

# Учет достоверности определения функции рассеяния точки для дополнительной коррекции резкости на космических изображениях высокого разрешения<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Рассматривается метод повышения резкости деконволюцией изображения с учетом достоверности оценок функции рассеяния точки для дополнительной коррекции резкости на сформированном космическом изображении высокого разрешения. Метод реализуется на основе представления резкости мерой Лебега, порождающей сходимость к минимуму интервальной ошибки оценки результата деконволюции.

**Ключевые слова:** цифровое космическое изображение, пространственно-частотный спектр, тонкая структура изображения, функция рассеяния точки, деконволюция, интегральный оператор, мера Лебега, нечеткое множество.

## Введение

При обработке космических изображений с аппаратов с оптико-электронными системами высокого пространственного разрешения, например, российских «Аркон», «Ресурс-ДК», американских – Ikonos, QuickBird [1] и сформированных съемочной бортовой оптико-электронной аппаратурой с передаточной характеристикой исключительно высшего качества, необходимо решать задачи снижения апертуры функции рассеяния точки (ФРТ) для повышения корректности получения изображений ландшафта Земли и объектов на нем [2], особенно с субпиксельным разрешением – сверхразрешением (спутники OrbView-3, Spot-5, Pleiades-1A, Pleiades-1B [3-5]). При этом в той или

иной степени восстанавливаются высшие пространственные частоты (ПЧ) в двумерной частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) тракта дистанционного зондирования (ДЗ) для данного изображения [6] (в соответствии с выдвинутой моделью Бейтса и Мак Доннела формирования изображения с аналитической записью в виде интегрального уравнения Фредгольма [7]).

Неполнота в спектральном представлении ФРТ или ошибки в ее измерении при деконволюции могут приводить к результатам, говорящим о том, что в процессе обработки резидентно присутствовало нежелательное изменение контраста, принимаемое визуально как улучшение резкости или процесс деконволюции не был доведен до необходимого этапа.

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

Существенную роль при этом играет учет достоверности измерения ФРТ на исходном изображении в виде метода корректировки результатов функционирования итеративного интегрального оператора деконволюции исходного изображения. В основе метода лежит оценка достоверности функции рассеяния точки, композированной из функций рассеяния, определяемых по опознанным опорным ориентирам (ОО): пошаговым перебором ФРТ из интервала достоверности с одновременным удовлетворением требованиям к погрешности вычисления итеративных операторов и к разности этих погрешностей при переборах ФРТ. При этом сходимость апертур ФРТ к минимуму характеризуется достаточным уровнем неравномерности. В работе представлено решение этих проблем для изображений, сформированных постфактум в одном спектральном канале оптико-электронной аппаратуры спутника, без привлечения технологий обработки материалов многоспектрального ДЗ и компенсаций смазов по данным орбитальной кинематики.

### 1. Каноническое представление задачи снижения апертуры функции рассеяния точки на изображении

Современные технологии снижения на космических изображениях апертур ФРТ, выполняемые с неполным описанием ФРТ в пространственно-частотных спектрах (ПЧС) при оценках ФРТ по опознаваемым объектам, линиям, границам, нередко приводят к окончательному формированию изображения высокого и сверхвысокого разрешения, на котором присутствует «остаточная» ФРТ с апертурой, превышающей размеры пиксела в нецелое число раз. Замерить такую ФРТ прямыми методами весьма затруднительно. Пятно ФРТ при этом от начального состояния, соответствующего регулярному его представлению в виде геометрического образа, при снижении его радиуса с учетом измерительной информации – значений углов ориентации оптической оси, формирующей системы, и кинематических орбитальных параметров преобразуется в пикселизованную «картинку», для которой эти мето-

ды снижения апертуры ФРТ теряют свою эффективность.

Строя деконволюцию – решение интегральных уравнений Фредгольма с использованием модифицированных фильтров Винера, т.е. спектральных представлений оператора деконволюции (СПОД), и корректируя СПОД с минимизацией невязки обратной оптимизированной частотно-контрастной характеристики тракта зондирования  $1/(ЧКХ)$  и СПОД на этапах итеративного процесса коррекции, можно определить необходимую для пополнения спектрального описания ФРТ частотно-зависимую добавку к ФРТ, и на основе метода возмущений спектров операторов в Гильбертовом пространстве реализовать оптимальный итеративный оператор деконволюции изображения [8-12].

Первичная ЧКХ для последующей оптимизации определяется классическим отношением ПЧС исходного и корректируемого изображений в специальном разработанном аддитивном представлении задачи коррекции изображения на основе обобщенного градиентного оператора с варьируемым порядком [8,10,13].

Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях:

- минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;
- максимальной гладкости ЧКХ;
- наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта;
- мажорирования огибающей ЧКХ огибающую  $1/СПОД$  даже с возмущающей добавкой;
- вписывания огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении ОО в огибающую ЧКХ;
- не превышения значением порядка обобщенного градиентного оператора порога, при котором резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров в первом шаге коррекции – аддитивной коррекции, представленной в [8,10,11] (с возможностью компенсации тенденции спада огибающей ЧКХ) в виде соотношения

$$S_H = S_R + a \text{grad}_\alpha (S_R), \quad (1)$$

где  $S_R$  – формируемое изображение;  $S_{II}$  – восстанавливаемое изображение,  $a$  – варьируемый при оптимизации ЧКХ коэффициент аддитивной коррекции резкости с использованием обобщенного градиентного оператора  $grad_{\alpha\beta}(S)$  в виде  $grad_{\alpha\alpha}(S) = grad_{\alpha}(S)$ , где градиентный оператор конструируется в виде нормы вектора  $(D_x^{\alpha}S(x, y), D_y^{\beta}S(x, y))$  т.е.

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

а операция  $D^{\alpha}$  имеет нецелый неотрицательный порядок [13].

Формулы, соответствующие перечисленным функционалам оптимизации ЧКХ, итеративным операторам деконволюции изображения с частотно-зависимой возмущающей добавкой и их спектральным представлениям, выведенные в работах [8-11] в данной статье не приводятся по причине высокого их объема в печатной форме. Физический смысл оптимизации ЧКХ: деформация огибающей ЧКХ на любом азимутальном срезе при переборе параметров коррекции в формуле (1) к квазипрямоугольному окну пропускания ПЧС при недостижении нежелательных эффектов контрастирования изображения [8].

Уменьшение по описанному методу апертуры ФРТ является одновременно и измерением «малых» ФРТ методом сравнения радиусов ПЧС изображений – исходного и откорректированного.

«Соотношение неопределенности» для сопряженных – прямого и обратного 2D-Фурье-преобразования формируемого изображения – можно записать в виде

$$\delta\omega\delta t = C, \quad (3)$$

здесь множители определяются как нормы векторов  $\delta\omega = \|(\delta\omega_x, \delta\omega_y)\|$ ,  $\delta t = \|(\delta t_x, \delta t_y)\|$ , где  $\delta\omega$  – оценка радиуса ПЧС изображения,  $\delta t$  – возможная точность временного позиционирования элемента на изображении на уровне 0,1 вероятности ложной тревоги или разрешение на оси времени,  $C$  – константа, зависящая от уровня ложной тревоги и вида огибающей импульса, т.е. зависящая от профиля функции неопределенности [14], вычисляемой на тестовом объекте при формировании изображения.

Можно записать соотношение

$$\delta\omega\delta t \text{ СДИ} / \text{СДИ} = \delta\omega\delta r / \text{СДИ} = C, \quad (4)$$

где  $\delta r$  – оценка погрешности пространственного позиционирования объектов на изображении на уровне 0,1 вероятности ложной тревоги или пространственное разрешение по Рэлю,  $\text{СДИ}$  – скорость движения изображения на фотоприемниках оптико-электронного прибора (ОЭП), откуда следует, что

$$\delta r = C \text{ СДИ} / \delta\omega. \quad (5)$$

Наличие ФРТ даже с апертурой, сравнимой с апертурой пикселей и меньше апертуры пикселей снижает ширину пространственно-частотного спектра изображения  $\delta\omega$  и создает резерв и предпосылки для снижения апертуры ФРТ, что соответствует улучшению резкости на изображении (5). В данном случае считаем решенной важнейшую задачу компенсации возмущений на формируемом изображении за счет несовпадения СДИ фактической и запрограммированной по прогнозируемым кинематическим параметрам орбитального движения аппарата. Отклонение значений СДИ на фотоприемниках бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) космического аппарата (КА) в сторону уменьшения от верно заданного программного значения приводит к формированию изображения с псевдопериодическими полосами с пониженным отношением сигнал/шум [15], а отклонение в сторону увеличения – к формированию функции рассеяния точки – смазу и, как следствие, уменьшению радиуса ПЧС изображения [16]. Реализовать снижение  $\delta r$  после внесения коррекций по СДИ целесообразно строго за счет снижения апертуры присутствующей остаточной ФРТ, т.е. за счет расширения полосы  $\delta\omega$ , что и соответствует увеличению разрешающей способности (или резкости). В целом, следует отметить, что при отклонении значений СДИ на фотоприемниках космического аппарата (КА) от «запрограммированной» для участка орбиты КА формируется дополнительная к атмосферной функция рассеяния точки [16], подавление которой осуществляется соответствующими коррекциями изображения по текущим навигационным параметрам аппарата, включая значения измеренных рысканий, тангажей и кренов. При этом

остаточная ФРТ может подавляться обратными, инверсными и как модификации инверсных – Винеровскими с применением регуляризации Тихонова фильтрами.

