

УДК 681.7.069.32

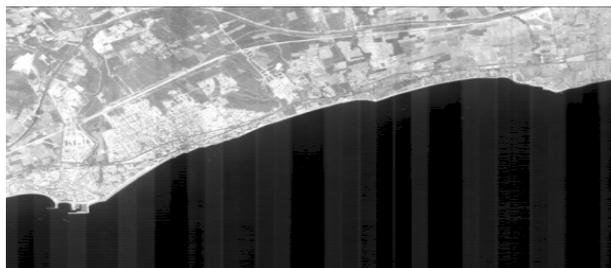
В.А. Зенин, А.Е. Кузнецов, В.И. Побаруев

АЛГОРИТМ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С НЕОДНОРОДНЫМ СЮЖЕТОМ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РЕСУРС ДК»

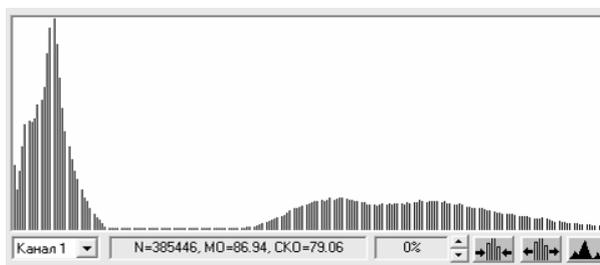
Предлагается алгоритм радиометрической коррекции изображений, основанный на предварительной кластеризации снимка и последующей обработке каждого кластера по своим параметрам. Описываются пути ускорения его работы за счет прореживания изображения и распараллеливания вычислений, что привело к снижению времени работы на 72 %. Демонстрируются результаты обработки реальных данных, доказывающие преимущества предлагаемого подхода по сравнению с традиционным.

Введение. Задачей радиометрической коррекции является устранение на спутниковых изображениях структурных искажений, проявляющихся в виде вертикальной «полосатости» снимка. Эти искажения возникают из-за различия передаточных характеристик как между отдельными приемниками внутри одной ПЗС-матрицы, так и между целыми матрицами.

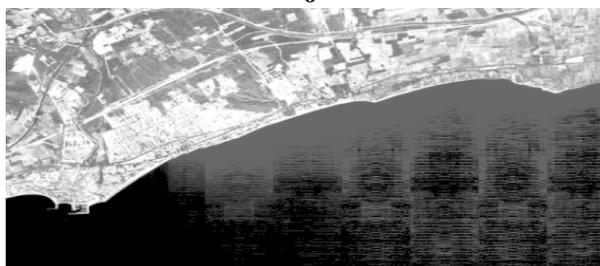
На сегодняшний день для устранения структурных искажений в системах обработки широко применяются статистические алгоритмы, параметры которых рассчитываются на основе анализа исходных изображений [1]. Эти алгоритмы в большинстве случаев обеспечивают высококачественную обработку изображений земной поверхности. Однако радиометрическая коррекция неоднородных сюжетов, содержащих участки водной поверхности и суши, выполняется недостаточно качественно. В частности, как показано на рисунке 1, а, в, неверно представляется яркость пикселей, принадлежащих морской поверхности и расположенных вдоль границы суши. Поэтому цель настоящей работы состоит в выявлении причин, приводящих к ошибочным яркостным преобразованиям, и разработке более эффективных подходов по радиометрической коррекции неоднородных сюжетов.



а



б



в

Рисунок 1 – Фрагмент снимка «суша-море» его полимодальная гистограмма и результат радиометрической обработки

Анализ известных алгоритмов. Для восстановления искаженных снимков на практике применяются два алгоритма, основанные на приведении статистических моментов или функций распределения яркости столбца к параметрам окружающей его апертуры [1,2].

