

Метод повышения разрешения космических изображений с использованием априорной информации в векторной форме для сохранения границ*

А. Н. Трекин^{1,2}, И. А. Матвеев³, А. Б. Мурьнин^{1,3}, В. Г. Бочкарева^{1,2}
alexey.trekin@gmail.com

¹Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»

²Московский физико-технический институт (Государственный университет)

³Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Российской академии наук

Разработан метод повышения разрешения изображений, использующий векторную информацию о геометрических свойствах объектов, содержащихся на изображениях. Априорная информация о контрастных границах разнородных областей позволяет сохранить резкий переход яркости при повышении разрешения. Произведена апробация метода на наборе космических изображений с использованием карты водоемов в векторной форме.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли; повышение разрешения; обработка изображений

DOI: 10.21469/22233792.1.12.07

A method for upsampling of remote sensing images using vector data for preserving edges*

A. N. Trekin^{1,2}, I. A. Matveev³, A. B. Murynin^{1,3}, and V. G. Bochkareva^{1,2}

¹Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, 4 Gorokhovskii per., Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Russia

³Dorodnicyn Computing Centre of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilova st., Moscow, Russia

A method for image upsampling was developed. The method makes use of vector data about geometry of objects contained in image. *A priori* information about high-contrast boundaries helps to preserve sharp illuminance change from blurring due to upsampling procedure. The developed method was tested over a set of remote sensing images and vector map of water bodies.

Keywords: remote sensing; superresolution; image processing

DOI: 10.21469/22233792.1.12.07

1 Введение

Пространственное разрешение, т. е. частота дискретизации, с которой непрерывный сигнал переводится в дискретное изображение, — одно из ограничений, влияющих на информативность данных дистанционного зондирования [1, 2]. Оно играет решающую роль

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-01-00348, 13-05-12019 и 14-05-91759). Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 2015/P8.

при поиске объектов, обработке изображений спектральными методами [3,4]. Моделирование полей электромагнитных сигналов, поступающих на вход аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяет определить ее возможности и задать оптимальные характеристики [5], однако на практике возможности создания систем ДЗЗ с высоким пространственным разрешением ограничиваются множеством факторов, что приводит к необходимости увеличивать частоту дискретизации имеющихся космических изображений. Существует множество методов повышения разрешения изображений, многие из которых применяются в ДЗЗ. Эти методы можно подразделить по числу используемых изображений на однокадровые (в том числе линейные [6], нелинейные градиентные [7] и фрактальные [8]) и многокадровые (сверхразрешение [9], паншарпенинг). По способу восполнения недостающей информации при формировании изображений высокого разрешения можно разделить методы на использующие интерполяцию [6,10], повышающие разрешающую способность мультиспектральных изображений путем синтеза информации в спектральных каналах и основанные на использовании априорной информации об объектах. Заслуживает внимания класс методов, основанных на минимизации потоков [11–13].

В любом случае при повышении разрешения приходится иметь дело с недостатком информации, и это сказывается на качестве восстановленного изображения. Как правило, при этом проявляются следующие дефекты: эффект размытия, алиасинг (ступенчатость контуров) и эффект Гиббса (ложное оконтуривание) [14].

В задачах мониторинга стационарных объектов по их изображениям, в частности при космическом мониторинге участков поверхности Земли, возникает необходимость четкого прослеживания границ этих объектов с целью точного определения их расположения, измерения геометрических размеров и площадей. Такая задача возникает при мониторинге урбанизированных территорий, береговых линий, ледовой обстановки, природных пожаров и территорий, пройденных огнем. При использовании стандартных методов повышения разрешающей способности, не учитывающих информацию о границах объектов, происходит сглаживание, в том числе там, где не должно быть плавного перехода яркости, а существует резкая граница.

Существуют различные методы избежать размытия границ, включающие предварительное выделение перепадов яркости [15,16], использование нелинейной диффузии [17], агентный подход [18]. В таких методах непосредственно перед интерполяцией проводится предварительная обработка, выделяющая границы. Данный подход имеет немало преимуществ: он не требует дополнительной информации и хорошо сохраняет границы. К его недостаткам относится значительная вычислительная сложность, связанная с необходимостью предварительной обработки изображения, и вероятность ошибки при выделении границ: пропуска реальной границы или выделения ее там, где в действительности происходит плавное, но быстрое изменение яркости.

Для объектов, не изменяющих свои геометрические свойства длительное время, часто существует их векторное представление, полученное тем или иным способом. В данной статье предложен метод, использующий для повышения четкости границ при повышении разрешения априорную информацию, т. е. уже имеющиеся векторные карты, содержащие границы объектов.

