РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
2016, том 3, выпуск 4, с. 32–40

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

УДК 528.852.4

Специальные алгоритмы радиометрической коррекции изображений ДЗЗ в ИК-диапазоне

Р. В. Андреев, Ю. М. Гектин[1], А. А. Зайцев, М. Б. Смелянский

[1]*к. т. н., АО «Российские космические системы»*

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Аннотация. В статье представлены основные алгоритмы обработки изображений, формируемых современной российской аппаратурой дистанционного зондирования Земли МСУ-ГС (установленной на геостационарном космическом аппарате «Электро-Л» № 2) в инфракрасном диапазоне спектра. Разработанные алгоритмы позволяют проводить коррекцию сигнала и компенсировать влияние большого числа факторов: от особенностей работы электрических трактов до изменения корпусной температуры прибора. Их применение позволяет уменьшить эквивалентную геометрическим и временным шумам разность температуры 0,1 К. Все алгоритмы реализованы в штатном комплексе обработки данных с МСУ-ГС.

Ключевые слова: геостационарная орбита, дистанционное зондирование Земли, инфракрасный диапазон спектра, обработка изображений, коррекция сигнала

Special Algorithms for Radiometric Correction of ERS Images in Infrared Range

R. V. Andreev, Yu. M. Gektin[1], A. A. Zaytsev, M. B. Smelyanskiy

[1]*candidate of engineering science, Joint Stock Company "Russian Space Systems"*

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. Principal algorithms for processing of the images generated by the modern Russian Earth remote sensing (ERS) equipment MSU-GS (mounted on the geostationary spacecraft Elektro-L) in infrared range are presented in the article. The developed algorithms make it possible to perform signal correction, as well as compensate for an influence of a large number of factors: from operation features of electrical channels to alteration of temperature of the instrument case. The implementation of the algorithms reduces the difference in temperature equivalent to geometric and time noises to 0.1 K. It is necessary to mention that all algorithms are implemented in the standard complex for data processing obtained from MSU-GS.

Keywords: geostationary orbit, Earth remote sensing, infrared range of the spectrum, image processing, signal correction

Введение

11 декабря 2015 г. состоялся успешный запуск КА «Электро-Л» № 2 с аппаратурой МСУ-ГС на борту. МСУ-ГС — аппаратура дистанционного зондирования Земли, проводящая съемку земной поверхности с геостационарной орбиты в десяти спектральных диапазонах в видимой и инфракрасной областях спектра. Аппаратура, установленная на КА «Электро-Л» № 2 (далее — МСУ-ГС № 2), представляет собой модифицированный вариант МСУ-ГС, уже находящегося на орбите [1].

При модернизации ИК-модуля аппаратуры были применены новые конструктивно-технические решения. В целях повышения качества получаемой информации используются матричные фотоприемные устройства (МФПУ) большего формата, соответственно изменена оптическая система [2]. Также был пересмотрен принцип функционирования МСУ-ГС № 2 и полностью изменен алгоритм работы бортового блока обработки сигналов (БОС). Ниже представлены алгоритмы, позволяющие при наземной обработке проводить различного рода коррекцию изображений, формируемых ИК-каналами МСУ-ГС № 2.

Алгоритм коррекции дрейфа постоянной составляющей сигнала

При наземной настройке ИК-модуля аппаратуры МСУ-ГС № 2 обнаружилась нестабильность темновой составляющей сигнала фотоприемников, проявляющаяся в виде плавного дрейфа (рис. 1). Величина этого дрейфа зависит от многих факторов (температуры МФПУ, времени, прошедшего с момента включения, и пр.), что значительно усложняет его коррекцию.

Снимок получен во время съемки однородной температурной сцены при наземных испытаниях. Наблюдается дрейф сигнала, плавно затухающий к концу кадра. Каждые два скана данные калибровки по «холодному» обновляются, что возвращает значение сигнала на заданный уровень.

Для решения этой проблемы была использована особенность оптической схемы ИК-каналов аппаратуры МСУ-ГС № 2, состоящая в том, что поле зрения объектива в фокальной плоскости этих каналов несколько меньше размеров МФПУ (рис. 2). Таким образом, в составе МФПУ имеются элементы, не чувствительные к излучению от объекта съемки (далее — «слепые» элементы). Сигнал от таких элементов можно использовать в качестве опорного для коррекции выходного изображения.

