

ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРЕЦИЗИОННОГО СОВМЕЩЕНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ, ПОЛУЧАЕМЫХ РАЗНЫМИ СЪЕМОЧНЫМИ СИСТЕМАМИ, В РАЗНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗОНАХ И В РАЗНОЕ ВРЕМЯ

А.С. Василейский

АНО «Космос — наука и техника»

E-mail: asvas@wildcat.iki.rssi.ru

Представлено программное обеспечение, предназначенное для прецизионного совмещения изображений, получаемых съемочной аппаратурой в разных спектральных зонах и в разное время. Совмещение может осуществляться в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. При ручном совмещении оператор производит традиционные операции по выбору и уточнению местоположения опорных точек (ОТ) на изображениях. При этом в распоряжении оператора предоставляется ряд автоматизированных инструментов, облегчающих процесс выбора ОТ.

В автоматическом режиме программа реализует обобщенный площадной алгоритм совмещения, основанный на выборе и сопоставлении ОТ с использованием корреляционного алгоритма и метода наименьших квадратов (МНК) для идентификации сходных фрагментов изображений. Дополнительное субпиксельное уточнение местоположения ОТ на основе МНК обеспечивает высокую точность совмещения. Последующая многоступенчатая верификация ОТ позволяет исключать из рассмотрения неправильно сопоставленные ОТ.

Введение

При дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) из космоса съемку одних и тех же участков земной поверхности зачастую проводят в разное время, разными съемочными системами, с разных космических аппаратов (КА), в различных спектральных зонах и с разным пространственным разрешением. В то же время высокая эффективность исследования большинства характеристик земной поверхности и происходящих на ней процессов может быть достигнута только при совместной обработке большей части всех вышеперечисленных видеоданных. Такая совместная обработка разных изображений одного и того же участка земной поверхности требует их прецизионного координатного совмещения.

Совмещение ДЗЗ производится обычно при геометрической коррекции, являющейся одним из начальных этапов в рамках так называемой межотраслевой обработки [3]. Совмещение направлено на установление взаимно однозначного соответствия между соответствующими одним и тем же участкам земной поверхности пикселями одного изображения, обычно называемого совмещаемым, и пикселями другого изображения, обычно называемого опорным или базовым [5, 7]. Кроме того, проблему совмещения различных получаемых из космоса изображений земной поверхности можно рассматривать как задачу координатной привязки совмещаемого изображения к базовому.

Традиционно применяемое на практике ручное совмещение изображений является очень трудоемким процессом, требующим привлечения большого количества операторов, существенно увеличивая общие финансовые затраты на обработку данных ДЗЗ. Автоматизация процесса совмещения является, поэтому, весьма актуальной задачей, особенно в условиях жестких временных ограничений, накладываемых при оперативном использовании видеоданных, и высокой требуемой точности их совмещения, не достижимой при ручной обработке.

Алгоритм совмещения

Представленное в настоящей работе алгоритмическое и программное обеспечение направлено на решение задачи автоматизированного оперативного прецизионного совме-

щения видеоданных ДЗЗ, получаемых многоканальными космическими съемочными системами в разное время, в разных спектральных зонах с одинаковым пространственным разрешением. Выбранный площадной метод совмещения основан на сравнении распределения яркости в пределах фрагментов подлежащих совмещению изображений и установлении взаимного соответствия между ними [6]. Основными преимуществами площадных методов совмещения являются простота реализации, независимость от наличия ярко выраженных деталей на изображениях и устойчивость к шумам [6]. При этом может быть достигнута высокая, вплоть до субпиксельной, точность совмещения.

Для описания местоположения соответствующих элементов на совмещаемом и базовом изображениях применяется концепция опорных точек (ОТ), позволяющая гибко, эффективно и экономично с точки зрения хранения, обработки и обмена информацией описывать взаимные геометрические искажения изображений [4].

Разработанный алгоритм совмещения [1] включает следующие основные этапы:

- **Предварительная обработка** совмещаемого и базового изображений, которая может включать радиометрическую коррекцию, пространственную фильтрацию или подчеркивание границ.

