

ляционные портреты позволяют выделять реально существующие пространственные структуры. Это свидетельствует о наличии значительного количества потенциально полезной информации, не сводящейся к средним значениям и дисперсиям и обычно отображаемой при обработке данных.

3. Применение карт сходства корреляционных портретов позволяет обнаруживать пространственные структуры, связанные с тонкими вариациями состояния объекта зондирования.

Литература

1. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Белов А.А. и др. Проект спутникового гиперспектрометра, предназначенного для малого космического аппарата // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 43–55.
2. Kremer H.J. Observation of the Earth and its environment survey of missions and sensors/ DLP. Oberpfaffenhofen. 1993. 476 p.
3. Пона А., Балтер Б.М., Ганзориг Г. и др. Особенности корреляционной структуры спектра оптического сигнала, восходящего от зондируемых объектов (на примере морской поверхности) // Исслед. Земли из космоса. 1988. № 3. С. 23–30.
4. Балтер Б.М., Егоров В.В., Кузьмин А.А., Чекалина Т.И. Применение спектрально-корреляционных методов и теории катастроф в изучении пространственной неоднородности земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1991. № 5. С. 10–15.
5. Chekalina T.I., Popova I.V., Balter B.M., Egorov V.V. Correlation portraits and neural networks for spaceborne high-resolution spectrometry // Proc. ISSR Intern. Symp. Maui, Hawaii, Nov. 15–20, 1992. V. 2. P. 1137–1149.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 317 с.
7. Saich P., Lewis P., Disney M., Thackrah G. Comparison of HyMap/E-SAR data with models for optical reflectance and microwave scattering from vegetation canopies // Proc. Intern. Symp. «Retrieval of Bio- and Geophysical parameters from SAR data for Land Applications». Sheffield Sept. 2001 (ESA SP-475, Jan. 2000).

СИНТЕЗ ВИДЕОДАНЫХ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Б.С. Жуков

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Метод синтеза видеоданных различного пространственного разрешения (ММТ) иллюстрируется на примере синтеза изображений гарей, полученных спектрорадиометром MODIS на ИСЗ Terra в каналах видимого и ближнего ИК-диапазонов с разрешением 250 м, в каналах коротковолнового ИК-диапазона с разрешением 500 м и в каналах среднего и теплового ИК-диапазонов с разрешением 1 км. В результате синтеза гари картированы с разрешением 250 м, и для них получены полные спектры, охватывающие все каналы MODIS, что позволяет надежно распознать гари и оценить степень повреждения растительности.

Application of the Multi-sensor Multi-Resolution Technique (MMT) is illustrated by the example of fusing the MODIS/Terra images of fire scars that were obtained in the visible and near infrared channels with a resolution of 250 m, in the shortwave infrared channels with a resolution of 500 m and in the middle and thermal infrared channels with a resolution of 1 km. As a result, fire scars were mapped with a resolution of 250 m and their spectra within the entire MODIS spectral range were obtained. This allows fire scars reliable identification and vegetation damage estimation.

Введение

В космических исследованиях Земли увеличение информативности дистанционных измерений возможно с помощью комплексирования съемочных систем различных спектральных диапазонов (от видимого до СВЧ) и/или увеличения в том же диапазоне числа спектральных зон, в которых проводятся наблюдения. Среди современных космических съемочных систем наиболее высокое пространственное разрешение (от долей метра до десятков метров), требуемое для зондирования суши, могут обеспечить панхроматические и многозональные сканеры видимого и ближнего ИК-диапазонов и радиолокаторы с синтезированной апертурой.

Применимость таких перспективных съемочных систем как видеоспектрометры, тепловые сканеры и СВЧ-радиометры ограничивает их низкое пространственное разрешение (от десятков и сотен метров для видеоспектрометров и тепловых сканеров до десятков километров для СВЧ-радиометров), поскольку большинство (или даже все) пикселей в данных этих приборов могут быть «смешанными», т. е. содержать несколько различных классов объектов.

В связи с этим возникает проблема синтеза многосенсорных видеоданных различного пространственного и спектрального разрешения с тем, чтобы совместить детальную пространственную информацию, содержащуюся в видеоданных съемочных систем высокого пространственного разрешения, и дополнительную спектрорадиометрическую информацию, которая может содержаться в видеоданных съемочных систем более низкого пространственного разрешения. При этом видеоданные высокого разрешения дают возможность проанализировать состав смешанных пикселей в видеоданных более низкого разрешения.

