

ОРИЕНТИРОВАНИЕ И КАЛИБРОВКА ИЗОБРАЖЕНИЙ СИСТЕМЫ PRISM КА ALOS*

С. Косаман (S. Kosaman), А. Грун (A. Gruen) (Институт геодезии и фотограмметрии Швейцарского государственного технологического института (ETH Zurich), Цюрих, Швейцария)

Космические изображения с высокой разрешающей способностью, полученные методом линейного сканирования, как панхроматические, так и мультиспектральные, в последние годы находят широкое применение в практической деятельности, однако требуют специальной фотограмметрической и тематической обработки. Большинство камер, использующих линейные ПЗС для получения изображений, оснащены устройствами для определения пространственного (планового и высотного) положения камеры. Это приемники GPS, инерциальные системы (IMU-системы) и системы астроориентации.

Для полноценного использования потенциальных возможностей изображений, получаемых с помощью линейных ПЗС, классические методы анализа спутниковых изображений должны быть расширены, чтобы правильно описать геометрию изображения, которая характеризуется почти параллельной проекцией в направлении полета и перспективной проекцией в поперечном направлении. Вообще, обработка такого типа изображений является интересной задачей и требует модернизации алгоритмов, что позволяет пересмотреть и улучшить многие компоненты фотограмметрической обработки.

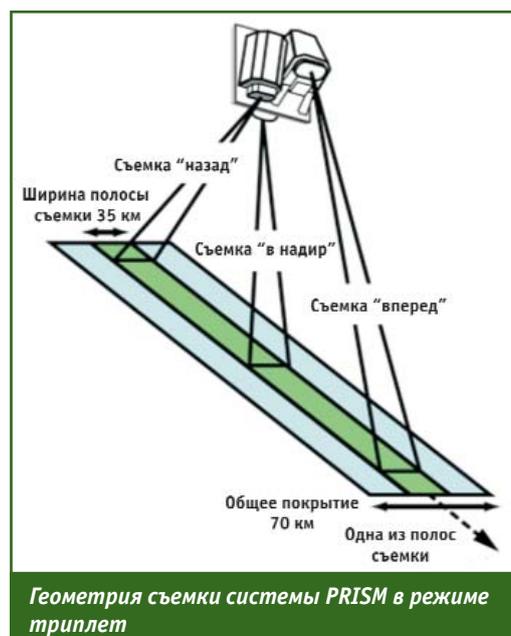
В Институте геодезии и фотограмметрии (Цюрих, Швейцария) разработан алгоритм обработки космических изображений высокого разрешения, реализованный в виде программного обеспечения для точной обработки спутниковых изображений SAT-PP (Satellite Image Precision Processing). Это программное обеспечение включает следующие функции: измерение опорных наземных точек, пространственную привязку изображений с использованием модели RPC (коэффициенты рационального многочлена) и других моделей камеры, построение цифровой модели местности с применением геометрического уравнивания сканерных изображений по методу наименьших квадратов, состоящих из массива линейных датчиков и кадровых изображений, создание ортотрансформированных изображений и дешифрирование. С помощью ПО SAT-PP можно обрабатывать изображения IKONOS, QUICKBIRD, SPOT5 HRG/HRS, Cartosat-1, а также космические снимки, получаемые аналогичными камерами.

▼ Строгая модель картографической стереосистемы PRISM космического аппарата ALOS

Камеры системы PRISM, установленной на КА ALOS, запущенной в январе 2006 г. (см. Гео-

профи. — 2006. — № 6. — С. 28–31), работают в режиме линейного сканирования. Каждая из трех камер имеет линейные ПЗС. Система PRISM позволяет получать моно- и стереоснимки с разрешением до 2,5 м на местности.

Рассмотрим подробнее строгую модель системы PRISM. В этой модели используется уравнение коллинеарности, которое позволяет применять две модели траектории. Система PRISM имеет возможность получать три изображения на сцену (триплет) квазисовременно с визированием «вперед», «в надир» и «назад» в продольном направлении (см. рисунок), а каждая сцена



* Публикуется сокращенный вариант технического перевода статьи Kosaman S., Gruen A. Orientation and Calibration of ALOS/PRISM Imagery / ISPRS Workshop «High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information», 29 May — 1 June, 2007, Hannover, Germany, (proceedings on CD-ROM), выполненного М.А. Болсуновским и А.В. Беленовым (компания «Совзонд»).

