

Метод повышения разрешения космических изображений ригидных объектов*

А. Б. Мурынин^{1,2}, А. Н. Трекин^{2,3}, В. Ю. Игнатьев^{1,3}, В. Г. Кульченкова^{1,4},
К. О. Ракова^{3,4}

AMurynin@bk.ru; alexey.trekin@gmail.com; vladimir.ignatiev.mipt@gmail.com;
kulchenkova.lera@gmail.com; kristina.rakova94@gmail.com

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44/2;

²Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»;

³Сколковский институт науки и технологий, Москва, Большой бульвар, д.1, стр. 30;

⁴Московский физико-технический институт, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Проведен анализ метода, позволяющего повысить пространственное разрешение космических изображений ригидных объектов с использованием векторной информации о геометрических свойствах этих объектов. Повышение разрешения снимка низкого качества проводится с применением вероятностного подхода с использованием наиболее оптимальных параметров, полученных путем минимизации различия между эталонным изображением и результатом работы метода по тестовому набору данных. Представлены результаты исследования качества работы метода от типов подстилающей поверхности при разных масштабах повышения разрешения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли; повышение разрешения; паншарпенинг; обработка изображений

DOI: 10.21469/22233792.4.5.01

1 Введение

На сегодняшний день усовершенствование методов повышения разрешения космических изображений является наиболее актуальным для повышения точности распознавания и улучшения визуального качества изображений. Рассматриваемая в данном исследовании прикладная задача связана с необходимостью иметь возможность повысить детализацию входных данных для мониторинга урбанизированных территорий. Большинство методов повышения пространственного разрешения приводят к появлению артефактов — объектов, не присутствующих на исходной сцене, но возникающих на результирующем изображении. Наиболее распространенные артефакты связаны с искажением высокочастотной информации: эффект размытия, алиасинг (ступенчатость контуров) и эффект Гиббса (ложное оконтуривание) [1].

Методы повышения разрешения могут отличаться по способу восполнения недостающей информации при формировании изображений высокого разрешения: повышение разрешающей способности мультиспектральных изображений, основанные на синтезе информации в спектральных каналах; использование интерполяции одиночных изображений; использовании априорной информации об объектах [2].

Для сцен типа городских кварталов, где есть интересующие нас ригидные объекты, например здания, целесообразно привлечение дополнительной векторной информации из

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №16-51-55019

внешних источников. Для этих объектов могут быть получены вспомогательные векторные данные, в том числе в результате наземной съемки, как описано, например, в статье [3].

Существуют различные методы, позволяющие избежать размытия границ. Например, предварительное выделение перепадов яркости [4, 5], использование нелинейной диффузии [6], агентный подход [7]. В этих методах перед интерполяцией проводится предварительная обработка, выделяющая границы. Такой подход позволяет хорошо сохранить границы, и не требует какой-либо дополнительной информации, однако в связи с этим обладает и значительной вычислительной сложностью. Также к недостаткам относится риск выделения границы в той части изображения, где на самом деле происходит плавное, но быстрое изменение яркости, и наоборот, возможность пропуска реальной границы.

При повышении разрешения изображений ригидных объектов, для которых имеется вспомогательная векторная информация могут быть скомбинированы методы с целью повышения точности выделения границ объектов и повышения общего качества изображения. Мы предлагаем дальнейшее развитие вероятностного метода [8], который относится к группе методов SISO (single input, single output — одно изображение на входе, одно на выходе) и не сохраняет информацию о реальных границах объектов, поэтому при кратности повышения разрешения более чем в 4 раза неизбежно искажение в области высоких частот пространственного спектра. Для выделения границ будем учитывать особенности использования априорной информации в методе [9], который позволяет уточнять интерполяцию на границах реальных объектов. В методе [9] требуется наличие основного метода для повышения разрешения в областях, не принадлежащих к границе реальных объектов. Объединение методов предполагает использование итеративной процедуры повышения разрешения, создание которой является темой дальнейшего исследования.

2 Повышение качества изображений вероятностным методом

В статье [8] предложен вероятностный метод повышения пространственного разрешения мультиспектральных космических изображений с использованием опорного изображения, который вычисляет математическое ожидание яркости пикселя в различных каналах улучшенного мультиспектрального изображения.

В основе метода лежат два свойства:

- свойство пространственной локальности объектов в пространстве изображения (две соседних области более вероятно принадлежат одному объекту, чем две удаленные);
- схожесть значений яркости пикселей в спектральных каналах пространственно близких областей в случае принадлежности одному объекту.

Идея вероятностного метода повышения пространственного разрешения изображения заключается в том, что на основе мультиспектрального изображения I_m и его панхроматической пары I_p , рассчитывается апостериорная вероятность и вычисляется значение яркости мультиспектрального вектора \hat{I}_m^r при условии обнаружения в этой же точке пространства яркости I_p панхроматического изображения. Верхний индекс r обозначает, что изображение восстановлено (restored) из двух оригинальных. Обозначим эту апостериорную вероятность за $P(I_m, I_p)$. В рамках задачи для повышения пространственного разрешения изображения необходимо для каждой точки панхроматического изображения найти наиболее вероятный вектор \hat{I}_m^r .

