РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2019, том 6, выпуск 1, с. 76–82

___ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ____ Обработка информации и системы телеметрии

УДК 528.852.8 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.76.82

Алгоритм статистической коррекции пространственной неоднородности многосканового изображения

Ю.М.Гектин, к.т.н., petrov_sv@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Р.В.Андреев, acnupaнm, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Зайцев, zaytsev_aa@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. Д. Коган, acnupaнm, kogan.sd@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В процессе орбитального функционирования приборов дистанционного зондирования Земли для абсолютизации получаемого сигнала регулярно проводится их внутренняя бортовая калибровка. Однако в случае использования многоэлементного фотоприемника в качестве регистратора сигнала могут возникнуть ситуации, при которых в результате проведенной бортовой калибровки не в полной мере обеспечивается пространственная однородность сигнала по полю фотоприемника при съемке однородной области подстилающей поверхности.

В статье предлагается алгоритм коррекции указанных неоднородностей, основанный на статистическом анализе сигнала с многоэлементных фотоприемников. При этом используется избыточность информации, возникающая из-за перекрытия сканов изображения. Основным преимуществом данного алгоритма является его непараметричность, то есть для его работы требуется только само исходное многоскановое изображение.

Предлагаемый алгоритм протестирован на данных, полученных с российского спутника дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: многоскановые изображения, пространственная неоднородность, спутниковые системы дистанционного зондирования Земли, линейные многоэлементные фотоприемники

Algorithm of Statistical Correction of Spatial Nonuniformity of the Multiscan Image

Yu. M. Gektin, Cand. Sci. (Engineering), petrov_sv@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

R. V. Andreev, *postgraduate student, contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zaytsev, zaytsev_aa@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. D. Kogan, postgraduate student, kogan.sd@spacecorp.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. During orbital functioning Earth remote sensing devices for absolutization of the received signal regularly carry out internal onboard calibration. However in case of using a multielement photodetector as a signal recording device there can be situations when, as a result of the carried out onboard calibration, spatial uniformity of a signal across the field of the photodetector is not fully provided when surveying a uniform area of the underlying surface.

The article offers the algorithm to correct the specified nonuniformity based on the statistical analysis of a signal from multielement photodetectors. Under such conditions, the redundancy of information arising because of overlapping of image scans is employed. The main advantage of this algorithm is its nonparametricity, i.e., only the initial multiscan image is required for its operation.

The offered algorithm is tested on the real data obtained from the Russian satellite of Earth remote sensing.

Keywords: multiscan images, spatial nonuniformity, satellite systems of Earth remote sensing, linear multielement photodetectors

Введение

В процессе орбитального функционирования приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для абсолютизации получаемого сигнала регулярно проводится внутренняя бортовая калибровка фотоприемного оптико-электронного тракта. Однако в случае использования линейного многоэлементного фотоприемника в качестве регистратора сигнала могут возникнуть ситуации, при которых в результате проведенной бортовой калибровки не в полной мере обеспечивается пространственная однородность чувствительности по полю фотоприемника [1]. Эта неоднородность тем больше, чем выше уровень регистрируемого сигнала, поэтому особенно сильно она проявляется при съемке пространственно квазиоднородных сцен с высоким уровнем средней яркости. В качестве примера на рис. 1 приведено изображение с явной скановой структурой. Визуально такая неоднородность воспринимается как наличие на изображении поперечных полос с периодом, равным ширине скана.



Рис. 1. Фрагмент многосканового инфракрасного изображения, полученного аппаратурой МСУ-ИК-СРМ (космический аппарат «Канопус-В-ИК») [2]

Причины появления указанной скановой структуры могут быть различны. Подобные эффекты могут быть вызваны как особенностями оптической схемы и механизма калибровки конкретной аппаратуры (особенностями съемки бортовых эталонных источников излучения), так и другими причинами, характер которых далеко не всегда можно установить однозначно. Дополнительные трудности связаны также с тем, что указанная неоднородность чувствительности может быть нестационарной и изменяться в процессе эксплуатации аппаратуры, что со временем снижает эффект компенсационного влияния предполетных наземных калибровок и ухудшает радиометрическое качество получаемой информации. Таким образом, возникает необходимость ее наземной коррекции.

