

УДК 528.72; 629.7

DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-2-229-238

ФОРМИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С МОДЕЛИРОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕАЛЬНОГО АППАРАТА**THE FORMATION OF THE SPACE IMAGE SUPER RESOLUTION MODELING GROUP OF THE IMAGES OF THE REAL APPARATUS****Н.Н. Ушакова**
N.N. UshakovaБелгородский университет кооперации, экономики и права,
Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, 116аBelgorod University of Cooperation, Economics and Law,
116a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia

e-mail:natush2006@yandex.ru

Аннотация

При формировании изображения сверхвысокого разрешения с использованием технологии моделирования группировки спутников с учетом возникающих сингулярностей в результатах необходимого синтеза частотно-контрастной характеристики трактов зондирования целесообразно модифицировать известные математические подходы, в том числе правила применимости основных принципов теоремы Котельникова дискретизации функций для согласования условий сходимости итеративных операторов деконволюции изображений и условий по дискретизации изображений.

Abstract

In the formation of image super resolution using technology modeling a constellation of satellites in view of emerging singularities in the results of the necessary synthesis of the frequency-contrast characteristics of the sensing circuits it is expedient to modify a known mathematical approaches, including rules for the applicability of the basic principles of the Kotel'nikov's theorem of sampling functions for matching the conditions of convergence of iterative operators deconvolution of images and conditions for sampling of images.

Ключевые слова: сверхразрешение, деконволюция, субпиксельный сдвиг, группировка спутников, сингулярные функции, теорема Котельникова.

Keywords: superresolution, deconvolution, sub-pixel shift, grouping of satellites, singular functions, Kotel'nikov's theorem.

Введение

Повышению эффективности формирования изображения со сверхразрешением способствует, особенно в группировках спутников, деконволюция зарегистрированного или сформированного изображения в тракте дистанционного зондирования каждого аппарата [1,2,3], выполняемая с целью улучшения и восстановления резкости и, соответственно, пространственного разрешения, которые уменьшаются как за счет наличия на изображениях остаточных функций рассеяния точки (ФРТ), так и ФРТ из-за внесения в процессе обработки изображений, особенно в оверлейных операциях, погрешностей [4,5].



Организуется деконволюция наиболее целесообразно в виде итеративного оператора на обрабатываемом паттерне (в том числе с использованием спектральных представлений оператора деконволюции (СПОД)).

Одной из проблем для моделирования группировок при этом является необходимость регуляризации возникающих сингулярных значений в синтезируемой частотно-контрастной характеристике (ЧКХ) тракта зондирования, необходимой для синтеза модифицированного фильтра Винера-Тихонова и преобразования его в итеративный оператор деконволюции изображений. Однако, регуляризация приводит в итоге к квазирешениям по резкости, то есть к улучшению резкости на изображениях, всего лишь близких по некоторой норме к корректируемым изображениям [6].

В соответствии с этим предложен метод представления упомянутых сингулярностей моделями обобщенных сингулярных на мере нуль функций, парциальная свертка изображений с которыми при их подстановке в конечную формулу итеративной коррекции резкости – формулу Ван Циттера, дает решение по деконволюции с минимально возможными возмущениями измерительных характеристик обрабатываемых изображений, кроме увеличения резкости [6].

При этом необходимо увеличивать частоту дискретизации изображений не бесконечно, а в соответствии с теоремой Котельникова, в связи с финитностью всех пространственно-частотных спектров (ПЧС) изображений. Кроме того, выбирая частоту дискретизации из условия согласования с верхней модой ПЧС модели сингулярной на мере нуль функции необходимо отслеживать взаимосвязь критериев сходимости итеративного оператора деконволюции изображения и собственно критериев теоремы Котельникова [6].