Пусть вектор x соответствует пространственной координате точки, (i, j) — координаты точки изображения I_p , а $\omega(i, j)$ — весовые коэффициенты точки $x(i, j)$. Используя формулу Байеса [10] о полной вероятности, вычисляется математическое ожидание вероятности

яркости (или, другими словами, наиболее вероятного мультиспектрального вектора) результирующего изображения как взвешенная сумма яркостей по окрестности точки (i, j) :

$$\left\langle P\left(\hat{I}_m^r \mid I_m, I_p\right)\right\rangle_{x_{i,j}} = \frac{\sum_{x_{i,j} \in \Omega} \hat{I}_m(x_{i,j}) \omega(i, j)}{\sum_{x_{i,j} \in \Omega} \omega(i, j)}, \quad (1)$$

где $\left\langle P\left(\hat{I}_m^r \mid I_m, I_p\right)\right\rangle$ — математическое ожидание вероятности $P\left(\hat{I}_m^r \mid I_m, I_p\right)$. Весовые коэффициенты $\omega(i, j)$ параметров формы ядра в пространстве двумерных гауссовских ядер наиболее вероятного мультиспектрального вектора (или, другими словами, математического ожидания $\left\langle P\left(\hat{I}_m^r \mid I_m, I_p\right)\right\rangle$), для определения которого используется взвешенное среднее значение наиболее подобных точек в окрестности заданной. Чем больше степень подобия, тем больше будет весовой коэффициент для этой точки.

Следовательно, восстановленное мультиспектральное изображение считается поэлементным умножением интенсивностей изображения на восстановленное нормированное мультиспектральное изображение:

$$I_m^r(x) = \hat{I}_m^r(x) I_p(x). \quad (2)$$

Качество работы метода зависит от формы ядра для вычисления вектора значений яркости в точке (i, j) . Как показано в работе [8], выбор оптимальных формы ядра определяется двумя значениями: k — линейный размер ядра, t — величина отступа от границы двумерного ядра, значения которых задают размер матрицы весов, которая определяет вклад значений яркости из окрестности текущего пикселя.

Поиск оптимальных значений параметров k_{opt}, t_{opt} осуществляется с помощью итерационной процедуры минимизации функция ошибки $f(I_m, \hat{I}_m^r)$, которая отражает меру различия между эталонным мультиспектральным изображением I_m и результирующим изображением \hat{I}_m^r .

В качестве меры оценки качества повышения разрешения мультиспектральных изображений в формуле $f(I_m, \hat{I}_m^r)$ использован набор метрик: *SAM* [11], *ERGAS* [12], *Q* [13]. Перечисленные метрики позволяют оценить степень подобия пары изображений I_m, \hat{I}_m^r на основе следующих факторов:

1. Степень пространственной близости точки из окрестности к заданной. Суть это факта заключается в том, что чем ближе точки находятся на изображении, тем больше вероятность того, что значения интенсивности в этих точках будут близки.
2. Степень близости двух точек согласно их панхроматическим яркостям. Делается допущение, что чем меньше разность панхроматических яркостей точек, тем более подобными будут мультиспектральные векторы этих точек.

Таким образом, зная вероятностные характеристики окрестности точки и значение яркости панхроматического изображения, возможно сделать предположение о мультиспектральных характеристиках в этой точке.

Сравнение метода проводилось с существующими качественными методами паншарпенинга, основанными на методе замены компонент, и на высокочастотных структурах [14]. Результаты сравнения качества работы предложенного подхода с методами: Principal component analysis (PCA) [15], [16], [17], Gram-Schmidt (GS) [18], Smoothing Filter-based Intensity Modulation (SFIM) [19], Modulation Transfer Function Generalized Laplasian Pyramid (MTF GLP) [20] представлены в таблице 1.

Таблица 1 Значение метрик качества при применении различных методов паншарпенинга при двукратном увеличении

	PCA	GS	SFIM	MTF GLP	Данный метод
Q(больше-лучше)	0.879	0.878	0.878	0.881	0.917
SAM(меньше-лучше)	1.889	1.891	1.743	1.762	1.531
ERGAS(меньше-лучше)	3.710	3.720	3.951	3.902	3.175

2.1 Эксперименты с различными типами подстилающих поверхностей

Результаты исследования применимости разработанного метода для повышения качества спутниковых изображений для различных подстилающих поверхностей представлены на рисунке 1.

