# Синтез многоспектральных изображений различного пространственного разрешения с использованием для регуляризации библиотечных спектров объектов

**Б.С.** Жуков<sup>1</sup>, М.А. Попов<sup>2</sup>, С.А. Станкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru <sup>2</sup>Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины Киев, 01601, Украина, E-mail: st@casre.kiev.ua

Комплексная оценка характеристик поверхности и атмосферы Земли по результатам спутниковых наблюдений требует совместной обработки многосенсорных видеоданных, получаемых в различных спектральных диапазонах с различным пространственным разрешением. Задачу радиометрически верного синтеза многоспектральных изображений различного разрешения предлагается решать путём комбинирования двух ранее предложенных методов: метода MMT (Multisensor Multiresolution Technique) и метода синтеза по библиотечным спектрам. Метод ММТ основан на классификации изображений высокого разрешения (ВР), оценке спектральных сигнатур полученных классов в спектральных зонах низкого разрешения (НР) и использовании их для восстановления изображений в НР-зонах с размером пиксела ВР-изображения. Недостатком метода ММТ является ухудшение точности оценки сигнатур классов при уменьшении их площади. Для компенсации этого недостатка при применении метода ММТ предлагается проводить регуляризацию с помощью НР-изображения, восстановленного методом синтеза по библиотечным спектрам. Этот метод основан на совместной классификации ВР- и НР-изображений с использованием библиотечных спектров природных и антропогенных объектов и присвоении ВР-пикселам взвешенных НР-сигнатур соответствующих классов. Возможности комбинированного метода проиллюстрированы на примере синтеза изображений, полученных спектрорадиометром ASTER на КА Тегга в каналах видимого и ближнего ИК (VNIR) диапазонов с разрешением 15 м и в каналах коротковолнового ИК (SWIR) диапазона с разрешением 30 м. Показано, что комбинированный метод позволяет восстановить SWIR-изображения с лучшей резкостью, чем исходное и регуляризующее изображения, уменьшить ошибки оценки спектральных сигнатур классов малой площади, возникающие при применении метода ММТ без регуляризации, и извлечь из данных новую информацию, не содержащуюся в библиотечных спектрах.

**Ключевые слова:** методы повышения резкости изображения, синтез многосенсорных данных, метод ММТ, метод синтеза по библиотечным спектрам, спектрорадиометр ASTER.

## Введение

При дистанционном зондировании Земли комплексная оценка характеристик поверхности и атмосферы, которые проявляются в различных спектральных диапазонах, требует одновременного использования видеоданных, получаемых различными съёмочными системами - от видимого до микроволнового диапазонов. Среди современных космических съёмочных систем наиболее высокое пространственное разрешение от долей метра до нескольких десятков метров, требуемое для зондирования суши, могут обеспечить лишь панхроматические/многоспектральные сканеры видимого и ближнего ИК (VNIR) диапазонов и радиолокаторы с синтезированной апертурой. С другой стороны, применимость таких перспективных съёмочных систем как многоспектральные сканеры коротковолнового (SWIR), среднего (MIR) и теплового (TIR) ИК диапазонов, видеоспектрометры и микроволновые радиометры ограничивает их низкое пространственное разрешение (от десятков и сотен метров для SWIR-MIR-TIR многоспектральных систем и VNIR-SWIR видеоспектрометров до десятков километров для микроволновых радиометров), приводящее к ситуации, когда большинство или даже все пикселы в изображениях, полученных этими приборами, содержат несколько различных классов объектов, т.е. являются "смешанными".

В связи с этим возникает проблема синтеза многосенсорных видеоданных различного пространственного и спектрального разрешения с тем, чтобы органически совместить детальную пространственную информацию, содержащуюся в данных съёмочных систем высокого пространственного разрешения, и дополнительную спектрорадиометрическую информацию, которая содержится в данных съёмочных систем более низкого пространственного разрешения.

Для синтеза изображений высокого и низкого разрешения предложены различные методы, позволяющие перенести пространственную информацию высокого разрешения в данные низкого разрешения - sharpening techniques (Шовенгердт, 2010). В большинстве случаев эти методы имеют целью получение синтезированных изображений высокого визуального качества, даже за счет потери их радиометрической точности. Для реализации радиометрически верного синтеза, который необходим для количественного анализа получаемой информации, в работе (Zhukov et al., 1999) предложен метод MMT (Multisensor Multiresolution Technique). Метод MMT основан на классификации изображений высокого разрешения (BP), оценке спектральных сигнатур полученных классов в спектральных зонах с размером пиксела ВР-изображений. Недостатком этого метода является ухудшение точности оценки сигнатур классов при уменьшении их площади. Для повышения точности оценки сигнатур малых классов предлагается скомбинировать метод MMT с методом синтеза HP- и BP-изображений на основе классификации по библиотечным спектрам объектов (Попов и др., 2006).

