

На правах рукописи

Колодыко Геннадий Николаевич

**СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО
ПРИЕМНИКА ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА И АЛГОРИТМЫ
ЕГО ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МНОГОСКОРОСТНОЙ
АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Специальности: 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения»

05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витязев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кошелев Виталий Иванович
кандидат технических наук, доцент
Филатов Александр Дмитриевич

Ведущая организация: ОАО «НИИ приборостроения имени
В.В. Тихомирова», г. Жуковский

Защита состоится 10 октября 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59\1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «___» августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.04

канд.техн.наук, доцент

А.Г. Борисов

Колодько Геннадий Николаевич

**СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО
ПРИЕМНИКА ТРАЕКТОРНОГО СИГНАЛА И АЛГОРИТМЫ
ЕГО ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МНОГОСКОРОСТНОЙ
АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 11 августа 2008 г. Формат бумаги 60x84\16.

Бумага офсетная. Печать. Усл.печ.л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано в ООО НПЦ «Информационные технологии»

3900035. г. Рязань, ул. Островского, д.21/1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время во многих районах мира сохраняется угроза возникновения региональных военных конфликтов на суше и на море. В связи с этим для государств таких регионов имеет большое значение наличие многофункциональных самолетов, которые, наряду с борьбой с воздушным противником, могут выполнять ударные (штурмовые) задачи по наземным и надводным целям. К числу таких самолетов принадлежат двухместные отечественные истребители Су-30 и Су-27УБ. Однако существовавший ранее комплекс бортового радиоэлектронного оборудования этих самолетов был разработан достаточно давно и не отвечал современным требованиям. Поэтому потребовалась его модернизация, цель которой состояла в дальнейшем расширении боевых возможностей истребителей в борьбе с воздушным противником и введении новых режимов работы, предназначенных для поражения наземных и надводных объектов.

В то же время истребители аналогичного класса, находящиеся на вооружении НАТО, а именно F-15, F-16, F-18, начали оснащаться РЛС нового поколения с полностью цифровой обработкой траекторного сигнала, что значительно расширило функциональные возможности самолетов и повысило эффективность их боевого применения, в первую очередь по наземным и надводным целям. Аналогичные задачи решались отечественными разработчиками - учеными и специалистами, среди которых можно выделить работы Антипова В.Н., Горяинова В.Т., Кондратенкова Г.Ф., Лаврова А.А., Орлова М.С., Самарина О.Ф., Фролова А.Ю. и др. Однако резкое сокращение объемов финансирования НИОКР в 90-х годах не позволило решить поставленную проблему путем полного переоборудования радиолокационного прицельного комплекса истребителей (РЛПК Н001). В этих условиях была выдвинута концепция «обводного канала», в соответствии с которой полностью сохранялись существующее радиоэлектронное оборудование и соответствующие режимы его работы, а следовательно, и все то, что было ранее наработано в процессе длительных летных испытаний и многочисленных заводских доводок, обучения летчиков и наземных специалистов, создания тренажеров и учебных комплексов. Суть модернизации заключалась во введении дополнительной системы управления вооружением самолетов в режиме «воздух-поверхность» путем наращивания возможностей бортового радиолокационного комплекса (БРЛК) за счет новых элементов и алгоритмов.

Одним из центральных элементов дополнительного оборудования является цифровой приемник траекторного сигнала, который строится с применением современных цифровых сигнальных процессоров и решает весь комплекс задач радиовидения на этапе формирования радиолокационного изображения (РЛИ) и селекции наземных (надводных) движущихся целей (НДЦ). Введение процессора обработки сигналов в состав БРЛК поставило перед разработчиками целый комплекс научно-технических задач, связанных с созданием эффективного программно-алгоритмического обеспечения его работы в различных режимах картографирования земной поверхности и селекции НДЦ.

Объектом исследований настоящей диссертационной работы являются способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмов его обработки при решении задач радиовидения, связанных с формированием РЛИ и селекцией НДЦ. **Предмет** исследований – повышение разрешающей способности, точности и скорости формирования РЛИ, а также уменьшение вычислительных затрат и памяти данных путем использования многоскоростной адаптивной фильтрации траекторного сигнала.

Известно, что одним из наиболее эффективных способов минимизации вычислительных затрат при решении широкого круга задач ЦОС является многоскоростная обработка сигналов, использующая понижение и повышение частоты дискретизации. Идея последовательного понижения частоты дискретизации траекторного сигнала при переходе от внутрипериодной к межпериодной обработке и самого РЛИ при его последующем формировании и отображении на индикаторе, естественно, не обошла вниманием и специалистов в области радиовидения.

Целью настоящей диссертационной работы являются разработка и исследование способов построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмов его обработки с применением многоскоростной адаптивной фильтрации, направленных на повышение качества формирования РЛИ и вероятности обнаружения НДЦ при одновременной минимизации вычислительных затрат и памяти данных.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач.

1. Анализ методов и алгоритмов обработки траекторного сигнала в различных режимах картографирования земной поверхности и селекции НДЦ, возникающих в связи с реализацией концепции «обводного канала» при введении в действующую систему управления вооружением отечественных истребителей режима «воздух-поверхность».
2. Разработка структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмов формирования РЛИ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации в режимах ДОЛ и ФСА.
3. Исследование эффективности многоскоростной адаптивной фильтрации траекторного сигнала при решении задач картографирования земной поверхности в режимах ДОЛ и ФСА.
4. Разработка структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмов селекции НДЦ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации и исследование их эффективности.
5. Разработка и исследование способов построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала в БРЛК с двухдиапазонной ФАР.
6. Разработка обобщенной структуры цифрового приемника траекторного сигнала в задачах формирования РЛИ и селекции НДЦ.
7. Моделирование и экспериментальные исследования способов и алгоритмов формирования РЛИ и селекции НДЦ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались теория и методы цифровой обработки сигналов, включающие в себя: методы частотно-временной селекции и спектрального анализа, многоскоростной и адаптивной фильтрации, оптимального проектирования многопроцессорных систем ЦОС. Теоретические исследования проводились с применением математического аппарата статистической радиотехники, радиолокации и радиовидения, методов оптимизации и имитационного моделирования.

