РАЗДЕЛ IV. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н.

Формирование космического изображения на основе технологии сверхразрешения в модели группировки аппаратов

*Белгородский университет кооперации, экономики и права
(Россия, Белгород)*

doi: 10.18411/scienceconf-05-2019-05

idsp: scienceconf-05-2019-05

Аннотация

Для уменьшения аперттуры пятна функции рассеяния точки (ФРТ) с моделированием группировок спутников с преобразованием изображений в паттерны со сверхразрешением целесообразно выполнение синтеза, оптимизации и использования пространственной частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) сформированного тракта дистанционного зондирования. Выполняемая в связи с этим по требованиям теоремы Котельникова передискретизация изображений и ядер итеративных (интегральных) операторов деконволюции приводит к согласованию условий применения теоремы Котельникова с процессами сходимости итеративных деконволюций и процессами моделирования сингулярностей в ЧКХ, а также построения мер Лебега оценки значений восстанавливаемой резкости на изображениях при переборах ФРТ из доверительного интервала оценок их уровня достоверности для синтеза операторов деконволюции.

Ключевые слова: сверхразрешение, функция рассеяния точки, группировка аппаратов, деконволюция изображений, теорема Котельникова, обобщенный градиентный фильтр, сингулярная на мере нуль функция, субпиксельный сдвиг, мера Лебега.

Abstract

To reduce the spot aperture of the point spread function (PSF) with modeling satellite groups with image conversion into super-resolution patterns, it is advisable to perform synthesis, optimization and use of the spatial frequency-contrast characteristic (MTF) of the remote sensing path formed. In connection with this, according to the requirements of the Kotelnikov theorem, resampling of images and kernels of iterative (integral) deconvolution operators leads to agreement on the conditions for applying Kotelnikov's theorem to the convergence processes of iterative deconvolutions and the modeling of singularities in the MTF, as well as the construction of Lebesgue measures for estimating recoverable sharpness on the images on images. busting of PSF from the confidence interval of estimates of their confidence level for the synthesis of deconvolution operators.

Keywords: superresolution, point spreading function, grouping of devices, image deconvolution, Kotelnikov theorem, generalized gradient filter, function singular at measure zero, subpixel shift, Lebesgue measure.

Введение

Для оценки пространственного разрешения на ареалах при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне некогерентного рассеянного излучения можно использовать как пример приведенное ниже выражение [1,3]:

$$L = M / 2R = HK(Y, \beta) / 2Rf, \quad (1)$$

где L – измеряемое по методу Рэля в единицах длины возможное линейное разрешение на местности или аперттура формируемого псевдопиксела на ареале; M, H – соответственно, масштаб и высота наблюдения; $K(Y, \beta)$ – 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); f – фокусное расстояние аппаратуры наблюдения космического аппарата (КА).

Формула (1), при соответствии значения R и разрешения, определяемого апертурами пикселей приемного транспаранта позволяет определить размеры соответствующего псевдопикселя, позиционированного на зондируемой поверхности, а также прогнозировать размер пикселей на приборе с зарядовой связью (ПЗС) для требуемых размеров псевдопикселей на наблюдаемой поверхности.

При этом в технологии сверхразрешения реализуется уменьшение значения L за счет увеличения R , (если для формирования каждого из субпиксельно сдвинутых первичных в сверхразрешении изображений использовался один и тот же или идентичный телескоп).

Следует еще учесть качество изготовления элементов оптики и методы компенсации ухудшающих качество изображения факторов при формировании изображения [2], т.е. эффективную ЧКХ аппаратуры КА формирования световых потоков. Если полоса «пропускания» пространственных мод у такой ЧКХ невелика, то попытки улучшения разрешения за счет параметра R приведут только к уменьшению апертур псевдопикселей на ареале с отсутствием как улучшения разрешения по Рэлею, так и увеличения детальности на формируемом изображении зондируемого ареала.

Увеличения детальности можно добиться, по крайней мере, с начальной моды спада полосы «пропускания» упоминаемой ЧКХ, если эта и последующие ее моды входят во множество мод, предшествующих вычисляемой по методу Фуко верхней пространственной частоте, определяемой увеличением R .

Вклад в увеличение значения R дают геометрическая, приборная, радиометрическая коррекция изображений, коррекция на угол места солнца, компенсация смазов и полос изменения отношения сигнал/шум из-за неоднородного распределения скоростей движения изображения (СДИ) на ПЗС в КА.

