

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОРИЕНТИРОВАНИЯ СНИМКОВ SPOT 6

П.С. ТИТАРОВ, «РАКУРС», МОСКВА, РОССИЯ, 2014

1. Набор данных для исследования

Набор тестовых данных включает в себя триплет (продукт Tri-Stereo) снимков SPOT 6, а также абрисы и координаты точек для использования их в качестве опорных и контрольных.

С точки зрения уровня предварительной обработки снимки представляют собой мультиспектральный продукт уровня Primary; дополнительные сведения об этих снимках приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Сведения о снимках, используемых в исследовании.

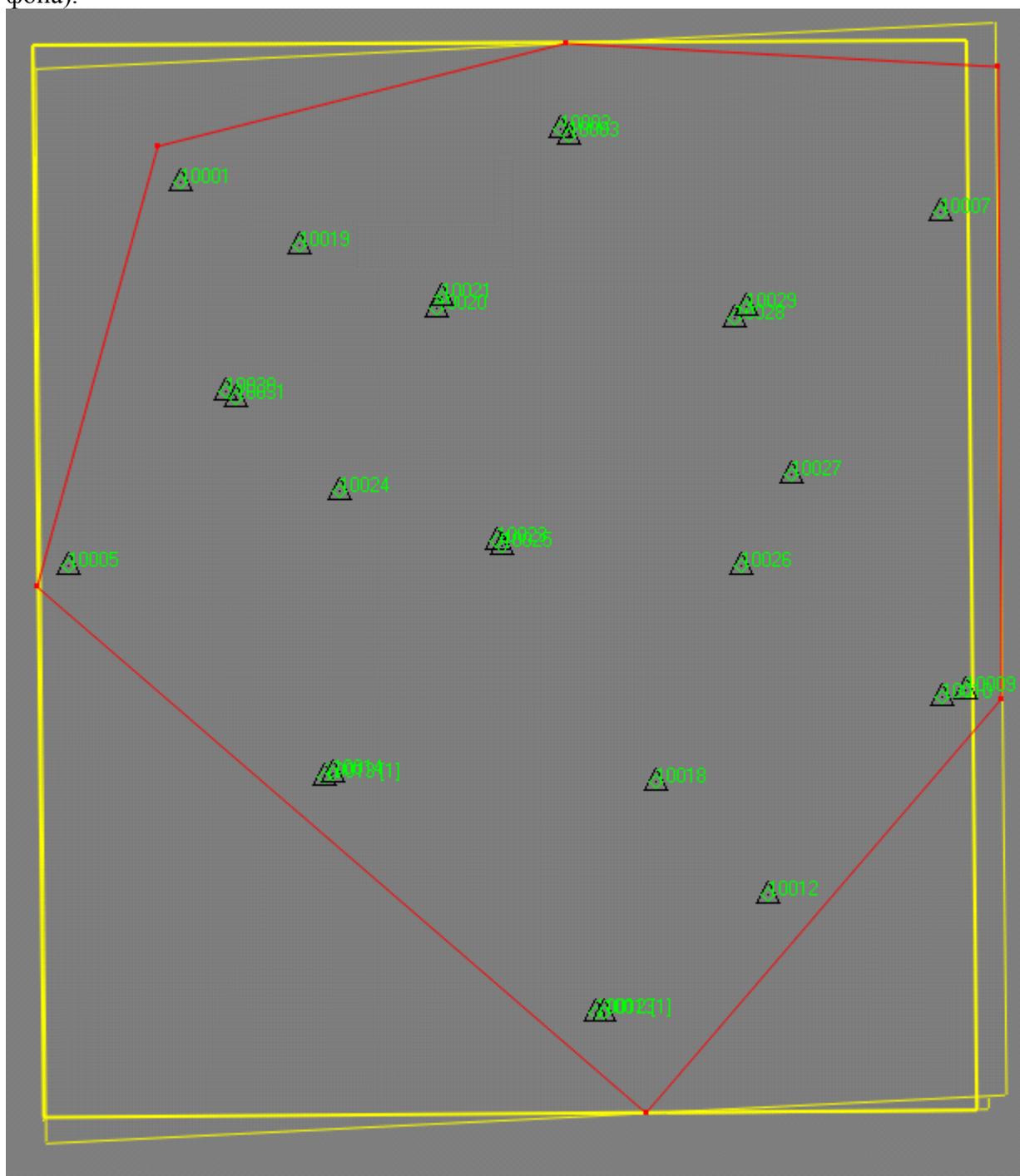
Параметры	Снимки		
Идентификатор	SEN_SPOT6_20140816_070207900_000	SEN_SPOT6_20140816_070240500_000	SEN_SPOT6_20140816_070258900_000
Дата и время съёмки	2014-08-16 07:02:07.7	2014-08-16 07:02:40.2	2014-08-16 07:02:58.6
Отклонение от надира вдоль трассы	-16.4383324524°	2.56433276285°	13.2313282395°
Отклонение от надира поперек трассы	11.3588099822°	5.3611791784°	2.35563522183°