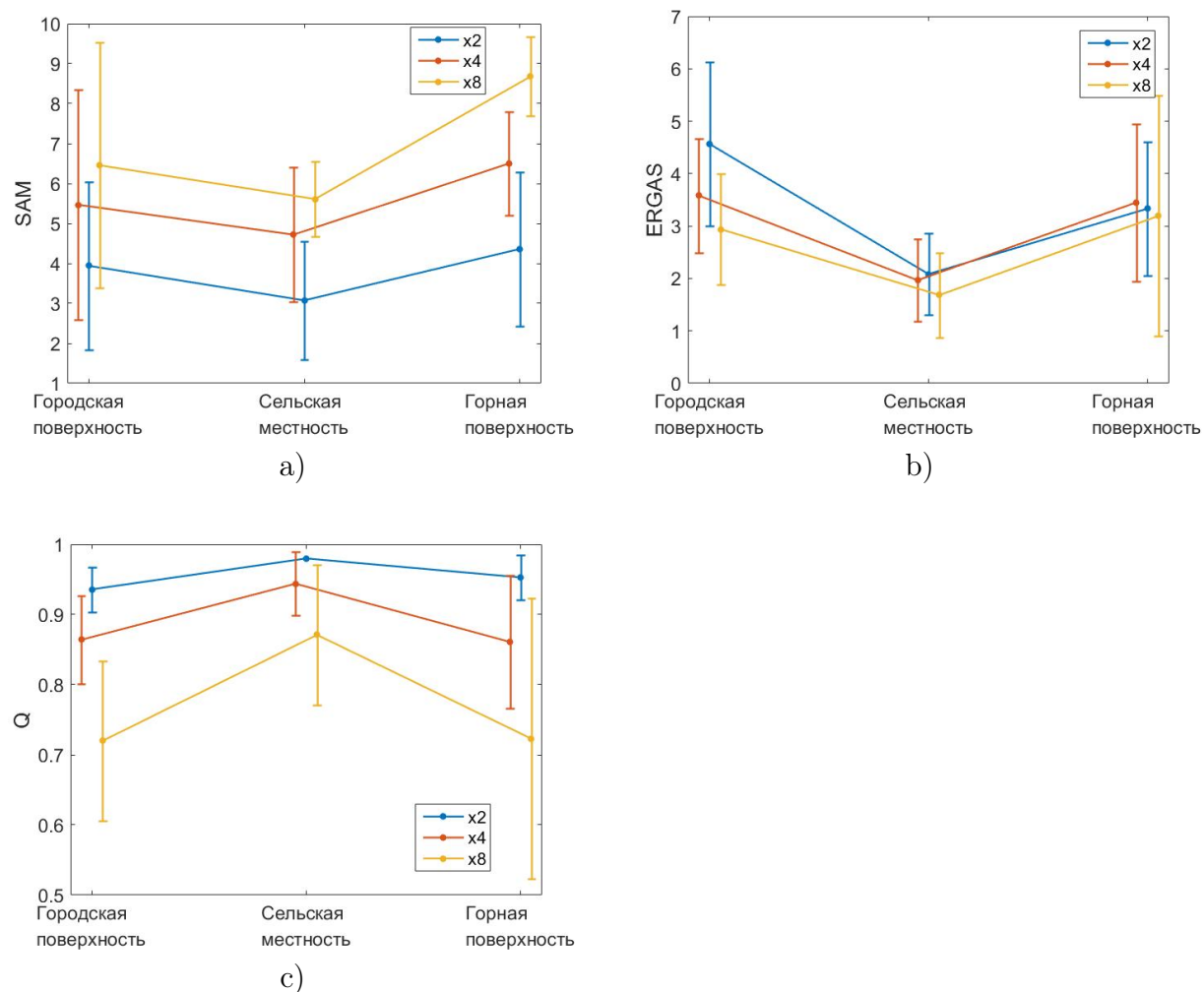


Рис. 1 Тестирование качества работы метода на изображениях с различными типами подстилающей поверхности при разной кратности увеличения: а) по метрике SAM; б) по метрике ERGAS; в) по метрике Q.

Из приведенных результатов видно, что лучше всего метод работает для территорий сельской местности. Применимость метода для изображений ригидных объектов можно оценить по результатом для городской застройки, поскольку здания, являются характерным примером объектов, сохраняющих свою форму в течение продолжительного времени.

В следующем разделе описан метод, который при объединении с описанным выше подходом может привести к повышению качества результата при повышении пространственного разрешения космических изображений с силу добавления априорной информации о границах ригидных объектов.

3 Использование векторной информации о геометрических свойствах объектов для улучшения изображений

Для лучшего выделения границ ригидных объектов будем использовать подход, описанный в статье [9]. Представлен метод улучшения спутниковых изображений, основанный на использовании априорной информации о контрастных границах разнородных областей, который позволяет сохранять резкий переход яркости на результирующих изображениях.

Обычное пиксельное изображение не позволяет сделать вывод о том, где проходят резкие границы между объектами, а где — плавный переход яркости, что приводит к размытию границ при попытке повышения разрешения изображения. Поэтому предложено хранение изображения не в виде двумерной матрицы пикселей, а в виде так называемых бикселей (bixels) [21]. Такое изображение состоит из обычного растра, задающего значения яркости в вершинах равномерной сетки, и описания границ, проходящих вблизи каждой вершины, с субпиксельной точностью. Границы могут быть представлены в виде ломаных или кривых и обозначают линии, по которым проходит резкий перепад яркости, обычно — границы объектов, разделение объекта и фона. Таким образом, появляется возможность сохранить резкие перепады яркости, соответствующие границам, при повышении разрешения в любое количество раз, оставив в прочих местах плавные переходы, соответствующие интерполяционным алгоритмам.

Для отображений изображений на экране или в печати используется пиксельное представление, поэтому существует алгоритм перевода изображения из бикселей в чисто растровый вид. Так как при этом могут получаться абсолютно резкие границы, для лучшего восприятия производится сглаживание (anti-aliasing) [22]. В зависимости от конфигурации близлежащих границ, интерполяция яркости в выбранных координатах производится по одной из десяти функций билинейной интерполяции по точкам базового изображения [23]. При этом для интерполяции, с помощью которой получают пиксели результирующего растрового изображения, используются только те значения яркостей, что не отделены от результирующего пикселя линией границы. С примеры применения векторных границ для повышения разрешения показан можно ознакомиться в статье [9].

При улучшении космических изображений существует возможность использовать дополнительную информацию о поверхности. В качестве такой информации доступны различные карты поверхности, созданные ранее по другим данным дистанционного зондирования, а также с помощью наземных измерений: карты подстилающей поверхности, граница суши и воды, карта дорожной сети, и другие. Предполагается использование таких карт в качестве априорной информации в векторной форме, например в формате шейпфайла [24], содержащего полигоны.