— стереопары изображений с визированием в следующих комбинациях: «вперед — в надир», «вперед — назад» и «назад — в надир». Временной интервал получения изображений с визированием «вперед», «в надир» и «назад» составляет 45 с между каждым последующим изображением.

Конструкция съемочной системы PRISM имеет следующие особенности. Камера, которая смотрит «в надир», содержит 6 элементов ПЗС, в то время как камеры с визированием «вперед» и «назад» содержат по 8 элементов ПЗС. Строки всех изображений имеют перекрытие в 32 пикселя. Когда выбирается ширина полосы покрытия 35 км, изображения системы PRISM получают, используя данные от четырех элементов ПЗС для трех камер. Выбор используемых элементов ПЗС зависит от проекта и выполняется оператором КА.

Каждая камера имеет собственную систему координат. Ось X параллельна направлению полета (продольное направление), а ось Y — линейке ПЗС (поперечное направление). Начало системы координат изображения расположено в главной точке оптической системы камеры.

Параметры пространственного положения траектории платформы системы PRISM содержатся в дополнительных файлах, поставляемых с изображениями, и основаны на данных системы астроориентации и GPS-измерений. Эти параметры используются как стохастические неизвест-

ные при уравнивании.

Рабочей группой по калибровке (аттестации) КА ALOS, организованной владельцем спутника — Японским аэрокосмическим агентством (JAXA), были добавлены результаты исследования по возможности уравнивания изображений, получаемых системой PRISM, выполненные в Институте геодезии и фотограмметрии.

▼ Экспериментальные исследования

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований, выполненных авторами, по пространственной привязке ранних изображений, полученных с помощью системы PRISM. Для проведения экспериментальных исследований по этому проекту были использованы данные, полученные на четырех тестовых (испытательных) полигонах в Пьемонте (Италия), Саитама (Япония), Берне/Туне (Швейцария) и Оказаки (Япония) (табл. 1).

Полигон Саитама расположен на северо-востоке Токио. Первый набор данных системы PRISM по этому полигону был подготовлен Японским аэрокосмическим агентством. Координаты наземных опорных точек на изображениях измерили специалисты JAXA. Из-за неравномерного расположения, эти точки были дополнены новыми наземными опорными точками, привязку которых выполнили специалисты Института геодезии и фотограмметрии.

Данные испытательного полигона Берн/Тун были подготовлены Швейцарским государственным технологическим институтом в Цюрихе. Набор данных создан по контракту с JAXA. Координаты наземных опорных точек определены с помощью приемников GPS.

Испытательный полигон Пьемонт расположен в северо-западной части Италии. Данные были подготовлены GAEL (Франция). Координаты наземных опорных точек определены с помощью приемников GPS.

Испытательный полигон Оказаки расположен в префектуре Аичи на острове Хонсю в Японии. Набор данных был подготовлен JAXA.

Хотя изображения имели специфические радиометрические проблемы, результаты ориентирования камер демонстрировали высокий уровень точности.

Особенностью данного проекта было то, что на первом этапе отсутствовали данные лабораторной калибровки положения элементов ПЗС и фокусного расстояния камер. Поэтому на данном этапе исследования изображений, полученных с полигона Саитама, наблюдались остаточные невязки в координатах опорных наземных точек по всему полю изображения для трех камер (с визированием «вперед», «в надир» и «назад»). Эти систематические ошибки на изображениях указывали на смещение в относительных положениях элементов ПЗС. Было сделано предположение, что невязки в

Основные параметры данных системы PRISM, использованные при исследованиях

Таблица 1

Наименование параметров / Название полигона	Саитама (Япония)	Берн/Тун (Швейцария)	Пьемонт (Италия)	Оказаки (Япония)
Дата съемки	30 апреля 2006 г.	21 сентября 2006 г.	04 сентября 2006 г.	20 июня 2006 г.
Количество изображений PRISM	Триплет («вперед», «в надир», «назад»)			
Углы наклона	-23,8°; 0°; 23,8°			
Количество опорных наземных точек	203	82	29	51
Количество связующих точек	111	24	142	135

координатах наземных опорных точек могут быть компенсированы параметрами, полученными в процессе самокалибровки.