Для этого в формате выходного сигнала во время сеанса МСУ-ГС № 2 передаются значения отсчетов не только от элементов рабочей области МФПУ, но и от «слепых» элементов. Так как эти значения зависят только от номера фоточувствительного регистра (строки) МФПУ и от времени, то для каждой строки выходного сигнала передаются 8 «поправок», соответствующим 8 строкам МФПУ. Величины поправок вычисляются следующим образом:

$$\delta_{\text{blind}}^{l,t} = \sum_{\text{blind}} \frac{u_{\text{cold}}^{m,l} - u^{m,l,t} + 512}{N_{\text{blind}}},$$

где $\sum_{\text{blind}}$ — сумма по всем номерам m элементов строки МФПУ, которые считаются «слепыми», $u_{\text{cold}}^{m,l}$ — значение сигнала от «холодного», $u^{m,l,t}$ — значение текущего сигнала от элемента МФПУ, l — номер строки МФПУ, t — номер строки выходного сигнала (всего 3400 строк в одном скане), N_{blind} — количество «слепых» элементов в выбранной строке МФПУ. Процедура наземной обработки для выделенного пикселя видеоинформации выглядит так:

$$U_{i,t}^{\text{corr I}} = U_{i,t} + \sum_{l=1}^{8} \widehat{F}((\delta_{\text{blind}}^{l,t} - 512) \cdot K_{m,l}),$$

где $U_{i,t}^{\text{corr I}}$ — значение скорректированного сигнала, $U_{i,t}$ — значение сигнала на том же элементе исходного изображения, $K_{m,l}$ — коэффициент нормализации, рассчитываемый из передаваемых в телеметрии значений от «горячего» и «холодного» источников излучения, $\widehat{F}$ — оператор процедуры объединения отсчетов [3].

На рис. 3 показан результат обработки изображения, полученного МСУ-ГС № 2 в одном из первых сеансов. На исходном изображении максимальная величина дрейфа составляет 4–8 уровней (что соответствует разности температур порядка 0,5–1,0 К на уровне 300 К).

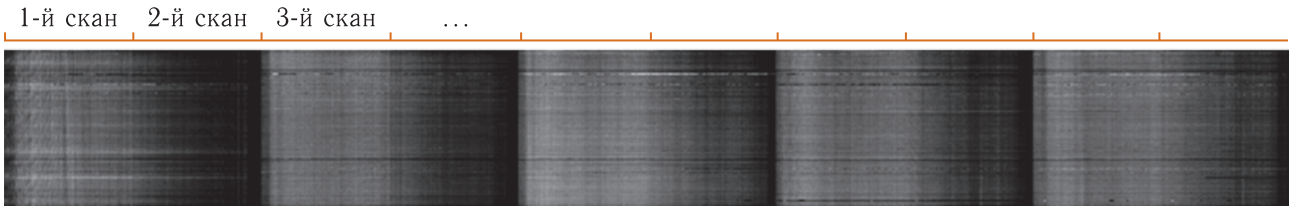

Рис. 1. Фрагмент кадра одного из ИК-каналов аппаратуры МСУ-ГС № 2

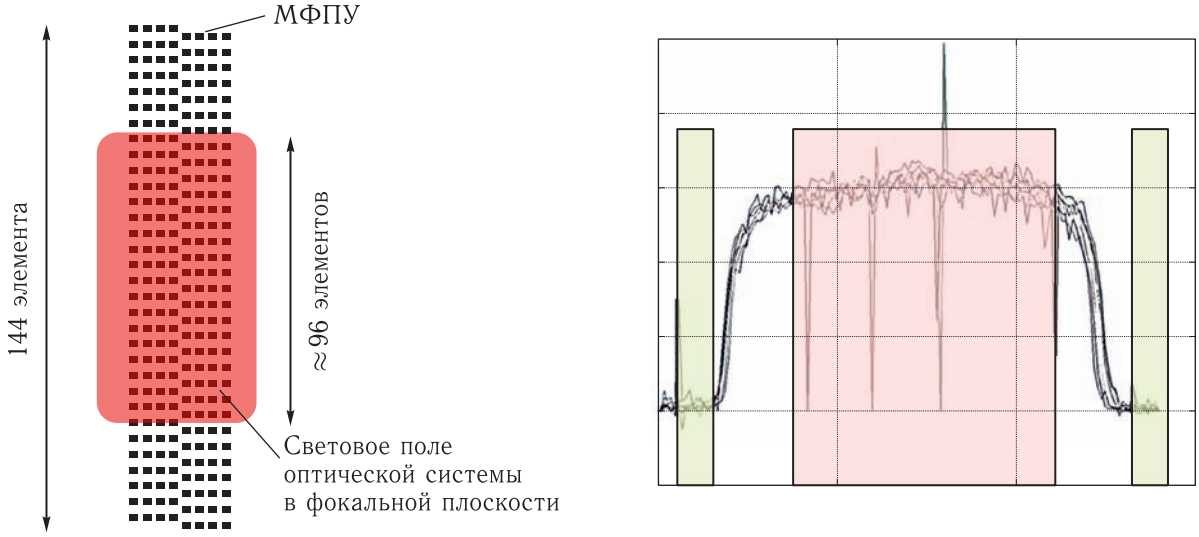

Рис. 2. Положение светового поля оптической системы на МФПУ ИК-канала (слева); разность между значениями сигнала от «горячего» и «холодного» калибровочных источников излучения по элементам МФПУ (справа; красным показана рабочая область, зеленым — элементы, полностью нечувствительные к излучению на входе оптической системы)