В данной статье обсуждается использование для этой цели метода, предложенного в работах [1, 2] и развитого в работе [3].

1. Описание метода

Рассматриваемый метод основан на совмещении видеоданных всех съемочных систем на общем базисе — совокупности классов, распознаваемых на изображениях, которые получены съемочной системой наиболее высокого разрешения, обеспечивающей требуемую детальность классификации. Далее на этом базисе проводится разложение видеоданных более низкого разрешения, причем информация высокого разрешения используется для анализа состава пикселей низкого разрешения.

Съемочную систему высокого разрешения, данные которой используются для определения исходной системы классов, будем условно называть «классифицирующим прибором» (КП). Этот прибор должен иметь необходимые пространственное разрешение и спектрорадиометрические измерительные характеристики для распознавания требу-

емых классов. В качестве КП могут использоваться, например, многоспектральные сканеры, а также радиолокаторы с синтезированной апертурой. Съемочные системы низкого разрешения (например, видеоспектрометры, тепловые ИК-сканеры, СВЧ-радиометры) рассматриваются как один многоканальный «измерительный прибор» (ИП), причем не требуется, чтобы все каналы ИП имели одинаковое разрешение. Функцией ИП является «измерение» дополнительных характеристик классов объектов, распознанных КП. Например, классами объектов, распознаваемых КП, могут быть различные сельскохозяйственные угодья, а данные ИП могут использоваться для измерения дополнительных количественных и качественных характеристик этих угодий, например, влажности, состояния и содержания биохимических компонентов в растительности, состава, влажности и солености почвы и др. Функции КП и ИП могут выполнять также различные каналы одного и того же прибора, имеющие различное пространственное разрешение.

Рассматриваемый метод синтеза видеоданных, полученных системой КП/ИП, в упрощенном виде проиллюстрирован на рис. 1.

Метод включает следующие основные этапы.

1. *Классификация данных КП.* На первом этапе в результате классификации изображений КП получается классификационная карта $k(u, v)$, где каждому пикселу высокого разрешения (u, v) присвоен код k соответствующего ему класса. В зависимости от поставленной задачи могут использоваться различные алгоритмы классификации с обучением или без него [4]. В данной работе используется кластерный алгоритм ISODATA.

2. *Определение вклада классов в сигналы пикселей ИП.* Вклад $c_j(U, V; k_0)$ класса k_0 в сигнал пикселя (U, V) канала j измерительного прибора находится с учетом функции рассеяния точки (ФРТ) ИП и определяемой по классификационной карте доли площади, занимаемой классом k_0 в пикселе (U, V) :

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

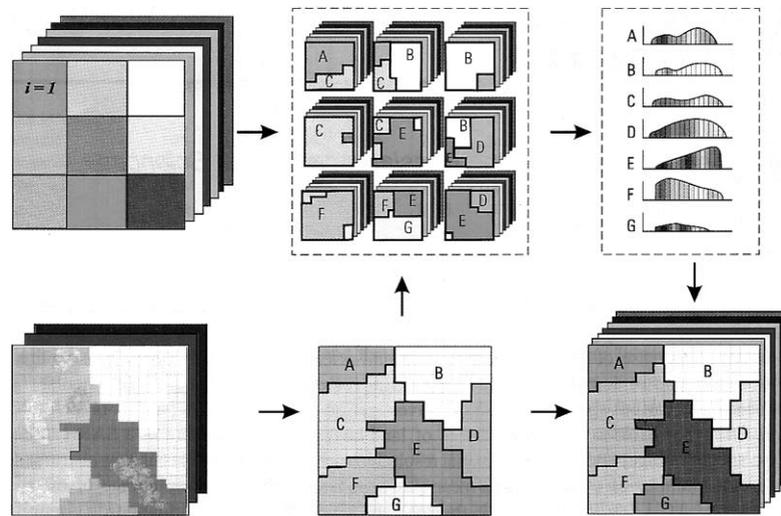


Рис. 1. Схема синтеза видеоданных, полученных видеоспектрометром низкого разрешения (ИП) — вверху и многозональным сканером высокого разрешения (КП) — внизу

где нормализованная на единицу ФРТ $\rho_j(U, V; u, v)$ характеризует вес, с которым сигнал от участка, соответствующего пикселу КП (u, v) , вносит вклад в сигнал пиксела (U, V) в канале j измерительного прибора. Предполагается, что ФРТ учитывает все эффекты, влияющие на разрешение данных ИП: разрешение съемочной системы, передаточные характеристики атмосферы, эффект геометрической трансформации данных при совмещении изображений. Обычно ФРТ аппроксимируется гауссовой функцией.