Самокалибровка является эффективной и мощной технологией, используемой для калибровки фотограмметрических съемочных систем. Метод самокалибровки применяется для исправления координат каждой точки i изображения j (x_{ij} , y_{ij}). В правую часть уравнений коллинеарности добавлены соответствующие поправочные члены Δx_{ij} и Δy_{ij} , которые включают дополнительные параметры:

$$x_{ij} = -C_j (F_x/F_z) + \Delta x_{ij},$$

$$y_{ij} = -C_j (F_y/F_z) + \Delta y_{ij}.$$

Если использовать этот метод в контексте общего блочного уравнивания, то он повышает точность вычисления пространственных координат объекта, улучшает элементы внешнего и внутреннего ориентирования камеры, а также моделирует систематические ошибки. Метод самокалибровки является альтернативным и дополняет метод лабораторной и полевой калибровки. Кроме того, в методе самокалибровки при уравнивании можно использовать данные лабораторной калибровки как стохастические входные данные.

Для самокалибровки изображений системы PRISM первоначально было определено 30 дополнительных параметров для трех камер. Эти параметры описаны в соответствии с физической конструкцией съемочной системы PRISM. Кроме того, отдельно для каждой камеры системы PRISM были определены дополнительные параметры. Набор этих параметров для каждого изображения включал:

— масштабный коэффициент в направлении y ;

— коэффициент кривизны линейки ПЗС;

— $8 = 2 \times 4$ смещений центров элементов ПЗС от главной точки.

Математические выражения поправочных членов Δx_{ij} и Δy_{ij} имеют вид:

$$\Delta x_{ij} = \Delta x_{nj} + y_{ij} r_{ij}^2 b_j,$$

$$\Delta y_{ij} = \Delta y_{nj} + y_{ij} s_j,$$

где $i = 1, \dots, m$; m — количество точек;

$j = 1, \dots, 3$ — количество камер;

$n = 1, \dots, 4$ — количество элементов ПЗС в фокальной плоскости;

x_{ij} , y_{ij} — координаты каждой i -й точки изображения, полученного камерой j ;

Δx_{nj} , Δy_{nj} — смещение центра каждого n -го элемента ПЗС от главной точки камеры j ;

b_j — коэффициент кривизны линейки ПЗС для камеры j ;

s_j — масштабный коэффициент для камеры j ;

$$r_{ij}^2 = (x_{ij} - x_{pj})^2 + (y_{ij} - y_{pj})^2.$$

На втором этапе использовались данные лабораторной калибровки для камер системы PRISM, предоставленные JAXA. После проведения первых расчетов для данных полигона Сайтама с 30 дополнительными параметрами и с использованием данных лабораторной калибровки отклонения в положениях элементов ПЗС были признаны незначительными. Поэтому при дальнейших экспериментальных исследованиях использовалась самокалибровка с двумя дополнительными параметрами на изображение каждой камеры, т. е. шесть дополнительных параметров на одно изображение, получаемое системой PRISM.

Для определения степени влияния количества опорных наземных точек на точность определения пространственного положения изображений наборы данных с полигонов Сайтама, Оказаки и Берн/Тун были протестированы с 5, 9 и 25 наземными опорными точками, а полигона Пьемонта только с 5 и 9, из-за меньшего числа пригодных опорных точек.

Для пространственной привязки изображений авторы применили модифицированный алгоритм блочного уравнивания с возможностью использования трех моделей траектории, разработанный ими в 2003 г. Для тес-

тирования точности ориентирования системы PRISM использовалась модель непрерывного геопозиционирования DGR (Direct Georeferencing Model) и кусочная полиномиальная модель PPM (Piecewise Polynomial Model). Обе модели были изменены в соответствии с требованиями системы PRISM и расширены дополнительными параметрами для самокалибровки. Для модели PPM определили два участка на траекторию изображения. Во всех исследованиях применялась самокалибровка. Значения коэффициентов кривизны ПЗС и масштабных коэффициентов были разными для различных наборов данных.

Для трех направлений визирования системы PRISM априорные стандартные отклонения значений координат траектории составили 2 м. Так как значения высоты траектории не были предоставлены во всех наборах данных, они оценивались в процессе уравнивания с использованием слабых ограничений. Точность наземных опорных точек принималась равной 0,5 м в плане и по высоте. Априорное стандартное отклонение для всех измерений на снимке принималось равным половине пикселя.

Для оценки точности планового и высотного положения объектов на изображениях использовались следующие показатели:

— $RMSE_{x,y}$ и $RMSE_z$ ($RMSE$ — Root Mean Square Error) — средние квадратические погрешности разностей в плане и по высоте между значениями известных и вычисленных координат контрольных точек;

— $SIGMA_{x,y}$ и $SIGMA_z$ — средние квадратические погрешности разностей в плане и по высоте между значениями известных координат контрольных точек и определенных из ковариационной матрицы неизвестных.

Рассмотрим подробнее результаты ориентирования изображений по каждому полигону.

