



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ КОРРЕКЦИИ РЕЗКОСТИ НА СНИМКАХ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

**О.А. ИВАЩУК**  
**Н.В. ЩЕРБИНИНА**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет*  
*e-mail:*  
*shcherbinina@bsu.edu.ru*

Проводится анализ метода координируемой коррекции восстановления подавленной резкости на основе аддитивного представления коррекции резкости с синтезом частотно-контрастной характеристики тракта формирования космического изображения и методов деконволюции.

Ключевые слова: космическое изображение, пространственно-частотный спектр, функция рассеяния точки, регуляризация, итеративная деконволюция, оптимизация

Улучшение резкости на космических изображениях высокого и сверхвысокого разрешения решается с учетом орбитальных кинематических параметров аппарата, несущего аппаратуру, сканирующую поверхность Земли. При этом в изображение вносятся все индустриальные виды коррекций, кроме коррекции функции рассеивания точки (ФРТ), которая присутствует на изображениях и которую невозможно уменьшить указанными методами. В этом случае, используя опорные ориентиры, распознаваемые на изображении, основываясь на свойствах изопланатичности ФРТ на ориентирах можно решать задачи деконволюции, т.е. коррекции резкости. От этой резкости зависит разрешение, которое реализуется данным спутником на местности. Задача коррекции резкости, а также восстановления смазанных изображений, т.е. изображений с наличием на них ФРТ, является одной из актуальных задач цифровой обработки изображений. Данную задачу чаще всего представляют уравнением Фредгольма I-го рода типа свертки (для космических изображений – это математическая модель Бейтса и МакДоннела). Решение этого уравнения, как известно, является некорректной задачей и требует, по крайней мере, регуляризации [1, 5].

Решение строится, как правило, на методах инверсной фильтрации, параметрической Винеровской фильтрации, фильтрации по Тихонову, на алгоритме Люси-Ричардсона, на методах «слепой» деконволюции, методе квадратур с регуляризацией Тихонова и др. Последний метод обладает меньшей среди остальных относительной погрешностью восстановления и приводит уравнение Фредгольма первого рода к уравнению Фредгольма II рода, с устойчивым решением [1, 6].

**Цель работы:** Сравнительный анализ методов восстановления коррекции резкости на снимках высокого разрешения с помощью координируемой коррекции резкости и с применением деконволюции.

Разрешение уравнения Фредгольма, соответствующего модели Бейтса и МакДоннела для формируемого космического изображения относительно исходного – это деконволюция некорректно поставленных задач. При этом используются две группы методов деконволюции – прямые и итерационные. В прямых методах для стабилизации решения используются различные способы регуляризации, самым распространенным из которых является регуляризация Тихонова. Параметр регуляризации задает вес минимизации нормы решения по отношению к минимизации нормы невязки. В итерационных методах деконволюции роль параметра регуляризации выполняет номер итерации. Итерационные методы позволяют избежать трудностей, связанных с выбором оптимального параметра регуляризации. Множество решений, даваемых любым методом деконволюции, требует критерия отбора оптимального решения.

В методе координируемой коррекции строится аддитивное представление коррекции резкости с оптимизацией сопутствующей коррекции частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) тракта формирования изображения при условии отсутствия выделения



контуров или процессов резидентного контрастирования. При этом реализуется ближайшее по заданной погрешности приближение ЧКХ к прямоугольному виду на любом азимутальном срезе. Единственным источником неединственности решения при этом является протоколируемая воля оператора – интерпретатора при выборе весовых коэффициентов для ЧКХ [1, 5].

Регуляризация Тихонова при любом выборе соотношений между невязкой и регуляризационным параметром свободна от возможности привнесения в изображение впечатываемых контуров, скрытой в спектральном представлении ядра деконволюции, а также от чрезмерного усиления высших мод ЧКХ. Данный метод не позволяет контролировать процесс оптимизации ЧКХ. В этом случае единственным возможным вариантом сохранения измерительных свойств изображения является тщательный выбор такого опорного ориентира со спектральным представлением ФРТ, при котором отсутствуют резидентные явления, что с технической точки зрения не всегда реализуемо.

Это же можно сказать и о таких достаточно весомых методах итеративной деконволюции при обработке космических изображений, как метод Ван Циттера, метод Джанссона, метод Голда, метод максимума правдоподобия (ММП), метод разложения по сингулярным значениям [2]. Перечисленные методы не привлекают смежные данные из каналов тракта дистанционного зондирования земли.