3. *Оценка средних ИП-спектров классов.* ИП-спектры классов $S_j(k)$, усредненные по их площади на обрабатываемом фрагменте изображения, оцениваются независимо в каждом канале ИП путем обращения методом наименьших квадратов системы уравнений модели линейной смеси:

$$H_j(U, V) = \sum_{k=1}^K c_j(U, V; k) S_j(k) + \varepsilon_j(U, V), \quad (1)$$

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 зонах ИП. Оцененные ИП-спектры классов $S_j(k)$ вместе с их исходными КП-спектрами образуют синтезированные спектры классов. Для того чтобы уменьшить ошибки восстановления спектров малых классов, при решении рекомендуется использовать методы регуляризации [3].

4. *Синтез ИП-изображения высокого разрешения.* Рассмотрим воображаемую съемочную систему, имеющую спектральные зоны ИП и пространственное разрешение КП, которую будем условно называть измерительным прибором высокого разрешения (ИПВ). В предлагаемом методе ИПВ-изображение аппроксимируется присвоением пикселям классификационной карты оцененных ИП-спектров соответствующих классов:

$$\tilde{H}_j(u, v) = S_j(k(u, v)). \quad (2)$$

Таким образом, в ИПВ-изображении синтезируется спектрорадиометрическая информация ИП и текстурная информация высокого разрешения КП. Отличие изображения (2) от реального ИПВ-изображения состоит в том, что в (2) сигнал ИПВ постоянен в пределах каждого класса. В реальном ИПВ-изображении возможны также вариации ИП-сигнала внутри классов, поскольку классы, которые кажутся однородными при использовании данных КП, могут быть неоднородными в спектральных зонах ИП.

Во избежание усреднения ИП-сигналов классов по всей площади классов на изображении этапы (2–4) алгоритма применяются не ко всему изображению, а последовательно к его отдельным фрагментам с использованием «скользящего окна». При этом окно перемещается по геометрически совмещенному КП/ИП-изображению с шагом 1 ИП-пиксел в обоих направлениях. При каждом положении окна восстанавливаются ИП-спектры представленных в этом окне классов с использованием только ИП-пикселей этого окна. Полученное в результате ИПВ-изображение сохраняется в пределах центрального ИП-пиксела в окне. После сдви-

га окна на 1 ИП-пиксел сохраняется ИПВ-изображение в пределах следующего ИП-пиксела и т. д. В результате, восстанавливается полное ИПВ-изображение.

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

$$H_j(U_0, V_0) = \sum_{k=1}^K c_j(U_0, V_0; k) S_j(k). \quad (3)$$

Вариант метода, где система уравнений (1) решается при условии (3), назван консервативным синтезом, в отличие от неконсервативного, где условие (3) не используется. При малом уровне приборных ошибок лучшие результаты дает консервативный синтез, а при большом уровне ошибок — неконсервативный, позволяющий фильтровать шум при сохранении резкости ИПВ-изображения [3].

При синтезе в скользящем окне масштаб внутриклассового усреднения ограничивается только размерами окна. При выборе размеров окна необходимо учитывать, что их уменьшение ведет к уменьшению масштаба пространственного усреднения ИП-спектров классов, однако при этом уменьшается и допустимая детальность классификации. Оптимальный размер окна обычно составляет от 5×5 до 7×7 ИП-пикселей.

Применимость метода для решения конкретных задач определяется выполнением следующих условий:

- данные КП должны быть достаточны для распознавания классов, требуемых поставленной задачей;
- классы должны быть разделимы в данных ИП, т. е. должно выполняться условие

$$\det \mathbf{A}_j \neq 0, \quad (4)$$

$$\text{где } \mathbf{A}_j = \left\{ A_j(k, k') = \sum_{U, V} c_j(U, V; k) c_j(U, V; k') \right\}.$$

Для этого, в частности, необходимо, чтобы число классов в окне не превышало числа ИП-пикселей, а при консервативном синтезе было, по крайней мере, на единицу меньше. Кроме того, не допустима ситуация, когда два (или более) класса содержатся только в одном ИП-пикселе. В случае, когда в каком-либо окне условие (4) не выполняется, наименьший по площади класс объединяется со спектрально наиболее близким классом до тех пор, пока классы не становятся разделимыми. В этом случае для объединенных классов оценивается их средневзвешенный ИП-спектр.

