



**ФИЗИКА.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
PHYSICS.
MATHEMATICAL MODELING**

УДК 528.72:629.7

DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-3-424-434

**МЕТОД ВОЗМУЩЕНИЙ ФИЗИКИ РАССЕЙЯНИЯ ВОЛН
В КОРРЕКЦИИ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ**

**PERTURBATION METHOD OF WAVE SCATTERING PHYSICS
IN CORRECTION OF SHARPNESS OF IMAGES UNDER REMOTE
SENSING**

В.Н. Винтаев

V.N. Vintaev

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

Belgorod University of Cooperation, Economics and Law,
116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia

E-mail: viktor.vn2010@yandex.ru

Аннотация

При формировании космического изображения высокого разрешения и коррекции резкости на нем целесообразно для улучшения резкости на изображении подключать процессы обработки изображений, построенные с учетом физики рассеяния световых потоков на исследуемых ареалах. В работе представлены технология и результаты соответствующей коррекции резкости для фрагментов отображения ареалов, порождающих физику рассеяния световых потоков, позволяющую использовать преимущественно метод возмущений для рассеяния падающего излучения на статистически неровных поверхностях.

Abstract

When forming a high-resolution space image and correcting sharpness on it, it is advisable to enhance image sharpness in the image to connect image processing processes built with consideration of the physics of light scattering in the studied areas. The paper presents the technology and the results of the corresponding sharpness correction for fragments of the display areas, generating physics of light flux scattering, which allows using mainly the method of perturbations to scatter the incident radiation on statistically uneven surfaces.

Ключевые слова: деконволюция, зона Фраунгофера, метод возмущений, конечно-разностная миграция волн, космическое изображение, пространственно-частотный спектр, рекурсивное продолжение пространственно-частотного спектра.

Key words: deconvolution, Fraunhofer zone, perturbation method, finite-difference wave migration, space image, spatial-frequency spectrum, recursive continuation of the spatial-frequency spectrum.

Введение

Для большинства космических изображений и представленного в работе исследуемого космического изображения можно отметить следующее: в объектив телескопа космического аппарата (КА) при способе наблюдения в надири и при боковом облучении солнцем объектов на ареале попадает рассеянное на статистически неровной поверхности излучение. Расчеты прогнозируемых и/или согласуемых с возможностями оптики интенсивностей засветок пикселей чувствительных транспарантов (приборов с зарядовой связью – ПЗС) на КА для формирования цифровых изображений исследуемых ареалов в оптическом диапазоне излучения при этом реализуются основными тремя методами – методом возмущений и продолжения (миграции) или дифракции поля в конечных разностях (в верхнее полупространство) при малых пологих неровностях, методом Кирхгофа (методом нахождения отраженных лучей) при больших, гладких и пологих неровностях и методом двухмасштабного представления неровностей в случае совершенно произвольных по параметрам статистических неровностей [Басс, Фукс, 1972; Прэтт, 1982; Тихонов, 1966]. Все три метода при синтезе изображения только приближенно соответствуют предельным требованиям объективности отображения ареалов, однако следует учесть, что сам факт наличия на изображении при его формировании пространственного разрешения с неравным нулю параметром Рэлея (минимумом апертуры функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении), соответствующего на ареале 0,3–2 м (в некоторых случаях 0,15–2 м) для снимков, квалифицируемых как снимки высокого и сверхвысокого разрешения с высочайшими достижениями по их формированию нарушает все идеальные пожелания по разрешению (и, соответственно, резкости на изображении). На современном этапе обсуждаемая объективность отображения регулируется некоторыми подогнанными под реализуемость требованиями по отношению к гипотетическим идеальным пределам [Park и др., 2003; Константинов и др., 2014; Кочанов и др., 2010]. Набор таких требований квалифицирует так называемую валидность изображения – соответствие параметров изображения требованиям по резкости, геометрическим [Бобков, Роньшин, 2010; Жиленев, Винтаев, 2011; Москвитин, 2003], яркостным характеристикам и т. д. Однако при моделировании процессов рассеяния в верхнее полупространство при всем сказанном на основании [Басс, Фукс, 1972] принципов суперпозиции волн можно начинать экспериментировать в численных расчетах с излучениями с масштабируемыми длинами волн в моделях, соответствующими уровню получаемого реального разрешения по Рэлею на ареале. Такие длины волн будут гораздо выше длин волн реального облучения поверхности в 380–780 нм, что существенно снижает объемы вычислительных затрат. Очевидно, что в модели на базе основополагающего принципа о достижении некоторого или заданного разрешения при зондировании волновым процессом необходимо работать с длиной волны, которая будет не выше ожидаемого пространственного разрешения, и для метода возмущений это дает возможность оценки среднеквадратичных размеров неоднородностей, участвующих продуктивно в рассеянии излучения [Остриков, 2012]. При выборе длины волны, согласованной в модели рассеяния с ожидаемым при обработке исходного изображения новым уровнем пространственного разрешения, должно обеспечиваться выполнение по теории рассеяния на малых неровностях (шероховатостях) [Басс, Фукс, 1972] требование $KQ < 1$ (здесь K – волновой вектор с модельной длиной волны λ , соответствующей ожидаемому разрешению, а Q – среднеквадратичные размеры малых неровностей,



