

УДК 681.3

Фотограмметрический метод построения единого изображения при спутниковой съёмке секционированным датчиком изображений

Барабин Г.В.^{1*}, Гусев В.Ю.^{2}**

¹Научно-производственная фирма «Инфосистема»

ул. 3-я Мытищинская ул., 16, Москва, 129626, Россия

²Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: gbarabin@gmail.com*

***e-mail: gusev3@mail.ru*

Аннотация

Описывается метод построения единого изображения из сшиваемых полос, полученных отдельными ПЗС-датчиками спутниковой камеры, и имеющих общие перекрывающиеся участки. Целью являлась выработка метода, обеспечивающего высокую точность сшивки, и ориентированного на работу с изображениями больших размеров (порядка нескольких гигабайт). Предлагаемый метод использует строгую модель съёмки и полета спутника для уточнения ее параметров с целью совмещения полос изображений. Метод использует информацию об общих точках в области перекрытий изображений, которые находятся автоматически. С помощью фотограмметрических преобразований и минимизации целевой функции погрешностей совмещения подбираются такие параметры модели, которые обеспечивают совмещение полос в земной проекции. Затем для получения сшитого

изображения осуществляется переход в земную проекцию и оттуда на отдельные полосы изображений.

Ключевые слова: геометрическая коррекция спутниковых изображений, совмещение изображений, фотограмметрический метод, уточнение параметров спутниковой модели съемки

Введение

В настоящее время широко применяется космическая съёмка земной поверхности для самых различных целей. Это экологический мониторинг, слежение за развитием чрезвычайных ситуаций, сельскохозяйственный комплекс и т.д. Однако, получаемые при этом сырые изображения требуют нетривиальной многоступенчатой обработки с применением различных математических и численных методов и учёта специфики аппаратуры [1].

При съёмке распространёнными космическими аппаратами (КА), использующими сканерный тип съёмки, изображение местности регистрируется набором отдельных ПЗС матриц, расположенных рядом друг с другом. Матрицы размещаются в шахматном порядке в два ряда, что позволяет обеспечить неразрывную фиксацию изображения. Между матрицами имеется перекрытие для того, чтобы их можно было сопоставить по общим участкам и объединить в единое изображение.

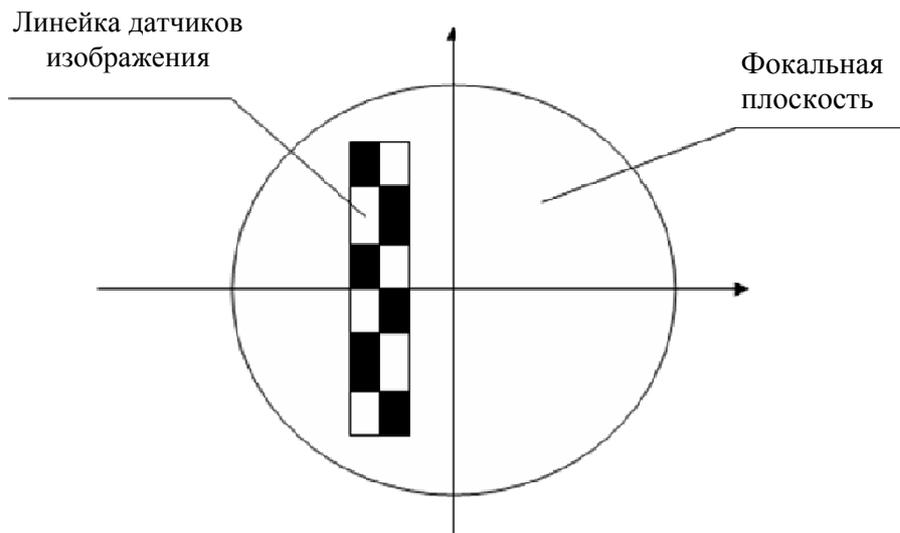


Рис. 1. Расположение линейки в фокальной плоскости.