Вопросы коррекции изображений достаточно широко освещены в трудах Арманда Н.А., Асмуса В.В., Лупяна Е.А., Kronberg P., Pratt W., Rosenfeld A., а работы в области технологий формирования и улучшения качества изображений, в том числе космических, авторами которых являются российские и зарубежные специалисты Н.И. Абросимов, Б.В. Кугаенко, Н.В. Хохлова, Е.В., Аганбекян К.А., Р. Арвидсон, Д. Батлер, Р. Хартли, Ф.Г. Басс, И.М. Фукс, Р. Бейтс, М. Мак-Доннел, А.Исмару, Д.Кларк, Н.А. Карини, Р. Шовенгердт составили научный базис настоящего исследования.

При этом методы оценки качества формируемых изображений и получаемого пространственного разрешения на изображениях модернизируется в соответствии с развитием техники их формирования.

Исследованию оценки качества космических изображений посвящены труды ученых и специалистов: Бакланова А.И., Батракова А.С., Гектина Ю.М., Кондратьева Ю.М., Красильникова Н.Н., Миркина Л.И., Петрищева В.Ф., Савченко А.В., Сойфера В.А., Anuta P., Burns P., Choi T., Freeman W., Helder D., Leger D., и др., а подходы к оценке пространственного разрешения по материалам съемки земной поверхности предложены в работах Батракова А.С., Anuta P., Burns P., Choi T., Helder D., Leger D., Cook M., Rangaswamy M.

Тем не менее, проблема получения пространственного разрешения на формируемом изображении (по Рэлею), не отстающего от разрешения, определяемого реализованной пикселизацией отображения ареала, особенно для технологий сверхразрешения, все еще актуальна и все еще далека от исчерпывающего ее решения.

Т.к. по Фуко пространственное разрешение и резкость на изображении определяются одной и той же высшей модой пространственного частотного спектра (ПЧС) отображаемого объекта с представлением значения резкости величиной отклонения фронта опорного эталонного прямоугольного двумерного всплеска яркости от

вертикали, то значение резкости будет нам характеризовать и достигнутое разрешение, на сформированном изображении и на ареале, которое можно вычислить и по Рэлею.

Цель работы –выработать решения по преодолению наиболее критических аспектов технологии реанимации возможных потерь резкости и разрешения в технологии сверхразрешения в моделях группировки аппаратов, с использованием сформированных постфактум изображений на аппаратах группировки.

В связи с этим решаются задачи:

1) применения методов продолжения спектров изображений в моделях группировок для реанимации ослабленной резкости формируемых и синтезируемых со сверхразрешением изображений с учетом ослабления степени регуляризации возникающих сингулярностей при синтезе и оптимизации ЧКХ реальных и виртуальных трактов дистанционного зондирования;

2) оценки уровня дискретизации паттернов и ядер операторов итеративной деконволюции изображений не ограничивающего достижения по разрешению на синтезируемых изображениях.

Проблемы, объект и методы исследования

Объектом выполненных исследований являются космические изображения (территория Испании, район г. Рота).

Проблемы и решения по их преодолению

а) При реализации деконволюции изображений высокого и сверхвысокого разрешения в модели группировки аппаратов, используемая теорема Котельникова о дискретизации изображений и ядер интегральных операторов деконволюции нацеливается на пространственные частоты, лежащие достаточно далеко за границами прозрачности пространственной ЧКХ виртуального тракта зондирования ареала. Связано это с необходимостью цифровой обработки паттернов с внедренными в них моделями сингулярных на мере нуль всплесков, представляемыми с финитными ПЧС. Сингулярные всплески получаются и наследуются в дальнейшей обработке паттернов при построении операций деления ПЧС с нулевыми отсчетами в знаменателях. Модель меры нуль определяет высшую моду ПЧС моделируемых всплесков для передачи ее значения в формулировку требований теоремы Котельникова о дискретизации функций при коррекции разрешения на изображениях [1].

б) Использование итеративной деконволюции на основе модификаций фильтров Винера-Тихонова [1] для коррекции разрешения не дает возможности предсказать увеличение радиуса ПЧС корректируемых изображений к выбранной для контроля итерации оператора деконволюции и приходится ограничиваться тем, что есть рабочий критерий прерывания итераций, при срабатывании которого можно провести измерение радиуса ПЧС получаемого изображения. Для прогноза и выхода при коррекции резкости на задаваемый уровень для корректируемых изображений, что особенно важно в режиме сверхразрешения, требуется построение коррекции ПЧС изображения с достоверно прогнозируемой величиной продолжения спектра. Соответствующим средством является рекурсивная процедура на основе аддитивной коррекции резкости, с предварительным выбором стартового порядка обобщенного градиентного оператора.

