

УДК 004.932

## КОРРЕКЦИЯ СМАЗА И РАСФОКУСИРОВКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

*Егошкин Н.А., к.т.н., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru.*

### SATELLITE IMAGES BLURRING AND DEFOCUS CORRECTION IN THE CASE OF GEOMETRIC DISTORTION

*Egoshkin N.A.*

*The problem of speed blurring correction and defocus of satellite images from modern scanning sensors is considered. It is shown that it's need to consider the geometric distortion of images. Speed blurring correction is based on the analytical description of the signal acquisition process. Defocus correction is based on point spread function evaluation using point objects and multi-channel images of the same area. Methods of wavelet transform are used to improve the correction quality and simplify configuration of the algorithms.*

**Key words:** image improvement, defocus correction, blurring correction, remote sensing, point spread function, deconvolution.

**Ключевые слова:** улучшение изображений, коррекция расфокусировки, коррекция смаза, дистанционное зондирование земли, функция рассеяния точки, обратная свёртка.

#### Введение

Современные космические систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используют достаточно сложные механизмы формирования изображений [1]. Излучение от подстилающей поверхности проходит через оптическую систему и регистрируется линейками приборов с зарядовой связью (ПЗС) или матрицами, работающими в режиме временной задержки и накопления сигнала (ВЗН). Развертка изображений осуществляется за счет полета спутника (для высокодетального ДЗЗ), либо с использованием сканирующего зеркала (для систем глобального ДЗЗ). Изображения формируются в виде отдельных частей, так называемых сканов.

Для организации накопления сигнала скорость опроса ВЗН-матрицы должна быть строго согласована со скоростью и направлением бега изображения в фокальной плоскости, в противном случае возникает скоростной смаз, снижающий пространственное разрешение съемки. Для минимизации скоростного смаза при съемке осуществляется маневрирование углами ориентации спутника, частоты опроса для ПЗС-матриц задаются в зависимости от их расположения в фокальной плоскости. Однако полностью избежать скоростного смаза очень трудно, а зачастую принципиально не возможно в пределах всего поля зрения датчика.

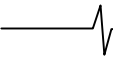
В процессе вывода спутника на орбиту неизбежные деформации фокальной плоскости и оптической системы. Иногда предусматривается возможность настройки объектива на орбите, однако возможности такой настройки не беспредельны. В результате изображения оказываются в различной степени расфокусированными, причем степень расфокусировки может зависеть от

*Рассматривается проблема коррекции скоростного смаза и расфокусировки спутниковых изображений от современных сканирующих датчиков. Показано, что необходимо учитывать геометрические искажения снимков. Устранение скоростного смаза основано на аналитическом описании процесса накопления сигнала. Коррекция расфокусировки основана на оценивании функция рассеяния точки по точечным объектам и по многоканальным изображениям одной и той же местности. Для повышения качества коррекции и упрощения настройки алгоритмов используется методы вейвлет-преобразования.*

спектрального канала или оптического модуля. Таким образом, весьма актуальна задача коррекции скоростного смаза и расфокусировки изображений ДЗЗ.

Явления смаза и расфокусировки традиционно описываются сверткой [2] изображений с некоторой функцией рассеяния точки (ФРТ). Соответственно, задача коррекции является известной задачей обратной свертки. Однако для систем ДЗЗ применение известных подходов часто оказывается затруднительным. Во-первых, характер смаза и расфокусировки существенно зависят от режима и геометрии съемки: при ДЗЗ форма ФРТ может изменяться от изображения к изображению и в поля снимка. Подавляющее большинство методов оценивания ФРТ и обратной свертки требуют постоянства ФРТ. Во-вторых, из-за больших и сверхбольших объемов информации ДЗЗ на практике возможно применение только высокоэффективных методов обратной свертки, «быстрых» преобразований. В третьих, скановая структура изображений осложняет обработку из-за многочисленных краевых эффектов, возникающих на границах сканов.

