

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 528.72; 629.7
MSC 90-10

DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-3-235-242

КОРРЕКЦИЯ РЕЗКОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА АРЕАЛА

Ушакова Н. Н., Винтаев В. Н.

(Статья представлена членом редакционной коллегии Ю. П. Вирченко)

Белгородский университет кооперации, экономики и права,
г. Белгород, 308023 Россия

E-mail: natush2006@yandex.ru, viktor.vn2010@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен алгоритм коррекции резкости и пространственного разрешения по технологии обеспечения режима сверхвысокого разрешения на цифровом космическом изображении без привлечения физически реализуемых дополнительных каналов дистанционного зондирования. Алгоритм строится на применении метода возмущений в конечных разностях в зоне Фраунгофера для рассеяния падающего светового потока на цифровой модели рельефа, восстановленной по теням на исходном изображении. Коррекция резкости превентивно сопровождается синтезированием и оптимизацией частотно-контрастной характеристики тракта зондирования, сложившегося для данного изображения. Возможное превышение пространственно-частотной полосы результата над полосами участвующих в синтезе парциальных паттернов может квалифицироваться как сверхвысокое разрешение.

Ключевые слова: сверхвысокое разрешение, цифровое космическое изображение, цифровая модель рельефа, пространственно-частотный спектр.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-07-00697 «Разработка основ системного анализа и моделирования коррекции резкости космических изображений сверхвысокого разрешения на базе модернизации теоретико-типовых математических и семантических подходов для прогноза и реализации максимально возможных характеристик по пространственному разрешению».

Для цитирования: Ушакова Н. Н., Винтаев В. Н. 2021. Коррекция резкости космического изображения по модели рельефа ареала. Прикладная математика & Физика 53(3): 235–242. DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-3-235-242.

CORRECTION OF THE SHARPNESS OF THE SPACE IMAGE BASED ON THE TERRAIN MODEL OF THE AREA

Natalia Ushakova , Viktor Vintaev

(Article submitted by a member of the editorial board Yu. P. Virchenko)

Belgorod University of Cooperation, Economics and Law,
Belgorod, 308023 Russia

E-mail: natush2006@yandex.ru, viktor.vn2010@yandex.ru

Received September, 4, 2021

Abstract. An algorithm for correcting sharpness and spatial resolution using the technology of providing ultra-high resolution mode on a digital space image without involving physically implemented additional remote sensing channels is considered. The algorithm is based on the application of the method of perturbations in finite differences in the Fraunhofer zone for scattering the incident light flux on a digital terrain model reconstructed from the shadows in the original image. The sharpness correction is preemptively accompanied by the synthesis and optimization of the frequency-contrast characteristic of the sensing path formed for this image. The possible excess of the spatial-frequency band of the result over the bands of the partial patterns involved in the synthesis can be qualified as an ultra-high resolution.

Key words: ultra-high resolution, digital space image, digital terrain model, spatial frequency spectrum.

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) in the framework of scientific project N 19-07-00697 "Development of the basics of system analysis and modeling of sharpness correction of ultra-high-resolution space images based on the modernization of model-theoretical mathematical and semantic approaches for predicting and implementing the maximum possible characteristics in spatial resolution".

For citation: Ushakova N. N., Vintaev V. N. 2021. Correction of the sharpness of the space image based on the terrain model of the area. Applied Mathematics & Physics. 53(3): 235–242. (in Russian). DOI 10.52575/2687-0959-2021-53-3-235-242.

1. Введение. Улучшение резкости на сформированном космическом изображении в работе осуществляется за счет согласованного с теоремой Котельникова о дискретизации функций уменьшения апертур пикселей с соответственным увеличением их плотности на паттерне (стимулируемого операторами деконволюции изображения) с подчеркиванием высших мод пространственных спектров объектов и несущих ареалов [11],[3]. При этом превышение пространственно-частотной полосы результата над полосами участвующих в синтезе парциальных паттернов может квалифицироваться как сверхвысокое разрешение.

Эти технологии сверхвысокого разрешения при формировании космического изображения развиты на современном этапе до уровня промышленных методов. Спутники OrbView-3, Spot-5, Pleiades-1A, Pleiades-1B [17],[10],[12], например, осуществляют методы сверхвысокого разрешения на инициализации нескольких каналов дистанционного зондирования ареала, разнесенных один относительно другого по времени и/или в пространстве.

