



УДК 621.377.2

АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕЗКОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ¹

И.С. КОНСТАНТИНОВ¹
Н.В. ЩЕРБИНИНА¹
М.Ю. ЖИЛЕНЕВ²
В.Н. ВИНТАЕВ³
Н.Н. УШАКОВА³

¹⁾ *Белгородский государственный национальный исследовательский университет*
²⁾ *ФГУП Государственный Космический Научно Производственный Центр имени М.В. Хруничева и*
³⁾ *Белгородский университет кооперации, экономики и права*
e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

Радиусы пространственно-частотных спектров изображения с повышенным разрешением или контрастированного (линейным или нелинейным преобразованием) изображения с худшим разрешением могут совпасть, тем более процесс восстановления или улучшения разрешения на изображении в итеративных процедурах нередко перерождается в процесс контрастирования без улучшения разрешения – в работе предложена аддитивная конструкция процесса восстановления резкости на основе обобщенного градиентного оператора.

Ключевые слова: цифровое космическое изображение, пространственно-частотный спектр, тонкая структура изображения, функция рассеяния точки

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

- повышения визуальной резкости (четкости) изображения, что означает усиление высоких пространственных частот и выделения контуров за счет фильтраций;
- повышения визуальной яркости и контрастности изображения (субъективных характеристик, воспринимаемых человеком) гистограммными и другими методами;
- улучшения изображения за счет его интерполяций (метод ближайшего соседа, билинейная и бикубическая интерполяция) и т.д.

Использование такого рода улучшений, помимо выравнивания важных дешифрирующих и метрических измеримых особенностей изображений тех или иных элементов ландшафта Земли (ЭЛЗ), могут приводить к проявлениям алиасинга (эффект «лесенки», наложения спектров при несоответствии теореме Котельникова), размытия изображения, эффекта Гиббса (в виде ореолов, ложных контуров на нем).

Кроме перечисленных и других с приведенными артефактами технологий обработки изображений ландшафта Земли (ИЛЗ), полученных аэрокосмическими методами, даже безупречно сформированных съемочной бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА), становится невозможно получить ИЛЗ с субпиксельным разрешением (сверхразрешением). А эволюция космических съемочных систем и средств формирования, обработки и синтеза ЦКИ высокого разрешения убеждает в высокой эффективности технологий сверхразрешения (спутники ObrView-3, Spot-5 ,Pleiades -1A, Pleiades -1B), пришедших на смену традиционным системам.[1,2]

Появление космических аппаратов (КА) с оптико-электронными системами высокого пространственного разрешения (например, российских «Аркон», «Ресурс-ДК», американских Ikonos, QuickBird) потребовало не только, оснащения их высокоточными системами навигации, но и выдвинуло новые требования к методам обработки материалов ДЗЗ и особенно к системам сверхразрешения. [3,4]

Теоретически частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) оптоэлектронных систем может иметь практически любую ширину в области пространственных частот. Однако, с

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00171 "Разработка теоретических основ методов моделирования и алгоритмов представления в обобщенных операциях трактов преобразования дистанционных данных с максимизацией эффективности обработки информации (цифровых космических изображений)".

увеличением пространственной частоты огибающая ЧКХ имеет спад, что приводит к подавлению или полному уничтожению в этой спектральной полосе мелких деталей на формируемом изображении, т.е. к ограничению разрешающей способности ИЛЗ, сформированного по результатам съемки и коррекций при обработке сигнала.

В цифровых системах пространственная дискретизация и наличие функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении отфильтровывают пространственные частоты, которые используются для повышения разрешения. При создании, например, сдвинутых на доли апертур пикселей входных изображений для каналов формирования и обработки, реализуется возможность достижения на синтезированном цифровом космическом изображении (ЦКИ) «сверхразрешения» с потенциальными возможностями восстановления отфильтрованных высших пространственных частот [5].

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 [6] (для краткости, манипуляции с контрастом с указанными артефактами будем называть контрастированием).

Решение задачи подавления ФРТ, соответствует синтезу ЧКХ всего тракта формирования конечного (или этапного) изображения с нивелированным спадом, за счет усиления амплитуд верхних мод пространственно-частотных спектров (ПЧС) изображений. А неполнота в спектральном описании ФРТ (что характерно для многих эмпирических методов определения ФРТ) может приводить к результатам, говорящим о том, что в процессе обработки резидентно присутствовало нежелательное контрастирование. [7]

Цель работы: разработать метод ослабления резидентного усиления контраста при подавлении функции рассеяния точки на изображении, сформированном в одном спектральном канале оптико-электронной аппаратуры (ОЭП) спутника, не привлекая технологий обработки материалов многоспектрального ДЗЗ.