2 Постановка задачи

Основы данного метода аналогичны тем, что заданы в работе [19]. Обычное пиксельное изображение не позволяет сделать вывод, где проходят резкие границы между объектами, а где — плавный переход яркости, что приводит к размытию границ при попытке повысить

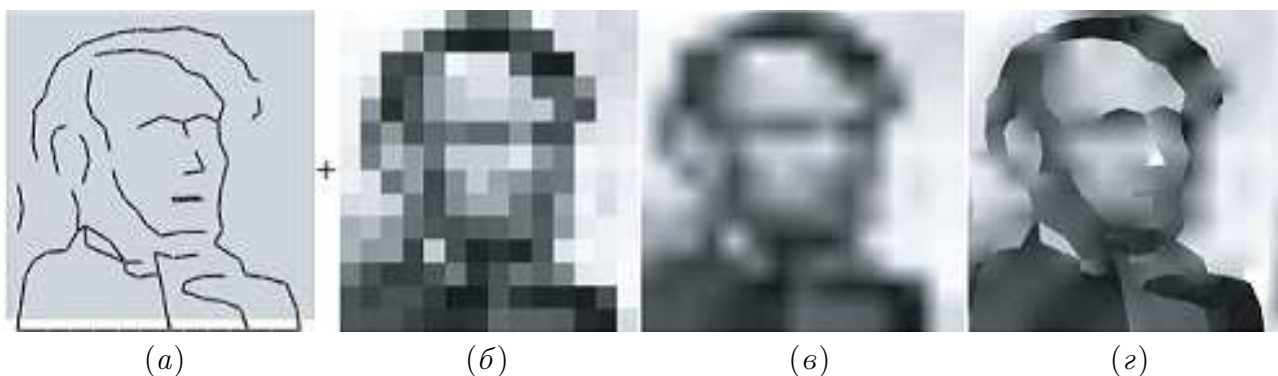


Рис. 1 Границы биксельного изображения (а); пиксельная матрица низкого разрешения (б); пиксельное изображение повышенного разрешения (билинейная интерполяция) (в) и биксельное изображение повышенного разрешения (г) [19]

разрешение изображения (рис. 1). В данной статье предлагается хранение изображения не в виде двумерной матрицы пикселей, а в виде так называемых бикселей (bixels). 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 отображения таких 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 (antialiasing). В зависимости от конфигурации близлежащих границ интерполяция яркости в выбранных координатах производится по одной из десяти функций билинейной интерполяции по точкам базового изображения. При этом для интерполяции, с помощью которой получаются пиксели результирующего растрового изображения, используются только те значения яркостей, что не отделены от результирующего пикселя линией границы.

Таким образом, на параметры границы должны быть наложены некоторые ограничения, позволяющие восстановить яркость в любой точке. Для этого область изображения делится на квадратные плитки с вершинами в центрах пикселей:

- каждая плитка может содержать не более одной опорной точки линии, представляющей границу;
- каждая сторона плитки может пересекаться не более чем с одной линией границы;
- граница не может проходить через угол плитки.

При использовании космических изображений не имеет смысла требовать хранения в особом виде, но существует возможность использовать дополнительную информацию о поверхности, изображение которой требуется улучшить. 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 др. Предполагается использование таких карт в качестве априорной информации в векторной форме, например в формате шейпфайла [20], содержащего полигоны.

Сформулируем условия задачи.

На плоскости (x, y) задано изображение — функция яркости $I(x_i, y_j)$, заданная на регулярной сетке

$$x_i = id; \quad y_j = jd, \quad i \in \{1, \dots, h\}; \quad j \in \{1, \dots, w\},$$

где d — размер ячейки. Точки изображения, представленные своими координатами и значением яркости, будем называть также пикселями.

Дополнительно задано деление множества определения функции на области P_k , $k \in \{1, \dots, K\}$. Каждая область представляет собой отдельный объект, обладающий резкой границей с другими объектами и фоном, так что при операциях с изображением значения яркости внутри и снаружи объекта не должны смешиваться.

На практике области P_k , $k \in \{1, \dots, K - 1\}$, задаются в виде полигонов, а область P_K представляет собой фон — множество точек, не вошедших ни в одну другую область. Каждый полигон представляет собой плоский многоугольник, заданный последовательностью точек $p_l(x, y)$, $l \in \{1, \dots, n\}$.

Требуется получить пропорционально увеличенное изображение повышенного разрешения:

$$I(x_p, y_q), \quad x_p = pb, \quad y_q = qb, \quad p \in \{1, \dots, H\}, \quad q \in \{1, \dots, W\}, \quad b < d,$$

причем яркости точек, принадлежащих к определенному полигону, должны быть вычислены с использованием известных значений функции только в тех точках, которые лежат внутри данного полигона:

$$\forall (x, y) \in P : I(x, y) = f(I(x_{k_1}, y_{k_1}), x_{k_1}, y_{k_1}, \dots, I(x_{k_m}, y_{k_m}), x_{k_m}, y_{k_m}) : (x_{k_i}, y_{k_i}) \in P \\ \forall i \in \{1, \dots, m\}.$$

Также для обеспечения линейной сложности алгоритм должен быть локальным, т. е.

$$\exists L : \forall (x, y) : I(x, y) = f(I(x_{k_1}, y_{k_1}), \dots, I(x_{k_m}, y_{k_m}), x_{k_m}, y_{k_m}) : \\ \forall i \in \{1, \dots, m\} : \rho((x, y), (x_{k_i}, y_{k_i})) < L, \quad (1)$$

где $\rho((x_1, y_1), (x_2, y_2))$ — расстояние между точками (x_1, y_1) и (x_2, y_2) .