В контексте данной работы изображения рассматриваются как элементы конечномерного линейного пространства с функцией евклидовой нормы.

Радиусы пространственно-частотных спектров (ПЧС) результатов использования модели рассеяния света на цифровой модели рельефа (ЦМР) в коррекциях резкости демонстрируют возможность их увеличения в соответствии с аналогичными коррекциями на физически реализованных дополнительных каналах зондирования с формированием увеличенного объема дискретизирующего аналогового изображение пикселей, что при промышленном применении в коррекции резкости сулит эффект экономии из-за отказа от запусков дополнительных космических аппаратов или от методов изометрических повторов следов орбит аппаратов на поверхности Земли.

В настоящее время в литературе не встречается прецедента описания, где упоминается аналогичное использование модели рассеяния света на ЦМР зондируемого ареала в коррекции резкости, кроме публикаций статей и докладов авторов в ИКИ РАН РФ за последние несколько лет.

2. Методика проведения коррекции цифрового космического изображения. Объектом исследования данной работы являются следующие две сущности. С одной стороны, это космическое, сформированное постфактум изображение исследуемого ареала, преобразуемое в изображение с более высоким значением резкости, поддерживающее более высокое разрешение, значение которого не проектировалось изначально для выполнения орбитальной съемки [2] или подготовленное для дальнейшей тематической обработки [16]. С другой стороны, это метод формирования изображения со сверхвысоким разрешением, который не использует подходы получения и применения сдвинутых пикселей (субпикселей) на параллельных оптических системах, реализуемых на дублирующих полетах аппаратов и других методах дополнительной съемки исследуемого ареала.

На схеме (см. рис. 1) приведена реализация технологии сверхвысокого разрешения для двух выделенных строк сдвинутых субпиксельно растров изображений, т. е. сдвинутых на половину апертуры пиксела друг относительно друга по горизонтали. Приведенная схема поддерживается однозначностью решения системы уравнений для яркостей искомым пикселей сверхвысокого разрешения по отделенным цветовым (спектральным или кросс-спектральным) каналам [3],[7].

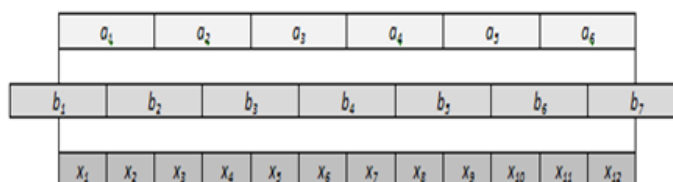


Рис. 1. Одномерный вариант реализации сверхвысокого разрешения

Fig. 1. One-dimensional implementation of ultra-high resolution

Здесь элементы $a_1 - a_6$, $b_1 - b_7$ соответствуют расположению и значениям яркостей в параллельном (или раздвоенном – условно параллельном) световом потоке при формировании двух изображений одного и того же ареала – пикселей чувствительного транспаранта (или приборов с зарядовой связью (ПЗС)), а $x_1 - x_{12}$ – это виртуальные пиксели, структурирующие в модели сверхвысокого разрешения световой поток на транспарант (или ПЗС) с удвоенной дискретизацией, значения яркости которых необходимо вычислить.

Выход b_1 и b_7 за пределы апертуры оптической системы на рисунке означает, что обеспечена их полная засветка. Таким образом, формируется полностью определенная система линейных уравнений

для нахождения яркостей пикселей восстанавливаемого изображения в каждом из цветовых каналов:

$$\begin{cases} x_{2i-1} + x_{2i} = a_i & (i = 1, 6) \\ x_1 = b_1/2 \\ x_{2j} + x_{2j+1} = b_k & (j = 1, 5; k = 2, 6). \end{cases} \quad (1)$$

Погрешности в геометрических размерах пикселей ПЗС и погрешности размещения их центров в идеальной (гипотетической) матрице фотоприемного элемента суммируются с погрешностями совмещения изображений со сдвигом и с некорректно скомпенсированными погрешностями, вызванными орбитальным поведением оптической оси аппарата [6], порождая безуспешность детального учета погрешностей. Это приводит к снижению эффекта в улучшении резкости и пространственного разрешения в моделях сверхвысокого разрешения, который согласно схеме (см. рис. 1) и в решении соответствующих систем уравнений предварительно представлялся кратным двум. В работе [7], например, как и во многих других, это обстоятельство отражено в виде достижений по улучшению разрешения в 1,6-1,8 раз, а не в 2 раза, если делать выводы по идеальной схеме сверхвысокого разрешения. Кроме того, можно использовать приведенное ниже выражение [4]:

