из радиоголограммы ведется по субапертурам, в пределах каждой из которых ширина полосы доплеровских частот не превышает частоту повторения импульсов.

При необходимости увеличения ширины полосы съемки ценой снижения пространственного разрешения применяется широкозахватный режим, в котором съемка ведется поочередно несколькими лучами с различными отклонениями от надира. Для каждого луча формируется разрывная радиоголограмма. Разрывы соответствуют интервалам времени, когда радиолокатор переключается на съемку другими лучами, и приводят к сокращению длины синтезированной апертуры со снижением азимутального разрешения. Изображения, синтезированные из каждой радиоголограммы, «сшиваются» в единый растр, причем «сшивка» ведется на основе значений R_{\perp} и t_{\perp} . Учет угловой ориентации КА ДЗЗ при этом не требуется.

При съемке с несколькими поляризациями сигнала одновременно формируется от двух до четырех радиоголограмм. Обычно это достигается одновременным приемом сразу двух поляризаций и поочередным излучением импульсов то с горизонтальной, то с вертикальной поляризацией. Поэтому, если два изображения име-

ют общую поляризацию сигнала при излучении, то они автоматически синтезируются геометрически совмещенными. В противном случае между ними наблюдается рассогласование на половину пикселя вдоль столбца, которое легко может быть устранено путем субпиксельного сдвига одного из изображений.

1.2.4 Анализ влияния погрешностей измерительной информации на качество формирования изображений из радиоголограмм при первичной наземной обработке информации в космических системах ДЗЗ. Математические модели устранения миграции по каналам дальности и сжатия по азимуту в ходе синтеза изображения из радиоголограммы имеют параметры, значение которых зависит от орбитального движения КА ДЗЗ и угловой ориентации антенны радиолокатора. В первую очередь это доплеровский центроид $f_{\text{дц}}$ и производная доплеровского сдвига частоты по времени – доплеровская скорость K_η .

Погрешности знания орбитального движения влияют в первую очередь на значение доплеровской скорости и приводят к расфокусировке синтезированного изображения преимущественно в азимутальном направлении. Для борьбы с такими погрешностями разработаны различные алгоритмы автофокусировки радиоголограмм, уточняющие закон временного изменения доплеровских сдвигов частоты путем анализа радиоголограммы или синтезированного из нее изображения [140, 208]. При этом уточнение может выполняться итерационно, когда с каждой итерацией синтезируется все более качественное изображение, по которому можно точнее оценить имеющиеся погрешности синтеза. Наиболее сложные алгоритмы разработаны для авиационных систем, траектория движения которых искривляется из-за воздействия воздушных масс. Для КА ДЗЗ, движущихся практически в вакуме, траектория может быть описана малопараметрической моделью, что упрощает алгоритмы автофокусировки.

Погрешности знания угловой ориентации влияют в первую очередь на значение доплеровского центроида $f_{\text{дц}}$, которое может быть представлено в виде комбинации относительного значения $f_{\text{дц отн}} \in [-f_{\text{имн}}/2, f_{\text{имн}}/2]$ и доплеровской неопределенности (неоднозначности) $M_{\text{дц}} \in \mathbb{Z}$, где \mathbb{Z} – множество целых чисел:

$$f_{\text{дц}} = f_{\text{дц отн}} + M_{\text{дц}} f_{\text{имн}}. \quad (1.8)$$

Ошибки в значении $M_{\text{дц}}$ приводят к расфокусировке и сдвигу сигнала на синтезированном радиолокационном изображении. Сжатый импульсный отклик регистрируется не в точке (t_{\perp}, R_{\perp}) , а в точке $(t_{\perp} - \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имн}} / K_{\eta}, R(t_{\perp} - \Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имн}} / K_{\eta}))$, где $\Delta M_{\text{дц}}$ – целочисленная погрешность знания $M_{\text{дц}}$, поскольку переносится не на нулевую частоту, а на неотличимую от нее в цифровом сигнале частоту $\Delta M_{\text{дц}} f_{\text{имн}}$. В пересчете на земную поверхность этот сдвиг составляет несколько километров при $\Delta M_{\text{дц}} = 1$.

При погрешности знания $f_{\text{дц отн}}$ наблюдается двоение сигнала на синтезированном изображении. Сдвиг по времени между копиями сигнала составляет $f_{\text{имн}} / K_{\eta}$. Соотношение амплитуд двух копий сигнала определяется величиной погрешности $f_{\text{дц отн}}$. Двоение обусловлено тем, что часть полосы доплеровских частот обрабатывается в одной зоне доплеровской неопределенности, а другая часть – в соседней, ошибочной зоне. Описанный эффект существенно снижает радиометрическое качество изображения.

Значения $f_{\text{дц отн}}$ и $M_{\text{дц}}$ при неточном знании угловой ориентации могут быть скорректированы по результатам анализа радиоголограммы или синтезированного из нее изображения.

Известно несколько методов оценивания относительного значения доплеровского центроида по сигналу радиоголограммы. В амплитудном методе [140, 209] выполняется анализ усредненного амплитудного азимутального спектра фрагмента радиоголограммы и находится точка его максимума. В фазовом методе [140, 210] оценивается средний набег фазы комплексного сигнала вдоль столбца в пределах фрагмента радиоголограммы. Основным недостатком обоих методов является снижение точности получаемых оценок, когда в анализируемый фрагмент входит только часть импульсного отклика на сверхъяркий объект. Из-за пространственной протяженности импульсных откликов на радиоголограмме (в пределах нескольких тысяч пикселей по каждому измерению) такие случаи встречаются часто, а выявление их затруднено.

Для устранения негативного влияния пространственно протяженных импульсных откликов оценка относительного значения доплеровского центроида может выполняться по сигналу не радиоголограммы, а синтезированного из нее изображения, на котором импульсные отклики становятся компактными. При этом могут применяться те же самые методы, что и для радиоголограммы [211].

Для оценивания $M_{\text{дп}}$ также применяются два основных метода: фазовый анализ радиоголограммы и амплитудный анализ изображений, синтезированных по двум субапертурам.

В рамках фазового метода известно несколько алгоритмов [140, 212, 213], использующих зависимость абсолютного значения доплеровского центроида $f_{\text{дп}}$ от несущей частоты зондирующих импульсов f_0 . Для этого широкополосный эхо-сигнал с ЛЧМ разделяется на несколько узкополосных, из каждого из которых получается своя радиоголограмма со смещенной несущей частотой. Для каждой радиоголограммы с помощью фазового метода оценивается относительное значение доплеровского центроида, а вариация значений оценок, полученных для различных смещенных по несущей частоте радиоголограмм, пересчитывается в доплеровскую неопределенность. У фазового метода имеются два недостатка. Во-первых, он требует частотной модуляции зондирующих импульсов, а в случае ФКМ не может быть применен. Во-вторых, погрешности оценивания относительных значений доплеровского центроида, вызванные протяженностью импульсных откликов, приводят к искажению получаемых оценок доплеровской неопределенности.

В рамках амплитудного метода [214] полная апертура (полоса доплеровских частот) разбивается на две неперекрывающиеся субапертуры, по каждой из которых синтезируется радиолокационное изображение со сниженным азимутальным пространственным разрешением. В основу определения доплеровской неопределенности положена зависимость величины миграции по каналам дальности от доплеровского сдвига f_η , приближенно описываемая выражением:

$$\Delta R(f) \approx \frac{c^2 R_\perp f_\eta^2}{8 f_0^2 V_{\text{лз}}^2}, \quad (1.9)$$

где $V_{\text{лэ}}$ – линейная эквивалентная скорость – параметр аппроксимации реального движения радиолокатора относительно наблюдаемых объектов прямолинейным равномерным движением.

Если при синтезе изображений использовалось правильное значение доплеровского центроида, то в обеих субапертурах миграция дальности полностью устраняется, а геометрические рассогласования между двумя изображениями отсутствуют. Если же при синтезе изображений использовалось неправильное значение доплеровской неопределенности, то в одной из субапертур миграция дальности устраняется недостаточно, а в другой – избыточно. Из-за этого возникает горизонтальное смещение двух изображений на Δn пикселей, тем большее, чем больше ошибка в доплеровской неопределенности. Путем корреляционно-экстремального совмещения изображений это смещение может быть найдено и пересчитано в поправку к доплеровской неопределенности:

$$\Delta M_{\text{дц}} = \left[\frac{4 f_0^2 V_{\text{лэ}}^2 \Delta n}{f_{\text{имп}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} \right], \quad (1.10)$$

где $[x]$ – округление до ближайшего целого.

Основное достоинство данного метода – в отсутствие изначальной ошибки в значении доплеровского центроида изображения, синтезированные по субапертурам, получаются качественными, достаточно легко коррелируются друг с другом в случае радиометрически неоднородного сюжета и позволяют правильно получить оклонулевые поправки. При большой изначальной ошибке из-за деградации качества синтезированных изображений точность получаемых поправок снижается, но имеется возможность итерационного уточнения доплеровской неопределенности, позволяющая после выполнения нескольких итераций прийти к достаточно точным значениям. Недостатком метода является достаточно грубая математическая модель пересчета геометрических рассогласований изображений в поправку к доплеровской неопределенности, не учитывающая погрешность знания $f_{\text{дц отн}}$, неизбежно возникающую одновременно с ошибкой $M_{\text{дц}}$. Из-за этого для получения точных значений требуется выполнить значительное количество итераций алгоритма, а в

отдельных случаях, когда погрешность $f_{\text{дл отн}}$ приближается к $f_{\text{имп}}/2$, оценивание доплеровской неопределенности данным методом становится невозможным.

В то же время вопросы одновременного уточнения и $f_{\text{дл отн}}$, и $M_{\text{дл}}$ путем амплитудного анализа синтезированных изображений, которое бы позволило устранить недостаток рассмотренного выше метода, не исследованы.

1.2.5 Анализ влияния погрешностей измерительной информации на точность радиометрической коррекции радиолокационных изображений. Радиометрическая коррекция изображения, синтезированного из радиоголограммы, является завершающим этапом первичной наземной обработки информации в радиолокационных системах ДЗЗ. Цель радиометрической коррекции – устранение вариаций коэффициента пропорциональности удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) квадрату амплитуды сигнала в различных пикселях радиолокационного изображения [215, 216].

В маршрутном (полосовом) режиме съемки радиометрическая коррекция заключается в устранении неоднородности подсветки полосы съемки, обусловленной угломестной ДНА, а также затухания радиолокационного сигнала с увеличением наклонной дальности. В широкозахватном и прожекторном режимах необходима еще и компенсация азимутальной ДНА. В зависимости от вида УЭПР могут также учитываться вариации углов падения зондирующих радиоимпульсов на земную поверхность. Для УЭПР бета-ноль, нормируемой площадью проекции объекта на плоскость, проходящую через векторы визирования и скорости движения космического аппарата, учет вариации углов падения не требуется. Для УЭПР сигма-ноль, нормируемой площадью поверхности объекта, и для УЭПР гамма-ноль, нормируемой площадью поперечного сечения объекта, такой учет необходим.

Для расчета угла места – угла отклонения направления визирования от центральной оси антенны в вертикальной плоскости – требуется знание угловой ориентации космического аппарата, в первую очередь, угла крена. Погрешности знания угла крена приводят к паразитному плавному возрастанию или убыванию амплитуды сигнала вдоль строки радиометрически скорректированного радиолока-

ционного изображения. В результате объекты, расположенные ближе к левому краю изображения, оказываются несколько светлее (темнее) необходимого, а объекты у правого края наоборот. За счет плавного характера угломестной ДНА сверхвысокая точность знания угловой ориентации при радиометрической коррекции не требуется. Существенные искажения возникают лишь тогда, когда ошибки знания угла крена начинают превышать единицы угловых минут. Измерительная аппаратура на современных КА ДЗЗ обычно обеспечивает более высокую точность. Однако для отечественных КА ДЗЗ в условиях импортозамещения возможны отдельные ситуации, когда необходимая точность не обеспечивается.

Рассмотрим более подробно механизм измерения угловой ориентации на КА ДЗЗ. Для решения этой задачи на КА устанавливается два вида приборов: блоки определения координат звезд (БОКЗ) и датчики угловых скоростей (ДУС) [217]. БОКЗ представляют собой оптико-электронные приборы, выполняющие съемку звездного неба, детектирование звезд на полученных снимках и сопоставление их положения на снимке с данными звездного каталога. Результаты сопоставления дают оценку углов ориентации КА. При этом по различным ортогональным осям точность оценки получается разной. Для получения высокоточной оценки по всем осям на КА устанавливают несколько БОКЗ и размещают их под разными углами. Данные БОКЗ дополняются показаниями ДУС, которые с большей частотой дают измерения производной угловой ориентации по времени, однако для них характерна проблема смещения нуля, из-за которой интегрирование показаний ДУС приводит к постепенному возрастанию ошибки оценивания угловой ориентации. Когда присутствуют измерения от всех приборов, смещение нуля ДУС можно скорректировать по показаниям БОКЗ.

Однако периодически возникают ситуации, когда отдельные БОКЗ оказываются засвеченены Солнцем и временно не могут выполнять измерения либо когда они выходят из строя. В отсутствие измерений БОКЗ смещение нуля ДУС скорректировать не удается и возникает плавно возрастающая систематическая ошибка знания угловой ориентации. За рубежом за счет более высокого качества бортовой аппаратуры и многочисленности спутниковой группировки такие ситуации

возникают редко и не столь критичны: можно не обрабатывать данные, полученные при сбое аппаратуры, а выполнить съемку другим КА. В России же в условиях импортозамещения сбои возникают чаще, а малочисленность спутниковой группировки не позволяет игнорировать сбойные данные.

Как было рассмотрено выше, в ходе синтеза изображения из радиоголограммы может быть уточнено значение доплеровского центроида $f_{\partial u}$, зависящее от угловой ориентации. Однако на него влияют, в первую очередь, углы рысканья и тангажа. Поэтому для обеспечения высокого качества радиометрической коррекции радиолокационного изображения в условиях сбоев измерительной аппаратуры необходимо уточнение угла крена на основе анализа вариаций амплитуды сигнала по полю изображения при известной форме угломестной ДНА. Данный вопрос в литературе мало исследован. Имеются лишь простые алгоритмы поиска максимума ДНА по амплитуде изображения, обеспечивающие низкую точность при наблюдении радиометрически неоднородных участков земной поверхности, и алгоритмы, пригодные только для широкозахватных режимов, на основе сопоставления амплитуд сигналов в области перекрытия соседних парциальных полос съемки [218].

1.2.6 Анализ моделей геодезической привязки радиолокационных изображений в космических системах ДЗЗ. Задача определения координат объекта по его положению (m, n) на изображении от РСА имеет бесконечное множество решений. Неопределенность может быть устранена, если известна геодезическая высота h_u объекта на поверхности Земли. В этом случае его координаты (x_u, y_u, z_u) в Гринвичской системе могут быть найдены путем решения системы уравнений [36]:

$$\begin{cases} (x_u - x_p(t_{\perp m}))V_{px}(t_{\perp m}) + (y_u - y_p(t_{\perp m}))V_{py}(t_{\perp m}) + \\ \quad + (z_u - z_p(t_{\perp m}))V_{pz}(t_{\perp m}) = 0, \\ E(a_3, b_3, h_u, x_u, y_u, z_u) = 0, \\ (x_u - x_p(t_{\perp m}))^2 + (y_u - y_p(t_{\perp m}))^2 + (z_u - z_p(t_{\perp m}))^2 = (R_{\perp n} - \Delta R_{amm}(h_u))^2, \end{cases} \quad (1.11)$$

где $\mathbf{r}_p(t_{\perp m}) = (x_p(t_{\perp m}), y_p(t_{\perp m}), z_p(t_{\perp m}))^T$ и $\mathbf{V}_p(t_{\perp m}) = (V_{px}(t_{\perp m}), V_{py}(t_{\perp m}), V_{pz}(t_{\perp m}))^T$ – радиус-вектор фазового центра антенны и вектор скорости КА ДЗЗ в момент времени $t_{\perp m}$, $E(a_3, b_3, h_u, x_u, y_u, z_u) = 0$ – уравнение поверхности, расположенной на высоте h_u над земным эллипсоидом с большой полуосью a_3 и малой полуосью b_3 .

Поверхность $E(a_3, b_3, h_u, x_u, y_u, z_u) = 0$ может быть выражена параметрически через геодезические широту и долготу объекта B_u и L_u :

$$\begin{cases} x_u = \left(\frac{a_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \cos B_u \cos L_u, \\ y_u = \left(\frac{a_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \cos B_u \sin L_u, \\ z_u = \left(\frac{b_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \sin B_u. \end{cases} \quad (1.12)$$

Также поверхность $E(a_3, b_3, h_u, x_u, y_u, z_u) = 0$ с погрешностью менее сантиметра можно аппроксимировать эллипсоидом с увеличенными на h_u полуосями:

$$\frac{x_u^2 + y_u^2}{(a_3 + h_u)^2} + \frac{z_u^2}{(b_3 + h_u)^2} = 1. \quad (1.13)$$

Значение атмосферной задержки $\Delta R_{atm}(h_u)$ можно приближенно оценить с использованием модели Саастамойнена [219], в которую могут быть подставлены значения атмосферного давления, температуры и влажности воздуха на основе метеоданных или типовые для земной поверхности или наблюдаемого региона. Погрешность такой оценки будет менее дециметра при использовании метеоданных и порядка нескольких дециметров при использовании типовых значений.

Результат решения (1.11) может быть пересчитан в геодезические широту и долготу путем обращения (1.12). С помощью проективных преобразований геодезические координаты (B_u, L_u, h_u) могут быть преобразованы в картографические (E_u, N_u) .

Угловая ориентация КА ДЗЗ влияет на геодезическую привязку синтезированного изображения от РСА только в части расчета положения фазового центра антенны по данным о положении центра масс КА ДЗЗ и размещении антенны на КА ДЗЗ:

$$\mathbf{r}_p(t_{\perp m}) = \mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m}) + \mathbf{M}_{KA}(t_{\perp m}) \Delta \mathbf{r}_p, \quad (1.14)$$

где $\mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$ – радиус-вектор центра масс КА ДЗЗ по данным измерительной аппаратуры, $\mathbf{M}_{KA}(t_{\perp m})$ – матрица поворота, определяемая угловой ориентацией КА, $\Delta \mathbf{r}_p$ – смещение фазового центра антенны относительно центра масс в системе координат, связанной с КА. Ввиду малости $\Delta \mathbf{r}_p$ высокая точность знания угловой ориентации здесь не требуется. В ряде случаев можно считать $\mathbf{r}_p(t_{\perp m}) \approx \mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$.

Основными источниками ошибок привязки радиолокационных изображений выступают погрешности h_u , ошибки навигационных данных $\mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$ и систематические сдвиги шкал $R_{\perp n}$ и $t_{\perp m}$.

Влияние погрешностей h_u было рассмотрено при сравнении оптико-электронных и радиолокационных систем. Систематические ошибки $\mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$ без усиления переходят в ошибки привязки. Если оценка орбиты КА не только сдвинута, но и повернута относительно истинной орбиты, возникает дополнительная составляющая ошибки привязки, связанная с погрешностью направления вектора скорости $\mathbf{V}_p(t_{\perp m})$. Систематические сдвиги шкал $R_{\perp n}$ и $t_{\perp m}$ могут быть вызваны некачественным синтезом изображения из радиоголограммы, при котором бралось в расчет неточное значение доплеровского центроида f_{du} ; неучтенными задержками сигнала в приемопередающем тракте радиолокатора; рассинхронизацией временных шкал отдельных приборов на борту КА.

В зарубежных радиолокационных космических системах ДЗЗ обычно применяются высококачественные навигационные приемники, регистрирующие сигнал от различных спутниковых навигационных систем, привлекаются апостериорные данные от наземного сегмента навигационных систем, а также выполняется тщательная калибровка всех измерений, практически полностью исключающая систем-

матические сдвиги. Это позволяет добиться метровой и субметровой точности привязки изображений на наличии точных данных о высоте. В России в настоящее время доступна только отечественная навигационная система ГЛОНАСС, что ограничивает число навигационных спутников, сигнал которых может зарегистрировать КА ДЗЗ. Это негативно отражается на точности измерения $\mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$. Возможны сбойные ситуации, когда погрешности $\mathbf{r}_{KA}(t_{\perp m})$ начинают составлять десятки метров. При этом малое число зарегистрированных сигналов может не позволить применить методы улучшения навигационных измерений на основе привлечения априорной информации об эфемеридах навигационных спутников и состоянии земной атмосферы [220]. Также в условиях импортозамещения из-за ухудшения характеристик бортовой аппаратуры могут быть не полностью устраниены в ходе калибровок сдвиги и рассинхронизация временных шкал. Поэтому наряду со строгой моделью привязки изображений на основе измерительной информации актуальны технологии привязки по наземным ориентирам, которые должны применяться в случае недостаточной точности параметров строгой модели.

Привязка по наземным ориентирам может выполняться вручную, что снижает оперативность получения стандартных продуктов космической системы ДЗЗ и требует большого штата операторов на наземных пунктах обработки информации. Для автоматизации этой задачи применяется привязка на основе совмещения обрабатываемого изображения с высокоточно привязанным опорным спутниковым снимком, который может быть сформирован другой, более точной системой ДЗЗ либо этим же КА, но в отсутствие сбоев. Технологии такой привязки разработаны для оптико-электронных систем ДЗЗ [221–223].

Поскольку отечественная радиолокационная группировка находится только в начале своего формирования, в настоящее время в России отсутствует опорное растровое покрытие радиодиапазона. Имеется лишь видовое опорное покрытие, сформированное оптико-электронными системами. Поэтому актуальна задача привязки радиолокационных изображений на основе их совмещения с опорными оптическими снимками.

За рубежом ввиду более высокого качества бортовой аппаратуры и наличия радиолокационного покрытия такая задача остро не стоит. Радиолокационные и оптические изображения совмещают лишь при высокоуровневой или тематической обработках, которые выполняются не массово и обычно не требуют высокой оперативности. В принципе, задача автоматического совмещения радиолокационного и оптического изображений является сложной в силу существенной разнородности совмещаемой информации.

Существуют различные площадные меры нелинейного сходства, например, взаимная информация (MI) [224], а также точечные дескрипторы [225], используемые для совмещения радиолокационных и оптических изображений. Однако точность точечных дескрипторов ограничивается малым размером окрестности, в которой они вычисляются, а площадные меры типа MI характеризуются недопустимо большим объемом вычислений. При тематической обработке это не столь критично, но для формирования стандартных продуктов систем ДЗЗ необходимы высокоточные и вычислительно эффективные алгоритмы обработки. Проблема создания таких алгоритмов мало исследована в литературе.

1.2.7 Анализ моделей геометрических преобразований радиолокационных изображений в космических системах ДЗЗ. Формирование стандартных продуктов (геокодирование и ортотрансформирование) заключается в изменении системы координат, в которой представлено радиолокационное изображение, с (t_{\perp}, R_{\perp}) на (E_u, N_u) . Геометрическое преобразование обычно выполняется по обратному закону координатного соответствия. Картографические координаты (E_u, N_u) на выходном изображении стандартного продукта путем обращения правил проецирования пересчитываются в геодезические координаты (B_u, L_u) , которые в свою очередь дополняются высотой (некоторой средней высотой h_{cp} или высотой из опорной цифровой модели $h_{onop}(B_u, L_u)$) и пересчитываются в (t_{\perp}, R_{\perp}) .

Пересчет (B_u, L_u, h_u) , где $h_u = h_{cp}$ или $h_u = h_{onop}(B_u, L_u)$, в (t_{\perp}, R_{\perp}) осуществляется следующим образом. Тройка (B_u, L_u, h_u) пересчитывается в Гринвич-

скую систему координат (x_u, y_u, z_u) в соответствии с (1.12). Численно решается первое уравнение системы (1.11) относительно первой координаты t_{\perp} . Вторая координата R_{\perp} находится как расстояние между концом радиуса-вектора $\mathbf{r}_p(t_{\perp})$ и точкой (x_u, y_u, z_u), увеличенное на $\Delta R_{atm}(h_u)$. Путем обращения шкал $R_{\perp n}$ и $t_{\perp m}$ координаты (t_{\perp}, R_{\perp}) могут быть пересчитаны в положение пикселя (m, n) на исходном радиолокационном изображении.

Описанный процесс требует значительного объема вычислений, и его применение к каждому пикслю в ходе геометрического преобразования существенно увеличивает время обработки. В то же время закон координатного соответствия носит плавный характер, что потенциально позволяет аппроксимировать его вычислительно более простыми выражениями. Для оптико-электронных систем указанная задача решена в [226] на основе кусочно-линейной аппроксимации. Для радиолокационных систем ДЗЗ из-за более сильного влияния высоты h_u на закон координатного соответствия при такой аппроксимации требуется существенное уменьшение шага между узлами для построения кусочно-линейных зависимостей. В результате количество узлов трехмерной аппроксимирующей решетки становится сопоставимым с количеством пикселей в двумерном растре изображения. Поскольку в каждом узле решетки необходимо выполнение строгого пересчета координат, наблюдается лишь увеличение расхода памяти без уменьшения объема вычислений. В то же время специализированных механизмов аппроксимации координатных преобразований при формировании стандартных продуктов радиолокационных систем ДЗЗ в известной литературе не предложено.

Аналогичная проблема возникает и при геометрических преобразованиях радиолокационных изображений в ходе высокоуровневой или тематической обработки. В частности при интерферометрической обработке требуется геометрическое совмещение пары изображений с точностью до десятой доли пикселя. Координатное соответствие изображений может быть получено с привлечением опорных данных о высоте на основе рассмотренных выше прямой и обратной моделей геодезической привязки: $(m_1, n_1) \rightarrow (B_u, L_u, h_{onop}(B_u, L_u)) \rightarrow (m_2, n_2)$, где индексом обозначен номер

изображения в паре [227, 228]. Для уменьшения объема вычислений в [229] предложена полиномиальная модель совмещения без учета перепадов высот наблюдаемых объектов, что допустимо только при малых значениях пространственной интерферометрической базы. В [230] предложена упрощенная модель совмещения, основанная на предположении, что траектории движения фазовых центров двух антенн при интерферометрической съемке строго параллельны друг другу и перпендикулярны к вектору нормали к поверхности Земли, аппроксимируемой сферой радиуса R_3 . В то же время вычислительно эффективные модели совмещения интерферометрической пары изображений при средних и больших значениях пространственной базы и нестрогой параллельности орбит в известной литературе не предложены.

Из-за погрешностей геодезической привязки, рассмотренных ранее, полученные по строгой модели оценки (m_2, n_2) содержат систематическую ошибку $(\Delta m, \Delta n)$, которую в [231, 232] предложено описывать полиномиальной моделью:

$$\Delta m = P_{\Delta m}(m_1, n_1) = \sum_o \sum_p k_{\Delta m o p} m_1^o n_1^p, \quad \Delta n = P_{\Delta n}(m_1, n_1) = \sum_o \sum_p k_{\Delta n o p} m_1^o n_1^p. \quad (1.15)$$

Степень полиномов (1.15) выбирается малой, а коэффициенты $k_{\Delta m o p}$ и $k_{\Delta n o p}$ вычисляются на основе метода наименьших квадратов (МНК) по небольшому числу опорных фрагментов, в которых выполнено корреляционно-экстремальное совмещение амплитудных составляющих комплексных сигналов изображений.

В работах [233, 234] предлагается при совмещении максимизировать не коэффициент корреляции амплитуд, а коэффициент когерентности комплексных сигналов, учитывающий также фазу:

$$\gamma = \left| \frac{\sum_k \sum_l s_1(m+k, n+l) \cdot s_2^*(m+k, n+l)}{\sqrt{\sum_k \sum_l |s_1(m+k, n+l)|^2} \sqrt{\sum_k \sum_l |s_2(m+k, n+l)|^2}} \right|. \quad (1.16)$$

где s_1 – комплексный сигнал первого (основного) изображения, s_2 – комплексный сигнал второго (дополнительного) изображения, трансформированный в систему координат основного, s^* – операция комплексного сопряжения. Коэффициент γ ра-

вен единице, когда амплитуды сигналов совпадают с точностью до множителя, а разность фаз постоянна. Максимизация γ обосновывается тем, что при совмещении необходимо минимизировать фазовый шум, нарушающий постоянность разности фаз. Однако разность фаз сигналов включает много составляющих, пространственные вариации которых не известны на этапе совмещения: топографическую фазу, фазу смещений, атмосферные искажения и др. Поэтому вариации фазы, не связанные с шумом, приводят к ухудшению точности совмещения изображений по максимуму γ . В то же время корреляционное совмещение по амплитуде сигналов лишено указанного недостатка. Кроме того, для повышения надежности коэффициент корреляции может комбинироваться с нечеткими мерами подобия [55].

1.3 АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

1.3.1 Основные этапы обработки интерферометрических изображений в радиолокационных космических системах наблюдения Земли. Интерферометрическое изображение, или интерферограмма (рисунок 1.7), формируется путем вычитания фаз комплексных сигналов геометрически совмещенных радиолокационных изображений:

$$\Delta \varphi_{c6}(m, n) = \arg(s_1(m, n)s_2^*(m, n)). \quad (1.17)$$

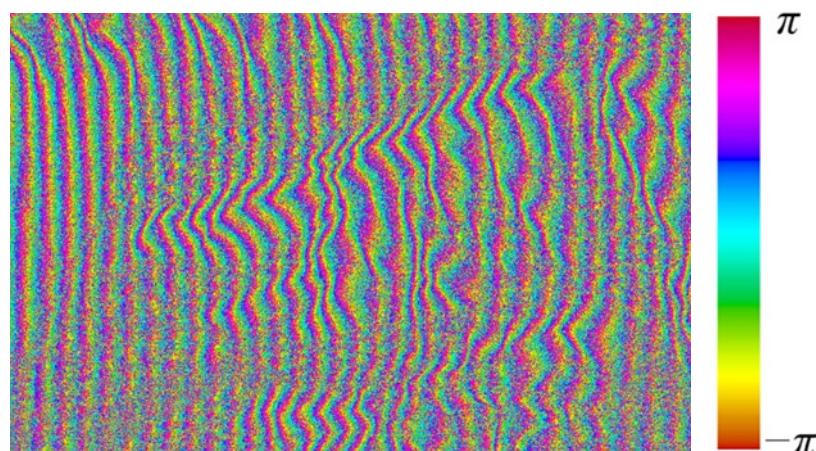


Рисунок 1.7 – Пример интерферограммы

Совмещение интерферометрической пары изображений было рассмотрено в предыдущем параграфе. Последующая обработка интерферограммы – сложный процесс, включающий следующие основные этапы:

- 1) вычитание из интерферограммы фазы плоского рельефа и optionalное вычитание опорной топографической фазы при дифференциальной интерферометрии;
- 2) оценивание когерентности – степени зашумленности фазы;
- 3) адаптивную фильтрацию фазового шума с учётом когерентности;
- 4) развертывание фазы на интерферограмме;
- 5) формирование матрицы высот (при классической интерферометрии) или смещений (при дифференциальной интерферометрии) из отсчетов развернутой фазы;
- 6) ортотрансформирование матрицы высот или смещений в картографическую проекцию.

Рассмотрим подробнее каждый из этапов.

1.3.2 Вычитание фазы плоского рельефа и опорной топографической фазы из интерферометрического изображения. Фаза на интерферограмме включает следующие составляющие:

- 1) фазу плоского рельефа (соответствует объектам, расположенным на поверхности земного эллипсоида);
- 2) топографическую фазу, обусловленную возвышением наблюдаемых объектов на земным эллипсоидом;
- 3) фазу смещений, обусловленную перемещением объектов в направлении наклонной дальности за период между съемками интерферометрической пары изображений;
- 4) атмосферные искажения фазы, обусловленные изменением метеопараметров за период между съемками;
- 5) фазовый шум.

Фаза плоского рельефа может быть вычислена как

$$\varphi_{\text{плоск}}(m, n) = -2\pi f_0 \cdot 2(R_{\perp 1n} - R_{\perp 2}(m, n, 0))/c, \quad (1.18)$$

где $R_{\perp 1n}$ – наклонная дальность, соответствующая n -му столбцу основного изображения; $R_{\perp 2}(m, n, h_u)$ – наклонная дальность на втором изображении, если наблюдаемый объект имеет высоту h_u . $R_{\perp 2}(m, n, h_u)$ рассчитывается путем перехода $(m, n, h_u) \rightarrow (x_u, y_u, z_u)$ по модели привязки основного изображения (1.11) и последующего обращения модели привязки дополнительного изображения, рассмотренного в пункте 1.2.7.

После вычитания фазы плоского рельефа формируется так называемая выравненная интерферограмма:

$$\Delta\varphi_{выравн\,св}(m, n) = \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{св}(m, n) - \varphi_{плоск}(m, n)))). \quad (1.19)$$

При дифференциальной интерферометрии рассчитывается опорная топографическая фаза:

$$\varphi_{mono}(m, n) = -2\pi f_0 \cdot 2(R_{\perp 2}(m, n, 0) - R_{\perp 2}(m, n, h_{onop}(m, n))) / c. \quad (1.20)$$

Выражения (1.18) и (1.20) обусловлены последним фазовым множителем сжатого импульсного отклика РСА (1.7).

Для расчета опорной топографической фазы $\varphi_{mono}(m, n)$ необходимо представить опорную модель высот $h_{onop}(B_u, L_u)$ в системе координат основного изображения. Для каждого пикселя (m, n) это осуществляется путем итерационного поиска высоты h_u , при которой решение системы уравнений (1.11) дает такие (B_u, L_u) , что $h_u = h_{onop}(B_u, L_u)$.

Таким образом, при дифференциальной интерферометрии выравненная интерферограмма имеет вид:

$$\Delta\varphi_{выравн\,св}(m, n) = \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{св}(m, n) - \varphi_{плоск}(m, n) - \varphi_{mono}(m, n)))). \quad (1.21)$$

1.3.3 Оценивание когерентности и адаптивная фильтрация фазового шума. Коэффициент когерентности (1.16) используется для определения степени зашумленности разности фаз на интерферограмме. Как отмечено в предыдущем параграфе, коэффициент когерентности максимальен, когда разность фаз сигналов постоянна. В реальности разность фаз $\Delta\varphi$ изменяется даже в отсутствие шумов φ_u

из-за вариаций других составляющих (в первую очередь $\varphi_{\text{плоск}}$ и φ_{mono}), что приводит к занижению оценки когерентности.

Во избежание этого когерентность оценивают по выравненной интерферограмме с учетом опорной топографической фазы [235]:

$$\gamma(m, n) = \left| \frac{\sum_k \sum_l |s_1(m+k, n+l)| \cdot |s_2(m+k, n+l)| \exp(j\phi(m+k, n+l))}{\sqrt{\sum_k \sum_l |s_1(m+k, n+l)|^2} \sqrt{\sum_k \sum_l |s_2(m+k, n+l)|^2}} \right|, \quad (1.22)$$

где $\phi(m, n) = \Delta\varphi_{\text{выравн_св}}(m, n) - \varphi_{\text{mono}}(m, n)$ при классической интерферометрии и $\phi(m, n) = \Delta\varphi_{\text{выравн_св}}(m, n)$ при дифференциальной интерферометрии.

При оценивании когерентности важен выбор размеров прямоугольного окна, в котором ведутся вычисления по (1.22). В [236] предлагается выбирать размер окна адаптивно: сначала приближенно оценивать среднюю когерентность в большом окне и, если она достаточно высока, уточнять оценку в меньшем окне. Это позволяет найти компромисс между детальностью полученной карты значений когерентности и точностью оценивания.

Фильтрация сигнала выравненной интерферограммы предназначена для устранения из него фазового шума. Основным недостатком фильтрации является снижение пространственного разрешения, поэтому искажать полезный сигнал стараются как можно слабее, адаптивно определяя необходимую степень фильтрации по оценке когерентности, полученной на предыдущем этапе.

Для фильтрации фаза преобразуется в комплексный сигнал единичной амплитуды с последующим обратным пересчетом отфильтрованного сигнала в свернутые значения фазы:

$$\Delta\varphi_{\text{фильтр_св}}(m, n) = \arg(F(\exp(j\Delta\varphi_{\text{выравн_св}}(m, n)))). \quad (1.23)$$

В качестве фильтра F возможно применение скользящего среднего или фильтра Гаусса, однако наилучшие результаты обеспечивает специально разработанный для интерферометрической обработки фильтр Голдштейна [237, 238]. Он строится путем возведения сглаженного амплитудного спектра фрагмента фильтру-

емого сигнала в некоторую степень, выбираемую в соответствии с коэффициентом когерентности $\gamma(m, n)$.

Фильтр Голдштейна подавляет фазовый шум с малыми искажениями полезного сигнала в случае высокой и средней когерентности. В участках низкой когерентности результат фильтрации содержит лишь коррелированный шум и должен исключаться из дальнейшей обработки (рисунок 1.8).

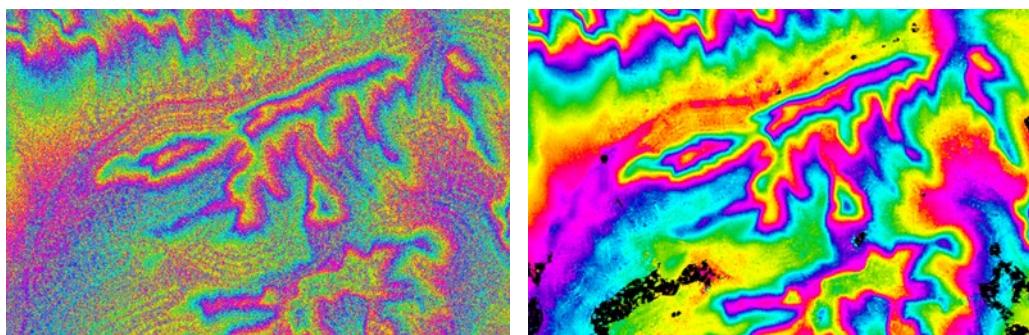


Рисунок 1.8 – Пример интерферограммы до и после фильтрации с отбраковкой участков низкой когерентности, показанных черным цветом

1.3.4 Анализ проблемы развертывания фазы на интерферограмме. Наиболее сложным этапом интерферометрической обработки является развертывание фазы на интерферограмме, заключающееся в переходе от свернутых значений фазы $\varphi_{\text{св}}(m, n)$ из полуинтервала $(-\pi, \pi]$ к истинным значениям $\varphi(m, n) = -\varphi_{\text{св}}(m, n) + 2\pi k_{\text{разв}}(m, n)$, $k_{\text{разв}} \in \mathbb{Z}$. В качестве $\varphi_{\text{св}}(m, n)$ выступает сигнал отфильтрованной интерферограммы $\Delta\varphi_{\text{фильтр св}}(m, n)$.

Задача развертывания фазы имеет бесконечное множество решений, только одно из которых соответствует наблюдаемым объектам. Четких критериев, позволяющих выбрать правильное решение среди всех возможных, не существует. Поэтому известные алгоритмы развертывания фазы основаны на эвристических предположениях, позволяющих во многих случаях получить решение, близкое к истинной топографической фазе или фазе смещений. Основным таким предположением является плавный характер изменений $\varphi(m, n)$, при котором горизонтальная и вертикальная составляющие градиента фазы принадлежат полуинтервалу $(-\pi, \pi]$:

$$\begin{aligned} G_x(m, n) &= \varphi(m, n+1) - \varphi(m, n) \in (-\pi, \pi], \\ G_y(m, n) &= \varphi(m+1, n) - \varphi(m, n) \in (-\pi, \pi]. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Если предположение о плавности изменений фазы справедливо для всех пикселей интерферограммы, то развертывание фазы с точностью до постоянной, кратной периоду, сводится к интегрированию свернутых значений градиентов фазы $G_{x_{cb}}(m, n)$ и $G_{y_{cb}}(m, n)$, вычисляемых как

$$\begin{aligned} G_{x_{cb}}(m, n) &= \arg(\exp(j(\varphi_{cb}(m, n+1) - \varphi_{cb}(m, n)))), \\ G_{y_{cb}}(m, n) &= \arg(\exp(j(\varphi_{cb}(m+1, n) - \varphi_{cb}(m, n)))). \end{aligned} \quad (1.25)$$

Однако в реальности на интерферограмме находится некоторое количество пикселей, в которых $G_x(m, n) \notin (-\pi, \pi]$ или $G_y(m, n) \notin (-\pi, \pi]$. Нарушение предположения о плавности изменений фазы в отдельных пикселях принято называть фазовым разрывом. Разрывы располагаются вдоль некоторых линий, которые заканчиваются либо на границе интерферограммы или отбракованной области низкой когерентности, либо в так называемых сингулярных точках, в которых $\text{rot } \mathbf{G}_{cb}(m, n) \neq 0$, где $\mathbf{G}_{cb} = (G_{x_{cb}}, G_{y_{cb}})^T$ – вектор свернутого градиента фазы. Сумма зарядов сингулярных точек на концах одной линии разрыва фазы равна нулю. Положительность или отрицательность заряда определяется знаком выражения:

$$\xi(m, n) = G_{x_{cb}}(m, n) + G_{y_{cb}}(m, n+1) - G_{x_{cb}}(m+1, n) - G_{y_{cb}}(m, n). \quad (1.26)$$

Можно выделить две основные причины возникновения фазовых разрывов:

- 1) остаточный фазовый шум и артефакты фильтрации интерферограммы;
- 2) резкие границы наблюдаемых высотных или смещенных площадных объектов, а также областей переналожения сигналов на исходных изображениях.

Первая причина приводит к появлению коротких линий разрыва фазы длиной до нескольких пикселей. Вторая причина приводит к появлению длинных (от десятка от нескольких тысяч пикселей) линий разрыва фазы, направленных вдоль границы объекта. Также разрывы характерны для склонов, расположенных под таким углом, что даже с учетом отклонения от надира зондирующие сигналы распространяются практически перпендикулярно к поверхности склона.

Основной трудностью при развертывании фазы является правильное определение положения и величины фазовых разрывов на интерферограмме, где под величиной разрыва понимается количество фазовых периодов, на которое отличается G_x от $G_{x_{cb}}$ или G_y от $G_{y_{cb}}$. При этом неправильное определение положения или величины разрыва приводит к тому, что при интегрировании градиента фазы, начиная с определенного момента, возникает ошибка, кратная фазовому периоду, которая может распространяться на значительную часть интерферограммы вдоль дальнейшего пути интегрирования. Это характерно для всех известных алгоритмов развертывания фазы, поскольку они включают либо интегрирование градиента в явном или скрытом виде, либо предсказание следующих значений фазы по предыдущим, при котором ошибка распространяется аналогично интегрированию.

Известные алгоритмы развертывания фазы можно разделить на группы:

- 1) алгоритмы отсечения ветвей;
- 2) алгоритмы на основе минимизации невязок градиента;
- 3) алгоритмы на основе минимизации стоимости потоков в сетях;
- 4) алгоритмы на основе прогнозирования следующих значений фазы;
- 5) нейросетевые алгоритмы.

Рассмотрим основные алгоритмы в рамках каждой группы.

1.3.5 Анализ алгоритмов развертывания фазы на основе отсечения ветвей. Ключевой идеей алгоритмов развертывания фазы на основе отсечения ветвей является соединение противоположно заряженных сингулярных точек прямыми линиями отсечения с дальнейшим выбором пути интегрирования $\mathbf{G}_{cb}(m, n)$, не пересекающего ни одну из этих линий. Базовый алгоритм отсечения ветвей предложен Голдштейном, Зебкером и Вернером в [239]. В нем соединение выполняется за один проход интерферограммы с помощью «жадного» алгоритма квазиминимизации суммарной длины линий отсечения. Для каждой обнаруженной сингулярной точки ищется ближайшая соседняя. Между ними проводится линия отсечения, которая продолжает наращиваться, до тех пор пока не соединит равное количество положительных и отрицательных сингулярных точек. Алгоритм обеспечивает качественное

развертывание фазы только тогда, когда линии разрыва фазы коротки и расположены далеко друг от друга. Если линии разрыва фазы длинны, их форма не обязательно является прямой, поэтому даже при правильном выборе пары сингулярных точек для соединения линия отсечения не проводится строго по истинному положению разрыва, приводя к локальной ошибке. Если же много линий разрыва расположено рядом друг с другом, «жадный» алгоритм чаще всего неправильно выбирает пары сингулярных точек для соединения, приводя к ошибкам развертывания фазы вплоть до глобальных. Достоинствами алгоритма являются простота и малая вычислительная сложность $O(N_{\text{пикс}})$, где $N_{\text{пикс}}$ – количество пикселей на интерферограмме.

Основным отличием других алгоритмов данной группы [240, 241] от базового являются более сложные способы выбора пар сингулярных точек для соединения линиями отсечения. При этом увеличивается вычислительная сложность, однако точность развертывания фазы при наличии большого количества близко расположенных длинных линий фазовых разрывов остается недостаточно высокой.

1.3.6 Анализ алгоритмов развертывания фазы на основе минимизации невязок градиента. Ключевой идеей алгоритмов данной группы является построение поверхности, градиент $\mathbf{G}_{MNG}(m, n)$ которой потенциален ($\nabla(m, n) \cdot \text{rot } \mathbf{G}_{MNG}(m, n) = 0$) и максимально похож на $\mathbf{G}_{ce}(m, n)$ по некоторому критерию.

В [242] предложены алгоритмы развертывания фазы на основе безвесового и весового вариантов МНК. В безвесовом варианте выполняется оптимизация:

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_n (G_{x MNG}(m, n) - G_{x ce}(m, n))^2 + \\ & + \sum_m \sum_n (G_{y MNG}(m, n) - G_{y ce}(m, n))^2 = \min. \end{aligned} \quad (1.27)$$

Задача (1.27) сводится к решению дискретного уравнения Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi_{MNG} = \text{div } \mathbf{G}_{ce}, \quad (1.28)$$

где ∇^2 – дискретный оператор Лапласа. Уравнение (1.28) при граничных условиях второго рода (нулевой градиент фазы на границе) решается с вычислительной сложностью $O(N_{\text{пикс}} \log_2 N_{\text{пикс}})$ на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП):

$$\varphi_{MNG} = \text{ОДКП} \left\{ \frac{\text{ДКП} \{ \text{div } \mathbf{G}_{ce} \}}{2(\cos(\pi k / K_{DKP}) + \cos(\pi l / L_{DKP}) - 2)} \right\}, \quad (1.29)$$

где ОДКП – обратное ДКП, $K_{DKP} \times L_{DKP}$ – размерность матрицы отсчетов результата ДКП, $k = \overline{0, K_{DKP}-1}$, $l = \overline{0, L_{DKP}-1}$.

При нулевых k и l знаменатель в (1.29) обращается в нуль, т.е. постоянная составляющая $\varphi_{MNG}(m, n)$ неизвестна и должна быть задана произвольным образом. На низких частотах при малых k и l за счет малости знаменателя в (1.29) происходит усиление шумов. На высоких частотах шумы ослабляются. В результате получается гладкая фазовая поверхность $\varphi_{MNG}(m, n)$, которая соответствует истине только в мелких деталях, а в глобальном плане может значительно отличаться. Кроме того, не гарантируется, что в каждом пикселе интерферограммы $\varphi_{MNG}(m, n)$ отличается от $\varphi_{ce}(m, n)$ на целое количество фазовых периодов.

В весовом варианте МНК выполняется оптимизация:

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_n w_x(m, n) (G_{x MNG}(m, n) - G_{x ce}(m, n))^2 + \\ & + \sum_m \sum_n w_y(m, n) (G_{y MNG}(m, n) - G_{y ce}(m, n))^2 \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (1.30)$$

Задача (1.30) сводится к многократному решению уравнения Пуассона в рамках итерационной схемы Пикара или метода сопряженных градиентов.

Итерационная схема Пикара выглядит следующим образом:

$$\nabla^2 \varphi_{MNGi} = \text{div}(\mathbf{w} \circ \mathbf{w} \circ \mathbf{G}_{ce}) + \text{div} \left(\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \mathbf{w} \circ \mathbf{w} \right) \circ \text{grad } \varphi_{MNGi-1} \right), \quad (1.31)$$

где $\mathbf{w}(m, n) = (w_x(m, n), w_y(m, n))^T$ – вектор весов, \circ – произведение Адамара.

Итерационная схема метода сопряженных градиентов выглядит как

$$\begin{aligned} \varphi_{MNGi} &= \varphi_{MNGi-1} + \alpha_i p_i, \quad p_i = z_{i-1} + \beta_i p_{i-1}, \quad \nabla^2 z_i = r_i, \quad r_i = r_{i-1} - \alpha_i \text{div}(\mathbf{w} \circ \mathbf{w} \circ \text{grad } p_{i-1}), \\ p_1 &= z_0, \quad \varphi_{MNG0} = 0, \quad r_0 = \text{div}(\mathbf{w} \circ \mathbf{w} \circ \mathbf{G}_{ce}), \end{aligned} \quad (1.32)$$

где α_i и β_i – коэффициенты, вычисляемые на основе r_{i-2} , z_{i-2} , r_{i-1} , z_{i-1} и p_i .

Метод сопряженных градиентов требует большего количества вычислений и затрат памяти в рамках одной итерации, но обеспечивает более быструю сходимость

по сравнению со схемой Пикара. Общая вычислительная сложность развертывания фазы по весовому МНК составляет $O(k_{um} N_{nukc} \log_2 N_{nukc})$, где k_{um} – количество итераций, составляющее от нескольких десятков до нескольких сотен.

Веса $\mathbf{w}(m, n)$ для МНК в [242] предлагаются назначать в соответствии с оценками когерентности $\gamma(m, n)$, что позволяет игнорировать при развертывании фазы области низкой когерентности и повысить точность по сравнению с безвесовым МНК. Однако для весового варианта сохраняются недостатки безвесового МНК, хотя и проявляются в несколько меньшей степени.

Одной из вариаций развертывания фазы по МНК является использование функций Грина [243]. Точность алгоритма является промежуточной между безвесовым и весовым МНК.

В [244] предложено развертывание фазы на основе минимизации суммы p -степеней невязок градиента (p -нормы):

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_n |G_{x MHT}(m, n) - G_{x cb}(m, n)|^p + \\ & + \sum_m \sum_n |G_{y MHT}(m, n) - G_{y cb}(m, n)|^p \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (1.33)$$

Минимизация (1.33) осуществляется путем итерационного решения задачи (1.30) с весами $\mathbf{w}(m, n)$, изменяемыми на каждой итерации в соответствии с величиной невязок градиента, возникших в результате решения (1.30).

Практическое применение развертывания фазы на основе минимизации p -нормы останавливает его высокая вычислительная сложность $O(k_{um \text{ внеш}} k_{um \text{ внутр}} N_{nukc} \log_2 N_{nukc})$, где $k_{um \text{ внеш}}$ – количество итераций во внешнем цикле минимизации p -нормы, $k_{um \text{ внутр}}$ – среднее количество итераций при решении задачи (1.30) во внутреннем цикле. Общее количество итераций $k_{um \text{ внеш}} \times k_{um \text{ внутр}}$ превышает десятки тысяч, что не позволяет выполнить развертывание фазы на современной вычислительной технике за приемлемое время. Кроме того, даже минимизация 0-нормы, представляющая наибольший интерес среди всех p -норм и эквивалентная минимизации суммарной длины линий фазовых разрывов, не гарантирует правильного развертывания фазы.

1.3.7 Анализ развертывания фазы на основе минимизации стоимости потоков в транспортных сетях. Алгоритмы данной группы основаны на минимизации взвешенной 1-нормы невязок градиента фазы при ограничении, что невязки равны целому количеству фазовых периодов, а результирующее поле градиента потенциально, с применением аппарата теории графов.

Базовый алгоритм развертывания фазы на основе минимизации стоимости потоков в транспорной сети предложен М. Костантини в [245]. В нем строится транспортная сеть (рисунок 1.9). Узлы сети располагаются в виде матрицы со смещением на полпикселя по диагонали относительно растра интерферограммы. Соседние узлы в строке (столбце) матрицы соединяются друг с другом двунаправленными горизонтальными (вертикальными) дугами. Узлы сети, расположение которых соответствует сингулярным точкам на интерферограмме с положительным (отрицательным) зарядом, являются источниками (стоками). С использованием того или иного алгоритма из теории графов [246] (например, последовательного нахождения кратчайших путей по алгоритму Дейкстры [247] на основе двоичной кучи) осуществляется попарная группировка источников со стоками, при которой минимизируется суммарная стоимость проведения по дугам сети единиц потока из источников в стоки. Под стоимостью потока подразумевается суммарная длина дуг, по которым он проведен. Если количество источников и стоков не одинаково, то каждый «лишний» источник или сток соединяется единицей потока с «землей» – одним из узлов на краю транспортной сети. В результате по каждой дуге оказывается проведено некоторое целое количество единиц потока, которое показывает, на сколько фазовых периодов нужно скорректировать составляющие градиента фазы в том или ином пикселе интерферограммы относительно $G_{x_{\text{ce}}}$ или $G_{y_{\text{ce}}}$:

$$\begin{aligned} G_{x_{\text{PMC}}} (m, n) &= G_{x_{\text{ce}}} (m, n) + 2\pi(k_{\downarrow}(m-0,5, n+0,5) - k_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5)), \\ G_{y_{\text{PMC}}} (m, n) &= G_{y_{\text{ce}}} (m, n) + 2\pi(k_{\leftarrow}(m+0,5, n+0,5) - k_{\rightarrow}(m+0,5, n-0,5)), \end{aligned} \quad (1.34)$$

где k_{\downarrow} , k_{\uparrow} , k_{\leftarrow} и k_{\rightarrow} – количество единиц потока, проведенного по дуге из заданного узла в сторону, указанную стрелкой. Результат развертывания фазы получается путем интегрирования скорректированного градиента $\mathbf{G}_{\text{PMC}} = (G_{x_{\text{PMC}}}, G_{y_{\text{PMC}}})^T$.

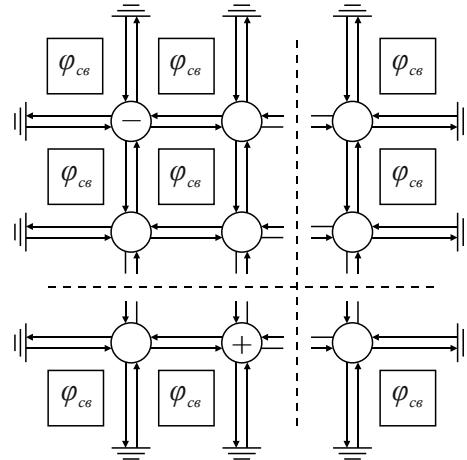


Рисунок 1.9 – Интерферограмма и транспортная сеть

Каждой дуге сети может задаваться уникальная длина в соответствии с некоторой дополнительной информацией. В [248, 249, 250] предлагается назначать длину дуг в соответствии с оценкой когерентности $\gamma(m, n)$, величиной амплитудного сигнала на исходной интерферометрической паре изображений и локальным наклоном фазовой поверхности, оцениваемым по максимуму амплитудного спектра малого прямоугольного фрагмента интерферограммы. В [248] предлагается назначать длины дуг обратно пропорционально величинам наклона, когерентности и амплитуды, что несколько повышает точность развертывания фазы, но не гарантирует высокое качество результата. В [250] путем моделирования получены функции плотности вероятности возникновения фазового разрыва в зависимости от значений когерентности, амплитуды и локального наклона, на основе которых по методу максимального правдоподобия назначаются длины дугам сети. Однако смоделированные функции учитывают далеко не все факторы и являются приближенными. Кроме того, метод максимального правдоподобия применяется не к фазе, а к весам градиентов фазы. Поэтому минимальная ошибка развертывания фазы не гарантируется, а на отдельных сюжетах ошибка может распространяться на значительную часть интерферограммы.

Минимизация стоимости потоков в транспортной сети требует затрат памяти, примерно на порядок превышающих затраты на хранение интерферограммы, и характеризуется высокой вычислительной сложностью $O(k_{cm} N_{nukc} \log_2 N_{nukc})$, где k_{cm} – количество пар сингулярных точек, между которыми проводятся потоки. В

большинстве случаев k_{cm} составляет десятки и сотни тысяч, что не позволяет выполнить за приемлемое время развертывание фазы на больших интерферограммах. Поэтому на практике отказываются от строгой минимизации, выполняемой по всей интерферограмме, и взамен ее используют:

- 1) квазиминимизацию с помощью «жадных» алгоритмов [250];
- 2) разбиение интерферограммы на небольшие блоки и строгую минимизацию в пределах каждого блока [251–254];
- 3) переход к многомасштабной обработке и отдельную минимизацию в каждом масштабе [254–256].

Перечисленные решения позволяют выполнить развертывание фазы за приемлемое время, но одновременно приводят к снижению точности результата и увеличению вероятности возникновения глобальных ошибок.

1.3.8 Анализ развертывания фазы на основе прогнозирования и с использованием искусственных нейронных сетей. В группе алгоритмов, основанных на прогнозировании, интегрирование оцененного градиента фазы заменяется последовательным прогнозированием следующих значений фазы на основе предыдущих развернутых значений. При этом может применяться фильтр Калмана [257, 258] или марковская сеть [259]. Недостатком данных алгоритмов является то, что ошибка прогнозирования очередного значения может привести к неправильному прогнозированию всех последующих значений и глобальной ошибке на результате развертывания фазы. В связи с этим наибольшее распространение в данной группе получил алгоритм наращивания областей [260]. В нем прогнозирование начинается независимо с нескольких участков с контролем точности прогнозирования по эвристическим критериям. Нарашивание области с развернутой фазой осуществляется только тогда, когда точность прогнозирования достаточно высока. Когда две наращенные области начинают пересекаться, выполняется их объединение. Указанные меры позволяют уменьшить вероятность возникновения глобальной ошибки развертывания фазы, однако результаты алгоритма сильно зависят от выбора участков для наращивания областей и критериев надежности прогнозирования.

В работах [261, 262] предприняты первые попытки применения искусственных нейронных сетей в задаче развертывания фазы, однако обеспечиваемая ими точность результата невысока.

1.3.9 Формирование и ортотрансформирование матрицы высот или смещений по отсчетам развернутой фазы. Развернутая фаза φ может быть пересчитана в высоту или смещения в зависимости от вида интерферометрии.

Пересчет фазы в высоту осуществляется путем обращения выражения (1.20), в котором φ_{mono} заменена на φ , а h_{onop} – на искомую высоту h_u . Средний уровень развернутой фазы известен с точностью до целого количества фазовых периодов, поэтому интерферометрическая обработка позволяет определять лишь относительные высоты объектов. Для получения абсолютных высот требуется знать среднюю высоту наблюдаемой сцены. При этом коррекция развернутой фазы осуществляется не на целое, а на дробное количество фазовых периодов, что позволяет устранить среднее влияние всех искажающих факторов.

Пересчет фазы в смещения в направлении наклонной дальности при дифференциальной интерферометрии осуществляется в соответствии с выражением:

$$dR(m, n) = -\frac{c \varphi(m, n)}{4 \pi f_0}. \quad (1.35)$$

Средний уровень смещений также не известен. Для расчета их абсолютных значений требуется информация о расположении на матрице смещений заведомо неподвижных объектов.

Ортотрансформирование матрицы высот в картографическую проекцию выполняется по прямому закону координатного соответствия $(m, n, h_u(m, n)) \rightarrow (N_u, E_u)$, поскольку высота задана в пикселях самой трансформируемой матрицы. Ортотрансформирование матрицы смещений полностью аналогично ортотрансформированию радиолокационных изображений.

1.3.10 Анализ влияния погрешностей измерительной информации на точность обработки интерферограмм и алгоритмов уточнения измерительных данных. В случае применения алгоритмов автофокусировки радиоголо-

грамм, рассмотренных в предыдущем параграфе, погрешности измерения угловой ориентации КА слабо влияют на обработку интерферограмм. В то же время погрешности измерения траекторий движения фазового центра антенны при двухпроходной интерферометрической съемке оказывают существенное негативное влияние на точность результатов интерферометрии.

В задаче построения цифровых моделей высот необходимо знание расстояния между двумя траекториями (пространственной интерферометрической базы) с сантиметровой точностью. В противном случае некорректно рассчитывается фаза плоского рельефа и возникает мультиплекативная ошибка прямого и обратного расчетов топографической фазы. В дифференциальной интерферометрии требования к точности измерительной информации несколько снижаются, но негативное влияние погрешностей навигационных измерений имеет аналогичный характер.

Погрешность фазы плоского рельефа может быть с высокой точностью аппроксимирована линейной зависимостью вида:

$$\Delta \varphi_{\text{плоск}}(m, n) \approx \Delta k_{n \text{ плоск}} n + \Delta k_{m \text{ плоск}} m + \Delta b_{\text{плоск}}, \quad (1.36)$$

где $\Delta k_{n \text{ плоск}}$, $\Delta k_{m \text{ плоск}}$ и $\Delta b_{\text{плоск}}$ – коэффициенты линейной зависимости.

Остаточная величина $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$ ошибочно приписывается топографической фазе или фазе смещений, приводя к аддитивной ошибке на результирующей матрице высот или смещений.

Во избежание указанного негативного эффекта разработаны алгоритмы уточнения фазы плоского рельефа, которые можно разделить на две группы. Алгоритмы первой группы выполняют уточнение путем анализа сигнала интерферограммы, содержащего свернутые значения разности фаз $\Delta \varphi_{\text{св}}$. Алгоритмы второй группы выявляют аддитивную ошибку на результирующей матрице высот по окончании интерферометрической обработки.

Наиболее известный алгоритм первой группы [263] предполагает почти плоский характер рельефа снятого участка земной поверхности и основан на определении центральной частоты комплексного сигнала:

$$\tilde{s}_{\text{выравн св}}(m, n) = \exp(j(\Delta \varphi_{\text{св}}(m, n) - \tilde{\varphi}_{\text{плоск}}(m, n))), \quad (1.37)$$

где $\tilde{\varphi}_{\text{плоск}}(m, n)$ – приближенная оценка фазы плоского рельефа, рассчитанная по орбитальным данным. На точность алгоритма оказывают негативное влияние рельеф земной поверхности, который чаще всего далек от плоского, фаза смещений, атмосферные искажения и сильный фазовый шум. Поэтому в работе [264] предложен алгоритм, способный обеспечивать более точную оценку $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$ для ряда типовых видов рельефа земной поверхности. Однако рассмотренные алгоритмы первой группы были разработаны, когда еще не была доступна низкодетальная априорная информация о рельефе земной поверхности, благодаря которой в настоящее время имеется возможность более точного оценивания $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$.

Априорные сведения о рельефе используют алгоритмы второй группы [265], анализирующие отклонения высоты на результирующей матрице высот от заранее известных значений и по МНК строящие линейную зависимость аддитивной ошибки от номеров строки и столбца в матрице высот.

Аналогично выявляется и мультипликативная ошибка, связанная с некорректным пересчетом фазы в высоту. Путем сопоставления матрицы высот с опорной моделью по МНК находится мультипликативный поправочный коэффициент.

Откладывание процесса уточнения фазы плоского рельефа и выявления мультипликативной ошибки до момента, когда будет сформирована матрица высот, существенно упрощает алгоритмы оценивания, поскольку они работают с абсолютными значениями высоты, а не с относительными значениями фазы, имеющими периодический характер. Однако это усложняет процедуру развертывания фазы, во время которой в случае применения рассматриваемых алгоритмов оценивания мультипликативные и аддитивные искажения еще не устранены.

1.3.11 Выводы по результатам анализа алгоритмов обработки интерферограмм. Рассмотренные алгоритмы обработки интерферограмм реализованы в отечественных и зарубежных программных продуктах: Ракурс Photomod Radar (Россия), GAMMA Interferometric SAR Processor, Sarmap SARscape (Швейцария), DORIS (Нидерланды), GMTSAR, SNAPHU (США), PCI Geomatica (последние версии переименованы в CATALYST, Канада), SNAP (Евросоюз).

По результатам анализа алгоритмов выполнения отдельных этапов обработки интерферограмм можно сделать следующие выводы.

Во-первых, известные алгоритмы развертывания фазы в основном сводят его к задаче оптимизации, что позволяет в простых случаях правильно выявлять разрывы и получать развернутую фазу, близкую к истинной. Однако реальное положение фазовых разрывов определяется сюжетом (высотой или смещениями наблюдаемых объектов) и не обязано соответствовать минимуму целевой функции. Введение весов в минимизируемый критерий в соответствии с известными параметрами конкретного сюжета позволяет в среднем увеличить точность развертывания фазы. Тем не менее, вероятность распространения ошибки на значительную часть интерферограммы остается достаточно высокой. Следовательно, крайне актуальна разработка новых, более точных алгоритмов развертывания фазы.

Во-вторых, точность и скорость развертывания фазы зависят от качества подготовки интерферограммы на предшествующих этапах интерферометрической обработки, в частности, от количества сингулярных точек и линий разрыва фазы, содержащихся в дефектных областях интерферограммы: участках низкой когерентности, радиотеней и переналожения сигналов. Причем если участки низкой когерентности отбраковываются в известных технологиях интерферометрической обработки, то выявление областей затенения и переналожения в них не предусмотрено. Также в ходе предварительной обработки интерферограммы не устраняются атмосферные искажения фазы. Таким образом, для достижения максимальной точности интерферометрической обработки недостаточно создания только более точных алгоритмов развертывания фазы. Необходима разработка единого метода обработки интерферограмм, позволяющего на всех стадиях максимально подготовить интерферограмму к развертыванию фазы на ней. При этом для улучшения качества обработки на большинстве этапов можно привлечь в качестве опорной информации стереофотограмметрические цифровые матрицы высот более низкого разрешения. Первая попытка разработки такого метода осуществлена в [266]. Можно продолжить исследования в этом направлении.

1.4 АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОБЪЕДИНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

1.4.1 Анализ алгоритмов объединения стереофотограмметрических и интерферометрических цифровых моделей высот. Объединение разновременной или разнородной информации обычно применяется в ходе высокоуровневой обработки или при решении тематических задач. В рамках тематической задачи картографирования актуально объединение цифровых моделей высот, сформированных оптико-электронными системами ДЗЗ путем стереофотограмметрической обработки и радиолокационными системами путем интерферометрии, поскольку каждый из двух способов имеет свои достоинства и недостатки, рассмотренные в параграфе 1.1, а вместе они дополняют друг друга.

В то же время эта проблема исследована мало. Известны лишь алгоритмы заполнения пропусков на ЦМВ одного из видов данными других ЦМВ в трех вариантах [267, 268]:

- 1) данные сторонних ЦМВ используются для уточнения фотограмметрической засечки в малоконтрастных областях [269];
- 2) пропуски на ЦМВ заполняются данными других ЦМВ с бесшовной стыковкой на основе построения корректирующей поверхности [270];
- 3) на основе масок качества нескольких ЦМВ строится интегральная ЦМВ, в каждом пикселе которой отдается большее предпочтение данным той исходной ЦМВ, для которой выше значение маски качества [271].

В то же время алгоритмы объединения разнородных ЦМВ с учетом сильных и слабых сторон стереофотограмметрии и интерферометрии в литературе не изложены.

1.4.2 Анализ алгоритмов сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах. Как было отмечено в параграфе 1.1, двухпроходная дифференциальная интерферометрия не является всепогодной из-за неустранимых атмосферных искажений фазы, основными источниками которых являются пространственные в-

риации концентрации водяного пара и капель жидкой воды в атмосфере. Наличие жидкой воды проявляется в виде облачности. Кучевые облака вносят дополнительную задержку 0,7–3 мм на один километр пути распространения зондирующего импульса [272], которая затем должно интерпретироваться как смещение объектов, загороженных облаками. В [272] приведен пример матрицы смещений, построенной по данным радиолокационных КА «ERS-1» и «ERS-2». Временная база между двумя съемками составляла одни сутки. Никаких чрезвычайных ситуаций за это время не происходило, и истинные смещения должны быть оклонулевыми, однако на матрице наблюдаются значительные пространственные вариации оценок смещений. Анализ метеоданных показал, что все они обусловлены разным расположением кучевых облаков в дни съемок. А если бы на части наблюдаемого участка произошло, например, проседание грунта, то отделить его от атмосферных искажений было бы невозможно без привлечения дополнительной информации.

Поскольку облачность не видна на амплитудных радиолокационных изображениях, проявляясь лишь в виде искажений фазы, но хорошо различима на оптических снимках, то проведение синхронного интерферометрического и оптико-электронного наблюдения потенциально позволяет получить информацию о расположении облачности и отбраковать ложные смещения на результате дифференциальной интерферометрии.

Кроме того, при наличии оптико-электронной и радиолокационной съемочных аппаратур на одном гибридном КА потенциально возможно выполнять предварительную оптическую съемку с положительным углом тангажа, детектировать на полученном снимке наличие или отсутствие облачности и в связи с этим принимать решение о целесообразности энергетически затратного интерферометрического радиолокационного бокового обзора. Для этого необходимы высокоточные и вычислительно эффективные алгоритмы сегментации облачности на оптических изображениях, которые можно реализовать на бортовой вычислительной аппаратуре.

Для сегментации облачности разработано множество алгоритмов, базирующихся на различных принципах:

- 1) на основе колориметрии при мультиспектральной съемке [273];

- 2) на основе стереофотограмметрии при наличии межканального параллакса и опорной цифровой модели высот [274];
- 3) на основе пороговой яркостной обработки и метода k-средних при панхроматической съемке [275];
- 4) на основе пороговой яркостной обработки снимков, снятых в специальных поддиапазонах инфракрасного спектра [276];
- 5) на основе сверточных искусственных нейронных сетей [277–283].

Наиболее высокую точность сегментации при малом объеме вычислений обеспечивают алгоритмы, требующие съемки в специальных поддиапазонах инфракрасного спектра. Однако отечественные технологии производства инфракрасных датчиков для ДЗЗ существенно отстают от зарубежных, и такая съемка не предусмотрена даже на чисто оптико-электронных КА отечественного производства, где она важнее, чем на гибридных КА.

Наиболее простыми съемочными устройствами являются панхроматические датчики, и именно их проще всего установить на гибридный КА в дополнение к радиолокатору. По данным таких приборов лучшие результаты сегментации облачности обеспечивают нейросетевые алгоритмы. За рубежом уже имеется положительный опыт реализации в экспериментальном исполнении наиболее простых нейросетевых алгоритмов сегментации облачности на борту КА «OPS-SAT» и «Phi-Sat-1», однако точность сегментации такими алгоритмами недостаточно высока [284, 285]. В России также имеются технологии производства нейропроцессоров (например, архитектуры «NeuroMatrix» разработки НТЦ «Модуль» [286]), которые потенциально могут быть размещены на борту КА. В то же время нейросетевые архитектуры, обеспечивающие высокое качество сегментации, отличаются большим объемом вычислений. Проблема создания нейросетевых архитектур, обеспечивающих высокое качество сегментации облачности при умеренном объеме вычислений, недостаточно исследована.

1.4.3 Анализ алгоритмов объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты. Как было отмечено в параграфе 1.1, при радиолокационном наблюдении сложной пересеченной местности невозможно

получить качественные данные по всей ее площади: в ряде областей возникает переналожение эхо-сигналов от объектов различной высоты, а ряде областей – затенение. Можно выполнить боковой радиолокационный обзор вправо дважды: один раз с западной стороны на восходящем витке орбиты, а другой раз с восточной стороны на нисходящем витке орбиты. В этом случае расположение областей затенения и переналожения на двух изображениях будет различным (рисунок 1.10). Это позволяет, комбинируя оба ортотрансформированных и геометрически совмещенных изображения, получить объединенный снимок с существенно уменьшенной суммарной площадью областей затенения и переналожения сигналов.

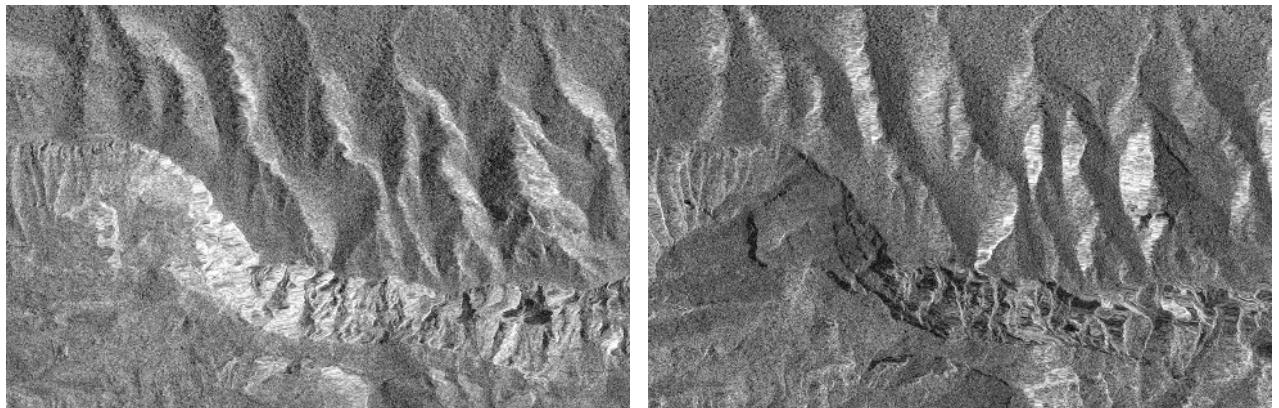


Рисунок 1.10 – Ортотрансформированные радиолокационные изображения одной местности с восходящего и нисходящего витков орбиты

Известен ряд алгоритмов такого объединения [287, 288]. Они построены на четких правилах, описывающих, в каком случае сигнал какого исходного изображения переносится на результат объединения. В алгоритме [287] правилами предусмотрено две ветви: заполнение кодом яркости первого или второго исходного изображения. В алгоритме [288] правилами вводится дополнительная третья ветвь: усреднение яркостей двух изображений. При этом на границе областей, при заполнении которых алгоритм пошел по разным ветвям, наблюдается «шов» – резкий перепад яркости. Правила в рассматриваемых алгоритмах основаны на геометрической модели радиолокационной съемки. Введен четкий критерий принадлежности к области переналожения сигналов: сумма угла падения зондирующих импульсов и

угла восходящего наклона земной поверхности в направлении увеличения дальности по отношению к горизонтали должна быть не меньше 90° . Критерий принадлежности к области затенения сформулирован в [287] следующим образом: угол нисходящего наклона земной поверхности в направлении увеличения дальности по отношению к горизонтали превышает угол падения зондирующих импульсов.

Очевидно, что критерий, предложенный в [287], позволяет выявить далеко не все затенения, поскольку не учитывает загораживание одних объектов другими, которое может быть выявлено только при трассировке лучей. Другим недостатком известных алгоритмов является их высокая чувствительность к детальности опорной цифровой модели высот, по которой рассчитывается наклон земной поверхности. Резкие «швы» на результате объединения пройдут ровно по границам высотных объектов только в случае высокой детальности модели высот. В противном случае на объединенном снимке появятся ложные резкие границы.

В отличие от ряда зарубежных стран, имеющих высокодетальные глобальные модели высот, в России в основном доступны лишь низкодетальные глобальные модели, выложенные в открытый доступ операторами зарубежных систем ДЗЗ. Лишь на отдельные районы построены высокодетальные ЦММ по данным стереофотограмметрической съемки отечественными КА ДЗЗ. В то же время известные методы и алгоритмы объединения, позволяющие избежать появления ложных резких границ при низкой детальности опорных данных о высоте, отсутствуют.

1.4.4 Анализ алгоритмов объединения радиолокационных и оптических изображений. Задача объединения радиолокационных и оптических изображений является частным случаем общей проблемы объединения разноспектральных изображений. В рамках решения общей проблемы разработан ряд алгоритмов объединения на основе трех основных подходов:

- 1) морфологического анализа с целью выявления объектов, различимых в одном диапазоне и незаметных в другом [289, 290];
- 2) пирамidalной обработки изображений, когда на каждом уровне пирамиды выбирается наиболее информативное из объединяемых изображений [291–297];
- 3) нейросетевой обработки [298, 299].

В рамках второго подхода могут применяться пирамиды Гаусса [291], Лапласа [292, 293], FSD [294], вейвлет-преобразование [297].

Общим недостатком данных алгоритмов является высокая вычислительная сложность. Кроме того, алгоритмы являются универсальными и не учитывают особенности объединения радиолокационных и оптических изображений. В [300] предпринята попытка адаптации универсальных алгоритмов к особенностям радиолокации: радиолокационное изображение перед объединением подвергается процедуре фильтрации спекл-шума. Однако другие особенности при этом не учитываются.

В то же время задача объединения с оптическими снимками актуальна в первую очередь при визуальной дешифрации радиолокационных изображений человеком. В процессе решения этой задачи дешифровщик должен иметь возможность изменять параметры объединения, в большей или меньшей степени «подмешивая» к радиолокационным данным привычную для восприятия оптическую информацию. При этом вычислительная сложность объединения должна быть низкой, чтобы визуализируемый дешифровщику результат мог быть обновлен в режиме, близком к реальному времени, в случае изменения параметров объединения. Потенциально эту задачу можно решить путем упрощения известных алгоритмов с учетом особенностей радиолокационной и оптической информации. Однако в известной литературе эта проблема мало исследована. Вычислительно простые алгоритмы объединения изложены в [301], но они не учитывают особенности объединения радиолокационных и оптических данных.

1.5 АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

1.5.1 Выбор актуальных направлений исследований. По результатам проведенного анализа можно выделить ряд актуальных направлений исследований по созданию новых методов и алгоритмов обработки информации от космических

систем радиолокационного наблюдения Земли с привлечением данных от оптико-электронных систем ДЗЗ с целью улучшения качества и увеличения скорости формирования информационных продуктов.

1.5.2 Первое направление исследований. Актуальна задача снижения уровня потерь при заданной степени бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений. В особенности это необходимо в гибридных КА ДЗЗ, имеющих на борту и радиолокационную, и оптико-электронную съемочные аппаратуры. Для радиоголограмм это может быть достигнуто путем неравномерного БАК совместно с энтропийным кодированием. При этом необходима разработка алгоритма выбора оптимальных порогов неравномерного квантования и интегрального критерия оптимизации с учетом повышения отношения сигнал-шум в ходе синтеза изображения из сжатой радиоголограммы при первичной наземной обработке. Для оптических изображений можно добиться более естественного характера артефактов сжатия за счет разработки нейросетевых алгоритмов, пригодных для бортового применения в условиях ограниченной мощности вычислительных средств. Теоретические исследования в данном направлении приведены в первых двух параграфах главы 2.

1.5.3 Второе направление исследований. Как было отмечено в параграфе 1.2, при сбойных ситуациях измерения угловой ориентации, выполняемые оптико-электронными приборами – БОКЗ, могут быть недостаточно точны для качественной первичной обработки радиолокационной информации. Поэтому актуальны исследования по уточнению угловой ориентации на основе анализа изображений, формируемых в результате первичной обработки. В данной задаче можно выделить два поднаправления. Первое – это уточнение углов рысканья и тангажа, необходимых для синтеза изображения из радиоголограммы. Здесь необходима разработка метода на основе совместного уточнения относительного значения доплеровского центроида и доплеровской неопределенности путем амплитудного анализа синтезированных изображений, отличающегося от известных подходов меньшей вычислительной сложностью и большей устойчивостью к начальным ошибкам угловой ориентации. Второе поднаправление – это уточнение угла крена, необходимого для радиометрической коррекции изображения. Здесь необходима разработка метода на основе опре-

деления положения максимума угломестной ДНА при известной ее форме путем амплитудно-дифференциального анализа радиолокационного изображения, отличающегося от известных подходов большей точностью и возможностью применения в однолучевых режимах съемки. Теоретические исследования в рамках указанных под направлений приведены в последних двух параграфах главы 2.

1.5.4 Третье направление исследований. В условиях импортозамещения в российских системах ДЗЗ актуальна задача уточнения привязки радиолокационного изображения по опорному оптическому растровому покрытию при неточной навигационной информации или погрешностях временной привязки пикселей радиолокационного изображения. Здесь необходима разработка алгоритма, позволяющего с пиксельной точностью выявить систематическую ошибку привязки при умеренном объеме вычислений. Также требуются исследования по выбору оптимальных аппроксимирующих моделей координатного соответствия при геометрических преобразованиях и совмещении радиолокационных изображений. Теоретические аспекты данного направления приведены в первых трех параграфах главы 3.

1.5.5 Четвертое направление исследований. Как было отмечено в параграфе 1.4, известные алгоритмы объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты недостаточно точно определяют положение областей затенения, а также приводят к появлению ложных резких границ («швов») при низкой детальности имеющихся в открытом доступе опорных стереофотограмметрических цифровых моделей высот, сформированных зарубежными оптико-электронными системами ДЗЗ, и отсутствии глобального покрытия территорий отечественными высокодетальными моделями высот. В то же время в рамках технологий искусственного интеллекта имеется аппарат нечеткой логики, позволяющий сформировать нестрогие критерии при недостаточной точности исходных данных. Поэтому актуальна разработка метода объединения на основе нечетких критериев выявления областей затенения и переналожения сигналов, позволяющего уменьшить площадь геометрических дефектов на результате объединения без возникновения ложных резких границ. Теоретические основы данного метода изложены в последнем параграфе главы 3.

1.5.6 Пятое направление исследований. Одним из наиболее сложных видов обработки радиолокационной информации является интерферометрия. Как было отмечено в параграфе 1.3, необходима разработка метода сквозной обработки интерферограмм, позволяющего на всех стадиях максимально подготовить интерферограмму к наиболее проблемному этапу обработки – развертыванию фазы – и гарантировать отсутствие глобальных ошибок на результирующей ЦМВ за счет привлечения в качестве опорной информации стереофотограмметрических моделей высот более низкого разрешения. Данный метод изложен в главе 4. Новизна решений, положенных в основу метода, подтверждена патентом РФ [80].

1.5.7 Шестое направление исследований. Перспективной является разработка нейросетевого алгоритма высокоточной сегментации облачности на панхроматическом оптическом изображении, пригодного для реализации на борту гибридного КА ДЗЗ и предназначенного для принятия решения о целесообразности выполнения двухпроходной дифференциальной интерферометрической съемки. Также данный алгоритм может применяться для отбраковки ложных смещений на результатах наземной дифференциальной интерферометрической обработки. Теоретические основы алгоритма приведены в первом параграфе главы 5.

1.5.8 Седьмое направление исследований. Актуальна разработка новых алгоритмов объединения разнородной информации от радиолокационных и оптико-электронных систем ДЗЗ: интерферометрических и стереофотограмметрических ЦММ, радиолокационных и оптических изображений. Целью объединения ЦММ является выявление проблемных территорий для интерферометрии и заполнение их стереофотограмметрическими данными, более точными для данных территорий. Для выявления может быть привлечена опорная информация о наиболее проблемной территории – городской застройке – в виде электронных карт [56, 60]. Целью объединения радиолокационных и оптических изображений является облегчение задачи их дешифрации человеком с возможностью управления параметрами объединения и переформирования его результата в режиме, близком к реальному времени. Теоретические аспекты объединения разнородной информации изложены в последних трех параграфах главы 5.

1.5.9 Восьмое направление исследований. Последнее направление исследований связано с экспериментальным подтверждением эффективности результатов, достигнутых в рамках перечисленных выше направлений, на модельной и натурной информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ. Результаты экспериментальных исследований приведены в главе 6.

Основные результаты

1. Выполнен сравнительный анализ технологий обработки целевой информации в космических системах радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Выявлены общие черты и различия технологий обработки.
2. Проанализированы известные алгоритмы и технологии бортового сжатия радиолокационной и оптической информации, первичной наземной обработки радиолокационных данных, геодезической привязки и стандартной (геометрической) обработки радиолокационных изображений. Выявлены проблемные вопросы бортовой, первичной и геометрической обработок для отечественных систем ДЗЗ в условиях импортозамещения.
3. Проведен анализ алгоритмов и технологий обработки интерферометрических изображений в радиолокационных космических системах ДЗЗ. Выявлен наиболее проблемный этап – развертывание фазы. Определена необходимость тщательной подготовки интерферограммы к развертыванию фазы для достижения максимальной точности формирования цифровых матриц высот.
4. Выполнен анализ алгоритмов и технологий объединения информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Определены проблемные вопросы объединения.
5. На основе выявленных проблемных вопросов сформулированы основные направления диссертационных исследований, направленных на повышение качества и скорости формирования информационных продуктов космических систем наблюдения Земли.

2 МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ БОРТОВОГО СЖАТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И УТОЧНЕНИЯ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

В главе выдвигаются и обосновываются первые два положения, выносимые на защиту. В рамках первого положения описываются алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений с уменьшенными потерями. Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм [62–64] основан на неравномерном блочно-адаптивном квантовании с последующим энтропийным кодированием по Хаффману. Пороги для квантования выбираются с учетом интегрального критерия, учитывающего уровень потерь, среднюю длину кода Хаффмана и улучшение отношения сигнал-шум в ходе синтеза радиолокационного изображения из радиоголограммы. Алгоритм адаптивного бортового сжатия оптических изображений [65, 110] основан на применении искусственных нейронных сетей – автокодировщиков – для базового сжатия с потерями и нейросетевого прогнозирования с энтропийным арифметическим кодированием для дополнительного сжатия без потерь.

В рамках второго положения описываются методы уточнения угловой ориентации КА, измеренной оптико-электронными приборами – БОКЗ, на основе анализа радиолокационных изображений, сформированных в ходе первичной обработки [66–68, 111–113]. Первый метод предназначен для уточнения углов рысканья и тангажа по оценкам относительного значения доплеровского центроида и доплеровской неопределенности, полученным путем амплитудного анализа радиолокационных изображений, синтезированных по субапертурам. Метод отличается повышенной устойчивостью к начальным ошибкам и уменьшенным числом итераций. Второй метод предназначен для уточнения угла крена по оценке положения максимума угломестной ДНА, полученной путем амплитудно-дифференциального анализа радиолокационного изображения при его радиометрической коррекции.

2.1 АЛГОРИТМ БОРТОВОГО СЖАТИЯ РАДИОГОЛОГРАММ С УМЕНЬШЕННЫМИ ПОТЕРЯМИ

2.1.1 Исследование повышения отношения сигнала-шум в результате синтеза изображения из сжатой с потерями радиоголограммы. Проведенный в главе 1 анализ показал, что радиоголограмма сама по себе не имеет ценности, а основным продуктом систем радиолокационного наблюдения Земли является синтезированное изображение. Следовательно, при бортовом сжатии следует исходить не из уровня искажений, вносимых в сигнал радиоголограммы, а из уровня шумов, которые останутся на радиолокационном изображении после процедуры синтеза из искаженной радиоголограммы. Для этого необходимо получить зависимость улучшения отношения сигнала-шум ΔQ от параметров синтеза.

Фильтрация шумов при синтезе изображения происходит в рамках двух процедур: сжатия импульсного отклика по дальности и сжатия по азимуту. Основным параметром обеих процедур, влияющим на фильтрацию шумов, можно считать число отсчетов $N_{c\phi}$ согласованного фильтра, используемого для сжатия импульсного отклика. Именно оно определяет, сколько искаженных отсчетов радиоголограммы вовлекается для формирования сжатого отклика на синтезированном изображении.

Модуляция частоты по азимуту, вызванная эффектом Доплера, имеет квазилинейный характер. Поэтому в случае применения ЛЧМ-импульсов можно считать, что сжатия импульсного отклика в обоих направлениях однотипно влияют на уровень искажений. Таким образом, достаточно найти зависимость $\Delta Q_{L\chi M}(N_{c\phi})$, а улучшение отношения сигнал-шум на изображении в логарифмической шкале выразить как

$$\Delta Q = \Delta Q_{L\chi M}(N_{c\phi R}) + \Delta Q_{L\chi M}(N_{c\phi \eta}), \quad (2.1)$$

где $N_{c\phi R} = T / f_{\text{дискр}}$ – число отсчетов согласованного фильтра по дальности, $N_{c\phi \eta}$ – число отсчетов согласованного фильтра по азимуту.

Поскольку при синтезе изображения из радиоголограммы накопление является когерентным, то оценка, что средний квадрат искажений уменьшается в $N_{c\phi}$ раз, не может быть применена. Для нахождения зависимости $\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{c\phi})$ проведем моделирование в соответствии со следующей схемой:

- 1) возьмем несжатую радиоголограмму $s_{PG}(m, n)$ и синтезируем из нее комплексное изображение $s_{PЛИ}(m, n)$;
- 2) выполним квантование $s_{PG}(m, n)$ с получением квантованного сигнала $s_{PG_{кв}}(m, n)$;
- 3) синтезируем из $s_{PG_{кв}}(m, n)$ изображение $s_{PЛИ_{кв}}(m, n)$;
- 4) рассчитаем отношение сигнал-шум на сжатой радиоголограмме:

$$Q_{PG} = 10 \lg \frac{\sum_{m,n} |s_{PG}(m, n)|^2}{\sum_{m,n} (|s_{PG_{кв}}(m, n)| - |s_{PG}(m, n)|)^2}; \quad (2.2)$$

5) рассчитаем отношение сигнал-шум на изображении, синтезированном из сжатой радиоголограммы:

$$Q_{PЛИ} = 10 \lg \frac{\sum_{m,n} |s_{PЛИ}(m, n)|^2}{\sum_{m,n} (|s_{PЛИ_{кв}}(m, n)| - |s_{PЛИ}(m, n)|)^2}; \quad (2.3)$$

6) найдем улучшение отношения сигнал-шум:

$$\Delta Q = Q_{PЛИ} - Q_{PG}. \quad (2.4)$$

Чтобы перейти от значений ΔQ к зависимости $\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{c\phi})$, необходимо повторить моделирование с разными значениями $N_{c\phi R}$ и $N_{c\phi \eta}$, используемыми при синтезе изображения из радиоголограммы.

Главной проблемой проведения моделирования является отсутствие реальных несжатых радиоголограмм. Поэтому необходима искусственная генерация таких данных. Ее можно осуществить путем нестрогого обращения процедуры синтеза изображения.

Возьмем произвольное комплексное радиолокационное изображение. Если строго обратить процедуру его синтеза, то будет восстановлена исходная радиограмма, подверженная квантованию на борту КА. Однако можно провести обращение синтеза с несколько измененными параметрами, это даст на выходе радиограмму, несколько отличающуюся от реальной, зато ее энтропия не будет снижена. Действительные отсчеты квадратурных составляющих сигнала полученной радиограммы необходимо округлить до ближайшего целого в соответствии с типовой разрядностью аналого-цифрового преобразователя в современных РСА – 8 бит. Для сокращения объема вычислений при моделировании можно не обращать процедуру устранения миграции по каналам дальности, которая никак не влияет на уровень шумов квантования, а при обращении сжатия по азимуту считать временной закон изменения доплеровской частоты строго линейным.

В соответствии с описанной схемой генерации несжатых радиограмм было проведено моделирование с использованием комплексных изображений от КА «TerraSAR-X» и «RadarSat-2». При моделировании фиксировалось значение $N_{c\phi\eta}=2660$, а значение $N_{c\phi R}$ изменялось в диапазоне от 150 до 27000. Квантование квадратурных составляющих сигнала радиограммы выполнялось блочно-адаптивно до 5 бит с равномерным шагом. Было установлено, что при увеличении $N_{c\phi R}$ отношение сигнал-шум на синтезированном изображении растет, но конкретное значение ΔQ и скорость его роста зависят от сюжета изображения. Графики зависимости ΔQ от $\lg N_{c\phi R}$ при $N_{c\phi\eta}=2660$ для нескольких различных изображений приведены на рисунке 2.1.

При малых $N_{c\phi R}$ разброс значений ΔQ для различных изображений составляет порядка 0,5 дБ, при больших $N_{c\phi R}$ разброс увеличивается в несколько раз. Тем не менее, можно ввести зависимость $\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{c\phi})$, описывающую, как отношение сигнал-шум увеличивается в среднем по изображениям. В качестве такой зависимости при $150 \leq N_{c\phi} \leq 27000$ предлагается:

$$\Delta Q_{ЛЧМ}(N_{c\phi}) \approx 1,15 + 0,12 \lg N_{c\phi} + 0,0265 (\lg N_{c\phi} - 2,5)^6. \quad (2.5)$$

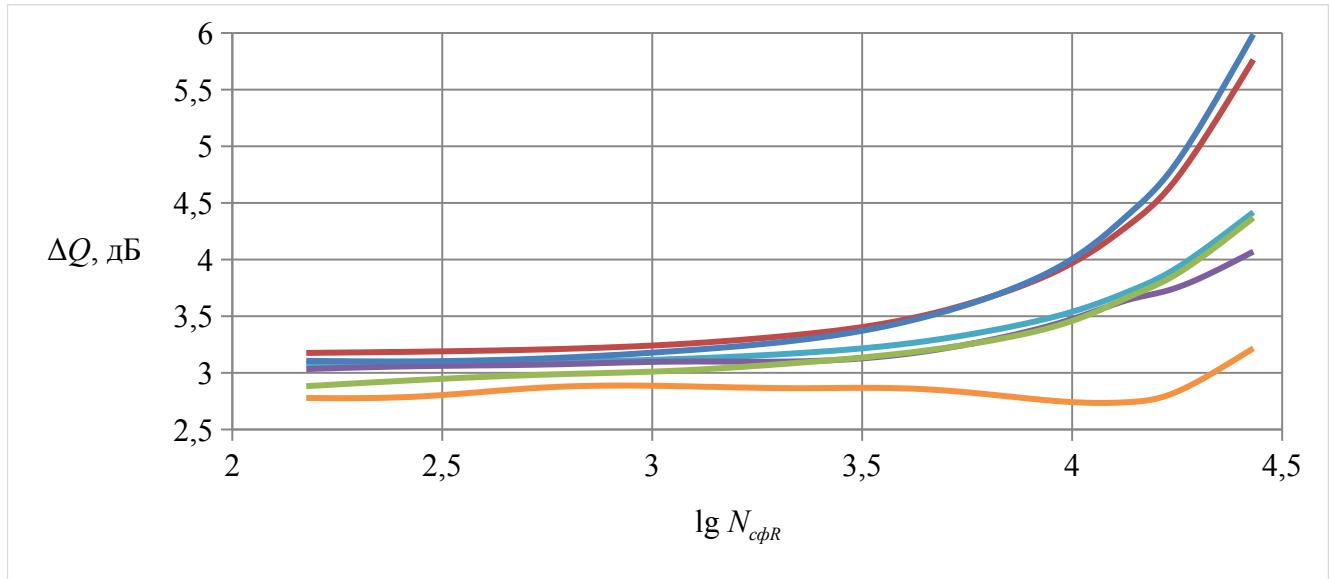


Рисунок 2.1 – Зависимость улучшения отношения сигнала-шум после синтеза от размера фильтра сжатия по дальности для различных изображений

График зависимости (2.5) приведен на рисунке 2.2.

