

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТА ДЗЗ CARTOSAT-1 STEREO ORTHOKIT

П.С. Титаров  
«Ракурс»

## 1. Введение

В статье представлены результаты исследования геометрических характеристик продукта дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) Cartosat-1 Stereo Orthokit, которое было выполнено в рамках программы C-SAP (Cartosat-1 Scientific Assessment Programme), проводимой индийским космическим агентством ISRO (Indian Space Research Organization) и Международным обществом фотограмметрии и дистанционного зондирования ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing).

Целью исследования являлось изучение достижимой геометрической точности продуктов фотограмметрической обработки (цифровых моделей рельефа и ортоизображений), получаемых по снимкам с космического аппарата Cartosat-1.

## 2. Cartosat-1 и продукт дистанционного зондирования Stereo Orthokit

Космический аппарат (КА) Cartosat-1 (IRS P5) был разработан индийским космическим агентством ISRO специально для решения картографических задач. Спутник был выведен на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 618 км 5 мая 2005 года.

На КА установлены два панхроматических оптико-электронных сенсора на линейках ПЗС, получающие изображения с пространственным разрешением около 2.5 м. Направление обзора одного сенсора отклонено от надира по тангажу на  $26^\circ$  вперед вдоль направления полета, а другого – на  $5^\circ$  назад; реализована возможность изменения направлений обзора по крену. Одновременно работающие сенсоры либо получают стереопару изображений с отношением базиса съёмки к высоте 0.62 и шириной полосы захвата около 26 км (в надире), либо выполняют моноскопическую съёмку с шириной полосы захвата 55 км. Динамический диапазон сенсоров составляет 10 бит на пиксель, бортовое запоминающее устройство имеет емкость 120 Гбит [2],[3],[4].

Продукты дистанционного зондирования Orthokit (Mono и Stereo) включают в себя изображения, к которым применялась только радиометрическая (и не применялась геометрическая) коррекция, и коэффициенты RPC для каждого изображения [4].

Для проведения рассматриваемого исследования использовался продукт Cartosat-1 Stereo Orthokit, представляющий собой стереопару изображений, полученных с одного витка.

## 3. Данные, использовавшиеся в исследовании

Исследование проводилось на данных полигона №9 (Польша) программы C-SAP.

Индийское космическое агентство ISRO предоставило стереопару Cartosat-1 Stereo Orthokit на указанный полигон, включающую в себя, помимо самих снимков, файлы с RPC и метаданными для каждого из изображений (BAND F и BAND A).

Снимки были получены 25 февраля 2006 года, их размеры составляют  $12000 \times 12000$  пикселей, область перекрытия лежит в диапазоне широт  $51.6^\circ \div 51.8^\circ$  и долгот  $20.2^\circ \div 20.5^\circ$ .

Кроме того, компанией Geosystems Polska были предоставлены цифровые модели рельефа (ЦМР) и набор опорных точек на указанный полигон.

Модели рельефа включали в себя две матрицы высот. Одна из них (“NM DTEDT”) была построена по горизонталям карт масштаба 1 : 50 000; по оценке предоставившей ее стороны, точность этой матрицы высот составляет около 5 м. Вторая матрица высот (“DTM Warsaw”) была построена по топографическим картам масштаба 1 : 25 000 и стереопарам снимков ТК-350; среднеквадратическая ошибка (СКО) этой ЦМР считается равной примерно 1-2 м. Кроме того, данная матрица высот, в отличие от вышеупомянутой, охватывает практически всю область перекрытия снимков стереопары (см. рис. 1). Более того, размер ячейки этой матрицы высот меньше. Таким образом, именно эта ЦМР использовалась в рамках данного исследования для оценки точности модели рельефа, построенной по предоставленной стереопаре Cartosat-1.