$$L = \frac{M}{2r} = \frac{hZ(y, \beta)}{2rf}, \quad (2)$$

где L — измеряемое по методу Рэля в единицах длины возможное линейное разрешение на местности или апертура формируемого псевдопиксела на ареале; M — соответственно, масштаб и высота наблюдения; $Z(y, \beta)$ — масштабный коэффициент при перспективном наблюдении; y — угол отклонения оптической оси от вертикали; β — текущий угол поля изображения; r — разрешающая способность носителя информации (вычисляемая по методу Фуко по верхней пространственной частоте изображения на носителе или определяемая, например, с помощью микр и обеспечиваемая предпринимаемыми технологическими усилиями, в том числе и технологиями сверхвысокого разрешения); f — фокусное расстояние аппаратуры наблюдения космического аппарата (КА).

Формула (2) позволяет определить размеры псевдопиксела, позиционированного на зондируемой поверхности, а также размер пикселей на ПЗС. Целесообразно тем не менее учесть качество изготовления элементов оптики и недостаточную состоятельность методов компенсации орбитальных факторов, ухудшающих качество изображения при его формировании [6], т. е. учесть эффективную частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) тракта формирования аппаратурой КА световых потоков: в связи с изложенным выше полоса «пропускания» пространственных мод у такой ЧКХ может оказаться невелика и попытки улучшения разрешения (за счет параметра r) приведут к уменьшению апертур псевдопикселей на ареале с отсутствием существенного улучшения разрешения по Рэлю и увеличения детальности на формируемом изображении зондируемого ареала.

Коррекцию резкости изображений целесообразно начинать с синтеза ЧКХ, сложившегося для данного изображения тракта зондирования с последующей ее оптимизацией под квазипрямоугольное по форме огибающей ее поверхности окно пропускания ПЧС гипотетических изображений. Стартовая ЧКХ для последующей оптимизации определяется как частное от деления ПЧС регистрируемого изображения на ПЧС этого же изображения, обработанного единичным, но со слабо возмущенным усилением верхних мод спектрального представления оператором деконволюции [13].

При этом коррекция резкости выполняется итеративными соотношениями Ван Циттерта (2), выводимыми из модернизированного фундаментального соотношения Винера – Тихонова или рекурсивным продолжением ПЧС изображений на методе аддитивной коррекции [4] до достижения требуемой или заявленной погрешности вычисления оператора деконволюции и/или до наступления начала перерождения процесса коррекции резкости в контрастирование.

Приведем получение модернизированной формулы Винера – Тихонова из спектрального представления популярной инверсной фильтрации при гипотетическом случае измерения на изображении функции рассеяния точки (ФРТ), соответствующей возможному полному ее спектральному портрету $F(\text{ФРТ}_0)$ [2], [15]. Инверсная фильтрация имеет вид:

$$F(S_I) = \frac{F(S_R)}{F(\text{ФРТ}_0)} = F(S_R)(F(\text{ФРТ}_0))^{-1}, \quad (3)$$

где F — двумерное преобразование Фурье (т. е. ПЧС), $(F)^{-1}$ — деление единицы на отсчеты комплексного ПЧС; S_R — наблюдаемое и сформированное постфактум изображение, S_I — восстанавливаемое изображение; ФРТ_0 — это ФРТ с полным спектральным портретом.

ФРТ целесообразно определять по парам «Опорный ориентир – имеющийся его эталон». Определяемая по опорным ориентирам или слепым восстановлением [8] ФРТ тракта зондирования для предъявленного изображения требует пополнения спектрального портрета до оптимизированной частотно-контрастной характеристики $\text{ЧКХ}_0(\omega_i, \omega_j)$ тракта зондирования для данного изображения S_R . $F(\text{ФРТ}_0)$ в

формуле (3) заменим на $H(\omega_i, \omega_j)$, т. е. на спектр ФРТ с неполнотой заполнения диапазона пространственных частот задачи. Числитель и знаменатель в (3) домножим на $H^*(\omega_i, \omega_j)$ (* – символ комплексного сопряжения) и, добавляя аддитивно в знаменатель «умеренно» подавляющий верхние моды ПЧС изображения параметр регуляризации $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$, получим модернизированный для коррекции резкости фильтр Винера – Тихонова со спектром ядра оператора деконволюции H_M^{-1} :

$$F(S_I) = \frac{H^*(\omega_i, \omega_j)F(S_R)}{|H^*(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}} = H_M^{-1}F(S_R). \quad (4)$$