В методе рассматривалось использование векторных карт для более точного учета границы областей. Несмотря на то, что есть возможность использовать данный метод для всего изображения, как вблизи границ, так и в отдалении от них, было принято решение об интерполяции по регулярной сетке (например, бикубическая), которая оказывается менее вычислительно затратной, и в тоже время достаточно качественным методом повышения разрешения

Итак, области изображения с контрастными границами задаются в одном или нескольких векторных файлах в виде полигонов. Для определения, какой области принадлежит определенная точка, производится проверка по каждому шейпфайлу, лежит ли точка внутри какого-либо из его полигонов. Так как такую проверку необходимо делать для каждой точки, целесообразно использовать метод индексации векторного файла для ускорения поиска нужного полигона [25]. В зависимости от того, лежат ли точки внутри какого-либо из полигонов, каждой из них присваивается номер соответствующей области. Если все точки окрестности лежат в одной области, то к каждой из этих точек применяется бикубическая интерполяция. Методом можно воспользоваться, когда 16 пикселей исходного изображения, ближайших к точке, для которой необходимо вычислить яркость, находятся в одной области. В случае, когда часть этих пикселей лежит в той же области, что и искомая точка, а часть отделена границей, то для каждого пикселя результирующего изображения определяется область (полигон), к которой он принадлежит. После этого искомое значение вычисляется интерполяцией по методу Шепарда [26] на основании точек окрестности, принадлежащих той же области.

Для обеспечения наличия хотя бы одного пикселя исходного изображения внутри каждого полигона, накладываются следующие ограничения:

- каждый полигон должен содержать как минимум один пиксель исходного изображения для исключения неопределенности, т.е. для любого P существуют такие $i \in \{1, \dots, h\}, j \in \{1, \dots, w\}$, что $(x_i, y_j) \in P$;
- полигоны не должны иметь пересечений, т.е. для любых i, j верно: $P_i \cap P_j = \emptyset$.

Алгоритм обработки изображения представлен в виде блок-схемы на Рис. 2.

Для тестирования алгоритма использовались квадратные фрагменты изображений Landsat [27] размером 500×500 точек, загрублялись в 4 раза, а затем проводилось повышение разрешения описанным методом. Для сравнения был выбран метод бикубической интерполяции. Также результат работы описанного алгоритма сравнивался с увеличением всего изображения методом Шепарда [26] в вариантах с применением векторных данных и без.

Пример исходных данных и результата приведен на рис. 3. Можно отметить, что при использовании априорной информации в векторной форме границы ригидных объектов сохраняют резкость.

Для оценки результатов работы метода используются количественные оценки: среднеквадратичная ошибка RMSE (формула (3)), чем ближе к 0 — тем ближе к эталону; и средний индекс структурного сходства MSSIM (формула (4)), чем ближе к 1 — тем ближе к эталону, может принимать значения в диапазоне $[-1; 1]$ [12], [28]

$$\text{RMSE}(I_1, I_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2}{NM}}, \quad (3)$$

где $I_1(i, j), I_2(i, j)$ — функции яркости сравниваемых изображений.

$$\text{MSSIM} = \sum_{a \in I_1, b \in I_2} \frac{(2\mu_a \mu_b + c_1)(2\sigma_{ab}^2 + c_2)}{(\mu_a^2 + \mu_b^2 + c_1)(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + c_2)}, \quad (4)$$

где два квадратных окна $a \subset I_1$ и $b \subset I_2$ имеют одинаковый размер, μ_a — среднее значение яркости изображения I_1 в окне a ; μ_b — среднее значение яркости изображения I_2 в b ;