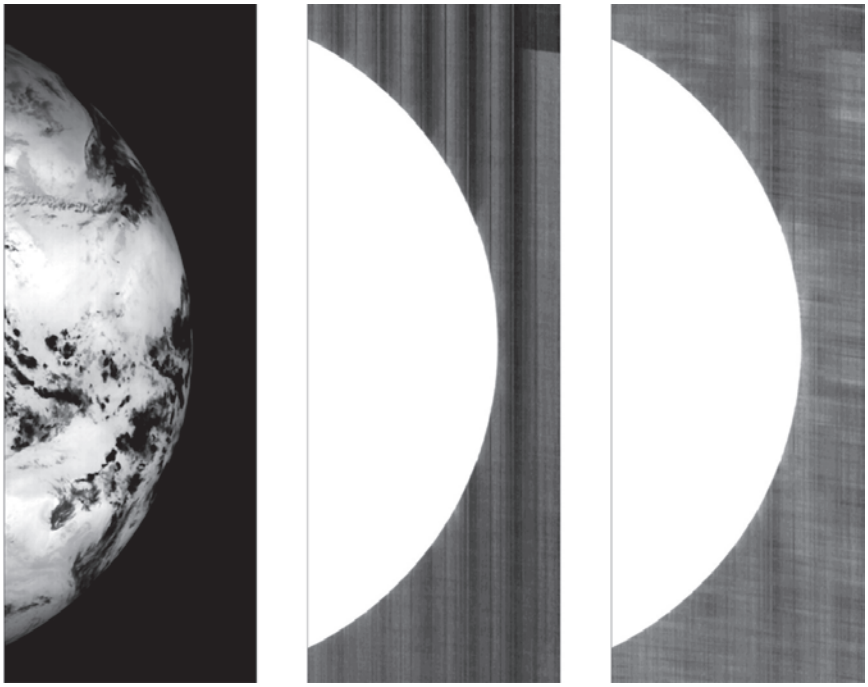

Рис. 3. Результат обработки изображения, полученного МСУ-ГС № 2

Исходное изображение (слева), в центре — оно же, с повышенным контрастом в области низких значений. Видны вертикальные градиентные полосы, вызванные дрейфом сигнала. Изображение, обработанное алгоритмом коррекции по «слепым» элементам, приведено справа. Вертикальные градиентные полосы устранены.

Алгоритм коррекции полос на изображениях ИК-каналов

На изображениях от ИК-каналов прибора МСУ-ГС №2 присутствуют отдельные вертикальные полосы, сильно отличающиеся по своему уровню яркости от основной сцены (рис. 4).

Рис. 4. Фрагмент изображения VI канала

Однако на этих элементах строки присутствует изображение реального сюжета, а шумовые характеристики не аномальны, т. е. эти элементы не являются абсолютно дефектными. Анализ данных телеметрии по работе каждого отдельного элемента МФПУ показал, что полоса возникает в результате погрешности определения коэффициента нормализации для одного отдельного элемента какой-либо из строк МФПУ при съемке «горячего» (рис. 5).

Для элемента №50 из-за цифрового ограничения при съемке «горячего» коэффициент нормализации оказывается завышенным, что, в свою очередь, приводит к появлению яркой полосы на выходном изображении.

В алгоритме работы БОС ИК-каналов предусмотрены различные критерии интеллектуальной отбраковки элементов, но порог по максимальному значению «горячего» предусмотрен не был. Тем не менее искаженный таким образом сигнал можно восстановить.

Каждый пиксель выходного изображения формируется следующим образом:

$$U_i = \sum g^{l,j} \cdot (u^{l,j} - u^{l,j}_{\text{cold}}) \cdot k^{l,j}_{\text{norm}},$$
$$k^{l,j}_{\text{norm}} = A/(u^{l,i}_{\text{hot}} - u^{l,i}_{\text{cold}}),$$

где $u^{l,j}$ — значение сырого сигнала от элемента МФПУ, $u^{l,i}_{\text{hot}}$ — значение сигнала от «горячего», $u^{l,i}_{\text{cold}}$ — значение сигнала от «холодного», $k^{l,j}_{\text{norm}}$ — коэффициент нормализации, $g^{l,j}$ — коэффициент интерполяции, l — номер строки МФПУ, j — номер элемента строки МФПУ, A — масштабный коэффициент (свое значение для каждого канала). Знак суммы обозначает суммирование по тем элементам, которые входят в элемент i изображения ($i = \overline{1:183}$ — число элементов в строке выходного сигнала от одного ИК-канала). Далее будем обозначать U_i как U, а также $g^{l,j}$ как g, $u^{l,j}$ как u и т. д., опуская индексы l и j. Тогда

$$U = \sum g \cdot (u - u_x) \cdot k_{\text{norm}} = \sum g \cdot u' \cdot k_{\text{norm}} = \sum g \cdot u'',$$

где u' — ненормализованный сигнал от элемента МФПУ, u'' — нормализованный сигнал.

