

УДК 629.7

В.В. Старовойтов, А.О. Макаров

**АЛГОРИТМЫ РЕГРЕССИОННОГО ТИПА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ  
РАЗРЕШЕНИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Описываются быстрые алгоритмы регрессионного типа, предназначенные для увеличения разрешения изображений видимого спектра. Предложенные алгоритмы протестированы на десятках мультиспектральных изображений, полученных со спутников Landsat 7ETM+ и Quickbird. Даются результаты увеличения разрешения изображений и таблицы численных оценок качества увеличения разрешения снимков, а также время выполнения алгоритмов.*

**Введение**

Для анализа и дешифрирования мультиспектральных космических снимков актуальной задачей является быстрое увеличение их разрешения. Увеличение разрешения часто выполняется с использованием панхроматического изображения [1–4].

Существует три типа алгоритмов обработки изображений: точечные, локальные и глобальные. В точечных алгоритмах значение результирующего изображения в одной точке зависит от значения исходного изображения в данной точке. В алгоритмах локального типа значение результирующего изображения в одной точке зависит от значений точек исходного изображения, находящихся в окрестности данной точки. В алгоритмах глобального типа значение результирующего изображения в одной точке зависит от значений всех точек исходного изображения. Сложность алгоритмов точечного типа равна  $O(M*N)$ , локального –  $O(M*N*p^2)$ , где  $M, N$  – размеры изображения,  $p \times p$  – размеры скользящего окна ( $p \geq 3$ ).

Широко распространенные алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений на основе метода главных компонент и вейвлет-преобразования являются алгоритмами глобального и локального типов, и соответственно их недостатки – зачастую неприемлемое время выполнения и искажение цветовых палитр исходных изображений. Алгоритмы на основе преобразования Броуи и HSI-преобразования являются алгоритмами точечного типа. Все методы увеличения разрешения, использующие панхроматическое изображение и разработанные до 2000 г., существенно меняют цветовые палитры мультиспектральных изображений, которые регистрируются спутниками, запущенными в 1999 г. и позднее [2], поскольку панхроматическое изображение регистрируется в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Поэтому актуальной задачей является разработка быстрых алгоритмов для увеличения разрешения мультиспектральных изображений с максимальным сохранением палитр исходных изображений.

В данной статье предлагаются алгоритмы точечного типа, лучше других алгоритмов сохраняющие цветовую палитру увеличенных изображений.

**1. Обзор алгоритмов увеличения разрешения мультиспектральных изображений**

Алгоритм добавления высоких частот (ДВЧ) [3] увеличивает разрешение мультиспектрального изображения путем включения мелких деталей снимка, извлекаемых из панхроматического изображения. Исходное панхроматическое изображение  $pan^{high}$  фильтруется низкочастотным фильтром, в результате создается панхроматическое изображение  $pan^{low}$  с разрешением, близким к разрешению мультиспектрального изображения. Увеличение разрешения мультиспектрального изображения выполняется по формуле

$$mult^{high} = mult^{low} + (pan^{high} - pan^{low}), \quad (1)$$

где  $mult^{high}$  – мультиспектральное изображение с увеличенным разрешением;  $mult^{low}$  – мультиспектральное изображение, увеличенное до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ ;  $pan^{high}$  – панхроматическое изображение;  $pan^{low}$  – панхроматическое изображение с разрешением, близким к разрешению мультиспектрального изображения. Этот алгоритм является алгоритмом локального типа.

В алгоритме частотной модуляции (ЧМ) [3] мелкие детали сцены извлекаются попиксельным делением панхроматического изображения  $pan^{high}$  на  $pan^{low}$ :

$$mult^{high} = mult^{low} * pan^{high} / pan^{low}, \quad (2)$$

где  $mult^{high}$  – мультиспектральное изображение с увеличенным разрешением;  $mult^{low}$  – мультиспектральное изображение, увеличенное до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ ;  $pan^{high}$  – панхроматическое изображение;  $pan^{low}$  – панхроматическое изображение с разрешением, близким к разрешению мультиспектрального изображения. Этот алгоритм является алгоритмом локального типа.

Авторы работы [3] предложили алгоритм увеличения разрешения мультиспектральных изображений на основе локальной регрессии (ЛР). Панхроматическое изображение  $pan^{high}$  фильтруется низкочастотным фильтром, чтобы его разрешение было близким к разрешению мультиспектрального изображения. Результат фильтрации (изображение  $pan^{low}$ ) уменьшается до размеров мультиспектрального изображения. Между изображениями  $pan^{low}$  и  $mult^{low}$  в скользящем окне размером  $p \times p$  (в работе [3] использовали  $p=5$ ) вычисляются ЛР, коэффициенты которых сохраняются в матрицах  $a^{low}$ ,  $b^{low}$  и  $e^{low}$ :