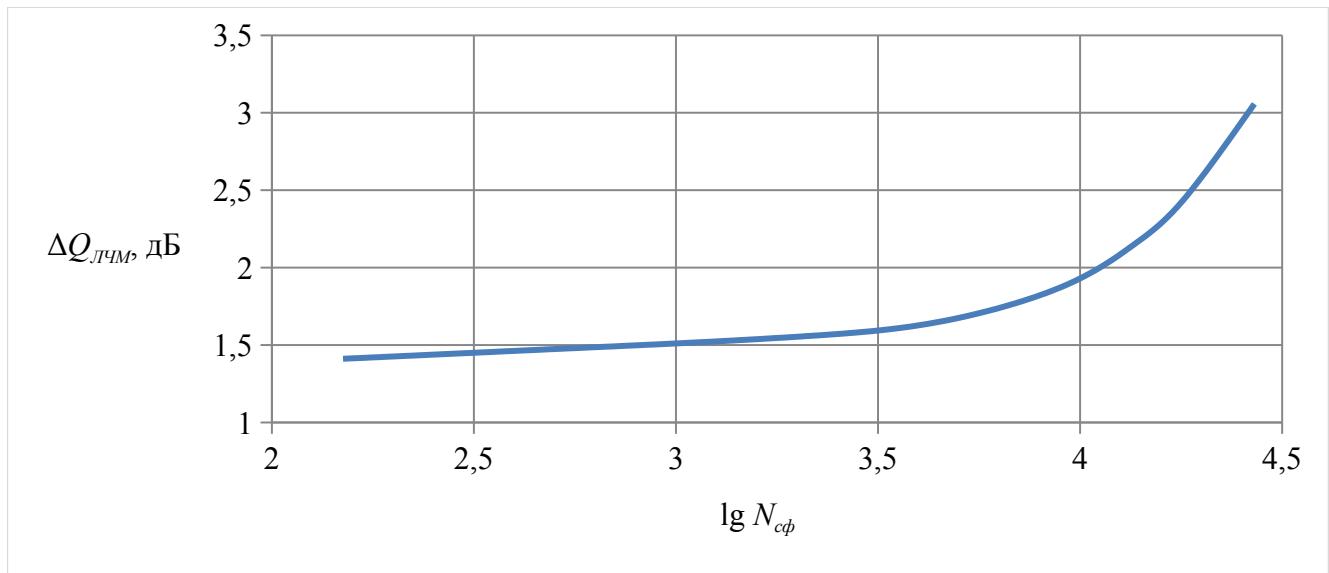


Рисунок 2.2 – Усредненная зависимость улучшения отношения сигнала-шум в ходе одного из этапов синтеза от размера согласованного фильтра

2.1.2 Алгоритм расчета оптимальных порогов неравномерного квантования. После того как найдена усредненная зависимость улучшения отношения сигнала-шум от параметров сжатия импульсного отклика РСА, может быть сформулирован критерий оптимального выбора порогов блочно-адаптивного квантования

квадратурных составляющих сигнала радиоголограммы: отношение сигнал-шум на синтезированном изображении, деленное на среднюю длину кода отсчета квадратурной составляющей, должно быть максимальным:

$$F_{cyc PT} = \frac{Q_{PLI}}{L_{Xa\phi}} \rightarrow \max. \quad (2.6)$$

Отношение сигнал-шум на синтезированном изображении определяется средним квадратом ошибки квантования $D_{\kappa\kappa}$ квадратурных составляющих сигнала радиоголограммы, улучшением $\Delta Q(N_{c\phi R}, N_{c\phi \eta})$ в ходе когерентной обработки радиоголограммы и количеством некогерентных накоплений (усреднений квадрата амплитуды без учета фазы) N_{nn} :

$$Q_{PLI} = -10 \lg D_{\kappa\kappa} + \Delta Q_{PLM}(N_{c\phi R}) + \Delta Q_{PLM}(N_{c\phi \eta}) + 10 \lg N_{nn}. \quad (2.7)$$

Некогерентное накопление уменьшает дисперсию некоррелированного шума в N_{nn} раз и применяется при формировании амплитудного радиолокационного изображения уровня 1Б, когда шаг квантования по одному из измерений оказывается существенно меньше, чем по другому измерению, и проекция пикселя изображения на земную поверхность приводится к квадратному виду. При формировании комплексного радиолокационного изображения уровня 1А $N_{nn}=1$.

Значения $N_{c\phi R}$, $N_{c\phi \eta}$ и N_{nn} могут отличаться в разных режимах съемки. Поэтому расчет оптимальных пороговых значений квантователя целесообразно выполнять независимо для каждого режима.

Средняя длина кода Хаффмана $L_{Xa\phi}$ может быть найдена после построения дерева кодирования как

$$L_{Xa\phi} = \sum_{k=0}^{N_{yp}-1} P_k L_{Xa\phi k}, \quad (2.8)$$

где $L_{Xa\phi k}$ – длина кода k -го уровня квантования.

Более эффективным, но более сложным вариантом энтропийного кодирования является арифметическое кодирование. В нем, в отличие от кодирования по Хаффману, средняя длина кода всегда максимально приближена к энтропии. Одна-

ко в данной задаче нет смысла переходить на арифметическое кодирование, поскольку, изменения пороги квантования, можно управлять законом распределения вероятностей уровней квантования и в результате оптимизации по критерию (2.6) подобрать такое распределение, при котором P_k близки к обратным степеням двойки и $L_{X\alpha\phi} \rightarrow H_{\kappa\sigma}$.

Для нахождения оптимальных порогов квантования t_k по критерию (2.6) предлагается следующий итерационный алгоритм, являющийся адаптацией метода покоординатного спуска к решаемой задаче и ограничениям $t_k < t_{k+1}$.

Шаг 1. Выбирается точность ∂t определения величин t_k .

Шаг 2. Назначаются начальные значения t_k с помощью равномерного квантования на отрезке $[-3, 3]$: $t_k = (k-1)\Delta t - 3$, где $\Delta t = 6/(N_{yp} - 2)$, $k = \overline{1, N_{yp} - 1}$. При $N_{yp} = 2$ возникает деление на нуль. В этом случае за счет симметричности распределения единственному порогу t_k назначается нулевое значение, а дальнейшие шаги алгоритма не выполняются.

Шаг 3. Для уменьшения объема вычислений сначала по критерию (2.6) методом градиентного спуска ищется оптимальный шаг Δt равномерного квантования с назначением уточненных порогов как $t_k = (k-1 - 0,5(N_{yp} - 2))\Delta t$.

Шаг 4. Выбирается одна из точек t_k , $k = \overline{1, N_{yp} - 1}$, перемещение которой на ∂t влево или вправо по числовой оси при соблюдении условия $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$ обеспечивает наибольшее увеличение целевой функции $F_{cж PG}$. Обозначим выбранную точку $t_{k\max}$. Если для всех точек перемещение недопустимо или не обеспечивает увеличение $F_{cж PG}$, работа алгоритма завершается, а значения порогов t_k признаются оптимальными.

Шаг 5. Выполняется последовательное перемещение точки $t_{k\max}$ на величину ∂t в выявленном на предыдущем шаге направлении увеличения $F_{cж PG}$, пока выполняется условие $t_{k\max-1} < t_{k\max} < t_{k\max+1}$ и наблюдается увеличение $F_{cж PG}$.

Шаг 6. Выполняется переход к шагу 4.

Поскольку расчет $F_{cjk\text{ }PG}$ является вычислительно сложной задачей, требующей многократного численного интегрирования для получения $D_{k\theta}$ и построения дерева кодирования по Хаффману для получения L_{Xaf} , при большом числе уровней квантования N_{yp} оптимизация может выполняться несколько часов на современной рабочей станции. Однако такие сложные вычисления могут быть сделаны однократно для каждого режима съемки при проектировании КА. Их результаты в виде наборов пороговых значений t_k для различных N_{yp} и режимов съемки могут быть заложены в память бортового вычислительного устройства.

2.1.3 Алгоритмы бортового сжатия и наземной распаковки радиограммы. С учетом того, что расчет оптимальных t_k заранее выполняется на Земле, алгоритм сжатия радиограммы на борту КА может быть следующим.

Шаг 1. Из строки радиограммы выбирается блок данных из N_{bl} комплексных отсчетов.

Шаг 2. В пределах блока оцениваются СКО действительной и мнимой квадратурных составляющих комплексного сигнала. Полученная пара значений СКО квантуется и в виде пары целочисленных кодов записывается в выходной поток.

Шаг 3. В соответствии со значениями СКО, априорными сведениями об уровне теплового шума и об увеличении отношения сигнал-шум ΔQ при синтезе изображения для текущего режима съемки выбирается число уровней квантования N_{yp} , загружаются из памяти значения порогов t_k .

Шаг 4. Отсчеты действительных сигналов квадратурных составляющих делятся на соответствующие им СКО и неравномерно квантуются с назначением уровня k из условия $t_k < x \leq t_{k+1}$. В соответствии с назначенными уровнями k и деревом кодирования по Хаффману в выходной поток записываются коды переменной длины соответствующих уровней квантования.

Шаг 5. Осуществляется переход к шагу 1.

Вычислительная сложность описанного алгоритма совпадает со сложностью алгоритма FDBAQ, разработанного для КА «Sentinel-1» [191], но неравномерное квантование должно уменьшить уровень искажений для выбранной степени сжатия.

тия, а учет режима съемки и величины ΔQ позволяет более гибко управлять уровнем потерь.

Алгоритм наземной распаковки сжатой на борту радиоголограммы следующий.

Шаг 1. Определяется размер блока N_{bl} , записанный в составе метаданных или в документации на КА.

Шаг 2. Из сжатого потока извлекаются целочисленные коды СКО квадратурных составляющих в пределах блока. Целочисленным кодам сопоставляются действительные значения СКО.

Шаг 3. В соответствии со значениями СКО по тому же критерию, что и на борту КА, определяется число уровней квантования N_{yp} , загружаются из памяти заранее рассчитанные значения \bar{x}_k .

Шаг 4. С использованием дерева Хаффмана выполняется последовательное извлечение из сжатого потока кодов уровней квантования переменной длины. Каждому декодированному уровню квантования ставится в соответствие значение \bar{x}_k , умноженное на соответствующее СКО. Всего извлекается $2N_{bl}$ кодов переменной длины, из которых формируется N_{bl} отсчетов распакованного комплексного сигнала радиоголограммы.

Шаг 5. Осуществляется переход к шагу 2.

2.1.4 Теоретическая оценка снижения уровня потерь при использовании предложенного алгоритма бортового сжатия радиоголограмм. Исходя из представлений о стандартном нормальном распределении значений нормализованных квадратурных составляющих сигнала радиоголограммы можно получить теоретическую оценку уровня потерь, вносимых предлагаемым алгоритмом, в сравнении с FDBAQ и квантователем Ллойда–Макса, дополненным кодированием по Хаффману.

Поскольку результаты оптимизации (2.6) зависят от параметров синтеза изображения из радиоголограммы, в рамках теоретической оценки выбраны типовые размеры фильтров для маршрутного режима съемки в X-диапазоне с про-

странным разрешением порядка 2 м: $N_{c\phi\eta}=2660$ и $N_{c\phi R}=9000$. Предполагается также, что некогерентное накопление не выполняется, т.е. $N_{hh}=1$.

Для квантователя Ллойда–Макса и предлагаемого алгоритма при различных N_{yp} рассчитаны пороговые значения t_k и построены деревья кодирования по Хаффману. Для FDBAQ деревья кодирования взяты из документации на КА «Sentinel-1», а значения t_k восстановлены по значениям \bar{x}_k , приведенным в документации [302].

Для квантователя Ллойда–Макса значения N_{yp} ограничены степенями двойки, поскольку его обычно применяют для равномерного кодирования целым числом бит. Для FDBAQ N_{yp} ограничены значениями, применяемыми в КА «Sentinel-1».

С использованием выражений (1.2), (1.3), (1.4), (2.5), (2.7) и (2.8) найдены теоретические оценки $Q=-10 \lg D_{\kappa\theta}$, Q_{PLI} и $L_{Xa\phi}$, приведенные в таблице 2.1. Величина $L_{Xa\phi}$ определяет степень сжатия радиоголограммы. Если пренебречь записью в выходной поток параметров нормализации сигнала в пределах блока, достигнутая степень сжатия равняется $L_{AЦП}/L_{Xa\phi}$, где $L_{AЦП}$ – исходная разрядность отсчетов квадратурных составляющих комплексного сигнала радиоголограммы. Типовые значения $L_{AЦП}$ для современных радиолокаторов составляют 8–10 бит.

На рисунке 2.3 приведены графики зависимости Q_{PLI} от $L_{Xa\phi}$ для сравниваемых квантователей. Видно, что наихудшие результаты обеспечивает квантователь Ллойда–Макса, поскольку при его построении никак не учитывается возможность дальнейшего энтропийного сжатия. Предлагаемый алгоритм обеспечивает наименьший теоретический уровень амплитудных искажений на синтезированном изображении при заданной степени сжатия, превосходя FDBAQ по достигнутому отношению сигнал–шум на 0,1–0,4 дБ. Это соответствует уменьшению на 1–5 % среднеквадратической ошибки отсчетов амплитуды сигнала на изображении.

Таблица 2.1 – Теоретические потери при сжатии и средняя длина кода для различных квантователей

N_{up}	Квантователь Ллойда–Макса с кодированием по Хаффману			FDBAQ			Предлагаемый алгоритм		
	$L_{Хаф}$, бит	Q , дБ	Q_{PLI} , дБ	$L_{Хаф}$, бит	Q , дБ	Q_{PLI} , дБ	$L_{Хаф}$, бит	Q , дБ	Q_{PLI} , дБ
4	1,99	9,3	12,7	—	—	—	1,79	8,7	12,1
8	2,88	14,6	18,0	2,57	13,2	16,6	2,45	12,9	16,3
10	—	—	—	2,80	14,9	18,3	2,49	13,1	16,5
14	—	—	—	3,22	17,4	20,8	2,82	15,2	18,6
16	3,81	20,2	23,6	—	—	—	2,82	15,2	18,6
20	—	—	—	3,62	20,1	23,5	3,43	19,0	22,4
32	4,76	26,0	29,4	4,24	23,7	27,1	3,97	22,1	25,6
36	—	—	—	—	—	—	4,19	23,5	26,9

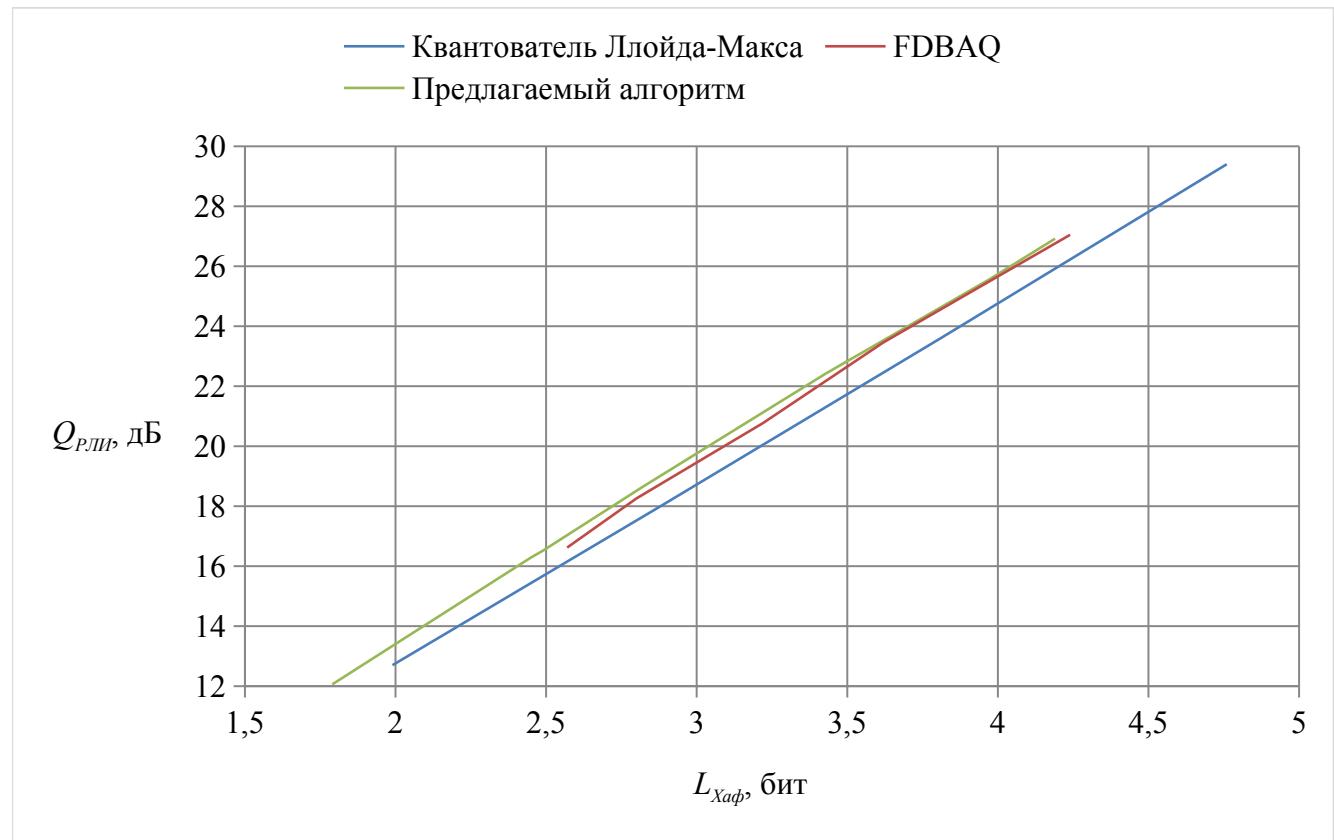


Рисунок 2.3 – Теоретическая зависимость отношения сигнал-шум на синтезированном изображении от средней длины кода отсчета сжатой радиоголограммы для различных квантователей

На практике распределение значений квадратурных составляющих сигнала радиоголограммы может отклоняться от нормального закона, поэтому также необходимо экспериментальное оценивание эффективности предложенного алгоритма сжатия радиоголограмм. Оно выполняется в главе 6.

2.2 АЛГОРИТМ БОРТОВОГО АДАПТИВНОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО СЖАТИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УМЕНЬШЕННЫМИ ПОТЕРЯМИ

2.2.1 Выбор базовой нейросетевой архитектуры автокодировщика для бортового сжатия оптических изображений с потерями. Как было отмечено в главе 1, известные нейросетевые архитектуры автокодировщиков отличаются слишком высокой вычислительной сложностью. Для разработки более простой архитектуры, пригодной для применения на борту КА ДЗЗ, проанализируем известные архитектуры автокодировщиков в сравнении с детерминированными алгоритмами.

Известные автокодировщики на базе сверточных искусственных нейронных сетей (ИНС) имеют следующие общие черты. В них выполняется несколько последовательных сверток сигнала. Результаты сверток постепенно прореживаются по строкам и столбцам, а число каналов в изображении увеличивается. После прохождения нескольких сверточных слоев получается в несколько раз прореженное изображение с большим числом каналов. При этом в конце концов отношение текущего числа каналов к исходному оказывается меньше, чем квадрат коэффициента прореживания. За счет этого достигается уменьшение объема изображения. Для дополнительного уменьшения объема обычно выполняется квантование значений сигнала в пикселях сжатого изображения. Описанная часть ИНС представляет собой кодировщик. Декодировщик включает те же сверточные слои, расположенные в обратном порядке и чередующиеся с операцией «Depth to space». Указанная операция увеличивает число строк и столбцов изображения и уменьшает число каналов, заполняя новые строки данными отбрасываемых каналов. В результате восстанавливается изображение с исходным числом строк, столбцов и каналов. Выполнение в сверточных ИНС нескольких последовательных сверток с прорежи-

ванием позволяет построить пирамиду изображений, что имеет некоторое сходство с вейвлет-преобразованием, используемым в алгоритме JPEG2000, и учитывает растровую структуру изображения.

В алгоритме JPEG2000 используются одномерные фильтры из 7 и 9 элементов (вейвлеты Коэна–Добеши–Фово 9/7 [303]), применяемые сначала к строкам, а затем к столбцам изображения. Таким образом, преобразование фактически сводится к свертке в окне 9×9 , которая описывается всего $9+7=16$ коэффициентами. Свертка в пределах окна большой площади позволяет снизить влияние погрешностей квантования сигнала верхнего уровня пирамиды на сигнал в отдельном пикселе нижнего уровня пирамиды после восстановления сжатого изображения.

Известные архитектуры автокодировщиков на каждом уровне пирамиды используют существенно большее число коэффициентов, но выполняют свертку с фильтрами меньшей апертуры (3×3 или 5×5) в рамках операции «Conv2D»:

$$x_{\text{вых}}(m, n, k_{\text{вых}}) = f_{\text{акт}} \left(b(k_{\text{вых}}) + \sum_{k_{\text{вх}}, k, l} x_{\text{вх}}(m+k, n+l, k_{\text{вх}}) a(k_{\text{вх}}, k, l, k_{\text{вых}}) \right), \quad (2.9)$$

где $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$ – многоканальные изображения на входе и выходе операции, $a(k_{\text{вх}}, k, l, k_{\text{вых}})$ – гиперкуб мультипликативных весовых коэффициентов операции, $b(k_{\text{вых}})$ – набор аддитивных весовых коэффициентов, $f_{\text{акт}}$ – функция активации.

Для сокращения объема вычислений решено операцию «Conv2D» (свертки) заменить двумя операциями «DepthwiseConv2D» (поканальной свертки) в окнах 9×1 и 1×9 соответственно. Операция «DepthwiseConv2D» для формирования выходного канала изображения использует только один канал входного изображения, что существенно сокращает число весовых коэффициентов:

$$x_{\text{вых}}(m, n, k_{\text{вх вых}}) = f_{\text{акт}} \left(b(k_{\text{вх вых}}) + \sum_{k, l} x_{\text{вх}}(m+k, n+l, k_{\text{вх вых}}) a(k, l, k_{\text{вх вых}}) \right). \quad (2.10)$$

Кроме того, выполнен отказ от избыточного числа каналов на промежуточных уровнях пирамидального преобразования. На каждом последующем уровне число каналов увеличивается в 4 раза с одновременным прореживанием по стро-

кам и столбцам в 2 раза и сохранением общего объема данных. По окончании пирамидального преобразования на верхнем уровне пирамиды выполняется дополнительная свертка сигнала с уменьшением числа каналов и последующим квантованием с целью сокращения объема данных.

Поскольку при сжатии с потерями в первую очередь деградирует высокочастотная составляющая сигнала изображения, решено добавить в архитектуру автокодировщика слой коррекции этой составляющей. Он заключается в поканальной свертке сигнала в окне 5×5 с фильтром, сумма коэффициентов которого равна нулю, и прибавлении результата свертки к исходному сигналу.

Перед кодированием выполняется нормализация яркостей изображения, а в конце декодирования – денормализация. Также в начале и в конце автокодировщика выполняется операция «Conv2D» в окне 1×1 , являющаяся аналогом преобразования цветового пространства изображения в алгоритмах JPEG и JPEG2000. Полученная базовая архитектура автокодировщика приведена на рисунке 2.4.

2.2.2 Разработка семейства кодировщиков для адаптивного бортового сжатия оптических изображений с контролем потерь. Недостатком известных адаптивных нейросетевых подходов к сжатию является возникновение блочных артефактов при переключении степени сжатия. Это связано с тем, что для каждой степени сжатия автокодировщики работают с разными весовыми коэффициентами во всех слоях. Чтобы избежать влияния краевых эффектов на свертки, выполняемые при декодировании сжатого изображения, требуется записывать в сжатый поток избыточные данные, что отрицательно сказывается на степени сжатия. В противном случае на границах блоков возникают краевые эффекты, увеличивающие уровень искажений при сжатии и хорошо заметные глазу.

Для устранения этого эффекта предлагается принципиально новый подход к обучению ИНС для сжатия с потерями: обучение семейства взаимосогласованных по весовым коэффициентам кодировщиков для каждой степени сжатия с единым декодировщиком.

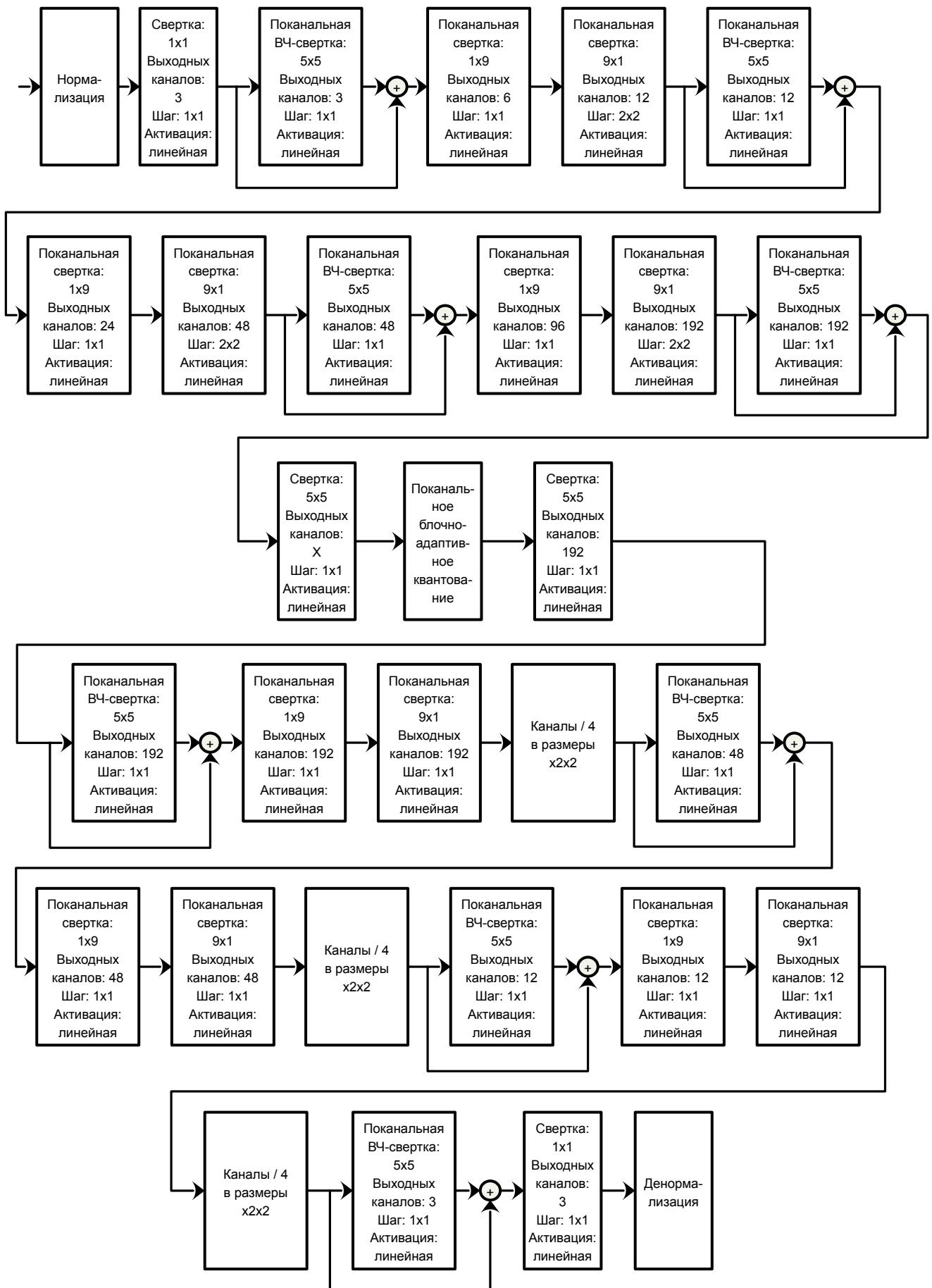


Рисунок 2.4 – Предлагаемая базовая архитектура автокодировщика

Все кодировщики в рамках семейства имеют одни и те же весовые коэффициенты для пирамидального преобразования изображения и отличаются друг от друга лишь на последнем уровне. Последние уровни кодировщиков формируют разное число X выходных каналов. При этом весовые коэффициенты кодировщика с большей степенью сжатия, формирующего меньшее число выходных каналов, целиком включаются в состав выходного слоя кодировщика с меньшей степенью сжатия, формирующего те же выходные каналы, а также ряд дополнительных выходных каналов.

Декодировщик формируется единый для всех кодировщиков и принимает на вход максимальное количество квантованных каналов сжатого изображения. Единый декодировщик позволяет из всех сжатых блоков собрать единое сжатое изображение. Если при некоторой степени сжатия в блоке формируется меньшее число каналов, недостающие каналы заполняются нулями. В этом также прослеживается сходство с алгоритмами JPEG/JPEG2000, в которых обнуляется часть коэффициентов. Единое сжатое изображение преобразуется декодировщиком в результат распаковки, на котором отсутствуют блочные артефакты, поскольку резкая граница между нулевым и ненулевым сигналом соседних блоков размывается в ходе сверток, выполняемых декодировщиком.

Основные трудности возникают с обучением такого семейства нейронных сетей. Добиться минимума потерь на всех степенях сжатия крайне затруднительно, поскольку для этого требуется многокритериальная оптимизация по нескольким выходам нейронной сети. В связи с этим предлагается «жадный» алгоритм обучения.

Сначала подбираются коэффициенты пирамидального преобразования изображения, обеспечивающие минимальное влияние шумов квантования сигнала верхнего уровня пирамиды на восстановление изображения на нижнем уровне. Для этого строится и обучается базовый автокодировщик, не выполняющий сжатие изображения за счет уменьшения числа каналов. Сжатие в нем выполняется только лишь за счет квантования сигнала верхнего уровня пирамиды с минимальным числом бит. В качестве такого числа бит выбрано 4.

Для обучения семейства кодировщиков последовательно составляются и обучаются автокодировщики с разным числом выходных каналов в слое перед блочно-адаптивным квантованием. Первым обучается автокодировщик с максимальной степенью сжатия (минимальным числом каналов, равным 12, каждый из которых адаптивно квантуется 4 битами на отрезке от минимального до максимального значения сигнала в пределах блока). Границы адаптивного квантования в пределах блока вместе с собственно квантованными значениями записываются в выходной поток по аналогии с алгоритмами сжатия радиоголограмм.

При обучении такого автокодировщика в начальные и конечные слои сети загружаются и фиксируются весовые коэффициенты, полученные для базового автокодировщика, обученного ранее, а обучение выполняется только для двух средних слоев, соседних со слоем квантования.

Для следующего автокодировщика число каналов на выходе слоя перед квантованием и на входе слоя после квантования увеличивается до 24. Каждый канал по-прежнему квантуется 4 битами. В слои данного автокодировщика загружаются и фиксируются весовые коэффициенты от предыдущей сети. В средних слоях новой сети число весовых коэффициентов увеличивается. Поэтому в них загружается и фиксируется лишь часть весов, а оставшаяся часть подбирается в ходе обучения. Таким образом, новый кодировщик формирует те же 12 каналов сжатого изображения, что и предыдущий, а также 12 новых каналов, позволяющих более точно восстановить исходное изображение из сжатого.

Для следующего автокодировщика число каналов составляет 36. Первые 24 канала квантуются 5 битами и формируются с теми же весами, что и в предыдущей сети, а дополнительные 12 каналов формируются с весами, подбираемыми в ходе обучения, и квантуются 6 битами.

Для последнего автокодировщика число каналов составляет 60. Первые 36 каналов квантуются 6 битами, а дополнительные 24 канала – 7 битами. Таким образом, сигнал от каждого следующего кодировщика целиком включает в себя сигналы от всех предыдущих кодировщиков, лишь менее грубо их квантую и дополняя новыми каналами, содержащими поправки для более точного восстановления

исходного изображения. Вторая половина слоев последнего автокодировщика образует единый декодировщик адаптивно сжатого изображения.

Объемы данных на выходе кодировщиков составляют 0,75, 1,5, 3 и 6 бит на пиксель исходного мультиспектрального 3-канального изображения. Эксперименты показали, что среднеквадратическая ошибка восстановления исходного изображения по сжатым данным от каждого следующего кодировщика уменьшается примерно в 1,4 раза по сравнению с предыдущим.

2.2.3 Алгоритм предварительного адаптивного бортового сжатия оптических изображений с контролем потерь. Для работы предлагаемого нейросетевого сжатия на борту КА необходимо предварительно сформировать мультиспектральное изображение с пространственно совмещенными спектральными каналами, т.е. перенести на борт КА один из этапов первичной наземной обработки. Так же целесообразно перед сжатием применять на борту КА радиометрическую коррекцию изображения.

Независимое сжатие изображений отдельных спектральных каналов не позволяет учесть межканальную корреляцию. В таких условиях и детерминированные, и нейросетевые алгоритмы менее эффективны. Причем, как показывают экспериментальные исследования, при сжатии одноканальных изображений преимущества нейросетевых алгоритмов перед детерминированными теряются. Поэтому перенос на борт КА отдельных этапов первичной обработки оптических изображений – необходимое условие для эффективного функционирования предлагаемого алгоритма сжатия, который сводится к следующим действиям.

Шаг 1. Сжимаемое изображение делится на блоки $N_{\delta_l} \times N_{\delta_l}$ пикселей.

Шаг 2. Сигнал блока пропускается через последний обученный кодировщик, выполняющий минимальное сжатие.

Шаг 3. Выполняется адаптивное квантование 4 битами 12 каналов на выходе кодировщика, соответствующих максимальному сжатию, и отбрасывание (обнуление) остальных каналов.

Шаг 4. Полученный сигнал пропускается через декодировщик, сигнал на выходе которого сопоставляется с блоком исходного изображения с вычислением потерь при сжатии.

Шаг 5. Если потери слишком велики, то от сигнала, сформированного кодировщиком, оставляется большее количество каналов и вновь выполняется декодирование с оценкой потерь. Шаг 5 повторяется до достижения либо приемлемых потерь, либо минимально предусмотренной степени сжатия.

Шаг 6. После определения необходимой степени сжатия на шаге 5 квантованные отсчеты каналов на выходе кодировщика записываются в выходной поток вместе с границами диапазона квантования и кодом степени сжатия.

Шаг 7. Выполняется переход к следующему блоку и шагу 2.

В дополнение к описанному процессу может выполняться учет вспомогательных признаков. Если имеется маска малоинформационных объектов на снимке (например, облачности), а сигнал сжимаемого блока целиком соответствует малоинформационным объектам, то выбирается максимальная степень сжатия без контроля потерь.

Поток данных на выходе описанного алгоритма предварительного сжатия может быть дополнительно без потерь уменьшен в объеме на следующем этапе бортовой обработки.

2.2.4 Алгоритм дополнительного бортового сжатия оптических изображений без потерь. Дополнительное сжатие без потерь выходного потока семейства кодировщиков может быть осуществлено на основе энтропийного кодирования и нейросетевого предсказания значения следующего отсчета сигнала по предыдущим значениям. Такой подход позволяет добиться большей степени сжатия без потерь, чем детерминированные алгоритмы.

Экспериментальные исследования показали, что традиционные архиваторы WinRAR и 7Zip уменьшают объем выходного потока семейства кодировщиков всего на ~5 %, а лучшие из имеющихся детерминированных алгоритмов (МСМ и BSC [304]) – на 10–11 %. В то же время с помощью открытого алгоритма нейросетевого сжатия без потерь DeepZIP [184] удалось уменьшить объем на ~20 %.

При этом был поставлен эксперимент, в рамках которого ИНС, используемая для предсказания в DeepZIP, была обучена по одной пятой части выходного потока семейства кодировщиков, а затем применена ко всему потоку данных. Достигнутая степень сжатия оказалась сопоставима как для пятой части потока, по которой выполнялось обучение, так и для потока целиком. Это позволило сделать вывод, что нейронную сеть-предсказатель достаточно обучить один раз, а затем многократно использовать для сжатия выходного потока семейства кодировщиков и тем самым существенно уменьшить вычислительную сложность нейросетевого сжатия без потерь.

В составе нейронных сетей-предсказателей в настоящее время используются следующие слои: рекуррентные слои (LSTM, GRU) и полносвязные слои. По результатам экспериментальной отработки с помощью алгоритма DeepZIP, поддерживающего несколько различных архитектур сети-предсказателя, установлено, что наилучшее предсказание следующего отсчета в выходном потоке семейства кодировщиков обеспечивает нейронная сеть на базе полносвязных слоев. Достигнутый объем данных получается на 1 % ниже, чем при использовании слоев LSTM и GRU, при этом объем вычислений оказывается в 2 раза меньше.

Следующим шагом по повышению степени сжатия без потерь стал учет структуры сжимаемого потока данных. В нем выделяются отсчеты отдельных каналов на выходе кодировщиков, и за счет этого предсказывается не следующий байт данных, а следующий квантованный отсчет в каждом канале. Для этого ИНС-предсказатель использует значения каналов предыдущего пикселя и значения предыдущих каналов текущего пикселя. Причем для предсказания отсчетов в каждом канале используется отдельная ИНС.

В результате с помощью набора ИНС на базе полносвязных слоев, каждая из которых была обучена по отдельному каналу в потоке данных, достигнуто на несколько процентов большее уменьшение объема данных, чем у DeepZIP. При этом в каждом отдельном предсказателе удалось уменьшить число нейронов без существенного снижения достигаемой степени сжатия.

В итоге, наилучшим образом учитя структуру сжимаемых данных, удалось добиться высокой степени сжатия без потерь при небольших вычислительных затратах и умеренном потреблении оперативной памяти. Достигнутая степень сжатия лишь немногим уступает лучшему на сегодняшний день алгоритму сжатия без потерь NNCP [182], использующему ИНС-трансформер и требующему на несколько порядков больших затрат.

Архитектура семейства поканальных предсказателей на основе полносвязных ИНС представлена на рисунке 2.5, где b – число бит, которыми квантуются отсчеты сигнала отдельного канала на выходе кодировщика с потерями. Размерность сигнала, подаваемого на вход предсказателя, равняется числу каналов при заданной степени сжатия.

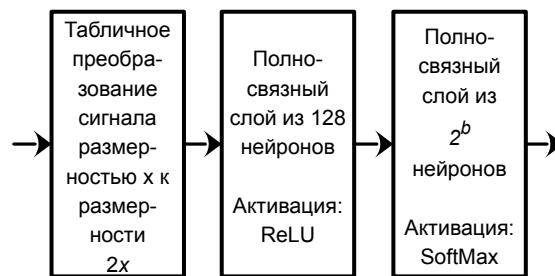


Рисунок 2.5 – Предлагаемая архитектура семейства предсказателей

Алгоритм дополнительного нейросетевого сжатия без потерь следующий.

Шаг 1. Для каждого блока сжатых с потерями данных читается код степени сжатия. В соответствии с ним определяются число каналов в блоке данных и разрядность квантованных отсчетов сигнала в каждом канале. Служебная информация блока данных (код степени сжатия и значения границ диапазона квантования) ретранслируется в окончательно сжатый поток данных без изменения.

Шаг 2. Перед обработкой каждого следующего отсчета в k_{cyc} -м канале потока данных, где $k_{cyc} = \overline{0, K_{cyc}-1}$, запускается соответствующая нейронная сеть-предсказатель, на вход которой подаются значения в последних $(K_{cyc} - k_{cyc})$ каналах предыдущего пикселя сжатого изображения и в первых k_{cyc} каналах текущего пикселя. За счет применения активационной функции «SoftMax» ИНС выдает ги-

стограмму распределения апостериорной вероятности возможных значений следующего отсчета.

Шаг 3. Из сжимаемого потока данных извлекается реальное значение следующего отсчета и арифметически кодируется с учетом вероятности этого значения, предсказанной ИНС. Для первых отсчетов в блоке, для которых еще не известны предыдущие отсчеты, все значения признаются равновероятными.

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются для всех отсчетов всех каналов в блоке данных. Затем выполняется переход к следующему блоку и шагу 1.

2.2.5 Алгоритм декодирования сжатых данных. Декодирование сжатых данных также выполняется в два этапа. Сначала распаковывается поток данных, сжатый без потерь. Затем из распакованного потока данных восстанавливается оптическое изображение.

Рассмотрим основные шаги первого этапа.

Шаги 1 и 2. Идентичны шагам 1 и 2 при сжатии без потерь.

Шаг 3. С учетом полученного распределения вероятностей на выходе ИНС выполняется арифметическое декодирование реального значения следующего отсчета в сжатом потоке данных. Для корректного декодирования результаты ИНС при сжатии и распаковке должны быть идентичны. Чтобы это гарантировать, нейросетевые расчеты должны выполняться одним и тем же устройством в одном и том же порядке на борту КА и при наземной распаковке.

Шаг 4. Шаги 2 и 3 повторяются для всех отсчетов всех каналов в блоке данных. Затем выполняется переход к следующему блоку и шагу 1.

Основные шаги второго этапа следующие.

Шаг 1. Из всех декодированных блоков данных собирается единое многоканальное изображение. Отсутствующие каналы в отдельных блоках заполняются нулями. Вместо целочисленных кодов квантованных отсчетов в каждом канале записываются соответствующие им действительные значения с учетом границ диапазонов квантования.

Шаг 2. Сформированное многоканальное изображение подается на вход декодировщика, на выходе которого формируется результирующее оптическое изображение.

2.2.6 Обучение ИНС. Для обучения автокодировщиков необходимы разрезанные на фрагменты мультиспектральные космические снимки, которые должны содержать большинство типовых наблюдаемых объектов в пределах всего возможного диапазона яркостей: водную поверхность, облака, поля, леса, городскую застройку. Расчет целевой функции обучения выполняется лишь по центральной части каждого фрагмента для исключения влияния краевых эффектов. В качестве целевой функции могут использоваться среднеквадратическое отклонение яркостей изображений на входе и выходе автокодировщика, одномасштабный и много- масштабный индексы структурного сходства [177] и другие показатели. В настоящей работе при обучении использовалось среднеквадратическое отклонение.

Из-за наличия слоя квантования, отличающегося разрывным градиентом, сходимость процесса минимизации целевой функции крайне нестабильная. Применение пакетной нормализации [305] в данном случае сходимость практически не улучшает, поэтому ее использование нецелесообразно. За ходом обучения необходимо постоянно следить и снижать скорость градиентного спуска, если процесс начал расходиться или целевая функция перестала уменьшаться. Особенно сложно выполняется обучение базового автокодировщика, поскольку подбираются коэффициенты для всех слоев нейронной сети (так называемое глубокое обучение).

Для обучения нейронных сетей-предсказателей генерируются отдельные выборки путем неадаптивного сжатия с потерями мультиспектральных космических снимков. Снимки должны быть сжаты с каждой из возможных степеней сжатия, фиксированной в пределах всего снимка. Эталонным выходом нейронной сети является сигнал из 2^b отсчетов, из которых один, соответствующий b -битному коду в k_{cjk} -м канале текущего пикселя, является единичным, а остальные нулевыми. Целевой функцией, минимизируемой при обучении, является перекрестная энтропия между выходом нейронной сети и эталонным выходом. В отличие от обучения

автокодировщиков, включающего от нескольких сотен до нескольких тысяч эпох, обучение каждого предсказателя выполняется быстро: за несколько эпох.

Экспериментальные исследования эффективности сжатия оптических изображений с помощью обученных ИНС приведены в главе 6.

2.3 МЕТОД УТОЧНЕНИЯ УГЛОВ РЫСКАНЬЯ И ТАНГАЖА НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО ЦЕНТРОИДА ПУТЕМ АМПЛИТУДНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОГОЛОГРАММ

2.3.1 Ключевая идея метода. В основу предлагаемого метода уточнения углов рысканья и тангажа положено совместное оценивание относительного значения доплеровского центроида $f_{\text{дц отн}}$ и доплеровской неопределенности $M_{\text{дц}}$, выполняемое путем амплитудного анализа комплексного сигнала двух изображений, синтезированных из радиоголограммы по субапертурам. Совместность оценивания позволяет уточнить математическую модель (1.10) пересчета геометрических рассогласований изображений в поправку к доплеровской неопределенности, учтя в ней ошибку $f_{\text{дц отн}}$ и дефекты синтеза изображений, возникшие из-за этого.

2.3.2 Оценивание относительного значения доплеровского центроида. Для обеспечения совместности будем выполнять оценивание относительного значения доплеровского центроида по тем же данным, что и оценивание доплеровской неопределенности: по паре комплексных радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголограммы по двум неперекрывающимся субапертурям, каждая из которых составляет половину доплеровского спектра. При этом в процессе синтеза изображений не должна выполняться аподизация азимутального спектра. За счет линейности дискретного преобразования Фурье сумма комплексных сигналов этих двух изображений эквивалентна сигналу комплексного изображения, синтезированного по полной апертуре. Центральная частота сигнала вдоль столбца суммарного изображения дает оценку относительного значения доплеровского центроида.

Поскольку значения доплеровского центроида могут плавно изменяться по полю изображения, оценивание выполняется независимо по отдельным его фрагментам. Для нахождения азимутального спектра с высоким отношением сигнал-шум суммируются сигналы во всех столбцах фрагмента суммарного комплексного изображения, а затем применяется дискретное преобразование Фурье.

Для нахождения центральной частоты в [140] предлагается свернуть амплитудный спектр с производной треугольной функции, ширина основания которой соответствует полосе доплеровских частот, и найти точку, в которой результат свертки обращается в ноль с отрицательным наклоном. Вместо производной треугольной функции может также использоваться производная амплитудного спектра квадрата азимутальной ДНА РСА $w_\eta(t)$.

В настоящей работе для нахождения центральной частоты предлагается применять более быстрый способ, который обеспечит эквивалентный результат в случае симметричного спектра. Необходимо перейти в полярную систему координат и представить каждый отсчет амплитудного спектра в виде вектора, длина которого определяется интенсивностью отсчета, а направление – доплеровской частотой. Направление суммы таких векторов даст центральную частоту. Наиболее удобно описанные вычисления реализуются с помощью аппарата комплексных чисел:

$$f_{\text{доп отн}} = \frac{f_{\text{имн}}}{2\pi} \arg \sum_i A(f_i) \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{имн}}}\right), \quad (2.11)$$

где $A(f)$ – амплитудный спектр суммарного сигнала всех столбцов фрагмента, $f_i \in [-f_{\text{имн}}/2, f_{\text{имн}}/2]$ – частоты отсчетов азимутального спектра.

В классическом амплитудном методе оценивания $f_{\text{доп отн}}$ [140, 209] одна оценка получается в результате анализа суммарного амплитудного азимутального спектра достаточно большого квадратного фрагмента с размером стороны в несколько сотен пикселей. Однако проведенные экспериментальные исследования показали, что за счет компактности импульсных откликов на синтезированном изображении относительно точные оценки можно получать при размерах стороны

фрагмента в несколько десятков пикселей. Более того, выяснилось, что если большой фрагмент изображения разделить на непересекающиеся малые фрагменты, в каждом из них выполнить анализ амплитудного азимутального спектра, а затем полученные оценки $f_{\text{дц отн}}$ усреднить с весами, пропорциональными сумме отсчетов амплитудного спектра малого фрагмента, то результат такого усреднения получается в среднем более точным, чем оценка $f_{\text{дц отн}}$, полученная по спектру всего большого фрагмента. Так при размере стороны большого фрагмента, составляющем 1024 пикселя, среднеквадратическое отклонение оценок $f_{\text{дц отн}}$ от полинома малой степени, аппроксимирующего их вариации по полю изображения от космического аппарата «COSMO-SkyMed», составило 0,58 % от величины $f_{\text{умн}}$. Если же каждый большой фрагмент разделить на малые фрагменты размером 32×32 пикселя, то среднеквадратическое отклонение снижается до 0,29 % от величины $f_{\text{умн}}$.

Таким образом, наиболее точная оценка $f_{\text{дц отн}}$ получается как

$$\begin{aligned} f_{\text{дц отн}} &= \frac{f_{\text{умн}}}{2\pi} \arg \sum_{k_\phi} \sum_i A_{k_\phi}(f_i) \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{умн}}}\right) = \\ &= \frac{f_{\text{умн}}}{2\pi} \arg \sum_i \exp\left(j \cdot 2\pi \frac{f_i}{f_{\text{умн}}}\right) \sum_{k_\phi} A_{k_\phi}(f_i), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $A_{k_\phi}(f)$ – амплитудный азимутальный спектр k_ϕ -го малого фрагмента.

Из (2.12) видно, что такое оценивание эквивалентно анализу суммы азимутальных амплитудных спектров, построенных по малым фрагментам, на которые разделен большой фрагмент изображения. Суммирование амплитудных спектров можно считать неким аналогом некогерентного накопления, позволяющим снизить влияние шумов.

Уточнение доплеровского центроида может выполняться с двумя возможными целями. Во-первых, для качественного синтеза из радиоголограммы отдельного изображения в условиях низкой точности измерительной информации, возникших из-за сбоя БОКЗ. Во-вторых, для уточнения установочных углов БОКЗ и антенны РСА в ходе геометрической калибровки КА. Во втором случае найденная

поправка к доплеровскому центроиду, пересчитанная в углы рысканья и тангажа, используется в качестве аддитивной добавки к измерениям БОКЗ при их штатной работе в процессе всех последующих синтезов изображений из радиоголограмм.

В обоих случаях точности оценок $f_{\text{дл отн}}$ порядка 0,3 % от величины $f_{\text{имн}}$ достаточно. Однако такая точность достигается лишь при следующих условиях:

- 1) наблюдаемые объекты в пределах анализируемого фрагмента изображения должны быть неподвижны относительно земной поверхности;
- 2) на фрагменте изображения должно быть высокое отношение сигнал-шум;
- 3) изображение должно быть качественно синтезировано из радиоголограммы.

Для выполнения первых двух условий необходимо исключать из оценки водную поверхность, радиотени, пески и прочие темные малоконтрастные объекты. Последнее условие можно выполнить, организовав итерационную схему последовательного уточнения.

2.3.3 Оценивание доплеровской неопределенности. Оценивание доплеровской неопределенности в рамках предлагаемого метода базируется на классическом амплитудном подходе [214] с дополнительным учетом дефектов синтеза, вызванных ошибкой знания $f_{\text{дл отн}}$, выявленной на предыдущем этапе метода.

В [214] предполагается, что смещение по дальности лишь линейно зависит от ошибки знания доплеровской неопределенности. Однако, как показывает практика, это справедливо лишь тогда, когда отсутствует ошибка знания $f_{\text{дл отн}}$. Поэтому в случае существенных ошибок $f_{\text{дл отн}}$ получаются искаженные оценки доплеровской неопределенности, что увеличивает число итераций последовательного уточнения доплеровских параметров, а иногда в принципе не позволяет оценить $M_{\text{дл}}$. Рассмотрим более подробно, что происходит с изображениями, синтезированными по двум неперекрывающимся апертурам, в обоих случаях.

Пусть ошибка знания $f_{\text{дл отн}}$ нулевая, но имеется ошибка $\Delta M_{\text{дл}}$ знания доплеровской неопределенности. В этом случае полная апертура корректно разбивается на две субапертуры относительно $f_{\text{дл отн}}$. При симметричной диаграмме

направленности антенны средневзвешенные доплеровские частоты двух синтезированных изображений смещены на одинаковую величину Kf_{umn} относительно как имеющейся оценки абсолютного значения доплеровского центроида $\tilde{f}_{\partial u}$, так и истинного значения $f_{\partial u}$. Таким образом, дальности одного и того же объекта на двух синтезированных изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{\perp} + \Delta R(f_{\partial u} - Kf_{umn}) - \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} - Kf_{umn}) = \\ &= R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} + \Delta M_{\partial u} f_{umn} - Kf_{umn}) - \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} - Kf_{umn}), \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= R_{\perp} + \Delta R(f_{\partial u} + Kf_{umn}) - \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} + Kf_{umn}) = \\ &= R_{\perp} + \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} + \Delta M_{\partial u} f_{umn} + Kf_{umn}) - \Delta R(\tilde{f}_{\partial u} + Kf_{umn}). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Прибавление ΔR в (2.13) и (2.14) соответствует истинной миграции дальности, а вычитание ΔR – ее устраниению в процессе синтеза изображения.

Смещение двух изображений вдоль строки из-за разницы наклонных дальностей может быть записано как

$$\Delta n = \frac{2 f_{discr} (R_2 - R_1)}{c}. \quad (2.15)$$

Зависимость (1.10), используемая в [214], получается путем вычитания (2.13) из (2.14) с учетом (1.9) и (2.15). При этом в качестве коэффициента K берется значение 0,25, т.е. не учитывается взвешивание сигналов, смешенных по доплеровской частоте, квадратом ДНА. Однако, как показывает практика, из-за этого возникает относительная погрешность оценки $\Delta M_{\partial u}$ порядка 30%, что при $\Delta M_{\partial u} \geq 2$ приводит к некорректной оценке и необходимости в еще как минимум одной итерации по ее уточнению.

В то же время, если известен амплитудный спектр $W_{\eta}(f - f_{\partial u})$ квадрата азимутальной ДНА $w_{\eta}(t)$, то коэффициент K может быть найден как

$$K = \frac{\int_0^{f_{umn}/2} f W_{\eta}(f) df}{\int_0^{f_{umn}/2} W_{\eta}(f) df}. \quad (2.16)$$

Если азимутальная ДНА неизвестна, то в качестве аппроксимации ее квадрата может быть взята одна из стандартных оконных функций, например, обобщенное окно Хэмминга.

Расчет K с помощью (2.16) позволяет точнее оценивать большие значения $\Delta M_{\partial\eta}$.

Теперь рассмотрим случай, когда при синтезе изображений имелась ненулевая ошибка:

$$\Delta f_{\partial\eta \text{ отн}} = (f_{\partial\eta \text{ отн}} - \tilde{f}_{\partial\eta \text{ отн}}) \bmod f_{umn}, \quad (2.17)$$

где $\Delta f_{\partial\eta \text{ отн}} \in [-f_{umn}/2, f_{umn}/2]$, $\tilde{f}_{\partial\eta \text{ отн}}$ – значение, использованное при синтезе изображений.

В этом случае разделение на субапертуры выполняется некорректно. Частоты в пределах одной из субапертур интерпретируются при синтезе в пределах одной зоны неоднозначности, а в другой субапертуре часть частот попадает в ту же зону неоднозначности, а часть – переносится в соседнюю зону. Это приводит к раздвоению сюжета на одном из изображений. Вертикальное смещение между двумя копиями сюжета, попавшими в разные зоны неоднозначности, определяется временем, за которое доплеровский сдвиг частоты изменяется на величину f_{umn} . Значение этого смещения в пикселях равняется:

$$\Delta m = \frac{f_{umn}^2}{K_\eta}. \quad (2.18)$$

Оценка значения $\Delta f_{\partial\eta \text{ отн}}$ может быть получена в соответствии с алгоритмом, описанным в предыдущем пункте настоящего параграфа. Зная $\Delta f_{\partial\eta \text{ отн}}$, можно оценить, какая из двух копий сюжета имеет большую интенсивность. Если $|\Delta f_{\partial\eta \text{ отн}}| < f_{umn}/4$, то большей интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и у изображения другой субапертуры. В противном случае большей интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности.

В первом случае для нахождения Δn требуется корреляционно-экстремальное совмещение фрагментов двух изображений, одинаково расположенных по вертикали. Во втором случае коррелируемый фрагмент одного изображения должен быть смещен по вертикали на Δm относительно фрагмента другого изображения. Если же указанный выбор не сделать, то корреляционно-экстремальное совмещение будет выполняться с копией сюжета, обладающей слабой интенсивностью и плохо различимой на фоне другой копии. В пределе, когда $|\Delta f_{\text{дл отн}}| \rightarrow f_{\text{умн}}/2$, интенсивность текущей копии сюжета падает практически до нуля, делая невозможным совмещение с ней, а следовательно, и оценивание доплеровской неопределенности. В то же время выбор другой копии для совмещения существенно его упрощает.

В каждом из указанных двух случаев имеются свои нюансы в зависимости от знака $\Delta f_{\text{дл отн}}$. Таким образом, возможны четыре варианта, рассматриваемые ниже.

Первый вариант: $-f_{\text{умн}}/4 < \Delta f_{\text{дл отн}} < 0$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из второй субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и для первого изображения. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{\perp} + \Delta R (\tilde{f}_{\text{дл}} + \Delta M_{\text{дл}} f_{\text{умн}} - K_1 f_{\text{умн}}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{дл}} - K_1 f_{\text{умн}}), \\ R_2 &= R_{\perp} + \Delta R (\tilde{f}_{\text{дл}} + \Delta M_{\text{дл}} f_{\text{умн}} + K_2 f_{\text{умн}}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{дл}} + K_2 f_{\text{умн}}), \end{aligned} \quad (2.19)$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты смещения средневзвешенного доплеровского сдвига на изображениях относительно $\tilde{f}_{\text{дл}}$.

Поправка к доплеровской неопределенности в данном варианте будет вычисляться как

$$\Delta M_{\text{дл}} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2) f_{\text{умн}}^2 c R_{\perp} f_{\text{дискр}}} \right]. \quad (2.20)$$

Коэффициент K_1 находится из расчета, что все частоты первой субапертуры попали в одну зону неоднозначности, но при этом их верхняя граница сместились относительно $f_{\text{дц}}$ на минус $\Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_1 = - \frac{\int_{-f_{\text{имн}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{-\Delta f_{\text{дц отн}}} f W_\eta(f) df}{\int_{-f_{\text{имн}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имн}}} W_\eta(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имн}}}. \quad (2.21)$$

Коэффициент K_2 находится из расчета, что в пределах второй субапертуры в ту же зону неоднозначности попала лишь полоса частот шириной $f_{\text{имн}}/2 + \Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имн}}/2} f W_\eta(f) df}{\int_{-\Delta f_{\text{дц отн}}}^{f_{\text{имн}}/2} W_\eta(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{дц отн}}}{f_{\text{имн}}}. \quad (2.22)$$

Поскольку значения коэффициентов K_1 и K_2 зависят от $\Delta f_{\text{дц отн}}$, то зависимость горизонтального сдвига Δn между изображениями от ошибки знания доплеровского центроида $\Delta f_{\text{дц}}$, включающей $\Delta f_{\text{дц отн}}$ и $\Delta M_{\text{дц}}$, перестает носить линейный характер, как это предполагалось в исходном алгоритме оценки доплеровской неопределенности.

Второй вариант: $0 \leq \Delta f_{\text{дц отн}} < f_{\text{имн}}/4$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из первой субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая той же зоне неоднозначности, что и для второго изображения. Выражения для дальностей и поправки к доплеровской неопределенности будут в этом варианте эквивалентны (2.19) и (2.20), но используемые в них коэффициенты K_1 и K_2 будут находиться по-другому.

Коэффициент K_1 находится из расчета, что в пределах первой субапертуры в нужную зону неоднозначности попала лишь полоса частот шириной $f_{\text{имн}}/2 - \Delta f_{\text{дц отн}}$:

$$K_1 = -\frac{\int_{-f_{umn}/2}^{-\Delta f_{\text{доп отн}}} f W_\eta(f) df}{\int_{f_{umn}}^{-\Delta f_{\text{доп отн}}} W_\eta(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{доп отн}}}{f_{umn}}. \quad (2.23)$$

Коэффициент K_2 находится из расчета, что все частоты второй субапертуры попали в одну зону неоднозначности, но при этом их нижняя граница сместились относительно $f_{\text{доп}}$ на минус $\Delta f_{\text{доп отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}}^{f_{umn}/2} f W_\eta(f) df}{\int_{f_{umn}}^{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}} W_\eta(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{доп отн}}}{f_{umn}}. \quad (2.24)$$

Третий вариант: $\Delta f_{\text{доп отн}} \leq -f_{umn}/4$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из второй субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности по отношению к первому изображению. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_\perp + \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + \Delta M_{\text{доп}} f_{umn} - K_1 f_{umn}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} - K_1 f_{umn}), \\ R_2 &= R_\perp + \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + \Delta M_{\text{доп}} f_{umn} + (K_2 - 1) f_{umn}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + K_2 f_{umn}). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Поправка к доплеровской неопределенности в данном варианте будет вычисляться как

$$\Delta M_{\text{доп}} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{\text{дл}}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2 - 1) f_{umn}^2 c R_\perp f_{\text{дискр}}} + \frac{\tilde{f}_{\text{доп}} - (0,5 - K_2) f_{umn}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{umn}} \right]. \quad (2.26)$$

Коэффициент K_1 находится аналогично первому варианту в соответствии с (2.21).

Коэффициент K_2 находится из расчета, что в пределах второй субапертуры в соседнюю зону неоднозначности попала полоса частот шириной минус $\Delta f_{\text{доп отн}}$:

$$K_2 = \frac{\int_{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}}^{f_{umn}/2} f W_\eta(f) df}{\int_{f_{umn}}^{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}} W_\eta(f) df} + \frac{\Delta f_{\text{доп отн}}}{f_{umn}} + 1. \quad (2.27)$$

Как видно из (2.26), в данном варианте для нахождения поправки $\Delta M_{\text{доп}}$ требуется также ошибочное значение доплеровского центроида $\tilde{f}_{\text{доп}}$, использованное при синтезе изображений.

Четвертый вариант: $\Delta f_{\text{доп отн}} \geq f_{umn}/4$. Двоение сюжета наблюдается на изображении, синтезированном из первой субапертуры. Большой интенсивностью обладает копия сюжета, соответствующая соседней зоне неоднозначности по отношению ко второму изображению. Дальности одного и того же объекта на двух изображениях будут равняться:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_\perp + \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + \Delta M_{\text{доп}} f_{umn} - (K_1 - 1) f_{umn}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} - K_1 f_{umn}), \\ R_2 &= R_\perp + \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + \Delta M_{\text{доп}} f_{umn} + K_2 f_{umn}) - \Delta R (\tilde{f}_{\text{доп}} + K_2 f_{umn}). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Поправка к доплеровской неопределенности в данном варианте будет вычисляться как

$$\Delta M_{\text{доп}} = \left[\frac{2 f_0^2 V_{\text{лз}}^2 \Delta n}{(K_1 + K_2 - 1) f_{umn}^2 c R_\perp f_{\text{дискр}}} + \frac{\tilde{f}_{\text{доп}} + (0,5 - K_1) f_{umn}}{(K_1 + K_2 - 1) f_{umn}} \right]. \quad (2.29)$$

Коэффициент K_1 находится из расчета, что в пределах первой субапертуры в соседнюю зону неоднозначности попала полоса частот шириной $\Delta f_{\text{доп отн}}$:

$$K_1 = - \frac{\int_{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}}^{f_{umn}/2} f W_\eta(f) df}{\int_{f_{umn}}^{f_{umn}/2 - \Delta f_{\text{доп отн}}} W_\eta(f) df} - \frac{\Delta f_{\text{доп отн}}}{f_{umn}} + 1. \quad (2.30)$$

Коэффициент K_2 находится аналогично второму варианту в соответствии с (2.24).

2.3.4 Оценивание абсолютного значения доплеровского центроида. Совместное оценивание относительного значения доплеровского центроида и допле-

ровской неопределенности позволяет получить оценку абсолютного значения до-плеровского центроида. Рассмотрим процесс ее получения в пределах отдельного фрагмента анализируемых изображений.

Шаг 1. Комплексные сигналы двух изображений в пределах анализируемого фрагмента суммируются.

Шаг 2. Суммарный комплексный сигнал изображений разбивается на малые подфрагменты. В пределах каждого подфрагмента суммируются столбцы, и к полученному одномерному сигналу применяется БПФ. Фаза комплексных отсчетов результата БПФ игнорируется. Амплитуда отсчетов образует амплитудный спектр $A_{k_\phi}(f)$ каждого подфрагмента.

Шаг 3. В соответствии с (2.12) вычисляется $f_{\text{дц отн}}$.

Шаг 4. В соответствии с (2.17) вычисляется $\Delta f_{\text{дц отн}}$.

Шаг 5. В соответствии со значением $\Delta f_{\text{дц отн}}$ выбираются вертикальные положения m_1 и m_2 фрагментов двух исходных изображений для корреляционно-экстремального совмещения. Если $|\Delta f_{\text{дц отн}}| < f_{\text{имп}}/4$, положения фрагментов остаются неизменными по отношению к шагу 1. Если $\Delta f_{\text{дц отн}} \leq -f_{\text{имп}}/4$, фрагмент второго изображения смещается на Δm пикселей вниз (в сторону увеличения азимутального времени). Если $\Delta f_{\text{дц отн}} \geq f_{\text{имп}}/4$, фрагмент первого изображения смещается на Δm вверх (в сторону уменьшения азимутального времени).

Шаг 6. В пределах выбранных фрагментов фаза комплексного сигнала изображений игнорируется. На основе корреляционно-экстремального совмещения амплитудных сигналов находится их горизонтальное смещение:

$$\Delta n = \underset{\Delta n}{\operatorname{argmax}} r_{\text{kopp}}(|s_1(m_1, n + \Delta n)|, |s_2(m_2, n)|). \quad (2.31)$$

В качестве корреляционной меры $r_{\text{kopp}}(a_1(m_1, n_1), a_2(m_2, n_2))$ используется коэффициент корреляции Пирсона фрагментов действительных двумерных сигналов a_1 и a_2 с координатами верхнего левого угла (m_1, n_1) и (m_2, n_2) соответственно:

$$r_{\text{kopp}}(a_1(m_1, n_1), a_2(m_2, n_2)) = \frac{\sum_{k,l} (a_1(m_1+k, n_1+l) - \bar{a}_1(m_1, n_1))(a_2(m_2+k, n_2+l) - \bar{a}_2(m_2, n_2))}{\sqrt{\sum_{k,l} (a_1(m_1+k, n_1+l) - \bar{a}_1(m_1, n_1))^2 \sum_{k,l} (a_2(m_2+k, n_2+l) - \bar{a}_2(m_2, n_2))^2}}, \quad (2.32)$$

где $\bar{a}(m, n) = \frac{\sum_{k,l} a(m+k, n+l)}{\sum_{k,l} 1}$ – средний уровень сигнала.

Шаг 7. Если $\max_{\Delta n} r_{\text{kopp}}(|s_1(m_1, n+\Delta n)|, |s_2(m_2, n)|) < r_{\text{korr min}}$, где $r_{\text{korr min}}$ – вы-

бранное пороговое значение, считается, что анализируемый фрагмент не пригоден для оценивания доплеровского центроида (содержит лишь малоконтрастные объекты). В противном случае вычисления продолжаются.

Шаг 8. В зависимости от значения $\Delta f_{\text{дл отн}}$ по одному из четырех вариантов, рассмотренных в предыдущем пункте, смещение Δn пересчитывается в поправку $\Delta M_{\text{дл}}$.

Шаг 9. Вычисляется оценка значения доплеровского центроида как $f_{\text{дл отн}} + (\tilde{M}_{\text{дл}} + \Delta M_{\text{дл}}) f_{\text{имп}}$, где $\tilde{M}_{\text{дл}}$ – значение доплеровской неопределенности, использованное при синтезе анализируемых изображений из радиоголограммы.

2.3.5 Оценивание вариаций доплеровского центроида по полю изображения. Для оценивания вариаций доплеровского центроида по полю изображения описанная в предыдущем пункте процедура применяется к различным фрагментам, центры которых располагаются на некоторой квадратной сетке. Если размеры синтезированного изображения не уменьшены по сравнению с радиоголограммой, граничные узлы сетки располагаются с отступом от краев изображения на половину горизонтального или вертикального размера неожатого импульсного отклика РСА во избежание негативного влияния краевых эффектов.

Из-за возможных ошибок корреляционно-экстремального совмещения и погрешностей оценивания требуется дополнительная фильтрация полученных оценок. Она может быть выполнена в два этапа.

На первом этапе на основе оценок доплеровского центроида, полученных по фрагментам, расположенным в одном горизонтальном ряду, строится строгая геометрическая модель радиолокационной съемки в фиксированный момент времени. Для этого рассчитываются координаты точек на земной поверхности, расположенных на фиксированной высоте h_u , имеющих наклонную дальность, соответствующую центру фрагмента (m_u, n_u) , и доплеровский сдвиг частоты, соответствующий полученной оценке $f_{\partial u}$, путем решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_u - x_p(t_{\perp m_u})) V_{px}(t_{\perp m_u}) + (y_u - y_p(t_{\perp m_u})) V_{py}(t_{\perp m_u}) + \\ + (z_u - z_p(t_{\perp m_u})) V_{pz}(t_{\perp m_u}) = \frac{c f_{\partial u}}{2 f_0} (R_{\perp n_u} + \Delta R(f_{\partial u}) - \Delta R_{amm}(h_u)), \\ E(a_3, b_3, h_u, x_u, y_u, z_u) = 0, \\ (x_u - x_p(t_{\perp m_u}))^2 + (y_u - y_p(t_{\perp m_u}))^2 + (z_u - z_p(t_{\perp m_u}))^2 = \\ = (R_{\perp n_u} + \Delta R(f_{\partial u}) - \Delta R_{amm}(h_u))^2. \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Поскольку все точки в рамках горизонтального ряда должны наблюдаться РСА в один момент времени, через них, а также положение РСА $\mathbf{r}_p(t_{\perp m_u})$, соответствующее центральной строке фрагментов, по методу наименьших квадратов итерационно проводится плоскость – вертикальная плоскость антенны РСА. На каждой итерации из построения плоскости исключаются точки, наиболее сильно отклоняющиеся от нее на предыдущей итерации. Итерационный процесс заканчивается, либо когда становятся достаточно малы невязки, либо когда остается мало точек. Если удалось провести плоскость с малыми невязками через достаточное количество точек, то для всех фрагментов горизонтального ряда корректируются оценки доплеровского центроида, чтобы они строго соответствовали проведенной плоскости. Каждая коррекция выполняется следующим образом. Из точки (x_u, y_u, z_u) опускается перпендикуляр на проведенную плоскость. Координаты (x_u, y_u, z_u) заменяются координатами точки пересечения перпендикуляра с плоскостью. Затем из третьего и первого уравнений системы (2.33) выражается скорректированное значение $f_{\partial u}$.

На втором этапе на основе оценок доплеровского центроида, полученных по полю изображения и скорректированных на предыдущем этапе, итерационно строится двумерный полином малой степени, аппроксимирующий пространственные вариации поправки $\Delta f_{\partial u}$ к значению доплеровского центроида $\tilde{f}_{\partial u}$, использованному ранее для синтеза изображения. В качестве такого полинома, например, может быть взят многочлен вида $P_M(m, n) = \sum_{0 \leq m+n \leq M} p_{ij} m^i n^j$, где $M=2$. Построение также выполняется по методу наименьших квадратов с постепенным отбрасыванием наиболее отклоняющихся от полинома поправок $\Delta f_{\partial u}$. Если неотбракованных оценок остается мало или они начинают группироваться лишь в малой части площади изображения, степень полинома M понижается вплоть до нуля, чтобы избежать существенного возрастания ошибок оценивания к краям изображения. Итерационное построение полинома заканчивается, либо когда становятся достаточно малы невязки, либо когда остается мало оценок для его построения.

После получения полинома $P_M(m, n)$ может быть рассчитано максимальное значение поправки по полю изображения $\max_{m, n} P_M(m, n)$. Если оно достаточно мало, процесс оценивания завершается. Если же оно велико, требуются повторная обработка радиоголограммы с уточненным значением доплеровского центроида и повторное оценивание доплеровского центроида по двум изображениям субапертур, синтезированным из радиоголограммы. Для получения заданной точности может потребоваться несколько таких итераций, каждая из которых требует существенного объема вычислений, в первую очередь, на повторный синтез изображений из радиоголограммы. Однако за счет более точной модели пересчета Δn в $\Delta M_{\partial u}$ по сравнению с подходом [214] число итераций сокращается, что иллюстрируется в рамках экспериментальных исследований, приведенных в главе 6.

2.3.6 Уточнение углов рысканья и тангажа по результатам оценивания доплеровского центроида. На основе оцененных значений $f_{\partial u}$ могут быть найдены поправки к углам рысканья и тангажа.

Рассмотрим момент времени $t_{\perp m}$. Для него известны значения доплеровского центроида в различных столбцах изображения как $f_{\partial u}(m, n) = \tilde{f}_{\partial u}(m, n) + P_M(m, n)$. С учетом этих значений может быть построена вертикальная плоскость антенны РСА, описываемая вектором нормали к ней \mathbf{n}_e единичной длины. Процесс построения такой плоскости описан в предыдущем пункте.

С антенной РСА можно связать следующую прямоугольную систему координат $O X_A Y_A Z_A$. В отсутствие сканирования луча (т.е. при нулевых отклонениях луча по азимуту и углу места от номинального направления) ось Y_A направлена в сторону максимума коэффициента усиления антенны, вращение вокруг оси Z_A задает направление азимута, а вращение вокруг оси X_A – угломестное направление. В отсутствие ошибок угловой ориентации вертикальная плоскость антенны должна проходить через ось Z_A , т.е. величина $n_{e z_A}$ должна быть нулевой. Наличие сканирования по азимуту приводит к тому, что вертикальная плоскость антенны может образовывать некоторый угол с осью Y_A , равный углу азимутального сканирования. Направление осей X_A , Y_A и Z_A определяется угловой ориентацией КА и углами установки антенны.

Чтобы абстрагироваться от возможных значений угла азимутального сканирования при дальнейшем рассмотрении, перейдем к системе координат $O X'_A Y'_A Z'_A$, повернутой относительно $O X_A Y_A Z_A$ вокруг оси Z_A на угол азимутального сканирования.

В отсутствие ошибок угловой ориентации вертикальная плоскость должна совпадать с плоскостью $O Y'_A Z'_A$, т.е. должны быть нулевыми величины $n_{e z'_A}$ и $n_{e y'_A}$. Если же после определения вектора \mathbf{n}_e по результатам уточнения доплеровского центроида эти величины оказались ненулевыми, необходимо два поворота системы координат $O X'_A Y'_A Z'_A$ для их обнуления.

Первый поворот выполняется относительно оси, перпендикулярной к \mathbf{n}_6 и Z'_A , на такой угол θ_A , что в новой системе координат $O X''_A Y''_A Z''_A \ n_{6z_A} = 0$. Второй поворот выполняется относительно оси Z''_A на такой угол ψ_A , что в новой системе координат $O X'''_A Y'''_A Z'''_A \ n_{6y_A} = 0$, а также $n_{6z_A} = 0$.

Система $O X'''_A Y'''_A Z'''_A$ признается истинным положением системы $O X'_A Y'_A Z'_A$, ориентация которой вычислялась по измерительной информации. Истинное положение системы $O X_A Y_A Z_A$ может быть получено путем обратного поворота $O X'''_A Y'''_A Z'''_A$ вокруг оси Z'''_A на угол азимутального сканирования.

В отсутствие азимутального сканирования угол ψ_A является поправкой к углу рысканья, а угол θ_A – к углу тангажа.

Значения доплеровского центроида определяют лишь положение вертикальной плоскости антенны. В этой плоскости можно ввести полярную систему, вторая координата которой определяет направление луча антенны по углу места. Начало отсчета углов в этой системе, определяемое креном КА, не может быть уточнено по результатам оценки доплеровского центроида, поскольку никак не учитывается в ходе синтеза изображения из радиоголограммы. Оно влияет лишь на радиометрическую коррекцию синтезированного изображения, что рассматривается в следующем параграфе.

2.4 МЕТОД УТОЧНЕНИЯ УГЛА КРЕНА ПРИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АМПЛИТУДНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

2.4.1 Ключевая идея метода. Предлагаемый метод заключается в выявлении формы угломестной ДНА путем статистического анализа амплитудного сигнала радиолокационного изображения, сопоставлении ее с эталонной ДНА и определении их смещения друг относительно друга вдоль угломестной оси. Выявленное смещение является поправкой к углу крена КА.

В основу метода положена гипотеза, что наблюдаемый участок земной поверхности можно представить в виде преобладающей совокупности радиометрически однородных объектов, каждый из которых имеет собственную УЭПР и отделен от других объектов резкими границами. Под преобладанием понимается, что суммарная площадь однородных объектов превышает суммарную площадь радиометрически неоднородных.

В рамках приведенной гипотезы форма ДНА анализируется с использованием величины, не зависящей от УЭПР конкретного однородного объекта, и отбраковкой сигнала от радиометрически неоднородных объектов в процессе статистического анализа.

2.4.2 Виды УЭПР и однородные объекты. Регистрируемая радиолокационными системами энергетическая величина – ЭПР – это площадь некоторой плоской поверхности, которая расположена на месте наблюдаемого объекта, ориентирована нормально к направлению падающего радиоизлучения, является идеальным изотропным переизлучателем и создает в антенне радиолокатора ту же плотность потока мощности, что и реальный объект [306].

ЭПР наблюдаемого объекта, являющаяся энергетической величиной, может быть нормирована некоторой геометрической площадью с получением УЭПР. В зависимости от того, какой именно геометрической площадью выполняется нормировка, различают три вида УЭПР:

- 1) бета-ноль – ЭПР, нормированная площадью проекции объекта на плоскость наклонной дальности, проходящую через вектор скорости движения фазового центра антенны радиолокатора и линию визирования;
- 2) сигма-ноль – ЭПР плоского объекта, нормированная его геометрической площадью;
- 3) гамма-ноль – ЭПР объекта, нормированная площадью его поперечного сечения, т.е. площадью его проекции на плоскость, перпендикулярную к линии визирования.

Радиометрически однородный площадной объект, являющийся изотропным рассеивателем, будет иметь на радиолокационном изображении постоянную ве-

личину только одного вида УЭПР – гамма-ноль. Это связано с изменением значений угла падения зондирующего сигнала в пределах полосы съемки: у ближней границы полосы съемки углы падения меньше, чем у дальней границы. В то же время из определения ЭПР следует, что она пропорциональна площади изотропного рассеивателя, ориентированно перпендикулярно направлению визирования. Следовательно, для произвольно ориентированных изотропных рассеивателей ЭПР пропорциональна площади их поперечного сечения.

Поскольку в направлении от ближней границы полосы съемки к дальней границе площадь поперечного сечения, соответствующаяциальному пикселю изображения, изменяется, то будут наблюдаться и плавные изменения амплитуды сигнала от однородного объекта, квадрат которой пропорционален ЭПР.

Таким образом, перед выполнением статистического анализа амплитудного сигнала радиолокационного изображения необходимо обеспечить, чтобы квадрат амплитуды был пропорционален не ЭПР, а УЭПР гамма-ноль. Для этого амплитуда сигнала в каждом пикселе изображения умножается на квадратный корень из тангенса угла падения зондирующих импульсов $\alpha_{n\alpha\delta}$:

$$\alpha_{\gamma_0}(m, n) = |s(m, n)| \sqrt{\operatorname{tg} \alpha_{n\alpha\delta}(m, n)}. \quad (2.34)$$

Дополнительно устраняется затухание радиолокационного сигнала с увеличением удаленности наблюдаемого объекта:

$$\alpha_{R\gamma_0}(m, n) = \frac{\alpha_{\gamma_0}(m, n)}{f_{затух}(R_{\perp n} + \Delta R(f_{\partial\gamma}(m, n)))}, \quad (2.35)$$

где $f_{затух}(R)$ – закон затухания амплитуды сигнала на синтезированном изображении с увеличением наклонной дальности R . Мощность каждого отдельного регистрируемого на радиоголограмме эхо-сигнала убывает пропорционально R^4 , а вид закона $f_{затух}(R)$ определяется тем, как нормируется сжатый импульсный отклик РСА в различных каналах дальности при фокусировке радиоголограммы.

2.4.3 Статистический амплитудный анализ изображения. В низкоточных алгоритмах оценивания угла крена [218] и при радиометрической калибровке радиолокатора выполняется статистический анализ распределения амплитуды сиг-

нала $\alpha_{R\gamma_0}$ по углам места α_m в предположении, что наблюдаемый участок земной поверхности радиометрически однороден. При калибровке это предположение обеспечивается съемкой специального полигона, а в алгоритмах [218] при попытке обработки произвольного радиолокационного изображения чаще всего оказывается несостоительным, что негативно отражается на точности получаемых оценок.

Рассмотрим подробнее процесс статистического анализа распределения амплитуды сигнала по углам места.

Перед выполнением анализа для расчета значений $\alpha_{nao}(m, n)$, необходимых для предварительной нормировки амплитуды сигнала (2.34), и для расчета углов места $\alpha_m(m, n)$, требуется преобразовать опорную модель высот $h_{onop}(B_u, L_u)$ в систему координат (m, n) с получением $h_{onop}(m, n)$. Для каждого пикселя (m, n) это достигается путем итерационного решения системы уравнений, начиная с некоторой высоты $h_u = h_{nac}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_u - x_p(t_{\perp m}))V_{px}(t_{\perp m}) + (y_u - y_p(t_{\perp m}))V_{py}(t_{\perp m}) + \\ \quad + (z_u - z_p(t_{\perp m}))V_{pz}(t_{\perp m}) = 0, \\ (x_u - x_p(t_{\perp m}))^2 + (y_u - y_p(t_{\perp m}))^2 + (z_u - z_p(t_{\perp m}))^2 = (R_{\perp n} - \Delta R_{amm}(h_u))^2, \\ x_u = \left(\frac{a_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \cos B_u \cos L_u, \\ y_u = \left(\frac{a_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \cos B_u \sin L_u, \\ z_u = \left(\frac{b_3^2}{\sqrt{a_3^2 \cos^2 B_u + b_3^2 \sin^2 B_u}} + h_u \right) \sin B_u, \\ h_u = h_{onop}(B_u, L_u). \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Получив в результате решения (2.36) для пикселя (m, n) координаты наблюдаемого объекта (x_u, y_u, z_u) и его опорную высоту $h_u = h_{onop}(B_u, L_u)$, можно с использованием значения доплеровского центроида $f_{\partial u}(m, n)$ вычислить координа-

ты фазового центра антенны РСА в момент наиболее интенсивной подсветки объекта путем решения системы (2.33) относительно $\mathbf{r}_p = (x_p, y_p, z_p)^T$.

Вектор, направленный из точки (x_p, y_p, z_p) в (x_u, y_u, z_u) , является вектором визирования. Он проецируется на вертикальную плоскость антенны $OY'_AZ'_A$, введенную в предыдущем параграфе, и переводится в полярную систему координат. Угол места $\alpha_m(m, n)$ равняется угловой координате проекции вектора визирования на вертикальную плоскость антенны.

Для вычисления $\alpha_{n\partial}(m, n)$ строится касательная плоскость к поверхности $h_{onop}(B_u, L_u)$ в окрестности точки $(B_u(x_u, y_u, z_u), L_u(x_u, y_u, z_u))$. Угол падения $\alpha_{n\partial}(m, n)$ равен углу между вектором визирования и нормалью к касательной плоскости.

Весь диапазон полученных значений $\alpha_m(m, n)$ разбивается на N_{CAA} поддиапазонов шириной $\Delta \alpha_{mCAA}$ с центрами α_{mk} , где $k = \overline{0, N_{CAA}-1}$. Число поддиапазонов N_{CAA} выбирается близким к ширине изображения.

После этого может быть вычислена средняя амплитуда сигнала $a_{R\gamma_0}$ в пикселях, угол места которых попал в соответствующий поддиапазон:

$$A(\alpha_{mk}) = \frac{\sum_{m,n} \alpha_{R\gamma_0}(m, n)}{\sum_{m,n} 1} \quad (2.37)$$

$$\text{where } \alpha_m(m, n) \in \left[\alpha_{mk} - \frac{\Delta \alpha_{mCAA}}{2}, \alpha_{mk} + \frac{\Delta \alpha_{mCAA}}{2} \right]$$

В случае радиометрической однородности наблюдаемого участка земной поверхности полученная зависимость $A(\alpha_{mk})$ с точностью до мультипликативного коэффициента, пропорционального УЭПР наблюдаемого объекта, является оценкой формы квадрата угломестной ДНА по амплитуде $w_\alpha(\alpha_m)$, определяющего, как зависит от угла места коэффициент усиления амплитуды радиолокационного сигнала антенной РСА в результате его излучения и последующего приема. Квадрат угломестной ДНА по амплитуде $w_\alpha(\alpha_m)$ совпадает с угломестной ДНА по мощности.

Если форма угломестной ДНА $w_\alpha(\alpha_m)$ известна, то можно попытаться найти погрешность $\Delta \alpha_m$ угла крена на основе корреляционно-экстремального совмещения $A(\alpha_{mk})$ с $w_\alpha(\alpha_m)$:

$$\Delta \alpha_m = \underset{\Delta \alpha_m}{\operatorname{argmax}} r_{kopp}(A(\alpha_m + \Delta \alpha_m), w_\alpha(\alpha_m)), \quad (2.38)$$

где $r_{kopp}(w_1(\alpha_{m1}), w_2(\alpha_{m2}))$ – коэффициент корреляции Пирсона для одномерных действительных сигналов:

$$r_{kopp}(w_1(\alpha_{m1}), w_2(\alpha_{m2})) = \frac{\sum_k (w_1(\alpha_{m1} + k \Delta \alpha_{mCA}) - \bar{w}_1(\alpha_{m1}))(w_2(\alpha_{m2} + k \Delta \alpha_{mCA}) - \bar{w}_2(\alpha_{m2}))}{\sqrt{\sum_k (w_1(\alpha_{m1} + k \Delta \alpha_{mCA}) - \bar{w}_1(\alpha_{m1}))^2} \sum_k (w_2(\alpha_{m2} + k \Delta \alpha_{mCA}) - \bar{w}_2(\alpha_{m2}))^2}}, \quad (2.39)$$

где $\bar{w}(\alpha_m) = \frac{\sum_k w(\alpha_m + k \Delta \alpha_{mCA})}{\sum_k 1}$ – средний уровень одномерного сигнала.

Найденная поправка $\Delta \alpha_m$ будет адекватной реальной угловой ориентации КА только в случае, если наблюдаемый участок земной поверхности радиометрически однороден. В общем же случае радиометрическая неоднородность наблюдаемого участка земной поверхности приводит к значительному отличию форм сигналов $A(\alpha_{mk})$ и $w_\alpha(\alpha_m)$.

Пример такого отличия приведен на рисунке 2.6. Для наглядности оба сигнала приведены к диапазону от нуля до единицы путем деления на масштабные коэффициенты. Сигнал $A(\alpha_{mk})$ рассчитан в отсутствие существенных ошибок угла крена, однако его максимум смещен на $15'$ влево относительно максимума $w_\alpha(\alpha_m)$ из-за того, что в одной части изображения намного больше ярких объектов, чем в другой.

Отличие форм сигналов $A(\alpha_{mk})$ и $w_\alpha(\alpha_m)$ негативно отражается на качестве их совмещения и не позволяет найти поправку к углу крена радиолокационного КА с приемлемой точностью.

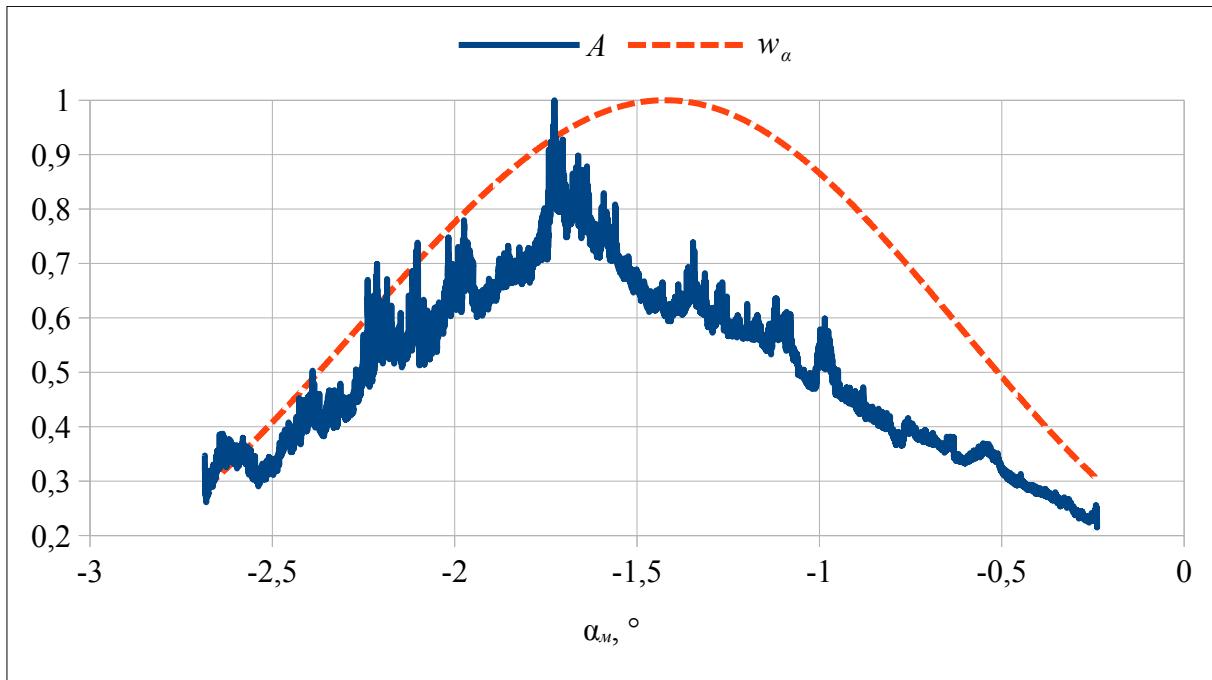


Рисунок 2.6 – Пример отличия формы сигналов $A(\alpha_{m_k})$ и $w_\alpha(\alpha_m)$

2.4.4 Статистический амплитудно-дифференциальный анализ изображения. Для корректного анализа сигнала от участка земной поверхности, представленного, согласно гипотезе, положенной в основу предлагаемого метода, совокупностью однородных объектов, каждый из которых имеет собственную УЭПР, необходимо использовать величину, зависящую от формы угломестной ДНА, но не зависящую от УЭПР наблюдаемого объекта.

В качестве такой величины предлагается отношение производной амплитуды сигнала по углу места к величине амплитуды сигнала: $\frac{da_{R\gamma_0}(m, n)/d\alpha_m}{a_{R\gamma_0}(m, n)}$. Для радиометрически однородных объектов значение этой величины должно быть равно отношению $\delta_w(\alpha_m) = \frac{w'_\alpha(\alpha_m)}{w_\alpha(\alpha_m)}$. Предлагаемая величина не зависит от УЭПР, поскольку последней пропорциональны и числитель, и знаменатель выражения $\frac{da_{R\gamma_0}(m, n)/d\alpha_m}{a_{R\gamma_0}(m, n)}$. Таким образом, УЭПР в виде коэффициента пропорциональности «сокращается» при делении.

Из-за плавного характера угломестной ДНА предлагаемая величина принимает достаточно малые значения, поэтому необходимо минимизировать погрешности ее оценивания, обусловленные влиянием спектрального шума и радиометрической неоднородностью отдельных объектов, представленных на изображении. Для устранения первого влияния необходима фильтрация исходного изображения. Для устранения второго влияния необходима отбраковка неоднородных объектов. Она осложняется тем, что радиометрически нескорректированное изображение в принципе неоднородно и необходимо отличать неоднородности, вызванные неравномерной подсветкой полосы съемки антенной РСА, и собственные неоднородности наблюдаемых объектов. Объект предлагается считать радиометрически однородным, если в его окрестности оцениваемая величина оказывается близка к $\delta_w(\alpha_m)$, т.е. модуль их разности не превышает некоторый порог.

С учетом вышесказанного статистический амплитудно-дифференциальный анализ изображения может быть выполнен следующим образом.

Из $a_{R\gamma_0}(m, n)$ формируется размытый вдоль строки сигнал:

$$a_{\phi R\gamma_0}(m, n) = \frac{1}{2R_\phi + 1} \sum_{l=-R_\phi}^{R_\phi} a_{R\gamma_0}(m, n+l), \quad (2.40)$$

где R_ϕ – радиус одномерного фильтра скользящего среднего.

В пикселях размытого сигнала через конечные разности оценивается предложенная выше величина:

$$\begin{aligned} \partial_A(m, n) &= \\ &= \frac{2(a_{\phi R\gamma_0}(m, n+R_\phi) - a_{\phi R\gamma_0}(m, n-R_\phi))}{(a_{\phi R\gamma_0}(m, n+R_\phi) + a_{\phi R\gamma_0}(m, n-R_\phi))(\alpha_m(m, n+R_\phi) - \alpha_m(m, n-R_\phi))}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Диапазон углов места разбивается на $N_{СADA}$ более широких поддиапазонов с шагом $\Delta \alpha_{mСADA} = (2R_\phi + 1)\Delta \alpha_{mCAA}$. Поддиапазоны имеют центры $\alpha_{m\partial k}$, где $k = \overline{0, N_{СADA}-1}$.

После этого может быть вычислена средняя величина ∂_A в пикселях, угол места которых попал в соответствующий поддиапазон и которые соответствуют радиометрически однородным объектам:

$$\delta_A(\alpha_{m\partial k}) = \frac{\sum_{m,n} \partial_A(m, n)}{\sum_{m,n} \begin{cases} \alpha_m \in \left[\alpha_{m\partial k} - \frac{\Delta \alpha_{mCADA}}{2}, \alpha_{m\partial k} + \frac{\Delta \alpha_{mCADA}}{2}\right] \\ |\partial_A(m, n) - \delta_w(\alpha_m, n)| \leq \theta_{CADA} \end{cases}}, \quad (2.42)$$

где θ_{CADA} – порог отбраковки радиометрически неоднородных объектов.

Радиус фильтра R_ϕ и порог отбраковки θ_{CADA} подбираются таким образом, чтобы уменьшить погрешности оценки $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$ и обеспечить схожесть формы сигналов $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$ и $\delta_w(\alpha_m)$. Примеры сигналов $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$ и $\delta_w(\alpha_m)$ полученных для того же изображения, что и сигналы $A(\alpha_{mk})$ и $w_\alpha(\alpha_m)$, приведенные на рисунке 2.6, представлены на рисунке 2.7.