С помощью частотно-зависимой добавки $v(\omega_i, \omega_j)$ [13], дополняющей H_M^{-1} до оптимизированной $(\text{ЧКХ})_0^{-1}(\omega_i, \omega_j)$ тракта настолько близко, насколько это можно будет сделать, не возбуждая артефактов, подобных резидентному контрастированию на восстанавливаемом изображении, дополнительно получим выражение для откорректированного под оптимальную $(\text{ЧКХ})_0(\omega_i, \omega_j)$ модифицированного фильтра Винера – Тихонова:

$$F(S_I) = F(S_R) \left(\frac{H^*(\omega_i, \omega_j)}{|H^*(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}} + v(\omega_i, \omega_j) \right) = F(S_R)(H_M^{-1} + v). \quad (5)$$

Оптимизация ЧКХ проводится поиском оптимального решения системы неравенств, сформулированной для значений функционалов, построенных на следующих требованиях:

- минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;
- осуществления наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта;
- выдерживания непревышения значением порядка обобщенного градиентного оператора стартовой аддитивной коррекции резкости порога 0,25, при котором резидентно могут присутствовать глобальное контрастирование и даже выделение контуров.

При этом реализуется процесс минимизации нормы разности между оптимизированной $(\text{ЧКХ})_0^{-1}$ и H_M^{-1} на основе самосогласованных вычислений: итеративно на потоке значений составленного функционала вычисляемой нормы с подстановкой каждый раз определенной добавки $v(\omega_i, \omega_j)$ в соотношение (5) вплоть до выявления зарождения процесса контрастирования на исходном изображении.

Введем откорректированное спектральное представление $H_{\lambda M}^{-1}$ в виде соотношения

$$H_{\lambda M}^{-1} = H_M^{-1} + \lambda v, \quad (6)$$

где $0 < \lambda < 1$.

Если из выражения (6) найти $H_{\lambda M}^{-1}$ и обозначить за Y , то для S_I получим итеративное представление Ван Циттерта интегрального оператора деконволюции в обобщенной и компактной форме:

$$1\text{-й шаг} - S_I^{(0)} = S_R; \quad \dots; \quad n\text{-й шаг} - S_I^{(n)} = S_R + F^{-1}(1 - Y) ** S_I^{(n-1)}; \quad (7)$$

здесь символ ** обозначает операцию двумерной свертки.

Получаемая при этом стартовая (первичная) ЧКХ может иметь сингулярные значения (из-за наличия нулей в ПЧС знаменателя соответствующего выражения). Эти сингулярные значения учитываются в дальнейшем в виде встраиваемых на месте их расположения в ЧКХ моделей регуляризованных до уровня получения финитных спектров сингулярных на мере нуль функций [5],[14], вызывающих допустимые погрешности реализации операторов деконволюции при коррекции. При этом необходимо в соответствии с регуляризованными моделями сингулярных выбросов в ЧКХ трактов зондирования осуществить сдвиг в высшую сторону критериев дискретизации изображений в соответствии с теоремой Котельникова, определяя тем самым частотную полосу решаемой задачи, значительно превышающую исходную пространственно-частотную полосу изображения.

Для измерения и контроля резкости и поддерживаемого разрешения в формирующей системе и на изображении используется в работе сближение двух (или нескольких) метрических импульсов (МИ) – конусовидных с постоянным вертикальным градиентом плотности яркости (или яркости) в пределах от нуля до номинала. Минимальное расстояние между вершинами варьируемых по телесным углам вершин конусов при этом при их сближении и при пересечении, создающее при варьировании углов конусов при их вершине уровень отсечения нижних объемов конусов с соответствием этого уровня принятым требованиям (как правило, это уровень среднего шума или немного выше) принято за пространственное или линейное разрешение по Рэлею. Обратная величина этого значения регламентирует значение разрешения по Фуко, т. к. является пространственной частотой.