не нарушающих приведенного условия при подстановке в неравенство их среднеквадратичного значения). Это позволяет получить оценку среднеквадратичных размеров неровностей, участвующих в процессе рассеяния излучения в сторону оптики KA .

В данной работе предпринята попытка построить коррекцию резкости на изображении, формируемом в модели рассеяния зондирующего излучения на исследуемом ареале с последующей дообработкой методом, который строится на положениях, совершенно не связанных с фактурой рассеивающей зондируемой поверхности, а именно: дообработка сформированного изображения строится так, чтобы частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) сложившегося в данный момент тракта зондирования приближалась по огибающей к квазипрямоугольной форме окна пропускания пространственных мод, и довести которую до желаемого состояния прямоугольности при выполняемых дообработках корректируемых изображений не всегда возможно [Грузман и др., 2002], т. к. начинает мешать процесс контрастирования изображения, в который перерождается коррекция резкости [Бейтс, Мак-Доннел, 1989; Винтаев и др., 2014; Винтаев, Ушакова, 2018а; Винтаев, Ушакова, 2018б]. К этому приводит, как правило, неучитываемый или некорректно идентифицируемый рост амплитуд верхних мод пространственно-частотного спектра (ПЧС) на некоторых выделенных участках корректируемого изображения [Ращупкин, 2010]. Соответствующих «волновых» цифровых моделей рассеяния зондирующего излучения для космических платформ пока не выявлено в литературных источниках, в связи с чем ставится эксперимент по коррекции резкости по фактум сформированного изображения, как модели исследуемого ареала, задающего стартовые (граничные) значения волновых амплитуд рассеиваемого поля, изображения, населенного в большей мере маломасштабными гладкими и пологими статистическими неоднородностями яркости, трактуемых как модели малых неровностей, для которых подбор длин модельных волн позволяет сформулировать соотношение « $KQ < 1$ », являющееся критерием использования при моделировании метода миграции (продолжения) поля в рамках соответствующей теории возмущений [Басс, Фукс, 1972].

2. Метод исследования

Исходя из вышесказанного, строим предположение о достижении на методе возмущений поддержки пространственного разрешения втрое лучшего, чем на исходном снимке, т. е. будем реализовывать миграцию рассеянного поля с длиной волны в модели $\lambda=0,3$ м. Для волнового вектора с длиной волны $\Lambda=0,3$ 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 σ (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 паллиативе и в первом приближении можно считать, что на приведенном изображении такие детали подавлены по яркости примерно в 7 раз и увеличение резкости в ожидаемые три раза по аналогичным рассуждениям позволит констатировать присутствие выявленных деталей в 4,7 см с подавлением их яркости примерно в 2,3 раза относительно среднего значения яркости на полученном изображении. Это свидетельствует о возможном увеличении степени детальности на изображении с использованием метода миграции поля на длине волны $\lambda = 0,3$ м.

Как правило, практически на всех снимках и на предъявленном снимке имеются кроме малых неоднородностей и крупномасштабные (гладкие) неровности, дающие повод для расчета рассеяния по правилам Кирхгофа, но практика расчетов интенсивностей засветок пикселей ПЗС [Шовенгердт, 2010] показывает, что применение и к таким участкам ареалов метода возмущений для углов попадания в оптику КА с учетом суммирования в точках приема по правилам суперпозиции волн со случайной фазой не меняет картину интенсивностей для формирования изображения, добавляя лишь некоторый объем вычислений для углов рассеяния, близких к углам отражения от спрямляемых площадок (по Кирхгофу). В целом практика расчетов засветок пикселей не идентична практике формирования полного изображения изучаемого участка местности за счет высокого различия объема суммируемых со случайной фазой волн [Удод, 2002; Ушакова, 2004; Ушакова, Винтаев, 2017] для зоны Фраунгофера (высота орбиты более 200 км) учитываемых участков рассеяния в методе миграции для расчета засветок и для формирования полного изображения.