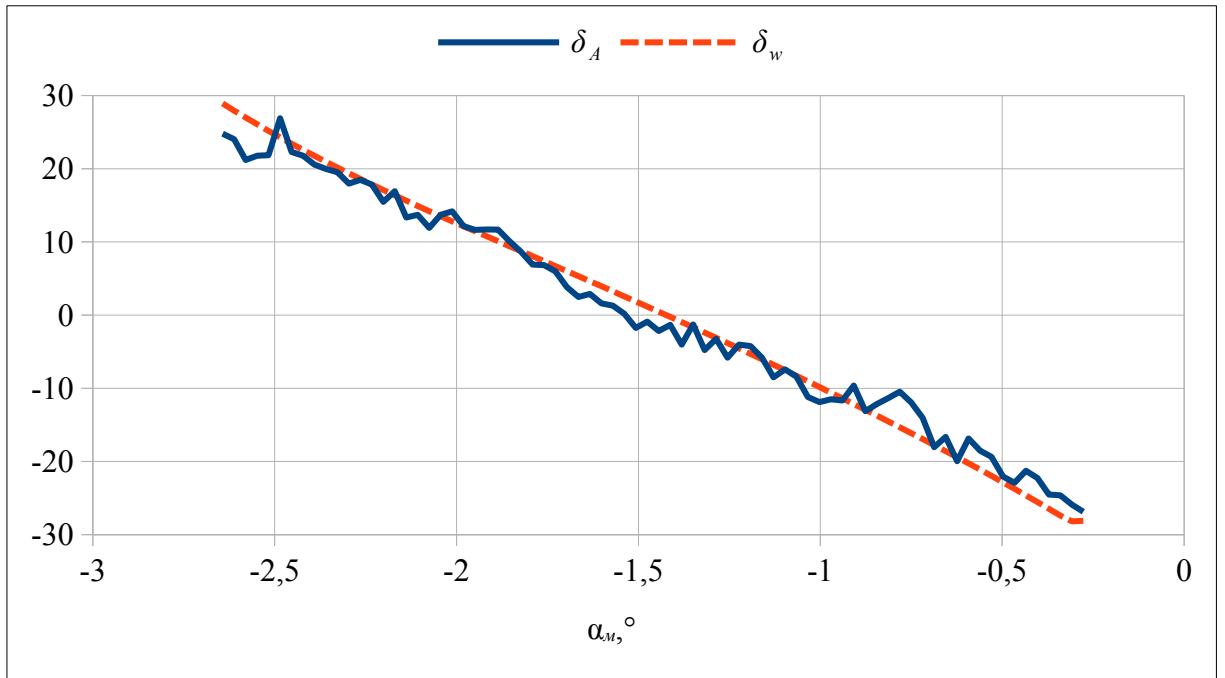


Рисунок 2.7 – Пример сходства сигналов $\delta_A(\alpha_{m\partial k})$ и $\delta_w(\alpha_m)$

Погрешность угла крена $\Delta \alpha_m$ может быть выявлена на основе совмещения сигналов $\delta_A(\alpha_{mod})$ и $\delta_w(\alpha_m)$. Поскольку влияние УЭПР исключено, совмещаемые сигналы в идеале должны быть не просто линейно зависимы, а полностью совпадать. Следовательно для их совмещения используется не коэффициент корреляции Пирсона, а взвешенная сумма квадратов невязок:

$$\Delta \alpha_m = \operatorname{argmin}_{\Delta \alpha_m} \sum_{k=0}^{N_{СADA}-1} (w_{СADAk} (\delta_A(\alpha_{modk} + \Delta \alpha_m) - \delta_w(\alpha_{modk})))^2, \quad (2.43)$$

где $w_{СADAk}$ – весовые коэффициенты, назначаемые для каждого поддиапазона в соответствии с мощностью множества $\{(m, n) : \alpha_m(m, n) \in \left[\alpha_{modk} - \frac{\Delta \alpha_{mСADA}}{2}, \alpha_{modk} + \frac{\Delta \alpha_{mСADA}}{2} \right] \text{ и } |\delta_A(m, n) - \delta_w(\alpha_m(m, n))| \leq \theta_{СADA} \}$.

Введение весовых коэффициентов обусловлено отбраковкой неоднородных объектов, из-за которой в отдельные поддиапазоны может попасть крайне малое количество пикселей (m, n) (или даже ни одного пикселя). В таких поддиапазонах оценка $\delta_A(\alpha_{modk})$ может быть недостоверной, поэтому ей назначается малый вес $w_{СADAk}$.

2.4.5 Организация итерационного процесса последовательного уточнения угла крена. Слабым местом рассмотренного выше статистического амплитудно-дифференциального анализа является выявление однородных объектов. При большой начальной погрешности знания угловой ориентации для истинно однородных объектов величина $\delta_A(m, n)$ может отличаться от $\delta_w(\alpha_m)$ сильнее, чем на выбранный порог $\theta_{СADA}$. Поэтому необходима организация итерационного процесса, в ходе которого систематическая погрешность угла крена $\Delta \alpha_m$ должна снижаться и истинно однородные объекты всё в большем количестве должны признаваться таковыми.

С учетом вышесказанного предлагается следующая последовательность действий при уточнении угла крена в соответствии с рассматриваемым методом.

Шаг 1. Выполняются статистический амплитудный анализ изображения и корреляционно-экстремальное совмещение сигналов $A(\alpha_{m_k})$ и $w_a(\alpha_m)$.

Коэффициент корреляции Пирсона, используемый при совмещении, выравнивает средние уровни совмещаемых сигналов, хотя аддитивной зависимости между ними быть не должно. Тем не менее применение коэффициента корреляции Пирсона позволяет лучше оценить, насколько отличия формы сигналов соотносятся с шириной диапазонов их значений. Направленность ДНА может быть сильно выраженной, когда ширина диапазона ее значений сопоставима со средним значением, а может быть невыраженной, когда ширина диапазона ее значений существенно меньше среднего значения. При расчете коэффициента корреляции Пирсона обнуляются средние уровни сигналов, и за счет этого он принимает более низкие значения в случае слабо направленной ДНА.

Достигнутое при совмещении сигналов максимальное значение коэффициента корреляции Пирсона $\max r_{kopp}(A(\alpha_m + \Delta\alpha_m), w_a(\alpha_m))$ используется в качестве меры радиометрической однородности участка земной поверхности, представленного на радиолокационном изображении. Если максимальное значение близко к единице, участок земной поверхности однородный, а полученная поправка $\Delta\alpha_m$ к углу крена обладает достаточной точностью и не требует дальнейшего уточнения. В противном случае полученное значение поправки $\Delta\alpha_m$ игнорируется, ей задается нулевое значение и выполняется переход к шагу 2.

Шаг 2. Выполняется статистический амплитудно-дифференциальный анализ изображения, при этом значения углов места $\alpha_m(m, n)$ заменяются уточненными значениями $\alpha_m(m, n) + \Delta\alpha_m$. По результатам совмещения сигналов $\delta_A(\alpha_{m\delta k})$ и $\delta_w(\alpha_m)$ находится новое значение поправки $\delta\alpha_m$. Старое значение поправки $\Delta\alpha_m$ увеличивается на $\delta\alpha_m$.

Шаг 3. Если значение $\delta\alpha_m$, полученное на предыдущем шаге, достаточно велико, выполняется переход к шагу 2. В противном случае итерационный процесс останавливается, а значение $\Delta\alpha_m$ признается достаточно точным и пригодным для

учета при последующей радиометрической коррекции радиолокационного изображения.

По завершении оценивания угла крена можно проанализировать, какая часть пикселей изображения была признана принадлежащей радиометрически однородным объектам. Если эта часть слишком мала (гипотеза, положенная в основу метода, неверна, и однородные объекты оказались в меньшинстве), результат оценивания можно считать неточным из-за недостаточно представительной статистической выборки. В этом случае можно отдать предпочтение значению угла крена, рассчитанному на основе измерительной информации.

2.4.6 Учет вариативности погрешности угла крена. Рассмотренный метод на базе статистического амплитудно-дифференциального анализа предполагает, что погрешность угла крена постоянна по всему полю изображения или что ее вариации намного меньше среднего значения. Для уточнения угла крена в условиях сильной вариативности его погрешности предлагаемый амплитудно-дифференциальный анализ непригоден, поскольку требует значительного количества пикселей для накопления статистики. Однако предложенный метод можно незначительно модифицировать на случай плавных изменений погрешности угла крена вдоль столбца изображения. Для этого изображение делится на блоки такой же ширины, но меньшей высоты, чем полное изображение. Высота каждого блока должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить представительность статистической выборки, но не настолько, чтобы имели существенное значение плавные изменения систематической погрешности. В пределах каждого блока независимо выполняется уточнение, а значения поправок $\Delta \alpha_m$, полученные для блоков, служат для построения функций, описывающей их плавное изменение вдоль столбца полного изображения. Построение функции может выполняться как на основе интерполяции, так и на основе аппроксимации по методу наименьших квадратов. В последнем случае в качестве аппроксимирующей функции может быть взят полином малой степени.

Экспериментальные исследования эффективности предложенного метода приведены в главе 6.

Основные результаты

1. Разработан алгоритм бортового сжатия радиоголограмм на основе неравномерного блочно-адаптивного квантования и последующего кодирования по Хаффману. Предложены критерий и механизм расчета оптимальных пороговых значений для квантования. Теоретическая оценка эффективности алгоритма предсказывает улучшение отношения сигнал-шум при заданной степени сжатия на 0,1–0,4 дБ по сравнению с известным алгоритмом FDBAQ.

2. Предложен алгоритм адаптивного бортового сжатия оптических изображений на основе применения нейросетевых автокодировщиков для базового сжатия с потерями и нейросетевого прогнозирования с арифметическим кодированием для дополнительного сжатия без потерь. За счет введения семейства кодировщиков с унифицированными весами и единого декодировщика алгоритм гарантирует отсутствие блочных артефактов на изображении, восстановленном из сжатых данных.

3. Разработан метод уточнения углов рысканья и тангажа, измеренных оптико-электронными приборами – БОКЗ, на основе совместного оценивания относительного значения доплеровского центроида и доплеровской неопределенности путем амплитудного анализа двух радиолокационных изображений, синтезированных из радиоголограммы по субапертурам. Метод позволяет, используя выявленную величину погрешности относительного значения доплеровского центроида, выбрать на каждом изображении зону неоднозначности, в рамках которой будет осуществляться амплитудный анализ, и за счет этого сократить число итераций, необходимых для качественного оценивания доплеровской неопределенности.

4. Предложен метод уточнения угла крена, измеренного оптико-электронными приборами – БОКЗ, на основе статистического амплитудно-дифференциального анализа радиолокационного изображения, синтезированного из радиоголограммы. Метод позволяет выполнять уточнение не только в широкозахватных, но и в однолучевых режимах съемки, а также получать приемлемые оценки по радиометрически неоднородным участкам земной поверхности, на которых имеется значительное количество однородных площадных объектов с разной УЭПР.

3 МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОБЪЕДИНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В главе выдвигаются и обосновываются третье и четвертое положения, выносимые на защиту. В рамках третьего положения описываются алгоритмы, позволяющие уменьшить ошибку геодезической привязки радиолокационного изображения за счет совмещения с опорным оптическим снимком [66, 72, 73, 114–116] и увеличить скорость геометрических преобразований при ортотрансформировании и совмещении радиолокационных изображений за счет полиномиальных аппроксимаций [35, 58, 69–71].

В рамках четвертого положения описывается метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики, позволяющий уменьшить количество геометрических дефектов (переналожений сигналов и затенений) без возникновения ложных резких границ в условиях низкой детальности опорной цифровой модели высот, сформированной по данным оптико-электронных систем наблюдения Земли [35, 58, 74, 117, 118].

3.1 Алгоритм уточнения геодезической привязки радиолокационного изображения на основе геометрического совмещения с опорным оптическим снимком

3.1.1 Предварительная подготовка опорного оптического снимка. При сбоях измерительной аппаратуры или систематических сдвигах временной привязки пикселей радиолокационного изображения могут наблюдаться значительные ошибки геодезической привязки, выполняемой по строгой модели (1.11): вплоть до нескольких сотен метров. Они несколько ниже, чем в аналогичных ситуациях в оптико-электронных системах, поскольку при корректном разрешении допле-

ровской неопределенности, метод выполнения которого предложен в предыдущей главе, ошибки измерения угловой ориентации не оказывают негативного влияния на геодезическую привязку радиолокационного изображения. Тем не менее, при таких погрешностях привязки невозможно корректно выполнить процедуру ортотрансформирования, поскольку высоты, извлекаемые из опорной цифровой модели $h_{onop}(B_u, L_u)$, будут сопоставляться не тем объектам, к каким они относятся на самом деле. Геокодирование же на средней высоте h_{cp} неприемлемо, поскольку не устраняет значительные внутрикадровые искажения, вызванные перепадами высот наблюдаемых объектов. Таким образом, радиолокационное изображение следует оставить в исходной антенной или путевой системе координат. Поскольку данные системы отличаются лишь положительным направлением осей, а также шагами дискретизации величин $R_{\perp n}$ и $t_{\perp m}$, в дальнейшем не будем различать эти системы координат, обозначая их как (t_{\perp}, R_{\perp}) , но подразумевая, что в антенной системе шкала дискретизации $R_{\perp n}$ линейная, а в путевой – нелинейная.

В то же время оптическое опорное изображение представляет собой высокоточно привязанный ортофотоплан в некоторой системе картографических координат (E_u, N_u) . Объектам, представленным на таком изображении, могут быть корректно сопоставлены высоты из опорной цифровой модели. Следовательно, можно обратить процедуру ортотрансформирования и преобразовать оптический опорный снимок в систему координат радиолокационного изображения. Рассмотрим подробнее этот процесс.

Трансформирование опорного изображения удобнее всего выполнять по обратному закону координатного соответствия. Для этого предварительно необходимо получить в целевой системе координат (t_{\perp}, R_{\perp}) опорную цифровую модель высот $h_{onop}(B_u, L_u)$, на основе итерационного решения системы (2.36). Обратное координатное соответствие задается преобразованием $(t_{\perp}, R_{\perp}, h_{onop}(t_{\perp}, R_{\perp})) \rightarrow (B_u, L_u) \rightarrow (E_u, N_u)$, осуществляемым на основе решения системы (1.11) и применения правил проецирования земной сферы или эллипсоида на плоскость. Во-

прос уменьшения вычислений при массовых координатных преобразованиях подобного вида рассмотрен в следующем параграфе.

Из-за погрешностей $h_{\text{опор}}(B_u, L_u)$ внутrikадровые искажения, внесенные в опорное изображение, не будут полностью совпадать с аналогичными искажениями, имеющимися на радиолокационном изображении. Пусть в меньшей степени, но подобное влияние оказывает также погрешность строгой модели привязки радиолокационного снимка.

Для корреляционно-экстремального совмещения изображений важно, чтобы совмещаемые фрагменты могли наложиться друг на друга пиксель в пиксель. Для этого перед совмещением необходимо увеличить шаг дискретизации изображений до такого уровня, чтобы разность большей части их внутrikадровых искажений была субпиксельной. Если при этом требуется более высокая точность совмещения, чем увеличенный шаг пикселя, то ее можно достичь путем интерполяции корреляционной функции и субпиксельного поиска точки максимума коэффициента корреляции.

С учетом доступных в настоящий момент глобальных цифровых моделей высот, имеющих шаг пикселя около 30 м и вертикальную точность порядка 4–5 м [307, 308], в качестве минимального шага дискретизации совмещаемых изображений можно выбрать 4 м. В зависимости от характеристик привлекаемых высотных данных это значение может быть уточнено. Если детальность радиолокационного и/или опорного снимка выше, выполняется понижение частоты их дискретизации с предварительным подавлением высоких частот. В случае радиолокационного изображения это также позволяет уменьшить уровень спекл-шума.

3.1.2 Модель геометрического рассогласования радиолокационного и опорного изображений. Задача автоматического совмещения такой разнородной информации, как радиолокационное и оптическое изображения, очень сложная. Любые подходы к отождествлению фрагментов таких данных будут с некоторой вероятностью давать ложные результаты. Поэтому необходима модель геометрического рассогласования совмещаемых изображений с малым числом параметров,

позволяющая отбраковать отдельные ложные результаты, которые должны существенно отклоняться от нее, в то время как истинные результаты должны хорошо согласовываться с аппроксимирующей их моделью.

Малопараметрическая модель геометрического рассогласования допустима, поскольку ошибки определения орбиты КА имеют плавно изменяющийся во времени характер, погрешности шкал $R_{\perp n}$ и $t_{\perp m}$ обычно являются систематическими, а разность внутрикадровых искажений совмещаемых изображений сведена до субпиксельной величины путем подготовки, рассмотренной в предыдущем пункте. Плавность изменения ошибок определения пространственного положения КА достигается применением модели возмущенной орбиты, сглаживающей шумы отдельных навигационных измерений [220].

В качестве малопараметрической модели, допускающей плавные изменения ошибки привязки по полю радиолокационного изображения, может быть выбрана билинейная функция вида:

$$\mathbf{p}_{on} = \mathbf{b} + n_p \mathbf{k}_n + m_p \mathbf{k}_m + m_p n_p \mathbf{k}_{mn}, \quad (3.1)$$

где $\mathbf{p}_p = (m_p, n_p)^T$ – координаты пикселя радиолокационного изображения, соответствующего пикселию $\mathbf{p}_{on} = (m_{on}, n_{on})^T$ опорного изображения; \mathbf{b} , \mathbf{k}_n , \mathbf{k}_m и \mathbf{k}_{mn} – векторы параметров модели.

В прожекторном режиме, когда радиокационная съемка ведется короткими кадрами, вариации ошибки привязки по полю кадра малы, и их тяжело обнаружить. В этом случае может быть выбрана модель геометрических рассогласований в виде плоскопараллельного сдвига, т.е. векторы мультиплекативных коэффициентов \mathbf{k}_n , \mathbf{k}_m и \mathbf{k}_{mn} приняты нулевыми, а функция $\mathbf{p}_{on}(m_p, n_p)$ сведена к:

$$\mathbf{p}_{on} = \mathbf{b}. \quad (3.2)$$

3.1.3 Предварительные яркостные преобразования совмещаемых радиолокационного и опорного изображений. Информация, представленная на радиолокационном и оптическом изображениях, является существенно разнородной, в то время как классический коэффициент корреляции Пирсона, в отличие от

сложно вычисляемой взаимной информации [224], способен обнаруживать только линейную связь двух сигналов. Поэтому необходимо преобразовать яркости на совмещаемых изображениях для увеличения их сходства.

Помимо снижения уровня спекл-шума, основной операцией повышения сходства радиолокационного изображения $s_p(m, n)$ с оптическим $s_{onop}(m, n)$ является логарифмическое преобразование яркости первого:

$$s_{p\log}(m, n) = \log(|s_p(m, n)| + 1). \quad (3.3)$$

Основание логарифма в (3.3) может быть произвольным, поскольку определяет лишь коэффициент линейного усиления сигнала $s_{p\log}(m, n)$, не существенный для коэффициента корреляции Пирсона. Прибавляемая перед логарифмированием единица является малой регуляризующей добавкой, позволяющей избежать отрицательных значений $s_{p\log}(m, n)$.

На радиолокационном изображении часто имеют большую яркость резкие края высотных объектов: зданий, заборов, мостов и т.п. Поэтому имеет смысл выделить контуры на оптическом изображении. Это можно сделать с помощью оператора Собеля:

$$s_{onop\ Cob}(m, n) = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * s_{onop}(m, n) \right)^2 + \left(\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} * s_{onop}(m, n) \right)^2}, \quad (3.4)$$

где $*$ – операция свертки.

Поскольку на радиолокационном изображении подсвечены только границы высотных объектов, срабатывающие как уголковые отражатели, имеет смысл на нем тоже выполнить выделение контуров, чтобы подсветить границы объектов, не имеющие перепада высоты. Выделение контуров на радиолокационном изображении хорошо работает только в случае предварительной фильтрации спекл-шума в ходе понижения частоты дискретизации. В противном случае пятна спекл-шума просто превратятся в кольца без подсветки реальных границ объектов. Радиолокационное изображение с выделенными контурами может быть получено как

$$s_{p\log Cob}(m, n) = \sqrt{\left(\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} * s_{p\log}(m, n) \right)^2 + \left(\begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} * s_{p\log}(m, n) \right)^2}. \quad (3.5)$$

Коэффициент корреляции Пирсона сначала применяется к исходным сигналам $s_{p\log}(m, n)$ и $s_{onop}(m, n)$, а если совмещение признано недостоверным, то он применяется к преобразованным сигналам $s_{p\log Cob}(m, n)$ и $s_{onop Cob}(m, n)$.

3.1.4 Вычислительно эффективный расчет коэффициента корреляции Пирсона. Для достижения высокой производительности процедуры геодезической привязки необходима эффективная организация вычислений корреляционной функции $f_{kopp}(\Delta m, \Delta n)$, отсчеты которой представляют собой значения коэффициента корреляции Пирсона $r_{kopp}(s_1(m+\Delta m, n+\Delta n), s_2(m, n))$ при различных смещениях $(\Delta m, \Delta n)$ фрагмента одного изображения относительно фрагмента другого снимка.

Для эффективной реализации вычислений корреляционная функция может быть представлена в виде:

$$f_{kopp} = \frac{\text{ОБПФ}\{ \text{БПФ}\{s_1\} \text{БПФ}^*\{\hat{s}_2\} \}}{\sqrt{\mathbf{M}_{cp} * s_1^2 - (\mathbf{M}_{cp} * s_1)^2}}, \quad (3.6)$$

где ОБПФ – обратное БПФ, $\mathbf{M}_{cp} = \frac{1}{N_{\phi p}^2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}_{N_{\phi p} \times N_{\phi p}}$ – матрица фильтра скользящего среднего, $N_{\phi p}$ – размер стороны квадратного фрагмента $s_2(m, n)$, \hat{s}_2 – результат нормализации сигнала фрагмента $s_2(m, n)$:

$$\hat{s}_2(m, n) = \frac{s_2(m, n) - \frac{1}{N_{\phi p}^2} \sum_{k=0}^{N_{\phi p}-1} \sum_{l=0}^{N_{\phi p}-1} s_2(k, l)}{\sqrt{\frac{1}{N_{\phi p}^2} \sum_{k=0}^{N_{\phi p}-1} \sum_{l=0}^{N_{\phi p}-1} s_2^2(k, l) - \left(\frac{1}{N_{\phi p}^2} \sum_{k=0}^{N_{\phi p}-1} \sum_{l=0}^{N_{\phi p}-1} s_2(k, l) \right)^2}}. \quad (3.7)$$

Вычисление знаменателя в (3.6) для каждого смещения $(\Delta m, \Delta n)$ может быть асимптотически сведено к четырем сложениям, пяти вычитаниям, четырем

умножениям и одному извлечению квадратного корня на один отсчет $f_{\text{корр}}(\Delta m, \Delta n)$, поскольку свертка с двумерным фильтром скользящего среднего во временной области асимптотически сводится к двум сложениям и двум вычитаниям.

Основную часть объема вычислений составляет расчет числителя в (3.6) для всех возможных значений $(\Delta m, \Delta n)$, имеющий сложность $O((N_{\phi p} + 2\Delta N_{\text{поиск}})^2 \log_2(N_{\phi p} + 2\Delta N_{\text{поиск}}))$, где $\Delta N_{\text{поиск}}$ – радиус области поиска точки максимума $f_{\text{корр}}(\Delta m, \Delta n)$.

Хотя имеются алгоритмы вычисления БПФ для фрагмента сигнала произвольного размера, расчеты наиболее эффективны, когда величина $(N_{\phi p} + 2\Delta N_{\text{поиск}})$ является степенью двойки. Поэтому при совмещении необходимо выбирать $N_{\phi p}$ и $\Delta N_{\text{поиск}}$ так, чтобы выполнить это условие.

На скорость вычислений с использованием современной вычислительной техники существенно влияет точность представления чисел с плавающей точкой. При умеренных значениях $(N_{\phi p} + 2\Delta N_{\text{поиск}})$, не превышающих 8196, и использовании выражения (3.6) расчет числителя отсчетов корреляционной функции можно выполнять с одинарной точностью представления чисел с плавающей точкой. Такая возможность обеспечивается за счет предварительной нормировки сигнала $s_2(m, n)$. В этом случае из числителя коэффициента корреляции Пирсона исчезает операция вычитания произведения средних уровней сигналов, при которой могла возникнуть катастрофическая потеря точности.

При этом нормировка $s_2(m, n)$ в соответствии с (3.7), содержащая операции вычитания, выполняется однократно, поэтому в ее рамках могут вестись расчеты с большей точностью представления чисел с плавающей точкой.

Также важную роль в эффективной организации вычислений играет алгоритм расчета двумерных прямого и обратного БПФ.

Двумерное БПФ может быть сведено к последовательности одномерных БПФ, применяемых сначала к строкам, а затем к столбцам двумерного сигнала. Здесь возможно несколько направлений увеличения скорости расчетов.

Во-первых, на вход БПФ по строкам подается действительный сигнал, обладающий симметричным спектром. Такое преобразование можно свести к БПФ комплексного сигнала с в 2 раза меньшим числом отсчетов и примерно в 2 раза сократить объем вычислений. При этом действительные части отсчетов комплексного сигнала составляют четные отсчеты действительного сигнала (при индексации с нуля), а мнимые части – нечетные отсчеты [309]. На вход БПФ по столбцам подается уже комплексный сигнал, для которого описанная оптимизация вычислений невозможна, но число столбцов при этом сокращается в 2 раза, поскольку вторая симметричная половина строчного спектра не формируется. Таким образом, учет действительного характера сигнала при строчных БПФ и ОБПФ позволяет примерно в 2 раза сократить общий объем вычислений отсчетов $f_{\text{корр}}(\Delta m, \Delta n)$.

Во-вторых, не изменяя суммарный объем вычислений, но управляя порядком их выполнения, можно в несколько раз ускорить вычисления на современных центральных процессорах. Ускорение связано с работой кэш-памяти процессора, которая максимально эффективна, когда доступ к данным в оперативной памяти осуществляется последовательно.

Рассмотрим типовые реализации классического алгоритма Кули–Тьюки для вычисления одномерного БПФ по основанию 2 [310]. В них порядок выполнения операций типа «бабочка» оптимизирован с точки зрения сокращения расчетов комплексного множителя, вращающего фазу одного из аргументов «бабочки»: сначала выполняются все операции с одинаковым значением комплексного множителя, но разным шагом между расположением аргументов, а затем осуществляется переход к следующему значению комплексного множителя. При таком порядке отсчеты сигнала для выполнения операций «бабочка» выбираются из оперативной памяти непоследовательно, что снижает эффективность кэш-памяти.

Однако можно изменить порядок вычислений: сначала выполнять все операции типа «бабочка» с одним и тем же шагом между расположением аргументов, монотонно увеличивая номер отсчета сигнала, являющегося первым аргументом «бабочки», а затем переходить к следующему значению шага между расположением ар-

гументов. При этом для каждой следующей «бабочки» требуется новое значение комплексного множителя, однако эти значения периодически повторяются, и можно избежать их повторного вычисления за счет однократного предварительного расчета. Количество комплексных множителей, которые необходимо рассчитать, заранее известно, поскольку все одномерные комплексные БПФ применяются к сигналам одного и того же размера: $(N_{\phi p} + 2 \Delta N_{\text{поск}})/2$ для строк и $(N_{\phi p} + 2 \Delta N_{\text{поск}})$ для столбцов.

Предлагаемое изменение порядка вычислений приводит к увеличению скорости расчетов на современных центральных процессорах при числе отсчетов преобразуемого комплексного сигнала не менее 256. При меньшем числе отсчетов сигнал целиком помещается в кэш-память процессора и порядок вычислений перестает иметь значение. При числе отсчетов 4096 скорость вычислений увеличивается примерно в 2 раза. При дальнейшем увеличении числа отсчетов выигрыш в скорости доходит до трехкратного.

Наконец, порядок вычислений можно изменить при выполнении БПФ по столбцам. Транспонирование матрицы отсчетов двумерного сигнала выполняется крайне неэффективно с точки зрения кэш-памяти центрального процессора. Можно предложить два подхода к снижению этой неэффективности. Первый подход предназначен для умеренного числа строк и столбцов матрицы отсчетов, второй подход – для больших матриц.

В рамках первого подхода можно отказаться от транспонирования матрицы и заменить его синхронным выполнением БПФ для всех столбцов. Алгоритм Кули–Тьюки модифицируется так, что на вход ему подается не скалярный, а векторный одномерный комплексный сигнал. Каждый отсчет такого сигнала представляет собой строку матрицы исходного двумерного сигнала. Каждая операция «бабочка» поэлементно применяется к компонентам отсчетов векторного сигнала. При этом в рамках выполнения каждой «бабочки» последовательно выбираются из оперативной памяти две строки матрицы отсчетов, что улучшает работу кэш-памяти. Однако одновременная работа с двумя строками, которые могут быть значительно удалены друг от друга при выполнении «бабочек» с большим шагом

между расположением аргументов, не позволяет добиться максимальной эффективности кэш-памяти. В особенности это проявляется для больших матриц.

В рамках второго подхода осуществляется транспонирование матрицы отсчетов группами из нескольких столбцов. Каждая такая группа транспонируется с получением матрицы малой высоты, равной числу столбцов в группе. К строкам транспонированной матрицы последовательно применяется одномерное БПФ, а затем выполняется обратное транспонирование с записью преобразованных столбцов в исходную матрицу отсчетов. В рамках данного подхода каждое одномерное БПФ выполняется с более эффективным использованием кэш-памяти, чем в первом подходе, поскольку идет одновременная работа только с одной, а не с двумя строками. Однако дополнительные расходы вносит транспонирование. В сумме положительный эффект по сравнению с первым подходом появляется только для больших матриц.

3.1.5 Расчет значений параметров модели геометрического рассогласования радиолокационного и опорного изображений. Предлагается следующий алгоритм определения значений параметров модели геометрического рассогласования радиолокационного и опорного изображений.

Шаг 1. Выбираются размер фрагмента для корреляции, размер области поиска и начальное значение расстояния между центрами соседних фрагментов. Расстояние сначала выбирается большим, чтобы получить шанс на уточнение привязки с малым объемом вычислений, если совмещаемые изображения окажутся достаточно схожими.

Шаг 2. Для каждого k -го фрагмента радиолокационного изображения с центром в точке (m_k, n_k) выполняется его корреляционно-экстремальное совмещение с опорным снимком в виде поиска точки максимума $(\Delta m_k, \Delta n_k)$ модуля корреляционной функции $f_{kopp}(\Delta m, \Delta n)$ на основе вычислительно эффективных расчетов, рассмотренных в предыдущем пункте. Положение точки максимума определяется субпиксельно. Для этого в ее окрестности $|f_{kopp}(\Delta m, \Delta n)|$ аппроксимируется эллиптическим параболоидом, и за точку максимума $|f_{kopp}(\Delta m, \Delta n)|$ признаются координаты вершины параболоида.

Шаг 3. Осуществляется отбраковка недостоверных результатов корреляционно-экстремального совмещения по критерию их неустойчивости к изменению размера коррелируемого фрагмента. Для этого каждый фрагмент делится на четыре равные части. Для каждой из частей также выполняется корреляционно-экстремальное совмещение. Если для фрагмента и не менее $N_{част}$ из 4 его частей максимум модуля коэффициента корреляции Пирсона превышает выбранный порог и положения точек максимума модуля корреляционной функции отличаются не более чем на выбранную величину, то результаты совмещения признаются достоверными. В противном случае они отбраковываются. Рассмотренный критерий позволяет отбраковать абсолютное большинство недостоверных результатов.

Шаг 4. На основе результатов совмещения отдельных фрагментов, признанных надежными, рассчитываются значения параметров модели геометрического рассогласования. Расчет выполняется по МНК путем нахождения псевдорешения системы, составленной из уравнений (3.1), в которые для каждого неотбракованного k -го фрагмента в качестве $\mathbf{p}_p = (m_p, n_p)^T$ подставляются координаты центра фрагмента $(m_k, n_k)^T$, а в качестве $\mathbf{p}_{on} = (m_{on}, n_{on})^T$ – координаты $(m_k + \Delta m_k, n_k + \Delta n_k)^T$, смещенные с учетом точки максимума корреляционной функции. Для повышения точности рассчитываемых параметров может применяться весовой вариант МНК, где значения весов для каждого фрагмента выбираются в соответствии с максимальным значением корреляционной функции.

Достаточно часто возникают ситуации, что на значительных участках совмещаемых радиолокационного и оптического изображений наблюдаемые объекты выглядят настолько по-разному, что в пределах таких участков не находится ни одного результата корреляции, призванного достоверным, а все найденные результаты локализуются в пределах малой области. В данных ситуациях оценка по МНК всех параметров модели (3.1) может привести к значительному возрастанию погрешности по мере удаления от этой малой области к краям изображений. Чтобы этого избежать, предлагаются следующие меры.

Перед выполнением расчетов по МНК рассчитываются СКО σ_m и σ_n координат m_k и n_k центров фрагментов, результаты корреляционно-экстремального совмещения которых не были отбракованы. Если фрагменты достаточно равномерно покрывают площадь радиолокационного изображения, то значения σ_m и σ_n должны быть близки к 30 % от высоты и ширины изображения соответственно. Если σ_m оказывается существенно меньше, векторы параметров \mathbf{k}_m и \mathbf{k}_{mn} признаются нулевыми с сокращением числа неизвестных в системе уравнений, решаемой по МНК. Если малым оказывается значение σ_n , то обнуляются векторы параметров \mathbf{k}_n и \mathbf{k}_{mn} .

Если радиолокационное изображение получено в прожекторном режиме и применяется упрощенная модель геометрического рассогласования (3.2), то анализ σ_m и σ_n не требуется, поскольку из (3.2) исключены вариации рассогласований по полю изображения.

Шаг 5. Рассчитываются среднеквадратические невязки по координатам:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{pm}^2 \\ \sigma_{pn}^2 \end{pmatrix} = \frac{\sum_k \left(\begin{pmatrix} m_k + \Delta m_k \\ n_k + \Delta n_k \end{pmatrix} - \mathbf{p}_{on}(m_k, n_k) \right) \circ \left(\begin{pmatrix} m_k + \Delta m_k \\ n_k + \Delta n_k \end{pmatrix} - \mathbf{p}_{on}(m_k, n_k) \right)}{\sum_k 1}, \quad (3.8)$$

где $\mathbf{p}_1 \circ \mathbf{p}_2$ – произведение Адамара (поэлементное произведение матриц).

Если σ_{pm} и σ_{pn} достаточно малы, число неотбракованных фрагментов достаточно велико и в случае использования модели (3.1) не выполнялось обнуление отдельных коэффициентов, алгоритм определения значений параметров модели геометрического рассогласования радиолокационного и опорного изображений успешно завершает работу. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

Шаг 6. Фрагменты, для которых $|m_k + \Delta m_k - m_{on}(m_k, n_k)| > 3\sigma_{pm}$ или $|n_k + \Delta n_k - n_{on}(m_k, n_k)| > 3\sigma_{pn}$, дополнительно отбраковываются. После отбраковки повторяются шаги 4–5. Если условие успешного окончания алгоритма из шага 5 так и не выполнилось, продолжаются дальнейшие действия.

Шаг 7. Дополнительно отбраковываются фрагменты, для которых $|m_k + \Delta m_k - m_{on}(m_k, n_k)| > \sigma_{pm}$ или $|n_k + \Delta n_k - n_{on}(m_k, n_k)| > \sigma_{pn}$, и повторяются ша-

ги 4–5. Шаг 7 повторяется, до тех пор пока не выполнится условие из шага 5 без учета требования к числу фрагментов или не закончатся фрагменты для отбраковки.

Шаг 8. Если итерационное выполнение шага 7 завершилось полным выполнением условия из шага 5, алгоритм успешно заканчивает работу. В противном случае признается, что с заданным расстоянием между центрами соседних коррелируемых фрагментов достоверное совмещение радиолокационного и опорного изображений не представляется возможным, и осуществляется переход к шагу 9.

Шаг 9. Расстояние между центрами соседних коррелируемых фрагментов уменьшается в 2 раза. Если уменьшенное значение расстояния стало недопустимо малым, алгоритм завершает работу с отрицательным результатом. Совмещаемые изображения являются настолько разнородными, что не удается их автоматически совместить. В этом случае для геодезической привязки радиолокационного изображения по наземным ориентирам требуется участие человека. Если же уменьшенное значение расстояния остается допустимым, то выполняется переход к шагу 2, на котором для экономии вычислений могут не пересчитываться результаты совмещения фрагментов, уже полученные ранее для в 2 раза большего расстояния между их центрами.

Если размер области поиска слишком велик, то для сокращения объема вычислений можно ввести многомасштабное совмещение. Для этого на первом этапе существенно снижается частота дискретизации изображений и в соответствии с описанным алгоритмом находится приближенная модель их рассогласований (3.2). Затем на втором этапе определяются значения параметров более точной модели рассогласования изображений, представленных с большей частотой дискретизации. При этом за счет выполнения первого этапа область поиска выбирается малой.

3.1.6 Коррекция параметров строгой модели геодезической привязки по результатам совмещения с опорным изображением. Чтобы обеспечить возможность корректного выполнения процедуры ортотрансформирования радиолокационного изображения, необходимо с учетом найденной малопараметрической модели геометрических рассогласований радиолокационного и опорного изображения внести поправки в параметры строгой модели геодезической привязки (1.11).

Параметрами строгой модели (1.11) являются траектория движения фазового центра антенны РСА и шкалы $t_{\perp m}$ и $R_{\perp n}$.

Шкала $t_{\perp m}$ линейная и описывается временем максимального сближения фазового центра антенны РСА с объектами, представленными в первой строке изображения, $t_{\perp 0}$ и межстрочным временным интервалом $\Delta t_{\perp} = t_{\perp m+1} - t_{\perp m}$, в маршрутном режиме съемки равным $1/f_{ump}$.

Шкала $R_{\perp n}$ линейна для комплексного изображения и задается в этом случае наклонной дальностью для первого столбца $R_{\perp 0}$ и шагом наклонной дальности $\Delta R_{\perp} = \frac{c}{2f_{discr}}$. Для геореференцированного амплитудного изображения шкала $R_{\perp n}$ обычно задается в виде полинома $R_{\perp n} = R_{\perp 0} + n \Delta R_{\perp} + \sum_{i=2}^{N_{georef}} k_i n^i$, где N_{georef} – степень полинома.

Траекторию движения центра масс КА можно описать моделью возмущенной орбиты, задаваемой с помощью 7 скалярных параметров: координат $\mathbf{r}_{KA}(t_{op\delta}) = (x_{KA}(t_{op\delta}), y_{KA}(t_{op\delta}), z_{KA}(t_{op\delta}))^T$ и вектора скорости $\mathbf{V}_{KA}(t_{op\delta}) = (V_{KAx}(t_{op\delta}), V_{KAy}(t_{op\delta}), V_{KAz}(t_{op\delta}))^T$ центра масс КА в некоторый момент времени $t_{op\delta}$. Для перехода к движению фазового центра антенны в соответствии с (1.14) требуется угловая ориентация КА, но в нее вносить поправки нет смысла, поскольку ее влияние на точность модели несущественно из-за малости величины $\Delta \mathbf{r}_p$.

Часть параметров оказывает идентичное влияние на точность привязки. Например, это параметры $t_{\perp 0}$ и $t_{op\delta}$. Корректировать следует только один из них.

Другая часть параметров оказывает не строго идентичное, но достаточно схожее влияние. Например, это сдвиг начального положения КА $\mathbf{r}_{KA}(t_{op\delta})$ и сдвиги начальных значений шкал $R_{\perp 0}$ и $t_{\perp 0}$.

Также имеются параметры, влияние которых не представлено в билинейной модели (3.1). Это коэффициенты k_i , где $i \geq 2$, нелинейности шкалы $R_{\perp n}$.

С учетом вышесказанного имеет смысл вносить поправки в следующие параметры строгой модели (1.11): $t_{\perp 0}$, $R_{\perp 0}$, Δt_{\perp} , ΔR_{\perp} , $\mathbf{V}_{KA}(t_{op})$. Первые два параметра преимущественно отвечают за плоскопараллельный сдвиг, вторые два параметра – за масштабирование вдоль строки и столбца, последний вектор из трех скалярных параметров – за поворот проекции изображения на земную поверхность.

Параметры строгой модели корректируются исходя из задачи минимизации взвешенной суммы квадратов ошибок привязки по широте и по долготе для некоторого набора точек.

В качестве таких точек могут выступать центры (m_k, n_k) фрагментов, участвовавших в корреляционно-экстремальном совмещении. Для неотбракованных фрагментов устанавливается максимальный весовой коэффициент, для отбракованных – минимальный. Вовлечение центров фрагментов, рассредоточенных по всему полю изображения, позволяет избежать возрастания ошибки приближении к краям снимка в результате коррекции параметров строгой модели.

Для каждой точки (m_k, n_k) находится соответствующая ей точка $\mathbf{p}_{on}(m_k, n_k)$ на опорном изображении. Координаты (m_k, n_k) и (m_{on}, n_{on}) по исходной строгой модели (1.11) с учетом высоты $h_{onop}(t_{\perp m_{on}}, R_{\perp n_{on}})$ пересчитываются в измеренные геодезические координаты (B_{uk}, L_{uk}) и опорные координаты (B_{onk}, L_{onk}) соответственно.

Минимизируемая взвешенная сумма квадратов невязок может быть записана как

$$F_{geo} = \sum_k w_k (F_{Bk}^2 + F_{Lk}^2), \quad (3.9)$$

где:

$$F_{Bk} = B_{uk} - B_{onk}, \quad (3.10)$$

$$F_{Lk} = (L_{uk} - L_{onk}) \cos B_{onk}, \quad (3.11)$$

w_k – весовые коэффициенты.

Умножение невязок по долготе на косинус опорной широты призвано уравнять их с невязками широты в пересчете на расстояния на земной поверхности.

Параметры строгой модели (1.11) влияют на значение F_{geo} через F_{Bk} и F_{Lk} .

Зависимость F_{Bk} и F_{Lk} от параметров $t_{\perp 0}$, $R_{\perp 0}$, Δt_{\perp} , ΔR_{\perp} и $\mathbf{V}_{KA}(t_{op\sigma})$ имеет сложный характер, однако достаточно близка к линейному закону. Это позволяет вычислительно эффективно найти оптимальные значения параметров с помощью следующего итерационного процесса.

В каждой k -й точке оцениваются степени влияния каждого из параметров строгой модели на невязки широты и долготы в виде частных производных функций $F_{Bk}(t_{\perp 0}, R_{\perp 0}, \Delta t_{\perp}, \Delta R_{\perp}, V_{KAx}, V_{KAY}, V_{KAZ})$ и $F_{Lk}(t_{\perp 0}, R_{\perp 0}, \Delta t_{\perp}, \Delta R_{\perp}, V_{KAx}, V_{KAY}, V_{KAZ})$. Затем функции F_{Bk} и F_{Lk} линеаризуются в окрестности точки гиперпространства $(t_{\perp 0}, R_{\perp 0}, \Delta t_{\perp}, \Delta R_{\perp}, V_{KAx}, V_{KAY}, V_{KAZ})$:

$$\begin{aligned} F_{lin Bk}(\tilde{t}_{\perp 0}, \tilde{R}_{\perp 0}, \Delta \tilde{t}_{\perp}, \Delta \tilde{R}_{\perp}, \tilde{V}_{KAx}, \tilde{V}_{KAY}, \tilde{V}_{KAZ}) = \\ = F_{Bk}(t_{\perp 0}, R_{\perp 0}, \Delta t_{\perp}, \Delta R_{\perp}, V_{KAx}, V_{KAY}, V_{KAZ}) + (\tilde{t}_{\perp 0} - t_{\perp 0}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial t_{\perp 0}} + \\ + (\tilde{R}_{\perp 0} - R_{\perp 0}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial R_{\perp 0}} + (\Delta \tilde{t}_{\perp} - \Delta t_{\perp}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial \Delta t_{\perp}} + (\Delta \tilde{R}_{\perp} - \Delta R_{\perp}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial \Delta R_{\perp}} + \\ + (\tilde{V}_{KAx} - V_{KAx}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial V_{KAx}} + (\tilde{V}_{KAY} - V_{KAY}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial V_{KAY}} + (\tilde{V}_{KAZ} - V_{KAZ}) \frac{\partial F_{Bk}}{\partial V_{KAZ}}, \quad (3.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{lin Lk}(\tilde{t}_{\perp 0}, \tilde{R}_{\perp 0}, \Delta \tilde{t}_{\perp}, \Delta \tilde{R}_{\perp}, \tilde{V}_{KAx}, \tilde{V}_{KAY}, \tilde{V}_{KAZ}) = \\ = F_{Lk}(t_{\perp 0}, R_{\perp 0}, \Delta t_{\perp}, \Delta R_{\perp}, V_{KAx}, V_{KAY}, V_{KAZ}) + (\tilde{t}_{\perp 0} - t_{\perp 0}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial t_{\perp 0}} + \\ + (\tilde{R}_{\perp 0} - R_{\perp 0}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial R_{\perp 0}} + (\Delta \tilde{t}_{\perp} - \Delta t_{\perp}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial \Delta t_{\perp}} + (\Delta \tilde{R}_{\perp} - \Delta R_{\perp}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial \Delta R_{\perp}} + \\ + (\tilde{V}_{KAx} - V_{KAx}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial V_{KAx}} + (\tilde{V}_{KAY} - V_{KAY}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial V_{KAY}} + (\tilde{V}_{KAZ} - V_{KAZ}) \frac{\partial F_{Lk}}{\partial V_{KAZ}}. \quad (3.13) \end{aligned}$$

Скорректированная конфигурация строгой модели $(\tilde{t}_{\perp 0}, \tilde{R}_{\perp 0}, \Delta \tilde{t}_{\perp}, \Delta \tilde{R}_{\perp}, \tilde{V}_{KAx}, \tilde{V}_{KAY}, \tilde{V}_{KAZ})$ находится как псевдорешение переопределенной системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{linBk}(\tilde{t}_{\perp 0}, \tilde{R}_{\perp 0}, \Delta \tilde{t}_{\perp}, \Delta \tilde{R}_{\perp}, \tilde{V}_{KAx}, \tilde{V}_{KAY}, \tilde{V}_{KAZ})=0, \\ \dots, \\ F_{linLk}(\tilde{t}_{\perp 0}, \tilde{R}_{\perp 0}, \Delta \tilde{t}_{\perp}, \Delta \tilde{R}_{\perp}, \tilde{V}_{KAx}, \tilde{V}_{KAY}, \tilde{V}_{KAZ})=0, \\ \dots, \\ \tilde{t}_{\perp 0} - t_{\perp 0} = 0, \\ \tilde{R}_{\perp 0} - R_{\perp 0} = 0, \\ \Delta \tilde{t}_{\perp} - \Delta t_{\perp} = 0, \\ \Delta \tilde{R}_{\perp} - \Delta R_{\perp} = 0, \\ \tilde{V}_{KAx} - V_{KAx} = 0, \\ \tilde{V}_{KAY} - V_{KAY} = 0, \\ \tilde{V}_{KAZ} - V_{KAZ} = 0. \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Уравнениям вида $F_{linBk}=0$ и $F_{linLk}=0$ устанавливаются веса w_k . Последние 7 уравнений в системе (3.14) являются регуляризующими. Им назначаются малые веса, которые, с одной стороны, позволяют приблизиться к минимуму целевой функции, а с другой стороны, не дают выполнить недопустимо большие изменения параметров модели.

Из-за погрешностей линеаризации полученное псевдорешение нестрого соответствует минимуму F_{geo} , однако значение целевой функции должно уменьшиться. Если уменьшение F_{geo} было малым, процесс корректировки параметров строгой модели завершается. В противном случае снова выполняются расчет значений частных производных, линеаризация функций F_{Bk} и F_{Lk} и нахождение псевдорешения системы (3.14).

За счет близости зависимости F_{Bk} и F_{Lk} от параметров $t_{\perp 0}$, $R_{\perp 0}$, Δt_{\perp} , ΔR_{\perp} и $\mathbf{V}_{KA}(t_{opb})$ к линейному закону процесс корректировки завершается буквально за несколько итераций.

Потенциально можно было не вводить билинейную модель (3.1) геометрических рассогласований радиолокационного и оптического изображений, а корректировать параметры строгой модели (1.11) непосредственно по результатам

совмещения отдельных фрагментов. Однако применение промежуточной модели (3.1) дает следующие преимущества. Во-первых, определение значений ее коэффициентов гораздо проще, чем коррекция параметров строгой модели, а оно выполняется многократно в процессе отбраковки отдельных результатов корреляционно-экстремального совмещения. Во-вторых, на начальных этапах отбраковки недостоверные результаты корреляции могут настолько сильно отклоняться от истинных, что при коррекции строгой модели могут быть получены недопустимые значения ее параметров, в то время как коэффициенты билинейной модели не имеют физического смысла, и любые их значения являются допустимыми. В-третьих, влияние коэффициентов билинейной модели на ошибки привязки является более прозрачным, за счет чего проще выбрать отдельные коэффициенты для фиксации их значений, когда достоверные результаты корреляции не покрывают всю площадь изображения. Перечисленные преимущества позволяют считать применение промежуточной билинейной модели (3.1) оправданным.

После перехода от (3.1) к строгой модели со скорректированными параметрами может осуществляться ортотрансформирование радиолокационного изображения в картографическую проекцию.

Экспериментальные исследования точности привязки, обеспечиваемой предложенным алгоритмом, приведены в главе 6.

3.2 ЭФФЕКТИВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МАССОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.2.1 Выбор аппроксимирующей модели координатного соответствия для радиолокационных систем наблюдения Земли. В главе 1 выявлена необходимость выбора оптимальных аппроксимирующих моделей координатного соответствия при геометрических преобразованиях и совмещении радиолокационных изображений. Кроме того, в предыдущем параграфе отмечено, что этот выбор актуален и в задаче деортотрансформирования опорного оптического изображения в antennную или путевую систему координат.

В настоящей работе в качестве такой модели предлагается регулярная трехмерная решетка с кусочно-параболической интерполяцией между узлами решетки по каждому измерению.

Для простоты изложения рассмотрим одномерный частный случай такой решетки. Некоторый отрезок делится на $2N_{\text{peru}}$ равных частей с помощью $N_{\text{peru}}+1$ основных и N_{peru} промежуточных узлов. Основные и промежуточные узлы чередуются друг с другом, причем на краях отрезка располагаются основные узлы. Через каждую пару соседних основных узлов и промежуточный узел между ними, вместе образующих одну ячейку решетки, проводится парабола (рисунок 3.1).

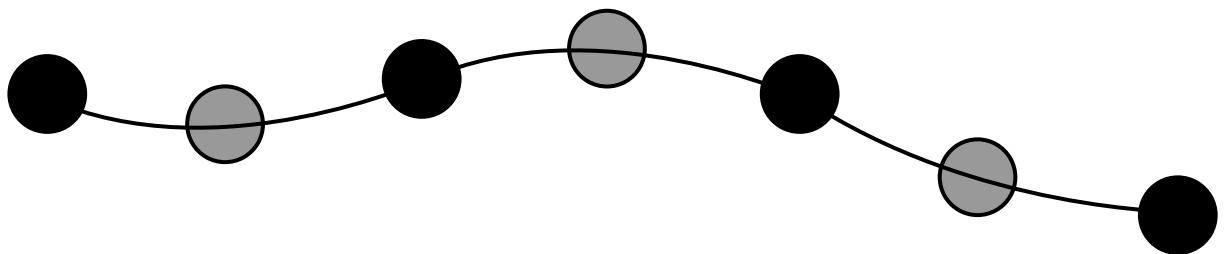


Рисунок 3.1 – Одномерная решетка с кусочно-параболической интерполяцией

Одномерные решетки по одной координате, построенные для различных фиксированных значений другой координаты, образуют двумерную решетку. Одномерные решетки по первой координате также разделяются на основные и промежуточные. Через соответствующие точки двух соседних основных одномерных решеток и промежуточной решетки между ними также проводятся параболы. Ячейку двумерной сетки при этом образуют 3×3 соседних узлов (рисунок 3.2). Третье измерение в сетке добавляется аналогичным образом. Под шагом сетки по одному из измерений будем понимать расстояние между двумя соседними основными узлами.

Для прямого закона преобразования координат пикселя радиолокационного изображения в картографические координаты строятся две трехмерные решетки, аппроксимирующие зависимости $N_u(m, n, h_u)$ и $E_u(m, n, h_u)$. Если преобразование выполняется на фиксированной средней высоте, третье измерение в решетках может быть отброшено. Прямой закон обычно используется при геометрических преобразованиях лишь на начальном этапе, когда необходимо определить диапа-

зон значений N_u и E_u , соответствующих изображению, и на основе этого рассчитать размеры выходного кадра. Основная масса координатных преобразований выполняется по обратному закону. Для него строятся две трехмерные решетки, аппроксимирующие зависимости $m(N_u, E_u, h_u)$ и $n(N_u, E_u, h_u)$. При использовании средней высоты решетки заменяются двумерными.

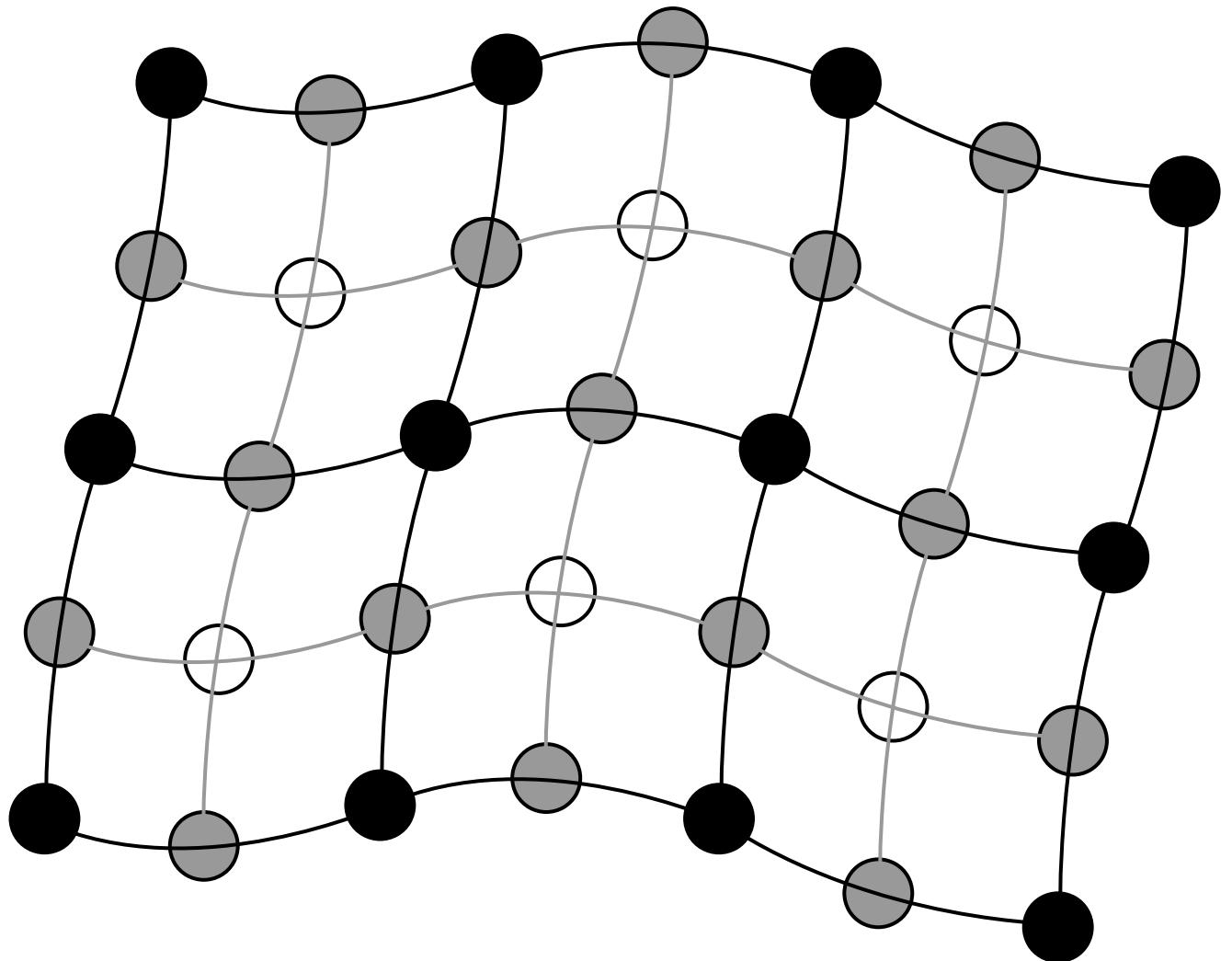


Рисунок 3.2 – Двумерная решетка с кусочно-параболической интерполяцией

В задаче деортотрансформирования опорного оптического изображения строятся те же решетки, но прямой и обратный законы координатного соответствия меняются местами.

В задаче представления двух перекрывающихся радиолокационных изображений в системе координат одного из них для упрощения координатных преоб-

разований могут быть построены решетки, аппроксимирующие зависимости $m_2(m_1, n_1, h_u)$ и $n_2(m_1, n_1, h_u)$. При этом в случае изображений, образующих интерферометрическую пару, т.е. снятых с почти одинаковых ракурсов, могут быть построены еще более простые аппроксимирующие модели, рассматриваемые в следующем параграфе.

3.2.2 Оценка вычислительной сложности массовых координатных преобразований при использовании предложенных аппроксимирующих моделей. Оценим объем вычислений при выполнении массовых координатных преобразований с помощью предложенных аппроксимирующих моделей в пересчете на один пиксель изображения в сравнении с решеткой на основе кусочно-линейной интерполяции между узлами [226]. При этом рассмотрим два случая: двумерный и трехмерный варианты решеток.

При геокодировании, когда используется двумерный вариант решетки, массовые координатные преобразования последовательно вызываются для параметров (N_{u0}, E_{u0}) , $(N_{u0}, E_{u0}+\Delta E_u)$, $(N_{u0}, E_{u0}+2\Delta E_u)$, ..., $(N_{u0}+\Delta N_u, E_{u0})$, $(N_{u0}+\Delta N_u, E_{u0}+\Delta E_u)$, $(N_{u0}+\Delta N_u, E_{u0}+2\Delta E_u)$ и т.д. То есть фактически при фиксированном N_u последовательно вызываются преобразования для разных E_u с постоянным шагом, и лишь затем изменяется N_u .

Пусть некоторое количество значений вида $E_{u0}, E_{u0}+\Delta E_u, E_{u0}+2\Delta E_u$ и т.д. попадает в пределы одной ячейки двух двумерных кусочно-линейных решеток, используемых для расчетов $m(N_u, E_u)$ и $n(N_u, E_u)$. Поскольку все преобразования ведутся для фиксированного N_u , билинейную интерполяцию в рамках отдельного преобразования можно заменить на одномерную (по горизонтали), предварительно линейно интерполировав значения в двух парах соседних узлов решетки по вертикали. Через полученные интерполированные узловые значения в двух решетках проводится прямая, записываемая в векторном виде как

$$\begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} = \frac{E_u}{\Delta E_u} \begin{pmatrix} k_{lin\,m} \\ k_{lin\,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{lin\,m} \\ b_{lin\,n} \end{pmatrix}. \quad (3.15)$$

В результате линейную интерполяцию нужно применять напрямую лишь для расчетов в начальной точке E_{u0} , а остальные результаты координатных преобразований можно быстро вычислять по предыдущим значениям:

$$\begin{pmatrix} m_i \\ n_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{i-1} \\ n_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{lin\,m} \\ k_{lin\,n} \end{pmatrix}. \quad (3.16)$$

Таким образом, вычислительная сложность одного координатного преобразования по двум двумерным решеткам с билинейным интерполятором асимптотически стремится к двум сложениям.

Если линейную интерполяцию в решетках заменить на параболическую, то последовательные вычисления для регулярно изменяющихся E_u тоже можно свести к сложениям. На самом деле эту задачу можно свести к сложениям для любого полинома, поскольку у него конечно число ненулевых производных, причем старшая ненулевая производная постоянна. За счет того, что коэффициенты полинома – векторы из двух элементов, количество сложений при этом будет в два раза больше степени полинома. Для векторного представления параболы вида

$$\begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_u}{\Delta E_u} \right)^2 \begin{pmatrix} a_{nap\,m} \\ a_{nap\,n} \end{pmatrix} + \frac{E_u}{\Delta E_u} \begin{pmatrix} b_{nap\,m} \\ b_{nap\,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{nap\,m} \\ c_{nap\,n} \end{pmatrix} \quad \text{последовательные координатные}$$

преобразования записываются как

$$\begin{pmatrix} m_i \\ n_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{i-1} \\ n_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_{lin\,m,i-1} \\ k_{lin\,n,i-1} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} k_{lin\,m,i} \\ k_{lin\,n,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{lin\,m,i-1} \\ k_{lin\,n,i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{nap\,m} \\ a_{nap\,n} \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\text{где } \begin{pmatrix} k_{lin\,m,0} \\ k_{lin\,n,0} \end{pmatrix} = \left(\frac{E_{u0}}{\Delta E_u} + \frac{1}{2} \right) \begin{pmatrix} a_{nap\,m} \\ a_{nap\,n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{nap\,m} \\ b_{nap\,n} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, вычислительная сложность одного координатного преобразования по двум двумерным решеткам с бипараболическим интерполятором асимптотически стремится к четырем сложениям. С одной стороны, это в два раза больше, чем при билинейной интерполяции, но с другой стороны, все равно намного меньше, чем затраты на передискретизацию сигнала при геометрических преобразованиях.

В случае же трехмерной решетки, учитывающей высоту рельефа, объем вычислений существенно возрастает как для трилинейной, так и для трипараболиче-

ской интерполяции. Это связано с тем, что значения высоты $h_u(N_u, E_u)$ изменяются произвольным образом при движении вдоль строк и столбцов двумерной проекции решетки, причем разрешение трехмерной модели выше, чем размеры ячейки решетки по N_u и E_u . В результате приходится поступать следующим образом. В пределах нескольких последовательных преобразований, приходящихся с учетом вариации высоты на одну ячейку трехмерной решетки, выполняется последовательная двумерная интерполяция в двух (для прямой) или трех (для параболы) сечениях решетки для соседних узловых значений высоты, а затем независимо для каждого преобразования выполняется линейная или параболическая интерполяция по высоте. В результате для трилинейного интерполятора каждое преобразование асимптотически сводится к четырем сложениям и одномерной линейной интерполяции по высоте, а для трипараболического интерполятора – к двенадцати сложениям и одномерной интерполяции параболой.

Таким образом, применение трипараболического интерполятора увеличивает асимптотическую сложность координатных преобразований по трехмерным решеткам примерно в три раза. Однако вычислительные затраты на координатные преобразования все равно остаются примерно в полтора раза меньше, чем на передискретизацию сигнала изображения на основе билинейной интерполяции. С учетом же того, что для РЛИ передискретизацию обычно выполняют с помощью фильтров более высокого порядка (бикубического или на основе sinc-функции), увеличение затрат на координатные преобразования практически не отражается на скорости ортотрансформирования.

При этом увеличение порядка интерполирующего полинома позволяет существенно сократить число узлов в решетке, а за счет этого уменьшить объем памяти для ее хранения и вычислительные затраты на строгий расчет координатных преобразований в узлах при построении решетки.

3.2.3 Алгоритм построения решетки, обеспечивающей заданную точность аппроксимации массовых координатных преобразований. Рассмотрим процесс построения решетки, обеспечивающей приемлемую точность коор-

динатных преобразований. При этом ограничимся трехмерной кусочно-параболической решеткой как более общим случаем.

Выбирать шаг решетки будем независимо для каждого из измерений. Сначала установим величины шагов по измерениям, соответствующие ширине, высоте результирующего изображения и диапазону высот. Затем будем уменьшать шаг сетки по отдельным измерениям в 2 раза, до тех пор пока ошибка интерполяции между узлами не снизится до приемлемой.

Наибольшую проблему здесь составляет эффективное оценивание максимальной ошибки интерполяции независимо по каждому из измерений. В общем виде решить эту задачу крайне затруднительно, поэтому будем получать лишь приближенную оценку, основываясь на следующих предположениях:

1) ошибка интерполяции по каждому измерению монотонно изменяется при движении вдоль других измерений;

2) гиперповерхности, аппроксимируемые решетками, раскладываются по каждому из измерений в ряд Тейлора, в котором коэффициент перед каждым следующим членом оказывается намного меньше предыдущего коэффициента.

В соответствии с первым предположением будем оценивать ошибку интерполяции по каждому измерению лишь для граничных значений двух других параметров. В соответствии со вторым положением ошибка интерполяции параболой близка к кубической функции с двумя точками экстремума посередине между промежуточным и одним из основных узлов. Именно в этих точках для каждой ячейки одномерной сетки и оценивается ошибка интерполяции.

В реальности сделанные предположения могут выполняться нестрого, из-за чего реальная максимальная ошибка построенной сетки может оказаться в несколько раз больше, чем оцененная. В связи с этим предельную ошибку координатных преобразований для построения сетки следует задавать с некоторым запасом.

При ортотрансформировании радиолокационного изображения метрового разрешения типичный размер ячейки решетки с трилинейной интерполяцией, обеспечивающей точность аппроксимации массовых координатных преобразований 0,1 пикселя, составляет порядка 60 пикселей по горизонтали и вертикали и

около 100 м по высоте. Следовательно, общее число узлов в трехмерной решетке составляет около 3 % от числа пикселей изображения. Поскольку строгий расчет координатных преобразований сложен, вычислительные затраты на построение решетки оказываются больше, чем на последующие массовые преобразования. Поскольку строятся две решетки, а в узлах хранится значение координаты в формате с плавающей точкой, то на хранение таких решеток требуется около 11 % от объема памяти, необходимого для хранения амплитудного изображения. Это полностью нивелирует преимущества такой решетки.

В то же время размер ячейки решетки с трипараболической интерполяцией в тех же условиях составляет порядка 1000 пикселей по горизонтали и вертикали и около 3000 м по высоте (указано расстояние между основными узлами). Следовательно, общее число узлов в трехмерной решетке сокращается до примерно 0,002 % от числа пикселей изображения. За счет этого вычислительные затраты на построение решетки становятся пренебрежимо малы. Объем памяти, требуемый для хранения двух таких решеток, также сокращается до примерно 0,01 % от объема памяти, необходимого для хранения амплитудного изображения. Это позволяет снизить нагрузку на кэш-память центрального процессора, что дополнительно увеличивает скорость вычислений. В итоге проигрыш от большего числа сложений компенсируется выигрышем от более эффективного использования кэш-памяти.

3.3 АЛГОРИТМ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОВМЕЩЕНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ПАРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

3.3.1 Основная идея высокоскоростного совмещения интерферометрической пары изображений. В рамках задачи субпиксельного совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений можно применить еще более простую и вычислительно эффективную аппроксимирующую модель для массовых координатных преобразований, чем универсальные модели, рассмотренные в предыдущем параграфе.

За счет того, что изображения интерферометрической пары сняты с близких орбит, влияние вариаций высоты на закон их координатного соответствия мало и составляет единицы пикселей лишь при километровых перепадах высот наблюдаемых объектов.

При фиксированной высоте закон координатного соответствия изображений также достаточно прост и с высокой точностью описывается полиномиальной моделью, как это было рассмотрено в параграфе 1.2.

В связи с этим нет смысла вводить сложные аппроксимирующие решетки. Можно дополнить полиномиальные модели совмещения на фиксированной высоте еще одним полиномом в третьем измерении, описывающим влияние перепадов высот на закон координатного соответствия.

Информация о вариациях высоты наблюдаемых объектов извлекается из низкодетальной опорной стереофотограмметрической цифровой модели высот, привлекаемой в рамках интерферометрической обработки. В рамках задачи совмещения требования к качеству опорной модели высот невысоки: может использоваться модель высот, полученная любым способом. Однако для последующей обработки интерферограмм предпочтительны стереофотограмметрические опорные данные. Поэтому совмещение интерферометрической пары радиолокационных изображений целесообразно выполнять с учетом тех же данных, что будут использованы при дальнейшей обработке.

3.3.2 Построение полиномиальной аппроксимирующей модели координатного соответствия. Влияние высоты наблюдаемого объекта на закон координатного соответствия $(m_1, n_1) \rightarrow (m_2, n_2)$ можно с субпиксельной точностью аппроксимировать полиномом малой степени L_h . Коэффициенты такого полинома плавно изменяются по полю основного изображения интерферометрической пары. При величине пространственной базы до нескольких сотен метров для аппроксимации достаточно линейной функции, т.е. $L_h=1$. Если база приближается к километровой величине, необходимо увеличить L_h до 2.

Аппроксимирующая модель может быть построена следующим образом.

Разобьем диапазон высот рельефа снимаемого фрагмента земной поверхности на L_h равных отрезков и получим (L_h+1) значений высоты h_l , где $l=\overline{0, L_h}$, на границах этих отрезков. Построим (L_h+1) полиномиальных моделей совмещения изображений для полученных высот h_l :

$$P_{ml}(m_1, n_1) = \sum_{o,p}^{o+p \leq N_n} k_{mlop} m_1^o n_1^p, \quad P_{nl}(m_1, n_1) = \sum_{o,p}^{o+p \leq N_n} k_{nlop} m_1^o n_1^p, \quad (3.18)$$

где N_n – степень полиномов.

Если две орбиты при интерферометрической съемке строго параллельны, то может быть достаточно $N_n=0$. Обычно небольшая непараллельность орбит все же наблюдается, поэтому при умеренной величине пространственной базы следует выбирать $N_n=1$. При километровой величине пространственной базы стоит увеличить N_n до двух.

Коэффициенты k_{mlop} и k_{nlop} каждой полиномиальной модели определяются с помощью МНК по небольшому числу $M_n \geq N_n$ равномерно распределенных по полу изображения узловых точек (m_{1k}, n_{1k}) , в которых по прямой и обратной строгим моделям геодезической привязки радиолокационных изображений рассчитывается координатное соответствие $(m_{1k}, n_{1k}) \rightarrow (B_{ul}, L_{ul}, h_l) \rightarrow (m_{2kl}, n_{2kl})$. Для каждого l -го полинома МНК сводится к нахождению псевдорешения системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} \dots, \\ P_{ml}(m_{1k}, n_{1k}) = m_{2kl}, \\ \dots \end{cases} \quad (3.19)$$

и

$$\begin{cases} \dots, \\ P_{nl}(m_{1k}, n_{1k}) = n_{2kl}, \\ \dots \end{cases} \quad (3.20)$$

Для определения коэффициентов k_{mlop} и k_{nlop} требуется выполнять сложные вычисления по строгим моделям только $(L_h+1)M_n$ раз. Поэтому построение

рассматриваемой аппроксимирующей модели осуществляется с минимумом вычислительных затрат. Также ничтожно мал и расход оперативной памяти, поскольку модель описывается лишь $(L_h+1)(N_n+1)(N_n+2)$ коэффициентами.

Как и для рассмотренных в предыдущем параграфе аппроксимирующих решеток, каждое отдельное координатное преобразование в предлагаемой полиномиальной модели сводится к небольшому количеству сложений и последующей одномерной интерполяции по третьему измерению – по высоте. С помощью сложений последовательно вычисляются значения полиномов $P_{ml}(m_1, n_1)$ и $P_{nl}(m_1, n_1)$, а интерполяция осуществляется путем построения полиномов степени L_h по точкам $(h_l, P_{ml}(m_1, n_1))$ для расчета m_2 и по точкам $(h_l, P_{nl}(m_1, n_1))$ для расчета n_2 . Результат координатного преобразования получается как значение построенных полиномов в точке $h=h_{opop}(m_1, n_1)$. При этом опорная цифровая модель высот должна быть предварительно трансформирована в систему координат (m_1, n_1) основного радиолокационного изображения интерферометрической пары на основе решения системы (2.36).

При $L_h=1$ и $N_n=1$ объем вычислений в рамках предложенной модели такой же, как у трехмерной решетки с трилинейной интерполяцией между узлами, а при $L_h=2$ и $N_n=2$ – такой же, как у трехмерной решетки с трипараболической интерполяцией. Но за счет существенно меньшего количества параметров, описывающих модель, повышается эффективность работы кэш-памяти, а следовательно, и общая скорость совмещения изображений на центральном процессоре.

3.3.3 Уточнение параметров полиномиальной аппроксимирующей модели координатного соответствия по результатам корреляционно-экстремального совмещения изображений. Поскольку для совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений требуется точность порядка одной десятой пикселя, а строгая модель геодезической привязки имеет систематическую погрешность, связанную с неточностью измерительной информации, требуется уточнение параметров модели координатного соответствия изображений.

Уточнение необходимо и в том случае, когда строгая модель привязки изображений была скорректирована путем совмещения с опорным оптическим снимком, рассмотренного в параграфе 3.1. Это связано с тем, что даже при идеально точном опорном покрытии из-за разнородности совмещаемой информации остается пиксельная погрешность привязки радиолокационного изображения, что на порядок хуже, чем необходимо для последующей интерферометрической обработки. В то же время в рамках интерферометрической пары совмещаемая информация в высокой степени однородна. Это позволяет достичь необходимой точности путем корреляционно-экстремального совмещения изображений интерферометрической пары.

В параграфе 1.2 приведена полиномиальная модель (1.15) поправки к закону координатного соответствия изображений, коэффициенты которой обычно находятся по МНК. Однако в случае двухпроходной интерферометрии в отдельных областях совмещаемых изображений могут наблюдаться значительные временные изменения. Также на изображениях могут быть представлены малоконтрастные объекты. Результаты корреляционно-экстремального совмещения отдельных фрагментов изображений в таких ситуациях могут быть недостоверными, что вносит погрешность в значения коэффициентов $k_{\Delta_{top}}$ и $k_{\Delta_{nop}}$, вычисляемых по МНК. В то же время в рамках параграфа 3.1 предложен механизм отбраковки таких результатов при совмещении радиолокационного и опорного оптического изображений. Этот механизм можно адаптировать и к задаче совмещения интерферометрической пары изображений.

Полиномы (1.15) строятся итерационно с помощью весового МНК, где в качестве весов используются максимальные значения коэффициента корреляции Пирсона, достигнутые при совмещении отдельных фрагментов.

Перед первой итерацией сразу отбраковываются результаты совмещения фрагментов с низким коэффициентом корреляции.

На каждой итерации точно так же, как в параграфе 3.1, оценивается и анализируется равномерность распределения неотбракованных фрагментов по полю изображения с понижением при необходимости степени полиномов (1.15). Кроме того, рас-

считываются среднеквадратические ошибки σ_{pm} и σ_{pn} аппроксимации полиномами результатов корреляционного совмещения с отбраковкой фрагментов, результаты совмещения которых наиболее сильно отклоняются от построенных полиномов. Поскольку здесь информация более однородна, пороги отбраковки могут быть более щадящими, чем используемые в параграфе 3.1: $k_{\text{брак}} \sigma_{pm}$ и $k_{\text{брак}} \sigma_{pn}$, где $k_{\text{брак}} \geq 1$.

Итерационный процесс заканчивается, либо когда выполнилось условие $3 \max(\sigma_{pm}, \sigma_{pn}) \leq 0,1$, либо когда не осталось фрагментов для отбраковки.

Для ускорения последующих массовых координатных преобразований поправочные полиномы (1.15) могут быть «слиты» с полиномами (3.18). «Слияние» заключается в прибавлении к коэффициентам k_{mlop} и k_{nlop} полиномов (3.18) значений соответствующих поправочных коэффициентов $k_{\Delta mop}$ и $k_{\Delta nop}$. Если степень одного из «сливаемых» полиномов ниже, чем у другого, коэффициенты при недостающих степенях признаются нулевыми. В результате «слияния» массовые координатные преобразования выполняются так, как было описано в предыдущем пункте, при этом за счет внесения поправок в коэффициенты k_{mlop} и k_{nlop} аппроксимирующей модели достигается необходимая точность совмещения без снижения скорости массовых координатных преобразований.

3.4 МЕТОД ОБЪЕДИНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ВОСХОДЯЩЕГО И НИСХОДЯЩЕГО ВИТКОВ ОРБИТЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОДЕТАЛЬНЫХ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

3.4.1 Ключевая идея метода. Цель объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты – получение изображения с минимальной суммарной площадью дефектных участков: областей переналожения сигналов или радиотеней. Предлагаемый метод предназначен для выполнения такого объединения в условиях низкой детальности опорной стереофотограмметрической цифровой модели высот без возникновения ложных резких границ – «швов».

Для перехода к основной идеи предлагаемого метода сформулируем правила объединения в соответствии с известными алгоритмами с помощью математической логики.

С учетом работ [287] и [288] универсальные правила объединения можно выразить как

$$s_{ob}(m_k, n_k) = w_\lambda(A_1)s_1(m_k, n_k) + w_\lambda(A_2)s_2(m_k, n_k) + \\ + w_\lambda(A_{12})F_{слияния}(s_1(m_k, n_k), s_2(m_k, n_k)), \quad (3.21)$$

где (m_k, n_k) – пиксель изображения в картографической проекции, A_1 , A_2 и A_{12} – логические условия, определяющие, какими данными заполняется пиксель выходного изображения: сигналом одного из исходных изображений или результатом некоторой функции $F_{слияния}$ двух сигналов. Функция $w_\lambda(A) = \begin{cases} 1, & A \text{ – истина,} \\ 0, & A \text{ – ложь} \end{cases}$ представляет результат логической переменной в числовой форме.

Условия A_1 , A_2 и A_{12} должны быть такими, чтобы результат их попарной конъюнкции был ложью (выполнение одного условия должно исключать другие), а результат дизъюнкции всех условий $A_1 \vee A_2 \vee A_{12}$ – истиной (одно из условий должно всегда выполняться). В этом случае $w_\lambda(A_1) + w_\lambda(A_2) + w_\lambda(A_{12}) \equiv 1$, что сохраняет нормировку яркости пикселей на результате объединения изображений.

«Шов» на результате объединения возникает, когда для некоторого пикселя (m_k, n_k) истинно одно из условий A_1 , A_2 и A_{12} , а для пикселя (m_k+1, n_k) или (m_k, n_k+1) становится истинным другое условие. Чтобы не порождались ложные границы на результате объединения, «швы» должны проходить строго вдоль границ наблюдаемых объектов. При низкой детальности опорных сведений о высоте $h_{onop}(m_k, n_k)$, оказывающих основное влияние на значение логических переменных A_1 , A_2 и A_{12} , данное требование не выполняется.

Поскольку из-за недостаточной детальности $h_{onop}(m_k, n_k)$ истинность или ложность переменных A_1 , A_2 и A_{12} может быть поставлена под сомнение,

перейдем в правилах объединения от ступенчатой функции $w_\mu(A)$ к непрерывной функции $\mu(A)$ – степени истинности логического выражения. В этом и заключается основная идея предлагаемого метода.

Универсальные правила объединения, сформулированные в терминах нечеткой логики, выглядят как

$$\begin{aligned} s_{\text{об}}(m_\kappa, n_\kappa) = & \mu(A_1)s_1(m_\kappa, n_\kappa) + \mu(A_2)s_2(m_\kappa, n_\kappa) + \\ & + \mu(A_{12})F_{\text{слияния}}(s_1(m_\kappa, n_\kappa), s_2(m_\kappa, n_\kappa)). \end{aligned} \quad (3.22)$$

3.4.2 Выбор условий объединения изображений и Т-нормы для выполнения нечетких логических операций. Введенные выше условия A_1 , A_2 и A_{12} формулируются с помощью логических операций на основе четырех базовых признаков: L_1 и L_2 – наличия переналожения сигналов в анализируемом пикселе первого и второго изображения, S_1 и S_2 – попадания анализируемого пикселя первого и второго изображения в область радиотени.

При использовании классической логики $L_i \wedge S_i \equiv \text{ложь}$, $i = \overline{1, 2}$ (в условиях радиотени полезный сигнал отсутствует, переналожения сигналов быть не может).

В алгоритме [287] условия A_1 , A_2 и A_{12} выражаются через базовые признаки с помощью следующих операций:

$$A_1 = L_2 \vee \overline{L_1} \wedge (\overline{S_1} \vee S_2), \quad A_2 = \overline{L_1} = \overline{L_2} \wedge (S_1 \wedge \overline{S_2} \vee L_1), \quad A_{12} \equiv \text{ложь}. \quad (3.23)$$

В работе [288] условия A_1 , A_2 и A_{12} сформулированы как

$$\begin{aligned} A_1 = & \overline{L_1} \wedge (S_2 \wedge \overline{S_1} \vee L_2), \quad A_2 = \overline{L_2} \wedge (S_1 \wedge \overline{S_2} \vee L_1), \\ A_{12} = & \overline{A_1 \vee A_2} = (L_1 \vee (\overline{S_2} \vee S_1) \wedge \overline{L_2}) \wedge (L_2 \vee (\overline{S_1} \vee S_2) \wedge \overline{L_1}). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Формулировка (3.23) подразумевает, что слияние сигналов двух изображений не выполняется, а сигнал для отдельного пикселя результата объединения целиком берется или из одного, или из другого исходного изображения. Предпочитается сигнал изображения без дефектов, в противном случае предпочтение отдается первому изображению и затенению перед переналожением сигналов.

Формулировка (3.24) подразумевает, что объединяемые изображения равноправны. Предпочтение конкретного изображения выполняется только тогда, когда

на другом исходном изображении наблюдается менее качественный сигнал. В противном случае входные сигналы сливаются с помощью функции $F_{слияния}$.

В рамках предлагаемого метода базовые признаки становятся нечеткими и характеризуются степенями истинности $\mu(L_1)$, $\mu(L_2)$, $\mu(S_1)$ и $\mu(S_2)$, при этом $\mu(L_i \wedge S_i) \geq 0$ (из-за недостаточной детальности $h_{онор}(m_\kappa, n_\kappa)$ в отдельном пикселе изображения нельзя полностью исключить переналожение сигналов, даже если весьма вероятно наличие радиотени).

Известен ряд нечетких логик, базирующихся на различных Т-нормах $T(\mu_1, \mu_2)$, обобщающих операцию конъюнкции в классической математической логике. Каждой Т-норме ставится в соответствие Т-конорма $1 - T(1 - \mu_1, 1 - \mu_2)$, обобщающая операцию дизъюнкции и обеспечивающая выполнение закона де Моргана с учетом, что $\mu(\overline{A}) = 1 - \mu(A)$ [311].

Для двух нечетких условий A_1 и $A_2 = \overline{A_1}$ (формулировка (3.23)) любая Т-норма обеспечит $\mu(A_1) + \mu(\overline{A_1}) \equiv 1$.

Для трех условий A_1 , A_2 и $A_{12} = \overline{A_1 \vee A_2}$ (формулировка (3.24)) необходимо выбрать Т-норму, при которой справедливо тождество $\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) \equiv 1$.

При использовании нечеткой логики Гёделя с Т-нормой $T(\mu_1, \mu_2) = \min(\mu_1, \mu_2)$:

$$\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) = 1 + \mu(A_1) + \mu(A_2) - \max(\mu(A_1), \mu(A_2)) \geq 1. \quad (3.25)$$

При использовании вероятностной нечеткой логики с Т-нормой $T(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \mu_2$:

$$\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) = 1 + \mu(A_1) \mu(A_2) \geq 1. \quad (3.26)$$

При использовании нечеткой логики Лукасевича с Т-нормой $T(\mu_1, \mu_2) = \max(0, \mu_1 + \mu_2 - 1)$:

$$\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) = 1 + \mu(A_1) + \mu(A_2) - \min(1, \mu(A_1) + \mu(A_2)). \quad (3.27)$$

Из (3.25), (3.26) и (3.27) видно, что ни в одной из рассмотренных нечетких логик не выполняется $\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) \equiv 1$, но в рамках нечеткой логики

Лукасевича $\mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(\overline{A_1 \vee A_2}) = 1$, если $\mu(A_1) + \mu(A_2) \leq 1$. Для формулировки (3.24) это условие обеспечивается.

Можно ввести другие правила формирования A_1 , A_2 и A_{12} из базовых признаков, например, предпочтеть переналожение сигналов радиуса. В этом случае выражения для A_1 , A_2 и A_{12} изменятся. Чтобы предлагаемый метод остался применимым, при модификации выражений для A_1 , A_2 и A_{12} необходимо обеспечить условия $\mu(A_1 \vee A_2 \vee A_{12}) \equiv 1$, $A_{12} = \overline{A_1 \vee A_2}$ и $\mu(A_1) + \mu(A_2) \leq 1$. Если $\mu(A_1 \vee A_2) \equiv 1$, для пересчета $\mu(L_1)$, $\mu(L_2)$, $\mu(S_1)$ и $\mu(S_2)$ в $\mu(A_1)$ и $\mu(A_2)$ может использоваться любая Т-норма. Если $\mu(A_{12}) \geq 0$, необходимо применять Т-норму Лукасевича, а при выражении $A_{12} = \overline{A_1 \vee A_2}$ через L_1 , L_2 , S_1 и S_2 использовать только свойства коммутативности и ассоциативности, а также законы де Моргана и двойного отрицания, поскольку, в отличие от классической математической логики, нечеткая логика Лукасевича свойством дистрибутивности не обладает.

В настоящей работе для конкретной реализации предлагаемого метода принимается компромисс между подходами [287] и [288]. Для A_1 , A_2 и A_{12} берется формулировка (3.24) с применением Т-нормы Лукасевича, но с помощью выбора функции $F_{\text{слияния}}$ отдается предпочтение сигналу первого из объединяемых изображений. $F_{\text{слияния}}$ в данном случае осуществляет не полноценное слияние двух сигналов, а мультивременную фильтрацию спектр-шума на первом изображении с привлечением данных второго изображения.

Мультивременная фильтрация сохраняет низкочастотную составляющую сигнала $s_1(m_\kappa, n_\kappa)$, а высокочастотные составляющие сигналов усредняются с уменьшением СКО спектр-шума в $\sqrt{2}$ раз [147]:

$$\begin{aligned} F_{\text{слияния}}(s_1(m_\kappa, n_\kappa), s_2(m_\kappa, n_\kappa)) &= \text{НЧ}\{s_1(m_\kappa, n_\kappa)\} + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\text{ВЧ}\{s_1(m_\kappa, n_\kappa)\} + \text{ВЧ}\{s_2(m_\kappa, n_\kappa)\} \frac{\text{НЧ}\{s_1(m_\kappa, n_\kappa)\}}{\text{НЧ}\{s_2(m_\kappa, n_\kappa)\}} \right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.4.3 Построение нечеткой маски переналожения сигналов. В рамках предлагаемого метода необходимо не только перейти к нечетким правилам

объединения изображений, но и заменить четкие базовые признаки переналожения сигналов и затенения на нечеткие.

В рамках известных алгоритмов [287, 288] для выявления переналожения сигналов сопоставляются углы визирования и наклона поверхности наблюдаемого объекта. По разности этих углов тяжело судить, насколько сильно дефект проявляется на изображении, что осложняет переход от порогового критерия к непрерывной функции принадлежности. В связи с этим переопределим переналожение сигналов с точки зрения внутрикадровых искажений радиолокационного изображения, вызванных перепадами высот наблюдаемых объектов.

Переналожению сигналов соответствует локальная инверсия направления развертки одного из сигналов вдоль строки радиолокационного изображения в системе координат (t_{\perp}, R_{\perp}) . Границей области переналожения является разрыв – место локальной паузы развертки, когда все объекты восходящего склона наблюдаемой поверхности попадают в один и тот же пиксель изображения. В окрестности области переналожения наблюдается снижение скорости развертки вдоль строки, приводящее к деградации пространственного разрешения по наземной дальности.

Таким образом, переналожение сигналов и сопутствующие ему дефекты будем выявлять по степени растяжения пикселей в процессе деортотрансформирования радиолокационного изображения, представленного в картографической проекции.

Рассмотрим пиксель (m_k, n_k) одного из двух объединяемых ортотрансформированных радиолокационных изображений, которому соответствуют картографические координаты (E_u, N_u) и опорная высота $h_{opop}(E_u, N_u)$. По обратному закону координатного соответствия получим положение (m, n) наблюдаемого объекта на исходном изображении в антенной или путевой системе координат (t_{\perp}, R_{\perp}) . Отступим от этого положения один пиксель вдоль строки и по прямому закону пересчитаем координаты $(m, n+1, h_{opop}(E_u, N_u))$ в $(\tilde{E}_{u0}, \tilde{N}_{u0})$. Вектор $\mathbf{R} = (\tilde{E}_{u0} - E_u, \tilde{N}_{u0} - N_u)^T$ показывает локальное направление дальности в системе координат ортотрансформированного изображения, а расстояние d_0 , равное длине вектора \mathbf{R} , соответствует шагу пикселя исходного изображения по наземной дальности в отсутствие перепадов высоты.

Низкодетальная опорная модель высот $h_{onop}(E_u, N_u)$ имеет шаг пикселя $d_{DEM} \gg d_0$. Отступим от точки (E_u, N_u) на d_{DEM} в направлении, задаваемом вектором \mathbf{R} , с получением точки:

$$(\tilde{E}_{u2}, \tilde{N}_{u2}) = \left(E_u + \frac{d_{DEM}}{d_0} (\tilde{E}_{u0} - E_u), N_u + \frac{d_{DEM}}{d_0} (\tilde{N}_{u0} - N_u) \right). \quad (3.29)$$

Также отступим от (E_u, N_u) на d_{DEM} в противоположном направлении с получением точки:

$$(\tilde{E}_{u1}, \tilde{N}_{u1}) = \left(E_u - \frac{d_{DEM}}{d_0} (\tilde{E}_{u0} - E_u), N_u - \frac{d_{DEM}}{d_0} (\tilde{N}_{u0} - N_u) \right). \quad (3.30)$$

Учтем опорные высоты в указанных точках и по обратному закону пересчитаем координаты $(\tilde{E}_{u1}, \tilde{N}_{u1}, h_{onop}(\tilde{E}_{u1}, \tilde{N}_{u1}))$ и $(\tilde{E}_{u2}, \tilde{N}_{u2}, h_{onop}(\tilde{E}_{u2}, \tilde{N}_{u2}))$ в положения $(\tilde{m}_1, \tilde{n}_1)$ и $(\tilde{m}_2, \tilde{n}_2)$ на исходном радиолокационном изображении. Значения \tilde{m}_1 и \tilde{m}_2 должны совпадать с субпиксельной точностью, а разность значений \tilde{n}_2 и \tilde{n}_1 определяет степень растяжения пикселя радиолокационного изображения в процессе деортотрансформирования:

$$k_{pacm}(E_u, N_u) = \frac{d_0}{2d_{DEM}} (\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1). \quad (3.31)$$

Отрицательные значения k_{pacm} соответствуют инверсии направления развертки и переналожению сигналов. Нулевое значение k_{pacm} соответствует разрыву, а значения $k_{pacm} \ll 1$ – деградации разрешения по наземной дальности в окрестности области переналожения сигналов.

Если ортотрансформирование изображения выполнялось со снижением пространственного разрешения, то умеренные деградации разрешения из-за деформации пикселей становятся несущественными. Пусть шаг пикселя ортотрансформированного изображения равен d_{opto} , тогда сопутствующим дефектам в окрестности области переналожения сигналов соответствуют значения $k_{pacm} \ll \min(1, d_0/d_{opto})$.

Отметим, что в оценке k_{pacm} косвенным образом принимается в расчет наклон наблюданной поверхности на основе сопоставления высот $h_{onop}(\tilde{E}_{u1}, \tilde{N}_{u1})$ и $h_{onop}(\tilde{E}_{u2}, \tilde{N}_{u2})$. Расстояние между точками $(\tilde{E}_{u1}, \tilde{N}_{u1})$ и $(\tilde{E}_{u2}, \tilde{N}_{u2})$ выбрано равным $2d_{DEM}$, чтобы минимизировать ошибки, вызванные интерполяцией отсчетов опорной матрицы высот.

Для формирования нечеткого признака L_i наличия переналожения на i -м объединяемом изображении, $i=\overline{1, 2}$, можно ввести степень истинности $\mu(L_i)$ как функцию k_{pacm} следующим образом:

$$\mu(L_i) = \begin{cases} 1, & k_{pacm} < \theta_{L1}, \\ 1 - \frac{k_{pacm} - \theta_{L1}}{\theta_{L2} - \theta_{L1}}, & \theta_{L1} \leq k_{pacm} \leq \theta_{L2}, \\ 0, & k_{pacm} > \theta_{L2}, \end{cases} \quad (3.32)$$

где θ_{L1} и θ_{L2} – некоторые пороги.

В качестве пороговых значений можно выбрать, например, $\theta_{L1}=0,5 \min(1, d_0/d_{opmo})$, соответствующее деградации разрешения в 2 раза, и $\theta_{L2}=0,75 \min(1, d_0/d_{opmo})$, соответствующее деградации разрешения в $4/3$ раза.

3.4.4 Построение нечеткой маски затенений. В рамках известных алгоритмов [287, 288] затенения выявляются только с учетом угла наклона нисходящих склонов наблюдаемой поверхности. При этом не учитывается загораживание одних объектов другими. Чтобы его учесть, необходимо выполнить трассировку лучей, которая позволит получить границу тени от каждого наблюдаемого объекта. Степень истинности $\mu(S_i)$ нечеткого признака S_i наличия затенения на одном из объединяемых изображений можно определить как функцию возвышения Δh_m наблюдаемого объекта над тенью от более близких к радиолокатору объектов.

Рассмотрим более подробно задачу трассировки лучей.

Строго говоря, РСА ведет зондирование объекта не одним лучом, а путем отправки тысяч радиоимпульсов под немного разными азимутальными углами в течение времени синтеза апертуры. Средний азимутальный угол определяется до-

плеровским центроидом, метод уточнения которого рассмотрен в параграфе 2.3, а вариации азимутального угла составляют единицы или доли градуса в зависимости от режима съемки. Это приводит к тому, что в азимутальном направлении нет четких границ тени: для части зондирующих импульсов объект рядом с границей тени оказывается загорожен, но оставшаяся часть дает сигнал от объекта, который на радиолокационном изображении после синтеза апертуры получается ослабленным и частично расфокусированным по азимуту. Такую область рядом с границей полного затенения можно назвать полутенью. За счет того, что вариации азимутального угла невелики, диаметр областей полутени составляет несколько десятков метров и близок к шагу пикселя опорных низкодетальных стереофотограмметрических моделей высот. Поэтому данным эффектом можно пренебречь и считать, что радиолокатор ведет строго боковой обзор одним лучом. Это соответствует движению вдоль строки радиолокационного изображения, представленного в антенной или путевой системе координат.

Таким образом, если пренебречь отклонениями от строго бокового обзора, трассировка лучей наиболее удобно выполняется в антенной или путевой системе координат. Однако для этого необходимо сначала трансформировать опорную цифровую модель высот, выполняя для каждого пикселя сложные итерационные расчеты с целью решения системы уравнений (2.36), а затем ортотрансформировать в картографическую проекцию полученную карту возвышений Δh_m . Эти процессы требуют достаточно много времени, нивелируя удобство трассировки лучей.

В то же время в разных пикселях изображения, представленного в картографической проекции, направление трассировки луча различается. Для проекций Меркатора, Гаусса–Крюгера и UTM обеспечивается условие, что знак проекции направления трассировки луча на ось N_u постоянен по всему полю изображения. Он определяется наклонением орбиты КА и направлением визирования (влево или вправо). Следовательно для данных проекций, являющихся наиболее распространенными, можно эффективно организовать массовую трассировку лучей, двигаясь по матрице высот сверху вниз или снизу вверх в зависимости от знака

проекции направления трассировки луча на ось N_u . Такая организация рассматривается ниже.

Для ряда проекций, например, полярной стереографической, описанное выше условие может не обеспечиваться. В этом случае необходим переход в антенную или путевую систему координат, организация трассировки лучей в которой рассмотрена в главе 4 в рамках обработки интерферограмм.

Рассмотрим эффективную организацию массовой трассировки лучей для цифровой модели высот, представленной в картографической проекции.

Для каждого пикселя, которому соответствуют картографические координаты (E_u, N_u) , направление трассировки луча определяется вектором \mathbf{R} , введенным в предыдущем пункте. В направлении, противоположном вектору \mathbf{R} , ищется точка предыдущей обработанной строки с координатами $(\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0})$. Отрезок между

$$\text{точками } (\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0}) \text{ и } (E_u, N_u) \text{ разбивается на } N_m = \left\lceil \frac{\sqrt{(\hat{E}_{u0} - E_u)^2 + (\hat{N}_{u0} - N_u)^2}}{d_{DEM}} \right\rceil$$

равных частей, где $\lceil x \rceil$ – функция «потолок» (округление вверх до целого). Границы частей задаются точками $(\hat{E}_{ui}, \hat{N}_{ui}), i = \overline{0, N_u - 1}$.