Что касается коррекции смаза и расфокусировки применительно к системам ДЗЗ, то обычно в литературе рассматриваются случаи незначительной расфокусировки [3-5], этом задача коррекции решается достаточно просто. В практике отечественного ДЗЗ, особенно для новых экспериментальных видеодатчиков, приходится



иметь дело с гораздо более сильными искажениями, при этом задача обратной свертки становится не корректно поставленной. В статье рассматривается подход к коррекции смаза и сильной расфокусировки в системах ДЗЗ с учетом скановой структуры современной съёмочной аппаратуры инвариантно к принципу развертки изображений, как для высокодетальных, так и для глобальных систем наблюдения.

### Модель формирования изображений

Рассмотрим формирование изображения одного скана. Изображение подстилающей поверхности  $S$  подается на вход оптической системы при помощи некоторого механизма развертки (например, сканирующего зеркала). Оптическая система формирует изображение и проецирует его на ВЗН матрицу. В плоскости ВЗН – матрицы введем систему координат  $xu$  так, что ось  $x$  расположена вдоль строки, а ось  $y$  перпендикулярна  $x$  и направлена вдоль переноса заряда в ВЗН, рис. 1.

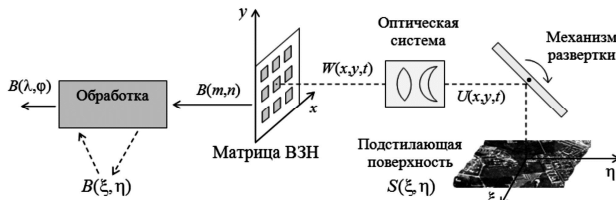


Рис. 1. Обобщенная схема формирования и обработки изображений ДЗЗ

Обозначим  $U(x, y, t)$  – изображение на входе оптической системы в виде функции яркости  $U$  координат  $x, y$  и времени  $t$ . Для низкоорбитальных систем развертка осуществляется за счет полета спутника, при этом изображение на входе оптической системы с некоторой скоростью движется поступательно. Для систем глобального наблюдения сканирование осуществляется вращением зеркала и закон сканирования более сложен [6]. Однако если зеркало плоское, то отражение от него – изометрия, поэтому развертка зеркалом равносильна изменению углов ориентации спутника. Поэтому можно выбрать некоторую криволинейную системы координат  $(\xi, \eta)$  на подстилающей поверхности и записать для обоих типов съёмочных систем:

$$U(x, y, t) = S(\xi, \eta), \quad \xi = x + V_x t, \quad \eta = y + V_y t, \quad (1)$$

где  $V_x, V_y$  – компоненты вектора скорости бега изображения в системе координат  $xu$ .

Оптическая система проецирует на матрицу изображение  $W(x, y, t) = U(x, y, t) \otimes F(x, y)$ , где  $F(x, y)$  – не зависящая от времени ФРТ точки оптической системы.

В процессе опроса матрицы ВЗН формируется изображение  $B(m, n)$ , где  $m, n$  – номера строк и столбцов. Процесс ВЗН можно математически описать в виде

$$B(m, n) = \sum_{v=0}^{N-1} W(\Delta_x n, -\Delta_y v, (m-v)/f), \quad \text{где } \Delta_x, \Delta_y -$$

расстояния между фотоприёмными элементами матрицы в соответствующих направлениях;  $f$  – частота опроса строк матрицы,  $N$  – число строк накопления.

Также обычно в ходе последующей обработки материалов ДЗЗ осуществляют геометрическую трансформацию исходного изображения  $B(m, n)$  в некоторую картографическую систему координат  $\lambda, \varphi$ .

Для фиксированного момента времени  $t$  операции развертки и расфокусировки перестановочны. Поэтому с учетом (1) можно записать:

$$B'(\xi, \eta) = G(\xi, \eta) \otimes F(\xi, \eta) \otimes S(\xi, \eta), \quad (2)$$

$$G(\xi, \eta) = \sum_{v=0}^{N-1} \delta(\xi - vV_x / f) \delta(\eta - v(\Delta_y + V_y / f)), \quad (3)$$

$$B(m, n) = B'(\xi, \eta), \quad \xi = \Delta_x n + V_x m / f, \quad \eta = V_y m / f, \quad (4)$$

где  $\delta$  – дельта-функция.