Так как контрастирование подавляет мелкие детали на изображении при его нормализации и наносит вред коррекции резкости, то вставляя в расширенную апертуру в зону достижимости процедурами

обработки изображений МИ (измеривший разрешение или резкость) «шероховатый» на гранях, можно зафиксировать переход коррекции в контрастирование при выявлении недопустимого уровня сглаживания шероховатостей на гранях МИ и выявлении степени поворота самой грани метрического импульса в сторону вертикали на недопустимое значение угла поворота. Значения возмущений яркости и размеров неоднородностей — шероховатостей импортируются из гистограммы распределения размеров шероховатостей на изображении по яркостям.

В предлагаемом алгоритме, выполняемом по схеме сверхвысокого разрешения (см. рис. 1), реализуется замена сдвинутых относительно исходного паттерна на половины апертур пиксела изображений, полученных от физически реализованных каналов зондирования, изображениями от модели рассеяния света на восстановленной ЦМР зондируемого ареала.

В оптическом диапазоне излучения вычисление рассеянной компоненты для координат местонахождения КА (как правило, зоны Фраунгофера) является задачей рассеяния на статистически неровной поверхности с представлением рассеяния методом возмущений и продолжения поля в конечных разностях (в верхнее полупространство [1]).

Для регистрируемого изображения ЦМР восстанавливается по теням на исходном сюжете. Вариация углов падения зондирующего излучения на восстановленную ЦМР ареала с малым отклонением от углов при формировании изображения позволяет получить дополнительные пикселы с оптимальной для реализации сверхвысокого разрешения апертурой и необходимым субпиксельным сдвигом относительно пикселов исходного изображения.

При этом целесообразно использовать совершенствующиеся еще с середины прошлого века [9] в цифровой сейсморазведке методы продолжения полей в конечных разностях. Эти методы отличаются от рассматриваемых задач космического дистанционного зондирования в базовой алгоритмической части тем, что рассеивающих поверхностей в сейсмической задаче много (слоистая зондируемая среда), непосредственно перед приемными датчиками необходимо вносить кинематические поправки, а в космическом зондировании рассеивающая поверхность одна, нет поправок по кинематике (кроме исключительных случаев экстремальной рефракции в атмосфере). Кроме того, в сейсморазведке результирующая искомая амплитуда поля в удаленной точке определяется интерференцией волн с учитываемой фазой каждой волны, а аналогичные задачи для космического зондирования вынужденно решаются с условием формирования результирующих изображений или сигналов в приближении случайной фазы, аналогично отличиям получения голограммы от получения фотографии.

Первичная амплитуда яркости в программе миграции волн задается из исходного изображения, накопление сигналов в точках приема (на апертуре синтезируемого изображения) происходит по закону суммирования нормализованного значения энергии волн рассеянного излучения, поставляемых от процедур регулируемого направленного приема (РНП).

Для задачи рассеяния на ЦМР ареала значения длин волн зондирующего излучения будут гораздо выше длин волн реального облучения поверхности в 380 нм – 780 нм, что снижает существенно объемы вычислительных затрат. При выборе длины волны, согласованной в модели рассеяния с ожидаемым при обработке исходного изображения новым уровнем пространственного разрешения, должно обеспечиваться выполнение по теории рассеяния для зоны Фраунгофера требование $KQ < 1$ (здесь K – волновой вектор с модельной длиной волны γ , соответствующей ожидаемому разрешению, а Q – среднеквадратичные размеры неровностей, не нарушающих приведенного условия при подстановке в неравенство их среднеквадратичного значения).

Для повышения резкости и разрешения, что эквивалентно снижению или подавлению квазипостоянного среднеквадратичного фона, целесообразно, например, осуществить продолжение ПЧС изображения в сторону расположения высших мод после его синтеза методом миграции волнового поля на длине волны втрое меньшей полученного разрешения на сформированном постфактум изображении (в соответствии со статистическим правилом трех сигм, так как формируемое поле считаем стационарным).

Например, для волнового вектора с длиной волны $\gamma = 0,3\text{ м}$ соотношение $KQ < 1$ выполняется для статистических неровностей со среднеквадратичным размером Q , меньшим $(20,9)^{-1}$ м, т. е. меньшим 4,7 см. Физика, поддерживающая исследования, следующая: на изображении с разрешением в 1 м стохастические детали в 4,7 см высотой по правилу трех сигм могут быть представлены как имеющие гауссоподобную форму с апертурой пятки 14,1 см, т. е. в 7 раз меньше критерия Рэлея при заданном разрешении.