Научная новизна.

1. Разработаны структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы формирования РЛИ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации в режимах ДОЛ и ФСА картографирования земной поверхности.
2. Разработаны структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы селекции НДЦ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации.
3. Предложены способы совмещения апертур двухдиапазонной ДНА и модификация структуры цифрового приемника траекторного сигнала на их основе.
4. Проведены исследование и оценка эффективности способов и алгоритмов формирования РЛИ и селекции НДЦ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации.

Практическая значимость. Предложенные способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы его обработки позволяют:

1. Многократно (на порядок и более) уменьшить объем вычислительных затрат и памяти данных при решении задач радиовидения в реальном времени, за счет введения предварительной обработки с многоступенчатым понижением частоты дискретизации.
2. Увеличить разрешающую способность БРЛК по азимутальному направлению в режимах переднего и переднебокового обзора путем адаптации к спектральной структуре траекторного сигнала и увеличения интервала синтезирования РЛИ.
3. Повысить вероятность обнаружения и разрешающую способность БРЛК в режиме селекции НДЦ при использовании перестраиваемого режекторного фильтра и последующей многоскоростной частотно-временной обработки с адаптацией к спектральной структуре траекторного сигнала.
4. Многократно (почти на порядок) увеличить разрешающую способность БРЛК в режиме переднего обзора путем введения двухдиапазонной ФАР и соответствующей модификации структуры цифрового приемника траекторного сигнала.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ФГУП «ГРПЗ» при модернизации серийно выпускаемых БРЛК систем управления вооружением (СУВ с БРЛК Н001) для самолетов Су-30МКК и Су-30МК2. Планируется их дальнейшее внедрение для отечественных самолетов Су-27М, а также транспортного вертолета Ми-8ГМ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала на основе многоскоростной адаптивной фильтрации в режиме ДОЛ секторного и панорамного обзоров с пок кадровым формированием РЛИ, отличающиеся многоступенчатой реализацией набора полосовых фильтров-дециматоров предварительной обработки, что позволяет многократно уменьшить объем вычислительных затрат и памяти данных.

2. Способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала в режиме селекции НДЦ, отличающиеся использованием многоскоростной адаптивной обработки как на этапе режекции узкополосной помехи от земной поверхности и неподвижных объектов, так и на этапе последующего частотно-временного разделения сигналов от НДЦ, что позволяет повысить эффективность обнаружения НДЦ и уменьшить вычислительные затраты.

3. Алгоритмы обработки траекторного сигнала на основе многоскоростной адаптивной фильтрации в режимах ДОЛ, ФСА и СНДЦ секторного, телескопического и панорамного обзоров, позволяющие увеличить разрешающую способность приемника и, как следствие, улучшить качество формирования РЛИ.

4. Оценки влияния рассогласования параметров траекторного сигнала и опорной функции, а также шума приемника на качество формирования РЛИ в режиме ФСА и рекомендации по выбору числа опорных функций и интервала синтезирования.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17-й и 18-й НТК НИИ приборостроения имени В.В. Тихомирова (г.Жуковский, 2002 и 2005 гг.); симпозиуме «Электронное управление лучом в бортовых радиолокационных комплексах» (г. Рязань, 2000 г.); 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007» (г. Москва, ИПУ РАН, 2007 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 работ, среди которых: 4 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 4 патента на способ, 3 статьи в центральных профильных журналах, 6 докладов в трудах и тезисах международных и отраслевых конференций и одно авторское свидетельство на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 47 наименований, 1 приложения. Содержание работы изложено на 154 с. основного текста, включая 51 иллюстрацию, 5 с. библиографии и 2 с. приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика работы, сформулированы цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту; определен круг вопросов, касающихся решения поставленных задач.

Первая глава посвящена описанию методов и алгоритмов обработки траекторного сигнала в задачах радиовидения, возникающих в связи с реализацией концепции «обводного канала» и двухдиапазонной ФАР при введении в дейст-

вующую систему управления вооружением отечественных истребителей режима «воздух-поверхность». Формулируются задачи и описываются методы формирования РЛИ в различных режимах картографирования земной поверхности и селекции НДЦ. Отмечаются особенности реализации концепции двухдиапазонной ФАР с позиции совмещения апертур СМ- и ММ-диапазонов, а также алгоритмов обработки траекторного сигнала и способов построения структуры цифрового приемника. Рассматриваются методы многоскоростной адаптивной фильтрации траекторного сигнала применительно к задачам радиовидения. Предлагается способ построения общей структуры цифрового приемника траекторного сигнала, отличающийся введением блока предварительной обработки на основе многоскоростной адаптивной фильтрации. Формулируются задачи исследований.

Концепция «обводного канала» использует то обстоятельство, что основные элементы приемопередающего тракта БРЛС – антенна, передающее устройство и высокочастотный приемник с небольшими доработками способны выполнять формирование, излучение и прием сигналов в режиме «воздух-поверхность». Введение «обводного канала» в БРЛС выполнялось с учетом следующих ограничений. Во-первых, введение режима «воздух-поверхность» не должно нарушать работу системы в режиме «воздух-воздух» и затрагивать существующее ПО для этого решения. Во-вторых, вновь вводимые блоки следовало разместить в существующую БРЛС без существенной доработки конструкции, заметного изменения веса, габаритов и энергопотребления. Эти ограничения были полностью удовлетворены за счет введения в БРЛС отдельной ЦВМ, реализованной на современных цифровых сигнальных процессорах, выполняющей обработку данных и управление блоками в режиме «воздух-поверхность» и отключающейся в режиме «воздух-воздух».