$$mult^{low} = a^{low} + b^{low} * pan^{low} + e^{low}, \quad (3)$$

где  $a^{low}$ ,  $b^{low}$  – матрицы, элементами которых являются коэффициенты ЛР;  $e^{low}$  – матрица остатков ЛР. Матрицы  $a^{low}$ ,  $b^{low}$  и  $e^{low}$  увеличиваются до размеров изображения  $pan^{high}$ . Результаты назовем  $a^{low'}$ ,  $b^{low'}$  и  $e^{low'}$ . Мультиспектральное изображение с увеличенным разрешением вычисляется по формулам

$$mult^{high} = a^{low'} + b^{low'} * pan^{high} + e^{low'} \quad (4)$$

или, без использования  $e^{low'}$ ,

$$mult^{high} = mult^{low} + b^{low'} * (pan^{high} - pan^{low}). \quad (5)$$

Поскольку в данном алгоритме ЛР вычисляется в скользящем окне, то это алгоритм локального типа, и его недостатком является высокая вычислительная сложность по сравнению с алгоритмами точечного типа. В связи с тем, что ЛР вычисляются для каждого пикселя изображения, необходимо хранить матрицы  $a^{low'}$  и  $b^{low'}$  в памяти ЭВМ. Из-за того что космоснимки имеют большие размеры (18844×17460 пикселей для изображений со спутника Landsat 7 ETM+ и 16384×16384 пикселей для изображений со спутника Quickbird), при хранении матриц коэффициентов ЛР  $a^{low'}$  и  $b^{low'}$  такого размера значительно возрастают нагрузки на память ЭВМ. Вычисление глобальной регрессии (ГР) гораздо эффективнее, чем вычисление ЛР в каждом пикселе изображения по затраченному времени и нагрузке на память ЭВМ.

Далее в работе для увеличения разрешения мультиспектральных изображений предлагаются и исследуются новые быстрые алгоритмы регрессионного типа, которые являются алгоритмами точечного типа.

## 2. Новые алгоритмы регрессионного типа для увеличения разрешения мультиспектральных изображений

### 2.1. Увеличение разрешения мультиспектральных изображений на основе ГР

Для увеличения разрешения мультиспектральных изображений вычисляются ГР между панхроматическим и спектральными изображениями  $R$ ,  $G$ ,  $B$ , увеличенными до размеров панхроматического. Изображение  $pan^{high}$  обрабатывается низкочастотным фильтром, результат обозначается  $pan^{low}$ . Для каждого увеличенного спектрального изображения и обработанного панхроматического  $pan^{low}$  вычисляются ГР:

$$\begin{aligned} R' &= a_R + b_R * pan^{low} + e_R; \\ G' &= a_G + b_G * pan^{low} + e_G; \\ B' &= a_B + b_B * pan^{low} + e_B, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a_R, a_G, a_B, b_R, b_G, b_B$  – коэффициенты ГР спектральных изображений  $R', G', B'$  и панхроматического изображения  $pan^{low}$ ;  $e_R, e_G, e_B$  – матрицы остатков ГР;  $R', G', B'$  – спектральные изображения  $R, G, B$ , увеличенные до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ ;  $pan^{low}$  – панхроматическое изображение после обработки низкочастотным фильтром. Увеличение разрешения спектральных изображений вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} R'' &= R' + b_R * (pan^{high} - pan^{low}); \\ G'' &= G' + b_G * (pan^{high} - pan^{low}); \\ B'' &= B' + b_B * (pan^{high} - pan^{low}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $R'', G'', B''$  – спектральные изображения с увеличенным разрешением;  $R', G', B'$  – спектральные изображения  $R, G, B$ , увеличенные до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ .

#### Алгоритм 1. Увеличение разрешения мультиспектральных изображений на основе ГР

*Шаг 1.* Увеличить спектральные изображения  $R, G, B$  до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ . Увеличенные спектральные изображения обозначить  $R', G', B'$ .

*Шаг 2.* Выполнить фильтрацию изображения  $pan^{high}$  низкочастотным фильтром. Результирующее изображение обозначить  $pan^{low}$ .

*Шаг 3.* Вычислить коэффициенты глобальных регрессий для каждого спектрального изображения  $R', G', B'$  и панхроматического изображения  $pan^{low}$ , используя формулы (6).

*Шаг 4.* Выполнить увеличение разрешения спектральных изображений по формулам (7).

### 2.2. Увеличение разрешения мультиспектральных изображений на основе вычисления ГР по соответствующим точкам мультиспектрального и панхроматического изображений

Алгоритм 1 модифицирован таким образом, что ГР между спектральным и панхроматическим изображениями  $pan^{high}$  вычисляется только в совпадающих точках панхроматического и спектрального изображений. Таким образом, исходное панхроматическое изображение не преобразуется (в частности, не фильтруется низкочастотным фильтром), и спектральные изображения не увеличиваются до размеров панхроматического. Разрешение панхроматического

изображения выше в два (для Landsat 7 ETM+) и четыре (для Quickbird) раза, чем разрешение спектральных (рис. 1). Одному пикселю спектрального изображения соответствуют четыре пикселя панхроматического. У изображений, получаемых со спутника Quickbird, одному пикселю мультиспектрального изображения соответствуют шестнадцать пикселей панхроматического.

