

УДК 528.72; 629.7

DOI 10.18413/2075-4639-2018-50-3-355-366

**МЕТОД ПРОДОЛЖЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ  
СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОДЕЛИ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**METHOD OF CONTINUING THE SPECTRA IN THE REALIZATION  
OF SUPER-RESOLUTION WITH THE USE OF IMAGES OF THE MODEL  
OF GROUPING OF SPACE APPLIANCES**

**В.Н. Винтаев**  
**V.N. Vintaev**

Белгородский университет кооперации, экономики и права, Россия, 308023, г. Белгород,  
ул. Садовая, 116а

Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116aSadovaya St, Belgorod, Russia

E-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

**Аннотация**

Методы продолжения спектров, в том числе методы аналитического продолжения, могут служить средством коррекции резкости на космических изображениях, но обладают недостаточно широким диапазоном коррекции. Модификация разработанного на основе аддитивной коррекции резкости итеративного метода продолжения спектра согласованием результатов этапов с требованиями отсутствия перерастания процедур коррекции в контрастирование изображения позволяет расширить диапазон значений коррекции резкости и использовать его в формировании изображений сверхвысокого разрешения в модели группировки спутников.

**Abstract**

Techniques continue of the spectra, including methods of analytic continuation can serve as a means of setting the focus on the space images, but have not a wide enough range of correction. The modification was developed based on the additive correction of field iterative method continue spectrum coordination results of the stages with the requirements of the absence of escalation procedures for the correction of the contrast of the image allows to extend the range of the correction values of field and use of imaging very high resolution model of the constellation of satellites.

**Ключевые слова:** сверхразрешение, деконволюция, продолжение спектра, группировка спутников, апертура пиксела.

**Keywords:** super-resolution, deconvolution, continuation of spectrum, satellite grouping, pixel aperture.

---

**Введение**

Во многих экспериментах с технологиями формирования космического изображения сверхвысокого разрешения, построенными на инспирированных или реальных космических исходных изображениях высокого разрешения группировки спутников [1,2,3,4], можно видеть, что апертура пикселей на сформированном со сверхразрешением изображении иногда до полутора раз меньше минимальной средней апертуры сверхмалых и разрешаемых по Рэлю объектов на изображении, что говорит о наличии остаточной функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении, относительно которой можно еще предпринимать



меры по снижению ее апертуры. Одним из методов уменьшения апертуры ФРТ является метод продолжения спектров изображений, даже с постановками задач продолжения за так называемый дифракционный предел разрешения системы формирования изображения (в данной работе – за пределы спада полосы прозрачности сформированного для исходных изображений тракта дистанционного зондирования) [5].

Алгоритмы уменьшения апертуры ФРТ на изображении соответствуют процессам повышения резкости и, соответственно, реализуемого изображением пространственного разрешения, а увеличение резкости соответствует увеличению радиусов пространственно-частотных спектров (ПЧС) образов на изображениях и панорамах самих изображений [6]. Выполнение обработки изображений так, чтобы она характеризовалась приведенной последовательностью связей событий в обратном порядке и есть метод продолжения спектров. В работе [7] представлен метод аналитического продолжения спектра способом проектирования его на ортонормированную систему сфероидальных волновых функций. При этом в методе аналитического продолжения предполагается и показано, что именно аналитическое продолжение спектра позволяет сохранить при расширении полосы ПЧС свойства, характерные для регулярных функций. Однако реализация требования неполучения при этом огибающей результирующего спектра, свойственной и для увеличения контраста изображений, сдвигающего значения яркостей к верхним уровням и снижающего при необходимой нормализации изображений разрешение мелких деталей на изображении в методе продолжения спектров не рассматривалась, что приводило к слишком малому количеству гармоник продолжения спектра (в литературе нет сведений о том, чтобы авторы продолжений спектров не позволяли процедурам продолжения спектров вызывать усиление контраста изображений, когда продолжение спектра есть, а улучшения дальнейшего резкости нет, при этом популярный пример продолжения спектра, спадающего к нулю по экспоненциальному закону, например, можно моделировать покомпонентным его перемножением на подобранную по желанию возрастающую функцию частот [8]).

Цель работы: Построение модели группировки аппаратов с формированием сверхразрешения на изображении ареала в тракте зондирования со спутника с коррекцией резкости методом продолжения спектров, согласованным с требованиями неконтрастирования изображения, т. е. согласования этапов метода с оптимизированной частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) тракта [9].