Известны статистические способы наземной коррекции неоднородности многоэлементных фотоприемников [4, с. 23-75]. Однако каждый из них накладывает определенные ограничения на исходный спутниковый снимок: одни алгоритмы требуют однородности сюжета, другие учитывают его неоднородность, но предполагают резкую границу между разнородными классами объектов; все они чувствительны к объему исходных данных (требуется большая статистика) и т. д. Описываемый в этой статье способ лишен указанных недостатков, т.к. вычисляет коэффициенты «взаимного искажения» между элементами фотоприемника не в смысле среднего, а напрямую, с точностью до географической привязки исходных сканов. Благодаря этому он пригоден не только для визуального «выравнивания» снимка, но и для радиометрической нормализации данных ДЗЗ.

Описание алгоритма

Предлагаемый алгоритм коррекции основан на использовании избыточности информации, содержащейся в исходном изображении, полученном аппаратурой ДЗЗ. Для корректной работы алгоритма на его вход должно поступать многоскановое изображение, имеющее такие области перекрытия между соседними сканами, что ширина области (размер в направлении, перпендикулярном сканированию), непрерывно изменяется от некоторого начального значения до конечного, составляющего не менее 50 процентов от ширины всего скана. Сами сканы при этом есть результат съемки линейным многоэлементным фотоприемником с использованием оптико-механической развертки [3, с. 150–152] в широком угле сканирования [5]. Алгоритм является двухэтапным: на первом этапе проводится вычисление коэффициентов коррекции, на втором — их применение к исходному изображению. Ниже приводится описание работы алгоритма, осуществляющего линейную (по яркости) коррекцию.

Этап І. Вычисление коэффициентов коррекции

Пусть имеется изображение ДЗЗ, удовлетворяющее приведенным в предыдущем разделе условиям. Введем индексацию: $k \in [1; K]$ — номер скана, $i \in [1; I]$ — номер строки изображения в скане (эквивалентен номеру фоточувствительного элемента), $j \in [1; J]$ — номер пикселя в строке скана. На рис. 2 схематично показано перекрытие соседних сканов при их пространственной сшивке (географической привязке изображения [4, с. 76– 166]) и приведена индексация пары пространственно совпадающих элементов изображения из разных сканов.



Рис. 2. Перекрытие двух последовательных сканов. Обозначена пара пространственно совпадающих элементов изображения из разных сканов

В случае полностью корректной калибровки аппаратуры в области перекрытия значения кода яркости для одних и тех же объектов должны быть одинаковыми в разных сканах. Предположим, что это не так, и для элемента изображения с координатами $\{i, j, k\}$ имеет место линейное искажение сигнала вида

$$U_{\{i,j,k\}} = (U^0_{\{i,j,k\}} - \beta) \times \alpha_i + \beta,$$

где $U_{\{i,j,k\}}$ — искаженное значение сигнала;

 $U^0_{\{i,j,k\}}$ — идеальное, неискаженное значение сигнала;

 α_i — коэффициент, отвечающий за степень искажения сигнала;

 β — уровень сигнала, передающийся без искажений (в дальнейшем изложении для простоты описания положим, что $\beta = 0$; случай $\beta \neq 0$ будет рассмотрен в конце описания алгоритма).

Очевидно, что для любых пар элементов изображения $\{i, j, k\}_1$ и $\{i, j, k\}_2$, совпадающих пространственно, должно выполняться равенство $U^0_{\{i,j,k\}_1} = U^0_{\{i,j,k\}_2}$. Следовательно,

$$\alpha_{i_2}^{i_1} = \frac{\alpha_{i_1}}{\alpha_{i_2}} = \frac{U_{\{i,j,k\}_1}}{U_{\{i,j,k\}_2}}.$$

Смысл полученного коэффициента $\alpha_{i_2}^{i_1}$ заключается в «степени взаимного искажения» сигнала для строк i_1 и i_2 изображения (или, что то же самое, для фотоэлементов с номерами i_1 и i_2). Таким образом, задача алгоритма на первом этапе сводится к поиску этих коэффициентов.