Используем утилиты построения изображения сред пакета FINES, предназначенного для обработки и анализа профилей в сейсморазведке и являющегося свободно распространяемым программным продуктом из сейсмического комплекса SPS [Программный комплекс SPS-PC (SeismicProcessingSystem), 2004]: селекцию волн методом РНП (регулируемым направленным приемом) и утилиту конечно-разностной миграции волн и учетом при составлении задания комплексу SPS, что количество границ раздела сред для построения модели рассеяния равно единице (с высокой степенью прозрачности среды передачи излучения и отсутствием рефракций и объемных рассеяний, чего нельзя с уверенностью сказать при особых погодных условиях в атмосфере, представимых так называемыми капельными моделями [Шовенгердт, 2010]).

Т. к. мы не можем воспользоваться высокоэффективной утилитой когерентной фильтрации из комплекса SPS из-за замены в модели процесса интерференции волн в лучах на суммирование яркостей в лучах в режиме случайной фазы, то столкнувшись при этом с высокоэнергетической среднеквадратичной составляющей на изображении при накоплении сигнала на каждом формируемом пикселе, имеющей «низкочастотный» ПЧС с оцененным выше уровнем подавления яркости малых деталей, будем вынуждены выполнять для подавления возникающей среднеквадратичной составляющей яркости изображения описанную выше не связанную с физикой рассеяния лучей деконволюцию изображения полученного на методе возмущений при построении миграции поля.

Для выполнения деконволюции и повышения резкости и разрешения, что эквивалентно снижению или подавлению почти постоянного среднеквадратичного фона целесообразно осуществить продолжение ПЧС изображения в сторону расположения высших мод после его синтеза методом миграции волнового поля на длине волны $\lambda = 0,3$ м.

Эксперименты показывают, что аналитическое продолжение спектра за дифракционный предел $KQ = 1$ (что соответствует максимальному радиусу ЧКХ сформированного тракта зондирования) возможно с восстановлением всего нескольких пространственных частот, если энергетическое отношение вида сигнал/шум на изображении было не ниже 1000/1 [Прэтт, 1982]. Для снимков высокого разрешения это условие является практически нижней границей. Альтернативно методам аналитического продолжения спектров разработанный метод деконволюции в виде рекурсивного продолжения ПЧС приводит к эффекту продолжения спектров с расширением полос спектров (уве-



личением радиусов ПЧС) [Винтаев, Ушакова, 2018а; Винтаев, Ушакова, 2018б] до 2–4 раз.

Решение задачи коррекции резкости изображений без учета физики рассеяния волн на ареалах в дистанционном зондировании целесообразно начинать с построения ЧКХ сложившегося для данного изображения тракта зондирования с последующей ее оптимизацией под квазипрямоугольное по форме огибающей окно пропускания ПЧС гипотетических изображений. Стартовая для последующей оптимизации ЧКХ определяется как частное от деления ПЧС регистрируемого изображения и ПЧС возмущенного достаточно мало в сторону усиления высших мод ПЧС зарегистрированного изображения.

Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях:

- минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;
- максимально возможной гладкости огибающей поверхности ЧКХ;
- наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта;
- мажорирования огибающей ЧКХ⁻¹ огибающую спектрального представления оператора деконволюции (СПОД) даже с возмущающей добавкой;
- вписывания огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении опорного ориентира (ОО) в огибающую ЧКХ;
- не превышения значением порядка обобщенного градиентного оператора порога (порядок оператора 0,25 [Винтаев, Ушакова, 2018а; Винтаев, Ушакова, 2018б], при котором резидентно могут присутствовать глобальное контрастирование и далее выделение контуров в первом шаге коррекции – аддитивной коррекции, выполняемой в виде соотношения

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

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

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

а операция D^α имеет нецелый неотрицательный порядок.

Ввиду того, что восстанавливаемого изображения мы можем и не знать принципиально, то, учитывая предстоящий последующий процесс оптимизации ЧКХ с практически достоверной независимостью этого процесса от начальной формы огибающей ЧКХ, целесообразно гипотетическое изображение получить из наблюдаемого, слабо возмущая его в сторону улучшения резкости соотношением (1).

