УДК 004.932.4

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ МОЗАИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Кузнецов А.Е., д.т.н., зам. директора НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rsreu.ru **Пресняков О.А.,** к.т.н., с.н.с, НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rsreu.ru

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, обработка изображений, геометрическая коррекция.

Введение

Получение космокарт на обширные территории происходит путём объединения разновременных снимков

в непрерывное мозаичное изображение. Этот процесс выполняется в два этапа. На первом этапе решается задача уравнивания блока снимков, в ходе которой за счёт коррекции элементов внешнего ориентирования минимизируются невязки в одноименных и опорных точках изображений. На втором этапе все снимки трансформируются в единую картографическую проекцию с целью получения непрерывного изображения. Специфика данного этапа состоит в том, что для формирования высококачественного снимка необходимо:

 устранить остаточные взаимные геометрические рассогласования изображений, чтобы исключить пространственные нестыковки объектов;

 минимизировать яркостные различия в перекрывающихся частях снимков;

 исключить из мозаики участки снимков, закрытые облачностью и попадающие в тень от облаков.

Другая важная особенность формирования мозаичных снимков состоит в необходимости обрабатывать изображения сверхбольшого объёма (десятки и сотни гигабайт) с предоставлением возможности контроля и коррекции параметров геометрического и яркостного совмещения снимков без снижения производительности и исключении повторных преобразований.

В предлагаемой вниманию статье рассматриваются структурные решения по выполнению технологических операций, базирующиеся на принципах виртуальной обработки видеоданных, и математические модели основных этапов преобразования изображений, положенные в основу получивших эффективное внедрение на практике программных комплексов обработки самолётных и космических снимков земной поверхности.

Технология формирования мозаичных изображений

Пусть имеется *K* геокодированных изображений земной поверхности $B_k(m_k, n_k)$, $k = \overline{1,K}$, $m_k = \overline{1,M_k}$, $n_k = \overline{1,N_k}$, для каждого из которых известны соотношения, задающие связь с координатами пикселей мозаичного снимка D(x,y), $x = \overline{1,X}$, $y = \overline{1,Y}$, $x = F_{kx}(m_k, n_k)$, $y = F_{ky}(m_k, n_k)$. (1)

Тогда формирование мозаичного снимка выполняется путём геометрического трансформирования ис-

Предложена технология формирования мозаичного изображения из снимков поверхности Земли на основе процедуры виртуальной обработки данных с использованием пирамидального представления видеоинформации. Рассмотрены математические модели глобального и локального геометрического и яркостного бесшовного совмещения изображений.

ходных изображений B_k в картографическую систему координат (x, y),

$$D(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \boldsymbol{\Phi}_{k} \left\{ \mathbf{x}, \mathbf{y}, \boldsymbol{B}_{k} \left[\boldsymbol{F}_{km}(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \boldsymbol{F}_{kn}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \right] \right\} , \qquad (2)$$

где Φ_k – оператор яркостного преобразования; F_{km} , F_{kn} – функции обратного геометрического преобразования.

$$m = F_{km}(x, y), \quad n = F_{kn}(x, y) \quad . \tag{3}$$

Поскольку для получения мозаичных изображений используются, как правило, разновременные снимки земной поверхности, полученные при различных условиях съёмки, и, кроме того, из-за отсутствия высокодетальных цифровых моделей местности сформировать высококачественные изображения *D* не всегда удаётся. Это выражается в том, что на мозаичном изображении остаются геометрические и яркостные нестыковки одноименных объектов. Пример подобных различий, существенно снижающих качество выходной продукции, показан на рис. 1.