В соответствии с техническими требованиями режима «воздух-поверхность» БРЛС должна обеспечивать оперативное формирование РЛИ путем обзора поверхности реальным лучом (режим РЛ), обзора с доплеровским обужением луча (режим ДОЛ) и обзора с селекцией наземных (надводных) движущихся целей (режим СНДЦ). Кроме того, для выделения отдельных, сравнительно небольших, участков земной (водной) поверхности («микрoплан») с повышенной азимутальной разрешающей способностью должен быть реализован режим фокусированного синтеза апертуры (режим ФСА - высокое разрешение). В работе приводятся основные требования, предъявляемые к БРЛС при реализации различных режимов обзора и картографирования земной поверхности на дальностях от 10 до 320 км.

Рассматривается общая структурная схема цифрового приемника траекторного сигнала, отвечающая всем необходимым требованиям формирования РЛИ в различных режимах работы БРЛК. На основании анализа алгоритмов обработки траекторного сигнала делается вывод о целесообразности и эффективности его предварительной обработки с использованием многоскоростной адаптивной фильтрации. Предлагается способ построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала, представленный на рис. 1.

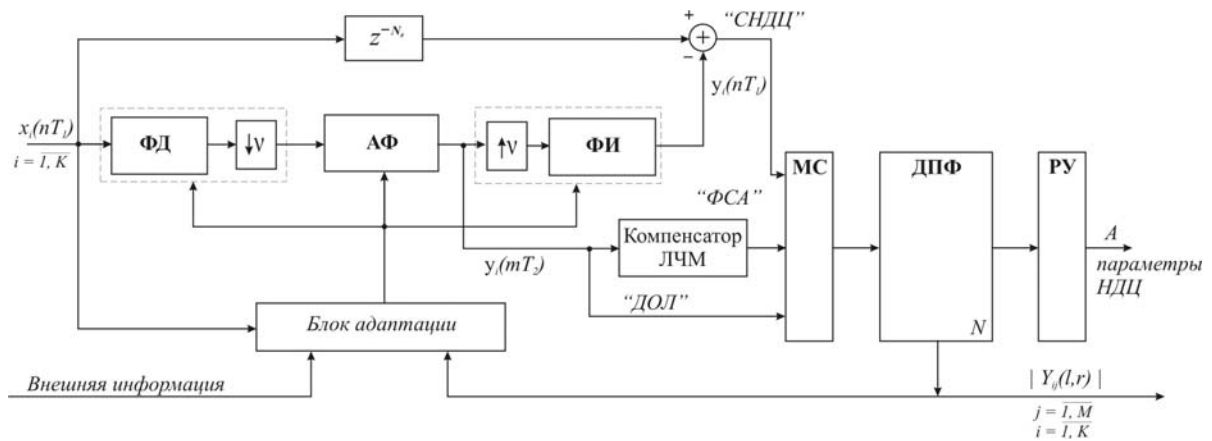


Рисунок 1. Способ построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала

В соответствии с данной структурной схемой входной траекторный сигнал $x_i(nT_1)$, $i = \overline{1, K}$, каждого i -го элемента дальности подвергается предварительной обработке с помощью адаптивного узкополосного фильтра (секторный обзор) или набора цифровых полосовых фильтров (панорамный обзор). Блок предварительной обработки выполняет функцию согласования спектра траекторного сигнала с частотно-временными параметрами последующего устройства спектрального оценивания амплитуды (яркости) сигнала по каждому j -му азимутальному направлению ($j = \overline{1, M}$).

Необходимость такого согласования обусловлена тем, что устройство спектрального оценивания строится, как правило, с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ), имеющего равномерное частотное разрешение во всем диапазоне рабочих частот, а спектр реального траекторного сигнала требует неравномерного разрешения, так как с уменьшением азимутального направления при переднем обзоре наблюдается значительное его «сжатие». Поэтому для обеспечения одинакового линейного разрешения по азимуту необходимо увеличивать частотное разрешение в узкой полосе траекторного сигнала, приходящего под углом менее 10^0 к направлению полета носителя БРЛК. Не менее важной является необходимость согласования и по частоте, а именно по положению спектрального окна анализа относительно фактического смещения полосы частот траекторного сигнала вследствие маневрирования носителя БРЛК и траекторных нестабильностей. Введение входного перестраиваемого фильтра-дециматора, понижающего частоту дискретизации траекторного сигнала в ν_1 раз, является эффективным инструментом как согласования частотно-временных характеристик и параметров траекторного сигнала и измерителя, так и минимизации общих вычислительных затрат, повышения помехоустойчивости цифрового приемника, в том числе к собственным шумам.

Фильтр-дециматор (ФД), выполняющий функцию подстройки цифрового приемника траекторного сигнала по центральной частоте и ширине полосы пропускания, настраивается на заданную полосу частот как по внешней информации с навигационной системы носителя БРЛК, так и по результатам спектрального анализа с выхода процессора ДПФ или в самом блоке адаптации. Бо-

лее тонкая процедура согласования может выполняться адаптивным фильтром (АФ), работающим на пониженной в ν раз частоте дискретизации.

В зависимости от выбранного режима картографирования: ДОЛ или ФСА, отфильтрованный сигнал $y(mT_2)$ с выхода ЦФД подается непосредственно на устройство спектрального анализа (режим ДОЛ) или предварительно проходит через устройство линейно-частотной демодуляции (ЛЧДМ), компенсирующее на интервале синтеза апертуры антенны (формирования РЛИ) линейный уход доплеровских частот (режим ФСА). Полученный на выходе процессора ДПФ спектр амплитуд $|Y_{ij}(f)|$ используется в дальнейшем для формирования РЛИ выделенного участка земной поверхности.

