

УДК 629.7

А.О. Макаров, В.В. Старовойтов

**БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Описываются быстрые алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений, получаемых с искусственных спутников Земли. Даются методики повышения качества мультиспектральных изображений с увеличенным разрешением. Предложенные алгоритмы протестированы на нескольких десятках мультиспектральных изображений, полученных со спутника Landsat 7ETM+ в разное время в разных географических координатах. Представляются результаты увеличения разрешения изображений. Качество увеличения разрешения снимков оценивается визуально и численно с помощью меры сходства изображений, предложенной в работе [7]. Даются рекомендации по использованию предложенных алгоритмов.

Введение

Изображения, получаемые с искусственных спутников Земли, как правило, являются мультиспектральными, т. е. состоят из набора изображений, регистрируемых в разных спектрах.

Набор изображений, получаемый со спутника Landsat 7ETM+, состоит из одного панхроматического изображения (спектральный диапазон 0,52–0,9 мкм) и семи мультиспектральных: 1 – изображение, зарегистрированное в спектральном диапазоне синего цвета (0,45–0,515 мкм); 2 – зеленого (0,525–0,605 мкм); 3 – красного (0,63–0,69 мкм); 4 – ближнего инфракрасного (0,75–0,90 мкм); 5 – коротковолнового инфракрасного (1,55–1,75 мкм); 6 – температурного инфракрасного (10,4–12,5 мкм); 7 – коротковолнового инфракрасного (2,09–2,35 мкм). В наборе изображений, получаемом со спутника IKONOS, есть одно панхроматическое изображение (спектральный диапазон 0,45–0,9 мкм) и четыре мультиспектральных: 1 – изображение, зарегистрированное в спектральном диапазоне синего цвета (0,45–0,53 мкм); 2 – зеленого (0,52–0,62 мкм); 3 – красного (0,64–0,72 мкм); 4 – ближнего инфракрасного (0,77–0,88 мкм). Во множестве изображений любого из наборов есть три изображения, полученные в диапазонах, которые близки к спектральным диапазонам красного, зеленого и синего цветов, и одно панхроматическое, покрывающее весь видимый диапазон. Разрешение панхроматического изображения обычно выше разрешения других изображений: чем уже диапазон, тем ниже разрешение.

Три цветовых канала позволяют получить более детальную информацию об исследуемой области земной поверхности. С помощью синего цветового канала можно определить характеристики атмосферы, глубину водных бассейнов, характеристики и состав воды, выделить типы растительности и типы почв [1]. С помощью зеленого цветового канала можно обнаружить области растительности, разливы нефти на поверхности воды, загрязненную воду в водоемах. Красный цветовой канал позволяет выделять области по типам растительности, измерять количество растительной биомассы. Используя эти три канала, можно создать цветное изображение поверхности Земли. Недостаточное разрешение цветовых изображений затрудняет их анализ и обработку. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритмов увеличения разрешения мультиспектральных изображений. Одно из направлений увеличения разрешения мультиспектрального изображения состоит в комбинированном преобразовании панхроматического и мультиспектральных изображений с целью получения более высокого разрешения последних. При увеличении разрешения мультиспектральных изображений алгоритм должен максимально сохранить цветовую палитру исходных изображений.

1. Обзор алгоритмов увеличения разрешения с использованием панхроматических изображений

Алгоритмы обработки изображений делятся на три класса: точечные, локальные и глобальные. Точечные алгоритмы используют значения отдельных пикселей исходного изображе-

ния без учета других, т. е. значение пикселя результирующего изображения зависит только от значения соответствующего пикселя исходного изображения. Локальные алгоритмы используют значения пикселей области изображения. К глобальным алгоритмам относятся такие алгоритмы, которые применяют значения всех пикселей исходного изображения.

В работе [2] для увеличения разрешения изображений используются свойства представления цветного изображения в пространстве цветов HSI (HSV, где H (hue) – оттенок цвета, S (saturation) – насыщенность, I (intensity) – яркость. Компонент I является полутоновой составляющей цветного изображения в пространстве цветов HSI. Исходное цветное (RGB) изображение увеличивается до размеров панхроматического и преобразуется в пространство цветов HSI. Составляющая I заменяется панхроматическим изображением, разрешение которого выше, чем разрешение цветного, и выполняется обратное преобразование изображения из пространства цветов HSI в пространство цветов RGB. Данный алгоритм является алгоритмом точечного типа.

Повышение разрешения изображений можно выполнять с помощью метода главных компонент [3]. Мультиспектральное изображение преобразуется в набор главных компонент, затем первая компонента заменяется панхроматическим изображением. После замены выполняется обратное преобразование. Главным недостатком данного алгоритма является вычислительная сложность. Это алгоритм глобального типа.

