

УДК 528.72;629.7

DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-2-331-338

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КИРХГОФА ФИЗИКИ РАССЕЯНИЯ ВОЛН ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ОПЕРАТОРА ДЕКОНВОЛЮЦИИ ФОРМИРУЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**REPRESENTATION OF THE KIRCHHOFF OF WAVE SCATTERING PHYSICS FOR THE CORRECTION OF THE DECONVOLUTION OPERATOR OF THE FOODED IMAGE IN THE PROBLEM OF REMOTE SENSING****Н.Н. Ушакова****N.N. Ushakova**

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: natush2006@ya.ru

Аннотация

При коррекции резкости космического изображения высокого разрешения целесообразно выполнять коррекцию оператора деконволюции изображения с учетом физики рассеяния излучения на статистически неровной поверхности зондируемого участка. В работе представлены технология и результаты соответствующей коррекции резкости для фрагментов отображения ареалов, порождающих физику рассеяния световых потоков на статистически неровной поверхности, позволяющую использовать метод Кирхгофа.

Abstract

When correcting the sharpness of a high-resolution space image, it is advisable to perform the correction of the image deconvolution operator taking into account the physics of radiation scattering on the statistically uneven surface of the probed portion. The paper presents the technology and the results of the corresponding sharpness correction for fragments of display areas, generating physics of light flux scattering on a statistically uneven surface, which allows using the Kirchhoff method.

Ключевые слова: деконволюция, функция рассеяния точки, зона Фраунгофера, метод Кирхгофа, космическое изображение, пространственно-частотный спектр

Keywords: deconvolution, point scattering function, Fraunhofer zone, Kirchhoff method, space image, spatial frequency spectrum

Введение

Для сформированного изображения с коррекциями от возмущений орбитальных параметров движения космического аппарата (КА) в качестве модели тракта дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обоснованно популярна модель Бейтса и Мак-Доннела [Бейтс, Мак-Доннел, 1989] с аналитической записью в виде уравнений Фредгольма. По пространственно-частотным спектрам (ПЧС) этих изображений восстанавливается частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) тракта простым отношением ПЧС [Park, Park, Kang, 2003; Винтаев и др., 2014; Винтаев, Ушакова, 2018а; Винтаев, Ушакова, 2018б], а построение поля скоростей движения изображения (СДИ) на фокальной плоскости фиксирующей аппаратуры для коррекции смазов на изображении позволяет повысить разрешение на изображении [Жиленев, Винтаев, 2011; Константин ов и др., 2014; Остриков, 2012]. Использование этих методов требует высокой точности оценок



СДИ и снижения степени или отказа от регуляризации возникающих (особенно при вычислениях отношений ПЧС) сингулярностей, т. к. регуляризация в деконволюции изображений приводит к работе с изображениями «не совсем теми», с которыми необходимо работать [Цибанов, 2008; Шовенгердт, 2010]. Попадающее в объектив телескопа КА излучение является рассеянным на статистически неровной поверхности. Для оптического диапазона излучения решения задачи рассеяния при этом охватываются основными тремя подходами – методом возмущений и продолжения 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]. И все это достаточно некорректно и даже примитивно с физической точки зрения, хотя решения соответствующих волновых уравнений обеспечиваются достаточным набором краевых и граничных условий с различными степенями взвешенного усреднения, позволяющих искать сходящиеся решения по распределению интенсивности рассеянного поля и его флуктуациям, тем более что делается это практически всегда для зоны Фраунгофера (для зоны разделения пространственных спектров и для ставших плоскими фронтов волн), в которой и находится КА.