В режиме селекции НДЦ блок предварительной обработки реализует адаптивное режектирование узкополосной помехи, формируемой отражениями от земной поверхности и неподвижных объектов. С этой целью фильтр-интерполятор (ФИ) производит восстановление исходной частоты дискретизации режектируемой помехи, и далее производится ее вычитание из задержанного на N_0 периодов дискретизации входного сигнала $x_i(nT_1)$. Последующий спектральный анализ выявляет положение доплеровских частот от НДЦ, вышедших за зону режекции.

В заключение главы делается вывод о теоретической и практической значимости предварительной многоскоростной обработки траекторного сигнала и формулируются возникающие в связи с этим задачи исследований настоящей диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы его обработки в режиме ДОЛ. На основе общепринятой математической модели траекторного сигнала дается анализ методов и алгоритмов повышения азимутального разрешения цифрового приемника при секторном, панорамном и комбинированном обзоре. Предлагается способ построения блока предварительной обработки, отличающийся многоступенчатой реализацией набора полосовых фильтров-дециматоров. Проводятся моделирование и оценка влияния ухода доплеровских частот и шума приемника на качество формирования РЛИ.

Простой и в достаточной степени адекватный способ математического описания радиоизображения основан на предположении, что РЛИ формируется как совокупность точечных объектов определенной яркости. Каждому i -му точечному объекту ставится в соответствие принимаемый сигнал $S_i(t)$ вида:

$$S_i(t) = U_i G(t) \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi}{\lambda} r_{hi}(t) - \varphi_{oi} \right] \right\}, \quad (1)$$

где U_i, φ_{oi} - случайные амплитуда и начальная фаза сигнала; λ - длина волны; $G(t)$ - нормированная функция, характеризующая модуляцию сигнала ДНА; $r_{hi}(t)$ - текущее расстояние от носителя БРЛК до объекта.

Решающую роль в азимутальном разделении объектов методом доплеровской фильтрации начинает играть квадратичная составляющая изменения текущего расстояния до каждого i -го точечного объекта:

$$r_{ni}(t) = R_{ni} - Vt \cos \theta_{ni} + \frac{V^2 t^2 \sin^2 \theta_{ni}}{2 R_{ni}} + \frac{V^3 t^3 \sin^2 \theta_{ni} \cos \theta_{ni}}{4 R_{ni}^2} + \dots, \quad (2)$$

где R_{ni} - наклонная дальность до i -го объекта в начальный момент времени, θ_{ni} - азимут i -го объекта в плоскости ДНА, содержащей наклонную дальность, V - скорость полета БРЛК. Предполагается, что траектория полета носителя прямолинейна.

Подставив (2) в аргумент функции (1) и отбросив все составляющие выше кубической, получим, что доплеровская частота принимает вид:

$$F_{\text{днi}}(t) = \frac{2V}{\lambda} \cos \theta_{ni} - \frac{2V^2 t}{\lambda R_{ni}} \sin^2 \theta_{ni} - \frac{3V^3 \sin^3 \theta_{ni} \operatorname{ctg} \theta_{ni}}{2\lambda R_{ni}^2} t^2. \quad (3)$$

Первый член выражения (3) определяет среднюю доплеровскую частоту, второй – постоянный линейный уход (ЛЧМ-модуляцию), третий - квадратичную составляющую частотной модуляции принимаемого сигнала.

В режиме ДОЛ, с учетом известных ограничений, опорная функция для i -го точечного объекта может быть представлена в виде:

$$h_i(t, \theta_{ni}) = W(t) \exp\left\{-j \frac{4\pi}{\lambda} Vt \cos \theta_{ni}\right\}, \text{ где } W(t) - \text{весовая функция.}$$

Полное двумерное РЛИ в координатах «дальность-азимут» рассматривается как матрица точечных объектов размерностью $R \times L$, где R - число элементов дальности, а L - число азимутальных элементов. При этом каждый (i, j) -й, $j = \overline{1, R}$, $i = \overline{1, L}$, точечный объект несет в себе усредненную информацию о яркости соответствующего (i, j) -го элемента разрешения в координатах «дальность-азимут».

Анализ спектральной структуры траекторного сигнала показал, что при изменении азимутального направления от $\pm 60^\circ$ до 0° диапазон доплеровских частот занимает полосу от 7 кГц до 13,3 кГц (при прямолинейном полете носителя БРЛК на скорости 200 м/с и длине волны зондирующего сигнала $\lambda = 0,03$ м), что значительно превышает максимально допустимую частоту повторения зондирующих импульсов на среднем и большом диапазонах дальности. Поэтому на дальностях более 80 км, как правило, используется пространственно-частотная селекция траекторного сигнала, предполагающая последовательный секторный обзор по азимуту с помощью сканирующей узкополосной (от 2° и менее) ДНА. В этом случае, в зависимости от азимутального положения центра ДНА, ширина полосы частот траекторного сигнала (при тех же исходных условиях) будет лежать в диапазоне частот от 400 Гц ($\theta_{ni} = 60^\circ$) до 24 Гц ($\theta_{ni} = 3^\circ$). Таким образом, с уменьшением азимутального направления центра ДНА ширина полосы доплеровских частот уменьшается приблизительно в 16 раз, что позволяет при частоте повторения зондирующих импульсов $F_{\text{П}} = 800$ Гц уменьшить частоту дискретизации траекторного сигнала соответственно от 2 до 16 раз, используя цифровой полосовой фильтр-дециматор, перестраиваемый по центральной частоте и ширине полосы пропускания. Введение узкополосного фильтра предварительной обработки позволяет не только согласовать интервал синтеза РЛИ, меняющийся с изменением азимутального направления

центра ДНА, с фиксированной разрешающей способностью N -точечного процессора БПФ на выходе фильтра, но и увеличить соотношение сигнал/шум на входе анализатора спектра, а также существенно уменьшить общие вычислительные затраты.