Таким образом, выбор системы координат  $\xi\eta$  таким образом, чтобы выполнялось (1), позволяет описать процессы расфокусировки и скоростного смаза в виде свертки  $S(\xi, \eta)$  с функциями  $F$  и  $G$ . Формулы (4) при этом связываются результат такой свертки и изображение на выходе матрицы. Показательно, что вообще говоря, система координат  $\xi\eta$  не совпадает ни с картографической системой координат  $\lambda\varphi$ , ни с системой координат регистрируемого изображения  $mn$ . Поэтому не оптимально решать задачу обратной свертки непосредственно по изображениям  $B(m, n)$  или  $B(\lambda, \varphi)$ . Например, для систем глобального наблюдения и исходные и обработанные изображения существенно искажены по геометрии [6].

Таким образом, для решения задачи коррекции смаза и расфокусировки необходимо, во-первых, оптимальным образом ввести систему координат  $\xi\eta$ . Во-вторых, определить ФРТ  $F(\xi, \eta)$  и  $G(\xi, \eta)$ . В-третьих, сформировать новое исправное изображение в координатах  $mn$  или  $\lambda\varphi$ .

### Технология коррекции расфокусировки и смаза

Первым делом для конкретной съёмочной аппаратуры на основе (1) вводится оптимальная система координат  $\xi\eta$ . Далее определяются параметры  $V_x, V_y, f$  связи  $\xi\eta$  и  $mn$  в формуле (4). Параметры  $V_x, V_y, f$  вообще говоря, зависят от времени, но обычно меняются либо достаточно медленно, либо кусочно-постоянно в пределах скана. На практике  $V_x, V_y, f$  определяют, исходя из геометрии съёмки с использованием служебной информации и параметров внутреннего и внешнего ориентирования съёмочной аппаратуры [1]. Также для современных систем ДЗЗ имеется возможность уточнения этих параметров по многокановому изображению на основе сопоставления изображений отдельных сканов в областях перекрытия [7].

Далее возможны два подхода. Первый заключается в геометрической трансформации изображения  $B(m, n)$  в оптимальную систему координат:  $B(m, n) \rightarrow B(\xi, \eta)$ .

Для  $B(\xi, \eta)$  расфокусировка не зависит от параметров съёмки и задача коррекции решается более эффективно. В процессе последующей обработки формирование

$B(\lambda, \varphi)$  осуществляется уже по скорректированному  $B(\xi, \eta)$ . На этапе формирования  $B(\xi, \eta)$  также удобно решить задачу совмещения сканов, при этом автоматически решается проблема краевых эффектов, возникающих на границах сканов. Такой подход особенно целесообразен для инфракрасных датчиков, в которых имеется большое количество узких сканов и имеется значительный радиометрический шум. В процессе формирования  $B(\xi, \eta)$  шумы могут быть уменьшены [8], что очень важно из-за чувствительности последующих алгоритмов к шумам. Наконец, формирование изображения  $B(\xi, \eta)$  необходимо, чтобы набрать достаточно статистики для оценивания ФРТ какими либо известными «слепыми» методами.

Второй подход не требует формирования раstra  $B(\xi, \eta)$ . Вместо этого  $B(m, n)$  обрабатывается достаточно маленькими фрагментами, причем для каждого фрагмента ФРТ  $F(\xi, \eta), S(\xi, \eta)$  переводятся в координаты  $m, n$  с использованием (4) и задача обратной свертки решается в плоскости  $mn$ . Такой подход может увеличить скорость обработки и уменьшить затраты памяти, однако  $F(\xi, \eta), S(\xi, \eta)$  должны быть уже известными, их достоверное определение по отдельным фрагментам затруднительно.