Упомянутая выше модель Бейтса и Мак-Доннела оперирует с амплитудами принятого и восстанавливаемого по резкости изображения. Многократные попытки записи соответствующих выражений для интенсивностей не давали заметного успеха – расхождения между реальными данными и вычисляемыми получались заметные [Кольцов, 2011]. В данной работе предпринята попытка построить коррекцию резкости на формируемом изображении методом дополнительной коррекции оператора деконволюции, который, строго говоря, исходно синтезируется на совершенно абстрактных, хотя и верных исходных парадигмах. Например, на парадигме: ЧКХ тракта зондирования должна иметь квазипрямоугольную форму окна пропускания пространственных мод, которую выдержать при всевозможных обработках изображения не всегда удается [Ушакова, 2004; Ушакова, 2016; Ушакова, Винтаев, 2017]. В настоящей работе ставится эксперимент по коррекции резкости постфактум сформированного изображения с крупномасштабными неровностями. Предстоит работать с изображением, для которого $KQ \gg 1$, что является спусковым механизмом на запуск метода Кирхгофа при оценке рассеянной компоненты излучения (здесь K – волновой вектор с длиной волны 380 нм–780 нм, а Q – размеры неровностей до 6 м в среднем) [Басс, Фукс, 1972; Шовенгердт, 2010]. Угол места солнца соответствует отклонению от вертикали на 30 градусов.

Метод исследования

Достижимая степень «прямоугольности» огибающей ЧКХ, получаемой по «входу-выходу» тракта при коррекциях резкости, определяется технологическим совершенством операций в тракте ДЗЗ. Однако и для трактов ДЗЗ с превентивными мерами по «улучшению» их работы можно на сформированном изображении иметь на итеративной деконволюции пропущенные лучшие результаты [Ушакова, Винтаев, 2017].

Для подавления функции рассеяния точки (ФРТ) строится модификация фильтра Винера на соотношении инверсной фильтрации изображения (для гипотетического случая определения полного спектрального портрета $F(\Phi PT_0)$) [Грузман и др., 2002]:

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

здесь F – двумерное преобразование Фурье (т. е. ПЧС), $(F)^{-1}$ – деление единицы на отсчеты комплексного ПЧС, спектры и ЧКХ всегда ограничены верхней модой ω_6 , моды задаются



$(\omega_x, \omega_y) = (\omega_i, \omega_j)$ – координатами в двумерном ПЧС изображения $S(x, y)$, S_R – наблюдаемое и сформированное постфактум изображение, S_H – восстанавливаемое изображение.

Определяемая по опорным ориентирам ФРТ требует пополнения спектрального портрета на оптимизированную частотно-контрастную характеристику $ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j)$ [Винтаев, Ушакова, 2018, Удод, 2002]. $F(\Phi PT_0)$ заменим на $H(\omega_i, \omega_j)$, т. е. на спектр ФРТ с неполнотой покрытия диапазона частот задачи. Числитель и знаменатель в (1) 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 используемый широко в коррекции резкости модифицированный фильтр Винера-Тихонова со спектром ядра оператора деконволюции H_M^{-1} [Морен, 1965; Рашупкин, 2010]

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

Частотно-зависимая добавка $\nu(\omega_i, \omega_j)$ пополняет $H(\omega_i, \omega_j)$ в соответствии с оптимизированной $ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j)$ тракта настолько близко, насколько это можно будет сделать, не возбуждая артефактов подобных резидентному контрастированию на изображении при подборе уровня первичной коррекции изображения обобщенным градиентным оператором [Винтаев, Ушакова, 2018]. Выражение для откорректированного под оптимальную $ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j)$ фильтра Винера-Тихонова имеет тогда вид

$$F(S_H) = F(S_R) (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) + \nu(\omega_i, \omega_j)) = F(S_R) (H_M^{-1} + \nu), \quad (3)$$

а $(ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j))^{-1}$ – это спектральный портрет оператора деконволюции $Deconv_{чкх}$, построенного на ЧКХ.

Техника оптимизации ЧКХ подгонкой под квазипрямоугольное окно пропускания ПЧС предобработкой исходного изображения представлена в [Винтаев, Ушакова, 2018; Константинов и др., 2014] и без пополнения набора используемых операций обобщенным градиентным оператором нецелого порядка необозримо громоздка (за счет выдерживания сходимостей и точностей реализации операторов с нецелым порядком в рядах, сходных с рядами Тейлора по целым порядкам производных).

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

$$H_{\lambda M}^{-1} = H_M^{-1} + \lambda \nu, 0 < \lambda < 1, \quad (4)$$

и ввести обозначение Y для получающегося из (4) соотношения $H_{\lambda M} = H_M / (1 + \lambda \nu H_M)$, т. е. $Y = H_{\lambda M} = H_M / (1 + \lambda \nu H_M)$, то для S_H в соответствии с [Грузман и др., 2002] получим итеративное представление Ван Циттера интегрального оператора деконволюции в обобщенной и компактной форме:

$$S^{(0)}_H = S_R; \\ S^{(n)}_H = S_R + F^{-1} (1 - Y) ** S^{(n-1)}_H; \quad (5)$$

здесь символ ** обозначает операцию двумерной свертки.

