

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,  
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.  
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСЕНИЯ**

УДК 528.851

**Практическая реализация методов  
радиометрической коррекции ИК-изображений,  
получаемых с использованием  
многоэлементных фотоприемников**

**Р. В. Андреев, Ю. М. Гектин<sup>1</sup>, А. А. Зайцев, М. Б. Смелянский**

<sup>1</sup>*к. т. н.*

*АО «Российские космические системы»*

*e-mail: andreev-k@list.ru, petrov\_sv@spacecorp.ru*

**Аннотация.** В работе описан метод радиометрической коррекции изображений, получаемых при помощи многоэлементных фотоприемников. Метод основан на использовании сигналов от элементов фотоприемника, находящихся вне поля зрения объектива. В работе рассмотрены способы практической реализации предложенного метода.

**Ключевые слова:** многоэлементный фотоприемник, аддитивная помеха, цифровое изображение, радиометрическая коррекция, «слепые» элементы

**Practical Implementation of Methods  
of Radiometric Correction of IR Images  
Produced Using Multi-Element Photodetector**

**R. V. Andreev, Yu. M. Gektin<sup>1</sup>, A. A. Zaytsev, M. B. Smeliansky**

<sup>1</sup>*candidate of engineering science*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems"*

*e-mail: andreev-k@list.ru, petrov\_sv@spacecorp.ru*

**Abstract.** The method of radiometric correction of images produced using multi-element photodetector is described in the paper. The method is based on the usage of signals from the elements located outside the field of view of the lens. The ways of practical implementation of the proposed method are considered.

**Key words:** multi-element photodetector, additive interference, digital image, radiometric correction, blind elements

## Введение

Видеоинформация, получаемая при помощи аппаратуры ДЗЗ, достаточно часто содержит шумы и помехи различной природы. Высокие требования, предъявляемые к качеству этой видеоинформации, требуют разработки специальных методов коррекции негативных процессов. Стандартные методы фильтрации помех и шумов не всегда обеспечивают требуемые результаты. Поэтому при наземной обработке информации необходимо учитывать специфику конкретной аппаратуры.

В последнее время в аппаратуре ДЗЗ все чаще используются многоэлементные фотоприемные устройства. Для таких фотоприемников характерны протяженные импульсные помехи [2]. Пример таких помех приведен на рис. 1. Применение специальных методов их устранения может оказать значительно эффективнее стандартной фильтрации.

В настоящее время на стадии комплексных предполетных испытаний находится аппаратура МСУ-ГС второго поколения [3], предназначенная для оперативного получения изображения облачности и подстилающей поверхности Земли. Для формирования изображений в ИК-каналах аппаратуры используются многоэлементные фотоприемные устройства. Ввиду особенностей алгоритма формирования выходного сигнала необходимо создание специальных методов радиометрической коррекции изображений, получаемых при помощи аппаратуры МСУ-ГС.

## Формирование выходного сигнала в тепловых каналах аппаратуры МСУ-ГС № 2

В процессе работы аппаратуры формируются изображения в 3 видимых и 7 инфракрасных каналах. В ИК-каналах для формирования изображения используются многоэлементные фотоприемники форматом  $144 \times 8$  элементов (8 линейных фотоприемных устройств, далее — ЛФПУ, по 144 элемента в каждом).

В целях сокращения объема передаваемой информации отсчеты от разных ЛФПУ одного фото-

приемника объединяются между собой блоком обработки сигналов [1]. Протяженные импульсные помехи от разных ЛФПУ накладываются друг на друга (рис. 2), что значительно усложняет их фильтрацию. Кроме того, в тепловых каналах данной аппаратуры имеет место дрейф темновой составляющей сигнала фотоприемников. Величина этого дрейфа имеет сложную зависимость от многих факторов (температуры фотоприемника, времени с момента начала сеанса, времени с момента начала кадра и других, еще недостаточно исследованных), что значительно усложняет его коррекцию.

## Использование элементов фотоприемника, находящихся вне поля зрения объектива, для коррекции выходного сигнала

Особенностью оптической схемы ИК-каналов аппаратуры МСУ-ГС № 2 является уменьшенное (несколько меньше размеров фотоприемника) световое поле, формируемое объективом в фокальной плоскости. Таким образом, на фотоприемнике присутствуют элементы, на которые не попадает излучение от объекта съемки (далее — «слепые» элементы). Сигнал от таких элементов можно использовать в качестве опорного и с его помощью корректировать изображение.