Методы слепого определения ФРТ [17] и, соответственно, восстановления резкости, выполняющиеся при невозможности опознавания ОО, например, при пролете над ландшафтами без объектов антропогенного происхождения, так или иначе исходят из принимаемой гипотезы о соответствии структур изображения некоторому «идеальному состоянию» без наличия ФРТ и представляют собой отдельное научно-техническое направление, которое в данной работе не рассматривается.

Реальная ФРТ неизопланатична из-за наличия до уровня 0.0001% от энергии изопланатичной составляющей неучитываемой стохастической компоненты энергии ФРТ. В большинстве случаев стохастическую компоненту ФРТ приписывают к шуму на изображении. Отсюда следует необходимость соблюдения высокого уровня точности оценки ФРТ или внесения соответствующих коррекций в деконволюцию изображения.

Построенные в [8-11, 18] на модификациях и возмущениях инверсного фильтра итеративные интегральные операторы деконволюции, поддерживающие корректность измерительных свойств изображений, представляют собой известные (хотя и модифицированные) формулы Ван Циттера [19], т.е. формулы получения ядра интегрального оператора обратным преобразованием Фурье от используемого в итеративном процессе спектрального представления (СП) фильтрации. Упомянутые выше пространственно-частотные характеристики фильтров коррекции резкости являются результатом проектирования ядер интегральных операторов на ортонормированную систему тригонометрических функций. Это не решение задачи на собственные значения для оператора деконволюции, и их СП не являются спектром оператора в популярном смысле [20, 21], также как не являются в означенном смысле спектром оператора ни ЧКХ, ни большинство известных линейных фильтров в частотной области [19]. Итеративная деконволюция с недостатком по числу шагов, возникающим при возможной

недооценке реально имеющейся на изображении апертуры ФРТ, приводит к неполной фокусировке изображения при восстановлении резкости, а при избытке числа шагов, возникающем при переоценке апертуры реальной ФРТ проявляются на последних шагах итераций описанные в [8] эффекты паразитного контрастирования. Для сохранения измерительных свойств изображений высокого разрешения это губительно. Отметим, что замеряемое посредством тест-объекта, поддерживаемое изображением пространственное разрешение и резкость, определяемая углом или скоростью изменения контраста на его фронтах, определяются высшей модой в ПЧС его изображения и линейно связаны [22]. При этом, в работе [22] введено определение разрешения (и, следовательно, резкости) как меры Лебега диаметра открытого множества значений верхних пространственных частот изображений объектов. Отметим, что описанная оптимизация ЧКХ тракта ДЗ является снижением в необходимой, но недостаточной степени редукции виртуальной «квазипрямоугольной» огибающей ЧКХ за счет расширения ПЧС ФРТ, сформированной в тракте.

## 2. Повышение резкости сформированного изображения с учетом достоверности оценок функции рассеяния точки

Формирование изображения без учета (или при подавлении) артефактов, вызываемых возмущением СДИ, в модели Бейтса и Мак Донне-ла представляется в аналитической записи для изображений высокого и сверхвысокого разрешения в виде Фурье-представления интегрального уравнения Фредгольма [23]:

$$F(S_R) = F(S_H) \cdot F(\Phi PT), \quad (6)$$

где  $\Phi PT$  является ядром интегрального преобразования (свертки),  $F(S)$ ,  $F(\Phi PT)$  – Фурье-спектры объектов. Определяемая из (6) для каждого из ОО или полигонных объектов  $S_{oo}$  и их эталонов ( $\mathcal{E}$ ) –  $S_{no}$  уникальная ЧКХ тракта в виде

$$F(\Phi PT)_i = F(S_{oo})_i / F(S_{no})_i \quad (7)$$

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

$$\Phi PT_0 = F^{-1}(\bigcup_i^N F(\Phi PT_i)) \quad (8)$$

и выводит на инверсную фильтрацию

$$F(S_H) = F(S_R) / F(\Phi PT_0) = F(S_R)(F(\Phi PT_0))^{-1}, \quad (9)$$

здесь  $F^{-1}$  – обратная Фурье-процедура, а  $(F)^{-1}$  – деление единицы на отсчеты комплексного спектра  $F$ .

Множества гармоник  $F(\Phi PT_i)$  определяются как нечеткие множества с функциями принадлежности на них  $\mu_i$ , равными коэффициентам корреляции соответствующих  $S_{oo}$  и  $S_{no}$ . 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  $\mu_i$  [8].