При наличии полного портрета ФРТ, найденного, например, по набору сравнений опорных ориентиров на изображении и их эталонов, при условии полноты покрытия спектрального портрета ФРТ спектральными портретами объектов набора, и устранении всех возможных невязок в парах, как показано в [7], можно снизить апертуру ФРТ в 1,65 раза с высокой достоверностью получаемого результата. Во всех остальных случаях, характеризующихся неполнотой задания ФРТ (наиболее характерны при этом методы слепого определения ФРТ или слепого восстановления изображения), необходимо предпринимать превентивно на этапах деконволюции меры по подавлению усиления контраста. Радиусы ПЧС изображения с повышенной резкостью или контрастированного, но с худшей резкостью могут совпасть, к тому же, процесс восстановления резкости на изображении смешивается с процессом контрастирования [7] снижая в целом профит деконволюции.

Ниже на рисунках представлены: фрагмент ЦКИ со спутника QuickBird и его ПЧС (рис.1); фрагмент ЦКИ со спутника QuickBird с повышением резкости усилением контраста и его ПЧС (рис.2); изображение сюжетное и его ПЧС (рис.3); изображение сюжетное контрастированное с использованием пороговых и нелинейных функций и его ПЧС (рис.4); изображение сюжетное с подавленной ФРТ на основе описываемой в работе коррекцией резкости (рис.5).



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



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



Рис.3. Изображение сюжетное и его ПЧС



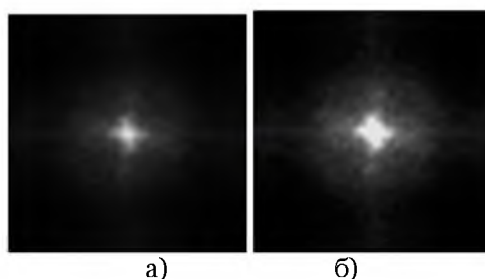
Рис.4. Изображение сюжетное с увеличенным контрастом и его ПЧС



Рис.5. Изображение сюжетное с подавленной ФРТ

Заметно увеличение радиусов ПЧС на рис.4 и 5 и даже примерное равенство радиусов ПЧС. Увеличение радиуса ПЧС на рис.2 заметно по большей яркости почти вертикальных сформировавшихся полос (осей корреляции), гарантирующих более замедленное их угасание к периферии ПЧС.

На рис. 6 приведены дающие возможность визуальной оценки радиуса регуляризованные маской 17x17 ПЧС сюжетного изображения с увеличенным контрастом: а) с выполненной нормализацией, б) без нормализации.



а) б)

Рис.6. Репрезентативные формы ПЧС сюжетного изображения а) с выполненной нормализацией; б) без нормализации



На рис.7 приведен ПЧС оператора контрастирования для сюжетного изображения, найденный в виде ЧКХ, классическим покомпонентным делением ПЧС контрастированного изображения на ПЧС исходного в регуляризованном режиме, реализованным последовательным уменьшением аддитивного к ПЧС контрастируемого (исходного) изображения в знаменателе положительного малого параметра с подавлением на методе наименьших квадратов относительно предыдущей итерации увеличивающихся выбросов на результате деления при приближении к точкам сингулярности (из-за нулевых гармоник в ПЧС знаменателя).

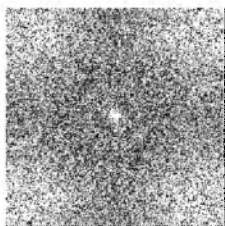


Рис.7. ПЧС оператора контрастирования для сюжетного изображения

При визуальном сравнении найденного ПЧС оператора и контрастированного изображения заметен «завал» амплитуд в ПЧС (соответствующего ЧКХ тракта) оператора, в зоне, соответствующей периферии ПЧС изображения и возрастание амплитуд гармоник этой ЧКХ за пределами этой периферии. Это означает подавление тонкой структуры исходного изображения на данной ЧКХ и синтез на результатном изображении более крутых фронтов с характерной спектральной полосой, лежащей за пределами носителя ПЧС изображения.

