



УДК 528.72; 629.7

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО
ИЗОБРАЖЕНИЯ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
В ГРУППИРОВКЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMATION OF COSMIC IMAGE OF HIGH AND
VERY HIGH RESOLUTION IN THE GROUP OF SPACECRAFT**

**Н.Н. Ушакова
N.N. Ushakova**

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

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

E-mail: natush2006@yandex.ru

Аннотация. Разработана модель процесса формирования космического изображения исследуемого ареала в режиме сверхразрешения по изображениям со спутников группировки с заведомо худшими и разными значениями параметра разрешающей способности с предварительной коррекцией резкости изображений в группировке.

Resume. A model of the formation of cosmic image of the test area in the superresolution mode for images with the constellation clearly inferior and different values of the parameter resolution with advanced image correction field in the group.

Ключевые слова: сверхразрешение, оператор деконволюции, космическое изображение, функция рассеяния точки, субпиксельная технология, апертура пиксела.

Keywords: superresolution, deconvolution operator, space image, point spread function, sub-pixel technology, the pixel aperture.

Введение

В настоящее время использование субпиксельных технологий или так называемых технологий сверхразрешения при формировании космического изображения с повышенным разрешением из нескольких взаимно сдвинутых на доли апертур пикселей изображений одной и той же сцены с худшим разрешением с применением специальных методов предварительной их обработки развиты до уровня промышленных методов. Например, в спутниках OrbView-3, Spot-5, Pleiades-1A, Pleiades-1B [1,2] методы сверхразрешения, по крайней мере с 1991 года, реализованы в специальных фокальных системах космических аппаратов [3]. Следует отметить, что по литературным источникам [1,2,4] термин свехразрешение в настоящее время понимается и как характеристика изображения, когда оно обеспечивает разрешение существенно лучшее 1 м на местности, и как технология получения разрешения на формируемом изображении из нескольких изображений худшего разрешения. При этом множество изображений одной и той же сцены могут быть получены одним из следующих способов [3]:

- использование орбитальной группировки для съёмки исследуемого участка местности;
- использование последовательной съёмки объекта одним спутником за время пролёта района наблюдения;



- использование нескольких оптико-электронных преобразователей, расположенных в фокальной плоскости.

