

# Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях

В.Н. Винтаев, М.Ю. Жиленев, С.И. Маторин, Н.Н. Ушакова, Н.В. Щербинина

**Аннотация.** Рассматривается новый метод восстановления подавленной резкости цифрового космического изображения на основе коррекции оператора восстановления пространственно-частотных спектров. С помощью предложенного метода существенно расширяется диапазон значений восстановленной резкости за счет реализации механизма снижения на изображениях апертуры функции рассеяния точки, являющейся остаточной и присущей современным методам ее подавления.

**Ключевые слова:** цифровое космическое изображение, пространственно-частотный спектр, функция рассеяния точки, деконволюция, обобщенный градиентный оператор, функционал сравнения.

## Введение

Для улучшения визуальных свойств материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) нередко используются традиционные методы:

- повышения визуальной резкости (четкости) изображения, за счет усиления высоких пространственных частот;
- повышения яркости и контрастности изображения гистограммными и другими методами;
- улучшения изображения интерполяциями и т.д.

Использование такого рода улучшений, помимо выравнивания дешифрирующих и метрических измеримых особенностей элементов ландшафта Земли, может приводить к проявлениям алиасинга, эффекта Гиббса, перераспределения пикселей по уровням яркости и т.п. Это делает не документарными данные ДЗЗ, а соответствующие снимки непригодными, например, для использования страховыми компаниями, в сельском хозяйстве, при изысканиях для строительства, ка-

дастровых, лесотаксационных и подобных картографических работах, а также при работах с использованием биофизических индексов покровов Земли типа NDVI и с использованием темпоральных методов ДЗЗ.

На основе изображений с приведенными артефактами, даже безупречно сформированных съемочной бортовой оптико-электронной аппаратурой, становится невозможно получить корректные изображения ландшафта Земли с субпиксельным разрешением - сверхразрешением.

А эволюция космических съемочных систем и средств получения цифровых космических изображений (ЦКИ) высокого разрешения убеждает в высокой эффективности технологий сверхразрешения. Это спутники OrbView-3, Spot-5, Pleiades-1A, Pleiades-1B [1].

Появление космических аппаратов с оптико-электронными системами высокого пространственного разрешения, например, российских «Аркон», «Ресурс-ДК», американских Ikonos, QuickBird потребовало не только оснащения их

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-07-00171).

высокоточными системами навигации, но и выдвинуло новые требования к методам обработки материалов ДЗЗ и, особенно, к технологиям реализации сверхразрешения [2].

Теоретически частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) оптоэлектронных систем может иметь любую ширину в области пространственных частот. В реальности, с увеличением частоты, огибающая ЧКХ имеет спад, что приводит к подавлению или полному уничтожению в этой спектральной полосе мелких деталей на формируемом изображении. Это говорит о наличии функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении, т.е. подавлении или отфильтровывании на нем высоких пространственных частот.

Однако, при синтезе ЦКИ на основе нескольких, например, сдвинутых на доли апертур пикселей входных изображений реализуется даже эффект «сверхразрешения» с потенциальными возможностями восстановления подавленных высших пространственных частот [3].

Глобальные методы улучшения контраста – сдвигая данные в изображении к верхним значениям тонов, стирают мелкие детали, что в итоге сказывается и на эффективности фильтрации и тем более на эффективности реализации сверхразрешения [4]. Манипуляции с контрастом с указанными артефактами будем называть контрастированием.

Подавление ФРТ соответствует синтезу ЧКХ всего тракта формирования изображения с как можно лучше нивелированным спадом, т.е. с квазипрямоугольной огибающей, за счет нечрезмерного усиления амплитуд верхних мод пространственно-частотных спектров изображений. Неполнота в спектральном представлении ФРТ и перманентная неучтенная девиация ее пикселизации при деконволюции могут приводить к результатам, говорящим о том, что в процессе обработки резидентно присутствовало нежелательное контрастирование [5].

В работе представлено решение этой проблемы для изображений, сформированных постфактум в одном спектральном канале оптико-электронной аппаратуры спутника, без привлечения технологий обработки материалов многоспектрального ДЗЗ и компенсаций смазов по данным орбитальной кинематики.

## 1. Аддитивное представление коррекции резкости и синтезируемой частотно-контрастной характеристики

При восстановлении резкости, т.е. при подавлении ФРТ на изображениях, применяется, как правило, деконволюция в виде регуляризованной версии инверсной фильтрации и ее модернизации в модификации фильтров Винера, и нередко в виде алгебраических методов непосредственно в пространственных координатах. Основным критерием достигаемого уровня резкости при этом является значение восстановленной высшей частоты в пространственно-частотном спектре изображения. Радиусы спектров изображения с повышенной резкостью или частично контрастированного, но с худшей резкостью могут совпасть. Для подавления контрастирования в процессе деконволюции необходимо корректировать спектр ядра деконволюции так, чтобы не было избыточного усиления верхних мод спектров изображения. При наличии полного портрета ФРТ, найденного, например, по набору сравнений опорных ориентиров на изображении и их эталонов, как показано в [5] можно снизить апертуру ФРТ в 1,65 раза с высокой достоверностью получаемого результата. Это реализуется при условии полноты покрытия спектра ФРТ спектральными портретами опорных ориентиров и эталонов набора и устранения всех возможных невязок в парах. Кроме того, значимо условие слабого влияния изменения числа пикселей, представляющих ФРТ на процесс деконволюции. Это невозможно при малых апертурах ФРТ, особенно в технологиях сверхразрешения. Неполнота задания спектра ФРТ, характерная для методов слепого определения ФРТ и восстановления изображения, и повышение пикселизации ФРТ при снижении ее апертуры требуют предпринимать на этапах деконволюции превентивные меры по подавлению усиления контраста (Рис.1-Рис.5).