Обобщенное аддитивное представление коррекции резкости и синтезируемой частотно-контрастной характеристики. Как отмечалось, восстановление резкости, т.е. тонких структур на сформированном в тракте ДЗЗ ЦКИ, можно приравнять к осуществляемой для данного изображения компенсации спада ЧКХ на высших пространственных частотах (ПЧ) в тракте. Спектральная форма применяемой для этого деконволюции (инверсной, винеровской фильтрации, итеративных и регуляризационных методов) [8,9,10] определяется мультипликативным представлением – покомпонентным произведением ПЧС изображения (в том числе на каждом из этапов итерации) и ПЧС оператора деконволюции (ОД). Результат можно считать лучшим, если упоминаемая компенсация спада ЧКХ позволила преобразовать ЧКХ в равномерную на всей допустимой пространственно – частотной полосе в тракте. Это означает согласование с ЧКХ нарастания амплитуд спектральных мод ПЧС ОД с увеличением ПЧ [11].

Для инверсной фильтрации ЦКИ, например, такими ПЧС ОД являются ПЧС – результаты деления единицы на Фурье-представление ФРТ. ЧКХ – это ПЧС ФРТ в соответствии с моделью Бейтса и Мак Доннела формирования ЦКИ [8] всегда ограничена верхней модой ω_s (моды в ПЧС задаются (ω_x, ω_y) – координатами ПЧС от $S(x, y)$ в виде $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$) и определяет нижнюю границу числа дискретных отсчетов в соответствии с теоремой отсчетов Котельникова:

$$S_R(x, y) = \int_A \Phi PT(x', y',) S_H(x - x', y - y') dx' dy' + n(x, y) \quad (1)$$

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

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

где S_R – формируемое изображение; S_H – восстанавливаемое (гипотетическое) изображение; $\Phi PT(x', y')$ – ядро интегрального преобразования (свертки), изопланатичное на апертуре A носителя S_H , полученное в результате усреднения мгновенных ФРТ, $n(x, y)$ – аддитивный шум, ** – символ операции свертки, $F(S)$, $F(\Phi PT)$, $F(n)$ – ПЧС объектов. Определяемая из формулы (1b) для каждого из N опорных



ориентиров (ОО) (или полигонных объектов) S_{OO} и их эталонов $S_{ИО}$ уникальная ЧКХ в виде

$$F(\Phi PT)_i = \frac{F(S_{OO})_i}{F(S_{ИО})_i} \quad (2)$$

с оценкой $F(\Phi PT)$ в виде $\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i$ по правилам выполнения операций \bigcup_i^N над нечеткими множествами дает оценку

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

и выводит на инверсную фильтрацию

$$F(S_{И}) = F(S_{R}) / F(\Phi PT_o) = F(S_{R})(F(\Phi PT_o))^{-1}, \quad (4)$$

т.е. покомпонентное произведение ПЧС изображения и $(F(\Phi PT_o))^{-1}$, здесь F^{-1} – обратная Фурье-процедура, а $(F)^{-1}$ – деление единицы на отсчеты комплексного спектра F . Деконволюция в пространственных координатах может строиться на ядре $H = F^{-1}(((F(\Phi PT_o))^{-1}))$ в виде итерационной процедуры Ван Циттера.

Соблюдение принципа полноты набора опорных ориентиров и их эталонов (т.е. перекрытия спектрального диапазона решения задачи наборами гармоник в спектрах ОО и $S_{ИО}$), устранения всевозможных невязок для S_{OO} и $S_{ИО}$, а также применение методов регуляризации при наличии сингулярностей в ядрах дает набор квазирешений приближающихся к $S_{ИО}$ в соответствии с требованиями к погрешности решения задачи.

Соотношения (2) и (4) являются следствием из соотношения (1б). В этих соотношениях подавление шума, представленного в (1б), реализуется в парах S_{OO} и $S_{ИО}$ на этапе их сравнения достаточно эффективно с учетом того, что шум на носителе яркостного портрета ОО и в примыкающем окне имеет изопланатичные характеристики и изотропен, тогда как радиусы корреляции структурных элементов ОО существенно анизотропны, а корреляционная процедура распознавания ОО с учетом имеющегося эталона позволяет восстановить высокодостоверно (в том числе интерполяционно) все яркостные и геометрические элементы ОО, кроме того, при выясненной статистике шума на ЦКИ высокого разрешения может использоваться технология фильтрации оптимальной по разрешению [12]. На рис.1 и рис. 8 (фрагмент ЦКИ со спутника Ресурс-ДК) легко заметить, что проблема шума для решения задач с резкостью не фатальна.