Для каждой точки последовательно вычисляется высота границы тени:

$$h_m(\hat{E}_{ui}, \hat{N}_{ui}) = \max \left(h_{onop}(\hat{E}_{ui}, \hat{N}_{ui}), h_m(\hat{E}_{ui-1}, \hat{N}_{ui-1}) - \frac{d_m}{\operatorname{tg} \alpha_{had}} \right), \quad (3.33)$$

где $d_m = \frac{\sqrt{(\hat{E}_{u0} - E_u)^2 + (\hat{N}_{u0} - N_u)^2}}{N_m}$, α_{had} – угол падения зондирующего сигнала на

поверхность земного эллипсоида.

Значение $h_m(\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0})$ берется из результатов обработки предыдущей строки цифровой матрицы высот. Для первой обрабатываемой строки (верхней или нижней в зависимости от направления трассировки лучей) принимается $h_m(\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0}) = h_{onop}(\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0})$.

Для пикселя текущей обрабатываемой строки возвышение над тенью определяется как

$$\Delta h_m(E_u, N_u) = h_{onop}(E_u, N_u) - h_m(\hat{E}_{uN_m-1}, \hat{N}_{uN_m-1}) + \frac{d_m}{\operatorname{tg} \alpha_{had}}. \quad (3.34)$$

Процесс трассировки лучей между точками $(\hat{E}_{u0}, \hat{N}_{u0})$ и (E_u, N_u) проиллюстрирован на рисунках 3.3 и 3.4.

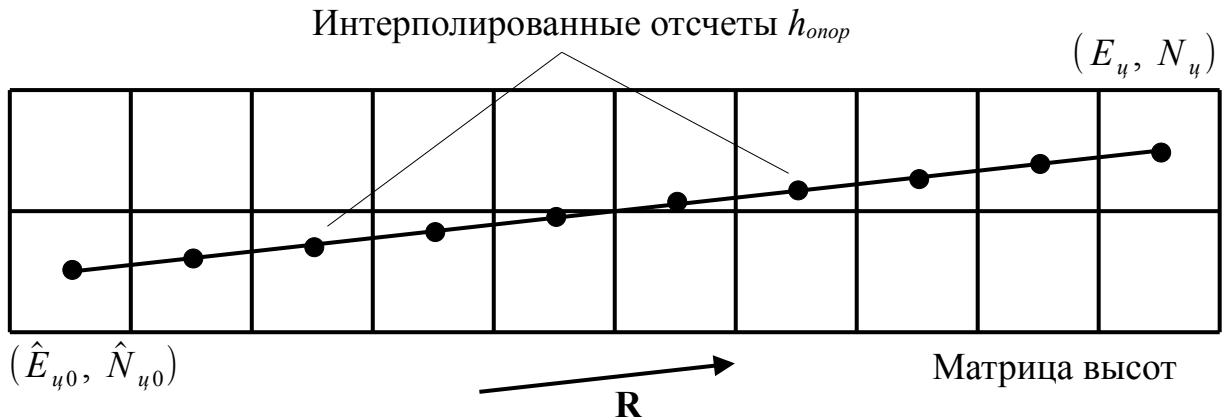


Рисунок 3.3 – Трассировка лучей в картографической проекции, вид сверху

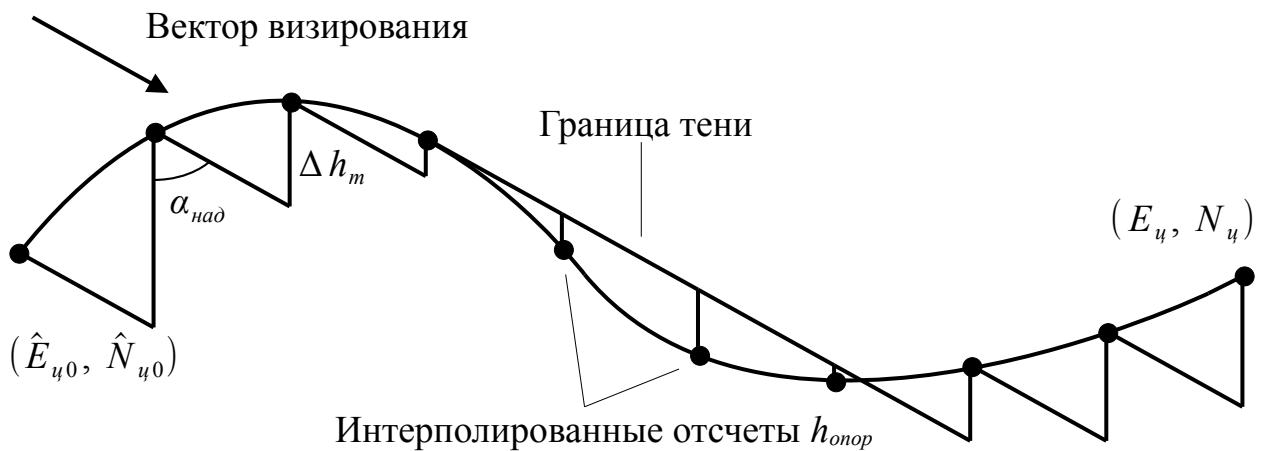


Рисунок 3.4 – Трассировка лучей в картографической проекции, вид сбоку

Отрицательные значения Δh_m однозначно свидетельствуют о наличии затенения. Малые положительные значения говорят о том, что объект близок к границе тени, приближенно рассчитанной по низкодетальным опорным данным, и может оказаться в пределах реальной области затенения. Также объект может располагаться на нисходящем склоне, практически параллельном вектору визирования.

Такие склоны характеризуются слабым обратным рассеянием и практически неотличимы от теней.

В связи с этим степень истинности $\mu(S_i)$ может быть задана с помощью следующей функции:

$$\mu(S_i) = \begin{cases} 1, & \Delta h_m < 0, \\ 1 - \frac{\Delta h_m}{\theta_s}, & 0 \leq \Delta h_m \leq \theta_s, \\ 0, & \Delta h_m > \theta_s, \end{cases} \quad (3.35)$$

где θ_s – некоторое пороговое значение.

В качестве порогового можно взять значение $\theta_s = \frac{0,3 d_m}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{над}}}$.

3.4.5 Процедура объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики. Исходными данными для объединения является пара ортотрансформированных радиолокационных изображений, имеющих пиксельную точность геодезической привязки, которая достигается или высоким качеством измерительной информации, как в зарубежных системах ДЗЗ, или применением метода уточнения доплеровского центроида, предложенного в параграфе 2.3, и алгоритма совмещения с опорным оптическим снимком, рассмотренного в параграфе 3.1, или ручной привязкой по наземным ориентирам в наиболее сложных случаях. Также для объединения требуется опорная низкодетальная стереофотограмметрическая цифровая модель высот, с использованием которой были ортотрансформированы исходные изображения.

Пиксельная точность привязки позволяет геометрически совместить объединяемые изображения путем представления в единой картографической системе координат (E_κ, N_κ) , соответствующей пикселям (m_κ, n_κ) . Из-за недостаточной детальности опорной модели высот на изображениях могут наблюдаться остаточные внутрикадровые искажения, из-за которых могут иметь место локальные геометрические рассогласования, но в среднем сдвига изображений друг относительно друга наблюдаваться не должно.

Применение корреляционно-экстремального совмещения изображений на данном этапе нецелесообразно, поскольку для применимости предлагаемого метода необходимо обеспечить возможность координатных преобразований по строгой модели геодезической привязки радиолокационного изображения. Внесение поправок в параметры этой модели по результатам совмещения с опорным оптическим снимком рассмотрено в параграфе 3.1. Кроме того, привязка должна быть уточнена до выполнения ортотрансформирования, чтобы опорные высоты были применены именно к тем объектам на изображении, к которым они на самом деле относятся.

При дальнейшем изложении будем считать, что объединяемые изображения уже геометрически совмещены.

Процедура объединения в соответствии с предлагаемым методом сводится к последовательности следующих шагов.

Шаг 1. Выполняется расчет карт значений коэффициента k_{pacm} растяжения пикселей в процессе деортотрансформирования первого и второго объединяемых изображений. С целью эффективного выполнения массовых координатных преобразований между картографической и антенной или путевой системой координат, необходимых для расчета k_{pacm} , предварительно строятся трехмерные аппроксимирующие решетки, как это было рассмотрено в параграфе 3.2. Карты значений k_{pacm} строятся с шагом пикселя, соответствующим низкодетальной опорной модели высот. Обозначим позицию такого пикселя (m_{onop}, n_{onop}) .

Шаг 2. Из-за недостаточной детальности $h_{onop}(E_u, N_u)$ низкие значения k_{pacm} могут не полностью охватывать сверхъяркие области реального переналожения сигналов. Чтобы уменьшить площадь неохваченных частей, предлагается фильтрация каждой полученной карты $k_{pacm}(m_{onop}, n_{onop})$:

$$\begin{aligned} k_{pacm\phi}(m_{onop}, n_{onop}) = & (1 - w_{pacm}) k_{pacm\phi}(m_{onop}, n_{onop}) + \\ & + w_{pacm} \min_{\substack{\Delta m_{onop} \in [-r_{pacm}, r_{pacm}], \\ \Delta n_{onop} \in [-r_{pacm}, r_{pacm}]}} k_{pacm\phi}(m_{onop} + \Delta m_{onop}, n_{onop} + \Delta n_{onop}), \end{aligned} \quad (3.36)$$

где $w_{pacm} = \frac{\min(r_{pacm}, \sqrt{\Delta m_{\text{опор мин}}^2 + \Delta n_{\text{опор мин}}^2})}{r_{pacm} + 1}$ – вес минимального значения,

$$(\Delta m_{\text{опор мин}}, \Delta n_{\text{опор мин}}) = \underset{\substack{\Delta m_{\text{опор}} \in [-r_{pacm}, r_{pacm}], \\ \Delta n_{\text{опор}} \in [-r_{pacm}, r_{pacm}]}}{\operatorname{argmin}} k_{\text{pacm}}(m_{\text{опор}} + \Delta m_{\text{опор}}, n_{\text{опор}} + \Delta n_{\text{опор}}) - \text{смещение}$$

положения минимального значения относительно текущего пикселя, r_{pacm} – радиус окрестности для поиска минимального значения. Радиус r_{pacm} должен выбираться малым, например, равным единице.

Пример карты $k_{\text{pacm}}(m_{\text{опор}}, n_{\text{опор}})$, построенной для левого изображения, приведенного на рисунке 1.10, в увеличенном масштабе представлен на рисунке 3.5. Значения k_{pacm} визуализированы линейной шкалой градаций серого. Чёрному цвету соответствует $k_{\text{pacm}} = -1$, белому цвету – $k_{\text{pacm}} = 2$.

Шаг 3. Полученные для обоих изображений карты $k_{\text{pacm}}(m_{\text{опор}}, n_{\text{опор}})$ с использованием интерполятора Ланцоша, обеспечивающего гладкость, трансформируются в систему координат (m_κ, n_κ) объединяемых радиолокационных изображений. Интерполированные значения $k_{\text{pacm}}(m_\kappa, n_\kappa)$ с использованием (3.32) пересчитываются в степени истинности $\mu(L_i)$.

Пример распределения значений $\mu(L_1)$ по полю левого изображения, приведенного на рисунке 1.10, представлен на рисунке 3.6. Значения $\mu(L_1)$ визуализированы линейной шкалой градаций серого. Чёрному цвету соответствует нулевая степень истинности, белому цвету – единичная.

Шаг 4. Выполняется расчет карт значений Δh_m возвышения над тенью для первого и второго объединяемых изображений. Для массовых координатных преобразований между картографической и антенной или путевой системами координат, необходимых для расчета Δh_m , используются трехмерные аппроксимирующие решетки, построенные в рамках расчета k_{pacm} . Карты значений $\Delta h_m(m_{\text{опор}}, n_{\text{опор}})$ строятся с шагом пикселя, соответствующим низкодетальной опорной модели высот.



Рисунок 3.5 – Карта значений степени растяжения пикселей радиолокационного изображения при деортотрансформировании



Рисунок 3.6 – Карта значений нечеткого признака наличия переналожения сигналов

Пример карты $\Delta h_m(m_{onop}, n_{onop})$, построенной для левого изображения, приведенного на рисунке 1.10, в увеличенном масштабе представлен на рисунке 3.7. Значения Δh_m визуализированы линейной шкалой градаций серого. Черному цвету соответствует $\Delta h_m = -\frac{1,5 d_m}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{над}}}$, белому цвету – $\Delta h_m = \frac{5 d_m}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{над}}}$.

Шаг 5. Полученные для обоих изображений карты $\Delta h_m(m_{onop}, n_{onop})$ с использованием интерполятора Ланцоша трансформируются в систему координат (m_κ, n_κ) . Интерполированные значения $\Delta h_m(m_\kappa, n_\kappa)$ с использованием (3.32) пересчитываются в степени истинности $\mu(S_i)$.

Пример распределения значений $\mu(S_1)$ по полю левого изображения, приведенного на рисунке 1.10, представлен на рисунке 3.8. Значения $\mu(S_1)$ визуализированы линейной шкалой градаций серого. Черному цвету соответствует нулевая степень истинности, белому цвету – единичная.

Шаг 6. В соответствии с (3.28) выполняется мультивременная фильтрация спекл-шума на первом объединяемом изображении.

Шаг 7. В соответствии с (3.24) и с применением Т-нормы Лукасевича для каждого пикселя (m_κ, n_κ) рассчитываются $\mu(A_1)$, $\mu(A_2)$ и $\mu(A_{12})$. Затем с использованием (3.22) формируется сигнал пикселя результирующего изображения.

За счет различного расположения областей переналожения сигналов и затенения на объединяемых изображениях, результат объединения содержит минимальное количество дефектов.

На рисунке 3.9 приведено распределение областей переналожения сигналов и затенения для радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты, представленных на рисунке 1.10. Красным цветом обозначены переналожения сигналов на левом изображении, зеленым цветом – переналожения сигналов на правом изображении, синим цветом – затенения на левом изображении. Правое изображение, представленное на рисунке 1.10, было снято с умеренным углом $\alpha_{\text{над}}$, поэтому затенений на нем не наблюдается.

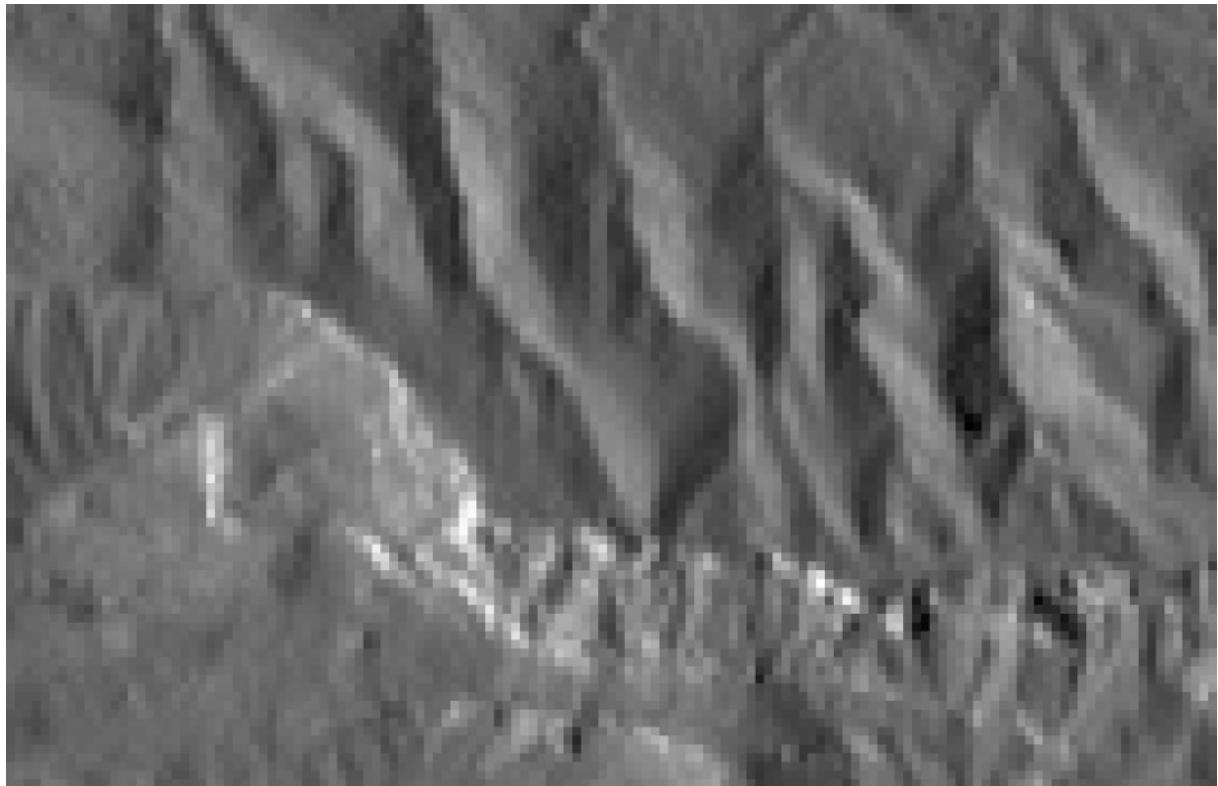


Рисунок 3.7 – Карта значений возвышения над тенью



Рисунок 3.8 – Карта значений нечеткого признака наличия затенений

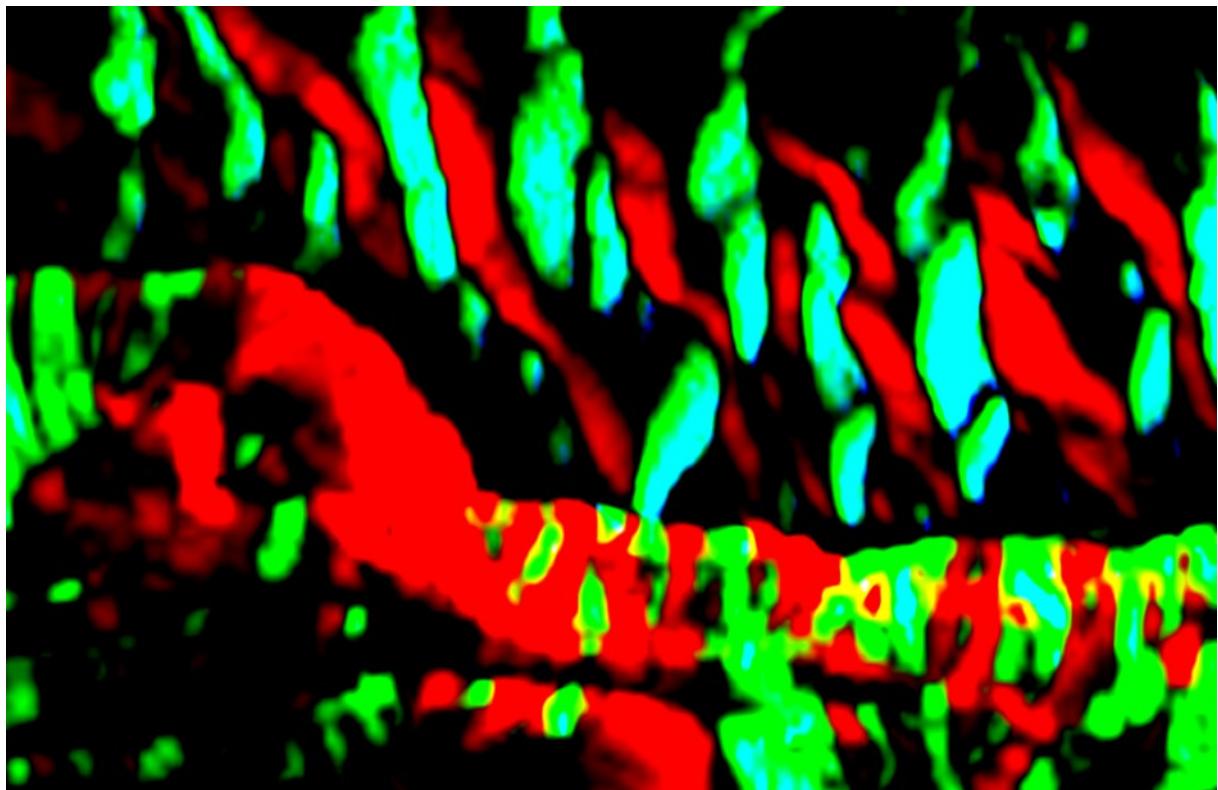


Рисунок 3.9 – Пространственное распределение областей переналожения сигналов и затенения на объединяемых радиолокационных изображениях

Из рисунка 3.9 видно, что области переналожения сигналов на объединяемых изображениях практически не пересекаются, но большей части затенений на первом изображении соответствуют переналожения на втором изображении. Последняя особенность не позволяет полностью избавиться от дефектов, но их остаточная площадь в рамках приведенного примера оказывается многократно меньше площади дефектов на исходных изображениях.

Экспериментальные исследования предложенного метода на натурной информации и полученные оценки эффективности приведены в главе 6.

Основные результаты

1. Разработан алгоритм, позволяющий уточнить геодезическую привязку радиолокационного изображения на основе его корреляционно-экстремального совмещения с опорным оптическим снимком. Определена система координат, в которую преобразуются изображения перед совмещением. Предложены яркостные

преобразования совмещаемых изображений для уменьшения их разнородности, а также критерии отбраковки недостоверных результатов корреляции. Проанализированы способы эффективной организации расчетов значений коэффициента корреляции Пирсона при больших размерах фрагмента и области поиска для современной вычислительной техники. Рассмотрен механизм пересчета результатов корреляционно-экстремального совмещения в поправки к параметрам строгой модели геодезической привязки радиолокационного изображения.

2. Рассмотрен вопрос вычислительно эффективной организации массовых координатных преобразований при геометрических трансформированиях радиолокационных изображений. Предложены аппроксимирующие трехмерные решетки с трипараболической интерполяцией между узлами. Предложен алгоритм выбора шага решетки по каждому измерению.

3. Предложен алгоритм еще более эффективной организации массовых координатных преобразований для частного случая – совмещения интерферометрической пары радиолокационных изображений с учетом опорной низкодетальной стереофотограмметрической цифровой модели высот.

4. Предложен метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики, позволяющий уменьшить суммарную площадь дефектных областей без возникновения ложных резких границ в условиях низкой детальности привлекаемой опорной стереофотограмметрической цифровой модели высот.

4 МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В главе выдвигается и обосновывается пятое положение, выносимое на защиту. В его рамках описывается метод высокоточной обработки радиолокационных интерферометрических изображений на основе анализа сюжета интерферограммы с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации от оптико-электронных систем ДЗЗ на абсолютном большинстве этапов обработки [35, 58, 75–91, 119–131]. Высокая точность достигается за счет гарантии, что ошибки будут локализованы в пределах нескольких пикселей опорной низкодетальной модели высот, а также за счет устранения различных видов фазовых искажений и отбраковки дефектных областей. Новизна решений, положенных в основу метода, подтверждена патентом РФ [80].

4.1 Объединение низкодетальной стереофотограмметрической информации с целью повышения точности опорных данных для интерферометрической обработки

4.1.1 Постановка задачи объединения стереофотограмметрической информации. Основная идея предлагаемого метода высокоточной обработки интерферометрических изображений заключается в том, что топографическая фаза на интерферограмме начиная с определенного масштаба должна совпадать с привлекаемой низкодетальной стереофотограмметрической цифровой моделью высот. Это позволяет локализовать ошибки развертывания фазы, а также выявить фазовые искажения различного типа. Однако одновременно повышаются требования к точности опорных стереофотограмметрических данных, поскольку все содержащиеся в них ошибки будут перенесены на результаты интерферометрической обработки. В связи с этим возникает задача подготовки опорных данных с целью повышения их точности.

В настоящее время в открытом доступе имеется ряд глобальных низкодетальных ЦМВ, полученных в результате стереофотограмметрической обработки материалов оптико-электронного наблюдения. Глобальность ЦМВ определяется тем, что они покрывают большую часть земной суши, однако ни одна из имеющихся на текущий момент стереофотограмметрических ЦМВ не покрывает сушу целиком. Это обусловлено следующими причинами:

- 1) наклонение орбиты космического аппарата может не позволить вести стереосъемку полярных областей;
- 2) пески, льды и снега являются малоконтрастными объектами, которые не надежно совмещаются при стереофотограмметрической обработке и могут быть отбракованы;
- 3) постоянная облачность над территориями с влажным климатом не позволяет выполнить их оптико-электронную съемку.

В таких проблемных районах стереофотограмметрические ЦМВ могут быть дополнены имеющимися в открытом доступе низкодетальными интерферометрическими ЦМВ, к которым относятся SRTM [312] и Copernicus DEM [313]. Для остальной части суши предпочтительны стереофотограмметрические ЦМВ, поскольку привлечение принципиально иным способом полученных данных для использования при обработке радиолокационной информации позволяет частично скомпенсировать проблемы радиолокационного наблюдения сложной пересеченной местности. Наиболее известными глобальными стереофотограмметрическими ЦМВ являются ASTER GDEM [314] и Alos World 3D 30 [315].

Помимо пропусков данных, глобальные низкодетальные стереофотограмметрические ЦМВ могут содержать локальные ошибки двух типов:

- 1) пересеченной местности может быть ошибочно назначена фиксированная высота из-за ложного выявления водной поверхности;
- 2) из-за невыявления облачности или малоконтрастных объектов могут появиться ложные возвышенности или впадины.

Благодаря тому, что доступные глобальные низкодетальные ЦМВ получены из различных источников (различными космическими системами), расположение ошиб-

бок и пропусков на них в целом не совпадает. Это позволяет получить более точные опорные данные для использования при интерферометрической обработке путем объединения глобальных низкодетальных стереофотограмметрических ЦМВ.

Перед объединением можно выделить наиболее точную и детальную из имеющихся глобальных стереофотограмметрических ЦМВ. В настоящее время такой ЦМВ является Alos World 3D 30. Выделенная ЦМВ назначается базовой. Из нее формируется результат объединения во всех пикселях, кроме принадлежащих участкам, где имеются пропуски данных или выявлены локальные ошибки. Такие участки заполняются данными других ЦМВ с обеспечением их бесшовнойстыковки с базовой ЦМВ на границах участков.

4.1.2 Критерий выявления ошибок первого типа на базовой ЦМВ. Ошибочно выделенную водную поверхность на базовой ЦМВ можно выявить по критерию, что высота воды существенно превышает высоту значительной части берега. Математически этот критерий формулируется следующим образом:

$$N_{выше\ бер} > \varepsilon_{выше\ бер} N_{бер}, \quad (4.1)$$

где $N_{бер}$ – количество пикселей «берега», т.е. пикселей, граничащих с областью постоянной высоты на ЦМВ; $N_{выше\ бер}$ – количество пикселей «берега», в которых высота на ЦМВ ниже, чем в области, с которой они граничат, более чем на некоторый порог θ_h , выбираемый в соответствии с известной вертикальной точностью ЦМВ; $\varepsilon_{выше\ бер} \ll 1$ – малое пороговое значение.

Введение $\varepsilon_{выше\ бер} > 0$ позволяет учесть ситуации, когда водная поверхность выделена в целом верно, но по соседству с ней имеется небольшое количество ошибок высоты другого типа.

Введение порога θ_h позволяет учесть пологий берег и высокочастотный шум малой амплитуды на ЦМВ.

Обычно для ошибочно выделенной водной поверхности величина $N_{выше\ бер}$ составляет примерно половину от $N_{бер}$.

4.1.3 Критерий выявления ошибок второго типа на базовой ЦМВ.

Ошибки второго типа на базовой ЦМВ $h_{\text{оноп баз}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})$ выявляются в два этапа на основе ее попиксельного сопоставления с другой (альтернативной) ЦМВ $h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})$.

На первом этапе находятся пиксели $(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})$, потенциально содержащие ошибочные значения высоты, по критерию:

$$\begin{aligned} h_{\text{оноп баз}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) - h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) &\notin [-\theta_{h\text{ниж}}, \theta_{h\text{верх}}] \cup \\ &\cup [-\varepsilon_{Gh} G_{h\text{макс}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}), \varepsilon_{Gh} G_{h\text{макс}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})], \end{aligned} \quad (4.2)$$

где $\theta_{h\text{ниж}}$ и $\theta_{h\text{верх}}$ – предельно допустимые для равнинной местности отличия высоты на базовой ЦМВ в меньшую и большую стороны от высоты на альтернативной ЦМВ, ε_{Gh} – коэффициент учета вариаций высоты, $G_{h\text{макс}}$ – максимальное значение градиента высоты в окрестности радиуса $r_{\text{оноп}}$ пикселя $(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})$ альтернативной ЦМВ:

$$\begin{aligned} G_{h\text{макс}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) = \max_{\Delta m_{\text{оноп}}, \Delta n_{\text{оноп}} \leq r_{\text{оноп}}} & ((h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}} + \Delta m_{\text{оноп}} + 1, n_{\text{оноп}} + \Delta n_{\text{оноп}}) - \\ & - h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}} + \Delta m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}} + \Delta n_{\text{оноп}}))^2 + \\ & + (h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}} + \Delta m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}} + \Delta n_{\text{оноп}} + 1) - \\ & - h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}} + \Delta m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}} + \Delta n_{\text{оноп}}))^2)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Учет $G_{h\text{макс}}$ необходим, поскольку между объединяемыми ЦМВ может наблюдаться небольшой сдвиг, вызванный погрешностями их геодезической привязки.

На втором этапе анализируются связные области пикселей, выявленных на предыдущем этапе. Для каждой такой области, изолированной от других, независимо принимается решение, считать или нет, что она содержит ошибку второго типа. Принятие решения осуществляется по результатам сопоставления градиентов высоты на границе области для базовой и альтернативной ЦМВ. Считается, что область содержит ошибку второго типа, если выполняется условие:

$$\frac{1}{N_{\text{ep}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ep}}} |G_{\text{еп баз}}(m_{\text{оноп}i}, n_{\text{оноп}i})| - |G_{\text{еп альт}}(m_{\text{оноп}i}, n_{\text{оноп}i})| > \varepsilon_{\text{еп}}, \quad (4.4)$$

где $G_{\text{ср баз}}(m_{\text{оноп}_i}, n_{\text{оноп}_i})$ и $G_{\text{ср альт}}(m_{\text{оноп}_i}, n_{\text{оноп}_i})$ – градиент высоты в i -м пикселе границы области в направлении внешней нормали к линии границы на базовой и альтернативной ЦМВ, $N_{\text{ср}}$ – периметр области в пикселях, $\varepsilon_{\text{ср}} \geq 0$ – пороговое значение.

Если условие (4.4) не выполняется, то предполагается, что различия высот на объединяемых ЦМВ вызваны ошибкой не на базовой, а на альтернативной ЦМВ.

4.1.4 Заполнение пропусков и областей с ошибками на базовой ЦМВ. Пропуски и области с ошибками, выявленные на базовой ЦМВ, заполняются на результате объединения данными альтернативной ЦМВ, модифицированными с целью обеспечения их бесшовнойстыковки с данными базовой ЦМВ на границах областей.

Модификация заключается в прибавлении корректирующей поверхности $h_{\text{kopp}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})$. Введем весовые коэффициенты $w_{h_{\text{kopp}}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})=1$ в пикселях, заполняемых данными базовой ЦМВ, и $w_{h_{\text{kopp}}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})=0$ в остальных пикселях. Тогда при $w_{h_{\text{kopp}}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})=1$:

$$h_{\text{kopp}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) = h_{\text{оноп баз}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) - h_{\text{оноп альт}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}), \quad (4.5)$$

а при $w_{h_{\text{kopp}}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}})=0$:

$$\begin{aligned} h_{\text{kopp}}(m_{\text{оноп}}, n_{\text{оноп}}) &= \\ &= \frac{\sum_{k,l} (h_{\text{оноп баз}}(k, l) - h_{\text{оноп альт}}(k, l)) w_{h_{\text{kopp}}}(k, l) ((k - m_{\text{оноп}})^2 + (l - n_{\text{оноп}})^2)^{-\frac{p_{\text{оноп}}}{2}}}{\sum_{k,l} w_{h_{\text{kopp}}}(k, l) ((k - m_{\text{оноп}})^2 + (l - n_{\text{оноп}})^2)^{-\frac{p_{\text{оноп}}}{2}} + \varepsilon_{\text{оноп}}}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где $k, l \in \mathbb{Z}$, $\sqrt{(k - m_{\text{оноп}})^2 + (l - n_{\text{оноп}})^2} \leq r_{\text{оноп}}$ – индексы, $r_{\text{оноп}}$ – радиус фильтра, $p_{\text{оноп}}$ – показатель фильтра, $\varepsilon_{\text{оноп}}$ – малая регуляризующая константа.

Выражение (4.6) фактически описывает интерполяцию на нерегулярной решетке по методу обратных взвешенных расстояний.

4.1.5 Алгоритм объединения нескольких ЦМВ. Если для объединения доступно более двух стереофотограмметрических ЦМВ, то они упорядочиваются в порядке возрастания точности. Сначала объединяются первые две ЦМВ. Первая назначается альтернативной, вторая – базовой. Затем объединяются результат

объединения первой пары (как альтернативная ЦМВ) и третья ЦМВ, назначаемая базовой. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет вовлечена в качестве базовой лучшая из имеющихся ЦМВ.

Результат объединения стереофотограмметрических ЦМВ $h_{onop}(m_{onop}, n_{onop})$ используется в качестве низкодетальных опорных данных о высоте наблюдаемых объектов при обработке интерферограмм, рассматриваемой в следующих параграфах.

4.2 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

4.2.1 Трансформирование низкодетальной стереофотограмметрической информации в систему координат основного радиолокационного изображения интерферометрической пары с предварительным выявлением областей переналожения сигналов. Перед выполнением интерферометрической обработки необходимо низкодетальные стереофотограмметрические данные $h_{onop}(m_{onop}, n_{onop})$ преобразовать в систему координат основного радиолокационного изображения интерферометрической пары $h_{onop}(m, n)$. Это можно сделать на основе итерационного решения системы (2.36), введя координатное соответствие $(m_{onop}, n_{onop}) \rightarrow (B_u, L_u)$.

В отсутствие переналожения сигналов система (2.36) имеет два решения – две точки, расположенные по разные стороны от радиолокационного КА, из которых выбирается одна в соответствии с данными о визировании влево или вправо, следующими из угловой ориентации КА. При наличии переналожения сигналов система (2.36) имеет в качестве решения более одной точки, расположенной по нужную сторону от КА. В таком случае преобразование $h_{onop}(m_{onop}, n_{onop}) \rightarrow h_{onop}(m, n)$ становится неоднозначным. Фаза на интерферограмме в областях переналожения сигналов определяется не конкретным значением высоты одного наблюдаемого точечного объекта, а суперпозицией высот нескольких объектов, сигналы от которых попадают в один и тот же пиксель радиолокационного изобра-

жения. Следовательно корректно пересчитать такую фазу в высоту становится невозможno. Поэтому области переналожения сигналов при интерферометрической обработке необходимо выявлять и отбраковывать.

Выявление областей переналожения сигналов при интерферометрической обработке существенно упрощается по сравнению с задачей, рассмотренной в параграфе 3.4, поскольку выполняется в антенной системе координат, а не картографической проекции. Оно может быть эффективно осуществлено одновременно с преобразованием $h_{\text{онор}}(m_{\text{онор}}, n_{\text{онор}}) \rightarrow h_{\text{онор}}(m, n)$ следующим образом.

Для каждой m -й строки преобразование выполняется дважды. В первый раз оно осуществляется в порядке возрастания n с получением $h_{\text{онор}\uparrow}(m, n)$. В качестве начального приближения для решения (2.36) берется $h_{\text{нач}} = -500$ м при минимальном n и $h_{\text{нач}} = h_{\text{онор}\uparrow}(m, n-1)$ для последующих n . Во второй раз преобразование выполняется в порядке убывания с получением $h_{\text{онор}\downarrow}(m, n)$. В качестве начального приближения для решения (2.36) берется $h_{\text{нач}} = 9000$ м при максимальном n и $h_{\text{нач}} = h_{\text{онор}\downarrow}(m, n+1)$ для последующих n . К областям переналожения сигналов относятся пиксели (m, n) , в которых $|h_{\text{онор}\downarrow}(m, n) - h_{\text{онор}\uparrow}(m, n)| > \theta_{\text{переналож}}$.

Порог $\theta_{\text{переналож}}$ при интерферометрической обработке с целью формирования ЦМВ выбирается близким к вертикальной точности опорных стереофотограмметрических данных $h_{\text{онор}}(m_{\text{онор}}, n_{\text{онор}})$. При дифференциальной интерферометрической обработке порог $\theta_{\text{переналож}}$ может быть увеличен. Выбирается такой порог, при котором разница $\varphi_{\text{mono}}(m, n, h_{\text{онор}}(m, n))$ и $\varphi_{\text{mono}}(m, n, h_{\text{онор}}(m, n) + \theta_{\text{переналож}})$ становится существенной и начинает снижать точность пересчета фазы в смещения наблюдаемых объектов.

Из-за низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных границы областей переналожения выявляются неточно. Поэтому при дальнейшей обработке будет предусмотрено дополнительное выявление переналожений на основе анализа сигнала интерферограммы.

После получения $h_{onop}(m, n)$ выполняется совмещение радиолокационных изображений интерферометрической пары в соответствии с алгоритмом, предложенным в параграфе 3.3, а затем формируется интерферометрическое изображение (интерферограмма) в соответствии с (1.17).

4.2.2 Модифицированное оценивание когерентности и усиленная фильтрация фазового шума. Оценивание когерентности как меры зашумленности интерферограммы в соответствии с (1.22) приводит к занижению получаемых оценок $\gamma(m, n)$ в окрестности резких границ высотных объектов, не представленных на опорной топографической фазе $\phi_{mono}(m, n)$ из-за низкой детальности стереофотограмметрических данных. В результате интерферограмма сильнее фильтруется, а резкие перепады высот на результирующей ЦМВ сглаживаются. Чтобы этого избежать, предлагается следующая модификация процедуры оценивания когерентности.

$\phi(m, n)$ в (1.22) необходимо представить не как отклонения сигнала интерферограммы от фазовой картины опорных стереофотограмметрических данных о высоте, а как чисто шумовую составляющую фазы. Для этого необходимо приблизенно восстановить полезный фазовый сигнал с максимальным сохранением его детальности. Фильтр Голдштейна [237, 238] в данном случае не подходит, поскольку либо сильно снижает детальность, либо слабо устраняет шум.

При обработке однозначных действительных сигналов наиболее подходящим для заданной цели является медианный фильтр. Однако для фазы такая фильтрация напрямую неприменима: из-за неоднозначного периодического характера значения сигнала не могут быть упорядочены по величине. Покажем, как можно преобразовать фазу к упорядочиваемым значениям.

В основе преобразования лежит предположение, что в пределах малого прямоугольного окна фильтрации полезный сигнал интерферограммы изменяется практически линейно, причем отклонения от аппроксимирующей линейной зависимости не превышают половину фазового периода. Таким образом, в каждом малом фрагменте из сигнала интерферограммы можно вычесть его линейную ап-

проксимацию, применить медианный фильтр к результату вычитания и прибавить обратно линейную аппроксимацию:

$$\begin{aligned} F_{Me}(\Delta\varphi_{ce}(m, n)) = \\ = \arg(\exp(j(Me \{ \arg \exp(j(\Delta\varphi_{ce}(m+k, n+l) - \varphi_{cp} - G_{xcp}l - G_{ycop}k)) ; \\ k, l = -r_{Me}, r_{Me} \} + \varphi_{cp}))), \end{aligned} \quad (4.7)$$

где Me – медиана, r_{Me} – радиус фильтра, φ_{cp} , G_{xcp} и G_{ycop} – параметры линейной аппроксимации, вычисляемые как

$$\varphi_{cp} = \arg \left(\sum_{k=-r_{Me}}^{r_{Me}} \sum_{l=-r_{Me}}^{r_{Me}} \exp(j \Delta\varphi_{ce}(m+k, n+l)) \right), \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} G_{xcp} = \frac{1}{2r_{Me}(2r_{Me}+1)} \times \\ \times \sum_{k=-r_{Me}}^{r_{Me}} \sum_{l=-r_{Me}}^{r_{Me}-1} \exp(j(\Delta\varphi_{ce}(m+k, n+l+1) - \Delta\varphi_{ce}(m+k, n+l))), \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} G_{ycop} = \frac{1}{2r_{Me}(2r_{Me}+1)} \times \\ \times \sum_{k=-r_{Me}}^{r_{Me}-1} \sum_{l=-r_{Me}}^{r_{Me}} \exp(j(\Delta\varphi_{ce}(m+k+1, n+l) - \Delta\varphi_{ce}(m+k, n+l))). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Таким образом, в модифицированной процедуре оценивания когерентности используется $\phi(m, n) = \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{ce}(m, n) - F_{Me}(\Delta\varphi_{ce}(m, n)))))$. Следовательно, при необходимости когерентность может быть оценена и до процедуры выравнивания интерферограммы. Если же оценивание выполняется после выравнивания, то $\Delta\varphi_{ce}$ заменяется на $\Delta\varphi_{выравн\,ce}(m, n)$.

В результате на фильтрованной интерферограмме после применения фильтра Голдштейна [237, 238] с учетом значений $\gamma(m, n)$, рассчитанных описанным выше образом, лучше сохраняются вариации фазы, вызванные резкими перепадами высот наблюдаемых объектов.

Значения фазы в пикселях, в которых $\gamma(m, n) \leq \gamma_{min}$, так же, как и в пикселях ранее выявленных областей переналожения, исключаются из последующей обработки путем назначения им нулевых весов или нулевой амплитуды при преобразо-

вании в комплексный сигнал. В качестве γ_{\min} может быть взято значение 0,3. Отбраковка связана с тем, что при очень низких значениях $\gamma(m, n)$ фильтр Голдштейна не способен восстановить полезный сигнал.

Другой проблемой фильтра Голдштейна является сохранение небольшого количества импульсных шумов, приводящих к увеличению количества сингулярных точек на интерферограмме и усложнению последующего развертывания фазы со снижением качества результата обработки. В связи с этим предлагается дополнительно обработать результат фильтрации Голдштейна медианным фильтром, адаптированным выше для обработки интерферограмм, т.е. формировать фильтрованную интерферограмму как

$$\Delta\varphi_{\text{фильтр } c_6}(m, n) = F_{Me}(\arg(F(\exp(j\Delta\varphi_{\text{выравн } c_6}(m, n))))). \quad (4.11)$$

При использовании (4.11) пространственное разрешение фильтрованной интерферограммы практически не деградирует по отношению к (1.23), но при этом многократно сокращается количество сингулярных точек, вызванных остаточным импульсным шумом.

4.2.3 Выявление и отбраковка затенений. Участкам, попавшим в радиотень, обычно соответствуют слабый уровень сигнала на радиолокационном изображении и низкая когерентность на интерферограмме. Поэтому большая часть затенений отбраковывается по критерию низкой когерентности, как это было описано в предыдущем пункте.

Однако возможны две ситуации, когда сигнал в области радиотени будет иметь достаточно высокую когерентность, при этом не описывая реальные высоты наблюдаемых объектов. Первая ситуация – это коррелированный характер шума. Вторая ситуация – в области радиотени может быть различим ослабленный сигнал от боковых лепестков антенны радиолокатора, из-за азимутальной неоднозначности соответствующий не текущим наблюдаемым объектам, а объектам, смещенным на несколько километров вдоль трассы КА.

Поэтому целесообразно в дополнение к отбраковке участков низкой когерентности ввести дополнительные выявление и отбраковку затенений.

Поскольку интерферограмма и опорные стереофотографические данные представлены в антенной системе координат, определение затенений путем трассировки лучей существенно упрощается по сравнению с задачей, рассмотренной в параграфе 3.4. Трассировка лучей ведется вдоль строки интерферограммы относительно положения фазового центра антенны радиолокатора при съемке основного изображения интерферометрической пары. Поскольку интерферометрическая база относительно невелика, считается, что расположение радиотеней на паре изображений совпадает. По аналогии с пунктом 3.4.4 для каждого пикселя вычисляются высота границы тени $h_m(m, n)$ и возвышение над тенью $\Delta h_m(m, n)$:

$$h_m(m, n) = \max(h_{onop}(m, n), h_m(m, n-1) - \Delta R_\perp \cos \alpha_{had}(m, n)), \quad (4.12)$$

$$\Delta h_m(m, n) = h_{onop}(m, n) - h_m(m, n-1) + \Delta R_\perp \cos \alpha_{had}(m, n). \quad (4.13)$$

Сигнал в пикселях с $\Delta h_m(m, n) \leq 0$ отбраковывается.

Из-за низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных $h_{onop}(m, n)$ границы областей затенения определяются неточно. Поэтому вводится дополнительный этап уточнения границ областей затенения путем анализа амплитуды $\hat{a}(m, n)$ радиолокационного сигнала, усредненной по двум изображениям интерферометрической пары, и дополнительно обработанной фильтром скользящего среднего малой апертуры с целью уменьшения спекл-шума.

Вычисляется средняя амплитуда сигнала в пределах выявленных областей затенения:

$$\hat{a}_m = \frac{\sum_{\substack{m, n \\ \Delta h_m(m, n) \leq 0}} \hat{a}(m, n)}{\sum_{\substack{m, n \\ \Delta h_m(m, n) \leq 0}} 1}. \quad (4.14)$$

Пиксели (m, n) , для которых выполняются условия $\Delta h_m(k, l) \leq 0$, $\sqrt{(m-k)^2 + (n-l)^2} \leq r_{onop}$ и $\hat{a}(m, n) \leq \hat{a}_m k_{m \text{ запас}}$, где r_{onop} – округленный вверх до целого результат отношения шагов пикселя низкодетальных стереофотограмметрических данных и интерферограммы, $k_{m \text{ запас}} > 1$ – коэффициент запаса, также считаются теневыми и отбраковываются.

4.2.4 Предварительное уточнение фазы плоского рельефа. В пункте 1.3.10 отмечено, что погрешности знания интерферометрической базы, вызванные неточностью измерительной информации, приводят к неполному устранению набега фазы плоского рельефа и мультиплексной ошибке пересчета высоты в топографическую фазу. Данные негативные эффекты предлагаются устранять до развертывания фазы в 3 этапа.

На первом этапе – этапе предварительного уточнения фазы плоского рельефа – устраняются значительные ошибки выравнивания интерферограммы.

Из интерферограммы $\Delta \tilde{\varphi}_{\text{выравн} \text{св}}(m, n)$, выравненной с использованием измерительной информации, вычленяется остаточная фаза плоского рельефа $\Delta \varphi_{\text{плоск}}$. Для этого сигнал $\Delta \tilde{\varphi}_{\text{выравн} \text{св}}(m, n) - \tilde{\varphi}_{\text{mono}}(m, n)$ размывается и прореживается до разрешения опорных стереофотограмметрических данных с получением:

$$\Delta \varphi_{\text{ocm} \text{св}}(\hat{m}, \hat{n}) = \arg \left(\sum_{k, l} w_{\varphi n}(m(\hat{m})+k, n(\hat{n})+l) \times \right. \\ \left. \times \exp(j(\Delta \tilde{\varphi}_{\text{выравн} \text{св}}(m(\hat{m})+k, n(\hat{n})+l) - \tilde{\varphi}_{\text{mono}}(m(\hat{m})+k, n(\hat{n})+l))) \right), \quad (4.15)$$

где $m \sim \hat{m}$, $n \sim \hat{n}$, $w_{\varphi n}(m, n)$ – весовые коэффициенты, $\tilde{\varphi}_{\text{mono}}$ – топографическая фаза, полученная путем пересчета опорных стереофотограмметрических данных с учетом измерительной информации и потенциально содержащая мультиплексную ошибку.

В отбракованных областях интерферограммы $w_{\varphi n}(m, n)=0$. В остальных пикселях $w_{\varphi n}(m, n)$ назначаются в соответствии со значениями коэффициента когерентности:

$$w_{\varphi n}(m, n) = \begin{cases} 0, & \gamma(m, n) \leq \gamma_{\min}, \\ \frac{\gamma(m, n) - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}, & \gamma_{\min} < \gamma(m, n) < \gamma_{\max}, \\ 1, & \gamma(m, n) \geq \gamma_{\max}. \end{cases} \quad (4.16)$$

В качестве порогового значения γ_{\max} выбирается 0,7.

Принимается, что $\Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}) \approx \Delta\varphi_{плоск}$, и на основе средневзвешенных градиентов фазы $\Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n})$ вычисляются приближенные оценки коэффициентов линейной аппроксимации $\Delta\varphi_{плоск}$ (1.36):

$$\Delta\hat{k}_{n_плоск} = \frac{\sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{xnp}(\hat{m}, \hat{n}) \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}+1) - \Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}))))}{(n(\hat{n}+1) - n(\hat{n})) \sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{xnp}(\hat{m}, \hat{n})}, \quad (4.17)$$

$$\Delta\hat{k}_{m_плоск} = \frac{\sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{ynp}(\hat{m}, \hat{n}) \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}+1, \hat{n}) - \Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}))))}{(m(\hat{m}+1) - m(\hat{m})) \sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{ynp}(\hat{m}, \hat{n})}, \quad (4.18)$$

где:

$$w_{xnp}(\hat{m}, \hat{n}) = \min(w_{np}(\hat{m}, \hat{n}), w_{np}(\hat{m}, \hat{n}+1)), \quad (4.19)$$

$$w_{ynp}(\hat{m}, \hat{n}) = \min(w_{np}(\hat{m}, \hat{n}), w_{np}(\hat{m}+1, \hat{n})), \quad (4.20)$$

$$w_{np}(m, n) = \sum_{k, l} w_{\varphi n}(m(\hat{m})+k, n(\hat{n})+l). \quad (4.21)$$

По результатам предварительного уточнения фазы плоского рельефа формируется скорректированная прореженная интерферограмма:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{ocm1_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}) = & \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{ocm_{cb}}(\hat{m}, \hat{n}) - \Delta\hat{k}_{n_плоск}n(\hat{n}) - \Delta\hat{k}_{m_плоск}m(\hat{m}) + \\ & + \widetilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n}))))). \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.2.5 Устранение мультипликативной ошибки топографической фазы.

Основной составляющей сигнала $\Delta\varphi_{ocm1_{cb}}(\hat{m}, \hat{n})$ является топографическая фаза. За счет увеличения шага дискретизации она должна практически идеально совпадать с опорной топографической фазой $\widetilde{\varphi}_{mono}$. Поэтому на втором этапе устранения негативных эффектов, вызванных неточностью знания интерферометрической базы, ищется мультипликативная зависимость $\Delta\varphi_{ocm1_{cb}}$ от $\widetilde{\varphi}_{mono}$. Если коэффициент этой зависимости отличен от единицы, требуется внести мультипликативную поправку в правила прямого и обратного пересчета топографической фазы в высоту.

Нахождение мультипликативной зависимости осуществляется путем сопоставления СКО сигналов. Для этого, во-первых, нужно развернуть фазу $\Delta\varphi_{ocm1_{cb}}$, а во-вторых, исключить влияние остаточного набега фазы плоского рельефа, кото-

рый после выполнения предыдущего этапа не превышает 1–2 периода в пределах всей ширины или всей высоты интерферограммы.

Второе решается путем анализа малых фрагментов, в которых остаточный набег фазы пренебрежимо мал, а первое – путем развертывания не самой фазы $\Delta\varphi_{ocm1_{cs}}$, а ее отличий от $\tilde{\varphi}_{mono}$. Предполагается, что отличия малы и их вариации не превышают половины фазового периода:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{ocm1}(\hat{m}, \hat{n}) = & \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{ocm1_{cs}}(\hat{m}, \hat{n}) - \tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n})) - \bar{\varphi}_{ocm1}))) + \\ & + \tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n})) + \bar{\varphi}_{ocm1},\end{aligned}\quad (4.23)$$

где $\bar{\varphi}_{ocm1}$ – среднее отличие фаз в пределах малого фрагмента радиуса $r_{\phi p}$:

$$\bar{\varphi}_{ocm1} = \arg\left(\sum_{k=-r_{\phi p}}^{r_{\phi p}} \sum_{l=-r_{\phi p}}^{r_{\phi p}} \exp(j(\Delta\varphi_{ocm1_{cs}}(\hat{m}+k, \hat{n}+l) - \tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}+k), n(\hat{n}+l))))\right). \quad (4.24)$$

Коэффициент мультипликативной зависимости вычисляется в пределах каждого малого фрагмента с центром в точке (\hat{m}, \hat{n}) как отношение СКО двух сигналов:

$$\delta_\sigma(\hat{m}, \hat{n}) = \frac{\sigma[\Delta\varphi_{ocm1}(\hat{m}, \hat{n})]}{\sigma[\tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n}))]}. \quad (4.25)$$

Для повышения точности $\delta_\sigma(\hat{m}, \hat{n})$ при вычислении СКО из выборки могут быть исключены пиксели с $w_{np}(\hat{m}, \hat{n})=0$.

Из-за малого объема выборки погрешность каждой отдельной оценки $\delta_\sigma(\hat{m}, \hat{n})$ велика, поэтому итоговая оценка мультипликативного коэффициента находится путем усреднения $\delta_\sigma(\hat{m}, \hat{n})$, при этом приоритет отдается фрагментам с большим значением СКО опорной топографической фазы:

$$\delta_\sigma = \frac{\sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{np}(\hat{m}, \hat{n}) \min(0, \sigma[\tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n}))] - \sigma_{min}) \delta_\sigma(\hat{m}, \hat{n})}{\sum_{\hat{m}, \hat{n}} w_{np}(\hat{m}, \hat{n}) \min(0, \sigma[\tilde{\varphi}_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n}))] - \sigma_{min})}, \quad (4.26)$$

где σ_{min} – порог, позволяющий отбраковать фрагменты с однородным рельефом, в которых при расчетах по формуле (4.25) может возникнуть деление на нуль.

Уточненная опорная топографическая фаза может быть выражена как

$$\varphi_{mono}(m, n) = \delta_\sigma \tilde{\varphi}_{mono}(m, n). \quad (4.27)$$

При больших начальных погрешностях знания интерферометрической базы может потребоваться несколько итераций описанного уточнения мультипликативной зависимости. Итерации заканчиваются, когда δ_σ становится достаточно близким к единице. Обычно достаточно двух-трех итераций.

4.2.6 Окончательное уточнение фазы плоского рельефа. На третьем этапе устранения негативных эффектов, вызванных неточностью знания интерферометрической базы, формируется сигнал:

$$\Delta \varphi_{ocm2_cb}(\hat{m}, \hat{n}) = \arg(\exp(j(\Delta \varphi_{ocm1_cb}(\hat{m}, \hat{n}) - \varphi_{mono}(m(\hat{m}), n(\hat{n}))))). \quad (4.28)$$

Из $\Delta \varphi_{ocm2_cb}(\hat{m}, \hat{n})$ полностью исключена топографическая фаза, что позволяет более точно оценить остаточную фазу плоского рельефа на основе аппроксимации:

$$\Delta \varphi_{ocm2_cb}(\hat{m}, \hat{n}) \approx \Delta \tilde{k}_{n_плоск} n(\hat{n}) + \Delta \tilde{k}_{m_плоск} m(\hat{m}) + \Delta \tilde{b}_{плоск}. \quad (4.29)$$

Оценивание коэффициентов $\Delta \tilde{k}_{n_плоск}$ и $\Delta \tilde{k}_{m_плоск}$ по средневзвешенному градиенту, как это делалось в пункте 4.2.4, является недостаточно точным. Поэтому для аппроксимации (4.29) предлагается МНК, адаптированный к периодическому характеру фазы. Он сводится к нахождению псевдорешения системы трансцендентных уравнений:

$$\begin{cases} \dots, \\ \arg(\exp(j(\Delta \tilde{k}_{n_плоск} n(\hat{n}) + \Delta \tilde{k}_{m_плоск} m(\hat{m}) + \Delta \tilde{b}_{плоск} - \Delta \varphi_{ocm2_cb}(\hat{m}, \hat{n})))) = 0, \\ \dots \end{cases} \quad (4.30)$$

Предлагается следующий алгоритм нахождения псевдорешения системы (4.30).

Из-за периодического характера фазы сначала путем полного перебора определяется, сколько полных периодов составляет набег $\Delta \varphi_{ocm2_cb}(\hat{m}, \hat{n})$ вдоль всей строки и всего столбца интерферограммы. Число перебираемых вариантов составляет $(2 K_{\max} + 1)^2$, где K_{\max} – максимальная возможная погрешность предварительного уточнения фазы плоского рельефа, выраженная в фазовых периодах. Как пра-

вило, $K_{\max} \leq 2$. В результате перебора находятся значения $\Delta \tilde{k}_{n \text{ плоск}}$, $\Delta \tilde{k}_{m \text{ плоск}}$ и $\Delta \tilde{b}_{\text{плоск}}$, обеспечивающие минимальную сумму квадратов невязок системы (4.30).

Контролируется, что средний квадрат невязок оказался существенно меньше $\pi^2/3$. В противном случае необходимо увеличить K_{\max} и повторить полный перебор.

После успешного выполнения полного перебора становится возможным итерационное приближение к истинным значениям $\Delta \tilde{k}_{n \text{ плоск}}$, $\Delta \tilde{k}_{m \text{ плоск}}$ и $\Delta \tilde{b}_{\text{плоск}}$, осуществляющее следующим образом.

Устанавливается начальный шаг коррекции $\Delta \tilde{k}_{n \text{ плоск}}$ и $\Delta \tilde{k}_{m \text{ плоск}}$, соответствующий набегу фазы вдоль всей строки и всего столбца интерферограммы в половину периода. Рассматривается девять вариантов коррекции, при которых каждый из коэффициентов может увеличиться на выбранный шаг, уменьшиться на него же или остаться без изменения. Из полученных вариантов выбирается тот, который обеспечивает минимальную сумму квадратов невязок системы (4.30).

На каждой следующей итерации шаг коррекции уменьшается в 2 раза и снова осуществляется выбор из 9 вариантов. Итерационный процесс заканчивается, когда становится достаточно мал шаг коррекции параметров аппроксимации.

Для достижения большей точности может применяться весовой вариант МНК, где в качестве весов используются $w_{np}(\hat{m}, \hat{n})$.

По результатам уточнения фазы плоского рельефа формируется окончательно выравненная интерферограмма, которая может быть подвержена фильтрации (4.11) и дальнейшим этапам интерферометрической обработки:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{\text{выравн св}}(m, n) = & \arg \left(\exp \left(j \left(\Delta \tilde{\varphi}_{\text{выравн св}}(m, n) - (\Delta \hat{k}_{m \text{ плоск}} + \Delta \tilde{k}_{m \text{ плоск}}) m - \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. - (\Delta \hat{k}_{n \text{ плоск}} + \Delta \tilde{k}_{n \text{ плоск}}) n \right) \right) \right). \end{aligned} \quad (4.31)$$

4.2.7 Окончательное выявление областей переналожения сигналов. После окончательного выравнивания интерферограммы и фильтрации шумов на ней становится возможным окончательное выявление областей переналожения сигналов. Основной составляющей сигнала $\Delta \varphi_{\text{фильтр св}}(m, n)$ является топографическая фаза. Не все ее изменения вдоль строки интерферограммы допустимы с точки зре-

ния геометрической модели интерферометрической съемки. Изменение фазы, соответствующее резкому уменьшению высоты в направлении увеличения наклонной дальности, является недопустимым, поскольку в этом случае более дальний пиксель должен был бы попасть в область радиотени и не содержать полезный сигнал. Если же оба пикселя не отнесены к теневым, то это означает, что фаза на интерферограмме искажена. Предполагается, что источником таких искажений являются переналожения сигналов, не полностью отбракованные ранее из-за недостаточной детальности опорных стереофотограмметрических данных.

Предлагается выявлять и отбраковывать рассмотренные искажения на интерферограмме следующим образом.

В рамках отбраковки затенений для пикселей интерферограммы должны были быть рассчитаны значения углов $\alpha_{\text{над}}(m, n)$. Максимальное уменьшение высоты, при котором не образуется затенение, составляет $\Delta R_{\perp} \cos \alpha_{\text{над}}(m, n)$. Поэтому вычисляются соответствующие предельно допустимые изменения фазы:

$$G_{x\text{пред}}(m, n) = \varphi_{\text{mono}}(h_{\text{оноп}}(m, n) - \Delta R_{\perp} \cos \alpha_{\text{над}}(m, n)) - \varphi_{\text{mono}}(h_{\text{оноп}}(m, n)). \quad (4.32)$$

Если $G_{x\text{св}}(m, n) < G_{x\text{пред}}(m, n)$ и $d\varphi_{\text{mono}}/dh > 0$ или $G_{x\text{св}}(m, n) > G_{x\text{пред}}(m, n)$ и $d\varphi_{\text{mono}}/dh < 0$, сигнал в пикселе (m, n) отбраковывается с получением веса $w_{\varphi}(m, n) = 0$. В остальных пикселях $w_{\varphi}(m, n) = w_{\varphi n}(m, n)$.

4.2.8 Устранение атмосферных искажений фазы. Если съемка двух радиоголограмм, из которых были синтезированы радиолокационные изображения интерферометрической пары, велась асинхронно, на интерферограмме присутствуют атмосферные искажения фазы, которые, во-первых, вносят ошибку в формируемые ЦМВ, а во-вторых, мешают сопоставлению сигнала интерферограммы с опорной топографической фазой на последующих этапах обработки. Поэтому при обработке данных асинхронной съемки необходимо устранение этих искажений.

За счет того, что состояние атмосферы изменяется в пространстве плавно, основные атмосферные искажения сосредоточены в низкочастотной составляющей сигнала интерферограммы, которая априорно известна по низкодетальным стереофотограмметрическим ЦМВ. Поэтому устранение атмосферных искажений

заключается в подавлении низких частот на результате вычитания из интерферограммы опорной топографической фазы:

$$\varphi_{разн\,св}(m, n) = \arg(F_{amm}\{\exp(j(\Delta\varphi_{фильтр\,св}(m, n) - \varphi_{mono}(m, n)))\}). \quad (4.33)$$

В качестве фильтра F_{amm} предлагается:

$$F_{amm}\{s(m, n)\} = s(m, n) - \frac{g_{\sigma_{\Gamma_m}, \sigma_{\Gamma_n}} * (w_\varphi(m, n)s(m, n))}{g_{\sigma_{\Gamma_m}, \sigma_{\Gamma_n}} * w_\varphi(m, n)}, \quad (4.34)$$

где $g_{\sigma_{\Gamma_m}, \sigma_{\Gamma_n}}$ – двумерный фильтр Гаусса с параметрами σ_{Γ_m} и σ_{Γ_n} , выбираемыми в соответствии с соотношением шагов пикселя интерферограммы по двум измерениям и пространственного разрешения опорных стереофотограмметрических данных.

При этом при размытии целесообразно загрублять пространственное разрешение интерферограммы до величины проекции не одного, а нескольких пикселей опорных данных. Это связано с тем, что значения высоты в отдельных пикселях опорной стереофотограмметрической ЦМВ могут быть недостоверными из-за наличия небольших артефактов или временных изменений местности. Особенно это характерно для городов, где постоянно появляются новые здания, размеры основания которых сопоставимы с пространственным разрешением опорных данных.

В случае синхронной интерферометрической съемки устранение атмосферных искажений не требуется, поэтому разностная интерферограмма формируется как

$$\varphi_{разн\,св}(m, n) = \arg(\exp(j(\Delta\varphi_{фильтр\,св}(m, n) - \varphi_{mono}(m, n)))). \quad (4.35)$$

Сигнал $\varphi_{разн\,св}(m, n)$ подается на вход развертывания фазы. Для корректного расчета весовых коэффициентов при развертывании также учитывается выченная из интерферограммы опорная топографическая фаза $\varphi_{mono}(m, n)$.

4.3 ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ ФАЗЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СЮЖЕТА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

4.3.1 Постановка задачи выявления и восстановления коротких линий разрыва фазы. В пункте 1.3.4 были выделены 2 основных типа линий разрыва фазы: короткие и длинные. Первый тип в основном вызван остаточным им-

пульсным шумом на интерферограмме и артефактами фильтрации. Введение дополнительной медианной фильтрации интерферограммы, рассмотренное в пункте 4.2.2, существенно уменьшает количество таких линий, однако необходимость выявления оставшихся коротких линий и восстановления фазового градиента в их окрестности это не отменяет.

С выявлением коротких линий разрыва фазы с минимальными вычислительными затратами справляется алгоритм Голдштейна–Зебкера–Вернера [239], однако он не может восстановить фазовый градиент в их окрестности. Последнее может выполнить алгоритм Костантини [245], однако в исходном виде он требует больших вычислительных затрат. Поэтому целесообразно модифицировать и скомбинировать указанные известные алгоритмы для достижения поставленной задачи с приемлемой точностью и малыми вычислительными затратами.

Комбинирование заключается в следующем. Применяется «жадный» алгоритм, как у Голдштейна, Зебкера и Вернера, но вместо линий отсечения проводятся единицы потока по дугам транспортной сети, как у Костантини, позволяющие скорректировать на фазовый период оценку градиента фазы. Приемлемая точность достигается путем задания длин дугам транспортной сети и модификацией ее структуры, что рассматривается ниже.

4.3.2 Модификация структуры транспортной сети. Недостатком структуры транспортной сети, предложенной Костантини, является невозможность задать предпочтительным направление проведения потока под произвольным углом, поскольку расстояние между узлами сети описывается манхэттенской, а не евклидовой метрикой. Уменьшить негативное влияние этого недостатка можно путем введения диагональных дуг (рисунок 4.1).

Для модифицированной сети изменяются правила (1.34) коррекции фазового градиента после проведения потока по ее дугам:

$$\begin{aligned} G_{xKPP}(m, n) = & G_{x_{cb}}(m, n) + 2\pi(k_\downarrow(m-0,5, n+0,5) - k_\uparrow(m+0,5, n+0,5) + \\ & + k_\nearrow(m-0,5, n+0,5) + k_\nwarrow(m-0,5, n-0,5) - \\ & - k_\nearrow(m+0,5, n+0,5) - k_\nwarrow(m+0,5, n+1,5)), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_{y_{KPP}}(m, n) = & G_{y_{cb}}(m, n) + 2\pi(k_\leftarrow(m+0,5, n+0,5) - k_\rightarrow(m+0,5, n-0,5) + \\
 & + k_\nearrow(m-0,5, n+0,5) - k_\nwarrow(m+0,5, n-0,5) - \\
 & - k_\nearrow(m+1,5, n-0,5) - k_\nwarrow(m+0,5, n+0,5)),
 \end{aligned} \quad (4.36)$$

где k_\nearrow , k_\nwarrow , k_\rightarrow и k_\leftarrow – количество единиц потока, проведенного по соответствующей диагональной дуге.

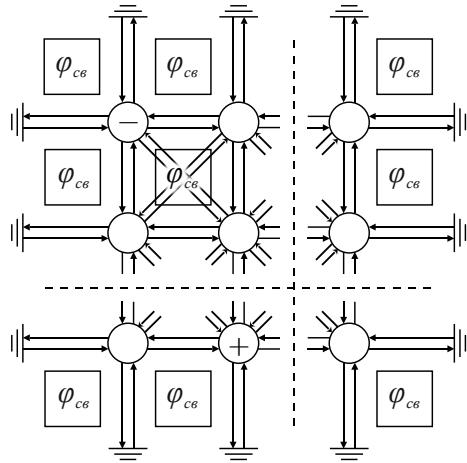


Рисунок 4.1 – Модифицированная структура транспортной сети

4.3.3 Назначение длин дугам транспортной сети. Длины дугам транспортной сети предлагается назначать, исходя из наблюдения, что короткая линия разрыва фазы, как правило, ориентируется перпендикулярно к направлению локального наклона разностной фазовой поверхности $\varphi_{разн cb}(m, n)$, задаваемого вектором $\mathbf{G}_{hp}(m, n) = (G_{x_{hp}}(m, n), G_{y_{hp}}(m, n))^T$. Перпендикуляр к направлению локального наклона фазовой поверхности описывает два противоположных направления проведения потока. Среди них предпочтительным выбирается то, которое приводит при коррекции к увеличению градиента фазы в направлении $\mathbf{G}_{hp}(m, n)$.

Значения вектора $\mathbf{G}_{hp}(m, n)$ предлагается получать как свернутый градиент фазы на интерферограмме, прошедшей для окончательного устранения шумов еще одну медианную фильтрацию, аналогичную описанной в пункте 4.2.2. Данная фильтрация применяется к сигналу $\varphi_{разн cb}(m, n)$ только для получения $\mathbf{G}_{hp}(m, n)$, а развертыванию фазы подвергается нефильтрованный сигнал $\varphi_{разн cb}(m, n)$. Это связано с тем, что сильная фильтрация снижает детальность интерферограммы до

неприемлемого уровня, но для назначения длин дугам транспортной сети такой детальности достаточно. Также на последующих этапах понадобится наклон поверхности $\varphi_{разн\,св}(m, n) + \varphi_{mono}(m, n)$, обозначаемый $\mathbf{G}_n(m, n) = (G_{x_n}(m, n), G_{y_n}(m, n))^T$ и вычисляемый аналогично $\mathbf{G}_{hp}(m, n)$.

Минимальная длина для вертикальных и горизонтальных дуг транспортной сети составляет единицу, а для диагональных дуг $-\sqrt{2}$. Длина дуг, не соответствующих предпочтительному направлению, увеличивается по отношению к минимальной.

Таким образом, длины вертикальных и горизонтальных дуг транспортной сети равняются:

$$\begin{aligned}
 w_\downarrow(m+0,5, n+0,5) &= \begin{cases} 1+K_n|G_{y_{hp}}(m, n)|, & G_{x_{hp}}(m, n) \leq 0, \\ (1+K_n|G_{y_{hp}}(m, n)|)(1+K_n G_{x_{hp}}(m, n)), & G_{x_{hp}}(m, n) > 0; \end{cases} \\
 w_\uparrow(m+0,5, n+0,5) &= \begin{cases} 1+K_n|G_{y_{hp}}(m, n)|, & G_{x_{hp}}(m, n) > 0, \\ (1+K_n|G_{y_{hp}}(m, n)|)(1-K_n G_{x_{hp}}(m, n)), & G_{x_{hp}}(m, n) \leq 0; \end{cases} \\
 w_\leftarrow(m+0,5, n+0,5) &= \begin{cases} 1+K_n|G_{x_{hp}}(m, n)|, & G_{y_{hp}}(m, n) \leq 0, \\ (1+K_n|G_{x_{hp}}(m, n)|)(1+K_n G_{y_{hp}}(m, n)), & G_{y_{hp}}(m, n) > 0; \end{cases} \\
 w_\rightarrow(m+0,5, n+0,5) &= \begin{cases} 1+K_n|G_{x_{hp}}(m, n)|, & G_{y_{hp}}(m, n) > 0, \\ (1+K_n|G_{x_{hp}}(m, n)|)(1-K_n G_{y_{hp}}(m, n)), & G_{y_{hp}}(m, n) \leq 0, \end{cases} \tag{4.37}
 \end{aligned}$$

где K_n – коэффициент чувствительности длин дуг к наклону фазовой поверхности, подбираемый эмпирическим путем.

При $G_{x_{hp}}(m, n) \leq 0$ и $G_{y_{hp}}(m, n) \leq 0$ длины диагональных дуг равняются:

$$\begin{aligned}
 w_\nearrow(m+0,5, n+0,5) &= \sqrt{2} \frac{\max(w_\leftarrow(m+0,5, n+0,5), w_\downarrow(m+0,5, n+0,5))}{\min(w_\leftarrow(m+0,5, n+0,5), w_\downarrow(m+0,5, n+0,5))}, \\
 w_\searrow(m+0,5, n+0,5) &= w_\nearrow(m+0,5, n+0,5) = w_\nwarrow(m+0,5, n+0,5) = \\
 &= w_\nearrow(m+0,5, n+0,5) \frac{w_\leftarrow(m+0,5, n+0,5) + w_\downarrow(m+0,5, n+0,5)}{2}. \tag{4.38}
 \end{aligned}$$

При $G_{x_{hp}}(m, n) \leq 0$ и $G_{y_{hp}}(m, n) > 0$ длины диагональных дуг равняются:

$$\begin{aligned}
w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) &= \sqrt{2} \frac{\max(w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\downarrow}(m+0,5, n+0,5))}{\min(w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\downarrow}(m+0,5, n+0,5))}, \\
w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) = w_{\swarrow}(m+0,5, n+0,5) = \\
&= w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) \frac{w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5) + w_{\downarrow}(m+0,5, n+0,5)}{2}. \quad (4.39)
\end{aligned}$$

При $G_{x_{hp}}(m, n) > 0$ и $G_{y_{hp}}(m, n) \leq 0$ длины диагональных дуг равняются:

$$\begin{aligned}
w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) &= \sqrt{2} \frac{\max(w_{\leftarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5))}{\min(w_{\leftarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5))}, \\
w_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) = w_{\swarrow}(m+0,5, n+0,5) = \\
&= w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) \frac{w_{\leftarrow}(m+0,5, n+0,5) + w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5)}{2}. \quad (4.40)
\end{aligned}$$

При $G_{x_{hp}}(m, n) > 0$ и $G_{y_{hp}}(m, n) > 0$ длины диагональных дуг равняются:

$$\begin{aligned}
w_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) &= \sqrt{2} \frac{\max(w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5))}{\min(w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5), w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5))}, \\
w_{\nwarrow}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) = w_{\swarrow}(m+0,5, n+0,5) = \\
&= w_{\nearrow}(m+0,5, n+0,5) \frac{w_{\rightarrow}(m+0,5, n+0,5) + w_{\uparrow}(m+0,5, n+0,5)}{2}. \quad (4.41)
\end{aligned}$$

4.3.4 Процедура выявления и восстановления коротких линий разрыва

фазы. Выявление и восстановление коротких линий разрыва фазы сводятся к следующим действиям.

Шаг 1. По интерферограмме строится транспортная сеть. Узлы сети, смешенные на половину шага дискретизации относительно пикселей с $w_{\phi}(m, n) = 0$, заменяются «землей». В соответствии с положением сингулярных точек назначаются источники и стоки среди узлов сети, не являющихся «землей». Вычисляются длины дуг.

Шаг 2. Назначается максимальная стоимость проводимых потоков, равная единице.

Шаг 3. Выполняется последовательный перебор узлов транспортной сети. Для каждого обнаруженного источника (стока) с помощью алгоритма Дейкстры [247] ищется ближайший сток (источник) или «земля». Если расстояние до найденного узла (суммарная длина соединяющих их дуг) не превышает установ-

ленную ранее максимальную стоимость потока, по найденному кратчайшему пути проводится единица потока, а соединенные потоком узлы «нейтрализуются».

Шаг 4. Если максимальная стоимость потока не достигла некоторого предела, она увеличивается на единицу с переходом к шагу 3. В противном случае выполняется переход к шагу 5.

Шаг 5. В соответствии с количеством единиц потока, проведенного по дугам сети, выполняется коррекция фазового градиента с использованием выражения (4.36).

Вычислительная сложность выявления и восстановления коротких линий разрыва фазы составляет $O(N_{пикс})$, а объем вычислений оказывается лишь в несколько раз больше, чем в рамках алгоритма Голдштейна–Зебкера–Вернерса [239] за счет выполнения не одного, а нескольких проходов.

В результате «нейтрализуется» абсолютное большинство сингулярных точек, а остаточные нарушения потенциальности поля скорректированного градиента $\mathbf{G}_{КЛР}(m, n) = (G_{x\text{ }КЛР}(m, n), G_{y\text{ }КЛР}(m, n))^T$ вызваны лишь небольшим количеством длинных линий разрыва фазы.

4.3.5 Предварительная идентификация областей с длинными линиями разрыва фазы. В основу идентификации длинных линий разрыва фазы положено наблюдение, что такие линии чаще всего встречаются в окрестности резких изменений крутизны и/или направления локального наклона фазовой поверхности.

Данный признак не является строго ни необходимым, ни достаточным условием наличия длинной линии разрыва фазы, поэтому идентификация является предварительной и заключается в поиске небольшого количества пикселей, в которых наличие длинной линии разрыва фазы видится наиболее вероятным. При дальнейшем развертывания фазы таким пикселям будут назначены нулевые веса, означающие, что именно здесь предпочтительно изменить фазовый градиент для обеспечения свойства его потенциальности.

В отличие от пикселей, которым назначены $w_\varphi(m, n) = 0$, идентифицированные на данном этапе пиксели будут игнорироваться лишь временно, т.е. только в процессе

восстановления потенциального поля фазового градента, а после развертывания фазы сигнал в этих пикселях будет учтен при формировании результирующей ЦМВ.

Крутизна и направление наклона фазовой поверхности задаются вектором $\mathbf{G}_n(m, n)$, введенным в пункте 4.3.3. Относительное сходство длин и направлений двух векторов можно оценить с помощью функции $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) \in [0, 1]$, вычисляемой как

$$F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} \frac{\mathbf{G}_1 \cdot \mathbf{G}_2}{2 \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|)^2} + \frac{1}{2}, & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) > 0, \\ 1, & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) = 0. \end{cases} \quad (4.42)$$

$F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = 1$, когда векторы равны. $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = 0$, когда векторы противоположно направлены, и $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = 0,5$, когда один из них нулевой, а второй отличен от нуля.

Последнее свойство $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$ является нежелательным, поскольку во избежание влияния небольших шумов два вектора малой длины следует считать похожими, даже если они по-разному направлены или один из них строго нулевой. В связи с этим вводится модифицированная функция сходства $\tilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$ на основе регуляризации функции $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$:

$$\tilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2), & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) \geq G_{верх}, \\ (F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) - 1) \times \\ \times \frac{\max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) - G_{ниж}}{G_{верх} - G_{ниж}} + 1, & G_{ниж} < \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) < G_{верх}, \\ 1, & \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|) \leq G_{ниж}, \end{cases} \quad (4.43)$$

где $G_{ниж}$ и $G_{верх}$ – пороговые значения. Все векторы не длиннее $G_{ниж}$ признаются одинаковыми, а на интервале длин от $G_{ниж}$ до $G_{верх}$ выполняется плавный переход от регуляризации к исходной функции $F_{cx}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$.

Другим признаком наличия длинной линии разрыва фазы может быть условие $|\varphi_{mono}(m+1, n) - \varphi_{mono}(m, n)| \geq \pi$ или $|\varphi_{mono}(m, n+1) - \varphi_{mono}(m, n)| \geq \pi$, т.е. нарушение плавности изменения опорной топографической фазы.

Таким образом, по результатам предварительной идентификации областей с длинными линиями разрыва фазы формируются весовые коэффициенты:

$$w_{\varphi 0}(m, n) = \begin{cases} 0, & |\varphi_{mono}(m+1, n) - \varphi_{mono}(m, n)| \geq \pi \\ & \text{или } |\varphi_{mono}(m, n+1) - \varphi_{mono}(m, n)| \geq \pi \\ & \text{или } \min_{k, l = -r_{cx}, r_{cx}} \tilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_n(m, n), \mathbf{G}_n(m+k, n+l)) < \theta_{cx}, \\ w_{\varphi}(m, n) & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (4.44)$$

где θ_{cx} – подбираемый эмпирическим путем порог, r_{cx} – радиус окрестности, в которой оцениваются изменения наклона фазовой поверхности. Значения r_{cx} следует выбирать небольшими, например, 1 или 2.

Вычислительная сложность предварительной идентификации областей с длинными линиями разрыва фазы составляет $O(N_{pixc})$. Окончательное выявление длинных линий разрыва фазы осуществляется на следующем этапе.

4.4 ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ВЫСОКОТОЧНОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ ФАЗЫ НА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

4.4.1 Окончательная идентификация областей с длинными линиями разрыва фазы. Окончательная идентификация основана на итерационном поиске точек локальных максимумов модуля вектора невязок градиента, возникающих на прошедшем высокочастотную фильтрацию результате развертывания фазы по весовому критерию наименьших квадратов:

$$\sum_{m, n} \min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m, n+1))(G_{xMHKi}(m, n) - G_{xKLP}(m, n))^2 + \\ + \sum_{m, n} \min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m+1, n))(G_{yMHKi}(m, n) - G_{yKLP}(m, n))^2 \rightarrow \min. \quad (4.45)$$

Высокочастотная фильтрация фазы, развернутой по критерию (4.45), обусловлена тем, что на разворачиваемой фазе $\varphi_{разн св}(m, n)$ низкочастотная составляющая должна отсутствовать либо за счет синхронности интерферометрической

съемки, либо за счет устранения атмосферных искажений в соответствии с (4.33). Такая фильтрация позволяет гарантировать, что ошибки развертывания фазы не будут неограниченно распространяться, а окажутся локализованы в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных.

С учетом того, что градиент $\mathbf{G}_{\text{КЛР}}(m, n)$ уже восстановлен в части коротких линий разрыва фазы, и того, что заданы нулевые веса для пикселей с наибольшей вероятностью наличия длинных линий разрыва фазы, фазовых разрывов, обладающих ненулевым весом в (4.45), остается мало. За счет этого невязки градиента, возникающие в окрестности разрывов, быстро убывают и практически не суммируются друг с другом. Высокочастотная фильтрация дополнительно повышает скорость убывания невязок и улучшает детектирование разрывов. В результате точки локального максимума невязок, характеризующиеся большими высотой и крутизной пика, примерно соответствуют положению еще не выявленных линий разрыва фазы. На последующих этапах развертывания фазы их положение будет дополнительно уточнено в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных.

Для уменьшения объема вычислений высокочастотную фильтрацию можно объединить с решением уравнения Пуассона, к которому сводится (4.45), если фильтр является четной функцией. Свертка фазовой поверхности с таким фильтром сводится к умножению их ДКП-образов. При этом требуется применять разные варианты ДКП. К сигналу, как и при решении уравнения Пуассона, применяется ДКП-2, а к фильтру – ДКП-1.

С учетом того, что фильтрация атмосферных искажений интерферограммы выполнялась с использованием фильтра Гаусса (4.34), высокочастотную фильтрацию развернутой фазы целесообразно выполнять аналогичным образом: вычитать из сигнала результат его размытия фильтром Гаусса. При этом, чтобы не вносить сильные искажения в среднечастотную составляющую фазы, размывать сигнал необходимо сильнее. В соответствии с правилом «трех сигм» параметры σ_{Γ_m} и σ_{Γ_n} фильтра Гаусса можно увеличить в 3 раза.

В весовом варианте МНК решать уравнение Пуассона требуется многократно. В пункте 1.3.6 были рассмотрены две известные итерационные схемы такого решения: схема Пикара и метод сопряженных градиентов. Последний обладает лучшей сходимостью, но не позволяет эффективно встроить в себя высокочастотную фильтрацию, поскольку развернутая фаза на очередной итерации получается из решения уравнения Пуассона не напрямую, а после ряда преобразований, не рассчитанных на высокочастотную фильтрацию. Поэтому выбирается итерационная схема Пикара. Ее более медленная сходимость компенсируется тем, что высокочастотная фильтрация существенно улучшает результат и сокращает необходимое число итераций. Критерием остановки является малое уменьшение целевой функции за несколько последних итераций.

С учетом вышесказанного оптимизация (4.45) с одновременной высокочастотной фильтрацией сводится к следующим итерационным вычислениям:

$$\begin{aligned} \rho_{i,i_{\text{внуп}}}(m, n) &= \operatorname{div}(\mathbf{w}_{\varphi i} \circ \mathbf{w}_{\varphi i} \circ \mathbf{G}_{\text{КЛР}}) + \operatorname{div}\left(\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \mathbf{w}_{\varphi i} \circ \mathbf{w}_{\varphi i}\right) \circ \operatorname{grad} \varphi_{\text{МНК } i, i_{\text{внуп}} - 1}\right), \\ \varphi_{\text{МНК } i, i_{\text{внуп}}} &= \text{ОДКП} \left\{ \frac{(1 - \text{ДКП-1}\{g_{3\sigma_{\Gamma_m}, 3\sigma_{\Gamma_n}}\}) \text{ДКП}\{\rho_{i,i_{\text{внуп}}}(m, n)\}}{2(\cos(\pi k / K_{\text{ДКП}}) + \cos(\pi l / L_{\text{ДКП}}) - 2)} \right\}, \end{aligned} \quad (4.46)$$

где $i_{\text{внуп}}$ – номер итерации в рамках схемы Пикара, i – номер итерации в рамках внешнего процесса, в ходе которого выявляются новые области с длинными линиями разрыва фазы, и изменяются весовые коэффициенты $\mathbf{w}_{\varphi i} = (\min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m+1, n)), \min(w_{\varphi i}(m, n), w_{\varphi i}(m, n+1)))^T$.

Двумерные ДКП и ОДКП могут быть эффективно вычислены аналогично БПФ. При этом для них также справедливы все механизмы сокращения объема вычислений и повышения эффективности работы кэш-памяти процессора, рассмотренные для БПФ в пункте 3.1.4.

Результат $\text{ДКП-1}\{g_{3\sigma_{\Gamma_m}, 3\sigma_{\Gamma_n}}\}$ может быть получен аналитически. Он совпадает с положительной частью Фурье-образа гауссовского фильтра [316]:

$$\text{ДКП-1}\{g_{3\sigma_{\Gamma_m}, 3\sigma_{\Gamma_n}}\} = \exp\left(-\frac{9}{2}\pi^2\left(\sigma_{\Gamma_m}^2\left(\frac{k}{K_{\text{ДКП}}}\right)^2 + \sigma_{\Gamma_n}^2\left(\frac{l}{L_{\text{ДКП}}}\right)^2\right)\right). \quad (4.47)$$

Результатом φ_{MHK_i} оптимизации (4.45) с одновременной высокочастотной фильтрацией, имеющим градиент $(G_{xMHK_i}(m, n), G_{yMHK_i}(m, n))^T = \text{grad } \varphi_{MHK_i}$, признается фазовая поверхность $\varphi_{MHK_i, i_{\text{end}}}$, полученная на последней итерации схемы Пикара.

Начальные весовые коэффициенты $\mathbf{w}_{\varphi 0}$ задаются на основе $w_{\varphi 0}(m, n)$, вычисленных на предыдущем этапе развертывания фазы в соответствии с (4.44).

В ходе внешнего итерационного процесса выполняется коррекция весов $\mathbf{w}_{\varphi i}$ по отношению к $\mathbf{w}_{\varphi i-1}$ на основе анализа пространственного распределения значений вектора невязок $\Delta \mathbf{G}_i(m, n) = (\Delta G_{xi}(m, n), \Delta G_{yi}(m, n))^T$, где:

$$\begin{aligned} \Delta G_{xi}(m, n) &= G_{xMHK_i}(m, n) - G_{xKLP}(m, n), \\ \Delta G_{yi}(m, n) &= G_{yMHK_i}(m, n) - G_{yKLP}(m, n). \end{aligned} \quad (4.48)$$

Новые веса назначаются следующим образом:

$$\mathbf{w}_{\varphi i}(m, n) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, & |\Delta \mathbf{G}_i(m, n)| > \theta_{\Delta \mathbf{G}_i} \text{ и } |\Delta \mathbf{G}_i(m, n)| > \\ & > \left| \Delta \mathbf{G}_i \left(m + \frac{\Delta G_{yi}(m, n)}{|\Delta \mathbf{G}_i(m, n)|}, n + \frac{\Delta G_{xi}(m, n)}{|\Delta \mathbf{G}_i(m, n)|} \right) \right| \\ & \text{и } |\Delta \mathbf{G}_i(m, n)| > \\ & > \left| \Delta \mathbf{G}_i \left(m - \frac{\Delta G_{yi}(m, n)}{|\Delta \mathbf{G}_i(m, n)|}, n - \frac{\Delta G_{xi}(m, n)}{|\Delta \mathbf{G}_i(m, n)|} \right) \right| \\ & \text{и } |\text{grad } \Delta \mathbf{G}_i(m, n)| > \theta_{\text{grad } \Delta \mathbf{G}_i}, \\ \mathbf{w}_{\varphi i-1}(m, n) & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (4.49)$$

где пороги $\theta_{\Delta \mathbf{G}_i}$ и $\theta_{\text{grad } \Delta \mathbf{G}_i}$ выбираются пропорциональными значению $|\Delta \mathbf{G}_i(m, n)|$, усредненному по всем пикселям ненулевого веса $\mathbf{w}_{\varphi i}(m, n)$.

С каждой следующей итерацией сокращается количество разрывов фазы, которым еще не назначены нулевые веса, и снижается средняя длина вектора невязок. Следовательно уменьшаются пороги $\theta_{\Delta \mathbf{G}_i}$ и $\theta_{\text{grad } \Delta \mathbf{G}_i}$, и все большему количеству

ству пикселей назначаются нулевые веса. Итерационный процесс заканчивается, когда участки с нулевыми весами разделяют интерферограмму на изолированные области ненулевого веса, в каждой из которых разброс значений фазы сигнала $\exp(j(\varphi_{M\!N\!K_i}(m, n) - \varphi_{разрыв}(m, n)))$ становится существенно меньше периода.

Описанный процесс составляет основной объем вычислений при интерферометрической обработке. Его вычислительная сложность составляет $O(k_{им\,внеш} k_{им\,внутр} N_{пикс} \log_2 N_{пикс})$. Однако за счет ряда мер общее количество итераций $k_{им\,внеш} k_{им\,внутр}$ можно сделать умеренным: от нескольких десятков до нескольких сотен. Рассмотрим эти меры.

Во-первых, за счет того, что большая часть весов $\mathbf{w}_{\varphi_i}(m, n)$ остается неизменной по отношению к $\mathbf{w}_{\varphi_{i-1}}(m, n)$, в качестве начального приближения $\varphi_{M\!N\!K_{i,0}}$ для схемы Пикара можно брать фазовую поверхность $\varphi_{M\!N\!K_{i-1}}$, которая будет близка к $\varphi_{M\!N\!K_i}$. В результате при больших i схема Пикара будет сходиться буквально за несколько итераций.

Во-вторых, критерий остановки итераций в схеме Пикара выбирается так, что минимизация (4.45) еще далека от своего завершения, но полученное приближение $\varphi_{M\!N\!K_{i,i_{stop}}}$ уже обладает достаточной точностью для обнаружения локальных максимумов невязок и коррекции весов $\mathbf{w}_{\varphi_i}(m, n)$. За счет выбора такого критерия даже при $i=0$ в рамках схемы Пикара выполняется лишь несколько десятков итераций, в то время как строгая оптимизация может требовать нескольких сотен итераций.

Таким образом, объем вычислений при окончательной идентификации областей с длинными линиями разрыва фазы оказывается сопоставим с развертыванием фазы по весовому МНК [242] в соответствии с (1.30) и меньше, чем у алгоритмов на основе минимизации стоимости потоков в сетях [245] при большом количестве сингулярных точек.

4.4.2 Основные этапы развертывания фазы по результатам выявления фазовых разрывов. После окончательного выявления областей с длинными линиями разрыва фазы оказываются сформированы фазовая поверхность $\varphi_{M\!N\!K}(m, n)$ и окончательные весовые коэффициенты $\mathbf{w}_\varphi(m, n)$. Высокочастотная фильтрация

гарантирует, что ошибки локализуются в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных, однако не гарантируется, что $\varphi_{MHK}(m, n)$ в каждом пикселе отличается от $\varphi_{разн\,св}(m, n)$ на целое количество фазовых периодов. Поэтому необходимо окончательное развертывание фазы, включающее следующие основные этапы:

- 1) восстановление развернутой фазы в крупных областях ненулевого веса $w_\varphi(m, n)$ на интерферограмме;
- 2) восстановление развернутой фазы в малых областях ненулевого веса $w_\varphi(m, n)$ на интерферограмме;
- 3) проведение разрывов в участках нулевого веса $w_\varphi(m, n)$ на интерферограмме;
- 4) уточнение положения проведенных фазовых разрывов в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных;
- 5) заполнение отбракованных областей, для которых $w_\varphi(m, n)=0$: областей переналожений сигналов, радиотеней и низкой когерентности.

Перечисленные этапы подробнее рассматриваются далее.

4.4.3 Восстановление развернутой фазы в крупных изолированных областях ненулевого веса на интерферометрическом изображении. Под крупными подразумеваются области с ненулевыми значениями весов $w_\varphi(m, n)$, изолированные от других таких областей пикселями нулевого веса $w_\varphi(m, n)=(0, 0)^T$ и имеющие площадь не менее $18\sigma_{\Gamma_m} \times 18\sigma_{\Gamma_n}$ пикселей.

Высокочастотная фильтрация гарантирует, что средний уровень сигнала $\varphi_{MHK}(m, n)$ в таких областях близок к нулю. Требуется лишь скорректировать $\varphi_{MHK}(m, n)$ таким образом, чтобы развернутая фаза отличалась от свернутой на целое количество периодов.

Критерий остановки итераций в рамках предыдущего этапа обработки гарантирует, что вариации фазы сигнала $\exp(j(\varphi_{MHK_i}(m, n) - \varphi_{разн\,св}(m, n)))$ в пределах каждой области оказываются меньше фазового периода. Чтобы небольшие от-

личия среднего уровня сигнала $\varphi_{MHK}(m, n)$ от нуля не привели к возникновению «лишних» разрывов фазы, коррекция $\varphi_{MHK}(m, n)$ выполняется независимо для каждой крупной изолированной области ненулевого веса:

$$\begin{aligned} \forall (m, n) \in \Omega_{kp\text{ обл}} : \varphi_{разн}(m, n) = & \varphi_{MHK}(m, n) - \Delta \varphi_{kp\text{ обл}} - \\ & - \arg(\exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n) - \Delta \varphi_{kp\text{ обл}}))), \end{aligned} \quad (4.50)$$

где $\Omega_{kp\text{ обл}}$ – множество пикселей, принадлежащих o -й крупной изолированной области ненулевого веса, $\Delta \varphi_{kp\text{ обл}}$ – средняя фаза сигнала $\exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n)))$ в пределах o -й крупной области:

$$\Delta \varphi_{kp\text{ обл}} = \arg \left(\sum_{m,n}^{(m, n) \in \Omega_{kp\text{ обл}}} \exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n))) \right). \quad (4.51)$$

4.4.4 Восстановление развернутой фазы в малых изолированных областях ненулевого веса на интерферометрическом изображении. Малыми считаются изолированные области ненулевого веса, площадь которых меньше $18\sigma_{\Gamma_m} \times 18\sigma_{\Gamma_n}$ пикселей. В них, в отличие от крупных областей, не гарантируется близость к нулю среднего уровня фазы $\varphi_{MHK}(m, n)$. Обеспечивается только то, что средний уровень $\varphi_{MHK}(m, n)$ соответствует как можно меньшему среднему наклону фазы в участках с нулевыми $\mathbf{w}_\varphi(m, n)$, отделяющих малые области от крупных.