Для увеличения разрешения изображений в работе [4] используется высокочастотная фильтрация панхроматического изображения. С помощью фильтра из изображения извлекаются мелкие детали, которых нет на изображениях с низким разрешением. Результаты высокочастотной фильтрации добавляются к увеличенному изображению с низким разрешением. Главными недостатками алгоритма являются вычислительная сложность, так как используются прямое и обратное преобразования Фурье, а также то, что на результирующем изображении могут появиться ложные края. Данный алгоритм является алгоритмом глобального типа.

Алгоритм на базе вейвлет-преобразования выполняет многоуровневое разложение панхроматического изображения [5]. Панхроматическое изображение раскладывается в набор изображений с низким разрешением с соответствующими вейвлет-коэффициентами для каждого изображения из набора. Если изображение из набора заменяется мультиспектральным с таким же разрешением и выполняется обратное вейвлет-преобразование, получается мультиспектральное изображение с повышенным разрешением. Так как алгоритм использует вейвлет-преобразование, то с возрастанием размеров изображений увеличивается время выполнения алгоритма. Данный алгоритм является алгоритмом локального типа.

Арифметический алгоритм увеличения разрешений на основе панхроматического изображения является алгоритмом точечного типа [5]. Значение в пикселе результирующего мультиспектрального изображения вычисляется по формуле

$$Fused_i = \frac{Mult_i}{\sum_j Mult_j} \times Pan, \quad (1)$$

где $Fused_i$ – i -е мультиспектральное изображение с увеличенным разрешением; $Mult_i$ – мультиспектральное изображение, увеличенное до размеров панхроматического; Pan – панхроматическое изображение с высоким разрешением; знак \times означает попиксельное перемножение двух изображений. Поскольку данный алгоритм является алгоритмом точечного типа, его сложность невысока, вычисления можно распараллеливать.

Если выполнять стандартное масштабирование, то на изображении будут потеряны мелкие детали и оно станет нечетким. Это происходит потому, что значения в новых пикселях вычисляются с помощью интерполяции значений яркостей в соседних пикселях. На мультиспектральном изображении фрагмента поверхности Земли, увеличенном до размеров панхроматического (рис. 1), белым цветом выделена строка пикселей. Далее необходимо сравнить значения пикселей, принадлежащих выделенной строке на увеличенном мультиспектральном изображении и панхроматическом. По оси X отсчитываются координаты расположения пикселей в строке (начиная с начала строки), по оси Y – значения яркостей пикселей. Пунктирной линией обозначены значения яркостей пикселей строки мультиспектрального изображения, увеличенного до разме-

ров панхроматического. Сплошной линией обозначены значения яркостей пикселей строки соответствующего панхроматического изображения. На рис. 2 видно, что значения совпадают не во всех пикселях. После увеличения размеров изображения перепады значений яркостей пикселей стали плавными. Увеличением размеров изображения повысить разрешение не получится.

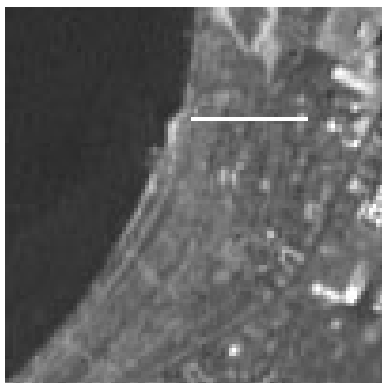


Рис. 1. Фрагмент мультиспектрального изображения поверхности Земли, увеличенного до размеров панхроматического посредством бикубической интерполяции

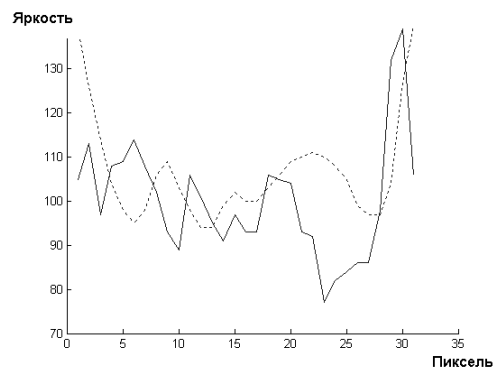


Рис. 2. Одномерное представление выделенной строки пикселей фрагмента мультиспектрального изображения на рис. 1, увеличенного до размеров панхроматического (пунктирная линия), и этой же строки соответствующего фрагмента панхроматического изображения (сплошная линия)

Попиксельное умножение увеличенного мультиспектрального изображения на значение яркости соответствующего пикселя панхроматического изображения позволяет скорректировать перепады значений в пикселях и увеличить четкость изображения, но при этом искажается цветовая палитра этого изображения.