По аналогии с ограничением на описание границ в определении бикселей, необходимо задать условия на полигоны:

- каждый полигон должен содержать как минимум один пиксель исходного изображения, чтобы не было неопределенных значений:

$$\forall P \exists i \in \{1, \dots, h\}, j \in \{1, \dots, w\} : (x_i, y_j) \in P; \quad (2)$$

- полигоны не должны иметь пересечений.

$$\forall i, j : P_i \cap P_j = \emptyset.$$

Для каждой точки нового изображения (x_p, y_q) решается задача интерполяции функции $I(x, y)$ по известным точкам. Как базовый метод повышения разрешающей способности используется один из известных локальных методов, не требующих дополнительной информации — билинейная или бикубическая интерполяция [10].

В случае, когда все пиксели исходного изображения, влияющие на данные пиксель нового, согласно (1), расположены в одной области и условие (2) выполняется автоматически, можно считать, что в окрестности не проходит границы, и использовать базовый метод интерполяции.

В том случае, когда пиксели исходного изображения, влияющие на данный пиксель нового изображения, лежат в разных областях, для интерполяции нового пикселя используются только те пиксели исходного изображения, которые лежат в той же области, что и данный пиксель изображения повышенного разрешения.

Таким образом, вблизи заданных границ объектов невозможно построение регулярной прямоугольной сетки, поэтому требуется применение методов, работающих на нерегулярных сетках. В статье [21] описывается такой метод, позволяющий интерполировать значения, определенные на нерегулярной сетке гладкой функцией. В данном методе используется разное количество узлов в зависимости от расстояния их до искомой точки, направления и плотности узлов в данной области. Полученная функция соответствует значениям, заданным в узлах, является гладкой и непрерывной. Значение функции в точке выражается следующим образом:

$$f(P) = \begin{cases} \frac{|\sum_{D_i \in C'} w_i (f_i + \Delta f_i)|}{|\sum_{D_i \in C'} w_i|}, & \text{если } \forall D_i : d_i > \varepsilon; \\ f_i & \text{если } \exists D_i : d_i \leq \varepsilon, \end{cases},$$

где P — искомая точка, для которой производится интерполяция; D_i — узлы нерегулярной сетки, участвующие в интерполяции; f_i — значение функции в узле D_i ; d_i — расстояние между искомой точкой и узлом D_i ; ε — малое число, введенное для учета погрешностей округления при компьютерном расчете; Δf_i — параметр, характеризующий первую производную функции вблизи узла сетки; при этом предполагается, что только одна точка может быть настолько близка к искомой, так как исходные точки выбираются из узлов регулярной сетки.

Множество C' — те узлы нерегулярной сетки, которые используются при расчете интерполяции, их не менее 4 и не более 10. В него входят ближайшие к искомой точке узлы, входящие в радиус r , выбираемый так, чтобы в среднем в него входили 7 точек:

$$r = \sqrt{\frac{7A}{N\pi}},$$

где A — площадь выпуклой оболочки исходного множества точек; N — их количество, либо 4 ближайших узла, если в радиус r входят не более 3, либо 10 ближайших узлов, если в радиус r входят более 10. Соответственно r' — расстояние от P , в которое входят $|C'|$ точек.

Весовая функция, определяющая влияние каждого узла сетки на интерполируемое значение, задается следующим образом:

$$w_i = s_i^2(1 + t_i),$$

где s_i — член, учитывающий расстояние до узла D_i , а t_i — член, учитывающий направление.

Весовая функция зависит от расстояния таким образом, чтобы гладким образом сходиться к нулю при удалении, имея вблизи вид обратного квадрата:

$$s_i = \begin{cases} \frac{1}{d}, & 0 < d \leq \frac{r'}{3}; \\ \frac{27}{4r'} \left(\frac{d}{r'} - 1 \right)^2, & \frac{r'}{3} < d \leq r'; \\ 0, & r' < d \end{cases}$$

Зависимость весовой функции от направления введена для того, чтобы учитывать «затенение» более удаленных точек на одном и том же направлении от искомой:

$$t_i = \frac{\sum_{D_j \in C'} s_j |1 - \cos(D_i P D_j)|}{\sum_{D_j \in C'} s_j}.$$

В этом члене для точки D_i учитываются углы $D_i P D_j$ для всех j , и он тем меньше, чем меньше эти углы. Таким образом, точки, лежащие рядом друг с другом в одном направлении от точки, для которой проводится интерполяция, будут иметь пониженный весовой коэффициент по сравнению с точками, лежащими на менее плотных направлениях.

Несмотря на то что есть возможность использовать данный метод для всего изображения как вблизи границ, так и в отдалении от них, в рассматриваемом случае это не представляется целесообразным, так как при удалении от границы возможна интерполяция по регулярной сетке (например, бикубическая), которая дает хорошие результаты и менее вычислительно затратна.

3 Описание алгоритма

В качестве базового метода интерполяции выбрана бикубическая интерполяция, так как она позволяет производить достаточно качественное повышение разрешения и при этом является относительно простым, локальным, одноступенчатым методом.

Таким образом, базовым методом интерполяции 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, существует множество возможностей вычисления и часть из них требует экспериментального сравнения.

В случае если не все 16 заданных точек лежат в данной области, применяется вычисление значения яркости методом Шепарда с выбором исходных точек из пересечения искомой области с ближайшими 16 пикселями.