С уменьшением расстояния до объекта картографирования, например в диапазоне дальностей от 10 до 20 км, возможно пропорциональное увеличение частоты повторения зондирующих импульсов. При этом эффективность предварительной обработки с помощью узкополосного ЦФД многократно возрастает. Кроме того, на небольших дальностях открывается возможность реализации панорамного и комбинированного панорамно-секторного обзора с покадровым формированием РЛИ при ширине ДНА от 8° до 32° . В этом случае блок предварительной обработки должен реализовать набор полосовых фильтров-дециматоров, каждый из которых обеспечит выделение полосы частот траекторного сигнала, адекватной азимутальному положению центра ДНА при секторном обзоре.

В работе предлагается способ построения структуры блока предварительной обработки траекторного сигнала на основе многоскоростной адаптивной фильтрации в режиме ДОЛ панорамного обзора, отличающийся многоступенчатой древовидной реализацией набора полосовых фильтров-дециматоров. Рис. 2 иллюстрирует один из вариантов построения многоступенчатой структуры блока предварительной обработки.

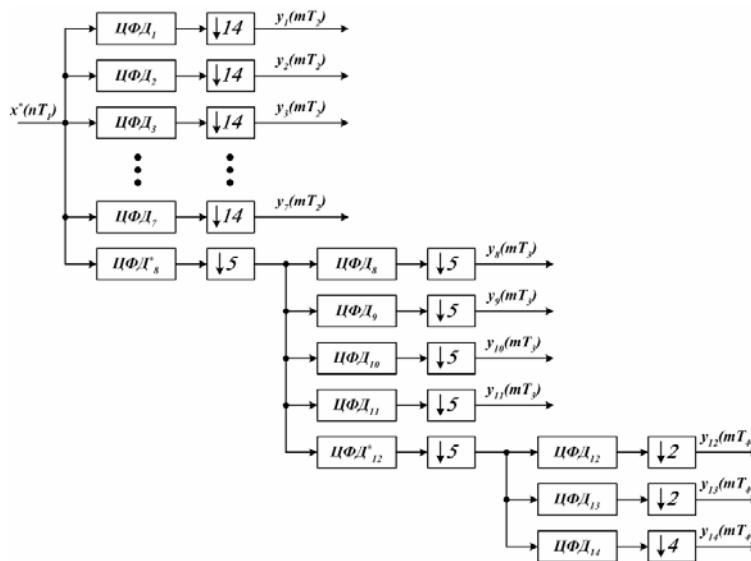


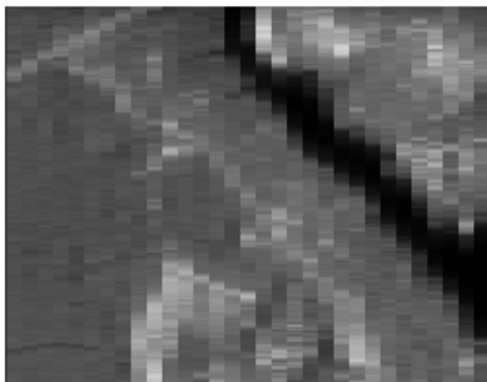
Рисунок 2. Структурная схема блока предварительной обработки траекторного сигнала в режиме ДОЛ панорамного обзора

Показано, что предложенная структура цифрового приемного устройства на основе многоскоростной обработки сигналов лишена многих недостатков, свойственных обычному подходу, ориентированному на применение алгоритма БПФ.

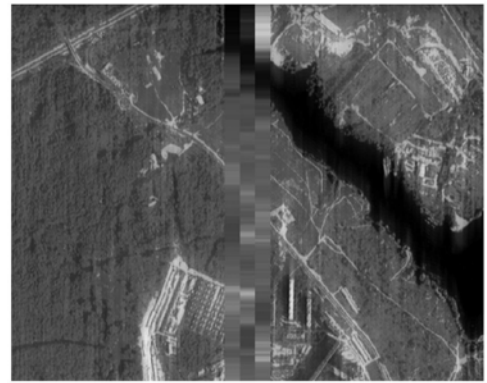
С целью проверки работоспособности и анализа потенциальной эффективности рассмотренных способов и алгоритмов, с учетом возможного ухода доп-

леровских частот и влияния шума приемника, было проведено моделирование процесса обработки траекторного сигнала и формирования РЛИ по информации, полученной в оптическом диапазоне. Рис. 3 иллюстрирует результаты моделирования. Рис. 3,а отражает крайне низкую разрешающую способность по азимуту в режиме РЛ, реализуемом путем сканирования ДНА шириной 2° в диапазоне углов $\pm 30^\circ$. Переход в режим ДОЛ с использованием $N = 16$ частотных каналов на каждый последовательно формируемый по азимуту сектор (парциальный кадр) дает хорошее приближение к исходному изображению, за исключением узкого участка переднего обзора в диапазоне углов $\pm 2^\circ$ (рис.3,б).

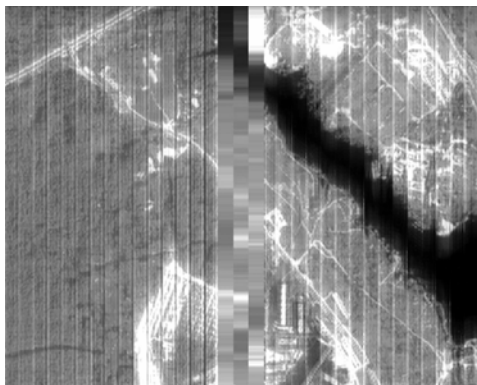
Для оценки амплитудного спектра выполнялось условие точного совпадения доплеровских частот реального траекторного сигнала от i -го точечного объекта и частот соответствующих опорных функций корреляционного приемника. При их несовпадении, например когда используется обычное ДПФ на равномерной сетке частот, имеют место колебания яркости относительно истинных значений и плохая «стыковка» парциальных кадров друг с другом (рис. 3,в). Рис. 3,г показывает достижимое качество формирования РЛИ в режиме ДОЛ при переднебоковом обзоре путем разворачивания носителя БРЛК от прямого направления на зону картографирования земной поверхности.