Главными недостатками алгоритмов увеличения разрешения изображения являются неприемлемое время выполнения и искажение цветовых палитр исходных изображений. Так, алгоритмы на базе метода главных компонент и высокочастотной фильтрации являются алгоритмами глобального типа. Алгоритм на базе вейвлет-преобразования является алгоритмом локального типа. Алгоритм на базе свойств представления цветного изображения в пространстве цветов HSI и арифметический алгоритм являются алгоритмами точечного типа, но при этом сильно искажают цветовую палитру изображений. В данной работе предлагаются алгоритмы, позволяющие увеличивать разрешение мультиспектрального изображения, обеспечивая улучшенную передачу цветовой палитры.

2. Алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений

2.1. Увеличение разрешения мультиспектральных компонентов в исходном пространстве

Алгоритм увеличения разрешения мультиспектральных компонентов в исходном пространстве позволяет увеличивать разрешение мультиспектральных изображений с использованием панхроматического изображения. Предлагаемый алгоритм отличается от арифметического тем, что вводятся коэффициенты K_R, K_G, K_B для соответствующих RGB-цветовых каналов и выполняется операция модификации гистограмм каждого цветового канала.

RGB-каналы путем интерполирования увеличиваются до размеров панхроматического изображения. Увеличенные каналы обозначим через R', G', B' . Затем каналы R', G', B' попиксельно умножаются на панхроматическое изображение. Преобразованные цветовые каналы R'', G'', B'' вычисляются по следующим формулам:

$$R'' = \frac{R' \times Pan}{K_R R' + K_G G' + K_B B'}; \quad (2)$$

$$G'' = \frac{G' \times Pan}{K_R R' + K_G G' + K_B B'}; \quad (3)$$

$$B'' = \frac{B' \times Pan}{K_R R' + K_G G' + K_B B'}; \quad (4)$$

где R', G', B' – цветовые каналы R, G, B , увеличенные до размеров панхроматического изображения; K_R, K_G, K_B – коэффициенты, задаваемые оператором для соответствующих каналов R', G', B' ; Pan – панхроматическое изображение; R'', G'', B'' – цветовые каналы нового цветного изображения.

В данном алгоритме необходимо выполнить масштабирование значений яркостей пикселей каналов R'', G'', B'' в диапазон от 0 до 255. Из вычисленных цветовых компонентов R'', G'', B'' создается цветное изображение.

Алгоритм 1. Увеличение разрешения мультиспектральных компонентов

Шаг 1. Увеличить размеры цветовых каналов R, G, B до размеров панхроматического изображения.

Шаг 2. Задать величины K_R, K_G, K_B .

Шаг 3. Вычислить преобразованные цветовые каналы R'', G'', B'' по формулам (2)–(4).

Шаг 4. Для каждого канала R'', G'', B'' выполнить преобразование значений яркостей пикселей в диапазон от 0 до 255.

Шаг 5. Выполнить модификацию гистограмм компонентов R'', G'', B'' одним из способов: растяжением гистограммы либо ее адаптивным выравниванием [6].

Шаг 6. Создать цветное изображение из цветовых каналов R'', G'', B'' .

Алгоритм 1 можно применить для увеличения разрешения одного канала на основе панхроматического изображения. Увеличение разрешения канала целесообразно выполнять, если спектральный диапазон канала C покрывается спектральным диапазоном панхроматического изображения Pan . Канал C необходимо увеличить до размеров панхроматического изображения. Увеличенный канал обозначим через C' . Далее попиксельно перемножим C' с панхроматическим изображением Pan по формуле

$$C'' = C' \times Pan, \quad (5)$$

где C'' – канал с увеличенным разрешением; C' – исходный канал, увеличенный до размеров панхроматического изображения; Pan – панхроматическое изображение; \times – попиксельное перемножение.

В данном алгоритме необходимо выполнить линейное масштабирование результирующих значений в диапазон от 0 до 255.

Алгоритм 2. Увеличение разрешения одного канала

Шаг 1. Увеличить канал до размеров панхроматического изображения.

Шаг 2. Вычислить канал C'' попиксельным перемножением канала C' с панхроматическим изображением Pan по формуле (5).

Шаг 3. Выполнить линейное масштабирование значений канала C'' в диапазон от 0 до 255.

Шаг 4. Выполнить модификацию гистограммы компонента C'' одним из способов: растяжением гистограммы либо ее адаптивным выравниванием [6].

2.2. Алгоритмы увеличения разрешения цветных космических снимков в других цветовых пространствах

Увеличение разрешения компонентов мультиспектрального изображения, регистрируемых в видимом диапазоне (RGB), можно выполнять в других цветовых пространствах, например HSV (hue – оттенок; saturation – насыщенность; value – яркость) и $L^*a^*b^*$.