Назовем квадрат, образованный центрами четырех соседних пикселей изображения низкого разрешения, ячейкой, а окружающие его 16 пикселей исходного изображения окрестностью. На рис. 2 представлена ячейка (заштрихованная область) и ее окрестность.

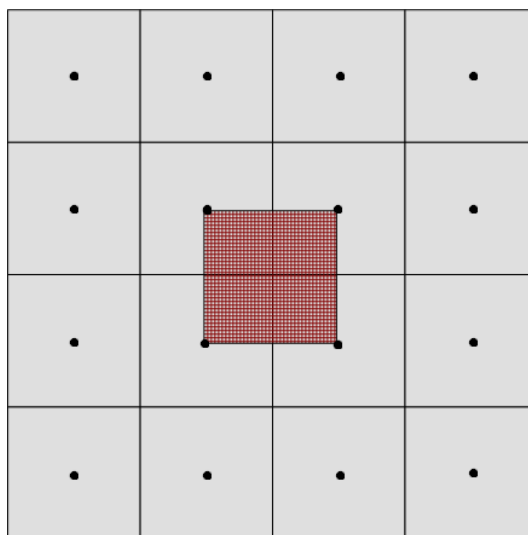


Рис. 2 Ячейка изображения и 16 пикселей, используемых для интерполяции в ее пределах

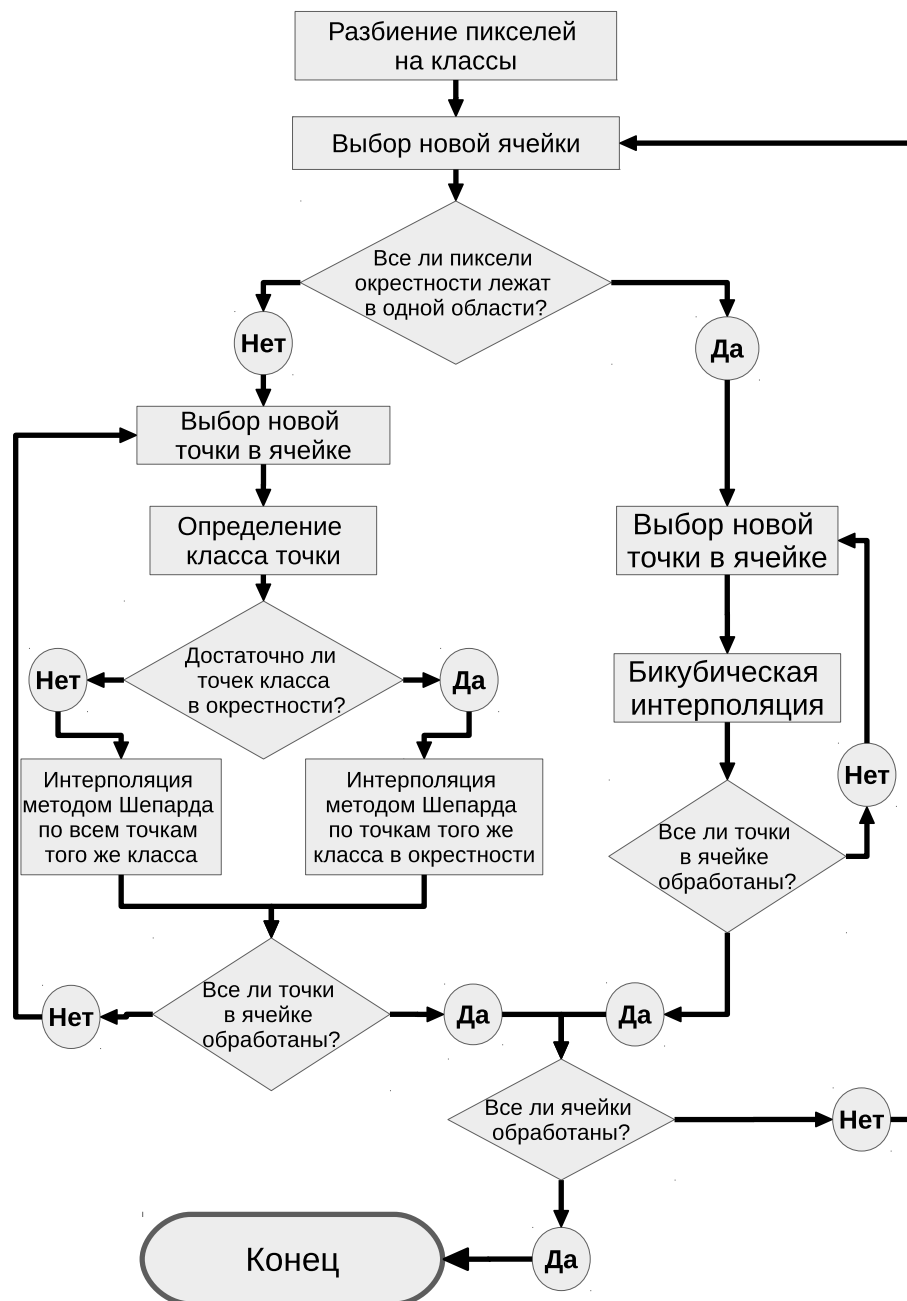


Рис. 3 Блок-схема работы алгоритма

Значения интерполяционной функции внутри ячейки зависят только от значений яркости в окрестности, причем для всех точек внутри ячейки метод интерполяции один и тот же: либо бикубическая интерполяция, если вся окрестность лежит в одной области, либо метод Шепарда для пикселей, лежащих в той же области, что и точка, для которой вычисляется функция. Поэтому повышение разрешения состоит из повторения идентичных шагов для каждой ячейки исходного изображения и каждого класса объектов, содержащихся в шейпфайле.