Хотя метод ММТ не накладывает ограничений на спектральный диапазон обрабатываемых изображений, использование библиотечных спектров ограничивает применимость комбинированного подхода VNIR- и SWIR-диапазонами (длины волн короче ~3 мкм), в которых собственным излучением Земли можно пренебречь.

Предполагается, что предварительно проведена абсолютная радиометрическая коррекция ВР- и НР-изображений.

Ниже приводятся описание предлагаемого комбинированного метода и дается пример его применения для синтеза многоспектральных изображений, полученных спутниковым спектрорадиометром ASTER в каналах VNIR- и SWIR-диапазонов (Abrams et al., 2002).

# Метод ММТ



Рис. 1. Иллюстрация метода ММТ на примере синтеза изображений, полученных многоспектральным сканером высокого разрешения (BP) и видеоспектрометром низкого разрешения (HP)

Метод ММТ включает следующие основные этапы (рис. 1):

1. Классификация ВР-изображений. На первом этапе осуществляется классификация многоспектральных ВР-изображений, в результате чего получается классификационная карта k(u,v), где каждому ВР-пикселу (u,v) присвоен код k соответствующего ему класса. В зависимости от стоящей задачи для классификации могут использоваться различные алгоритмы классификации с обучением или без обучения. Каждому классу соответствует его спектральная сигнатура в ВР-зонах (ВР-сигнатура).

2. Определение вклада классов в сигналы НР-пикселов. Вклад  $c_j(U,V;k_0)$  класса  $k_0$  в сигнал  $I_j(U,V)$  пиксела (U,V) в НР-канале *j* находится с учетом определяемой по классификационной карте доли площади, занимаемой этим классом в пикселе (U,V), и функции рассеяния точки (ФРТ) НР-канала:

$$c_j(U,V;k_0) = \sum_{k(u,v)=k_0} \rho_j(U,V;u,v) ,$$

где нормализованная функция рассеяния точки  $\rho_j(U,V;u,v)$  характеризует вес, с которым сигнал от участка, соответствующего пикселу (u,v), вносит вклад в сигнал пиксела (*U*,*V*) в НР-канале *j*. Предполагается, что ФРТ учитывает все эффекты, влияющие на разрешение НР-данных, включая эффект геометрической трансформации данных при совмещении изображений. Обычно ФРТ аппроксимируется гауссовой функцией.

3. Оценка НР-сигнатур классов. НР-сигнатуры классов  $S_j(k)$ , усреднённые по площади соответствующего класса на обрабатываемом фрагменте изображения, оцениваются независимо в каждом НР-канале путём обращения методом наименьших квадратов системы уравнений модели линейной смеси:

$$I_{j}(U,V) = \sum_{k=1}^{K} c_{j}(U,V;k) S_{j}(k) + \varepsilon_{j}(U,V) , \qquad (1)$$

где  $\varepsilon_j(U,V)$  – ошибка модели линейной смеси, включающая как приборные ошибки (радиометрический шум, ошибки геометрического совмещения данных и др.), так и эффекты спектральной неоднородности классов в НР-каналах.

Как показано в работе (Zhukov et al., 1999), ошибки оценки HP-сигнатур классов обратно пропорциональны корню квадратному из площади класса. Для того, чтобы уменьшить ошибки восстановления HP-сигнатур малых классов, при решении системы уравнений (1) рекомендуется использовать методы регуляризации. Регуляризация может быть выполнена с использованием целевой функции:

$$F = \sum_{U,V} \left( I_j(U,V) - \sum_{k=1}^{K} c_j(U,V;k) S_j(k) \right)^2 + \alpha \frac{N_{pix}}{K} \sum_{k=1}^{K} \left( S_j(k) - S_j^0(k) \right)^2 , \qquad (2)$$