Применение первых двух способов требует выполнения геометрического и яркостного согласования изображений, полученных различными системами или в разное время; в том числе необходимо выполнять согласования масштабов, динамических диапазонов цвето-яркостных представлений, углов поворотов изображений, осуществлять учет углов места солнца, выполнять ортотрансформирование и, таким образом, приводить изображения к нормализованному для сверхразрешения виду [5]. Для группировки спутников изображения представлены с разными функциями рассеяния точки (ФРТ) и разными от спутника к спутнику апертурами пикселей на паттернах. Но если найден или инспирирован принудительно с сохранением соответствия сцене такой взаимный сдвиг изображений, что реальная или инспирированная засветка пикселей приборов с зарядовой связью (ПЗС) (или виртуальных ПЗС) выполняется с пересечением пятен засветки от меньших пикселей на смежные равные или большие по апертуре, то уравнения для нахождения пикселей сверхразрешения легко составляются и разрешимы. При этом на тех же размерах формируемого изображения размещается, как при передискретизации число пикселей равное в идеале примерно суммарному количеству пикселей от изображений-участников технологии сверхразрешения, увеличивая детальность изображения, но при условии, если эта детальность восстанавливаема в принципе [5, 6]. Если на всех изображениях в группировке однородный или псевдооднородный фон или все малые детали стали подавленными из-за наличия ФРТ, то и нечего восстанавливать. В работах [5,6] показано, что деградация исходного разрешения на изображении за счет ФРТ более чем в 1,6 раза может с высокой степенью вероятности приводить к необратимым при восстановлении детальности последствиям. Лабораторные модели представления изображений с улучшенным разрешением на основе субпиксельных сдвигов [7] показывают обнадеживающие результаты – в два раза увеличение резкости и разрешения при четырех изображениях-участниках схемы сверхразрешения, т.к. являются сопряженными прямым и обратным преобразованиями некоторого исходного изображения с «загрублением» в два раза в данном случае при прямом преобразовании, тогда как соответствующие реальные достижения для космических изображений измеряются показателями улучшения в 1,4-1,6 раза [8]. Результаты практической реализации сверхразрешения на реальных, а не инспирированных от единого снимка космических изображениях и на одномерных линейках ПЗС отмечены Москвитиным А.Э. в диссертационной работе следующим образом: «Экспериментально установлено, что при комплексировании данных от двух субпиксельно смещенных ПЗС-линеек можно достичь повышения разрешающей способности съемки в 1,5 раза, а при комплексировании данных от трех ПЗС-линеек – в 1,9 раза». Однако работать на спутнике с такими линейками при формировании строк изображений – это чрезвычайно усложнить и увеличить по весу и габаритам систему учета орбитальных нестабильностей движения спутника и даже малых отклонений от запрограммированных параметров движения. Существенным фатальным фактором снижения профита сверхразрешения является наличие ФРТ на реально «принятых» изображениях. При этом на изображениях высокого разрешения подавление (и отделение) шумов эффективно выполняется с учетом независимости характеристик шумов от кинематических орбитальных параметров, исполняемых аппаратом при движении на орбите [3]. Израильские специалисты, учитывая колоссальные размеры космических кадров и заменяя прямые (подобные методам Гаусса, Крамера и т.п.) методы решения систем уравнений для сверхразрешения итеративными процессами, ввели ФРТ в выражения для соответствующих итераций в разработанный ими в 1991 году метод сверхразрешения Iterative Back Projection (IBP) [3]. Но метод IBP разработан для изоб-

ражений с одинаковыми ФРТ и поэтому применим лишь для одного аппарата и одинаковых условий его орбитальной работы.

Современные технологии снижения апертур ФРТ, выполняемые, как правило, с неполным описанием ФРТ в пространственно-частотных спектрах (ПЧС) при оценках ФРТ слепым методом [9] или по опознаваемым линеаментам, границам и ориентирам [5] нередко приводят к окончательному формированию изображения высокого и сверхвысокого разрешения с «остаточной» ФРТ с апертурой, превышающей размеры пиксела в нецелое число раз. Замерить такую ФРТ прямыми методами весьма затруднительно, а промышленные методы борьбы с ФРТ теряют свою эффективность. Решению именно этой проблемы посвящен ряд работ по специальной коррекции резкости изображений высокого разрешения [10,11]. С учетом описанного выше и большого числа находящихся на околоземных орбитах аппаратов целесообразно переходить к использованию существующих или инспирируемых группировок и не загромождать аппаратно спутники, особенно при запуске их на дальние орбиты. Целесообразно инициировать работы по моделированию сверхразрешения с исходными и нормализованными для сверхразрешения изображениями, разными по апертурам пикселей и, соответственно, с разными остаточными ФРТ с учетом тонких технологий снижения апертур ФРТ, неэффективное подавление которых существенно влияет на снижение профитов технологий сверхразрешения от теоретических возможностей улучшения разрешения в 2 раза для четырех исходных изображений до 1,4-1,6 раз. Методы и программы приведения изображений к нормализованному виду входят в реестр промышленных методов и программ, непрерывно применяются на центрах приема данных и на спутниках, и в силу наличия в сопровождающих работу научных договорах и использования в разрабатываемой модели нормализованных изображений в работе не рассматриваются.

Цель работы – на нормализованных реальных космических изображениях инспирировать их представление в различных апертурах пикселей с различными ФРТ, разработать соответствующую модель сверхразрешения для демонстрации улучшения результата сверхразрешения.