Разработанная израильскими специалистами технология формирования изображения сверхвысокого разрешения ИВР [1] прописанным в технологии оператором проектирования F , порождающим связанные системы уравнений для пикселей формируемых изображений, позволяет для аппаратов с серией каналов, подобных поочередно иницируемым трем каналам спутника типа «Ресурс Д», находить субпиксельные взаимные сдвиги при совмещении изображений каналов и, соответственно, синтезировать порождающие операторы F для применения метода ИВР с целью формирования виртуального тракта зондирования и соответствующего ему изображения со сверхразрешением.

Целью работы является моделирование метода формирования космического изображения сверхвысокого разрешения в соответствующей технологии инспирирования группировки спутников на реальных, предоставляемых аппаратом изображениях в независимых каналах дистанционного зондирования с поочередным их переключением над исследуемым ареалом при орбитальном движении.

1. Построение деконволюции изображений и модели группировки из каналов спутника «Ресурс Д»

На изображениях со спутника «Ресурс Д» с трех каналов формирования изображений высокого разрешения (для различных длин волн рассеянного потока облучения ареала) при орбитальном движении аппарата, с компенсацией соответствующих задержек можно формировать панхроматическое или цветное в практически реальных цветах изображение. При этом на сюжете синтезируемого виртуального канала зондирования динамические объекты успевают «разбежаться» по интенсивности будущих назначаемых цветов и по координатам (например, автомобили или шевелящаяся крупная листва при наличии ветра). Все три канала работают с излучениями трех длин волн видимого диапазона, подобранных для наилучшего цветового отображения ареалов и объектов в модели цвета RGB. При этом можно выявлять соответствующие субпиксельные сдвиги изображений в каналах и на базе модифицированного для группировок спутников лидирующего метода сверхразрешения ИВР [1,2] формировать так же изображение со сверхразрешением. Для «Ресурс Д» таким образом созданы предпосылки осуществления стандартной технологии

последовательной съёмки объекта одним спутником за время пролёта района наблюдения. Подобные методы уже реализуются за рубежом: в спутниках Pleiades-1A, Pleiades-1B [6] используются методы сверхразрешения при синхронизации движения по крайней мере двух аппаратов, но детали процессов не раскрываются.

Формируется изображение с увеличенным числом пикселей на таком же по апертуре носителе по формуле итеративного метода ИВР:

$$S_{\text{И}}^{(n+1)} = S_{\text{И}}^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{-1}(L(S_{R_k} - S_{R_k}^{(n)}) ** \Phi PT_k), \quad (1)$$

где $S_{\text{И}}^{(n+1)}$ – следующая за n -ой итерация изображения со сверхразрешением; $S_{\text{И}}^{(n)}$ – n -ая итерация изображения со сверхразрешением; F_k^{-1} – оператор проектирования исходных и нормализованных изображений группировки на изображение со сверхразрешением; F_k – оператор проектирования изображения со сверхразрешением на исходные изображения; S_{R_k} – исходные изображения; $S_{R_k}^{(n)}$ – n -ая итерация согласуемого с исходными k -го изображения; L – оператор увеличения изображений; ΦPT_k – функция рассеяния точки на k -ом исходном изображении; $**$ – операция свертки; K – число исходных изображений для технологии сверхразрешения.

В данном случае компенсации возмущений на исходных изображениях из-за уходов фактических скоростей движения изображения (СДИ) на фокальных плоскостях от запрограммированных СДИ на орбите для «Ресурс Д» уже выполнены, и синтез оператора F_k^{-1} сводится к замерам взаимных двумерных субпиксельных сдвигов изображений, что представляет собой нетривиальную, но решенную и представленную в работе [2] задачу. Останов процесса формирования изображения осуществляется на момент начала изменения контраста изображения [1].

Измеряемая на изображении ФРТ служит для конструирования оператора деконволюции, но она не всегда обладает полнотой ее спектрального представления $F(\Phi PT)$ (F -двумерное Фурье-преобразование). Вводя для такого представления обозначение H (спектр или точнее ПЧС ФРТ с неполнотой покрытия диапазона пространственных частот задачи) и минимизируя невязку H с оптимизированной ЧКХ тракта зондирования (канала) введением частотно-зависимой добавки ν к H , получим широко используемый в коррекции резкости, но модифицированный фильтр Винера-Тихонова со спектром откорректированного ядра оператора деконволюции $H_{\text{м}}^I$ [7].