### **1. Метод продолжения спектра изображений в технологии сверхразрешения**

Основным недостатком метода аналитического продолжения спектра является то, что спектр с аналитическим продолжением, измеряемый в расширенной области полученной «прозрачности» изображающей системы, фактически состоит из двух составляющих – спектра изображения и шумового спектра и, соответственно, вычисление коэффициентов экстраполяции спектра не обеспечено достаточной степенью достоверности. Эксперименты показывают, что аналитическое продолжение спектра за дифракционный предел, а в нашем случае за пределы радиуса ЧКХ сформированного тракта зондирования, возможно с восстановлением всего нескольких пространственных частот, если энергетическое отношение вида сигнал/шум на изображении было не ниже 1000/1 [7]. Для снимков высокого разрешения, это условие является практически нижней границей, т. к. по условиям рассеяния высших мод на ареалах, ПЧС от мешающих и создающих шум потоков как раз удовлетворяет такому соотношению из-за того, что формирование изображений на транспарантах осуществляется в так называемой зоне разделения пространственных спектров – зоне Фраунгофера [2]. Альтернативно методам аналитического продолжения спектров, разработанный метод деконволюции в виде аддитивной (предварительной) и

специальной (тонкой) коррекции с выполнением условий отсутствия перерождения процессов обработки в контрастирование [9, 10, 11] тоже приводит к эффекту продолжения спектров, но с расширением полос спектров (увеличением радиусов ПЧС) [1,2] до 2–4 раз, с учетом снижения степени регуляризации сингулярностей, возникающих при синтезе ЧКХ тракта зондирования (оптимизируемой под квазипрямоугольное окно пропускания мод ПЧС изображений) [5] и с использованием метода моделирования группировки аппаратов из каналов зондирования ареала, т. е. с использованием методов сверхразрешения.

При этом при построении процедур возврата от сверхразрешения в моделях группировок к исходным параметрам используемых в сверхразрешении паттернов (к исходной апертуре пикселей, в первую очередь) изображения приводятся к разрешению в тракте зондирования более высокому, чем было при старте процедур сверхразрешения, т. к. даже при неэффективной коррекции резкости на исходных для сверхразрешения изображениях подавляются (в том числе и самой процедурой сверхразрешения) моды исходной ФРТ, прилегающие к верхней моде «снизу», снижая энергию остаточной и «достаточно малой» ФРТ. Упоминаемые процедуры возврата к исходным параметрам изображений не могут быть процедурами, обратными «сверхразрешению», и представляют собой поэтапное преобразование изображений интерполяцией каждый раз в представление с большей апертурой пиксела, и так до начального значения апертуры пиксела [5].

Увеличивая число исходных изображений в технологии сверхразрешения от трех и далее (во всех базовых вариантах формирования трактов зондирования со сверхразрешением) и принимая для начальных итераций вариантов сверхразрешения показатель передискретизации изображений  $K=7$  (что соответствует нормативным требованиям по погрешности для высокого и сверхвысокого разрешения), обеспечивающий корректное относительно верхних мод ПЧС выполнение требования теоремы Котельникова, легко, тем не менее, заметить снижение уровня роста тренда разрешения на изображениях с увеличением числа исходных паттернов-участников технологии сверхразрешения. Эксперименты показывают неэффективность построения технологии сверхразрешения при доведении числа исходных паттернов до девяти и далее [12,13]. Для каждого формируемого субпиксела, например, в технологии ИВР [1] в соответствии с оператором проектирования паттернов-участников формирования субпиксела выполняется накопление сигнала по числу участников с накоплением стохастической составляющей сдвигового характера более высокого порядка малости относительно апертур пикселей – стохастической составляющей от передискретизаций и суммированием составляющих от несовершенств приборов с зарядовой связью (ПЗС) на борту, что приводит к итоговому превышению полезного сигнала над шумом в соответствии с теорией квазиинтерференционного накопления сигнала [14] в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  – число участников в накоплении.

В работах [9,10] приведена разработка коррекции резкости альтернативно методу продолжения спектров: на инспирированных изображениях используется модифицированный фильтр Винера, т. е. спектральное представление оператора деконволюции (СПОД) с минимизацией невязки синтезированной обратной, оптимизированной под квазипрямоугольное окно пропускания мод спектров, частотно-контрастной характеристики тракта зондирования  $1/(\text{ЧКХ})$  и СПОД с регулируемой степенью возмущения ядра оператора деконволюции.