в) Проблема подмены обрабатываемых изображений: При выполнении коррекции разрешения на основе синтеза и оптимизации ЧКХ тракта зондирования возникающие ЧКХ на нулевых значениях ПЧС-знаменателей сингулярные значения, в паллиативном случае требуют в практике аналогичных операций со спектрами применения методов регуляризации (например, регуляризации Тихонова), что приводит всего лишь к близкому к «истине» решению с мерой близости, характеризуемой верхней модой в ЧКХ тракта зондирования, т.е. уровнем разрешения по Фуко. Описанное выше определение требуемой погрешности вычисления операторов деконволюции с учетом моделирования сингулярностей объектами с финитными спектрами дает окончательное решение по деконволюции (в формуле Ван Циттера) существенно более близкое к «истине». При этом

интегралы Римана в выражениях Ван Циттера для итеративной деконволюции необходимо преобразовать в интегралы Лебега при аналитическом интегрировании.

г) Из-за дисперсии прироста амплитуд мод ПЧС добавки к стартовому корректируемому по резкости изображению в формуле Ван Циттера при выполнении итераций может осуществиться пропуск лучшего по резкости результата, т.к. он может объективно в континуальной модели вариаций улучшаемых изображений находиться между итерациями при состоявшемся дискретном наборе результатов.

Это происходит из-за того, что требования к погрешности вычисления операторов деконволюции удастся сформулировать только апеллируя к нормам операторов и изображений. Для снижения риска пропуска лучшего результата применяется квазинепрерывный субпиксельный сдвиг итераций посредством применения обобщенной билинейной бинарной операции (ОББО) со сплошным спектром состояний. Делается это простой заменой операций умножения в алгоритмах формулы Ван Циттера на ОББО с перебором собственных малых возмущений ОББО.

Использование ОББО смещает субпиксельно итерации оператора деконволюции на долю интервала итерации при правильно ограниченном возмущении для ОББО, обнаруживая результат по коррекции, «спрятанный» между исходными итерациями оператора деконволюции. Такой итерации в ординарном случае деконволюции нет. Но результат, как принадлежащий виртуальному квазинепрерывному потоку результатов по разрешению на этой итерации существует и его можно включить в ряд анализируемых на максимум результатов по резкости. Риск пропуска лучшего результата может быть оценен отношением среднеквадратичной дисперсии в зоне итераций оператора деконволюции, близкой к точке сходимости итеративного оператора к суммарной энергии выделяемого полезного сигнала на всей зоне итераций. Но это еще зависит и от установки порога по распознаванию регулярной составляющей и отделению ее от стохастической составляющей [1].

Коррекцию разрешения изображений целесообразно начинать с построения ЧКХ тракта зондирования (сложившегося, по крайней мере, для выбранного обрабатываемого изображения) с последующей ее оптимизацией под квазипрямоугольное по форме огибающей по всем азимутальным направлениям окно пропускания ПЧС гипотетических изображений.

Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях [1]:

- минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;
- максимальной гладкости ЧКХ (за исключением наличия встраиваемых моделей сингулярных на мере нуль всплесков);
- 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 по радиусу огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении опорного ориентира (ОО) в огибающую ЧКХ;
- не превышения значением порядка обобщенного градиентного оператора порога, при котором резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров в первом шаге коррекции – аддитивной коррекции, выполняемой в виде соотношения

$$S_{II} = S_R + a \operatorname{grad}_\alpha(S_R), \quad (2)$$

где S_R – формируемое (наблюдаемое) изображение; S_{II} – восстанавливаемое изображение, a – варьируемый при оптимизации ЧКХ коэффициент аддитивной коррекции разрешения,

при использовании обобщенного градиентного оператора $grad_{\alpha\beta}(S)$ в виде $grad_{\alpha\alpha}(S) = grad_{\alpha}(S)$, где градиентный оператор конструируется в виде нормы вектора $(D_x^\alpha S(x, y), D_y^\beta S(x, y))$ т.е.

$$grad_{\alpha\beta}(S) = ((D_x^\alpha S)^2 + (D_y^\beta S)^2)^{1/2}, \quad (3)$$

а операции D^α и D^β имеют нецелый неотрицательный порядок.

Ввиду того, что восстанавливаемого изображения мы можем и не знать принципиально, то, учитывая предстоящий последующий процесс оптимизации ЧКХ со слабой зависимостью этого процесса от начальной формы огибающей ЧКХ, целесообразно гипотетическое изображение получить из наблюдаемого, слабо возмущая его в сторону улучшения разрешения с использованием соотношения (2) с достаточно малыми значениями входящих в него констант.