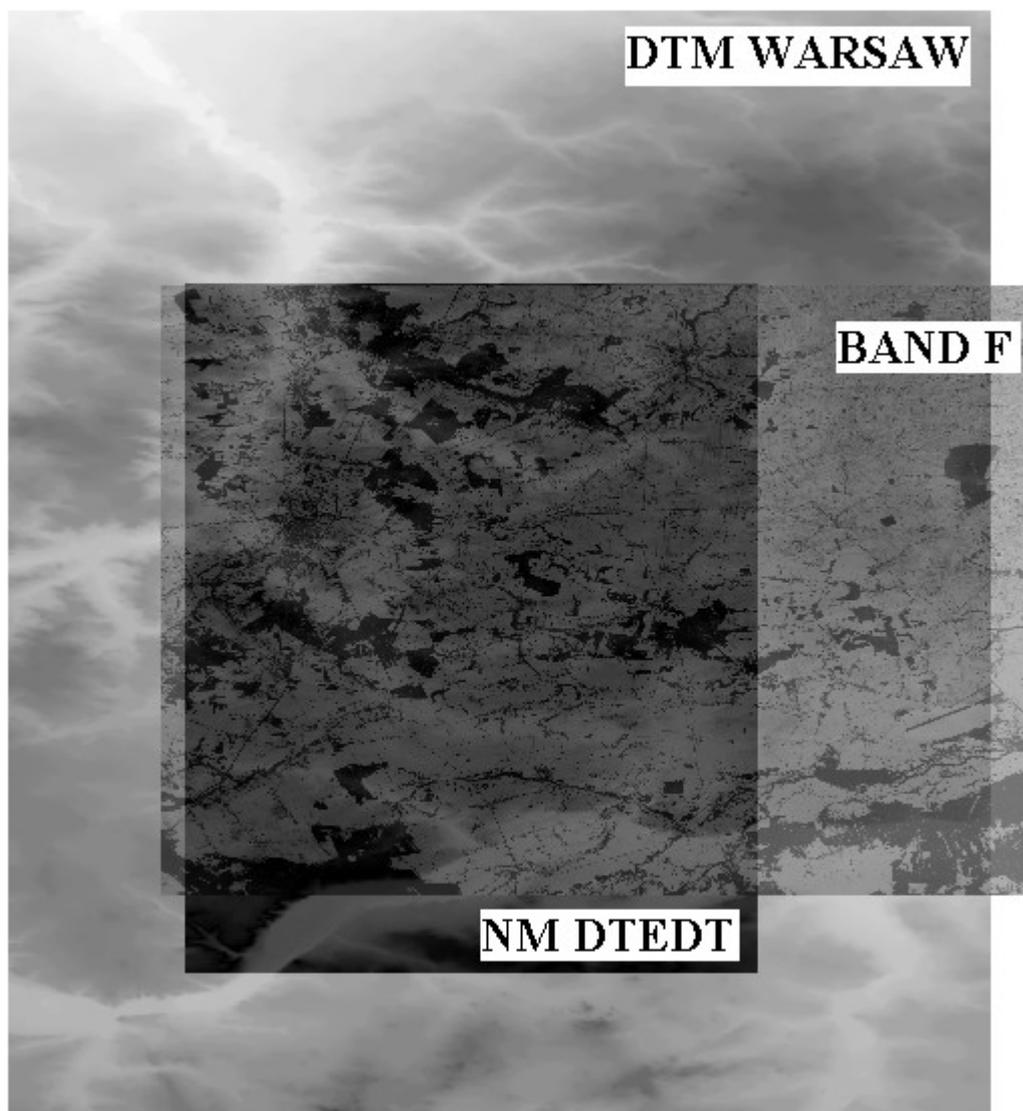


Рис 1: Схема взаимного расположения предоставленных снимков и матриц высот.

Набор предоставленных наземных точек включал в себя абрисы и географические (широта-долгота) и прямоугольные (UTM) координаты точек на WGS 84, причем их высоты были даны как над эллипсоидом WGS 84, так и над геоидом EGM 96. Всего было предоставлено 36 точек, равномерно распределенных по области перекрытия снимков стереопары.

## 4. Элементы фотограмметрии сканерных снимков

### 4.1. Основные задачи фотограмметрической обработки

Для выполнения фотограмметрической обработки снимков необходимо реализовать решение трех основных задач. Первая – выполнение ориентирования снимков (уравнивание), заключается в уточнении геометрических моделей изображений. Вторая – решение прямой фотограмметрической засечки. Эта задача решается при построении цифровых моделей рельефа и заключается в вычислении координат точки местности по пиксельным координатам ее изображений на снимках стереопары. Третья задача – обратная фотограмметрическая засечка, которая решается при построении ортоизображений и заключается в вычислении пиксельных координат изображения данной точки местности на снимке по ее наземным координатам.

Методы решения этих задач зависят от используемых геометрических моделей снимков; краткий их обзор приведен в следующем разделе.

### 4.2. Методы сканерной фотограмметрии

В фотограмметрии сканерных снимков широко применяются три основных подхода, каждый из которых основан на использовании геометрических моделей снимков определенного типа.

Первым рассмотрим строгий подход, который заключается в восстановлении пространственной конфигурации совокупности лучей, сформировавших изображение, и подразумевает моделирование траектории и ориентации сенсора во время выполнения съёмки и использование его элементов внутреннего ориентирования. Теоретически, этот подход обеспечивает получение выходных продуктов наивысшей точности, однако он неприменим в случае Cartosat-1, так как поставляемые вместе со снимками метаданные не содержат информации, необходимой для его реализации.

Второй подход основан на использовании RPC, которые являются аппроксимацией строгой модели; продукт Cartosat-1 Orthokit включает в себя данные, необходимые для применения этого метода. Вообще говоря, в рамках этого подхода можно получить высокоточные выходные продукты, однако вопрос о достижимой точности требует изучения, так как она определяется качеством поставляемых RPC и особенностями съёмочной системы, от которых зависит возможность уточнения RPC по опорным точкам.

Третий подход можно назвать «параметрическим». В этом случае при обработке изображений не используются никакие дополнительные данные; соотношения модели основаны на самых общих и приближенных предположениях о способе выполнения съёмки, а значения входящих в эти соотношения параметров вычисляются по опорным точкам. Классическим примером подобного метода является DLT (Direct Linear Transformation). Применяются также параллельно-перспективная, аффинная, полиномиальная модели. Методы этой группы обычно уступают по точности строгому методу и RPC, а также требуют большего количества опорных точек.