Разработка модели сверхразрешения с коррекцией резкости на инспирированных для модели исходных изображениях

Разработанный Блажевичем С.В. [7] в модели сверхразрешения без учета ФРТ и с идентичными апертурами пикселей алгоритм субпиксельного сканирования избавляет от сложного поиска матричного представления оператора преобразования субпиксельно сдвинутых изображений в формируемое изображение и поддерживает однозначность решения соответствующей системы уравнений для яркостей пикселей по отделенным цветовым каналам. На рисунке 1 приведена схематично реализация сверхразрешения в одномерном варианте.

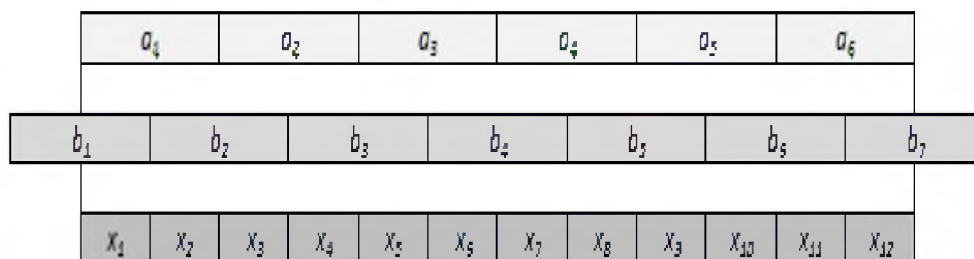


Рис. 1. Схематичная реализация сверхразрешения в одномерном варианте
 Fig. 1. Schematic implementation of the one-dimensional version of superresolution

Здесь a_1-a_6 , b_1-b_7 означают значения яркостей субпиксельно сдвинутых пикселей ПЗС, а x_1-x_{12} это виртуальные пиксели, структурирующие в модели сверхразрешения световой поток на ПЗС, дискретизирующие изображение в световом потоке с удвоенной частотой и значения яркости которых необходимо вычислить.

Видно, что можно составить и 13 уравнений, но для весьма длинных линеек на спутниках это несущественно.

Выход v_1 и v_7 за пределы апертуры оптической системы означает, что обеспечена их полная засветка. Таким образом, формируется система линейных уравнений для нахождения пикселей восстанавливаемого изображения:

$$\begin{aligned} x_1 &= b_1/2 \\ x_1 + x_2 &= a_1 \\ x_2 + x_3 &= b_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1)$$

Двумерный вариант сверхразрешения, соответствующего схеме на рисунке 1 представлен в работе [7]. Схему для субпиксельно сдвинутых пикселей для двух дополнительных линеек ПЗС с отличающимися по апертуре пикселями, легко представить заменив вторую строку на рисунке 1 двумя с разными по апертуре пикселями от строки к строке, например в 1,5 раза, в 2 раза. При этом некоторые субпиксельные сдвиги нейтрализуются, но это и неважно, т.к. сохраняется взаимно согласованная засветка пикселей в схеме, позволяющая формировать систему уравнений для нахождения пикселей по закону: сумма всех пикселей в трех строках равна числу пикселей в вычисляемой строке.

На рис. 2 приведены интерфейсы программных модулей:

для сдвига изображения, например, на 1 пиксел вверх и влево исходного изображения сверткой изображения с маской с единицей специально расположенной относительно центра маски;

для изменения апертуры пикселя на сдвинутом субпиксельно после отработки первого модуля изображении;

для нанесения ФРТ на сдвинутое субпиксельно изображение методом свертки с маской.



Рис. 2. Интерфейсы модулей для подготовки инспирированных для сверхразрешения изображений
Fig. 2. Interfaces modules for training inspired for superresolution images



Для восстановления изображения со сверхразрешением используем итерационный метод сверхразрешения ИВР.

По оценкам ФГУП «Государственный Научно-Производственный Ракетно-Космический Центр "ЦСКБ-Прогресс" (г. Самара) метод ИВР [3] признан лидирующим индустриальным методом сверхразрешения. Используем его для построения модели, но с модернизациями: вместо критерия останова итерации в виде минимизации евклидовой нормы разности между проектированиями инспирированных изображений на итерации сформированных используем останов расширения радиуса ПЧС формируемого изображения.