Однако и эта технология берет старт от метода продолжения спектров – для синтеза итеративной формы модифицированного фильтра Винера (развиваемого в оператор деконволюции на основе модифицированной формулы Ван Циттера) строится оптимизируемая в дальнейшем ЧКХ тракта зондирования, определяемая в первичной аддитивной коррекции [10] резкости на соотношении малого возмущения принятого изображения градиентным оператором нецелого порядка (не выше 0,25).



## 2. Рекурсивный метод продолжения спектра для построения итеративной коррекции резкости

В нашем случае рекурсивным использованием аддитивной коррекции при условии недопущения контрастирования в результатах этапов и организуется технология продолжения спектров. Описанная ранее [9, 10] технология оптимизации ЧКХ на этапе под квазипрямоугольное окно пропускания мод ПЧС (с соответствующей дообработкой изображения) на этапах итеративной коррекции резкости и есть собственно технология подавления резидентного контрастирования изображения, пока устанавливающие параметры оптимизации достижимы и не нарушаются [15].

Эти этапы выполняются каждый раз при условии контроля и при необходимости выравнивания среднего уровня яркости и контраста на изображении этапа относительно исходного изображения, пока не станет заметным появление контрастирования. Т. к. при рекурсивном применении коррекции резкости [16] эффективный порядок оператора, моделирующего коррекцию, растет, то это может вызвать не только перерождение коррекции резкости в контрастирование, но и даже выделение контуров на регулярных структурах с подавлением «истинного» сюжета изображения.

Кроме того, чем больше выполнено итераций продолжения спектра, тем меньшим становится интервал предельного позиционирования элемента на изображении и тем опаснее становится некорректность учета скорости движения изображения (СДИ) фактической, т. к. суммировать в формуле сверхразрешения (метод ИВР) необходимо с учетом определенных постфактум по снимкам или специальными бортовыми средствами значений СДИ [2, 16] или с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) зондируемой поверхности по формуле, выдвинутой Жиленевым М.Ю. в работе [17], в виде выражения для СДИ.

В общем случае модель коррекции резкости представляется либо аддитивно суммированием к исходному ПЧС спектра, характерного для дифференциальных операторов нецелого, в общем случае, порядка, т. е. спектра, возрастающего по аппликатам при приближении к высшим модам, либо мультипликативно – покомпонентным перемножением ПЧС изображения и возрастающего по амплитудам спектра и тогда эффективный порядок процедуры коррекции резкости находится из мажорирующей модели [11]: «ближайшего» дифференциального оператора нецелого порядка и понимается в том смысле, что при выполнении коррекции эффективный порядок оператора коррекции соответствует модели в работе [11] мажорирующего дифференциального оператора (можно показать, что при этом спектр изображения в области верхних мод усиливается по амплитудам и, соответственно, терпит продолжение за ранее установленную ограничивающую его моду (разумеется, если спектр не «оборвался» резко нулями в зоне предельной моды ЧКХ тракта зондирования).

Учитывая факт усиления разноса по «частотной полосе» средневзвешенных мод в ПЧС ФРТ и в восстанавливаемом изображении на этапах итеративной коррекции резкости, сопровождаемого при этом дисперсией из-за влияния практически случайного поведения обновляемого сюжета изображения, представляемого в восстанавливаемых модах, следует отметить снижение роста тренда резкости на фоне случайных составляющих ее на этапах коррекции. Средневзвешенные моды в ПЧС изображения и ФРТ при уменьшении апертуры ФРТ не только деконволюцией, а любым из способов с увеличением номеров этапов итеративных процедур обработки изображения расходятся из-за того, что средневзвешенная мода изображения при улучшении резкости мало смещается в сторону высших мод из-за наличия достаточно весомой по энергетике низко- и среднечастотной составляющей в операции суммирования при нахождении средневзвешенной моды, а составляющие ПЧС ФРТ практически не имеют явно выраженных по энергетическим значениям средне- и низкочастотных составляющих и изменение положения на полосе частот средневзвешенной моды

ПЧС ФРТ линейно связано с изменением апертуры ФРТ. В связи с этим синтезируемый на ПЧС ФРТ фильтр усиления верхних мод ПЧС изображений имеет по спектру все меньшую полосу взаимодействия с ПЧС изображения.

В работах [9,10,11] показано, что оценка эффективного порядка оператора коррекции резкости равная 0,25 соответствует процессу начала контрастирования изображения.