Количество коэффициентов $\alpha^{i_{\varphi}}_{i_{\psi}}$ равно I^2 , однако лишь I из них являются независимыми. Действительно, зная значения коэффициентов $\alpha_{i_2}^{i_1}$ и $\alpha_{i_3}^{i_1}$, можно найти значение коэффициента $\alpha_{i_2}^{i_3} = \alpha_{i_2}^{i_1}/\alpha_{i_3}^{i_1}$, а также $\alpha_{i_3}^{i_2} = 1/\alpha_{i_2}^{i_3}$. Приведенные выше требования наличия хотя бы 50-процентного перекрытия между соседними сканами и широкого угла обзора сканера как раз и обеспечивают получение I независимых коэффициентов $\alpha_{i_{ob}}^{i_{\varphi}}$ (т.е. гарантируют существование хотя бы одной пары коэффициентов $\alpha_{i_2}^{i_1}$ и $\alpha_{i_3}^{i_1}$ для любой пары индексов i_2 и i_3). Поскольку все коэффициенты $lpha_{i_\psi}^{i_{\varphi}}$ являются относительными, то выбор конкретных І независимых коэффициентов формально произволен. Однако, исходя из того соображения, что наибольшие искажения сигнала обычно наблюдаются на краях скана, а в центральной области почти отсутствуют, логично вычислить набор коэффициентов $\alpha_{I/2}^{i}$.

На рис. З показан процесс получения коэффициентов $\alpha_{i_{\psi}}^{i_{\varphi}}$ на примере приведенного на рис. 1 фрагмента изображения с аппаратуры МСУ-ИК-СРМ. На рис. 3, *а* показана область мат-



Рис. 3. Стадии получения матрицы коэффициентов $\alpha_{i_{s,t}}^{i_{\varphi}}$



Рис. 4. Процесс самосогласования матрицы коэффициентов $\alpha_{i_{ab}}^{i_{\varphi}}$

рицы коэффициентов, полученная при наборе статистики по изображению. Возникающая при этом избыточность для определения каждого коэффициента $\alpha_{i_{\psi}}^{i_{\varphi}}$ устраняется выбором медианного значения. На рис. 3, δ -c показано дополнение области до содержащей I^2 коэффициентов по вышеописанным формулам. При этом для получения новых коэффициентов (например, для перехода из «s» в «c») используются все известные пары коэффициентов и конечным результатом считается медианное значение среди результатов вычисления.

После заполнения пустых областей в матрице коэффициентов $\alpha_{i_{\psi}}^{i_{\varphi}}$ на рис. 3, e отчетливо видны диагональные полосы — это границы подобластей, полученных разными методами. Поэтому необходимо согласовать полученные коэффициенты.

Для этого в несколько итераций выполняется вычисление каждого коэффициента $\alpha_{i_{\psi}}^{i_{\varphi}}$ с использованием (I-1) пары коэффициентов. На рис. 4, *а-г* показаны исходная матрица и три итерации ее самосогласования, а на рис. 4, *д-ж* — разницы между значениями коэффициентов для соседних итераций. Видно, что означенные дефекты быстро исчезают и набор коэффициентов $\alpha_{i_{\psi}}^{i_{\varphi}}$ становится самосогласованным.

79

На рис. 5 приведены значения искомого набора коэффициентов $\alpha_{I/2}^i$ и аппроксимирующая их функция $\tilde{\alpha}_{I/2}^i$ (в данном случае — полином 6-й степени) для тестового изображения с I == 288. Тот факт, что наименьший разброс значений коэффициентов наблюдается по краям скана,



Рис. 5. Вычисленные коэффициенты коррекции α_{144}^i и аппроксимирующая их функция $\widetilde{\alpha}_{144}^i$

объясняется тем, что для них изначально было больше статистических данных — чем ближе строка к центру скана (т. е. чем меньше разница |I/2 - i|), тем реже она участвует в межскановом перекрытии.

С физической точки зрения полученная зависимость $\tilde{\alpha}_{I/2}^{i}$ есть относительная чувствительность фотоприемного тракта аппаратуры (как функция порядкового номера фотоэлемента).