Представленные алгоритмы отличаются от алгоритма на базе пространства цветов HSI тем, что для повышения качества изображения с увеличенным разрешением выполняется модификация гистограммы V компонента изображения в пространстве HSV и L^* компонента изображения в пространстве $L^*a^*b^*$.

Исходное цветное RGB-изображение увеличивается до размеров панхроматического, и оно преобразуется в пространство цветов HSV. В HSV-изображении составляющая V заменяется панхроматическим изображением, и изображение преобразуется обратно из HSV в пространство цветов RGB. Выполняется модификация гистограммы компонента V изображения в пространстве HSV и компонента L^* изображения в пространстве $L^*a^*b^*$.

Алгоритм 3. Увеличение разрешения изображения цветного космоснимка в пространстве HSV

Шаг 1. Увеличить исходное цветное RGB-изображение до размеров панхроматического.

Шаг 2. Преобразовать увеличенное изображение из пространства цветов RGB в пространство цветов HSV.

Шаг 3. Заменить составляющую V преобразованного изображения панхроматическим изображением.

Шаг 4. Модифицировать гистограмму компонента V одним из способов: растяжением гистограммы либо ее адаптивным выравниванием [6].

Шаг 5. Преобразовать изображение из пространства цветов HSV в пространство цветов RGB.

Метод выравнивания гистограммы предусматривает преобразование яркостей исходного изображения, с тем чтобы гистограмма распределения яркостей приняла желаемую форму (чтобы в гистограмме не было перекосов в сторону малых или больших значений) [6]. Алгоритм адаптивного выравнивания гистограммы заключается в том, что выравнивание выполняется не на изображении целиком, а индивидуально в непересекающихся областях изображения размером $K \times K$.

*Алгоритм 4. Увеличение разрешения изображения цветного космоснимка в пространстве $L^*a^*b^*$*

Шаг 1. Увеличить исходное цветное RGB-изображение до размеров панхроматического.

Шаг 2. Преобразовать увеличенное изображение из пространства цветов RGB в пространство цветов $L^*a^*b^*$.

Шаг 3. Заменить составляющую L^* преобразованного изображения панхроматическим изображением.

Шаг 4. Модифицировать гистограмму компонента L^* одним из способов: растяжением гистограммы либо ее адаптивным выравниванием [6].

Шаг 5. Преобразовать изображение из пространства цветов $L^*a^*b^*$ в пространство цветов RGB.

3. Экспериментальные исследования алгоритмов

Для анализа алгоритмов использовались фрагменты более двадцати мультиспектральных изображений, полученных со спутника Landsat 7ETM+ в разное время и в разных географических координатах. Разрешение мультиспектральных изображений равно 30 м, панхроматического – 15 м. Результаты работы алгоритмов показаны на фрагменте одного мультиспектрального изображения.

Во всех предложенных алгоритмах для увеличения цветовых каналов RGB до размеров панхроматического изображения использовалась бикубическая интерполяция. Масштабирование значений яркостей пикселей каналов R'', G'', B'' в диапазон от 0 до 255 можно выполнять разными способами: линейно, кусочно-линейно или нелинейно. В данных экспериментах масштабирование значений яркостей пикселей выполнялось линейно. В предлагаемых алгоритмах для цветовых каналов используются весовые коэффициенты K_R, K_G, K_B . В простейшем случае для каждого канала можно использовать коэффициент, равный 0,33. Для вычисления полутоновой составляющей Y в цветовом пространстве YIQ для RGB-каналов применяются коэффи-

циенты 0,299, 0,587, 0,114 соответственно цветовым каналам RGB [6]. Цветовое пространство YIQ используется в системе телевидения НТСЦ.

3.1. Исследование алгоритма 1

В проведенных экспериментах задавались различные значения констант для формул (2)–(4), в частности $K_R = K_G = K_B = 1$ (как в арифметическом алгоритме) и $K_R = 0,299$, $K_G = 0,587$, $K_B = 0,114$, при вычислении цветового пространства YIQ. На рис. 3, *a* показан фрагмент исходного цветного изображения, на рис. 3, *б*, *в* – новые цветные изображения, полученные с разными комбинациями коэффициентов K_R , K_G , K_B . Размер исходного RGB-изображения равен 100×100 пикселей, размер изображения с увеличенным разрешением – 200×200 пикселей.

Исследовались разные варианты растяжения гистограмм цветовых составляющих. Преобразование растяжения гистограммы является линейным и растягивает гистограмму яркостей пикселей с исходного интервала $[x_{\min} \dots x_{\max}]$ на новый интервал $[y_{\min} \dots y_{\max}]$. Данное преобразование увеличивает контраст изображения, не изменяя форму гистограммы. В этом преобразовании могут участвовать не все значения яркостей. Оператор может задать значение процента пикселей p такое, что $(100 - p)/2$ % пикселей в начале и в конце гистограммы будут иметь в новом диапазоне минимальные и максимальные значения соответственно. Значение p задает нижнюю и верхнюю границы диапазона гистограммы и обычно находится в пределах от 98 до 85.