В первом алгоритме для определения коэффициентов преобразования используются математическое ожидание и дисперсия яркости корректируемого столбца и апертуры:

$$\begin{aligned} b^*(m, n) &= a_0(m) + a_1(m)b(m, n), \\ d(m, n) &= \text{ent}(b^*(m, n) + \varepsilon), \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_1(m) = \frac{\bar{\sigma}(m)}{\sigma(m)}$, $a_0(m) = \bar{b}(m) - a_1(m)b(m)$,

$b(m, n)$ - исходный код яркости пикселя с координатами m и n ; $b^*(m, n)$ - вещественное значение кода яркости в точке с координатами m и n после преобразования; $d(m, n)$ - целочисленное значение яркости преобразованного изображения; ε - случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне (0; 1); $b(m)$, $\sigma(m)$ - среднее значение яркости и СКО по столбцу m ; $\bar{b}(m)$, $\bar{\sigma}(m)$ - среднее значение яркости и СКО по апертуре вокруг столбца m .

В интегральном алгоритме преобразование выполняется в соответствии с формулой

$$\begin{aligned} b^*(m, n) &= F^{-1} \left[F_m(b(m, n)) \right], \\ d(m, n) &= \text{ent} \left(b^*(m, n) + \varepsilon \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где F^{-1} - функция, обратная эмпирической функции распределения яркости в апертуре; F_m - эмпирическая функция распределения яркости в столбце.

Характерной особенностью неоднородных сюжетов является присутствие видеоданных от двух типов объектов – суши и моря, резко отличающихся по яркостным характеристикам. Гистограмма такого снимка имеет две ярко выраженные моды, рисунок 1, б. Отсюда некорректно рассчитываются средняя яркость и СКО по формуле (1) и, как следствие, неверно выполняется яркостное преобразование.

Что касается второго алгоритма, то здесь, как показано в [3], со значением функции распределения $F(b^*) = F_m(b) = p$ ошибочно сопоставляются значения b и b^* , относящиеся к области определения различных объектов, рисунок 2. В результате элементам столбца, принадлежащим водной поверхности, присваиваются более высокие коды яркости объектов суши.

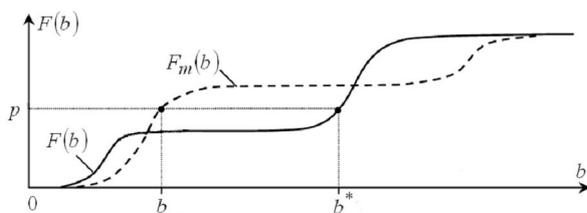


Рисунок 2 – Схема яркостных преобразований с использованием функций распределения яркости столбца $F_m(b)$ и апертуры $F(b)$

Таким образом, при обработке изображений с двумодальными гистограммами необходимо:

- выполнить кластеризацию изображения на объекты двух типов – суша и море;

- выполнить радиометрическую коррекцию структурных искажений отдельно для каждого класса объектов.

Алгоритм кластеризации. Подзадача кластеризации в рамках выполнения радиометрической коррекции имеет существенную особенность. Она заключается в том, что обрабатывать необходимо радиометрически искаженное изображение. При этом, как показали эксперименты, уровень яркостных различий отдельных столбцов может достигать 20-25 %, что делает неработоспособными существующие подходы кластеризации, ориентированные на радиометрически однородные снимки.

Для разделения по снимку участков водной поверхности и суши предлагается следующий подход. Вначале выполняется грубая коррекция структурных искажений до уровня 5-7 %, а затем выполняется пороговая кластеризация полученного снимка.

Обозначим через $\bar{b}(m)$ функцию средней яркости по столбцам изображения. В нее входят шумовая и сюжетная составляющие. Следует заметить, что последняя представляется низкими частотами, а шум находится в области средних и высоких частот.

Низкочастотную сюжетную составляющую можно получить скользящей аппроксимацией функции $\bar{b}(m)$ методом наименьших квадратов.