Увеличение радиуса спектра на Рис.2 заметно по большей яркости почти вертикальных сформировавшихся полос, гарантирующих их замедленное угасание к периферии.



Рис. 1. Фрагмент ЦКИ со спутника QuickBird и его спектр

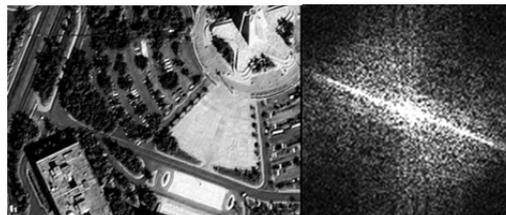


Рис. 2. Фрагмент ЦКИ со спутника QuickBird с повышением резкости усилением контраста и его спектр



Рис. 3. Изображение сюжетное и его спектр

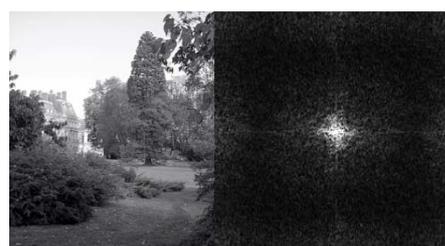


Рис. 4. Изображение сюжетное с увеличенным контрастом и его спектр



Рис. 5. Изображение сюжетное с подавленной ФРТ на основе коррекции оператора восстановления пространственно-частотных спектров и его спектр

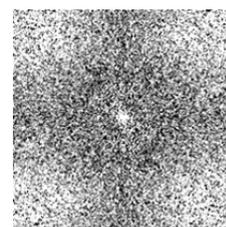


Рис. 6. Спектр оператора контрастирования для сюжетного изображения

На Рис. 4 и Рис. 5 заметно увеличение радиусов спектров и даже их примерное равенство.

На Рис. 6 приведен спектр оператора контрастирования для сюжетного изображения, найденный в виде ЧКХ классическим покомпонентным делением спектра контрастированного изображения на спектр исходного в регуляризованном режиме. Все отношения спектров в работе реализуются с использованием процесса регуляризации для нивелирования возникающих сингулярностей, в основном из-за нулевых гармоник в спектрах знаменателя.

В спектре оператора заметен «завал» амплитуд в зоне, соответствующей периферии спектра исходного изображения и возрастание амплитуд гармоник за пределами этой периферии. Это подавление тонкой структуры исходного изображения и синтез на результатном изображении

более крутых фронтов с характерной спектральной полосой, лежащей за пределами носителя спектра изображения.

Из выше изложенного вытекает постановка задачи:

В процессе восстановления резкости на ЦКИ в условиях меняющейся пикселизации и неполноты задания спектра ФРТ определять параметрически и выполнять коррекцию деконволюции, согласованную с сопутствующим синтезом ЧКХ тракта, приближающейся максимально по огибающей к квазипрямоугольному окну пропускания пространственных частот. Строго говоря, речь идет о приближении огибающей ЧКХ, определенной на двумерном пространстве частот, к квазицилиндрической форме. Будем пользоваться традиционным термином «квазипрямоугольной» для ЧКХ,

трактуя их традиционно как окна пропускания пространственных частот, если не будет необходимости рассмотреть вопрос детальнее.

Спектральная форма применяемой деконволюции [6] определяется мультипликативным представлением – покомпонентным произведением спектра изображения, в том числе на каждом из этапов итерации, и спектра оператора деконволюции. Положительный эффект возможен при отсутствии полного обнуления верхних мод спектра ЦКИ [7].

В соответствии с выдвинутой для ЦКИ моделью Бейтса и Мак Доннела процесс формирования изображения записывается аналитически в виде интегрального уравнения Фредгольма [6]:

$$S_R(x, y) = S_H(x', y', x, y) ** \Phi PT(x', y') + n(x, y), \quad (1a)$$

$$F(S_R) = F(S_H) \cdot F(\Phi PT) + F(n), \quad (1b)$$

где  $S_R$  – формируемое изображение;  $S_H$  – восстанавливаемое изображение;  $\Phi PT(x', y')$  – ядро интегрального преобразования (свертки), изопланатичное на апертуре носителя  $S_H$ , полученное в результате усреднения мгновенных ФРТ,  $n(x, y)$  – аддитивный шум, \*\* – символ операции свертки,  $F(S)$ ,  $F(\Phi PT)$ ,  $F(n)$  – спектры объектов. Определяемая из (1б) для каждого из  $N$  опорных ориентиров или полигонных объектов  $S_{OO}$  и их эталонов  $S_{НО}$  уникальная ЧКХ в виде

$$F(\Phi PT)_i = F(S_{OO})_i / F(S_{НО})_i \quad (2)$$

с оценкой  $F(\Phi PT)$  в виде  $\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i$  дает оценку искомой  $\Phi PT_0$  в виде

$$\Phi PT_0 = F^{-1} \left( \bigcup_i^N F(\Phi PT)_i \right), \quad (3)$$

и выводит на инверсную фильтрацию

$$F(S_H) = F(S_R) / F(\Phi PT_0) = F(S_R) (F(\Phi PT_0))^{-1}, \quad (4)$$

т.е. покомпонентное произведение спектра изображения и  $(F(\Phi PT_0))^{-1}$ ; здесь  $F^{-1}$  – обратная Фурье-процедура, а  $(F)^{-1}$  – деление единицы на отсчеты комплексного спектра  $F$ . Спектры и ЧКХ всегда ограничены верхней модой  $\omega_0$ , моды задаются  $(\omega_x, \omega_y)$  – координатами в спектре  $S(x, y)$ .