Рис. 8. Фрагмент ЦКИ со спутника Ресурс-ДК

С целью повышения эффективности коррекции ЧКХ целесообразно использовать аппарат обобщенной градиентной фильтрации с переменным порядком оператора [7, 13]. Обобщенный градиентный фильтр (оператор), реализуется на базе прямого продолжения на вещественные значения порядка спектрального представления операции дифференцирования – $D^{\alpha}_x, D^{\beta}_y$ ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$), определяемого для допускающих Фурье-представление функций в виде:

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

где $F_S(\omega_x, \omega_y)$ – прямое двумерное преобразование Фурье функции $S(x, y)$; ω_x, ω_y – координаты на спектральной плоскости.



Соотношение (5) при целых α и β 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.

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

Так как в соотношении (5) при $\alpha, \beta < 1$ модули $|(\omega_x)^\alpha|, |(\omega_y)^\beta|$ растут в области высших мод спектров гораздо медленнее, чем при $\alpha, \beta > 1$, то располагающуюся в этой области шумовую составляющую $\text{grad}_{\alpha\beta}(S)$ усиливает слабее, чем градиентный фильтр, построенный на базе операции дифференцирования целого порядка, выявляя градации контуров образов практически адекватно при порядках α и β , находящихся в пределах $0.5 \leq \alpha, \beta \leq 0.8$. Так как полоса частот контурной составляющей, как правило, совмещена с низкочастотной областью спектральной полосы шума, то ослабление усиления в верхних модах спектрального портрета изображения увеличивает профит выявления контуров объектов.

В теории обобщенных функций операция D^α задается разновидностями интегральных выражений

$$\begin{aligned} f^{(\alpha)}(x) &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_x^\infty (x-y)^{\alpha-1} f(y) dy; \\ f^{(\alpha)}(x) &= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x (x-y)^{\alpha-1} f(y) dy. \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция [14], дающих идентичные с предлагаемым аппаратом результаты при возврате к целым порядкам).

Для целых порядков основная связь между спектрами и их дифференциальными образами описывается известным выражением

$$D^k f(x) = \int_{\Omega} (J\omega)^k F_f(\omega) e^{J\omega x} d\omega, \quad (8)$$

где D^k – дифференциальный оператор порядка k ; Ω – носитель спектра.

Это равенство продолжается в область нецелых значений порядка в виде

$$D^\alpha f(x) = \int_{\Omega} (J\omega)^\alpha F_f(\omega) e^{J\omega x} d\omega. \quad (9)$$

Можно ввести аксиоматически правило дифференцирования тригонометрических функций:

$$\left. \begin{aligned} \cos^{(\alpha)}(x) &= \cos\left(x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \\ \sin^{(\alpha)}(x) &= \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos^{(\alpha)}(\omega x) &= \omega^\alpha \cos\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \\ \sin^{(\alpha)}(\omega x) &= \omega^\alpha \sin\left(\omega x + \frac{\pi}{2}\alpha\right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

При целых значениях α эти правила очевидны. Они могут быть объединены в соотношение вида

$$(e^{J\omega x})^{(\alpha)} = (J\omega)^\alpha e^{J\omega x} = \omega^\alpha e^{J\omega x} e^{J\frac{\pi}{2}\alpha}. \quad (12)$$

Аксиома (11) легко реализуется в вычислительном аспекте для оператора (6) или (8) или (9).

При наличии соотношения (12) соотношение (9) легко доказуемо. Этот аппарат предлагается для объектов, представляемых любыми функциями, допускающими

спектральное разложение, в том числе и в обобщенном смысле (в смысле слабой сходимости над пространством основных функций).

На рис. 9 схематично представлены: спектр изображения (полоса $0-\omega_l$), спектр шума (полоса $\omega_o-\omega_e$), 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 спадает 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.

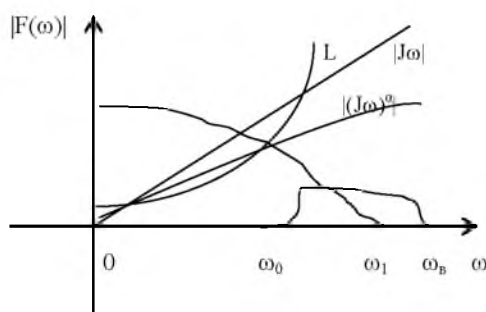


Рис.9. Главная часть спектрального представления оператора деконволюции и градиентного оператора с переменным порядком

Выполнение контрастирования не увеличивает пропускную информационную способность тракта по сравнению с коррекцией разрешения [7].