Фаза $\varphi_{MHK}(m, n)$ в пределах крупных областей была скорректирована на предыдущем этапе. Причем, как правило, наибольшая поправка вносится на краях областей. Это искажает соотношение уровней сигнала на границах двух областей, разделенных участком нулевого веса. Чтобы сохранился минимальный средний наклон фазы в участках с нулевыми $\mathbf{w}_\varphi(m, n)$, требуется уточнение среднего уровня фазы в малых изолированных областях.

Для этого строится корректирующая фазовая поверхность $\Delta \varphi_{kp\text{ обл}}(m, n)$, в пределах крупных изолированных областей ненулевого веса определяемая как

$$\Delta \varphi_{kp\text{ обл}}(m, n) = \varphi_{разн}(m, n) - \varphi_{MHK}(m, n). \quad (4.52)$$

В остальных пикселях интерферограммы корректирующая фазовая поверхность $\Delta\varphi_{kp\text{ обл}}(m, n)$ определяется с использованием фильтра обратных взвешенных расстояний по аналогии с (4.6):

$$\Delta\varphi_{kp\text{ обл}}(m, n) = \frac{\sum_{k,l} (\varphi_{разн}(m+k, n+l) - \varphi_{MHK}(m+l, n+l)) w_{kp\text{ обл}}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{обp}}{2}}}{\sum_{k,l} w_{kp\text{ обл}}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{обp}}{2}} + \varepsilon_{obp}}, \quad (4.53)$$

где размер фильтра определяется условием $\sqrt{k^2 + l^2} \leq \max(9\sigma_{\Gamma_m}, 9\sigma_{\Gamma_n})$, а весовые коэффициенты $w_{kp\text{ обл}}(m, n)$ задаются как

$$w_{kp\text{ обл}}(m, n) = \begin{cases} 1, & \exists o: (m, n) \in \Omega_{kp\text{ обл}o}, \\ 0, & \forall o: (m, n) \notin \Omega_{kp\text{ обл}o}. \end{cases} \quad (4.54)$$

Поскольку размеры фильтра обратных взвешенных расстояний $(k^2 + l^2)^{-p_{обp}/2}$ достаточно велики, свертку с ним целесообразно выполнять в частотной области путем умножения спектров, полученных с помощью двумерного БПФ, эффективное выполнение которого рассмотрено в пункте 3.1.4. Вычислительная сложность фильтрации составит $O(N_{пикс} \log_2 N_{пикс})$.

С учетом построенной корректирующей поверхности $\Delta\varphi_{kp\text{ обл}}(m, n)$ развернутая фаза в каждой малой изолированной области ненулевого веса восстанавливается следующим образом:

$$\forall (m, n) \in \Omega_{mal\text{ обл}o}: \varphi_{разн}(m, n) = \varphi_{MHK}(m, n) + \overline{\Delta\varphi}_{kp\text{ обл}o} - \Delta\varphi_{mal\text{ обл}o} - \arg(\exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) + \overline{\Delta\varphi}_{kp\text{ обл}o} - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n) - \Delta\varphi_{mal\text{ обл}o}))), \quad (4.55)$$

где $\Omega_{mal\text{ обл}o}$ – множество пикселей, принадлежащих o -й малой изолированной области ненулевого веса, $\Delta\varphi_{mal\text{ обл}o}$ – средняя фаза сигнала $\exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n)))$ в пределах o -й малой области:

$$\Delta\varphi_{mal\text{ обл}o} = \arg \left(\sum_{m,n}^{(m, n) \in \Omega_{mal\text{ обл}o}} \exp(j(\varphi_{MHK}(m, n) - \varphi_{разн\text{ св}}(m, n))) \right), \quad (4.56)$$

$\overline{\Delta\varphi}_{kp\text{ обл}}$ – среднее значение корректирующей поверхности $\Delta\varphi_{kp\text{ обл}}(m, n)$ в пределах o -й малой области:

$$\overline{\Delta\varphi}_{kp\text{ обл}} = \frac{1}{|\Omega_{\text{мал обл}}|} \sum_{m,n}^{(m, n) \in \Omega_{\text{мал обл}}} \Delta\varphi_{kp\text{ обл}}(m, n). \quad (4.57)$$

4.4.5 Проведение фазовых разрывов в участках нулевого веса на интерферометрическом изображении. Участки нулевого веса $w_\varphi(m, n)$ можно разделить на два типа. Для первого типа $w_\varphi(m, n)=0$, т.е. участки не содержат полезный сигнал, а соответствуют переналожениям, радиотеням или областям низкой когерентности. В них разрывы фазы не проводятся. Для второго типа $w_\varphi(m, n)>0$. Таким участкам были назначены нулевые веса в ходе идентификации длинных линий разрыва фазы, и теперь эти разрывы необходимо в них провести, поскольку на $\varphi_{MHK}(m, n)$ участки нулевого веса заполнены гладкой поверхностью, т.е. резкий скачок фазы на них размыт.

Перед проведением разрывов необходимо учесть в участках нулевого веса результаты предыдущего этапа развертывания фазы. Для этого строится еще одна корректирующая фазовая поверхность $\Delta\varphi_{\text{мал обл}}(m, n)$, определяемая в пределах областей ненулевого веса как

$$\Delta\varphi_{\text{мал обл}}(m, n) = \varphi_{\text{разн}}(m, n) - \varphi_{MHK}(m, n). \quad (4.58)$$

В пределах участков нулевого веса корректирующая фазовая поверхность $\Delta\varphi_{\text{мал обл}}(m, n)$ определяется с использованием фильтра обратных взвешенных расстояний по аналогии с (4.6) и (4.53):

$$\Delta\varphi_{\text{мал обл}}(m, n) = \frac{\sum_{k,l} (\varphi_{\text{разн}}(m+k, n+l) - \varphi_{MHK}(m+l, n+l)) w_{\text{мал обл}}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{\text{обр}}}{2}}}{\sum_{k,l} w_{\text{мал обл}}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{\text{обр}}}{2}} + \varepsilon_{\text{обр}}}, \quad (4.59)$$

где размер фильтра аналогичен (4.53), а весовые коэффициенты $w_{\text{мал обл}}(m, n)$ задаются как

$$w_{\text{мал обл}}(m, n) = \begin{cases} 1, & \mathbf{w}_\varphi(m, n) \neq (0, 0)^T, \\ 0, & \mathbf{w}_\varphi(m, n) = (0, 0)^T. \end{cases} \quad (4.60)$$

Восстановление развернутой фазы в пикселях, в которых $\mathbf{w}_\varphi(m, n) = (0, 0)^T$ и $w_\varphi(m, n) > 0$, заключается в выборе значения, отличающегося от $\varphi_{\text{разн сб}}(m, n)$ на целое количество периодов и наиболее близкого к $\varphi_{\text{МНК}}(m, n) + \Delta \varphi_{\text{мал обл}}(m, n)$:

$$\begin{aligned} \forall (m, n) \in \{(m, n); \mathbf{w}_\varphi(m, n) = (0, 0)^T \text{ и } w_\varphi(m, n) > 0\}: \varphi_{\text{разн}}(m, n) = \\ = \varphi_{\text{МНК}}(m, n) + \Delta \varphi_{\text{мал обл}}(m, n) - \\ - \arg(\exp(j(\varphi_{\text{МНК}}(m, n) + \Delta \varphi_{\text{мал обл}}(m, n) - \varphi_{\text{разн сб}}(m, n)))). \end{aligned} \quad (4.61)$$

Если в окрестности участка нулевого веса действительно проходит разрыв фазы, то в результате восстановления по (4.61) он проводится, как правило, по центральной части участка, что иллюстрирует рисунок 4.2.

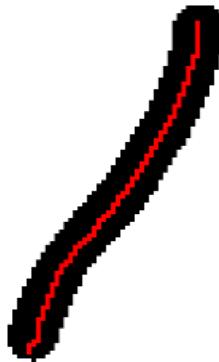


Рисунок 4.2 – Участок нулевого веса (чёрный)
и проведенный разрыв фазы (красный)

Если же вес $\mathbf{w}_\varphi(m, n)$ был обнулен ошибочно и фазового разрыва в окрестности нет, то это обычно не приводит к ошибкам развертывания фазы, поскольку участки с обнуленными $\mathbf{w}_\varphi(m, n)$ очень узкие и значения $\varphi_{\text{МНК}}(m, n) + \Delta \varphi_{\text{мал обл}}(m, n)$, полученные путем интерполяции сигнала в соседних областях ненулевого веса, оказываются близки к истинным значениям $\varphi_{\text{разн}}(m, n)$.

4.4.6 Уточнение положения проведенных фазовых разрывов. Истинное положение длинных линий разрыва фазы может отличаться от места их проведе-

ния, рассмотренного в предыдущем пункте, в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных.

Можно выделить два основных типа локальных ошибок.

Первый тип ошибок возникает тогда, когда рядом с длинной линией разрыва фазы расположена отбракованная область переналожений, радиотеней или низкой когерентности с $w_\phi(m, n) = 0$. В этом случае может произойти неправильная коррекция фазового градиента на этапе идентификации коротких линий разрыва фазы. Поток проводится не от источника к стоку, которые могут быть расположены далеко друг от друга, а из источника на «землю» и из «земли» в сток, где в качестве «земли» выступают точки на границе расположенной рядом отбракованной области.

Второй тип ошибок возникает, когда длинная линия разрыва фазы не сопровождается резким изменением направления и крутизны наклона фазовой поверхности. В этом случае она постепенно детектируется в ходе обнуления $w_\phi(m, n)$ при итерационном развертывании фазы по критерию (4.45). Различные участки линии разрыва фазы обнаруживаются на разных итерациях, между которыми происходит некоторое смещение точек максимума невязок градиента фазы. Из-за этого фазовый разрыв проводится по некоторой извилистой линии, «петляющей» в пределах нескольких пикселей опорных стереофотограмметрических данных от истинного положения разрыва.

Рассмотренные типы локальных ошибок проиллюстрированы на рисунке 4.3. Для их устранения требуется дополнительное уточнение положения фазовых разрывов.

В работах [248–250] при проведении разрывов на основе минимизации стоимости потоков в транспортной сети предлагается учитывать множество факторов: локальный наклон фазовой поверхности, коэффициент когерентности и амплитуду сигнала на исходных радиолокационных изображениях. Поэтому учтем дополнительные факторы на данном этапе развертывания фазы для более точного проведения длинных линий фазовых разрывов.

Уточнение положения разрывов будем по аналогии с [248–250] выполнять на основе минимизации стоимости потоков в транспортной сети, но внесем при

этом ряд модификаций с целью уменьшения объема вычислений и сохранения достигнутой точности обработки.

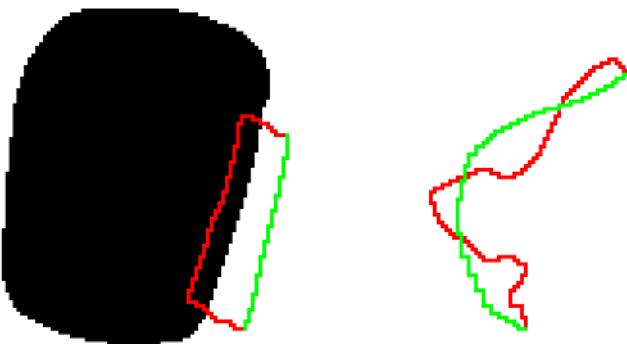


Рисунок 4.3 – Отбракованная область (черный), проведенные разрывы фазы (красный) и истинные положения фазовых разрывов (зеленый)

Транспортная сеть строится не по всей интерферограмме, а только в узких коридорах, в центрах которых располагаются длинные линии разрыва фазы, проведенные на предыдущем этапе. Ширина коридоров выбирается соответствующей нескольким пикселям опорных стереофотограмметрических данных, чтобы сохранить гарантию отсутствия глобальных ошибок развертывания фазы. Так же, как и при выявлении коротких линий разрыва фазы, в структуру транспортной сети вводятся диагональные дуги.

Процедура уточнения положения фазовых разрывов сводится к следующим действиям.

Шаг 1. По дугам транспортной сети вдоль путей, соответствующих длинным линиям разрыва фазы, полученным на предыдущем этапе обработки, в направлении от стоков к источникам проводятся единицы потока, по сути отменяя проведенные ранее разрывы.

Шаг 2. От источников к стокам проводятся единицы потока по таким дугам, чтобы суммарная стоимость всех потоков была минимальной. За счет того, что транспортная сеть строится не по всей интерферограмме, а лишь в узких коридорах, данный шаг не требует большого объема вычислений, типичного для классических алгоритмов развертывания фазы на основе минимизации стоимости потоков.

Шаг 3. Градиент фазовой поверхности $\varphi_{разн}(m, n)$ корректируется по аналогии с (4.36) в соответствии с потоками, проведенными в транспортной сети на предыдущих двух шагах. Поле скорректированного градиента остается потенциальным. После интегрирования скорректированного градиента получается уточненная поверхность развернутой фазы $\tilde{\varphi}_{разн}(m, n)$, на которой разрывы проведены близко к предыдущим положениям, но все же в немного иных местах.

Чтобы новое положение фазовых разрывов было точнее старого, необходимо соответствующим образом задать длины дуг транспортной сети. Правила задания длин дуг, предложенные в работах [248–250] в данном случае не подходят, поскольку не учитывают наличие диагональных дуг. Правила, предложенные в параграфе 4.3, также не могут быть в полной мере применены, поскольку природа длинных линий разрыва фазы иная, чем у коротких.

Длины дуг будем назначать в соответствии с 5 факторами. Для этого определим длины дуг $w_{\leftarrow i}$, $w_{\rightarrow i}$, $w_{\uparrow i}$, $w_{\downarrow i}$, $w_{\nearrow i}$, $w_{\nwarrow i}$ и $w_{\searrow i}$, $i = \overline{1, 5}$ отдельно для каждого фактора, а итоговые длины дуг будут равняться:

$$\begin{aligned} w_{\leftarrow_{ДЛР}} &= \prod_{i=1}^5 w_{\leftarrow i}, \quad w_{\rightarrow_{ДЛР}} = \prod_{i=1}^5 w_{\rightarrow i}, \quad w_{\uparrow_{ДЛР}} = \prod_{i=1}^5 w_{\uparrow i}, \quad w_{\downarrow_{ДЛР}} = \prod_{i=1}^5 w_{\downarrow i}, \\ w_{\nearrow_{ДЛР}} &= \prod_{i=1}^5 w_{\nearrow i}, \quad w_{\nwarrow_{ДЛР}} = \prod_{i=1}^5 w_{\nwarrow i}, \quad w_{\searrow_{ДЛР}} = \prod_{i=1}^5 w_{\searrow i}. \end{aligned} \quad (4.62)$$

Первым фактором является направление наклона фазовой поверхности, задаваемое вектором $\mathbf{G}_n(m, n)$. Длины дуг с его учетом назначаются на базе (4.37)–(4.41), но с заменой $\mathbf{G}_{np}(m, n)$ на $\mathbf{G}_n(m, n)$ и без выделения предпочтительного направления для двух противоположно направленных дуг:

$$\begin{aligned} w_{\leftarrow 1}(m, n) &= w_{\rightarrow 1}(m, n) = \min(w_{\leftarrow}(m, n), w_{\rightarrow}(m, n)), \\ w_{\downarrow 1}(m, n) &= w_{\uparrow 1}(m, n) = \min(w_{\downarrow}(m, n), w_{\uparrow}(m, n)), \\ w_{\nearrow 1}(m, n) &= w_{\nwarrow 1}(m, n) = \min(w_{\nearrow}(m, n), w_{\nwarrow}(m, n)), \\ w_{\searrow 1}(m, n) &= w_{\nwarrow 1}(m, n) = \min(w_{\searrow}(m, n), w_{\nwarrow}(m, n)). \end{aligned} \quad (4.63)$$

Вторым фактором являются резкие изменения наклона фазовой поверхности в виде отличий значений \mathbf{G}_h в соседних пикселях. В соответствии с ним длины дуг назначаются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 w_{\leftarrow 2}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\rightarrow 2}(m+0,5, n-0,5) = (\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m+1, n)))^{p_{длр}}, \\
 w_{\downarrow 2}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\uparrow 2}(m+0,5, n+0,5) = (\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m, n+1)))^{p_{длр}}, \\
 w_{\nearrow 2}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\swarrow 2}(m+0,5, n-0,5) = \\
 &= \sqrt{(\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m+1, n+1)))^{p_{длр}} (\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m-1, n-1)))^{p_{длр}}}, \\
 w_{\searrow 2}(m-0,5, n-0,5) &= w_{\nwarrow 2}(m+0,5, n+0,5) = \\
 &= \sqrt{(\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m-1, n+1)))^{p_{длр}} (\widetilde{F}_{cx}(\mathbf{G}_h(m, n), \mathbf{G}_h(m+1, n-1)))^{p_{длр}}}, \quad (4.64)
 \end{aligned}$$

где $p_{длр}$ – параметр, подбираемый эмпирическим путем и определяющий чувствительность длин дуг к резким изменениям наклона фазовой поверхности.

Третьим фактором является крутизна наклона фазовой поверхности вдоль строки и столбца интерферограммы, задаваемая вектором $\mathbf{G}_h(m, n)$. Длины дуг с его учетом определяются как

$$\begin{aligned}
 w_{\leftarrow 3}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\rightarrow 3}(m+0,5, n-0,5) = f_G(G_{y_h}(m, n)), \\
 w_{\downarrow 3}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\uparrow 3}(m+0,5, n+0,5) = f_G(G_{x_h}(m, n)), \\
 w_{\nearrow 3}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\swarrow 3}(m+0,5, n-0,5) = f_G\left(\frac{G_{x_h}(m, n) - G_{y_h}(m, n)}{2}\right), \\
 w_{\searrow 3}(m-0,5, n-0,5) &= w_{\nwarrow 3}(m+0,5, n+0,5) = f_G\left(\frac{G_{x_h}(m, n) + G_{y_h}(m, n)}{2}\right). \quad (4.65)
 \end{aligned}$$

Функция $f_G(G)$ задается следующим образом:

$$f_G(G) = \begin{cases} K_G, & |G| < \theta_{\text{накл мин}}, \\ 1 + (K_G - 1) \frac{|G| - \theta_{\text{накл мин}}}{\theta_{\text{накл макс}} - \theta_{\text{накл мин}}}, & \theta_{\text{накл мин}} \leq |G| \leq \theta_{\text{накл макс}}, \\ 1, & |G| > \theta_{\text{накл макс}}, \end{cases} \quad (4.66)$$

где K_G – коэффициент чувствительности длин дуг к крутизне наклона, $\theta_{\text{накл мин}}$ и $\theta_{\text{накл макс}}$ – пороговые величины. Параметры K_G , $\theta_{\text{накл мин}}$ и $\theta_{\text{накл макс}}$ подбираются эмпирическим путем.

Четвертым фактором является средняя амплитуда сигнала на совмещенных радиолокационных изображениях интерферометрической пары $a_{12}(m, n) = \frac{|s_1(m, n)| + |s_2(m, n)|}{2}$. В соответствии с ним длины дуг определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} w_{\leftarrow 4}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\rightarrow 4}(m+0,5, n-0,5) = 1, \\ w_{\downarrow 4}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\uparrow 4}(m+0,5, n+0,5) = f_A(a_{12}(m, n)), \\ w_{\swarrow 4}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\searrow 4}(m+0,5, n-0,5) = \\ &= w_{\nwarrow 4}(m-0,5, n-0,5) = w_{\nearrow 4}(m+0,5, n+0,5) = \sqrt{(f_A(a_{12}(m, n)))^2 + 1}. \end{aligned} \quad (4.67)$$

Функция $f_A(A)$ задается следующим образом:

$$f_A(A) = \begin{cases} 1, & A < \theta_{\text{ампл мин}}, \\ 1 + \frac{1 - K_A}{K_A} \cdot \frac{A - \theta_{\text{ампл мин}}}{\theta_{\text{ампл макс}} - \theta_{\text{ампл мин}}}, & \theta_{\text{ампл мин}} \leq A \leq \theta_{\text{ампл макс}}, \\ \frac{1}{K_A}, & A > \theta_{\text{ампл макс}}, \end{cases} \quad (4.68)$$

где K_A – коэффициент чувствительности длин дуг к амплитуде сигнала, $\theta_{\text{ампл мин}}$ и $\theta_{\text{ампл макс}}$ – пороговые величины. Параметры K_A , $\theta_{\text{ампл мин}}$ и $\theta_{\text{ампл макс}}$ подбираются эмпирическим путем.

Значения $\theta_{\text{ампл мин}}$ и $\theta_{\text{ампл макс}}$ можно определить как границы диапазона амплитуд, характерных для случаев, когда земная поверхность перпендикулярна направлению визирования. Их можно найти путем статистического анализа значений $a_{12}(m, n)$ в областях переналожения сигналов. При этом значение $\theta_{\text{ампл мин}}$ должно быть существенно больше средней яркости на остальных участках исходных изображений.

Пятым фактором является недопустимость резкого уменьшения высоты в направлении увеличения наклонной дальности, рассмотренная в пункте 4.2.7. В соответствии с этим фактором увеличивается длина дуг, проведение потока по которым может привести к такому уменьшению высоты:

$$\begin{aligned}
 w_{\leftarrow 5}(m+0,5, n+0,5) &= w_{\rightarrow 5}(m+0,5, n-0,5) = 1, \\
 w_{\downarrow 5}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\nearrow 5}(m-0,5, n+0,5) = w_{\nwarrow 5}(m-0,5, n-0,5) = \\
 &= \begin{cases} 1, & \frac{d \varphi_{mono}}{dh} > 0, \\ K_{\text{верт}}, & \frac{d \varphi_{mono}}{dh} < 0, \end{cases} \\
 w_{\uparrow 5}(m-0,5, n+0,5) &= w_{\nearrow 5}(m+0,5, n-0,5) = w_{\nwarrow 5}(m+0,5, n+0,5) = \\
 &= \begin{cases} 1, & \frac{d \varphi_{mono}}{dh} < 0, \\ K_{\text{верт}}, & \frac{d \varphi_{mono}}{dh} > 0, \end{cases} \tag{4.69}
 \end{aligned}$$

где штрафная длина $K_{\text{верт}} \gg 1$ подбирается эмпирическим путем.

Описанная процедура уточнения положения фазовых разрывов позволяет значительно снизить количество возникающих локальных ошибок за счет того, что при проведении разрывов учитывается максимальный набор параметров, доступный на основе анализа обрабатываемой информации.

4.4.7 Заполнение отбракованных областей, не содержащих полезный сигнал. После выполнения предыдущего этапа оказываются получены значения развернутой фазы $\tilde{\varphi}_{\text{разн}}(m, n)$ во всех неотбракованных пикселях с $w_\varphi(m, n) > 0$.

Текущий этап обработки является опциональным и выполняется только тогда, когда необходимо получить данные о высоте без пропусков в отдельных областях. В этом случае $\tilde{\varphi}_{\text{разн}}(m, n)$ в таких областях заполняется гладкой поверхностью, бесшовно стыкующейся с полезным сигналом на границах отбракованных областей.

На $\varphi_{\text{МНК}}(m, n)$ заполнение отбракованных областей гладкой поверхностью обеспечивается весовым МНК. Однако, поскольку $\tilde{\varphi}_{\text{разн}}(m, n)$ отличается от

$\varphi_{MHK}(m, n)$, необходимо обеспечить стыковку гладкой поверхности с сигналом $\tilde{\varphi}_{разн}(m, n)$. Это может быть выполнено с помощью корректирующей поверхности $\Delta\varphi_{брак}(m, n)$, определяемой в пикселях с $w_\varphi(m, n) > 0$ как $\Delta\varphi_{брак}(m, n) = \tilde{\varphi}_{разн}(m, n) - \varphi_{MHK}(m, n)$ и восстанавливаемой в пикселях с $w_\varphi(m, n) = 0$ с помощью фильтра обратных взвешенных расстояний по аналогии с (4.6), (4.53) и (4.59):

$$\Delta\varphi_{брак}(m, n) = \frac{\sum_{k,l} (\tilde{\varphi}_{разн}(m+k, n+l) - \varphi_{MHK}(m+l, n+l)) w_{брак}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{оп}}{2}}}{\sum_{k,l} w_{брак}(m+k, n+l) (k^2 + l^2)^{-\frac{p_{оп}}{2}} + \varepsilon_{оп}}, \quad (4.70)$$

где размер фильтра аналогичен (4.53), а весовые коэффициенты $w_{брак}(m, n)$ задаются как

$$w_{брак}(m, n) = \begin{cases} 1, & w_\varphi(m, n) > 0, \\ 0, & w_\varphi(m, n) = 0. \end{cases} \quad (4.71)$$

Таким образом, сигнал $\tilde{\varphi}_{разн}(m, n)$ в отбракованных областях восстанавливается в виде:

$$\forall (m, n) \in \{(m, n); w_\varphi(m, n) = 0\}: \tilde{\varphi}_{разн}(m, n) = \Delta\varphi_{брак}(m, n) + \varphi_{MHK}(m, n). \quad (4.72)$$

Дальнейшая интерферометрическая обработка заключается в прибавлении к $\tilde{\varphi}_{разн}(m, n)$ опорной топографической фазы $\varphi_{mono}(m, n)$ и пересчете полученного результата $\tilde{\varphi}(m, n)$ в высоту с учетом поправочного мультиплексивного коэффициента δ_σ , введенного в пункте 4.2.5. Полученная матрица высот ортотрансформируется в картографическую проекцию. На данном этапе для ускорения массовых координатных преобразований могут использоваться аппроксимирующие модели, предложенные в параграфе 3.2.

4.4.8 Технологическая схема обработки интерферометрических изображений в соответствии с предлагаемым методом. Сквозная высокоточная обработка интерферометрических изображений с привлечением низкодетальных стереофотограмметрических данных в соответствии с предлагаемым методом

формируется путем объединения рассмотренных выше отдельных этапов, как это показано на технологической схеме, представленной на рисунке 4.4. Синим цветом обозначены подготовительные этапы, заключающиеся в получении интерферограммы из исходной интерферометрической пары радиолокационных изображений и рассмотренные в главах 1 и 3. Остальные этапы относятся непосредственно к обработке интерферометрического изображения. Красным цветом показаны этапы, имеющиеся в традиционных технологиях интерферометрической обработки. Желтым цветом обозначены этапы, введенные в рамках первой попытки создания метода высокоточной интерферометрической обработки с привлечением опорной информации, предпринятой в работе [266]. Зеленым цветом отмечены этапы, отсутствующие в методе [266] и традиционных технологиях. Звездочкой помечены этапы обработки, для которых в рамках настоящей диссертации предлагаются новые решения.

На рисунке 4.4 использованы следующие сокращения: ПГС – параметры геометрического соответствия; УПГС – уточненные параметры геометрического соответствия; МП – маска переналожений; МЗ – маска затенений; ФИ – фильтрованная интерферограмма (без дополнительной фильтрации); РИ – разностная интерферограмма $\arg(\exp(j(\Delta\varphi_{\text{фильтр_св}} - \varphi_{\text{mono}})))$; ИМВ – интерферометрическая матрица высот в системе координат основного изображения интерферометрической пары; МК – маска качества, получаемая путем ортотрансформирования $w_\varphi(m, n)$.

Основные отличия технологической схемы обработки в рамках предлагаемого метода от наиболее близкого к нему метода [266] следующие. Во-первых, введены этапы 9, 10, 16, 17, 19, 24. Во-вторых, отбраковка сигнала на основе маски переналожений и значений коэффициента когерентности выполняется уже на этапе 10, а не только при развертывании фазы, что позволяет качественнее выполнить этапы 12–19.

Экспериментальная оценка эффективности предложенного метода по сравнению с известными приведена в главе 6.

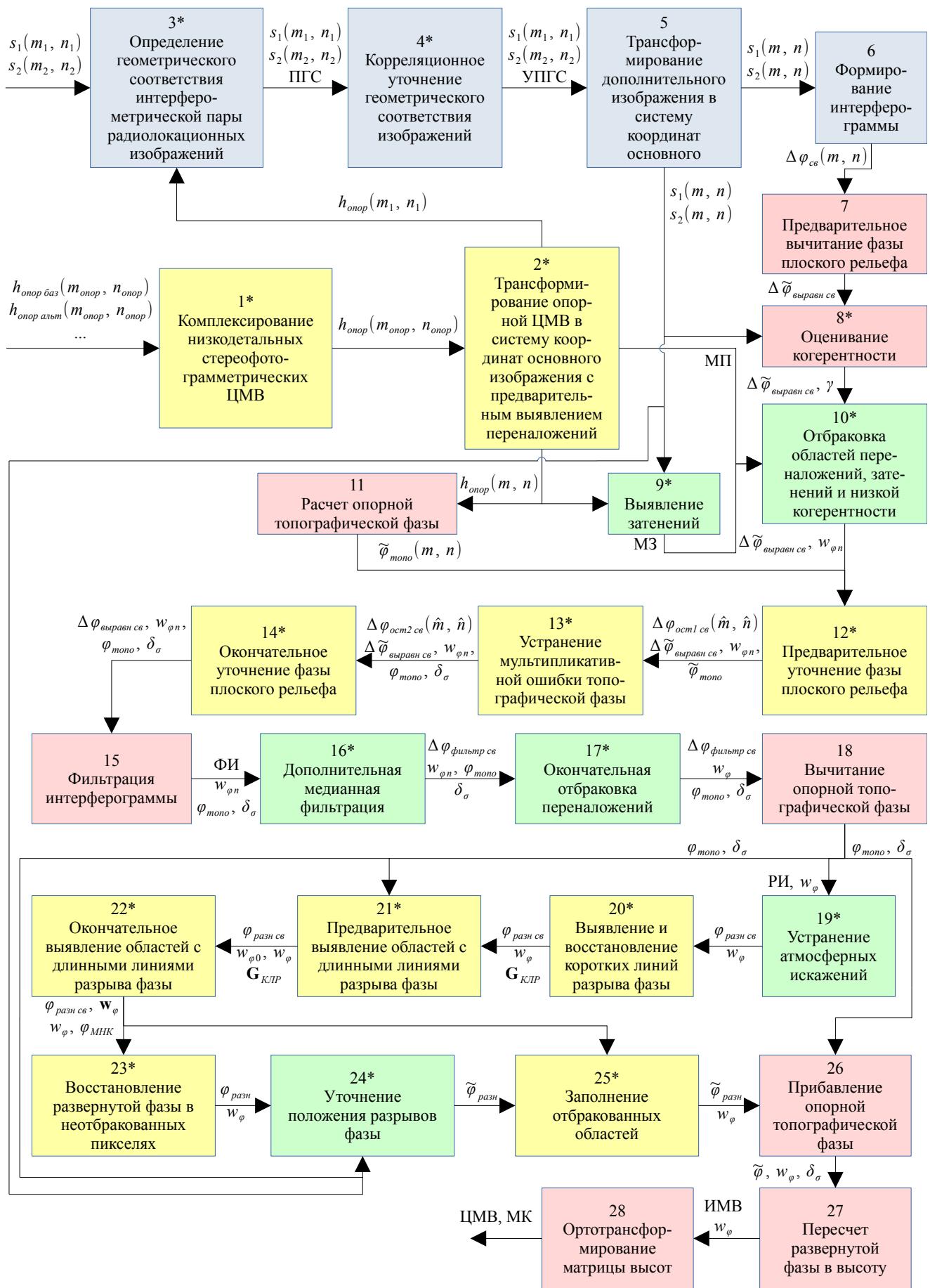


Рисунок 4.4 – Технологическая схема интерферометрической обработки

4.4.9 Адаптация предложенного метода к задаче выявления смещений в рамках дифференциальной интерферометрии. Предложенный метод предназначен для высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью формирования высокодетальных ЦМВ: ЦММ или ЦМР. Тем не менее, он может быть адаптирован и для дифференциальной интерферометрии, когда обработка интерферограммы выполняется с целью определения малых смещений наблюдаемых объектов. Рассмотрим, как может быть выполнена адаптация.

При дифференциальной интерферометрии смягчается предварительная отбраковка областей переналожения сигналов, как это было отмечено в пункте 4.2.1. Из обработки исключаются этапы 17, 19 и 26. Этап 27 заменяется пересчетом развернутой фазы в смещения, этап 28 – ортотрансформированием матрицы смещений. При развертывании фазы принимается $\mathbf{G}_u(m, n) = \mathbf{G}_{up}(m, n)$, а на этапе 22 перестает применяться высокочастотная фильтрация:

$$\varphi_{MCK i, i_{up}} = \text{ОДКП} \left\{ \frac{\text{ДКП}\{\rho_{i, i_{up}}(m, n)\}}{2(\cos(\pi k / K_{ДКП}) + \cos(\pi l / L_{ДКП}) - 2)} \right\}. \quad (4.73)$$

Остальные этапы остаются без изменений.

Основное преимущество метода – гарантия нераспространения ошибок более чем на несколько пикселей опорных стереофотограмметрических данных – при адаптации теряется, поскольку опорная информация о малых смещениях наблюдаемых объектов отсутствует. Однако предложенные решения по дополнительной отбраковке искажений и по выявлению фазовых разрывов путем анализа интерферограммы позволяют сохранить остальные преимущества метода перед известными и при дифференциальной интерферометрии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации для получения высокодетальных цифровых моделей высот.

2. Рассмотрена задача объединения стереофотограмметрических цифровых моделей высот, полученных различными космическими системами, с целью повышения точности опорных данных, привлекаемых для обработки интерферограмм.

3. Рассмотрена проблема предварительной обработки интерферограмм. В рамках известных этапов интерферометрической обработки предложено более точное оценивание когерентности на основе медианной фильтрации интерферограммы. Предложены новые этапы предварительной обработки, связанные с обнаружением, отбраковкой или устранением искажений фазы и основанные на сопоставлении сигнала интерферограммы с низкодетальными стереофотограмметрическими данными.

4. Выделены две процедуры в рамках предварительного развертывания фазы: выявление и коррекция коротких линий разрыва фаза, обнаружение областей с повышенной вероятностью наличия длинной линии разрыва фазы.

5. Предложена процедура окончательного обнаружения длинных линий разрыва фазы, гарантирующая, что ошибки развертывания фазы не будут распространяться более, чем на несколько пикселей низкодетальных стереофотограмметрических данных. Рассмотрены этапы окончательного развертывания фазы, обеспечивающие, что развернутая фаза будет отличаться от свернутой на целое количество периодов.

6. Предложен подход к уточнению положения фазовых разрывов на основе проведения потоков минимальной стоимости в транспортной сети с учетом результатов анализа сигнала интерферограммы и амплитудного сигнала исходной интерферометрической пары радиолокационных изображений. Подход позволяет дополнительно уменьшить количество локальных ошибок развертывания фазы.

7. Представлена технологическая схема интерферометрической обработки в соответствии с предложенным методом. Рассмотрены вопросы адаптации метода к задаче выявления малых смещений наблюдаемых объектов при дифференциальной интерферометрии.

5 АЛГОРИТМЫ ОБЪЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

В главе выдвигаются и обосновываются шестое и седьмое положения, выносимые на защиту. В рамках шестого положения описывается алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных дифференциальных интерферограммах [65, 92–99]. Высокая скорость сегментации делает алгоритм потенциально применимым на борту КА в задаче определения процента облачности и целесообразности выполнения радиолокационной интерферометрической съемки.

В рамках седьмого положения описываются три алгоритма объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли [58, 100–103, 132]. Первый алгоритм предназначен для объединения интерферометрических и стереофотограмметрических ЦММ с привлечением информации о расположении искусственных высотных объектов из электронных карт, второй алгоритм – для перенесения наиболее важных объектов с радиолокационного изображения на оптическую подложку с целью облегчения их дешифрации, третий алгоритм – для раскраски радиолокационного изображения в естественные цвета, задаваемые спектрональным снимком.

5.1 Алгоритм нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах

5.1.1 Варианты применения результатов детектирования облачности по оптическим снимкам при радиолокационной дифференциальной интерферометрии. Как было отмечено в пункте 1.4.2, основными источниками атмосферных

искажений фазы на радиолокационных дифференциальных интерферограммах являются водяной пар и облачность. На амплитудных радиолокационных изображениях они неразличимы. В то же время и водяной пар, и облачность могут быть обнаружены с использованием данных от оптико-электронных систем ДЗЗ.

Обнаружение водяного пара основано на оптической съемке земной поверхности в нескольких близких спектральных диапазонах, часть из которых находится в области поглощения водяного пара, а другая часть – рядом с ней. Например, КА «MODIS» определяет концентрацию водяного пара (в виде общего количества осаждаемой воды) по нескольким спектральным каналам: в области поглощения водяного пара на длине волны 0,94 мкм и в областях прозрачности атмосферы на длинах волн 0,86 и 1,24 мкм [317].

Алгоритмы сегментации облачности на оптических снимках были рассмотрены в пункте 1.4.2. Наиболее универсальными и перспективными среди них являются нейросетевые алгоритмы.

При размещении на гибридном КА и радиолокационной, и оптико-электронной аппаратур с проведением одновременной съемки обеими аппаратурами дает возможность учета данных о водяном паре и расположении облачности при дифференциальной интерферометрической обработке, когда устранение атмосферных искажений, предложенное в пункте 4.2.8 в рамках классической интерферометрии, становится недоступным.

Чтобы данные оптико-электронной съемки можно было геометрически совместить с интерферограммой, направления оптического и радиолокационного визирований должны быть максимально близки. В противном случае совмещение становится невозможным из-за неизвестной высоты облачности.

Рассмотрим подробнее, как маска облачности, полученная по оптическому снимку, может быть совмещена с интерферограммой.

При интерферометрической обработке, в том числе дифференциальной, в каждом пикселе (m, n) интерферограммы известно опорное значение высоты $h_{onop}(m, n)$, извлеченное из низкодетальных стереофотограмметрических данных.

С его использованием в качестве h_u на основе решения системы (1.11) могут быть получены координаты (x_u, y_u, z_u) наблюдаемого объекта и вектор визирования $(x_u - x_p(t_{\perp m}), y_u - y_p(t_{\perp m}), z_u - z_p(t_{\perp m}))^T$. С использованием сведений об орбитальном движении и угловой ориентации КА по строгой модели оптической съемки находятся координаты пикселя (m_{onm}, n_{onm}) оптического изображения, соответствующие полученному вектору визирования. Преобразование $(m, n, h_{onop}(m, n)) \rightarrow (m_{onm}, n_{onm})$ определяет обратный закон координатного соответствия, по которому маска облачности может быть трансформирована в систему координат интерферограммы. Для ускорения массовых координатных преобразований при этом может быть применена аппроксимирующая решетка, предложенная в параграфе 3.2.

Указанное преобразование корректно, когда m однозначно пересчитывается в m_{onm} , т.е. углы оптического и радиолокационного наблюдений по рысканию и тангажу совпадают, и требуется лишь найти столбец n_{onm} , соответствующий оптическому визированию под таким же углом крена, что и радиолокационное наблюдение для пикселя в столбце n с высотой $h_{onop}(m, n)$.

Если углы оптического и радиолокационного наблюдений по рысканию и тангажу не будут совпадать, то для пересчета m в m_{onm} потребуются пересечение векторов визирования и решение задачи триангуляции, для чего необходимо знать не только высоту наблюдаемого радиолокатором объекта, но и высоту облачности, сегментированной на оптическом снимке. Именно поэтому выше было отмечено, что в таком случае совмещение не может быть выполнено.

Если отличия углов оптического и радиолокационного наблюдений по рысканию и тангажу имеются, но малы, их наличием можно пренебречь и считать, что векторы визирования параллельны и пересекать их не требуется.

Поскольку на точность привязки оптических изображений погрешности знания угловой ориентации КА влияют гораздо сильнее, чем для РСА, может наблюдаться систематическая погрешность пересчета $(m, n, h_{onop}(m, n)) \rightarrow (m_{onm}, n_{onm})$. Погрешность можно устраниТЬ путем предварительного совмещения оптического

снимка с высокоточно привязанным опорным изображением и внесения поправок в параметры строгой геометрической модели оптической съемки.

После совмещения маска облачности может быть наложена на дифференциальную интерферограмму. Сигнал в пикселях, в которых маска облачности имеет единичное значение, подлежит отбраковке как подверженный сильным атмосферным искажениям. Если также имеются данные о концентрации водяного пара, на их основе могут быть рассчитаны поправки к значениям фазы в неотбракованных пикселях дифференциальной интерферограммы.

Другой вариант применения оптических данных при дифференциальной интерферометрии возможен на борту КА. Это может быть гибридный КА или пара из радиолокационного и оптико-электронного КА в составе обширной спутниковой группировки, способных наблюдать один и тот же участок земной поверхности в близкие моменты времени.

Сначала оптико-электронная аппаратура выполняет съемку интересуемого участка. Такая съемка является пассивной и за счет этого гораздо менее затратной энергетически, чем радиолокационная. В случае гибридного КА съемка ведется с положительным углом тангажа (передне-боковой обзор). Затем на борту КА выполняется сегментация облачности с расчетом процента последней. Если доля облачности высока, проведение радиолокационного бокового обзора при дальнейшем полете признается нецелесообразным. В случае пары аппаратов оптико-электронный КА посредством радиосвязи должен передать соответствующее сообщение радиолокационному КА.

Чтобы такой вариант применения был возможен, требуются вычислительно эффективные алгоритмы сегментации облачности, которые могут быть реализованы на борту КА.

Предлагаемый далее нейросетевой алгоритм рассчитан на оба рассмотренных варианта применения результатов сегментации облачности при радиолокационной интерферометрии, поскольку обеспечивает точность, необходимую для первого применения, и достаточную скорость для второго применения.

5.1.2 Выбор показателей качества сегментации. Перед обучением ИНС необходимо выбрать показатель качества сегментации, на основе которого будут рассчитываться потери при обучении. Рассмотрим основные известные показатели качества бинарной сегментации [318].

Все показатели предполагают, что имеется результат сегментации в виде бинарного растрового изображения $C_{segm}(m_{onm}, n_{onm})$, где единичный код пикселя соответствует искомому объекту, а нулевой – окружающему фону. В задаче сегментации облачности искомым объектом являются сплошная облачность и полупрозрачная дымка, а окружающим фоном – наземные объекты. Также должен иметься эталонный результат $E_{segm}(m_{onm}, n_{onm})$, полученный, например, в результате ручной сегментации.

Первый показатель – общая точность (англ. – accuracy) сегментации a_{segm} , определяемая как отношение числа пикселей (m_{onm}, n_{onm}) , в которых $C_{segm}(m_{onm}, n_{onm})=E_{segm}(m_{onm}, n_{onm})$, к общему числу сегментируемых пикселей.

До единицы показатель a_{segm} дополняют ошибки первого и второго рода. Под ошибкой первого рода понимается ложное выделение искомого объекта: $C_{segm}(m_{onm}, n_{onm})=1$ при $E_{segm}(m_{onm}, n_{onm})=0$ (на результате сегментации представлен объект, а на эталоне – фон). Под ошибкой второго рода понимается пропуск объекта: $C_{segm}(m_{onm}, n_{onm})=0$ при $E_{segm}(m_{onm}, n_{onm})=1$ (на результате сегментации представлен фон, а на эталоне – объект).

Абсолютное значение числа ошибок первого и второго рода в пикселях изображения обычно не используется. Оно заменяется относительными значениями, нормированными общей площадью окружающего фона или искомых объектов. Таким образом, вероятность возникновения ошибки первого рода α_{segm} – это отношение числа пикселей изображения, ложно распознанных как объект, к числу пикселей, соответствующих окружающему фону на эталоне. Вероятность возникновения ошибки второго рода β_{segm} – это отношение числа пикселей изображения, ошибочно отнесенных к окружающему фону, к числу пикселей, соответствующих искомому объекту на эталоне.

Пусть эталонная доля пикселей изображения, принадлежащих искомому объекту, составляет $\delta_{сегм}$, тогда общая точность сегментации может быть выражена через ошибки первого и второго рода как

$$a_{сегм} = 1 - (1 - \delta_{сегм})\alpha_{сегм} - \delta_{сегм}\beta_{сегм}. \quad (5.1)$$

Недостатком показателя $a_{сегм}$ является тот факт, что при $\delta_{сегм} \rightarrow 0$ он вырождается в $a_{сегм} = 1 - \alpha_{сегм}$, т.е., когда искомых объектов крайне мало, оказывается неважным, пропускаются они или нет; главное, чтобы не было ложных выделений. В обратном случае при $\delta_{сегм} \rightarrow 1$ показатель вырождается в $a_{сегм} = 1 - \beta_{сегм}$, т.е. учитываются только пропуски искомого объекта, а ложные выделения игнорируются.

В ряде задач сегментации, особенно в области медицины, приведенное поведение показателя $a_{сегм}$ является недопустимым, поэтому для таких случаев были разработаны другие показатели. Однако они могут вести себя лучше, чем $a_{сегм}$, лишь при умеренных отклонениях $\delta_{сегм}$ от 0,5, а в экстремальных ситуациях, когда $|\delta_{сегм} - 0,5| \rightarrow 0,5$, их поведение оказывается еще хуже, чем у $a_{сегм}$. Покажем это.

Одним из показателей, выступающих в качестве альтернативы $a_{сегм}$, является мера Жаккара $J_{сегм}$ – отношение числа пикселей, верно отнесенных к объекту, к сумме эталонного числа пикселей объекта и числа пикселей, ошибочно отнесенных к объекту. Через $\alpha_{сегм}$, $\beta_{сегм}$ и $\delta_{сегм}$ мера Жаккара может быть выражена следующим образом:

$$J_{сегм} = \frac{\delta_{сегм}(1 - \beta_{сегм})}{\delta_{сегм} + (1 - \delta_{сегм})\alpha_{сегм}}. \quad (5.2)$$

При $\delta_{сегм} \rightarrow 0$ мера Жаккара вырождается в:

$$J_{сегм} = \frac{0}{\alpha_{сегм}} = \begin{cases} 0, & \forall \alpha_{сегм} > 0, \\ \text{неопределенность}, & \alpha_{сегм} = 0. \end{cases} \quad (5.3)$$

Таким образом, на значение показателя перестают влиять не только ошибки второго рода, но и положительные значения ошибок первого рода. В отсутствие ошибок первого рода и в отсутствие искомых объектов мера Жаккара вырождает-

ся в полную неопределенность, поскольку и числитель, и знаменатель в (5.2) обращаются в нуль. В обратном случае (т.е. при $\delta_{cegm} \rightarrow 1$) $J_{cegm} = 1 - \beta_{cegm}$, т.е. ведет себя аналогично показателю a_{cegm} .

Другими альтернативными показателями являются точность (англ. – precision) обнаружения объекта p_{cegm} , полнота (англ. – recall) обнаружения объекта r_{cegm} , и F_i -меры.

Точность обнаружения объекта p_{cegm} схожа с мерой Жаккара и определяется как отношение числа пикселей, верно отнесенных к искомому объекту, к общему числу пикселей, отнесенных на результате сегментации к искомому объекту:

$$p_{cegm} = \frac{\delta_{cegm}(1 - \beta_{cegm})}{\delta_{cegm}(1 - \beta_{cegm}) + (1 - \delta_{cegm})\alpha_{cegm}}. \quad (5.4)$$

Поведение меры p_{cegm} при $\delta_{cegm} \rightarrow 0$ точно такое же, как у меры Жаккара, и хуже, чем у a_{cegm} . При $\delta_{cegm} \rightarrow 1$ на точность обнаружения объекта перестает влиять количество ошибок первого и второго рода и она вырождается в $p_{cegm} = 1$, т.е. ведет себя хуже, чем a_{cegm} и J_{cegm} .

Полнота обнаружения объекта r_{cegm} определяется как отношение числа пикселей, верно отнесенных к искомому объекту, к эталонному числу пикселей объекта, т.е. фактически дополняет β_{cegm} до единицы:

$$r_{cegm} = 1 - \beta_{cegm}. \quad (5.5)$$

Поскольку полнота r_{cegm} не учитывает количество ошибок первого рода, она используется не самостоятельно, а в комбинации с другими мерами.

Одной из таких комбинаций является F_1 -мера, определяемая как среднее гармоническое точности и полноты обнаружения объекта:

$$F_{1cegm} = \frac{2}{p_{cegm}^{-1} + r_{cegm}^{-1}} = \frac{2\delta_{cegm}(1 - \beta_{cegm})}{\delta_{cegm}(2 - \beta_{cegm}) + (1 - \delta_{cegm})\alpha_{cegm}}. \quad (5.6)$$

При $\delta_{cegm} \rightarrow 0$ F_1 -мера ведет себя так же, как J_{cegm} и p_{cegm} , и хуже, чем a_{cegm} .

При $\delta_{cegm} \rightarrow 1$ F_1 -мера вырождается в $F_{1cegm} = \frac{2(1 - \beta_{cegm})}{2 - \beta_{cegm}}$, т.е. не только, как и дру-

гие меры игнорирует ошибки первого рода, но и оказывается менее чувствительна к ошибкам второго рода.

Обобщением F_1 -меры является семейство F_i -мер, определяемых как

$$F_{icegm} = (1+i^2) \frac{p_{cegm} r_{cegm}}{i^2 p_{cegm} + r_{cegm}} = \frac{(1+i^2) \delta_{cegm} (1 - \beta_{cegm})}{\delta_{cegm} (1+i^2 - \beta_{cegm}) + (1 - \delta_{cegm}) \alpha_{cegm}}. \quad (5.7)$$

Поведение всех F_i -мер при $\delta_{cegm} \rightarrow 0$ одинаково. При $\delta_{cegm} \rightarrow 1$ поведение F_i -мер приближается к поведению a_{cegm} по мере увеличения i .

Также известна ϕ -мера (или коэффициент корреляции Мэттью), определяемая как

$$\begin{aligned} \phi_{cegm} = & \frac{\delta_{cegm} (1 - \beta_{cegm}) (1 - \delta_{cegm}) (1 - \alpha_{cegm}) - (1 - \delta_{cegm}) \alpha_{cegm} \delta_{cegm} \beta_{cegm}}{\sqrt{\delta_{cegm} (1 - \delta_{cegm}) (\delta_{cegm} (1 - \beta_{cegm}) + (1 - \delta_{cegm}) \alpha_{cegm})}} \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{((1 - \delta_{cegm}) (1 - \alpha_{cegm}) + \delta_{cegm} \beta_{cegm})}}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

При $\delta_{cegm} \rightarrow 0$ и $\delta_{cegm} \rightarrow 1$ ϕ -мера вырождается в неопределенность вида $\frac{0}{0}$, т.е.

ведет себя хуже остальных мер, которые хотя бы в одном из двух случаев остаются определены.

Таким же недостатком обладает сбалансированная точность, определяемая как дополнение до единицы среднего арифметического α_{cegm} и β_{cegm} : при $\delta_{cegm} \rightarrow 0$ вырождается в неопределенность β_{cegm} , при $\delta_{cegm} \rightarrow 1 - \alpha_{cegm}$.

Поведение рассмотренных мер в экстремальных ситуациях не является критичным, когда оценка ведется по большой выборке, в которой всегда имеются хотя бы один пиксель объекта и хотя бы один пиксель фона. В то же время при обучении ИНС функция потерь рассчитывается по результатам обработки отдельных малых фрагментов изображений, в пределах которых с достаточно высокой вероятностью может не оказаться ни одного пикселя искомого объекта или ни одного пикселя фона, даже если в среднем по всем фрагментам соблюдается баланс между выделяемыми классами.

С учетом вышесказанного для применения в качестве функции потерь при обучении ИНС бинарной сегментации потенциально пригоден только показатель общей точности сегментации $a_{сегм}$.

Другим достоинством $a_{сегм}$ является его линейность, позволяющая получить оценку точности сегментации для всей выборки путем простого усреднения оценок, полученных для отдельных фрагментов изображений, составляющих выборку.

Исправить недостатки $a_{сегм}$ на несбалансированных данных, когда для вероятности $\bar{\delta}_{сегм}$ наличия целевого объекта в пределах всей выборки выполняется условие $|\bar{\delta}_{сегм} - 0,5| \gg 0$, можно путем введения поправочных коэффициентов $k_{\alpha_{сегм}}$ и $k_{\beta_{сегм}}$:

$$\hat{a}_{сегм} = 1 - k_{\alpha_{сегм}}(1 - \delta_{сегм})\alpha_{сегм} - k_{\beta_{сегм}}\delta_{сегм}\beta_{сегм}. \quad (5.9)$$

Если назначить $k_{\alpha_{сегм}} = \frac{1}{2(1 - \bar{\delta}_{сегм})}$ и $k_{\beta_{сегм}} = \frac{1}{2\bar{\delta}_{сегм}}$, то значение $\hat{a}_{сегм}$, рассчитанное в среднем по выборке, будет равняться сбалансированной точности. В то же время при расчете в пределах отдельных малых фрагментов, для которых $\delta_{сегм} = 0$ или $\delta_{сегм} = 1$, значение $\hat{a}_{сегм}$ будет определено.

Применительно к задаче сегментации облачности введение коэффициентов $k_{\alpha_{сегм}}$ и $k_{\beta_{сегм}}$ видится нецелесообразным. Ситуация пропуска облачности так же плоха, как ситуация ложного ее обнаружения. В первом случае облачность не отбракуется, что негативно отразится на точности дифференциальной интерферометрической обработки. Во втором случае из-за ложного выделения облачности будет ошибочно проигнорирована полезная информация о смещениях наблюдаемых объектов. Показатель $a_{сегм}$ оценивает суммарное количество ситуаций обоих видов.

5.1.3 Переход от показателя качества сегментации к дифференцируемой функции потерь при машинном обучении. Рассмотренные в предыдущем пункте показатели качества сегментации, в том числе $a_{сегм}$, принимают только дискретные значения, поскольку выражаются через количество пикселей, являющееся целочисленной величиной. Из-за этого значения показателей качества при коррекции весовых коэффициентов ИНС изменяются скачкообразно, что затрудняет обучение ИНС методами градиентного спуска.

Указанная особенность привела к тому, что в качестве функции потерь при обучении ИНС в задаче сегментации в основном используется бинарная перекрестная энтропия:

$$H_{\text{сегм}} = - \frac{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} E_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm}) \log_2 C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})}{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} 1} - \frac{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} (1 - E_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})) \log_2 (1 - C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm}))}{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} 1}. \quad (5.10)$$

Основным достоинством такой функции потерь является ее дифференцируемость, что позволяет обучать ИНС методами на основе градиентного спуска. Однако при $C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})=0$ или $C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})=1$ из-за операции логарифмирования бинарная перекрестная энтропия устремляется в бесконечность. Поэтому растровые маски $C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})$, получаемые в результате машинного обучения с данной функцией потерь, содержат лишь промежуточные значения $0 < C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm}) < 1$, т.е. обученная ИНС не принимает однозначное решение, соответствует данный пиксель искомому объекту или нет. Требуется дополнительный поиск некоторого порога бинаризации маски $C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})$. Кроме того, поскольку для оценки качества сегментации используются совершенно другие показатели, рассмотренные ранее, целесообразно при машинном обучении применять функцию потерь, максимально близкую к этим показателям.

Покажем, как представить дискретный показатель $a_{\text{сегм}}$ в виде частного случая дифференцируемой функции и сделать его пригодным для использования в качестве функции потерь при обучении ИНС.

Пусть $C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})$ может быть только нулем или единицей, для эталонного результата $E_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})$ это справедливо по определению, тогда число верно сегментированных пикселей объекта можно записать как $\sum_{m_{onm}, n_{onm}} C_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm}) E_{\text{сегм}}(m_{onm}, n_{onm})$, а число верно сегментированных пикселей

фона – как $\sum_{m_{onm}, n_{onm}} (1 - C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}))(1 - E_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}))$. Таким образом, общая точность сегментации может быть выражена как

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{cegm} = & \frac{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} E_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}) C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm})}{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} 1} + \\ & + \frac{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} (1 - E_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}))(1 - C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}))}{\sum_{m_{onm}, n_{onm}} 1}. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Если $C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm})$ во всех пикселях принимает в качестве значения только нуль или единицу, $\tilde{a}_{cegm} = a_{cegm}$. Если $C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm})$ начинает принимать значения на интервале от нуля до единицы, \tilde{a}_{cegm} дополняет a_{cegm} промежуточными значениями до непрерывной дифференцируемой функции.

Таким образом, величина $1 - \tilde{a}_{cegm}$ может использоваться в качестве функции потерь при обучении ИНС на замену бинарной перекрестной энтропии.

Экспериментальные исследования показали, что при обучении с функцией потерь $1 - \tilde{a}_{cegm}$ ИНС становится выгоднее принимать однозначное решение, к какому из двух классов принадлежит пиксель изображения: к искомому объекту или к фону. В результате $C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm})$ практически не содержит значений на интервале от нуля до единицы, а полученная при обучении оценка \tilde{a}_{cegm} с высокой точностью соответствует целевому показателю качества сегментации a_{cegm} .

При этом отпадает необходимость выбора порога для бинаризации $C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm})$, поскольку маска на выходе ИНС уже практически бинаризована. Для тех редких пикселей, в которых $0 \ll C_{cegm}(m_{onm}, n_{onm}) \ll 1$, может быть выбран произвольный порог бинаризации, например, равный 0,5, поскольку на итоговой точности сегментации он почти не отражается.

Такое поведение ИНС может быть достигнуто следующим образом. Функцией активации выходного слоя ИНС, используемых для бинарной сегментации, как правило, является сигмоида. Для того чтобы сигмоида была близка к нулю, ей на

вход нужно подать большое по модулю отрицательное значение. Чтобы сигмоида была близка к единице, ей на вход должно поступить большое положительное значение. Последний слой ИНС обычно выполняет некоторое линейное преобразование яркости пикселей изображения. Чтобы обеспечить такой выход сигмоиды, он должен за счет больших мультипликативных коэффициентов значительно усилить сигнал. Затем к усиленному сигналу прибавляется некоторый аддитивный коэффициент, в результате чего сигнал оказывается положительным или отрицательным. По сути этот аддитивный коэффициент последнего слоя ИНС и является порогом, по которому бинаризуется результат сегментации. Он вместе с другими весовыми коэффициентами ИНС автоматически подбирается в ходе машинного обучения.

Для сверточных ИНС, которые по сути эквивалентны некоторому нелинейному фильтру конечной апертуры, при расчете потерь нужно учитывать наличие краевых эффектов фильтрации. Для этого либо размеры выхода ИНС должны быть уменьшены по сравнению со входом на апертуру фильтра, либо расчет потерь должен вестись лишь по центральной части выходного изображения. Если вовлекать области краевых эффектов в расчет потерь, ИНС при обучении будет вынуждена уменьшать размер окрестности, которую она анализирует, обнуляя часть своих коэффициентов, чтобы ослабить краевые эффекты. В этом случае архитектура ИНС будет использоваться не полностью, что может негативно отразиться на качестве результата.

5.1.4 Выбор прототипа архитектуры ИНС. На борту экспериментального КА «OPS-SAT» для сегментации облачности применялись две простые архитектуры ИНС. Первый вариант архитектуры включал два сверточных и два полносвязных слоя. Были достигнуты следующие показатели качества: $a_{cegm}=0,68$, $p_{cegm}=0,7$, $r_{cegm}=0,47$, $F_{1cegm}=0,56$. Второй вариант архитектуры включал три сверточных слоя и обеспечил более высокое качество сегментации: $a_{cegm}=0,77$, $p_{cegm}=0,75$, $r_{cegm}=0,7$, $F_{1cegm}=0,72$ [284]. Тем не менее, такое качество сегментации облачности является неприемлемо низким для применения его результатов в задаче дифференциальной интерферометрии.

На борту КА «Phi-Sat-1» применялась несколько более сложная архитектура ИНС, включающая 5 слоев свертки в окне 3×3 , два слоя «MaxPooling», выполняющих прореживание изображения в 2 раза по строкам и столбцам с выбором максимального значения из 2×2 соседних отсчетов, один слой уменьшения шага дискретизации в 2 раза с последующей сверткой в окне 2×2 и 2 слоя обращения свертки в окне 3×3 . Усложнение архитектуры позволило повысить качество сегментации облачности по сравнению с КА «OPS-SAT»: $\alpha_{cegm}=0,113$, $\beta_{cegm}=0,119$, $a_{cegm}=0,884$, $p_{cegm}=0,888$, $r_{cegm}=0,881$, $F_{1cegm}=0,884$ [285]. Однако маска облачности выдалась с шагом дискретизации, увеличенным в 2 раза по сравнению с исходным изображением, в то время как необходима выдача с исходным шагом дискретизации. Кроме того, достигнутые показатели все еще являются недостаточно высокими.

Известны также архитектуры «ResNet» [319] и «YOLO» [320], однако они относят к конкретному классу целиком изображение или его крупный фрагмент, а не строят попиксельную маску детектируемого объекта. Наиболее простая 34-слойная версия «ResNet» при обработке фрагмента изображения 512×512 пикселей требует около 18,8 млрд сложений и примерно столько же умножений.

Наибольшее применение в задаче бинарной сегментации, когда требуется построить попиксельную маску детектированного объекта с шагом дискретизации, соответствующим исходному изображению, получила архитектура «U-Net» [321], представленная на рисунке 5.1.

На рисунке 5.1 используются следующие обозначения: «CXX» – операция «Conv2D» двумерной свертки в окне $X \times X$ пикселей; «MPX» – операция «MaxPooling» с прореживанием изображения в X раз по строкам и столбцам; «USX» – операция «Upscale» уменьшения в X раз шага дискретизации изображения на основе интерполяции; «C» – операция конкатенации сигналов – объединения нескольких изображений одинаковой ширины и высоты в одно изображение с большим числом каналов; «R» – активационная функция «линейный выпрямитель» (англ. – ReLU); «S» – активационная функция сигмоида. Во второй строке надписи для каждого слоя указано число выходных каналов изображения. При вы-

полнении операции «Upscale» в архитектуре «U-Net» используется интерполяция по ближайшему соседу, поэтому за ней следует сверточный слой, выступающий в качестве замены интерполяции более высокого порядка.

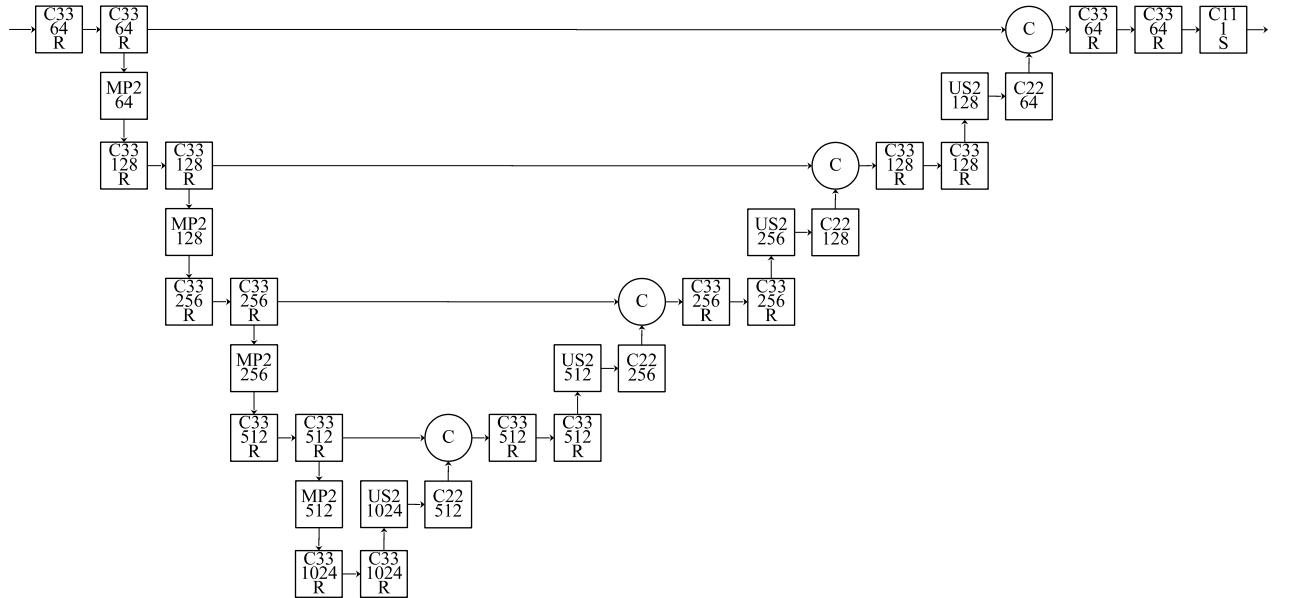


Рисунок 5.1 – Нейросетевая архитектура «U-Net»

Архитектура «U-Net» основана на пирамидальной обработке, позволяющей относительно быстро анализировать большую окрестность пикселя для принятия решения, к какому классу его отнести. Каждый следующий уровень пирамиды формируется путем выполнения двух сверток в окне 3×3 с активационной функцией «линейный выпрямитель» и операции «MaxPooling» с прореживанием изображения в 2 раза по строкам и столбцам. На каждом следующем уровне пирамиды число каналов изображения увеличивается в 2 раза. Пирамида содержит 5 уровней. После достижения верхнего уровня начинается обратный ход. Для возвращения на предыдущий уровень пирамиды применяется операция «Upscale» с интерполяцией по ближайшему соседу. Чтобы компенсировать низкое качество такой интерполяции, далее следует слой свертки в окне 2×2 . Восстановленный более детальный уровень пирамиды при обратном ходе симметрично прямому ходу фильтруется в окне 3×3 двумя сверточными слоями с активационной функцией «линейный выпрямитель» с понижением в 2 раза числа каналов по сравнению с менее детальным уровнем. Графическое представление архитектуры напоминает

букву «U», что определило ее название. Для ускорения обучения ИНС методами стохастического градиентного спуска с обратным распространением ошибки между левой и правой части ИНС введены горизонтальные связи, когда на каждом уровне пирамиды сигнал, полученный при прямом ходе, объединяется при помощи операции конкатенации с сигналом, восстановленным при обратном ходе. По достижении нижнего слоя пирамиды выполняется линейное преобразование яркости изображения с сигмоидой в качестве активационной функции и сокращением числа каналов до одного.

Сеть «U-Net» имеет около 31 млн весовых коэффициентов. Ее можно рассматривать в качестве нелинейного фильтра в окне порядка 200×200 пикселей. Таков размер анализируемой окрестности для каждого пикселя. Обработка фрагмента изображения 512×512 пикселей требует около 218 млрд сложений и примерно столько же умножений. При этом выходное изображение уменьшается в размерах примерно до 300×300 пикселей, чтобы избежать негативного влияния краевых эффектов.

Развитием «U-Net» стала архитектура «Cloud-Net+» [277], разработанная специально для сегментации облачности и представленная на рисунке 5.2. Она также основана на пирамidalной обработке, но высота пирамиды увеличена до 6, на каждом уровне пирамиды выполняется большее число сверток и, наконец, введено огромное количество обходных горизонтальных и вертикальных связей между слоями с целью упрощения обучения такой ИНС.

На рисунке 5.2 используются следующие обозначения: «BR» – комбинация пакетной нормализации и активационной функции «линейный выпрямитель»; «CTX» – операция «Conv2DTranspose» обращения свертки в окне $X \times X$ пикселей с уменьшением шага дискретизации изображения в X раз по строкам и столбцам, «+» – операция суммирования нескольких изображений одного размера. Операция «Upscale» в данной архитектуре выполняется с использованием билинейной интерполяции. Блоки конкатенации с одним входом и числом X во второй строке надписи означают дублирование X раз каждого канала входного изображения.

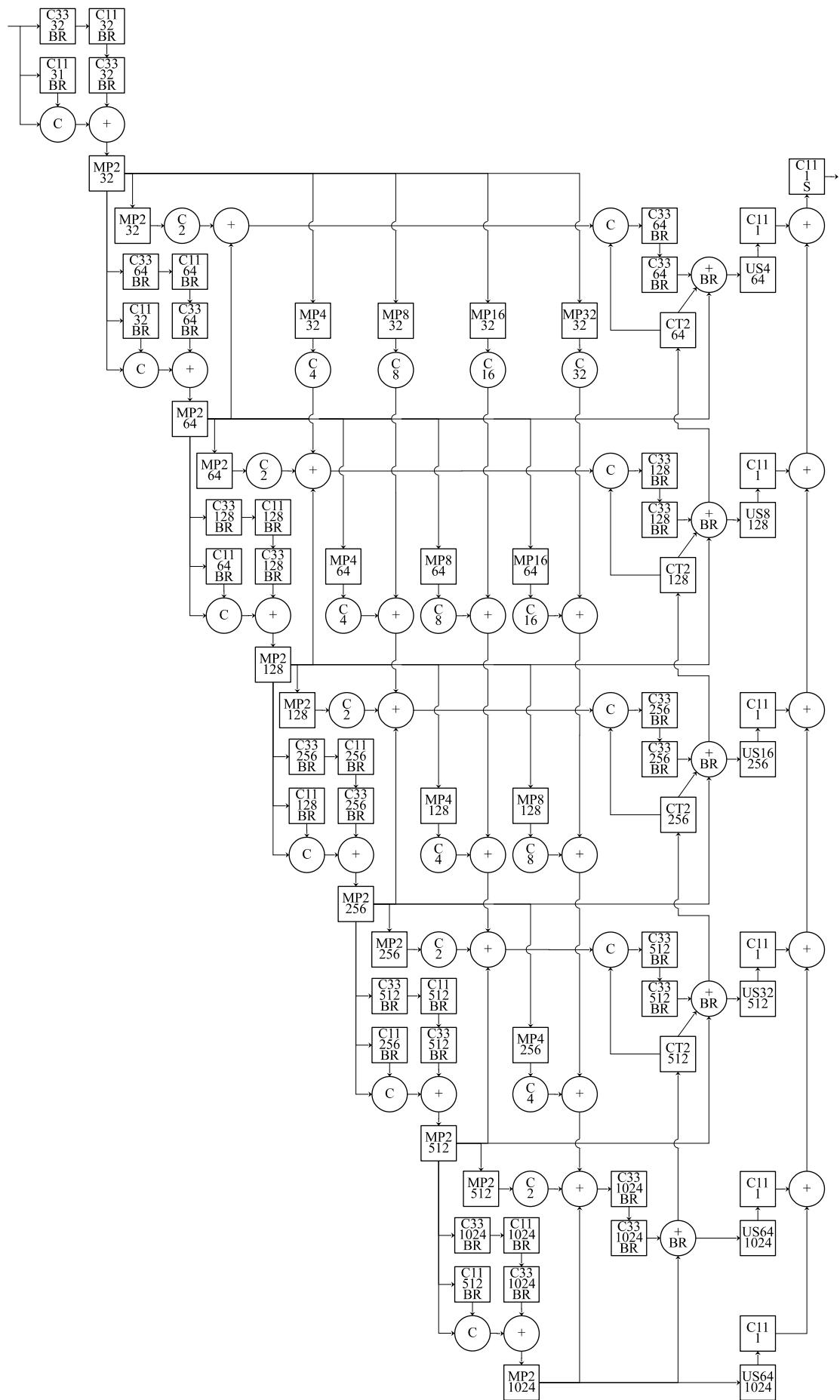


Рисунок 5.2 – Нейросетевая архитектура «Cloud-Net+»

Сеть «Cloud-Net+» имеет около 52 млн весовых коэффициентов, т.е. примерно в 1,7 раза больше, чем «U-Net». Ее можно рассматривать в качестве нелинейного фильтра в окне порядка 400×400 пикселей. Обработка фрагмента изображения 512×512 пикселей требует около 65 млрд умножений и незначительно большего числа сложений, что примерно в 3,4 раза меньше, чем для «U-Net». При этом авторы сети обучали и применяли ее для обработки фрагментов 192×192 пикселя, что с точки зрения цифровой обработки сигналов является недопустимым, поскольку вся площадь выходного кадра попадает в область краевых эффектов фильтрации. Корректным применение такой сети может быть при размерах фрагмента 512×512 и более пикселей. В этом случае область выходного кадра без краевых эффектов будет составлять от $\sim 100 \times 100$ пикселей. Однако, несмотря на сокращение числа арифметических операций по сравнению с «U-Net», множество слоев и связей между ними в сети «Cloud-Net+» требует существенно больших затрат видеопамяти для хранения промежуточных данных. В связи с этим на современном графическом ускорителе с 11–12 Гбайт видеопамяти сетью «Cloud-Net+» может быть обработан лишь одиночный фрагмент размером $\sim 400 \times 400$ пикселей. Обучение же сети требует одновременной обработки пакета из нескольких изображений. В связи с этим максимальный размер фрагмента, для работы с которым можно обучить «Cloud-Net+» на одиночной видеокарте, составляет 256×256 пикселей (3 фрагмента в пакете). При обучении на таком фрагменте ИНС будет искусственно ограничивать пространственные размеры своих сверточных фильтров, обнуляя их крайние коэффициенты. В результате краевые эффекты на результате обработки фрагмента 256×256 пикселей будут малозаметны, но возможности архитектуры ИНС будут использованы далеко не полностью. Полноценное обучение и применение «Cloud-Net+» возможно только на специализированных дорогостоящих серверах, имеющих кластеры из нескольких графических ускорителей.

Таким образом, ИНС «Cloud-Net+» непригодна для применения не только на борту КА, но и на обычных рабочих станциях наземных пунктов обработки спутниковых данных из-за крайне высоких требований к объему видеопамяти. В то же время сеть «U-Net», хотя и отличается большим объемом вычислений, за счет

меньшего числа слоев и связей между ними гораздо менее требовательна к объему видеопамяти. Кроме того, при блочной обработке больших изображений с корректным учетом краевых эффектов преимущество «Cloud-Net+» перед «U-Net» по объему вычислений теряется из-за необходимости выбирать в 2 раза большее перекрытие между блоками, поскольку «Cloud-Net+» анализирует окрестность пикселя в 2 раза большего радиуса, чем «U-Net».

По результатам проведенного анализа известных нейросетевых архитектур в качестве прототипа можно выбрать сеть «U-Net». При этом необходима ее модификация с целью существенного сокращения количества выполняемых арифметических операций и дополнительного уменьшения требуемого объема видеопамяти при сохранении высокого качества сегментации облачности.

5.1.5 Разработка архитектуры ИНС «Lanky U-Net». Рассмотрим архитектуру «U-Net» более подробно и выявим, какие проблемы возникают при обучении такой ИНС сегментации облачности на панхроматических оптических изображениях от космических систем ДЗЗ.

Авторы архитектуры «U-Net» применили ее для сегментации медицинских изображений. В их задаче положительного результата удалось достичь на небольшой обучающей выборке.

В задаче сегментации облачности на панхроматических изображениях обучающую выборку приходится делать больших размеров. Это обусловлено широким разнообразием объектов, которые могут быть представлены на космических снимках. Обучающая выборка должна включать все основные виды объектов, чтобы все из них ИНС научилась отделять от облачности. Кроме того, сама облачность отличается крайне широким разнообразием по форме, структуре, яркости, прозрачности. Одни облака могут находиться в тени других облаков и быть хуже освещенными. Полупрозрачная дымка может располагаться над любыми другими видами объектов.

Машинное обучение сложных многослойных архитектур ИНС на больших обучающих выборках крайне затруднительно, поскольку требует огромного объема вычислений. При большом числе слоев из-за накапливающихся погрешностей алго-

ритма обратного распространения ошибки сходимость машинного обучения крайне низкая. Требуются десятки и сотни тысяч эпох обучения для минимизации целевой функции, а если обучающая выборка большая, то одна эпоха может длиться несколько часов даже на современных графических ускорителях вычислений.

В работе [305] был предложен механизм существенного ускорения обучения многослойных ИНС – пакетная нормализация. В рамках этого механизма в ИНС после промежуточных сверточных слоев добавляются слои нормализации, которые в ходе обучения в пределах пакета рассчитывают среднее значение и дисперсию сигнала, а затем выполняют линейное преобразование сигнала, обнуляя его среднее и делая дисперсию единичной. Коэффициенты линейного преобразования оказываются уникальными для каждого пакета, однако в ходе обучения запоминаются усредненные значения этих коэффициентов, которые используются при штатной работе обученной ИНС, когда уже нет никаких пакетов, а обрабатывается то или иное отдельное изображение.

Классическая архитектура «U-Net» была разработана раньше опубликования пакетной нормализации в [305] и не учитывала возможность ее применения. В тоже время в задаче сегментации облачности без применения пакетной нормализации обучить ИНС за приемлемое время не представляется возможным. В более поздней архитектуре «Cloud-Net+» пакетная нормализация уже применяется. Поэтому целесообразно добавить слои нормализации и в ИНС «U-Net».

Пакетная нормализация позволяет сократить машинное обучение ИНС до нескольких десятков или сотен эпох, однако потери, рассчитываемые в ходе обучения и получаемые в ходе последующего штатного функционирования, разнятся из-за различной работы слоев пакетной нормализации в этих режимах. Поэтому для корректного обучения необходимо в пределах каждой эпохи рассчитывать функцию потерь дважды: один раз в ходе итераций градиентного спуска в режиме обучения и второй раз в конце эпохи в режиме штатной работы для оценки истинного значения потерь.

Другой проблемой машинного обучения ИНС является так называемое переобучение. С точки зрения математики минимизация целевой функции в преде-

лах обучающей выборки не гарантирует, что целевая функция будет принимать малые значения за пределами этой выборки. Поэтому периодически случается, что обученная ИНС хорошо работает в пределах обучающей выборки, но выдает совершенно неприемлемые результаты на других изображениях. Особенно часто это происходит, когда выборка непредставительна (т.е. не охватывает все типовые варианты, которые в дальнейшем могут быть поданы на вход ИНС) или мала по объему. В таких случаях ИНС в своих коэффициентах может просто запомнить таблицу преобразования небольшого количества комбинаций на входе в требуемый выход.

Чтобы избежать переобучения, обычно выделяют две выборки: обучающую и валидационную. Обучающая выборка делится на пакеты, по которым выполняются итерации градиентного спуска, а по окончании эпохи выполняется расчет потерь по валидационной выборке. Т.е. для коррекции весов ИНС используются значения потерь, полученные по обучающей выборке, в т.ч. с применением пакетной нормализации, а минимизируется целевая функция, рассчитанная по валидационной выборке в режиме штатной работы ИНС.

Чтобы пакетная нормализация работала корректно, необходимо выбрать достаточно большой размер пакета и более менее равномерно размешать обучающую выборку, чтобы в каждом пакете на изображениях было представлено как можно больше различных видов объектов. Тогда статистические характеристики сигналов на выходе сверточных слоев в рамках каждого пакета будут достаточно стабильными, и их усредненные значения, которые используются при штатной работе ИНС, будут близкими к ним. В этом случае ИНС обучается быстро и способна достичь малых значений функции потерь как на обучающей, так и на валидационной выборках. Если же размер пакета недостаточно большой, потери на обучающей выборке снижаются достаточно быстро, но в режиме штатной работы на валидационной выборке потери остаются стабильно высокими. Однако размер пакета, который можно выбрать, ограничен объемом видеопамяти графического ускорителя. Нормализация требует одновременного доступа к данным всего пакета изображений для расчета их статистических характеристик. Число слоев нормализации измеряется десятками. Если все данные не будут размещены в быстродействующей памяти,

время обработки одного пакета катастрофически увеличится, что лишит смысла пакетную нормализацию как способ ускорения машинного обучения.

При обучении ИНС «U-Net» в видеопамяти объемом 11 Гбайт можно разместить лишь пакет из 3 фрагментов изображений размером 512×512 пикселей. Это больше, чем для ИНС «Cloud-Net+», но все равно меньше, чем необходимо для корректной работы пакетной нормализации. Проведенное обучение ИНС «U-Net» сегментации облачности на панхроматических изображениях от высокодетальной аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П» показало, что значение функции потерь $1 - \tilde{\alpha}_{cegm}$ в пределах валидационной выборки не опускается ниже 0,0584.

В связи с этим было принято решение в 2 раза сократить число каналов во всех промежуточных слоях ИНС «U-Net», за счет чего в 4 раза сократились количество весовых коэффициентов и число арифметических операций, а размер пакета стало возможным увеличить до 6 фрагментов 512×512 пикселей. В этом случае удалось достичь значения функции потерь $1 - \tilde{\alpha}_{cegm}$ на валидационной выборке, равного 0,0228.

Такая сокращенная версия ИНС является частным случаем полноценной ИНС «U-Net», в которой искусственно обнулены три четверти весовых коэффициентов. Поэтому в 2 раза меньшее значение функции потерь потенциально достижимо и для полноценной «U-Net». Тем не менее, методы стохастического градиентного спуска при ограниченном размере пакета не позволяют настолько хорошо обучить сложную ИНС.

Результаты, полученные для ИНС «U-Net» с уменьшенным в 2 раза числом каналов, обладают достаточной точностью и пригодны для применения на рабочих станциях наземных пунктов обработки спутниковой информации. Однако ИНС всё еще характеризуется большим объемом вычислений, что не позволяет применить ее на борту КА. Поэтому проведем дальнейшее упрощение нейросетевой архитектуры.

Основным достоинством «U-Net» является пирамидальная организация обработки, позволяющая относительно быстро анализировать широкую окрестность

пикселя. Было решено развить идею пирамидальной обработки, увеличив на единицу высоту пирамиды (по аналогии с «Cloud-Net+») и сократив в 2 раза число сверточных слоев на каждом уровне пирамиды. Размер анализируемой окрестности при этом остается таким же, но существенно сокращается число слоев ИНС. Число каналов на каждом уровне пирамиды дополнительно сокращено в 2 раза. На нижнем уровне пирамиды, таким образом, формируется 16 каналов. При этом за счет большей высоты на верхнем уровне пирамиды число каналов оказывается лишь в 2 раза меньше, чем в классической архитектуре «U-Net». Общее количество весовых коэффициентов в слоях составляет 3,8 млн. Для обработки одного фрагмента 512×512 пикселей с помощью модифицированной архитектуры ИНС требуется порядка 10 млрд сложений и умножений, что почти в 22 раза меньше, чем в полноценной архитектуре «U-Net», и в 5,5 раз меньше, чем у ИНС «U-Net» с уменьшенным в 2 раза числом каналов. Такой объем вычислений уже может быть приемлем для бортовой реализации сегментации облачности.

Модифицированная архитектура ИНС представлена на рисунке 5.3. После модификации она напоминает более высокую и более узкую букву «U», поэтому назовем модифицированную архитектуру «Lanky U-Net» (англ. lanky – долговязый). Размер пакета для «Lanky U-Net» удалось увеличить до 13 фрагментов. По результатам машинного обучения «Lanky U-Net» было достигнуто значение функции потерь $1 - \tilde{d}_{\text{seg}}$ на валидационной выборке, равное 0,0224. Таким образом, «Lanky U-Net» в задаче сегментации облачности на панхроматических изображениях аппаратуры «Геотон» космических аппаратов «Ресурс-П» при всей своей простоте обеспечивает даже чуть более высокое качество сегментации, чем архитектура «U-Net» с уменьшенным в 2 раза числом каналов. Это обусловлено сокращением количества слоев, за счет чего упрощается обратное распространение ошибки, и увеличением размера пакета, за счет чего лучше работает пакетная нормализация.

Недостатком пакетной нормализации является небольшое увеличение объема вычислений при штатной работе ИНС из-за затрат на линейное преобразование яркостей изображения после каждого сверточного слоя. Его можно избе-

жать, если размещать слой нормализации не после активационной функции сверточного слоя, а между сверткой и активацией. После обучения сети коэффициенты нормализации можно применить к весовым коэффициентам свертки, выполнив «слияние» двух слоев в один. Такой вариант размещения слоев нормализации применен в «Cloud-Net+» и предлагается в ИНС «Lanky U-Net». Он возможен лишь за счет того, что активационная функция «линейный выпрямитель», выполняемая после сверточных слоев, является кусочно-линейной.

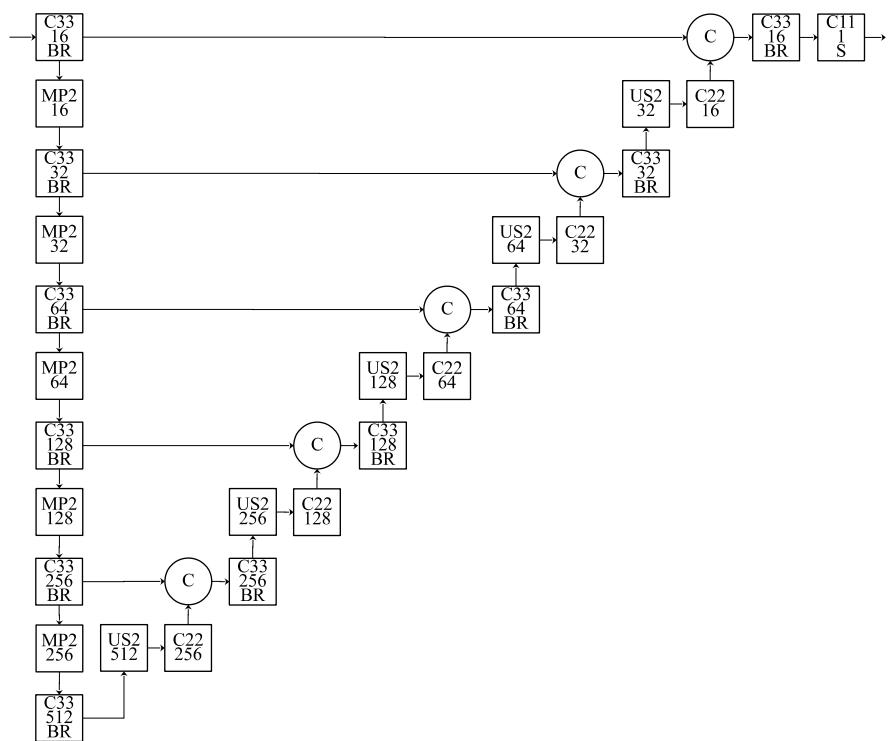


Рисунок 5.3 – Нейросетевая архитектура «Lanky U-Net»

В ИНС «Cloud-Net+» при обратном ходе пирамидальной обработки применяются операция «Conv2DTranspose» и билинейная интерполяция в операции «Upscale». Такие нейросетевые слои неэффективно реализуются на отечественных нейропроцессорах архитектуры «NeuroMatrix» разработки НТЦ «Модуль» [286]. Поэтому в ИНС «Lanky U-Net» оставлены операции «Upscale» с интерполяцией по ближайшему соседу и последующей сверткой в окне 2×2 , как это было в ИНС «U-Net».

5.1.6 Выбор уровня предварительной радиометрической обработки входных данных ИНС. Перед выполнением нейросетевой сегментации облачно-

сти оптические изображения должны быть подвержены радиометрической обработке. Можно выделить 3 уровня такой обработки:

- 1) относительную радиометрическую коррекцию, устраняющую вариации чувствительности отдельных фотоэлементов, после выполнения которой сигнал во всех пикселях изображения может быть единообразно линейно преобразован в спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ), зарегистрированную на входном зрачке оптической системы;
- 2) абсолютную радиометрическую коррекцию, после выполнения которой сигнал во всех пикселях изображения оказывается представлен в единицах СПЭЯ;
- 3) радиометрическую нормализацию с учетом освещенности, после выполнения которой сигнал во всех пикселях изображения оказывается представлен в виде коэффициентов спектральной яркости (КСЯ): отношений зарегистрированных СПЭЯ к СПЭЯ идеально отражающих ламбертовых поверхностей, находящихся в тех же условиях освещения, что и наблюдаемые объекты.

Первый уровень радиометрической обработки обязательно должен быть выполнен, поскольку вертикальная полосатость, характерная для необработанных изображений от скановых датчиков, искажает текстуру наблюдаемых объектов и затрудняет сегментацию. Относительная радиометрическая коррекция является вычислительно простой и может быть выполнена на борту КА. Это позволит не только осуществлять бортовую сегментацию облачности, но и более эффективно сжимать полученные изображения перед передачей на Землю, как это было рассмотрено в параграфе 2.2. Для выполнения такой коррекции необходимо передать на борт значения чувствительности всех фотоэлементов, полученные в результате наземной радиометрической калибровки по результатам съемки однородных объектов.

Поскольку чувствительности фотоэлементов обычно близки, относительная радиометрическая коррекция лишь в малой степени изменяет исходные коды яркости пикселей.

Оптические съемочные устройства могут снимать с различным коэффициентом усиления в зависимости от ожидаемых энергетических характеристик участка земной поверхности. В скановых датчиках это обычно достигается на

основе приборов с зарядовой связью в виде матриц из нескольких строк, реализующих режим временной задержки и накопления. Максимальный коэффициент усиления получается при использовании для накопления заряда всех строк матрицы. Если нужно меньшее усиление, используется только часть строк.

Если два изображения сняты с разным числом строк накопления, то один и тот же код яркости на них будет соответствовать совершенно разным значениям СПЭЯ, и наоборот, один и тот же объект будет выглядеть на изображении светлее или темнее в зависимости от числа строк накопления, использованного при съемке. Это затруднит обнаружение такого объекта.

Данная проблема решается при абсолютной радиометрической коррекции, которая учитывает число строк накопления и скорость бега изображения и осуществляет пересчет кодов яркости пикселей в единицы СПЭЯ, зарегистрированной на входном зрачке съемочной аппаратуры КА. Однако не всегда абсолютная радиометрическая коррекция может быть правильно выполнена. Отечественная съемочная аппаратура зачастую обладает относительно низким динамическим диапазоном, из-за чего сверхъяркие объекты получают код яркости, близкий к максимальному, наряду с менее яркими объектами. Для таких засвеченных объектов оценка СПЭЯ получается сильно заниженной. При этом после абсолютной коррекции теряется информация о том, что объект был засвечен: если на исходном изображении он имел код яркости, близкий к максимальному, то после коррекции он имеет некоторое значение СПЭЯ, которое может быть вполне допустимо при меньших коэффициентах усиления. Основной проблемой сегментации облачности является тот факт, что облако – это сверхъяркий объект, который не ожидают увидеть при планировании съемки и выборе числа строк накопления. Значительная доля облаков получается засвеченной, и для нее рассчитываются заниженные значения СПЭЯ.

Третий уровень радиометрической обработки позволяет устраниить вариации освещенности наблюдаемых объектов. Оптическая съемка является пассивной, и регистрируемые значения СПЭЯ определяются тем, как освещен Солнцем наблюдаемый объект. С учетом времени съемки и геодезических координат наблюдаемого объекта вычисляется зенитный угол Солнца. Далее либо предполагается, что

поверхность наблюдаемого объекта горизонтальная, либо привлекается опорная ЦМВ для определения угла наклона поверхности. В результате зенитный угол пересчитывается в угол падения солнечного излучения на поверхность объекта. Интегрируется спектральная кривая солнечного излучения на верхней границе земной атмосферы, умноженная на кривую спектральной чувствительности датчика. Результат интегрирования умножается на косинус угла падения и делится на π радиан – ширину диапазона возможных углов диффузного отражения. Таким образом рассчитывается эталонная СПЭЯ идеального отражателя, на которую нормируется зарегистрированная СПЭЯ с получением КСЯ.

Здесь также возникает проблема. Наклон поверхности, описывающей верхнюю границу облака, неизвестен. Горизонтальной обычно является только нижняя граница облака, которую мы наблюдаем с Земли. Она соответствует точке росы. Верхняя же граница, как правило, имеет некий рельеф. Особенно ярко он выражен для кучевых облаков (рисунок 5.4), но даже для слоистых облаков, наблюдаемых с Земли как сплошное серое небо, рельеф верхней границы имеет место. Это иллюстрирует рисунок 5.5. Видно, что даже при большом зенитном угле Солнца часть склонов верхней границы слоистых облаков оказывается хорошо освещена.



Рисунок 5.4 – Кучевые облака, вид сбоку: плоская нижняя граница и ярко выраженный рельеф верхней границы

Таким образом, КСЯ для целевого объекта сегментации – облачности – не может быть правильно рассчитан. Корректные КСЯ получаются только для наземных объектов, наклон поверхности которых описывается опорной ЦМВ.

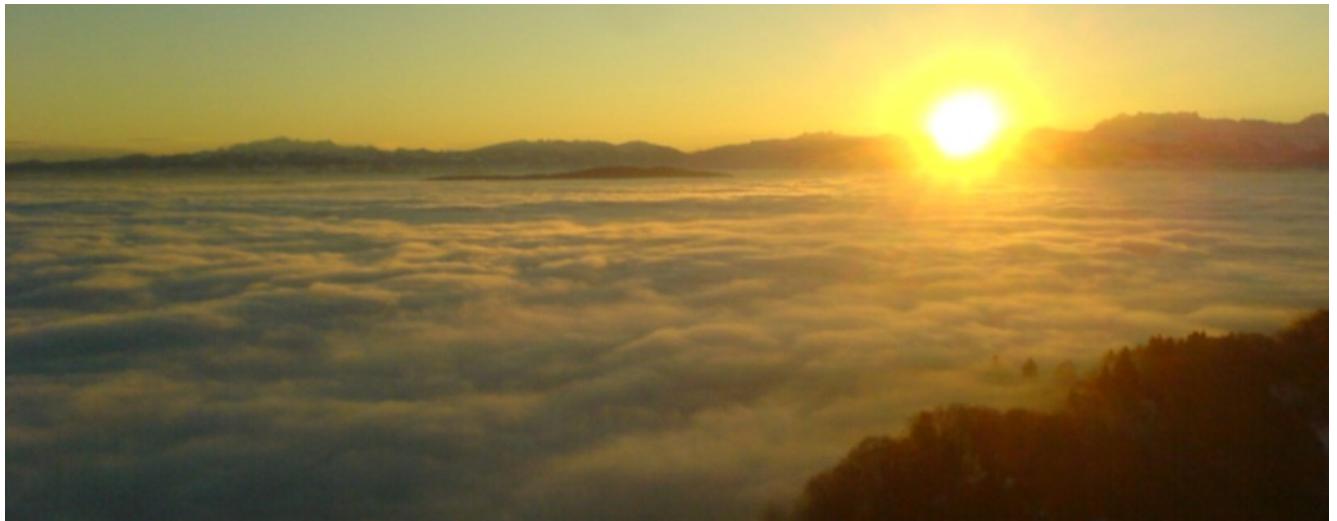


Рисунок 5.5 – Слоистые облака в горной местности, вид с возвышенности

По результатам выполненного анализа можно сделать следующий вывод. Ни один из уровней радиометрической обработки исходных изображений нельзя однозначно выделить как предпочтительный в задаче сегментации облачности. Яркость облаков на результате относительной коррекции зависит от угла Солнца и коэффициента усиления датчика. Абсолютная коррекция выполняется неправильно для засвеченной яркой облачности. Нормализация с учетом угла Солнца не может быть выполнена для облачности из-за неизвестного рельефа верхней границы.

Это также подтверждают проведенные эксперименты по обучению ИНС. Результаты обучения «Lanky U-Net», приведенные в предыдущем пункте, получены для изображений, нормализованных с расчетом КСЯ. Если нормализованные изображения заменить на прошедшие относительную коррекцию, то при обучении достигается значение функции потерь на валидационной выборке $1 - \tilde{\alpha}_{segm} = 0,0199$. Если же использовать результаты абсолютной радиометрической коррекции, выраженные в единицах СПЭЯ, то $1 - \tilde{\alpha}_{segm} = 0,0226$.