Минимальное y_{\min} и максимальное y_{\max} значения равнялись 0 и 255 соответственно, p во всех вариантах растяжений гистограмм равнялось 98. В первом варианте x_{\min} и x_{\max} вычислялись отдельно для каждого канала R', G', B' . Растяжение гистограмм применялось отдельно для каждого из каналов R', G', B' до перемножения с панхроматическим изображением. Во втором варианте минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения вычислялись отдельно для каждого из каналов R'', G'', B'' . Растяжение гистограмм применялось отдельно для каждого канала R'', G'', B'' после перемножения с панхроматическим изображением. В третьем варианте выбирались минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения из всех трех каналов R', G', B' . Растяжение гистограмм применялось отдельно для каждого из каналов R', G', B' до перемножения с панхроматическим изображением. В четвертом варианте выбирались минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения из всех трех каналов R'', G'', B'' . Растяжение гистограмм применялось отдельно для каждого из каналов R'', G'', B'' после перемножения с панхроматическим изображением. На рис. 4 представлены результаты выполнения алгоритма 1 с различными вариантами растяжения гистограмм.

Все эксперименты проводились в среде Матлаб на компьютере с процессором Пентиум 4 2.4 ГГц. Время вычисления изображения, показанного на рис. 3, составило 0,531 с (*б*), 0,468 с (*в*), а на рис. 4 – 0,594 с (*а*), 0,563 с (*б*), 0,594 с (*в*), 0,656 с (*г*).

3.2. Исследование алгоритма 2

При выполнении алгоритма 2 для каналов R,G,B и RGB-изображений использовались: *a)–в*) растяжение; *д)–ж*) адаптивное выравнивание гистограммы (рис. 5). Размер области адаптивного выравнивания гистограмм каналов равен 25×25 .

3.3. Исследование алгоритмов 3 и 4

В алгоритмах 3 и 4 размер области адаптивного выравнивания гистограммы компонентов V и L^* равен 25×25 . Для увеличения разрешения цветного изображения, показанного на рис. 3, *а*, использовались: *а), в*) растяжение гистограмм компонентов V и L^* ; *б), г*) адаптивное выравнивание гистограмм компонентов V и L^* соответственно (рис. 6). Анализ результатов выполнялся визуально и аналитически. Визуально все полученные изображения имеют более высокую, по сравнению с исходным изображением, четкость, но, как правило, в них изменяется цветовая г



Рис. 3. Увеличение разрешения изображений алгоритмом 1: а) исходное цветное изображение, разрешение 30 м; б), в) цветные изображения, вычисленные алгоритмом 1 с разрешением 15 м по параметрам $K_R=1$; $K_G=1$; $K_B=1$ и $K_R=0,299$; $K_G=0,587$; $K_B=0,114$ соответственно

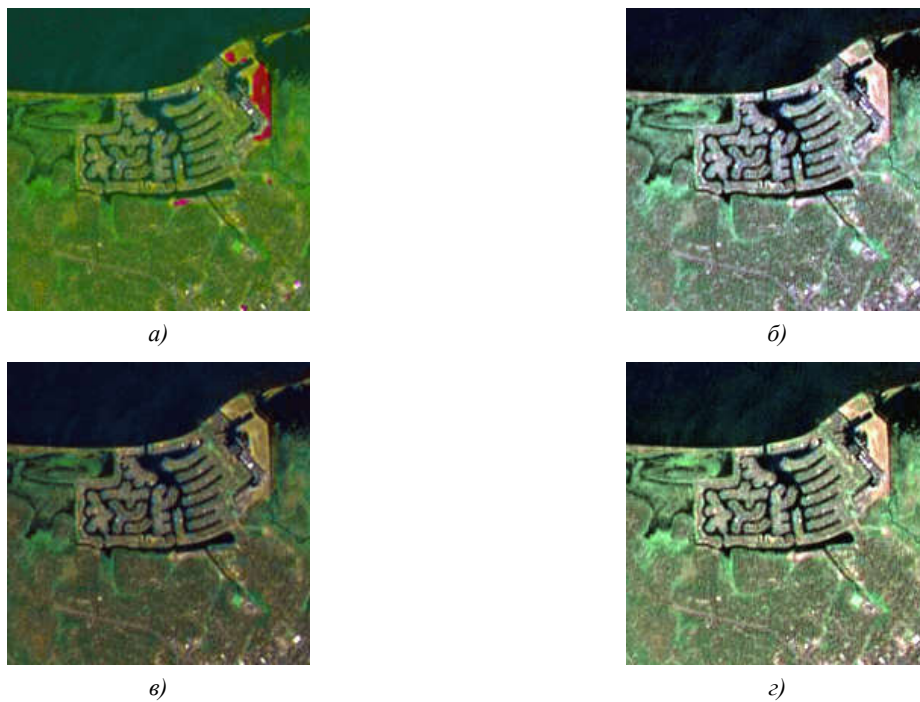


Рис. 4. Варианты изображений, полученных алгоритмом 1 при $K_R=0,299$, $K_G=0,587$, $K_B=0,114$: а) первый; б) второй; в) третий; г) четвертый