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:

$$S_{И} = S_R + a grad_{\alpha}(S_R), \tag{13}$$

с варьируемыми параметрами a и α . Очевидно, чем ниже значение α , тем медленнее растут амплитуды мод ПЧС оператора к периферии ПЧС (рис.9) и чем меньше значение a , тем «мягче» коррекция изображения аддитивной добавкой (13) и тем больше может понадобиться итераций построенной таким образом деконволюции для соответствующей компенсации ЧКХ тракта. Но следует учесть, что повторные применения формулы (13) к результатам на этапах увеличивают результирующий порядок выполненной градиентной фильтрации $grad_{\alpha}(S)$. На рис.10 приведен фрагмент ЦКИ со спутника Ikonos, на котором еще есть резерв по улучшению резкости и его ПЧС.

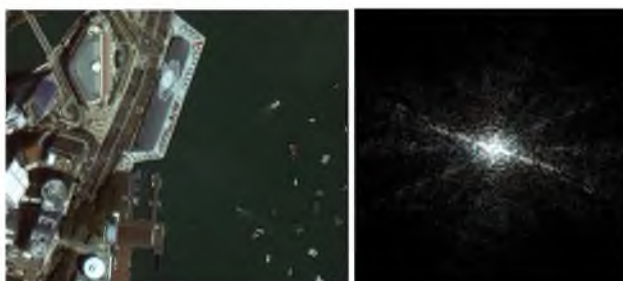


Рис. 10. Фрагмент ЦКИ со спутника Ikonos и его ПЧС

Зададим значение $a=1$. Для $\alpha = 1$ результат по формуле (13) общеизвестный – это выделенные контуры и впечатанные в исходное изображение (рис. 11, где для сравнения приведен ПЧС исходного изображения).

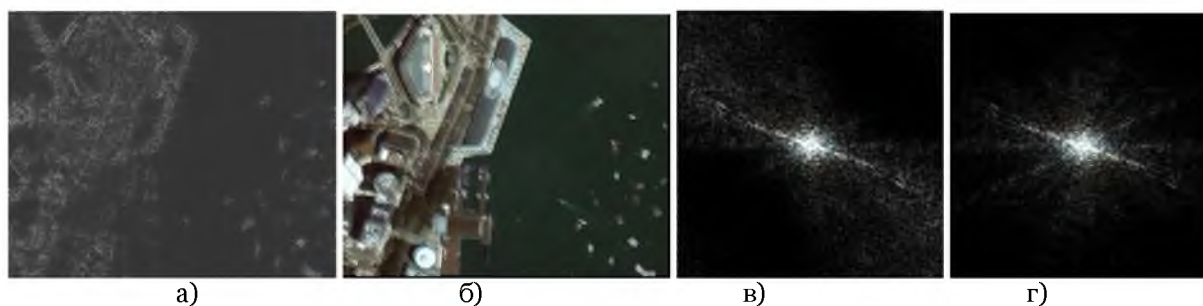


Рис. 11. а) градиентный фильтр порядка 1; б) $SI = SR + 1 * grad_1(S_R)$; в) ПЧС SI; г) ПЧС SR

В изображении, получаемом по формуле (13) для предупреждения превышения динамического диапазона яркостей каждый пиксел вычислялся с нормализацией – умножением его значения на предварительно вычисляемый коэффициент, равный отношению максимальной яркости в исходном изображении к максимальной яркости в изображении, получаемом по формуле (13).

Легко заметить, что ПЧС S_{II} (рис. 11в) по структуре приблизился к ПЧС контрастирования, т.е. подавлена тонкая структура (в первом квадранте особенно заметно по сравнению с ПЧС S_R (рис. 11г)).

На рис.12 представлены эксперименты по коррекции с производной порядка 1 по направлению (-45°).