Рис. 1. Пример остаточных геометрических и яркостных искажений совмещаемых изображений



а) Многоэтапная технология формирования мозаичного снимка



Рис. 2. Технологические схемы формирования мозаичного изображения

В соответствии с опытом мировой практики, для формирования бесшовного мозаичного изображения предлагается:

– осуществлять локальное уточнение функций, *F_{kx}, F_{ky}* по координатам одноимённых точек (ОИТ), расположенных в перекрывающихся частях изображе-

ний *B_k* ;

 выполнять глобальное и локальное яркостное выравнивание снимков между собой;

– интерактивно задавать линию «шва» в виде многоугольника с вершинами $E = \{m_{ki}, n_{ki}\}$, располагаемыми вдоль качественно совмещённых между собой объектов земной поверхности.

Организовать процесс формирования мозаичного изображения D, с учётом перечисленных требований, можно так, как это показано на рис. 2,а. В соответствии с приведенной схемой, на первом шаге с помощью аппарата корреляционно-экстремального анализа отождествляются одноименные точки (ОИТ) на перекрывающихся частях изображений В, . На основе набора ОИТ $T = \left\{ m_{ki}, n_{kj}, x_{kj}, y_{kj} \right\}$ корректируются функции F_{kx} , F_{ky} . Кроме того, для каждого B_k вычисляются параметры глобальной и локальной яркостной нормализации изображений Φ_k . По найденным функциям геометрической $\mathbf{F}_{k} = (\mathbf{F}_{km}, \mathbf{F}_{kn})$ и яркостной $\boldsymbol{\Phi}_{k}$ коррекции из исходных изображений синтезируется мозаичный снимок D. Изображение сохраняется на жестком диске, а затем открывается для интерактивного анализа качества совмещения снимков. Если на непрерывном изображении обнаруживаются дефекты совмещения, то: формируется линия «сшивки» Е, а также осуществляется редактирование ОИТ путём формирования корректирующего множества точек ΔT . По скорректированным параметрам вновь рассчитываются функции геометрического и яркостного преобразования и повторно выполняется синтез мозаичного изображения D с улучшенными характеристиками. При необходимости, процесс может повторяться до получения требуемого результата.

Можно заметить, что рассматриваемая технология отличается крайне низкой производительностью, поскольку требует многоэтапной обработки сверхбольших по объёму массивов видеоданных. Для устранения этого недостатка была разработана одноэтапная технология синтеза мозаичного изображения, схема которой приведена на рис. 2, б. В основе технологии лежит механизм виртуальной обработки данных, в соответствии с которым мозаичное изображение оперативно синтезируется в пределах области, соответствующей размерам экрана монитора. Для оперативного синтеза разномасштабных изображений используется пирамидальное представление снимков B_к, где r – коэффициент прореживания исходного снимка. Пример, поясняющий технологию синтеза виртуального изображения D, показан на рис. 3.

В соответствии с рис. 2,б, контроль качества совмещения изображений, задание линии «сшивки» *E* и формирование корректирующих точек ΔT осуществляются по виртуально синтезированному изображению

D^{*}. При этом основное сокращение временных затрат происходит за счёт того, что, во-первых, визуальный анализ выполняется по обзорным изображениям и, вовторых, для контроля оперативно синтезируются лишь границы совмещаемых снимков.



а) Формирование полного кадра
б) Формирование фрагмента детального кадра
по прореженным снимкам В_{kr}
по исходным изображениям В_{k1}

Рис. 3. Иллюстрация принципа виртуального синтеза мозаичного изображения



Рис. 4. Схема функционирования процессора синтеза мозаичного изображения

Физическое создание мозаичного изображения D в виде файла происходит за один проход обработки изображений B_{k1} , $k = \overline{1,K}$, по откорректированным на этапе анализа параметрам. Если не

требуется контроль над результатами обработки, то механизм виртуального синтеза не инициируется оператором, и формирование изображения *D* осуществляется по схеме, приведённой на рис. 2,а.