Точность результатов обработки данных тестового полигона Саитама

Таблица 2

Количество наземных опорных точек	5		9		25	
	DGR	PPM	DGR	PPM	DGR	PPM
Модель ориентирования	DGR	PPM	DGR	PPM	DGR	PPM
RMSE _{x,y} , м	1,38	2,12	1,3	1,3	1,3	1,33
SIGMA _{x,y} , м	0,80	1,58	0,75	0,88	0,74	0,73
RMSE _z , м	2,46	2,79	2,17	2,33	2,1	2,33
SIGMA _z , м	2,12	2,79	2,0	2,17	1,92	1,88

Примечание. Значения RMSE_{x,y}, RMSE_z, SIGMA_{x,y} и SIGMA_z, приведенные в таблице, измерены на графиках оригинала статьи.

Полигон Саитама. Для изображений, полученных с этого полигона, использовались модели DGR и PPM на двух участках траектории. Контрольные точки были выбраны из общего количества наземных опорных точек и не использовались при уравнивании. Значения средних квадратических погрешностей в шести тестах изменялись в диапазоне 0,36–0,40 пикселя. Данные тестирования изображений полигона Саитама, приведенные в табл. 2, показали следующее. С использованием моделей DGR и PPM значения RMSE_{x,y} не превышают одного пикселя, даже с использованием только пяти наземных опорных точек. Полученные результаты с использованием модели DGR не сильно зависят от количества наземных опорных точек (5, 9 или 25). Значения RMSE_z примерно одинаковы во всех тестах. Если сравнивать модели DGR и PPM, значения точности примерно одинаковы для 9 и 25 наземных опорных точек. Модель PPM требует большего количества стабильных наземных

опорных точек. Нестабильность модели PPM видна по вычисленным значениям SIGMA_{x,y} и SIGMA_z для случая с пятью наземными опорными точками. Во всех случаях средние квадратические отклонения более стабильны, чем разности RMSE_{x,y} и RMSE_z. Это указывает на существование незначительных остаточных систематических ошибок.

Полигон Берн/Тун. Результаты исследований на этом полигоне приведены в табл. 3. Экспериментальные значения средних квадратических погрешностей колебались в диапазоне 0,37–0,53 пикселя. Точность в плане и по высоте во всех тестах при использовании модели DGR составила менее одного пикселя по значениям RMSE_{x,y} и RMSE_z. Использование модели PPM дало нестабильные результаты с небольшим числом наземных опорных точек (5). В некоторых случаях значения SIGMA_z получились больше, чем соответствующие значения RMSE_z.

Полигон Пьемонт. Исследования точности ориентирования

изображений, полученных с этого полигона, для обеих моделей проводились с пятью и девятью наземными опорными точками. Как видно из табл. 4 значения точности находятся на уровне одного пикселя для всех моделей. Для пяти наземных опорных точек результаты с использованием модели DGR вновь получились лучше, чем для модели PPM. Экспериментальные значения средних квадратических погрешностей похожи во всех тестах и изменяются в диапазоне 0,27–0,29 пикселя. Все значения SIGMA_z больше по величине, чем RMSE_z.

Полигон Оказки. Поскольку исследования на этом полигоне выполнялись в последнюю очередь, для небольшого количества наземных опорных точек модель PPM не исследовалась. Для модели DGR использовались 5, 9, и 25 наземных опорных точек, а для модели PPM — только 25, и траектория была смоделирована для одного участка. В табл. 5 приведены результаты обработки данных тестового полигона Оказки, которые показывают

Точность результатов обработки данных тестового полигона Берн/Тун

Таблица 3

Количество наземных опорных точек	5		9		25	
	DGR	PPM	DGR	PPM	DGR	PPM
Модель ориентирования	DGR	PPM	DGR	PPM	DGR	PPM
RMSE _{x,y} , м	2,25	4,34	2,0	2,46	1,85	1,94
SIGMA _{x,y} , м	0,75	2,56	0,75	1,00	0,88	1,06
RMSE _z , м	1,62	5,25	1,56	3,31	1,5	3,25
SIGMA _z , м	2,12	6,5	2,00	2,66	2,44	2,81

Примечание. Значения RMSE_{x,y}, RMSE_z, SIGMA_{x,y} и SIGMA_z, приведенные в таблице, измерены на графиках оригинала статьи.