Формируем изображение с числом пикселей, задаваемым самим исходным изображением в модели, т.к. уменьшение их числа некорректно и бессмысленно, а увеличение, хотя и возможно, но не скажется на достигаемом разрешении на изображении. Ниже представлены формулы итеративного метода ИВР.

$$S_{II}^{(n+1)} = S_{II}^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{-1}(L(S_{Rk} - S_{Rk}^{(n)}) * \Phi PT_k), \quad (2)$$

$$S_{II}^{(n+1)} = S_{II}^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K F_k^{-1}(L(S_{Rk} - S_{Rk}^{(n)}) * \delta), \quad (3)$$

где $S_{II}^{(n+1)}$ - следующая за n -ой итерация изображения со сверхразрешением; $S_{II}^{(n)}$ - n -ая итерация изображения со сверхразрешением; F_k^{-1} - оператор проектирования инспирированных изображений на изображение со сверхразрешением; F_k - оператор проектирования изображения со сверхразрешением на инспирированные изображения; S_{Rk} - инспирированные изображения; $S_{Rk}^{(n)}$ - n -ая итерация инспирированного k -го изображения; L - оператор увеличения изображений; ΦPT_k - функция рассеяния точки на k -ом инспирированном изображении; δ - ядро единичного преобразования или остаточная близкая к ядру единичного преобразования ФРТ; * - операция свертки; K - число инспирированных изображений.

При моделировании выполнялись следующие операции:

запуск процесса ИВР: первая итерация формируемого изображения получаемого по формуле (2) с обнулением $S_{Rk}^{(n)}$ и $S_{II}^{(n)}$;

выполнение подавления ФРТ на инспирированных изображениях с сохранением их исходных паттернов;

запуск процесса ИВР: первая итерация формируемого изображения получаемого по формуле (3) с обнулением $S_{Rk}^{(n)}$ и $S_{II}^{(n)}$;

вычисление в обоих случаях (с наличием ФРТ на инспирированных изображениях и с подавленной на инспирированных изображениях ФРТ) первой итерации $S_{Rk}^{(n)}$;

вычисление в обоих случаях последующих итераций инспирированных изображений и итераций изображения со сверхразрешением с вычислением его ПЧС;

констатация на первых двух итерациях прекращения роста радиуса ПЧС в обоих случаях с остановом итеративного процесса.

При вычислении всех итераций каждый раз инспирированные изображения подвергаются увеличению соответственно выполненному увеличению апертур их пикселей, т.к. адаптер графики в



компьютере не создает пикселей с увеличенной апертурой. Уменьшение числа пикселей на инспирированных изображениях приводит к соответствующему их уменьшению в размерах.

Для выбранных кратностей значений апертур пикселей инспирированных изображений к размерам исходных пикселей равных 2 и 3 разработана программа формирования прямого и обратного проектирования F_k и F_k^{-1} для ИВР, работающая с конкатенацией трех скользящих по изображениям окон – основного, размером 12x12 и компенсационных, размером 15x15 и размером 16x16 (в пикселах исходного изображения). При этом в модели все изображения обрамлены вокруг края полосой шириной в 24 апертуры пиксела исходного изображения с нулевыми значениями яркости.

Коррекция резкости на нормализованных изображениях реализуется с использованием модифицированных фильтров Винера, т.е. спектральных представлений оператора деконволюции (СПОД) с минимизацией невязки обратной оптимизированной частотно-контрастной характеристики тракта зондирования 1/(ЧКХ) и СПОД. [10,11]. Тракт дистанционного зондирования (ДЗ) представляется моделью Бейтса и Мак Доннела [11,12], персонифицируется сформированным в тракте изображением, а ЧКХ тракта определяет деградацию ПЧС входного в тракт, т.е. восстанавливаемого по резкости изображения до ПЧС наблюдаемого, сформированного на фокальных системах космического аппарата.