Множества гармоник  $F(\Phi PT)_i$  определяются как нечеткие множества с функциями принадлежности на них  $\mu_i$ , равными коэффициентам корреляции соответствующих  $S_{OO}$  и  $S_{НО}$ . Операция объединения  $\bigcup_i^N$  для построения множества  $F(\Phi PT_0)$  сопровождается минимаксной формулой исчисления  $\mu_0$  для каждой гармоники в  $F(\Phi PT_0)$  с медианной фильтрацией значений ряда гармоник из образующих множеств  $F(\Phi PT)_i$  с равными значениями  $\mu_i$ .

Соотношения (2) и (4) являются следствием из соотношения (1б). В этих соотношениях подавление шума, представленного в (1б) реализуется в парах  $S_{OO}$  и  $S_{НО}$  на этапе их сравнения достаточно эффективно: шум на носителе яркостного портрета  $S_{OO}$  и в примыкающем окне имеет изопланатичные характеристики и изотропен, тогда как радиусы корреляции структурных элементов  $S_{OO}$  и  $S_{НО}$  существенно анизотропны. Именно это позволяет восстановить с высокой достоверностью яркостные и геометрические характеристики  $S_{OO}$ , начиная, к примеру, с выделения их границ и вообще линейментов [8, 9]. Кроме того, на ЦКИ высокого разрешения может использоваться технология фильтрации, оптимальной по разрешению [10].

Используем аппарат обобщенной градиентной фильтрации с переменным порядком оператора [5]: обобщенный градиентный фильтр (оператор), реализуется на базе прямого продолжения на вещественные значения порядка спектрального представления операции дифференцирования –  $D_x^\alpha D_y^\beta$  ( $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ ), определяемого для допускающих Фурье-представление функций в виде:

$$D_x^\alpha D_y^\beta S(x, y) = \int (J\omega_x)^\alpha (J\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{j(x\omega_x + y\omega_y)} d\omega_x d\omega_y, \quad (5)$$

где  $F_S(\omega_x, \omega_y)$  – прямое двумерное преобразование Фурье функции  $S(x, y)$ ,  $J = (-1)^{0,5}$ .

Соотношение (5) при целых  $\alpha$  и  $\beta$  представляет собой известную теорему о дифференцировании функций в спектральном представлении.

Градиентный фильтр конструируется в виде нормы вектора  $(D_x^\alpha S(x, y), D_y^\beta S(x, y))$  т.е.

$$grad_{\alpha\beta}(S) = ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2}. \quad (6)$$

В теории обобщенных функций операция  $D^\alpha$  задается разновидностями интегральных преобразований [11], дающих идентичные с предлагаемым аппаратом результаты при возврате к целым порядкам.

На Рис. 7 схематично представлены: спектр изображения (полоса  $0-\omega_l$ ), спектр шума (полоса  $\omega_0-\omega_s$ ), спектр главной части градиентного оператора первого порядка (выделяет скачки градаций, контуры), спектр оператора порядка меньше 1, спектр  $L$ , инверсный спектру выявленной ФРТ; в данном случае ФРТ достаточно быстро падает к нулю. Очевидно, что если итеративно организованную задачу деконволюции со спектром  $L$  вовремя не остановить или не откорректировать спектр оператора на этапах, то полученное решение вполне может завершиться контрастированием.

Выполнение контрастирования не увеличивает пропускную информационную способность тракта по сравнению с коррекцией разрешения [5].

В соответствии с упоминаемой выше возможностью компенсации провала ЧКХ тракта, используя  $grad_{\alpha\beta}(S)$  в виде  $grad_{\alpha\alpha}(S) = grad_\alpha(S)$  целесообразно реализовать коррекцию  $S_R$  в виде

$$S_{H=} S_R + a grad_\alpha(S_R), \quad (7)$$

с варьируемыми параметрами  $a$  и  $\alpha$ . Чем ниже значение  $\alpha$ , тем медленнее растут амплитуды мод спектра оператора к периферии (Рис. 7) и чем меньше значение  $a$ , тем «мягче» коррекция изображения аддитивной добавкой (7) и тем больше может понадобиться итераций построенной таким образом деконволюции для соот-

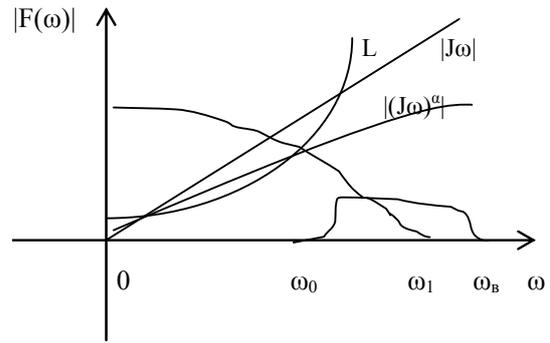


Рис. 7. Главная часть спектрального представления оператора деконволюции и градиентного оператора с переменным порядком

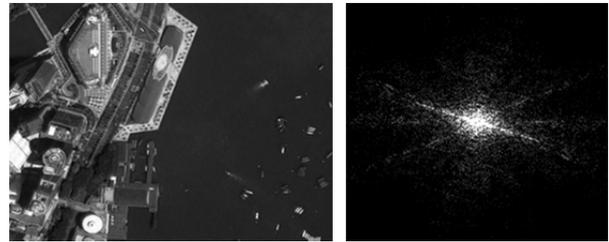


Рис. 8. Фрагмент ЦКИ со спутника Ikonos и его спектр

ветствующей компенсации ЧКХ тракта. На Рис. 8 приведен фрагмент ЦКИ со спутника Ikonos, на котором еще есть резерв по улучшению резкости и его спектр.