Теоретически 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, а 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 [18, 19].

В соответствии с выдвинутой моделью Бейтса и Мак Доннела процесс формирования изображения записывается аналитически в виде интегрального уравнения Фредгольма [20]:

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

$$F(S_R) = F(S_H) \cdot F(\Phi PT) + F(n), \tag{1б}$$

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

$$F(\Phi PT)_i = F(S_{oo})_i / F(S_{но})_i, \tag{2}$$

с оценкой  $F(\Phi PT)$  в виде  $\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i$  дает оценку искомой ФРТ<sub>0</sub> в виде

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

и выводит на инверсную фильтрацию вида

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

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  $\omega_e$ , характеризующей полосу «прозрачности» тракта дистанционного зондирования, 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  $S_{IO}$  существенно анизотропны. Именно это позволяет восстановить высокодостоверно яркостные и геометрические характеристики  $S_{OO}$ , начиная, к примеру, с выделения их границ и вообще линейментов [5]. Кроме того, на изображении высокого разрешения шумовая составляющая весьма ослаблена условиями наблюдения ареалов.

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  $S(x, y)$ ,  $J = (-1)^{0.5}$ , конструируем градиентный фильтр (оператор) в виде нормы вектора  $(D_x^\alpha S(x, y), D_y^\beta S(x, y))$ , т. е. в виде [11]

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

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

В соответствии с упоминаемой выше возможностью коррекции резкости, используя  $\text{grad}_{\alpha\beta}(S)$  в виде  $\text{grad}_{\alpha\alpha}(S) = \text{grad}_\alpha(S)$  целесообразно реализовать коррекцию  $S_R$  в виде

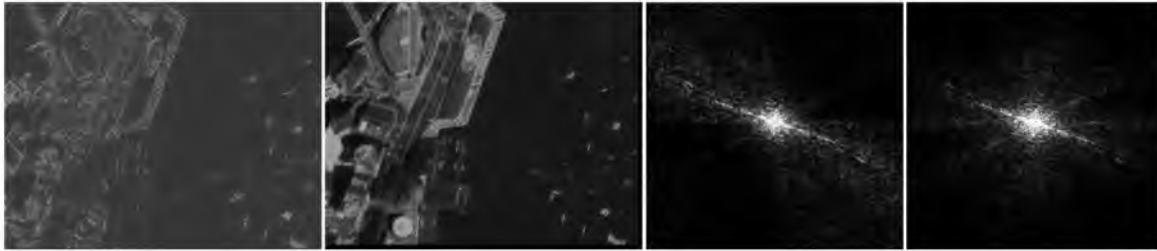
$$S_H = S_R + a \text{grad}_\alpha(S_R), \quad (7)$$

с варьируемыми параметрами  $a$  и  $\alpha$ , т. е. коррекцию рекурсивным методом продолжения спектра. Чем ниже значение  $\alpha$ , тем медленнее растут амплитуды мод спектра оператора к периферии, и чем меньше значение  $a$ , тем «мягче» коррекция изображения аддитивной добавкой (7) и тем больше может понадобиться итераций построенного таким образом продолжения спектра с учетом и контролем отсутствия контрастирования.

Ниже приведены экспериментальные результаты по построению метода продолжения спектра вариантами аддитивной коррекции резкости.

На рисунках 1, 2, 3 представлены фрагменты изображения со спутника Iconos с обработкой вариантами продолжения спектра: а) результат применения градиентного фильтра к  $S_R$  со значениями  $\alpha$ , равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; б)  $S_H = S_R + a \text{grad}_\alpha(S_R)$  со значениями  $\alpha$ , равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; в) спектр  $S_H$  со значениями  $\alpha$  равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно; г) спектр  $S_R$ .

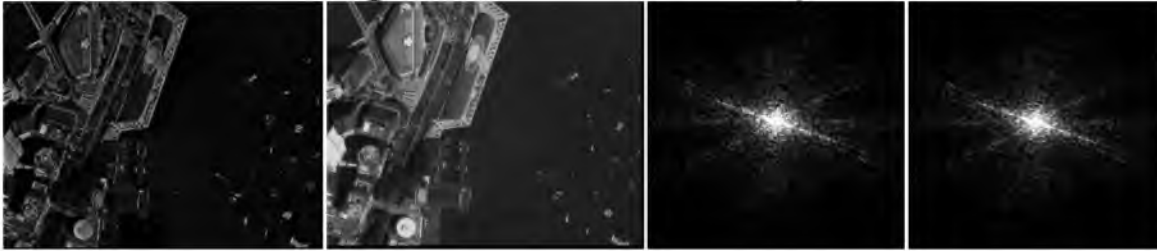
На рис. 1 видны характерные признаки контрастирования – подъем амплитуд гармоник ЧКХ за пределами спектра изображения  $S_H$ . На рис. 2 сравниваемые спектры практически совпадают. Из рис. 3 видно, что спектр  $S_H$  (Рис. 3в) сохранил топологию спектра исходного  $S_R$  (Рис. 3г) с компенсацией «завалов» на периферии, что соответствует увеличению резкости на  $S_H$ .