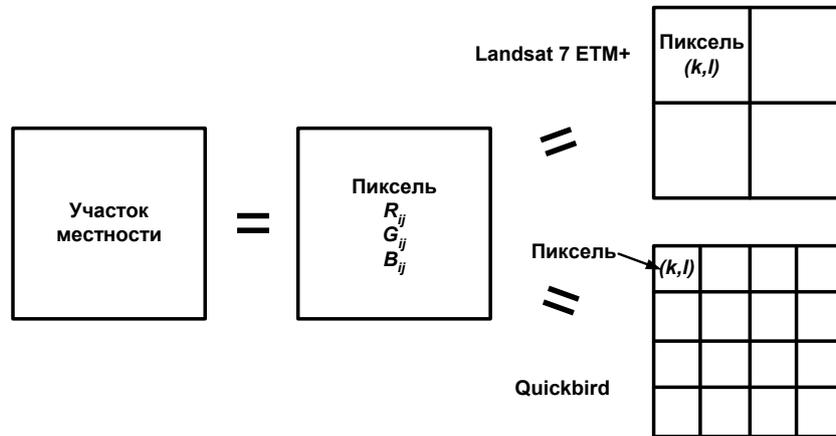


Рис. 1. Схема взаимного расположения пикселей мультиспектрального и панхроматических изображений. Разрешение мультиспектрального изображения  $mult$  ниже разрешения панхроматического изображения  $pan$ . Одному пикселю с координатами  $(i, j)$  мультиспектрального изображения  $mult$  соответствуют четыре пикселя панхроматического изображения  $pan$  из набора, получаемого со спутника Landsat 7 ETM+, или шестнадцать пикселей панхроматического изображения, получаемого со спутника Quickbird

Для пикселя  $(i, j)$  мультиспектрального изображения  $mult$  совпадающим пикселем будет пиксель  $(k, l)$  панхроматического изображения  $pan$ . Пиксели панхроматического изображения могут выбираться разными способами: позиционно (первый, ..., четвертый, из заданного расположения), по яркостным характеристикам (те, которые ближе к среднему или медианному значению после свертки с некоторым фильтром) или с помощью пирамидального подхода (т. е. использовать значения соответствующих пикселей на соответствующем уровне пирамиды).

**Алгоритм 2. Увеличение разрешения спектральных изображений на основе глобальной регрессии по соответствующим точкам спектрального и панхроматического изображений (СТГР)**

**Шаг 1.** Создать изображение  $pan^p$  из значений пикселей, которые совпадают с пикселями спектрального изображения.

**Шаг 2.** Вычислить коэффициенты ГР для каждого спектрального изображения  $R, G, B$  и панхроматического изображения  $pan^p$  по формулам

$$\begin{aligned} R &= a_R^p + b_R^p * pan^p + e_R^p; \\ G &= a_G^p + b_G^p * pan^p + e_G^p; \\ B &= a_B^p + b_B^p * pan^p + e_B^p, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $a_R^p, a_G^p, a_B^p, b_R^p, b_G^p, b_B^p$  – коэффициенты ГР спектральных изображений  $R, G, B$  и изображения  $pan^p$ ;  $e_R^p, e_G^p, e_B^p$  – остатки ГР;  $pan^p$  – панхроматическое изображение, составленное из точек, которые совпадают с точками спектрального изображения.

**Шаг 3.** Вычислить панхроматическое изображение  $pan^{low}$  фильтрацией низкочастотным фильтром изображения  $pan^{high}$ .

**Шаг 4.** Увеличить спектральные изображения  $R, G, B$  до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ . Увеличенные спектральные изображения обозначить  $R', G', B'$ .

**Шаг 5.** Увеличить разрешения спектральных изображений по формулам

$$\begin{aligned}
R'' &= R' + b_R^p * (pan^{high} - pan^{low}); \\
G'' &= G' + b_G^p * (pan^{high} - pan^{low}); \\
B'' &= B' + b_B^p * (pan^{high} - pan^{low}),
\end{aligned} \tag{9}$$

где  $R'', G'', B''$  – спектральные изображения с увеличенным разрешением;  $R', G', B'$  – спектральные изображения  $R, G, B$ , увеличенные до размеров панхроматического изображения  $pan^{high}$ ;  $b_R^p, b_G^p, b_B^p$  – коэффициенты ГР спектральных изображений  $R, G, B$  и изображения  $pan^p$ ;  $pan^{low}$  – изображение  $pan^{high}$  после фильтрации низкочастотным фильтром.