В оптику КА попадает рассеянное излучение, в рассматриваемом изображении рассеянное в сторону вертикали. Аппаратные коэффициенты усиления сигнала подобраны под расстояние до 300 км (это стоит подчеркнуть, т. к. падение амплитуды оптического сигнала происходит в $(300 \text{ км})^2$ раз). Апертура раскрыва оптики КА порядка 1 м, максимум в индикатрисе рассеяния либо попадет на вертикаль, либо нет. 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: селекцию волн методом РНП (регулируемым направленным приемом) и утилиту миграции Кирхгофа (построения



продолжения волнового поля по критериям Кирхгофа) [Программный комплекс SPS-PC (Seismic Processing System), 2004].

Получим снова предъявленное изображение с осреднением картины по малым неровностям [Москвитин, 2003]. Диапазон яркостей на нем будет увеличен существенно, т. к. с помощью РНП к точке излучения соберутся все сигналы от рассеяния на участке площадки при гипотетическом движении КА до отклонения направления на аппарат на 60 градусов от вертикали, при котором расстояние до аппарата увеличится в 2 раза, а его квадрат в 4 раза. Этого достаточно, чтобы считать границу поля рассеяния от данной площадки достигнутой. Первичная амплитуда яркости задается из исходного изображения, накопление сигналов происходит по закону суммирования амплитуд, поставляемых от РНП с возведением в квадрат с вычислением затем корня квадратного из получаемой суммы. Полученное новое изображение как S_R вставляется в формулу (1) и далее выполняется коррекция, описанная формулами (1)–(5).

Сейсмические методы продолжения полей и фильтрации изображений отличаются от задач дистанционного зондирования в базовой алгоритмической части тем, что рассеивающих поверхностей в сейсмической задаче много (слоистая зондируемая среда), а в ДЗЗ – одна, и все задачи решаются с условием формирования изображений или сигналов в приближении случайной или даже неизвестной фазы [Бобков, Роньшин, 2010]. Например, веерный фильтр (аналог РНП) представляет собой в преломлении к оптическим вычислениям весьма продуктивный интерференционный фильтр при условии своевременного удаления накапливающейся постоянной в процессах суммирования сигналов со случайной фазой [Винтаев, Ушакова, 2018а; Винтаев, Ушакова, 2018б].

Результаты исследования

На рисунке 1 приведен фрагмент космического изображения высокого разрешения со спутника QuickBird, реализующего на местности 0.6 м пространственного разрешения. Съемка выполнена по территории г. Гавана. Оригинальный файл имеет имя QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6m. Видно, что фактура зондируемой поверхности существенно заселена статистическими неровностями, удовлетворяющими требованию пологости и гладкости. На 70 % площади снимка эти неровности являются крупномасштабными неровностями, дающими повод для расчета рассеяния по правилам Кирхгофа.

