

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ ЛИНЕЕК ФОТОПРИЁМНИКОВ В УСЛОВИЯХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Егошкин Н.А., к.т.н., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, г. Рязань, e-mail: foton@rsreu.ru

Еремеев В.В., д.т.н., директор НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru

Москвитин А.Э., к.т.н., в.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ

**Ключевые слова:** комплексирование, линейка фотоприемников, пространственное, радиометрическое разрешение, геометрические искажения.

### Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обычно строятся на базе линеек фотоприёмников [1]. Развертка изображений осуществляется в одном направлении за счет опроса чувствительных элементов линейки, а в другом – за счет механического сканирования [2] или за счет движения спутника. Один из путей повышения геометрического и радиометрического разрешения съемки является одновременное использование нескольких линеек фотоприёмников, установленных в фокальной плоскости видеодатчика [1].

На рис. 1 показан пример расположения в фокальной плоскости  $L$  одинаковых линеек на равном расстоянии друг от друга  $\Delta$  с взаимными субпиксельными сдвигами на  $M$  (НС – направление сканирования).

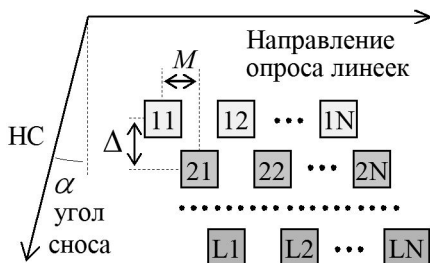


Рис. 1. Расположение линеек в фокальной плоскости

Весьма актуальной является задача комплексирования информации от нескольких линеек фотоприёмников с целью получения изображения максимального качества (радиометрического и пространственного разрешения). В некоторых системах ДЗЗ задача комплексирования может выступать как дополнительная. Например, современная гиперспектральная аппаратура строится на базе матрицы, содержащей до сотни и более линеек. Поэтому можно поставить задачу объединения информации от нескольких линеек (спектральных каналов) с целью повышения качества съемки (например, пространственного разрешения), конечно же за счет сокращения спектрального разрешения.

Общей особенностью систем ДЗЗ является то, что в процессе съемки развертка изображений происходит со значительными геометрическими искажениями. Обычно направление сканирования не перпендикулярно к ли-

Представлены модели и алгоритмы комплексирования изображений от субпиксельно смещенных линеек фотоприёмников с целью повышения пространственного и радиометрического разрешения в условиях геометрических искажений наблюдаемой сцены.

нейкам чувствительных элементов, угол сноса  $\alpha \neq 0$ . Для систем глобального наблюдения земли (например, геостационарная система «Электро-Л», тепловые каналы [3]) угол сноса обусловлен особенностями механического сканирования. Для низкоорбитальных систем характерно непостоянство угла сноса по полю изображения. Всё это значительно усложняет задачу комплексирования. В данной статье рассматривается решение задачи в условиях геометрических искажений (т.е. при  $\alpha \neq 0$ ).

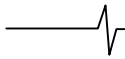
### Постановка задачи комплексирования

Пусть  $L$  линеек фотоприёмников формируют дискретные изображения  $B_l(m_l, n_l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ . Требуется получить новое изображение  $D(x, y)$ , обладающее лучшими характеристиками по пространственному и радиометрическому разрешению. Взаимное расположение линеек, геометрию сканирования сцены и нового изображения  $D(x, y)$  считаем полностью известными, например, в виде функций связи между системами координат  $(m_l, n_l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ , и  $(x, y)$ :

$$m_l = F_l(x, y), \quad n_l = G_l(x, y), \quad l = \overline{1, L}. \quad (1)$$

Вычисляемые по (1) координаты  $(m_l, n_l)$ , вообще говоря, не являются целочисленными. Яркости  $B_l(m_l, n_l)$  определены только при  $m_l, n_l \in Z$ , где  $Z$  – множество целых чисел. В конечном счете  $D(x, y)$  это дискретное изображение (по размерам большее исходных  $B_l$ ). Однако дальнейшие выкладки станут проще, если поставить задачу получения непрерывного изображения  $D(x, y)$ . При этом для перехода к дискретному изображению достаточно взять отчеты  $D(x, y)$  в узлах подпадающей сетки (периоды дискретизации следует выбирать в зависимости от реально достигнутого пространственного разрешения).