Первичная ЧКХ для последующей оптимизации определяется классическим отношением ПЧС исходного и корректируемого изображений в специальном разработанном аддитивном представлении задачи коррекции изображения на основе обобщенного градиентного оператора с варьируемым порядком [10].

Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях:

минимизации тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;

максимальной гладкости ЧКХ;

наиболее крутого спада ЧКХ в области высшей спектральной моды тракта;

мажорирования огибающей ЧКХ огибающую 1/СПОД даже с возмущающей добавкой;

вписывания огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении опорного ориентира (ОО) в огибающую ЧКХ;

не превышения значением порядка обобщенного градиентного оператора порога, при котором резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров в первом шаге коррекции – аддитивной коррекции, представленной в [10].

По физической сущности оптимизация ЧКХ заключается в такой предобработке изображения, 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.

Соотношение согласования ЧКХ и ФРТ на фоне модифицированной фильтрации Винера при оптимизации ЧКХ для дальнейшего вычисления частотно-зависимой добавки к спектру ФРТ имеет вид [10]:

$$\max ЧКХ(\omega_i, \omega_j) - \max(H^*(\omega_i, \omega_j) / (|H(\omega_i, \omega_j)|^2 + \rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}))^{-1} = \min > 0, \quad (4)$$



где $H(\omega_i, \omega_j) = F(\Phi PT_0)$ и есть оптимизированная ЧКХ тракта по условиям синтеза характеристики фильтра, $\rho(\omega_i^2 + \omega_j^2)^{1/2}$ – регуляризационный компенсатор спектрального представления шума изображения [9].

Далее выполняется специальная коррекция резкости (СКР) в соответствии с техникой, представленной в работе [11].

Пространственная разрешающая способность по Рэлю, достигаемая при СКР, параметрически задается значением, обратным значению соответствующего разрешения по Фуко, определяемого высшей модой в спектральном портрете репрезентативного для данного изображения объекта (с максимальной степенью репрезентативности – что означает: этот объект порождает двумерный спектр Фурье, практически полностью совпадающий по диаметру с диаметром спектра всего изображения). Для репрезентативного объекта его эталон с устраненными всевозможными невязками отображения [5,13], т.е. отличающийся от ОО только диаметром спектра, причем в большую сторону, демонстрирует в данном случае предельно достижимое (эталонное) пространственное разрешение. Используем этот эталон для построения меры Лебега оценки значения резкости R_s при его отображении. При решении задачи восстановления резкости внешняя мера MR_s итеративно получаемых значений резкости R_i определится классически $MR_s = \inf\{R_i\}$ (что соответствует мере разрешения по ФУКО: $\inf\{w_s\}$, где w_s – верхняя мода в двумерном спектре тестируемого объекта).

К множеству значений восстановленной резкости найдем дополнение R_a

$$R_a = R_s - R_i \tag{5}$$

Внутренняя мера MR_n определится как

$$MR_n = R_s - \inf\{R_a\} \tag{6}$$

Следует заметить, что в выражении (6) указывается сильная зависимость внутренней меры от значения R_s , однако это не так; более того, в случае совпадения внешней и внутренней мер Лебега значение R_s будет нейтрализовано вычитанием R_s , которое содержится в (5).

В более общих случаях, когда допускается несовпадение внутренней и внешней меры Лебега, влияние R_s ослабляется по тем же причинам, но значение R_{di} будет модулировано близким к единице множителем, причем зависимость внутренней меры от качества выбранного эталона будет сохраняться.