В терминах теории операторов – оператор $(\operatorname{grad}_\alpha)$ имеет порядок α , а для оператора $(1 + a(\operatorname{grad}_\alpha))$, 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 $(1 + a \operatorname{grad}_\alpha)$ по методу наименьших квадратов с минимальным значением невязки.

В соответствии с упоминаемой выше возможностью компенсации провала в верхних модах ЧКХ тракта, используя $\operatorname{grad}_{\alpha\beta}(S)$ в виде $\operatorname{grad}_{\alpha\alpha}(S) = \operatorname{grad}_\alpha(S)$ целесообразно



реализовать коррекцию S_R в виде (1) с рекурсивным использованием оператора $(1 + a \text{grad}_\alpha)$, отслеживая и предотвращая преобразование процесса коррекции резкости в контрастирование.

Производные нецелого порядка реализуем на базе прямого продолжения на вещественные значения порядка спектрального представления операции дифференцирования $-D_x^\alpha, D_y^\alpha$ ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$), определяемого для допускающих Фурье-представление функций виде:

$$D_x^\alpha, D_y^\alpha S(x, y) = \int (J\omega_x)^\alpha (J\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{J(x\omega_x + y\omega_y)} d\omega_x d\omega_y. \quad (3)$$

Первичная стартовая коррекция (a priori выполняемая с явной недостаточностью восстановления или увеличения резкости (без резидентного контрастирования)) в виде аддитивной коррекции с дальнейшими манипуляциями по технологии продолжения ПЧС изображения при выполнении условий отсутствия «чрезмерного» усиления высших мод ПЧС реализуется при достаточно малых значениях a и альфа в соотношении (1), не вызывающих эффектов контрастирования изображения.

Для получения стартового изображения с коррекцией соотношением (1) выбирается последовательно методом половинного деления интервала 0,01-0,5 ряд значений коэффициента аддитивной коррекции a с условием отсутствия признаков контрастирования при минимальном значении порядка α градиентного оператора. Минимальное значение при наборе в повторной коррекции эффективного порядка оператора значения не более 0,25 выбирается 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 стартовое значение a порядка оператора аддитивной коррекции $(0,25)^{0,5/L}$. Очевидно, что с увеличением стартового значения a и α уменьшается число L , ограничиваемое явными признаками контрастирования изображения, но растет риск пропуска лучшего результата по резкости. Для слишком малых стартовых значений параметров формулы аддитивной коррекции резкости рекурсивный процесс плавно с малым шагом дискретности при вычислениях приближается по результату к изображению с лучшей резкостью, но цена этого подхода – высокий или слишком высокий объем вычислений. Так как сюжеты и дисперсия их преобразования на изображениях псевдослучайны, то вывести некую оптимальную формулу по числу рекурсий нет возможности, т. к. все оценки операторов деконволюции можно строить на уровне вычисления их норм, которые могут быть одинаковыми кроме того и для разных сюжетов на изображениях [Коллатц, 1969; Цибанов, 2008]. Однако в интерактивном режиме процесс коррекции резкости достаточно легко оценивается, главным образом в перспективе, т.е. в направлении, куда он движется – к повышению резкости или к почти неконтролируемому повышению верхних мод ПЧС. Таким образом организуется рекурсивное продолжение пространственно-частотного спектра изображения.

3. Результаты исследования

На рисунке 1 приведен фрагмент космического изображения высокого разрешения (Ikonos_sandiego_usa_1m) со спутника Ikonos (1 м разрешения на местности) территории г. Сан-Диего в США, штат Калифорния и его ПЧС. Видно, что фактура зондируемой поверхности на 80 % по площади изображения заселена маломасштабными

и пологими неровностями. Угол места солнца соответствует отклонению вектора облучения от вертикали примерно на 30 градусов (по оценке размеров теней от объектов с приблизительно известной высотой).



Рис. 1. Исходное изображение Ikonos_sandiego_usa_1m и его ПЧС

Fig. 1. Original Image Ikonos_sandiego_usa_1m and its PCP

На рисунке 2 (Ikonos_sandiego_usa_1m) приведен вариант рекурсивного продолжения спектра на изображении с целью улучшения резкости (продолжения ПЧС) изображения на формуле аддитивной коррекции резкости с остановом процесса при появлении признаков перерождения коррекции резкости в контрастирование. Получен заметный результат в расширении радиуса ПЧС изображения.