а) б) в) г)

Рис. 1. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha=0,7$

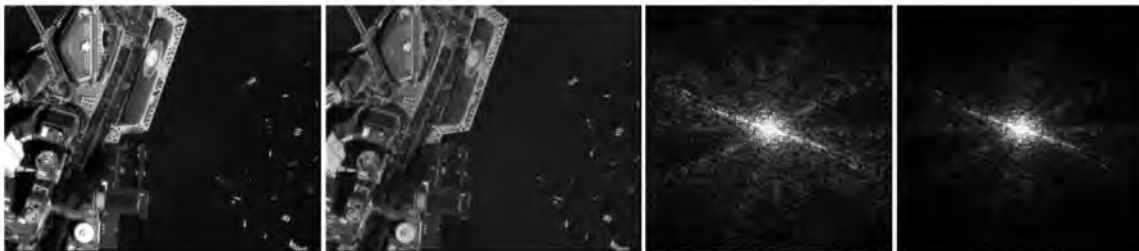
Fig. 1. Results of  $S_R$  correction at  $\alpha =0,7$



а) б) в) г)

Рис. 2. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha=0,5$

Fig. 2. Results of  $S_R$  correction at  $\alpha =0,5$



а) б) в) г)

Рис. 3. Результаты коррекции  $S_R$  при  $\alpha=0,25$

Fig. 3. Results of  $S_R$  correction at  $\alpha =0,25$

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. Эксперименты (и анализ логики построения алгоритмов) показывают, что начинающееся контрастирование при порядке оператора или аддитивной коррекции со значением эффективного порядка 0,25 слабо зависит от исходного спектра, т. к. контрастирование порождается именно составляющей  $grad_\alpha(S)$

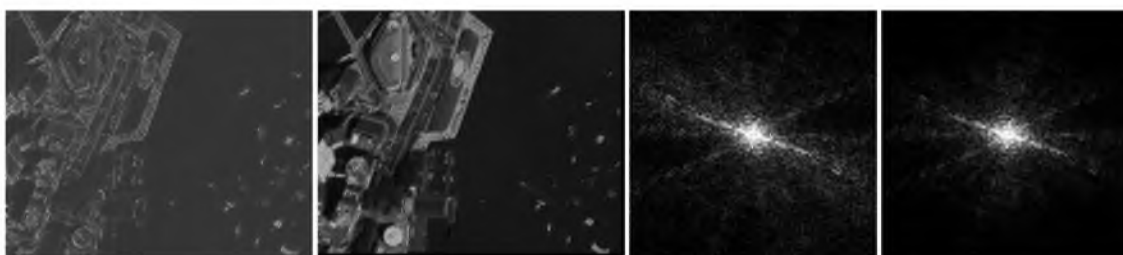
Повторное применение оператора (7), например, в итеративном процессе означает повышение эффективного порядка оператора и в приведенном примере приводит к подчеркиванию контуров и смешанному с контрастированием увеличению резкости. Результаты повторной коррекции приведены на рисунке 4 и соответствуют выполнению соотношения

$$S_H^* = S_R + 2 grad_\alpha(S_R) + grad_\alpha(grad_\alpha S_R), \quad (8)$$

порождающего сложный спектр (рис. 4в), который можно спутать со спектром, получающимся в процессе увеличения резкости при первой итерации аддитивной коррекции и при  $\alpha=0,7$  (рис. 1в). Эффективный порядок повторной аддитивной коррекции при заданных  $\alpha$ ,

$\alpha$  и спектре исходного изображения близок к значению 0,7 – можно сравнить результаты с рис. 1.