Пусть для некоторого элемента МФПУ коэффициент нормализации определяется неправильно. Обозначим корректный коэффициент нормализации как k^+_{norm}, а некорректный — как k^-_{norm}. Тогда пиксель для темной или светлой полосы формируется следующим образом:

$$U^{\text{def}} = \sum (g \cdot u' \cdot k_{\text{norm}}) = \\ = \sum (g^+ \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}) + g^- \cdot u' \cdot k^-_{\text{norm}},$$

где U^{def} — значение пикселя из темной или светлой полосы, g^+ — коэффициенты интерполяции для элементов с правильными коэффициентами нормализации, а g^- — коэффициент интерполяции для элемента с неправильным коэффициентом нормализации.

$$U^{\text{def}} = \sum (g^+ \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}) + g^- \cdot u' \cdot k^-_{\text{norm}} = \\ = \sum (g^+ \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}) + \frac{g^- \cdot u' \cdot k^-_{\text{norm}} \cdot k^+_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}} = \\ = \sum (g^+ \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}) + \left(g^- \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}\right) \cdot \frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}} =$$

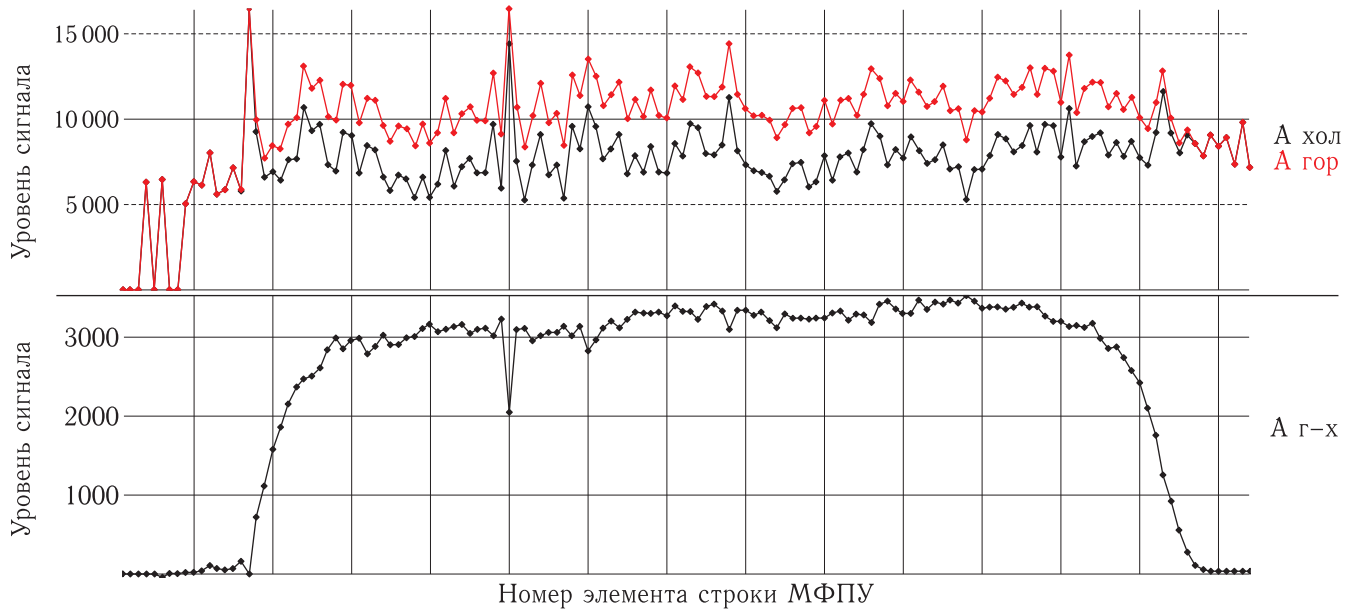

Рис. 5. Профили яркости при съемке «горячего» и «холодного» для 1-й строки МФПУ (сверху), разница в сигнале (снизу)

$$= \left(\sum(g^+) + g^- \cdot \frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}}\right) \cdot \sum(u' \cdot k^+_{\text{norm}}) =$$

$$= \frac{\left(\sum(g^+) + g^- \cdot \frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}}\right)}{\sum g} \times \sum(u' \cdot k^+_{\text{norm}} \cdot g) =$$

$$= \frac{\left(\sum(g^+) + g^- \cdot \frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}}\right)}{\sum g} \cdot U^{\text{corr II}},$$

где $U^{\text{corr II}}$ — скорректированное значение пикселя из темной или светлой полосы. Таким образом,

$$U^{\text{corr II}} = \frac{\sum g}{\sum(g^+) + g^- \cdot \frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}}} \cdot U^{\text{def}}$$

и задача коррекции аномальной полосы сводится к нахождению правильного коэффициента нормализации того элемента, для которого этот коэффициент вычисляется с ошибкой.

Исходя из того, что разность «горячего» и «холодного» для различных элементов одной строки МФПУ не сильно отличается от среднего значения, для элемента, значение коэффициента нормализации которого вычислено неправильно, можно было бы взять в качестве k^+_{norm} среднее между значениями коэффициентов нормализации соседних с ним элементов. Однако коррекция полос при вычислении k^+_{norm} подобным образом дает плохие результаты.