Обобщенный градиентный фильтр (оператор), реализуется на базе прямого продолжения на вещественные значения порядка спектрального представления операции дифференцирования – $D_x^\alpha D_y^\beta$ ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$), определяемого для допускающих Фурье-представление функций виде:

$$D_x^\alpha D_y^\beta S(x, y) = \int (J\omega_x)^\alpha (J\omega_y)^\beta F_S(\omega_x, \omega_y) e^{(J(x\omega_x + y\omega_y))} d\omega_x d\omega_y, \quad (4)$$

где $F_S(\omega_x, \omega_y)$ – двумерное преобразование Фурье функции $S(x, y)$, представляемое в плоскости ортонормированных пространственных частот, $J = (-1)^{0.5}$, $D_x^\alpha D_y^\beta$ ($0 \leq \alpha, \beta \leq 1$), дифференциальные операторы для допускающих Фурье-представление функций.

Первичная стартовая коррекция соотношением (2) (априори выполняемая с явной недостаточностью восстановления или увеличения резкости (без резидентного контрастирования)) в виде аддитивной коррекции в дальнейшем повторяется рекурсивно на имеющихся результатах с проверкой каждый раз отсутствия перерождения процесса коррекции резкости в контрастирование. При заданных константах соотношения (2) каждый последующий прирост радиуса корректируемого ПЧС известен точно.

Определяемая каждый раз по опорным ориентирам и участвующая в синтезе ядра оператора деконволюции ФРТ требует пополнения ее спектрального портрета на оптимизированную ЧКХ.

Если ФРТ_i, определяется всякий раз по i-ой паре эталон-опорный ориентир из соотношения

$$S_{RPOi}(x, y) = S_{IPOi}(x', y') ** \Phi PT_i(x, y, x', y'), \quad (5)$$

то синтез ФРТ изображения (генеральной ФРТ) проводится по набору ФРТ_i, где $S_{RPOi}(x, y)$ – регистрируемый протяженный образ (РПО), $S_{IPOi}(x', y')$ – идеальный эталонный протяженный образ (ИПО), $\Phi PT_i(x, y, x', y')$ – ФРТ по данному ИПО. (ИПО, РПО – образы, апертура которых много больше минимального радиуса корреляции на изображении), ** – операция аperiodической свертки. Отношениями спектров

$$\frac{F(S_{RPOi})}{F(S_{IPOi})} = F(\Phi PT_i) \quad (6)$$

определяется группа спектров $F(\Phi PT_i)$.

S_{IPO} подбирается под S_{RPO} в интерактивном режиме с максимумом отклика совпадения (с недостижением единичного значения коэффициента взаимной корреляции), шумовая составляющая, присутствующая (аддитивно) на S_{RPO} в этом случае подавляется веерным фильтром.

$$\bigcup_i F(\Phi PT_i)$$

За главную часть $F(\Phi PT)$ принимается – объединение спектральных портретов $F(\Phi PT_i)$ на осях частот.

За N -оценку главной части $F(\Phi PT)$ (метод N -конечных представлений Релея-Ритца) принимается

$$\bigcup_i^N F(\Phi PT_i)$$

$$\Phi PT_N = F^{-1}(\bigcup_i^N F(\Phi PT_i)) \quad (7)$$

Множества гармоник $F(\Phi PT)_i$ определяются как нечеткие множества с функциями принадлежности на них μ_i , равными коэффициентам корреляции соответствующих S_{RPOi} и S_{IPIOi} . Операция объединения $\bigcup_i^N$ для построения множества $F(\Phi PT)$ сопровождается минимаксной формулой исчисления μ для каждой гармоники в $F(\Phi PT)$ с медианной фильтрацией значений ряда гармоник из образующих множеств $F(\Phi PT)_i$ с равными значениями μ_i . Синтез оператора деконволюции на основе вычисленной ФРТ с процессом оптимизации ЧКХ тракта позволяет допускать некоторые люфты в выборе алгоритмов вычисления мод $F(\Phi PT)$.

В соотношении инверсной фильтрации(6), решаемом относительно восстанавливаемого ПЧС $F(S_{IPIO})$ по предъявленному исходному $F(S_{RPIO})$ и вычисленной «полной» ΦPT сам ПЧС $F(\Phi PT)$ заменим на $H(\omega_i, \omega_j)$, представляющий собой спектр ΦPT с неполнотой покрытия диапазона частот задачи. Числитель и знаменатель в этом инверсном фильтре домножим на $H^*(\omega_i, \omega_j)$ (* – символ комплексного сопряжения) и присоединяя аддитивно в знаменатель параметр регуляризации $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$ получим модифицированный фильтр Винера-Тихонова со спектром ядра H_M :

$$F(S_{II}) = H^*(\omega_i, \omega_j) F(S_R) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) = H_M^{-1} F(S_R), \quad (8)$$

здесь S_{II} – это S_{IPIO} , а S_R – это S_{RPIO} .