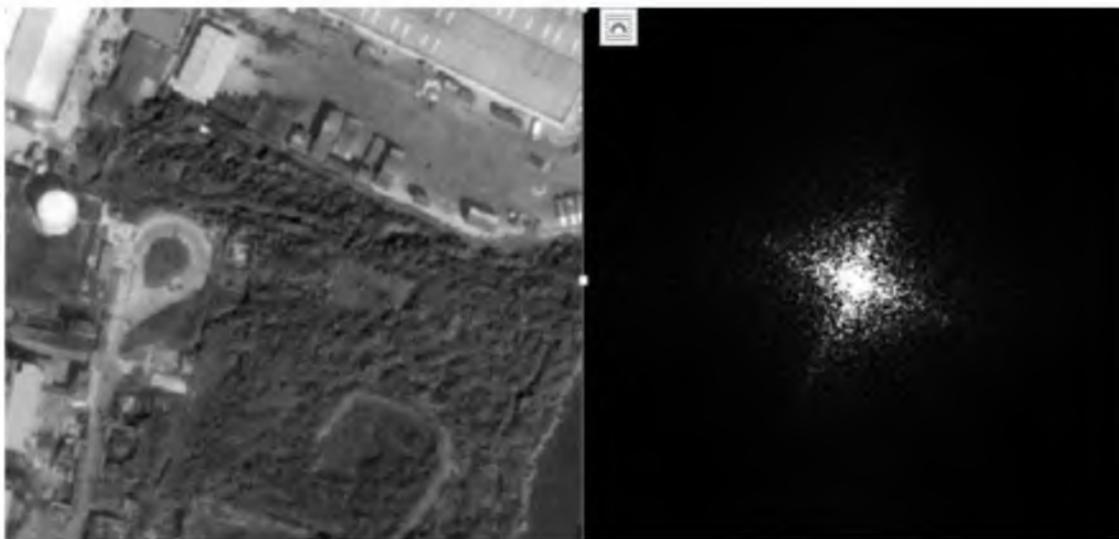


Рис.1. Исходное изображение QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m и его ПЧС
Fig.1. Original image QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m and its PNE



На рисунке 2 (QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6m) приведен результат адаптивной деконволюции изображения. Получен осязаемый эффект в виде расширения радиуса ПЧС изображения.

Наиболее успешное расширение радиуса ПЧС приведено на рисунке 3 при использовании метода Кирхгофа для коррекции операции улучшения резкости с выполнением необходимой дообработки изображения и модификации метода Кирхгофа в используемом пакете на накопление сигналов, представленных со случайной фазой.

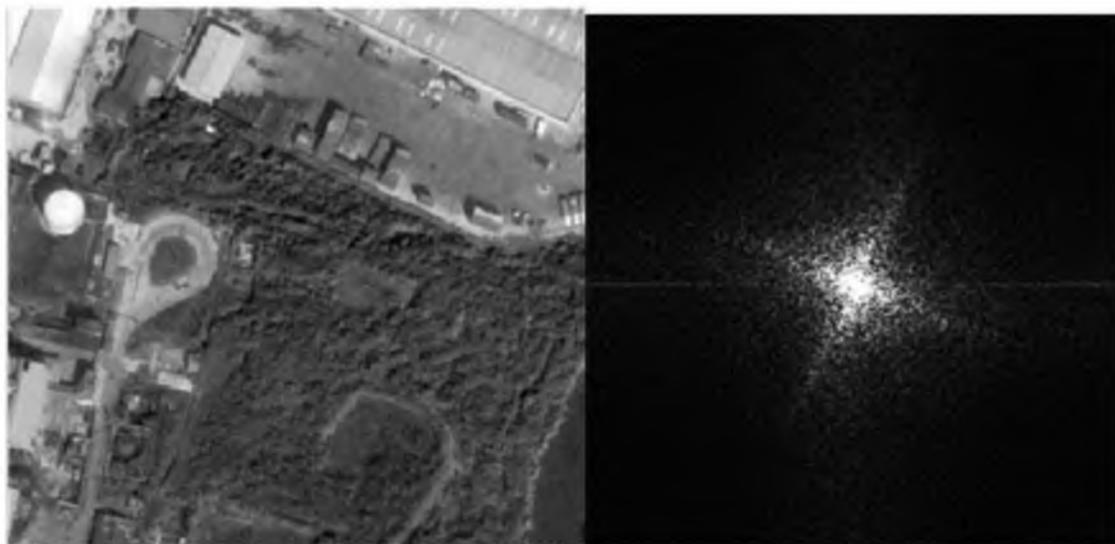


Рис. 2. QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m его ПЧС: результат адаптивной деконволюции изображения

Fig. 2. QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m of its EAP: the result of adaptive image deconvolution