Зададим значение  $a = 1$ . Для  $\alpha = 1$  результат по формуле (7) общеизвестный – выделенные контуры и впечатанные в исходное изображение (Рис. 9, где для сравнения приведен спектр исходного изображения).

В изображении, получаемом по формуле (7) для предупреждения превышения динамического диапазона яркостей каждый пиксел вычислялся с нормализацией – умножением его значения на предварительно вычисляемый ко-

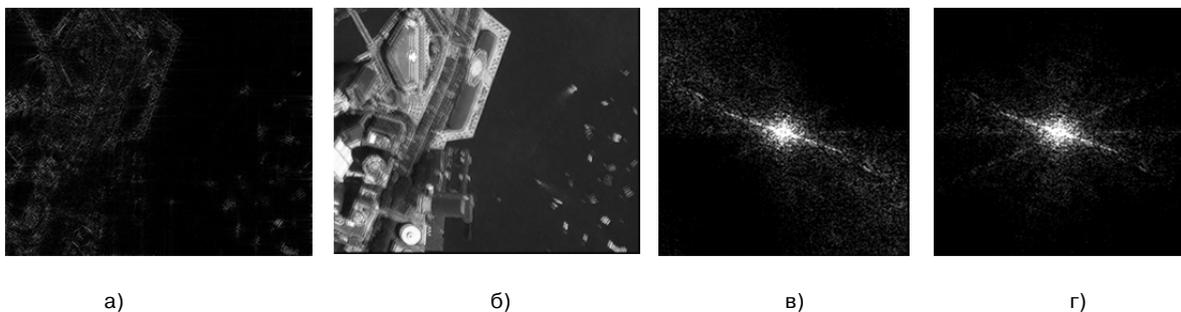


Рис. 9. а) градиентный фильтр порядка 1; б)  $S_{H=} S_R + 1 grad_1(S_R)$ ; в) спектр  $S_H$ ; г) спектр  $S_R$

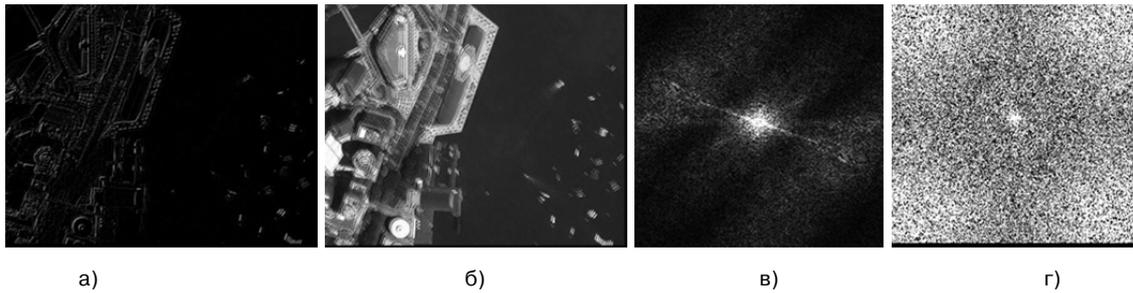


Рис. 10. а) производная порядка 1; б)  $S_{II} = S_R + 1 D(S_R)$ ; в) спектр  $S_R$ ; г) спектр оператора контрастирования сюжетного изображения - для сравнения

эффицент, равный отношению максимальной яркости в исходном изображении к максимальной яркости в изображении, получаемом по формуле (7).

Спектр  $S_{II}$  (Рис. 9в) по структуре приблизился к спектру контрастирования – подавлена тонкая структура: в первом квадранте особенно заметно по сравнению со спектром  $S_R$  (Рис. 9г).

На Рис. 10 представлены эксперименты по коррекции с производной порядка 1 по направлению  $(-45^\circ)$ .

Спектры результата коррекции из-за нормализации, без которой нет корректной обработки ЦКИ, показывают при  $\alpha = 1$  картину выполненного контрастирования с завалами в спектрах в области тонкой структуры изображения и появлением частот от усиления восхождения краев,

аналогично приведенному спектру оператора контрастирования сюжетного изображения.

На Рис. 11-Рис.13 – а) результат применения градиентного фильтра к  $S_R$ ; б)  $S_{II} = S_R + 1 grad_\alpha(S_R)$ ; в) спектр  $S_{II}$ ; г) спектр  $S_R$  со значениями  $\alpha$  равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно.

На Рис. 11 видны характерные признаки контрастирования – подъем амплитуд гармоник ЧКХ за пределами спектра изображения, с меньшим подъемом, чем при  $\alpha = 1$  и завалы на периферии спектра  $S_{II}$ , заметные в первом квадранте и в третьем. На Рис. 12 сравниваемые спектры практически совпадают. Из Рис. 13 видно, что спектр  $S_{II}$  (Рис. 13 в) сохранил топологию спектра исходного  $S_R$  (Рис. 13 г) с компенсацией «завалов» на периферии, что соответствует увеличению резкости на  $S_{II}$ .