Здесь на рис. 4а – результат обработки исходного изображения градиентным оператором, 4б – обработка с повтором аддитивной формой коррекции резкости. Спектр (Рис. 4в) преобразуется в спектр, неотличимый (на уровне 32-разрядной пиксельной сетки) от спектра (Рис. 1в), при наборе в повторной коррекции эффективного порядка оператора значения не более 0,25, т. е. при использовании аддитивной коррекции с первоначальным порядком  $(0,25)^{0,5}$  и т. д. Очевидно, что при увеличении длины рекурсии в  $L$  раз необходимо выбирать значение порядка оператора аддитивной коррекции  $(0,25)^{0,5/L}$ . Однако следует ожидать при рекурсивном применении метода продолжения спектра по формуле (7) появления момента нелинейного наращивания эффективного порядка оператора, что и окажется «визуальным критерием» прекращения выполнения рекурсии.



а) б) в) г)

Рис. 4. Результаты повторной коррекции  $S_R$  при  $\alpha = 0,5$

Fig. 4. Results of repeated correction of  $S_R$  at  $\alpha = 0,5$

На исходном изображении высокого разрешения аппарата QuickBird (город Тампа, штат Флорида, США, рисунок 5 – исходное изображение и его ПЧС) построим модель группировки спутников с субпиксельными сдвигами пикселей и увеличенной апертурой пикселей как описано в работе [1].



Рис. 5. Фрагмент исходного изображения «QuickBird\_tampa\_dwnntn\_psh\_8mar2002» и его ПЧС

Fig. 5. Fragment of the original image "QuickBird\_tampa\_dwnntn\_psh\_8mar2002" and its PSE

Строго говоря, таких изображений одного и того же участка Земли получено два (с разных орбит, в разное время) и выполнена нормализация обоих изображений с целью устранения невязок цветояростного портрета, геометрических параметров наблюдения поверхности и формирования изображения. При этом во время тонкого совмещения по реперам изображений установлен субпиксельный сдвиг одного изображения относительно другого на север на  $1/3$  апертуры пиксела и на восток на  $1/5$  апертуры исходного пиксела. Инспирирование полученных изображений под использование в методе сверхразрешения ИВР



[1] в группировке выполнялось удвоением апертур пикселей. Получен без коррекции резкости прогнозируемый результат по сверхразрешению для двух (требуется 4 для полноты эффекта) в 1,12 раза увеличение резкости.

Для использования при этом итеративного метода продолжения спектра принято  $L=50$ . В соответствии с требованием выбора значения порядка оператора аддитивной коррекции  $(0,25)^{0,5/L}$  определилось значение порядка как  $(0,25)^{0,5/50}=(0,25)^{0,01}$ .

Ниже, на рисунке 6 на двух инспирированных для сверхразрешения изображениях, дающих эффект в 1,12 раза улучшения разрешения приведено изображение со сверхразрешением с продолжением спектра до рекурсии  $L=40$  при порядке оператора  $(0,25)^{0,01}$ .



Рис. 6. Фрагмент сформированного со сверхразрешением изображения «QuickBird\_tampa\_dwntn\_psh\_8mar2002» с продолжением спектра до значения рекурсии  $L=40$   
 Fig. 6. A fragment of the image "QuickBird\_tampa\_dwntn\_psh\_8mar2002" generated with superresolution, with continuation of the spectrum to the value of recursion  $L=40$

Получено: метод сверхразрешения при инспирировании группировки по [1,2] при коррекции резкости на инспирированных изображениях методом продолжения спектра без проявления контрастирования дает в 1,2 раза улучшение (по критерию Фуко).

На рисунке 7 приведен результат увеличения рекурсии до 45–50; виден эффект контрастирования на изображении, и на ПЧС: усиление периферийных высших мод спектра (что характерно для начала контрастирования).



Рис. 7. Фрагмент сформированного со сверхразрешением изображения «QuickBird\_tampa\_dwntn\_psh\_8mar2002» с продолжением спектра до значения рекурсии  $L=45-50$

Fig. 7. A fragment of the image "QuickBird\_tampa\_dwntn\_psh\_8mar2002" formed with superresolution, with continuation of the spectrum to the value of recursion  $L=45-50$

Получено: метод сверхразрешения при инспирировании группировки по [1,2] при коррекции резкости на инспирированных изображениях методом продолжения спектра с



подавлением возможного контрастирования дает в 1,5 раза улучшение (по критерию Фуко), но зона начала останова должна начинаться раньше установленного числа 50. Это может объясняться дисперсным поведением расхождения средневзвешенных мод ПЧС ФРТ и изображения из-за псевдослучайного поведения сюжета на изображении.