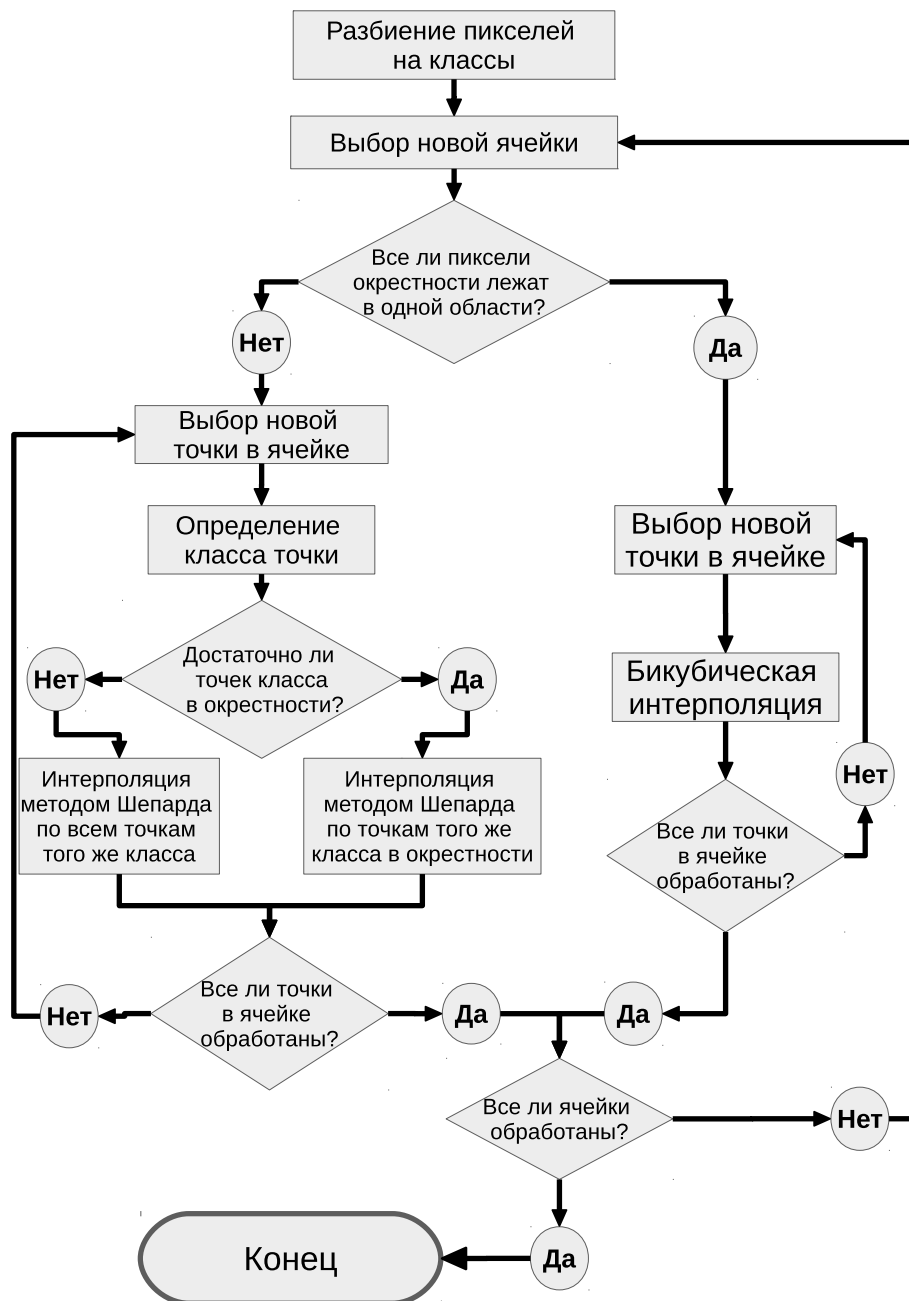


Рис. 2 Блок-схема работы алгоритма

σ_a^2 — дисперсия яркости a ; σ_b^2 — дисперсия b ; σ_{ab}^2 — ковариация a и b . Константы c_1 и c_2 вычисляются как: $c_1 = (0.01L)^2$, $c_2 = (0.03L)^2$, где L — динамический диапазон значений яркости пикселей [28].

При измерении на однородной области изображения, среднеквадратичная ошибка позволяет достаточно хорошо оценить спектральное качество изображения. Индекс структурного сходства характерен тем, что учитывает человеческое восприятие ошибки благодаря учету структурного изменения информации. Идея заключается в том, что пиксели имеют сильную взаимосвязь, особенно когда они близки пространственно. Данные зависимости несут важную информацию о структуре объектов и о сцене в целом.