В качестве материалов для апробирования предлагаемого алгоритма в работе использовались фрагменты изображений высокого разрешения: со всех трех поочередно иницилируемых базовых каналов зондирования с аппарата Ресурс-ДК (территория Испании, район г. Рота) и со спутника Иконос (Иконос_sandiego_usa_1m) по территории США (г. Сан-Диего).

Заключение. Выполнено моделирование рассеяния с исходными углами падения светового потока на восстановленную по теням на предъявленном изображении ЦМР с формированием методом

возмущений в конечных разностях с согласованием с неоднородностями на ЦМР масштабируемых выбираемых длин волн с использованием индустриально применяемого в сейсморазведке модернизированного под условия космического зондирования ареала модуля миграции поля с восстановлением в зоне Фраунгофера изображения с пикселями на апертуре изображения, взаимный субпиксельный сдвиг которых относительно пикселей исходного изображения управляется слабыми вариациями углов падения излучения на ЦМР.

Выполненное моделирование показало, что возможность реализации коррекции резкости и поддерживаемого пространственного разрешения, а также реализации технологии сверхвысокого разрешения на сформированном постфактум космическом изображении с использованием модели рассеяния светового потока на ЦМР зондируемого ареала, без привлечения физически реализуемых дополнительных каналов дистанционного зондирования высоковероятна.

Использование пикселей с модели рассеяния на ЦМР ареала для коррекции резкости исходного изображения и реализации сверхвысокого разрешения показывает, что структурные элементы и их геометрические расположения в пространственно-частотных спектрах сохраняются, а радиусы увеличиваются не менее чем в 1,6 раз, что практически соответствует реализациям коррекции на физически подключаемых каналах зондирования.

В целом информация с моделей рассеяния заселена псевдошумовыми пикселями, что требует вместе с нормализацией получаемых изображений выполнения работ по понижению уровня шума. Тем не менее использование модели рассеяния на ЦМР ареала весьма вероятно довести до индустриальных методов с эффектом экономии средств на неосуществленные запуски дополнительных космических аппаратов.

Список литературы

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. 1972. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М., Наука, 424.
2. Бейтс Р. Мак-Доннел М. 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М., Мир, 336.
3. Винтаев В. Н., Ушакова Н. Н. 2018. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения. Саарбрюккен, Германия, Lambert Academic Publishing, 208.
4. Винтаев В. Н., Жиленев М. Ю., Ушакова Н. Н. 2018. Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли-RORSE [Электронный ресурс]. Изд. ИКИ РАН.: 132–138.
5. Владимиров В. С., Жаринов В. В. 2004. Уравнения математической физики. М., Физико-математическая литература, 400.
6. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Геча В. Я. и др. 2017. Основные источники снижения качества изображений земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 160(5): 3–19.
7. Москвитин А. Э. 2003. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрально-информационной информации. дис. канд. техн. наук: 05.13.01, Рязанский государственный радиотехнический университет. 130.
8. Остриков В. Н. 2012. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления. Техническое зрение в системах управления: Сборник трудов науч.-техн. конф. 15-17 марта 2011 г., г. Москва. Институт космических исследований РАН. 16–20.
9. Программный комплекс SPS-PC (Seismic Processing System). [Электронный ресурс] www.sps-pc.ru.
10. Рашупкин А. В. 2010. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2: 42–48.
11. Свиридов К. Н. 2019. Реальное инструментальное разрешение на местности зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли сверхвысокого разрешения. Информация и космос, 1: 150–159.
12. Селиванов А. С. 2004. Субпиксельная обработка как способ повышения пространственного разрешения в системах дистанционного зондирования [Электронный ресурс]. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Материалы II открытой Всеросс. конф. 16-18 ноября 2004 г., Москва / ИКИ РАН:47: URL:<http://www.iki.rssi.ru/earth/tes.pdf> (дата обращения 21.05.2021).

13. Фридрихс К. 1969. Возмущение операторов в гильбертовом пространстве. М., Мир, 232.
14. Удод В. А. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. 2002. дис. докт. техн. наук: 05.13.01; Томский государственный университет, 338.
15. Шовенгердт Р. А. 2010. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М., Техносфера, 560.
16. Oveisgharam S., Esteban-Fernandez D., Waliser R. 2020. Friedlets Evaluating the Preconditions of Two Remote Sensing SWE Retrieval Algorithms over the US [Электронный ресурс] Remote Sensing. 12(12): doi.org/10.3390/rs12122021.
17. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. IEEE Signal Processing Magazine, 20(3): 21-36.