Обозначим сигнал от элемента фотоприемника как  $U_{m,L}$ , где  $L$  — номер ЛФПУ,  $m$  — номер элемента. Тогда  $U_{m,L} = U'_{m,L} + \delta_{m,L}$ , где  $U'_{m,L}$  — сигнал от объекта съемки, а  $\delta_{m,L}$  — помеха.

Каждый отсчет проходит процедуру двухточечной коррекции:

$$U_{m,L}^{\text{норм}} = \frac{U_{m,L} - U_{m,L}^{\text{хол}}}{U_{m,L}^{\text{гор}} - U_{m,L}^{\text{хол}}} \times A + C = (U_{m,L} - U_{m,L}^{\text{хол}}) \times K_{m,L} + C,$$

где  $U_{m,L}^{\text{норм}}$  — нормализованный сигнал,  $U_{m,L}^{\text{хол}}$  — сигнал от холодного источника излучения (космос),  $U_{m,L}^{\text{гор}}$  — сигнал от горячего источника излучения (термостатированная заслонка),  $A$  — масштабный коэффициент,  $C$  — уровень «холодного» в нормализованном выходном сигнале,  $K_{m,L}$  — коэффициент

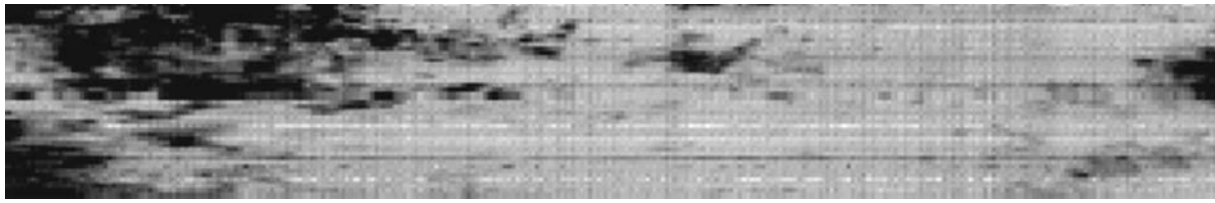


Рис. 1. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС № 1. На фрагменте присутствуют вертикальные полосы, представляющие собой протяженные импульсные помехи



Рис. 2. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС № 2. Снимок получен во время съемки «фона» при наземных испытаниях. Протяженные импульсные помехи от различных ЛФПУ одного фотоприемника накладываются друг на друга при формировании выходного сигнала

нормализации. Таким образом,

$$\begin{aligned} U_{m,L}^{\text{норм}} &= (U_{m,L} + \delta_{m,L} - U_{m,L}^{\text{хол}}) \times K_{m,L} + C = \\ &= U_{m,L}'^{\text{норм}} + \delta_{m,L} \times K_{m,L}. \end{aligned}$$

Затем нормализованные отсчеты от 8 ЛФПУ объединяются между собой в блоке обработки сигналов. Обозначим процедуру объединения отсчетов оператором  $\hat{F}$ . На выходе данной процедуры информация будет представлена в виде отсчетов от одного виртуального ЛФПУ:

$$U_i^{\text{вых}} = \hat{F}(U_{m,L}^{\text{норм}}).$$

Процедура объединения отсчетов представляет собой суммирование нормализованных отсчетов, умноженных на заранее известные коэффициенты интерполяции. Следовательно, оператор  $\hat{F}$  аддитивен и выходной сигнал можно представить в виде

$$\begin{aligned} U_i^{\text{вых}} &= \hat{F}(U_{m,L}'^{\text{норм}} + \delta_{m,L} \times K_{m,L}) = \\ &= \hat{F}(U_{m,L}'^{\text{норм}}) + \hat{F}(\delta_{m,L} \times K_{m,L}). \end{aligned}$$

В случае импульсной помехи или дрейфа сигнала величина помехи  $\delta$  зависит только от номера ЛФПУ и не зависит от номера элемента ( $\delta_{m,L} = \delta_L$ ). Поскольку на «слепые» элементы излучение от поверхности не попадает, изменение значения сигнала от этих элементов может быть вызвано только помехами или дрейфом. Обозначим изменение сигнала для «слепых» элементов по сравнению с его значением в начале кадра как  $\delta_L^{\text{blind}}$ . Если считать, что величина  $\delta_{m,L}$  включает в себя только дрейф и импульсные помехи, то  $\delta_{m,L} = \delta_L^{\text{blind}}$  и процедура коррекции выходного сигнала выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} U_i^{\text{кор}} &= U_i^{\text{вых}} - \hat{F}(\delta_L^{\text{blind}} \times K_{m,L}) = \hat{F}(U_{m,L}'^{\text{норм}}) + \\ &+ \hat{F}(\delta_{m,L} \times K_{m,L}) - \hat{F}(\delta_L^{\text{blind}} \times K_{m,L}) = \hat{F}(U_{m,L}'^{\text{норм}}) + \\ &+ \hat{F}((\delta_{m,L} - \delta_L^{\text{blind}}) \times K_{m,L}) = \hat{F}(U_{m,L}'^{\text{норм}}), \end{aligned}$$

где  $U_i^{\text{кор}}$  — значение скорректированного сигнала. Скорректированный сигнал не содержит в себе компонент, вызванных дрейфом или импульсными помехами.