В этом случае можно поставить задачу определения параметра – константы ε коррекции ядра деконволюции минимизацией невязки R_I – значения функционала сравнения Z :

$$Z(\varepsilon, R_{I5}) = \sum_{i,j}^{N,M} |ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j) - F(S_R)/F(S_{II})|^2 = R_I = \min, \quad (9)$$

при этом выражение $F(S_R)/F(S_{II}) = (H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}) + \varepsilon)^{-1}$ определяет откорректированную ЧКХ тракта при коррекции резкости изображения с согласованием ЧКХ под возможные приборные искажения.

Но корректирующая добавка, если она зависима от частоты, точнее корректирует ядро оператора деконволюции, поэтому будем искать такую добавку $v(\omega_i, \omega_j)$ из выводимого из (9) регуляризованного соотношения

$$|ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j) - (F(S_R)/F(S_{II}) + v(\omega_i, \omega_j))^{-1}|^2 = (R_2)^2 = \min, \quad (10)$$

из которого следует

$$v(\omega_i, \omega_j) = (ЧКХ_o(\omega_i, \omega_j) + (R_2)^2)^{-1} - H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}), \quad (11)$$

в котором $(R_2)^2$ играет аналогично ρ роль параметра регуляризации.

Частотно-зависимая добавка является возмущением спектра ядра оператора Винера-Тихонова в соответствии с оптимизированной ЧКХ.

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

$$H_{\lambda M}^{-1} = H_M^{-1} + \lambda v, 0 < \lambda < 1, \quad (12)$$

то получим $H_{\lambda M} = H_M / (1 + \lambda v H_M)$ и для восстанавливаемого изображения S_{II} будем иметь итеративное представление Ван Цитгера интегрального оператора деконволюции в обобщенной и компактной форме. Можно задать вопрос: почему бы просто не использовать в коррекции резкости полученную оптимальную ЧКХ, а находя добавку в

виде $\lambda \nu, 0 < \lambda < 1$ к спектру ядра оператора деконволюции до этой оптимальной ЧКХ строить итеративную деконволюцию для коррекции резкости, да еще с возможным перебором параметра $\lambda \nu, 0 < \lambda < 1$. Соотношения для получения поправок в виде добавки $\lambda \nu, 0 < \lambda < 1$ построены в виде Евклидовых норм, более того, соотношения оптимизации для ЧКХ тоже построены в виде Евклидовых норм и сама оптимизация является многопараметрической задачей, допускающей в силу теоремы Агеева вариации результатов деконволюции [5], тем более что и сходимость к задаваемой погрешности итеративного оператора деконволюции может быть оценена по норме. Однако согласование по норме спектров ядер операторов деконволюции с оптимизированной ЧКХ удерживает риск перерождения деконволюций в контрастирование изображения на низком уровне. В целом изображения с предпринятыми коррекциями еще нуждаются в обоснованиях их идентичности и наследности с исходными изображениями. Но предпринимаемые коррекции, с их параметрическим описанием являются средством паспортизации того, что с исходным изображением происходило.

Для решения сформулированных поставленных задач 1) и 2) разработана на модифицированном индустриальном итеративном израильском методе Iterative Back Projection (IBP) модель сверхразрешения с использованием инспирированных (приведенных к виду, необходимому для процедуры сверхразрешения) из реальных космических исходных изображений высокого разрешения паттернах, соответствующих группировке спутников. Подавление ФРТ выполняется при возмущении спектра ядра оператора деконволюции с согласованием возмущения с оптимальной ЧКХ тракта зондирования. Особенность ФРТ в основном заключается в том, что она определяется по парам опорный ориентир (ОО) – эталон (Э) и почти всегда в ее ПЧС будут отсутствовать некоторые моды, иногда весьма важные для обработки изображения со сверхразрешением[1].

Коэффициент корреляции ОО и Э не может быть равен 1, иначе ОО и Э идентичны и тогда нет постановки задачи, ниже 0.7 – запрещенные значения, т.к. при этом невозможно доказать что это сопряженная пара ОО и Э. Следует сделать оговорку: значение коэффициента корреляции, допустим, 0.7, а распознавание ОО и идентификация его соответствия эталону должна сопровождаться уровнем ложной тревоги не выше 0.1, т.е. распознавание и идентификация выполняются при дополнительных признаках. Например, наблюдаемый ОО – самолет, тогда его можно сравнивать только с эталоном самолета F105R, и выяснить, к примеру, что на отслеживаемом аэродроме других не бывает. В спектральном портрете – Фурье представлении $F(\Phi PT)$, которое и порождает инверсные и Винеровские фильтры с модификациями, включая модификации на частотно-зависимую добавку, каждая i, j -ая мода характеризуется значением функции принадлежности μ_{Oij} .