References

1. Bass F. G., Fuks I. M. 1972. Rassejanie voln na statisticheski nerovnoj poverhnosti. М., Nauka, 424. [in Russian]
2. Bejts R., Mak-Donnel M. 1989. Vosstanovlenie i rekonstrukcija izobrazhenij. М., Mir, 336. [in Russian]
3. Vintaev V. N., Ushakova N. N. 2018. Netrivial'naja korrekcija kosmicheskikh izobrazhenij vysokogo razreshenija. Saarbrücken, German: Lambert Academic Publishing, 208. [in Russian]
4. Vintaev V. N., Zhilenev M. Ju., Ushakova N. N. 2018. Informacionnye tehnologii v distancionnom zondirovanii Zemli - RORSE [Jelektronnyj resurs]. Izd. IKIRAN: 132-138. conf.rse.geosmis.ru/files/earticles/2018/22.htm. [in Russian]
5. Vladimirov V. S., Zharinov V. V. 2004. Uravnenija matematicheskoj fiziki. М., Fiziko-matematicheskaja literatura, 400. [in Russian]
6. Makridenko L. A., Volkov S. N., Gecha V. Ja. and other. 2017. Osnovnye istochniki snizhenija kachestva izobrazhenij zemli, poluchaemyh pri orbital'noj opticheskoy s'jomke s borta MKA. Voprosy jelektromehaniki. Trudy VNIIEМ. 160(5):3–19. [in Russian]
7. Moskvitin A. Je. 2003. Tehnologii i algoritmy povyshenija kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovanija spektrozonal'noj informacii. dis. kand. tehn. nauk: 05.13.01. Rjazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet, 130. [in Russian]
8. Ostrikov V. N. 2012. Ocenka funkcii rassejanija tochki na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vosstanovlenija. Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija: Sbornik trudov nauch.-tehn. konf. 15-17 March 2011, Moskva. Institut kosmicheskikh issledovanij RAN: 16–20. [in Russian]
9. Programmnyj kompleks SPS-PC (Seismic Processing System). [Jelektronnyj resurs] www.sps-pc.ru.
10. Rashhupkin A. V. 2010. Tehnologii obrabotki videoinformacii, obespechivajushhie kachestvo ajerokosmicheskikh izobrazhenij. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta. 2: 42–48. [in Russian]
11. Sviridov K. N., Volkov S. A. 2019. Real'noe instrumental'noe razreshenie na mestnosti zarubezhnyh kosmicheskikh apparatov distancionnogo zondirovanija Zemli sverhвысокoго razreshenija. Informacija i kosmos. 1: 150–159. [in Russian]
12. Selivanov A. S. 2004. Subpiksel'naja obrabotka kak sposob povyshenija prostranstvennogo razreshenija v sistemah distancionnogo zondirovanija [Jelektronnyj resurs]. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa: Materialy II otkrytoj Vseross. konf. 16-18 nojabrja 2004 g., Moskva. IKIRAN, 47. www.iki.rssi.ru/earth/tes.pdf [in Russian]
13. Fridrihs K. 1969. Vozmushhenie operatorov v gil'bertovom prostranstve. Moskva, Mir, 232. [in Russian]
14. Udod V. A. 2002. Optimal'naja po razreshajushhej sposobnosti linejnaja fil'tracija izobrazhenij. dis. dokt. tehn. nauk: 05.13.01. Tomskij gosudarstvennyj universitet, 338. [in Russian]
15. Shovengerdt R. A. 2010. Distancionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenij. М., Tehnosfera, 560. [in Russian]

16. Oveisgharam S., Esteban-Fernandez D., Waliser R. 2020. Fried lets. Evaluating the Preconditions of Two Remote Sensing SWE Retrieval Algorithms over the US [Jelektronnyj resurs] Remote Sensing. 12(12). doi.org/10.3390/rs12122021.
17. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. IEEE Signal Processing Magazine. 20(3): 21–36.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Получена 04.09.2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушакова Наталья Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права

 <http://orcid.org/0000-0003-2858-7053>

Ул. Садовая, 116а, Белгород, 308023, Россия

E-mail: natush2006@yandex.ru

Винтаев Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права

 <http://orcid.org/0000-0002-9069-5517>

Ул. Садовая, 116а, Белгород, 308023, Россия

E-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Natalia N. Ushakova – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russia

Viktor N. Vintaev – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russia