Соответствующий показатель улучшения резкости для инспирированной из двух изображений группировки аппаратов, при работе над изображениями, модифицированными на согласование с оптимальной ЧКХ тракта зондирования фильтрами Винера [9,10] с решением проблемы сингулярности синтезируемой ЧКХ [5, 21, 22] имеет значение 1,65–1,7.

### Заключение

Метод продолжения спектра, применяемый для подавления остаточной ФРТ или ее существенного ослабления в технологии сверхразрешения, достаточно прост – не надо синтезировать для конструирования фильтра Винера оптимальную ЧКХ, нивелировать последствия возникающих сингулярностей в ЧКХ, применять передискретизацию изображений с высоким коэффициентом изменения апертур пикселей. Профит итеративного метода продолжения спектра, построенного на принципе аддитивной коррекции резкости с вычислением этапов ЧКХ всего лишь для контроля наличия перерождения коррекции резкости в контрастирование изображения, отстает от результативности модернизированной Винеровской фильтрации с итеративным оператором деконволюции, хотя существенно отличается от метода аналитического продолжения в сторону повышения эффективности. При этом ничто не мешает при использовании метода продолжения спектра в моделях группировок при установленной длине рекурсии метода L, определяющей стартовое значение порядка оператора аддитивной коррекции резкости, выполнять неполное число рекурсий, чтобы не сталкиваться с перерождением коррекции резкости в контрастирование на последних номерах рекурсий, а переходить к описанной выше итеративной деконволюции изображений с гарантированной коррекцией именно резкости [9,10], т. к. при этом число этапов и итераций деконволюции может быть сокращено в несколько раз и единственным критерием останова процедур становится достижение оператором деконволюции установленной точности вычисления.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-00201 "Разработка фундаментальных основ мягкого системного анализа и моделирования систем формирования и верификации космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения по данным с группировок орбитальных аппаратов в неопределенных и предельно допустимых условиях орбитальных съемок"*

### Список литературы References

1. Ушакова Н.Н. Математическая модель процесса формирования космического изображения высокого и сверхвысокого разрешения в группировке космических аппаратов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. – Математика. Физика. Научный рецензируемый журнал. № 20 (44). Белгород, 2016 г. Выпуск 44: с. 155–167.

Ushakova N.N. Matematicheskaya model' processa formirovaniya kosmicheskogo izobrazheniya vysokogo i sverhvyssokogo razresheniya v gruppirovke kosmicheskikh apparatov // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. – Matematika. Fizika. Nauchnyj recenziruemyj zhurnal. № 20 (44). Belgorod, 2016 g. Vypusk 44: s. 155–167.

2. Ушакова Н.Н., Винтаев В.Н. Итеративный оператор деконволюции в вариантах модели формирования изображения со сверхразрешением в группировке космических аппаратов. Научные ведомости БелГУ, 2017. - № 20 (269)/48. – С. 131–145.

Ushakova N.N., Vintaev V.N. Iterativnyj operator dekonvoljucii v variantakh modeli formirovaniya izobrazheniya so sverkhrazresheniem v gruppировке kosmicheskikh apparatov. Nauchnye vedomosti BelGU, 2017. - №20 (269)/48. – S. 131–145.

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.

Park S. C., Park M. K., Kang M. G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview// IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – R.21–36.

4. Ращупкин А.В. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений // Полет, 2008. № 11. С. 42–48. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 2, 2010.

Rashhupkin A.V. Tehnologii obrabotki videoinformacii, obespechivajushhie kachestvo ajerokosmicheskikh izobrazhenij//Polet, 2008. № 11. S. 42–48. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta, № 2, 2010.

5. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Методы повышения детальности на материалах дистанционного зондирования для территориальных информационных систем: монография. – Белгород: Издательство ООО «ГиК», 2018. – 187 с.

Vintaev V.N., Ushakova N.N. Metody povysheniya detalnosti na materialakh distancionnogo zondirovaniya dlya territorialnykh informacionnykh sistem: monografiya. – Belgorod: Izdatelstvo ООО «GiK», 2018. – 187 s.

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

Shovengerdt R.A. Distancionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenij/ R.A. Shovengerdt. Moskva, «Tehnosfera», 2010, 560 s.

7. Прэйтт У. 1982. Цифровая обработка изображений. М.Мир. Ч. 4. 115 с.

Preht U. 1982. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij. M.Mir. CH. 4. 115 s.