Этап II. Коррекция изображения

Процедура коррекции изображения сравнительно проста и заключается в применении к каждому элементу изображения процедуры

$$U'_{\{i,j,k\}} = U_{\{i,j,k\}} / \widetilde{\alpha}^{i}_{I/2},$$

где $U'_{\{i,j,k\}}$ — скорректированное значение сигнала, $U'_{\{i,j,k\}} \cong U^0_{\{i,j,k\}}.$

Теперь необходимо сделать замечание насчет опущенного в приведенном изложении коэффициента β — уровня сигнала, передающегося без иска-

жений. Видно, что выражение $U_{\{i,j,k\}} = (U_{\{i,j,k\}}^0 - \beta) \times \alpha_i + \beta$ после переноса свободного члена β в левую часть имеет симметричный относительно него вид, и все дальнейшие вычисления следует проводить со значениями $(U_{\{i,j,k\}} - \beta)$. Таким образом, можно предложить использовать априорное значение β с учетом специфики конструкции и работы сканера, получившего изображение, а в случае неудовлетворительного результата — сделать несколько итераций полного цикла вычисления коэффициентов $\alpha_{I/2}^i$ и последующей коррекции изображения, варьируя значения β как параметра. Соответственно в случае $\beta \neq 0$ алгоритм коррекции имеет вид

$$U'_{\{i,j,k\}} = (U_{\{i,j,k\}} - \beta) / \tilde{\alpha}^{i}_{I/2} + \beta.$$

Пример работы алгоритма

На рис. 6 приведен результат применения алгоритма к тестовому изображению. Скановая структура устранена на всех уровнях яркости.





Рис. 6. Фрагмент изображения до коррекции (слева) и после коррекции (справа)

Замечания о корректности использования алгоритма

Как уже говорилось в разделе «Описание алгоритма», представленный способ устранения неоднородности позволяет получить корректный результат только тогда, когда искажение сигнала линейно по яркости. В случае когда это не так, можно разбить яркостный диапазон на несколько интервалов, в каждом из них вычислить $\tilde{\alpha}_{I/2}^i$, а после интерполировать полученный набор $\{\tilde{\alpha}_{I/2}^i\}$ как функцию яркости. Однако этот случай к настоящему моменту не апробирован в силу отсутствия необходимости решения подобной задачи.

Кроме того, при вычислении матрицы коэффициентов $\alpha_{i\psi}^{i\varphi}$ немаловажную роль играет точность пространственной сшивки (географической привязки) сканов изображения: чем ниже точность сшивки, тем бо́льшим должен быть объем исходной статистики по парам $\{i, j, k\}_{\varphi}$ и $\{i, j, k\}_{\psi}$ для минимизации погрешности первичного расчета $\alpha_{i\psi}^{i\varphi}$.

Заключение

Представленный в данной работе алгоритм успешно устраняет скановую структуру, порождаемую пространственной неоднородностью чувствительности фотоприемного тракта оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ. Для работы алгоритма необходимы исходное многоскановое изображение и данные для его географической привязки.

Следует отметить, что применение коррекции с относительными коэффициентами позволяет добиться лишь пространственной однородности сигнала на изображении при съемке однородных яркостных сцен, но абсолютизации измерений при этом не происходит. Поэтому для получения радиометрически абсолютизированного изображения (т. е. такого, где любому уровню цифрового сигнала можно однозначно сопоставить определенное значение яркости как физической величины) необходимо пользоваться дополнительными соображениями, определяемыми особенностями конкретной аппаратуры. Так, в изложенном материале было принято, что наименьшим искажениям подвержена центральная область скана, для которой проведена радиометрическая абсолютизация сигнала путем независимых наземных предполетных измерений.

На момент публикации данной статьи авторами подана заявка на изобретение представленного способа коррекции.

Список литературы

- Андреев Р.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Смелянский М.Б. Специальные алгоритмы радиометрической коррекции изображений ДЗЗ в ИК-диапазоне // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. З, вып. 4. С. 32–40.
- Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Смелянский М.Б., Рыжаков А.В., Фролов А.Г. Перспективный ИК-радиометр для опера-

тивного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций на территории России // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы III Междунар. науч. конф. (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.). Красноярск, 2016. С. 46–49.

- Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с. ISBN 978-5-94836-244-1.
- Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В. В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 460 с. ISBN 978-5-9221-1596-4.
- Акимов Н.П., Бадаев К.В., Гектин Ю.М., Зайцев А.А., Фролов А.Г. Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, вып. 4. С. 34–45. DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.34.45.