Важным элементом, позволяющим организовать технологию виртуальной обработки изображений В,, является механизм формирования изображения D, описываемый выражениями (2) и (3). Этот механизм реализован в процессоре синтеза строк выходного изображения, путем одновременной обработки всех изображений B_k на основе функций F_k и Φ_k . Схема функционирования процессора приведена на рис. 4. Основной функционал процессора реализован в рекурсивной процедуре синтеза фрагмента строки у снимка D по данным изображений $B_0 \dots B_k$, в соответствии с которой сначала формируется фрагмент, заданный координатой начала $x_{_{_{Hay}}}$, длиной ℓ и данными изображения В_к (верхнего слоя мозаичного снимка). Затем происходит формирование необходимых фрагментов видеоданных нижних слоев - изображений B₀...B_{k-1} для формирования участков, на которые не попадает изображение В_к, а также для реализации возможностей полупрозрачного отображения. Это позволит интерактивно управлять порядком объединения изображений путем исключения закрытых облачностью участков изображений с целью получения высококачественного изображения D.

Модель геометрического преобразования снимков

При разработке модели геометрического преобразования изображений *В*_к, необходимо решить две задачи:

– на основе прямых соотношений (1) получить функции обратного геометрического соответствия F_{km} , F_{kn} , используемые в выражениях (2), (3);

– выполнить локальное уточнение полученных уравнений по координатам ОИТ, идентифицированным в общих областях изображений.

Известно, что для спутниковых изображений земной поверхности прямые соотношения F_x , F_y , (здесь и далее для простоты индекс k опустим) имеют сложный вид и их аналитически обратить невозможно. Поэтому для получения обратных функций можно воспользоваться численными методами, рассмотренными в [1-3] и основанными на кусочно-билинейной или полиномиальной аппроксимации, $A: (F_x, F_y) \to (F_m, F_n)$, где A – оператор аппроксимации прямых функций координатного соответствия.

Для коррекции локальных взаимных геометрических искажений снимков были проанализированы модели «резиновая плёнка» и триангуляционная. Установлено, что с точки зрения вычислительных затрат и учёта специфики функционирования процессора синтеза мозаичного снимка, триангуляционная модель наилучшим образом подходит для устранения остаточных геометрических рассогласований объединяемых изображений. В соответствии с этой моделью, вначале по алгоритму Делоне [4, 5] формируются _Q треугольников, вершинами которых являются одноименные точки из множества *т*. После чего функция координатных преобразований в выражении (2) определяется соотношениями вида:

$$m = \mathbf{a}_{q} \times \begin{bmatrix} 1 \\ F_{m}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ F_{n}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix}, \quad n = \mathbf{c}_{q} \times \begin{bmatrix} 1 \\ F_{m}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ F_{n}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{bmatrix}$$
(4)

где q – номер треугольника, в который попадает точка (x, y); $\mathbf{a}_q = \begin{bmatrix} a_{0,q} & a_{1,q} & a_{2,q} \end{bmatrix}$, $\mathbf{c}_q = \begin{bmatrix} b_{0,q} & b_{1,q} & b_{2,q} \end{bmatrix}$, $q \in \begin{bmatrix} 1, Q \end{bmatrix}$ – векторы коэффициентов преобразований, рассчитываемых по координатам точек (m_{kj}, n_{kj}) и

$\left(\boldsymbol{X}_{kj}, \boldsymbol{Y}_{kj} \right)$.

Следует отметить две особенности, возникающие при использовании триангуляционной модели для синтеза мозаичного изображения. Во-первых, триангуляционная сеть, узлами которой являются ОИТ, не покрывает снимок целиком. Во-вторых, непосредственное использование триангуляционной модели предполагает для каждой точки определение номера треугольника, в который попадает точка (x, y), что приводит к недопустимым временным затратам. Поэтому, для трансформирования всего снимка по триангуляционной модели, множество ОИТ дополняется четырьмя точками для углов снимка. А для выполнения скоростной массовой кусочно-линейной обработки сначала определяются треугольники, перекрывающие формируемую строку мозаичного изображения, и затем для каждого найденного треугольника выполняется преобразование координат попадающих в него точек.