Очевидно, что предпочтительным подходом к обработке продуктов Cartosat-1 Orthokit является использование RPC; тем не менее, в рамках исследования были протестированы и некоторые параметрические методы. Во-первых, это интересно с точки зрения оценки геометрических характеристик других продуктов Cartosat-1, которые проходят только радиометрическую (но не геометрическую) коррекцию, но в состав которых не включены RPC. Во-вторых, в случае, когда все исходные данные (опорные точки, ЦМР) и выходные продукты должны быть заданы в некоторой местной системе координат, параметры связи которой с другими системами неизвестны, использование RPC проблематично, так как они обычно заданы относительно WGS 84.

### 4.3. Фотограмметрическая обработка снимков с использованием RPC

Подробное описание RPC (эта аббревиатура раскрывается как Rational Polynomial Coefficients, а также Rapid Positioning Capability) и процедуры блочного уравнивания с их использованием можно найти в [1].

RPC рассчитываются перед поставкой снимков потребителю путем аппроксимации строгой модели. Они определяют зависимость нормированных пиксельных координат  $l_N$ ,  $s_N$  изображения точки на снимке от ее нормированных координат  $\varphi_N$ ,  $\lambda_N$ ,  $h_N$  (широты, долготы и высоты над эллипсоидом) на местности (обычно заданных в WGS 84):

$$\begin{aligned} l_N &= \frac{Num_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{Den_l(\varphi_N, \lambda_N, h_N)} \\ s_N &= \frac{Num_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{Den_s(\varphi_N, \lambda_N, h_N)} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Num_l$ ,  $Den_l$ ,  $Num_s$ ,  $Den_s$  – полиномы третьей степени.

В процессе уравнивания блока геометрические модели снимков уточняются с использованием опорных и связующих точек; процедура уравнивания описана в [1]. В данном исследовании была изучена эффективность применения поправок двух видов: постоянных поправок (сдвига)

$$\begin{aligned} l &= l_D + a_0 \\ s &= s_D + b_0 \end{aligned} \quad (2)$$

и аффинных поправок

$$\begin{aligned} l &= l_D + a_0 + a_l \cdot l_D + a_s \cdot s_D \\ s &= s_D + b_0 + b_l \cdot l_D + b_s \cdot s_D \end{aligned} \quad (3)$$

где  $l_D$ ,  $s_D$  - ненормированные пиксельные координаты, соответствующие нормированным координатам  $l_N$ ,  $s_N$ , вычисленным по формулам (1).

Решение обратной фотограмметрической засечки производится непосредственно по формулам (2) или (3). Прямая засечка сводится к системе четырех нелинейных уравнений с тремя неизвестными  $\varphi_N$ ,  $\lambda_N$ ,  $h_N$ . Ее решение производится итерационно; начальное приближение вычисляется с помощью DLT в нормированных координатах, построенного аппроксимацией RPC с учетом введенных поправок.

### 4.4. Фотограмметрическая обработка снимков параметрическими методами

В рамках данного исследования были протестированы два метода: хорошо известный DLT и параллельно-перспективная модель. DLT традиционно (и зачастую без достаточного обоснования) применяется для обработки снимков, получаемых сенсорами с неизвестной или отличной от центральной проекции геометрией. Параллельно-перспективная модель может быть выведена из строгой при использовании ряда упрощающих и выполняющихся лишь приближенно предположений [5].

DLT заключается в использовании соотношений

$$\begin{aligned} l &= \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \\ s &= \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X, Y, Z$  – декартовы координаты точки на местности, а  $A_i, B_j, C_k$  – параметры модели. Параллельно перспективная модель определяется формулами [5]

$$\begin{aligned} l &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ s &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

где параметры модели обозначены  $L_i$ .

В обоих случаях параметры модели вычисляются по опорным точкам; использование наряду с ними связующих точек может снизить эффективность процедуры уравнивания. Таким образом, процедура уравнивания выполняется отдельно для каждого из изображений блока и сводится к решению системы линейных уравнений, где неизвестными являются искомые параметры модели.

Обратная засечка решается непосредственно по формулам (4) или (5), в то время как прямая засечка сводится к переопределенной системе четырех линейных уравнений с тремя неизвестными  $X, Y, Z$ , которая вытекает из двух пар уравнений (4) или (5).

## 5. Методология исследования

В рамках проведенного исследования оценивались:

- точность ориентирования снимков различными методами;
- достижимая точность построения ЦМР по предоставленной стереопаре.

### 5.1. Оценка точности ориентирования снимков

Проведенное исследование достижимой точности ориентирования снимков включало в себя 9 экспериментов, различавшихся примененным методом ориентирования (RPC с различными поправками и без них, DLT, параллельно-перспективная модель) и составом наборов опорных и контрольных точек (см. таблицу 1).

Эксперименты 1-4 выполнялись с использованием высот опорных и контрольных точек над эллипсоидом, чтобы исключить влияние используемой модели геоида на точность ориентирования снимков по RPC, которые заданы относительно эллипсоида.

Целью проведения экспериментов 1-3 была проверка точности самих исходных RPC, а также выявление оптимального типа поправок.

Эксперимент 4 должен был показать оптимальное (минимальное избыточное) количество надежных опорных точек для получения высокой точности ориентирования снимков.