В результате такой организации процесса съемки на обработку поступают отдельные изображения по матрицам со служебной информацией по каждой из них (времена записи строк и параметры движения). В таком случае возникает задача сшивки полос в единое изображение. Трудности данной задачи заключаются в том, что изображениям могут соответствовать разные частоты записи строк, и в том, что соответствующие матрицы могут иметь погрешности в точности их позиционирования в фокальной плоскости, заключающиеся в повороте и смещении. На Рис. 2 представлен набор из 6 шестиполосных изображений, полученных со спутника Ресурс-ДК. На Рис. 3 изображен фрагмент зоны перекрытия ПЗС матриц.



Рис. 2. Набор снимков по шести зонам компенсации ОЭП.



Рис. 3. Фрагмент области стыковки двух матриц с зонами перекрытий.

На данный момент существуют различные методы совмещения полос спутниковых изображений. Наиболее распространены полиномиальные методы [4, 6], которые выполняют сшивку, опираясь только на исходные изображения, без учета имеющихся паспортных параметров съемочной системы, которые включают в себя данные о положении матриц в фокальной плоскости, параметры дисторсии. В результате совмещение изображений получается без учета модели съемки. В данной статье предлагается фотограмметрический метод сшивки изображений, который в отличие от полиномиальных методов учитывает как результаты бортовых измерений элементов внешнего ориентирования, так и результаты наземной калибровки съемочной аппаратуры (положения ПЗС матриц в фокальной плоскости, дисторсию и т.п.). Совместное уравнивание элементов внешнего и внутреннего ориентирования с использованием опорных и связующих точек позволяет добиться не только максимальной точности сшивки полос изображений, но и максимальной точности преобразования сшитого изображения в картографическую проекцию. Подобный подход также известен и предлагался, например, в работе Гомозова О.А. [8]. Однако, недостатком указанной работы является раздельное уравнивание элементов ориентирования.

Фотограмметрический метод совмещения изображений

Идея метода заключается в том, чтобы определить уточненные параметры реального положения ПЗС матриц в фокальной плоскости на протяжении съемки так, чтобы достичь совмещения изображений.

В качестве входных данных имеем изображения и паспортную информацию. На основе паспортной информации вычисляются значения элементов внешнего ориентирования (ЭВО) – углы R, F, L, V, G, A (геоцентрический радиус, широта, долгота, углы тангажа, крена, рысканья) ориентации КА в фиксированные временные отсчеты. Также там содержатся данные о номинальном положении матриц x_i, y_i, α_i (смещения в фокальной плоскости и угол разворота). Значения параметров R, F, L, V, G, A аппроксимируются полиномом третьей степени.

В рамках данного метода происходит уточнение ЭВО с учетом не только опорных, но и связующих точек. При этом, R, F, L, V, G уточняются совместно для всех матриц, так как данные элементы не повлияют на совмещение матриц, которое вызвано погрешностями в их установке. Отдельно для каждой матрицы уточняется угол A , так как он находится в одной плоскости с углом α_i и исправит погрешность его значения, и положения матриц x_i, y_i .

Так как элементы ЭВО аппроксимируются полиномами, то уточняться будут коэффициенты полиномов. Как показали экспериментальные проверки, достаточно уточнять первые коэффициенты полиномов $R_0, F_0, L_0, V_0, G_0, A_0$, так как флуктуации во время полета спутника учитываются достаточно хорошо, а систематические сдвиги имеют место. Привлечение большего числа разнородных параметров, соответствующих различным степеням, негативно сказывается на сходимости итерационного метода подбора параметров, так как матрица частных производных получается плохообусловленной. Таким образом, уточняются общие параметры R_0, F_0, L_0, V_0, G_0 и индивидуальные для каждой матрицы A_{0i}, x_i, y_i .

Параметры определяются из условия минимизации среднеквадратических невязок на связующих точках. Связующие точки находятся автоматически с помощью локального корреляционного метода [2, 3]. При поиске точек используется субпиксельное уточнение координат [5] и браковка точек [4, 6]. Так как используются ЭВО, то координаты связующих точек (i, j) с помощью формулы прямого фотограмметрического преобразования с учетом текущих ЭВО переводятся в координаты земной проекции $F_k(i, j)$. Использование опорных точек наряду со связующими, обеспечивающими совмещение изображений, не дает системе свободно менять ЭВО.

Перед использованием опорных точек необходимо убедиться в их корректности, так как они находятся в ручном режиме с помощью сопоставления с опорной картой, и возможны ошибки оператора. Поэтому перед началом подбора параметров производится автоматическая браковка опорных точек.