ЧКХ при этом синтезируется отношением ПЧС зарегистрированного изображения к ПЧС корректируемого изображения, а оптимизация ЧКХ заключается в соответствующей предобработке этих изображений так, чтобы огибающую ЧКХ можно было как можно лучше приблизить к квазипрямоугольной форме окна пропускания пространственных мод ПЧС на любом азимутальном ее срезе, не вызывая перерождения деконволюции в процессы контрастирования изображения, визуально принимаемые за улучшение резкости. Начинается процесс с синтеза стартовой ЧКХ при очень малой предварительной коррекции резкости на зарегистрированном изображении и оптимизацией ЧКХ приводится к оператору деконволюции с спектром ядра $H_{\text{м}}^I$ [7].

Сингулярные значения возникают в ЧКХ из-за того, что используемый в знаменателе выражения для синтеза ЧКХ ПЧС (первично или на этапе итераций) откорректированного изображения имеет достаточное количество нулей. Методы регуляризации (замена нулей стремящимися к нулю параметрами (регуляризация Тихонова) или игнорирование соответствующих пространственных частот в решаемой задаче с уменьшением в пределе полос «игнорирования») приводят всего лишь к близкому к «истине» решению, которое не может удовлетворить требованиям, предъявляемым к технологии сверхвысокого разрешения [6].

В рассматриваемом случае сингулярные на мере нуль функции – это т.н. δ -функции или ряды из их производных, их регуляризованные модели – это гауссоподобные функции (так называемые «шапочки») или ряды из их производных, а модели интервалов меры нуль – это апертуры пикселей, деленные на K , и $K \geq 7$. Это начальное значение критерия K уже обеспечивает необходимую точность совмещений и замеров сдвигов изображений, алгоритмически тарифируемую половиной апертуры «нового» пикселя, что не хуже 10^{-1} , что нормативно соответствует зонам ПЧС не поддерживаемым никакими трактами зондирования, т.е. лежащим в области полного обнуления регулярных ненулевых сигналов, что и соответствует понятию меры нуль.

Оператор деконволюции в итеративной форме – это аperiодическая двумерная свертка ядра оператора (интегрального оператора свертки) на каждой итерации и соответствующего номеру итерации изображения. Сохранение возможности точного восстановления исходного (с повышенной плотностью числа гармоник на линейный размер координатной плоскости) и даже сплошного спектра указанных объектов в соответствии с теоремой Котельникова при дискретизации для построения вычислительных процессов требует превентивно выбирать частоту дискретизации объектов на каждой координатной оси в два раза выше высшей гармоники в ПЧС объекта.

Формула погрешности итерационного процесса деконволюции имеет вид [8]:

$$\rho(S_I^{(n)}, S_I) \leq (\|T\| \rho(S_I^{(n)}, S_I^{(n-1)})) / (1 - \|T\|), \quad (2)$$

где $\rho(S_I^{(n)}, S_I) = (\sum_{i,j} (S_{I_{ij}}^{(n)} - S_{I_{ij}})^2)^{1/2}$ – задаваемое значение погрешности и евклидова метрика, построенная на значениях яркостей пикселей изображений, а $\rho(S_I^{(n)}, S_I^{(n-1)})$ исчисляется аналогично, $S_I^{(n)}$ – корректируемое на этапе итерации изображение; при этом гипотетического (ожидаемого) изображения S_I , скорее всего, не существует, и в левой части неравенства (2) стоит число не большее 10^{-1} (по принятым нормативам). Норма оператора T в соответствии с технологией итеративной деконволюции [8,9,10] равна

$$\|T\| = \left\| F^{-1}(1 - H_M) * S_I^{(n-1)} \right\| / \left\| S_I^{(n-1)} \right\|, \quad (3)$$

где числитель и знаменатель – евклидова норма (формула Пифагора) на компонентах векторов;

F^{-1} – обратное Фурье-преобразование.