- **Выбор однородной сети ОТ** на базовом изображении в местах хорошо различимых деталей и расчет их ожидаемого положения на совмещаемом изображении. При этом используется априорная информация о местоположении и ориентации КА во время съемки [2].

- **Идентификация ОТ** путем сопоставления фрагментов изображений корреляционным методом или методом наименьших квадратов (МНК) [1, 8]. На этом шаге положение выбранных ОТ уточняется таким образом, чтобы они указывали на соответствующие детали совмещаемого и базового изображения.

- **Верификация** полученного набора ОТ. Этот этап подразумевает исключение из дальнейшего рассмотрения неправильно идентифицированных ОТ. Верификация осуществляется по остаточным ошибкам ОТ и путем сравнения текстуры в окрестностях соответствующих ОТ с использованием преобразования Уолша [1].

- **Оценка функции преобразования**, описывающей взаимные геометрические соотношения между совмещаемым и базовым изображениями. Коэффициенты функции преобразования оцениваются по МНК с использованием координат идентифицированных ОТ.

- **Трансформирование** совмещаемого изображения в проекцию базового путем передискретизации с использованием оцененной функции преобразования.

Программное обеспечение

Разработанный алгоритм реализован в виде специализированной программы совмещения изображений “*Registrar*”, позволяющей осуществлять совмещение в интерактивном, автоматизированном и автоматическом режиме.

Дружественный интерфейс программы “*Registrar*” позволяет пользователю эффективно управлять процессом совмещения и проводить анализ результатов, полученных на каждом шаге. Внешний вид главного рабочего окна программы представлен на рис. 1. Подлежащие совмещению изображения отображаются в верхней его части. Местоположение выбранных и идентифицированных ОТ отмечается на изображениях крестообразными маркерами. В нижней части рабочего окна приведена таблица ОТ, где для каждой точки указаны ее координаты на совмещаемом и базовом изображениях, величина остаточных ошибок и величины, характеризующие степень соответствия фрагментов совмещаемого и базового изображения вокруг ОТ.