Коэффициент корреляции не может быть равен 1, иначе ОО и Э идентичны, и тогда нет постановки задачи, ниже 0.7 – запрещенные значения, т.к. отсутствует при этом возможность доказать, что это сопряженная пара ОО и Э. Следует сделать оговорку: значение коэффициента корреляции, допустим, 0.7, а распознавание ОО и идентификация его соответствия эталону должна сопровождаться уровнем ложной тревоги не выше 0.1, т.е. распознавание и идентификация выполняются при дополнительных признаках [13]. Например, наблюдаемый ОО – самолет, тогда его можно сравнивать только с эталоном самолета F105R, и выяснить, к примеру, что на отслеживаемом аэродроме других не бывает. В  $F(\Phi PT_0)$ , которое и порождает инверсные и Винеровские фильтры с модификациями, включая модификации на частотно-зависимую добавку [8], каждая  $i, j$ -ая мода характеризуется индивидуальным значением функции принадлежности  $\mu_{ij}$ , определенной по минимаксной формуле для соотношения (8), оперирующей значениями коэффициентов корреляции эталонов и ОО.

Значение взвешенной суммы вида

$$\mu_{oo} = (\sum_{i,j}^{N,M} \mu_{oij} (F(\Phi PT_{0ij})^2) / (\sum_{i,l}^{N,M} (F(\Phi PT_{0il})^2)), \quad (10)$$

где  $\mu_{oo}$  находится только в пределах  $0.7 \leq \mu_{oo} < 1$ , целесообразно принять за достоверность  $F(\Phi PT_0)$  и  $\Phi PT_0$ .

Соотношение согласования ЧКХ и ФРТ на фоне модифицированной фильтрации Винера при оптимизации ЧКХ для дальнейшего вычисления частотно-зависимой добавки к спектру ФРТ имеет вид [11]:

$$\begin{aligned} & \max_{\omega_i, \omega_j} \text{ЧКХ}(\omega_i, \omega_j) - \\ & - \max(H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}))^{-1} = \\ & = R_4 = \min > 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $H(\omega_i, \omega_j) = F(\Phi PT_0)$  – по условиям синтеза характеристики фильтра,  $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$  – регуляризаторный спектральный компенсатор ПЧС шума на изображении [8].

По вычисленной  $\mu_{oo}$  определим разброс  $\Delta A$  апертур ФРТ, используя множитель вида  $1 - \mu_{oo}$  на расширение и сужение выявленной апертуры  $A(\Phi PT)$ :

$$\Delta A(\Phi PT) = A(\Phi PT)(1 - \mu_{oo}). \quad (12)$$

При этом ФРТ интерполируется на новые апертуры с сохранением ее энергии (суммы квадратов аппликат).

Далее выполняется специальная коррекция резкости (СКР) в соответствии с техникой, представленной в работах [10, 11], с пошаговым малым наращиванием «заниженной» апертуры ФРТ до остановки процесса роста резкости на каждом шаге и СКР с пошаговым малым уменьшением «завышенной» апертуры ФРТ до появления на каждом шаге отмеченных в [8] артефактов в виде паразитного контрастирования. Для итеративного оператора деконволюции на «нисходящем» по значениям апертур ФРТ процессе в СКР строится из значений минимальных погрешностей останова итераций  $\{\rho(S_H^{(n)}, S_H)\}_Z$  пошаговая последовательность внешних мер и, с учетом «восходящего процесса», внутренних мер Лебега при оценках  $\Delta\rho(S_H^{(n)}, S_H)_k$  вплоть до успокоения процесса при

достижении по норме заданной погрешности  $Q$ , причем

$$\Delta\rho(S_H^{(n)}, S_H)_k = \left\| \left\{ \rho(S_H^{(n)}, S_H) \right\}_g - \left\{ \rho(S_H^{(n)}, S_H) \right\}_z \right\| \leq Q, \quad (13)$$

где  $k = k(z, g)$  – индекс успокоения, определившийся числом шагов  $z$ , и  $k = g$  – получения «нисходящей» и «восходящей» последовательности итеративных деконволюций, соответственно.

Необходимо заметить, что монотонность в пошаговом наращивании или уменьшении апертур ФРТ на запуск итераций порождает монотонность тенденции изменений резкости, получаемой при заданной погрешности итеративных процессов, но дисперсия отклонений получаемых резкостей от оси выявленной тенденции может превышать указанную погрешность. Проведенный анализ соотношений (6), (7) и (8) как базовой модели коррекции резкости приводит к выводу, что «всплески» резкости на фоне тенденции изменения при принятом алгоритме построения последовательности ФРТ с сохранением ее энергии определяются (в первом приближении) уровнем энергии ПЧ изображения, совпадающей со средневзвешенной модой в ПЧС, используемой в данный момент ФРТ. Погрешность успокоения  $Q$  (при  $\Delta\rho(S_H^{(n)}, S_H)_k \leq Q$ ) устанавливается, по крайней мере, на порядок меньше погрешности вычисления операторов деконволюции, т.к. в соответствии с теорией меры Лебега она моделирует интервал меры нуль [24], определяющий меру совпадения двух типов мер Лебега для итоговых результатов. Невозможность установки столь малой погрешности  $Q$  констатирует факт сильно неизопланатичной ФРТ на сформированном изображении. Эта задача в данной статье не рассматривается. Значение реализованной при этом меры Лебега для резкости можно определить по тест-объекту на полученном изображении  $S_H$  в соответствии с соотношением (13) и определениями резкости в работе [22]: вычислить классически внутреннюю меру Лебега  $m_i[SS]$  множества точек на оси резкости  $SS$  как разность диаметра  $\inf\{RS_z\}$  с точками – значениями резкости, соответствующими минимуму значений в последователь-