Для снижения апертуры ФРТ формула погрешности итерационного процесса деконволюции имеет вид [11,14]:

$$\rho(S_n^{(n)}, S_n) \leq (\|T\| \rho(S_n^{(n)}, S_n^{(n-1)})) / (1 - \|T\|), \tag{7}$$

где $\rho(S_n^{(n)}, S_n) = (\sum_{i,j} (S_{ni}^{(n)} - S_{nij})^2)^{1/2}$ – евклидова метрика, а $\rho(S_n^{(n)}, S_n^{(n-1)})$ исчисляется аналогично;

норма оператора T в соответствии с технологией итеративной деконволюции [11] равна

$$\|T\| = \|F^{-1}(1 - H) * S_n^{(n-1)}\| / \|S_n^{(n-1)}\|, \tag{8}$$

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

Остановы итеративных процедур определяются заданием требуемой относительной погрешности, которая, например, для формулы (7) для изображений, представленных в палитре с глубиной цвета 24 и с исходной размерностью, составляет 10^{-7} - 10^{-8} от максимальной яркости, что

соответствует последнему или 25-му разряду кода палитры. Весь процесс деконволюции требует выполнения 5-6 итераций. Чем выше погрешность вычисления итеративного оператора деконволюции, тем больше разность достигаемых верхних и нижних мер Лебега для оценки резкости на изображении. Численные и аналитические оценки этого факта алгоритмически сложны и выходят за рамки данной работы. Однако в работе используется оценка резкости верхней мерой Лебега (с оговоркой на снижение достоверности оценки, если ее разница от значения нижней меры достаточно высока).

Работа модели на фрагменте космического изображения

Для обработки использован фрагмент Houston_24466_o_8bit панхроматического нормализованного изображения со спутника OrbView-3 с количеством пикселей, равным 1 150 742 и преобразованием его в формат *.BMP, согласованный с программной поддержкой модели. Выбор этого изображения обоснован наличием для него всех пунктов реестра валидации и тем, что он имитирует один из цветовых 8-битных каналов цветного изображения полной 24-разрядной палитры. Наносимые принудительно ФРТ выбираются так, чтобы не подавить разрешение на изображении более, чем в 1,6 раза.

Ниже представлены выборочно результаты работы модели. На рисунке 3 представлено исходное изображение и его ПЧС.



Рис. 3. Исходное изображение и его ПЧС
Fig. 3. The original image and its PSP

На рис. 4 представлено инспирированное с одним из субпиксельных сдвигов и измененное по апертуре пикселей в 2 раза одно из четырех изображений изображение и его ПЧС.



Рис. 4. Инспирированное с одним из субпиксельных сдвигов и измененное по апертуре пикселей в 2 раза одно из четырех изображений и его ПЧС
Fig. 4. inspired by one of the sub-pixel shifts and changes the aperture pixels 2 times one of the four images and PSP

На рис. 5 представлено инспирированное с одним из трех субпиксельных сдвигов на две трети увеличенного пиксела изображение с измененными по апертуре пикселами в 3 раза (одно из трех изображений изображение) и его ПЧС.



Рис. 5. Инспирированное с одним из трех субпиксельных сдвигов на две трети увеличенного пиксела изображение с измененными по апертуре пикселами в 3 раза (одно из трех изображений изображение) и его ПЧС
 Fig. 5. inspired by one of the three sub-pixel shifts in two-thirds of the increased pixel image with pixels changed by the aperture 3 times (one of the three images of the image) and its PSP

На рис. 6 представлены с увеличением идентичные по окнам фрагменты исходного и инспирированного с увеличением апертюры пиксела в 3 раза изображения, для визуальной оценки вписывания 9 исходных пикселов в пиксел инспирированного изображения.



Рис. 6. Масштабированные и идентичные по окнам фрагменты исходного и инспирированного с увеличением апертюры пиксела в 3 раза изображения
 Fig. 6. Scaled and identical on the windows and original pieces inspired to increase the pixel aperture at 3 times the image

На рис. 7 представлено инспирированное изображение с удвоенной апертюрой пиксела и его ПЧС с выполненной сверткой с ФРТ, приведенной на правой части рисунка 2.