а



б



в



г

Рисунок 3. Результаты моделирования процесса формирования РЛИ в режимах РЛ (б) и ДОЛ (в-д)

Предметом исследований **третьей главы** диссертационной работы являются способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы его обработки в режиме ФСА. В соответствии с ранее принятой математической моделью траекторного сигнала проводится оценка влияния рассогласования параметров траекторного сигнала и опорной функции на качество формирования РЛИ. Представлены результаты моделирования телескопического обзора с учетом ухода доплеровских частот от принятой ЛЧМ-модели траекторного сигнала и использования алгоритмов автофокусировки.

В режиме ФСА математическая модель изменения доплеровской частоты i -го точечного объекта (3) учитывает ЛЧМ-модуляцию траекторного сигнала. При этом третий член выражения (3) ограничивает доплеровский интервал синтезирования РЛИ значением, более чем на порядок превышающим допустимый интервал синтезирования в режиме ДОЛ, что и обеспечивает при соответствующей стабилизации параметров движения носителя БРЛК многократное увеличение азимутальной разрешающей способности.

При этом опорная функция для i -го точечного объекта в режиме ФСА может быть представлена в виде

$$h_i(t, \theta_{ni}) = W(t) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[Vt \cos \theta_{ni} - \frac{V^2 t^2}{2R_{ni}} \sin^2 \theta_{ni} \right] \right\}.$$

Точная фокусировка изображения предполагает, что для каждого i -го точечного объекта должна использоваться своя опорная функция. В этом случае даже для фрагмента РЛИ размерностью 256x256 пикселей необходимо хранить до 100 Мслов отсчетов опорной функции, а для полного обзора от $\pm 10^\circ$ до $\pm 60^\circ$ в диапазоне дальностей от 80 до 160 км память коэффициентов может достигать 512 миллиардов слов. При переходе на другие диапазоны дальностей с пропорциональным увеличением разрешающей способности потребуются новый массив отсчетов опорных функций такой же размерности. Следовательно, минимизация числа требуемых различных опорных функций и увеличение периода их дискретизации – главная задача на пути эффективной реализации цифрового приемника траекторного сигнала в режиме ФСА.

Исходя из предположения, что за время синтезирования РЛИ, равное T_c , частотное рассогласование между опорной функцией и траекторным сигналом в соответствующей области (j -м частотном канале) не должно превышать реально достижимого частотного разрешения $\Delta f_{\max} = 1/T_c$, получены оценки до-

пустимого рассогласования по дальности $\Delta R < \frac{\lambda R_n^2}{2V^2 T_c^2 \sin^2 \theta_n}$ и по азимуту

$\Delta \theta < \frac{\lambda R_n}{2V^2 T_c^2 \sin 2\theta_n}$ в зависимости от времени синтезирования T_c , азимутального

направления θ_n и дальности R_n . Показано, что с учетом выполнения полученных граничных условий число опорных функций и соответственно память коэффициентов уменьшаются в тысячи и десятки тысяч раз.

Дальнейшее уменьшение памяти коэффициентов, а также памяти данных достигается понижением частоты дискретизации траекторного сигнала с помощью входного ЦФД, параметры которого подстраиваются под ширину спектра принимаемого сигнала.

С целью демонстрации работоспособности и эффективности представленных алгоритмов обработки траекторного сигнала и формирования РЛИ проведено имитационное моделирование телескопического обзора в режиме ФСА. Моделирование проводилось при следующих исходных условиях. Предполагалось, что на исходном изображении, полученном в режиме ДОЛ, выделен участок земной поверхности, требующий многократного увеличения разрешающей способности с целью идентификации расположенного на нем объекта. Сравнение исходного оптического и синтезированного изображений показало потенциальную достижимость в режиме ФСА пространственного разрешения РЛИ, приближающегося к оптическому.

Вместе с тем с увеличением времени синтезирования T_c все в большей степени проявляется погрешность в формировании РЛИ, связанная с уходом доплеровских частот от принятой ЛЧМ-модели траекторного сигнала. Поэтому было проведено имитационное моделирование эффекта ухода доплеровских частот от принятой ЛЧМ-модели и эффективности применения алгоритма автофокусировки на основе оценки средней доплеровской частоты и фазоразностного алгоритма. Проведенное моделирование телескопического обзора заданного фрагмента земной поверхности в режиме ФСА позволило сделать вывод о потенциальной возможности достижения высокой разрешающей способности цифрового приемника траекторного сигнала и соответственно качества формирования РЛИ при использовании сравнительно небольшого числа различных опорных функций и известных алгоритмов автофокусировки.

В четвертой главе рассматриваются способы построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмы его обработки в режиме селекции НДЦ. Формулируются проблемы селекции НДЦ и описываются подходы к их решению. Предлагаются алгоритмы селекции НДЦ на основе пространственно-частотной и частотно-временной многоскоростной обработки траекторного сигнала. Проводятся моделирование и исследование эффективности предложенных алгоритмов селекции.

Предполагается, что каждая i -я цель – это отдельный точечный объект с независимыми параметрами движения, а число целей равно M . Тогда принимаемый БРЛК траекторный сигнал можно представить в виде:

$$s(t) = \sum_{i=1}^M s_{ui}(t) + s_{\phi}(t) + p(t),$$

где $s_{ui}(t)$ – составляющая траекторного сигнала от i -й цели, $s_{\phi}(t)$ – фоновая составляющая отражений от земной поверхности и неподвижных объектов, $p(t)$ – комплексный шум от внешних и внутренних источников.