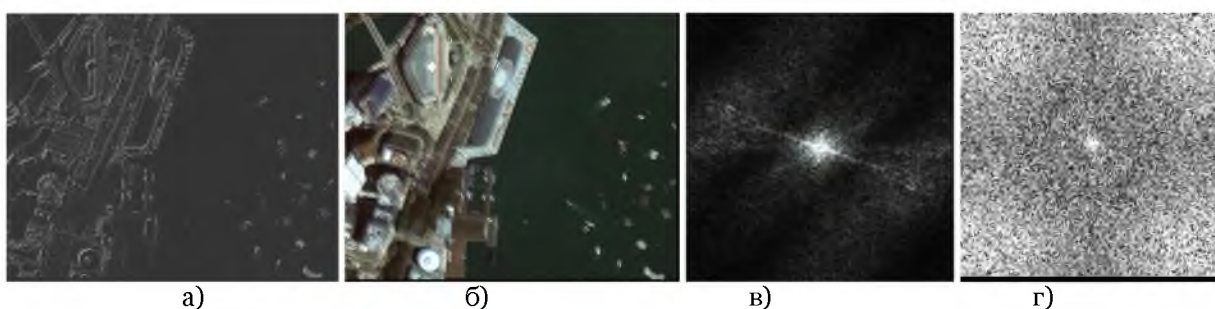


Рис. 12. а) производная порядка 1; б) $SI = SR + D(S_R)$; в) ПЧС SI; г) ПЧС оператора контрастирования сюжетного изображения (для сравнения)

Спектры результата коррекции из-за нормализации (без которой нет корректной обработки ЦКИ) показывают при $\alpha = 1$ картину выполненного контрастирования с завалами ПЧС в области тонкой структуры изображения и появлением частот от усиления восхождения краев, аналогично приведенному ПЧС оператора контрастирования сюжетного изображения. На рис.13 приведен ПЧС результата со сдвигом гистограммы вправо, для визуального восприятия малых амплитуд гармоник спектра.



Рис.13. ПЧС результата со сдвигом гистограммы вправо

На рисунках 14,15,16 представлены: а) результат применения градиентного фильтра к S_R ; б) $S_{II} = S_R + 1 * grad_{\alpha}(S_R)$; в) ПЧС S_{II} ; г) ПЧС S_R со значениями α равными 0,7, 0,5 и 0,25, соответственно.