ности внешних покрытий множества диаметров, ассоциированных с  $\{\rho(S_H^{(n)}, S_H)\}_z$  оси погрешностей для множества  $SS$  и внешней меры  $\inf\{RS_g\}$ , ассоциированной с точками  $\{\rho(S_H^{(n)}, S_H)\}_g$ , являющимися дополнением к множеству внешних покрытий, ассоциированных с  $\{\rho(S_H^{(n)}, S_H)\}_z$  оси погрешностей (что соответствует классическому определению и соотношению между внешней и внутренней мерами Лебега). Представление результатов СКР в мере Лебега необходимо для оптимальной фильтрации с регуляризацией по технологии работы [22] с целью дополнительного улучшения результата при соблюдении неучтенных в работе [22] ограничений, выдвигаемых технологией СКР.

Задача применения технологии фильтрации, оптимальной по разрешению, упрощается, если для ОО используется подобранный эталон.

Пространственная разрешающая способность по Рэлею, достигаемая при СКР, параметрически задается значением, обратным значению соответствующего разрешения по Фуко, определяемого высшей ПЧ в спектральном портрете репрезентативного для данного изображения объекта с максимальной степенью репрезентативности. Это означает, что этот объект порождает двумерный спектр Фурье, практически полностью совпадающий по диаметру с диаметром спектра всего изображения или, если упоминаемое совпадение нарушено этот объект компонуется как комплексный объект из более примитивных, но так, чтобы восстанавливалось упоминаемое совпадение диаметров спектров. Для репрезентативного объекта его эталон с устраненными всевозможными невязками отображения [13], т.е. отличающийся от ОО только диаметром спектра, причем в большую сторону, демонстрирует в данном случае предельно достижимое (эталонное) пространственное разрешение. Для построения меры Лебега используем этот эталон и значение резкости  $R_i$  при его отображении. При решении задачи восстановления резкости внешняя мера  $MR_i$  резкости  $R_i$  определится классически  $MR_i = \inf\{R_i\}$  (что соответствует мере разрешения по Фуко:  $\inf\{w_{vi}\}$ , где  $w_v$  –

верхняя мода в двумерном спектре тестируемого объекта). Для построения внутренней меры этот эталон также необходим как покрывающий при его отображении значением резкости результаты СКР сверху.

К множеству значений восстановленной резкости найдем дополнение  $R_{oi}$

$$R_{oi} = R_o - R_i. \quad (14)$$

Внутренняя мера  $MR_{in}$  определится как

$$MR_{in} = R_o - \inf\{R_{oi}\}. \quad (15)$$

Следует заметить, что в выражении (15) указывается сильная зависимость внутренней меры от значения  $R_o$ , однако это не совсем так; более того, при случае совпадения внешней и внутренней мер Лебега значение  $R_o$  будет нейтрализовано вычитанием  $R_o$ , которое содержится в (14).

В более общих случаях, когда допускается несовпадение внутренней и внешней меры Лебега, влияние  $R_o$  ослабляется по тем же причинам, и значение  $R_{oi}$  будет модулировано близким к единице множителем, но зависимость внутренней меры от качества выбранного эталона имеет место.

Для всех упомянутых выше представлений Ван Циттера формула погрешности итерационного процесса имеет вид [12]:

$$\rho(S_H^{(n)}, S_H) \leq (\|T\| \rho(S_H^{(n)}, S_H^{(n-1)})) / (1 - \|T\|), \quad (16)$$

где  $\rho(S_H^{(n)}, S_H) = (\sum_{i,j} (S_{H_{ij}}^{(n)} - S_{H_{ij}})^2)^{1/2}$  – евклидова метрика, а  $\rho(S_H^{(n)}, S_H^{(n-1)})$  исчисляется аналогично; норма оператора  $T$  в соответствии с технологией СКР равна

$$\|T\| = \|F^{-1}(1 - H) * S_H^{(n-1)}\| / \|S_H^{(n-1)}\|, \quad (17)$$

где числитель и знаменатель – евклидова норма (формула Пифагора) на компонентах векторов.