Рассмотрим теперь коррекцию смаза и расфокусировки изображения  $B(\xi, \eta)$ . В принципе, для решения этой задачи можно использовать различные методы обратной свертки. Большие объемы информации ДЗЗ требуют применения вычислительно эффективных методов, как правило основанных на переходе в спектральную область с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье. В спектральной области (2) принимает вид  $B(\omega, \theta) = G(\omega, \theta) F(\omega, \theta) S(\omega, \theta)$ , где  $\omega, \theta$  – частоты Фурье по осям  $\xi, \eta$ , а  $B, G, F, S$  обозначены спектры Фурье соответствующих функций.

При наличии шумов оптимальное восстановление изображения  $S(\omega, \theta)$ , рассматриваемого как стационарный случайный процесс, обеспечивает фильтр Винера [9]:

$$S^*(\omega, \theta) = \frac{B(\omega, \theta) \overline{G(\omega, \theta)} \overline{F(\omega, \theta)}}{(|G(\omega, \theta) F(\omega, \theta)|^2 + \varepsilon(\omega, \theta))}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon(\omega, \theta)$  – отношение энергий шума к энергии изображения на частотах  $\omega, \theta$ . Известны также различные модификации фильтра Винера [5, 10, 11], лучше согласованные с особенностями человеческого восприятия скорректированных изображений. На практике обычно  $\varepsilon(\omega, \theta)$  не известно и принимают  $\varepsilon(\omega, \theta) = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  подбирается исходя из наилучшего качества восстановленного изображения.

Основной проблемой при фильтрации (5) является рост шумов на изображении. Реальные изображения не являются стационарными случайными процессами, они обычно имеют участки относительно однородной яркости (например, водная поверхность). На таких участках возросший шум становится хорошо заметен. Это затрудняет подбор параметра  $\varepsilon$ , так как его оптимальное

значение зависит от условий съемки (кол-во строк накопления  $N$ ) и особенностей сюжета.

В ряде работ предлагается для решения задачи обратной свертки использовать методы вейвлет – преобразования [12-14]. Они основаны на разложении изображения по базису вейвлетов, например,  $B(\xi, \eta) =$

$$= \sum_k \sum_j a_{k,j} \varphi_{k,j}(\xi, \eta), \text{ где } \varphi_{k,j}(\xi, \eta) \text{ – базисные функ-}$$

ции,  $k \in Z$  – масштаб,  $j \in Z$  – сдвиг,  $a_{k,j}$  – коэффициенты вейвлет-разложения. Для реальных изображений, содержащих объекты с резкими границами и относительно однородные области, базис вейвлетов квази-оптимален в том смысле, что основная энергия изображения  $B(\xi, \eta)$  сосредоточена в малой части коэффициентов  $a_{k,j}$ . Поэтому оптимальная фильтрация белого шума осуществляется обнулением или уменьшением коэффициентов  $a_{k,j}$ , которые  $|a_{k,j}| < \sigma$ , где  $\sigma$  – порог, пропорциональный уровню шума на изображении.

Вейвлеты достаточно хорошо локализованы в частотной области. Поэтому коррекция некоторых классов ФРТ может быть решена на основе модификации коэффициентов  $a_{k,j}$  [12,13]. К сожалению, в общем случае

такой подход не применим. В [14] предложено комбинировать Винеровскую фильтрацию (5) и последующую вейвлет-обработку. Например, будем ограничивать вейвлет-коэффициенты из условия  $|a_{k,j}| < \sigma \lambda_k$ , где  $\lambda_k$  – ко-

эффициенты, учитывающие усиление шума фильтром (4) для масштаба  $k$ . В результате в (5) параметр  $\varepsilon$  можно увеличить по сравнению с только Винеровской фильтрацией, а параметр  $\sigma$  можно выбирать не зависимо от сюжета в соответствии с оценкой шума датчика. Это позволяет настроить однократно оптимальные параметры фильтрации под конкретный датчик, а не подстраивать  $\varepsilon$  под конкретный сюжет.

Рассмотрим теперь задачу оценивания  $G(\omega, \theta)$  и  $F(\omega, \theta)$ . Что касается  $G(\omega, \theta)$ , то она согласно (3) зависит от параметров  $V_x, V_y, f, N$  даже в координатах  $\xi, \eta$ .