Достаточно произвольный выбор функций (1) подразумевает, что комплексирование может осуществляться одновременно с геометрической трансформацией. Если это не требуется, достаточно положить в (1)  $x = m_1$ ,



$y = n_l$ , при этом  $D(x, y)$  геометрически идентично изображению от первой линейки, т.е. сформировано как бы новой более качественной линейкой, расположенной на месте первой.

**Задача повышения радиометрического разрешения**

Будем считать, что изображение от каждой линейки уже удовлетворительно по пространственному разрешению (т.е. шаг дискретизации подстилающий поверхности таков, что выполнены условия теоремы Котельникова), и рассмотрим задачу повышения только радиометрического разрешения. Этот случай наиболее прост: геометрически трансформируем изображения  $B_l(m_i, n_l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ , в плоскость  $(x, y)$  и усредним полученные изображения  $D_l(x, y)$ :

$$D(x, y) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L D_l(x, y). \tag{2}$$

Трансформацию изображений удобно выполнять по обратному закону [1]:

$$D_l(x, y) = B_l^*(F_l(x, y), G_l(x, y)), \quad B_l^* = \mathfrak{R} B_l, \tag{3}$$

где  $\mathfrak{R}$  – оператор яркостной интерполяции, позволяющий из дискретного изображения  $B_l$  получить непрерывное изображение  $B_l^*$ . Существование оператора  $\mathfrak{R}$  следует из допущения об «удовлетворительном пространственном разрешении» каждого  $B_l$ . Напротив, на практике обычно применяются интерполяционные операторы, работа которых полагается «удовлетворительной», например, линейные:

$$B_l^*(m_i, n_l) = - \sum_{M, N \in Z} B_l(M, N) \rho(m_i - M) \rho(n_l - N), \tag{4}$$

где  $\rho(t)$  – ядро интерполяционного оператора. Например,  $\rho(t)$  для билинейной и бикубической интерполяции имеет вид

$$\rho_x(t) = \begin{cases} 1 - |t|, & |t| < 1, \\ 0, & |t| \geq 1, \end{cases}$$

$$\rho_k(t) = \begin{cases} 1 - 0.5|t| - t^2 + 0.5|t|^3, & |t| < 1, \\ 1 - 11/6|t| + t^2 - |t|^3/6, & 1 \leq |t| < 2, \\ 0, & |t| \geq 2. \end{cases} \tag{5}$$

Легко показать, что формула (1) является оптимальной в том смысле, что если отношения сигнал/шум (С/Ш) для изображений  $B_l$  одинаковы, то для  $D(x, y)$  С/Ш достигает максимума. Если известен уровень шума каждого чувствительного элемента в виде дисперсии  $\sigma_i^2(n_l)$ , то можно получить более качественный результат.

Из (4) следует, что вызванная шумом дисперсия интерполированного отчета

$$\sigma_i^2(m_i, n_l) = \sigma^2 [B_l^*(m_i, n_l)] = \sum_{N \in Z} \sigma_i^2(N) \rho^2(n_l - N) \sum_{M \in Z} \rho^2(m_i - M). \tag{6}$$

Тогда оптимальное решение в плане С/Ш комплексированного изображения дает формула:

$$B(m, n) = \sum_{l=1}^L w_l(m, n) B_l^*(m_i, n_l) / \sum_{l=1}^L w_l(m, n), \tag{7}$$

где  $w_l(m, n) = 1 / \sigma_i^2(m_i, n_l)$ .

Для использования (7) изображения  $B_l(m_i, n_l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ , должны быть предварительно с высокой точностью выровнены по яркости, иначе изменение весов по полю снимка проявится в виде амплитудной модуляции изображения  $D(x, y)$ . Впрочем, поскольку изображения от отдельных линеек содержат практически одинаковый сюжет, это легко сделать путем выравнивания гистограмм [1].