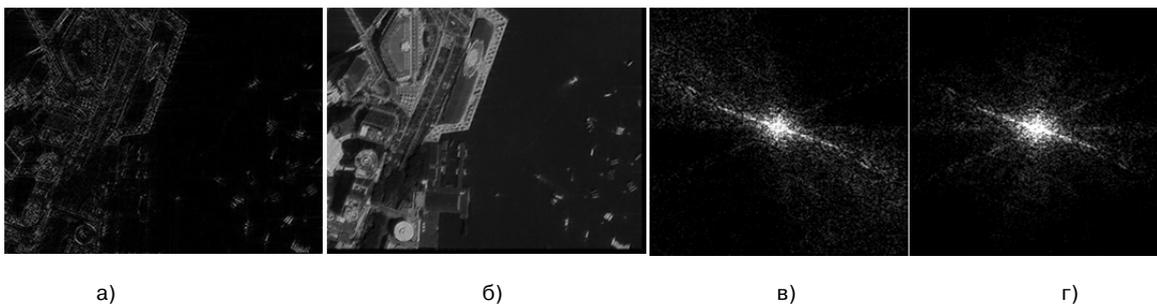


Рис. 11. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha = 0,7$

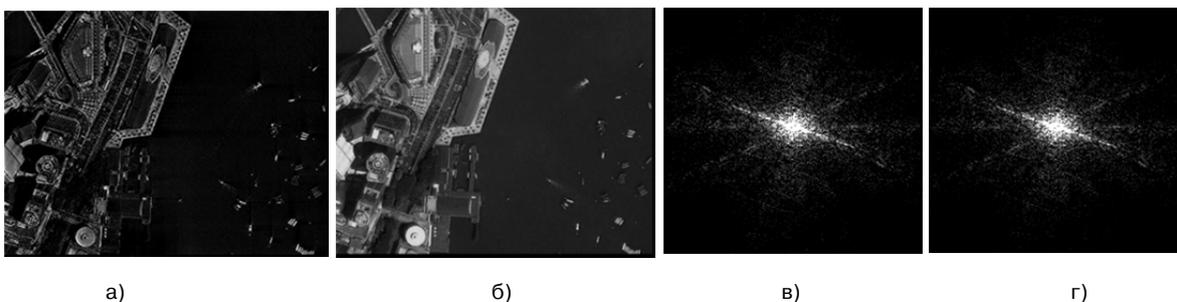
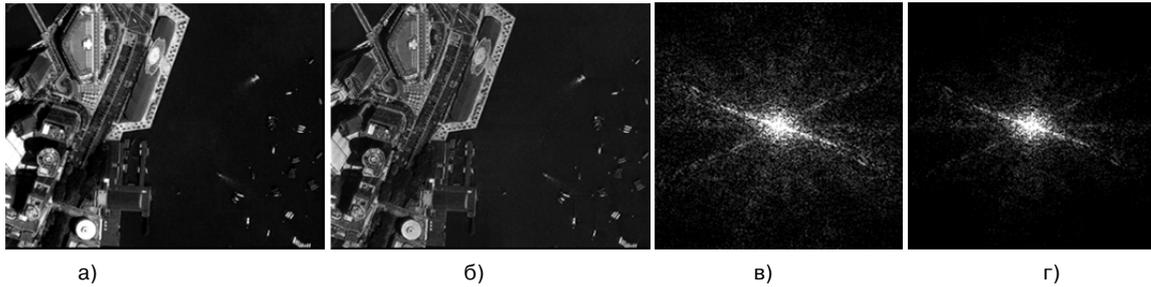
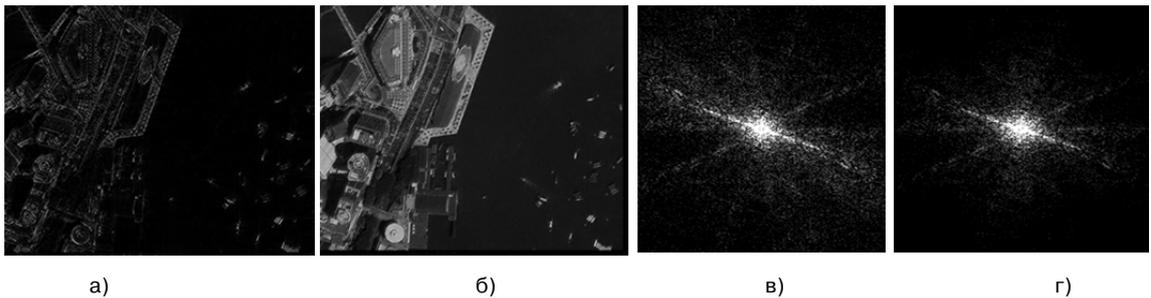


Рис. 12. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha = 0,5$

Рис. 13. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha = 0,25$ Рис. 14. Результаты повторной коррекции  $S_R$  при  $\alpha = 0,5$ 

В задаче повышения резкости управлением контрастом на изображении (раздел 1, Рис. 4) преобразования не относились к классу линейных операторов. Найденный спектр оператора контрастирования для сюжетного изображения определил ЧКХ тракта контрастирования с характерными «завалами» и разрастаниями. Спектр оператора контрастирования для космического изображения при нормализации и вычислении его отношением спектров показывает аналогичные свойства. Такие синтезированные ЧКХ тракта ДЗЗ неудовлетворительны.