Эксперимент 5 был посвящен исследованию варианта ориентирования, наиболее близкого к практическому применению.

В экспериментах 6-9 изучались свойства параметрических методов (DLT и параллельно-перспективного). В экспериментах 6 и 8 выяснялось, насколько близки используемые модели к геометрии снимков Cartosat-1. Эксперименты 7 и 9 должны были показать степень практической пригодности этих моделей к обработке этих данных.

№ эксперимента	Геометрическая модель снимков	Опорные и контрольные точки		
		Отсчет высот	Число точек	
			Опорных	Контрольных
1	RPC	Эллипсоид	Нет	Все имеющиеся
2	RPC + сдвиг	Эллипсоид	Все имеющиеся	Нет
3	RPC + афф. попр.	Эллипсоид	Все имеющиеся	Нет
4	RPC + афф. попр	Эллипсоид	Оптимальное	Все остальные
5	RPC + афф. попр	Геоид	Оптимальное	Все остальные
6	DLT	Геоид	Все имеющиеся	Нет
7	DLT	Геоид	Оптимальное	Все остальные
8	Паралл.–перспект.	Геоид	Все имеющиеся	Нет
9	Паралл.–перспект.	Геоид	Оптимальное	Все остальные

Таблица 1: эксперименты по оценке точности ориентирования снимков.

## 5.2. Оценка точности построенной матрицы высот

Процедура, применявшаяся для оценки точности ЦМР, построенной по стереопаре Cartosat-1, очень проста, но надежна, так как проверялось значение высоты для каждого узла построенной матрицы высот.

Указанная процедура требовала выполнения большого объема вычислений, однако выполнялась полностью автоматически. Значение высоты в каждом узле проверяемой матрицы высот сравнивалось с высотой, полученной билинейной интерполяцией по матрице высот, предоставленной для проверки. Выходные данные процедуры включали в себя СКО, среднюю ошибку (среднее арифметическое расхождений) и среднюю абсолютную ошибку (среднее арифметическое абсолютных величин расхождений) высоты, диапазон расхождений высоты и число проверенных узлов матрицы высот.

## 5.3. Программное обеспечение

Весь цикл обработки данных (радиометрическая подготовка снимков, измерение точек на снимках, ориентирование снимков, построение ЦМР и ортоизображений) выполнялся на цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD версии 4.1 разработки компании «Ракурс».

Процедура сравнения матриц высот производилась с помощью программы, специально написанной автором статьи для проведения данного исследования.

## 6. Результаты исследования

### 6.1. Точность ориентирования снимков

Результаты ориентирования снимков представлены в таблице 2 (описание экспериментов приведено в таблице 1).

№ эксперимента	Наземные точки		СКО, м			Макс. ошибка, м		
	Тип	Кол-во	X	Y	Z	X	Y	Z
1	Контр.	36	14.7	114.7	761.1	23.6	118.3	769.9
2	Опорн.	36	16.2	2.1	5.6	27.0	4.7	9.7
3	Опорн.	36	1.2	1.1	0.8	2.7	2.9	2.3
4	Опорн.	4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2
	Контр.	32	1.5	1.1	0.9	2.8	3.0	2.2
5	Опорн.	4	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.2
	Контр.	32	1.5	1.1	0.9	2.8	3.0	2.1
6	Опорн.	36	1.2	1.3	2.7	3.0	3.1	7.0
7	Опорн.	10	1.0	0.9	3.7	1.8	1.5	7.6
	Контр.	26	1.5	1.5	4.0	2.8	4.3	7.0
8	Опорн.	36	1.1	1.4	6.1	2.3	3.0	11.5
9	Опорн.	10	1.4	1.4	7.5	2.5	2.2	12.0
	Контр.	26	2.6	1.6	7.3	6.5	3.6	12.9

Таблица 2: Результаты ориентирования снимков.

Как показал эксперимент 1, исходные RPC (без введения поправок) дают значительные ошибки. Схема на рис.2 показывает, что все эти ошибки имеют явно выраженный систематический характер.

Следует уточнить, что вектора ошибок на рис. 2-5 показывают направления смещений вычисленных координат точек от их истинного положения; размеры векторов подобраны таким образом, чтобы эти вектора были хорошо заметны; об абсолютной величине ошибок следует судить по данным таблицы 2.

Эксперимент 2 показал, что постоянных поправок (сдвига) недостаточно для ориентирования снимков Cartosat-1. По рис. 3 видно, что ошибки ориентирования остаются систематическими: смещения в плане ориентированы преимущественно вдоль строк снимков, велики по краям строк снимка и направлены к их центрам, по мере приближения к которым и плановые, и высотные ошибки уменьшаются. Подобное поведение ошибок ориентирования может быть вызвано неверно определенной высотой носителя, либо погрешностями выполнения геометрической калибровки сенсора – определения фокусного расстояния или систематическими ошибками задания положений детекторов в фокальной плоскости сенсора.

В эксперименте 3 достигнута субпиксельная точность ориентирования; смещения распределены случайным образом (см. рис. 4). Это означает, что RPC с аффинной поправкой являются адекватной моделью геометрии снимков Cartosat-1.