**Задача повышения пространственного разрешения**

Пусть теперь требуется повысить пространственное разрешение. Сразу заметим, что использование формул (2)-(3) не даёт нужного результата: шаг дискретизации в направлении опроса линейки слишком велик, поэтому интерполяция по (3) не корректна. Построим иной интерполяционный оператор, учитывающий дискретизацию сцены несколькими линейками. Вообще говоря, вид интерполяционного оператора и качество интерполяции зависит от способа геометрической трансформации изображения (по прямому закону или по обратному) [1]. Для простоты будем решать задачу интерполяции в плоскости изображения первой линейки (что соответствует обработке по обратному закону).

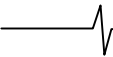
Будем считать, что чувствительные элементы линейки бесконечно малые. Конечные размеры пикселей эквиваленты включению НЧ - фильтра перед взятием выборок, поэтому в реальных системах возникает задача компенсации этих искажений. Эта задача в данной статье не рассматривается, некоторые подходы к её решению описаны в [4].

Рассмотрим плоскость  $(m, n)$ , где  $m = m_i$ ,  $n = n_l$ . Обозначим

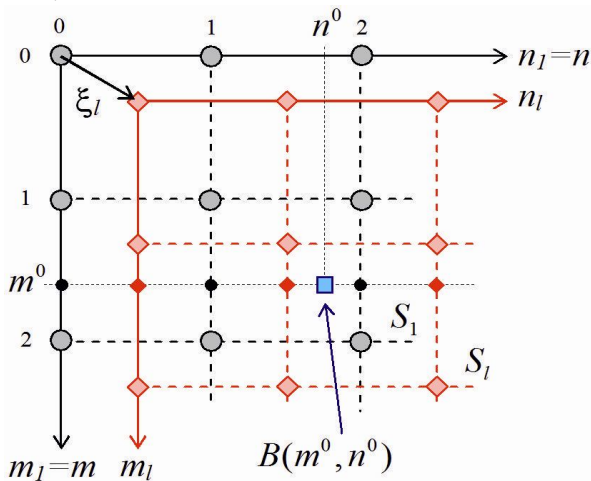
$$S_l = \left\{ (m, n) : m = F(F^{-1}(M, N), G^{-1}(M, N)), n = G(F^{-1}(M, N), G^{-1}(M, N)), M, N \in Z \right\}$$

– множество узловых точек, порожденных  $l$ -й линейкой в плоскости  $(m, n)$ . Ставится задача восстановить непрерывное изображение  $B(m, n)$  по его дискретным отчетам  $B_l$  в точках  $(m, n) \in S_l$ ,  $l = \overline{1, L}$ . В общем случае эта задача оказывается достаточно сложной и имеет лишь приближенное решение. Однако можно принять два допущения:

Во-первых, линейки одинаковы и опрашиваются с одной и той же частотой. Очевидно, это наиболее простой вариант построения аппаратуры датчика. Тогда сетки  $S_l$ ,  $l = \overline{1, L}$ , имеют одинаковый период.



Во-вторых, линейки расположены достаточно близко друг к другу в том смысле, что за интервал времени, когда крайние линейки фиксируют один и тот же сюжет, угол  $\alpha$  не успевает существенно измениться. Если линейки смещены всего на несколько (десятки) пикселей, то это допущение для реальных систем наблюдения всегда выполнено. Тогда в каждой локальной области сетки  $S_l$ ,  $l = \overline{1, L}$ , можно считать параллельными друг другу. В рамках этих допущений вид сеток  $S_l$  значительно упрощается. Рассмотрим фиксированную точку  $(m^0, n^0)$  и поставим задачу определения яркости  $B(m^0, n^0)$ . При интерполяции используются локальные операторы, поэтому существенна форма сеток  $S_l$  только вблизи  $(m^0, n^0)$ . Очевидно  $S_1 = Z^2$ . По введенным допущениям  $S_l \approx S_1 + \xi_l$  (рис. 2), где  $\xi_l$  – вектор плоскопараллельного сдвига, который можно определить как  $\xi_l = (\theta_l, \phi_l)$ ,  $\theta_l = m_l^0 - m_1^0$ ,  $\phi_l = n_l^0 - n_1^0$ ,  $m_l^0 = F_l(m^0, n^0)$ ,  $n_l^0 = G_l(m^0, n^0)$ . (8)