где первый член представляет собой сумму квадратов ошибок модели (1), а второй член, являющийся регуляризующим, - сумму квадратов отклонений искомых HP-сигнатур классов  $S_j(k)$  от их наперёд заданных «регуляризующих» HP-сигнатур  $S_j^0(k)$ . Коэффициент регуляризации  $\alpha$  характеризует соотношение априорной информации, содержащейся регуляризующих HP-сигнатурах классов  $S_j^0(k)$ , и новой информации, содержащейся в фактических измерениях  $I_j(U,V)$ . Коэффициент  $N_{pix}/K$  учитывает различие количества членов в первой и второй сумме в соотношении (2) и делает определение коэффициента регуляризации более инвариантным к выбору числа классов. Решение, минимизирующее функционал (2), имеет вид:

$$\widetilde{\mathbf{S}}_{j} = \mathbf{A}_{j}^{-1} \mathbf{b}_{j}, \qquad (3)$$

где: 
$$\widetilde{\mathbf{S}}_{j} = \left\{ \widetilde{S}_{j}(m) \right\},$$
 (4)

$$\mathbf{A}_{j} = \left\{ A_{j}(m,m') = \sum_{U,V} c_{j}(U,V;m) c_{j}(U,V;m') + \alpha \frac{N_{pix}}{K} \delta(m,m') \right\},$$
(5)

53

$$\mathbf{b}_{j} = \left\{ b_{j}(m) = \sum_{U,V} c_{j}(U,V;m) H_{j}(U,V) + \alpha \frac{N_{pix}}{K} S_{j}^{0}(k) \right\},$$
(6)

 $\delta(m, m')$  – единичная матрица:  $\delta(m, m')$  равна 0, если m = m', и равна 1 в противном случае.

Из структуры выражений (5) и (6) следует, что регуляризация оказывает тем меньший эффект на оценку НР-сигнатуры класса, чем больше его площадь. Для больших классов она мало влияет на оценки их НР-сигнатур, а для малых классов с площадью меньше площади НР-пиксела регуляризация не допускает их больших отклонений от регуляризующей НР-сигнатуры.

Совокупность ВР- и НР-сигнатур классов образует их синтезированную сигнатуру, т.е. совокупность сигналов классов во всех имеющихся спектральных каналах.

4. Восстановление изображений в НР-каналах с размером пиксела ВРизображения. Изображение в НР-каналах с размером пиксела ВР-изображения оценивается путем присвоения ВР-пикселам классификационной карты НР-сигнатур соответствующих классов:

$$\widetilde{I}_{i}(u,v) = S_{i}(k(u,v)) .$$
<sup>(7)</sup>

Отличие изображения (7) от изображения, которое могло бы быть получено воображаемой съёмочной системой, имеющей спектральные каналы НР и пространственное разрешение ВР, состоит в том, что в (7) НР-сигнатура постоянна в пределах каждого класса. В изображении, которое могло бы быть получено указанной воображаемой системой, возможны также внутриклассовые вариации НР-сигнатур, поскольку классы, которые кажутся однородными в ВР-каналах, могут не являться однородными в НР-каналах.

Для того, чтобы избежать усреднения НР-сигнатур по всей площади классов на изображении, этапы (2-4) алгоритма применяется не ко всему изображению одновременно, а последовательно к его отдельным фрагментам, используя "движущееся окно" (например, на *рис. 1* показано окно 3×3 НР-пиксела). При этом окно перемещается по геометрически совмещенным классификационной карте и НР-изображению с шагом 1 НР-пиксел в каждом направлении и при каждом положении окна проводится оценка НР-сигнатур представленных в этом окне классов с использованием только НР-пикселов этого окна. Восстановленное ВР-изображение сохраняется в пределах центрального НР-пиксела в окне. После сдвига окна на 1 НР-пиксел восстановленное НР-изображение сохраняется в пределах следующего НР-пиксела и т.д.

Для того, чтобы гарантировать, что при загрублении восстановленного HPизображения до исходного разрешения будет получено исходное HP-изображение, решение методом наименьших квадратов системы уравнений (1) следует проводить при условии сохранения HP-сигнала центрального пиксела в окне ( $U_0, V_0$ ):

$$I_{j}(U_{0},V_{0}) = \sum_{k=1}^{K} c_{j}(U_{0},V_{0};k)S_{j}(k) .$$
(8)