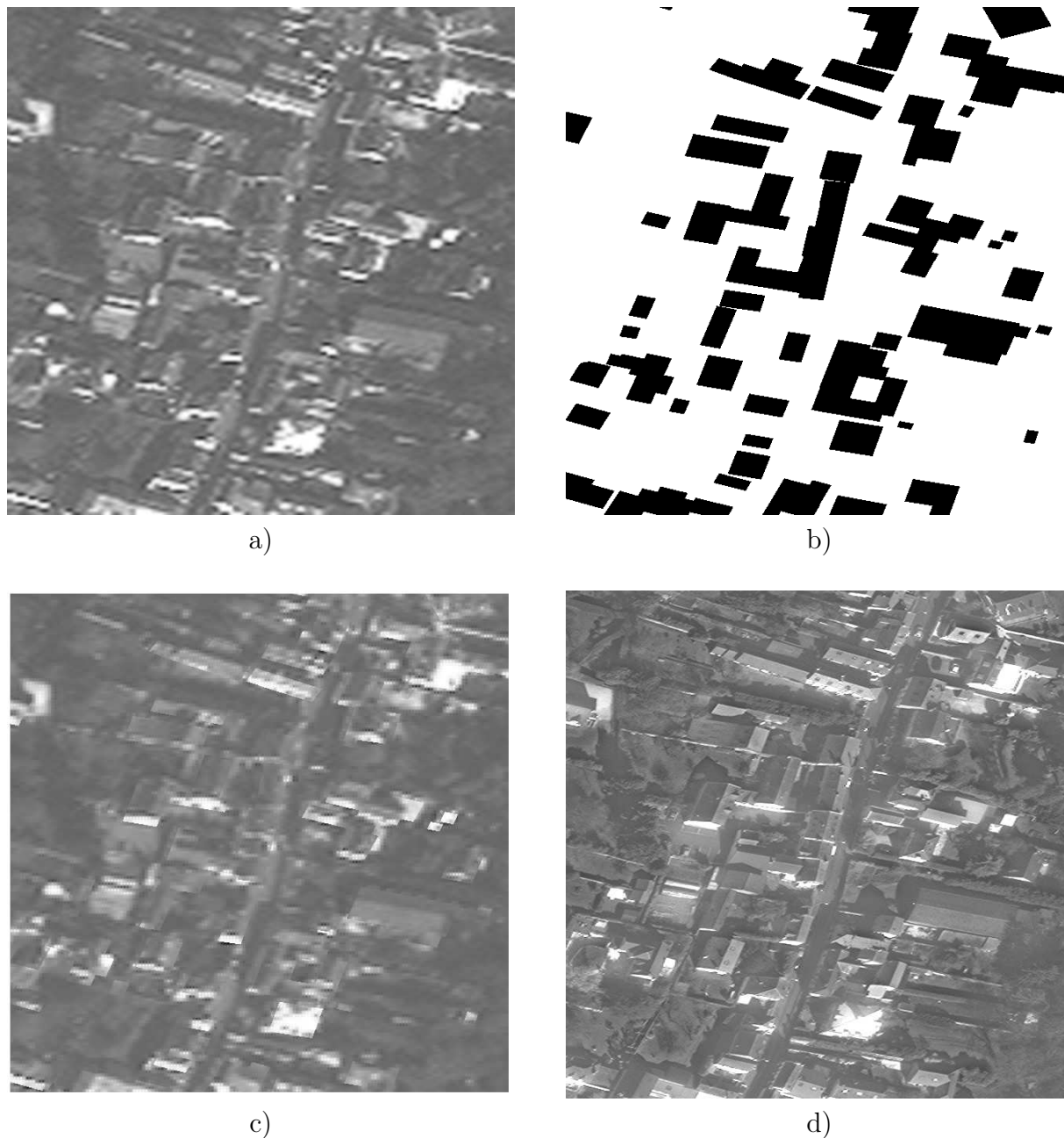


Рис. 3 Пример использования предложенного комбинированного метода для повышения детализации космического изображения городских кварталов: а) исходное тестовое изображение низкого пространственного разрешения; б) векторная карта, полученная из наземных источников; в) результат применения комбинированного метода; д) эталонное изображение, имеющее пространственное разрешение в 4 раза лучшее, чем тестовое.

Полученные результаты показывают, что применение векторной информации при повышении разрешения изображений позволяет улучшить результат. Разработанный метод, сочетая в себе подходы, примененные в базовых методах, в рассмотренных условиях превосходит их оба по качеству повышения разрешения изображения, измеренному с помощью двух различных критериев.

Следует заметить, что повышение качества требует точного позиционирования векторных данных относительно растровых, иначе неизбежно появление артефактов — перепа-

Таблица 2 Результат экспериментальной проверки

	Бикубическая интерполяция	Метод Шепарда	Метод Шепарда с границами	Данный метод
RMSE (меньше-лучше)	433.4	483.88	386.71	366.37
MSSIM (больше-лучше)	0.45844	0.42699	0.45002	0.47107

дов яркости там, где их быть не должно, что вызывает снижение численных характеристик качества повышения разрешения. При этом улучшение в меньшей степени касается восприятия схожести изображения человеком, что показывают близкие значения индекса структурного сходства, и в большей степени реальной, математической попиксельной близости к изображению, которая выражается методом среднеквадратичного отклонения. Таким образом, данный метод может быть применен для повышения разрешения изображений с целью последующей компьютерной обработки методами, использующими значения яркости — сегментации, классификации и др.

4 Заключение

Таким образом, предложено дальнейшее развитие вероятностного метода повышения качества мультиспектральных изображений с использованием априорной информации о границах реальных ригидных объектов. Представлен метод улучшения спутниковых изображений, который позволяет сохранять резкий переход яркости на результирующих изображениях. Показана возможность использования векторной информации о геометрических свойствах объектов, получаемой из различных источников, в том числе из подспутниковых измерений. Дальнейшее развитие предложенного подхода требует проведения экспериментальных и теоретических исследований по следующим направлениям: - исследование качества выделения ригидных объектов на мультиспектральных изображениях разработанным комбинированным методом с использованием данных дистанционного зондирования урбанизированных территорий, получаемых различными из различных источников: съемки с космических спутников, данных с воздушных летательных аппаратов (в том числе беспилотных), данных наземной панорамной съемки;

- оптимизация параметров вероятностного метода повышения пространственного разрешения изображений для выделения границ ригидных объектов с учетом специфики различных методов получения вспомогательной информации.

Литература

- [1] Крылов А. С., Насонов А. В. Компьютерное повышение разрешения изображений с использованием методов математической физики. М:МАКС Пресс, 2011, 72 с.
- [2] Milanfar P. Super-Resolution Imaging. CRC Press. 2010, pp. 490.
- [3] Мурынин А. Б., Рихтер А. Б. Особенности применения методов и алгоритмов реконструкции трехмерной формы ригидных объектов по данным панорамной съемки. Машинное обучение и анализ данных, 2018. Том 4, №4, С. 235-247 doi: <http://dx.doi.org/10.21469/22233792.4.4.02>