Видно, что во всех трех случаях получаются близкие значения ошибок сегментации. При этом несколько лучшие результаты получаются по первому уровню радиометрической обработки, когда по значению кода яркости ИНС может понять, что объект был засвечен. Визуальный анализ результатов сегментации показал, что при использовании второго и третьего уровней плохо выделяются засвеченные

облака, но достаточно неплохо отделяются от облачности другие яркие объекты: пески, снега, крыши зданий. При сегментации по первому уровню засвеченные облака почти не пропускаются, зато существенно учащаются случаи ложного распознавания в качестве облачности других ярких объектов.

Если аналитическая модель радиометрической обработки не позволяет корректно нормализовать яркость облачности, можно поручить эту задачу искусственно интеллекту, подав на вход ИНС результаты сразу нескольких уровней радиометрической обработки. По уровню 1 ИНС может детектировать засвеченные объекты, а по уровням 2 и 3 – увидеть СПЭЯ незасвеченных объектов и КСЯ объектов с известным наклоном ламбертовой поверхности. В результате ИНС сможет сама выбрать, на какие данные ей стоит опираться при принятии решения, принадлежит заданный пиксель облачности или нет.

Были проведены эксперименты по обучению ИНС «Lanky U-Net» со следующими вариантами входных данных:

- 1) уровни 1 и 2 радиометрической обработки (2 канала);
- 2) уровни 1 и 3 радиометрической обработки (2 канала);
- 3) уровни 1, 2 и 3 радиометрической обработки (3 канала).

В первом случае на валидационной выборке достигнуто значение $1 - \tilde{a}_{segm} = 0,0181$, во втором случае $1 - \tilde{a}_{segm} = 0,0189$, в третьем случае $1 - \tilde{a}_{segm} = 0,0170$. Видно, что результаты сегментации улучшились во всех случаях. Наибольший выигрыш наблюдается при использовании всех трех уровней обработки. Поэтому наземная реализация сегментации облачности должна быть реализована в таком варианте. Однако на борту КА корректно получить третий уровень радиометрической обработки весьма затруднительно, поскольку для этого требуется опорная ЦМВ на весь мир, занимающая большой объем памяти. В связи с этим бортовая сегментация облачности может выполняться с использованием только уровней 1 и 2 радиометрической обработки, которые вполне могут быть реализованы на борту КА. Приведенные выше результаты экспериментов показали, что качество сегментации при этом деградирует незначительно.

5.1.7 Организация блочной нейросетевой обработки изображений при сегментации облачности. Предложенная ИНС «Lanky U-Net» позволяет выполнить обработку фрагмента изображения размером 512×512 пикселей. Размер спутниковых снимков гораздо больше, поэтому необходима организация блочной нейросетевой обработки с обеспечением гарантированного отсутствия блочных артефактов – нестыковок масок облачности на границах соседних блоков.

Для сверточных слоев отсутствие блочных артефактов можно обеспечить выбором перекрытия соседних фрагментов не менее чем на апертуру сверточного фильтра, поскольку результаты свертки инвариантны к любому сдвигу на целое число пикселей. Однако в ИНС «Lanky U-Net» присутствуют также слои «Max-Pooling», результаты которых инвариантны только к сдвигу на целое число апертур слоя. Поскольку слои «MaxPooling» размещены в пирамиде, нужно учесть апертуру слоя на верхнем уровне в пересчете на нижний уровень. Она составляет 32 пикселя. Таким образом, перекрытие соседних блоков должно быть не меньше диаметра окрестности пикселя, анализируемой ИНС, и кратно 32. Данным условиям удовлетворяет перекрытие в 256 пикселей.

Таким образом, блочная нейросетевая обработка оптического спутникового изображения с целью сегментации облачности сводится к следующим шагам.

Шаг 1. Загружаются результаты относительной радиометрической калибровки датчика – поправочные аддитивные и мультипликативные коэффициенты для каждого фотоэлемента.

Шаг 2. С учетом числа строк накопления, скорости бега изображения и ширины регистрируемого диапазона длин волн рассчитываются мультипликативный и аддитивный коэффициенты пересчета кода яркости пикселя в единицы СПЭЯ.

Шаг 3. Опционально рассчитываются углы падения солнечного излучения на поверхность наблюдаемых объектов с использованием опорной ЦМВ.

Шаг 4. Изображение со всех краев зеркально дополняется на 256 пикселей. Зеркалирование необходимо для сохранения текстуры объектов.

Шаг 5. Дополненное изображение делится на блоки размером 512×512 пикселей с перекрытием в 256 пикселей по строкам и столбцам.

Шаг 6. В каждом блоке сигнал изображения подвергается относительной и абсолютной радиометрическим коррекциям на основе коэффициентов, полученных на шагах 1 и 2. Опционально может быть выполнена радиометрическая нормализация на основе данных, рассчитанных на шаге 3. Из полученных результатов радиометрической обработки формируется двух- или трехканальный фрагмент изображения.

Шаг 7. Каждый сформированный фрагмент подается на вход ИНС.

Шаг 8. С выхода ИНС забирается центральная часть обработанного фрагмента размером 256×256 пикселей.

Шаг 9. Полученные результаты обработки каждого блока стыкуются друг с другом без перекрытия с получением итоговой маски облачности.

Шаг 10. Полученная маска содержит в основном оклонулевые и околоединичные значения в формате с плавающей точкой. Для экономии памяти она может быть бинаризована. Как упоминалось ранее, порог бинаризации практически не влияет на результат. В качестве такого порога можно выбрать значение 0,5.

Маска облачности, сформированная в соответствии с описанным алгоритмом, может быть применена при дифференциальной интерферометрии, как это было рассмотрено в пункте 5.1.1.

В рамках текущего параграфа были представлены оценки качества предложенного алгоритма сегментации облачности в пределах валидационной выборки, достигнутые в результате обучения ИНС. В главе 6 приводятся результаты более подробных экспериментальных исследований в сравнении с известными нейросетевыми архитектурами на тестовой выборке существенно большего объема.

5.2 АЛГОРИТМ ОБЪЕДИНЕНИЯ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ И ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ КАРТ

5.2.1 Постановка задачи объединения. Если интерферометрическая ЦМВ получена не в соответствии с методом, предложенным в главе 4, а по классической

технологии без полноценного привлечения стереофотограмметрических данных, ее качество можно повысить путем объединения, если имеется близкая по точности и детальности стереофотограмметрическая ЦММ.

Это актуально в первую очередь тогда, когда интерферометрическая ЦМВ представлена зарубежной системой ДЗЗ и нет доступа к исходной интерферометрической паре изображений для ее более точной обработки. В настоящее время примером такой ЦМВ является Copernicus DEM GLO-30 [313], сформированная по данным немецких радиолокационных КА «TerraSAR-X» и «TanDEM-X» и выложенная в открытый доступ Европейским космическим агентством с загрублением пространственного разрешения до ~30 м.

Ближайшим стереофотограмметрическим аналогом GLO-30 является ЦММ Alos World 3D 30 [315], рассмотренная в параграфе 4.1. В среднем вертикальная точность GLO-30 примерно в 2 раза выше, чем у Alos World 3D 30, однако на отдельных участках земной поверхности у GLO-30 проявляются недостатки, типичные для интерферометрических ЦМВ и рассмотренные в пункте 1.1.6. И если в горной местности проблемы интерферометрии могут быть уравновешены более высокой средней точностью ЦМВ, то в районах высотной городской застройки ошибки интерферометрии, не учитывающей стереофотограмметрическую информацию, настолько велики, что в них стереофотограмметрическая ЦММ однозначно точнее.

По сути стереофотограмметрические ЦМВ являются истинными ЦММ, а интерферометрические ЦМВ выступают неким промежуточным звеном между ЦММ и ЦМР, поскольку из-за высокой проникающей способности радиоволн и ошибок развертывания фазы высоты искусственных объектов на них оказываются существенно заниженными.

Если же необходимо получить ЦММ максимально высокого качества, то в районах городской застройки необходимо взять стереофотограмметрические данные, а в остальных районах – интерферометрические.

Отличить искусственные высотные объекты, расположенные на земной поверхности, от перепадов высот рельефа – крайне сложная задача. В то же время с развитием картографических сервисов в настоящее время доступна априорная ин-

формация о расположении таких объектов в виде электронных карт, примером которых являются OpenStreetMap [322].

Таким образом, объединение стереофотограмметрических и интерферометрических ЦММ заключается в выявлении искусственных высотных объектов по электронным картам и заполнении участков на интерферометрической ЦМВ с такими объектами стереофотограмметрическими данными с обеспечением бесшовной стыковки.

5.2.2 Построение маски искусственных высотных объектов. В качестве искусственных высотных объектов, расположенных на земной поверхности, могут быть приняты следующие объекты электронных карт: здания, резервуары для хранения, накопительные баки, мосты, эстакады, развязки дорог, башни, вышки, мачты, столбы, дымовые трубы, маяки, буровые платформы, насыпи.

Каждый из перечисленных объектов описывается в векторном виде как многоугольник, линия или точка. Для использования картографических данных при объединении ЦММ необходимо преобразовать их к растровому виду – бинарной маске $O_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ в системе координат $(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ результата объединения ЦММ. Нулевое значение маски $O_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ соответствует отсутствию искусственных высотных объектов в пределах пикселя маски, а единичное значение – наличию хотя бы одного такого объекта.

Сформированная бинарная маска требует дополнительного уточнения. Во-первых, границы объектов на векторных картах и стереофотограмметрической ЦММ могут совпадать неточно. Во-вторых, на электронные карты могут быть нанесены не все объекты. В-третьих, из-за недостаточно высокой детальности стереофотограмметрической ЦММ близко расположенные высотные объекты могут слиться на ней в один объект.

Предлагается следующая процедура построения уточненной бинарной маски $O_{ЦММ_{ут}}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ искусственных высотных объектов.

Если $O_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=1$, $O_{ЦММ_{ут}}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=1$.

В окрестности радиуса $r_{\text{ЦММ}}$ каждого нулевого пикселя маски $O_{\text{ЦММ}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})$ выполняется классификация пикселей на пиксели рельефа и пиксели наземных объектов.

Множество пикселей рельефа задается как

$$\Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \left\{ (\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}); \tilde{m}_{\text{ЦММ}} - m_{\text{ЦММ}} \in [-r_{\text{ЦММ}}, r_{\text{ЦММ}}] \right. \\ \left. \text{и } \tilde{n}_{\text{ЦММ}} - n_{\text{ЦММ}} \in [-r_{\text{ЦММ}}, r_{\text{ЦММ}}] \text{ и } \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 O_{\text{ЦММ}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}} + k, \tilde{n}_{\text{ЦММ}} + l) = 0 \right\}. \quad (5.12)$$

Множество пикселей наземных объектов определяется как

$$\Omega_{o\bar{o}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \left\{ (\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}); \tilde{m}_{\text{ЦММ}} - m_{\text{ЦММ}} \in [-r_{\text{ЦММ}}, r_{\text{ЦММ}}] \right. \\ \left. \text{и } \tilde{n}_{\text{ЦММ}} - n_{\text{ЦММ}} \in [-r_{\text{ЦММ}}, r_{\text{ЦММ}}] \text{ и } \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 O_{\text{ЦММ}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}} + k, \tilde{n}_{\text{ЦММ}} + l) > 0 \right\}. \quad (5.13)$$

Если $\Omega_{o\bar{o}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \emptyset$, то $O_{\text{ЦММ}ym}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = 0$.

Если $|\Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})| < \theta_{\text{ЦММ}p}$, где $\theta_{\text{ЦММ}p}$ – некоторый положительный порог, то $O_{\text{ЦММ}ym}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = 1$.

В противном случае вычисляются следующие величины:

$$\Delta h_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \\ = \left| \frac{\sum_{(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) \in \Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})} h_{\text{стерео}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}})}{|\Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})|} - h_{\text{стерео}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) \right|, \quad (5.14)$$

$$\Delta h_{o\bar{o}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \\ = \left| \frac{\sum_{(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) \in \Omega_{o\bar{o}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})} h_{\text{стерео}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}})}{|\Omega_{o\bar{o}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})|} - h_{\text{стерео}}(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) \right|, \quad (5.15)$$

$$\Delta \bar{h}_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}}) = \\ = \left| \frac{1}{|\Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})|} \sum_{(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) \in \Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})} h_{\text{стерео}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) - \right. \\ \left. - \frac{1}{|\Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})|} \sum_{(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) \in \Omega_p(m_{\text{ЦММ}}, n_{\text{ЦММ}})} h_{\text{интерф}}(\tilde{m}_{\text{ЦММ}}, \tilde{n}_{\text{ЦММ}}) \right|, \quad (5.16)$$

$$\Delta \bar{h}_{ob}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = \\ = \left| \frac{1}{|\Omega_{ob}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})|} \sum_{(\tilde{m}_{ЦММ}, \tilde{n}_{ЦММ}) \in \Omega_{ob}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})} h_{стерео}(\tilde{m}_{ЦММ}, \tilde{n}_{ЦММ}) - \right. \\ \left. - \frac{1}{|\Omega_{об}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})|} \sum_{(\tilde{m}_{ЦММ}, \tilde{n}_{ЦММ}) \in \Omega_{об}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})} h_{интерф}(\tilde{m}_{ЦММ}, \tilde{n}_{ЦММ}) \right|, \quad (5.17)$$

$$\Delta h_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = |h_{стерео}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) - h_{интерф}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})|, \quad (5.18)$$

где $h_{стерео}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ и $h_{интерф}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ – высоты на стереофотограмметрической и интерферометрической ЦММ, представленных в системе координат результата объединения.

Если $\Delta h_p(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) > \theta_{\Delta h_p}$ или $\Delta h_{ob}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) < \Delta h_p(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ или $\Delta h_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) > \Delta \bar{h}_p(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) + \theta_{\Delta \bar{h}_p}$ или $\Delta \bar{h}_{ob}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) > \Delta \bar{h}_p(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) + \theta_{\Delta \bar{h}_{ob}}$, где $\theta_{\Delta h_p}$, $\theta_{\Delta \bar{h}_p}$ и $\theta_{\Delta \bar{h}_{ob}}$ – некоторые пороги, то $O_{ЦММ_{ум}}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = 1$. В противном случае $O_{ЦММ_{ум}}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = 0$.

Указанная процедура коррекции маски может быть выполнена в несколько итераций. Число итераций, размеры окрестности и значения порогов подбираются эмпирическим путем так, чтобы единичные пиксели скорректированной маски покрыли большую часть высотных объектов, представленных в городских районах на стереофотограмметрической ЦММ.

5.2.3 Геометрическое совмещение объединяемых ЦММ. Объединяемые интерферометрическая и стереофотограмметрическая ЦММ могут быть представлены в разных системах координат: $(m_{интерф}, n_{интерф})$ и $(m_{стерео}, n_{стерео})$ соответственно. В этом случае перед объединением требуется геометрическое совмещение ЦММ.

При совмещении необходимо определить, какая из ЦММ останется в исходной системе координат, а какая будет трансформироваться. Поскольку трансформация требует интерполяции высот, этот выбор обусловлен минимизацией искажений, возникающих при интерполяции. От интерферометрической ЦММ при объединении берутся данные по рельефу, который в преобладающем большинстве случаев обладает гладким характером. От стереофотограмметрической ЦММ при объединении берутся данные по искусственным высотным объектам, для которых характерны резкие

границы, где из-за нарушения теоремы Котельникова при интерполяции будут наблюдаться артефакты. Следовательно, система координат результата объединения $(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ совпадает с $(m_{стерео}, n_{стерео})$, а интерферометрическая ЦММ $h_{интерф}(m_{интерф}, n_{интерф})$ трансформируется в систему координат $(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$.

В качестве интерполятора при геометрическом преобразовании ЦММ может быть выбран двумерный фильтр Ланцоша в окне 4×4 как компромисс между точностью восстановления высоты на гладких участках рельефа и амплитудой выбросов в редких случаях, когда для высот рельефа нарушается теорема Котельникова.

5.2.4 Алгоритм объединения геометрически совмещенных ЦММ с учетом уточненной маски искусственных высотных объектов. При объединении участки на интерферометрической ЦММ, соответствующие пикселям с $O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=1$, заполняются данными стереофотограмметрической ЦММ с обеспечением бесшовнойстыковки на границах участков.

Стыковка обеспечивается с использованием корректирующей поверхности $h_{корр}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$ по аналогии с пунктом 4.1.4.

При $O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=0$:

$$h_{корр}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = h_{интерф}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) - h_{стерео}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}), \quad (5.19)$$

а при $O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=1$:

$$\begin{aligned} h_{корр}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) &= \\ &= \frac{\sum_{k,l} (h_{интерф}(k, l) - h_{стерео}(k, l)) \bar{O}(k, l) ((k - m_{ЦММ})^2 + (l - n_{ЦММ})^2)^{-\frac{p_{обр}}{2}}}{\sum_{k,l} \bar{O}(k, l) ((k - m_{ЦММ})^2 + (l - n_{ЦММ})^2)^{-\frac{p_{обр}}{2}} + \varepsilon_{обр}}, \end{aligned} \quad (5.20)$$

где $\bar{O}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) = 1 - O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})$.

Сигнал результата объединения формируется как

$$\begin{aligned} h_{ЦММ}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) &= \\ &= \begin{cases} h_{интерф}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}), & O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=0, \\ h_{стерео}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}) + h_{корр}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ}), & O_{ЦММ,ym}(m_{ЦММ}, n_{ЦММ})=1. \end{cases} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Экспериментальные исследования эффективности предложенного алгоритма приведены в главе 6.

5.3 АЛГОРИТМ ОБЪЕДИНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

5.3.1 Геометрическое совмещение объединяемых радиолокационного и оптического изображений. Перед выполнением объединения изображений от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли необходимо эти изображения геометрически совместить с пиксельной точностью. Возможно несколько вариантов такого совмещения.

Во-первых, для сбойных ситуаций, когда измерительная информация в радиолокационной системе ДЗЗ не обладает необходимой точностью, в параграфе 3.1 предложен алгоритм совмещения радиолокационного изображения с высокоточно привязанным оптическим снимком. Если этот же снимок используется при объединении, то для совмещения с ним достаточно трансформировать в ту же систему координат радиолокационное изображение, параметры строгой модели привязки которого были уточнены в результате работы алгоритма, как это было рассмотрено в пункте 3.1.6.

Во-вторых, типичной является ситуация, когда геодезическая привязка радиолокационного изображения точнее, чем у объединяемого с ним оптического снимка. В такой ситуации также возможно корреляционно-экстремальное совмещение изображений, но алгоритм, предложенный в параграфе 3.1, требует нескольких модификаций.

Первая модификация – совмещаются изображения, трансформированные в картографическую систему координат. Если привязка радиолокационного изображения по измерительной информации достаточно точна, то высоты, извлекаемые из опорной ЦМВ при ортотрансформировании, корректно сопоставляются объектам, представленным на изображении. При ортотрансформировании менее точно привязанного оптического снимка такое сопоставление становится менее точным,

но если съемка ведется в направлении, близком к надиру, ошибки сопоставления приводят к пренебрежимо малым внутрикадровым искажениям ортотрансформированного оптического снимка. В связи с этим можно считать, что геометрические рассогласования ортотрансформированных изображений будут адекватно описываться полиномом малой степени, аналогичным (3.1).

Вторая модификация – на основе построенной полиномиальной модели геометрических рассогласований изображений могут не рассчитываться поправки к строгой модели привязки снимков. Вместо этого выполняется лишь дополнительное трансформирование оптического снимка в соответствии с построенной полиномиальной моделью. В результате ортотрансформированное радиолокационное и дополнительно трансформированное оптическое изображения должны оказаться совмещенными с пиксельной точностью и пригодны для дальнейшего объединения.

5.3.2 Сравнительный анализ представления объектов на радиолокационном и оптическом изображениях. Помимо наличия спекл-шума и разного характера затенений и внутрикадровых искажений, обусловленных перепадами высот наблюдаемых объектов и рассмотренных в главе 1, можно выделить следующие особенности представления объектов на радиолокационном и оптическом изображениях.

Плоские площадные объекты представляются на радиолокационном и оптическом изображениях достаточно похожим образом. Их средние яркости могут быть разными, но они достаточно хорошо различимы и на радиолокационном, и на оптическом снимках. При этом для дешифровщика, привыкшего наблюдать мир в видимом диапазоне, предпочтительны оптические изображения таких объектов.

Объекты малой площади, характеризующиеся перепадами высоты, материалом с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости и/или наличием прямых углов, представляются на радиолокационном и оптическом изображениях совершенно по-разному. На оптическом снимке такие объекты либо вообще неразличимы, либо могут быть видны только их тени при пологих углах солнечного освещения. На радиолокационном же изображении данные объекты представляются в виде пятен малой площади, яркость которых существенно выше, чем у окружа-

ющего фона. К объектам рассмотренного типа можно отнести столбы, заборы, дорожные ограждения, военную технику, самолеты, корабли, катера, лодки и т.д.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. За счет возможности на-дирной съемки площадные высотные объекты лучше представляются на оптическом изображении. За счет съемки в привычном для человека диапазоне длин волн и отсутствия спекл-шума для плоских площадных объектов также предпочтительны оптические изображения. Объекты малой площади с перепадами высот, прямыми углами или высокой диэлектрической проницаемостью лучше различимы на радиолокационном изображении.

5.3.3 Выделение важных объектов и объединение радиолокационного и оптического изображений. Чтобы не путать яркие объекты малой площади с выбросами спекл-шума, целесообразно провести адаптивную фильтрацию радиолокационного изображения перед объединением.

Известно множество фильтров адаптивного подавления спекл-шума: классический и улучшенный фильтры Ли [323], классический и улучшенный фильтры Фроста [324], гамма-фильтр [325] и др.

На изображении, прошедшем фильтрацию спекл-шума, малые яркие объекты признаются важными и переносятся на оптическую подложку.

Для выявления важных объектов сигнал радиолокационного изображения делится на высокочастотную и низкочастотную составляющие. Первый алгоритм объединения изображений на основе выделения таких составляющих был предложен в [301], но он был рассчитан на оптические снимки. В предлагаемом же алгоритме объект, представленный на радиолокационном изображении, признается важным, если для него высокочастотная составляющая сигнала в несколько раз превосходит низкочастотную. При этом, в отличие от [301], на результат объединения переносится только высокочастотная составляющая, поскольку площадные объекты лучше представлены на оптическом изображении.

Низкочастотная составляющая (НЧ) сигнала изображения может быть вычислительно эффективно найдена с помощью фильтра скользящего среднего, который асимптотически сводится к двум сложениям и двум вычитаниям на пик-

сель. Высокочастотная составляющая (ВЧ) дополняет низкочастотную до полного сигнала.

Результат объединения $\mathbf{s}_{объед}(m_\kappa, n_\kappa)$ фильтрованного радиолокационного изображения $s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)$ и геометрически совмещенного с ним оптического изображения $\mathbf{s}_{онм}(m_\kappa, n_\kappa)$ может быть вычислен как

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{объед}(m_\kappa, n_\kappa) = & \\ = & \begin{cases} \mathbf{s}_{онм}(m_\kappa, n_\kappa), & \text{ВЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\} < \\ & < \theta_{важ} \text{НЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\}, \\ \mathbf{s}_{онм}(m_\kappa, n_\kappa) + & \text{ВЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\} \leq \\ & + \frac{\text{ВЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\} \cdot \text{НЧ}\{\mathbf{s}_{онм}(m_\kappa, n_\kappa)\}}{(\theta_{важ} + 1) \text{НЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\}}, & \geq \theta_{важ} \text{НЧ}\{s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)\}, \end{cases} \quad (5.22) \end{aligned}$$

где $\theta_{важ}$ – пороговый коэффициент, определяющий, насколько яркие объекты малой площади признаются важными. Площадь объектов регулируется апертурой фильтра скользящего среднего при вычислении низкочастотной составляющей. Элементы вектора $\mathbf{s}_{онм}(m_\kappa, n_\kappa)$ представляют собой отдельные спектральные каналы оптического изображения.

На рисунках 5.6–5.9 приведен пример объединяемых изображений и результата объединения. Видно, что столбы линий электропередач, незаметные на оптическом снимке, но хорошо различимые на радиолокационном, успешно перенесены на результат объединения. При этом выбран пороговый коэффициент $\theta_{важ}=3$, а радиолокационное изображение обработано улучшенным фильтром Фроста в окне 3×3 с коэффициентом затухания 0,25.

Для сравнения на рисунке 5.10 приведен результат объединения без предварительной фильтрации спекл-шума на радиолокационном изображении. Видно, что, помимо столбов линий электропередач, на оптический снимок перенесено множество шумовых пиков яркости. Таким образом, предварительная фильтрация радиолокационного изображения действительно необходима.



Рисунок 5.6 – Радиолокационное изображение, исходное для объединения



Рисунок 5.7 – Фильтрованное радиолокационное изображение



Рисунок 5.8 – Оптическое изображение, исходное для объединения



Рисунок 5.9 – Результат объединения с предварительной фильтрацией радиолокационного изображения



Рисунок 5.10 – Результат объединения без предварительной фильтрации радиолокационного изображения

Пороговый коэффициент $\theta_{\text{важ}}$ и размер апертуры фильтра скользящего среднего подбираются индивидуально в зависимости от объектов интереса, которые должны быть перенесены с радиолокационного изображения на оптическую подложку. При этом малая вычислительная сложность предлагаемого алгоритма позволяет «на лету» перестраивать изображение для дешифровщика при изменении им указанных выше параметров объединения.

Количественное оценивание эффективности предложенного алгоритма объединения выполнено в рамках главы 6.

5.4 АЛГОРИТМ ОБЪЕДИНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ РАСКРАСКИ

5.4.1 Постановка задачи. В предыдущем параграфе был предложен алгоритм, который при объединении в основном отдает предпочтение оптическому изображению. Однако в ряде задач может быть важна вся радиолокационная информация. В этом случае ее можно полностью сохранить в виде яркости результата объединения, а для облегчения дешифрации дополнить цветовой составляющей, взятой из оптического спектрозонального снимка.

Спектрозональное изображение в естественных цветах обычно представляется в виде RGB-снимка, включающего три спектральных канала: красный, зеленый и синий. Для выделения цвета и яркости в каждом пикселе изображения необходимо перейти из пространства RGB в некоторое цветовое пространство, одним из изменений которого является яркость, а другие описывают параметры цвета. К таким цветовым пространствам можно отнести YCbCr и YPbPr, традиционно используемые в компонентном видео и телевидении, а также HSL и HSV, часто применяемые при обработке изображений.

Перед раскраской радиолокационное и оптическое изображения необходимо совместить, как это было рассмотрено в пункте 5.3.1. Также желательно выполнить фильтрацию спекл-шума на радиолокационном изображении, рассмотренную в пункте 5.3.3. Кроме того, в пункте 3.1.3 было отмечено, что радиолокационное изображение выглядит более похожим на оптическое, если к нему применено логарифмическое преобразование яркости. В связи с этим целесообразно учитывать такое преобразование и при раскраске.

5.4.2 Раскраска радиолокационного изображения. При раскраске важную роль играет насыщенность цвета, поэтому цветоразностным моделям YCbCr и

YPbPr следует предпочесть пространства HSL и HSV, в которых насыщенность является одним из измерений.

Общим недостатком пространств HSL и HSV является тот факт, что для темных цветов возможны большие значения насыщенности, хотя человек их видит практически как черный цвет. Однако в пространстве HSL такая же проблема наблюдается и со светлыми цветами, а в пространстве HSV почти белые цвета имеют оклонулевую насыщенность. В связи с этим объединение целесообразно выполнять в пространстве HSV, а его недостаток в части темных цветов можно компенсировать преобразованием насыщенности с учетом яркости.

Обозначим спектрозональное оптическое изображение в естественных цветах как $\mathbf{s}_{onm}(m_\kappa, n_\kappa) = (s_{onmR}(m_\kappa, n_\kappa), s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa), s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa))^T$, тогда компоненты в цветовом пространстве HSV выражаются как

$$H_{onm}(m_\kappa, n_\kappa) = \begin{cases} 0, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa), \\ 60 \frac{s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa)}{s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa)}, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = s_{onmR}(m_\kappa, n_\kappa) \\ & \text{и } s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa) \geq s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa), \\ \frac{60(s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa))}{s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa)} + 360, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = s_{onmR}(m_\kappa, n_\kappa) \\ & \text{и } s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa) < s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa), \\ \frac{60(s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmR}(m_\kappa, n_\kappa))}{s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa)} + 120, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa), \\ \frac{60(s_{onmR}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmG}(m_\kappa, n_\kappa))}{s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) - s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa)} + 240, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = s_{onmB}(m_\kappa, n_\kappa), \end{cases} \quad (5.23)$$

$$S_{onm}(m_\kappa, n_\kappa) = \begin{cases} 0, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) = 0, \\ 1 - \frac{s_{onmmin}(m_\kappa, n_\kappa)}{s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa)}, & s_{onmmax}(m_\kappa, n_\kappa) > 0, \end{cases} \quad (5.24)$$

$$V_{onm}(m_k, n_k) = s_{onmmax}(m_k, n_k), \quad (5.25)$$

где:

$$s_{onmmax}(m_k, n_k) = \max(s_{onmR}(m_k, n_k), s_{onmG}(m_k, n_k), s_{onmB}(m_k, n_k)), \quad (5.26)$$

$$s_{onmmin}(m_k, n_k) = \min(s_{onmR}(m_k, n_k), s_{onmG}(m_k, n_k), s_{onmB}(m_k, n_k)). \quad (5.27)$$

Простейший способ раскраски радиолокационного изображения, это взять цвет $H_{onm}(m_k, n_k)$ и насыщенность $S_{onm}(m_k, n_k)$ с оптического изображения, а $V_{onm}(m_k, n_k)$ заменить яркостью радиолокационного изображения. Однако недостаток пространства HSV приводит к тому, что яркие пиксели радиолокационного изображения, соответствующие темным пикселям оптического, раскрашиваются в случайные насыщенные цвета, как это показано на рисунке 5.11.

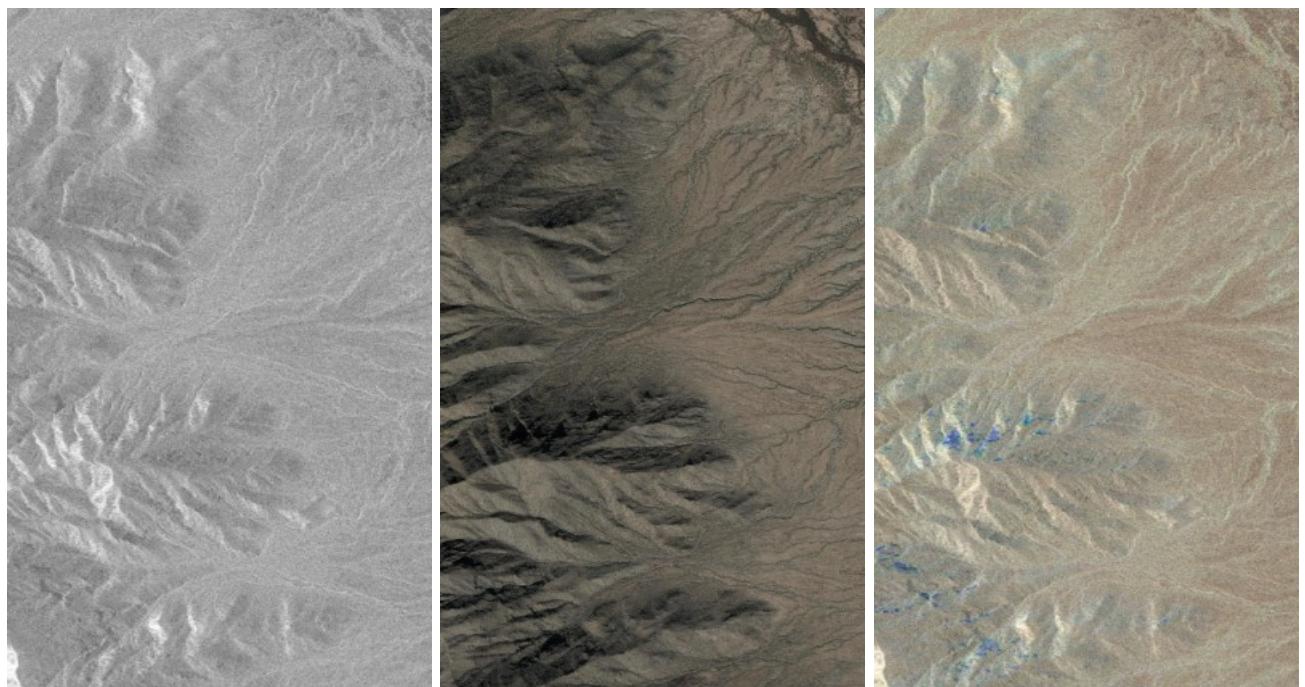


Рисунок 5.11 – Радиолокационное изображение в логарифмической шкале яркостей (слева), оптическое изображение (по центру) и результат раскраски без коррекции насыщенности цвета (справа)

Чтобы парировать рассмотренный недостаток, необходимо при раскраске уменьшать насыщенность цвета в пикселях с малым значением $V_{onm}(m_k, n_k)$:

$$H_{раскрас}(m_k, n_k) = H_{onm}(m_k, n_k), \quad (5.28)$$

$$S_{раскрас}(m_k, n_k) = \begin{cases} S_{onm}(m_k, n_k) \cdot p_{раскрас} \sqrt{\frac{V_{onm}(m_k, n_k)}{\theta_{V_{раскрас}}}}, & V_{onm}(m_k, n_k) \leq \theta_{V_{раскрас}}, \\ S_{onm}(m_k, n_k), & V_{onm}(m_k, n_k) > \theta_{V_{раскрас}}, \end{cases} \quad (5.29)$$

где $H_{раскрас}(m_k, n_k)$ и $S_{раскрас}(m_k, n_k)$ – цвет и насыщенность результата раскраски, $\theta_{V_{раскрас}}$ – максимальное значение яркости на оптическом изображении $V_{onm}(m_k, n_k)$, при котором выполняется коррекция насыщенности; параметр $p_{раскрас}$ определяет, насколько быстро начинает снижаться насыщенность по мере уменьшения яркости.

Пример результата раскраски с коррекцией насыщенности приведен на рисунке 5.12. В качестве $\theta_{V_{раскрас}}$ использовалась половина от максимально возможного значения $V_{onm}(m_k, n_k)$, в качестве $p_{раскрас}$ – значение 2. Видно, что коррекция позволила устраниТЬ насыщенные синие пятна на результате раскраски в области теней на спектрозональном оптическом снимке.



Рисунок 5.12 – Результат раскраски радиолокационного изображения с коррекцией насыщенности цвета

5.4.3 Учет логарифмирования радиояркости при раскраске радиолокационного изображения. Изображения, формируемые системами ДЗЗ, имеют разрядность кодов яркости большую, чем у мониторов. Поэтому при визуализации выполняется контрастирование – преобразование кодов яркости к диапазону от 0 до 255.

При визуализации оптических изображений обычно применяется линейное контрастирование – преобразование в виде кусочно-линейной функции, принимающей нулевое значение для малых кодов яркости, значение 255 для больших кодов яркости и линейно изменяющейся от 0 до 255 при средних кодах яркости. Абсциссы точек излома кусочно-линейной функции обычно выбираются в соответствии с оклонулевым и околоединичным квантилями распределения кодов яркости на изображении или его фрагменте. Чаще всего используются квантили уровней 0,02 и 0,98.

При визуализации радиолокационных изображений линейное контрастирование приводит к затемнению большей части пикселей. Избежать этого помогает логарифмическое контрастирование. Его можно представить в виде комбинации двух действий: логарифмического преобразования кодов яркости по аналогии с (3.3) и последующего линейного контрастирования результатов преобразования. При этом преобразование яркостей выполняется только для их вывода на экран монитора, а коды яркости, сохраняемые в растровых файлах выходной продукции космических систем, остаются в исходной линейной шкале.

Преобразования цветовых пространств RGB и HSV исходят из линейности пространства RGB. Однако логарифмическое контрастирование эту линейность нарушает. В результате логарифмирования относительная разница максимальной и минимальной из составляющих R, G и B уменьшается, а следовательно, снижается насыщенность цвета. Это иллюстрирует рисунок 5.13.

Решить указанную проблему можно, учтя логарифмирование при переходе из пространства HSV в RGB-пространство раскрашенного радиолокационного изображения. Величина $V_{onm}(m_k, n_k)$ при раскраске заменяется логарифмом ра-

диояркости $s_{p\phi}(m_\kappa, n_\kappa)$. Затем путем перехода в пространство RGB получаются промежуточные составляющие R, G и B. Коды яркости окончательных составляющих $s_{раскрасR}(m_\kappa, n_\kappa)$, $s_{раскрасG}(m_\kappa, n_\kappa)$ и $s_{раскрасB}(m_\kappa, n_\kappa)$ получаются путем возведения основания логарифма в степень, задаваемую промежуточным значением составляющей. Однако в результате насыщенность получаемых цветов оказывается завышенной, что иллюстрирует рисунок 5.14.



Рисунок 5.13 – Радиолокационное изображение в логарифмической шкале яркостей (слева), оптическое изображение (по центру) и результат раскраски без учета логарифмирования радиояркости (справа)

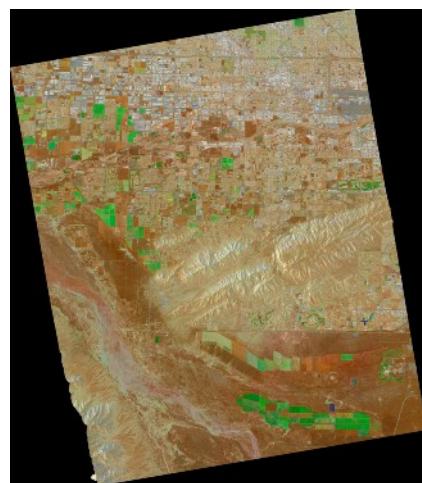


Рисунок 5.14 – Результат раскраски радиолокационного изображения с учетом логарифмирования, но без учета последующего линейного контрастирования

Завышение насыщенности связано с тем, что не учитывается линейное контрастирование, следующее при визуализации за логарифмическим преобразованием яркостей. Чтобы при логарифмическом контрастировании получить корректные значения насыщенности цвета, необходимо выполнить переход от $H_{раскрас}(m_k, n_k)$ и $S_{раскрас}(m_k, n_k)$ к $s_{раскрасR}(m_k, n_k)$, $s_{раскрасG}(m_k, n_k)$ и $s_{раскрасB}(m_k, n_k)$ следующим образом.

Пусть $s_{\alpha_{леб}}$ – значение оклонулевого квантиля уровня $\alpha_{леб}$, применяемого при контрастировании, и $s_{p\phi}(m_k, n_k) \geq s_{\alpha_{леб}}$, тогда:

$$V_{раскрас}(m_k, n_k) = \ln(s_{p\phi}(m_k, n_k) + 1) - \ln(s_{\alpha_{леб}} + 1), \quad (5.30)$$

$$\chi(k) = \max(0, \min(k, 4-k, 1)), \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{s}_{раскрасR}(m_k, n_k) &= V_{раскрас}(m_k, n_k) \times \\ &\times \left(1 - S_{раскрас}(m_k, n_k) \cdot \chi \left(\left(5 + \frac{H_{раскрас}(m_k, n_k)}{60} \right) \bmod 6 \right) \right), \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{s}_{раскрасG}(m_k, n_k) &= V_{раскрас}(m_k, n_k) \times \\ &\times \left(1 - S_{раскрас}(m_k, n_k) \cdot \chi \left(\left(3 + \frac{H_{раскрас}(m_k, n_k)}{60} \right) \bmod 6 \right) \right), \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{s}_{раскрасB}(m_k, n_k) &= V_{раскрас}(m_k, n_k) \times \\ &\times \left(1 - S_{раскрас}(m_k, n_k) \cdot \chi \left(\left(1 + \frac{H_{раскрас}(m_k, n_k)}{60} \right) \bmod 6 \right) \right), \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$S_{раскрасR, G, B}(m_k, n_k) = \exp(\widetilde{s}_{раскрасR, G, B}(m_k, n_k) + \ln(s_{\alpha_{леб}} + 1) - 1). \quad (5.35)$$

Если $s_{p\phi}(m_k, n_k) < s_{\alpha_{леб}}$, раскраска не выполняется: $s_{раскрасR, G, B}(m_k, n_k) = s_{p\phi}(m_k, n_k)$.

На рисунке 5.15 приведен результат раскраски радиолокационного изображения по спектрозональному оптическому снимку с учетом выражений (5.30)–(5.35) после логарифмического контрастирования. Видно, что насыщенность цветов соответствует оптическому снимку, приведенному на рисунке 5.13. Таким об-

разом, радиояркость дополняется естественными цветами наблюдаемых объектов, что облегчает задачу дешифрации радиолокационного изображения.

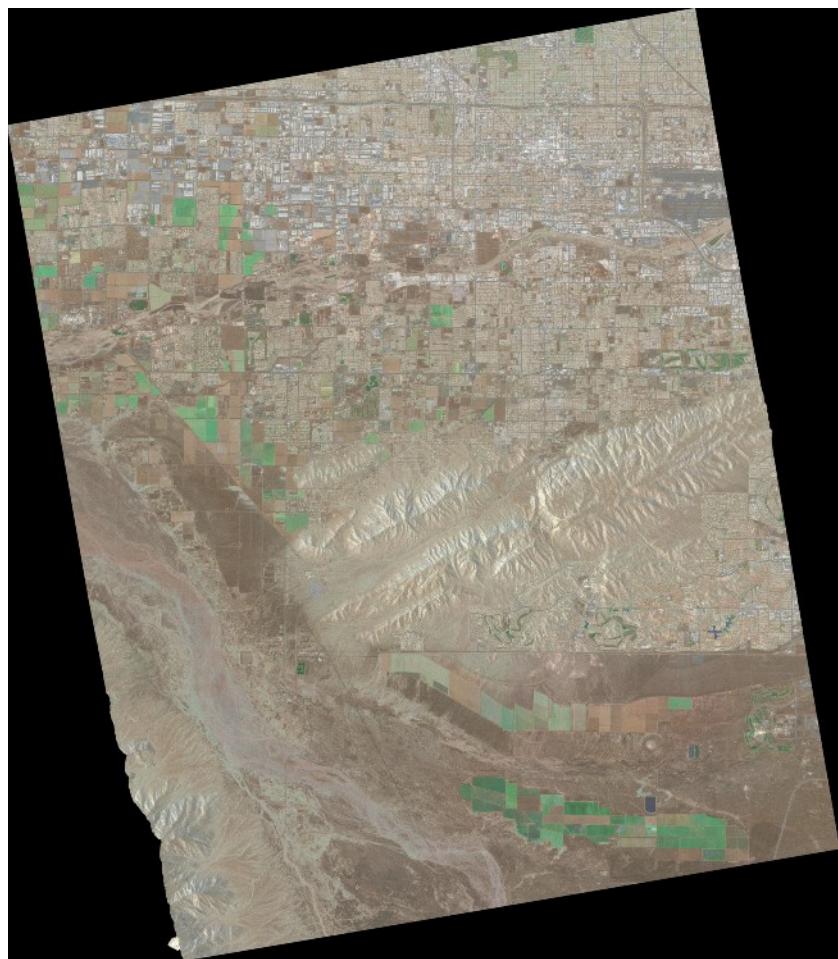


Рисунок 5.15 – Результат раскраски радиолокационного изображения с учетом логарифмического контрастирования

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проанализированы критерии качества сегментации изображений, и по результатам анализа предложена функция потерь, используемая при обучении ИНС сегментации облачности. Разработана архитектура ИНС, отличающаяся в 22 раза меньшим объемом вычислений по сравнению с известной архитектурой «U-Net». Предложено подавать на вход ИНС результаты сразу нескольких уровней радиометрической обработки изображения: относительной радиометрической коррек-

ции, абсолютной радиометрической коррекции и дополнительно радиометрической нормализации с учетом угла Солнца и наклона рельефа. Рассмотрена организация блочной обработки больших изображений, гарантирующая отсутствие нестыковок на границах блоков. Выделены 2 варианта применения сегментации облачности по оптическому снимку при радиолокационной дифференциальной интерферометрии: на борту КА для принятия решения о целесообразности интерферометрической съемки и при наземной обработке для отбраковки ложных смещений, вызванных задержкой прохождения зондирующего сигнала сквозь облачность. В совокупности предложенные решения образуют алгоритм нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах.

2. Предложен алгоритм объединения интерферометрических и стереофотограмметрических ЦММ с привлечением информации о расположении искусственных высотных объектов из электронных карт. Бинарная маска искусственных высотных объектов уточняется путем ее сопоставления с объединяемыми ЦММ. В районах городской застройки предпочтение отдается стереофотограмметрическим данным, в остальных участках – интерферометрическим.

3. Разработан вычислительно простой алгоритм объединения радиолокационных и оптических изображений, согласно которому на радиолокационном изображении выделяются яркие объекты малой площади и переносятся на оптическую подложку, отображающую остальные объекты лучше, чем радиолокационное изображение.

4. Предложен алгоритм раскраски радиолокационного изображения в естественные цвета, задаваемые оптическим спектрозональным снимком. При раскраске учитываются особенности представления темных цветов в пространстве HSV и визуализация радиолокационных изображений с применением логарифмического контрастирования.

6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

В главе приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предложенных методов и алгоритмов совместной обработки радиолокационной и оптической информации, составляющих положения, выносимые на защиту. Исследования выполнены с привлечением натурной информации в виде десятков изображений и цифровых моделей высот от отечественных и зарубежных космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли. Также приводятся особенности реализации предложенных методов и алгоритмов в виде специального программного обеспечения.

6.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ БОРТОВОГО СЖАТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И УТОЧНЕНИЯ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

6.1.1 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма бортового сжатия радиоголограмм. В параграфе 2.1 было выполнено теоретическое оценивание уровня потерь при сжатии радиоголограмм в соответствии с предложенным алгоритмом в сравнении с квантователем Ллойда–Макса и алгоритмом FDBAQ. В настоящем пункте выполняется экспериментальное подтверждение полученных теоретических оценок.

В пункте 2.1.1 описана схема моделирования несжатых радиоголограмм из реальных радиолокационных изображений от зарубежных КА, имитации бортового сжатия и расчета уровня потерь. С минимальными изменениями данная схема

может быть применена в рамках экспериментальных исследований. Для этого необходимо шаг 2 схемы заменить бортовым сжатием одним из сравниваемых алгоритмов. Размеры фильтров, применяемых для формирования модельных радиоголограмм из радиолокационных изображений, выбираются такими же, как и при проведении теоретической оценки в рамках параграфа 2.1: $N_{c\phi\eta}=2660$ и $N_{c\phi R}=9000$.

Эксперименты, проведенные с использованием нескольких десятков имеющихся в открытом доступе радиолокационных изображений от зарубежных КА «Sentinel-1», «COSMO-SkyMed», «TerraSAR-X» и «RadarSat-2», показали, что теоретические оценки уменьшения уровня потерь при сжатии предлагаемым алгоритмом по сравнению с квантователем Ллойда–Макса и алгоритмом FDBAQ полностью подтверждаются на практике. Примеры результатов экспериментов для 6 тестовых изображений приведены в таблице 6.1 и на рисунках 6.1–6.3. Видно, что абсолютные значения $Q_{РЛИ}$ достаточно сильно разнятся от изображения к изображению (в пределах 1 дБ), однако разница в значениях $Q_{РЛИ}$ для разных алгоритмов сжатия достаточно стабильна. От изображения к изображению выигрыш может несколько колебаться, но, как и предсказывалось теоретически, диапазон возможных значений выигрыша предлагаемого алгоритма в величине $Q_{РЛИ}$ при заданной степени сжатия по сравнению с FDBAQ составляет 0,1–0,4 дБ. Это соответствует уменьшению на 1–5 % среднеквадратической ошибки отсчетов амплитуды сигнала на изображении, синтезированном из сжатой радиоголограммы. По сравнению с квантователем Ллойда–Макса выигрыш в величине $Q_{РЛИ}$ больше и составляет порядка 1 дБ.

Таким образом, применение предлагаемого алгоритма для бортового сжатия позволит либо увеличить пропускную способность радиолинии за счет большей степени сжатия передаваемых данных при сохранении заданного уровня качества формируемых изображений, либо повысить качество при сохранении текущей пропускной способности.

Таблица 6.1 – Потери и средняя длина кода для различных квантователей при сжатии модельных радиоголограмм, полученных из радиолокационных изображений

Изображение	N_{yp}	Квантователь Ллойда–Макса с кодированием по Хаффману		FDBAQ		Предлагаемый алгоритм	
		$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ	$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ	$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ
Пангканан-Бун, КА «TerraSAR-X»	4	2,011	13,141	–	–	1,810	12,512
	8	2,901	18,584	2,589	17,158	2,476	16,828
	10	–	–	2,822	18,810	2,509	17,040
	14	–	–	3,255	21,307	2,849	19,173
	16	3,829	24,141	–	–	2,849	19,176
	20	–	–	3,646	23,959	3,456	22,943
	32	4,784	29,705	4,260	27,468	3,991	25,966
	36	–	–	–	–	4,216	27,289
Финикс, КА «RadarSat-2»	4	1,999	13,155	–	–	1,801	12,468
	8	2,881	18,550	2,577	17,090	2,461	16,752
	10	–	–	2,803	18,717	2,492	16,950
	14	–	–	3,226	21,167	2,827	19,069
	16	3,809	24,023	–	–	2,827	19,070
	20	–	–	3,625	23,764	3,439	22,767
	32	4,766	29,336	4,235	27,154	3,965	25,729
	36	–	–	–	–	4,190	26,989
Гавайи, КА «TerraSAR-X»	4	2,005	12,832	–	–	1,807	12,206
	8	2,896	18,152	2,587	16,744	2,472	16,418
	10	–	–	2,817	18,375	2,504	16,622
	14	–	–	3,247	20,824	2,843	18,734
	16	3,822	23,600	–	–	2,843	18,736
	20	–	–	3,641	23,409	3,450	22,413
	32	4,777	29,022	4,258	26,758	3,983	25,359
	36	–	–	–	–	4,212	26,589

Окончание таблицы 6.1

Изображение	N_{yp}	Квантователь Ллойда–Макса с кодированием по Хаффману		FDBAQ		Предлагаемый алгоритм	
		$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ	$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ	$L_{Хаф}$, бит	$Q_{РЛИ}$, дБ
Большой Каньон, КА «TerraSAR-X»	4	2,013	12,792	—	—	1,814	12,163
	8	2,906	18,184	2,598	16,822	2,483	16,475
	10	—	—	2,828	18,436	2,518	16,691
	14	—	—	3,262	20,878	2,856	18,799
	16	3,833	23,659	—	—	2,856	18,800
	20	—	—	3,658	23,454	3,466	22,495
	32	4,788	28,829	4,271	26,884	3,997	25,433
	36	—	—	—	—	4,225	26,735
Суматра, КА «TerraSAR-X»	4	2,006	12,868	—	—	1,807	12,237
	8	2,900	18,210	2,588	16,784	2,473	16,475
	10	—	—	2,820	18,435	2,506	16,680
	14	—	—	3,252	20,913	2,845	18,779
	16	3,826	23,731	—	—	2,845	18,781
	20	—	—	3,646	23,549	3,454	22,527
	32	4,779	29,304	4,261	27,056	3,987	25,541
	36	—	—	—	—	4,214	26,831
Норвегия, КА «TerraSAR-X»	4	2,010	12,570	—	—	1,810	11,900
	8	2,903	17,907	2,593	16,480	2,475	16,114
	10	—	—	2,823	18,032	2,508	16,308
	14	—	—	3,257	20,485	2,849	18,400
	16	3,830	23,360	—	—	2,849	18,400
	20	—	—	3,647	22,987	3,455	22,080
	32	4,784	28,407	4,270	26,400	3,992	25,004
	36	—	—	—	—	4,223	26,321

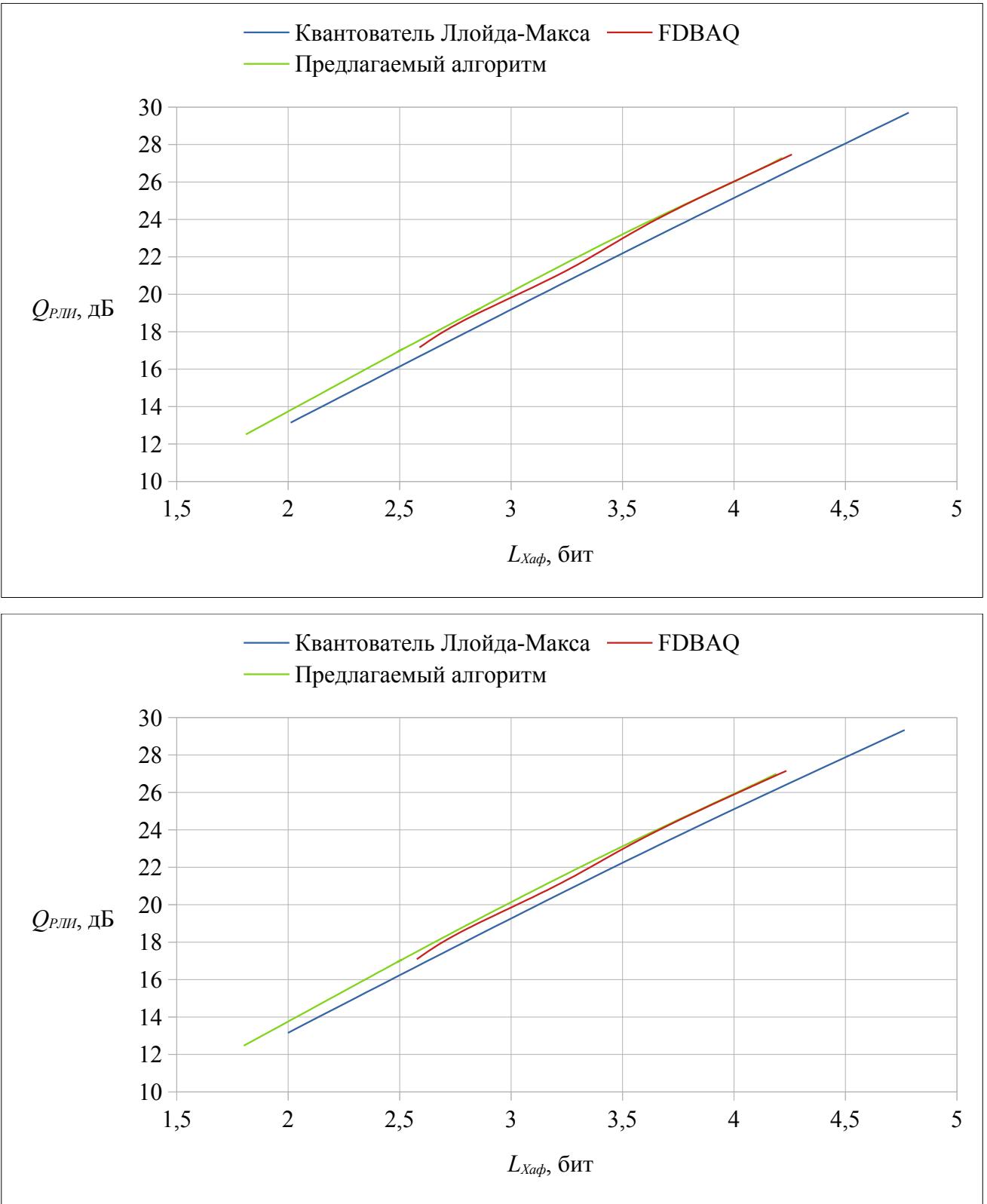


Рисунок 6.1 – Зависимости отношения сигнал-шум на синтезированном изображении от средней длины кода сжатых модельных радиоголограмм, полученных из изображений «Пангкалан-Бун» (сверху) и «Финикс» (снизу), для различных квантователей

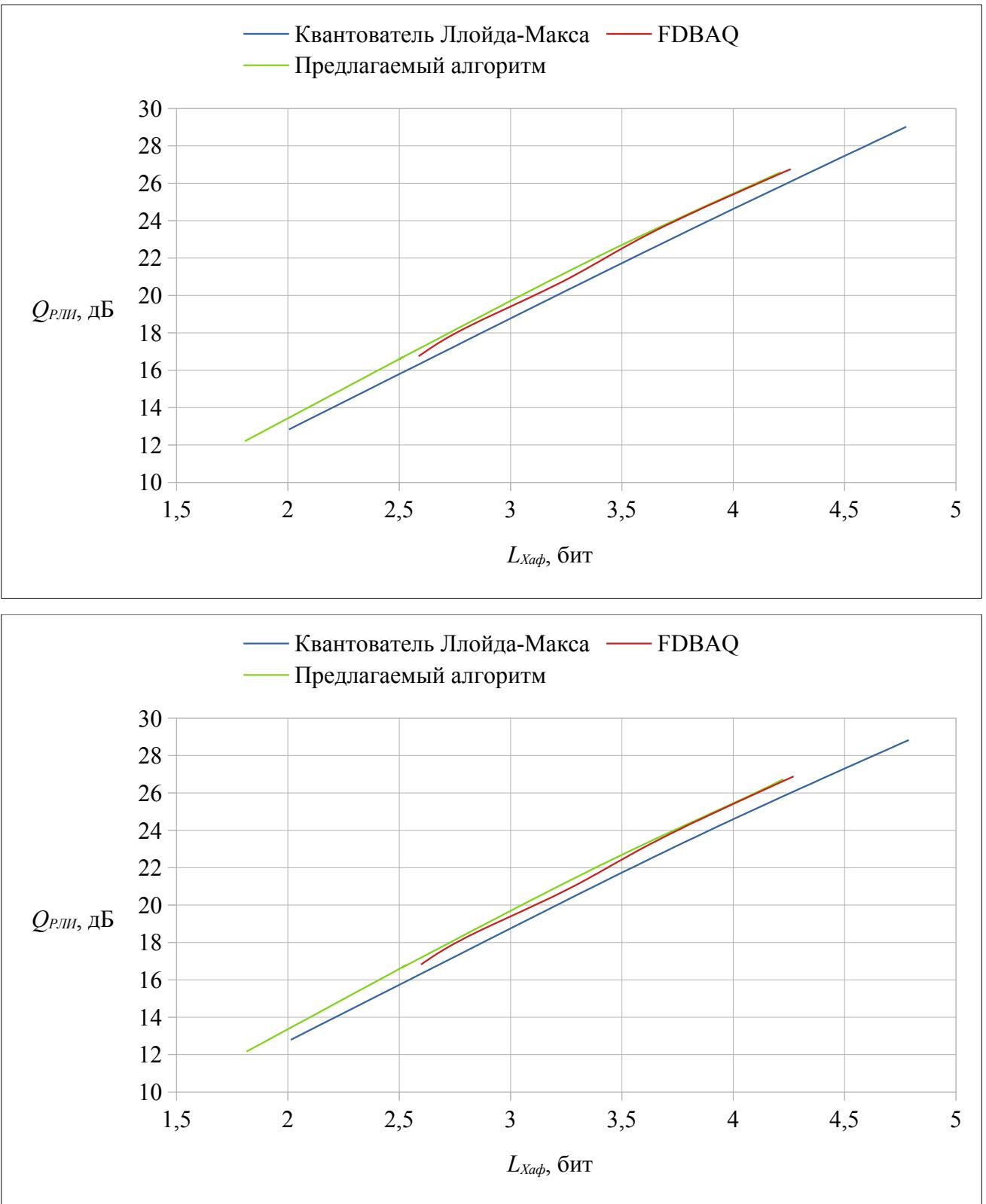


Рисунок 6.2 – Зависимости отношения сигнал-шум на синтезированном изображении от средней длины кода сжатых модельных радиоголограмм, полученных из изображений «Гавайи» (сверху) и «Большой Каньон» (снизу), для различных квантователей

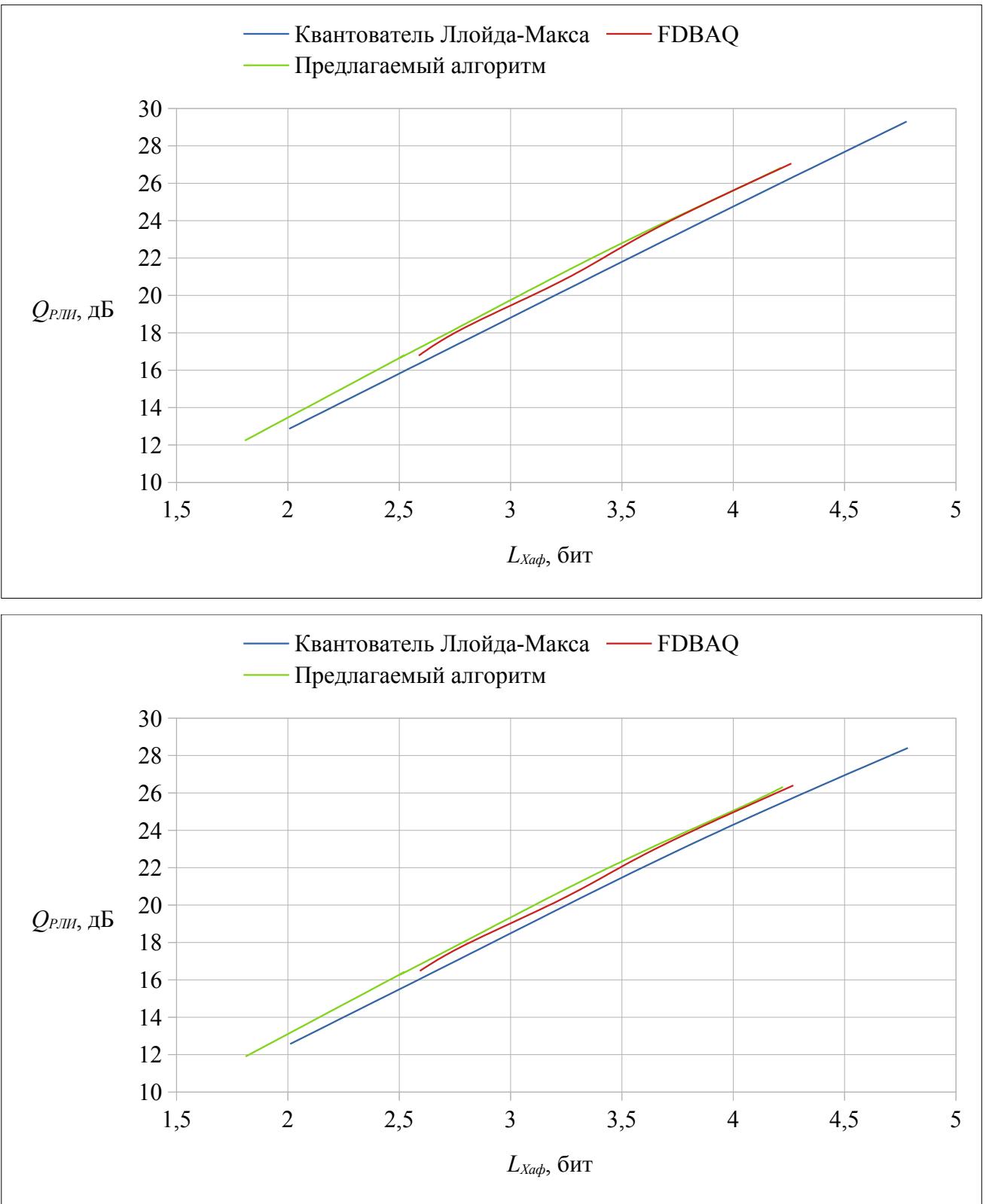


Рисунок 6.3 – Зависимости отношения сигнал-шум на синтезированном изображении от средней длины кода сжатых модельных радиоголографм, полученных из изображений «Суматра» (сверху) и «Норвегия» (снизу), для различных квантователей

6.1.2 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений. Перед проведением экспериментальных исследований алгоритма бортового сжатия оптических изображений необходимо выбрать показатели уровня искажений, возникающих при сжатии, с учетом их «естественности» для человека.

Традиционным показателем величины потерь является среднеквадратическое отклонение кодов яркости в одноименных пикселях исходного изображения $a(m, n, k)$ и изображения $b(m, n, k)$, распакованного после сжатия:

$$\sigma_{cyc} = \sqrt{\frac{\sum_{m,n,k} (a(m, n, k) - b(m, n, k))^2}{\sum_{m,n,k} 1}}, \quad (6.1)$$

где k – номер спектрального канала. За счет большого числа отсчетов смещением на единицу числа степеней свободы при оценке выборочной дисперсии пренебрегается.

Как отмечалось в параграфе 1.2, в [177] был предложен показатель сходства изображений с учетом их «естественноти» для человека – индекс структурного сходства (1.1). Расчет по формуле (1.1) выполняется для каждого канала в скользящем окне 8×8 пикселей, а в качестве итогового значения берется результат усреднения по всем положениям скользящего окна во всех каналах изображений.

Значение Q_{ucc} , вычисленное в соответствии с (1.1), можно представить в виде произведения трех показателей: сходства яркостей l_{cyc} , сходства контрастов c_{cyc} и сходства структуры s_{cyc} :

$$l_{cyc} = \frac{2\mu_a\mu_b + 0,0001L_y^2}{\mu_a^2 + \mu_b^2 + 0,0001L_y^2}, \quad c_{cyc} = \frac{2\sigma_a\sigma_b + 0,0009L_y^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + 0,0009L_y^2}, \quad s_{cyc} = \frac{2\sigma_{ab} + 0,0009L_y^2}{2\sigma_a\sigma_b + 0,0009L_y^2}. \quad (6.2)$$

Индекс структурного сходства и его составляющие в отсутствие искажений принимают единичное значение, а с увеличением потерь при сжатии снижаются. Поэтому в качестве меры потерь могут использоваться величины $1 - Q_{ucc}$, $1 - l_{cyc}$, $1 - c_{cyc}$ и $1 - s_{cyc}$.

Индекс структурного сходства является широко распространенной мерой оценки качества нейросетевого сжатия, однако разложение на составляющие показывает его недостатки. Показатель сходства яркостей сопоставляет средние яркости, но оказывается не инвариантен к одинаковому аддитивному сдвигу яркостей сравниваемых изображений: $l_{c\mathcal{J}}(\mu_a, \mu_b) \neq l_{c\mathcal{J}}(\mu_a + \Delta\mu, \mu_b + \Delta\mu)$. Если средние яркости оказываются малы, то их небольшие различия начинают сильно снижать значение $l_{c\mathcal{J}}$, в то время как такие искажения практически не заметны человеческому глазу и практически не ухудшают измерительные свойства изображения. Частично этот недостаток компенсируют регуляризующие члены в числителе и знаменателе показателя, однако негативное влияние всё равно присутствует. Аналогичные рассуждения можно провести и для показателя сходства контрастов. При сопоставлении изображений однородных по яркости объектов, когда σ_a^2 и σ_b^2 малы, значение показателя получается заниженным.

С учетом вышесказанного предлагается новый интегральный показатель сходства яркостей, контраста и структуры, выступающий альтернативой индексу структурного сходства. В пределах каждого положения скользящего окна в каждом спектральном канале он рассчитывается как

$$Q_{якc} = \frac{2\sigma_{ab} + 0,0009 L_\alpha^2}{2\sigma_a \sigma_b + 0,0009 L_\alpha^2} - \frac{|\mu_a - \mu_b|}{L_\alpha} - \frac{6 \cdot |\sigma_a - \sigma_b|}{L_\alpha}. \quad (6.3)$$

Коэффициент 6 предполагает, что яркости наиболее контрастных изображений имеют нормальное распределение на отрезке $[0, L_\alpha]$, т.е. верхней границей разности σ_a и σ_b можно считать $L_\alpha/6$.

Экспериментальные исследования эффективности алгоритма бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений выполнены с использованием 30 трехканальных изображений от КА «Канопус-В» с 8-разрядными кодами яркости, прошедших относительную радиометрическую коррекцию и «сшивку» из отдельных кадров. Предлагаемый нейросетевой алгоритм сравнивался с детерминированным алгоритмом JPEG2000, применяемым для бортового сжатия космических снимков, и широко распространенным детерминированным алго-

ритмом JPEG. Предлагаемый алгоритм исследовался в 2 вариантах: без дополнительного сжатия без потерь и с дополнительным сжатием.

В рамках исследований выполнялось сжатие изображений анализируемыми алгоритмами, сжатые данные распаковывались, а результаты распаковки сопоставлялись с исходными изображениями путем расчета показателей $\sigma_{c\&jc}$, $1-Q_{ucc}$, $1-l_{c\&jc}$, $1-c_{c\&jc}$, $1-s_{c\&jc}$ и $1-Q_{ykc}$.

Средние значения указанных показателей, рассчитанные для различных степеней сжатия по всем участвующим в исследованиях изображениям, приведены в таблице 6.2. На рисунках 6.4–6.9 приведены графики зависимостей рассчитанных показателей от степени сжатия изображений.

Видно, что предлагаемый нейросетевой алгоритм имеет преимущество над детерминированными алгоритмами по части показателей при высоких степенях сжатия. При этом преимущество достигается только в сочетании с последующим сжатием без потерь на основе нейросетевого предсказания. При степенях сжатия, больших 28, предлагаемый алгоритм превосходит JPEG по показателю $\sigma_{c\&jc}$, но всё равно уступает по данному показателю алгоритму JPEG2000. Предлагаемый алгоритм лучше показывает себя по индексу структурного сходства. Начиная со степени сжатия 25, он существенно превосходит JPEG, а со степени сжатия 38 начинает незначительно (на 0,4–0,7 %) превосходить алгоритм JPEG2000. Наибольший выигрыш предлагаемого алгоритма наблюдается по введенному интегральному показателю сходства яркостей, контраста и структуры. Предлагаемый алгоритм существенно превосходит JPEG, начиная со степени сжатия 29, и на 1,4–1,8 % превосходит JPEG2000, начиная со степени сжатия 33. Таким образом, как и ожидалось, нейросетевое сжатие имеет преимущество по показателям, учитывающим не только величину искажений, но и их «естественность» для человека.

Частные показатели $1-l_{c\&jc}$, $1-c_{c\&jc}$ и $1-s_{c\&jc}$ показывают лишь отдельные аспекты отличий изображений и позволяют выявить, какого типа искажения в основном вносит тот или иной алгоритм сжатия. Слабыми местами анализируемых алгоритмов являются: для JPEG – искажение структуры изображения, для

JPEG2000 – искажение локального контраста, для предлагаемого алгоритма – искажение среднего уровня яркости.

Таблица 6.2 – Показатели средней величины потерь при различных степенях сжатия оптических изображений анализируемыми алгоритмами

Алгоритм	Степень сжатия	σ_{cyc}	$1 - Q_{ucc}$	$1 - l_{cyc}$	$1 - c_{cyc}$	$1 - s_{cyc}$	$1 - Q_{ykc}$
Предлагаемый алгоритм	13,955	1,72	0,0207	$7,04 \cdot 10^{-5}$	0,00165	0,0191	0,0289
	18,617	1,98	0,0271	$8,75 \cdot 10^{-5}$	0,00242	0,0247	0,0367
	24,205	2,16	0,0314	$9,90 \cdot 10^{-5}$	0,00297	0,0285	0,0420
	28,670	2,29	0,0343	$1,07 \cdot 10^{-4}$	0,00334	0,0310	0,0455
	32,574	2,40	0,0364	$1,17 \cdot 10^{-4}$	0,00363	0,0328	0,0481
	35,787	2,49	0,0381	$1,24 \cdot 10^{-4}$	0,00384	0,0343	0,0501
	43,419	2,82	0,0433	$1,36 \cdot 10^{-4}$	0,00455	0,0389	0,0566
	44,738	2,89	0,0447	$1,37 \cdot 10^{-4}$	0,00474	0,0401	0,0583
Предлагаемый алгоритм без дополнительного сжатия без потерь	11,536	1,72	0,0207	$7,04 \cdot 10^{-5}$	0,00165	0,0191	0,0289
	14,922	1,98	0,0271	$8,75 \cdot 10^{-5}$	0,00242	0,0247	0,0367
	18,585	2,16	0,0314	$9,90 \cdot 10^{-5}$	0,00297	0,0285	0,0420
	21,424	2,29	0,0343	$1,07 \cdot 10^{-4}$	0,00334	0,0310	0,0455
	23,868	2,40	0,0364	$1,17 \cdot 10^{-4}$	0,00363	0,0328	0,0481
	25,872	2,49	0,0381	$1,24 \cdot 10^{-4}$	0,00384	0,0343	0,0501
	30,847	2,82	0,0433	$1,36 \cdot 10^{-4}$	0,00455	0,0389	0,0566
	31,754	2,89	0,0447	$1,37 \cdot 10^{-4}$	0,00474	0,0401	0,0583
JPEG	14,397	1,49	0,0173	$1,52 \cdot 10^{-5}$	0,000646	0,0166	0,0223
	20,322	1,85	0,0253	$3,13 \cdot 10^{-5}$	0,00122	0,0241	0,0322
	26,951	2,22	0,0346	$4,35 \cdot 10^{-5}$	0,00203	0,0326	0,0432
	37,458	2,67	0,0452	$1,19 \cdot 10^{-4}$	0,00412	0,0412	0,0572
	39,940	2,71	0,0489	$9,31 \cdot 10^{-5}$	0,00379	0,0452	0,0598
	49,944	3,14	0,0590	$2,10 \cdot 10^{-4}$	0,00637	0,0528	0,0730

Окончание таблицы 6.2

Алгоритм	Степень сжатия	$\sigma_{cж}$	$1 - Q_{ucc}$	$1 - l_{cж}$	$1 - c_{cж}$	$1 - s_{cж}$	$1 - Q_{як}$
JPEG2000	13,955	1,31	0,0141	$2,37 \cdot 10^{-5}$	0,000933	0,0132	0,0206
	18,617	1,57	0,0198	$3,30 \cdot 10^{-5}$	0,00166	0,0181	0,0280
	24,205	1,86	0,0256	$5,77 \cdot 10^{-5}$	0,00288	0,0228	0,0361
	28,670	2,06	0,0309	$8,29 \cdot 10^{-5}$	0,00439	0,0265	0,0429
	32,574	2,20	0,0349	$1,02 \cdot 10^{-4}$	0,00550	0,0295	0,0478
	35,787	2,29	0,0377	$1,08 \cdot 10^{-4}$	0,00605	0,0317	0,0508
	43,419	2,53	0,0436	$1,32 \cdot 10^{-4}$	0,00756	0,0361	0,0576
	44,738	2,57	0,0449	$1,39 \cdot 10^{-4}$	0,007955	0,0372	0,0592

Скорость предлагаемого нейросетевого алгоритма на процессоре общего назначения Intel Core i7-6800K составила около 0,32 Мпикс/с, что в ~12 раз медленнее JPEG2000, но уже может быть реализовано на борту КА ДЗ3. При использовании специализированных нейропроцессоров, позволяющих эффективно распараллелить операции свертки, разница во времени сжатия может быть дополнительно сокращена.

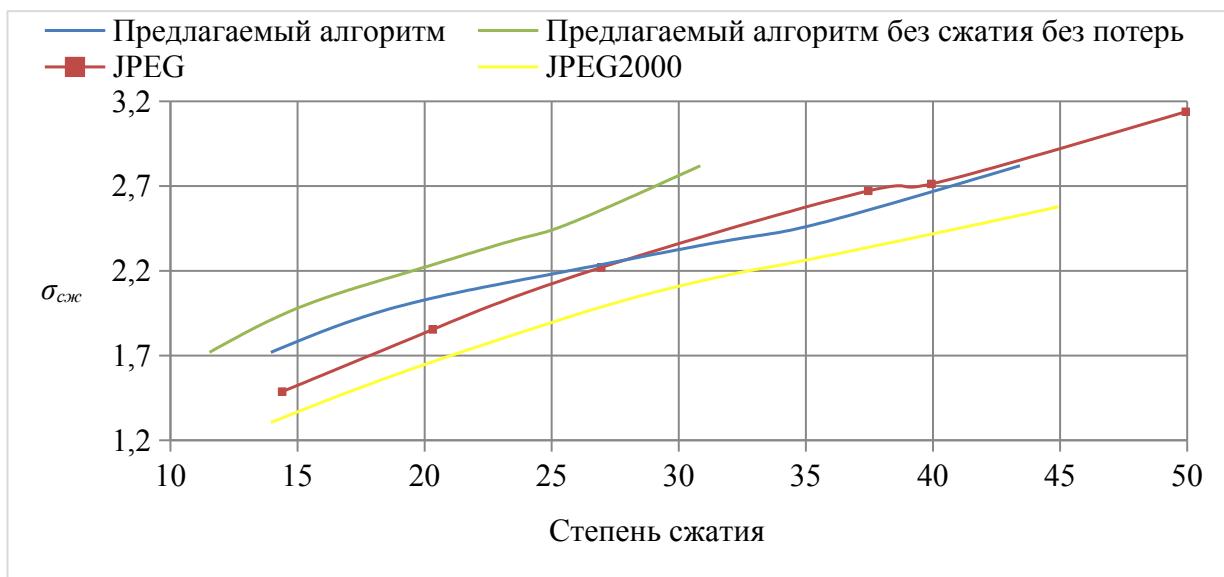


Рисунок 6.4 – Зависимости среднеквадратического отклонения от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

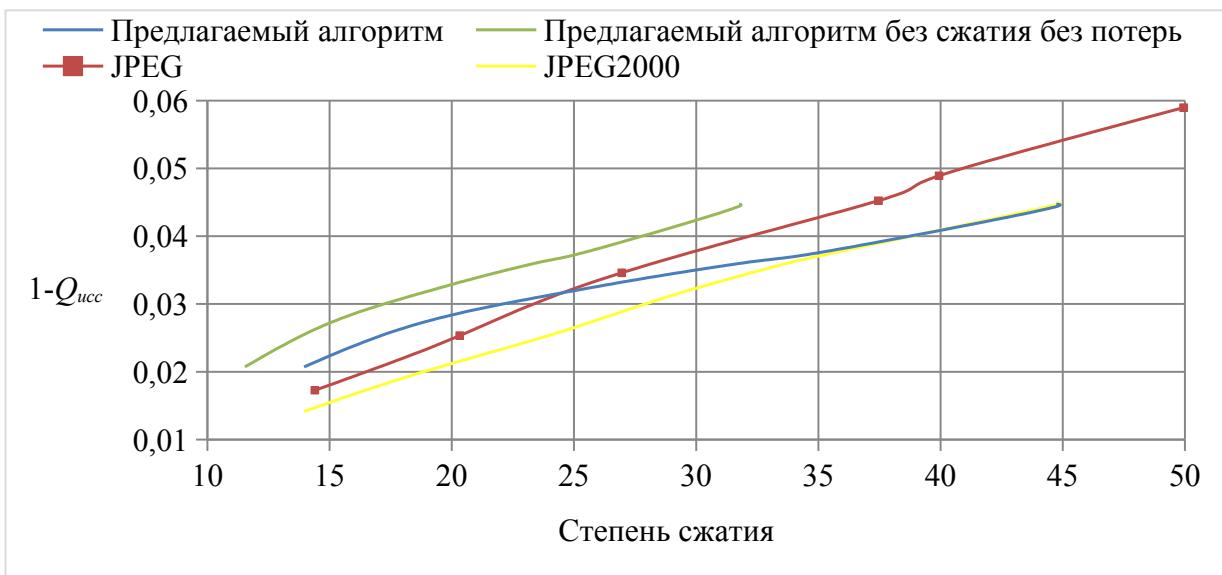


Рисунок 6.5 – Зависимости потерь по индексу структурного сходства от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

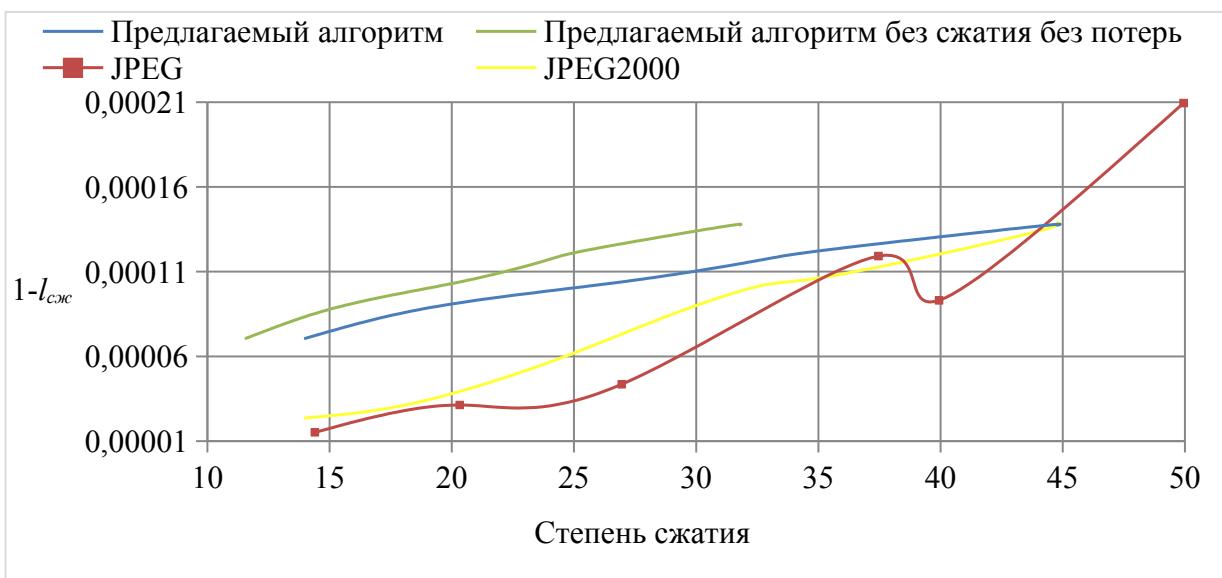


Рисунок 6.6 – Зависимости потерь по показателю сходства яркостей от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

Дополнительно выполнено сравнение предлагаемого алгоритма со сжатием на базе рекуррентной ИНС [181], для которой в открытом доступе имеются результаты обучения, выполненного ее авторами. ИНС отличается большой вычислительной сложностью и огромными затратами оперативной памяти. Это не позволяет провести сравнение на большой выборке. Поэтому эксперимент был поставлен в

части сжатия фрагмента мультиспектрального снимка городской территории размером 4000×2000 пикселей. Для сжатия такого небольшого фрагмента рекурентной ИНС [181] потребовалось около 3 ч времени процессора Intel Core i7-6800K и порядка 45 Гбайт оперативной памяти. В то же время сжатие с помощью предлагаемого алгоритма заняло ~ 18 с при затратах оперативной памяти менее 30 Мбайт.

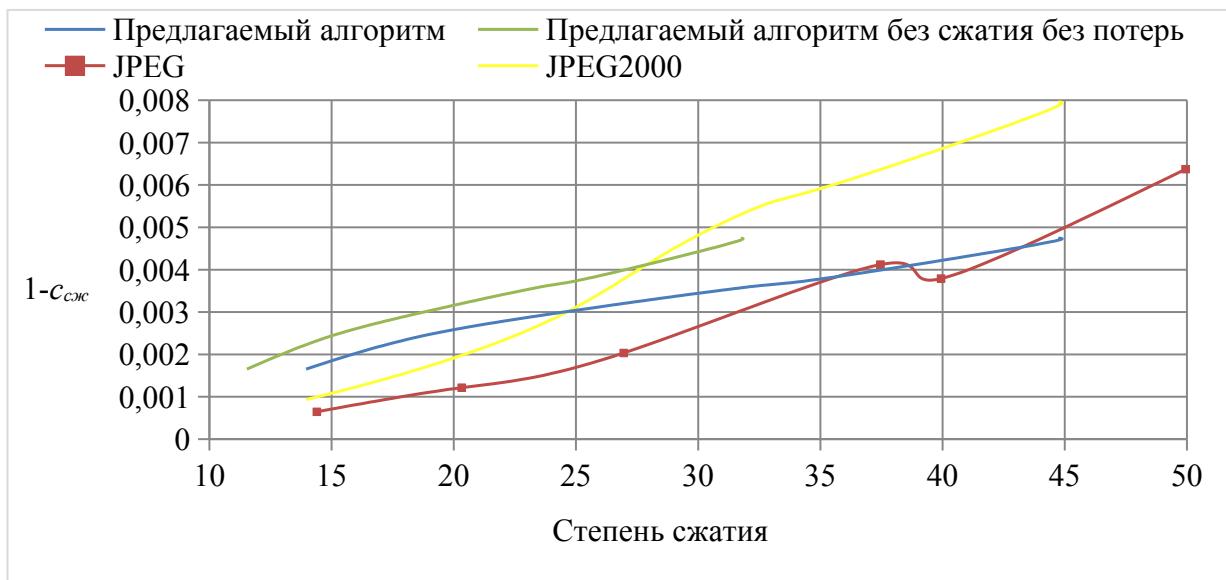


Рисунок 6.7 – Зависимости потерь по показателю сходства контрастов от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

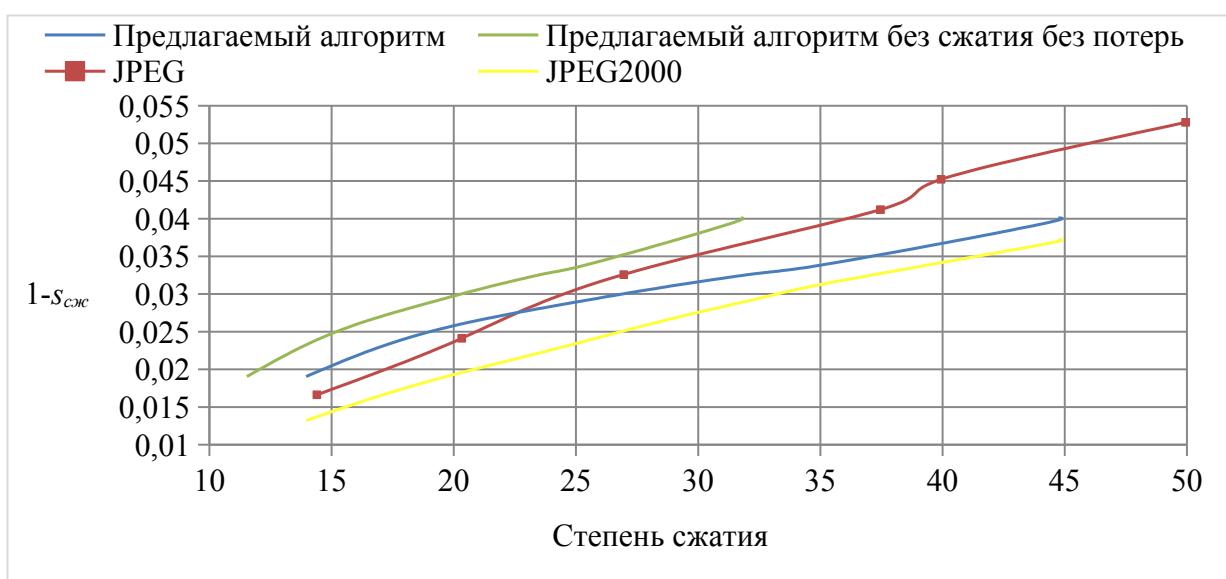


Рисунок 6.8 – Зависимости потерь по показателю сходства структуры от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

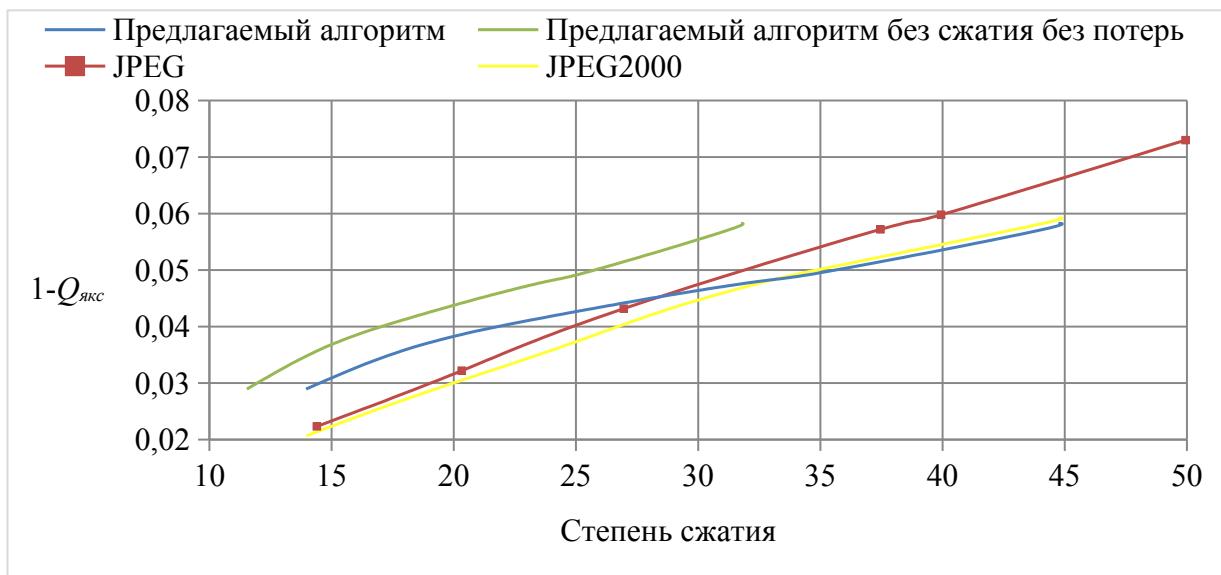


Рисунок 6.9 – Зависимости потерь по интегральному показателю от степени сжатия мультиспектрального изображения различными алгоритмами

Поскольку для рекуррентной ИНС [181] в открытом доступе имеется полноценная реализация лишь первой части сжатия (сжатие с потерями на базе автокодировщика), а для последующего сжатия без потерь реализация отсутствует, предлагаемый алгоритм с ней сравнивался в варианте без дополнительного сжатия без потерь. Результаты сравнения приведены в таблице 6.3 и на рисунках 6.10 и 6.11.

Таблица 6.3 – Показатели средней величины потерь при различных степенях сжатия оптических изображений анализируемыми нейросетевыми алгоритмами

Алгоритм	Степень сжатия	$\sigma_{c\text{жс}}$	$1-Q_{ucc}$	$1-l_{c\text{жс}}$	$1-c_{c\text{жс}}$	$1-s_{c\text{жс}}$	$1-Q_{якс}$
Предлагаемый алгоритм без сжатия без потерь	11,975	2,66	0,0312	$9,89 \cdot 10^{-5}$	0,00296	0,0283	0,0439
	15,755	3,07	0,0392	$1,24 \cdot 10^{-4}$	0,00392	0,0354	0,0540
	23,988	3,84	0,0551	$1,64 \cdot 10^{-4}$	0,00600	0,0494	0,0736
	31,530	4,55	0,0692	$1,79 \cdot 10^{-4}$	0,00784	0,0619	0,0911
Рекуррентная ИНС [181]	12	2,70	0,0389	$3,51 \cdot 10^{-5}$	0,00521	0,0340	0,0510
	16	2,94	0,0411	$3,46 \cdot 10^{-5}$	0,00491	0,0365	0,0547
	24	3,66	0,0558	$6,61 \cdot 10^{-5}$	0,00716	0,0491	0,0732
	32	4,32	0,0710	$1,07 \cdot 10^{-4}$	0,00935	0,0624	0,0908

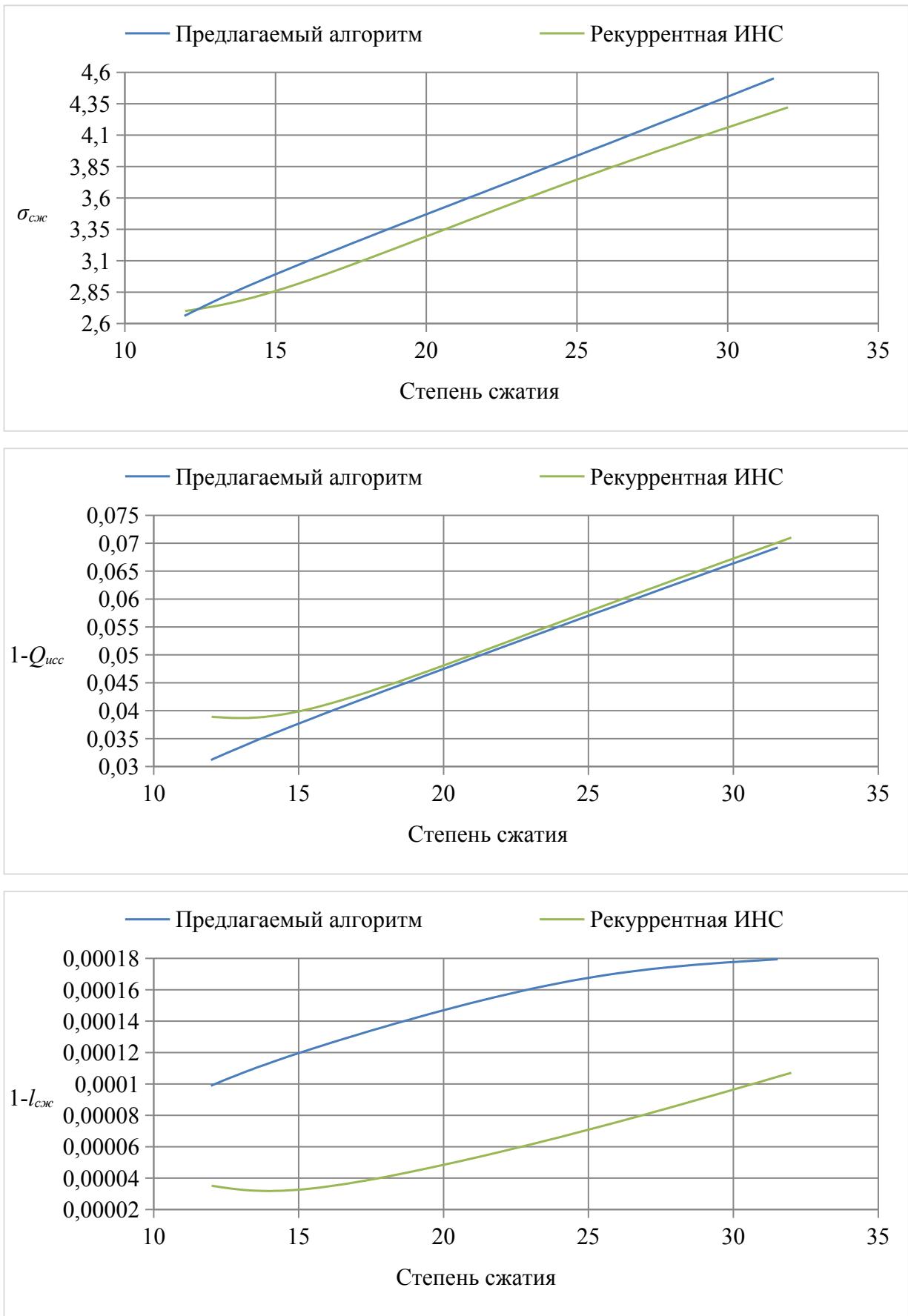


Рисунок 6.10 – Зависимости показателей $\sigma_{c jc}$, $1 - Q_{ucc}$ и $1 - l_{c jc}$ от степени сжатия мультиспектрального изображения различными нейросетевыми алгоритмами

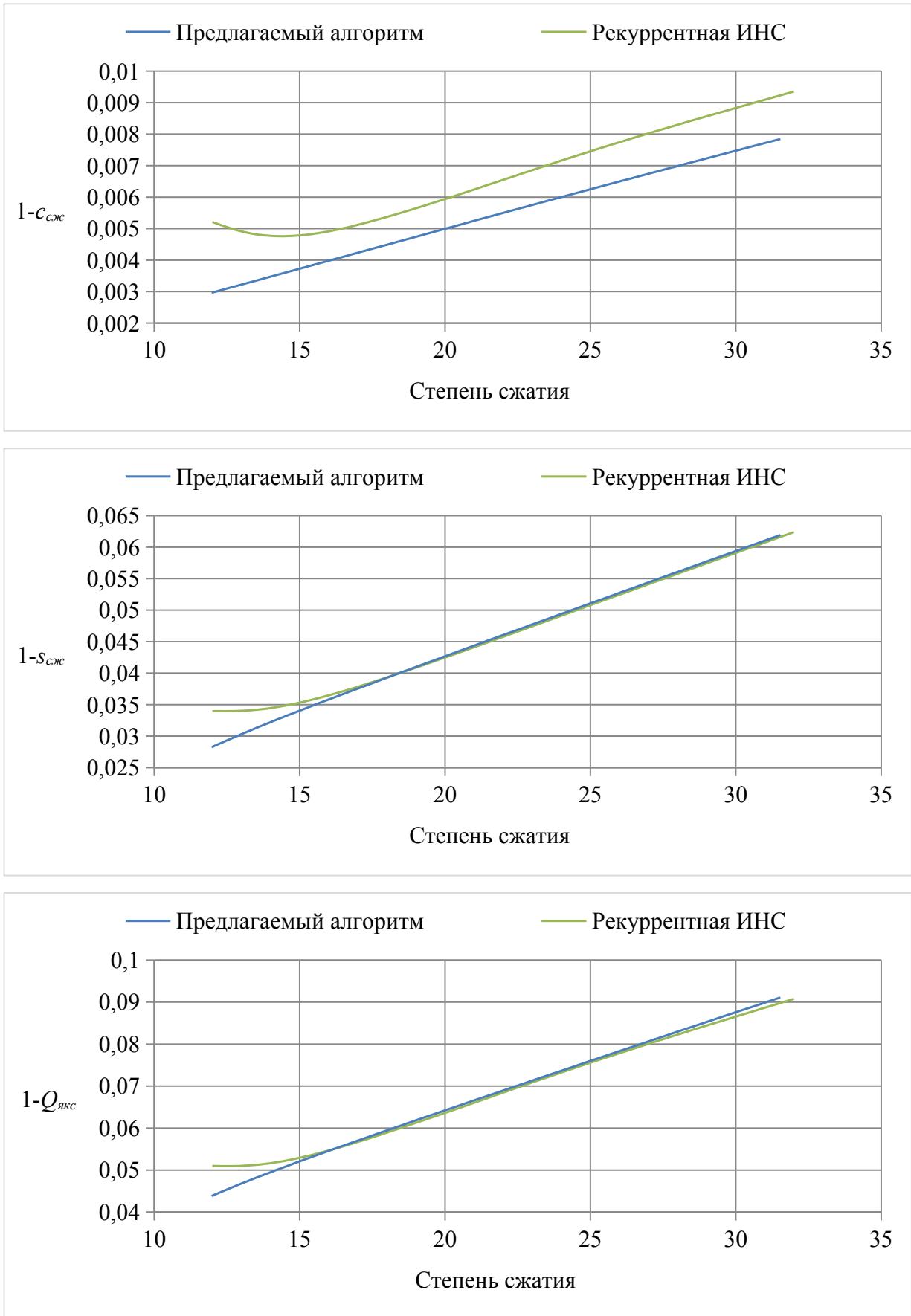


Рисунок 6.11 – Зависимости показателей $1 - c_{cyc}$, $1 - s_{cyc}$ и $1 - Q_{jcs}$ от степени сжатия мультиспектрального изображения различными нейросетевыми алгоритмами

Видно, что, несмотря на огромную разницу в объеме вычислений и затратах оперативной памяти, ИНС очень близки по значениям основных показателей. Рекуррентная ИНС [181] немного лучше по среднеквадратичному отклонению и сходству яркостей, а семейство ИНС в рамках предлагаемого алгоритма немного лучше по индексу структурного сходства и сходству контрастов. По сходству структуры и введенному интегральному показателю ИНС практически одинаковы.