Решение задачи минимизации целевой функции (2) при условии (8) имеет вид (Худсон, 1970):

$$\widetilde{\mathbf{S}}_{j}^{c} = \widetilde{\mathbf{S}}_{j} + \left(\mathbf{A}_{j}^{-1}\mathbf{c}_{0j}\right) \cdot \left(\mathbf{c}_{0j}^{T}\mathbf{A}_{j}^{-1}\mathbf{c}_{0j}\right)^{-1} \cdot \left(I_{j}\left(U_{0}, V_{0}\right) - \mathbf{c}_{0j}^{T}\widetilde{\mathbf{S}}_{j}\right),$$

$$(9)$$

где  $\widetilde{\mathbf{S}}_{j}$  – вектор сигналов классов в НР-канале *j* в случае, когда условие (8) не используется, матрица  $\mathbf{A}_{j}$  по прежнему определяется по соотношению (5),  $\mathbf{c}_{0j} = \{c_{j}(U_{0}, V_{0}; k)\}$  – вектор пропорций классов в центральном НР-пикселе окна.

Поскольку при восстановлении HP-изображения из каждого окна изображение сохраняется только в пределах площадки, покрываемая центральным HP-пикселом, в восстановленном HP-изображении будет обеспечено выполнение условия (8) для всех HPпикселов.

Вариант метода, где решение системы уравнений (2) проводится при условии (8), назван консервативным синтезом, в отличие от неконсервативного синтеза, где условие (8) не используется. При малом уровне шума лучшие результаты дает консервативный синтез, а при большом шуме – неконсервативный синтез, позволяющий фильтровать шум при сохранении резкости восстановленного НР-изображения (Zhukov et al., 1999).

В данной работе предлагается находить регуляризующие спектры классов  $S_j^0(k)$  в соотношении (2) по HP-изображению, восстановленному методом синтеза по библиотечным спектрам.

# Метод синтеза по библиотечным спектрам

Метод синтеза ВР- и НР-изображений по библиотечным спектрам включает следующие этапы:

 распознавание спектральных сигнатур объектов в пределах сцены по ВР- и НРизображениям;

• ресэмплирование спектральных сигнатур в НР-каналах на сетку ВР-изображения;

• коррекция HP-сигнатур BP-пикселов на основе классификации с наложением ограничения на искажение сигнала в пикселах HP-изображения.

Для объекта сцены с известным коэффициентом спектральной яркости (КСЯ)  $\rho(\lambda)$  можно найти его спектральную сигнатуру  $\rho_j$  для любого *j*-го спектрального канала с функцией спектральной чувствительности  $s_i(\lambda)$  как

$$\rho_{j} = \int s_{j}(\lambda) \,\rho(\lambda) \,d\lambda \,\bigg/ \int s_{j}(\lambda) \,d\lambda \,\,. \tag{10}$$

Яркость *I<sub>j</sub>* в *j*-ом спектральном канале калиброванного многоспектрального изображения примерно равна:

$$I_j \cong b_j \rho_j \,, \tag{11}$$

где *b<sub>j</sub>* – коэффициент, зависящий от освещенности поверхности и прозрачности атмосферы в *j*-ом спектральном канале. При этом пренебрегается яркостью атмосферной дымки. Ниже это приближение используется для SWIR-диапазона, где яркость дымки составляет не более 5-10% от яркости суши, однако может быть сравнима с яркостью воды.

Для исходного многоспектрального HP-изображения должно выполняться ограничение на неискажение сигналов пикселов в каждом *j*-ом спектральном канале:

$$I_{j} = \frac{b_{j}}{n_{j}} \sum_{i=1}^{n_{j}} \rho_{j}^{i} \quad .$$
 (12)

где *n<sub>j</sub>* – количество пикселов многоспектрального ВР-изображения, соответствующих одному пикселу многоспектрального НР-изображения.

Для классификации объектов сцены может быть использован любой из известных методов (King, 2002; Franklin, Wulder, 2002). После проведения классификации становится возможным определить спектральные сигнатуры объектов для произвольных спектральных каналов. Таким путем описывается сложная нелинейная зависимость между сигналами от одного и того же объекта в разных спектральных каналах, как показано на *puc. 2*.



Рис. 2. Привлечение дополнительной информации о спектре объекта из библиотеки

Необходимая последовательность операций выравнивания разрешения многоспектральных изображений на основе классификации по библиотечным спектрам описывается схемой на *puc. 3*.