8. 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: 16–21.

Ostrikov V. N. 2012. Ocenka funkcii rasseyaniya tochki na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vosstanovleniya. V kn.: Tekhnicheskoe zrenie v sistemah upravleniya 2011. Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Moskva, 15–17 marta 2011 g.). Moskva, Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovaniy RAN: t. 38: 16–21.

9. 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.

Konstantinov I.S., Shherbinina N.V., Zhilenev M.Ju., Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2014. Special'naja korrekciya v procedurah reguljarizaciii iterativnyh processah umen'sheniya razmerov pjatna funkcii rassejanija tochki na kosmicheskikh izobrazhenijah. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. -Istorija, Politologija, Jekonomika, Informatika. Nauchnyj recenziruemyj zhurnal, 15 (186): s. 166–175.

10. Винтаев В.Н., Жилнев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. 2014. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях. Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», №4:33–43.

Vintaev V.N., Zhilenev M.J., Matorin S.I., Ushakova N.N., Scherbinina N.V. 2014. Adaptive restoration of sharpness on digital space images. Magazine of the Russian Academy of Science «Information technologies and computing systems», №4: 33–43. (inRussian)

11. Ушакова Н.Н. 2004. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 255 с.

Ushakova N.N. 2004. Korrekciya cifrovyyh kosmicheskikh izobrazhenij na osnove verificirujushhego modelirovaniya. Diss. Na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 255 s.



12. 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.  
Kochanov A.A., Obuhov A.G., Prosoveckij D.V. 2010. Metody vosstanovlenija izobrazhenij i raspoznavanie obrazov v radioastronomii. Solnechno-zemnajafizika, №16: s.154–161.
13. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрозональной информации. Диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01. Рязань, 2003 г. – 130 с.  
Moskvitin A.E. Tekhnologii i algoritmy povysheniya kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovaniya spektrozonalnoj informacii. Dissertaciya na soiskanie uch stepen ikandidata tekhnicheskikh nauk po specialnosti 05. 13. 01. Ryazan. 2003 g. 130 s.
14. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. - М.: Советское радио, 1966, 677 с.  
Tihonov V.I. Statisticheskaja radiotehnika/V.I. Tihonov. - M.: Sovetskoe radio, 1966, 677 s.
15. Удод В.А. 2002. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. Дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Томск, 338 с.  
Udod V.A. 2002. Optimal'naja po razreshajushhej sposobnosti linejnaja fil'tracija izobrazhenij. Diss. Na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk. Tomsk, 338 s.
16. 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.  
Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosyh V.P., Peretjagin G.I., Spektor A.A. 2002. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 352 s.
17. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой // Телекоммуникации (TELECOMMUNICATIONS AND RADIOENGINEERING). 2011. № 7. С.2–7.  
Zhilenev M.U., Vintaev V.N. The Formula for Calculating the Image Motion of the Planets with Orbital Shooting Optoelectronic Equipment // Telecommunications (TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING). 2011. No 7. Pp.2–7.
18. Кольцов П.П. Эмпирический подход к оценке алгоритмов выделения границ // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2011. № 2, с. 50–57.  
Kol'cov P.P. Jempiricheskij podhod k ocenke algoritmov vydelenija granic // Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy», 2011. № 2, s. 50–57.
19. Бобков В.А., Роньшин Ю.И. Автоматическое сопоставление линий на калиброванных изображениях // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2010. № 4, с. 16–24.  
Bobkov V.A., Ron'shin Ju.I. Avtomaticheskoe sopostavlenie linij na kalibrovannyh izobrazhenijah // Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy», 2010. №4, s. 16–24.
20. Бейтс Р., Мак-Доннел М. 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М., Мир, 336 с.  
Bejts R., Mak-Donnel M. 1989. Vosstanovlenie i rekonstrukcija izobrazhenij. M.,Mir, 336 s.
21. Морен К. 1965. Методы Гильбертова пространства. Пер с польск. М., Мир, 570 с.  
Moren K. 1965. Metody Gil'bertova prostranstva. Per s pol'sk. M.,Mir, 570 s.
22. Цибанов В.Н. Регуляризирующие методы фильтрации и восстановления изображений: Дисс. на соискание ученой степени канд. физ. мат. наук. Москва, 2008. 113 с.  
Cibanov V.N. Regularization Methods of Filtering and Image Restoration: Diss. Na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz. mat. nauk. Moskva, 2008. 113 p.