УДК 004.932.2

РАДИОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАДРОВО-СКАНЕРНЫХ СИСТЕМ ДЗЗ

Зенин В.А., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань; Кузнецов А.Е., д.т.н., зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань; Побаруев В.И., к.т.н., вед. н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань.

Ключевые слова: матрица, радиометрическая коррекция, критерий Вебера–Фехнера.

Введение

В июле 2012 года был осуществлен успешный запуск двух идентичных малых космических аппаратов (КА), российского «Канопус-В» и белорусского «БКА». Целевая

аппаратура спутников представлена многозональной (МСС) и панхроматической (ПСС) съемочными системами, разработанными ОАО «Пеленг» Республики Беларусь. Эти системы впервые реализуют кадровосканерный принцип съемки земной поверхности, в соответствии с которым в фокальной плоскости устанавливаются ПЗС-матрицы, формирующие в дискретные мо-

менты времени t_i , $t_i = t_{i-1} + \Delta$, i = 2, 3, ..., микро-

кадры $B_{kj} = \{b_{kj}(m_j, n_j); m_j = \overline{1, M}, n_j = \overline{1, N}\},$

 $j = \overline{1, J}$, где k – номер ПЗС-матрицы, j – номер микрокадра, J – число микрокадров на маршруте съемки. Микрокадры имеют взаимные перекрытия. В аппаратуре МСС используются четыре матрицы, по одной на каждый спектральный диапазон, расположенные в фокальной плоскости последовательно вдоль направления полета КА. В системе ПСС используются шесть матриц, расположенных в шахматном порядке как показано на рис. 1.



Рис. 1. Принцип съемки земной поверхности аппаратурой ПСС

Рассматривается комплекс алгоритмов для радиометрического обеспечения систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) комбинированного кадрово-сканерного типа. Алгоритмы основаны на статистической оценке характеристик светочувствительных матриц путем анализа реальных изображений. Выполнены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов с использованием реальных изображений.

> Матрицы в съемочных системах функционируют в режиме временной задержки и накопления сигнала (ВЗН), что позволяет получать высококачественные снимки земной поверхности в различных условиях съемки. На этих снимках отсутствуют структурные радиометрические искажения, характерные для сканерных систем и проявляющиеся в виде «полосатости» изображения [1]. Однако различия передаточных характеристик отдельных ПЗС-матриц и особенности их работы в режиме ВЗН вызывают новый вид радиометрических искажений, которые проявляются как в изменении яркости в пределах отдельных микрокадров, так и в отличии яркости микрокадров. сформированных отдельными ПЗСматрицами датчика ПСС. Эти искажения не позволяют синтезировать непрерывный по яркости мозаичный снимок, то есть получить в ходе наземной обработки высококачественный информационный продукт.

> Цель настоящей работы – разработка алгоритмов радиометрической коррекции видеоданных, формируемых кадрово-сканерными системами дистанционного зондирования Земли.

Алгоритмы радиометрической коррекции видеоданных

В специализированных графических пакетах и в геоинформационных системах получение однородных по яркости изображений из набора перекрывающихся кадров осуществляется на основе анализа яркостей в общих областях снимков [2, 3]. Исследуем этот подход на примере яркостного совмещения двух микрокадров B_i

и B_{j+1} одной ПЗС-матрицы. Учитывая, что взаимное перекрытие микрокадров зависит от геометрических условий съемки, координаты одноименных пикселей сним-ков будем определять на основе уравнений геодезической привязки:

$$\begin{split} \phi_{j} &= F_{j}(m_{j}, n_{j}), \quad \lambda_{j} = \Phi_{j}(m_{j}, n_{j}), \\ \phi_{j+1} &= F_{j+1}(m_{j+1}, n_{j+1}), \\ \lambda_{i+1} &= \Phi_{i+1}(m_{i+1}, n_{i+1}), \end{split} \tag{1}$$

где φ , λ – геодезические координаты пикселя изображения b(m, n).

Тогда координаты одноименных пикселей в общей области двух микрокадров можно определить из условия:

$$\begin{cases} F_{j}(m_{j}, n_{j}) = F_{j+1}(m_{j+1}, n_{j+1}), \\ \Phi_{j}(m_{j}, n_{j}) = \Phi_{j+1}(m_{j+1}, n_{j+1}). \end{cases}$$
(2)

Яркостную коррекцию пикселей микрокадра B_{j+1} будем выполнять по формуле

$$b_{j+1}^{*}(m_{j+1}, n_{j+1}) = b_{j+1}(m_{j+1}, n_{j+1}) + \Delta b,$$

$$m_{j+1} = \overline{1, M}, \ n_{j+1} = \overline{1, N},$$
(3)

где Δb – корректирующая подставка, вычисляемая согласно выражению

$$\Delta b = \frac{1}{Q} \sum_{m,n} \left[b_{j+1}(m_{j+1}, n_{j+1}) - b_j(m_j, n_j) \right].$$
(4)

Здесь суммирование ведется по всем координатам (m_j, n_j) и (m_{j+1}, n_{j+1}) , удовлетворяющим условию (2), а Q – число пикселей с такими координатами (число пикселей общей области).