Рис. 2. Ikonos_sandiego_usa_1m и его ПЧС: результат адаптивной деконволюции изображения на варианте рекурсивного продолжения спектра (продолжения ПЧС) изображения на формуле аддитивной коррекции резкости

Fig. 2. Ikonos_sandiego_usa_1m and its PNP: the result of adaptive deconvolution of the image on the variant of the recursive continuation of the spectrum (continuation of PNP) of the image on the formula of additive sharpness correction

Наиболее успешное расширение радиуса ПЧС приведено на рисунке 3 при использовании метода возмущений в модели миграции рассеянного поля с модификацией метода возмущений и вычисления результатов миграции поля в используемом пакете на накопление сигналов, представленных со случайной фазой с длиной волны 0,3 м, с выполнением последующей дообработки изображения оператором деконволюции построенном на основе оптимизированной ЧКХ тракта зондирования.

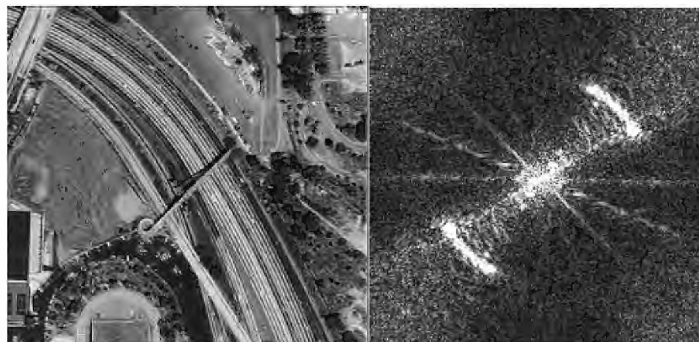


Рис. 3. Ikonos_sandiego_usa_1m и его ПЧС при использовании метода возмущений и миграции поля для коррекции операции улучшения резкости с выполнением необходимой дообработки оператором деконволюции

Fig. 3. Ikonos_sandiego_usa_1m and its PNP using the perturbation method and field migration to correct the sharpness improvement operation with the necessary additional processing by the deconvolution operator

4. Заключение

Применение метода возмущений при расчете в модели рассеяния на малых статистических неровностях, зондирующего ареал излучения с моделируемой длиной волны в 0,3 м для подстилающей поверхности, сформированной как изображение с разрешением, соответствующим 1 м на ареале с последующей адаптивной деконволюцией формируемого изображения методом рекурсивного продолжения спектра, реализует изменение детальности и фактуры полученного изображения (Рис. 3), отличающиеся в лучшую сторону от детальности и фактуры изображений при формально объективных методах поддержки квазипрямоугольности ЧКХ тракта зондирования (Рис. 2).

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» и 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».

Список литературы References

1. Басс Ф.Г., Фукс И.М. 1972. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 409.
Bass F.G., Fuks I.M. 1972. Rasseyanie voln na statisticheski nerovnoy poverkhnosti. M.: Nauka, 409.



2. Бейтс Р., Мак-Доннел М. 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 336.
Bejts R., Mak-Donnel M. 1989. Vosstanovlenie i rekonstrukcija izobrazhenij. M.: Mir, 336.
3. Бобков В.А., Роньшин Ю.И. 2010. Автоматическое сопоставление линий на калиброванных изображениях. Информационные технологии и вычислительные системы, (4): 16–24.
Bobkov V.A., Ron'shin Ju.I. 2010. Avtomaticheskoe sopostavlenie linij na kalibrovannyh izobrazhenijah. Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy, (4): 16–24.
4. Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Шербинина Н.В. 2014. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях. 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. Information technologies and computing systems, (4): 33–43.
5. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2018 а. Методы повышения детальности на материалах дистанционного зондирования для территориальных информационных систем. Белгород, ООО «ГиК», 187.
Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2018 a. Metody povysheniya detalnosti na materialakh distancionnogo zondirovaniya dlya territorialnykh informacionnykh system. Belgorod, ООО «GiK», 187.
6. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2018 б. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения. Саарбрюккен, Германия, Lambert Academic Publishing, 208.
Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2018 b. Netrivial'naja korrekcija kosmicheskikh izobrazhenij vysokogo razresheniya. Saarbrjukken, Germanija, Lambert Academic Publishing, 208.
7. 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.
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.
8. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. 2011. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой. Телекоммуникации (TELECOMMUNICATIONS AND RADIOENGINEERING). (7):2–7.
Zhilenev M.Yu., Vintaev V.N. 2011. Formula rascheta dvizheniya izobrazheniya pri orbital'noy s'emke planet optiko-elektronnoy apparaturoy. Telekommunikatsii (TELECOMMUNICATIONS AND RADIOENGINEERING). (7):2–7.
9. Коллатц Л. 1969. Функциональный анализ и вычислительная математика. Пер. с нем. М., Мир, 447 с.
Kollatc L. 1969. Funkcional'nyj analiz i vychislitel'naja matematika. Per. s. nem. M., Mir, 447 s.
10. Константинов И.С., Шербинина Н.В., Жиленев 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. 15 (186): 166–175.
Konstantinov I.S., Shherbinina N.V., Zhilenev M.Ju., Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2014. Special'naja korrekcija v procedurah reguljarizacii i iterativnyh processah umen'sheniya razmerov pjatna funkcii rassejanija toчки na kosmicheskikh izobrazhenijah. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. 15 (186): 166–175.

11. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. 2010. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии. *Солнечно-земная физика*, (16): 154–161.
Kochanov A.A., Obuhov A.G., Prosoveckij D.V. 2010. Metody vosstanovlenija izobrazhenij i raspoznavanie obrazov v radioastronomii. *Solnechno-zemnaja fizika*, (16): 154–161.
12. Москвитин А.Э. 2003. 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, 130.
Moskvitin A.Е. 2003. Tehnologii i algoritmy povyshenija kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovanija spektrozonal'noj informacii. Dissertacija na soiskanie uch. stepeni kandidata tehniceskikh nauk po special'nosti 05.13.01. Rjazan', 130.
13. 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 rasseyanija tochki na proizvol'nom sninke posredstvom slepogo vosstanovleniya. V kn.: *Tekhnicheskoe zrenie v sistemah upravleniya 2011. Materialy nauchno-tehniceskoy konferencii (Moskva, 15–17 marta 2011 g.)*. Moskva: Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN: t. 38: 16–21.
14. Программный комплекс SPS-PC (Seismic Processing System). 2004. URL: <http://www.sps-pc.ru/> (дата обращения: 15 мая 2019).
Programmnyj kompleks SPS-PC (Seismic Processing System). 2004. Available at: <http://www.sps-pc.ru/> (data obrashhenija: 15 maja 2019).
15. Прэтт У. 1982. Цифровая обработка изображений. М.: Мир. Ч.4, 115.
Prett U. 1982. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij. M.: Mir. ch.4, 115.
16. Ращупкин А.В. 2010. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. (2):42–48.
Rashchupkin A.V. 2010. Tehnologii obrabotki videoinformacii, obespechivajushchie kachestvo ajerokosmicheskikh izobrazhenij. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*. (2):42–48.
17. Тихонов В.И. 1966. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 677.
Tihonov V.I. 1966. Statisticheskaja radiotehnika. M.: Sovetskoe radio, 677.
18. Удод В.А. 2002. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. Дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Томск, 338.
Udod V.A. 2002. Optimal'naja po razreshajushchej sposobnosti linejnaja fil'tracija izobrazhenij. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk. Tomsk, 338.
19. Ушакова Н.Н. 2004. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 255.
Ushakova N.N. 2004. Korrekcija cifrovyh kosmicheskikh izobrazhenij na osnove verificirujuščego modelirovanija. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 255.



20. Ушакова Н.Н., Винтаев В.Н. 2017. Итеративный оператор деконволюции в вариантах модели формирования изображения со сверхразрешением в группировке космических аппаратов. Научные ведомости Белгородского государственного университета, 20(269)/48: 131–145.
Ushakova N.N., Vintaev V.N. 2017. Iterativnyj operator dekonvoljucii v variantah modeli formirovanija izobrazhenija so sverhrazresheniem v gruppirovke kosmicheskikh apparatov. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta, 20(269)/48: 131-145.
21. Цибанов В.Н. 2008. Регуляризирующие методы фильтрации и восстановления изображений: Дисс. на соискание ученой степени канд. физ. мат. наук. Москва, 113.
Cibanov V.N. 2008. Regularization Methods of Filtering and Image Restoration: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz. mat. nauk. Moskva, 113.
22. Шовенгердт Р.А. 2010. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. Москва: Техносфера, 560.
Shovengerdt R.A. 2010. Distancionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazhenij. Moskva: Tehnosfera, 560.
23. 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.

Ссылка для цитирования статьи
Reference to article

Винтаев В.Н. 2019. Метод возмущений физики рассеяния волн в коррекции резкости изображений при дистанционном зондировании. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 51 (3): 424–434. Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-3-424-434.

Vintaev V.N. 2019. Perturbation method of wave scattering physics in correction of sharpness of images under remote sensing. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics. Physics. 51 (3): 424–434 (in Russian). Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-3-424-434.