### 3. Экспериментальные исследования алгоритмов

При тестировании всех алгоритмов для увеличения мультиспектральных изображений  $R, G, B$  используется бикубическая интерполяция. В качестве низкочастотного фильтра применялось усреднение в окрестностях размером  $3 \times 3$  и  $5 \times 5$ . Усреднение выполнялось с помощью интегральных матриц изображений, описанных в работе [5]. Интегральными матрицами изображений будем называть такие матрицы, которые вычисляются суммированием элементов исходных изображений по строкам и столбцам. Интегральная матрица изображения вычисляется рекурсивно путем полного прохода матрицы изображения:

$$\begin{aligned}
s(i, -1) &= 0; \\
b(-1, j) &= 0; \\
s(i, j) &= s(i, j-1) + g(i, j); \\
b(i, j) &= b(i-1, j) + s(i, j),
\end{aligned} \tag{10}$$

где  $g$  – матрица исходного изображения;  $i, j$  – координаты пикселя с яркостью  $g(i, j)$ ;  $b$  – интегральная матрица изображения;  $s(i, j)$  – переменная, хранящая сумму значений пикселей по строкам. Интегральные матрицы изображений позволяют быстро вычислять суммы значений пикселей на прямоугольных областях любого размера, используя четыре значения интегральной матрицы изображения. Рассмотрим рис. 2. Сумма значений элементов интегральной матрицы изображения области **A** равна значению элемента матрицы, обозначенного единицей. Сумма элементов области **B** равна разности значений элементов интегральной матрицы, обозначенных двойкой и единицей; области **B** – разности значений элементов интегральной матрицы, обозначенных тройкой и единицей; области **Г** – сумме значений элементов интегральной матрицы, обозначенных четверкой и единицей, минус значения, обозначенные двойкой и тройкой. Сложность этого алгоритма на один пиксель изображения равна трем сложениям, двум вычитаниям.

При усредняющей фильтрации изображений с помощью маски  $p \times p$ , описанной выражением (11) для  $p=3$ , для каждого пикселя необходимо выполнить  $p \times (p-1)$  сложение и одно деление; если маска имеет размер  $5 \times 5$ , то 25 сложений и одно деление и т. д. Для ускорения фильтрации можно использовать интегральные матрицы, тогда вычислительная сложность не зависит от размера усредняющего фильтра и равна трем сложениям, двум вычитаниям и одному делению:

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

#### Алгоритм 3. Быстрое выполнение усредняющей фильтрации

Шаг 1. Вычислить интегральную матрицу изображения по формулам (10).

Шаг 2. Задать  $p$  – размер скользящего окна.

*Шаг 3.* В скользящем окне  $p \times p$ , проходящем построчно от левого верхнего до правого нижнего угла, вычислить сумму в окрестностях выбранного размера, используя интегральное изображение, и разделить сумму на  $p^2$ .

При исследовании алгоритмов на базе ЛР и ГР строились гистограммы значений регрессий между панхроматическим изображением  $pan^{low}$  и спектральными изображениями (рис. 3). ЛР вычислялись в областях размером  $5 \times 5$  пикселей. Значения были масштабированы в диапазон целых чисел от 1 до 100. Сплошной вертикальной линией указано среднее значение (22,0396) ЛР, пунктирной линией – значение ГР между этими двумя изображениями (21,8077). Значение ГР отличается незначительно от среднего значения ЛР, поэтому вместо ЛР можно вычислять глобальную.

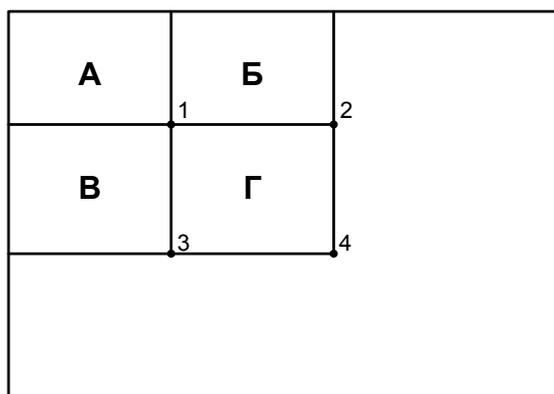


Рис. 2. Схема вычисления значений сумм в областях интегральной матрицы изображения

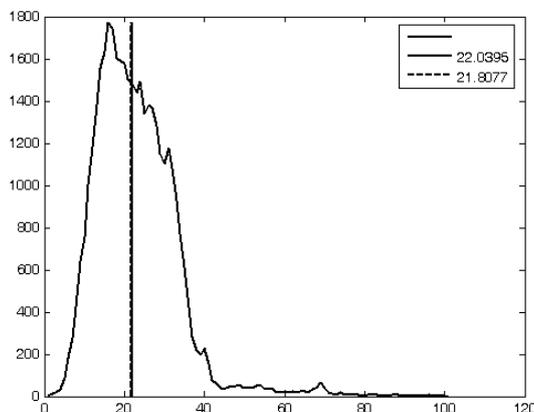


Рис. 3. Гистограмма значений ЛР между панхроматическим изображением и спектральным изображением R (спутник Landsat 7 ETM+)