Таким образом, предлагаемый алгоритм адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений превосходит детерминированные алгоритмы на 1,4–1,8 % по интегральному показателю сходства яркостей, контрастов и структуры, учитываящему «естественность» искажений для человека, при высоких степенях сжатия. При этом алгоритм по качеству сжатия сопоставим с известными ИНС, но обладает многократно меньшими требованиями к вычислительным ресурсам и оперативной памяти, что позволяет применить его на борту КА ДЗЗ.

6.1.3 Экспериментальное подтверждение эффективности метода уточнения углов рысканья и тангажа на основе оценивания доплеровского центроида путем амплитудного анализа радиолокационных изображений. Предложенный в параграфе 2.3 метод ориентирован на применение в ходе первичной обработки радиоголограмм, полученных в детальных режимах съемки (маршрутном или прожекторном) с пространственным разрешением 0,2–3 м, при котором хорошо наблюдается миграция по каналам дальности, необходимая для оценивания доплеровской неопределенности. Такие данные в открытом доступе практически отсутствуют. Распространяются лишь радиогологramмы, полученные на отдельные районы КА «Sentinel-1» в маршрутном режиме с пространственным разрешением 5 м, а также низкодетальные радиоголограммы в широкозахватных режимах съемки или от радиолокационных КА 90-х гг. прошлого века с пространственным разрешением 10–30 м. Единственными доступными для экспериментальных исследований данными является интерферометрическая пара радиоголограмм от КА «COSMO-SkyMed», полученная в маршрутном режиме с пространственным разрешением около 3 м в результате съемки острова Гавайи. Поскольку радиоголограммы и синтезированные из них изображения в интерферометрической паре

практически одинаковы, для проведения эксперимента можно взять любую из них, например, с более ранней датой съемки. Изображение, синтезированное из радиоголограммы по полной апертуре с корректным значением доплеровского центроида, приведено на рисунке 6.12. Ограниченностю количества доступных для эксперимента данных компенсирует достаточно разнообразный сюжет изображения, включающий водную поверхность, скалистую и горную местность (в том числе кратеры вулкана Килауэа), лесной массив, поля и деревенскую застройку.

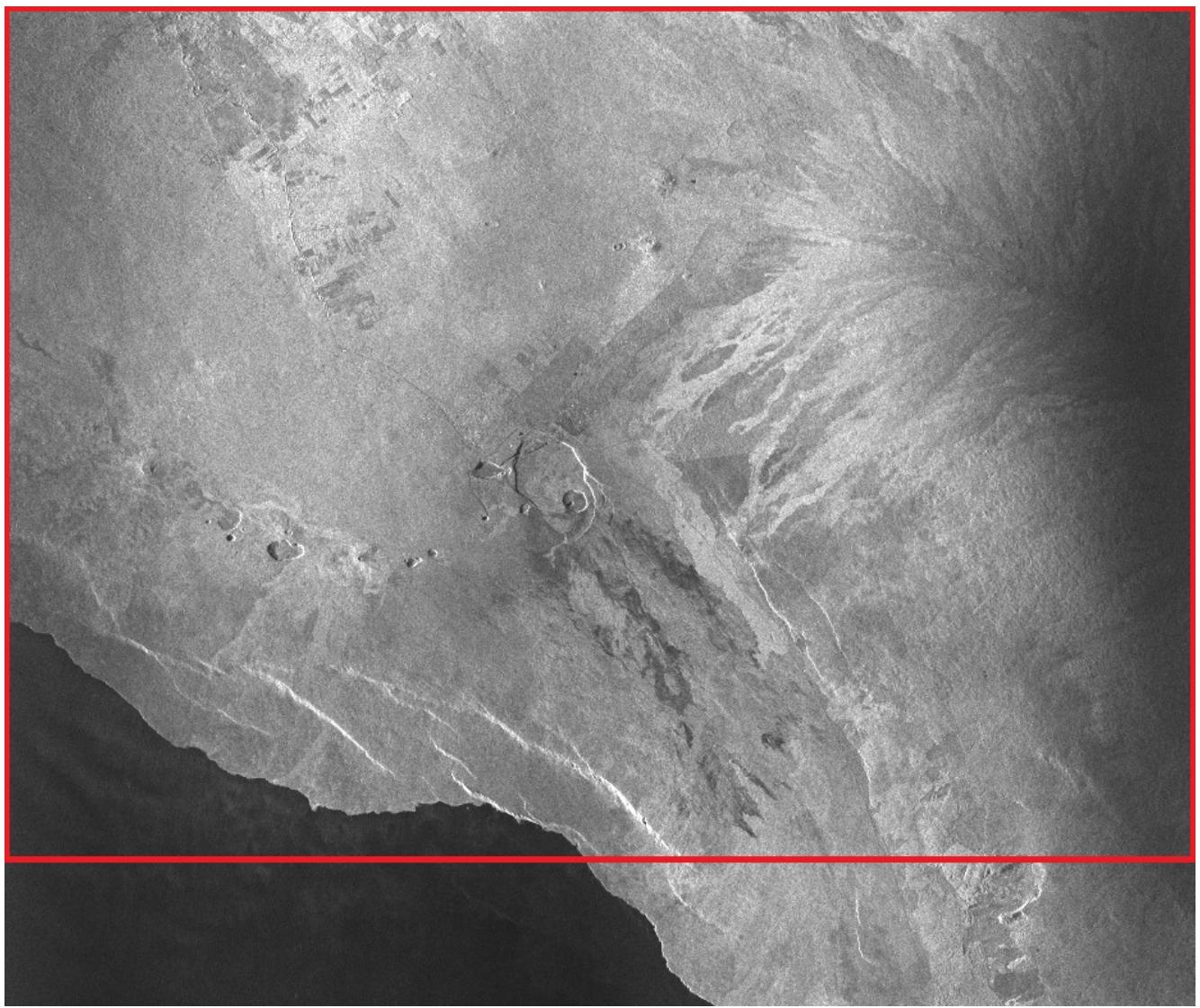


Рисунок 6.12 – Изображение, синтезированное из радиоголограммы
(без радиометрической коррекции), и выделенная его часть

Поскольку для КА «COSMO-SkyMed» доступны высокоточные измерения угловой ориентации, ошибка знания доплеровского центроида в экспериментальных исследованиях вносилась искусственно. Для различных значений внесенной ошибки выполнялось итерационное оценивание доплеровского центроида предложенным методом и классическим амплитудным подходом [214]. Ошибки вносились так, чтобы погрешность знания относительного значения доплеровского центроида составляла 0, 0,1, 0,2, минус 0,3 и минус 0,5 от частоты повторения импульсов, а погрешность знания доплеровской неопределенности варьировалась от 0 до 11. При этом анализировались число итераций, необходимых для точной оценки, и возможность корреляционно-экстремального совмещения фрагментов изображений, синтезированных по субапертурам. Критерием завершения итераций являлось непревышение максимальным значением поправки к доплеровскому центроиду порога в 0,01 от частоты повторения импульсов f_{imp} . Результаты анализа приведены в таблице 6.4.

Видно, что предложенный алгоритм, как правило, требует на 1–2 итерации меньше для получения точной оценки, чем классический амплитудный подход [214]. При этом в случаях, когда ошибка относительного значения доплеровского центроида составляет половину частоты повторения импульсов, подход [214] всё же позволяет в конце концов получить точный результат, несмотря на то, что в теории он должен перестать работать. Это объясняется наличием боковых лепестков в азимутальной диаграмме направленности антенны, за счет которых в зоне неоднозначности, не содержащей сигнал от основного лепестка из-за некорректного разделения на субапертуры, всё же присутствует очень слабый сигнал. Этот сигнал различим лишь на фоне водной поверхности. Поэтому все фрагменты, по которым подходу [214] удается в этом случае оценить доплеровскую неопределенность, локализованы в левом нижнем углу изображения. Оценки доплеровской неопределенности при этом получаются, как правило, ошибочные, из-за чего погрешность знания абсолютного значения доплеровского центроида после первой итерации может даже возрасти. Однако за счет уточнения относительного значения после первой

итерации процесс оценивания в дальнейшем сходится к точному решению. Число необходимых итераций при этом зависит от того, насколько сильно увеличилась погрешность на первой итерации. В то же время предложенный метод в этих случаях работает стабильно и уже с первой итерации приводит к существенному уменьшению погрешности знания доплеровского центроида.

Таблица 6.4 – Результаты оценивания доплеровского центроида по полному тестовому изображению

$\frac{\tilde{f}_{\partial u} - f_{\partial u}}{f_{imp}}$	Число итераций		$\frac{\tilde{f}_{\partial u} - f_{\partial u}}{f_{imp}}$	Число итераций	
	Предложен- ный метод	Подход [214]		Предложен- ный метод	Подход [214]
0	1	1	10,2; 11,2	3	6
1	3	3	-0,3; 0,7	3	4
2; 3	3	4	1,7	3	5
4; 5; 6; 7; 8; 9; 10	3	5	2,7; 3,7; 4,7; 5,7	3	4
11	4	5	6,7	4	4
0,1; 1,1	3	3	7,7	4	6
2,1; 3,1; 4,1	3	4	8,7	4	5
5,1; 6,1	3	5	9,7	4	3
7,1; 8,1; 9,1; 10,1	4	5	10,7	4	5
11,1	4	6	-0,5; 0,5	4	4
0,2; 1,2	3	3	1,5	3	6
2,2; 3,2	3	5	2,5; 3,5; 4,5	4	6
4,2	4	4	5,5	4	7
5,2	4	5	6,5	4	6
6,2; 7,2	3	5	7,5	4	5
8,2	4	5	8,5; 9,5; 10,5	4	6
9,2	3	5	Среднеквадрати- ческое отклоне- ние числа итера- ций	0,58	1,05
Среднее число итераций	3,38	4,72			

Чтобы продемонстрировать, что подход [214] в редких случаях при $\Delta f_{\text{дц отн}} \approx f_{\text{имп}}/2$ может в принципе не позволить оценить доплеровский центроид, исключим из оценивания нижнюю часть изображения, содержащую водную поверхность. Результаты оценивания доплеровского центроида по части изображения, выделенной на рисунке 6.12, приведены в таблице 6.5. При малых ошибках знания доплеровской неопределенности в рамках подхода [214] на первой итерации не находится ни одного фрагмента, который не был бы отбракован из-за недостаточно высокого значения максимума корреляционной функции, что делает оценку доплеровского центроида подходом [214] невозможной. При увеличении ошибки знания доплеровской неопределенности изображения синтезируются существенно более размытыми, из-за чего они становятся более похожими друг на друга. Поэтому для нескольких фрагментов максимум корреляционной функции начинает превышать пороговое значение. Положение максимума при этом не соответствует истинному смещению изображений, но итерационный процесс оценивания всё же выходит из проблемной точки и в конце концов сходится к точному значению. В то же время предложенный метод ведет себя стабильно, сходясь для всех рассмотренных значений начальной ошибки за 3–4 итерации.

Таблица 6.5 – Результаты оценивания доплеровского центроида по части тестового изображения

$\frac{\tilde{f}_{\text{дц}} - f_{\text{дц}}}{f_{\text{имп}}}$	Число итераций	
	Предложен- ный метод	Подход [214]
-0,5; 0,5; 2,5	3	не удалось совместить фрагменты изображений
1,5	3	8
3,5	3	7
4,5	3	4
5,5; 6,5	4	6
7,5	4	5
8,5	4	8
9,5; 10,5	4	6

Таким образом, более высокая точность предложенного метода позволяет сократить число итераций синтеза изображения и оценивания его параметров для получения точных оценок доплеровского центроида. Среднее значение числа необходимых итераций оказывается в абсолютном выражении на 1,34 или в относительном выражении на 28 % меньше, чем для подхода [214], а его случайные вариации уменьшаются в 1,8 раза. Это существенное сокращение, поскольку каждая итерация требует полноценного синтеза пары радиолокационных изображений из радиоголограммы, что является очень трудоемкой операцией. Кроме того, в отличие от подхода [214], предложенный метод стабильно позволяет выполнить оценивание доплеровского центроида в случае, когда ошибка знания его относительного значения близка к половине частоты повторения зондирующих импульсов.

6.1.4 Экспериментальное подтверждение эффективности метода уточнения угла крена при радиометрической обработке радиолокационных изображений на основе статистического амплитудно-дифференциального анализа. Для подтверждения эффективности предложенного метода были проведены экспериментальные исследования с использованием 12 радиолокационных изображений, полученных КА «TerraSAR-X» в маршрутном режиме съемки и представленных на рисунке 6.13. Данный КА выбран, поскольку для него приводится точность знания положения максимума ДНА по углу места: не хуже $0,015^\circ$, или $0,9'$ [326]. Данная ошибка складывается из точности ориентации КА по углу крена и точности электронной установки направления луча антенны.

Поскольку распространяются лишь радиометрически скорректированные изображения, исходные данные для исследования формировались за счет обращения радиометрической обработки данных космического аппарата «TerraSAR-X» с получением модельных нескорректированных изображений. Знание точности положения максимума ДНА по углу места необходимо, чтобы убедиться в радиометрической однородности объектов на скорректированных снимках, из которых моделируются исходные данные для исследования.

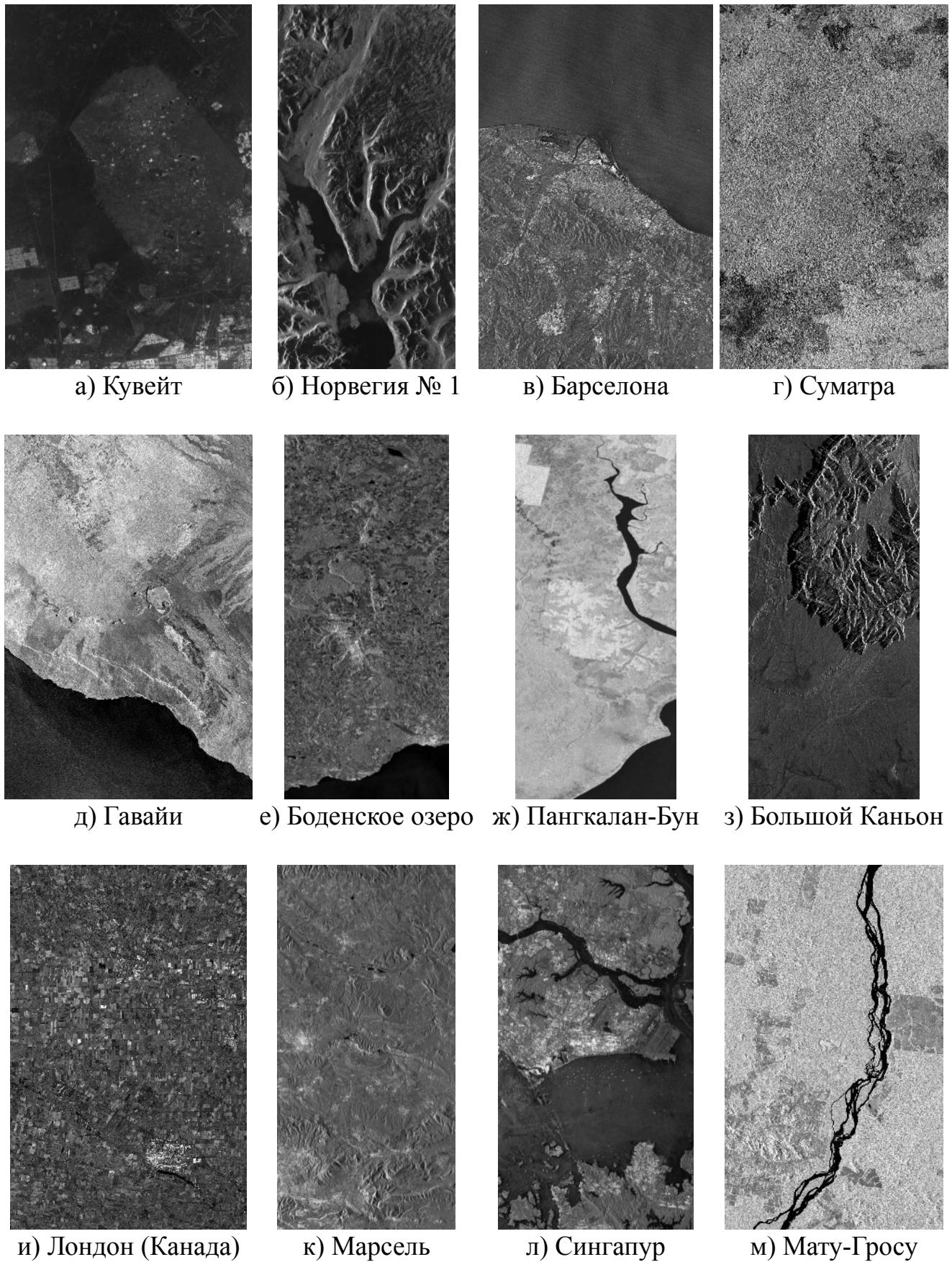


Рисунок 6.13 – Радиолокационные изображения, использованные при экспериментальных исследованиях

К каждому модельному исходному изображению применялось оценивание поправки $\Delta \alpha_m$ в двух вариантах: на основе статистического анализа распределения амплитуд сигнала изображения по углам места [218] и в соответствии с предложенным методом. Найденное значение поправки сопоставлялось с положением ДНА по углу места, использованным при обращении радиометрической обработки в процессе генерации модельного исходного изображения, с получением ошибки оценивания.

В ходе экспериментальных исследований использовались следующие параметры предложенного метода:

- минимально допустимое значение максимума коэффициента корреляции Пирсона 0,99;
- радиус низкочастотного фильтра $R_\phi = 128$ пикселей;
- порог отбраковки неоднородных объектов $\theta_{САДА} = 0,03 / \Delta \alpha_m САДА$;
- критерий продолжения итераций $\delta \alpha_m \geq 0,1'$;
- минимально допустимая доля пикселей изображения, принадлежащих однородным объектам, 40 %.

Значения ошибок оценивания, полученные для различных изображений, приведены в таблице 6.6. В скобках приведены результаты статистического амплитудно-дифференциального анализа, не принятые в расчет предложенным методом, поскольку на первом шаге оказался достаточно высок максимум коэффициента корреляции Пирсона или слишком низка доля однородных объектов.

На рисунке 6.14 приведен пример результата обращения радиометрической коррекции изображения «Кувейт» (слева), а также результатов радиометрической коррекции после уточнения положения максимума ДНА по углу места на основе анализа распределения амплитуд сигнала изображения по углам места (по центру) и в соответствии с предложенным методом (справа).

Одно изображение («Норвегия № 1») было признано непригодным для оценивания из-за слишком малой доли пикселей изображения, принадлежащих однородным объектам. Если его не отбраковать, то статистический амплитудно-диффе-

ренциальный анализ приводит к ошибке 18,1'. Это связано с особенностями наблюдавшего участка земной поверхности: преимущественно горной местностью, лишь в центральной части которой имеется относительно однородный объект – водная поверхность. Этот объект, хотя и близок к однородному, характеризуется плавными изменениями амплитуды сигнала (из-за изменения степени волнения воды и глубины водоема), которые алгоритму не удается отделить от неравномерной подсветки полосы съемки антенной РСА. Поскольку водная поверхность расположена лишь в центре полосы съемки, а в левой и правой частях однородные объекты не находятся, то неоднородность водной поверхности приводит к большой ошибке оценивания.

Таблица 6.6 – Результаты оценивания положения максимума ДНА по углу места

Изображение	Максимум коэффициента корреляции Пирсона	Доля однородных объектов, %	Ошибка оценивания, '	
			Статистический амплитудный анализ [218]	Предложенный метод
Кувейт	0,95	59,7	11,2	-0,2
Норвегия № 1	0,89	30,4	-1,3	изображение непригодно для оценивания (-18,1)
Барселона	0,99	60,9	-1,7	-1,7 (-5,3)
Суматра	1	74,1	1,6	1,6 (-2,1)
Гавайи	0,91	75,6	5,9	-0,5
Боденское озеро	0,94	49,5	-1,7	0,3
Пангкalan-Бун	0,95	70,7	-5,1	1,5
Большой Каньон № 1	0,98	50,1	2,8	-1,7
Лондон (Канада)	0,84	50,9	0,3	0,6
Марсель № 1	0,99	62,3	-2,5	-2,5 (-3)
Сингапур	0,76	43,4	-34,4	-0,5
Мату-Гросу	0,97	73,6	0,3	2,8

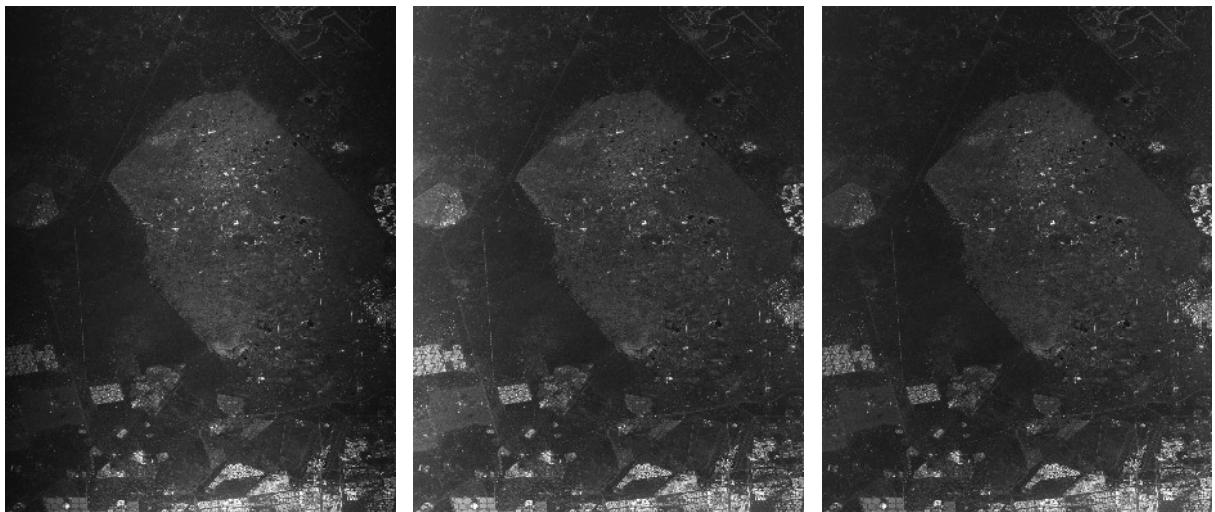


Рисунок 6.14 – Результат обращения радиометрической коррекции радиолокационного изображения «Кувейт» и результаты радиометрической коррекции после двух вариантов уточнения положения максимума ДНА по углу места

Водная поверхность в принципе является проблемным объектом для предложенного метода. Но если однородные или близкие к однородным объекты находятся по всей ширине полосы съемки, то ошибка оценивания получается умеренной. Это можно увидеть на изображении «Барселона». В нижней части изображения расположена горная местность с малым содержанием однородных объектов, а в верхней части – водная поверхность. Неоднородности водной поверхности снижают точность статистического амплитудно-дифференциального анализа, но поскольку водная поверхность занимает всю ширину полосы съемки, ошибка остается умеренной ($5,3'$).

На остальных изображениях статистический амплитудно-дифференциальный анализ обеспечивает высокую точность.

В то же время статистический амплитудный анализ [218], как и ожидалось, в большинстве случаев обеспечивает меньшую точность. Когда максимум коэффициента корреляции Пирсона отдаляется от единицы, существенно возрастает вероятность появления больших и умеренных ошибок оценивания. Лишь когда максимум коэффициента корреляции Пирсона близок к единице, т.е. наблюдаемый участок

сток земной поверхности радиометрически однороден, амплитудный анализ обеспечивает более высокую точность, чем амплитудно-дифференциальный анализ.

Поскольку предложенный метод сочетает в себе оба варианта статистического анализа, достигается наиболее высокая точность оценивания. Среднеквадратическая ошибка (квадратный корень из среднего квадрата ошибки) для предложенного метода, рассчитанная по 11 неотбракованным изображениям, составляет $1,5'$. Полученная оценка точности определения положения максимума ДНА по углу места близка к исходной точности его знания для КА «TerraSAR-X». В то же время среднеквадратическая ошибка для статистического амплитудного анализа [218] значительно больше и составляет $11,3'$. Таким образом, наблюдается средний выигрыш по точности в 7,5 раз.

6.2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА И АЛГОРИТМОВ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ, ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ОБЪЕДИНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

6.2.1 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма уточнения геодезической привязки радиолокационного изображения на основе геометрического совмещения с опорным оптическим снимком. Для оценивания точности геодезической привязки радиолокационного изображения, которая может быть достигнута с помощью предложенного алгоритма на основе совмещения с опорным оптическим снимком, проведены экспериментальные исследования с привлечением изображений от радиолокационного КА «TerraSAR-X», оптического растрового покрытия в сервисе Google Планета Земля и ЦМВ Copernicus DEM GLO-30 [313].

КА «TerraSAR-X» отличается высоким качеством измерительной информации, позволяющим привязывать радиолокационные изображения по строгой модели с точностью порядка 0,3 м при наличии качественной ЦМВ [326]. Эмпирически установлено, что оптическое растровое покрытие в сервисе Google Планета

Земля на значительную часть земной суши также отличается метровой точностью привязки к геодезическим координатам, хотя официальные данные по точности привязки отсутствуют, а также имеются районы, данные на которые имеют ошибку привязки более десятка метров [327]. Абсолютная погрешность ЦМВ Copernicus DEM GLO-30 с вероятностью 90 % не превышает 4 м [313].

В случае максимальной точности всех привлекаемых данных совмещение радиолокационного и оптического изображений должно дать нулевые поправки к строгой модели привязки радиолокационного изображения, поэтому вносимые поправки можно считать погрешностями совмещения. Однако поскольку максимальной точностью отличаются только данные КА «TerraSAR-X», вносимые предлагаемым алгоритмом поправки могут быть обусловлены не только ошибками совмещения, но и погрешностями оптического растрового покрытия и ЦМВ. Тем не менее, их можно считать верхней границей погрешностей предлагаемого алгоритма.

Экспериментальные исследования проведены на 20 имеющихся в открытом доступе изображениях в антенной или путевой системах координат, полученных КА «TerraSAR-X» в маршрутном или прожекторном режимах съемки. Для каждого радиолокационного изображения из сервиса Google Планета Земля загружалось опорное оптическое изображение, которое затем преобразовывалось в antennную или путевую систему координат с учетом ЦМВ Copernicus DEM GLO-30. В соответствии с предлагаемым алгоритмом выполнялось определение коэффициентов малопараметрической модели геометрического рассогласования совмещаемых изображений с последующей коррекцией параметров строгой модели привязки радиолокационного изображения. По результатам работы алгоритма вычислялась среднеквадратическая ошибка как корень квадратный из среднего квадрата длин векторов смещений координат объектов, измеряемых в пикселях изображения после коррекции параметров строгой модели привязки.

Усреднение выполнялось по всей площади изображения. Совмещение выполнялось в двух масштабах: сначала с шагом пикселя 16 м, размером фрагмента 64×64 пикселя и радиусом области поиска 1536 м, а затем с шагом пикселя 4 м, размером фрагмента 48×48 пикселей и радиусом области поиска 32 м. Начальное значение

ние расстояния между центрами соседних фрагментов выбрано в 4 раза большим стороны фрагмента, конечное значение выбрано равным стороне фрагмента в грубом масштабе и четверти стороны фрагмента в детальном масштабе. Минимально допустимым значением модуля коэффициента корреляции Пирсона выбрано 0,15, в качестве $N_{част}$ – значение 2. Максимально допустимый разброс координат точек максимума модуля коэффициента корреляции Пирсона для $N_{част}$ частей фрагмента выбран в 1 пиксель. Критерий малости отклонений результатов корреляции отдельных фрагментов от аппроксимирующей модели: $\sqrt{\sigma_{pm}^2 + \sigma_{pn}^2} \leq 0,75$ пикселя. Минимально допустимое количество неотбракованных результатов корреляции отдельных фрагментов для построения билинейной модели геометрических рассогласований выбрано равным 10. Для определения плоскопараллельного сдвига достаточно одного фрагмента.

Для всех 20 радиолокационных изображений предлагаемый алгоритм обеспечил положительный результат совмещения с опорным оптическим снимком. Полученные оценки среднеквадратической ошибки приведены в таблице 6.7. В последних двух столбцах таблицы указано, удалось ли в соответствующем масштабе применить билинейную модель геометрических рассогласований совмещаемых изображений или пришлось ограничиться плоскопараллельным сдвигом. В абсолютном большинстве случаев билинейную модель удалось применить. Плоскопараллельный сдвиг использовался лишь для нескольких изображений, полученных в прожекторном режиме и отличающихся крайне малой площадью кадра, а также для одного маршрута, треть которого занимает водная поверхность, в пределах которой корреляционно-экстремальное совмещение не представляется возможным.

Наибольшее число фрагментов для совмещения находится в пределах равнинной местности (рисунок 6.15, слева). Для высотной городской застройки (рисунок 6.15, по центру) наблюдается достаточно хорошая корреляция радиолокационного и оптического изображений, однако из-за недостаточной точности и детальности опорной ЦМВ имеются внутrikадровые геометрические искажения высотных объектов (крыши зданий смешены относительно основания). Из-за указанных искажений результаты совмещения существенно отклоняются от малопараметрической модели и

отбраковываются предложенным алгоритмом. Наиболее сложным сюжетом для корреляционного совмещения является горная местность (рисунок 6.15, справа). Различия объектов, представленных на радиолокационном и оптическом снимках, настолько велики, что даже человеку трудно понять, как смешены эти снимки друг относительно друга. Кроме того, в горной местности также наблюдаются внутрикадровые геометрические искажения из-за недостаточной точности и детальности опорной ЦМВ.

Таблица 6.7 – Результаты совмещения радиолокационных и оптических изображений

Изображение	Режим	Среднеквадратическая ошибка, м	Билинейная модель в масштабе	
			грубом	детальном
Пангкалан-Бун	Маршрутный	3,75	Да	Да
Улуру № 1	Прожекторный	2,93	Да	Да
Боденское озеро	Маршрутный	1,85	Да	Да
Марсель № 5	Маршрутный	5,89	Да	Да
Медный рудник, Чили № 1	Прожекторный	4,70	Да	Да
Иран	Прожекторный	2,17	Нет	Да
Намибия	Прожекторный	4,20	Да	Да
Суматра	Маршрутный	3,54	Да	Да
Барселона	Маршрутный	3,38	Нет	Нет
Кувейт	Маршрутный	2,08	Да	Да
Норвегия № 1	Маршрутный	4,83	Да	Да
Норвегия № 2	Маршрутный	4,35	Да	Да
Гибралтарский пролив	Маршрутный	4,17	Да	Да
Сингапур	Маршрутный	4,71	Да	Да
Гавайи	Маршрутный	5,61	Да	Да
Лондон (Канада)	Маршрутный	6,63	Да	Да
Шведт	Прожекторный	6,47	Нет	Да
Сан-Хосе	Маршрутный	3,44	Да	Да
Мату-Гросу	Маршрутный	4,20	Да	Да
Тусон	Прожекторный	1,93	Нет	Нет

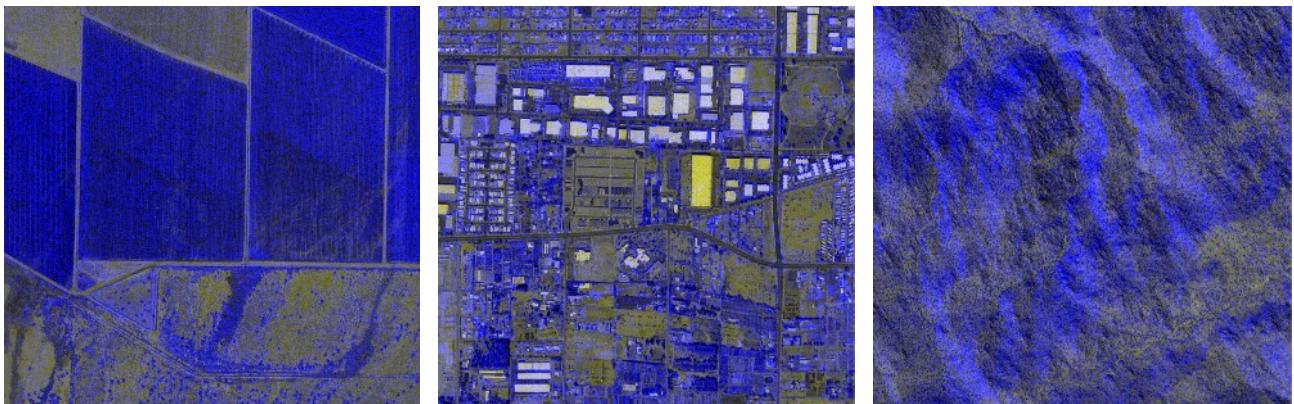


Рисунок 6.15 – Примеры совмещения радиолокационного (синий канал) и оптического (красный и зелёный каналы) изображений для равнинной местности (слева), городской застройки (по центру) и горной местности (справа) после преобразования в картографическую проекцию

Среднее значение среднеквадратической ошибки по 20 изображениям, использованным при экспериментальных исследованиях, составило $4,04 \approx 4$ м. Таким образом, предлагаемый алгоритм в среднем может обеспечить привязку радиолокационного изображения к опорному оптическому снимку с погрешностью порядка 4 м.

6.2.2 Экспериментальное подтверждение увеличения скорости геометрической обработки радиолокационных изображений при применении аппроксимирующих моделей массовых координатных преобразований. Для экспериментального подтверждения вычислительной эффективности предложенных аппроксимирующих моделей массовых координатных преобразований измерены скорости ортотрансформирования радиолокационного изображения и трансформирования дополнительного изображения интерферометрической пары в систему координат основного. Замеры скорости выполнены на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-6800K и 32 ГБ оперативной памяти.

При ортотрансформировании использовались 3 варианта массовых координатных преобразований: по строгой модели, на основе кусочно-линейных трехмерных решеток [226] и на основе предложенных кусочно-параболических решеток. Измеренные скорости обработки изображения размером 11000×6000 пиксе-

лей приведены в таблице 6.8. Видно, что предложенная аппроксимирующая модель многократно ускоряет обработку по сравнению с применением строгих расчетов. Более того, она даже оказывается немного быстрее модели на основе кусочно-линейных трехмерных решеток [226], характеризующейся меньшим объемом вычислений. Это объясняется тем, что предложенная решетка содержит мало узлов и целиком помещается в кэш-память процессора, а для хранения решетки [226] требуется значительный объем оперативной памяти, доступ к которой более медленный.

Таблица 6.8 – Скорости ортотрансформирования радиолокационного изображения при различных моделях массовых координатных преобразований

Модель массовых координатных преобразований	Скорость, Мбайт/с
Строгая	6,9
Кусочно-линейные аппроксимирующие решетки	72,1
Кусочно-параболические аппроксимирующие решетки	72,5

При трансформировании дополнительного радиолокационного изображения интерферометрической пары в систему координат основного применялись 3 варианта массовых координатных преобразований с учетом опорной ЦМВ: по строгой модели, по упрощенной модели [230] и по предложенной аппроксимирующей модели. Измеренные скорости обработки приведены в таблице 6.9. Видно, что предложенная аппроксимирующая модель массовых координатных преобразований обеспечивает наибольшую скорость обработки.

Таблица 6.9 – Скорости трансформирования дополнительного радиолокационного изображения интерферометрической пары в систему координат основного при различных моделях массовых координатных преобразований

Модель массовых координатных преобразований	Скорость, Мбайт/с
Строгая	6,4
Упрощенная [230]	37,7
Предложенная	75,1

6.2.3 Экспериментальное подтверждение эффективности метода объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики в условиях низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных. С целью подтверждения эффективности предложенного метода проведены экспериментальные исследования с использованием имеющихся в открытом доступе пар высокодетальных радиолокационных изображений одной местности с восходящего и нисходящего витков орбиты. Доступны только две пары таких изображений от КА «TerraSAR-X», входящие в наборы изображений «Марсель» и «Медный рудник, Чили». Первый набор включает 5 изображений и предназначен для радарграммической обработки, однако изображения № 1 и № 5 имеют значительную площадь пересечения, получены с витков разного типа и могут быть также применены в рамках исследуемого объединения. Второй набор включает 2 изображения с витков разного типа и изначально предназначен для задачи объединения.

В качестве низкодетальных опорных стереофотограмметрических данных использовался результат объединения ЦМВ ASTER GDEM [314] и Alos World 3D 30 [315] с помощью алгоритма, рассмотренного в параграфе 4.1.

Экспериментальные исследования проводились по двум направлениям.

В рамках первого направления подтверждалось сокращение площади дефектных участков на результате объединения предложенным методом по сравнению с исходными изображениями. Для этого выполнялось ручное выделение дефектных участков с переналожениями сигналов и радиотенями на первом из объединяемых изображений и на результате объединения, а затем сопоставлялись суммарные площади выделенных участков. Результаты исследований приведены в таблице 6.10. Видно, что на результате объединения площадь дефектов сокращается примерно в 6 раз.

В рамках второго направления исследовалось появление ложных границ объектов на результате объединения. При этом предложенный метод на основе нечеткой логики сравнивался с алгоритмом четкого объединения [287], а также компромиссным подходом, когда дефектные области выделялись так же, как в предложенном методе, но нечеткие признаки переналожения и затенения заменялись четкими по по-

рого 0,5. Пример результатов трех вариантов объединения для фрагментов изображений из набора «Марсель» приведен на рисунках 6.16 и 6.17. На каждом из результатов объединения вручную выделялись ложные границы с подсчетом количества выделенных пикселей. Результаты подсчета приведены в таблице 6.11. Видно, что предложенный метод не приводит к появлению ложных границ в условиях низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных. В то же время известный алгоритм [287] порождает значительное количество ложных границ. Компромиссный подход за счет более точного выделения дефектных областей, предложенного в параграфе 3.4, приводит к сокращению количества ложных границ, но полное их отсутствие обеспечивается только применением нечеткой логики в соответствии с предложенным методом.

Таблица 6.10 – Доля пикселей с геометрическими дефектами до и после объединения изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты

Изображение	Доля дефектов, %
Первое (основное) объединяемое изображение	31,6
Результат объединения	5,3

Таблица 6.11 – Доля пикселей с ложными границами объектов при различных вариантах объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты

Вариант объединения	Доля дефектов, %
Алгоритм [287]	0,5637
Компромиссный вариант	0,3061
Предлагаемый метод	0,0000

Таким образом, в отличие от известных алгоритмов, предложенный метод позволяет в 6 раз сократить площадь геометрических дефектов на результате объединения изображений в условиях низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных без появления ложных границ объектов.

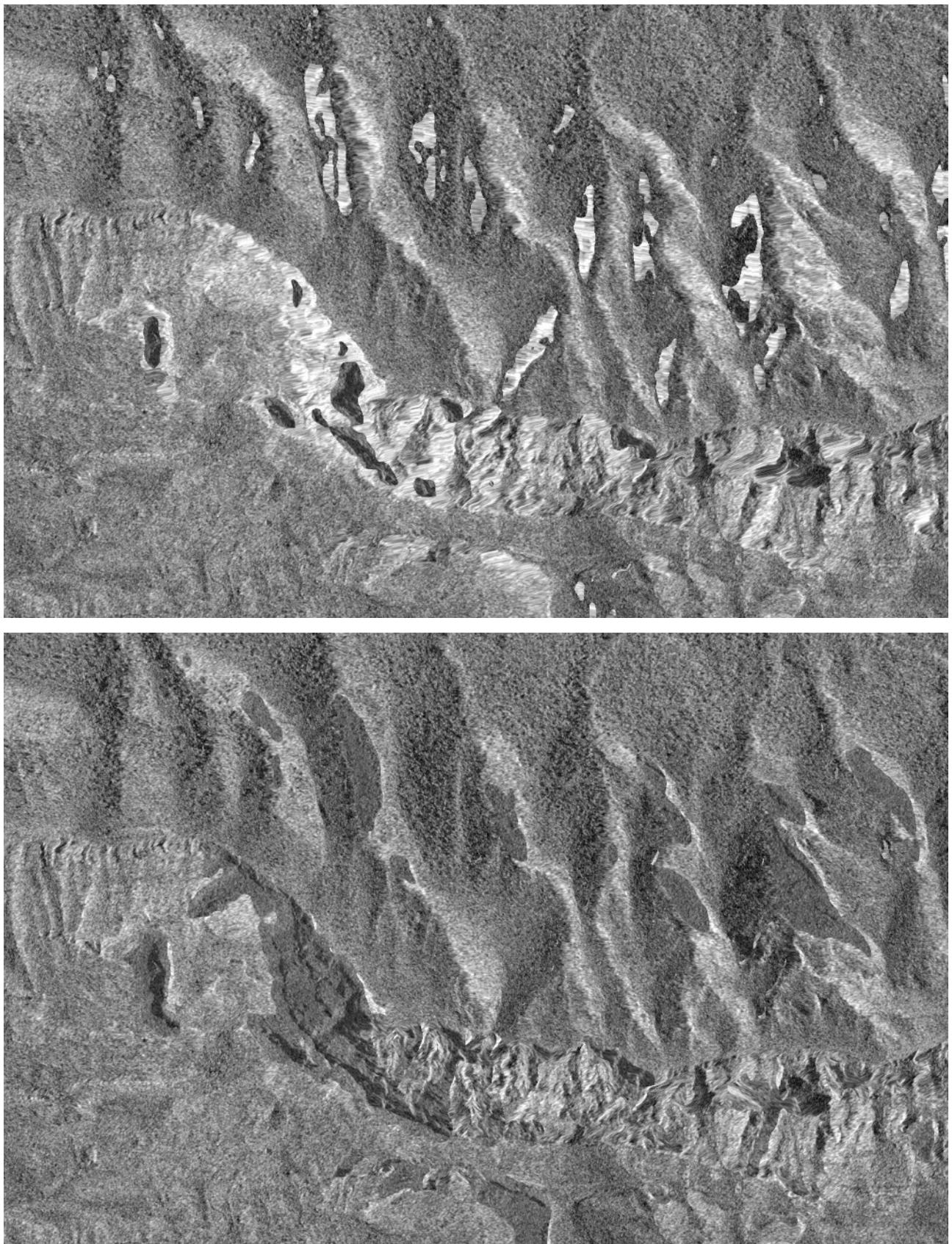


Рисунок 6.16 – Пример результата объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты алгоритмом [287] (сверху) и компромиссным подходом (снизу)

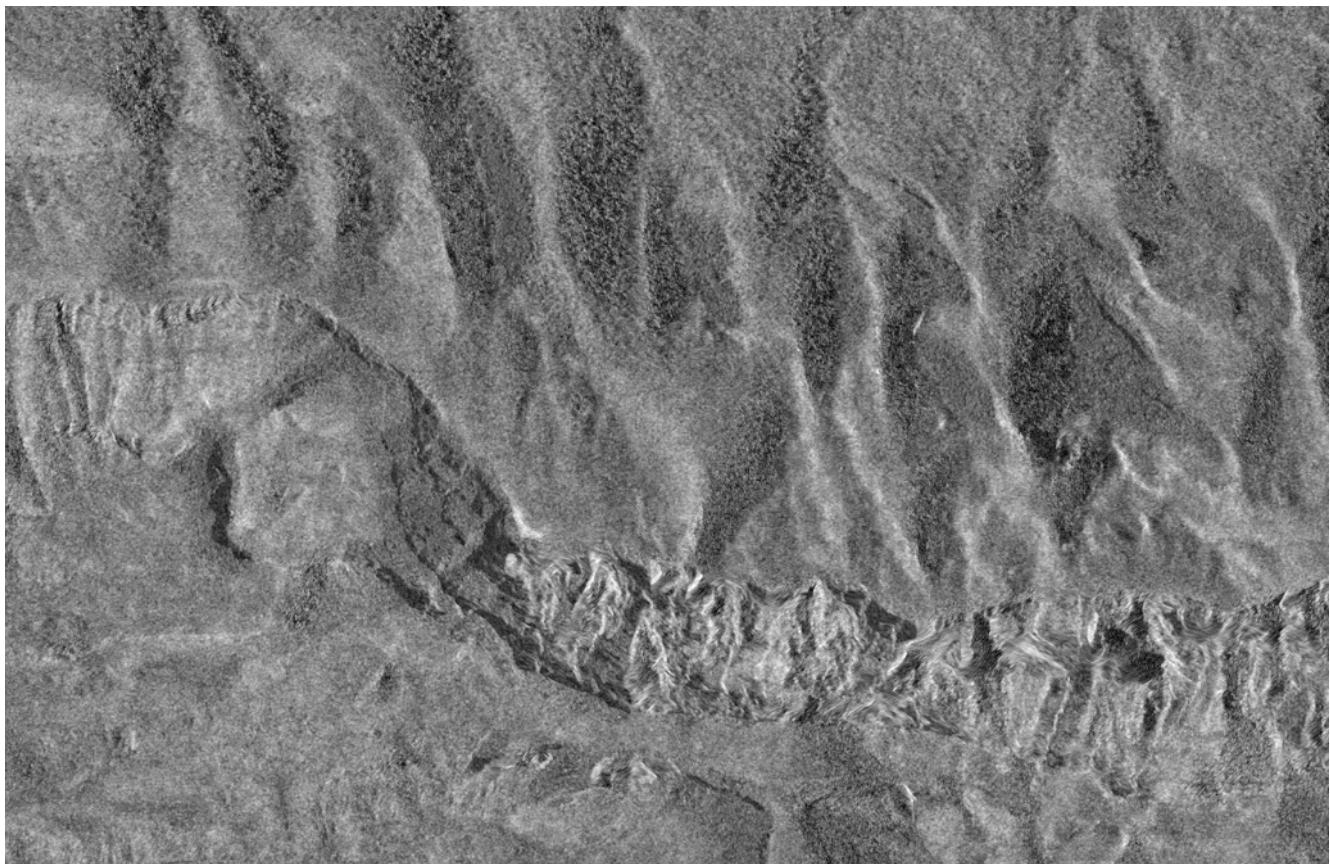


Рисунок 6.17 – Пример результата объединения радиолокационных изображений предложенным методом

Из рисунка 6.17 также видно, что дополнительным преимуществом предложенного метода является уменьшение спекл-шума в областях, в пределах которых на обоих объединяемых изображениях отсутствуют геометрические дефекты.

6.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ НИЗКОДЕТАЛЬНОЙ СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

6.3.1 Описание эксперимента. Для подтверждения эффективности метода обработки интерферометрических изображений, предложенного в главе 4, поставлен эксперимент по его сравнению с зарубежным программным обеспечением интерферометрической обработки.

Программное обеспечение, способное выполнять интерферометрическую обработку, перечислено в пункте 1.3.11. Из указанного списка свободно распро-

страняются только DORIS, GMTSAR и SNAP. Остальные программные продукты являются платными. При этом последние версии проприетарного зарубежного программного обеспечения интерферометрической обработки в условиях санкций в Россию не поставляются. Кроме того, из свободно распространяемых программ только SNAP поддерживает интерферометрическую обработку с целью формирования цифровых моделей высот, а в DORIS и GMTSAR реализована лишь дифференциальная интерферометрия, выявляющая смещения наблюдаемых объектов.

С учетом вышесказанного соискателю для проведения экспериментальных исследований доступно следующее программное обеспечение формирования интерферометрических ЦМВ:

- расширение SARscape 4.3 для программной платформы ENVI 4.8 (2010 года выпуска);
- GAMMA Interferometric SAR Processor (2012 года выпуска);
- PCI Geomatica 2020;
- SNAP 11 (2024 года выпуска).

Также в исследованиях использована программная реализация первой попытки создания высокоточного метода интерферометрической обработки, предпринятой в [266]. Реализация доступна для сравнения, поскольку ее автор является сотрудником той же организации, что и соискатель.

В рамках эксперимента сопоставляемым программным обеспечением выполнялась обработка 10 свободно распространяемых интерферометрических пар радиолокационных изображений от зарубежных КА «TerraSAR-X», «RadarSat-2» и «Sentinel-1A/B». Полученные ЦМВ в картографической проекции UTM с геодезическими высотами над эллипсоидом WGS 84 и шагом пикселя 3 м для прожекторного режима КА «TerraSAR-X», 7 м для маршрутных режимов КА «TerraSAR-X» и «RadarSat-2», 15 м для КА «Sentinel-1A/B» попиксельно сопоставлялись с опорными данными в виде результата объединения низкодетальных стереофотограмметрических ЦММ ASTER GDEM [314] и Alos World 3D 30 [315] с помощью алгоритма, рассмотренного в параграфе 4.1. При сопоставлении ортометрические высоты на опорных данных приводились к геодезическим с применением модели геоида

EGM96. В результате сопоставления находилась среднеквадратическая ошибка высоты $\sigma_{\text{выс}}$ на каждой из сформированных интерферометрических ЦМВ. Из-за низкой детальности опорных данных полученные значения среднеквадратической ошибки обусловлены не только погрешностями интерферометрической обработки, но и мелкими деталями высотных объектов, отсутствующими на опорных данных. Кроме того, все сопоставляемые программы используют опорные данные при обработке и в той или иной степени стараются приблизить к ним результирующую ЦМВ. Эти особенности несколько искажают полученные оценки качества обработки.

Тем не менее, для одной из интерферометрических пар (окрестности г. Финикс, штат Аризона, США, КА «RadarSat-2»), участвующих в исследованиях, доступны альтернативные высокоточные эталонные данные о высоте. Это результат стереофотограмметрической обработки пары оптических снимков от отечественного КА «Ресурс-П», имеющий пространственное разрешение и вертикальную точность порядка 1 м. Для указанной интерферометрической пары сопоставление результирующей ЦМВ выполнено как с опорными данными, так и с высокоточной эталонной информацией. Показано, что отличия полученных оценок невелики и существенно меньше выявленной разницы в качестве результатов обработки, обеспечиваемых различными программами. Таким образом, оценки, полученные для остальных 9 интерферометрических пар, также можно считать достоверными.

Также для обеспечения корректности сопоставления результатов интерферометрии с эталонными данными гарантировалась высокая точность геодезической привязки исходных пар радиолокационных изображений. Для «TerraSAR-X» и «Sentinel-1A/B» она обеспечивалась высокоточной измерительной информацией. В составе метаданных продуктов КА «RadarSat-2» поставляется лишь прогнозная орбита, поэтому для всех изображений от КА «RadarSat-2» привязка была уточнена по данным сервиса Google Планета Земля с помощью алгоритма, рассмотренного в параграфе 3.1.

В большинстве сопоставляемых программ интерферометрическая обработка реализована в виде разрозненных операций, каждую из которых должен запускать

оператор. При этом имеется некоторая вариативность в составе и порядке запускаемых операций. Однако каждый программный продукт сопровождается документацией и обучающими примерами, в которых рекомендуются типовые состав и порядок запускаемых операций. В рамках экспериментальных исследований соискатель старался по возможности придерживаться этих рекомендаций, а также оставлять значения параметров обработки по умолчанию. Случаи, когда это не удалось, описаны ниже отдельно для каждого программного продукта.

6.3.2 Описание интерферометрической обработки в SARscape 4.3. Среди зарубежных программных продуктов наибольшей степенью автоматизации отличается SARscape 4.3. В нем интерферометрическая обработка сводится к последовательному выполнению следующих команд:

- импорт интерферометрической пары изображений во внутренний формат программы;
- «Interferogram To Phase Unwrapping» – предварительная интерферометрическая обработка и развертывание фазы;
- ввод координат опорных точек;
- «Refinement And Re-flattening» – уточнение интерферометрической базы и средней высоты наблюдаемых объектов;
- «Phase To Height Conversion And Geocoding» – пересчет фазы в высоту с последующим ортотрансформированием.

Большинству параметров команд оставлялись значения по умолчанию, за исключением следующих параметров:

- для «Azimuth Looks» и «Range Looks» задавались единичные значения (обработка интерферограмм в исходном разрешении радиолокационных изображений);
- включалась опция совмещения пары изображений с учетом опорной ЦМВ (за исключением интерферометрической пары г. Финикс, где из-за программной ошибки в SARscape такое совмещение выполнялось неточно);

– для развертывания фазы выбирались оба поддерживаемых алгоритма: «Region Growing» (RG, на основе наращивания областей) и «Minimum Cost Flow» (MCF, на основе минимизации стоимости потоков в транспортных сетях);

– при обработке больших интерферограмм для развертывания фазы SARscape 4.3 не хватает 2 Гбайт оперативной памяти, которыми ограничено 32-разрядное приложение, в таких случаях параметру «Decomposition Levels» выставлялось значение 2 (развертывание прореженной в 2 раза интерферограммы с последующей интерполяцией к единичному масштабу).

Также в SARscape 4.3 имеется программная ошибка (перепутаны ширина и высота изображения), из-за которой нельзя ввести опорные точки, расположенные в строках, номер которых превышает ширину изображения. Поэтому на вытянутых в вертикальном направлении интерферограммах опорные точки вводились только в верхней части, что могло негативно сказаться на точности результатов обработки.

6.3.3 Описание интерферометрической обработки в GAMMA Interferometric SAR Processor (GAMMA ISP). GAMMA ISP представляет собой набор консольных программ, выполняющих отдельные операции интерферометрической обработки. Для формирования интерферометрической ЦМВ в исследованиях применялась следующая последовательность программ:

- программа импорта интерферометрической пары изображений во внутренний формат GAMMA ISP;
- create_offset – программа создания файла параметров совмещения пары изображений;
- init_offset_orbit – программа вычисления среднего смещения изображений по орбитальным данным;
- offset_pwr – программа корреляционно-экстремального совмещения фрагментов изображений; с параметрами по умолчанию аварийно завершает работу; для корректной работы программы передавался параметр совмещения в единичном масштабе;

- offset_fit – программа полиномиальной аппроксимации результатов корреляционно-экстремального совмещения;
- SLC_interp – программа геометрического трансформирования дополнительного исходного радиолокационного изображения в систему координат основного;
- SLC_intf – программа формирования интерферограммы;
- base_init – программа расчета интерферометрической базы (использовался расчет по орбитальным данным);
- ph_slope_base – программа выравнивания интерферограммы;
- cc_wave – программа расчета когерентности;
- adf – программа подавления шумов фильтром Голдштейна; с параметрами по умолчанию слишком слабо фильтрует интерферограмму, из-за чего оказываются неработоспособны программы развертывания фазы, поэтому передавался коэффициент фильтрации, равный единице;
- программы развертывания фазы, рассматриваемые ниже;
- gcp_phase – программа дополнения файла опорных точек данными о развернутой фазе; равномерно распределенные опорные точки извлекались из опорных стереофотограмметрических данных и записывались в файл внутреннего формата GAMMA ISP перед запуском программы;
- base_ls – программа уточнения интерферометрической базы и оценки средней высоты по опорным точкам;
- hgt_map – программа пересчета развернутой фазы в высоту;
- create_dem_par – программа создания файла параметров ортотрансформирования;
- gc_insar – программа выполнения массовых координатных преобразований;
- geocode – программа трансформирования по прямому закону.

GAMMA ISP поддерживает два варианта развертывания фазы.

В рамках первого варианта (ВС) вызывались следующие программы:

- corr_flag – программа отбраковки областей низкой когерентности; на вход подавалась корегентность, пересчитанная программой adf; порог отбраковки по когерентности выбирался индивидуально для каждой интерферограммы из диапазона от 0,6 до 0,8 с учетом компромисса между количеством сингулярных точек и связностью неотбракованных областей на интерферограмме;
- neutron – программа отбраковки ярких областей на исходных изображениях;
- residue_cc – программа выявления сингулярных точек, игнорирующая области низкой когерентности;
- tree_cc – программа, реализующая алгоритм развертывания фазы на основе отсечения ветвей; не может обработать интерферограмму целиком из-за ограничений на количество сингулярных точек, деревьев и ветвей в каждом дереве; обеспечение работоспособности программы достигалось за счет усиленной фильтрации программой adf, подбора порога отбраковки в программе corr_flag, а также многократного запуска tree_cc по перекрывающимся фрагментам интерферограммы шириной 1500–6000 пикселей;
- grasses – программа интегрирования фазы в обход ветвей отсечения.

Часть программ рассмотренного варианта развертывания фазы не может обрабатывать целиком большие интерферограммы, поскольку является 32-разрядным приложением и вместо блочной обработки пытается считать в оперативную память весь обрабатываемый растр. Такие программы запускались многократно по различным перекрывающимся фрагментам интерферограммы, а затем их результаты «сшивались» в один файл.

В рамках второго варианта развертывания фазы (MCF) вызывались следующие программы:

- rascc_mask – программа отбраковки областей низкой амплитуды и/или когерентности; отбраковка по амплитуде не выполнялась; при отбраковке по когерентности использовался тот же порог, что и в программе corr_flag;
- mcf – программа развертывания фазы алгоритмом на основе минимизации стоимости потоков в транспортной сети; передавалось такое количество фрагмен-

тов для разбиения интерферограммы, при котором 32-разрядному приложению хватало оперативной памяти для обработки.

КА «TerraSAR-X» и «RadarSat-2» были запущены задолго до выпуска используемых версий SARscape и GAMMA ISP, поэтому импорт данных от этих аппаратов осуществлялся штатными средствами программ. КА «Sentinel-1A/B» были запущены после выпуска используемых версий SARscape и GAMMA ISP, поэтому импорт данных с этих КА во внутренние форматы программ осуществлялся собственными средствами соискателя.

6.3.4 Описание интерферометрической обработки в PCI Geomatica 2020.

PCI Geomatica 2020 предоставляет ряд функций, выполняющих отдельные этапы интерферометрической обработки, которые могут быть вызваны из Python-окружения, командного интерпретатора Geomatica EASI либо графического интерфейса пользователя в среде Geomatica Focus:

- функция INSCOREG совмещения пары изображений;
- функция INSRAW формирования интерферограммы;
- функция INSTOPO выравнивания интерферограммы;
- функция INSMODGOLD фильтрации интерферограммы;
- функция INSADJUST уточнения интерферометрической базы по интерферограмме;
- функция INSUNWRAP развертывания фазы;
- функция DEMADJUST пересчета фазы в высоту с оценкой средней высоты по опорным данным;
- функции GEOCODEDEM и ORTHO ортотрансформирования матриц высот или с учетом опорных данных о высоте.

Функция INSUNWRAP использует для развертывания фазы стороннее свободно распространяемое программное обеспечение SNAPHU, реализующее алгоритм [250] на основе минимизации стоимости потоков в транспортной сети.

Для функции GEOCODEDEM, изначально разработанной для стереофотограмметрических матриц высот в эпиполярной геометрии, заявлена поддержка интерферометрических матриц высот, однако получить положительные результаты с

помощью этой функции не удалось, поэтому интерферометрические матрицы высот преобразовывались в картографическую проекцию с помощью функции ORTHO, использующей опорную ЦМВ.

Функции PCI Geomatica 2020 вызывались из библиотеки алгоритмов в среде Geomatica Focus в следующем порядке:

- 1) импорт интерферометрической пары изображений в формат PIX;
- 2) вызов функций INSCOREG и INSRAW;
- 3) вызов функции INSTOPO в режиме без вычитания опорной топографической фазы;
- 4) для данных от КА «RadarSat-2» и «Sentinel-1A/B»:
 - вызов функции INSTOPO в режиме вычитания опорной топографической фазы;
 - вызов функции INSMODGOLD для фильтрации дифференциальной интерферограммы;
 - вызов функции INSADJUST уточнения интерферометрической базы по фильтрованной дифференциальной интерферограмме с коррекцией интерферограммы, полученной на шаге 3;
- 5) вызов функции INSMODGOLD для фильтрации интерферограммы, полученной на шаге 3 для данных от КА «TerraSAR-X» или скорректированной на шаге 4 для данных от КА «RadarSat-2» и «Sentinel-1A/B»;
- 6) вызов функции INSUNWRAP;
- 7) преобразование опорной ЦМВ в набор равномерно распределенных опорных точек с помощью программы Geomatica OrthoEngine;
- 8) вызов функции DEMADJUST в режиме коррекции только средней высоты (параметр «Use Average»);
- 9) вызов функции ORTHO.

6.3.5 Описание интерферометрической обработки в SNAP 11. SNAP 11 имеет большие проблемы с точностью корреляционного совмещения исходной пары радиолокационных изображений. Из-за ошибок корреляции возникает геометрическое рассогласование изображений в несколько пикселей, не позволяющее

выполнить последующую обработку. При этом, поскольку для исходных изображений обеспечена высокая точность геодезической привязки, они могут быть субпиксельно совмещены по строгой геометрической модели с учетом опорной высоты. В связи с этим рекомендуемая обучающими руководствами команда «Coregistration» заменена командой «DEM Assisted Coregistration».

Анализ исходных кодов программы, имеющихся в открытом доступе, показал, с чем связана плохая точность корреляционного совмещения. По умолчанию SNAP 11 формирует результаты корреляции нескольких тысяч фрагментов совмещаемых изображений. В дальнейшем выполняется итерационное построение полиномиальной модели с отбраковкой отдельных результатов корреляции, однако количество отбраковываемых результатов ограничено лишь несколькими десятками, т.е. примерно 1 % от общего числа. В реальности доля неточных результатов корреляции оказывается гораздо больше, что и приводит к ошибкам совмещения. В то же время алгоритм, предложенный в параграфе 3.3, лишен этого недостатка.

Так же, как и PCI Geomatica 2020, SNAP 11 не имеет собственной реализации развертывания фазы и вызывает для этой задачи SNAPHU. При этом вызывается более новая версия, в которую добавлены дополнительные ограничения на число фазовых разрывов, не позволяющие развертывать фазу на больших интерферограммах сложной пересеченной местности. Поскольку исходный код SNAPHU доступен, в рамках экспериментальных исследований эти ограничения были убраны с перекомпиляцией программы, что позволило обработать все участвующие в исследованиях данные.

Таким образом, интерферометрическая обработка в SNAP 11 заключалась в выполнении следующих команд:

- импорт интерферометрической пары изображений во внутренний формат программы;
- «DEM Assisted Coregistration» – совмещение исходных изображений по строгой модели с учетом опорной ЦМВ без корреляционного уточнения;
- «Interferogram Formation» – формирование интерферограммы (без вычитания топографической фазы);

- «Goldstein Phase Filtering» – подавление шумов на интерферограмме фильтром Голдштейна;
- «Snaphu Export» – подготовка исходных данных для SNAPHU;
- «Snaphu-unwrapping» – развертывание фазы в SNAPHU;
- «Snaphu Import» – получение результатов развертывания фазы от SNAPHU;
- «Phase to Elevation» – уточнение интерферометрической базы и средней высоты наблюдаемых объектов с учетом опорной ЦМВ;
- «Range Doppler Terrain Correction» – ортотрансформирование матрицы высот в картографическую проекцию.

В SNAP 11 отсутствует реализация ортотрансформирования матриц высот по прямому закону координатного соответствия. Вместо этого применяется ортотрансформирование с привлечением опорной ЦМВ, потенциально отличающееся меньшей точностью из-за более низкой детальности опорных данных.

6.3.6 Описание интерферометрической обработки методом [266] и предлагаемым методом. Для сравнения метода [266] и метода, предложенного в главе 4, использовались программы, разработанные в НИИ «Фотон» РГРТУ. В указанных программах интерферометрическая обработка выполняется автоматически как единая операция. Реализация метода [266] не требует параметров запуска, кроме пары исходных изображений и опорной ЦМВ. Предлагаемый метод принимает в качестве параметра значение коэффициента пропорциональности величин σ_{Γ_m} и σ_{Γ_n} размеру проекции пикселя опорных стереофотограмметрических данных на пиксели интерферограммы. В качестве такого коэффициента в экспериментальных исследованиях использовалось значение 0,8.

6.3.7 Результаты эксперимента. Значения среднеквадратической ошибки высоты $\sigma_{\text{выс}}$, усредненные по всем интерферометрическим парам, участвующим в эксперименте, для различных программ обработки приведены в таблице 6.12. Видно, что предложенный метод в 2,5 раза превосходит по средней точности первую попытку создания метода высокоточной интерферометрической обра-

ботки [266] и в 10,3 раза превосходит лучшую из зарубежных программ, участвующих в эксперименте, – SARscape 4.3.

Таблица 6.12 – Средние значения среднеквадратических ошибок на ЦМВ, сформированных различными средствами интерферометрической обработки, по сравнению с опорными стереофотограмметическими данными

Средство интерферометрической обработки	$\sigma_{выс}$, м
Программная реализация предлагаемого метода	1,81
Программная реализация метода [266]	4,55
SARscape 4.3, MCF	18,71
SARscape 4.3, RG	68,64
GAMMA ISP, BC	38,37
GAMMA ISP, MCF	61,46
PCI Geomatica 2020	66,14
SNAP 11	92,48

На рисунках 6.18–6.20 приведены примеры результатов интерферометрической обработки в виде пространственного распределения ошибок высоты, представленного в цветовой шкале. Шкала является неравномерной: в пределах малых ошибок цвет изменяется быстро, а затем изменение цвета замедляется. Это позволяет сделать хорошо различимыми небольшие ошибки метода [266], связанные с остаточными атмосферными искажениями фазы, не полностью отбракованными переналожениями сигналов и затенениями. Основные ошибки зарубежных программ связаны с неточным развертыванием фазы, что в дальнейшем вносит погрешность и в процедуру уточнения интерферометрической базы. Также для зарубежных программ характерны погрешности высоты, вызванные атмосферными искажениями, не полностью отфильтрованным фазовым шумом, переналожениями сигналов и затенением объектов. В то же время ошибки, вносимые предложенным методом, минимальны.

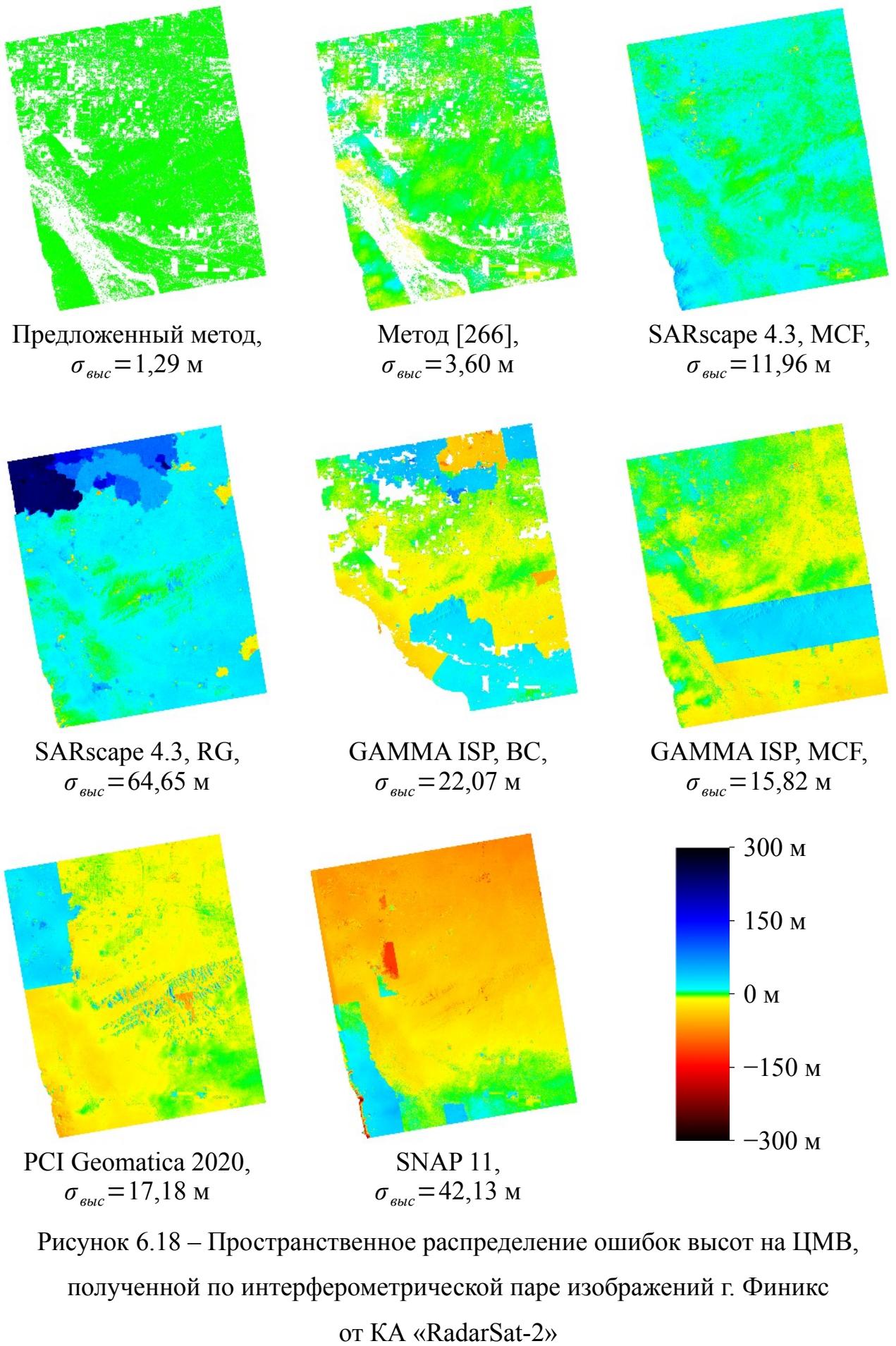


Рисунок 6.18 – Пространственное распределение ошибок высот на ЦМВ, полученной по интерферометрической паре изображений г. Финикс от КА «RadarSat-2»

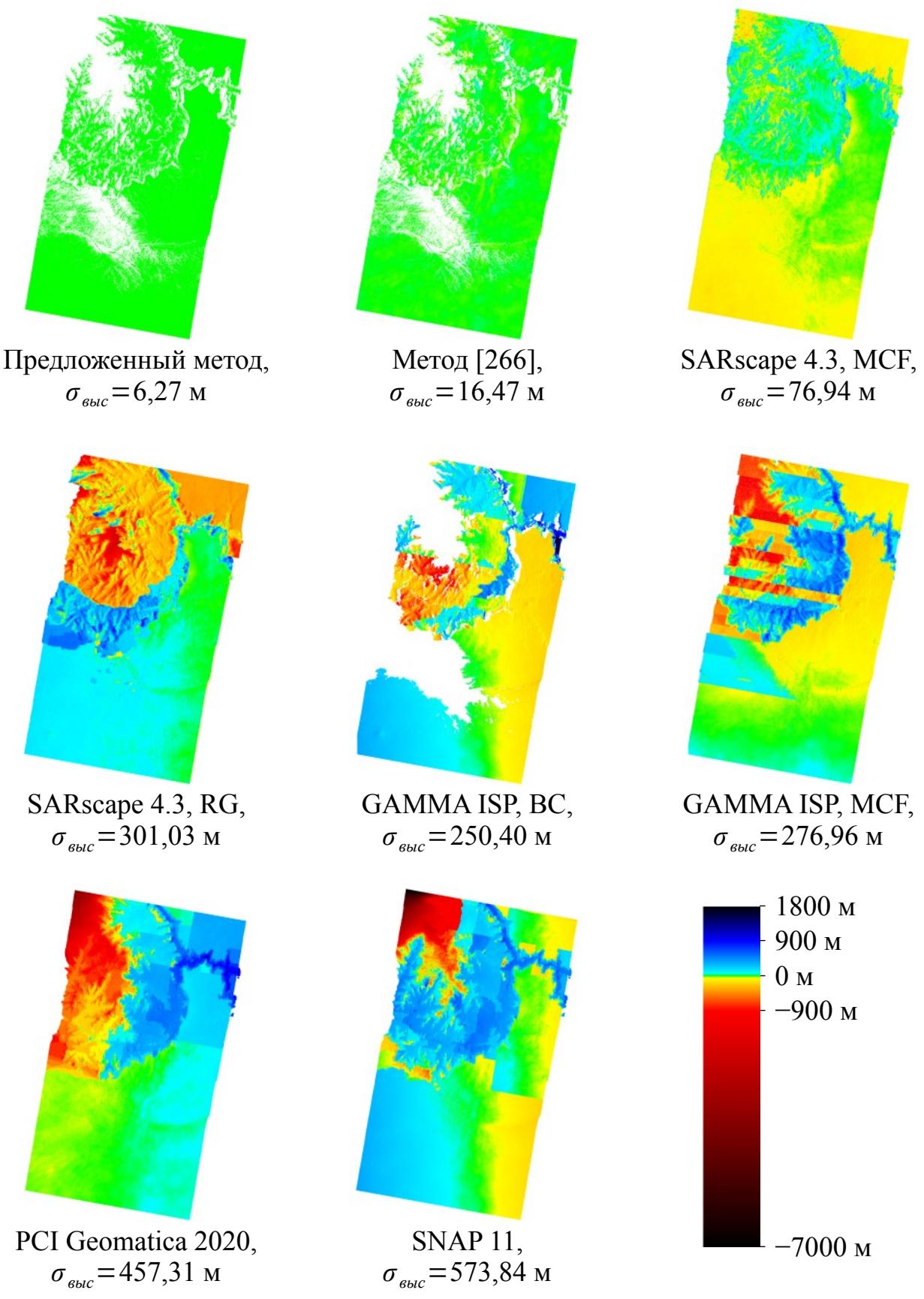


Рисунок 6.19 – Пространственное распределение ошибок высот на ЦМВ, полученной по интерферометрической паре изображений Большого Каньона от КА «TerraSAR-X»

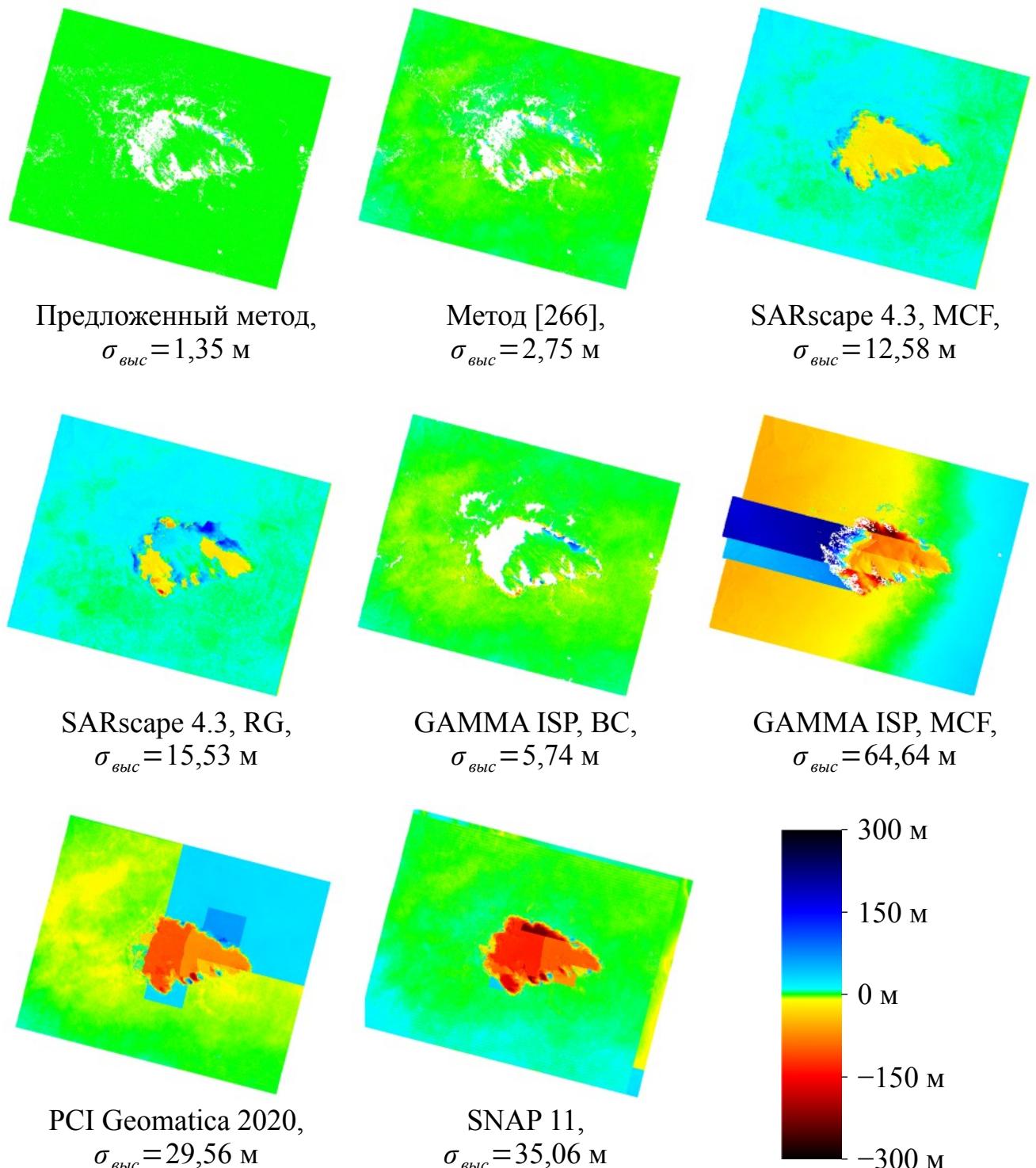


Рисунок 6.20 – Пространственное распределение ошибок высот на ЦМВ, полученной по интерферометрической паре изображений скалы Улуро от КА «TerraSAR-X»

В таблице 6.13 приведены значения среднеквадратической ошибки высоты $\sigma_{\text{выс}}$, рассчитанные для интерферометрических ЦМВ г. Финикс по отношению к

высокоточным эталонным данным. Видно, что значения ошибок близки к приведенным на рисунке 6.18. Отличие $\sigma_{\text{выс}}$ на рисунке 6.18 и в таблице 6.13 связано как с разной детальностью опорных и высокоточных эталонных данных, так и с небольшим различием средней высоты на них. Однако преимущество предложенного метода по точности намного выше погрешностей полученных оценок $\sigma_{\text{выс}}$. Это позволяет считать эффективность предложенного метода подтвержденной.

Таблица 6.13 – Значения среднеквадратических ошибок на ЦМВ г. Финикс, сформированных различными средствами интерферометрической обработки, по сравнению с высокоточными эталонными данными

Средство интерферометрической обработки	$\sigma_{\text{выс}}, \text{м}$
Программная реализация предлагаемого метода	1,97
Программная реализация метода [266]	3,75
SARscape 4.3, MCF	12,24
SARscape 4.3, RG	65,29
GAMMA ISP, BC	22,01
GAMMA ISP, MCF	15,90
PCI Geomatica 2020	17,22
SNAP 11	41,96

6.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ РАЗНОРОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

6.4.1 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах. В рамках параграфа 5.1 было показано, что предложенный алгоритм нейросетевой сегментации облачности отличается многократно меньшим объемом вы-

числений, чем наиболее распространенные нейросетевые архитектуры высокоточной сегментации. Также были приведены результаты обучения ИНС, согласно которым значение функции потерь в пределах валидационной выборки для предложенной нейросетевой архитектуры «Lanky U-Net» оказывается практически таким же, как для распространенной архитектуры «U-Net» с уменьшенным в 2 раза числом каналов в промежуточных слоях. Однако валидационная выборка отличается относительно небольшим объемом, поэтому проведены экспериментальные исследования по сравнению качества сегментации облачности предложенной и известными нейросетевыми архитектурами на более представительной тестовой выборке, включающей 87 панхроматических изображений от аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П».

В сравнении участвовали предложенная нейросетевая архитектура «Lanky U-Net», распространенная архитектура «U-Net» с уменьшенным в 2 раза числом каналов и архитектура «Cloud-Net+», обученные на одной и той же выборке. На вход сетей подавался уровень 3 радиометрической обработки в виде изображения, шаг пикселя которого увеличен в 8 раз по сравнению с исходным снимком. Маски облачности, полученные в результате нейросетевой сегментации, сопоставлялись с эталонными масками, сформированными вручную на основе визуального анализа снимков на предмет наличия облачности. По результатам сопоставления вычислялись ошибки первого и второго рода, пересчитываемые в дальнейшем в наиболее распространенные показатели качества сегментации.

Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 6.14. Видно, что показатели точности сегментации для архитектур «Lanky U-Net» и «U-Net» на тестовой выборке так же практически одинаковы, как и на валидационной выборке. Для отдельного изображения одна ИНС может быть немного лучше другой, но после набора статистики по всей выборке показатели точности выравниваются. При этом архитектура «U-Net» в среднем допускает немного меньше ошибок второго рода за счет большего количества ошибок первого рода, чем у «Lanky U-Net». ИНС «Cloud-Net+» обеспечила гораздо меньшую точность сегментации в части ошибок первого рода, чем «Lanky U-Net» и «U-Net», поскольку из-

за малого числа фрагментов изображений в пределах пакета и невозможности корректного учета краевых эффектов при обучении на одиночной видеокарте не удается в полной мере использовать возможности этой ИНС.

Таблица 6.14 – Показатели качества нейросетевой сегментации облачности

№ п/п	Изображение		$\delta_{сегм}$, %	По уровню 3						По уровням 1 и 2				
	Ши- рина	Высо- та		Cloud-Net+		U-Net		Lanky U-Net		U-Net		Lanky U-Net		
				$\alpha_{сегм}$, %	$\beta_{сегм}$, %									
1	5625	15263	34,10	0,53	25,03	0,78	21,62	0,28	27,53	0,93	20,49	0,70	24,99	
2	5625	25951	12,27	0,20	9,56	0,16	11,21	0,04	17,95	0,11	13,28	0,04	16,91	
3	6750	11081	54,62	1,04	15,96	0,79	14,66	0,52	20,80	0,27	21,41	0,23	20,41	
4	6750	11099	23,24	7,19	22,52	0,56	35,90	0,69	41,76	0,49	41,95	0,62	40,81	
5	6750	16447	10,34	0,62	33,85	0,82	27,15	0,30	34,93	0,97	20,44	0,60	33,93	
6	6750	7679	86,87	0,13	85,13	0,27	81,06	0,37	80,40	0,21	70,04	0,27	75,14	
7	6750	22788	34,67	4,46	5,93	3,47	6,71	1,15	17,16	0,80	11,09	0,53	11,49	
8	6750	25397	10,61	0,50	12,18	1,17	10,26	0,73	22,68	0,23	16,27	0,14	18,87	
9	6750	30797	14,99	0,06	17,86	0,31	14,81	0,17	19,71	0,10	21,68	0,08	18,36	
10	6750	21257	33,79	0,44	17,21	1,12	15,11	0,45	21,68	1,08	13,85	0,67	16,30	
11	4500	11137	0	11,79	–	0,91	–	0,17	–	5,53	–	0,41	–	
12	6750	13840	0	26,60	–	1,17	–	0,50	–	19,00	–	2,43	–	
13	6750	18630	0	0,74	–	0,01	–	0,04	–	0,01	–	0,00	–	
14	6750	10727	0	0,08	–	0,03	–	0,04	–	0,00	–	0,00	–	
15	5625	11298	2,43	1,29	7,43	0,04	30,74	0,02	46,29	0,07	20,87	0,07	35,38	
16	4500	11406	12,55	0,68	1,98	0,72	5,20	0,75	6,96	0,61	3,63	0,53	4,46	
17	4500	11172	72,93	2,41	10,58	5,65	2,31	9,51	1,73	4,93	1,66	7,52	0,77	
18	5625	16014	30,64	6,94	0,72	0,71	3,16	0,98	5,73	0,36	5,10	0,90	1,84	
19	5625	8094	5,76	0,05	54,58	0,32	21,83	0,14	35,78	0,43	20,46	0,38	21,70	
20	4500	8850	5,92	0,98	12,66	0,42	14,35	0,36	22,65	1,03	8,03	0,68	17,00	
21	4500	11244	49,52	1,74	8,26	5,19	4,53	2,83	11,85	2,56	3,75	4,67	2,65	
22	5625	18678	92,22	0,09	53,95	80,82	3,79	17,61	8,43	9,79	1,54	15,45	1,35	
23	5625	13818	0	31,92	–	0,03	–	0,09	–	0,54	–	0,14	–	
24	5625	13782	0	21,44	–	0,12	–	0,12	–	0,50	–	0,01	–	
25	5625	10380	70,10	85,95	1,96	20,99	5,01	27,54	5,28	40,87	0,34	18,93	1,29	
26	5625	13800	43,06	1,87	3,76	3,24	1,90	1,71	4,49	2,65	1,46	2,95	2,15	

Продолжение таблицы 6.14

Изображение			$\delta_{сегм}$, %	По уровню 3						По уровням 1 и 2				
№ п/п	Ши- рина	Высо- та		Cloud-Net+		U-Net		Lanky U-Net		U-Net		Lanky U-Net		
				$\alpha_{сегм}$, %	$\beta_{сегм}$, %									
27	5625	19956	13,05	2,94	4,25	1,46	7,52	0,96	14,66	1,59	5,96	1,35	8,29	
28	5625	20028	13,59	1,76	3,63	1,66	6,43	0,65	13,24	2,30	2,68	1,53	7,80	
29	4500	10470	91,54	90,83	0,08	60,75	8,86	64,53	11,95	36,90	1,43	64,77	0,75	
30	4500	8688	58,37	21,94	4,29	9,91	10,88	5,86	21,33	5,84	8,29	13,75	4,08	
31	4096	8704	7,12	10,26	1,07	3,82	1,95	3,15	9,24	0,43	3,05	0,56	7,87	
32	4096	9216	32,06	70,35	0,77	1,86	2,57	2,24	14,30	0,49	4,67	0,95	2,32	
33	5625	6870	96,00	41,27	0,23	33,34	1,05	23,06	1,92	35,41	0,41	36,71	0,24	
34	5625	7446	18,36	6,06	2,18	4,95	1,92	3,34	5,88	8,02	3,35	4,00	7,65	
35	5625	6511	18,56	0,63	16,46	1,79	9,14	0,91	13,35	0,90	6,92	1,19	6,60	
36	4500	4998	0,56	0,13	35,91	0,01	83,01	0,00	100,0	0,05	38,14	0,10	26,48	
37	5469	8464	0	14,23	—	2,12	—	1,01	—	0,21	—	0,15	—	
38	6289	7842	0	99,43	—	88,55	—	46,15	—	2,74	—	0,02	—	
39	6304	10753	0	11,37	—	0,75	—	0,56	—	1,97	—	0,25	—	
40	6338	10287	0	72,57	—	0,00	—	0,30	—	0,00	—	0,00	—	
41	5145	17923	0	0,34	—	0,02	—	0,02	—	0,01	—	0,00	—	
42	5183	8319	0	2,82	—	0,92	—	0,32	—	1,51	—	0,57	—	
43	5246	17887	25,24	10,85	5,18	0,85	13,88	0,23	18,10	6,05	9,18	1,41	19,10	
44	5537	22664	6,34	0,31	53,03	0,39	84,44	0,01	99,72	0,62	33,77	0,19	44,89	
45	7073	31157	2,58	7,40	26,65	1,58	21,41	0,13	35,82	0,38	31,36	0,14	33,75	
46	6301	11405	8,14	0,84	11,39	0,52	34,47	0,01	99,13	0,41	8,74	0,15	15,39	
47	5498	14473	12,78	0,37	18,98	0,16	17,41	0,09	24,56	0,96	9,06	0,22	17,25	
48	5398	12967	13,64	28,36	4,15	15,25	7,28	10,92	18,64	2,71	11,59	1,78	20,86	
49	6495	18889	2,87	1,72	8,24	1,40	12,74	0,63	98,81	0,20	8,85	0,07	15,77	
50	6750	14256	0	24,66	—	0,00	—	0,03	—	0,18	—	0,15	—	
51	6750	7266	0	0,86	—	0,07	—	0,08	—	0,05	—	0,01	—	
52	6750	11808	0	29,78	—	3,34	—	2,03	—	0,33	—	0,27	—	
53	5625	9210	0	0,03	—	0,00	—	0,00	—	0,12	—	0,02	—	
54	3375	6924	0	0,47	—	0,14	—	0,06	—	0,09	—	0,05	—	
55	5625	6420	0	0,00	—	0,00	—	0,00	—	0,04	—	0,09	—	
56	3375	8418	0	0,17	—	0,01	—	0,01	—	0,00	—	0,00	—	

Продолжение таблицы 6.14

Изображение			$\delta_{сегм}$, %	По уровню 3						По уровням 1 и 2				
№ п/п	Ши- рина	Высо- та		Cloud-Net+		U-Net		Lanky U-Net		U-Net		Lanky U-Net		
				$\alpha_{сегм}$, %	$\beta_{сегм}$, %									
57	6750	11370	0	0,25	—	0,64	—	1,30	—	0,12	—	0,04	—	
58	6750	9174	0	0,17	—	0,50	—	0,77	—	0,06	—	0,00	—	
59	6750	10146	0	0,83	—	1,64	—	0,95	—	0,47	—	0,12	—	
60	6750	8886	0	0,06	—	0,16	—	0,17	—	0,04	—	0,01	—	
61	6750	9588	0	51,48	—	18,74	—	6,23	—	0,30	—	0,15	—	
62	6750	8598	0	0,02	—	0,02	—	0,00	—	0,01	—	0,00	—	
63	6750	11568	0	0,11	—	0,43	—	0,23	—	0,51	—	0,23	—	
64	6750	11370	0	0,04	—	0,00	—	0,02	—	0,00	—	0,00	—	
65	6750	9678	0	0,15	—	0,26	—	0,49	—	0,10	—	0,29	—	
66	6750	13854	0	0,01	—	0,11	—	0,36	—	2,63	—	0,35	—	
67	6750	13980	0	0,04	—	0,12	—	0,07	—	0,02	—	0,01	—	
68	6750	10038	0	1,46	—	1,14	—	0,59	—	0,17	—	0,03	—	
69	6750	10038	0	0,07	—	0,10	—	0,66	—	0,17	—	0,01	—	
70	6750	14016	0	0,43	—	3,71	—	1,34	—	1,13	—	0,67	—	
71	6750	9912	0	0,58	—	0,05	—	0,05	—	0,11	—	0,03	—	
72	6750	8490	0	0,20	—	0,05	—	0,04	—	0,02	—	0,00	—	
73	6750	20282	0	0,68	—	0,35	—	0,67	—	0,09	—	0,08	—	
74	6750	10326	0	0,55	—	2,47	—	1,12	—	1,72	—	0,87	—	
75	6750	18809	0	0,99	—	0,00	—	0,03	—	0,00	—	0,00	—	
76	6750	5669	0	1,88	—	0,78	—	0,48	—	0,22	—	0,10	—	
77	6750	5579	0	14,00	—	1,56	—	0,55	—	0,45	—	0,43	—	
78	6750	5813	0	0,03	—	0,00	—	0,00	—	0,00	—	0,00	—	
79	6750	19762	8,25	0,02	80,29	0,06	72,08	5,53	22,50	0,25	33,00	0,17	37,45	
80	6750	19762	0,35	0,03	37,11	0,05	26,26	0,05	40,50	0,11	27,92	0,05	32,34	
81	6750	18461	0,54	0,26	19,66	1,44	24,60	0,19	97,50	1,24	9,76	0,69	18,58	
82	6750	7905	66,53	4,51	3,13	0,23	99,99	6,43	4,44	7,11	2,34	8,64	1,92	
83	6750	11072	2,50	0,05	21,70	0,14	11,80	0,03	20,68	0,46	7,12	0,56	9,14	
84	4500	5393	18,51	0,00	94,00	0,04	100,0	0,00	100,0	25,42	4,51	28,11	11,75	
85	4500	10624	36,29	3,62	12,36	5,52	4,29	1,62	18,07	2,17	13,97	1,41	16,91	
86	5625	7194	0,90	0,13	17,80	0,36	5,17	0,53	24,27	0,06	48,33	0,06	33,44	

Окончание таблицы 6.14

Изображение			$\delta_{сегм}$, %	По уровню 3						По уровням 1 и 2				
№ п/п	Ши- рина	Высо- та		Cloud-Net+		U-Net		Lanky U-Net		U-Net		Lanky U-Net		
				$\alpha_{сегм}$, %	$\beta_{сегм}$, %									
87	5625	11920	15,75	6,36	8,08	4,66	6,55	2,35	15,37	8,80	5,25	3,64	16,84	
Итого			13,42	6,88	19,54	2,25	18,33	1,36	19,79	1,40	12,26	0,74	13,77	
$a_{сегм}$, %				91,42		95,59		96,16		97,15		97,51		
$J_{сегм}$, %				55,74		71,32		73,73		80,50		82,30		
$p_{сегм}$, %				64,46		84,92		90,13		90,70		94,75		
$r_{сегм}$, %				80,46		81,67		80,21		87,74		86,23		
$F_{1сегм}$, %				71,58		83,26		84,88		89,20		90,29		
$\phi_{сегм}$, %				67,17		80,75		82,88		87,57		88,99		

ИНС «Lanky U-Net» и «U-Net» также были обучены работе в случае, когда на вход в виде двухканального изображения подаются уровни 1 и 2 радиометрической обработки исходного снимка. Сеть «Cloud-Net+» как явный аутсайдер в таком режиме не обучалась. Показатели качества нейросетевой сегментации по уровням 1 и 2 радиометрической обработки приведены в последних столбцах таблицы 6.14. Видно, что для обеих ИНС при работе по уровням 1 и 2 уменьшились средние значения ошибок и первого, и второго родов, а следовательно, приблизились к единице все производные показатели.