В практике выполнения деконволюции описываемые методы ранжируют по степени повышения качества решения в следующем порядке: 1) метод ван Циттерта; 2) метод Джанссона; 3) метод Тихонова; 4) метод Голда; 5) ММП. Однако при этом в результате работы методов превентивные меры по подавлению усиления контраста не предъявляются, что делает соответствующие оценки качества улучшения резкости недостаточно корректными [2].

#### **Сравнение методов деконволюции.**

Ниже приведены результаты коррекции резкости изображения высокого разрешения с аппарата OrbView-3 методами Ван Циттера (без оптимизации ЧКХ), Джанссона, Голда и метода координируемой коррекции резкости. Опорный ориентир выбирался на модели изображения, полученной методом расфокусировки на стандартном графическом пакете.

В эксперименте реализуется итеративный процесс вида:

$$F^{(0)}(S_H) = F(S_R),$$

$$F^{(n)}(S_H) = F(S_R) + (1 - H)F^{(n-1)}(S_H),$$

соответствующая норма решения, задается как евклидова норма, останов в итеративном процессе осуществляется оператором – интерпретатором. Каждая итерация  $F^{(n)}(S_H)$  отличается от  $F^{(0)}(S_H)$  увеличением амплитуд верхних мод пространственно – частного спектра (ПЧС) с увеличением номера  $n$ . Единственным средством избежать усиление на изображении контраста в процессе его коррекции является задание ограничения по изменению уровня наклона возрастания верхних мод ПЧС при обработке относительно исходного изображения. Это эквивалентно контролю итераций по сопутствующей ЧКХ или контролю по уровню увеличения эффективного порядка соответствующего оператора при аддитивном представлении.

Приведем итерационные схемы, лежащие в основе описываемых выше методов. Если решение, полученное на  $n$ -той итерации обозначить  $S_{In}$ ,  $H$  – спектральное представление ФРТ, определенной по опорному ориентиру, то итерационная схема Ван Циттера может быть записана в виде

$$S_{In+1} = S_{In} + (S_R - F^{-1}(H) ** S_{In}),$$

итерационная схема Голда

$$F(S_{In+1}) = F(S_{In})F(S_R)/(H ** F(S_{In})),$$

Итерационная схема Джанссона

$$F(S_{In+1}) = F(S_{In}) + \mu F(S_R) - (H ** F(S_{In})),$$

где  $\mu = \text{const}[1 - 2(B - A)][F(S_{\text{ин}} - (A + B)/2)]$ ,  $A$  и  $B$  нижние и верхние границы спектра, подбор константы осуществляется перебором возможных значений не нарушающих сходимость итерационного процесса.

Значимым отличием метода координируемой коррекции резкости космических изображений, описанного в [1], от множества методов деконволюции, является то, что в этом методе не ставится задачи восстановления огибающей светосигнальной характеристики (то есть ЧКХ тракта и пространственного спектра частот объекта съемки). А в задачах ДЗЗ требуется восстановление точного изображения, как образа объекта, так и пространственного его спектра, в то время как перечисленные методы улучшают только визуальные качества изображения. В приведенных методах в качестве критерия останова итеративного процесса используется критерий минимума нормированной среднеквадратической ошибки оценивания [3], который не связан с ограничениями усиления высших мод ПЧС обрабатываемого изображения. Необходимо отметить, что во многих источниках приведены слишком оптимистичные результаты по итеративному восстановлению расфокусированных изображений со спектральным представлением формул Винера. Определение ядра деконволюции ФРТ по всему кадру, в отличие от определения по опорным ориентирам на малом участке изображения, применяемым при работе с космическими снимками, ограничивает решаемую задачу классом инверсной фильтрации или фильтрации по известной полной ФРТ с несуществующей модификацией по величине нормы, что является моделью прямых и обратных преобразований. При нанесении шумов или дополнительных искажений на расфокусированное изображение задача восстановления могла перейти в класс некорректных, но тем не менее решаемых при полном задании ФРТ.

Получение для вычислительного эксперимента смазанного паттерна из исходного с расфокусировкой и получение такой же расфокусировкой опорного ориентира из эталона (выбираемого и выделяемого на исходном изображении) не требует выравнивания шумовой обстановки на изображениях. Тем более что на изображениях высокого разрешения отношение сигнал/шум имеет достаточно высокие значения.