На рис. 4, *а* показан фрагмент  $200 \times 200$  исходного цветного изображения, составленного из спектральных изображений *R, G, B* (спутник Landsat 7 ETM+, разрешение панхроматического изображения в два раза выше, чем разрешение мультиспектрального). Размер увеличенного изображения –  $400 \times 400$  пикселей. На рис. 4, *б–ж* представлены результаты увеличения разрешения ранее разработанным и предлагаемыми алгоритмами.

На рис. 5, *а* дан фрагмент исходного цветного изображения (спутник Quickbird, разрешение панхроматического изображения в четыре раза выше, чем разрешение мультиспектрального). Размер исходного изображения –  $200 \times 200$ , с увеличенным разрешением –  $800 \times 800$ . На рис. 5, *б–ж* показаны изображения, полученные теми же алгоритмами, что и изображения на рис. 4, *б–ж*.

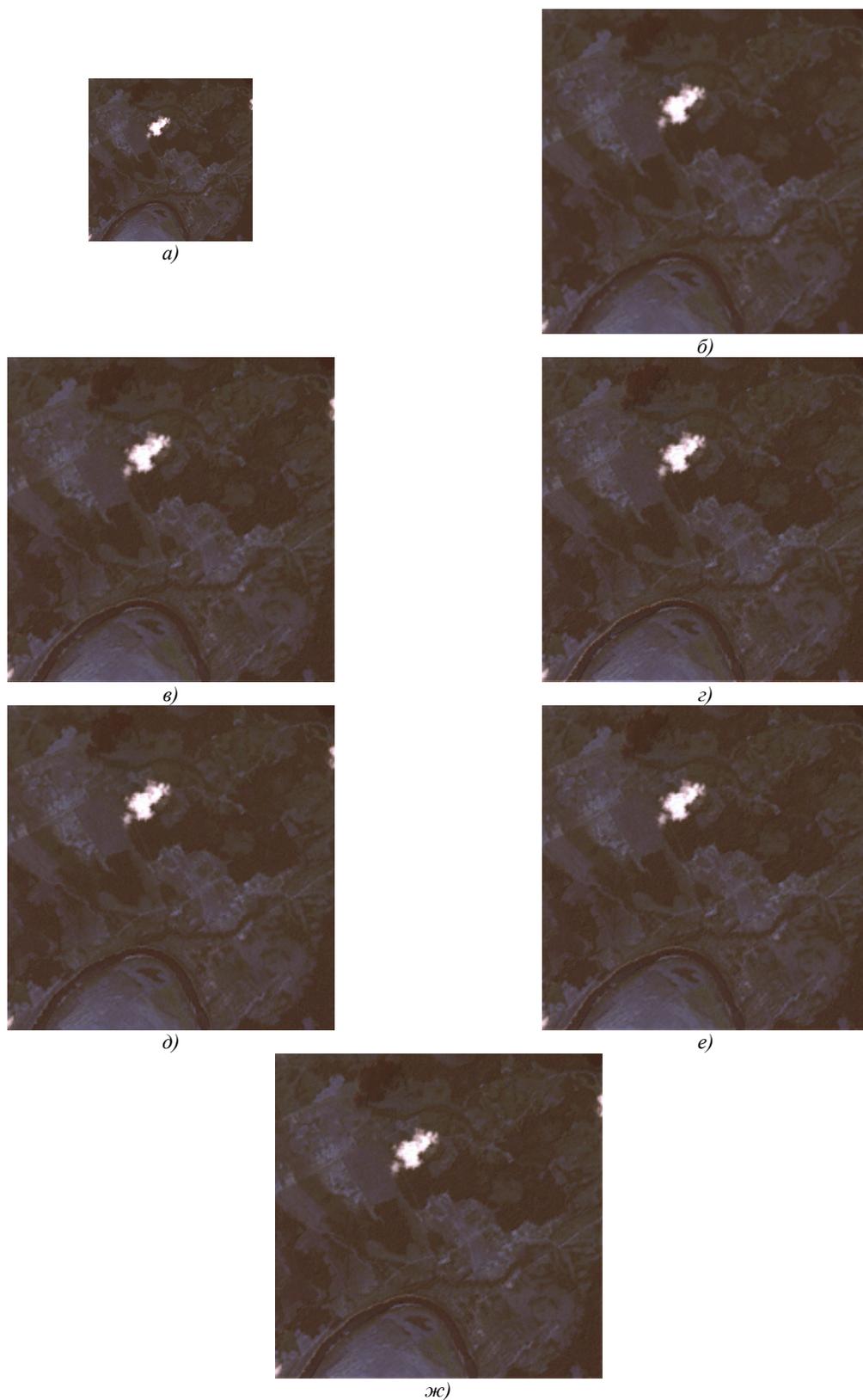


Рис. 4. Результаты увеличения разрешения мультиспектральных изображений:  
а) фрагмент исходного цветного изображения (спутник Landsat 7 ETM+); б) изображение, полученное с помощью бикубической интерполяции; в) изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом добавления высоких частот; г) изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом ЧМ; д) изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом на основе ЛР; е) изображение, вычисленное алгоритмом 1; ж) изображение, вычисленное алгоритмом 2