## Практическая реализация метода коррекции изображения

На практике такую радиометрическую коррекцию можно реализовать двумя способами: проводить ее на борту или при наземной обработке сигнала. Бортовая коррекция математически значительно проще наземной, так как выходной сигнал в этом случае корректируется уже на этапе нормализации. Однако это требует значительного усложнения алгоритма работы блока обработки сигнала. Поэтому для аппаратуры МСУ-ГС № 2 был выбран второй способ, т.е. радиометрическая коррекция при наземной обработке.

Для проведения процедуры наземной радиометрической коррекции предложенным в предыдущем разделе способом необходимо передавать величины поправок  $\delta_L^{\text{blind}}$ . Так как эти величины зависят только от номера ЛФПУ и от времени, то для каждой строки выходного сигнала необходимо передать 8 значений соответствующих поправок. Поскольку выходной сигнал имеет разрядность 10 бит, а величина дрейфа и помехи может быть как положительной, так и отрицательной, то величины поправок вычисляются следующим образом:

$$\delta_{L,t}^{\text{blind}} = \sum_{\text{blind}} (U_{m,L}^{\text{хол}} - U_{m,L,t} + 512) / N_{\text{blind}},$$

где  $\sum_{\text{blind}}$  есть сумма по всем номерам  $m$  элементов ЛФПУ, которые считаются «слепым»,  $N_{\text{blind}}$  — количество «слепых» элементов в выбранном ЛФПУ, а  $t$  — номер строки выходного сигнала (всего 3400 строк в одном скане).

Всего получается 8 значений поправок  $\delta_L^{\text{blind}}$  для каждой строки видеoinформации. В аппаратуре МСУ-ГС № 2 эти поправки записываются в первые и последние 4 отсчета строки для каждого ИК-канала.

Процедура наземной обработки для выделенного пикселя видеoinформации выглядит следующим образом:

$$U_i^{\text{кор}} = U_i + \sum_{L=1}^8 \hat{F}((\delta_L^{\text{blind}} - 512) \times K_{m,L}),$$

где  $K_{m,L}$  — коэффициент нормализации, рассчитываемый из передаваемых в телеметрии значений от горячего и холодного источников излучения.

## Результаты применения алгоритма коррекции изображения

Следует отметить, что оценить результаты применения описанного выше алгоритма коррекции в полной мере можно только на стадии летно-конструкторских испытаний (т.е. уже после запуска аппарата на геостационарную орбиту). Отчасти поэтому был выбран способ его реализации через наземную, а не через бортовую коррекцию, так как при коррекции на борту видоизменить или отменить применение алгоритма было бы уже невозможно.

Применение алгоритма коррекции при наземных испытаниях показало приемлемые результаты как по фильтрации аддитивных помех, так и при компенсации дрейфа. На рис. 3 приведен фрагмент изображения, полученного при съемке «фона» одним из тепловых каналов аппаратуры МСУ-ГС № 2 при наземных испытаниях.

Как видно, на изображении присутствует мощная регулярная помеха. На рис. 4 приведен тот же фрагмент после радиометрической коррекции, использующей сигнал от «слепых» элементов.

В таблице приведены средние значения СКО по различным участкам обоих изображений. Фрагменты 10x70 пикселей выбирались на темных и светлых участках нескорректированного изображения. На скорректированном изображении выбирались те же фрагменты. Сравнение результатов показывает, что полосы, вызванные протяженными импульсными помехами, практически полностью отсутствуют. Уровень шума по небольшому однородному фрагменту при этом не изменяется.

Уровень фонового сигнала при данной съемке равнялся 25. Заниженное среднее значение на нескорректированном изображении вызвано дрейфом темновой составляющей сигнала. Из результатов видно, что предложенный алгоритм коррекции позволяет скомпенсировать дрейф с точностью до 1 уровня квантования сигнала.