Алгоритм глобального и локального яркостного совмещения снимков

Особенность задачи яркостного совмещения снимков, входящих в мозаику, состоит в рекурсивном воздействии на них рассчитываемых параметров яркостного преобразования. Поэтому рассмотрим алгоритм глобального яркостного комплексирования изображений, свободный от этого недостатка.

При выравнивании фотометрических характеристик снимков, входящих в мозаику, сначала найдём параметры глобального яркостного преобразования каждого изображения u_k , v_k , $k = \overline{1,K}$. Для этого проанализируем перекрытия каждой пары изображений в пределах мозаики и вычислим средние значения

*b*_{ij} и СКО яркости *о*_{ij} снимка *B*_i в области перекры-

тия со снимком B_i , $i = \overline{1,K}$, $j = \overline{1,K}$, $i \neq j$.

Затем снимки разобьём на группы таким образом, чтобы в группы входили все связные между собой изображения. Здесь снимок считается связным с другим снимком, если он имеет общую область с ним или со связным с ним третьим снимком. Далее выполним независимое выравнивание яркости каждой группы. Допустим, что все *К* исходных снимков входят в одну группу. Для перекрытий значимой площади составляются уравнения:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{ij}\mathbf{u}_i + \mathbf{v}_i &= \mathbf{b}_{ji}\mathbf{u}_j + \mathbf{v}_{j,} \\ \sigma_{ij}\mathbf{u}_i &= \sigma_{ji}\mathbf{u}_j. \end{aligned} \tag{5}$$

Чтобы исключить тривиальное решение $u_k = v_k = 0$, $k = \overline{1,K}$, яркость и контраст одного из снимков, например первого, принимаются эталонными и остаются неизменными: $u_1 = 1$, $v_1 = 0$. Коэффициенты u_k , v_k , $k = \overline{2,K}$ находятся из составленных уравнений при помощи метода наименьших квадратов.

Полученные коэффициенты изменяют в среднем яркость и контраст снимков. Чтобы этого избежать, составим дополнительные условия:

$$\sum_{k=1}^{K} v_k = 0, \quad \prod_{k=1}^{K} u_k = 1,$$

для выполнения которых рассчитанные коэффициенты нормируются:

$$u'_{k} = u_{k} \frac{1}{\frac{1}{\kappa_{i} \prod_{i=1}^{K} u_{i}}}, v'_{k} = \left(v_{k} - \frac{1}{\kappa} \sum_{i=1}^{K} v_{i}\right) \frac{1}{\kappa_{i} \prod_{i=1}^{K} u_{i}}.$$

После выравнивания яркости и контраста снимков основным препятствием для создания бесшовной мозаики являются яркостные отличия в локальных областях изображений, вызванные неравномерностью освещенности земной поверхности, локальными сюжетными отличиями и т.д. Для компенсации подобных отличий построим в плоскости мозаичного снимка равномерную решётку. В пределах каждой ячейки для всех изображений В, найдём СКО яркости и средние значения яркости. Далее для каждой ячейки осредним полученные по всем изображениям значения и примем эти параметры в качестве эталонных. Для изображений В, найдём коэффициенты линейных фотометрических преобразований, приводящие яркость и контраст в пределах ячеек к эталонным. Поскольку в части ячеек могут отсутствовать найденные эталонные значения или значения СКО и среднего значения яркости снимка, коэффициенты фотометрического преобразования не могут быть определены описанным способом. Для расчёта пропущенных значений коэффициентов фотометрического преобразования по имеющимся значениям выполним восстановление непрерывных функций значений коэффициентов с использованием модели «резиновая плёнка» и выборку значений полученных функций в местах пропусков.

Чтобы при обработке не возникали скачки яркости на границах ячеек, используем билинейную интерполяцию для определения коэффициентов фотометрического преобразования произвольного пикселя изображения.

Пример результатов фотометрического выравнивания приведён на рис. 5.

Задание произвольных границ «обрезки» изображений в мозаике выполняет оператор, исключая области с плохим геометрическим и фотометрическим совмещением или закрытые облачностью. Границы видимости снимка в мозаике удобно вводить в виде полигона, вершины которого указываются сколом «мыши». Попадание точки в полигон при заполнении строки мозаики видеоданными исходного снимка проверяется по критерию «чётности».