По аналогии с работой [7] для сравнения алгоритмов увеличения разрешения использовалась мера сходства изображений

$$Q = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \frac{2\bar{X}\bar{Y}}{(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2} \frac{2\sigma_X \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2};$$

$$\bar{X} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{ij};$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})^2, \quad \sigma_Y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{Y})^2;$$

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})(y_{ij} - \bar{Y}),$$
(6)

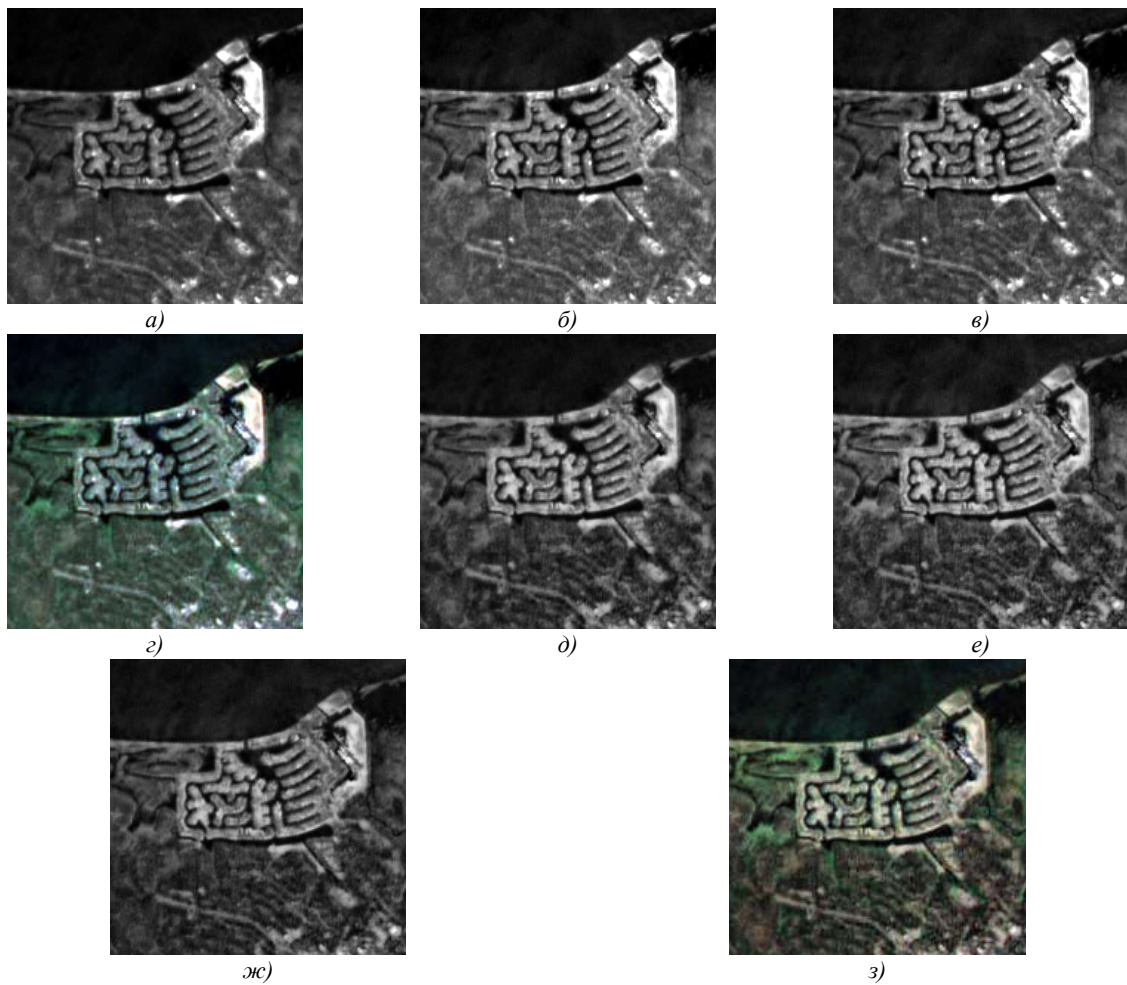


Рис. 5. Увеличение разрешения каналов R,G,B и RGB-изображений: а)–в) каналы с увеличенным разрешением (растяжение гистограмм); г) цветное изображение, созданное из каналов а)–в); д)–ж) каналы с увеличенным разрешением (адаптивное выравнивание гистограмм); з) цветное изображение, созданное из каналов д)–ж)