Алгоритм согласования частоты дискретизации со сходимостью оператора деконволюции в задаче следующий. Задается начальное значение $K=7$ и значение погрешности итерационного оператора 10^{-1} . Выполняется процесс формирования панхроматических изображений с деконволюцией их для коррекции резкости. Останов деконволюции выполняется или по достижении значения погрешности вычисления с оператором деконволюции или на момент начала изменения контраста изображения [11,12,13]. .

Если в последнем случае значение погрешности вычисления с оператором деконволюции не достигнуто, то K увеличивается на 1 и процесс деконволюции повторяется с последующим увеличением K до достижения значения нормативной погрешности. Можно K увеличивать и на нецелое число, но это направление еще нуждается в исследовании.

2. Результаты обработки изображений в предлагаемой модели

Ниже на рисунках 1–3 приведены фрагменты сформированных кадров всех каналов с «Ресурс Д» (территория Испании) с заметной яркой точкой немного правее

центра кадра с ее субпиксельным и орбитальным (за счет СДИ) сдвигом вместе со всем формируемым сюжетом.



Рис.1. Канал 1 зондирования ареала с «Ресурс Д»
Fig.1. Channel 1 sounding of the area from «Resource D»



Рис.2. Канал 2 зондирования ареала с «Ресурс Д»
Fig.2. Channel 2 sounding of the area from «Resource D»



Рис. 3. Канал 3 зондирования с «Ресурс Д»
Fig. 3. Channel 3 sounding from «Resource D»

Далее на масштабированном окне в районе яркой точки показан один из исходных каналов (рис.4), далее (рис. 5) показан виртуальный канал со сверхразрешением (с в два раза меньшими по апертуре пикселями на изображении), полученном на методе ИВР с модернизациями на подавление остаточных ФРТ.



Рис. 4. Окно из канала 1 с масштабированием для рассматривания пиксельной картины и дополнительным контрастированием сюжета изображения с выделенным пикселем в яркой точке
Fig. 4. Window from channel 1 with scaling to view the pixel picture and additional contrast of the plot of the image with the selected pixel in the bright spot

Пиксел выделялся методом нахождения максимума коэффициента корреляции ожидаемой «картины» и яркой точки [14,15,16]. Видна сложная структура пиксельной картины яркой точки в виде ФРТ гауссового типа в данной апертуре пикселей.

Выявление одиночного пикселя же без наличия виртуальной ФРТ (гауссового вида) приводит к сильно неустойчивым решениям относительно каждого импульса. Этот вопрос еще требует исследования и развития.

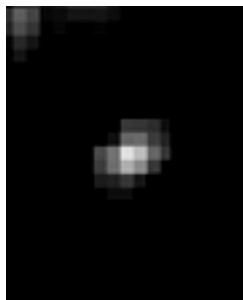


Рис.5. Окно после формирования сверхразрешения с вдвое меньшими по апертуре пикселями
Fig.5. Window after the formation of superresolution with half the aperture pixels

Виден яркий элемент на выделенном и ранее засвеченном пикселе (левый верхний субпиксел) – максимально засвечен вдвое меньший по апертуре пиксел, т.к. выполнялось подавление остаточной ФРТ на инспирированных изображениях по технологии согласованных с ЧКХ возмущений операторов деконволюции изображений для формирования сверхразрешения.

Ниже показано окно с соответствующим масштабированием и видно, что яркая точка это ряд строений, которые на изображении со сверхразрешением представлены более репрезентативно.

Для случая создания цветного изображения каждое из трех изображений по каналам, участвует в процедуре сверхразрешения, и таких паттернов со сверхразрешением создается три при соответствующих задержках на несколько (от 1 до 3) строк (с дублирующим хранением в ОЗУ аппарата). Далее эти три изображения координатно совмещаются с назначением каждому из них цветового кода [18, 19]. При этом истинность цветового отображения местности зависит от точности настройки цветов на опорных ориентирах сравнением их с ориентирами на цветном изображении, полученном без режима сверхразрешения.