Рис. 3. Порядок операций при синтезе многоспектральных изображений (МСИ) методом библиотечных спектров

В исходном наборе многоспектральных ВР- и НР-изображений каждому пикселу НР-изображения поставлены в однозначное соответствие несколько пикселов ВРизображения. По результатам предварительного анализа сцены из спектральной библиотеки выбираются необходимые спектры объектов. Выбранные спектры пересчитываются в спектральные сигнатуры съёмочной аппаратуры (10). На основе геометрического соответствия между пикселами ВР- и НР-изображений НР-изображение ресэмплируется на сетку ВР-изображения.

Далее для каждого пиксела совмещенных ВР-изображения и ресэмплированного НР-изображения производится т. н. "мягкая" (с определением вероятностей всех конкурирующих классов) классификация спектральной сигнатуры на основе библиотечных спектральных сигнатур объектов сцены. По результатам классификации выполняется коррекция НР-сигнатуры каждого пиксела ресэмплированного НР-изображения путём присвоения ему НР-сигнатуры соответствующих объектов из библиотеки, взвешенной с учетом их вероятности, так, чтобы для пикселов скорректированного ресэмплированного НРизображения выполнялось условие (12).

В результате коррекции получается восстановленное HP-изображение, которое используется далее как регуляризующее в методе ММТ.

# Пример применения комбинированного метода синтеза изображений

Комбинированный метод применялся для синтеза изображений крымского побережья в районе г. Алушты, полученных многоспектральным спектрорадиометром ASTER космического аппарата Terra 12.08.2005 в трёх VNIR-каналах 0,556, 0,661 и 0,807 мкм с разрешением 15 м (ВР-изображение, *puc. 4*) и в шести SWIR-каналах 1,656, 2,167, 2,209, 2,262, 2,336 и 2,400 мкм с разрешением 30 м (НР-изображение, *puc. 5*). При применении алгоритма ММТ использовался консервативный синтез при размере движущегося окна 3×3 пиксела.



Рис. 4. Изображение района г. Алушта, полученное ASTER в каналах VNIR-диапазона с разрешением 15 м (R – 0,661 мкм, G – 0,807 мкм, B – 0,556 мкм)



Рис. 5. Изображение района г. Алушта, полученное ASTER в SWIR-каналах с разрешением 30 м (R – 1,656 мкм, G – 2,209 мкм, B – 2,336 мкм)

Для классификации объектов сцены было отобрано 12 типовых спектров растительности, почв, водных поверхностей и искусственных покрытий в спектральном диапазоне  $\lambda = 0,3...3,0$  мкм (*рис. 6*) из спектральной библиотеки ASTER Spectral Library (Baldridge et al., 2009). "Мягкая" классификация с вычислением вероятностей принадлежности текущей сигнатуры всем возможным классам проводилась методом информационной дивергенции (Станкевич, 2006). По ее результатам путем слияния результатов "мягкой" классификации по методу максимального правдоподобия получена классификационная карта (*рис. 7*), по которой в алгоритме ММТ вычислялись пропорции классов в пикселах исходного SWIR-изображения. Результаты «мягкой» классификации использовались также при восстановлении SWIR-изображения методом синтеза по библиотечным спектрам (*рис. 8*). Это изображение рассматривалось как регуляризующее – по нему в алгоритме MMT вычислялись регуляризующие SWIR-сигнатуры классов  $S_i^0(k)$  в каждом окне.



Рис. 7. Классификационная карта с размером пиксела 15 м, построенная по изображениям на рис. 4 и рис. 5



Рис. 8. Изображение района г. Алушта в SWIR-каналах ASTER с размером пиксела 15 м, восстановленное методом синтеза по библиотечным спектрам (R – 1,656 мкм, G – 2,209 мкм, B – 2,336 мкм)

Результат применения метода ММТ зависит от выбранного значения регуляризационного параметра *α*. С одной стороны, значение параметра *α* нужно выбирать как можно меньшим, чтобы максимально использовать новую информацию, содержащуюся в данных. С другой стороны, оно должно быть достаточным для устранения больших ошибок оценки спектральных сигнатур малых классов. При этом улучшается визуальное качество восстановленного изображения, хотя оценки сигнатур таких классов остаются ненадежными, и их не рекомендуется использовать для количественной тематической интерпретации. Определить пикселы восстановленного НР-изображения, спектральные сигнатуры которого являются ненадежными, можно либо используя оценки ошибок сигнатур по остаткам модели линейной смеси (2), либо анализируя чувствительность оценок сигнатур к регуляризации.