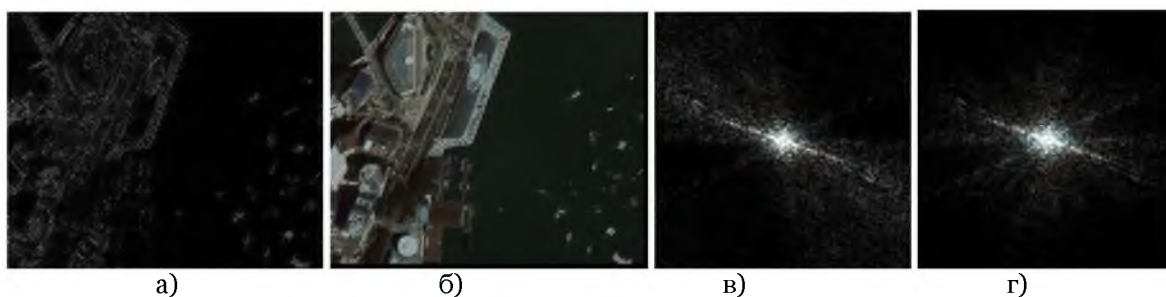


Рис. 14. Результаты коррекции SR при $\alpha = 0,7$

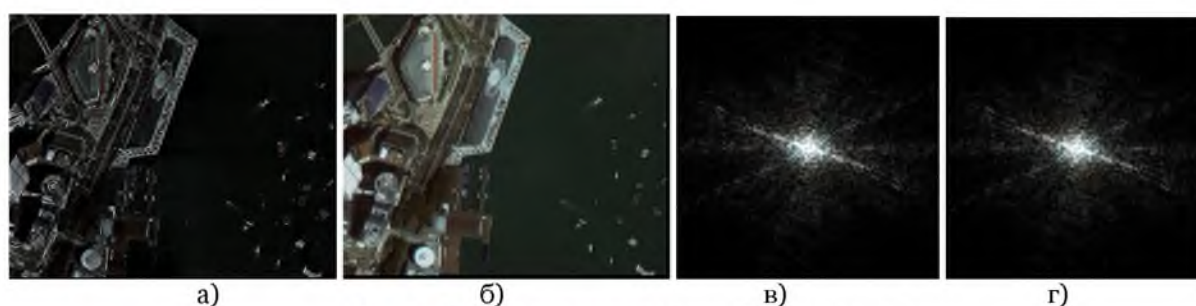


Рис. 15. Результаты коррекции SR при $\alpha = 0,5$

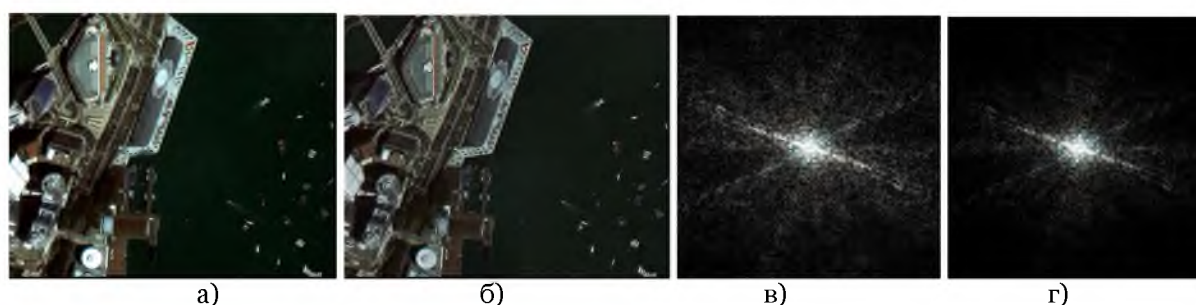


Рис. 16. Результаты коррекции SR при $\alpha = 0,25$

Из рис.16 видно, что ПЧС S_{II} (рис.16в) сохранил топологию спектра исходного S_R (рис. 16г) с компенсацией «завалов» на периферии, что соответствует увеличению резкости на S_{II} . На рис. 15 сравниваемые спектры практически совпадают. На рис. 14 видны характерные признаки контрастирования – подъем амплитуд гармоник ЧКХ за пределами спектра изображения и завалы на периферии ПЧС S_{II} (в первом квадранте и в третьем).

В задаче повышения резкости управлением контрастом на изображении (рис. 4) преобразования не относились к классу линейных операторов, но 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 (в регуляризованной форме) показывает аналогичные свойства. Такие синтезированные ЧКХ тракта ДЗЗ неудовлетворительны.

Спектр обработанного изображения по формуле (13) представляет собой сумму ниспадающего в верхних модах спектра S_R и спектра обобщенного градиентного оператора (фильтра): чем быстрее спадает спектр изображения и чем выше порядок градиентного оператора, тем глубже окажется завал в ЧКХ преобразования (в подавляющем большинстве случаев в области тонкой структуры S_R) и в спектре



изображения и в зависимости от коэффициента a , порядка оператора α и скорости ниспадания спектра S_R будет определяться момент перехода от существенного контрастирования к улучшению резкости (в чистом виде).

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

Повторное применение оператора (13), например, в итеративном процессе приводит к повышению эффективного порядка оператора, и в приведенном примере при $\alpha=0,5$ приводит к подчеркиванию контуров и смешанному с контрастированием увеличению резкости. Результаты повторной коррекции приведены на рис. 17 и соответствуют выполнению соотношения

$$S_{II}^* = S_R + 2 grad_\alpha(S_R) + grad_\alpha(grad_\alpha S_R),$$

порождающего сложный спектр (рис. 17в), который можно спутать со спектром, получающимся в процессе увеличения резкости по отношению к исходному спектру (рис. 17г). Эффективный порядок градиентного оператора при заданных a , α и спектре исходного изображения близок к значению 0,7 (можно сравнить результаты с рис. 14).