Для подбора параметров используется оптимизационный метод поиска с целью минимизации целевой функции [7]. В ходе экспериментов было установлено, что для поиска параметров следует использовать расширенный метод Гаусса-Ньютона

$$\omega_{j+1} = \omega_j + \beta_j (A_j^T P A_j + Q)^{-1} A_j^T P B_j,$$

где j – номер итерации, β – регулятор шага, который вычисляется на каждой итерации, P – весовая диагональная матрица для связующих и опорных точек, Q – весовая диагональная матрица для параметров ω . В случае если не использовать

специальные весовые матрицы и регулятор шага β , то итерационной алгоритм может не сходиться.

Матрица B_j , которая соответствует вектору невязок, примет вид:

$-(F_N(i_{op1}, j_{op1}) - N_1)$
$-(F_E(i_{op1}, j_{op1}) - E_1)$
.....
$-(F_N(i_{opn}, j_{opn}) - N_n)$
$-(F_E(i_{opn}, j_{opn}) - E_n)$
$-(F_N(i_{cс1}^1, j_{cс1}^1) - F_N(i_{cс1}^2, j_{cс1}^2))$
$-(F_E(i_{cс1}^1, j_{cс1}^1) - F_E(i_{cс1}^2, j_{cс1}^2))$
.....
$-(F_N(i_{cсt}^1, j_{cсt}^1) - F_N(i_{cсt}^2, j_{cсt}^2))$
$-(F_E(i_{cсt}^1, j_{cсt}^1) - F_E(i_{cсt}^2, j_{cсt}^2))$

где первая часть соответствует разностям на опорных точках по координатам N (направление на север в плоских прямоугольных координатах) и E (направление на восток в плоских прямоугольных координатах), а нижняя часть соответствует разностям на связующих точках также в плоской прямоугольной системе координат соответствующей земной поверхности. F – означает функцию прямой фотограмметрической засечки, и она зависит от ЭВО и параметров конкретной ПЗС матрицы, F_N и F_E – координаты N и E точки после преобразования. $N_1 \dots N_n, E_1 \dots E_n$ – известные координаты опорных точек на местности; $(i_{cс1}^1, j_{cс1}^1), (i_{cс1}^2, j_{cс1}^2)$ – пара связующих точек на соседних изображениях.

Матрица A частных производных невязок из $-B$ по соответствующим параметрам, то есть частные производные функции F , имеет блочную структуру, определяемую тем, что одновременно в системе присутствуют опорные и связующие точки, и общие и индивидуальные параметры ПЗС матриц.

R_0	F_0	L_0	V_0	G_0	x_1	y_1	A_{01}	x_2	y_2	A_{02}	...	x_m	y_m	A_{0m}
$A_{on}(1)$					$A_{on}(1)$			O			...	O		
$A_{on}(2)$					O			$A_{on}(2)$						
...					O			O						
$A_{on}(M)$					O			O						
$A_{ce}(1,2)$					$A_{ce}(1,2)$			$A_{ce}(1,2)$...	O		
$A_{ce}(2,3)$					O			$A_{ce}(2,3)$						
...					O			O						
$A_{ce}(M-1,M)$					O			O						

Верхняя часть матрицы A с блоками $A_{op}(m)$ соответствует уравнениям по опорным точкам, а нижняя часть – уравнениям по связующим точкам. Блоки $A_{op}(m)$ для каждой матрицы изображения строятся по количеству опорных точек, расположенных на ней, а блоки $A_{ce}(m)$ содержат число строк, соответствующее числу связующих точек, расположенных на изображении m . При этом одной ПЗС матрице могут соответствовать два блока, так как связующие точки располагаются слева и справа на изображении, кроме случая крайних изображений. Сами частные производные вычисляются численным способом.

Весовая диагональная матрица P имеет размерность по числу опорных и связующих точек с учетом строк для обоих координат. Данная матрица регулирует соотношение по “важности” между опорными и связующими точками. Так как для качественного совмещения более важны минимальные невязки на связующих точках, то им даются большие веса. Для задания весов используется априорная информация о точности определения данных точек. Диагональные элементы задаются равными $1/\sigma^2$, где σ – погрешность измерения точки.