Рис. 7. Инспирированное изображение с удвоенной апертюрой пиксела и его ПЧС с выполненной сверткой с ФРТ, приведенной на правой части рисунка 2
 Fig. 7. inspired image with twice the pixel aperture and PSP with the implementation of the convolution with the PSF shown in the right-hand side of Figure 2

На рис. 8 представлено с его ПЧС инспирированное изображение с рисунка 7 после подавления на нем ФРТ.



Рис. 8. Инспирированное изображение с его ПЧС с рисунка 7 после подавления на нем ФРТ

Fig. 8. inspired image with its PSP with the figure 7 after suppressing it PSF

На рис. 9 представлено восстановленное изображение со сверхразрешением с его ПЧС при выполнении подавления ФРТ на инспирированных изображениях.



Рис. 9. Восстановленное изображение со сверхразрешением с его ПЧС при выполнении подавления ФРТ на инспирированных изображениях

Fig. 9. The reconstructed image with superresolution with his PSP when the suppression of PSF in the inspired images

За счет подавления на инспирированных изображениях нанесенной принудительно ФРТ и остаточной ФРТ, перенесенной от исходного изображения на инспирированные наблюдается эффект увеличения разрешения по отношению к исходному изображению не хуже, чем в 1,9 раза, а по отношению к изображениям используемой группировки, когда исходное изображение просто отсутствует и синтезируется из изображений группировки (можно обратиться к рисунку 7, например) наблюдается эффект увеличения разрешения примерно до 4 раз.

На рис. 10 приведен эффект восстановления сверхразрешения в ИВР, без подавления ФРТ на инспирированных изображениях.



Рис. 10. Эффект восстановления сверхразрешения в ИВР, без подавления ФРТ на инспирированных изображениях

Fig. 10. Effect recovery superresolution in IBP, without suppressing the PSF on inspired images

Заметен эффект увеличения разрешения на восстанавливаемом изображении примерно в 1,2 раза, т.е. по отношению к изображениям группировки примерно в 2,4 раза.

На рис. 11 приведено восстановленное изображение и его ПЧС при подавлении на инспирированных изображениях только перенесенной от исходного изображения остаточной ФРТ.



Рис. 11. Восстановленное изображение и его ПЧС при подавлении на инспирированных изображениях только перенесенной от исходного изображения остаточной ФРТ

Fig. 11. The reconstructed image and PSP on the suppression inspired images only transferred from the source image remaining PSF

Заметен эффект увеличения резкости до 1,4 раза или в 2,8 раза по отношению к изображениям группировки. Уровень среднеквадратичной дисперсии на всех восстановленных изображениях в окрестности 30% захвата области их ПЧС от края ПЧС меняется не выше чем на 5%. Приведенные изображения получены при работе модели с неполным набором инспирированных изображений: с тремя субпиксельно сдвинутыми изображениями с удвоенной апертурой пиксела и двумя с утроенной апертурой пиксела, что дает использование в сверхразрешении 75% + 66% от 1 150 742 пикселей.

При таком выборе смена игнорируемых инспирированных изображений практически ничего не меняет. Любое превышение или равенство числа инспирированных пикселей числу пикселей в исходном изображении порождает неотличимые на уровне задаваемых погрешностей всех итераций одинаковые результаты. Меняется только число итераций в ИВР необходимых для завершения формирования сверхразрешения: при использовании в сверхразрешении в данной модели 100% инспирированных пикселей относительно исходного изображения выполняется 12-16 итераций, при максимальном наборе из восьми инспирированных изображений при 4 x 25% + 4 x 33% пикселей относительно 1 150 742 пикселей процесс завершается за 8-10 итераций.

Математическая модель программно реализована на языке C# среды программирования Microsoft Visual Studio 2010 Professional.