Обозначим ее как $\tilde{b}(m)$. Тогда высокочастотная составляющая может быть получена как

$$\hat{b}(m) = \bar{b}(m) - \tilde{b}(m), m = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Сформируем параметры предварительной обработки в виде аддитивного члена, вычитаемого из яркости каждого столбца. В общем случае использовать $\hat{b}(m)$ в качестве такого параметра нельзя, так как это приведет к изменению общей яркости снимка в силу того, что $\sum_{m=1}^M \hat{b}(m) \neq 0$. Поэтому необходимо выполнить

центрирование величины $\hat{b}(m)$,

$$\Delta b(m) = \hat{b}(m) - \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{b}(m), m = \overline{1, M}. \quad (4)$$

Предварительное подавление структурного шума в каждой точке изображения выполняется по формуле

$$c(m, n) = b(m, n) - \Delta b(n), m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Для разделения пикселей по признаку суша $i(m, n) = 0$ или море $i(m, n) = 1$ предлагается использовать пороговый алгоритм, рассмотренный в [4]. В соответствии с ним определение порога кластеризации Z_c изображения, представленного гистограммой $w(c)$, заключается в определении точки максимума функции межклассовой дисперсии

$$\sigma_B^2(c^*) = p_0(c^*)(\mu_0(c^*) - \mu)^2 + p_1(c^*)(\mu_1(c^*) - \mu)^2, \quad (6)$$

где c^* - пробный порог, $c^* \in (0, C_{\max})$, C_{\max} - максимальное значение яркости;

$p_0(c^*) = \sum_{c=0}^{c^*} w(c)$ - вероятность попадания произвольного пикселя в класс 0;

$p_1(c^*) = \sum_{c=c^*+1}^{c_{\max}} w(c)$ - вероятность попадания произвольного пикселя в класс 1;

$\mu_0(c^*) = \sum_{c=0}^{c^*} c w(c) / p_0(c^*)$ - математическое ожидание в пределах класса 0;

$\mu_1(c^*) = \sum_{c=c^*+1}^{c_{\max}} c w(c) / p_1(c^*)$ - математическое ожидание в пределах класса 1;

μ - математическое ожидание по всей гистограмме.

Путем несложных математических преобразований получается формула для определения искомого значения пороговой яркости

$$Z_c = \arg \max_{c^*} \left[\frac{[\mu p_0(c^*) - \mu(c^*)]^2}{p_0(c^*) [1 - p_0(c^*)]} \right], \quad (7)$$

где $\mu(c^*) = \sum_{c=0}^{c^*} c w(c)$ - ненормированное математическое ожидание.

Рассмотренный алгоритм дает хорошие результаты при выделении на радиометрически однородных изображениях участков водной поверхности. Однако для более надежной кластеризации предлагается добавить еще один параметр, который значительно меньше подвергнут влиянию структурного шума, но также может быть использован для идентификации суши и поверхности моря. В качестве такого параметра можно использовать производную яркости. В силу физических причин разность яркостей соседних пикселей в пределах морской поверхности меньше, чем в пределах суши. Следует заметить, что производная в строчном направлении для этих целей непригодна, так как она в полной мере подвержена влиянию структурного шума:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial m}(m, n) &= c(m+1, n) - c(m, n) = \\ &= \sigma(m, n) + \delta(m, n), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\sigma(m, n)$ - сюжетная составляющая производной; $\delta(m, n)$ - составляющая производной, вызванная рассогласованием передаточных характеристик фотоприемников.

В связи с высоким разрешением съемки соседние фотоприемники получают на вход практически одинаковый входной сигнал. Следовательно, с высокой долей вероятности справедливо соотношение $\sigma(m, n) \ll \delta(m, n)$. Поэтому при кластеризации будем использовать производную вдоль столбца изображения, $\frac{\partial c}{\partial n}(m, n)$.

Так как гистограмма производных имеет полимодальную форму, рассмотренный выше алгоритм можно использовать для отыскания на ней порога Z_Δ по формуле, аналогичной (7).