## Заключение

Предложенный алгоритм радиометрической коррекции изображений уже включен в программный комплекс наземной обработки видеoinформации аппаратуры МСУ-ГС № 2. Запуск аппарата



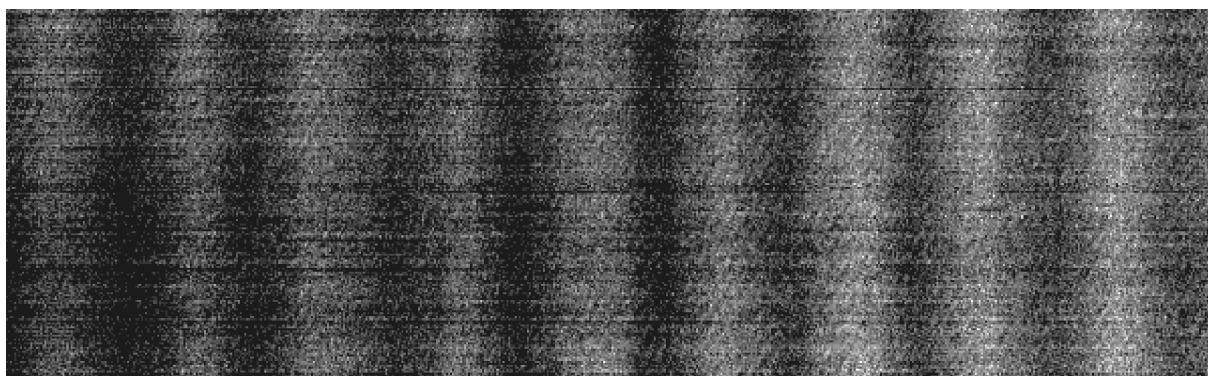


Рис. 3. Фрагмент одного из сканов ИК-канала аппаратуры МСУ-ГС №2. Снимок получен во время съемки фона при наземных испытаниях

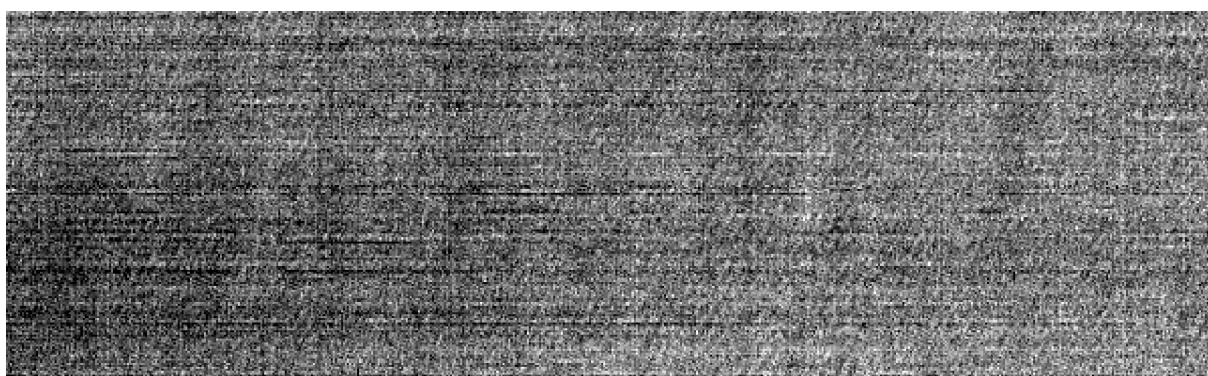


Рис. 4. Тот же фрагмент после радиометрической коррекции

Т а б л и ц а. Сравнение изображений до и после коррекции

	Изображение до коррекции		Изображение после коррекции	
	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
Фрагмент $10 \times 70$ пикселей, выбранный на темной полосе	25,03	1,66	24,75	1,69
Фрагмент $10 \times 70$ пикселей, выбранный на яркой полосе	22,08	1,61	24,88	1,67
По всему изображению	22,23	2,28	24,27	1,87

был запланирован на август 2015 г. Во время летно-конструкторских испытаний была проведена более детальная оценка результатов применения алгоритма. В случае хороших результатов возможно применение алгоритма для бортовой коррекции видео-изображения в следующих поколениях аппаратуры.

## Список литературы

1. Андреев Р.В. Разработка программного комплекса тестирования блока обработки сигналов геостационарной сканирующей аппаратуры тепловой области спектра. Дисс. ... магистра прикладных математики и физики. М., 2014. 53 с.
2. Бабышкин В.Е, Ерошкин В.Н., Яницкий А.А. Геостационарный гидрометеорологический комплекс второго поколения «Электро» // Космонавтика и ракетостроение, 2010, № 2(59), с. 46–53.
3. Гектин Ю.М., Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Зенин В.А., Москатынцев И.В. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли // Цифровая обработка сигналов, 2011, № 3, с. 28–31.