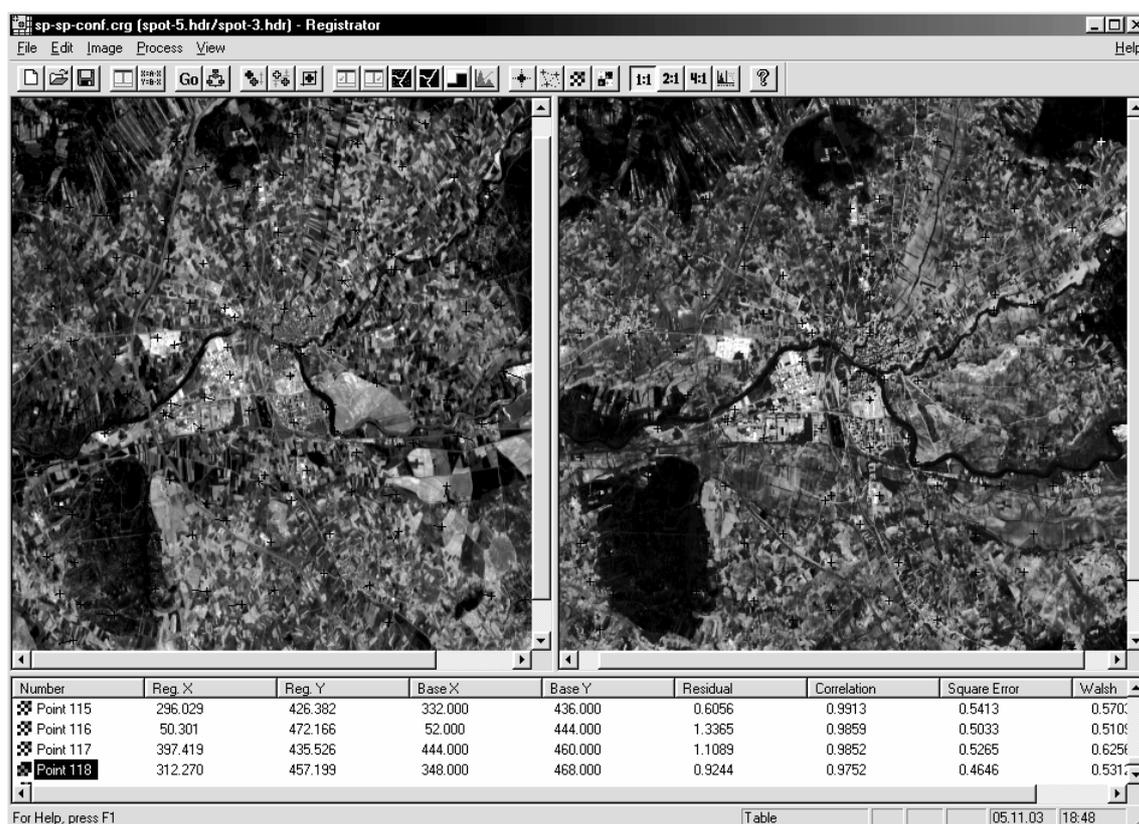


Рис. 1. Интерфейс программы совмещения изображений “Registrator”. В левом и правом окнах показаны два изображения, полученные съемочной аппаратурой Landsat TM

В режиме интерактивного совмещения пользователю в дополнение к традиционным для такого типа программ инструментам, позволяющим вручную выбирать соответствующие ОТ на подлежащих совмещению изображениях, предоставляются автоматизированные инструменты, облегчающие процесс распознавания и уточнения ОТ.

Диалоговое окно идентификации ОТ, представленное на рис. 2, предназначено для интерактивного уточнения местоположения ОТ. В левом окне представлен увеличенный фрагмент совмещаемого изображения вокруг выбранной ОТ, в правом окне отображается соответствующий фрагмент базового изображения. Центральное окно содержит фрагмент базового изображения. При перемещении указателя мыши в пределах этого окна поверх базового изображения отображается маленький фрагмент совмещаемого изображения, что позволяет проконтролировать правильность идентификации ОТ. Пользователь может изменять местоположение ОТ на изображениях, перемещая мышью в левом или правом окне или вводя их координаты в соответствующие поля. Кроме того, пользователь может активизировать автоматические процедуры определения местоположения ОТ с использованием корреляционного метода или МНК, а также осуществлять уточнение координат ОТ по МНК на субпиксельном уровне [1, 8].

В автоматическом режиме совмещение изображений осуществляется без непосредственного участия пользователя в соответствии с описанным ранее алгоритмом. В специальном диалоговом окне, приведенном на рис. 3, пользователь может настроить параметры алгоритма: активировать или отключить отдельные операции по предварительной обработке изображений, задать параметры автоматически выбираемой сети ОТ, выбрать метод идентификации ОТ, задать параметры для субпиксельного уточнения местоположения ОТ и настроить пороговые значения для четырех проводимых последовательно операций по отбраковке неправильно сопоставленных ОТ.