Существует возможность более достоверного определения величины k^+_{norm}. Для этого можно использовать центральный скан изображения, в котором значения сигнала от элементов различных строк МФПУ входят с интерполяционным коэффициентом, равным 0 или 1.

Пусть U_i — пиксель аномальной полосы на изображении, а U_{i-1} — соседний с ним пиксель из корректной строки. Так как нормализованный сигнал от близко расположенных друг к другу элементов фотоприемника совпадает с точностью до шумов (при достаточно однородном сюжете), то

$$U_{i-1} = \sum g \cdot u' \cdot k_{\text{norm}} = 4 \cdot u' \cdot k_{\text{norm}},$$

$$U_i = \sum(g^+ \cdot u' \cdot k^+_{\text{norm}}) + g^- \cdot u' \cdot k^-_{\text{norm}} =$$

$$= 3 \cdot u' \cdot k_{\text{norm}} + u' \cdot k^-_{\text{norm}},$$

$$u' \cdot k^+_{\text{norm}} = u' \cdot k_{\text{norm}} = \frac{U_{i-1}}{4},$$

$$u' \cdot k^-_{\text{norm}} = U_i - \frac{3 \cdot U_{i-1}}{4}.$$

Таким образом,

$$\frac{k^-_{\text{norm}}}{k^+_{\text{norm}}} = \frac{U_i - \frac{3 \cdot U_{i-1}}{4}}{\frac{U_{i-1}}{4}} = \frac{4 \cdot U_i - 3 \cdot U_{i-1}}{U_{i-1}}.$$

В качестве значений U_i и U_{i-1} берутся средние значения этих элементов по центральному скану. Таким образом, процедура коррекции изображения выглядит следующим образом:

$$U^{\text{corr II}} = \frac{\sum g}{\sum(g^+) + g^- \cdot \frac{4 \cdot U_i - 3 \cdot U_{i-1}}{U_{i-1}}} \cdot U^{\text{def}}.$$

На рис. 6 показан результат работы алгоритма.

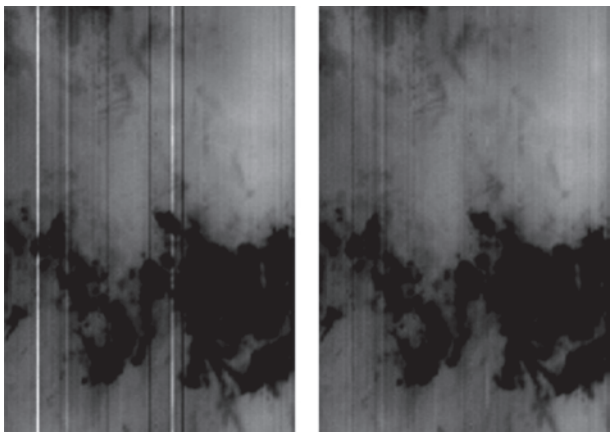

Рис. 6. Результат работы алгоритма коррекции

Большинство полос скорректировано. Полосы, оставшиеся после коррекции, изначально порождены дефектами конкретного МФПУ и не могут быть устранены вышеописанным методом. Слева приведено изображение до, справа — после коррекции.

Алгоритм коррекции неравномерности съемки бортового имитатора абсолютно черного тела

В аппаратуре МСУ-ГС №2 для получения одного из опорных уровней для нормализации сигнала используется термостабилизированный бортовой имитатор абсолютно черного тела (ИАЧТ). В процессе калибровки он вводится внутрь оптической системы. Размеры ИАЧТ таковы, что он с запасом перекрывает сечение светового пучка из приемного объектива, однако вследствие этого имеет место частичное виньетирование световых пучков из периферийных зон ИАЧТ, что приводит к изменению освещенности элементов МФПУ вдоль строки. При бортовой обработке этот эффект не учитывается, что приводит к неоднородности сигнала в строке изображения при съемке однородных по температуре сцен (рис. 7).

Коэффициенты коррекции были получены в процессе наземной калибровки МСУ-ГС №2 следующим образом.

Из файла записи протяженного однородного источника излучения с температурой 340 К в каждом канале был получен усредненный профиль яркости строки P_i ($i = \overline{1,183}$ — номер элемента в строке изображения), а также среднее значение сигнала M в области, использованной для построения градуировочных характеристик каналов (зависимостей выходного сигнала от радиационной температуры эталонного источника излучения). На рис. 8 показаны эти значения.

Коэффициенты коррекции r_i равны

$$r_i = \frac{M - C}{P_i - C},$$

где C — константа нормализации, соответствующая минимальной яркости. Значение скорректированного сигнала вычисляется следующим образом:

$$U_{i,t}^{\text{corr III}} = (U_{i,t} - C) \cdot r_i + C,$$

где $U_{i,t}$ — значение исходного сигнала, $U_{i,t}^{\text{corr III}}$ — значение скорректированного сигнала, t — номер строки. Результатом коррекции должно быть достижение равномерности сигнала при съемке однородных областей.