Для всех упомянутых представлений используется для останова итеративных процессов формула задаваемой погрешности [4]:

$$\rho(S_{\text{и}}^{(n)}, S_{\text{и}}) \leq (\|T\| \rho(S_{\text{и}}^{(n)}, S_{\text{и}}^{(n-1)})) / (1 - \|T\|),$$

где  $S_{\text{и}}$  – искомое решение;  $\rho(S_{\text{и}}^{(n)}, S_{\text{и}}) = (\sum_{i,j} (S_{\text{и}}^{(n)} - S_{\text{и}})^2)^{1/2}$  – евклидова метрика в пространстве  $\mathbb{R}$ , определяющая погрешность итерационного процесса относительно искомого решения;  $\rho(S_{\text{и}}^{(n)}, S_{\text{и}}^{(n-1)})$  – исчисляется аналогично; норма оператора  $T$  в равна

$$\|T\| = \|F^{-1}(1 - Y) ** S_{\text{и}}^{(n-1)}\| / \|S_{\text{и}}^{(n-1)}\|,$$

где числитель и знаменатель – евклидова норма на компонентах векторов.

Погрешность задается для изображений в палитре с глубиной цвета 24 и размерностью 1024x1024 составляет  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  от максимальной яркости, что соответствует последнему или 25-му разряду кода палитры.

Ниже представлены экспериментальные результаты, сопровождаемые рис. 1-5:



Рис. 1. Исходный фрагмент сформированного изображения высокого разрешения и его Фурье-спектр



Рис. 2. Расфокусированный фрагмент исходного изображения и его Фурье-спектр

**Коррекция резкости с оптимизацией ЧКХ.**

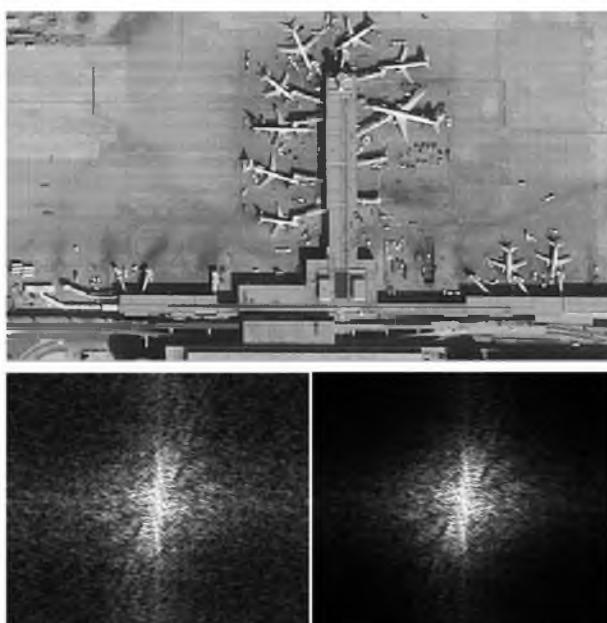


Рис. 3. Результат восстановления резкости, спектр восстановленного и эталонного изображения

**Итерационная схема Голда.**

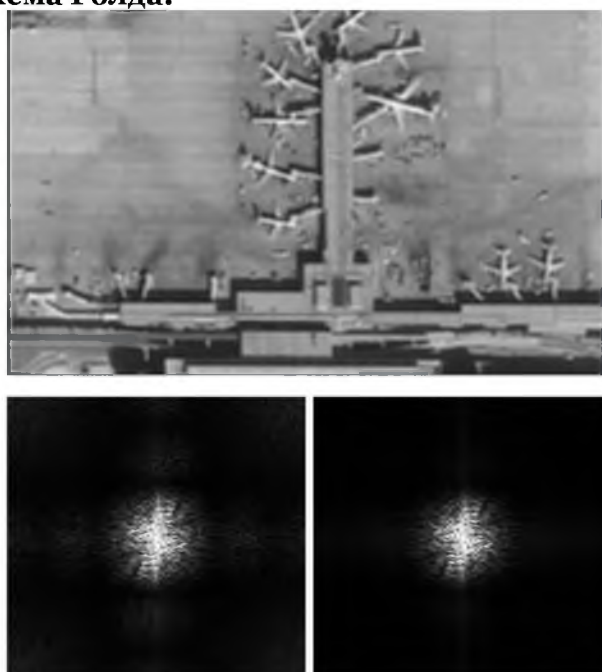


Рис. 4. Результат восстановления резкости, спектр восстановленного и эталонного изображения