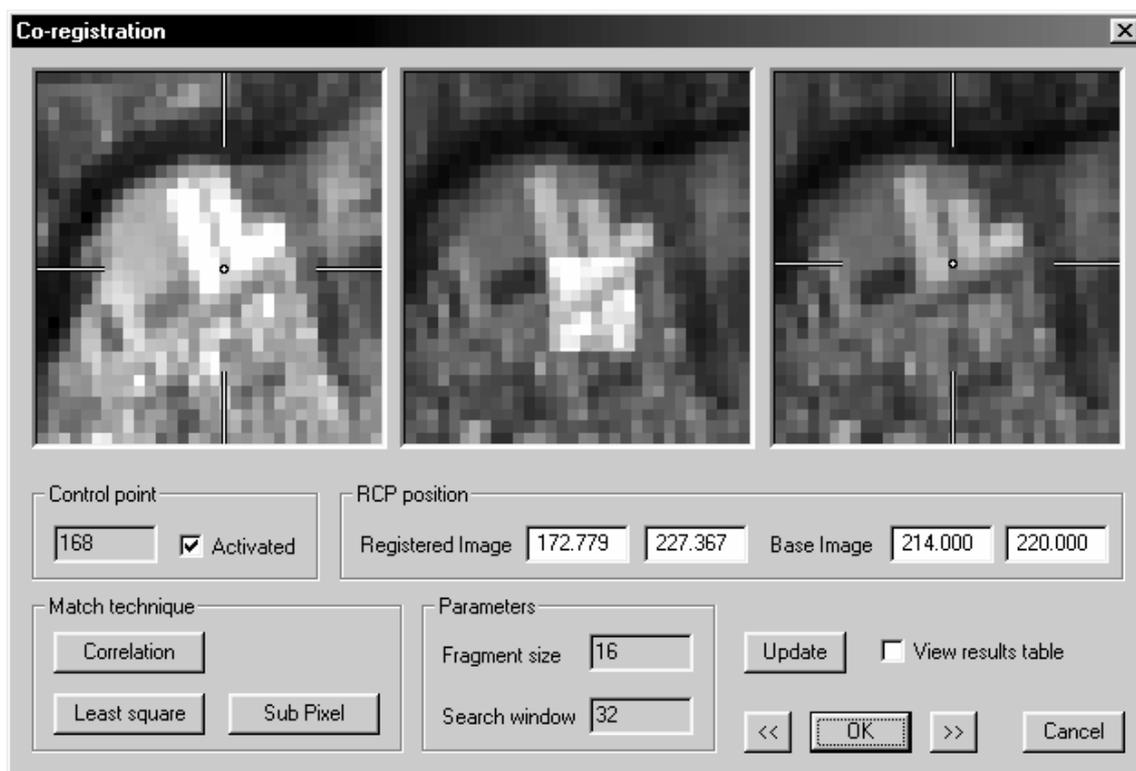


Рис. 2. Диалоговое окно идентификации ОТ программы “Registrator”

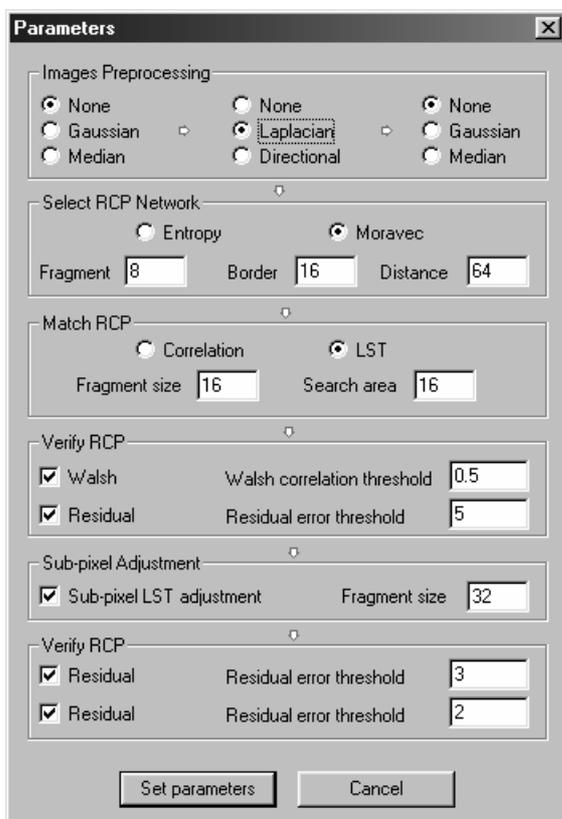


Рис. 3. Диалоговое окно параметров автоматического совмещения программы “Registrator”