На рис. 9 показан результат обработки изображения, полученного МСУ-ГС №2 в одном из первых сеансов. На исходном изображении типичная величина неоднородности составляет 5–10 уровней (что соответствует разности температур порядка 0,6–1,2 К на уровне 300 К). На скорректированном изображении неоднородность не превышает 1 уровня.

Алгоритм компенсации изменения температуры корпуса прибора

В процессе настройки и калибровки аппаратуры МСУ-ГС №2 были проведены исследования зависимости выходного сигнала от температуры корпуса прибора [4]. Обработка результатов

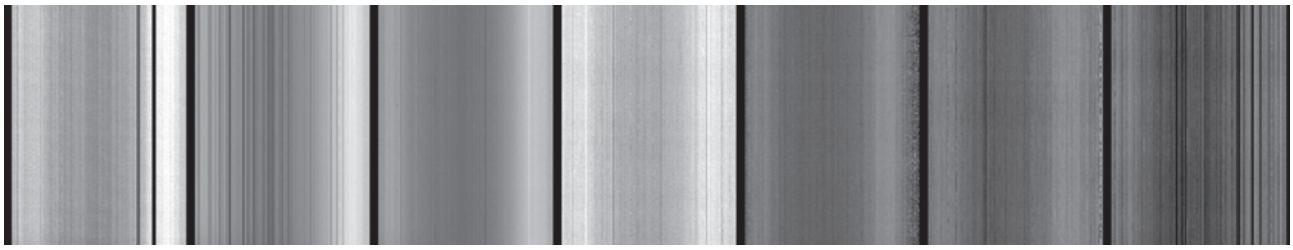

Рис. 7. Фрагмент изображения в каналах IV–X (слева направо). Неоднородность сигнала по строке обусловлена особенностями съемки бортового ИАЧТ

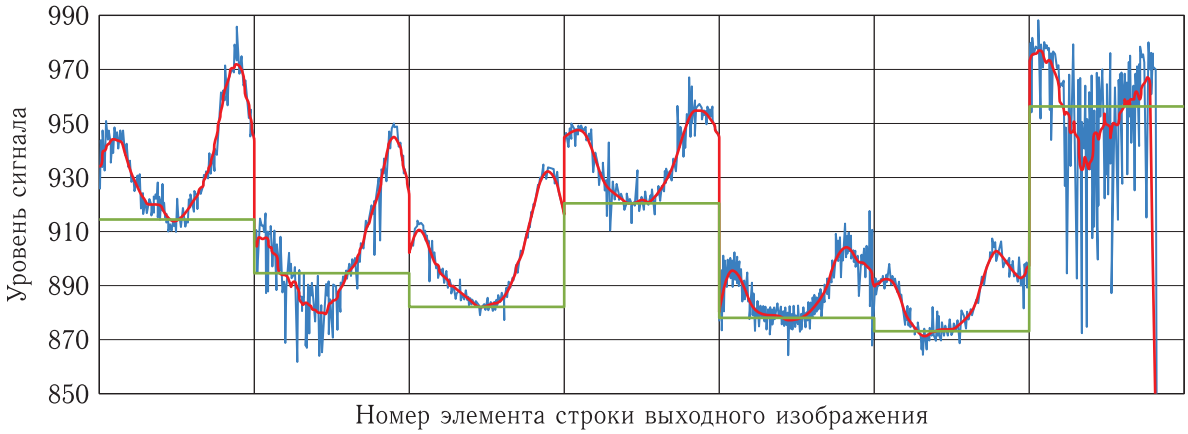

Рис. 8. Профиль сигнала от однородной сцены каналах IV–X (слева направо). Синим цветом показан сигнал в строке, красным — усредненный сигнал P_i, зеленым — опорное значение M