- отсчеты  $B_1$     ◆ отсчеты  $B_l$
- интерполированные отсчеты  $B_1(n_1)$
- ◆ интерполированные отсчеты  $B_l(n_1)$

Рис. 2. Отсчеты в плоскости  $(m, n)$

Пусть в направлении сканирования требуемое разрешение обеспечивается выбором частоты опроса линеек, а задача повышения разрешения ставится только в направлении опроса линеек (в действительности повысить частоту опроса гораздо проще, чем изготовить линейку с большим числом элементов). Тогда интерполяция в направлении сканирования корректна, например, функция

$$B_l^*(m_l, n_l) = \sum_M B_l(M, n_l) \rho(m_l - M) \quad (9)$$

корректно определена для  $(m_l, n_l) \in R \times Z$ , где  $R$  – множество вещественных чисел. Отсюда следуют два следствия.

**Первое.** Наличие сдвигов  $\theta_l$  сеток дискретизации в направлении сканирования никак не влияет на качество интерполяции. Это важно для аппаратной реализации,

так как позволяет выбирать частоту опроса линеек без строгого согласования со скоростью сканирования. Заметим, что при оптимальном выборе частоты интерполяция вообще не требуется.

**Второе.** Задача интерполяции сводится к одномерной на суперпозиции сеток  $s_l = Z + \varphi_l$ ,  $l = \overline{1, L}$ , (см. рис. 2). Возможность и алгоритм её решения зависит от конкретных значений сдвигов  $\varphi_l$ .

Для расположения линеек, показанном на рис. 1, сдвиги  $\varphi_l = (l-1)(M + \Delta \sin \alpha)$ . То есть субпиксельный сдвиг линеек  $M$  и ненулевой угол сноса приводят к одинаковым результатам. Для повышения пространственного разрешения обычно линейки устанавливаются со сдвигом  $M = 1/L$ , однако тот же результат можно достичь при  $M = 0$  и угле сноса  $\alpha = \arcsin [1/(\Delta L)]$ . Это дает реальную возможность решения задачи повышения пространственного разрешения в системах ДЗЗ, в которых субпиксельное смещение линеек изначально не предусмотрено (например, в гиперспектральной аппаратуре).

Наиболее просто задача повышения разрешения решается, когда отсчеты располагаются равномерно:  $\varphi_l = (l-1)/L$  при  $M + \Delta \sin \alpha = 1/L$ . В общем случае отсчеты располагаются группами по  $L$  равноотстоящих отсчетов, рис. 3.

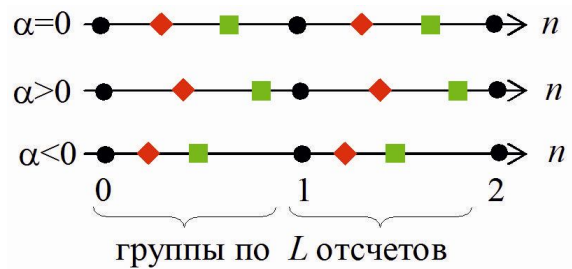


Рис. 3. Расположение отсчетов в зависимости от угла сноса ( $L=3, M=1/L$ )

Сначала построим интерполяционный оператор для равномерных отсчетов. Поскольку  $\rho(t)$  – ядро интерполяционного оператора на единичной сетке, то  $\rho(Lt)$  – ядро интерполятора для сетки с шагом  $1/L$ . Соответственно восстановление изображения выполняется как

$$B(m^0, n^0) = \sum_{l=1}^L \sum_N B_l^*(m_l^0, N) \rho(L(n^0 - N - \phi_l)) = \sum_{l=1}^L \sum_N B_l^*(m_l^0, N) \rho(L(n_l^0 - N)). \quad (10)$$

Интересно отметить, что (9), (10) отличаются от (4) только наличием множителя  $L$ .

При  $\alpha \neq 0$  формула (10) не применима: во-первых, она не оптимальна, а во вторых, не корректно интерполирует даже поле постоянной яркости. Последний дефект можно исправить нормировкой:

$$B(m^0, n^0) = \frac{1}{w} \sum_{l=1}^L \sum_N B_l^*(m_l^0, N) \rho(L(n_l^0 - N)), \quad w = \sum_{l=1}^L \sum_N \rho(L(n_l^0 - N)). \quad (11)$$

Однако необходимое  $w > 0$  гарантировано только при  $L = 2$  и линейного  $\rho$ .