В терминах теории операторов – оператор  $(grad_\alpha)$  имеет порядок  $\alpha$ , а для оператора  $(1+a(grad_\alpha))$ , т.к. он имеет тенденцию к росту амплитуд гармоник в высших модах спектра, можно подобрать эффективный порядок. Это будет порядок обобщенного градиентного оператора, спектр которого аппроксимирует спектр оператора  $(1+a(grad_\alpha))$  по методу наименьших квадратов с минимальным значением невязки.

Повторное применение оператора (7), например, в итеративном процессе означает повышение эффективного порядка оператора, и в приведенном примере при  $\alpha = 0,5$  приводит к подчеркиванию контуров и смешанному с контрастированием увеличению резкости. Резуль-

таты повторной коррекции приведены на Рис. 14 и соответствуют выполнению соотношения  $S_{II}^* - S_R + 2 grad_\alpha(S_R) + grad_\alpha(grad_\alpha S_R)$ , порождающего сложный спектр (Рис. 14в), который можно спутать со спектром, получающимся в процессе увеличения резкости по отношению к исходному спектру (Рис. 14г). Эффективный порядок градиентного оператора при заданных  $a$ ,  $\alpha$  и спектре исходного изображения близок к значению 0,7 – можно сравнить результаты с Рис. 11.

Представленное выше является одновременно и коррекцией  $S_R$  с целью восстановления резкости на  $S_{II}$  и синтезом откорректированной ЧКХ тракта ДЗЗ для имеющегося изображения. Правым фронтом ЧКХ высокодостоверно достигнет  $\omega_0$ , если в спектре  $S_R$  соответствующие гармоники были только подавлены, а не уничтожены трактом.

## 2. Оптимизация параметров аддитивного представления и коррекция ядер деконволюции

Оптимизация параметров  $a$  и  $\alpha$  для получения сопутствующей ЧКХ тракта с квазипрямоугольной огибающей строится на взаимном анализе экстремальных значений невязок

в нескольких соотношениях с использованием спектра вычисляемой функции смаза опознаваемой на ЦКИ границы (функции рассеяния границы (ФРГ)) или линии (функции рассеяния линии (ФРЛ)) [12] или фрагмента полигонного ориентира. Дополнительная априорная информация о характеристиках процесса или системы формирования ЦКИ, в принципе позволяет вычислить и ФРТ для реализации деконволюции - решения уравнения Фредгольма (1а, 1б) [13, 14]. Это все реализуется на отдельном ЦКИ, как отмечалось выше, без учета кинематических особенностей орбитальной съемки, которые меняют результаты по расчетам и измерениям ФРТ [15, 16].

В представленной работе подобно расчетам в [14] осуществляется коррекция ядра деконволюции, но в частотно зависимом варианте на ЦКИ, сформированном как постфактум. Заметим, что в аддитивном представлении задачи коррекции резкости нет возможности учесть в перспективе кинематику. Это позволяет осуществить модель Бейтса и Мак Доннела, оставляя приоритет в коррекции разрешения за «традиционной» деконволюцией. Аддитивному представлению отводится роль супервизора при сопутствующем синтезе ЧКХ тракта, приближающейся к прямоугольному виду вплоть до  $\omega_6$ .

Отметим свойства гипотетической оптимальной ЧКХ при восстановлении резкости: на всех этапах деконволюции все ЧКХ совпадают в низко- и среднечастотной части, и только в высокочастотной части различаются; все ЧКХ, соответствующие недостаточному усилению резкости вписываются в оптимальную ЧКХ; ЧКХ с подчеркиванием высших мод или с контрастированием и, тем более, выделением контуров мажорируют все ЧКХ; оптимальная ЧКХ не противоречит спектрам ФРТ, ФРЛ или ФРГ от полигонного артефакта.

Из перечисленного следуют условия:

- максимизации функционала – объема под огибающей ЧКХ (8);
- примерной гладкости и параллельности огибающей поверхности ЧКХ координатной плоскости (9);
- начала устойчивого завала огибающей ЧКХ с некоторой моды  $\omega_2$ , причем с минимизацией разницы  $\omega_6 - \omega_2$  (10 и 11);

Для спектров ФРТ, ФРЛ, ФРГ полигонного артефакта введем обозначение  $H(\omega_i, \omega_j)$ , где индексы  $i$  и  $j$  нумеруют дискретные отсчеты на осях  $\omega_x, \omega_y$ , соответственно.

В соответствии с перечисленными требованиями получим соотношения:

$$\begin{aligned} & \sum_{i,j}^{N,M} \text{ЧКХ}(\omega_i, \omega_j) \delta \omega_i \delta \omega_j = \\ & = \sum_{i,j}^{N,M} F(S_R) / F(S_R + a \text{grad}_\alpha(S_R)) \delta \omega_i \delta \omega_j = \\ & = R_l = \max, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $M$  и  $N$  – размеры в отсчетах спектрального окна задачи,  $\delta \omega_i$  и  $\delta \omega_j$  – приращения значений мод СП;

$$\text{grad ЧКХ}(\omega_i, \omega_j) = R_2 = \min \text{ при } \omega < \omega_2; \quad (9)$$

$$\text{grad ЧКХ}(\omega_i, \omega_j) = R_3 < 0 \text{ при } \omega > \omega_2; \quad (10)$$

$$\omega_6 - \omega_2 = R_4 = \min. \quad (11)$$

Опытный интерпретатор – специалист по обработке ЦКИ может «на глаз» дать оценки оптимальных  $a = a_1$  и  $\alpha = \alpha_1$ , но тогда обработанное изображение не будет сопровождено детальным паспортом и дальнейшая его обработка может стать некорректной.