Алгоритм обработки изображения в виде блок-схемы представлен на рис. 3.

Области 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 [22]. 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 точке, для которой требуется рассчитать значение, т. е. каждой точке изображения повышенного разрешения, лежащей внутри данной ячейки, применяется бикубическая интерполяция.

Если же в окрестности ячейки находятся пиксели, принадлежащие разным областям, то для каждого пикселя изображения повышенного разрешения тем же образом определяется область, к которой он принадлежит. После этого искомое значение вычисляется интерполяцией по методу Шепарда на основании точек окрестности, принадлежащих той же области. Ограничения, наложенные на полигоны, обеспечивают наличие хотя бы одного пикселя исходного изображения внутри каждого полигона, поэтому интерполяция возможна для любой точки.

4 Экспериментальная проверка

Проверка разработанных методов и алгоритмов возможна как на реальных, так и на модельных данных [1, 2, 23], в данном случае исследование на реальных данных может показать более репрезентативные результаты. Для экспериментальной проверки были использованы космические изображения Landsat 5 с разрешением 30 м в надире и карта водоемов России в векторной форме. Для лучшей контрастности водоемов был выбран спектральный канал изображения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (длина волны 1,55–1,75 мкм). Для тестирования алгоритма квадратный фрагмент изображения Landsat размером 500×500 точек загружался в 4 раза, а затем проводилось повышение разрешения исследуемым методом и для сравнения — повышение разрешения методом бикубической интерполяции. Метод бикубической интерполяции был выбран для сравнения, так как он используется как базовый метод во всех точках, удаленных от границ объектов, и полученная разница будет непосредственно представлять то отличие, которое достигнуто использованием информации о границах объектов. Также для сравнения использован метод Шепарда для всего изображения. Также результат работы разработанного алгоритма сравнивался с увеличением всего изображения методом Шепарда в вариантах с применением векторных данных и без применения.

Алгоритм Шепарда использован в реализации Burkardt [24], бикубическая интерполяция и программа для экспериментальной проверки реализована на языке С. Исходные изображения Landsat получены с помощью онлайн-сервиса Earthexplorer [25].

Пример исходных данных и результата работы приведен на рис. 4. Видно, что при повышении разрешения методом бикубической интерполяции (см. рис. 4, б) границы реки размываются, а при использовании априорной информации в векторной форме — сохраняют резкость.

Результаты сравнительного исследования собраны в табл. 1. Чтобы оценить качество повышения разрешения, полученные результаты сравниваются с эталоном — изображением, из которого загрузлением получено исходное изображение. Для этого применяются различные количественные оценки, в рамках данного исследования были выбраны две: среднеквадратичная ошибка (RMSE — root mean square error) и индекс структурного сходства (SSIM — structural similarity) [26, 27].