Можно показать, что в частотной области для дискретного изображения (3) можно достаточно качественно аппроксимировать как

$$G(\omega, \theta) = \frac{\sin 0,5(\omega b + \xi c)}{0,5(\omega b + \xi c)}, \quad (6)$$

$$b = N V_x / f, \quad c = N (\Delta_y + V_y / f).$$

На рис. 2 показан пример изображения российского КА «Ресурс-ДК», полученное в конце срока эксплуатации при наличии проблем с системой управления ВЗН (длина вектора смаза ~13 пикселей, угол к направлению полета ~62°), а справа – результат коррекции соответствующего скоростного смаза.

Определение ФРТ расфокусировки  $F$  – наиболее трудоемкая операция. В принципе, после формирования изображения  $B(\xi, \eta)$  для него можно применять различные известные методы оценивания ФРТ [3, 11], в том числе «слепые». Однако в практике ДЗЗ наиболее до-

стоверная оценка ФРТ может быть получена в специально калибровочном режиме, например, путем съёмки полигона с отдельным точечным объектом или яркой звезд. В этом случае образ точечного объекта в координатах  $\xi, \eta$  представляет собой искомую ФРТ. Для отделения точечного объекта от других объектов используется параметрическая коррекция:  $\hat{F}(\xi, \eta) = (0,5(B(\xi, \eta) - a + |B(\xi, \eta) - a|))^b$ , где  $a$  – параметр отсечения фона,  $b \geq 1$  – «степенной» параметр. Значения  $a, b$  подбираются с учетом реального качества коррекции изображений с использованием указанной ФРТ.

При отсутствии полигона можно использовать следующий простой подход: на  $B(\xi, \eta)$  визуально ищутся отдельные точечные объекты в виде характерных пятен (форма пятна совпадает с формой ФРТ, а, их расфокусированные образы представляют собой ФРТ. Если на изображении наблюдается группа характерных пятен, то самое яркое можно использовать в качестве оценки

ФРТ. Такой подход особенно эффективен, если ФРТ имеет характерную геометрическую форму. На рис. 3 слева приведено модельное изображение, полученное путем расфокусировки высокодетального изображения Земли с использованием ФРТ характерной формы (такая ФРТ наблюдалась у реальной системы ДЗЗ). Справа – результат геометрической коррекции с использованием оценки ФРТ по точечному объекту.

Также для современных систем ДЗЗ перспективен следующий подход к оцениванию ФРТ. Обычно на борту спутника имеется многочисленная аппаратура, при этом изображение одной и той же подстилающей поверхности может быть получено различными телескопами или в различных спектральных каналах. Если одно из таких изображений, например,  $C(m, n)$  достаточно четкое, то можно оценить  $F$  для  $B$  по паре изображений  $B$  и  $C$ . Для этого  $C(m, n)$  геометрически трансформируется в систему координат  $\xi, \eta$ :  $C(m, n) \rightarrow C(\xi, \eta)$ . В идеале в спектральной области  $F(\omega, \theta) = B(\omega, \theta) / C(\omega, \theta)$ . Более