Очень чувствительными к регуляризации являются сигнатуры классов, доля площади которых в окне не превышает ~10%. Для них регуляризация даже с малыми (существенно меньшими 1) значениях параметра  $\alpha$  приводит к значительным изменениям оценок сигнатур, которые приближается к сигнатурам классов на регуляризующем изображении. Сигнатуры классов, занимающих в окне бо́льшую площадь, наоборот, слабо чувствительны к регуляризации с значениями  $\alpha$  меньше ~1. В работе (Zhukov et al., 1999) на основе анализа модельных изображений показано, что наилучшая точность восстановления НР-изображения обеспечивается при  $\alpha \sim 0,5$ .

На практике параметр *α* можно рекомендовать повышать до тех пор, пока происходит существенный рост числа пикселов, для которых регуляризация приводит к значительному изменению сигнатур. В качестве значимого изменения сигнатур можно, например, принять изменение яркости хотя бы в одном канале на 5% по отношению к случаю, когда ММТ-метод применяется без регуляризации (т.е. при  $\alpha = 0$ ). Указанное изменение примерно соответствует точности абсолютной радиометрической калибровки современных космических съёмочных систем (Arai et al., 2011). *Рис. 9* показывает, что значение  $\alpha \sim 0,5$  является оптимальным и в данном случае, поскольку при большем значении  $\alpha$  рост числа пикселов, яркость которых изменяется более, чем на 5%, резко замедляется. Выбрав  $\alpha = 0,5$ , получим, что доля пикселов, для которых хотя бы в одном спектральном канале изменение яркости превышает 5%, составило около 10% от общего числа пикселов на изображении. Оценки SWIR-сигнатур таких пикселов следует считать ненадежными.



Рис. 9. Доля пикселов, изменение яркости которых хотя бы в одном SWIR-канале ASTER в результате регуляризации превышает 5% (сплошная кривая) и 10% (пунктирная кривая), в зависимости от параметра регуляризации α



Рис. 10. Изображение района г. Алушта в SWIR- каналах ASTER с размером пиксела 15 м, восстановленное методом ММТ без регуляризации (R – 1,656 мкм, G – 2,209 мкм, B – 2,336 мкм)

При ослаблении требования к постоянству яркости до 10% доля "недостоверных пикселов" уменьшается до ~5%.

На *рис. 10* показано SWIR-изображение, восстановленное методом MMT без регуляризации. Недостоверные пикселы видны, в частности, как тёмные точки, лежащие на резких границах объектов и особенно в районе городской застройки. При  $\alpha = 0,5$  эти точки исчезают, причем резкость восстановленного SWIR-изображения ухудшается незначительно и остается лучше, чем у исходного и регуляризующего SWIR-изображений (*рис. 11*).



Рис. 11. Изображение района Алушты в SWIR-каналах ASTER с размером пиксела 15 м, восстановленное комбинированным методом с коэффициентом регуляризации 0,5 (R – 1,656 мкм, G – 2,209 мкм, B – 2,336 мкм)

Для количественной оценки резкости как исходных, так и восстановленных изображений использовались экспериментальные функции передачи модуляции (ФПМ), измеряемые по переходным характеристикам на контрастных границах крупноразмерных объектов, которые автоматически выделялись непосредственно на соответствующих тестовых изображениях при помощи специального программного обеспечения (Станкевич, Шолонік, 2007). Пример экспериментальных ФПМ приведен на *рис. 12.* Резкость изображений оценивалась как пространственная частота, на которой ФПМ уменьшается до 0,5. Результаты измерений резкости исходных изображений и изображений, восстановленных комбинированным методом, во всех SWIR-каналах ASTER содержатся в *табл. 1*.



Рис. 12. Функции передачи модуляции изображений ASTER в SWIR-канале 1,656 мкм: A – исходного изображения, Б – изображения, восстановленного комбинированным методом; теоретическая ФПМ рассчитана по параметрам сенсора, экспериментальная ФПМ измерена по снимку, аппроксимированная ФПМ аппроксимирует экспериментальную ФПМ гауссовой функцией

Канал	Пространственная частота (мм <sup>-1</sup> ), на которой ФПМ = 0,5		Повышение
	исходное изображение	восстановленное изображение	резкости, раз
1,656 мкм	~7,5	~16	~2,13
2,167 мкм	~8,5	~14	~1,64
2,209 мкм	~8,0	~13	~1,62
2,262 мкм	~8,0	~13	~1,62
2,336 мкм	~8,0	~14	~1,75
2,400 мкм	~7,0	~15	~2,14
в среднем	~7,83	~14,17	~1,82

Таблица 1. Экспериментальные оценки резкости исходных SWIR-изображений ASTER и изображений, восстановленных комбинированным методом при *α* = 0,5

Как следует из *табл. 1*, значения экспериментальной ФПМ на уровне 0,5 соответствуют повышению резкости SWIR-изображений в среднем в 1,82 раза, что достаточно близко к формальному уменьшению размера пиксела SWIR-изображений в два раза.