К сожалению, как показали эксперименты, алгоритм на основе выражения (3) не обеспечивает яркостного совмещения двух микрокадров. В качестве корректирующей исследовалась линейная функция яркостного соответствия вида $B_{j+1}^* = a_0 + a_1 B_{j+1}$, в которой параметры a_0 и a_1 рассчитываются по общей области двух

снимков, а также более сложные нелинейные преобразования. Однако требуемое качество обработки не было достигнуто.

В ходе исследований установлено, что изменение яркости от начала микрокадра к его концу носит плавный характер и зависит как от числа шагов накопления заряда, так и от направления считывания сигнала с ПЗС-матрицы. По этой причине алгоритмы яркостного выравнивания на основе анализа общих областей микрокадров оказываются неработоспособными.

Оценить функцию яркостных искажений в зависимости от режима работы ПЗС-матрицы можно по различиям средних значений яркости пикселей в предположении, что при бесконечном увеличении количества микрокадров все элементы ПЗС-матрицы получают на вход в среднем одинаковые сигналы. Учитывая, что спутники выполняют маршрутную съемку с ограниченным набором микрокадров, в пределах которых влияние сюжета может сильно исказить искомый характер яркостных искажений, предлагается следующее решение.

Первое, выполнить съемку однородных сюжетов земной поверхности с различными параметрами ВЗН.

Второе, выполнить низкочастотную фильтрацию полученных сюжетов и сформировать набор корректирующих функций.

Третье, создать базу данных корректирующих коэффициентов и использовать их при радиометрической обработке материалов съемки. Рассмотрим предлагаемые решения.

Пусть имеется однородный маршрут съемки, представленный набором микрокадров B_{kj} . Для минимизации сюжетной составляющей на его основе сформируем массив осредненных значений яркости в точках $(m^*, n^*), m^* = h - 0,5h, 2h - 0,5h, ..., M^*$,

$$n^* = h - 0,5h, 2h - 0,5h, ..., N^*, \qquad m^* \in [1,M],$$

 $n^* \in [1, N]$, где h – размер окна низкочастотного фильтра,

$$\overline{b}_{k}(m^{*},n^{*}) = \frac{1}{h^{2}J} \sum_{m^{*}-0.5h}^{m^{*}+0.5h} \sum_{n^{*}-0.5h}^{n^{*}+0.5h} \sum_{j} b_{kj}(m^{*},n^{*}), \quad (5)$$

а также СКО полученных измерений σ_k ,

$$\sigma_k^2 = \frac{\sum_{m^*=0,5h}^{m^*+0,5h} \sum_{n^*=0,5h}^{n^*+0,5h} \sum_j (b_{kj}(m^*,n^*) - \overline{b}_k(m^*,n^*))^2}{M^* N^* h^2 J - 1}.$$
 (6)

Выполним аппроксимацию осредненных значений $\overline{b}_k(m^*,n^*)$ двумерным полиномом $\hat{b}_k(m,n) = P_k(m,n)$, где $\hat{b}_k(m,n)$ – предсказанное значение яркости в точке (m,n), на основе уравнения

$$\mathbf{B}_{k} = \mathbf{H}\mathbf{P}_{k}, \qquad (7)$$

где
$$\mathbf{B}_{k} = \begin{bmatrix} \overline{b}_{k} (m_{1}^{*}, n_{1}^{*}), \overline{b}_{k} (m_{2}^{*}, n_{2}^{*}), ... \end{bmatrix}^{T}, \mathbf{P}_{k} =$$

 $= \left[p_1, p_2, ..., p_{\tau} \right]^T$ – коэффициенты полинома $P_k(m, n),$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & m_1^* & n_1^* & (m_1^*)^2 & (n_1^*)^2 & \dots \\ 1 & m_2^* & n_2^* & (m_2^*)^2 & (n_1^*)^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & m_{M^*}^* & n_{N^*}^* & (m_{M^*}^*)^2 & (n_{N^*}^*)^2 & \dots \end{bmatrix}$$

Здесь размерность вектора \mathbf{B}_k и матрицы \mathbf{H} опре-

деляется числом M^*N^* , а также числом коэффициентов в аппроксимирующем полиноме τ . Искомые коэффициенты полинома определяются по методу наименьших квадратов