Значение взвешенной суммы вида

$$\mu_{OO} = \left(\sum_{i,j}^{N,M} \mu_{Oij} (F(\Phi PT)_{ij})^2 \right) / \left(\sum_{i,j}^{N,M} (F(\Phi PT)_{ij})^2 \right) \quad (13)$$

где $0.7 \leq \mu_{OO} < 1$ целесообразно принять за достоверность $F(\Phi PT)$ и ΦPT .

Наличие ФРТ даже с апертурой сравнимой с апертурой пикселей и меньше апертуры пикселей снижает радиус ПЧС спектра дискретизированного изображения и очевидно, что подавление такой ФРТ всегда будет связано с передискретизацией паттернов. В данном случае считаем решенной важнейшую задачу компенсации возмущений на формируемом изображении за счет несовпадения скорости движения изображения фактической и запрограммированной по кинематическим параметрам орбитального движения аппарата. Отклонение значений СДИ на фотоприемниках бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) КА в сторону уменьшения от верно заданного программного значения приводит к формированию изображения с

псевдопериодическими полосами с пониженным отношением сигнал/шум, а в сторону увеличения – формируется функция рассеяния точки – смаз и, как следствие, уменьшение радиуса ПЧС изображения [1].

Изображения являются элементами x конечномерного линейного, метрического Гильбертова пространства $\mathcal{H}$ с евклидовой нормой; спектры интегральных операторов – интегралов свертки задаются проекциями их ядер на ортонормированный базис тригонометрических функций.

Оператор деконволюции осуществляет на каждом шаге итерации поворот задающих углов спрямляемой поверхности – огибающей спектрального представления восстанавливаемого изображения в сторону увеличения, т.к. спектр его покомпонентно помножается на спектр изображения, и оператор можно с достаточно невысоким риском промоделировать воздействием на ПЧС изображения оператором дифференцирования нецелого и малого порядка, с присвоением ему значения этого порядка как эффективного.

На основе разложения в ряд по степеням малого параметра спектрального представления дифференциального оператора, возмущаемого использованием в нем ОББО с достаточно малым возмущением ее параметра вместо умножения в алгоритмах вычислений, можно заметить эффективное увеличение порядка дифференциального оператора нецелого порядка в области высших мод спектров приближающего оператор деконволюции:

$$F(D^\alpha S) = (J\omega)^\alpha \cdot \begin{cases} F_S(\omega)(1 + \frac{\|V_i\|}{\omega_c} \omega^{\omega_c}), \|V_i\| \ll 1; \\ F_S(\omega)(1 + \frac{\|V_i\|}{\omega_c} \omega), \|V_i\| < 1, \end{cases} \quad (14)$$

где ω_c – средневзвешенная пространственная частота; V_i – матрица возмущения таблицы умножения, вычисляемая при возмущенном параметре контроля состояния ОББО, $\| \cdot \|$ – функция вычисления нормы. Здесь средневзвешенная и мгновенная частоты представлены нормой радиуса-вектора (с проекциями ω_x, ω_y в двумерном спектральном портрете) от начала координат в портрете к пикселу, светящемуся с яркостью, равной амплитуде гармоники.

Такое «нештатное» повышение порядка оператора, содержащего в аналитическом выражении производные нецелого порядка, соответствует субпиксельному смещению итераций в сторону невыявляемого в потоке итераций повышения порядка градиентного оператора в рекурсивной процедуре продолжения спектра, что позволяет найти значение резкости, «спрятанное» между итерациями и могущее оказаться предельным.

Математически ОББО строится как свертка двух Z-преобразований массивов (или как свертка двух полиномов) с формированием классического ромба столбцов частичных результатов с выполнением суммирования вдоль столбцов в ромбе с передачей возможных переносов в старшие по номеру столбцы, если взаимный сдвиг на оси порядков этих столбцов уменьшен. Управление этим сдвигом осуществляется выполнением схемы скалярного перемножения результата свертки с нормирующим вектором $\rho_c = \{\beta_c^i\}$, где i индекс и степень вещественного основания β_c .