Рис. 13. Средние синтезированные спектральные сигнатуры классов

Синтез изображений, полученных в VNIR и SWIR каналах, позволяет получить синтезированные спектральные сигнатуры классов во всем VNIR-SWIR диапазоне. Сигнатуры классов, усреднённые по площади классов на всем изображении, которые получены по регуляризующему и восстановленному комбинированным методом изображениям, практически совпадают (*puc. 13*). В то же время, комбинированный метод позволил уточнить распределение сигнатур в пределах принятых библиотечных классов, что показывает

приведенное на *рис. 14* распределение среднеквадратической разности зональных яркостей восстановленного и регуляризующего изображений, вычисленное для отдельных классов. В среднем по изображению это уточнение составляло 7-10% в зависимости от спектральной зоны, однако для отдельных классов может достигать 20-25%. Эту величину можно считать оценкой доли новой информации в восстановленном комбинированным методом SWIR-изображении по сравнению с информацией, которую содержат априорные библиотечные спектры.



Рис. 14. Относительное среднеквадратическое отклонение яркости пикселов, принадлежащих одному классу, между SWIR-изображениями, восстановленными комбинированным методом при α = 0,5 и методом синтеза по библиотечным спектрам

#### Заключение

Задачу радиометрического синтеза многоспектральных изображений различного пространственного разрешения на длинах волн короче ~3 мкм предлагается решать путём комбинирования метода MMT (Multisensor Multiresolution Technique) и метода синтеза по библиотечным спектрам. Комбинированный метод позволяет значительно улучшить резкость изображений низкого разрешения, уменьшить ошибки оценки спектральных сигнатур классов малой площади, возникающие при применении метода MMT без регуляризации, и извлечь из данных новую информацию, не содержащуюся в библиотечных спектрах.

# Литература

- 1. Попов М.О., Станкевич С.А., Козлова А.О. Удосконалена процедура класифікування багатоспектральних аерокосмічних зображень при оцінюванні біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України // Сборник научных трудов Морского гидрофизического института. Вып. 14. Севастополь: МГИ, 2006. С. 406-410.
- 2. Станкевич С.А. Алгоритм статистичної класифікації об'єктів дистанційного спостереження за їх спектрально-топологічними характеристиками // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2006. № 7. С. 38-40.
- 3. Станкевич С.А., Шолонік О.В. Інструментарій оцінювання еквівалентної просторової розрізненності багато- та гіперспектральних цифрових аерокосмічних знімків // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. Вип.3(10). Київ: ДНДІА, 2007. С. 165-171.
- 4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Пер. с англ. М. Техносфера. 2010. 560 с.
- 5. *Abrams M., Hook S., Ramachandran B.* ASTER Users Handbook Version 2. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory. 2002. 135 p.
- 6. *Arai K., Thome K., Iwasaki A., Biggar S.* ASTER VNIR and SWIR radiometric calibration and atmospheric correction // Land Remote Sensing and Global Environmental Change. NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS / B. Ramachandran, C.O. Justice, M.J. Abrams (Eds). New York: Springer, 2011. P. 83-116.
- 7. *Baldridge A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G.* The ASTER spectral library version 2.0 // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. No.4. P.711-715.
- 8. *Franklin S.E., Wulder M.A.* Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas // Progress in Physical Geography. 2002. Vol.26. No.2. P. 173-205.
- 9. *King R.B.* Land cover mapping principles: a return to interpretation fundamentals // International Journal of Remote Sensing. 2002. Vol.23. No.18. P. 3525-3545.
- 10. Zhukov B., Oertel D., Lanzl F., Reinhaeckel G. Unmixing-based multi-sensor multi-resolution image fusion // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. Vol.37. No.3. P. 1212-1226.