Точность ориентирования, достигнутая в экспериментах 4 и 5, практически одинакова. В качестве опорных использовались 4 точки (с номерами 1, 6, 31, 36) по углам области перекрытия снимков стереопары, в то время как остальные точки использовались в качестве контрольных (см. рис. 5). Этот эксперимент показал, что субпиксельная точность ориентирования может быть достигнута с использованием четырех надежных и хорошо распределенных опорных точек.

Эксперименты 6-9 показывают, что параметрические модели (DLT и параллельно-перспективная) обеспечивают получение плановой точности, близкой к достигаемой по RPC, однако погрешности определения высот в несколько раз больше. Кроме того, возможно, DLT несколько лучше подходит к геометрии изображений Cartosat-1, чем параллельно-перспективная модель.

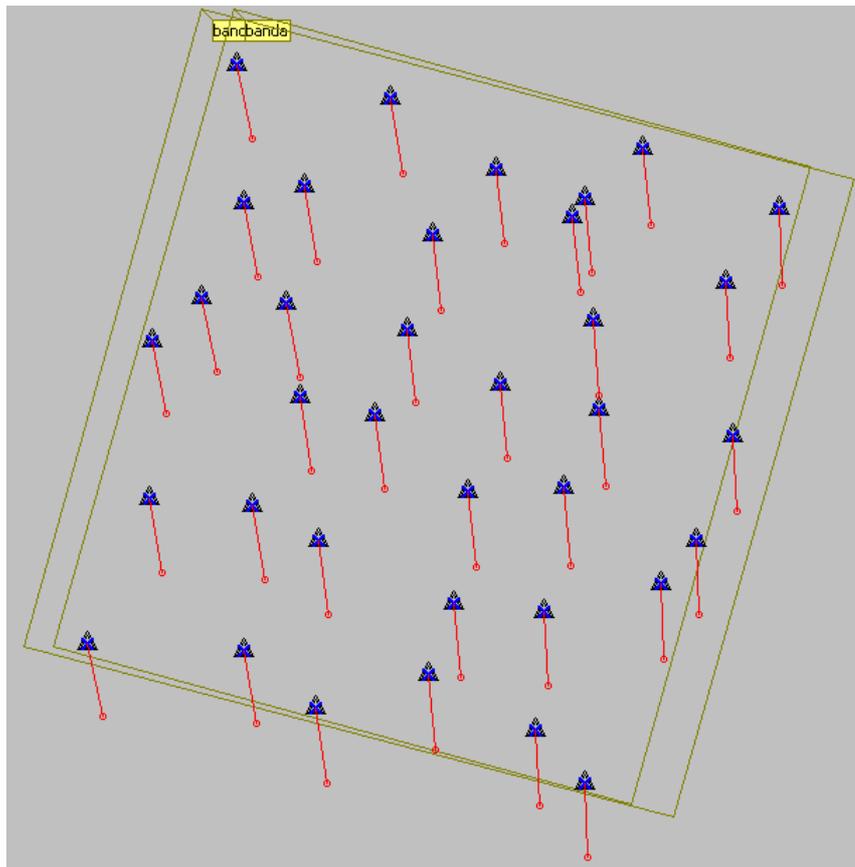


Рис 2: Плановые ошибки ориентирования снимков Cartosat-1 по исходным RPC.

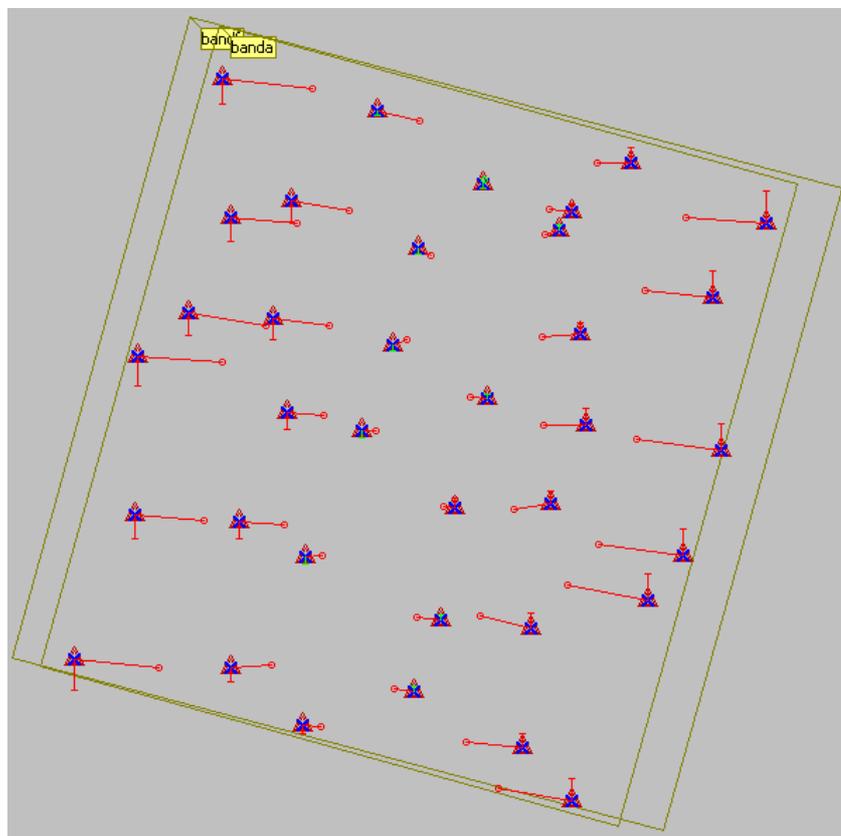


Рис 3: Погрешности ориентирования снимков по RPC с постоянными поправками.