Можно показать, что фаза траекторного сигнала i -й цели изменяется по закону:

$$\varphi_i(t) = \frac{4\pi}{\lambda}(V \cos \theta_{ni} + V_{ui}^R)t - \frac{2\pi}{\lambda R_{ni}}(V \sin \theta_{ni} + V_{ui}^{R\perp})^2 t^2 + \varphi_{n0i}, \quad (4)$$

где V_{ui}^R и $V_{ui}^{R\perp}$ - радиальная и перпендикулярной к ней составляющие вектора скорости цели V , $\varphi_{n0i} = \varphi_{0i} - \frac{4\pi}{\lambda} R_{ni}$ - начальная фаза.

При этом доплеровская частота принимает вид

$$F_{ui}(t) = \frac{2(V \cos \theta_{ni} + V_{ui}^R)}{\lambda} - \frac{2(V \sin \theta_{ni} + V_{ui}^{R\perp})^2}{\lambda R_{ni}} t. \quad (5)$$

Первый член выражения (5) определяет среднюю доплеровскую частоту, а второй член – ее линейный уход, обусловленный как движением носителя БРЛК, так и движением цели.

Из всех проблем, возникающих в связи с решением задачи селекции НДЦ, можно выделить две основные. Во-первых, это обнаружение медленно движущихся наземных целей на фоне подстилающей земной поверхности. Во-вторых, это обнаружение и измерение параметров движения маневрирующих целей в широком диапазоне доплеровских частот при малых отношениях сигнал/шум.

В диссертационной работе рассматриваются и исследуются методы и алгоритмы решения поставленных задач на основе пространственно-частотной многоскоростной обработки траекторного сигнала, доплеровской фильтрации и спектрального оценивания. Предлагается способ построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала, в основе которого лежит узкополосная адаптивная режекторная фильтрация (АРФ) в классе КИХ-цепей с применением эффектов децимации и интерполяции.

Отличительная особенность предложенного способа состоит не только в применении многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала, но и в том, что для реализации узкополосной АРФ фактически используется устройство предварительной обработки цифрового приемника, работающего в режиме формирования РЛИ земной поверхности и неподвижных объектов.

С целью эффективного обнаружения и разделения маневрирующих НДЦ предлагается вместо обычного ДПФ-преобразования на основе алгоритма БПФ использовать банк (набор) цифровых фильтров-дециматоров, который строится по многоступенчатой пирамидальной структуре и обеспечивает измерение параметров движения НДЦ с различной разрешающей способностью. Предложенная структура отличается от классического способа построения устройства на основе процессора БПФ высокой разрешающей способностью по времени и по частоте, повышенной помехоустойчивостью, значительным уменьшением вычислительных затрат и памяти данных.

Показано, что пирамидальная структура набора фильтров-дециматоров, фактически выполняющая адаптивное частотно-временное разделение доплеровских каналов, может использоваться и без предварительной режекции помехи от подстилающей земной поверхности. Последнее имеет место в случае, когда селектируемые доплеровские частоты от НДЦ не выходят за полосу частот

траекторного сигнала, формируемого от земной поверхности и неподвижных объектов при движении носителя.

С целью увеличения соотношения сигнал/шум на входе решающего устройства предлагается алгоритм построения потенциальных траекторий движения доплеровских частот НДЦ, на основе которых решение об обнаружении и измерении параметров как малоподвижных, так и быстро маневрирующих целей принимается на многократно увеличенных интервалах наблюдения.

В завершающей части главы проводятся моделирование и исследование эффективности некоторых из предложенных в работе алгоритмов селекции НДЦ с применением многоскоростной адаптивной фильтрации.

В заключении сформулированы основные научные положения диссертационной работы, которые заключаются в следующем.

1. В основе модернизации БРЛК действующих систем управления вооружением при введении режима «воздух-поверхность» лежит концепция «обводного канала», предполагающая необходимость разработки дополнительного канала обработки траекторного сигнала на основе цифрового приемника, реализующего весь спектр алгоритмов его обработки от предварительной фильтрации до формирования РЛИ в различных режимах обзора земной поверхности и селекции НДЦ.

2. Следующим этапом модернизации БРЛК является реализация концепции двухдиапазонной ФАР в режиме «воздух-поверхность», которая требует учета взаимного влияния совмещения СМ и ММ-диапазонов в одной апертуре антенны и модификации способов и алгоритмов обработки траекторного сигнала цифровым приемником.

3. Многоскоростная предварительная обработка в сочетании с элементами адаптации цифровых полосовых фильтров-дециматоров – это способ значительного уменьшения вычислительных затрат, повышения разрешающей способности и помехоустойчивости алгоритмов спектрального анализа и, как следствие, качества изображения, обеспечения гибкости и оперативности всей системы формирования РЛИ. С уменьшением азимутального направления центра ДНА от 59° до 3° ширина полосы доплеровских частот траекторного сигнала в режиме ДОЛ секторного обзора уменьшается приблизительно в 16 раз, что позволяет уменьшить частоту дискретизации от 2 до 16 раз в диапазоне дальностей 80-160 км и от 8 до 132 раз в диапазоне дальностей 10-20 км.

4. Панорамный обзор с покадровым формированием РЛИ, опирающийся полностью на частотно-временную селекцию траекторного сигнала, является альтернативой медленному секторному обзору при относительно небольших дальностях (до 20 км) и в сочетании с многоскоростной обработкой обеспечивает значительное повышение всех качественных показателей.

5. В режиме ФСА путем учета и компенсации ЛЧМ по каждому частотному (азимутальному) каналу траекторного сигнала можно многократно (в десятки раз) увеличить разрешающую способность по азимуту. Однако требование точного совпадения опорной функции и траекторного сигнала по каждому азиму-

тальному каналу на всем многократно увеличенном интервале синтезирования наталкивается на две проблемы: увеличения памяти коэффициентов до нескольких сотен миллиардов слов и необходимости реализации высокоточных алгоритмов «автофокусировки» опорных функций к траекторным нестабильностям носителя БРЛК.