# Multispectral multiresolution image synthesis using library object spectra for regularization

B.S. Zhukov<sup>1</sup>, M.A. Popov<sup>2</sup>, S.A. Stankevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute RAS, Moscow, Russia E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru <sup>2</sup>Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth IGS NAS of Ukraine Kiev, Ukraine E-mail: st@casre.kiev.ua

Comprehensive estimation of surface and atmospheric parameters from satellite observations requires synergetic interpretation of multisensor imaging data obtained in different spectral ranges with different spatial resolution. It is proposed to solve the problem of radiometrically correct synthesis of multispectral images with different spatial resolution by combining two previously developed methods: the Multisensor Multiresolution Technique (MMT) and the synthesis technique by library spectra classification. The MMT is based on classification of high-resolution (HR) images, estimation of class spectral signatures in the low-resolution (LR) bands and using them to construct an enhanced image in the LR bands with the HR pixel size. An MMT disadvantage is higher LR-signature estimation errors for small-area classes. In order to compensate for this disadvantage, it is proposed to use for regularization of the MMT algorithm the enhanced LR-images obtained by the library spectra synthesis method. This method is based on joint HR- and LR-image classification using library spectra of natural and man-made objects and on assigning weighted LR signatures to HR pixels. The combined method is applied for synthesis of images, obtained by spectroradiometer ASTER on Terra satellite in three bands of the visible and near infrared (VNIR) spectral range with a resolution of 15 m and in six bands of the shortwave infrared (SWIR) range with a resolution of 30 m. The SWIR image enhanced by the combined method shows a better sharpness than both the initial and regularization SWIR images, lower spectral signature estimation errors for small classes in comparison to the case when the MMTmethod is applied without regularization, and additional spectral information that is not accounted for by the library spectra.

**Keywords:** sharpening techniques, multisensor data synthesis, MMT technique, synthesis technique by library spectra classification, spectroradiometer ASTER.

# References

- Popov M.O., Stankevich S.A., Kozlova A.O., Popov M.O., Stankevich S.A., Kozlova A.O., Udoskonalena protsedura klasifikuvannya bagatospektral'nikh aerokosmichnikh zobrazhen' pri otsinyuvanni bioriznomanittya Pivnichno-Prichornomors'kogo regionu Ukraïni (Improved classification procedure of multispectral airborne and space-borne images for estimation of biodiversity in the North Black Sea region of Ukraine), *Sbornik nauchnyh trudov Morskogo gidrofizicheskogo instituta*, Issue 14, Sevastopol': MGI, 2006, pp. 406-410.
- Stankevich S.A., Algoritm statistichnoï klasifikatsiï ob'ektiv distantsiinogo sposterezhennya za ïkh spektral'notopologichnimi kharakteristikami (Algorithm of statistical classification of remote observation objects by their spectro-topological characteristics), *Naukovii visnik Natsional'nogo girnichogo universitetu*, 2006, No. 7, pp. 38-40.
- Stankevich S.A., Sholonik O.V., Instrumentarii otsinyuvannya ekvivalentnoï prostorovoï rozriznennosti bagato- ta giperspektral'nikh tsifrovikh aerokosmichnikh znimkiv (Instrumentation for estimation of the equivalent spatial diversity of multi- and hyperspectral digital airborne and space-borne images), Zbirnik naukovikh prats' Derzhavnogo naukovo-doslidnogo institutu aviatsiï, Issue 3(10), Kiev: DNDIA, 2007, pp. 165-171.
- 4. Schowengerdt R.A., Remote sensing. Models and methods for image processing, Moscow: Tehnosfera, 2010, 560 p.
- 5. Abrams M., Hook S., Ramachandran B., *ASTER Users Handbook Version 2*, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2002, 135 p.
- Arai K., Thome K., Iwasaki A., Biggar S., ASTER VNIR and SWIR radiometric calibration and atmospheric correction, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*. NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS, B. Ramachandran, C.O. Justice, M.J. Abrams (Eds), New York: Springer, 2011, pp. 83-116.
- Baldridge A.M., Hook S.J., Grove C.I., Rivera G., The ASTER spectral library version 2.0, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 4, pp. 711-715.
- 8. Franklin S.E., Wulder M.A., Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas, *Progress in Physical Geography*, 2002, Vol. 6, No. 2, pp. 173-205.
- 9. King R.B., Land cover mapping principles: a return to interpretation fundamentals, *International Journal of Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, No. 18, pp. 3525-3545.
- 10. Zhukov B., Oertel D., Lanzl F., Reinhaeckel G., Unmixing-based multi-sensor multi-resolution image fusion, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, Vol. 37, No. 3, pp. 1212-1226.