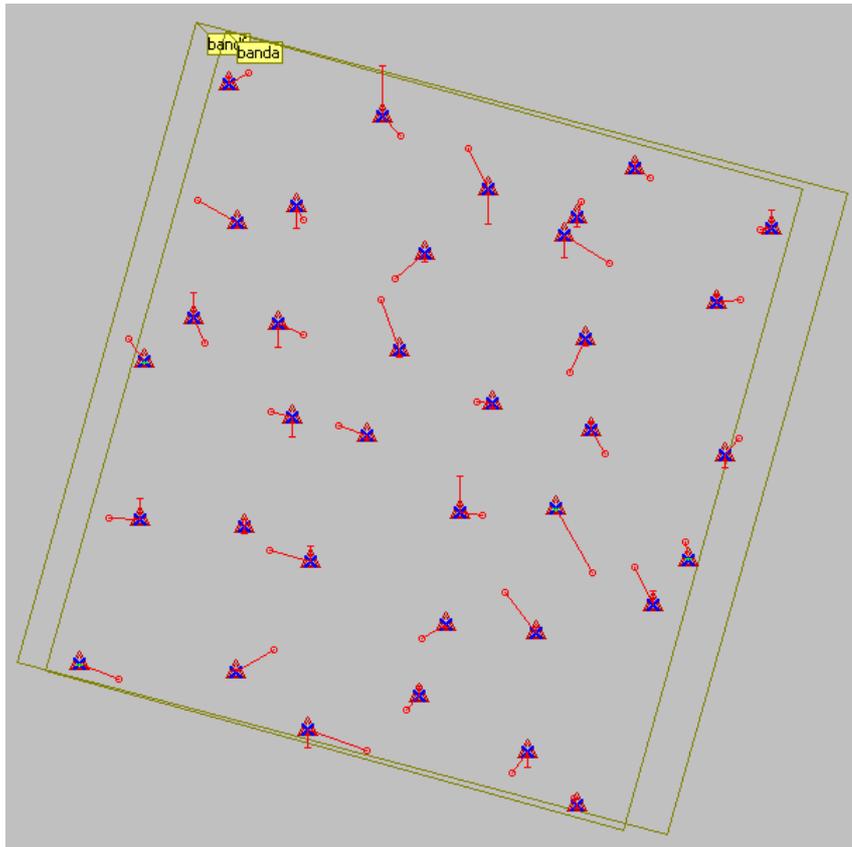


Рис 4: Погрешности ориентирования снимков по RPC с аффинными поправками (все имеющиеся точки используются в качестве опорных).

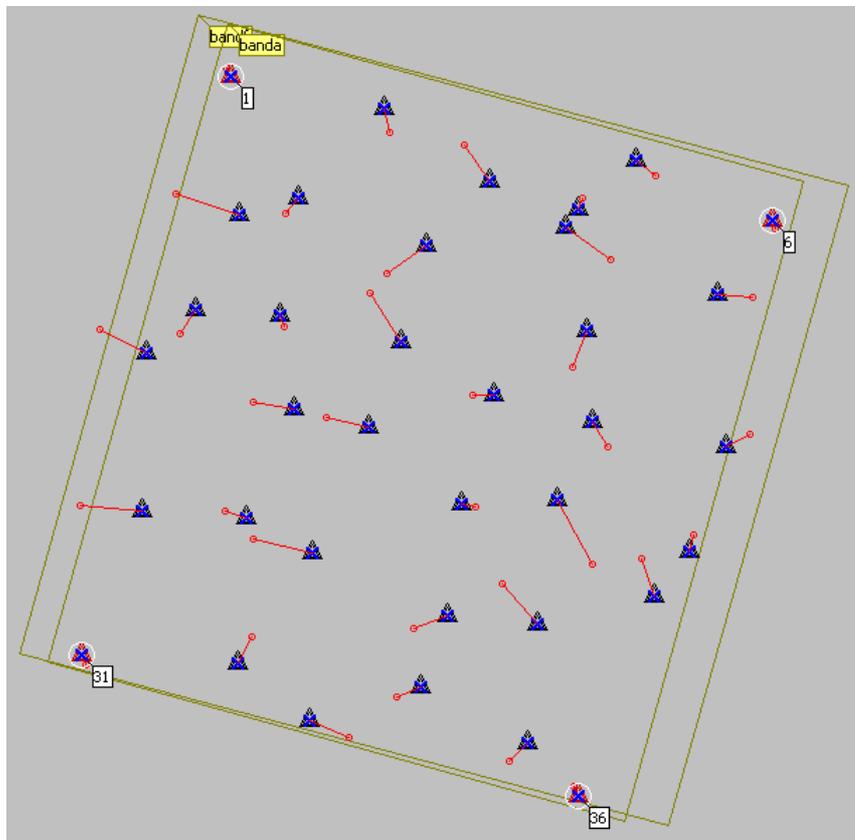


Рис 5: Погрешности ориентирования снимков по RPC с аффинными поправками (по 4 опорным точкам).