- [4] *Цурков В.И., Ковков Д.В.* Способ удаления шума в изображении. Патент RUS 2316816 25.08.2005.
- [5] *Fattal R.* Upsampling via Imposed Edges Statistics. Proc. ACM SIGGRAPH, 2007. V.26 N.3. Article N.95.
- [6] *Tsurkov V. I* An Analytical Model of Edge Protection under Noise Suppression by Anisotropic Diffusion. J. Computer and Systems Sciences International., 2000. V. 39. No 3. P. 437–440
- [7] *Чебурахин И. Ф., Цурков В.И.* Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов. Мехатроника, автоматизация, управление., 2011. N.3. С. 27–34.
- [8] *Гороховский К. Ю., Игнатъев В. Ю., Мурынин А. Б., Ракова К. О.* Поиск оптимальных параметров вероятностного алгоритма повышения пространственного разрешения мультиспектральных спутниковых изображений. Известия РАН. Теория и системы управления, 2017, 6, С. 112-124 doi: <http://dx.doi.org/10.7868/S0002338817060099>
- [9] *Трекин А. Н., Матвеев И. А., Мурынин А. Б., Бочкарева В. Г.* Метод повышения разрешения космических изображений с использованием априорной информации в векторной форме для сохранения границ. Машинное обучение и анализ данных, 2015. Т. 1, №12., С. 1717-1730. doi: <http://dx.doi.org/10.21469/22233792.1.12.07>
- [10] *Боровков А. А.* Математическая статистика. М.: Наука, 1984, 472 с.
- [11] *Yuhas R. H., Goetz A. F. H., Boardman J. W.* Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. Proc. Summaries 3rd Annu. JPL Airborne Geosci. Workshop, 1992. P. 147-149.
- [12] *Wald L., Ranchin T., Mangolini M.* Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. Photogramm. Eng. Remote Sens., 1997. V.63. P. 691-699.
- [13] *Wang Z., Bovik A. C.* A universal image quality index. IEEE Signal Process. Lett., 2002. V.9. N.3. P. 81-84. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/97.995823>
- [14] *Vivone G., Alparone L., Chanussot J., Dalla Mura M., Garzelli A., Licciardi G., Restaino R., Wald L.* A critical comparison among Pansharpening Algorithms. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 53, no. 5, May 2015 doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734>
- [15] *Chavez Jr. P. S., Sides S. C., Anderson J. A.* Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 57, no. 3, pp. 295-303, Mar. 1991.
- [16] *Chavez Jr. P. S., Kwarteng A. W.* Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis. Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 55, no. 3, pp. 339-348, Mar. 1989.
- [17] *Shettigara V. K.* A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. Photogramm. Eng. Remote Sens., vol. 58, no. 5, pp. 561-567, May 1992.
- [18] *Laben C. A., Brower B. V.* Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. U.S. Patent
- [19] *Wald L., Ranchin T.* Comment: Liu 'Smoothing filter-based intensity modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details'. Int. J. Remote Sens., vol. 23, no. 3, pp. 593-597, Jan 2002.

- [20] *Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Garzelli A., Selva M.* MTF - tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 72, no. 5, pp. 591-596, May 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.72.5.591>
- [21] *Tumblin J., Chouldhury P.* Bixels: Picture Samples with Sharp Embedded Boundaries. *Eurographics Symposium on Rendering.*, 2004
- [22] *Grahn A.* An Image and Processing Comparison Study of Antialiasing Methods.
- [23] *Sun C., Sang N., Zhang T., Wang X.* Image bilinear interpolation enlargement and calculation analysis. https://www.researchgate.net/publication/296609989_Image_bilinear_interpolation_enlargement_and_calculation_analysis
- [24] http://downloads.esri.com/support/whitepapers/mo_/shapefile.pdf. ESRI
- [25] *Бондур В. Г., Мурынин В. Б., Матвеев И. А., Трекин А. Н., Юдин И. А.* Метод вычислительной оптимизации в задаче сопоставления растровой и векторной информации при анализе спутниковых данных. *Современные проблемы дистанционного зондирования.*, 2013. Т. 10. No4. С. 98-106.
- [26] *Shepard D.* A two dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM National Conference*, 1968, pp 517-524. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/800186.810616>
- [27] <http://earthexplorer.usgs.gov>. Earthexplorer
- [28] *Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P.* Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *EEE Trans. Image Processing.*, 2004. V.13. N.4. P. 600–612. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- [29] *Ranchin T., Wald L.* Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 66, no. 1, pp. 49-61, Jan 2000.
- [30] *Gonzalez R. C., Woods R. E.* *Digital image processing.* Prentice Hall, 3 edition, August 31, 2007, 976 p.
- [31] *Тихонов В. И.* *Оптимальный прием сигналов.* М.: Радио и связь, 1983. — 320с.

Поступила в редакцию 19.03.2019

Approach to enhancement of spatial resolution of the rigid objects satellite imagery

A. B. Murynin, A. N. Trekin, V. Yu. Ignatiev, V. G. Kulchenkova, K. O. Rakova
AMurynin@bk.ru; alexey.trekin@gmail.com; vladimir.ignatiev.mipt@gmail.com;
kulchenkova.lera@gmail.com; kristina.rakova94@gmail.com

¹Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, 44/2 Vavilova st., Moscow, Russia;

²Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring AEROCOSMOS, Moscow, Russia;

³Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, Russia;

⁴Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

The approach is proposed allows to increase the spatial resolution of space images of rigid objects using vector information about the geometric properties of these objects. Enhancement of the resolution of a low-quality image is carried out using a probabilistic approach using the most optimal parameters obtained by minimizing the difference between the reference image and the result of the method's work on the test data set. The results of the study of the spatial resolution enhancement on different types of the underlying surface at different scales are presented.