следующее. При использовании модели DGR нет большой разницы в плановой точности в зависимости от количества наземных опорных точек (5 или 25). Однако точность по высоте повышается с увеличением числа наземных опорных точек, хотя в ряде случаев $SIGMA_z$ больше по величине, чем $RMSE_z$. Экспериментальные значения средних квадратических погрешностей похожи во всех тестах и изменяются в диапазоне 0,51–0,54 пикселя.

В заключение следует отметить, что отсутствие информации о точном местоположении отдельных элементов ПЗС-камер системы PRISM относительно главной точки камеры приводит к существенным систематическим ошибкам в положении объекта на снимке. Применяя соответствующие дополнительные параметры в процедуре самокалибровки (два смещения для каждого элемента в пространстве изображения), удалось компенсировать эти систематические ошибки, получив, таким образом, гораздо более точные результаты (улучшив их на 50%).

Использование для пространственной привязки модели непрерывного геопозиционирования (DGR) позволяет получить хорошие по точности результаты с применением небольшого количества наземных опорных точек, в то время как кусочная полиномиальная модель (PPM) при небольшом количестве наземных опорных точек дает менее устойчивые по точности результаты. При увеличении количества наземных опорных точек до 9 и более обе модели приводят к одинаково хорошим результатам.

Средние значения результатов оценки точности ориентирования камер для четырех полигонов с использованием модели DGR составили:

— в плане (на местности) — $RMSE_{xy} = 1,2\text{--}2,3$ м при $SIGMA_{xy} = 0,58\text{--}0,94$ м;

— по высоте (на местности) — $RMSE_z = 1,0\text{--}2,5$ м при $SIGMA_z$

Точность результатов обработки данных тестового полигона Пьемонт

Таблица 4

Количество наземных опорных точек	5		9	
	DGR	PPM	DGR	PPM
Модель ориентирования	DGR	PPM	DGR	PPM
$RMSE_{xy}$, м	2,35	2,58	2,22	2,21
$SIGMA_{xy}$, м	0,58	2,38	0,58	0,69
$RMSE_z$, м	1,04	2,38	1,04	1,18
$SIGMA_z$, м	1,59	4,09	1,66	1,84

Примечание. Значения $RMSE_{xy}$, $RMSE_z$, $SIGMA_{xy}$ и $SIGMA_z$, приведенные в таблице, измерены на графиках оригинала статьи.

Точность результатов обработки данных тестового полигона Окаzuki

Таблица 5

Количество наземных опорных точек	5		9		25	
	DGR	DGR	DGR	PPM	DGR	PPM
Модель ориентирования	DGR	DGR	DGR	PPM	DGR	PPM
$RMSE_{xy}$, м	2,00	1,83	1,93	2,00	2,00	2,00
$SIGMA_{xy}$, м	1,12	0,96	0,92	0,95	0,95	0,95
$RMSE_z$, м	3,16	2,42	1,83	1,82	1,82	1,82
$SIGMA_z$, м	2,6	2,64	2,58	2,57	2,57	2,57

Примечание. Значения $RMSE_{xy}$, $RMSE_z$, $SIGMA_{xy}$ и $SIGMA_z$, приведенные в таблице, измерены на графиках оригинала статьи.

= 1,6–2,6 м;

— в плане (на изображении)

— средняя квадратическая погрешность равна 0,27–0,54 пикселя.

Следует отметить, что в некоторых случаях точность экспериментальных значений по высоте ($RMSE_z$) даже лучше, чем точность соответствующих теоретических значений.

Анализируя остаточные погрешности контрольных точек, следует отметить, что в результатах все еще остаются незначительные систематические ошибки. Это обстоятельство может стать предметом дальнейших исследований.

Самокалибровка — полезный метод для уточнения модели камеры. Однако для изображений PRISM еще не проводились исследования на тему, какие дополнительные параметры лучше всего подходят для нее. В любом случае, самокалибровка должна использоваться осторожно. Статистические исследования дополни-

тельных параметров являются главным условием для успешного использования этого метода.

Если сравнить полученные результаты пространственной привязки и уравнивания системы PRISM КА ALOS с теми, которые были получены для других спутниковых систем подобного типа, таких как SPOT-5 и IKONOS, можно отметить, что точность, выраженная в пикселях, примерно такая же, как для данных с КА IKONOS.

RESUME

The article presents estimates of spatial georeferencing and adjustment of the imagery obtained by the PRISM system of the ALOS spacecraft. In order to verify the PRISM system orientation accuracy the authors used two models including the Direct Georeferencing Model and the Piecewise Polynomial Model. These models were modified to meet the PRISM system requirements as well as extended by adding parameters for selfcalibration.