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{B}_k^T.$$
(8)

Степень аппроксимирующего полинома, адекватно описывающего распределение яркости в пределах микрокадра, будем подбирать на основе критерия Фишера [4]. Для этого вначале зададим полином первой степени и оценим СКО невязок,

$$s^{2} = \frac{1}{M^{*}N^{*} - \tau} (\mathbf{B}_{k} - \mathbf{H}\mathbf{P})^{T} (\mathbf{B}_{k} - \mathbf{H}\mathbf{P}).$$
(9)

Составим отношение σ_k^2/s^2 , если оно удовлетворяет критерию Фишера о равенстве дисперсии двух случайных величин, то полином адекватно аппроксимирует

значения $\overline{b}_k(m^*,n^*)$. Если нет, то степень полинома увеличивается. Расчеты показали, что яркостные искажения в пределах микрокадра описываются полиномом 4-й степени, вид которого демонстрирует рис. 2.

С учетом найденного полинома $P_k(m,n)$ яркостные преобразования микрокадров датчика ПСС выполняется по формуле

$$\forall j, b_{k_j}^*(m, n) = \frac{P_k(m, n)}{\underset{\forall k, m^*, n^*}{\text{med}_k} \overline{b}_k(m^*, n^*)} b_{k_j}(m, n)$$
(10)



Рис. 2. Форма яркостных искажений отдельного микрокадра

Качество радиометрической коррекции оценим с использованием расширенного критерия Вебера–Фехнера [5], путем сопоставления яркости в общих областях соседних микрокадров. Будем считать, что яркостная коррекция выполняется с удовлетворительным качеством, если

$$\Delta b_j < 0.12 \frac{1}{Q} \sum_{m,n} \sqrt{(\overline{\mathbf{b}_j(m,n)} - b_{kj}(m,n))^2} , \qquad (11)$$

где Δb_j – средняя разность яркости пикселей, вычисленная по общей области j и j+1 микрокадров с использованием выражения (4), $\overline{\mathbf{b}_j(m,n)}$ – оценка математического ожидания яркости в общей области микрокадров, Q – суммарное количество пикселей в общей области.

Алгоритм отбора опорных сюжетов

Критерий (11) позволяет оценить не только качество радиометрической коррекции, но и отбраковать опорные сюжеты. Расчет коэффициентов может выполняться по фрагменту опорного сюжета, определяемому оператором. Такой фрагмент должен содержать максимально однородные по яркости объекты – водную поверхность, песок, снег. Вычисленные коэффициенты коррекции применяются к опорному маршруту в целом. Если после яркостного преобразования этого сюжета различия микрокадров не будут удовлетворять критерию (11), сюжет следует отбраковать.

Зачастую ручной выбор опорных сюжетов затруднителен или не обеспечивает получение оптимальных корректирующих коэффициентов. Предлагается алгоритм автоматического определения набора микрокадров, по которым формируются корректирующие коэффициенты. Алгоритм основан на минимизации остаточных яркостных различий микрокадров опорного маршрута съемки.

На первом этапе вычисление коэффициентов произмножеству микрокадров водится по всему $W = \{B_i, j = \overline{1,J}\}$ опорного маршрута. После применения этих коэффициентов оценивается средняя величина яркостных различий микрокадров υ . Далее коэффициенты яркостной коррекции вычисляются для множеств микрокадров $W_z = \{B_i, j = \overline{1, J}, j \neq z\}$, а после оценивается величина яркостных различий υ_r . Выбирается такое z, для которого $\upsilon_z = \min(\upsilon_i, j = \overline{1, J})$ и $\upsilon_z < \upsilon$. Если искомое значение z найдено, то микрокадр B_z признается непригодным и окончательно исключается из множества W.

Аналогичная процедура повторяется до тех пор, когда множество микрокадров W не станет пустым, или на определенной итерации не удастся определить очередное значение z. В первом случае анализируемый маршрут признается непригодным для получения коэффициентов. Во втором случае коэффициенты яркостной коррекции вычисляются по сформированному множеству W и сохраняются в базу данных при условии, что яркостное различие микрокадров соответствует критерию (11).

На рис. 3 приведен пример откорректированного по яркости маршрута съемки датчика ПСС, показанного на рис. 1. На исходном снимке относительные радиометрические различия микрокадров составляют 9%, а после обработки 1,9%, что делает мозаичное изображение маршрута съемки непрерывным по яркости.



Рис. 3. Откорректированный по яркости мозаичный снимок от датчика ПСС

Несмотря на высокую точность яркостной коррекции опорных маршрутов съемки, при штатной эксплуатации после коррекции снимков наблюдаются остаточные искажения. Причина их определяется дрейфом характеристик ПЗС-матриц во время работы. Подобные искажения описать с помощью калибровочных коэффициентов невозможно. Поэтому предлагается кроме калибровочной коррекции яркостных различий, добавить локальный анализ и исправление перепадов яркости на границах отдельных микрокадров.