Чувствительность метода к детальности перебора ФРТ из интервала достоверности и шаг приращений апертур ФРТ определяются дифференциалом правой части выражения (16) с подстановками: вместо  $\rho$  значения  $Q$  ( $\Delta\rho(S_H^{(n)}, S_H)_k \leq Q$ ) и соотношения  $H(\omega_i, \omega_j) = F(\Phi PT_0)$  в (17).

Если  $S_H$  сдвинуть на одну десятую часть доли апертуры пиксела, то в фазовом спектре появится множитель с гармоникой в 10 раз выше предельной частоты тракта, перераспределение яркостей на изображении будет практически незаметным. Это демонстрирует эффект сдвига изображения на величину, представляющую собой модель меры нуля в финитном спектре [24]. Но в пределах штатной спектральной ширины (диаметра ЧКХ) тракта зондирования в силу фундаментальной теоремы Котельникова об отсчетах эти все виртуально сдвинутые изображения тождественны, если только не строить технологию сверхразрешения на упомянутых сдвигах: получаемое изображение при пикселизации не совпадает ни с одним из исходных, но удовлетворяет погрешности  $\Delta\rho(S_H^{(n)}, S_H)_k$ , что не противоречит теореме Агеева [25]. Соответствующие изображения, свидетельствующие о неоднозначности результатов коррекции по резкости, неотличимые визуально, в метрике Евклида накапливают ненулевую разницу, т.е. показывают ненулевое расстояние.

Нанесение нулевых пикселов на фрейм для выявления самого ОО из фона – это задача корректного определения контуров, обрамляющих ОО, иначе в процессе определения ФРТ будут участвовать и пикселы фона. Целесообразно это реализовать веерными фильтрами [13] с учетом технологии, представленной в работах [26, 27].

Анизотропия радиуса корреляции линейного образа объекта антропогенного происхождения в отличие от радиуса корреляции шума делает веерный фильтр особенно чувствительным к отклонению азимута фильтрации, т.е. к отклонению направления простираения границы образа объекта, что повышает профит фильтра, а для криволинейных границ или контуров эффект фильтрации сохраняется при многократном запуске фильтра, но с малой базой, соответствующей разложению участка кривой в соответствии с алгоритмом Брезенхейма или переходом к Фурье-представлению веерной фильтрации [13, 28]. На Рис. 1 приведены исходное тестовое изображение, зашумленное изображение и сравнительные результаты исследования веерного фильтра.

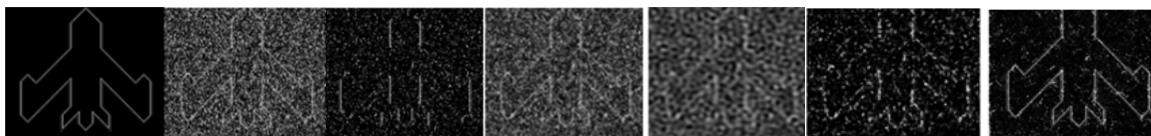


Рис. 1. Слева направо: исходное тестовое изображение; зашумленное равномерным нормальным шумом исходное тестовое изображение (соотношение сигнал/шум=0.8); далее результаты обработки зашумленного тестового изображения: фильтром Винера, линейным матричным фильтром с нормализацией, линейным фильтром в частотной области с обнулением кольца пространственных частот с номерами выше 50, адаптивным фильтром графического пакета PHOTOPAINT, веерным фильтром с параметрами: количество проходов – 2, длина базы – 17 и 5, количество направлений – 36.

Для выделения ОО на приведенных ниже материалах с аппарата OrbView-3 – самолете на стоянке и его эталоне – более резком изображении, выделялись для корректного оконтуривания опорного ориентира (и эталона) компоненты изображений – локальные спектральные максимумы в выделенных участках спектра фрейма с объектом. Далее находился энергетический максимум результатов веерной фильтрации в разных базах фильтрации, не выходящих по величине за пределы соотношения неопределенности для данной выделенной полосы. Полный портрет ОО и эталона реализовался операцией объединения обработанных участков спектра и обратным Фурье преобразованием [13].

На Рис. 2 представлены рабочие фрагменты исходного и расфокусированного изображений и их Фурье-спектры.

На Рис. 3 можно видеть эталон и соответствующий опорный ориентир с устраненными

взаимными невязками геометрии, масштаба, угла поворота, гистограммы. Они выбраны на соответствующих паттернах изображения и отфильтрованы от фона, помещены в рабочий фрейм и приведены к виду, инвариантному к углу места солнца.

На Рис. 4 приведены ФРТ для пары эталон-ОО и спектры Фурье эталона и ОО.

Приведенные на рисунке спектры инвариантны к углу места солнца объектов «отслеживают» угол места солнца, т.к. соответствующая программа для синтеза инвариантов штатная и, возможно, еще нуждается в модернизации.