На рисунке 6.21 приведены примеры сегментации облачности предложенным алгоритмом при работе по уровням 1 и 2 радиометрической обработки. Визуальный анализ показывает, что ИНС «Lanky U-Net» в основном удается отличить сплошную облачность от других ярких объектов: песков, крыш зданий, снегов. При этом полупрозрачная дымка выделяется плохо, и иногда за нее могут быть ошибочно приняты мелководные водоемы с просвечивающим дном и пески. Однако точно такие же проблемы характерны и для ИНС, требующих существенно большего объема вычислений.

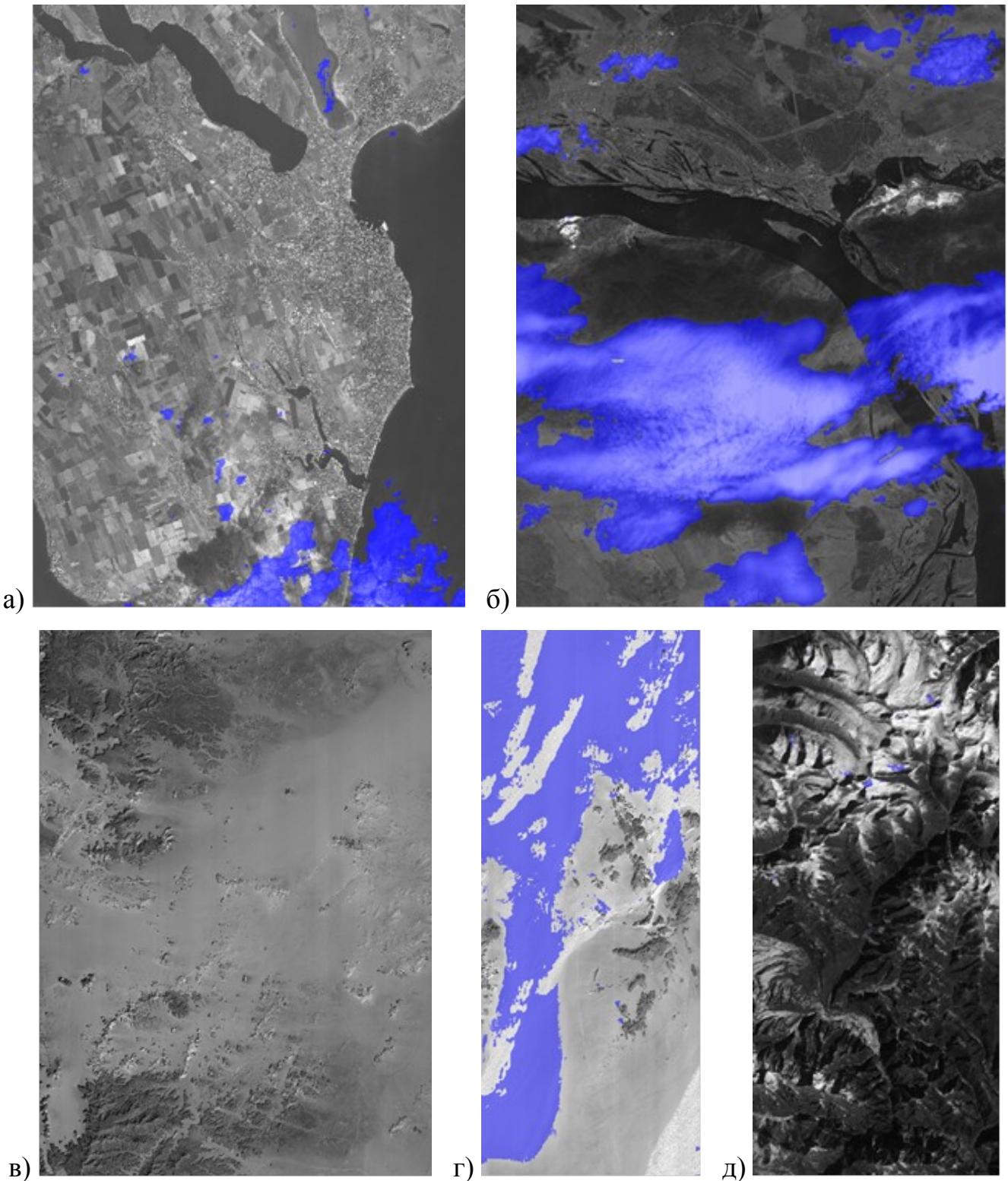


Рисунок 6.21 – Примеры результатов сегментации облачности: а) выделение сплошной облачности и ложное обнаружение дымки на мелководном озере; б) корректное отделение облачности от песчаных карьеров; в) песок не выделен как облачность; г) наиболее яркий песок с гладкой текстурой ошибочно выделен как облачность; д) снежные шапки гор практически не выделяются как облачность

По всем показателям качества сегментации, комбинирующим ошибки первого и второго родов и приведенным в последних строках таблицы 6.14, предложенная архитектура «Lanky U-Net» незначительно превосходит «U-Net». Однако это достигается при достаточно малой доли облаков в тестовой выборке: $\delta_{segm} = 0,1342 \ll 0,5$. Такая небольшая доля облачности связана с тем, что при планировании съемки оптико-электронным КА ДЗЗ учитывается метеопрогноз, т.е. доля облачности в отснятых материалах заведомо ниже вероятности закрытия облаком произвольного участка земной поверхности. Таким образом, значения показателей, приведенных в таблице 6.14, справедливы при функционировании ИНС в наземных пунктах обработки информации. В этих условиях предложенный алгоритм позволяет не только многократно сократить объем вычислений, но и незначительно превзойти известные ИНС по качеству сегментации.

Если же ИНС будет функционировать на борту гибридного КА для определения целесообразности выполнения им интерферометрической съемки, данные метеопрогноза могут быть недоступны. В этом случае средняя доля облачности в исходных данных для сегментации должна возрасти. Определим, какая доля земной поверхности в заданный момент времени закрыта облачностью, и будем считать, что она будет равняться средней доле облачности в исходных данных. Это справедливо, если каждый участок земной поверхности будет сниматься одинаково часто.

Для определения доли облачности воспользуемся практически синхронными снимками от отечественных геостационарных оптико-электронных КА ДЗЗ «Электро-Л» № 2 и № 4 с точками стояния $14,5^\circ$ з.д. и $165,8^\circ$ в.д., т.е. наблюдающих Землю с противоположных сторон. Два таких снимка дают представление практически обо всей земной поверхности и атмосфере над ней в некоторый момент времени. Снимки от КА «Электро-Л» свободно распространяются на портале Научного центра оперативного мониторинга Земли.

В заданный момент времени освещается Солнцем лишь половина земной поверхности. Поэтому в видимом диапазоне данные о теневой стороне Земли

недоступны. Однако снимки от КА «Электро-Л» содержат инфракрасные каналы, позволяющие оценить состояние теневой стороны Земли. На портале Научного центра оперативного мониторинга Земли представлены обзорные изображения, полученные в результате слияния видимых и инфракрасных каналов, по которым очень удобно выделить облачность на основе визуального анализа. Два таких обзорных изображения, снятых 23 мая 2025 г. в 10:30 по декретному московскому времени, приведены на рисунке 6.22. Составленные для них маски облачности представлены на рисунке 6.23.

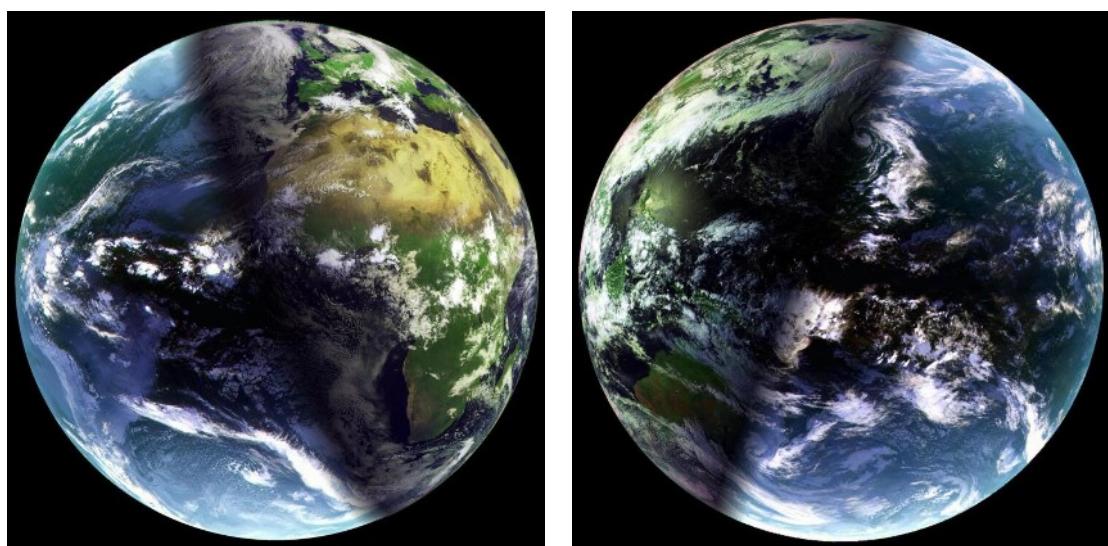


Рисунок 6.22 – Обзорные изображения от КА «Электро-Л» № 2 и № 4

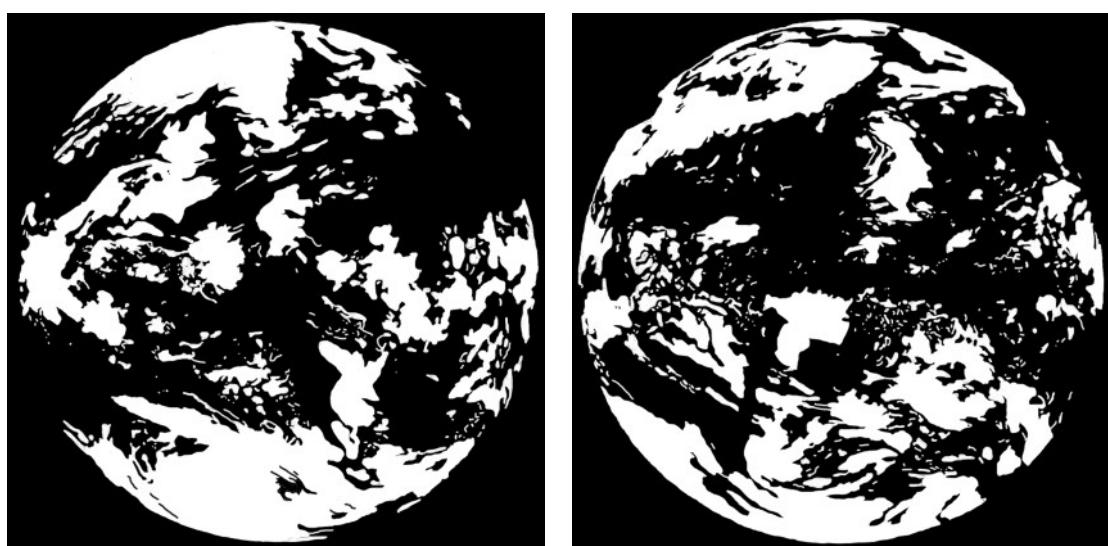


Рисунок 6.23 – Маски облачности для изображений от КА «Электро-Л» № 2 и № 4

При расчете доли земной поверхности, закрытой облачностью, учитывалось, что площадь проекции пикселя изображения увеличивается по мере удаления от подспутниковой точки и приближения к краю земного диска. Результаты расчетов, выполненных на основе составленных масок облачности, показали, что облаками закрыто примерно 45 % земной поверхности (включая Мировой океан).

С учетом полученных ранее средних значений вероятностей возникновения ошибок первого и второго родов и оцененной средней доли облачности $\delta_{csegm}=0,45$ пересчитаем с использованием выражений (5.1), (5.2), (5.4), (5.6) и (5.8) значения остальных показателей качества сегментации для случая, когда съемка исходных данных для нейросетевой обработки выполняется без учета метеопрогноза. Результаты расчета приведены в таблице 6.15. Видно, что в этом случае предложенная архитектура «Lanky U-Net» незначительно уступает «U-Net» по большинству показателей. С учетом обоих случаев ($\delta_{csegm}=0,1342$ и $\delta_{csegm}=0,45$) можно считать, что «Lanky U-Net» и «U-Net» обеспечивают примерно одинаковое качество сегментации.

Таблица 6.15 – Показатели качества нейросетевой сегментации облачности при $\delta_{csegm}=0,45$

Показатель	По уровню 3			По уровням 1 и 2	
	Cloud-Net+	U-Net	Lanky U-Net	U-Net	Lanky U-Net
a_{csegm} , %	87,43	90,51	90,35	93,72	93,39
J_{csegm} , %	74,22	79,48	78,90	86,27	85,45
p_{csegm} , %	90,54	96,74	97,97	98,09	98,96
F_{1csegm} , %	85,20	88,57	88,20	92,63	92,16
ϕ_{csegm} , %	74,73	81,41	81,32	87,60	87,11

Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили, что предложенный алгоритм позволяет многократно сократить объем вычислений при сохранении высокого качества сегментации облачности. Достигнутые значения показателей качества сегментации, приведенные в таблицах 6.14 и 6.15, существенно вы-

ше даже с учетом обработки панхроматических изображений, не содержащих данных о цвете, чем для простых нейросетевых архитектур, применявшихся на борту экспериментальных КА «Phi-Sat-1» и «OPS-SAT» для анализа мультиспектральных изображений. При этом предложенная ИНС «Lanky U-Net» также потенциально пригодна для бортовой обработки.

6.4.2 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма объединения стереофотограмметрических и интерферометрических цифровых моделей местности с привлечением электронных карт. Для подтверждения эффективности предложенного алгоритма объединения цифровых моделей местности проведены экспериментальные исследования, в рамках которых объединялись интерферометрическая ЦММ Copernicus DEM GLO-30 [313] и стереофотограмметрическая ЦММ Alos World 3D 30 [315] с привлечением электронных карт OpenStreetMap [322]. Объединение выполнялось для территории в окрестности г. Финикс, Аризона, США, для которой имеются высокоточные данные о высотах, уже использованные ранее при экспериментальных исследованиях интерферометрической обработки, выполненных в рамках параграфа 6.3. Это продукт обработки стереопары снимков от КА «Ресурс-П», имеющий пространственное разрешение и вертикальную точность около 1 м. Территория, на которую имеются высокоточные данные, включает горную местность, поля, малоэтажную городскую застройку и высотные здания.

Высокоточные данные о высоте трансформировались в систему координат результата объединения с предварительной низкочастотной фильтрацией для исключения мелких деталей высотных объектов, не представленных на GLO-30 и Alos World 3D 30 из-за большего шага пикселя. С трансформированными высокоточными данными попиксельно сравнивались три ЦММ: GLO-30, Alos World 3D 30 и результат их объединения предложенным алгоритмом. Полученные среднеквадратические ошибки высоты $\sigma_{\text{выс}}$ приведены в таблице 6.16. Видно, что GLO-30 примерно в 1,3 раза точнее, чем Alos World 3D 30, но предложенный алгоритм объединения позволяет дополнительно повысить точность ЦММ на 3,4 %. Относительно небольшое

увеличение точности связано с тем, что высотные здания, отсутствующие на GLO-30 и присутствующие на результате объединения, занимают достаточно малую площадь по сравнению со всей анализируемой территорией. Тем не менее, информация об их высоте может быть весьма важна при множестве тематических применений ЦММ. Поэтому эффективность предложенного алгоритма можно считать подтвержденной.

Таблица 6.16 – Оценки точности исходных ЦММ и результата их объединения

ЦММ	$\sigma_{выс}, \text{м}$
Copernicus DEM GLO-30	1,788
Alos World 3D 30	2,353
Результат объединения	1,729

6.4.3 Экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма объединения радиолокационных и оптических изображений на основе выделения важных объектов. Для экспериментального подтверждения эффективности алгоритма объединения изображений необходимо выработать показатель информативности, по которому можно будет сравнить исходные изображения и результат их объединения.

В [328, 329] предложены показатели качества объединения, в основе которых лежит сопоставление информативности объединяемых изображений при различных положениях скользящего окна малого размера. При этом считается, что информативность результата объединения должна быть взвешенной суммой информативностей объединяемых изображений. Адаптируем эти показатели к задаче оценке качества объединения существенно разнородных изображений.

Во-первых, будем считать, что алгоритм объединения в пределах каждого малого фрагмента должен выбирать наиболее информативное изображение из исходных и пытаться перенести его на результат объединения без снижения информативности. В этом случае относительную разность максимальной информативности и информативности остальных изображений будем считать потерями ин-

формативности. Каждое из объединяемых изображений и результат объединения будут характеризоваться значениями потерь информативности, усредненными по всем положениям скользящего окна малого размера.

Во-вторых, в качестве показателя информативности возьмем отношение СКО яркости на фрагменте изображения к средней яркости в пределах этого фрагмента. Радиолокационное изображение из-за влияния спекл-шума имеет повышенное СКО яркости. Поэтому перед оценкой качества необходимо выполнить его дополнительную адаптивную обработку улучшенным фильтром Фроста в окне 11×11 пикселей, чтобы практически полностью устраниТЬ спекл-шум.

Таким образом, среднее значение потерь информативности в скользящем окне 16×16 пикселей для каждого из оцениваемых изображений вычисляется как

$$Q_{nu}(s) = \frac{\sum_{m_0, n_0} \left(1 - \frac{I(s, m_0, n_0)}{I_{max}(m_0, n_0)} \right)}{\sum_{m_0, n_0} 1}, \quad (6.4)$$

где $I(s, m_0, n_0)$ и $I_{max}(m_0, n_0)$ – информативность изображения s и максимальная информативность при текущем положении скользящего окна (m_0, n_0) , оцениваемые с помощью выражений:

$$I(s, m_0, n_0) = \frac{\sqrt{\frac{1}{256} \sum_{m=0}^{15} \sum_{n=0}^{15} s^2(m_0+m, n_0+n) - \left(\frac{1}{256} \sum_{m=0}^{15} \sum_{n=0}^{15} s(m_0+m, n_0+n) \right)^2}}{\frac{1}{256} \sum_{m=0}^{15} \sum_{n=0}^{15} s(m_0+m, n_0+n)}, \quad (6.5)$$

$$I_{max}(m_0, n_0) = \max \{ I(s_{onm}, m_0, n_0), I(s_{rho}, m_0, n_0) \}, \quad (6.6)$$

s_{onm} – результат усреднения спектральных каналов исходного оптического изображения, s_{rho} – сигнал радиолокационного изображения после дополнительной адаптивной фильтрации, в качестве s могут выступать s_{onm} , s_{rho} и s_{obed} – усредненный сигнал каналов результата объединения.

Усредненные результаты расчета показателя $Q_{nu}(s)$ для 10 пар исходных изображений, участвующих в эксперименте, и результатов их объединения приве-

дены в таблице 6.17. Видно, что радиолокационные изображения в среднем являются менее информативными, чем оптические, но объединение с ними позволяет на 9,7 % уменьшить потери информативности. Следовательно, предложенный алгоритм можно считать эффективным.

Таблица 6.17 – Средние оценки потерь информативности для исходных изображений и результатов их объединения

Изображение	Q_{nu}
Радиолокационное	0,309
Оптическое	0,113
Результат объединения	0,103

6.5 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

6.5.1 Программная реализация алгоритмов бортовой обработки. Алгоритмы бортового сжатия и нейросетевой сегментации облачности реализованы в виде динамически загружаемых модулей в составе экспериментального специального программного обеспечения, которое разработано в ходе НИР, выполненных в НИИ «Фотон» РГРТУ в интересах Роскосмоса и Союзного государства, и может функционировать как на персональном компьютере под управлением 64-разрядной операционной системы Windows, так и на имитаторе бортовой вычислительной аппаратуры. В качестве имитатора такой аппаратуры для нейросетевых алгоритмов выступили нейропроцессоры разработки АО НТЦ «Модуль». Для работы с указанными нейропроцессорами обученные модели нейронных сетей сжатия и сегментации облачности преобразовывались в формат NMDL. Реализация алгоритмов на персональном компьютере выполнена с помощью языка программирования C++. Для ускорения вычислений применяются многопоточная обработка и векторные инструкции центрального процессора.

6.5.2 Программная реализация методов и алгоритмов наземной обработки. Методы и алгоритмы наземной совместной обработки радиолокационной и оптической информации реализованы в виде динамически загружаемых модулей в составе специального программного обеспечения, разрабатываемого в рамках создания радиолокационных КА ДЗЗ «Обзор-Р» № 1 и № 2 по заказу АО «РКЦ «Прогресс» в интересах Роскосмоса и предназначенного для функционирования в Наземном центре оперативного мониторинга Земли.

Специальное программное обеспечение для КА «Обзор-Р» № 1 работает под управлением 64-разрядной операционной системы Windows, а для КА «Обзор-Р» № 2 – под управлением отечественной операционной системы Astra Linux.

Реализация динамически загружаемых модулей осуществлялась на языке C++ с применением универсальной платформы быстрой разработки программ обработки данных ДЗЗ «ER-Set» [330], созданной в НИИ «Фотон» РГРТУ. Модули функционируют в унифицированной среде, предоставляемой платформой «ER-Set». Их входными и выходными данными являются универсальные объекты, включающие метаданные и растр изображения. Средства «ER-Set» предоставляют функции открытия исходных изображений, визуализации данных и сохранения результатов обработки. Также платформа «ER-Set» позволяет составлять из модулей технологические цепочки, где выходные данные одного модуля поступают на вход следующего.

Детерминированные методы и алгоритмы реализованы на центральном процессоре с применением многопоточной обработки и векторных инструкций. Особенности реализации БПФ, сильно влияющей на быстродействие значительной части предложенных методов и алгоритмов, подробно рассмотрены в пункте 3.1.4.

Алгоритм нейросетевой сегментации облачности реализован также в наземном исполнении. Для выполнения нейросетевых расчетов на языке C++ с применением технологий CUDA и cuDNN разработан программный модуль, функционирующий на видеокарте.

Программные реализации предложенных методов и алгоритмов отличаются высокой степенью автоматизации и могут работать без участия оператора по заданию от управляющей программы.

На программные реализации отдельных составляющих предложенных методов и алгоритмов получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [68, 71, 81, 82, 83].

Основные результаты

1. Выполнены экспериментальные исследования с использованием нескольких десятков радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗЗ, показавшие, что предложенный алгоритм бортового сжатия радиоголограмм позволяет при заданной степени сжатия улучшить отношение сигнал-шум квантования на синтезированных изображениях по сравнению с известным алгоритмом FDBAQ на 0,1–0,4 дБ. Это соответствует уменьшению на 1–5 % среднеквадратической ошибки отсчетов амплитуды сигнала на изображении.

2. Проведены экспериментальные исследования с использованием 30 трехканальных изображений от КА «Канопус-В», показавшие, что предложенный алгоритм бортового адаптивного нейросетевого сжатия оптических изображений позволяет при заданной степени сжатия улучшить на 1,4–1,8 % значение интегрального показателя сходства яркостей, контраста и структуры исходного и сжатого изображений по сравнению с известным детерминированным алгоритмом JPEG2000, начиная со степени сжатия 33. Исследования также показали, что предложенная архитектура сверточных нейронных сетей обеспечивает практически такие же значения показателей качества сжатого изображения, как и вычислительно гораздо более сложная архитектура на базе рекуррентных нейронных сетей.

3. Выполнены экспериментальные исследования с использованием радиоголограммы от КА «COSMO-SkyMed», показавшие, что предложенный метод уточнения углов рысканья и тангажа позволяет в среднем на 28 % сократить число итераций синтеза изображения и оценивания его параметров, необходимое для по-

лучения точных оценок, по сравнению с известным подходом [214]. Кроме того, в отличие от подхода [214], предложенный метод стабильно позволяет получить положительные результаты в случае, когда ошибка знания относительного значения доплеровского центроида близка к половине частоты повторения зондирующих импульсов.

4. Проведены экспериментальные исследования с использованием 12 радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», показавшие, что предложенный метод позволяет получить оценку угла крена со среднеквадратической ошибкой $1,5'$ и, таким образом, является в 7,5 раз более точным, чем известный алгоритм [218].

5. Выполнены экспериментальные исследования с использованием 20 радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», данных сервиса Google Планета Земля и ЦМВ Copernicus DEM GLO-30, показавшие, что предложенный алгоритм в среднем позволяет обеспечить геодезическую привязку радиолокационного изображения относительно опорного оптического снимка со среднеквадратической ошибкой порядка 4 м.

6. Проведены экспериментальные исследования, показавшие, что массовые координатные преобразования при геометрической обработке радиолокационных изображений могут быть ускорены в 10,5 раз за счет применения кусочно-параболических аппроксимирующих решеток по сравнению со строгими вычислениями. За счет меньшего расхода оперативной и кэш-памяти кусочно-параболические аппроксимирующие решетки обеспечивают большую скорость обработки радиолокационных изображений даже по сравнению с кусочно-линейными решетками.

7. Выполнены экспериментальные исследования, показавшие, что предложенный алгоритм позволяет примерно в 2 раза ускорить совмещение интерферометрической пары радиолокационных изображений с учетом высоты по сравнению с использованием упрощенной модели [230] и примерно в 11,7 раз по сравнению со строгими вычислениями.

8. Выполнены экспериментальные исследования с использованием 2 пар радиолокационных изображений от КА «TerraSAR-X», а также опорных ЦМВ ASTER GDEM и Alos World 3D 30, показавшие, что предложенный метод объеди-

нения радиолокационных изображений с нисходящего и восходящего витков орбиты позволяет в 6 раз сократить площадь геометрических дефектов на результате объединения изображений в условиях низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных без появления ложных границ объектов.

9. Проведены экспериментальные исследования с использованием 10 интерферометрических пар радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗ3, опорных ЦМВ ASTER GDEM и Alos World 3D 30, а также высокоточной стереофотограмметрической ЦММ, построенной по данным КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный метод обработки интерферограмм в 2,5 раза превосходит по средней точности метод [266] и в 10,3 раза превосходит лучшую из зарубежных программ, участвующих в эксперименте, – SARscape 4.3.

10. Выполнены экспериментальные исследования с использованием 87 оптических панхроматических изображений от аппаратуры «Геотон» КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный алгоритм нейросетевой сегментации облачности обеспечивает сопоставимое качество сегментации по сравнению с известной нейросетевой архитектурой «U-Net» при в 22 раза меньшем объеме вычислений.

11. Проведены экспериментальные исследования с использованием ЦММ Copernicus DEM GLO-30 и Alos World 3D 30, а также высокоточной стереофотограмметрической ЦММ, построенной по данным КА «Ресурс-П», показавшие, что предложенный алгоритм объединения позволяет на 3,4 % уменьшить среднеквадратическую ошибку высоты по сравнению с лучшей из исходных ЦММ.

12. Выполнены экспериментальные исследования с использованием 10 радиолокационных изображений от зарубежных КА ДЗ3 и данных сервиса Google Планета Земля, показавшие, что предложенный алгоритм объединения позволяет на 9,7 % уменьшить потери информативности по сравнению с лучшим из исходных изображений.

13. Предложенные методы и алгоритмы реализованы в виде динамически загружаемых модулей в составе специального программного обеспечения обработки данных от КА «Обзор-Р» № 1 и № 2, а также экспериментального программного обеспечения проектирования перспективных космических систем ДЗ3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методов и алгоритмов обработки информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли с привлечением изображений и производных продуктов космических систем оптико-электронного наблюдения. Технические решения охватывают все основные этапы обработки информации, начиная с бортового сжатия, продолжая первичной и стандартной наземными обработками и заканчивая высокоуровневой и тематической наземными обработками в части формирования цифровых моделей высот и объединения различных видов информации. Разработанные методы и алгоритмы составляют теоретическую основу создания бортовых и наземных программно-аппаратных средств для отечественных федеральных, региональных и отраслевых центров обработки спутниковых данных, внедрение которых вносит существенный вклад в повышение эффективности использования спутниковых данных в России.

В рамках диссертационного исследования получены следующие новые результаты.

1. Выполнен системный анализ проблемы совместной обработки информации от радиолокационных и оптико-электронных космических систем ДЗЗ. Выявлены проблемные вопросы такой обработки. Определены перспективные направления научных исследований.

2. Разработаны алгоритмы бортового сжатия радиоголограмм и оптических изображений земной поверхности с потерями на основе блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования (для радиоголограмм) и нейросетевых моделей (для оптических изображений), позволяющие при заданной степени сжатия уменьшить уровень искажений до 5 % по сравнению с известными детерминированными алгоритмами.

3. Предложены методы уточнения угловой ориентации космического аппарата с совместным использованием измерений оптико-электронных приборов и

результатов амплитудного анализа радиолокационных изображений в ходе их первичной обработки, позволяющие оценить угол крена со среднеквадратической ошибкой 1,5' и на 28 % сократить временные затраты на уточнение углов рысканья и тангажа.

4. Созданы алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе ее совмещения с опорными оптическими изображениями, позволяющие повысить точность оценки координат объектов в среднем до 4 м и значительно сократить время формирования стандартных информационных продуктов.

5. Разработан метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики и использования низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем, позволяющий в среднем в 6 раз уменьшить площадь геометрических искажений без образования ложных границ.

6. Предложен метод высокоточной обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот на основе анализа сюжета интерферометрического изображения и привлечения низкодетальной высотной информации от оптико-электронных систем наблюдения Земли, позволяющий в среднем в 10 раз уменьшить среднеквадратическую ошибку определения высот по сравнению с лучшими зарубежными аналогами.

7. Создан алгоритм высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на оптических изображениях с целью выявления атмосферных искажений на радиолокационных интерферограммах, позволяющий примерно в 22 раза сократить объем вычислений по сравнению с известной архитектурой «U-Net» при сохранении высокой точности сегментации.

8. Разработаны алгоритмы объединения разнородной информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли, позволяющие примерно на 3 % уменьшить среднеквадратическую ошибку высоты по сравнению с лучшей из объединяемых цифровых моделей местности, примерно на

10 % снизить потери информативности объединяемых изображений и представить радиолокационные изображения в естественных цветах.

9. На основе предложенных методов и алгоритмов создаются средства наземной обработки данных от отечественных радиолокационных КА ДЗЗ «Обзор-Р» № 1 и № 2, а также разработано экспериментальное программное обеспечение проектирования средств бортовой обработки в перспективных космических системах ДЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Д.А., Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Фалеев О.В. Состояние и направления развития технологий наземной обработки данных от систем ДЗЗ, создаваемых АО «РКЦ «Прогресс» // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VI Козловские чтения). Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2019. Т. 1. С. 36–47.
2. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Горбунов А.В., Салихов Р.С., Ходненко В.П. История создания космического комплекса "Канопус-В" и Белорусского космического комплекса // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2019. Т. 169. № 2. С. 39–44.
3. Горбунов А.В., Ильина И.Ю., Макриденко Л.А., Саульский В.К., Чуркин А.Л. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 2 (113). С. 5–21.
4. Ширшаков А.Е., Москатиньев И.В., Крайнов А.М. Развитие отечественной высокоорбитальной группировки метеоспутников на примере КА «Электро-Л» и «Арктика-М» // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 36–38.
5. Верба В.С., Турук В.Э., Голованова М.В., Голубцов П.Е., Евсиков М.В., Неронский Л.Б., Зайцев С.Э., Толстов Е.Ф. Радиолокатор с синтезированной апертурой «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // Радиотехника. 2019. № 5. С. 51–61.
6. Хартов В.В., Ризванов А.А., Пустовалов Е.В., Сизов А.А., Остапюк А.И. Аспекты серийного производства малых космических аппаратов, планируемых к созданию на базе перспективной масштабируемой унифицированной космической платформы // Тезисы докладов XXVII научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». 2023. С. 27–28.

7. Жамков А.С., Мясников В.И., Савченко А.В. Методический подход к обоснованию требований к баллистическому построению многоспутниковой орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 201. № 4. С. 28–36.
8. Захаров А.И., Костюк Е.А., Денисов П.В., Бадак Л.А. Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и ее перспективы в рамках проекта «Кондор-ФКА» // Журнал радиотехники. 2019. № 1. С. 11.
9. Бабокин М.И., Костюк Е.А., Бадак Л.А., Стёpin В.Г. Космические РСА-интерферометры детальной оценки рельефа местности с одновременным формированием парных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 1 (45). С. 5–13.
10. Костюк Е.А., Захаров А.И. Радиометрическая калибровка радиолокационных изображений // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 2024. С. 40.
11. Достовалов М.Ю., Коваленко А.И., Костусяк В.М., Риман В.В., Судоргин С.Г. Синтез радиолокационных изображений земной поверхности, получаемых в бортовом радиолокационном комплексе «Северянин» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 5 (51). С. 38–41.
12. Булыгин М.Л., Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Чечина И.Н. Режим многоканальной съемки в многоапertureном космическом радиолокаторе с синтезированной апертурой // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 20–26.
13. Габриэльян Д.Д., Демченко В.И., Занин К.М., Косогор А.А., Кузнецлов Ю.В., Лебедев Р.А., Лутченко О.В., Михайлов Н.А., Шлаферов А.Л. Принцип построения антенной системы БРЛК КА "Метеор-М" № 2-3, 2-4 и верификации ее характеристик на орбите // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 73–85.

14. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Миннебаев В.М. ППМ Х-диапазона на GaN транзисторах // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 131–133.
15. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Кудрявцев С.В., Николенко А.А. Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратурой ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 111–121.
16. Космический телескоп: пат. 2529052 РФ: МПК G02B 23/00, G01J 3/12 / А.М. Савицкий, М.Н. Сокольский, Л.Е. Левандовская, И.Е. Путилов, В.А. Данилов, Ю.Н. Петров, А.И. Лысенко, А.И. Бакланов, М.В. Клюшников; заявители и патентообладатели ОАО «ЛОМО», ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». – № 2012155905/28; заявл. 21.12.2012; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27.
17. Архипов С.А., Бакланов А.И., Герасименко В.В. Многоспектральная оптико-электронная аппаратура «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 44.
18. Архипов С.А., Бутяйкин Н.А., Линько В.М., Лузганова М.Ю. О результатах эксплуатации гиперспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» // Контентант. 2019. Т. 18. № 1-2. С. 1–17.
19. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.
20. Афанасьева Е.В., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Ермаков Д.М. Проблемы использования данных космической радиолокационной съёмки при решении за-

дачи автоматизации ледового картирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 9–27.

21. Попов С.Б., Сойфер В.А., Тараканов А.А., Фурсов В.А. Кластерная технология формирования и параллельной фильтрации больших изображений // Компьютерная оптика. 2002. № 23. С. 75–78.
22. Soifer V.A., Sergeev V.V., Kopenkov V.N., Chernov A.V. Earth remote sensing and geographic information systems // Pattern Recognition and Image Analysis. Advances in Mathematical Theory and Applications. 2023. Vol. 33. No. 4. P. 1129–1141.
23. Елизаветин И.В., Шувалов Р.И., Буш В.А. Принципы и методы радиолокационной съемки для целей формирования цифровой модели местности // Геодезия и картография. 2009. № 1. С. 39–45.
24. Кучайко А.А., Иванов А.Ю., Клименко С.К., Коваль Г.Я., Чайка А.А., Козлова Д.С. Наблюдение и оперативное спутниковое сопровождение случаев нефтяных разливов и утечек в прибрежной зоне Черного моря // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 10. С. 52–59.
25. Крутов М.М., Мирталибов Т.А., Славянский А.О., Фесенко М.В. Оценка влияния нестабильности положения космического аппарата на синтез радиолокационных изображений // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 5. С. 55–63.
26. Асмус В.В., Крамарева Л.С., Тасенко С.В. Первый в мире высокоэллиптический гидрометеорологический космический аппарат «Арктика-М» №1 // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 38–40.
27. Карпухин С.С. Создание концепции информационно-навигационной картографической системы «Цифровая Россия» // Проблемы региональной экологии. 2009. № 6. С. 239–245.
28. Григорьева О.В., Жуков Д.В., Марков А.В., Мочалов В.Ф. Методика оценивания эколого-экономического ущерба водным объектам по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 233–244.

29. Ташлинский А.Г., Ибрагимов Р.М., Сафина Г.Л. Синтез и оптимизация стохастического алгоритма совмещения изображений по критерию максимума взаимной информации Шеннона // Автометрия. 2024. Т. 60. № 2. С. 12–21.
30. Храмов К.К., Костров В.В., Макаров В.П. Помехи неоднозначности сигналов космических РСА при использовании круглой зеркальной антенны // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 11.
31. Горячkin О.В., Маслов И.В. Оценка погрешности измерения высоты рельефа местности бистатической радиолокационной системой космического базирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 5. С. 477–483.
32. Мятов Г.Н., Юдаков А.А., Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Мониторинг состояния бортовых систем космических аппаратов оптического наблюдения Земли в обеспечение автоматической наземной обработки получаемых изображений // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 3. С. 9–14.
33. Ушенкин В.А. Математическая модель синтеза радиолокационных изображений дециметрового разрешения из радиоголограмм от космических РСА // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 21–25.
34. Ушенкин В.А., Соловьев А.В. Сравнительный анализ пригодности поляриметрических декомпозиций изображений о космических систем радиолокационного наблюдения Земли в задаче мониторинга лесного покрова // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 8–13.
35. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. 320 с.
36. Гусев С.И., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Цифровая обработка данных радиолокационного зондирования Земли из космоса / под. ред. В.В. Еремеева, В.А. Ушенкина. М.: Курс, 2021. 248 с.
37. Ушенкин В.А., Лесков Д.В. Уточнение параметров формирования и интерферометрической обработки радиолокационных изображений // Информатика и

прикладная математика: межвузовский сборник научных трудов. 2015. № 21. С. 130–135.

38. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А., Найденов А.С. Вопросы первичной обработки данных радиолокационного космического зондирования Земли // Двенадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2014. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4390>.

39. Лесков Д.В., Ушенкин В.А. Формирование изображений от космических радиолокационных систем наблюдения Земли // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. 2015. Т. 9. С. 118–123.

40. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Моделирование процесса съемки высокодетальным космическим радиолокатором с синтезированной апертурой антенны // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 135–136.

41. Еремеев В.В., Князьков П.А., Ушенкин В.А. Программно-математическое обеспечение оценки информационных параметров радиолокационного изображения // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5624>.

42. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Проектирование алгоритмов обработки данных высокодетальной радиолокационной съемки Земли на основе имитационного моделирования // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5595>.

43. Егошкин Н.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А., Москатиньев И.В., Занин К.А. Отработка технологий первичной, вторичной и тематической обработки радиолокационной информации на основе имитационного моделирования процесса

функционирования космического РСА // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Тезисы докладов. 2017. С. 405–408.

44. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А., Мяттов Г.Н., Шебалин Ю.Г. Комплексная технология высокуюровневой обработки и оценки качества целевой информации от космического комплекса "Обзор-Р" // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Тезисы докладов. 2017. С. 401–405.

45. Ушенкин В.А., Соловьев А.В. Анализ пригодности поляриметрических декомпозиций космических радиолокационных изображений для обнаружения высотной растительности // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2021. Сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2021. Т. 6. С. 5–10.

46. Андрианов Д.С., Ушенкин В.А., Соловьев А.В. Применение поляриметрических признаков в задаче мониторинга лесного покрова на космических радиолокационных изображениях // Актуальные проблемы современной науки и производства. Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. Рязань, 2021. С. 329–336.

47. Ушенкин В.А., Соловьев А.В. Выявление лесов на космических радиолокационных изображениях с помощью поляриметрических признаков // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2021: материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2021. С. 212–213.

48. Ушенкин В.А., Соловьев А.В. Использование поляриметрических признаков в задаче обнаружения лесного покрова на космических радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. Т. 6. С. 28–32.

49. Ушенкин В.А., Юдаков А.А., Родионова Э.О. Технологии наземной обработки данных радиолокационного зондирования Земли из космоса // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 308–311.
50. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Разработка программного обеспечения оценки параметров качества изображений от космических аппаратов радиолокационного наблюдения Земли // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 350–351.
51. Ушенкин В.А., Соколов Е.А. Сегментация объектов на мультиполяризационных радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 18–22.
52. Ушенкин В.А., Федотов К.Г. Формирование модельных данных для отработки алгоритмов обработки космических радиолокационных изображений // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 13–17.
53. Гусев С.И., Кузнецов Л.Л., Ушенкин В.А. Обнаружение водной поверхности на полнополяризационных радиолокационных изображениях // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 58–61.
54. Ушенкин В.А., Овчинников В.А. Классификация амплитудных изображений от космических систем радиолокационного наблюдения Земли с использованием текстурных признаков // Двадцать третья международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=338&thesis=10748>.
55. Мятов Г.Н., Тишкин Р.В., Ушенкин В.А., Юдаков А.А. Применение нечетких мер подобия в задаче совмещения изображений поверхности Земли // Вест-

ник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 44. С. 18–26.

56. Демидова Л.А., Мятов Г.Н., Тишкин Р.В., Ушенкин В.А. Применение нечетких масок в задаче координатной привязки изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 49. С. 3–10.

57. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Проблемные вопросы обработки данных от космических систем гиперспектральной и радиолокационной съемки Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 60. С. 54–64.

58. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Кузнецов А.Е., Макаренков А.А., Москвитин А.Э., Пресняков О.А., Ушенкин В.А. Повышение информативности космических изображений Земли / под. ред. В.В. Еремеева. Москва: КУРС, 2022. 368 с.

59. Гусев С.И., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Ларионов С.М., Макаренков А.А., Ушенкин В.А. Геоинформатика. Обработка аэрокосмических изображений Земли / под. ред. В.В. Еремеева. М.: Курс, 2021. 312 с.

60. Demidova L., Ushenkin V. Satellite image georeferencing on the base of coastlines' fuzzy masks // MATEC Web of Conferences. Vol. 99. 2017. Article 03003.

61. Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Сегментация пожаров нейронными сетями по данным КА Landsat-8/9 // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 313–315.

62. Гусев С.И., Еремеев В.В., Ушенкин В.А., Черный А.Н. Алгоритм сжатия радиоголограмм на борту космических аппаратов с PCA // Цифровая обработка сигналов. 2022. № 1. С. 3–7.

63. Гусев С.И., Еремеев В.В., Ушенкин В.А., Черный А.Н. Наземная обработка алгоритмов бортового сжатия радиоголограмм для космического аппарата с PCA // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет

со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 245–248.

64. Гусев С.И., Ушенкин В.А. Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм с уменьшеными потерями на основе неравномерного блочно-адаптивного квантования и энтропийного кодирования // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2025. С. 125–127.

65. Ушенкин В.А., Макаренков А.А., Егошкин Н.А. Обработка данных дистанционного зондирования Земли с помощью технологий искусственного интеллекта // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2023. С. 7–9.

66. Гусев С.И., Ушенкин В.А. Уточнение угловой ориентации и орбитального движения космического аппарата радиолокационного наблюдения Земли на основе анализа целевой информации с привлечением опорных оптико-электронных данных // Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва: ВНИИЭМ, 2025. С. 58–59.

67. Гусев С.И., Ушенкин В.А. Уточнение угловой ориентации радиолокационного космического аппарата на основе анализа сформированных изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2025. С. 127–128.

68. Программа расчета радиометрического разрешения радиолокационных изображений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2015619221 от 27.08.2015 / П.А. Князьков, В.А. Ушенкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2015616013; заявл. 03.07.2015; опубл. 20.09.2015.

69. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Эффективная организация массовых координатных преобразований при геометрической обработке радиолокационных изображений // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 16–20.

70. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72–79.
71. Программа высокоскоростного субпиксельного совмещения интерферометрической пары высокодетальных изображений от космических систем ДЗ3: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017617929 от 17.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615063; заявл. 30.05.2017; опубл. 17.07.2017.
72. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Оптимизация алгоритмов быстрых спектральных преобразований при обработке изображений // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Тезисы докладов. 2017. С. 428–429.
73. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Вычислительная оптимизация двухмерных преобразований Фурье и Радона при обработке спутниковых изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 238–239.
74. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных изображений от восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 10–15.
75. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развертывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съемки Земли // Радиотехника. 2016. № 11. С. 120–127.
76. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при космической бистатической радиолокационной съемке Земли по сигналу интерферограммы // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 3. С. 42–48.

77. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 208–219.

78. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексирование цифровых моделей рельефа с целью повышения точности опорной информации о высоте объектов земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 1. С. 13–17.

79. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развертывания фазы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54-2. С. 21–31.

80. Способ развертывания фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли: пат. 2612322 РФ: МПК G01S 13/90 / Н.А. Егошкин, В.В. Еремеев, А.Э. Москвитин, В.А. Ушенкин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2016113159; заявл. 07.04.2016; опубл. 07.03.2017, Бюл. № 7.

81. Программа высокоточного развертывания фазы по результатам выявления фазовых разрывов на интерферометрических изображениях от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618131 от 24.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615286; заявл. 30.05.2017; опубл. 24.07.2017.

82. Программа уточнения перпендикулярной пространственной базы и фазы плоского рельефа по интерферометрическому изображению от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618206 от 25.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615039; заявл. 30.05.2017; опубл. 25.07.2017.

83. Программа выявления фазовых разрывов на интерферометрических изображениях от космических систем ДЗЗ: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017618213 от 25.07.2017 / В.А. Ушенкин, Н.А. Егошкин; заяви-

тель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». – № 2017615037; заявл. 30.05.2017; опубл. 25.07.2017.

84. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (IV Козловские чтения). 2015. Т. 1. С. 237–239.

85. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации с использованием опорного рельефа // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. 2015. С. 133–134.

86. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Восстановление высоты рельефа по радиолокационной интерферограмме на основе комбинирования методов развертывания фазы // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: Материалы 18-й Международной научно-технической конференции. 2015. С. 140–141.

87. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Проблемы интерферометрической обработки данных радиолокационного космического зондирования Земли // Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2015. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5115>.

88. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Высокоточное развертывание фазы при интерферометрической обработке радиолокационных снимков Земли // Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5594>.

89. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Комплексная технология формирования и интерферометрической обработки изображений от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2017. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6355>.

90. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Анализ причин возникновения ошибок определения высот объектов земной поверхности путем интерферометрической обработки информации от космических систем радиолокационной съемки Земли // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения) (11–15 сентября 2017 года, г. Самара); под общ. ред. А.Н. Кирилина/ СамНЦ РАН – Самара, 2017. Т. 1. С. 367–369.

91. Юдаков А.А., Ушенкин В.А. Формирование высокоточных цифровых моделей местности на основе интерферометрической обработки радиолокационной видеинформации с привлечением опорных данных // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Тезисы докладов. 2017. С. 408–410.

92. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Макаренков А.А., Ушенкин В.А., Постыляков О.В. Улучшение технологий искусственного интеллекта при обработке материалов наблюдения Земли на основе системного анализа сквозного информационного тракта // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 144–154.

93. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Алгоритм и программный комплекс высокоскоростной нейросетевой сегментации облачности на панхроматических изображениях от космических аппаратов «Ресурс-П» // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 8–17.

94. Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Нейросетевые технологии детектирования облачности и водных объектов на данных дистанционного зондирования Земли // 8-я международная научно-техническая конференция «В.Ф. Уткин – 100 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Мат. докл. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 311–312.

95. Овчинников В.А., Ушенкин В.А. Программное обеспечение нейросетевых вычислений при обработке спутниковых данных // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2024. Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Рязань, 2024. Т. 6. С. 13–16.
96. Ушенкин В.А., Ларюков С.А., Овчинников В.А. Алгоритм и программный компонент высокоскоростной автоматической нейросетевой сегментации облачности на космических изображениях // Материалы Совместной III Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» и VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения»). Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2024. С. 56–58.
97. Ушенкин В.А., Ларюков С.А., Овчинников В.А. Эффективное выполнение нейросетевых расчётов на видеоускорителе в задаче сегментации облачности на оптических спутниковых изображениях // СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 23–27.
98. Ушенкин В.А., Ларюков С.А., Овчинников В.А. Разработка программного обеспечения высокоскоростной автоматической нейросетевой сегментации облачности на оптических спутниковых снимках // Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Москва: ВНИИЭМ, 2025. С. 109–110.
99. Ушенкин В.А., Ларюков С.А., Овчинников В.А. Высокоскоростная нейросетевая сегментация облачности и наводнений на изображениях от космических аппаратов оптико-электронного наблюдения Земли // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2025. С. 157–158.
100. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 5-2. С. 183–191.

101. Ушенкин В.А., Ларюков С.А. Комплексирование интерферометрической и стереофотограмметрической цифровых моделей местности GLO-30 и AW3D30 // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 40–43.
102. Москатиньев И.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под общ. ред. А.А. Большакова. 2015. Т. 9. С. 124–127.
103. Еремеев В.А., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование изображений, полученных при съемке Земли в видимом и радиолокационном диапазонах спектра // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022. Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах. Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Рязань, 2022. Т. 6. С. 5–10.
104. Ушенкин В.А. Анализ алгоритмов фокусировки радиоголограмм от космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны // Информатика и прикладная математика: межвуз. сборник науч. трудов. 2014. № 20. С. 95–100.
105. Ушенкин В.А. Первичная обработка данных космического радиолокатора высокого разрешения // XL Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. М.: МАТИ, 2014. Т. 8. С. 113–114.
106. Ушенкин В.А. Фокусировка и автофокусировка радиоголограмм космического радиолокатора с синтезом апертуры антенны // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании «НИТ 2014»: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2014. С. 251–252.
107. Ушенкин В.А. Обработка данных радиолокационного наблюдения Земли из космоса // Новые информационные технологии в научных исследованиях. Материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. В 2-х томах. Рязань, 2022. С. 10–14.

108. Ушенкин В.А. Повышение устойчивости значений вегетационного индекса к влиянию атмосферных искажений // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2012. С. 178–180.
109. Ушенкин В.А. Оценка качества результата комплексирования каналов гиперспектральных изображений путем анализа в области градиента // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2013. С. 233–234.
110. Ушенкин В.А. Адаптивное нейросетевое сжатие мультиспектральных космических изображений поверхности Земли // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 3. С. 18–26.
111. Ушенкин В.А. Оценивание доплеровского центроида при первичной обработке космических радиоголограмм маршрутного режима съемки путем амплитудного анализа // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 31–39.
112. Ушенкин В.А. Статистическая радиометрическая коррекция космических РСА-изображений, полученных в маршрутном режиме съемки // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 3. С. 3–9.
113. Ушенкин В.А. Уточнение угловой ориентации космического аппарата радиолокационного наблюдения Земли на основе анализа целевой информации // СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 27–33.
114. Ушенкин В.А. Технологии высокоточной автоматической привязки и высокоуровневой обработки радиолокационных космических изображений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24. № 2. С. 74–86.
115. Ушенкин В.А. Технологии высокоточной автоматической привязки и высокоуровневой обработки радиолокационных космических изображений // Материалы Совместной III Отраслевой научно-практической конференции «Созвездие

Роскосмоса: траектория науки» и VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («VIII Козловские чтения»). Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2024. С. 59–61.

116. Ушенкин В.А. Уточнение геодезической привязки радиолокационного изображения по опорному оптическому снимку // СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 33–37.

117. Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных изображений, полученных на восходящем и нисходящем витках орбиты, с использованием нечеткой логики Лукасевича // Двадцать третья международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=338&thesis=10749>.

118. Ушенкин В.А. Метод объединения радиолокационных изображений, полученных на восходящем и нисходящем витках орбиты, с использованием нечеткой логики Лукасевича и мультивременной фильтрации спектр-шума // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2025. С. 156–157.

119. Ушенкин В.А. Метод высокоточной обработки топографических интерферометрических изображений с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации от оптико-электронных систем ДЗЗ // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 1. С. 59–66.

120. Ушенкин В.А. Когерентный анализ пар радиолокационных изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании «НИТ 2014»: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2014. С. 256–257.

121. Ушенкин В.А. Модификация и комбинирование методов развертывания фазы при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XX Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2015. С. 237–238.

122. Ушенкин В.А. Развортывание фазы при интерферометрической обработке информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. 2015. Т. 9. С. 128–131.
123. Ушенкин В.А. Комбинирование методов развертывания фазы при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под ред. О.В. Миловзорова. 2016. Т. 2. С. 112–117.
124. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка информации от радиолокационных систем ДЗЗ с использованием априорных данных // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под ред. О.В. Миловзорова. 2016. Т. 2. С. 117–121.
125. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка высокодетальной информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. С. 206–207.
126. Ушенкин В.А. Уточнение пространственной базы при интерферометрической радиолокационной съемке Земли из Космоса // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2016. С. 279–280.
127. Ушенкин В.А. Формирование опорных данных для интерферометрической обработки радиолокационной информации на основе комплексирования низкодетальных цифровых моделей рельефа // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 2016. С. 276–277.
128. Ушенкин В.А. Повышение точности опорной информации о высотах объектов земной поверхности на основе комплексирования цифровых моделей рельефа // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / под ред. О.В. Миловзорова. 2017. Т. 2. С. 112–117.

дунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 9 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. 2017. Т. 1. С. 179–184.

129. Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли на основе привлечения опорной 3D-модели и анализа наблюданной сцены // Тезисы докладов Пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. С. 128–129.

130. Ушенкин В.А. Анализ влияния качества формирования изображений в космических системах радиолокационного наблюдения Земли на точность интерферометрической обработки // 7-я международная научно-техническая конференция «К.Э.Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Тезисы докладов. 2017. С. 411–414.

131. Ушенкин В.А. Модификация технологической схемы интерферометрической обработки информации от систем радиолокационного наблюдения Земли с привлечением низкодетальной стереофотограмметрической информации // СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 44–48.

132. Ушенкин В.А. Комплексирование разнородной информации от космических аппаратов радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли // СТНО-2025: сборник трудов VIII Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2025. Т. 6. С. 38–44.

133. ГОСТ Р 59079-2020. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Типы данных дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

134. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Стратилатов Н.Р., Бакланов А.И., Федоров В.М., Новиков М.В. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. 2010. № 4. С. 23–26.

135. Benz U., Strodl K., Moreira A. A comparison of several algorithms for SAR raw data compression // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33. No. 5. P. 1266–1276.
136. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Мятов Г.Н. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 29–36.
137. Пресняков О.А. Априорная оценка точности "сшивки" изображений от многоматричных датчиков, выполняемой по данным измерительной аппаратуры КА // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 4. С. 57–62.
138. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Оперативное совмещение спектрозональных изображений при цветосинтезе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 22. С. 3–7.
139. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Модели координатного соответствия спектрозональных снимков сверхвысокого разрешения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 28. С. 12–17.
140. Cumming I.G., Wong F.H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Artech House, 2005. 660 p.
141. Van Zyl J.J., Kim Y. Synthetic Aperture Radar Polarimetry. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. 312 p.
142. Еремеев В.В., Зенин В.А. Радиометрическая коррекция структурных искажений в системах многоматричной съемки земной поверхности // Радиотехника. 2015. № 5. С. 28–34.
143. Зенин В.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Радиометрическое обеспечение кадрово-сканерных систем ДЗЗ // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 3. С. 43–46.
144. Антонушкина С.В. Радиометрическое обеспечение систем космического мониторинга поверхности Земли. Диссертация ... канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2002. 176 с.
145. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.

146. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А. Организация процесса формирования мозаичных изображений земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 3. С. 47–52.
147. Smara Y., Mansoura I.S. A study of multitemporal filtering techniques for SAR images speckle reduction // Remote sensing in transition / edited by R. Goossens. Rotterdam: Millpress, 2004. P. 135–141.
148. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Сухов А.А. Алгоритмы формирования цифровых моделей рельефа по данным от КА "Ресурс-ДК" // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 1. С. 96–104.
149. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Программно-математическое обеспечение системы обработки космических стереоизображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 27. С. 17–22.
150. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 44–49.
151. Méric S., Fayard F., Pottier É. Radargrammetric SAR image processing // Geoscience and Remote Sensing / edited by P.-G. P. Ho. 2009. P. 421–454.
152. Rosen P., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proc. of the IEEE. 2000. Vol. 88. No. 3. P. 333–382.
153. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. Vol. 38. No. 5. P. 2202–2212.
154. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. Vol. 39. No. 1. P. 8–20.
155. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. No. 11. P. 2375–2383.

156. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 115. P. 78–89.
157. Lee J.S., Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: from Basic to Applications. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2009. 398 p.
158. Krogager E. A new decomposition of the radar target scattering matrix // Electronics Letter. 1990. Vol. 26. No. 18. P. 1525–1526.
159. Krogager E. Aspects of Polarimetric Radar Imaging: Doctoral Thesis. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 1993. 235 p.
160. Krogager E., Czyz Z.H. Properties of the sphere, diplane, helix decomposition // Proc. of 3rd International Workshop on Radar Polarimetry. 1995. P. 106–114.
161. Cameron W.L., Leung L.K. Feature Motivated Polarization Scattering Matrix Decomposition // Proc. IEEE International Radar Conference. 1990. P. 549–557.
162. Cameron W.L., Youssef N.N., Leung L.K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. No. 3. P. 793–803.
163. Carea L., Wanielik G. Polarimetric SAR processing using the polar decomposition of the scattering matrix // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2001. P. 363–365.
164. Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36. No. 3. P. 963–973.
165. Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model to describe polarimetric SAR data // Proc. of SPIE Conference on Radar Polarimetry. 1993. Vol. 1748. P. 213–225.
166. Yamaguchi Y., Moriyama T., Ishido M., Yamada H. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. No. 8. P. 1699–1706.

167. Yamaguchi Y., Yajima Y., Yamada H. A four-component decomposition of POLSAR images based on the coherency matrix // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2006. Vol. 3. No. 3. P. 292–296.
168. Freeman A. Fitting a two-component scattering model to polarimetric SAR data from forests // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2007. Vol. 45. No. 8. P. 2583–2592.
169. Huynen J.R. Theory and applications of the N-target decomposition theorem // Journées Internationales de la Polarimétrie Radar. 1990.
170. Barnes R.M. Roll-invariant decompositions for the polarization covariance matrix // Polarimetry Technology Workshop. 1988.
171. Holm W.A., Barnes R.M. On radar polarization mixed state decomposition techniques // Proceedings 1988 USA National Radar Conference. 1988. P. 249–254.
172. Van Zyl J.J. Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar data // Proceedings SPIE Conference on Radar Polarimetry. 1992. Vol. 1748. P. 184–212.
173. Cloude S.R. Radar target decomposition theorems // Institute of Electrical Engineering and Electronics Letter. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 22–24.
174. Lee J.S., Grunes M.R., Ainsworth T.L., Du L.J., Schuler D.L., Cloude S.R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier // IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing. 1999. Vol. 37. No. 5. P. 2249–2258.
175. Pottier E., Lee J.S. Unsupervised classification scheme of PolSAR images based on the complex Wishart distribution and the «H/A/α» Polarimetric decomposition theorem // Proc. of EUSAR. 2000. P. 265–268.
176. Lee J.S., Grunes M.R., Ferro-Famil L. Unsupervised terrain classification preserving scattering characteristics // IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. No. 4. P. 722–731.
177. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Trans. on Image Processing. 2004. Vol. 13. No. 4. P. 600–612.

178. Sahoolizadeh H., Suratgar A.A. Adaptive image compression using neural networks // 5th International Conference: Science of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications. 2009. 5 p.
179. Islam K., Dang M., Lee S., Moon H. Image compression with recurrent neural networks and generalized divisive normalization // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2021. 5 p.
180. Theis L., Shi W., Cunningham A., Huszar F. Lossy image compression with compressive autoencoders // International Conference on Learning Representations. 2017. 19 p.
181. Toderici G., Vincent D., Johnston N., Hwang S.J., Minnen D., Shor J., Covell M. Full resolution image compression with recurrent neural networks // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. 9 p.
182. Bellard F. NNCP v2: Lossless Data Compression with Transformer. 2021. 5 p. URL: bellard.org/nncp/nncp_v2.1.pdf
183. Knoll B. CMIX. URL: www.byronknoll.com/cmix.html
184. Goyal M., Tatwawadi K., Chandak S., Ochoa I. DeepZip: Lossless data compression using recurrent neural networks // Data Compression Conference. 2019. 10 p.
185. Kwok R., Johnson W. Block Adaptive Quantization of Magellan SAR Data // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1989. Vol. 26. No. 5. P. 375–383.
186. Algra T. Data compression for operational SAR missions using entropy-constrained block adaptive quantisation // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2002. Vol. 2. P. 1135–1139.
187. Moreira A., Blaser F. Fusion of block adaptive and vector quantizer for efficient SAR data compression // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1993. Vol. 4. P. 1583–1585.
188. McLeod I.H., Cumming I.G. On-board encoding of the ENVISAT wave mode data // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1995. Vol. 3. P. 1681–1683.

189. Kuduvalli G., Dutkiewicz M., Cumming I.G. Synthetic aperture radar signal data compression using block adaptive quantization // 1994 Science Information Management and Data Compression Workshop. P. 43–55.
190. Zeoli G.W. A lower bound on the data rate for synthetic aperture radar // IEEE Trans. on Information Theory. 1976. Vol. IT-22. No. 6. P. 708–715.
191. Attema E., Cafforio C., Gottwald M. et al. Flexible Dynamic Block Adaptive Quantization for Sentinel-1 SAR Missions // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2010. Vol. 7. No. 4. P. 766–770.
192. Wu C. A digital system to produce imagery from SAR data // AIAA Conference: System Design Driven by Sensors. 1976.
193. Wu C. Processing of SEASAT SAR data // SAR Technology Symposium. 1977.
194. Cumming I.G., Bennett J.R. Digital processing of SEASAT SAR data // IEEE 1979 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1979. P. 710–718.
195. Bennett J.R., Cumming I.G. A digital processor for the production of SEASAT synthetic aperture radar imagery // Proc. SURGE Workshop. 1979.
196. Bamler R., Runge H. Method of correcting range migration in image generation in synthetic aperture radar. U.S. Patent No. 5,237,329. Patent Appl. No. 909,843, filed July 7, 1992, granted August 17, 1993.
197. Runge H., Bamler R. A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp scaling // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1992. P. 372–375.
198. Cumming I.G., Wong F.H., Raney R.K. A SAR processing algorithm with no interpolation // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1992. P. 376–379.
199. Raney R.K., Runge N., Bamler R., Cumming I.G., Wong F.H. Precision SAR processing using chirp scaling // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32. No. 4. P. 786–799.

200. Cumming I.G., Lim J. The design of a digital breadboard processor for the ESA remote sensing satellite synthetic aperture radar. Technical report, MacDonald Detwiler, Richmond, BC, July 1981. Final report for ESA Contract No. 3998/79/NL/HP(SC).
201. Okkes R., Cumming I.G. Method of and apparatus for processing data generated by a synthetic aperture radar system. European Patent No. 0048704, filed September 15, 1981, granted February 20, 1985.
202. Moreira A., Mittermayer J., Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in Stripmap and ScanSAR imaging modes // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. No. 5. P. 1123–1136.
203. Mittermayer J., Scheiber R., Moreira A. The extended chirp scaling algorithm for ScanSAR data processing // Proc. European Conference on Synthetic Aperture Radar. 1996. P. 517–520.
204. Mittermayer J., Moreira A. A generic formulation of the extended chirp scaling algorithm (ECS) for phase preserving ScanSAR and SpotSAR processing // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2000. Vol. 1. P. 108–110.
205. Rocca F., Cafforio C., Prati C. Synthetic aperture radar: a new application for wave equation techniques // Geophysical Prospecting. 1989. Vol. 37. P. 809–830.
206. Cafforio C., Prati C., Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1991. Vol. 27. No. 2. P. 194–207.
207. Stolt R.H. Migration by Transform // Geophysics. 1978. Vol. 43. No. 1. P. 23–48.
208. Curlander J.C., Wu C., Pang A. Automated processing of spaceborne SAR data // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1982. Vol. 1. P. 3–6.
209. Bamler R. Doppler frequency estimation and the Cramer-Rao bound // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1991. Vol. 29. No. 3. P. 385–390.
210. Madsen S.N. Estimating the Doppler centroid of SAR data // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1989. Vol. 25. No. 2. P. 134–140.

211. Dragošević M. On accuracy of attitude estimation and Doppler tracking // Proceedings of the CEOS SAR Workshop. ESA-SP. 2000. Vol. 450. P. 127–130.
212. Bamler R., Runge H. PRF-ambiguity resolving by wavelength diversity // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1991. Vol. 29. No. 6. P. 997–1003.
213. Wong F.H., Cumming I.G. A combined SAR Doppler centroid estimation scheme based upon signal phase // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1996. Vol. 34. No. 3. P. 696–707.
214. Cumming I.G., Kavanagh P.F., Ito M.R. Resolving the Doppler ambiguity for spaceborne synthetic aperture radar // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1986. P. 1639–1643.
215. Freeman A., Curlander J.C. Radiometric correction and calibration os SAR images // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1989. Vol. 55. No. 9. P. 1295–1301.
216. Freeman A. Radiometric calibration of SAR image data // ISPRS Archives. 1992. Vol. 29. Part B1. P. 212–222.
217. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Структурно-параметрический синтез компонентов малого космического аппарата картографического назначения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 185–192.
218. Bast D.C., Cumming I.G. RADARSAT ScanSAR Roll Angle Estimation // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2002. Vol. 1. P. 152–154.
219. Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction // Bulletin Géodésique. 1972. Vol. 105. No. 1. P. 279–298.
220. Егошкин Н.А. Обработка бортовой навигационной информации для высокоточной оперативной коррекции космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 23–29.
221. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Рыжиков А.С. Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА "Landsat-8" // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 37–42.

222. Кузнецов А.Е., Рыжиков А.С. Программная организация опорного растрового покрытия, сформированного по данным КА "Landsat-8" // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 100–108.
223. Кузнецов А.Е., Рыжиков А.С. Алгоритм поиска одноименных объектов на изображениях земной поверхности с учетом малоинформационных областей // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 4. С. 52–56.
224. Costantini M., Zavagli M., Martin J., Medina A., Barghini A., Naya J., Hernando C., Macina F., Ruiz I., Nicolas E., Fernandez S. Automatic Coregistration of SAR and Optical Images Exploiting Complementary Geometry and Mutual Information // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. P. 8877–8880.
225. Paul S., Pati U.C. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor // IET Image Processing. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 62–73.
226. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 288 с.
227. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR image registration // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44. No. 10. P. 2861–2870.
228. Arikan M., van Leijen F., Guang L., Hanssen R. Improved image alignment under the influence of elevation // ESA SP-649. 2008.
229. Li Z., Bethel J. Image coregistration in SAR interferometry // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. Vol. 37. Part B1. P. 433–438.
230. Nitti D.O., Hanssen R.F., Refice A., Bovenga F., Nutricato R. Impact of DEM-assisted coregistration on high-resolution SAR interferometry // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. No. 3. P. 1127–1143.
231. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR image registration // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44 (10). pp. 2861–2870.
232. Arikan M., van Leijen F., Guang L., Hanssen R. Improved image alignment under the influence of elevation // ESA SP-649. 2008.

233. Gabriel A.K., Goldstein R.M. Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B // International Journal of Remote Sensing. 1988. Vol. 9. No. 5. P. 857–872.
234. Prati C., Rocca F. Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images // International Journal of Remote Sensing. 1990. Vol. 11. No. 12. P. 2215–2235.
235. Touzi R., Lopes A., Bruniquel J., Vachon P.W. Coherence estimation for SAR imagery // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37. No. 1. P. 135–149.
236. Marco A., D’Aria D., Monti Guarnieri A. Space-adaptive coherence estimation // Proc. Fringe Workshop. 2005.
237. Goldstein R.M., Werner C.L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. No. 21. P. 4035–4038.
238. Baran I., Stewart M.P., Kampes B.M., Perski Z., Lilly P. A modification to the Goldstein radar interferogram filter // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 9. P. 2114–2118.
239. Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // Radio Science. 1988. Vol. 23. No. 4. P. 713–720.
240. Prati C., Giani M., Leuratti N. SAR Interferometry: A 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values informations // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1992. P. 2043–2046.
241. Rosen P.A., Werner C.L., Hiramatsu A. Two-dimensional phase unwrapping for SAR interferograms by charge connection through neutral trees // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1994.
242. Ghiglia D.C., Romero L.A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods // J. Opt. Soc. Am. A. 1994. Vol. 11. No. 1. P. 107–117.
243. Шувалов Р.И. Алгоритм метода функций Грина для задачи развертки фазы на плоскости // Электронный научный вестник МГГУ. 2011. №2. С. 101–113.

244. Ghiglia D.C., Romero L.A. Minimum L(p)-norm 2-dimensional phase unwrapping // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1996. Vol. 13. No. 10. P. 1999–2013.
245. Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* 1998. Vol. 36. No. 3. P. 813–821.
246. Ahuja R.K., Magnanti T.L., Orlin J.B. Network flows: Theory, algorithms, and applications. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 864 p.
247. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numer. Math.* 1959. Vol. 1. No. 1. P. 269–271.
248. Eineder M., Hubig M., Milcke B. Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1998. P. 83–87.
249. Carballo G.F., Fieguth P. Probabilistic cost functions for network flow phase unwrapping // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1999. Vol. 3. P. 1531–1533.
250. Chen C.W. Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry: A dissertation for degree of Doctor of Philosophy. Stanford, 2001. 141 p.
251. Chen C.W., Zebker H.A. Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* 2002. Vol. 40. No. 8. P. 1709–1719.
252. Li G., Xiaoyang W., Hong Z., Chao W. Phase unwrapping based on network flow algorithm and divide and conquer strategy // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005. Vol. 7. P. 4829–4831.
253. Dudczyk J., Kawalec A. Optimizing the Minimum Cost Flow Algorithm for the Phase Unwrapping Process in SAR Radar // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences.* 2014. P. 511–516.
254. Costantini M., Malvarosa F., Minati F. Multi-scale and block decomposition methods for finite difference integration and phase unwrapping of very large

datasets in high resolution SAR interferometry // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2012. P. 5574–5577.

255. Шувалов Р.И. Математическое моделирование в задаче развертки фазы радиолокационных топографических интерферограмм // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11 (11). С. 228–243.

256. Carballo G.F., Fieguth P.W. Hierarchical Network Flow Phase Unwrapping // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2002. Vol. 40. No. 8. P. 1695–1708.

257. Xie X., Pi Y. Phase noise filtering and phase unwrapping method based on unscented Kalman filter // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2011. Vol. 22. No. 3. P. 365–372.

258. Wang L.F., Yan M. Weighted Kalman Filter Phase Unwrapping Algorithm Based on the Phase Derivative Variance Map // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols. 475–476. P. 991–995.

259. Abdallah W.B., Abdelfattah R. A Joint Markov Random Field Approach for SAR Interferogram Filtering and Unwrapping // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9. No. 7. P. 3016–3025.

260. Xu W., Cumming I. A region growing algorithm for InSAR phase unwrapping // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37. P. 2044–2046.

261. Tipper D.J., Burton D.R., Lalor M.J. A neural network approach to the phase unwrapping problem in fringe analysis // Nondestr. Test. Eva. 1996. Vol. 12. P. 391–400.

262. Schwartzkopf W., Milner T.E., Ghosh J., Evans B.L., Bovik A.C. Two-Dimensional Phase Unwrapping Using Neural Networks // 4th IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation. 2000. P. 274–277.

263. Singh K., Stussi N., Keong K.L., Hock L. Baseline estimation in interferometric SAR // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1997. Vol. 1. P. 454–456.

264. Monti Guarnieri A., Biancardi P., D’Aria D., Rocca F. Accurate and robust baseline estimation // EUSAR. 2000. P. 109–112.

265. Kimura H., Todo M. Baseline estimation using ground points for Interferometric SAR // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1997. Vol. 1. P. 242–244.
266. Егошкин Н.А. Методы высокоточной геометрической обработки информации от современных систем космического зондирования Земли: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2019. 323 с.
267. Hoja D., Reinartz P., Schroeder M. Comparison of DEM generation and combination methods using high resolution optical stereo imagery and interferometric SAR data // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006. 6 p.
268. Hoja D., d'Angelo P. Analysis of DEM combination methods using high resolution optical stereo imagery and interferometric SAR data // ISPRS Hannover Workshop 2009 High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. 2009. 6 p.
269. Hoja D., Reinartz P., Lehner M. DSM generation from high resolution satellite imagery using additional information contained in existing DSM // ISPRS Hannover Workshop 2005 High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. 2005. Vol. XXXVI. Part I/W3.
270. Grohmann G., Kroenung G., Strebeck J. Filling SRTM Voids: The Delta Surface Fill Method // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2006. Vol. 72. No. 3. P. 213–216.
271. Papasaika H., Poli D., Baltsavias E. Fusion of digital elevation models from various data sources // Proc. of GEOWS. 2009.
272. Hanssen R. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry: DEOS report no. 98.1. Delft: Delft Univercity Press, 1998. 136 p.
273. Кочергин А.М. Алгоритмы и технологии предварительной обработки изображений в системах каталогизации данных дистанционного зондирования Земли: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2008. 116 с.
274. Пошехонов В.И. Алгоритмы и модели стереофотограмметической обработки данных от систем спектрозональной съемки Земли: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2010. 193 с.

275. Steinhaus H. Sur la division des corps materiels en parties // Bulletin L'Académie Polonaise des Science. 1957. – Vol 4. P. 801–804.
276. Kong X., Qian Y., Zhang A. Cloud and shadow detection and removal for Landsat-8 data // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8921. 10 p.
277. Mohajerani S., Saeedi P. Cloud-Net+: A Cloud Segmentation CNN for Landsat 8 Remote Sensing Imagery Optimized with Filtered Jaccard Loss Function // ArXiv. 2020. 10 p.
278. Yang J., Guo J., Yue H., Liu Z., Hu H., Li K. CDnet: CNN-Based Cloud Detection for Remote Sensing Imagery // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2019. Vol. 57. No. 8. P. 6195–6211.
279. Jeppesen J., Jacobsen R., Inceoglu F., Toftegaard T. A cloud detection algorithm for satellite imagery based on deep learning // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 229. P. 247–259.
280. Le Goff M., Tourneret J.-Y., Wendt H., Ortner M., Spigai M. Deep Learning for Cloud Detection // 8th International Conference of Pattern Recognition Systems. 2017. 6 p.
281. Katoch A., Sharma R. Cloud Detection Techniques Using Deep Learning: UNET, UNET++, RESUNET , RESUNET++ And Attention-UNet // Authorea. 2024.
282. Wang Z., Zhao L., Meng J., Han Y., Li X., Jiang R., Chen J., Li H. Deep Learning-Based Cloud Detection for Optical Remote Sensing Images: A Survey // Remote Sensing. 2024. Vol. 16.
283. Eremeev V., Kuznetcov A., Kochergin A., Makarenkov A. Clouds segmentation on panchromatic high spatial resolution remote sensing images using convolutional neural networks // Proc. of SPIE. 2019. Vol. 11155.
284. Kervennic E., Louis T., Benguigui M., Bobichon Y., Avaro N., Grenet I., Férésin F., Girard A. Embedded cloud segmentation using AI : Back on years of experiments in orbit on OPS-SAT // European Data Handling & Data Processing Conference. 2023. 8 p.
285. Giuffrida G., Fanucci L., Meoni G., Batić M., Buckley L., Dunne A., van Dijk C., Esposito M., Hefele J., Vercruyssen N., Furano G., Pastena M., Aschbacher J.

The Φ-Sat-1 Mission: The First On-Board Deep Neural Network Demonstrator for Satellite Earth Observation // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. 14 p.

286. Ландышев С.В. Параллелизм инференса глубоких свёрточных нейронных сетей на СБИС К1879ВМ8Я // Форум «Микроэлектроника 2022». 2022. 8 с.
287. Zhang J., Wei J., Huang G., Zhang Y. Fusion of ascending and descending polarimetric SAR data for colour orthophoto generation // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010. Vol. 38. Part 7A. P. 323–328.
288. Chandrakanth R., Saibaba J., Varadan G., Ananth Raj P. Fusion of ascending and descending pass high resolution SAR data // Journal of Geomatics. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 164–169.
289. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Ларетина Н.А. Проективные морфологии на базе операторов фильтрации и сегментации изображений, вычислимых методом динамического программирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. № 6. С. 14–24.
290. Визильтер Ю.В., Выголов О.В., Желтов С.Ю., Рубис А.Ю. Комплексирование многоспектральных изображений для систем улучшенного видения на основе методов диффузной морфологии // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2016. № 4. С. 103–114.
291. Olkkonen H., Pesola P. Gaussian pyramid wavelet transform for multiresolution analysis of images // Graphical Models and Image Processing. 1996. Vol. 58. P. 394–398.
292. Toet A. Image fusion by a ratio of low pass pyramid // Pattern Recognition Letters. 1989. Vol. 9. No. 4. P. 245–253.
293. Toet A., van Ruyven J.J., Valeton J.M. Merging thermal and visual images by a contrast pyramid // Optical Engineering. 1989. Vol. 28. No. 7. P. 789–792.
294. Anderson C.H. A Filter-Subtract-Decimate Hierarchical Pyramid Signal Analyzing and Synthesizing Technique. United States Patent 4718104. Washington D.C., 1987.

295. Hahn M., Samadzadegan F. A study of image fusion techniques in remote sensing // ISPRS Archives. 2004. Vol. 35. Part B4. P. 889–894.
296. Zhou Z., Li S., Wang B. Multi-scale weighted gradient-based fusion for multi-focus images // Information Fusion. 2014. Vol. 20. P. 60–72.
297. Pajares G., Manuel de la Cruz J. A wavelet-based image fusion tutorial // Pattern Recognition. 2004. Vol. 37. No. 9. P. 1855–1872.
298. Liu Y., Chen X., Peng H., Wang Z. Multi-focus image fusion with a deep convolutional neural network // Information Fusion. 2017. Vol. 36. P. 191–207.
299. Li J., Li C., Xu W., Feng H., Zhao F., Long H., Meng Y., Chen W., Yang H., Yang G. Fusion of optical and SAR images based on deep learning to reconstruct vegetation NDVI time series in cloud-prone regions // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 112.
300. Gençay S., Özcan C. An Image Fusion Method of SAR and Optical Images, Based on Image Intensity Fields, by Reducing the Effect of Speckle Noise // Acta Polytechnica Hungarica. 2024. Vol. 21. No. 11. P. 73–85.
301. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрональной видеинформации: диссертация ... канд. техн. наук: 05.13.01. Рязань, 2003. 130 с.
302. Sentinel-1 SAR Instrument. SAR Space Packet Protocol Data Unit No. S1-IF-ASD-PL-007. Issue 13. Airbus Defence and Space, 22.06.2015. 85 p.
303. Cohen A., Daubechies I., Feauveau J.-C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets // Communications on Pure and Applied Mathematics. 1992. Vol. 45. No. 5. P. 485–560.
304. Mahoney M. Large Text Compression Benchmark. URL: <http://www.mattmahoney.net/dc/text.html> (дата обращения 01.02.2023).
305. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift // Proc. of the 32nd International Conference on Machine Learning. 2015. Vol. 37. P. 448–456.
306. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.

307. Apeh O., Uzodinma V., Ebinne E., Moka E., Onah E. Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa // Journal of Geographic Information System. 2019. Vol. 11. P. 111–123.
308. Wecklich C., Gonzalez C., Bräutigam B. Height accuracy for the first part of the global TanDEM-X DEM Data // Geomorphometry for Geosciences / edited by J. Jasiewicz, Zb. Zwoliński, H. Mitasova, T. Hengl. Poznań, 2015. P. 5–8.
309. Sorensen H.V., Jones D.L., Heideman M.T., Burrus C.S. Real-valued fast Fourier transform algorithms // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1987. Vol. 35. No. 6. P. 849–863.
310. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. 1965. Vol. 19. P. 297–301.
311. Fodor J. Left-continuous t-norms in fuzzy logic: An overview // Acta Polytechnica Hungarica. 2004. Vol. 1. No. 2.
312. Farr T.G., Kobrick M. The Shuttle Radar Topography Mission // RTO Meeting Proceedings 61: Space-Based Observation Technology. 2000. P. 33-1–33-3.
313. Bielski C., López-Vázquez C., Grohmann C.H., Guth P.L., Hawker L., Gesch D.B., Trevisani S., Herrera-Cruz V., Riazanoff S., Corseaux A., Reuter H.I., Strobl P. Novel approach for ranking DEMs: Copernicus DEM improves one arc second open global topography // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2024. Vol. 62. Article 4503922. 22 p.
314. Cuartero A., Felicísimo A.M., Ariza F.J. Accuracy of DEM generation from Terra-ASTER stereo data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004. Vol. 35. Part B2. P. 559–563.
315. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by Alos PRISM // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. 41. Part B4. P. 157–162.
316. Getreuer P. A Survey of Gaussian Convolution Algorithms // Image Processing On Line. 2013. No. 3. P. 286–310.

317. King M.D., Menzel W.P., Kaufman Y.J., Tanré D., Gao B.-C., Platnick S., Ackerman S.A., Remer L.A., Pincus R., Hubanks P.A. Cloud and Aerosol Properties, Precipitable Water, and Profiles of Temperature and Water Vapor from MODIS // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41. No. 2. P. 442–458.
318. Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining: Second Edition / edited by C. Sammut, G.I. Webb. New York: Springer, 2017. 1351 p.
319. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770–778.
320. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 779–788.
321. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. P. 234–241.
322. Curran K., Crumlish J., Fisher G. OpenStreetMap // International Journal of Interactive Communication Systems and Technologies. 2012. Vol. 2. No. 1. P. 69–78.
323. Lee J.S. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images // Computer Graphics and Image Processing. 1981. Vol. 17. P. 24–32.
324. Frost V.S., Stiles J.A., Josephine A., Shanmugan K.S., Holtzman J.C. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1982. Vol. PAMI-4. No. 2. P. 157–166.
325. Lopes A., Nezry E., Touzi R., Laur H. Maximum A Posteriori Speckle Filtering and First Order texture Models in SAR Images // International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1990. P. 2409–2412.
326. Schwerdt M., Braeutigam B., Bachmann M., Doering B. TerraSAR-X Calibration Results // 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2008.
327. Setan H., Othman N.L., Ses S. Mapping via Google Maps and Handheld GPS: Accuracy Aspects // Proc. of World Engineering Congress. 2010. P. 281–290.

328. Piella G., Heijmans H. New Quality Measures for Image Fusion // Proc. of 2003 International Conference on Image Processing. 2003.

329. Hossny M., Nahavandi S., Crieghton D. Feature-Based Image Fusion Quality Metrics // Intelligent Robotics and Applications. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 5314. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 469–478.

330. Универсальная платформа быстрой разработки приложений для обработки данных дистанционного зондирования Земли «ER-Set»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610968, РФ: В.И. Побаруев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»; заявл. 04.12.2012; опубл. 09.01.2013.

ПРИЛОЖЕНИЕ

**АКТЫ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»
(АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»)**

ул. Земеца, д.18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@samspace.ru
ОКПО 43892776, ИНН 6312139922, КПП 997450001

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
генерального директора –
генеральный конструктор
АО «РКЦ «Прогресс», д.т.н.

Р.Н. Ахметов*

2025 г.



АКТ

об использовании результатов докторской диссертации Ушенкина В.А.
«Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических си-
стем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли»

Начиная с 2013 г. АО «РКЦ «Прогресс» совместно с Рязанским государственным радиотехническим университетом имени В.Ф. Уткина ведет опытно-конструкторские работы по созданию математических и программных средств обработки информации от космического комплекса «Обзор-Р».

В докторской диссертации В.А. Ушенкина предложен ряд новых решений, реализованных в специальном программном обеспечении высокого уровня обработки (СПО ВО) радиолокационной информации космического аппарата (КА) «Обзор-Р» №1 и используемых при техническом проектировании КА «Обзор-Р» №2:

- методы уточнения угловой ориентации радиолокационного КА, измеренной оптико-электронными приборами – астродатчиками, на основе анализа радиолокационной информации;

- алгоритмы геодезической привязки и геометрической обработки радиолокационной информации на основе совмещения с опорными оптическими изображениями;

- метод объединения радиолокационных изображений с восходящего и нисходящего витков орбиты в условиях низкой детальности опорных стереофотограмметрических данных;

- метод обработки интерферометрических изображений с целью получения цифровых моделей высот с учетом опорных стереофотограмметрических данных;

- алгоритмы объединения радиолокационных и оптических изображений.

СПО ВО прошло наземную экспериментальную отработку, показавшую высокую эффективность предложенных решений.

Первый заместитель
генерального конструктора
– первый заместитель
начальника ЦСКБ

Заместитель главного
конструктора, к.т.н.

Филатов Артем Викторович**

Шилов Лев Борисович***

* ул. Земеца, д.18 г. Самара, 443009; тел.: (846)992-65-29; e-mail ARN@samspace.ru

**ул. Земеца, д.18 г. Самара, 443009; тел.: (846)992-64-89; e-mail Filatov.AV@samspace.ru

***ул. Земеца, д.18 г. Самара, 443009; тел.(846)228-96-90; e-mail shilov@samspace.ru

Р.Н. Ахметов, А.В. Филатов, Л.Б. Шилов выражают согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Ушенкина Виктора Андреевича и их дальнейшую обработку.



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора,
д-р техн. наук, проф.

Б. В. Хартов

11 2025 г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы

Ушенкина Виктора Андреевича

на тему "Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли"

Комиссия в составе канд. техн. наук Савченко А.В. (председатель комиссии), канд. физ.-мат. наук Жамкова А.С. (член комиссии), канд. техн. наук Жиганова В.Н. (член комиссии), канд. техн. наук Шувалова В.А. (член комиссии) составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ушенкина Виктора Андреевича на тему "Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли", представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика", а именно:

1. нейросетевые алгоритмы сегментации облачности на оптических снимках;
2. нейросетевые алгоритмы сжатия оптических снимков;

использовались при проведении исследований в рамках НИР "Нейроборт". Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокую точность сегментации облачности и малый уровень потерь при сжатии изображений при высокой скорости обработки как на автоматизированном рабочем месте, так и на

макете бортового интеллектуального вычислительного комплекса, что позволит, в перспективе, повысить эффективность обработки и передачи целевой информации с ОГ КА ДЗЗ.

Начальник отделения,
канд. техн. наук



А.В. Савченко

Заместитель начальника
отделения – начальник отдела,
канд. физ.-мат. наук



А.С. Жамков

Начальник отдела,
канд. техн. наук



Б.Н. Жиганов

Ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук



Б.А. Шувалов

Акционерное общество
«Российская корпорация ракетно-космического
приборостроения и информационных систем»



Авиамоторная, д. 53, Москва, 111250, почтовый адрес: а/я 16, г. Москва, 111250
тел.: +7 495 673-94-30, факс: +7 495 509-12-00, www.spacecorp.ru, contact@spacecorp.ru
ОКПО 11477389 ОГРН 1097746649681 ИНН 7722698789 КПП 774550001

ДЕ26 АК-1943

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»
Начальник НЦ ОМЗ - заместитель
директора проектов по созданию
систем ДЗЗ АО «Российские
космические системы», к.т.н.

Е.М. Зайцев

 « 16 » 10 2025 г.

АКТ

об использовании результатов докторской диссертации Ушенкина В.А.
«Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических
систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли»

Настоящий акт составлен о том, что результаты докторской диссертации
Ушенкина В.А. «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от
космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения
Земли» реализованы в программном обеспечении высокоуровневой обработки
радиолокационной информации в составе комплекса программно – технических
средств приема и обработки информации (КТСПОИ) космического аппарата
радиолокационного наблюдения «Обзор-Р», размещенного в Научном центре
оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы».
Методы и алгоритмы, разработанные в диссертации, позволяют повысить
эффективность обработки радиолокационной информации за счёт привлечения
данных от оптико-электронных космических систем наблюдения Земли.

Начальник отдела 2608

Старший научный сотрудник
отдела 2608, к.т.н.

Пешкун А.А.

Костюк Е.А.



Госкорпорация «Роскосмос»
Акционерное общество
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР имени М.В. ХРУНИЧЕВА»
 (АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»)
Научно-исследовательский институт космических систем
имени А.А. Максимова
 филиал акционерного общества «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ
 НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР имени М.В. ХРУНИЧЕВА»
 («НИИ КС имени А.А. Максимова» – филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»)

М.К. Тихонравова ул., д. 27, Московская область, мкр. Юбилейный, г. Королёв, 141091, тел.: (499) 277-37-10,
 факс: (499) 277-37-16, e-mail: info@khrunichev.ru, <http://www.khrunichev.ru>
 ОГРН 5177746220361, ИНН/КПП 7730239877/501843003

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель директора НИИ КС –
 генеральный конструктор,
 научный руководитель НИР «Интеграция – СГ»
 канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А.Н. Королев

«24» октября 2025 г.



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

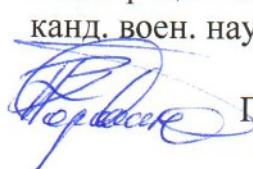
результатов докторской диссертации Ушенкина В.А.
 «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических
 систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли»

Настоящий акт составлен о том, что результаты докторской диссертации
 Ушенкина В.А. «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических
 систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения
 Земли» внедрены в «Научно-исследовательском институте космических систем
 имени А.А. Максимова» – филиале акционерного общества «Государственный
 космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева», в
 части бортового алгоритма обработки радиоголограмм как целевой информации
 космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, получаемой с
 использованием радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны X- и С-
 диапазонов, обеспечивающего уменьшение объема радиоголограмм (далее –
 Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм).

Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм доведен до программной реализации в виде программного комплекса для автоматизированной отработки бортового алгоритма обработки радиоголограмм (ЭО ПК АОР) и включен в состав экспериментального образца аппаратно-программного комплекса для отработки алгоритма автоматизированной обработки целевой информации на борту космического аппарата ДЗЗ, получаемой с использованием радаров космического базирования с синтезированной апертурой Э.АУВМ.ИЗ28.00.00, изготовленного в рамках программы Союзного государства «Разработка, модернизация и гармонизация нормативного, организационно-методического и аппаратно-программного обеспечения целевого применения космических систем дистанционного зондирования Земли России и Беларусь» («Интеграция-СГ»).

Алгоритм бортового сжатия радиоголограмм в составе Э.АУВМ.ИЗ28.00.00 прошел автоматизированную экспериментальную отработку, в ходе которой подтвердил, что его внедрение позволит существенно уменьшить (до 30%) объем информации, передаваемой с борта космического аппарата на наземные пункты приема, с запасом на помехоустойчивое кодирование при сохранении высокого качества радиолокационных изображений, сформированных из обработанных радиоголограмм.

Технический директор –
начальник Центра
ответственный исполнитель НИР
«Интеграция-СГ»
канд. воен. наук



Г.В. Коровин

Начальник комплекса
Научный руководитель
СЧ НИР «Интеграция-СГ-3.2.8»



Ю.Г. Пичурин

Главный научный аналитик
ответственный исполнитель
СЧ НИР «Интеграция-СГ-3.2.8»
канд. воен. наук, ст. науч. сотр.



А.Н. Черный

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по образовательной деятельности,
к.п.н., доцент



Е.А. Соколова
«02» 12 2025 г.

АКТ

об использовании результатов диссертации Ушенкина В.А.
«Методы и алгоритмы совместной обработки информации от космических
систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения Земли»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук,
в образовательном процессе ФГБОУ ВО «РГРТУ»

Настоящим подтверждаем, что результаты докторской диссертации
Ушенкина В.А. «Методы и алгоритмы совместной обработки информации от
космических систем радиолокационного и оптико-электронного наблюдения
Земли» использовались в учебном процессе кафедры «Космические
технологии» ФГБОУ ВО «РГРТУ» при руководстве выпускными
квалификационными работами, подготовке лекционного материала и
лабораторного практикума по дисциплине «Аэрокосмические системы и
технологии обработки информации», а также выпуске учебных пособий
«Геоинформатика. Обработка аэрокосмических изображений Земли» под
редакцией В.В. Еремеева и «Цифровая обработка данных радиолокационного
зондирования Земли из космоса» под редакцией В.В. Еремеева, В.А. Ушенкина,
рекомендованных научно-методическим советом ФГБОУ ВО «РГРТУ».

Проректор по научной работе
и инновациям, заведующий
кафедрой «Космические
технологии», д.т.н., доцент

С.И. Гусев

Профессор кафедры «Космические
технологии», д.т.н., профессор

А.И. Таганов

Профессор кафедры «Космические
технологии», д.т.н., профессор

Е.П. Васильев