Из соотношений (8) и (9) находятся  $a_1$  и  $\alpha_1$ , соотношения (10) и (11) или используются для коррекции  $a_1$  и  $\alpha_1$  или игнорируются при априорном задании значения моды  $\omega_2$ .

В соотношении инверсной фильтрации (4)  $F(\Phi_{PT0})$  заменим на  $H(\omega_i, \omega_j)$ , представляющее собой спектр ФРТ с неполнотой покрытия диапазона частот задачи. Числитель и знаменатель в (4) домножим на  $H^*(\omega_i, \omega_j)$  (\* – символ комплексного сопряжения) и добавляя аддитивно в знаменатель параметр регуляризации  $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$  получим модифицированный фильтр Винера-Тихонова со спектром ядра  $H_m$  [13, 14]

$$F(S_M) = H^*(\omega_i, \omega_j) F(S_R) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) = H_m^{-1} F(S_R), \quad (12)$$

который в работе [14] дополнительно модифицирован параметрами – константами коррекции в знаменателе и использованием степени ядра в числителе. Эти параметры оптимизируются под

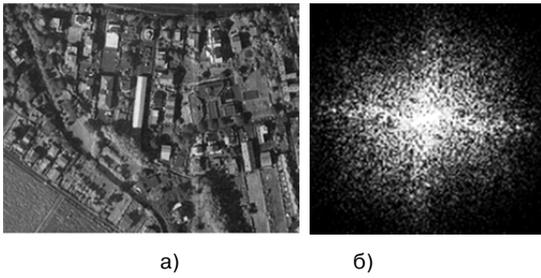


Рис. 15. Исходный фрагмент ЦКИ и его спектр

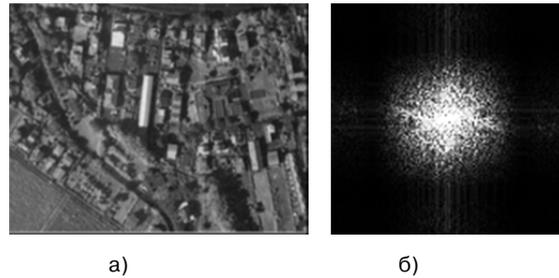


Рис. 16. Результат свертки ЦКИ с однородной ФРТ размером 3x3 пиксела

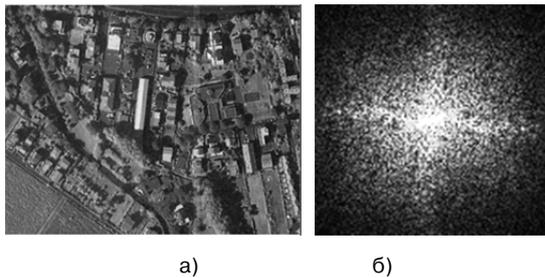


Рис. 17. Результат восстановления резкости и последующих трех шагов фильтрации ЦКИ с применением соотношения (15)

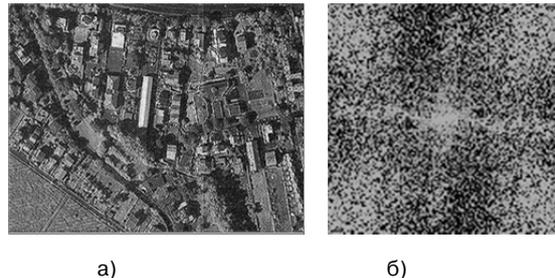


Рис. 18. Результат восстановления резкости и последующих трех шагов фильтрации без применения соотношения (15)

известную ЧКХ телескопа и дополнительную априорную информацию.

Пусть  $ЧКХ_0 = ЧКХ(\omega_i, \omega_j)$  при  $a = a_1$  и  $\alpha = \alpha_1$  и получена также, как описано выше в режиме регуляризации по Тихонову.

В этом случае можно поставить задачу определения параметра – константы  $\varepsilon$  коррекции ядра деконволюции подобно методу в работе [14] минимизацией невязки  $R_5$  – значения функционала сравнения  $Z$ :

$$Z(\varepsilon, R_5) = \sum_{i,j}^{N,M} |ЧКХ_0(\omega_i, \omega_j) - (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) + \varepsilon)^{-1}|^2 = R_5 = \min, \quad (13)$$

при этом  $(H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) + \varepsilon)^{-1} = F(S_R) / F(S_H)$  – это ЧКХ тракта при коррекции ЦКИ соотношением (12), а  $\varepsilon$  – постоянна.

Но корректирующая добавка, если она зависима от частоты, точнее согласует эти две ЧКХ, поэтому будем искать такую добавку  $v(\omega_i, \omega_j)$  из выводимого из (13) регуляризованного соотношения

$$|ЧКХ_0(\omega_i, \omega_j) - (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) + v(\omega_i, \omega_j))^{-1}|^2 = R_6^2 = \min, \quad (14)$$

из которого следует

$$v(\omega_i, \omega_j) = (ЧКХ_0(\omega_i, \omega_j) + |R_6|)^{-1} - H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}), \quad (15)$$

в котором  $R_6$  аналогично  $\rho$  играет роль параметра регуляризации.

На Рис. 15-Рис. 18 приведены результаты обработки ЦКИ с использованием соотношения (15) – фрагменты ЦКИ со спутника Ресурс ДК (а) и их спектры (б).