Ниже приведены исходное изображение (Рис.6) и изображение со сверхразрешением (рис.7), полученные соответствующими и описанными выше совмещениями без присвоения цветовых кодов родительским изображениям, т.е. в панхроматическом режиме.



Рис.6. Синтезированное по трем каналам панхроматическое изображение
Fig.6. Three-channel synthesized panchromatic image



Рис.7. Синтезированное по трем каналам панхроматическое изображение со сверхразрешением
 Fig.7. Three-channel synthesized panchromatic image with superresolution

На рисунках 8 и 9 приведены ПЧС исходного панхроматического изображения и после выполнения процедур сверхразрешения, соответственно. ПЧС исходного изображения представляется в исходных «крупных» пикселах, как и само изображение, спектр изображения со сверхразрешением – в пикселах с вдвое меньшей апертурой (как и само изображение со сверхразрешением). ПЧС изображения со сверхразрешением имеет более четкие тенденции и направления т.н. волновых векторов с перераспределением энергии в сторону высокочастотных мод до 50%.

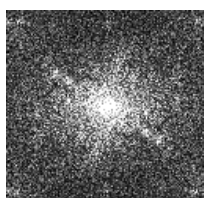


Рис.8. ПЧС исходного изображения
 Fig.8. PSE of the original image

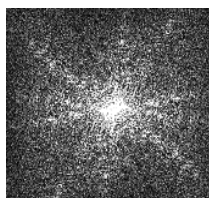


Рис.9. ПЧС изображения со сверхразрешением
 Fig.9. PSE images with superresolution

Следует заметить, что при совмещении изображений всегда формируется специфическая снижающая разрешение остаточная ФРТ, вызванная неполнотой геометрических коррекций на участниках совмещения из-за отсутствующей на аппарате и предельно необходимой более детальной информации об улодах фактической СДИ от запрограммированной, а также о состоянии тангажа, рыскания, крена аппарата [20]. В ЧКХ трактов в эксперименте присутствовали точки сингулярности и K при деконволюции достигло значения 9.

Заклучение

При формировании космического изображения сверхвысокого разрешения с моделированием группировки из изображений аппарата «Ресурс Д» частота дискретизации (при передискретизации на основе интерполяции) изображений и дискретного представления операторов деконволюции выбиралась из условия согласования с верхней модой ПЧС модели сингулярной на мере нуль функции (по теореме Котельникова) и корректи-

рвалась в сторону увеличения в зависимости от достижимости погрешности сходимости итеративного оператора деконволюции изображения.

Радиус ПЧС изображения со сверхразрешением относительно радиуса ПЧС исходного панхроматического изображения увеличен в 1,7 раза. Это меньше, чем полученные на соответствующих моделях ранее результаты от 2 до 4 раз увеличения радиуса ПЧС и, соответственно, пространственного разрешения по Фуко [1]. На снижении профита технологии сверхразрешения сказывается отсутствие необходимого для двумерного паттерна четвертого независимого канала зондирования ареала и сам факт совмещения трех разнесенных пространственно, и, соответственно, разнесенных по требуемым параметрам изображений. При нарушениях: некорректной модели сингулярности на мере нуль, некорректно выбранной модели самого интервала меры нуль, некорректной процедуре согласования выбора частоты дискретизации изображений в связи с фактом сходимости итеративного оператора деконволюции к заданной погрешности получение результата, соответствующего изображению на рисунке 7, сильно осложняется.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-07-00177 «Разработка теоретических основ методов моделирования реализации предельно достижимых характеристик сверхвысокого пространственного и спектрального разрешения в стволах дистанционного зондирования с космических платформ».