Для этого после применения калибровочных коэффициентов для каждой пары микрокадров, имеющих зону перекрытия, вычисляется отношение

$$\omega_j = \frac{2\Delta b_j}{\overline{b_j} + \overline{b_{j+1}}}, \ j = \overline{1, J - 1}$$
(12)

где $\overline{b_j}$ и $\overline{b_{j+1}}$ – средняя яркость зоны перекрытия, вычисленная по *j*-му и (*j*+1)-му микрокадрам.

Если $\omega_j > 0.02$, то считается, что необходима дополнительная коррекция j-го микрокадра. Предлагается модифицировать яркость строк по следующему соотношению

$$b_{j}^{*}(m,n) = b_{j}(m,n) + \frac{2\Delta b_{j}m}{2M - \Delta m_{j}},$$
 (13)

где M – число строк микрокадра, Δm_i – число строк в

зоне перекрытия *j*-го и (j+1)-го микрокадров.

Такое преобразование позволяет устранить остаточные яркостные неоднородности, и в результате величина яркостной неоднородности ω_j уменьшается до приемлемых для практического применения значений. На рис.

4 демонстрируется пример уточнения яркостного рассогласования двух микрокадров.



Рис. 4. Пример уточнения яркостных искажений

Радиометрическое обеспечение матрично-сканерных систем Д33

Разработанные алгоритмы послужили основой при создании схемы радиометрического обеспечения спутников «Канопус-В» и «БКА», которая иллюстрируется рис. 5.



Рис. 5. Схема радиометрического обеспечения данных «Канопус-В» и «БКА»

В соответствии с этой схемой, в начале, на основе опорных сюжетов формируется база данных (БД) ко-

эффициентов радиометрической коррекции для различных режимов ВЗН. При поступлении в комплекс обработки текущего маршрута съемки, выполняется поиск в БД соответствующих ему коэффициентов радиометрической коррекции. Если для данного режима ВЗН коэффициенты коррекции имеются, то вначале выполняется устранение яркостных артефактов, обусловленных технологическими особенностями установки ПЗС-матриц, на основе данных разработчиков целевой аппаратуры, а затем радиометрическая коррекция с использованием выражения (10). Далее выполняется контроль яркостного совмещения и, при необходимости, устранение остаточных искажений на основе выражения (13).

Если маршрут снят с режимом ВЗН, для которого нет в БД соответствующих коэффициентов обработки, то сюжет анализируется как опорный, формируются необходимые коэффициенты преобразования, а затем выполняется его коррекция.

Заключение

Поставленные в настоящей работе цели достигнуты. Рассмотренные в статье алгоритмы радиометрической коррекции объединяются в виде системы радиометрического обеспечения для кадрово-сканерных систем дистанционного зондирования Земли, в частности КА «Канопус-В» и «БКА». Использование этой системы обеспечивает удовлетворительное яркостное выравнивание изображений микрокадров при наличии качественных тестовых полигонов, необходимых для расчета поправочных коэффициентов.

Все алгоритмы реализованы в программном комплексе «NormSatB №2», который успешно эксплуатируется в научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) и НИЦ «Планета». Программный комплекс предназначен для комплексной обработки данных дистанционного зондирования от космических аппаратов «Канопус-В» и «БКА» и обеспечивает формирование выходной информационной продукции различных уровней обработки.

Литература

1. Зенин В.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Алгоритм радиометрической коррекции изображений с неоднородным сюжетом, полученных от космического аппарата «Ресурс-ДК» // Вестник РГРТУ. №1 (Выпуск 23). Рязань, 2008. С. 43-48.

- 2. Leica Geosystems. ERDAS Field Guide.
- 3. Программный комплекс ENVI. Совзонд, 2007.

4. Коршунов Ю.М. Математические основы кибернетики. М.: Энергоатомиздат, 1987. 496 с.

5. Побаруев В.И. Обобщение закона Вебера-Фехнера для случая наблюдения дисперсионных изображений при различных контрастах // Тез. докл. 6-й Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», Рязань, 2001 г. С.117-118.

6. Еремеев В.В., Зенин В.А. Модели коррекции динамических структурных искажений на космических изображениях // Вестник РГРТУ. №3 (Выпуск 33). Рязань, 2010. С 3-7.

7. Кузнецов А.Е. Системы и технологии обработки аэрокосмической информации // Вестник РГРТУ № 1 (выпуск 39). Часть 2. Рязань, 2012. С 7-14.