Рассматриваемый метод противоположен методу спектральной декомпозиции, предложенному в [5] и широко применяемому в практике дистанционного зондирования. В методе спектральной декомпозиции априорно или по однородным областям на изображении задаются спектры чистых классов $S_j(k)$ и затем, путем решения системы уравнений (1), определяются пропорции $c(U, V, k)$ классов k в пикселях (U, V) . В отличие от этого, в рассматриваемом методе пропорции классов в пикселях ИП определяются по видеоданным высокого разрешения, полученным КП, и далее используются для определения спектров классов $S_j(k)$, т. е. синтез проводится без использования априорной или дополнительной информации.

2. Пример применения метода

Проиллюстрируем рассматриваемый метод на примере синтеза видеоданных спектрорадиометра MODIS на ИСЗ Terra, имеющего два канала — 0,65 и 0,86 мкм — с разрешением 250 м, 5 каналов в диапазоне 0,4...2,2 мкм с разрешением 500 м и 29 каналов в диапазоне 0,4...14 мкм с разрешением 1 км. С этой целью использовалось изображение катастрофических пожаров в Португалии, полученное MODIS в августе 2003 г.

Гари легко распознаются в канале 0,86 мкм среди зеленой растительности по их низкой отражательной способности (рис. 2а). При этом, однако, трудно отличить гари от водоемов, которые также имеют низкую отражательную способность во всем видимом и ближнем ИК-диапазоне и также выглядят темными на представленном изображении.

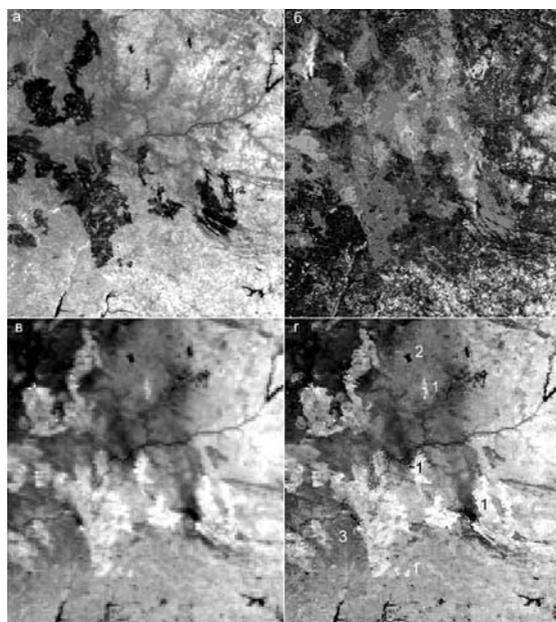


Рис. 2. Синтез изображений разного разрешения, полученных спектрометрией MODIS: *а* — изображение в канале 0,857 мкм с разрешением 250 м; *б* — классификационная карта на 64 класса; *в* — изображение в канале 11 мкм с разрешением 1 км; *г* — синтезированное изображение в канале 11 мкм с размером пиксела 250 м; 1 — гари; 2 — водоем; 3 — растительность

Использование информации других спектральных диапазонов позволяет решить эту проблему. Известно, что в коротковолновом ИК-диапазоне отражательная способность гарей значительно выше, чем у водоемов (<http://speclib.jpl.nasa.gov>), а в среднем и тепловом ИК-диапазонах гари значительно теплее как окружающего почвенно-растительного фона, так и водоемов (даже если пожар уже потух, нагревание солнечным излучением имеющих низкое альбедо и высокую поглощательную способность гарей приводит к повышению их температуры).

Рассматриваемый метод позволяет синтезировать информацию, содержащуюся во всех каналах MODIS. С этой

целью изображения, полученные в каналах 0,65 и 0,86 мкм с разрешением 250 м, классифицировались с помощью кластерного алгоритма ISODATA на 64 класса (рис. 2б). По полученной системе спектральных классов путем применения консервативного алгоритма в движущемся окне 7×7 ИП-пикселей осуществлялось разложение изображений в остальных каналах MODIS, имеющих более низкое пространственное разрешение.

Хотя при классификации изображений в каналах 0,65 и 0,86 мкм гари и водоемы плохо разделяются, использование движущегося окна позволяет избежать смешивания объектов этих классов, если они разделены расстоянием, превышающим размер окна.