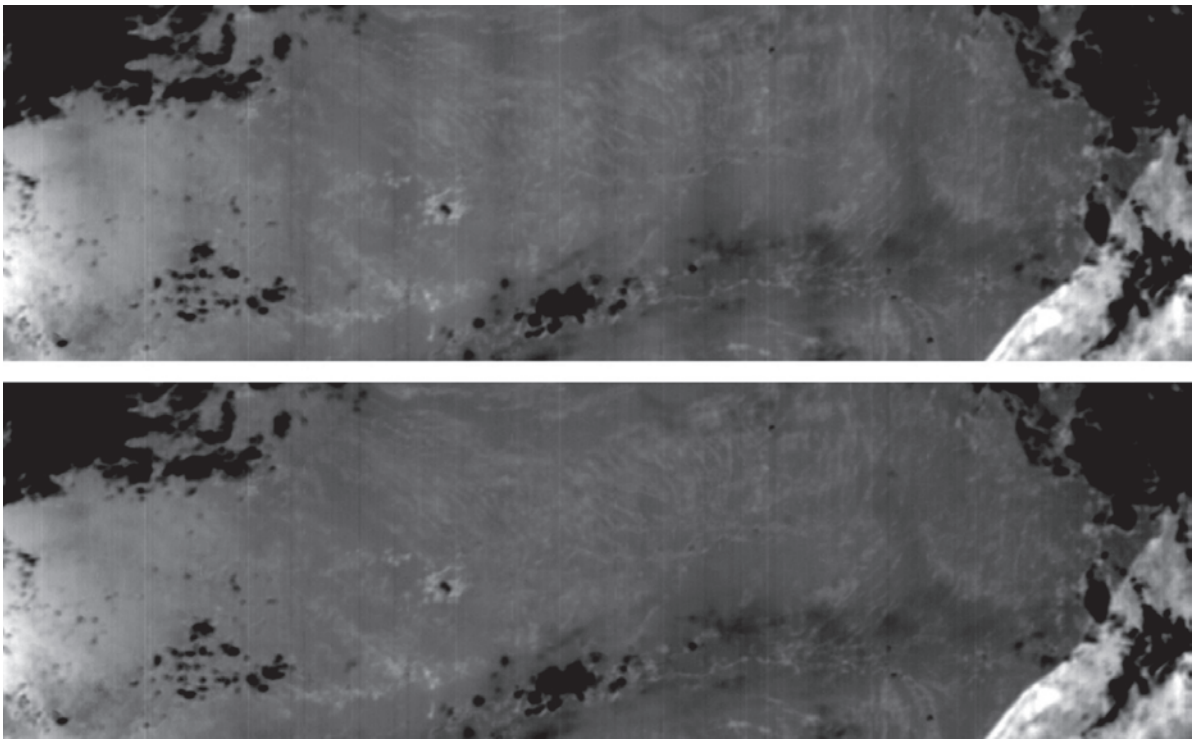

Рис. 9. Изображение до коррекции (вверху) и после коррекции (внизу)

калибровки показала заметное расхождение градуировочных характеристик каналов, полученных при различных значениях температуры. В наибольшей степени расхождение проявляется в IV канале (спектральный диапазон 3,5–4,0 мкм), как это показано на рис. 10.

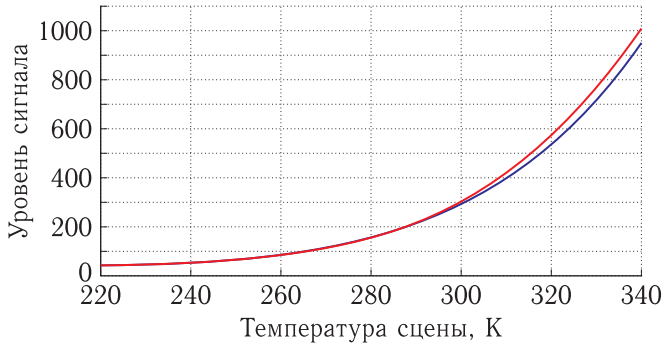

Рис. 10. Градуировочные характеристики, полученные для IV канала в двух сериях измерений при разных температурах корпуса прибора

Было выдвинуто предположение, что причина этих расхождений — изменение разности опорных сигналов от внутриприборного ИАЧТ с температурой 320 К (сигнал u_{hot}) и внешнего низкотемпературного источника излучения — имитатора космоса с температурой 90 К (сигнал u_{cold}). Сигналы u_{hot} и u_{cold} используются при бортовой обработке информационного сигнала по алгоритму двухточечной коррекции:

$$U^{l,i} = \frac{u^{l,j} - u^{l,j}_{\text{cold}}}{u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}} \cdot A + C,$$

где l — номер строки МФПУ, j — номер элемента строки МФПУ, A — масштабный коэффициент, C — константа нормализации, соответствующая нулевому сигналу.

При изменении температуры конструктивных и оптических элементов в передней части оптического тракта (приемного объектива) имеет место изменение фоновой составляющей как информационного сигнала $u^{l,j}$, так и опорного сигнала $u^{l,j}_{\text{cold}}$, что очевидным образом компенсируется при двухточечной коррекции (в числителе выражения).

В то же время в знаменателе выражения приращение фоновой составляющей остается нескомпенсированным, так как ИАЧТ, являющийся источником опорного сигнала $U_{\text{гор}\ i}$, расположен за приемным объективом и вводится в оптический тракт во время выполнения бортовой калибровки в начале кадра. Дифференцированием выражения для U^{lj}_{norm} приращение скорректированного сигнала находится как

$$\delta U^{l,i} = -(U^{l,i} - C) \cdot \frac{\delta\left(u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}\right)}{u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}}.$$

Можно показать, что относительное приращение разности опорных сигналов $\frac{\delta(u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}})}{u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}}$ не зависит от значения чувствительности конкретного элемента фотоприемника. Тогда поправка к скорректированному сигналу, учитывающая изменение внутриприборного фона, определяется через среднее по ансамблю чувствительных элементов относительное приращение разности $\frac{\delta(U_{\text{гор}} - U_{\text{хол}})}{U_{\text{гор}} - U_{\text{хол}}}$, которое в свою очередь является функцией внутриприборной температуры, как

$$\overline{\varepsilon} = \frac{\delta\left(u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}\right)}{u^{l,j}_{\text{hot}} - u^{l,j}_{\text{cold}}} = \frac{\delta\left(u_{\text{hot}} - u_{\text{cold}}\right)}{u_{\text{hot}} - u_{\text{cold}}} = f(T).$$