Формулу (11) можно использовать при не слишком значительных величинах  $\alpha$ . Её достоинство в том, что используется уже имеющийся интерполяционный оператор. Однако это приближенное решение.

В работе [5] показано, что теорема, аналогичная теореме Котельникова, справедлива и для неравномерных отчетов при условии общего сохранения их плотности. Там так же получены формулы для интерполяционного оператора, обеспечивающего точное восстановление сигнала с финитным спектром. Применительно к рассматриваемой задаче это означает: если сетки  $s_l$ ,  $l = \overline{1, L}$ , попарно различны, то можно повысить разрешение ровно в  $L$  раз (в том смысле, что верхняя пространственная частота изображения может быть выше в  $L$  раз при сохранении условия восстановимости изображения).

Однако использовать практически операторы из [5] нельзя: они имеют бесконечный носитель. Поэтому используем для синтеза интерполяционного оператора следующую аналогию. В практике обработки изображений для случая равномерных отчетов вместо идеального восстанавливающего ФНЧ используют полиномиальную аппроксимацию функции в окрестности восстанавливаемой точки. Будем также аппроксимировать дискретные отсчеты полиномом вблизи  $n^0$ . Тут возможны различные варианты, поскольку расположение отсчетов вокруг  $n^0$  имеет сложный характер. Однако именно ближайшие  $2L$  отсчетов обладают полезным свойством:  $L$  отсчетов располагаются слева от  $n^0$  и ровно  $L$  справа.

Введем полином  $P(d) = \sum_{i=0}^{2L-1} a_i d^i$  и определим его коэффициенты из системы  $2L$  уравнений:

$$\begin{cases} P(\lfloor n_l^0 \rfloor - n_l^0) = B_l^*(m_l^0, \lfloor n_l^0 \rfloor), l = \overline{1, L}; \\ P(\lfloor n_l^0 \rfloor + 1 - n_l^0) = B_l^*(m_l^0, \lfloor n_l^0 \rfloor + 1), l = \overline{1, L}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\lfloor t \rfloor$  – максимальное целое, не превосходящее  $t$ . Тогда значение полинома  $P(0)$  есть восстановленное значение яркости:  $B(m^0, n^0) = P(0)$ . Если разности  $\lfloor n_l^0 \rfloor - n_l^0$  попарно различны, то система (12) имеет единственное решение (её определитель есть определитель Вандермонда). В противном случае задача повышения разрешения в  $L$  раз неразрешима (на практике это редкий случай, а при разумных ограничениях на  $\alpha$  даже невозможный).

В вычислительном отношении эффективнее рассчитывать  $P(0)$  по интерполяционной формуле Лагранжа:

$$P(0) = \sum_{i=0}^{2L-1} B_i \prod_{i \neq t} [d_i / (d_i - d_t)], \quad (13)$$

где  $B_i, d_i$ ,  $t = \overline{0, 2L-1}$ , – аргументы полинома и его эталонные значения из (12).

Описанной процедуре также соответствует некоторый линейный интерполяционный оператор. На рис. 4

показаны импульсные характеристики этих операторов для  $L = 2$ ,  $\varphi_1 = 0.5$  и  $\varphi_1 = 0.3$ , а также для сравнения – идеальные фильтры из [5].

К сожалению, свойства интерполяционных операторов выше третьего порядка плохо исследованы даже для равномерного расположения отчетов.