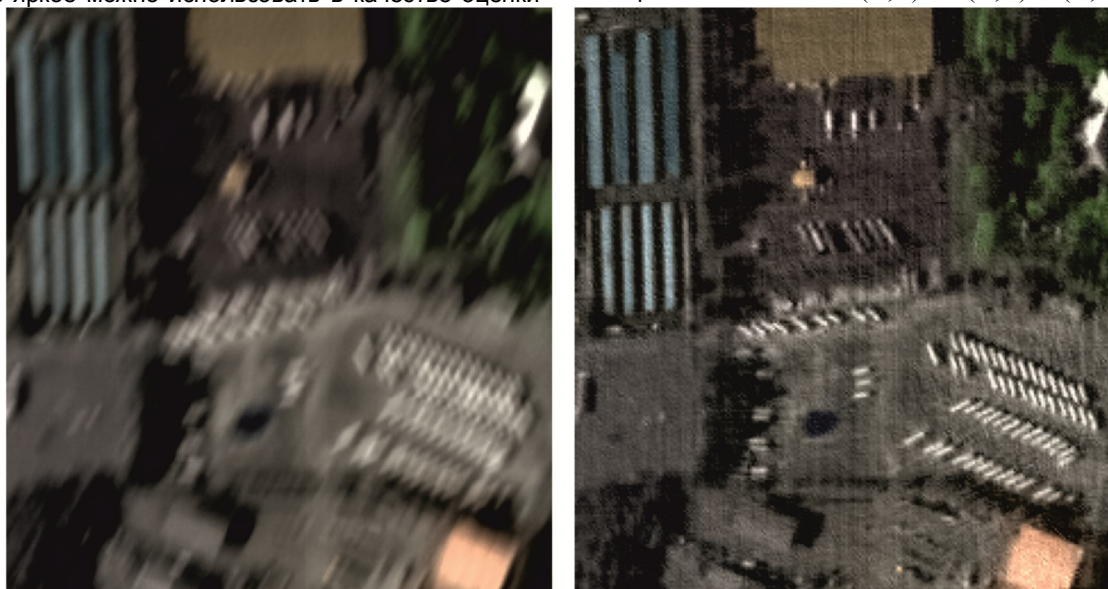


Рис. 2. Скоростной смаз изображения КА «Ресурс-ДК» (слева) и результат его коррекции (справа)

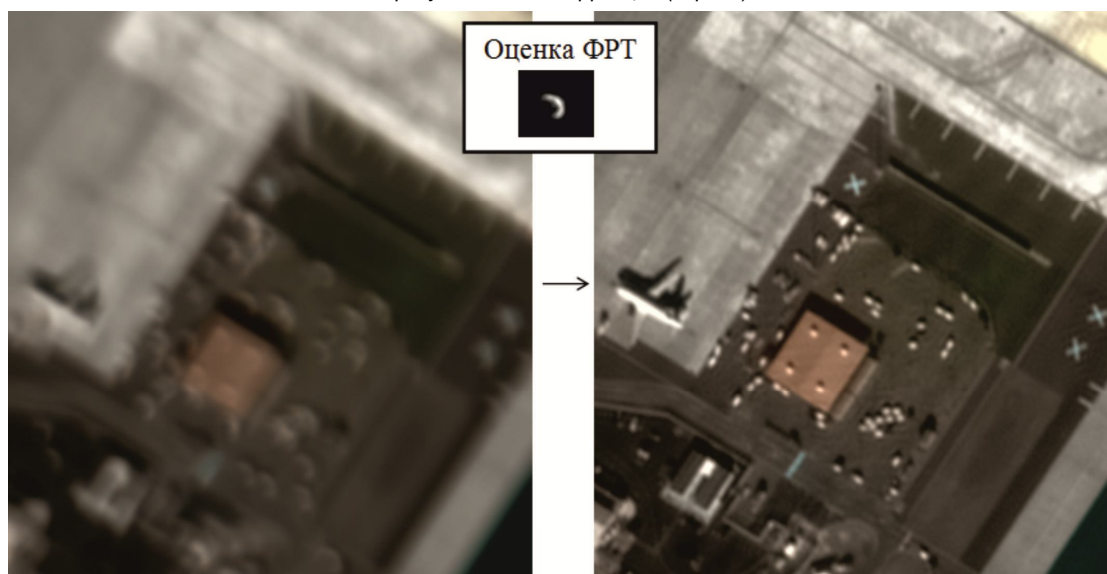


Рис. 3. Фрагмент расфокусированного изображения (слева), оценка ФРТ по точечному объекту и результат коррекции расфокусировки (справа)

строгое действие шумов и свойства подобной оценки изучались [15]. Однако на практике более важно учесть наличие сюжетных различий изображений  $B, C$ . Для их учета выполним оценку по методу наименьших квадратов (МНК) с использованием множества фрагментов изображений  $B$  и  $C$ , при этом

$$\hat{F}(\omega, \theta) = \sum_k w_k B_k(\omega, \theta) \bar{C}_k(\omega, \theta) / \sum_k |C_k(\omega, \theta)|^2, \quad (7)$$