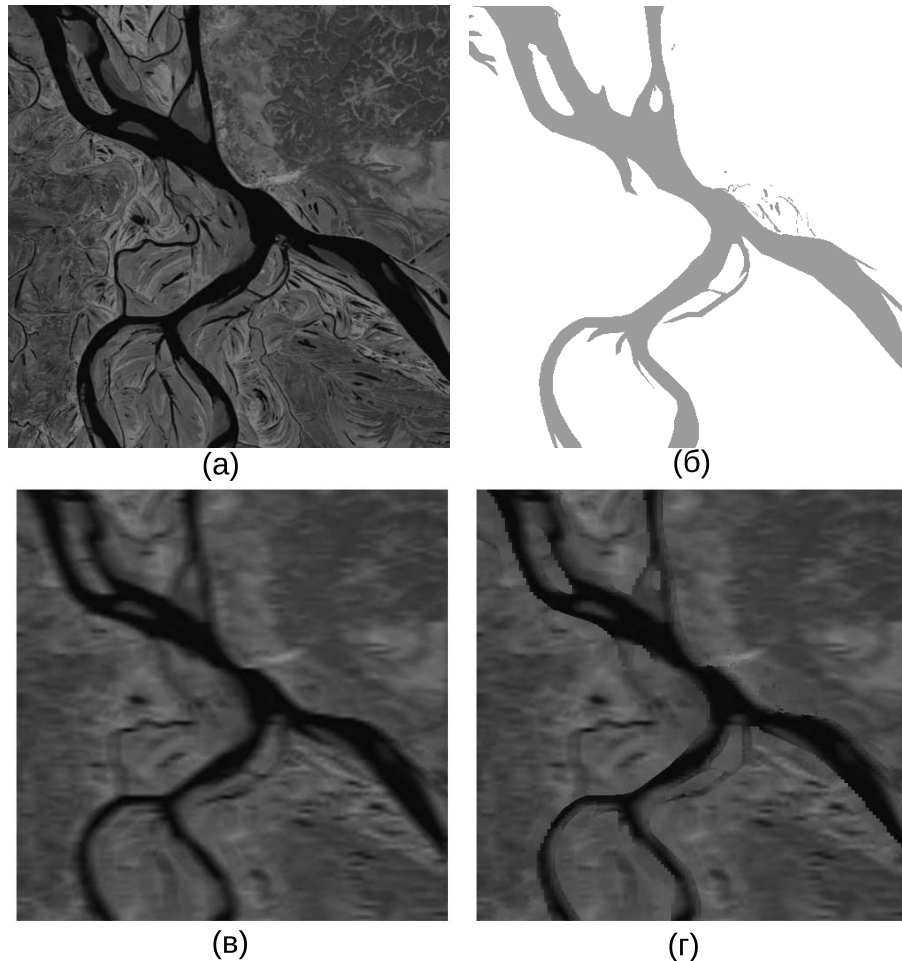


Рис. 4 Эталонное изображение (а); векторные данные — карта водоемов (б); результат бикубической интерполяции (в) и результат разработанного метода с использованием априорной информации в векторной форме (г)

Таблица 1 Результат экспериментальной проверки

Метод	RMSE	MSSIM
Бикубическая интерполяция	433,4	0,45844
Метод Шепарда	483,88	0,42699
Метод Шепарда с границами	386,71	0,45002
Данный метод	366,37	0,47107

Среднеквадратичная ошибка определяет изменение яркости пикселей по формуле [26]:

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

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

При измерении на однородной области изображения среднеквадратичная ошибка позволяет достаточно хорошо оценить спектральное качество изображения. Среднеквадратичная ошибка должна быть близка к нулю. Индекс структурного сходства характерен

тем, что учитывает «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. Для двух квадратных окон $a \subset I_1$ и $b \subset I_2$, имеющих одинаковый размер [27]:

$$\text{SSIM}_{\text{local}}(a, b) = \frac{(2\mu_a\mu_b + c_1)(2\sigma_{ab}^2 + c_2)}{(\mu_a^2 + \mu_b^2 + c_1)(\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + c_2)},$$

где μ_a — среднее значение яркости изображения I_1 в окне a ; μ_b — среднее значение яркости изображения I_2 в окне b ; 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 $c_1 = (0,01L)^2$ и $c_2 = (0,03L)^2$, где L — динамический диапазон значений яркости пикселей.

Метрика SSIM рассчитана на различные размеры окна, как правило, это квадратный участок изображения с линейным размером 8 пикселей. Она принимает значения от -1 до 1 , причем значение 1 соответствует абсолютно идентичным участкам, когда $\mu_a = \mu_b$, $\sigma_a^2 = \sigma_b^2 = \sigma_{ab}^2$, при появлении различий $2\mu_a\mu_b < \mu_a^2 + \mu_b^2$ и $2\sigma_{ab}^2 < \sigma_a^2 + \sigma_b^2$ индекс уменьшается вплоть до значения -1 .

Для оценки качества всего изображения рассчитывается среднее значение SSIM по всевозможным положениям окна на изображениях:

$$\text{MSSIM} = \sum_{x \in I_1, y \in I_2} \text{SSIM}_{\text{local}}(x, y).$$

Полученный индекс, являясь усреднением SSIM, лежит в пределах от -1 до 1 , и чем он больше, тем более схожи изображения.

Время работы разработанного алгоритма зависит от концентрации границ, заданных векторными данными. В случае отсутствия границ время работы соответствует бикубической интерполяции, в случае наличия их в окрестности любой ячейки — методу Шепарда. На тестовых данных время работы бикубической интерполяции, разработанного алгоритма и метода Шепарда соотносится как $1 : 5 : 60$.

Полученные результаты показывают, что применение векторной информации при использовании бикубической интерполяции в качестве базового метода повышения разрешения 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 — перепадов яркости там, где их быть не должно, и соответственно снижаются численные характеристики 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.

5 Заключение

Разработан метод повышения пространственного разрешения изображений с использованием априорной информации о границах объектов, выраженной в векторной форме. Метод применим для улучшения космических изображений, причем в качестве векторной информации о границах объектов доступны различные карты местности, предварительно составленные по данным высокого разрешения, наземным наблюдениям и т. п.

Разработанный метод использует разные подходы к повышению разрешения вблизи известных контрастных границ и вдали от них, что позволяет комбинировать эффективные алгоритмы для оптимального повышения разрешения с сохранением четких, резких границ там, где это необходимо, и гладких, непрерывных решений в прочих местах. Для повышения разрешения вблизи границ использован метод Шепарда интерполяции по нерегулярной сетке, а в удалении от них — метод бикубической интерполяции.

Качество повышения разрешения исследовано на космических изображениях Landsat с использованием векторной информации в виде карты водоемов. Для сравнения качества повышения разрешения использованы критерии среднеквадратичного отклонения и среднее значение индекса структурного сходства, которые показали, что использование векторной информации позволяет улучшить результат по сравнению с бикубической интерполяцией. Приведенные результаты показывают возможность применения разработанного метода для повышения разрешающей способности аппаратуры, устанавливаемой на космических аппаратах ДЗЗ, в том числе в инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра электромагнитных волн.