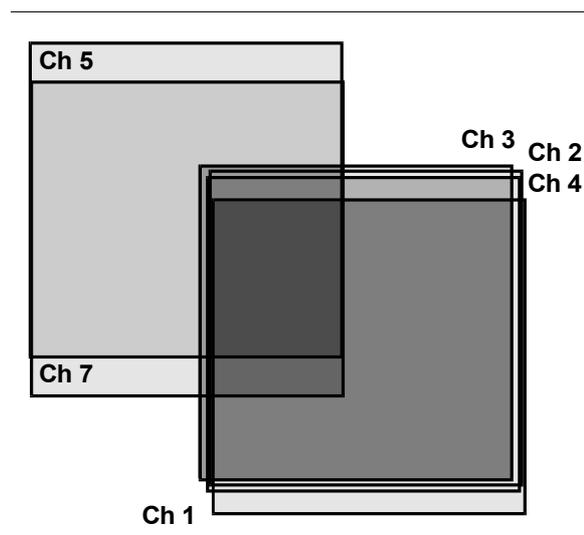


Рис. 4. Межканальные сдвиги изображения, полученного аппаратурой LANDSAT-TM

Программа “*Registrar*” позволяет совмещать видеоданные в «сыром» формате (в виде ВIL, ВIP или BSQ), сопровождающиеся заголовком, стандартным для широко распространенного коммерческого пакета обработки изображений ДЗЗ ENVI. При совмещении многоканальных изображений используется только один канал каждого из них. Список координат ОТ может импортироваться и экспортироваться в формате, также совместимом с пакетом ENVI.

Программа “*Registrar*” написана на объектно-ориентированном языке программирования C++ с использованием среды программирования Microsoft Visual Studio’97 и может функционировать под управлением операционных систем Microsoft Windows’98, 2000 и XP.

Результаты экспериментов

Для экспериментального подтверждения эффективности предложенного алгоритма и реализующего его программного обеспечения был проведен эксперимент по совмещению двух изображений одной и той же области земной поверхности, полученных съемочной аппаратурой SPOT-XS в 2000 г. с временным интервалом около 2 мес. Совмещаемое и базовое изображения показаны на рис. 1 в левом и правом окнах соответственно.

Предварительное совмещение осуществлялось путем ручного выбора с заведомо низкой точностью (средняя ошибка 3 пиксела) десяти соответствующих ОТ, равномерно распределенных по площади изображений. Дальнейшее совмещение в автоматическом режиме по разработанному алгоритму позволило идентифицировать набор из 106 ОТ, равномерно распределенных по площади изображений. Полученные при этом с использованием линейной функции трансформирования оценки остаточных ошибок ОТ (среднее значение — 0,97 пиксела, максимальное значение — 2,24 пиксела) достаточно велики, что вызвано в первую очередь локальными геометрическими искажениями при перспективной съемке холмистой местности.

Для достоверной численной оценки точности полученных результатов совмещаемое изображение было трансформировано в проекцию базового путем кусочно-аффинного преобразования в соответствии с полученным набором координат ОТ. Затем на обоих изображениях были вручную отобраны 30 проверочных ОТ. Среднее значение ошибки проверочных ОТ составило 0,3 пиксела (СКО = 0,56).

Для оценки точности предложенного алгоритма совмещения на субпиксельном уровне была проведена серия экспериментов по оценке величины межканальных сдвигов в изображениях, полученных многоканальными съемочными системами LANDSAT-TM, LANDSAT-ETM, SPOT-XS, «Ресурс-О1» МСУ-Е.

В качестве совмещаемого и базового изображения поочередно выбиралось каждое из изображений отдельных каналов (например, всего для случая шестиканального изображения, полученного системой LANDSAT-TM, — 30 возможных комбинаций). Получаемые при автоматическом совмещении наборы ОТ позволили оценить величины вертикальных и горизонтальных взаимных сдвигов для каждой пары канальных изображений. С учетом того, что найденные величины описывают сдвиги в единой системе из нескольких канальных изображений, с помощью МНК были получены более точные оценки межканальных сдвигов. При этом сдвиг первого канала предполагался равным нулю. Полученные таким образом величины горизонтальных и вертикальных межканальных сдвигов представлены в табл. 1. Для наглядности на рис. 4 представлено графическое отображение межканальных сдвигов изображения, полученного аппаратурой LANDSAT-TM (соответствующие пиксели шести канальных изображений показаны смещенными друг относительно друга на найденную величину межканальных сдвигов).