где  $k$  – индекс используемого фрагмента,  $w_k$  – веса. На первой итерации все  $w_k = 1$ . Затем проводится вторая итерация, причем веса  $w_k$  обратно пропорциональны невязкам в МНК. Это позволяет снизить влияние сюжетных различий между изображениями, исключив сильно отличающиеся фрагменты, которые вообще говоря, получены в разных спектральных каналах, в разное время и с разных точек наблюдения.

### Заключение

По результат выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Процесс возникновения скоростного смаза и расфокусировки изображений в современных системах дистанционного зондирования земли целесообразно описывать инвариантно к процессу сканирования, единообразно для высокодетальных и глобальных систем наблюдения земли. За счет специального выбора системы координат изображения удаётся устранить влияние режима съёмки на форму функции рассеяния точки.

2. Показана целесообразность коррекция смаза одновременно с расфокусировкой, при этом смаз аналитически определяется из геометрии съёмки с использованием служебной информации от съёмочной аппаратуры и при необходимости уточняется на основе сопоставления изображений отдельных сканов в областях перекрытия.

3. Для коррекция расфокусировки предложено сперва геометрически трансформировать изображение для исключения влияния режима съёмки на ФРТ. Это позволяет применять известные методы оценивания ФРТ. Наиболее надёжно ФРТ оценивается по полигонам, содержащих изображения практически точечных объектов. Также предложена технология оценивания ФРТ по визуально наблюдаемым точечным объектам и по многоканальным изображениям одной и той же местности.

4. Целесообразно для повышения качества коррекции и уменьшения шумов используются методы вейвлет-преобразования. Показано, что за счет их использования можно упростить подстройку параметров алгоритмов к особенностям определенных сюжетов. Примеры коррекции показывают, что визуальное качество изображений ДЗЗ удаётся значительно повысить, при

сильном смазе и расфокусировке качество съёмки увеличивается в разы.

### Литература

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под. ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015. 460 с
2. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 2007. 558 p.
3. Storey J.C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation // Proceedings of the SPIE, 2001. Vol. 4540. pp. 50-61.
4. Xin M., Shuyan X., Guangxin L. Remote sensing image restoration with modulation transfer function compensation technology in-orbit // Proceedings of SPIE, 2013. Vol. 8768.
5. Eunsong O., Ki-Beom A., Seongick C., Joo-Hyung R. A modulation transfer function compensation for the geostationary ocean color imager based on the wiener filter // Journal of Astronomy and Space Sciences, 2013. Vol. 30, issue 4. pp. 321-326.
6. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных космических систем глобального наблюдения земли // Вестник РГПУ, 2009. №1. С. 12-17.
7. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Самарского ГТУ, 2005. №37. С. 150-157.
8. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э. Комплексирование изображений от линеек фотоприёмников в условиях геометрических искажений // Цифровая обработка сигналов, 2012. №3. – С. 40 - 44.
9. Pratt W.K. Digital Image Processing. Hoboken, New Jersey, 2007. 807pp.
10. Егошкин Н.А., Еремеев В.В. Коррекция смаза изображений в системах космического наблюдения земли // Цифровая обработка сигналов, 2010. №4. С. 28 - 32.
11. Jeon B, Kim H., Chang Y. A MTF compensation for satellite image using L-curve-based modified Wiener filter // Korean Journal of Remote Sensing, 2012. Vol 28, pp. 561-571.
12. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, 1998. 550p.
13. Donoho D.L. Nonlinear solution of linear inverse problems by Wavelet-Vaguelette Decomposition // Appl. Comp. Harm. Anal., 1995. Vol. 2, pp. 101-126.
14. Neelamani R., Choi H., Baraniuk R. Wavelet-based deconvolution for ill-conditioned systems // IEEE Transactions on Image Processing, 1999.
15. Ljung L. System Identification. Theory for the User. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. 609 p.