6. Оценка влияния рассогласования параметров траекторного сигнала и опорных функций на качество формирования РЛИ в режиме ФСА показала, что в заданном поле допусков на уход доплеровских частот в пределах требуемой разрешающей способности по частоте возможно уменьшение необходимого числа опорных функций в тысячи и десятки тысяч раз. При этом введение предварительной обработки с помощью входного перестраиваемого фильтра-дециматора дает дальнейшее уменьшение памяти коэффициентов от 3 до 12 раз и более.

7. Предложенные в работе алгоритмы селекции НДЦ на основе многоскоростной частотно-временной обработки отличаются исключительной гибкостью и потенциальной «адаптируемостью» к спектрально-временной структуре принимаемого траекторного сигнала, высокой разрешающей способностью, повышенной помехоустойчивостью и вычислительной эффективностью.

8. Предложенный метод построения адаптивного режекторного фильтра в классе КИХ-цепей с использованием децимации и интерполяции (в общем случае многоступенчатой) позволяет значительно уменьшить вычислительные затраты и обеспечить адекватное подавление помехи от подстилающей земной поверхности, используя информацию о спектральной структуре траекторного сигнала, полученную в процессе формирования РЛИ в режиме ДОЛ.

По результатам проведенных в диссертационной работе исследований можно сделать вывод, что поставленная цель – разработка новых способов построения структуры цифрового приемника траекторного сигнала и алгоритмов его обработки с применением многоскоростной адаптивной фильтрации, достигнута. В диссертационной работе решена крупная научно-техническая задача, связанная с созданием программно-алгоритмического обеспечения и технических средств комплекса бортового радиоэлектронного оборудования многофункциональных самолетов, отвечающих современным требованиям боевого применения не только по воздушным, но и по наземным и надводным целям.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Белый Ю.И., Синани А.И., Колодько Г.Н., Зеленюк Ю.И. Не только в области балета мы впереди планеты всей // Мир авионики, 2000. № 1-2. -С. 49-53.
2. Зеленюк Ю.И., Колодько Г.Н., Синани А.И. и др. Двухдиапазонная фазированная антенная решетка // Свид. на полезную модель № 20989 РФ, МПК H01Q21/00 jп 30/07/2001/ Оpub. БИ № 34 от 10.12.2001 г.
3. Зеленюк Ю.И., Колодько Г.Н., Ключко В.К., Мойбенко В.И. Концепция режима маловысотного полета бортовых РЛС с электронным сканированием // Сб. докладов XVII НТК, г. Жуковский, 2002. -С. 57-58.

4. Колодько Г.Н., Мойбенко В.И. РЛС маловысотного полета ММ диапазона с АС ЭУЛ // Сб. докладов XVII НТК, г. Жуковский, 2002. -С. 59-62.
5. Колодько Г.Н., Шершнев Е.Д., Гераскин В. Бортовые РЛС для полетов на малых и предельно малых высотах // Военный парад, 2003. № 3. -С.33-38.
6. Колодько Г.Н., Мойбенко В.И., Ключко В.К. Способ обзора пространства и сопровождения объектов поверхности при маловысотном полете // Патент RU 2211459, МПК G01S 13/00, 13/44 от 22.03.2001. Оpubл. БИ № 24, август 2003 г.
7. Зеленюк Ю.И., Колодько Г.Н., Шершнев Е.Д. РЛС для полетов на малых высотах // Аэрокосмический курьер, 2004. № 3. -С. 54 – 55.
8. Ключко В.К., Колодько Г.Н., Мойбенко В.И., Ермаков А.А. Способ наблюдения за поверхностью // Патент RU 2249832 С1, МПК G01S 13/02, H01Q21/00 от 02.09.2003. Оpubл. БИ № 10, апрель 2005 г.
9. Ключко В.К., Колодько Г.Н., Мойбенко В.И., Ермаков А.А. Способ наблюдения за поверхностью и воздушной обстановкой // Патент RU 2256193 С1, МПК G01S 13/02 от 08.12.2003. Оpubл. БИ № 19, июль 2005 г.
10. Зеленюк Ю.И., Колодько Г.Н., Шершнев Е.Д., Мойбенко В.И. Двухдиапазонная вертолетная РЛС // Сб. докладов XVIII НТК, г. Жуковский, 2005. -С. 67-70.
11. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Цифровая обработка сигналов, 2006. № 3. -С. 31-41.
12. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Воронков Д.В. Формирование радиолокационного изображения в режиме фокусируемого синтезирования апертуры ДНА // Цифровая обработка сигналов, 2006. № 4. -С. 34-40.
13. Колодько Г.Н., Мойбенко В.И., Андросов В.В. Способ повышения разрешающей способности РЛС по дальности и азимуту // Патент RU 2287879 МПК H01Q21/00, G01S13/42 от 16.02.05. Оpubл. БИ № 32, ноябрь 2006 г.
14. Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В. Селекция наземных движущихся целей на основе многоскоростной адаптивной обработки траекторного сигнала // Цифровая обработка сигналов, 2007. № 1. -С. 41-50.
15. Витязев В.В., Колодько Г.Н. Многоскоростная обработка сигналов в задачах радиовидения // Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», г. Москва, ИПУ РАН, март 2007. -С. 254-258.
16. Витязев С.В., Колодько Г.Н. Моделирование и исследование эффективности формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского облучения луча // Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», г. Москва, ИПУ РАН, март 2007. -С. 258-261.
17. Воронков Д.В., Колодько Г.Н., Витязев В.В. Моделирование и исследование эффективности формирования радиолокационного изображения в режиме ФСА // Труды 9-й МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение-DSPA'2007», г. Москва, ИПУ РАН, март 2007. -С.261-263.
18. Колодько Г.Н. Многоскоростная и адаптивная обработка сигналов в задачах радиовидения // Вестник РГРТУ, 2007. № 21. -С. 47-52.