## 6.2. Оценка точности построенной матрицы высот

Построение матрицы высот выполнялось по стереопаре, ориентированной в рамках эксперимента №5 (см. таблицы 1,2 и рис. 5) по четырем опорным точкам, расположенным по углам снимков, высоты которых заданы над геоидом EGM 96. Точность ориентирования характеризуется субпиксельной СКО на контрольных точках.

Для создания матрицы высот сначала с применением корреляции по снимкам стереопары была построена ЦМР в виде TIN (Triangulated Irregular Network), которая была автоматически отфильтрована, а некоторые выбросы модели (обусловленные ошибками корреляции) были удалены вручную. По полученной ЦМР была построена матрица высот с размером ячейки 20 м (что близко к размеру ячейки матрицы высот, предоставленной для проверки).

Построенная и проверочная матрицы высот по отдельности представлены на рисунке 6, а их наложение показано на рисунке 7.

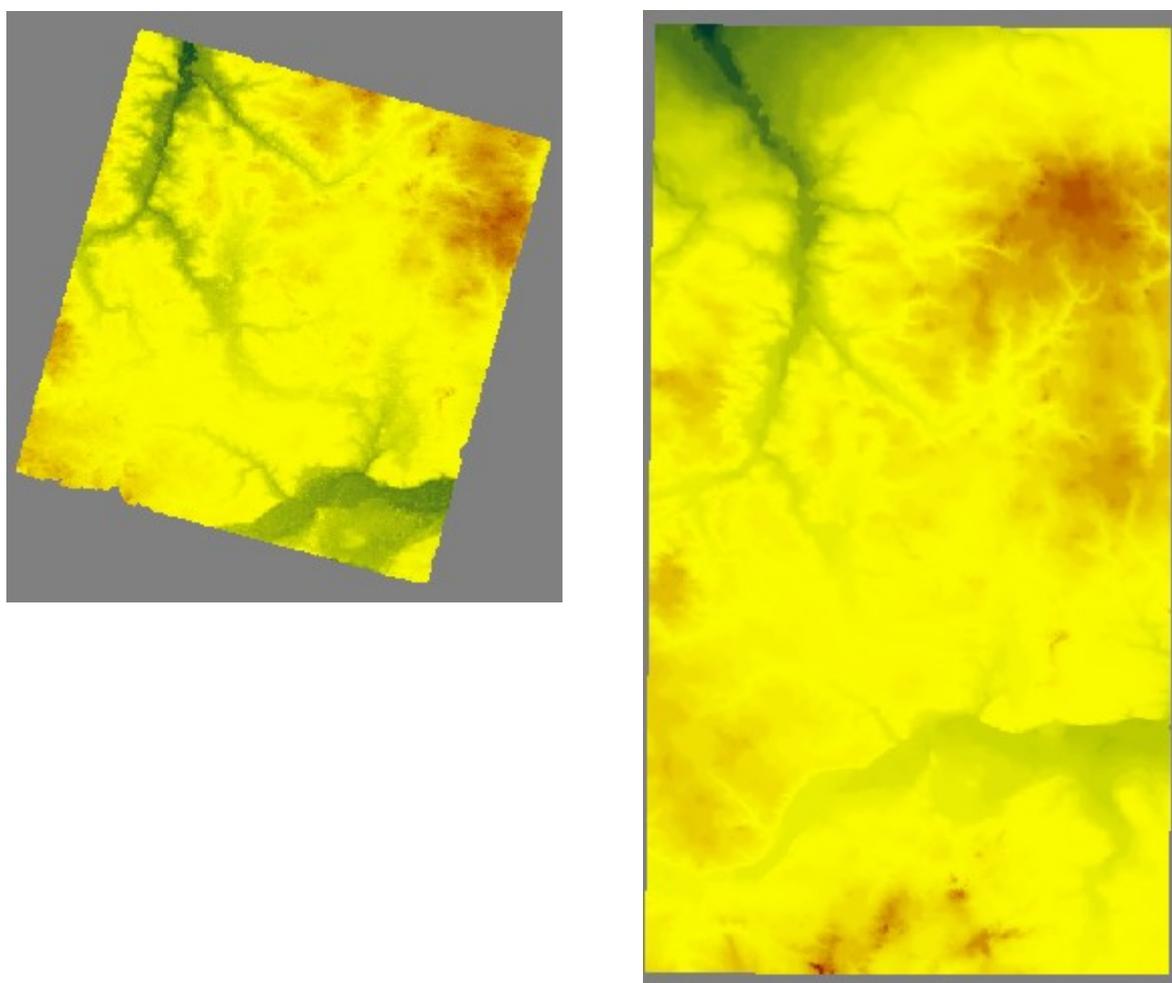


Рис 6: Построенная (слева) и проверочная (справа) матрицы высот.