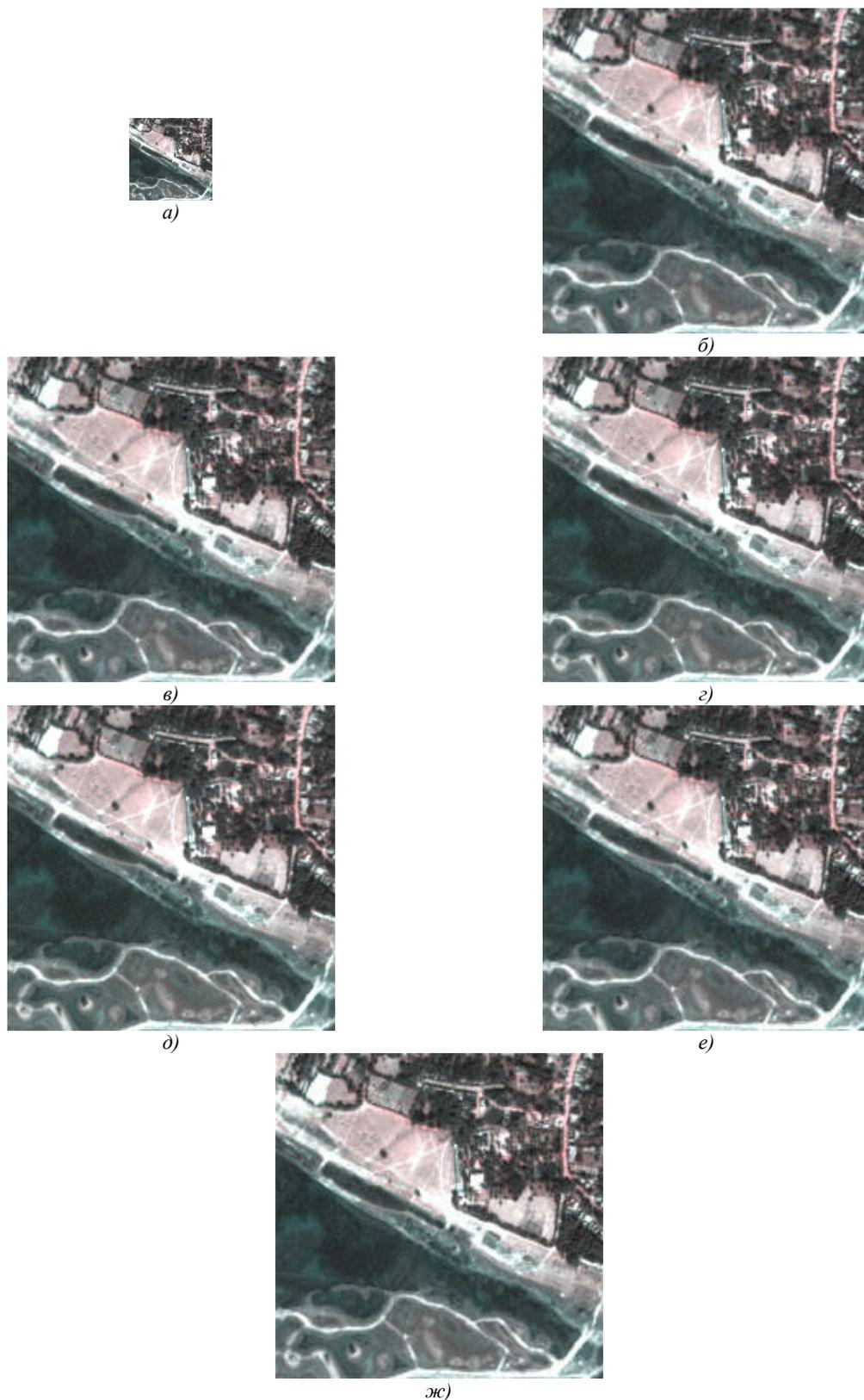


Рис. 5. Результаты увеличения разрешения мультиспектральных изображений:  
*a)* фрагмент исходного цветного изображения (спутник Quickbird); *б)* изображение, полученное с помощью бикубической интерполяции; *в)* изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом добавления высоких частот; *г)* изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом ЧМ; *д)* изображение с увеличенным разрешением, вычисленное алгоритмом на основе локальной регрессии; *е)* изображение, вычисленное алгоритмом 1; *ж)* изображение, вычисленное алгоритмом 2