Список литературы References

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

Ushakova N.N. 2016. Matematicheskaya model' processa formirovaniya kosmicheskogo izobrazheniya vysokogo i sverhvyssokogo razresheniya v gruppировке kosmicheskikh apparatov. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika, № 20 (44). Belgorod, Vypusk 44: 155-167. (in Russian)

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

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

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

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

Rashhupkin A.V. 2008. Tehnologii obrabotki videoinformacii, obespechivajushhie kachestvo ajerokosmicheskikh izobrazhenij. Polet, № 11: 42-48. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta, № 2, 2010. (in Russian)

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. (Дата обращения: 14 марта 2018)

<http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm> «Subpiksel'naja obrabotka kak sposob povysheniya prostanstvennogo razresheniya v sistemah distancionnogo zondirovaniya». Selivanov A.S. // FGUP «Ros-sijskij nauchno-issledovatel'skij institut kosmicheskogo priborostroeniya» (FGUP «RNIИКП»), 2008.

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

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

7. 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. -История, Политология, Экономика, Информатика. Научный рецензируемый журнал, 15 (186): 166–175.

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

8. 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. (in Russian)

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

Moren K. 1965. Metody Gil'bertova prostranstva. Per s pol'sk. M., Mir, 570 s. (in Russian)

10. Удод В.А. 2002. Оптимальная по разрешающей способности линейная фильтрация изображений. Дисс. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Томск, 338 с.

Udod V.A. 2002. Optimal'naja po razreshajushhej sposobnosti linejnaja fil'tracija izobrazhenij. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk. Tomsk, 338 s. (in Russian)

11. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. 2010. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии. Солнечно-земная физика, №16: с.154–161.

Kochanov A.A., Obuhov A.G., Prosoveckij D.V. 2010. Metody vosstanovlenija izobrazhenij i raspoznavanie obrazov v radioastronomii. Solnechno-zemnaja fizika, №16: s.154–161. (in Russian)

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

Ushakova N.N. 2004. Korrekciya cifrovых kosmicheskikh izobrazhenij na osnove verificirujushhego modelirovanija. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 255 s. (in Russian)

13. 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.

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. (in Russian)

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: с.16-21. +

Ostrikov V. N. 2012. Ocenka funkcii rassejanija toчки na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vosstanovlenija. V kn.: Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija 2011. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii (Moskva, 15-17 marta 2011 g.). Moskva, Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN: t. 38: s.16-21. (in Russian)

15. Бейтс Р., Мак-Доннел М. 1989. Восстановление и реконструкция изображений. М., Мир, 336 с.

Bejts R., Mak-Donnel M. 1989. Vosstanovlenie i rekonstrukcija izobrazhenij. M., Mir, 336 s. (in Russian)

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



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

17. Фридрихс К. Возмущение операторов в гильбертовом пространстве. М. «Мир».1969, 231 с.

Fridrihs K. Vozmushhenie operatorov v gil'bertovom prostranstve. М. «Mir».1969, 231 s. (in Russian)

18. Бобков В.А., Роньшин Ю.И. Автоматическое сопоставление линий на калиброванных изображениях// Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», 2010. №4, с. 16-24.

Bobkov V.A., Ron'shin Ju.I. Avtomaticheskoe sopostavlenie linij na kalibrovannyh izobrazhenijah// Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy», 2010. №4, s. 16-24. (in Russian)

19. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрозональной информации. Диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01. Рязань. 2003г. – 130 с.

Moskvitin A.E. Tekhnologii i algoritmy povysheniya kachestva izobrazhenij zemnoj poverhnosti na osnove kompleksirovaniya spektrozonalnoj informacii. Dissertaciya na soiskanie uch stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po specialnosti 05. 13. 01. Ryazan. 2003 g. 130 s. (in Russian)

20. Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы». – Москва. Издательство института системного анализа (ИСА) РАН- 2014. №4.- С. 33-43.

Vintaev V.N., Zhilenev M.Ju., Matorin S.I., Ushakova N.N., Shherbinina N.V. Adaptivnoe voss-tanovlenie rezkosti na cifrovyh kosmicheskikh izobrazhenijah // Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy». - Moskva. Izdatel'stvo instituta sistemnogo analiza (ISA) RAN-2014. №4.- S. 33-43. (in Russian)