Рис. 6. Изображения, вычисленные алгоритмами 3 и 4 с разрешением 15 м: а), в) растяжение гистограмм компонентов V и L^* ; б), г) адаптивное выравнивание гистограмм компонентов V и L^* соответственно

где Q – значение меры сходства изображений; $X = \{x_{ij}\}$, $Y = \{y_{ij}\}$ – сравниваемые изображения; M , N – размеры изображения. Первая составляющая выражения является коэффициентом корреляции между изображениями X и Y . Вторая составляющая характеризует сходство средних значений яркостей двух сравниваемых изображений. Третья составляющая характеризует сходство контрастов двух сравниваемых изображений. Результатом сравнения является действительное число, находящееся в диапазоне от -1 до 1 . Значение -1 означает, что сравниваемые изображения разные, а значение 1 означает, что сравниваемые изображения идентичны. Чем выше значение меры сходства изображений, тем лучше выполнено увеличение разрешения мультиспектрального изображения.

В общем случае мера сходства изображений рассчитывается в непересекающихся областях для каждого канала отдельно, затем находится суммарная оценка. Поскольку в данной работе сравнивались цветовые палитры изображений сцены, на которой объекты не изменялись и не двигались, то меру можно вычислять сразу на всем изображении. Для этого полученное мультиспектральное изображение уменьшалось до размеров исходного посредством бикубической интерполяции. Для соответствующих каналов исходного и результирующего мультиспектральных изображений определялись меры сходства. Используя полученные меры, вычислялась средняя мера сходства, характеризующая сходство исходного и результирующего мультиспектральных изображений.

Для изображения, показанного на рис. 3, значение меры сходства изображений равно $0,77532$ (*б*); $0,82298$ (*в*). Цветовая палитра изображения на рис. 3, *в* ближе к цветовой палитре исходного изображения, чем цветовая палитра изображения на рис. 3, *б*.

Для изображения, показанного на рис. 4, значение меры сходства изображений равно $0,94314$ (*а*); $0,57211$ (*б*); $0,93112$ (*в*); $0,62936$ (*г*). Согласно значениям меры сходства изображений меньше всего цветовая палитра искажена на рис. 4, *а*, *в*. Параметры алгоритма следующие: $K_R=0,299$; $K_G=0,587$; $K_B=0,114$. Лучшее визуальное качество у третьего варианта (рис. 4, *в*). Этот результат получен с использованием параметров $K_R=0,299$, $K_G=0,587$, $K_B=0,114$, растяжение гистограммы выполнялось для каждого из каналов R' , G' , B' до перемножения с панхроматическим изображением (выбирались минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения из всех трех каналов R' , G' , B'). Визуальное качество изображений, имеющих максимальные значения мер сходства изображений, не всегда является самым лучшим (см. рис. 3, *а*). Для визуального восприятия лучшие результаты обеспечили второй (см. рис. 4, *б*) и третий (см. рис. 4, *в*) эксперименты растяжения гистограмм цветовых каналов.

Исходя из проведенных экспериментов, можно дать некоторые рекомендации. Для повышения качества изображения с увеличенным разрешением рекомендуется выполнить операцию растяжения гистограммы для каждого цветового канала R' , G' , B' до перемножения с панхроматическим изображением (выбрать минимальное x_{\min} и максимальное x_{\max} значения из всех трех каналов R' , G' , B').

Для изображения, показанного на рис. 5, значение меры сходства изображений равно $0,5969$ (*г*); $0,588$ (*з*). Для изображения, показанного на рис. 6, значение меры сходства изображений равно $0,98091$ (*а*); $0,60527$ (*б*); $0,52931$ (*в*); $0,5131$ (*г*). Согласно вычисленным значениям мер сходства изображений меньше всего цветовая палитра искажена на рис. 5, *а*. Это изображение было вычислено алгоритмом 3 с помощью растяжения гистограммы компонента V пространства цветов HSV. Хорошее визуальное качество обеспечил алгоритм 4, использующий преобразование цветного изображения в пространство $L^*a^*b^*$ (рис. 6, *в*). Для визуального анализа лучшим результатом является изображение на рис. 6, *в*. При применении адаптивного выравнивания гистограммы рекомендуемый размер области равен 25×25 .

Описанные алгоритмы представлены в таблице в порядке убывания качества полученных изображений. Лучшие результаты увеличения разрешения мультиспектрального изображения обеспечили алгоритмы 1 и 3.