Разработанный метод может быть использован для космического мониторинга урбанизированных территорий, береговых линий, ледовой обстановки, природных пожаров и территорий, пройденных огнем, предупреждения и оценки последствий чрезвычайных ситуаций, создания и актуализации картографической продукции, решения других задач дистанционного зондирования, в том числе с применением мультиспектральных и гиперспектральных данных, содержащих значительное количество спектральной информации, однако зачастую имеющих недостаточное пространственное разрешение [28]. В качестве развития данного подхода предполагается применение других, более совершенных методов интерполяции на регулярной сетке и вблизи границ с учетом доли площади пикселя, попадающего в выделенную область.

Литература

- [1] *Бондур В. Г.* Методы моделирования полей излучения на входе аэрокосмических систем дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса, 2000. № 5. С. 16–27.
- [2] *Бондур В. Г., Арженинко Н. И., Линник В. Н., Титова И. Л.* Моделирование многоспектральных аэрокосмических изображений динамических полей яркости // Исслед. Земли из космоса, 2003. № 2. С. 3–17.
- [3] *Савин А. И., Бондур В. Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана, 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- [4] *Бондур В. Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1.: Физика. Химия. Биология. — М.: Наука, 2004. С. 55–117.
- [5] *Бондур В. Г., Савин А. И.* Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исслед. Земли из космоса, 1995. № 4. С. 24–33.
- [6] *Turkowski K.* Filters for common resampling tasks // Graphics gems. — Academic Press, Inc., 1990. P. 147–165.

- [7] Sun J., Xu Z., Shum H.-Y. Image super-resolution using gradient profile prior // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2008) Proceedings, 2008. P. 1–8.
- [8] Price J. R., Hayes M. H. Resampling and reconstruction with fractal interpolation functions // IEEE Signal Proc. Let., 1998. Vol. 5. No. 9. P. 228–230.
- [9] Маркелов К. С. Модель повышения информативности цифровых изображений на базе метода суперразрешения // Инженерный вестник, 2013. № 3.
- [10] Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. — М.: Советское радио, 1979. 312 с.
- [11] Миронов А. А., Цурков В. И. Транспортные и сетевые задачи с минимаксным критерием // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1995. Т. 35. № 1.
- [12] Миронов А. А., Цурков В. И. Транспортные задачи с минимаксным критерием // Докл. Акад. наук СССР, 1996. Т. 346. № 2.
- [13] Тизик А. П., Цурков В. И. Метод последовательной модификации функционала для решения транспортной задачи // Автоматика и телемеханика, 2012. № 1. С. 148–158.
- [14] Nasonov A. V., Krylov A. S. Finding areas of typical artifacts of image enhancement methods // Pattern Recognition Image Anal., 2011. Vol. 21. No. 2. P. 316–318.
- [15] Цурков В. И., Ковков Д. В. Способ удаления шума в изображении. Пат. на изобр. RUS 2316816, 25.08.2005.
- [16] Fattal R. Upsampling via imposed edges statistics // ACM SIGGRAPH Proceedings, 2007. Vol. 26. No. 3. Article No. 95.
- [17] Tsurkov V. I. An analytical model of edge protection under noise suppression by anisotropic diffusion // Int. J. Comput. Syst. Sci., 2000. Vol. 39. No. 3. P. 437–440.
- [18] Чебурашкин И. Ф., Цурков В. И. Синтез дискретных логических устройств обработки информации на основе теории агентов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2011. № 3. С. 27–34.
- [19] Tumblin J., Choudhury P. Bixels: Picture samples with sharp embedded boundaries // Eurographics Symposium on Rendering, 2004.
- [20] ESRI. <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>.
- [21] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // ACM National Conference Proceedings, 1968. P. 517–524.
- [22] Бондур В. Г., Мурынин А. 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. № 4. С. 98–106.
- [23] Бондур В. Г. Моделирование двумерных случайных полей яркости на входе аэрокосмической аппаратуры методом фазового спектра // Исслед. Земли из космоса, 2000. № 5. С. 28–44.
- [24] Shepard Interpolation of 2D Data. http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/c_src/shepard_interp_2d/shepard_interp_2d.html.
- [25] EarthExplorer. <http://earthexplorer.usgs.gov/>.
- [26] 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. Vol. 63. P. 691–699.
- [27] Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // IEEE Trans. Image Proc., 2004. Vol. 13. No. 4. P. 600–612.

- [28] *Бондур В. Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса, 2014. № 1. С. 4–16.