Допустив в первом приближении, что зависимость $f(T)$ имеет линейный вид, получаем:

$$\delta U^{l,i} = -(U^{l,i} - C) \cdot \overline{\varepsilon} = -(U^{l,i} - C) \cdot \alpha \cdot (T - T_0),$$

где T — среднее значение температуры аппаратуры на борту КА при штатном режиме функционирования, $T_0 = 15$ °C — расчетное значение T. Таким образом, исправленный сигнал $U^{\text{corr IV}}$ определяется из выражения

$$U^{\text{corr IV}} = U - \delta U = U + (U - C) \cdot \alpha \cdot (T - T_0).$$

Значения опорных сигналов $u^{l,j}_{\text{hot}}$, $u^{l,j}_{\text{cold}}$ для каждого из каналов IV–X и показания температурных датчиков содержатся в составе служебной информации каждого кадра МСУ-ГС № 2. Найденные по этим данным значения $\overline{\varepsilon}$ в зависимости от внутриприборной температуры и аппроксимирующие регрессии для прибора показаны на рис. 11. Видно, что сделанное выше предположение о линейности зависимости $f(T)$ справедливо.

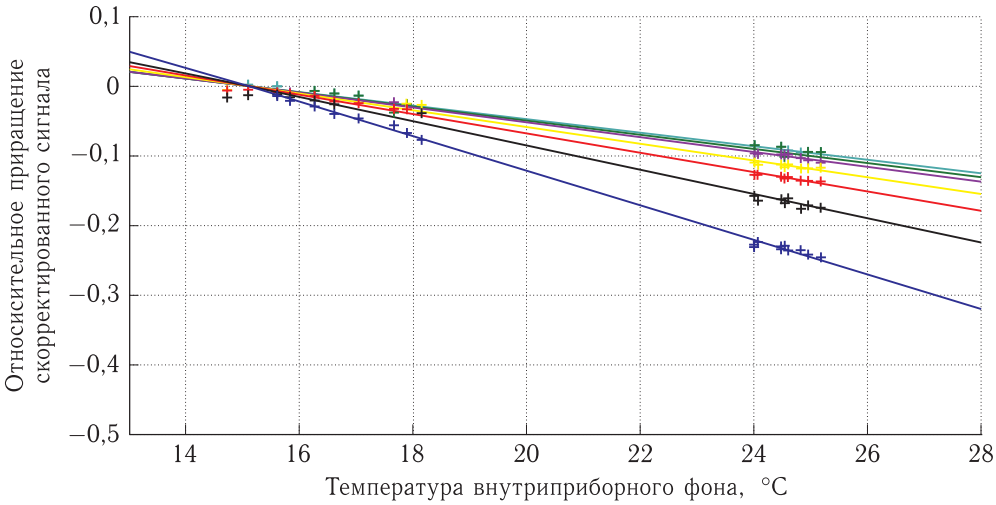

Рис. 11. Вид зависимостей $\overline{\varepsilon} = f(T)$

Целесообразность практического использования полученных зависимостей $\overline{\varepsilon} = f(T)$ для нахождения поправок к выходному сигналу была проверена путем коррекции данных, полученных в двух сериях радиометрической калибровки. В настоящий момент алгоритм находится в стадии отработки, поскольку реальная картина распределения и изменения температуры МСУ-ГС № 2 на орбите существенно сложнее, чем в лабораторных условиях.

Заключение

Описанные в этой статье алгоритмы были апробированы в процессе наземных и летно-космических испытаний, показали свою эффективность и в настоящий момент включены в штатную программу обработки видеоинформации с МСУ-ГС № 2. Их применение способствует достижению аппаратурой МСУ-ГС № 2 высоких радиометрических характеристик, соответствующих современным мировым стандартам.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу разработчиков программного обеспечения под руководством профессора А. Е. Кузнецова (НИИ «Фотон») за корректную и своевременную реализацию разработанных алгоритмов и внедрение их в комплекс обработки данных с МСУ-ГС № 2.

Список литературы

1. *Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Загребаев В. А. и др.* Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2012, № 1. С. 3–14.

2. *Андреев Р. В., Акимов Н. П., Бадаев К. В. и др.* Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 3. С. 33–44.

3. *Андреев Р. В., Гектин Ю. М., Зайцев А. А. и др.* Практическая реализация методов радиометрической коррекции ИК-изображений, получаемых с использованием многоэлементных фотоприемников // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2015, т. 2, вып. 4. С. 9–13.

4. *Гектин Ю. М., Зорин С. М., Новикова Н. В. и др.* Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки сканирующих систем ДЗЗ в видимой и инфракрасной областях спектра // Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности. Тез. докл. науч.-техн. конф. (о. Городомля, 07–10 сентября 2015 г.). С. 22–25.