Вычисленные оптимальные значения  $a=0,1$  и  $\alpha = 0,15$ .

Спектр на Рис. 18 соответствует ранее получаемым спектрам контрастирования. Спектр на Рис. 17 имеет в 1,2 раза больший радиус, чем спектр исходного изображения. Из соотношения (4), связывающего спектры исходного, восстановленного изображений и ФРТ следует, что на исходном изображении имелась остаточная ФРТ с апертурой в 1,2 апертуры пиксела. Считаем, что на конечном результате апертура ФРТ равна апертуре пиксела. Такие апертуры ФРТ весьма трудно определить существующими методами оценок ФРТ. Выходить с таким изображением на технологии сверхразрешения, т.е. осуществлять, например, сдвиги его на доли размера пиксела с последующим решением

системы уравнений для сверхразрешения – это заведомо снизить процент восстанавливаемой детальности при использовании технологии сверхразрешения [17].

## Заключение

Разработан новый метод адаптивного восстановления резкости на ЦКИ в отдельном спектральном канале ДЗЗ и без учета кинематики на основе построения формализованного сопутствующего обработке изображения синтеза оптимальной ЧКХ тракта ДЗЗ, приближающейся по огибающей к прямоугольному виду. Разработано аддитивное представление синтеза ЧКХ на основе обобщенного градиентного оператора.

Приведенная формализация восстановления резкости позволяет сопроводить ЦКИ достаточно полным паспортом для метрической аттестации измерительных свойств ЦКИ.

Авторы приносят благодарность коллективу Департамента МКА и спутниковых систем ФГУП «Государственный Космический Научно-Производственный Центр им. М.В. Хруничева» за активное участие в обсуждении и исследовании вопросов улучшения качества космических изображений, в том числе на современных эксплуатируемых космических аппаратах.

## Литература

1. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview// IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – P. 21-36.
2. Ращупкин А.В. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений//Полет, 2008. № 11. С. 42-48. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 2, 2010.
3. <http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm> «Субпиксельная обработка как способ повышения пространственного разрешения в системах дистанционного зондирования». Селиванов А.С. // ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИКП»), 2008.
4. Robert Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, William T. Freeman. Removing camera shake from a single photograph// Journal: ACM Transactions on Graphics - TOG , vol. 25, no. 3, pp. 787-794, 2006.
5. Ушакова Н.Н. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. – Дисс. на соискание ученой степени канд. техн.наук.- Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004, 255 с.
6. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989, 336 с.
7. Vintaev V.N., Urazbakhtin A. I., Ushakova, N. N. The Criterion of Admissibility of the Required Resolution Degradation of Images Synthesized by Some Radio Systems. Telecommunications And Radio Engineering, Vol. 64 '2005, BegellHouse, Inc., New York, 315-319 pages.
8. Кольцов П.П. Эмпирический подход к оценке алгоритмов выделения границ//Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2011. №2, с. 50-57.
9. Бобков В.А., Роньшин Ю.И. Автоматическое сопоставление линий на калиброванных изображениях// Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2010. №4, с. 16-24.
10. Удод В.А. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. – Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук по спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (техника)». – Томский государственный университет, 2002, 338 с.
11. Брычков Ю.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования обобщенных функций. - М.: Наука, 1977, 286 с.
12. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений/ Р.А. Шовенгердт. Москва, «Техносфера», 2010, 560 с.
13. Остриков В. Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления//Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011», Москва, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2012. - Т.38, ISSN 2075-6836, с. 16-21.
14. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии//Солнечно-земная физика. Вып. 16. (2010), с. 154-161.
15. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой//Телекоммуникации (TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING)- М.: Наука и технологии, № 7, 2011, с.2-7.
16. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса. //Вестник Самарского государственного технического университета. Выпуск 22. Серия "Технические науки", 2005, с. 150-157.
17. Блажевич С.В., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования// Материалы седьмой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Том 7 № 2, стр. 9-13, 2010, изд. ИКИ РАН.

**Винтаев Виктор Николаевич.** Доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права. В 1971 г. Окончил Харьковский институт радиоэлектроники, к.т.н., доцент. Количество печатных работ – 110. Область научных интересов: системный анализ, цифровая обработка космических изображений, параллельно-конвейерные алгоритмы и процессоры обработки данных. E-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

**Жилнев Михаил Юрьевич.** Руководитель группы ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева». В 1979 г. окончил Московский Институт Инженеров Геодезии, Аэрофотосъёмки и Картографии. Количество печатных работ – 30. Область научных интересов: методы формирования и обработки космических изображений высокого разрешения. E-mail: zhilnev\_mihail@mail.ru

**Маторин Сергей Игоревич.** Профессор кафедры прикладной информатики Белгородского государственного университета. В 1977 г. окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники, д.т.н., профессор. Количество печатных работ - 150. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, семантика, когнитология, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: matorin@bsu.edu.ru

**Ушакова Наталья Николаевна.** Доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права. В 1987 г. окончила Воронежский государственный университет, к.т.н., доцент. Количество печатных работ - 98. Область научных интересов: системный анализ, цифровая обработка сигналов, распознавание образов. E-mail: natush2006@ya.ru

**Щербинина Наталья Владимировна.** Старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики Белгородского государственного университета. В 2004 г. окончила Белгородский государственный университет. Количество печатных работ – 20. Область научных интересов: системный анализ. E-mail: shcherbinina@bsu.edu.ru