Таблица 1. Величины межканальных сдвигов на изображениях, полученных многоканальными съемочными системами LANDSAT-TM, LANDSAT-ETM, SPOT-XS, «Ресурс-О1» МСУ-Е (в пикселах)

Каналы	Горизонтальный сдвиг	Вертикальный сдвиг	Каналы	Горизонтальный сдвиг	Вертикальный сдвиг
Landsat-TM			Landsat-ETM		
1	0,000	0,000	1	0,000	0,000
2	-0,011	-0,093	2	0,071	0,026
3	-0,042	-0,109	3	0,200	0,007
4	-0,017	-0,072	4	-0,060	-0,085
5	-0,588	-0,495	5	0,013	0,129
6	-	-	6	-0,435	0,580
7	-0,583	-0,375	7	0,039	0,145
SPOT-XS			8	-0,413	0,574
1	0,000	0,000	«Ресурс-О1» МСУ-Е		
2	0,035	-0,286	1	0,000	0,000
3	-0,236	-0,282	2	0,440	1,684
4	-0,262	-0,085	3	1,234	2,792

Приведенные результаты подтверждают наличие существенных межканальных сдвигов в изображениях, полученных разными многоканальными съемочными системами: от 0,25 до 2,8 размера пиксела (SPOT-XS и МСУ-Е на КА «Ресурс-О1», соответственно).

Средние величины ошибок определения отдельных межканальных сдвигов и средние ошибки определения индивидуальных ОТ для изображений, полученных разными съемочными системами, приведены в табл. 2.

Для большинства съемочных систем ошибка определения величины межканальных сдвигов не превышает 5 % размера пиксела (несколько большая ошибка — около 9 % размера пиксела — наблюдается лишь в случае изображения с LANDSAT-ETM, часть каналов которого первоначально имела худшее пространственное разрешение). Полученная высокая точность подтверждает возможность использования предложенного метода совмещения для оценки межканальных сдвигов многоканальных изображений. Средние значения ошибок для отдельных ОТ составили 10–35 % размера пиксела, что подтверждает высокую субпиксельную точность предложенного алгоритма совмещения.

Таблица 2. Средние ошибки определения межканальных сдвигов на изображениях, полученных разными съемочными системами

Съемочная система	Кол-во каналов	Ошибка определения межканальных сдвигов, пиксел	Ошибка определения ОТ, пиксел
«Ресурс-О1» МСУ-Е	3	0,022	0,22
LANDSAT-TM	6	0,016	0,11
LANDSAT-ETM	7	0,090	0,35
SPOT-XS	4	0,046	0,27

Литература

1. Василейский А.С. Исследование методов совмещения видеоданных дистанционного зондирования: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИКИ РАН, 2003. С. 7–18.

2. Василейский А.С., Железнов М.М., Зиман Я.Л. Алгоритмы координатной привязки космических видеоданных по навигационным измерениям // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 37–43.

3. Гимельфарб Г.Л. Автоматизированная межотраслевая обработка снимков земной поверхности, получаемых с ИСЗ серии LANDSAT // Зарубеж. радиоэлектроника. 1988. № 8. С. 56–84.

4. Chen L.C., Rau J.Y. Geometric correction of airborne scanner imagery using orthophotos and triangulated feature point matching // Intern. J. of Remote Sensing. 1993. V. 14. N 16. P. 3041–3059.

5. Ehlers M. Rectification and registration / Integration of geographic information systems and remote sensing / Eds. J.L. Star, J.E. Estes, K.C. McGwire. Cambridge University Press. 1997. P. 13–36.

6. Fonseca L.M.G., Manjunath B.S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1996. V. 62. N 9. P. 1049–1056.

7. Vasileisky A.S., Berger M. Automated Co-registration of Multi-sensor Images on the Basis of Linear Feature Recognition for Subsequent Data Fusion // Proc. of the “Fusion of Earth Data” conf. Sophia Antipolis, France, 1998. P. 59–66.

8. Vasileisky A.S., Casanova J.-L.R., Al-Rawi K.R. Accurate images’ co-registration technique for fine geo-location in the FUEGO/FFEW project / Teledeteccion. Medio ambiente y cambio global / Eds. J.I.R. Urrutia, J.A. Martinez-Casasnovas. 2001. Lleida University. P. 481–484.