Результаты исследования

На модифицированном специальным критерием прерывания процедур методе сверхразрешения ИВР для группы изображений с разрешением в 1м-1,5 м на местности получены паттерны с поддержкой разрешения 0,5 м-0,75 м и далее получены изображения с поддержкой разрешения 0,25м-0,4м (оцененного по методу Фуко).

На изображениях со спутника класса «Ресурс ДК» для трех его каналов формирования изображений высокого разрешения при орбитальном движении аппарата можно выявлять соответствующие субпиксельные сдвиги изображений в каналах и на

базе модифицированного для группировок спутников метода сверхразрешения ИВР[4,6] получать паттерны с вдвое и даже вчетверо уменьшенными по апертуре пикселями.

ЧКХ трактов зондирования синтезируется отношением ПЧС зарегистрированного (или предыдущего в итерациях) изображения к ПЧС корректируемого изображения, а оптимизация ЧКХ заключается в соответствующей предобработке этих изображений так, чтобы огибающую ЧКХ можно было 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. При этом процесс достижения некоторой степени «квазипрямоугольности» ЧКХ прерывается превалированием начала контрастирования и других процессов обработки дифференциального характера.

Оптимизируется ЧКХ на применении принципов Нэша и Парето для системы функционалов, сформулированных на приведенных выше требованиях к ЧКХ в виде неравенств: минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам; максимальной гладкости ЧКХ; наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта и т.д.

При выявлении сингулярных всплесков на ЧКХ используется метод представления их моделями обобщенных сингулярных на мере нуль функций с финитными спектрами, 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. При этом необходимо увеличивать частоту дискретизации изображений и ядер интегральных операторов в соответствии с теоремой Котельникова, выбирая ее из условия согласования с верхней модой ПЧС модели сингулярной на мере нуль функции и отслеживая взаимосвязь критериев сходимости итеративного оператора деконволюции изображения [1] с выявлением достигаемого значения резкости по Фуко.

Модели интервалов меры нуль представляют собой апертуры исходных пикселей, деленные на K , и $K \geq 7$. Начальное значение критерия K уже обеспечивает необходимую точность совмещений и замеров сдвигов изображений, что нормативно соответствует зонам ПЧС не поддерживаемым никакими трактами зондирования, т.е. лежащим в области полного обнуления регулярных ненулевых сигналов.

Рис. 1. Пиксели: а) исходный и б) и в) субпиксельной мозаики изображения на первом и втором этапах сверхразрешения, соответственно

На рисунке 1а в масштабированном окне одного из исходных каналов аппарата представлен пиксел (с неотфильтрованной ФРТ), далее на рисунке 1б показан виртуальный канал со сверхразрешением с в два раза меньшими по апертуре пикселями на изображении, полученном на методе ИВР. Виден яркий элемент на выделенном и ранее засвеченном пикселе (левый верхний субпиксел). На рисунке 1в представлен состоящий из четырех субпикселей, увеличенный до размера исходного пикселя, являющийся субпикселем для пикселя показанного на рисунке 1б, и поддерживающий следующий этап сверхразрешения, выполненного на двух субпиксельно сдвинутых изображениях от предыдущего этапа сверхразрешения, соответствующий по формуле (1) поддержке 0,25 м разрешения на ареале. Визуально различить упомянутые четыре субпиксела сложно, т.к. зона «прозрачности» ЧКХ телескопа аппарата уже находится на спаде.

На рисунке 2 приведены исходное изображение с совмещением трех каналов без присвоения им кодов цветов палитры с ПЧС и со сверхразрешением с учетом субпиксельных сдвигов родительских изображений с ПЧС.

Рис. 2. а) – синтезированное по трем каналам панхроматическое изображение и его ПЧС и б) – окно после формирования сверхразрешения с вдвое меньшими по апертуре пикселями и ПЧС изображения

Радиус ПЧС изображения со сверхразрешением относительно радиуса ПЧС исходного панхроматического изображения увеличен в 1,7 раза. Это меньше, чем полученные для других аппаратов на соответствующих моделях ранее результаты увеличения радиуса ПЧС и, соответственно, пространственного разрешения по Фуко [4,6]. 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 и неуправляемая дистанция между строками сформированных для дообработки изображений, что приводит к эллипсовидному годографу радиус-вектора значений разрешения с максимальной полуосью, направленной поперек трассовой составляющей орбиты спутника.

Используя для сверхразрешения каналы 1 и 2, и параллельно 2 и 3 получаем с субпиксельным сдвигом два изображения с потенциалом разрешения по строке в 50 см и на этих изображениях получаем далее вторым каскадом сверхразрешение по строке без присвоения цветовых кодов родительским изображениям, т.е. в панхроматическом режиме с потенциалом в 25 см. Результат выполнения второго каскада процедур сверхразрешения приведен на рисунке 3.