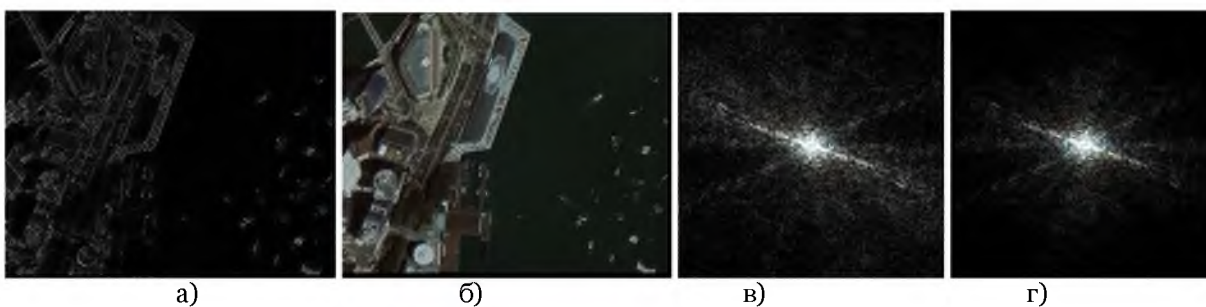


Рис. 17. Результаты повторной коррекции SR при $\alpha=0,5$

Представленное выше является одновременно и коррекцией S_R с целью восстановления резкости на S_{II} и при регуляризованной процедуре деления ПЧС S_R на ПЧС полученного S_{II} синтезом откорректированной ЧКХ тракта ДЗЗ для данного изображения (синтез полной ЧКХ описан выше и требует полноты набора ОО или изображений). Для тракта ДЗЗ мы обязаны знать значение его ω_b . Оптимизируя параметры a и α для получения ЧКХ с минимальным провалом, характерным для контрастирования, применяя стабилизаторы, минимизирующие тенденцию роста или падения значений ЧКХ вдоль координат $\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$ (с использованием при необходимости сглаживания флуктуаций значений ЧКХ) с максимально возможным сохранением минимальной тенденции роста или падения при приближении к ω_b получаем аддитивное представление ЧКХ тракта вида (13) на обобщенной градиентной фильтрации, приближающееся максимально возможно к П-образной ЧКХ – наилучшему виду ЧКХ. Даже в условиях квазиоптимальности знание ЧКХ дает возможность сохранения или улучшения измерительных свойств ЦКИ. Правым фронтом ЧКХ высокодостоверно достигнет ω_b , если в ПЧС S_R соответствующие гармоники были только подавлены, а не уничтожены трактом.

Выводы

Разработанное обобщенное аддитивное представление коррекции резкости и синтезируемой частотно-контрастной характеристики тракта формирования космического изображения позволяет выполнить высокодостоверно именно коррекцию резкости без нежелательных эффектов резидентного контрастирования.



Список литературы

1. Park, S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview / S. C. Park, M. K. Park, M. G. Kang // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – P. 21–36.
2. Elad, M. A fast super-resolution reconstruction algorithm for pure translational motion and common spaceinvariant blur / M. Elad, Y. Hel-Or // IEEE Trans. Image Processing. – 2001. – Vol. 10. – № 8. – P. 1187-1193.
3. Ращупкин, А.В. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений // Полет, 2008. № 11. С. 42 – 48. [Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 2, 2010.
4. Eric Breton ; Christophe Latty ; Fabrice Levy and Bernard Rouge. "Operational data processing to improve SPOT image resolution", Proc. SPIE 4474, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, 323 (November 20, 2001); doi:10.1117/12.4486.
5. <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.
6. Ревзон А.Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве.- М.:Транспорт, 1993,272 с.
7. 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.
8. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989, 336 с.
9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. – М.:Мир, Кн.2, 1982, 790 с.
10. Казмирчук А.А. Методы восстановления изображений по блокам двумерного спектра//Распараллеливание обработки информации: Сб. докладов VI Всесоюзн. шк.-семинара, Львов, 1987. – Ч.2. – С. 71-72.
11. 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.
12. 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.
13. Переход Н.Г., Ушакова Н.Н., Винтаев В.Н., Лихачев В.А. Разработка специальных операций для задач обработки цифровых изображений. Научные ведомости Научно-исследовательского университета «БелГУ», Серия История. Политология. Экономика. Информатика. 2010. № 19 (90). Выпуск 16/1 с.104-111.
14. Брычков Ю.А. Интегральные преобразования обобщенных функций/ Ю.А. Брычков, А.П. Прудников. – М.: Наука, 1977, 286 с.]

ADAPTIVE CORRECTION OF PROCESS OF RESTORATION OF SHARPNESS OF SPACE IMAGES OF HIGH RESOLUTION

I.S. KONSTANTINOV¹
N.V. SHCHERBININA¹
M. U. ZHILENEV²
V.N. VINTAYEV³
N.N. USHAKOVA³

¹⁾ *Belgorod National Research University*
²⁾ *Federal State Unitary Enterprise State Space Scientific Production Center named after MV Khrunichev*
³⁾ *Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*
e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

Radiuses of the spatial-frequency ranges of the image or contrasted (linear or nonlinear transformation) images with the worst permission can coincide with the increased permission. Process of restoration or permission improvement on the image in iterative procedures quite often regenerates in contrasting process without permission improvement. In work propose the additive structure of process of restoration of sharpness on the basis of the generalized gradient operator.

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