Таблица 1

Сравнение качества увеличения разрешения мультиспектральных изображений, полученных со спутника Landsat 7 ETM+

Сравнение	Евклидова норма гистограмм			Контраст			Структурное подобие			Корреляция			Время выполнения, с
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	
Алгоритм ДВЧ	2090	1496	1273	0,94825	0,95903	0,96358	0,94822	0,95898	0,9635	0,97691	0,98053	0,9871	1,828
ЧМ	2534	1446	888	0,9195	0,95623	0,96799	0,91944	0,95615	0,96789	0,90485	0,94373	0,96681	2,093
ЛР	2571	1536	931	0,96164	0,9792	0,97955	0,96164	0,9792	0,97955	0,9926	0,9958	0,99607	14,969
ГР	2520	1507	1178	0,92636	0,95854	0,96721	0,92631	0,95849	0,96715	0,96536	0,98025	0,98869	1,282
СТР	2512	1502	1174	0,92684	0,9588	0,96735	0,92679	0,95875	0,96729	0,96564	0,9804	0,98875	1,228

Таблица 2

Сравнение качества увеличения разрешения мультиспектральных изображений, полученных со спутника Quickbird

Сравнение	Евклидова норма гистограмм			Контраст			Структурное подобие			Корреляция			Время выполнения, с
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	
Алгоритм ДВЧ	524	3779	3779	0,98882	0,98412	0,98412	0,98882	0,98411	0,98411	0,9959	0,99502	0,99502	7,875
ЧМ	445	3769	3769	0,98945	0,98455	0,98455	0,98943	0,98453	0,98453	0,9953	0,99418	0,99418	8,14
ЛР	473	3769	3769	0,98961	0,98485	0,98485	0,98961	0,98484	0,98484	0,99805	0,99757	0,99757	25,484
ГР	521	3770	3770	0,98919	0,98449	0,98449	0,98918	0,98449	0,98449	0,99662	0,99586	0,99586	5,172
СТР	521	3772	3772	0,9892	0,98452	0,98452	0,98919	0,98452	0,98452	0,99665	0,99589	0,99589	4,813

#### 4. Анализ результатов увеличения разрешения мультиспектральных изображений

Для оценки качества увеличения разрешения изображений и передачи цветовой палитры вычисленное изображение уменьшалось до размеров исходного (использовалась бикубическая интерполяция). Для каждого исходного и уменьшенных результирующих спектральных изображений  $R$ ,  $G$ ,  $B$  вычислялись значение меры сходства контрастов изображений, мера структурного подобия, корреляция. Сходство контрастов вычислялось по следующим формулам:

$$C_{sim} = \frac{2\sigma_X\sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}; \quad (12)$$

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})^2; \quad (13)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{Y})^2, \quad (14)$$

где  $C_{sim}$  – значение меры сходства контрастов изображений;  $X = \{x_{ij}\}$ ,  $Y = \{y_{ij}\}$  – сравниваемые спектральные изображения;  $M$ ,  $N$  – размеры изображения. Способ вычисления меры структурного подобия описан в работах [4, 6]. Вычислялись евклидовы нормы гистограмм исходного и результирующего спектральных изображений. При вычислении евклидовых норм гистограмм результирующее изображение не уменьшалось. Значения в гистограммах результирующих спектральных изображений делились на четыре (при использовании снимков со спутника Landsat 7 ETM+, поскольку количество пикселей у вычисленного изображения в четыре раза больше) или шестнадцать (при использовании снимков со спутника Quickbird, поскольку количество пикселей у вычисленного изображения в шестнадцать раз больше).

Для каждого из спектральных изображений  $R$ ,  $G$ ,  $B$  в табл. 1, 2 приведены значения евклидовой нормы гистограмм, сходства контрастов, мер структурного подобия, корреляции. Приведено время выполнения алгоритмов. Визуальные отличия у изображений, вычисленных описанными алгоритмами, незначительны. Все эксперименты выполнялись в среде Матлаб на компьютере с процессором Пентиум 4 3 ГГц. Алгоритмы были протестированы на наборе изображений, полученных со спутников Landsat 7 ETM+ и Quickbird.

Алгоритм на основе ЛР имеет самое большое время вычисления среди описанных алгоритмов. Алгоритмы ГР и СТГР имеют гораздо меньшее время выполнения, чем алгоритмы ДВЧ, ЧМ и ЛР, за счет использования глобальной регрессии вместо локальной и быстрого алгоритма вычисления усредняющей фильтрации.

При увеличении разрешения космоснимков с большими размерами (более  $16000 \times 16000$  пикселей) использование алгоритмов ГР и СТГР сократит время вычисления примерно на один порядок и сэкономит память ЭВМ в отличие от алгоритмов на основе ЛР.