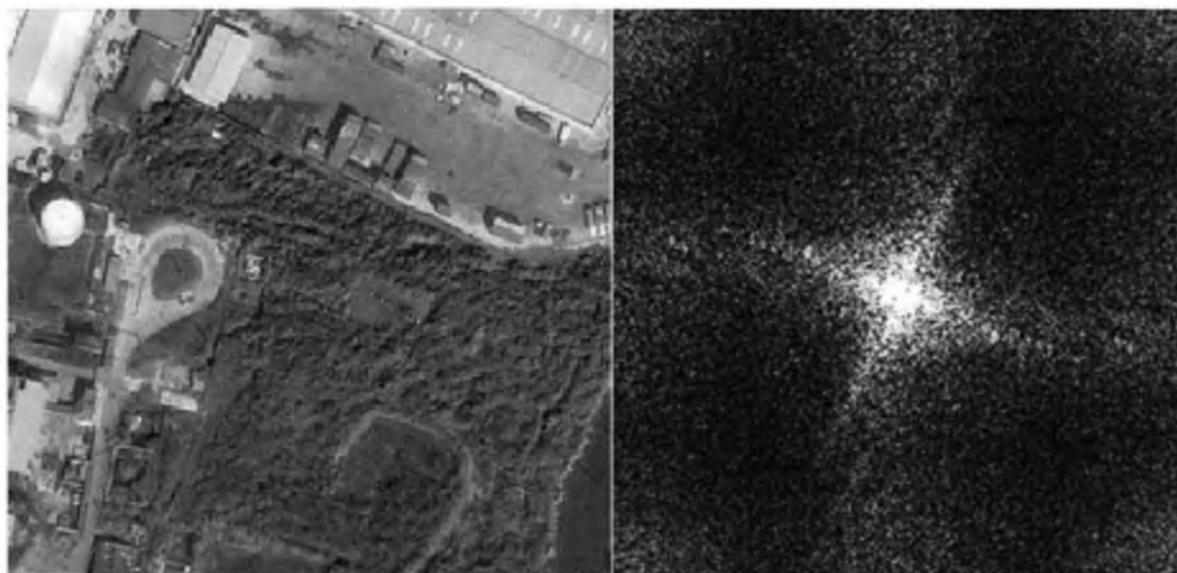


Рис. 3. QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m и его ПЧС при использовании метода Кирхгофа для коррекции операции улучшения резкости с выполнением необходимой дообработки изображения

Fig. 3. QuickBird_havana_industry_image_chip-0.6 m and its PHL using the Kirchhoff method for correcting the sharpness enhancement operation with the necessary additional image processing

В целом на применение метода Кирхгофа с устойчивым увеличением радиуса ПЧС исследовано 50 различных космических изображений.



Заключение

Применение метода Кирхгофа (рассеяния излучения на спрямляемых площадках по законам отражения, т. к. размер площадки больше длины волны) реализует разброс лучей в раскрытие индикатрисы рассеяния с максимумом интенсивности в углах, близких к направлению отражения, что приводит к изменению масштаба изображения. Кроме того, контрастность на изображении становится гипертрофированной и разрядность цифрового представления пикселей приходится многократно увеличивать. При сборке изображения после восстановления масштаба результат контрастирования необходимо выявить, отделить как процедуру и снизить до исходного уровня по анализируемым гистограммам. В целом детальность и фактура полученного методом Кирхгофа изображения (Рис. 3) отличаются 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 [Wave scattering on a statistically uneven surface]. M. Nauka Publ, 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 [Restoration and reconstruction of images]. 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 kalibrovannykh izobrazhenijah [Automatic line matching on calibrated images]. Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy, № 4: 16–24.
4. Винтаев В.Н., Жилнев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина 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 (in Russian).
5. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2018а. Методы повышения детальности на материалах дистанционного зондирования для территориальных информационных систем. Белгород, ООО «ГиК», 187.
Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2018. Metody povysheniya detalnosti na materialakh distancionnogo zondirovaniya dlya territorialnykh informacionnykh system [Methods to improve the detail on remote sensing materials for regional information systems]. Belgorod, ООО «GiK», 187.
6. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. 2018б. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения. Саарбрюккен, Германия, Lambert Academic Publishing, 208.



Vintaev V.N., Ushakova N.N. 2018. Netrivial'naja korrekcija kosmicheskikh izobrazhenij vysokogo razreshenija [Nontrivial correction of high resolution space images]. Saarbrücken, 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 [Digital image processing in information systems]. 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 [The formula for calculating the motion of the image in the orbital survey of planets by optical-electronic equipment]. Telekommunikatsii (TELECOMMUNICATIONS AND RADIOENGINEERING). № 7:2–7.

9 Кольцов П.П. 2011. Эмпирический подход к оценке алгоритмов выделения границ. Информационные технологии и вычислительные системы, 2011. № 2: 50–57.