Таким образом, номер кластера, к которому относится пиксель изображения, рассчитывается на основе условия

$$i(m, n) = \begin{cases} 1, & (c(m, n) \leq Z_c) \ \& \ \left(\frac{\partial c}{\partial n}(m, n) \leq Z_\Delta \right), \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

После кластеризации радиометрическая коррекция выполняется для каждого кластера в отдельности, что исключает ошибки, появление которых связано с полимодальностью гистограммы яркости. В качестве алгоритма используется рассмотренный выше интегральный алгоритм радиометрической обработки, дополненный картой кластеризации,

$$\begin{aligned} d(m, n) &= \text{ent} \left(\overline{F}_{i(m, n), m}^{-1} \left[F_{i(m, n), m} (b(m, n)) \right] + \varepsilon \right), \\ m &= \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (10)$$

Практическая реализация. Применение рассмотренной схемы радиометрической коррекции для изображений, полученных от космического аппарата «Ресурс ДК», имеет ряд особенностей, вызванных большим объемом обрабатываемых данных, их структурой и предъявляемыми требованиями к скорости обработки.

Снимок, подлежащий радиометрической коррекции, представлен несколькими зонами компенсации, хранящимися в отдельных файлах. Это требует перед началом обработки осуществить виртуальную сшивку отдельных частей в единое целое.

На рисунке 3 представлена последовательная схема выполнения радиометрической коррекции, где на переходах показаны данные, ге-

нерируемые на предыдущем этапе и используемые на следующем.

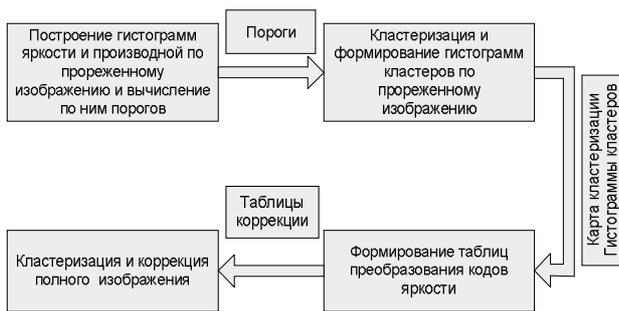


Рисунок 3 – Этапы выполнения радиометрической коррекции

На каждом этапе выполняется обработка всего виртуально сшитого изображения.

В рамках исследований был разработан программный модуль, реализующий алгоритм радиометрической коррекции в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3. Его испытания показали значительные расходы памяти и неудовлетворительно низкую скорость работы при больших объемах входных данных (порядка 5-6 Гбайт). Анализ показал, что наиболее узким местом, значительно снижающим производительность, является чтение данных с жесткого диска компьютера, так как в рассматриваемом случае большая часть видеоданных не может быть загружена в оперативную память. Необходимость хранения громоздкой карты кластеризации еще больше усугубляет проблему.

Эксперименты показали отсутствие необходимости проведения этапов анализа по всему изображению. Работа с прореженным снимком с коэффициентом прореживания в строчном направлении 16:1 значительно повысила производительность на этапе вычисления порогов кластеризации, при этом изменения вычисляемых характеристик не превысили 4 %.

Значительного снижения расходов памяти удалось добиться отказом от построения карты кластеризации. Вместо этого выполняется динамическая кластеризация прореженного изображения с одновременным формированием гистограмм. Правда, на этапе коррекции такое решение заставляет выполнять повторную кластеризацию, но это значительно менее трудоемко.

Так как сейчас любой промышленный компьютер имеет несколько процессоров, целесообразно выполнить распараллеливание отдельных этапов обработки. При этом оптимальное быстрое действие достигается при количестве потоков, равном числу ядер процессоров.

Любой этап радиометрической обработки может быть разделен на 3 процедуры: чтение строк изображения, обработка прочитанных

строк и запись обработанных строк. При анализе изображения запись не проводится, а только вычисляются необходимые его характеристики. Наибольший выигрыш от распараллеливания можно получить на этапах, основу которых составляет обработка данных, а операции чтения и записи второстепенны. Но и при активном вводе/выводе многопоточность оказывается полезна, так как ожидание завершения операций по вводу/выводу приостанавливает лишь один поток, в то время как остальные могут продолжать вычисления [5].