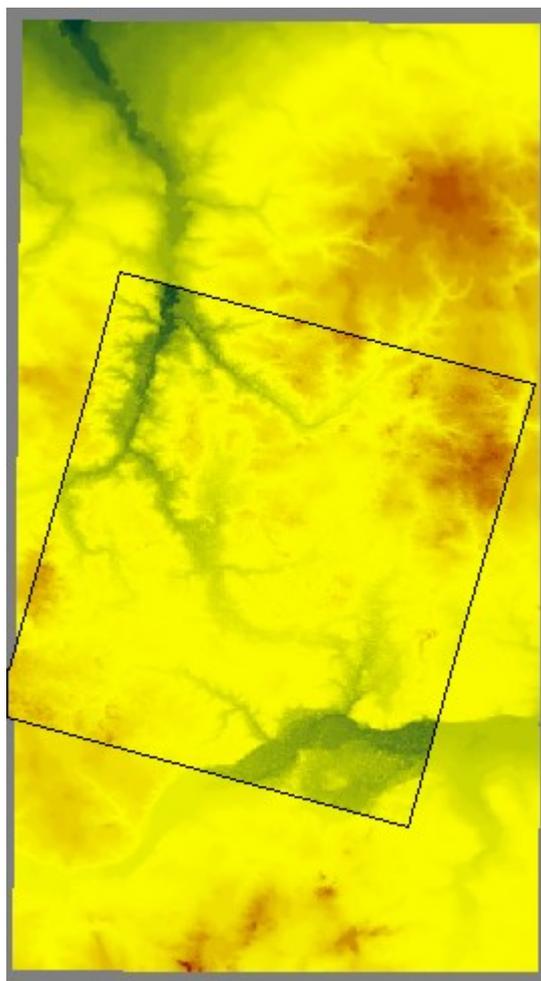


Рис 7: Наложение построенной и проверочной матриц высот.

Сравнение построенной и проверочной матриц высот показало, что они совпадают с высокой точностью:

- СКО 2.3 м;
- средняя ошибка (среднее арифметическое расхождений) +1.0 м;
- средняя абсолютная ошибка (среднее арифметическое модулей расхождений) 1.7 м;
- число проверенных узлов матрицы высот: 1 985 266.

Ненулевая средняя ошибка показывает, что между сравниваемыми матрицами высот существует систематическое расхождение, примерно равное 1 м, которое может быть обусловлено погрешностями модели геоида, применявшейся при обработке проекта. Таким образом, указанная выше СКО вычислена не вполне корректно, и ее можно уменьшить примерно вдвое, исключив систематические ошибки.

Учитывая, что декларируемая СКО матрицы высот, предоставленной для проверки, составляет 1-2 м, абсолютная точность построенной ЦМР не хуже 3 м.

### 6.3. Точность ортоизображений, построенных по снимкам Cartosat-1

Для увеличения производительности съёмочной системы, космический аппарат Cartosat-1 обладает возможностью отклонения направления обзора от надира по крену до  $23^\circ$ , однако исследуемые изображения получены при значении углов крена всего  $2^\circ$ . Чтобы оценить точность получаемых ортоизображений в наихудшем случае, рассчитаем СКО планового положения точек на ортоизображении, построенном по снимку, полученному при угле крена  $30^\circ$ . Предполагая, что СКО высот используемой ЦМР составляет 3 м, среднеквадратическая величина планового смещения точек, вызванного

погрешностями матрицы высот, составляет  $3\text{ м} \times \text{tg}30^\circ \approx 1.7$  метра. Результирующее среднеквадратическое плановое смещение точек на ортоизображении, вызванное совместным влиянием погрешностей ориентирования (полагая их примерно равными пространственному разрешению снимков) и погрешностей используемой ЦМР, незначительно превышает 3 метра, что удовлетворяет требованиям к геометрической точности топографических карт масштаба 1 : 10 000.

Тем не менее, следует иметь в виду, что не все объекты, которые должны быть показаны на топографической карте масштаба 1 : 10 000, можно отдешифровать по снимкам Cartosat-1.

## 7. Выводы

Проведенное исследование показало, что оптимальным способом ориентирования снимков Cartosat-1 является использование RPC с аффинными поправками. Четырех надежных и хорошо распределенных опорных точек достаточно для достижения субпиксельной точности ориентирования снимков и создания ЦМР с СКО высот 3 м. Создаваемые по снимкам Cartosat-1 ортоизображения удовлетворяют требованиям к геометрической точности топографических карт масштаба 1 : 10 000.

## Список литературы

1. Grodecki J., Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 69, No. 1, January 2003, pp. 59-68.
2. Lutes J. First Impressions of CARTOSAT-1, *JACIE 2006 Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop*, Laurel, Maryland, March 14-16, 2006.
3. Navalgund R.R., CARTOSAT-1: The Latest from the Indian Remote Sensing Satellite Series, *ISPRS Highlights*, Vol. 10, No. 3, September 2005.
4. Cartosat-1: A Global IRS Mission for Large Scale Mapping and Terrain Modelling Applications, *NRSA brochure*.
5. Титаров П.С. Метод приближенной фотограмметрической обработки сканерных снимков при неизвестных параметрах сенсора. *Геодезия и картография*, №6, 2002 г., стр. 30-34.