С точки зрения скорости выполнения предпочтительным алгоритмом увеличения разрешения является алгоритм СТГР, потому что он имеет самое маленькое время вычисления и обеспечивает достаточное качество передачи цветовой палитры при увеличении разрешения изображений.

#### Заключение

В работе представлены новые алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений на основе вычисления ГР, даны таблицы с оценками качества увеличения разрешения изображений и передачи цветовой палитры цветных изображений. Оценка передачи цветовой палитры выполнялась с помощью вычисления евклидовой нормы гистограмм, контраста, структурного подобия и корреляции. Согласно выполненным экспериментам наименьшее вре-

мя выполнения имеет алгоритм на основе ГР по соответствующим точкам спектрального и панхроматического изображений.

Поскольку предлагаемые алгоритмы являются алгоритмами точечного типа, время выполнения предлагаемых алгоритмов на порядок меньше, чем у алгоритмов на основе ЛР, метода главных компонент и вейвлет-преобразования.

Для снижения времени фильтрации усредняющим фильтром был использован алгоритм быстрого вычисления дискретной свертки, который выполняет фильтрацию с постоянной сложностью для окрестностей с различными размерами.

### Список литературы

1. A new look at IHS-like image fusion methods / T. Tu [et al.] // Information Fusion. – 2001. – Vol. 2, № 3. – P. 177–186.
2. Zhang, Y. Problems in the fusion of commercial high resolution satellite images as well as Landsat 7 images and initial solutions / Y. Zhang // International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 34. – Part 4.
3. A local correlation approach for the fusion of remote sensing data with different spatial resolution in forestry applications / J. Hill [et al.] // Proc. of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – Valladolid, Spain, 1999. – Vol. 32. – Part 7-4-3 W6.
4. A comparative analysis of image fusion methods / Wang Z. [et al.] // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43. – № 6. – P. 1391–1402.
5. Viola, P. Robust real-time object detection / P. Viola, M. Jones // Int. Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 57. – № 2. – P. 137–154.
6. Макаров, А.О. Быстрые алгоритмы увеличения разрешения мультиспектральных изображений / А.О. Макаров, В.В. Старовойтов // Информатика. – 2006. – № 2. – С. 27–37.

Поступила 25.04.06

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

**V.V. Starovoitov, A.O. Makarau**

### REGRESSION-MODEL ALGORITHMS FOR MULTISPECTRAL IMAGE FUSION

This paper presents fast algorithms based on regression for multiresolution spectral image fusion. The offered algorithms are tested on Landsat 7 ETM+ and Quickbird multispectral images. Numerical evaluations of fusion quality and consumed time are presented for the fused images.



Таблица 1

Сравнение качества увеличения разрешения мультиспектральных изображений, полученных со спутника Landsat 7 ETM+

Сравнение	Евклидова норма гистограмм			Контраст			Структурное подобие			Корреляция			Время выполнения, с
	Алгоритм	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	
ДВЧ	2090	1496	1273	0,94825	0,95903	0,96358	0,94822	0,95898	0,9635	0,97691	0,98053	0,9871	1,828
ЧМ	2534	1446	888	0,9195	0,95623	0,96799	0,91944	0,95615	0,96789	0,90485	0,94373	0,96681	2,093
ЛР	2571	1536	931	0,96164	0,9792	0,97955	0,96164	0,9792	0,97955	0,9926	0,9958	0,99607	14,969
ГР	2520	1507	1178	0,92636	0,95854	0,96721	0,92631	0,95849	0,96715	0,96536	0,98025	0,98869	1,282
СТГР	2512	1502	1174	0,92684	0,9588	0,96735	0,92679	0,95875	0,96729	0,96564	0,9804	0,98875	1,228

Таблица 2

Сравнение качества увеличения разрешения мультиспектральных изображений, полученных со спутника Quickbird

Сравнение	Евклидова норма гистограмм			Контраст			Структурное подобие			Корреляция			Время выполнения, с
	Алгоритм	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	
ДВЧ	524	3779	3779	0,98882	0,98412	0,98412	0,98882	0,98411	0,98411	0,9959	0,99502	0,99502	7,875
ЧМ	445	3769	3769	0,98945	0,98455	0,98455	0,98943	0,98453	0,98453	0,9953	0,99418	0,99418	8,14
ЛР	473	3769	3769	0,98961	0,98485	0,98485	0,98961	0,98484	0,98484	0,99805	0,99757	0,99757	25,484
ГР	521	3770	3770	0,98919	0,98449	0,98449	0,98918	0,98449	0,98449	0,99662	0,99586	0,99586	5,172
СТГР	521	3772	3772	0,9892	0,98452	0,98452	0,98919	0,98452	0,98452	0,99665	0,99589	0,99589	4,813