На Рис. 5 приведен результат с более высоким значением резкости, полученный в описываемой технологии учета достоверности определения ФРТ и фильтрацией шума с введением меры Лебега для резкости в соответствии с технологией, представленной в [22], с расширением числа ОО, выбранных на исходном

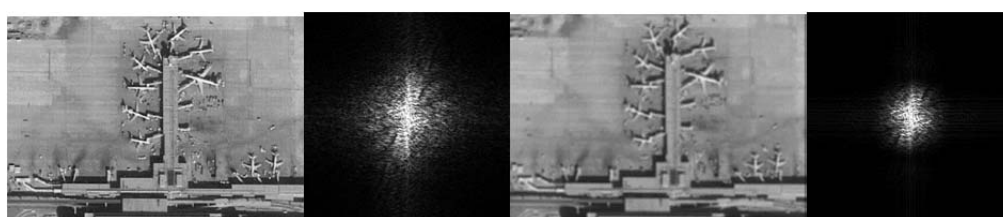


Рис.2. Слева направо: рабочие фрагменты исходного и расфокусированного изображений и их Фурье-спектры



Рис.3. Слева направо: эталон и соответствующий опорный ориентир с устраненными взаимными невязками, выбранные на соответствующих паттернах изображения и отфильтрованные от фона; далее эталон и соответствующий опорный ориентир, помещенные в рабочий фрейм и приведенные к виду инвариантному к углу места солнца



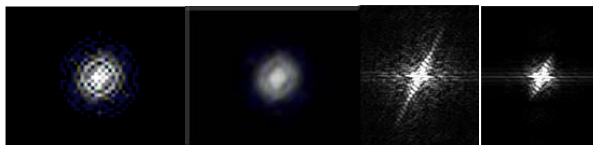


Рис.4. Слева направо: определенная по спектрам Фурье ОО и эталона ФРТ, сглаженная ФРТ, спектры инвариантных к углу места солнца эталона и ОО

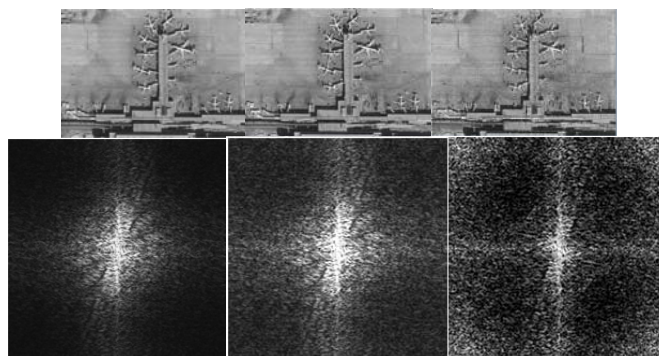


Рис.5. Слева направо: результат СКР, результат с учетом достоверности ФРТ, результат срыва корректности работы СКР на последующей итерации в СКР (изображения и их ПЧС)

снимке. В последовательности итеративных деконволюций полученный результат стоит после последней итерации в предыдущей версии коррекции резкости [11] и перед наступающим срывом корректности в коррекции резкости в предыдущей версии.

## Заключение

Разработан метод корректировки результатов функционирования итеративного интегрального оператора деконволюции исходного изображения по оценке достоверности функции рассеяния точки, композируемой из функций рассеяния, определяемых по опознанным опорным ориентирам. Метод разработан как модернизация представленной ранее специальной коррекции резкости на изображениях высокого разрешения с сохранением измерительных свойств изображений [8, 9, 11]. В литературных источниках нет сведений о постановках задач восстановления действительной огибающей светосигнальной характеристики, т.е. ЧКХ тракта и пространственного спектра частот объекта съемки, то есть точного изображения как образа объекта, так и пространственного его спектра, что требуется в ДЗ, а ставятся задачи улучшения практически визуального ка-

чества, понимаемого как резкость (при этом достигаемые результаты по резкости нередко путаются с интрузивными резидентными описанными артефактами, т.к. не ставится задача соответствующего контроля). Кроме того, в литературных источниках не отмечены постановки задач на оптимизацию ЧКХ, приведенную в работе, и в современных методах деконволюции, как правило, в качестве критерия остановки итеративного процесса используется критерий минимума нормированной среднеквадратической ошибки оценивания, никак не связанный с ограничениями усиления высших мод ПЧС обрабатываемого изображения. Это и является отличием представленного метода коррекции от подавляющего множества методов деконволюции, в особенности и на космических изображениях. Необходимо отметить, что современные технологии и приведенные соответствующие результаты по итеративному восстановлению расфокусированных изображений с использованием модификаций формул Винера не сопровождаются оценкой уровня достоверности «стартовой» ФРТ. Однако всегда коэффициент корреляции между ОО и его эталоном для вычисления ФРТ будет и должен быть меньше единицы. Это принципиально снижает уровень достоверности измерения или

синтеза по многим ОО самой ФРТ, что вынуждает подобно приведенному в данной работе подходу предпринимать дополнительные меры к обеспечению достоверности и единственности решений по деконволюции изображения в пределах задаваемой погрешности.