На рис. 2в показано исходное изображение, полученное в канале 11 мкм с разрешением 1 км, а на рис. 2г — синтезированное изображение высокого разрешения в том же канале. Изображение на рис. 2г имеет значительно лучшую резкость и позволяет различать даже небольшие гари с повышенной температурой и водоемы с пониженной температурой.

На рис. 3 сопоставляются синтезированные спектры картированных с разрешением 250 м участков гарей, водоемов и зеленой растительности, которые помечены на рис. 2г. Спектры охватывают все каналы MODIS в видимом и ближнем (0,4...0,95 мкм), коротковолновом (1,2...2,15 мкм), среднем (3,7...4,5 мкм) и тепловом (8,5...12 мкм) ИК-диапазонах, расположенные в окнах прозрачности атмосферы (за исключением зашумленных каналов). Эти спектры содержат значительно больше информации, чем спектральные отсчеты в каналах 0,65 и 0,86 мкм, использовавшихся при первоначальной классификации. В частности, гари и водоемы надежно различаются по яркости в коротковолновом, среднем и тепловом ИК-диапазонах. Различие спектров гарей в этих диапазонах позволяет также судить о степени повреждения растительности.

Заключение

Рассматриваемый метод позволяет синтезировать видеоданные, полученные различными съемочными системами или в различных каналах одной съемочной системы, имеющих

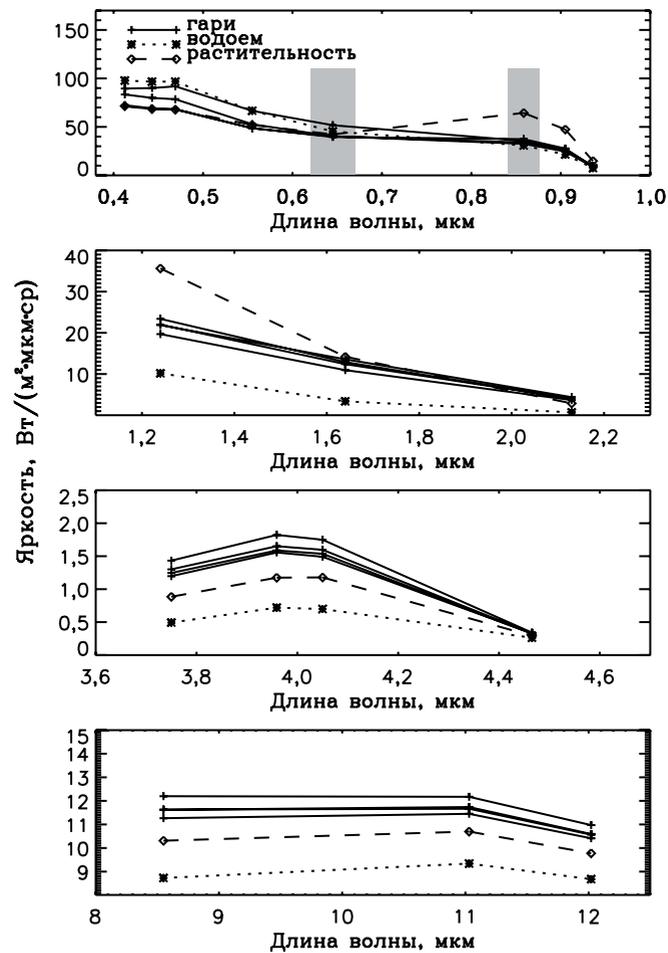


Рис. 3. Синтезированные спектры гарей, водоема и растительности; затенением указаны использовавшиеся при классификации спектральные зоны

разное разрешение. На примере изображений, полученных спектрометрией MODIS, показано, что такой синтез дает возможность не только более полно охарактеризовать спектральные классы, распознаваемые по видеоданным высокого разрешения, но и уточнить исходную классификацию.

Литература

1. Zhukov B., Oertel D. A technique for combined processing of the data of an imaging spectrometer and of a multispectral camera // Proc. SPIE. 1995. V. 2480. P. 453–465.
2. Жуков Б.С., Эртель Д.А. Метод синтеза многосенсорных данных различного пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 1996. № 4. С. 42–50.
3. Zhukov B., Oertel D., Lanzl F. et al. Unmixing-based multi-sensor multi-resolution image fusion // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. V. 37. N. 3. P. 1212–1226.
4. Richards A. Remote Sensing Digital Image Analyses. An Introduction. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1986.
5. Adams J.B., Smith M.O., Johnson P.E. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. N. B8. P. 8098–8112.