Следующим важным этапом локального яркостного совмещения снимков является операция устранения видимой линии «сшивки». «Шов», вызванный остаточными геометрическими и фотометрическими отличиями снимков, может быть сглажен за счёт плавного полупрозрачного перехода от одного снимка к другому. При этом для верхнего снимка определяется степень прозрачности каждого пикселя в окрестности «стыка» величиной *d* пикселей таким образом, чтобы пиксель на границе был прозрачным, а пиксель на расстоянии *d* пикселей от границы – непрозрачным. Пример работы алгоритма показан на рис. 6.

Заключение

На базе рассмотренных в статье структурных и алгоритмических решений спроектирован унифицированных программный модуль формирования мозаичных снимков.

Этот модуль позволяет формировать глобальные карты облачности подстилающей поверхности по данным от КА NOAA, MeteoSat, Meteop-M. Модуль с



а) Мозаичное изображение без фотовыравнивания

б) Глобальное выравнивание яркости и контрастности снимков

в) Локальное яркостное совмещение

Рис. 5. Пример выполнения глобального и локального яркостного совмещения снимков



Рис. 6. Пример устранения яркостных различий вдоль линии «сшивки»

успехом применяется и для синтеза высокодетальных космокарт по данным самолетного сканера Eagle и спутника «Ресурс-ДК». Получаемые при этом мозаичные снимки не уступают по качеству тем, которые формируются специализированными фотограмметрическими комплексами ERDAS, Photomod и ENVI. Однако учет специфики представления изображений и использование высокоскоростных алгоритмов обработки больших массивов данных позволяют создать на приемных центрах непрерывный технологический цикл обработки спутниковой информации.

Литература

- 1. Злобин В.К., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. Обработка изображений в геоинформационных системах: Учебное пособие. Рязань, 2006. 264. С. 80-88
- Кузнецов А.Е., Назарцев В.В., Пресняков О.А. Получение мозаичных изображений от многокадровых систем наблюдения Земли. Материалы 16-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2010. С. 113-114.

- Vincent Tao, C., and Yong Hu, «A comprehensive study of the Rational function model for photogrammetric processing», PERS, Vol 67, No. 12, Dec 2001, 1347-1357 pp.
- Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++: Пер. с англ. – М.: БИНОМ, 1997. С. 304.
- L. Guibas and J. Stolfi, Primitives for the manipulation of general subdivisions and the computation of Voronoi diagrams, ACM Transactions on Graphics, 4 (2), 74-123 pp., 1985

THE ORGANIZATION OF REMOTE SENSING IMAGES MOSAICING PROCESS

Kuznetsov A.E., Presnyakov O.A.

The remote sensing images mosaicing technology based on virtual data processing procedure using pyramid image representation is proposed. The mathematical models of global and local seamless image geometric joining and intensity alignment are reviewed.

НОВОСТИ Европейской университетской программы фирмы Texas Instruments

Новые обучающие материалы по процессору OMAP-L138, совмещающему ядро DSP с плавающей точкой C6748 и ядро процессора ARM9, готовятся в тестовой версии. Ожидается, что данные материалы помогут пользователям перейти от C6713 DSK к новым платам «OMAP-L138 Experimenter's Kit» с новым уровнем производительности. Чтобы получить тестовую версию материалов, обращайтесь по электронному адресу: i-bannov@ti.com По адресу http://www.ti.com/ww/ru/universities.htm доступно большинство брошюр Европейской университетской программы на русском языке. Русскоязычный сайт университетской программы расширяется и модифицируется так, чтобы соответствовать основному англоязычному сайту. Если вы ещё не зарегистрированы в Университетской программе TI, вы можете сделать это по адресу: https://focuswebapps.ti.com/ViewsFlash/servlet/viewsflash?cmd=sho wform&pollid=Russia!university