Таблица

Алгоритмы увеличения разрешения изображений,
представленные в порядке убывания значения меры сходства изображений

Номер рисунка	Алгоритм и его параметры	Значение меры сходства изображений
6, а	Алгоритм 3, растяжение гистограммы компонента V	0,98091
4, а	Алгоритм 1, растяжение гистограмм каналов R', G', B' до перемножения с панхроматическим изображением	0,94314
4, в	Алгоритм 1, растяжение гистограмм каналов R', G', B' до перемножения с панхроматическим изображением	0,93112
3, в	Алгоритм 1, $K_R=0,299, K_G=0,587, K_B=0,114$	0,82298
3, б	Алгоритм 1, $K_R=1, K_G=1, K_B=1$	0,77532
4, з	Алгоритм 1, растяжение гистограмм каналов R'', G'', B'' после перемножения с панхроматическим изображением	0,62936
6, б	Алгоритм 4, адаптивное выравнивание гистограммы компонента V	0,60527
5, з	Алгоритм 2, растяжение гистограмм каналов	0,5969
5, з	Алгоритм 2, адаптивное выравнивание гистограмм каналов	0,5880
4, б	Алгоритм 1, растяжение гистограмм каналов R'', G'', B'' после перемножения с панхроматическим изображением	0,57211
6, в	Алгоритм 4, растяжение гистограммы компонента L^*	0,52931
6, з	Алгоритм 4, адаптивное выравнивание гистограммы компонента L^*	0,5131

Заключение

В работе описаны быстрые алгоритмы увеличения разрешения и повышения качества мультиспектральных изображений с использованием панхроматического изображения. Предложены алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений с помощью растяжения гистограмм и свойств представления цветного изображения в пространствах цветов HSV и $L^*a^*b^*$.

Все алгоритмы были протестированы на базе мультиспектральных изображений. База изображений состояла из 20 изображений, полученных со спутника Landsat 7ETM+ в разное время в разных географических координатах. Лучшие визуальные результаты были получены с использованием свойств представления цвета в пространстве цветов $L^*a^*b^*$ (рис. 6, в) и растяжением гистограмм цветовых составляющих изображения RGB (рис. 3, в).

В алгоритме 1 растяжение гистограмм цветовых каналов выполнялось по отдельности для каждого канала R,G,B до перемножения с панхроматическим изображением. Параметры были следующими: $K_R=0,299, K_G=0,587, K_B=0,114$.

Найдены значения мер сходства изображений, полученных предложенными алгоритмами. Визуальное качество изображений, имеющих максимальные значения мер сходства изображений, не всегда является самым лучшим.

Данные алгоритмы являются алгоритмами точечного типа, они быстрее, чем алгоритмы, представленные в работах [3–5], и их можно распараллеливать.

Список литературы

1. Abrams, M. Aster user handbook / M. Abrams, S. Hook. – California Institute of Technology, 2002. – 135 p.
2. Pellemans, A.H. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor / A.H. Pellemans, R.W. Jordans, R. Allewijn // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1993. – Vol. 59, № 1. – P. 81–87.
3. A new look at IHS-like image fusion methods / T. Tu [et al.] // Information Fusion. – 2001. – Vol. 2, № 3. – P. 177–186.
4. Bethune, S. Adaptive intensity matching filters: a new tool for multi-resolution data fusion / S. Bethune, F. Muller, M. Binard // Proc. AGARD SPP Symposium on Multisensor Systems and Data Fusion for Telecommunications. – Lisbon, Portugal, 1997. – P. 28,1–28,15.

5. Zhang, Y. Problems in the fusion of commercial high resolution satellite images as well as Landsat 7 images and initial solutions / Y. Zhang // Joint International Symposium on GeoSpatial Theory, Processing and Applications [Electronic resource]. – Canada, 9–12 July 2002 / 2002; – Vol. 34(4). – Mode of access: <http://www.isprs.org/commission4/proceedings02/pdfpapers/220.pdf>. – Date of access: 16.05.06.

6. Прет, У. Цифровая обработка изображений: в 2-х кн. / У. Претт. – М.: Мир, 1982. – 722 с.

7. A comparative analysis of image fusion methods / Z. Wang [et al.] // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43, № 6. – P. 1391–1402.

Поступила 13.01.06

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова 6
e-mail: makarau@newman.bas-net.by*

A.O. Makarau, V.V. Starovoirov

FAST ALGORITHMS FOR MULTIREOLUTION IMAGE FUSION

The paper deals with spatial resolution enhancement by fusion of remote sensing multispectral images. Typical sharpening algorithms either distort color palettes (PCA based fusion, HSI based fusion, Brovey transform) or are computationally inefficient (PCA based fusion, Wavelet based image fusion). A few algorithms for multispectral image spatial resolution enhancement are proposed. The algorithms are computationally efficient (1-to-1 type algorithms) and preserve color palette with minimal distortions.