DOI: 10.21469/22233792.4.5.01

References

- [1] Krylov A. S., Nasonov A. V.. 2011. Komp'yuternoe povyshenie razresheniya izobrazheniy s ispol'zovaniem metodov matematicheskoy fiziki [Computer enhancement of image resolution using mathematical physics methods]. M:MAKS Press, 72 p.(In Russian)
- [2] Milanfar P.. 2010. Super-Resolution Imaging. CRC Press. 490 p.
- [3] Murynin A. B., Rihter A. B.. 2018. Osobennosti primeneniya metodov i algoritmov rekonstrukcii trekhmernoy formy rigidnykh obektov po dannym panoramnoy semki [Features of the application of methods and algorithms for the reconstruction of the three-dimensional shape of rigid objects according to the panoramic survey]. *Mashinnoe obucheniye i analiz dannykh* [Machine learning and data analysis]4(4):235–247. doi: <http://dx.doi.org/10.21469/22233792.4.4.02>. (In Russian)
- [4] Curkov V. I., Kovkov D. V.. 2005. Sposob udaleniya shuma v izobrazhenii [Methods of removing noise of the image]. Patent RUS 2316816 25.08.2005.
- [5] Fattal R.. 2007. Upsampling via Imposed Edges Statistics. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2007)*,26(3):Article N.95
- [6] Tsurkov V. I. 2000. An Analytical Model of Edge Protection under Noise Suppression by Anisotropic Diffusion. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 39(3):437–440
- [7] CHEburahin I. F., Curkov V. I.. 2011. Sintez diskretnykh logicheskikh ustroystv obrabotki informacii na osnove teorii agentov. [Syntheses discrete logical device information handling on base of the theories agent]. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. [Mekhatron., Avtomatiz., Upravl.],3:27–34. (In Russian)
- [8] Gorohovskiy K. Yu., Ignat'ev V. YU., Murynin A. B., Rakova K. O.. 2017. Poisk optimal'nykh parametrov veroyatnostnogo algoritma povysheniya prostranstvennogo razresheniya mul'tispektral'nykh sputnikovyykh izobrazheniy [Search for optimal parameters of a probabilistic algorithm for increasing the spatial resolution of multispectral satellite images]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 56(6):1008–1020. doi: <http://dx.doi.org/10.7868/S0002338817060099>
- [9] Trekin A. N., Matveev I. A., Murynin A. B., Bochkareva V. G.. 2015. Metod povysheniya razresheniya kosmicheskikh izobrazheniy s ispol'zovaniem apriornoy informacii v vektornoy forme dlya sohraneniya granic [A method for upsampling of remote sensing images using vector data for preserving edges]. *Machine Learning and Data Analysis*, 1:1008–1020. doi: <http://dx.doi.org/10.21469/22233792.1.12.07> (In Russian)
- [10] Borovkov A. A.. 1984. Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. M.: Nauka, 472 p. (In Russian)
- [11] Yuhas R. H., Goetz A. F. H., Boardman J. W.. 1992. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. *JPL, Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop*:147–149.
- [12] Wald L., Ranchin T., Mangolini M.. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (PHOTOGRAMM ENG REM S)*.63:691–699.
- [13] Wang Z., Bovik A. C.. 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*.9(3):81–84. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/97.995823>
- [14] Vivone G., Alparone L., Chanussot J., Dalla Mura M., Garzelli A., Licciardi G., Restaino R., Wald L.. 2015. A critical comparison among Pansharpening Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.53(5):2565–2586. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2361734>

- [15] Chavez Jr. P. S., Sides S. C., Anderson J. A.. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 57(3): 295–303.
- [16] Chavez Jr. P. S., Kwarteng A. W.. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat thematic mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(3):339–348.
- [17] Shettigara V. K.. 1992. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 58(5):561–567.
- [18] Laben C. A., Brower B. V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. U.S. Patent
- [19] Wald L., Ranchin T.. 2006. Comment: Liu 'Smoothing filter-based intensity modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details'. *International Journal of Remote Sensing*. 23(3):593–597
- [20] Aiazzi B., Alparone L., Baronti S., Garzelli A., Selva M.. 2006. MTF - tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 72(5):591–596. doi: <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.72.5.591>
- [21] Tumblin J., Chouldhury P.. 2004. Bixels: Picture Samples with Sharp Embedded Boundaries. *Eurographics Symposium on Rendering*.186–196
- [22] Grahn A.. 2016. An Image and Processing Comparison Study of Antialiasing Methods. Blekinge Institute of Technology, Faculty of Computing, Department of Creative Technologies.
- [23] Sun C., Sang N., Zhang T., Wang X.. 2005. Image bilinear interpolation enlargement and calculation analysis. https://www.researchgate.net/publication/296609989_Image_bilinear_interpolation_enlargement_and_calculation_analysis
- [24] http://downloads.esri.com/support/whitepapers/mo_/shapefile.pdf. ESRI
- [25] Bondur V. G., Murynin V. B., Matveev I. A., Trekin A. N., YUdin I. A.. 2013. Metod vychislitel'noy optimizatsii v zadache sopostavleniya rastrovoy i vektornoy informatsii pri analize sputnikovyyh dannyh [The method of computational optimization in the problem of comparing raster and vector information in the analysis of satellite data] *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya*[Modern problems of remote sensing].10(40):98–106. (In Russian)
- [26] Shepard D.. 1968. A two dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM National Conference*23:517–524. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/800186.810616>
- [27] <http://earthexplorer.usgs.gov>. Earthexplorer
- [28] Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P.. 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*.13(4):600–612. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
- [29] Ranchin T., Wald L.. 2006. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 66(1):49–61.
- [30] Gonzalez R. C., Woods R. E.. 2007. *Digital image processing*. Prentice Hall, 3 edition, 976 p.
- [31] Tihonov V. I.. 1983. Optimal'nyy priem signalov [Optimum reception of signals] M.: Radio i svyaz', 320p. (In Russian)

Received March 19, 2019