### Итерационная схема Джанссона.

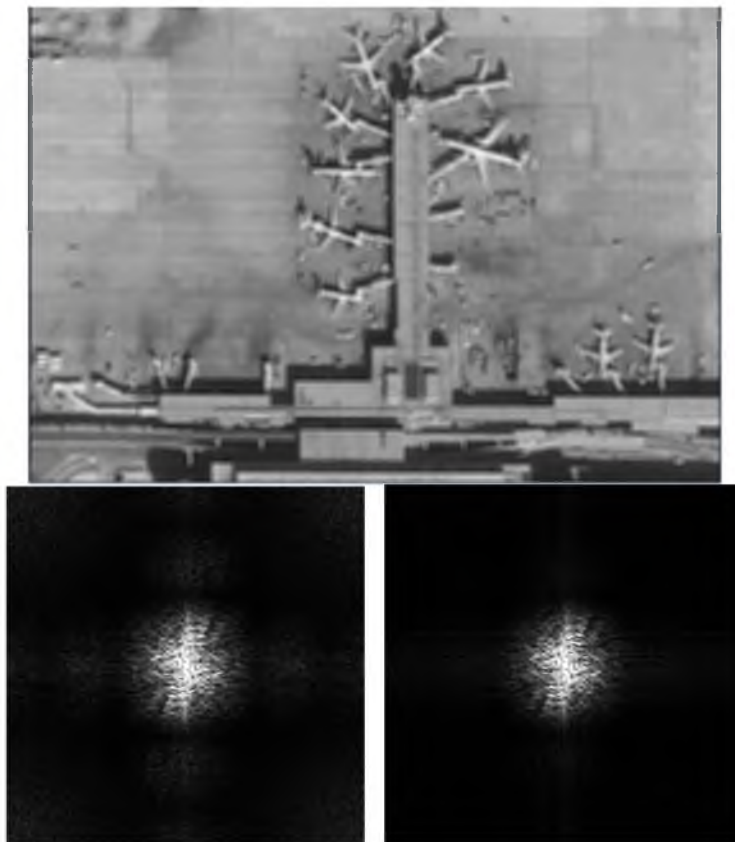


Рис.5. Результат восстановления резкости, спектр восстановленного и эталонного изображения

Радиус спектра при корректном восстановлении резкости меньше радиуса спектра эталона, но больше радиуса спектра расфокусированного

#### **Заключение.**

Качество координируемой коррекции резкости космических изображений определяется свойствами этой коррекции осуществлять подавление ФРТ, не нанося вреда измерительным свойствам изображения, устойчивостью её итеративных модификаций при работе с изображениями при вынужденном выполнении деконволюции слепыми методами.

#### **Список литературы**

1. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Специальная коррекция в процедурах регуляризации и итеративных процессах уменьшения размеров пятна функции рассеяния точки на космических изображениях. Научные ведомости БГУ (научный рецензируемый журнал), № 15 (186) 2014, Выпуск 31/1. С.166-176.
2. Погуляй А.В., Абзалимов Р.Р., Туймедов Г.М., Мазунов В.А. Сравнительный анализ методов деконволюции. Материалы докладов VIII Всероссийской конференции "Структура и динамика молекулярных систем". 2001 г.
3. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
4. Коллатц Л. Функциональный анализ и вычислительная математика / Л. Коллатц. – М.: Мир, 1969, 447 с.
5. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разре-



шения. Научные ведомости БГУ. №8 (179).2014. с. 189-200 (Выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00171).

6. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений/ Р.А. Шовенгердт. – М.: «Техносфера», 2010. – 560 с.

7. Е.Е. Переславцева, М.В. Филиппов. Двухфазная оценка ядра для устойчивого к ошибкам восстановления изображения, смазанного при движении. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012, 137

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR HIGH-RESOLUTION IMAGES SHARPNESS RECOVERY WITH THE AID OF A COORDINATED RECOVERY**

**O. A. IVASCHUK  
N.V. SHCHERBININA**

*Belgorod State National  
Research University*

*e-mail: shcherbinina@bsu.edu.ru*

The paper analyzes the method of coordinated recovery correction of suppressed sharpness, based on additive representation of sharpness correction with the synthesis of the frequency-contrast characteristics of the spaces images forming path and deconvolution methods.

Keywords: point spread function, image, spatial-frequency spectrum, digital space image, the spatial-frequency range, thin structure of the image, function of dispersion of a point.