Kol'cov P.P. 2011. Jempiricheskij podhod k ocenke algoritmov vydelenija granic [Empirical approach to the estimation of border detection algorithms]. Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy, № 2: 50–57.

10. Константинов И.С., Щербинина 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 reguljarizaciii iterativnyh processah umen'shenija razmerov pjatna funkcii rassejanija tochki na kosmicheskikh izobrazhenijah [Special correction in regularization procedures and iterative processes of reducing the spot size of the point spread function on space images]. 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 [Methods of image restoration and pattern recognition in radio astronomy]. Solnechno-zemnajafizika, № 16: 154–161.

12. Морен К. 1965. Методы Гильбертова пространства. Пер с польск. М., Мир, 570.

Moren K. 1965. Metody Gil'bertova prostranstva [Methods of Hilbert space]. Per s pol'sk. M., Mir, 570.

13. 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.Je. 2003. Tehnologii i algoritmy povyshenija kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovanija spektrozonal'noj informacii [Technologies and algorithms for improving the quality of images of the earth's surface based on the integration of spectral information]. Dissertacija na soiskanie uch. stepeni kandidata tehniceskikh nauk po special'nosti 05.13.01. Rjazan', 130.

14. 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 snimke posredstvom slepogo vosstanovleniya [Estimation of the point spread function on an arbitrary image by means of blind recovery]. V kn.: Tekhnicheskoe zrenie v sistemah upravleniya 2011 [Technical vision in control systems 2011]. Materialy nauchno-tehniceskoy konferencii (Moskva, 15–17 marta 2011 g.). Moskva, Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN: t. 38: 16–21.

15. 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) [SPS-PC software package]. 2004. URL: <http://www.sps-pc.ru/> (data obrashhenija: 15 maja 2019).

16. Прэйт У. 1982. Цифровая обработка изображений. М., Мир. Ч.4, 115.



- Prett U. 1982. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing]. M., Mir Publ. CH. 4, 115.
17. Ращупкин А.В. 2010. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. № 2:42–48.
- Rashhupkin A.V. 2010. *Tehnologii obrabotki videoinformacii, obespechivajushhie kachestvo ajerokosmicheskikh izobrazhenij* [Video processing technologies that ensure the quality of aerospace images]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*. № 2:42–48.
18. Тихонов В.И. 1966. Статистическая радиотехника. М., Советское радио, 677.
- Tihonov V.I. 1966. *Statisticheskaja radiotekhnika* [Statistical radio engineering]. M., Sovetskoe radio, 677.
19. 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 razreshajushhej sposobnosti linejnaja fil'tracija izobrazhenij* [Resolution-optimized linear image filtering]. *Diss. Na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk. Tomsk*, 338.
20. 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 verificirujushhego modelirovanija* [Correction of digital space images based on verifying modeling]. *Diss. Na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod*, 255.
21. Ушакова Н.Н. 2016. Математическая модель процесса формирования космического изображения высокого и сверхвысокого разрешения в группировке космических аппаратов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. 20 (44): 155–167.
- Ushakova N.N. 2016. *Matematicheskaja model' processa formirovaniya kosmicheskogo izobrazheniya vysokogo i sverhvyssokogo razresheniya v gruppirovke kosmicheskikh apparatov* [Mathematical model of the process of forming a high-resolution and ultra-high resolution space image in a spacecraft constellation]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 20 (44): 155–167.
22. 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 formirovaniya izobrazhenija so sverhrazresheniem v gruppirovke kosmicheskikh apparatov* [Iterative deconvolution operator in variants of the super-resolution imaging model in the spacecraft constellation]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 20 (269)/48: 131–145.
23. 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 (in Russian).
24. 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* [Remote sensing. Methods and models of image processing]. *Moskva, «Tehnosfera»*, 560.
25. 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

Ушакова Н.Н. 2019. Представление Кирхгофа физики рассеяния волн для коррекции оператора деконволюции формируемого изображения в задаче дистанционного зондирования. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 51 (2): 331–338. Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-331-338.

Ushakova N.N. 2019. Representation of the Kirchhoff of wave scattering physics for the correction of the deconvolution operator of the formed image in the problem of remote sensing. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics. Physics*. 51 (2): 331–338 (in Russian). Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-331-338.