Значительный прирост производительности был получен распараллеливанием этапа формирования таблиц кодов яркости, так как на нем не требуется выполнять обращений к жесткому диску, а лишь работать с готовыми гистограммами. При этом была достигнута полная загрузка всех присутствующих в системе процессоров. На этапе коррекции параллельная обработка также сильно повысила скорость, так как максимизировала загрузку подсистемы жесткого диска, а при работе с частью изображения, хранящегося в оперативной памяти, дала существенный выигрыш по производительности.

При обработке полного изображения необходимо, кроме обрабатываемой строки, иметь доступ к предыдущей и последующей строкам. Так как обработка выполняется последовательно, количество обращений к изображению сокращается путем использования трехстрочного буфера, в котором при переходе к новой строке данные сдвигаются на длину одной строки, а коды яркости новой строки записываются на освободившееся место.

В результате предлагается модифицированная схема выполнения этапов радиометрической коррекции, представленная на рисунке 4.

Таблица демонстрирует соотношение времени выполнения отдельных этапов радиометрической коррекции до модификации и после, а также процентное увеличение скорости работы на каждом из них.

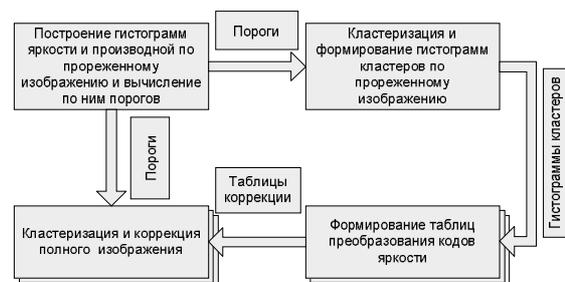


Рисунок 4 – Модифицированная схема выполнения этапов радиометрической коррекции

Таблица

Этап	Время работы, с		Ускорение, %
	исходное	после модификации	
Вычисление порогов	696	249	64,2
Кластеризация	148	77	48,0
Формирование таблиц пересчета кодов яркости	180	3	98,3
Коррекция изображения	2793	713	74,5
Всего	3817	1042	72,7

При испытаниях обрабатывались снимки размером 36000x72000 пикселей с неоднородным сюжетом. Использовался компьютер с конфигурацией 8xIntel Xeon 3ГГц, 8ГБ RAM.

Выводы. На рисунке 5 представлен результат успешной радиометрической коррекции снимка, содержащего объекты двух классов. Как видно, структурные искажения устранены лучше, чем на рис. 1, в, а значительные изменения яркости в правой части снимка отсутствуют. При этом большее на 10% время обработки с помощью кластерного алгоритма вполне оправдывается достигнутым качеством.

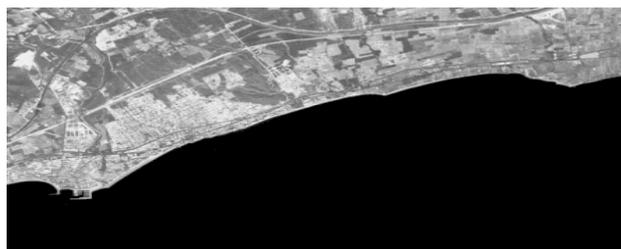


Рисунок 5 – Результат радиометрической коррекции неоднородного снимка с использованием кластерной обработки

Основываясь на представленных результатах, можно говорить о целесообразности использования кластерного алгоритма для выполнения высокоточной радиометрической коррекции снимков с неоднородным сюжетом.

Библиографический список

1. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Обработка изображений в геоинформационных системах: Учебное пособие. Рязанский государственный радиотехнический университет, 2006. 264 с.
2. Венцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2002. 575 с.
3. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: Физматлит, 2006. 286 с.
4. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
5. Хьюз Камерон, Хьюз Трейси. Параллельное и распределенное программирование на C++. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 672 с.