Весовая диагональная матрица Q имеет размерность по числу определяемых параметров ω и задает веса значений параметров. Так регулируется и масштабируется диапазон поиска значений отдельных параметров алгоритмом. В противном случае метод может расходиться из-за того, что по некоторым переменным оптимальный диапазон будет очень узким, по другим – широким. В этом случае целевая функция имеет “овражный” вид. Диагональные элементы матрицы также задаются как $1/\sigma^2$, где σ берется равной среднеквадратическим отклонениям коэффициентов полиномов, аппроксимирующих ЭВО, вычисляемых с использованием паспортных данных о погрешностях исходных ЭВО, а для смещений матриц σ устанавливается на основе паспортных данных о погрешностях установки матриц.

Кроме всего этого, для обеспечения лучшей сходимости на каждом шаге вычисляется регулятор шага β [7]. Начальное значение β берется равным 1. Если на текущем шаге норма увеличилась, то β уменьшается в два раза. Это продолжается до тех пор, пока на текущем шаге норма не будет меньше нормы на предыдущем шаге или не будет достигнуто предельное число для β .

В результате применения всех описанных приемов удалось достичь уверенной сходимости алгоритма за несколько итераций.

После определения уточненных параметров ЭВО и позиций матриц производится формирование единого изображения. Задаются параметры ЭВО для сшитого изображения (могут быть выбраны исходные ЭВО). Далее для пикселей сшитого изображения осуществляется переход на Землю с использованием ЭВО сшитого изображения, затем с Земли осуществляется переход на конкретное

изображение с использованием уточненных ЭВО и позиций матриц. Использование фотограмметрических преобразований на каждом шаге существенно замедляет процесс обработки, поэтому строгое вычисление пикселей целесообразно проводить с некоторым шагом. Для внутришаговых точек предлагается проводить линейную интерполяцию. Данный прием позволяет существенно ускорить процесс и сделать его более близким по времени к нефотограмметрическим методам.

Заключение

В статье предложен фотограмметрический метод сшивки полос спутниковых изображений, полученных соседними ПЗС матрицами. Задача заключалась в разработке высокоточного метода, поэтому были рассмотрены различные меры повышения точности на разных технологических этапах сшивки.

Предложенный метод использует информацию об общих точках в области перекрытий, найденных с помощью локального кросскорреляционного поиска по шаблону с субпиксельной точностью с браковкой. Идея метода заключается в подборе параметров модели съемки, в том числе положения ПЗС матриц, так чтобы достичь совмещения изображений в земной проекции.

Метод является строгим с формальной точки зрения, так как он построен на базе модели съемки и подборе параметров съемочной системы и спутника. Преимуществом данного метода является получение, наряду со сшитым изображением, уточненных параметров съемки и полета спутника. Но метод требует дополнительно наличия ЦМР и задания опорных точек, и скорость его работы может быть ниже методов, не использующих фотограмметрические преобразования.

В случае если не требуется высокая оперативность обработки, данный метод демонстрирует хорошие результаты.

Библиографический список

1. Злобин В.К., Еремеев В.В. Обработка аэрокосмических изображений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 288 с.
2. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
3. Richard Szeliski. Computer vision: Algorithms and Applications. Springer-Verlag London Limited, 2011.
4. Гусев В.Ю. Геометрическая коррекция спутниковых изображений. В сб.: Ломоносов – 2013: XX Международная научная конференция ... секция «Вычислительная математика и кибернетика»: – М.: Издательский отдел факультета ВМиКМГУ; МАКС Пресс, 2013. с. 102–104.
5. Misganu Debella-Gilo, Andreas Käab. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. Remote Sensing of Enviroment, **115** (2011), pp. 130–142.
6. Гусев В.Ю. Методы сшивки перекрывающихся полос спутниковых изображений на начальной стадии обработки. 11-ая Международная конференция “Авиация и космонавтика – 2012”. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. с. 253-254.
7. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с.

8. Гомозов О.А. Методы и технологии геометрической обработки космической видеоинформации от оптико-электронных систем высокого пространственного разрешения // Дисс. к.т.н., Рязань, 2005. – 153 с.