Заключение

Разработана на модифицированном индустриальном итеративном методе ИВР модель сверхразрешения на инспирированных из реальных космических исходных изображениях высокого разрешения паттернах, соответствующих группировке спутников, т.е. нормализованных субпиксельно сдвинутых изображениях с разными функциями рассеяния точки и разными апертурами пикселей. Показано, что при подавлении ФРТ на инспирированных изображениях с субпиксельным сдвигом модель реализует при формировании изображения увеличение разрешения не хуже 1,9 раз относи-



тельно исходного паттерна и до 4 раз относительно взвешенного разрешения по инспирированным изображениям.

Метод корректировки результатов функционирования итеративного интегрального оператора деконволюции инспирированных изображений разработан как модернизация представленной ранее специальной коррекции резкости на изображениях высокого разрешения с сохранением измерительных свойств изображений. Отличительной особенностью метода коррекции от подавляющего множества методов деконволюции, в том числе и на космических изображениях является преодоление проблемы: в литературе нет сведений о постановках задач восстановления действительной огибающей светосигнальной характеристики, то есть точного изображения как образа объекта, так и его пространственного спектра, что требуется в ДЗ, а ставятся задачи улучшения практически визуального качества, нередко ошибочно понимаемого как повышение резкости.

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

1. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview// IEEE Signal Processing Magazine, 3(20): 21-36.
Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. IEEE Signal Processing Magazine, 3 (20): 21-36.
2. <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 «РНИИКИ»), 2008.
<http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm> «Subpiksel'naja obrabotka kak sposob povyshenija prostranstvennogo razreshenija v sistemah distancionnogo zondirovanija». Selivanov A.S. // FGUP «Rossijskij nauchno-issledovatel'skij institut kosmicheskogo priborostroenija» (FGUP «RNIKP»), 2008.
3. Рапушкин А.В. 2008. Технологии обработки видеoinформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений. № 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.
4. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. 2010. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии. Солнечно-земная физика, №16: 154-161.
Kochanov A.A., Obuhov A.G., Prosoveckij D.V. 2010. Metody vosstanovlenija izobrazhenij i raspoznavanie obrazov v radioastronomii. Solnechno-zemnaja fizika, №16: 154-161.
5. 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. Korrekcija cifrovyh kosmicheskikh izobrazhenij na osnove verifirujushhego modelirovanija. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 255 s.
6. 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.
7. Блажевич С.В., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Синтез космического изображения с улучшенной разрешающей способностью на основе субпиксельного сканирования// Материалы седьмой всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Том 7 № 2, стр. 9-13, 2010, изд. ИКИРАН.
Blazhevich S.V., Vintaev V.N., Ushakova N.N. Sintez kosmicheskogo izobrazhenija s uluchshennoj razreshajushhej sposobnost'ju na osnove subpiksel'nogo skanirovanija// Materialy sed'moj vserossijskoj konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa», Tom 7 № 2, str. 9-13, 2010, izd. IKIRAN.



8. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектральной 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.

9. 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-tehnicheskoi konferencii (Moskva, 15-17 marta 2011 g.). Moskva, Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN: t. 38: s.16-21.

10. Винтаев В.Н., Жилнев 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 vosstanovlenie rezkosti na cifrovых kosmicheskikh izobrazhenijah // Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy». - Moskva. Izdatel'stvo instituta sistemnogo analiza (ISA) RAN- 2014. №4.- S. 33-43.

11. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилнев 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): с. 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 funkcii rassejanija toчки na kosmicheskikh izobrazhenijah. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. - Istorija, Politologija, Jekonomika, Informatika. Nauchnyj recenziruemyj zhurnal, 15 (186): s. 166–175.

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

Bejts R., Mak-Donnel M. 1989. Vosstanovlenie i rekonstrukciya izobrazhenij. M., Mir, 336 s.

13. Ушакова Н.Н. 2011. Вычислительные алгоритмы в компьютерной графике и обработке изображений. Белгород, Изд-во БУКЭП, 193 с.

Ushakova N.N. 2011. Vychislitel'nye algoritmy v komp'juternoj grafike i obrabotke izobrazhenij. Belgorod, Izd-vo BUKeP, 193 s.

14. 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.