Авторы благодарят коллектив 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, а также А.Б. Петровскому за помощь в подготовке данной публикации.

## Литература

1. Рашупкин А.В. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений//Повет, 2008. № 11. С. 42-48. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 2, 2010.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений/ Р.А. Шовенгердт. Москва, «Техносфера», 2010, 560 с.
3. 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.
4. <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.
5. 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, С. 9-13, 2010, изд. ИКИРАН.
6. 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.
7. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989, 336 с.
8. Винтаев В.Н., Жилнев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы». – Москва. Издательство института системного анализа (ИСА) РАН- 2014. №4.- С. 33-43.
9. [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf) (прямая ссылка). Жилнев М.Ю., Маторин С.И., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. Специальная коррекция космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения//Презентация доклада на Двенадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" 10 - 14 ноября 2014 г. Москва, Институт космических исследований РАН. (7.8 мб). [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf). Архив конференций. Презентации устных докладов. Методы и алгоритмы обработки спутниковых данных.
10. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилнев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2014. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разрешения. Научные ведомости Белгородского государственного университета. – История, Политология, Экономика, Информатика. Научный рецензируемый журнал, 8 (179): С.189–199.
11. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилнев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2014. Специальная коррекция в процедурах регуляризации и итеративных процессах уменьшения размеров пятна функции рассеяния точки на космических изображениях. Научные ведомости Белгородского государственного университета. - История, Политология, Экономика, Информатика. Научный рецензируемый журнал, 15 (186): С. 166–175.
12. Фридрихс К. Возмущение операторов в гильбертовом пространстве. М. «Мир».1969, 231 с.
13. Ушакова Н.Н. 2004. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 255 с.
14. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника/В.И. Тихонов. - М.: Советское радио, 1966, 677 с.
15. Блажевич С.В., Винтаев В.Н., Жилнев М.Ю., Ушакова Н.Н. Цифровая коррекция возмущений изображения, формируемых панхроматической оптико-электронной съемочной аппаратурой КА «Монитор». Научно-техническая конференция «Техническое зрение в системах управления-2011» ИКИ РАН, тезисы докладов, Москва 2012, С. 83-92.
16. Жилнев 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.
17. Остриков В. Н. 2012. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления. В кн.: Техническое зрение в системах управления 2011. Материалы научно-технической конференции (Москва, 15-17 марта 2011 г.). Москва, Изд-во Института космических исследований РАН: т.38: С.16-21.
18. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. 2010. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии. Солнечно-земная физика, №16: С.154–161.

19. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. 2002. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 352 с.
20. Морен К. 1965. Методы Гильбертова пространства. Пер с польск. М., Мир, 570 с.
21. Коллатц Л. 1969. Функциональный анализ и вычислительная математика. Перснем. М., Мир, 447 с.
22. Удод В.А. 2002. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. Дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Томск, 338 с.
23. Бейтс Р., Мак-Доннел М. 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М., Мир, 336 с.
24. Владимиров В.С. 1967. Уравнения математической физики. М., Наука, 436 с.
25. Финк Л.М. 1984. Сигналы, помехи, ошибки. М., Радио и связь, 258 с.
26. Кольцов П.П. Эмпирический подход к оценке алгоритмов выделения границ//Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2011. №2, С. 50-57.
27. Бобков В.А., Роньшин Ю.И. Автоматическое сопоставление линий на калиброванных изображениях// Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2010. №4, С. 16-24.
28. Ушакова Н.Н. 2011. Вычислительные алгоритмы в компьютерной графике и обработке изображений. Белгород, Изд-во БУКЭП, 193 с.

**Винтаев Виктор Николаевич.** Доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права. Окончил Харьковский институт радиоэлектроники в 1971 году. Кандидат технических наук, доцент. Автор 110 печатных работ. 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.** Ведущий конструктор конструкторского бюро «Салют» ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева». Окончил Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии в 1979 году. Автор 30 печатных работ. Область научных интересов: методы формирования и обработки космических изображений высокого разрешения. E-mail: zhilnev\_mihail@mail.ru

**Маторин Сергей Игоревич.** Профессор кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники в 1977 году. Доктор технических наук, профессор. Автор 150 печатных работ. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, семантика, когнитология, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: matorin@softconnect.ru

**Ушакова Наталья Николаевна.** Доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права. Окончила Воронежский государственный университет в 1987 году. Кандидат технических наук, доцент. Автор 98 печатных работ. Область научных интересов: системный анализ, цифровая обработка сигналов, распознавание образов. E-mail: natush2006@ua.ru