Рис. 3. Синтезированное по трем каналам панхроматическое изображение со сверхразрешением второго каскада и его ПЧС

В зависимости от оценки достоверности ФРТ на исходных изображениях итерации по деконволюции запускаются несколько раз с пошаговым изменением ФРТ из интервала доверительной оценки ФРТ и резкость в этом случае измеряется верхней и нижней мерами Лебега с присвоением выполненному итеративному оператору деконволюции значения дефекта между этими мерами в качестве оценки погрешности сходимости оператора. Существенной помехой при измерении субпиксельного сдвига пар изображений является смаз изображения (например, кинематический смаз первичных изображений большей или меньшей степени). Тем не менее, наилучшее качество изображения Земли, достижимое при применении данного конкретного аппарата, определяется статическими параметрами его съёмочной аппаратуры, факторами орбитальной съёмки и её геометрическими и радиометрическими условиями, что дает возможность прогноза на выполнение замеров субпиксельных сдвигов при совмещениях изображений для использования в дальнейшем их в технологии сверхразрешения [2].

Заключение

Метод рекурсивного продолжения спектра, применяемый для подавления остаточной ФРТ или ее существенного ослабления в технологии сверхразрешения проще метода синтеза итеративного оператора деконволюции. Построенный на принципе аддитивной коррекции резкости с вычислением этапов ЧКХ всего лишь для контроля наличия перерождения коррекции резкости в контрастирование изображения, метод отстает от результативности модернизированной Винеровской фильтрации с итеративным оператором деконволюции – требует выполнения большего числа итераций.

Изображения дискретизируются и передискретизируются в соответствии с модифицируемой по условиям применения к модели сингулярности на ЧКХ теоремой

Котельникова, являются элементами конечномерного линейного, метрического Гильбертова пространства $\mathbb{F}$ с евклидовой нормой; спектры интегральных операторов – интегралов свертки задаются проекциями их ядер на ортонормированный базис тригонометрических функций. В пространстве, сопряженном с $\mathbb{F}$ дискретным преобразованием Фурье определяется градиентная операция с варьируемым нецелым порядком. Итеративный оператор деконволюции изображений со всеми видами согласования его спектра с выдвигаемыми требованиями построен на преобразовании модифицированного фильтра Винера-Тихонова в геометрическую прогрессию на основании леммы Меррея об ограниченности нормы полинома, построенного на ограниченных по норме линейных операторах в Гильбертовом пространстве.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №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 №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».

1. Винтаев, В.Н. Нетривиальная коррекция космических изображений высокого разрешения/В.Н. Винтаев, Н.Н. Ушакова//Саарбрюккен, Германия: Lambert Academic Publishing, 2018. – 208 с.
2. Макриденко, Л. А. Основные источники снижения качества изображений земли, получаемых при орбитальной оптической съёмке с борта МКА// Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, В.Я. Геча, М.Ю. Жиленьев, С.Г. Казанцев//Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 160. – С.3-19.
3. Маламед, Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования /Е.Р. Маламед//С.-Пб.: СПб ГИТМО(ТУ). – 2002. – 368 с.
4. Ушакова, Н.Н. Математическая модель процесса формирования космического изображения высокого и сверхвысокого разрешения в группировке космических аппаратов/Н.Н. Ушакова//Научные ведомости Белгородского государственного университета. –2016. – № 20 (44). – С.155-167.
5. Финк, Л.М. Сигналы помехи ошибки/ Л.М. Финк; 2-е изд., перераб. и доп. –М.:Радио и связь, 1984.– 256 с.
6. Park, S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview/ S. C. Park, M. K. Park, M. G. Kang// IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – P.21-36.

Корнейчук Г.К.

Использование синергетического эффекта для создания универсального нанополимербитумного вяжущего для дорожных асфальтобетонов

*Инженерная школа Дальневосточного федерального университета
(Россия, Владивосток)*

doi: 10.18411/scienceconf-05-2019-06

idsp: scienceconf-05-2019-06

Аннотация

Исследования относятся к решению двух проблем – нахождения крупнотоннажного использования шинных отходов и созданию высококачественных дорожных асфальтобетонов.

Возникающий синергетический эффект при термическом и ультразвуковом воздействии на резинобитумную смесь привел к эффективной деструкции, девулканизации резиновой крошки шинных отходов и диспергированию образовавшихся частиц до наноразмеров. В результате этих процессов получены нанополимербитумные композиции с высокими физико-механическими характеристиками, которые позволяют их использовать в качестве высокоэффективных вяжущих для получения дорожных асфальтобетонов.