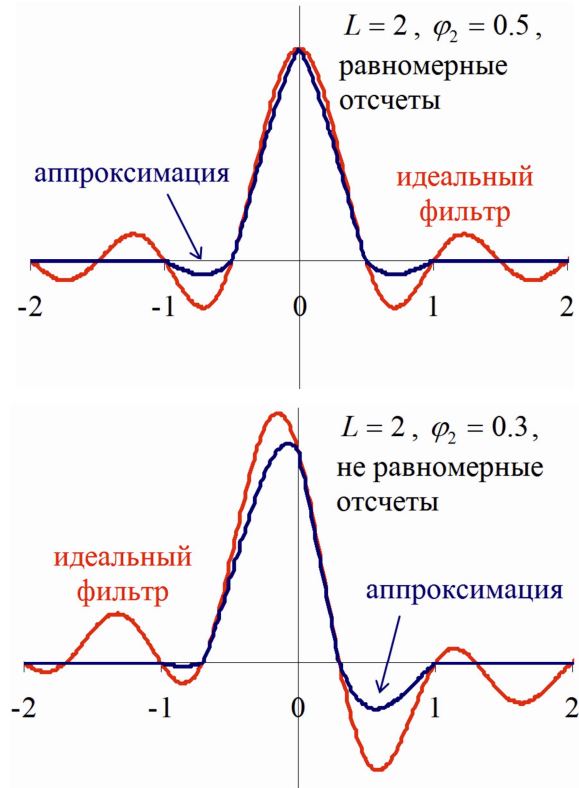


Рис. 4. Отклик идеального фильтра и его аппроксимация по (12)

### Задача одновременного повышения радиометрического и пространственного разрешений

Часто необходимо повысить разрешение в  $1 < K < L$  раз, а оставшуюся избыточность использовать для повышения радиометрического разрешения, т.е. отношения С/Ш. Общий подход может быть таким: разобьем линейки на группы по  $K$  линеек. В пределах каждой группы решим задачу повышения пространственного разрешения. Затем усредним  $L/K$  полученных результатов. Это показывает разрешимость задачи, по крайней мере при целых  $L/K$ .

Однако на практике удобнее обойтись без явного разбиения на группы. Так, в формуле (11) достаточно в аргументе функции  $\rho$  заменить множитель  $L$  коэффициентом  $K$ . В этом случае усреднение выполняется автоматически. Это также положительно отразится на работе интерполяционного оператора (11).

Формулу (12) также легко приспособить для одновременного решения задачи усреднения. В данном случае необходимо понизить в (12) порядок полинома с  $2L-1$  до  $2K-1$ . Тогда система (6) станет переопределенной и её необходимо решать по МНК; повышение радиометрического разрешения достигается за счет фильтрующих свойства МНК.



### Экспериментальное исследование

Выполнена апробация рассмотренных выше алгоритмов на тепловых изображениях от космической системы «Электро-Л». На рис. 5 представлены фрагменты восстановленного изображения в области сильных геометрических искажений ( $\alpha \approx 4.6^\circ$ ,  $\varphi_2 \approx 0.34$ ): А – изображение только от одной линейки (после интерполяции на более частой сетке); Б – результат объединения изображений от пары линеек по формуле (2); В – результат комплексирования по (11) для  $L = K = 2$ ; Г – изображение, полученное по алгоритму (12). Сопоставляя А и Б, видим, что повышения пространственного разрешения не происходит, хотя радиометрическое улучшилось.

Изображение В имеет лучшее пространственное разрешение по отношению к А и Б, однако на В присутствуют артефакты (если  $\alpha$  мал, они не возникают). Изображение Г в условиях геометрических искажений оказывается наиболее качественным.

### Литература

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. М. Физматлит, 2006. 288 с.
2. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москатиньев И.В. Геометрическая обработка данных от кос-

мических систем глобального наблюдения земли. // Вестник РГРТУ, 2009. №1. С. 12-17.

3. Гектин Ю.М., Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Зенин В.А., Москатиньев И.В. Нормализация изображений от геостационарной космической системы наблюдения Земли. // Цифровая обработка сигналов, 2011. №3. С. 28-32.

4. Москвитин А.Э. Технологии и алгоритмы повышения качества изображений земной поверхности на основе комплексирования спектрально-видеоинформации. Дисс. канд. тех. наук, Рязань, 2003. 130 с.

5. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. Изд. 2. М. Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 416 с.

### IMAGE FUSION FROM PHOTODETECTORS LINES IN CASE OF GEOMETRIC DISTORTION

*Eremeev V.V., Egoshkin N.A., Moskvitin A.E.*

Presents models and algorithms for aggregation of images from subpixel shifted photodetector arrays to increase the spatial and radiometric energy resolution in geometric distortion of the observed scene.