Поступила в редакцию 17.06.2015

References

- [1] Bondur, V. 2000. Metody modelirovaniya poley izlucheniya na vkhode aerokosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya [Methods for modeling of radiation fields at input of remote sensing aerospace systems]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 5:16–27. (In Russian.)
- [2] Bondur, V., N. Arzhenenko, V. Linnik, and I. Titova. 2003. Modelirovanie mul'tispektral'nykh aerokosmicheskikh izobrazheniy dinamicheskikh poley yarkosti [Modeling of multispectral aerospace images of dynamic brightness fields]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2:3–17. (In Russian.)
- [3] Savin, A., and V. Bondur. 2000. Nauchnye osnovy sozdaniya i diversifikatsii globalnykh aerokosmicheskikh sistem. *Optika Atmosfery i Okeana* [Optics of Atmosphere and Ocean] 13(1):46–62. (In Russian.)
- [4] Bondur, V. 2004. Aerokosmicheskie metody v sovremennoy okeanologii [Aerospace methods in modern oceanology]. *Noviye idei v okeanologii. T. 1: Fizika. Khimiya. Biologiya* [New ideas in oceanology. Vol. 1: Physics. Chemistry. Biology]. Moscow: Nauka. 55–117. (In Russian.)
- [5] Bondur, V., and A. Savin. 1995. Printsipy modelirovaniya poley signalov na vkhode apparatury DZ aerokosmicheskikh sistem monitoringa okruzhayushey sredy. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 4:24–33. (In Russian.)
- [6] Turkowski, K. 1990. Filters for common resampling tasks. *Graphics gems*. Academic Press, Inc. 147–165.
- [7] Sun, J., Z. Xu, and H.-Y. Shum. 2008. Image super-resolution using gradient profile prior. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2008) Proceedings*. 1–8.
- [8] Price, J., and M. Hayes. 1998. Resampling and reconstruction with fractal interpolation functions. *IEEE Signal Proc. Let.* 5(9):228–230.
- [9] Markelov, K. 2013. Model' povysheniya informativnosti izobrazheniy na baze metoda super-razresheniya [A model of image comprehension based on superresolution]. *Inzhenernyy Vestnik*. 3. (In Russian.)
- [10] Yaroslavskiy, L. 1979. *Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku izobrazheniy* [Introduction to digital image processing]. Moscow: Sovetskoye radio. 312 p. (In Russian.)
- [11] Mironov, A., and V. Tsurkov. 1995. Transportnye i setevye zadachi s minimaksnym kriteriem [Transportation and roadmap problems with min-max criterion]. *Zhurnal Vychislitel'noy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki* [J. Comput. Math. Math. Phys.] 35(1). (In Russian.)
- [12] Mironov, A., and V. Tsurkov. 1996. Transportnye i setevye zadachi s minimaksnym kriteriem [Transportation problems with min-max criterion]. *Dokl. Akad. Nauk USSR* 346(2). (In Russian.)
- [13] Tizik, A., and V. Tsurkov. 2012. Metod posledovatel'noy modifikatsii funktsionala dlya resheniya transportnoy zadachi [A method for serial modification of functional for solving the transportation problem]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automatics and Telemechanics] 1:148–158. (In Russian.)
- [14] Nasonov, A., and A. Krylov. 2011. Finding areas of typical artifacts of image enhancement methods. *Pattern Recognition Image Anal.* 21(2):316–318.
- [15] Tsurkov, V., and D. Kovkov. 25.08.2005. Sposob udaleniya shuma v izobrazhenii [A method for noise elimination in images]. Invention Patent RUS 2316816. (In Russian.)

- [16] Fattal, R. 2007. Upsampling via imposed edges statistics. *ACM SIGGRAPH Proceedings*. 26(3). Article No. 95.
- [17] Tsurkov, V. 2000. An analytical model of edge protection under noise suppression by anisotropic diffusion. *Int. J. Comput. Syst. Sci.* 39(3):437–440.
- [18] Cheburakhin, I., and V. Tsurkov. 2011. Sintez diskretnykh logicheskikh ustroystv obrabotki informatsii na osnove teorii agentov [Synthesis of discrete logical devices for agent theory-based information processing]. *Mekhatronika Avtomatizatsiya Upravlenie* 3:27–34. (In Russian.)
- [19] Tumblin, J., and P. Choudhury. 2004. Bixels: Picture samples with sharp embedded boundaries. *Eurographics Symposium on Rendering*.
- [20] ESRI. Available at: <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (accessed November 25, 2015).
- [21] Shepard, D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM National Conference Proceedings*. 517–524.
- [22] Bondur, V., A. Murynin, I. Matveev, A. Trekin, and I. Yudin. 2013. Metod vichislitel'noy optimizatsii v zadache sopostavleniya rastrovoy i vektornoy informatsii pri analize sputnikovykh dannykh [A computational optimization method for raster and vector information matching for satellite data analysis]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 10(4):98–106. (In Russian.)
- [23] Bondur, V. 2000. Modelirovanie sluchaynykh poley yarkosty na vkhode aerokosmicheskoy apparatury metodom fazovogo spektra [Modeling of brightness random fields at input of aerospace instrumentation using phase spectrum method]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 5:28–44. (In Russian.)
- [24] Shepard Interpolation of 2D Data. Available at: http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/c_src/shepard_interp_2d/shepard_interp_2d.html (accessed November 25, 2015).
- [25] EarthExplorer. Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed November 25, 2015).
- [26] Wald, L., T. Ranchin, and M. Mangolini. 1997. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 63:691–699.
- [27] Wang, Z., A. Bovik, H. Sheikh, and E. Simoncelli. 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Trans. Image Proc.* 13(4):600–612.
- [28] Bondur, V. 2014. Sovremennye podkhody k obrabotke bol'shikh potokov giperspektral'noy i multispektral'noy aerokosmicheskoy informatsii [Modern approaches to processing of large hyperspectral and multispectral aerospace data flows]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 1:4–16. (In Russian.)

Received June 17, 2015