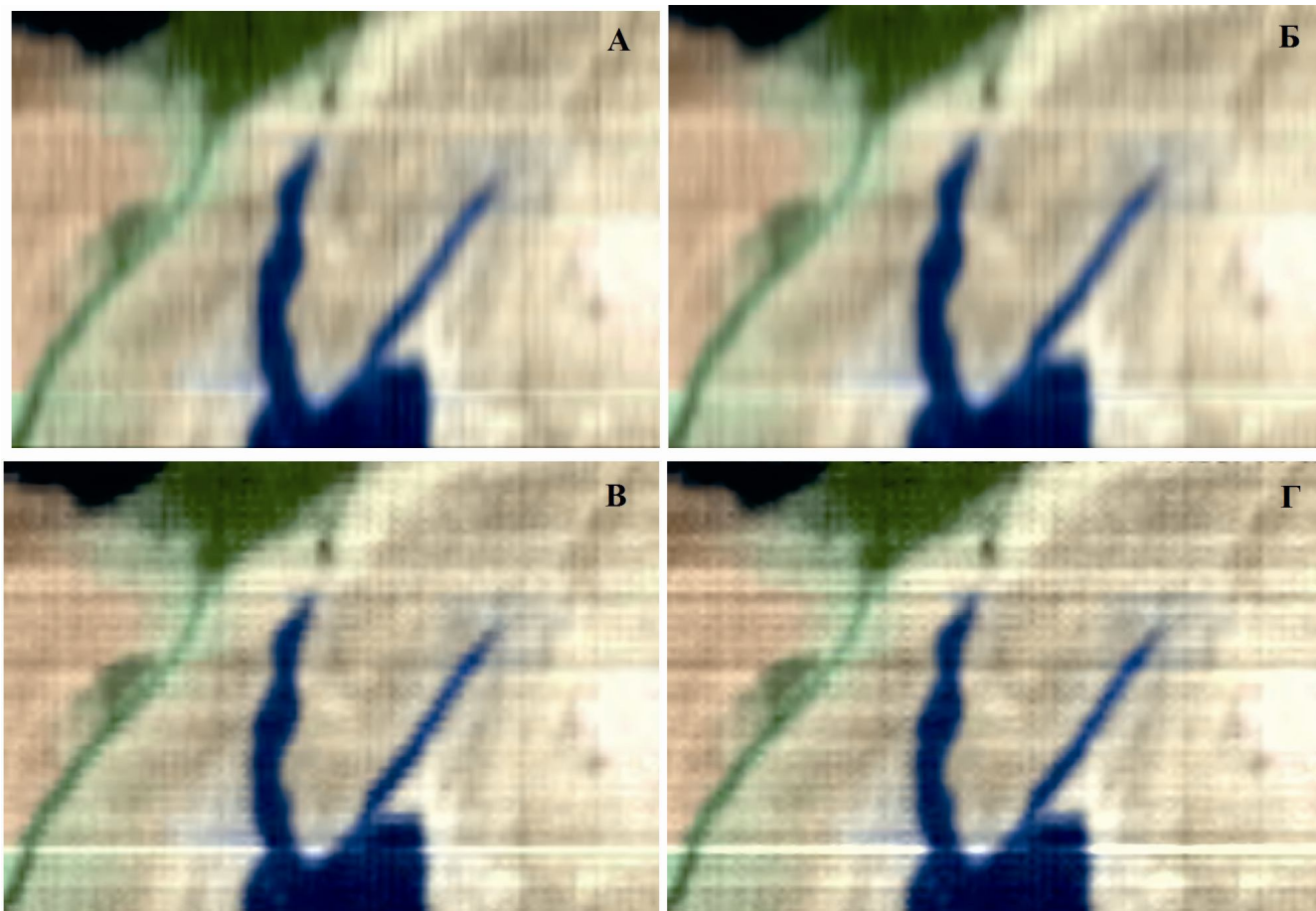


Рис. 5. Исходное изображение от одной линейки (А) и результаты комплексирования изображений от пары линеек различными алгоритмами (Б, В, Г)