Координаты опорных и контрольных точек были получены картометрически: плановые координаты - по фотопланам масштаба 1 : 2 0000, и предполагается, что погрешность планового положения точки не превышает 1 м; высоты точек измерялись по цифровым топографическим планам масштаба 1 : 2 0000 с сечением рельефа 1 м, поэтому их погрешность не должна превышать 0.3 м.

Измерение точек на снимках было выполнено с ошибкой около 1 пикселя. Учитывая, что поставляемые растры приводятся к размеру пикселя 1.5 м, это значение можно считать оценкой погрешности, вносимой неточностью измерений точек на снимках. Однако в дальнейшем, оценивая достигнутую в различных экспериментах точность уравнивания, следует также иметь в виду, что для сенсоров, установленных на космических аппаратах SPOT 6 и SPOT 7, размер проекции пикселя исходного снимка на местность составляет приблизительно 2 м (при съёмке в надир).

Схема расположения измеренных точек на снимках приведена на Рисунке 1.

Рисунок 1. Схема расположения точек, измеренных на снимках (красной линией показана граница области, заполненной результатами съёмки, участки растров вне нее имеют цвет фона).



2. Цель и методология исследований.

Целью исследования является определение наиболее эффективного метода ориентирования и оптимального количества опорных точек, оценка достижимой точности ориентирования, и выявление других особенностей уравнивания (проявляющихся при уравнивании одиночных снимков, стереопар и триплетов, с использованием связующих точек или без них).

В процессе проведения исследования выполнялось уравнивание проектов в соответствии со схемами, описанными в Таблице 2. Каждая схема задает тестируемую геометрическую модель снимка и тип поправок к ней, и определяет способ использования опорных, контрольных и связующих точек. Цель проведения эксперимента в соответствии с каждой схемой также указана в Таблице 2.

Кроме того, схемы сгруппированы следующим образом.

Схема I предназначена для оценки точности, достижимой при использовании RPC и отсутствии наземных опорных точек.

Схема II соответствует случаю, когда количество опорных точек минимально.

Схемы III и IV рассматривают возможности уравнивания в случае, когда набор опорных точек соответствует принципу «априорной разумной достаточности», т.е. подобный набор опорных точек, как показывает опыт, позволяет достичь наилучших результатов при уравнивании по RPC снимков, полученных другими съёмочными системами.

Схемы V и VI предназначены для прояснения вопроса, можно ли существенно повысить точность уравнивания, увеличив количество опорных точек; кроме того, они позволяют сравнить точность, получаемую по одному и тому же набору данных с использованием RPC и универсальными методами (см. схемы X-XII).

Схемы VII и VIII позволяют оценить границы достижимой точности в данном проекте; в некотором смысле они показывают, насколько имеющиеся точки с известными координатами местности «вписываются» в тестируемую геометрическую модель.

Схемы IX-XII посвящены универсальным моделям, причем в случае схемы IX рассматривается случай, когда имеется минимальный необходимый для применения универсальных методов объем данных, а схемы X-XII привлекают рекомендуемое для соответствующих моделей число опорных точек.

Для выявления роли связующих точек уравнивание триплета выполнялось как с учетом связующих точек, так и без них.

Исследования выполнялись отдельно по каждому из одиночных снимков (три снимка), по каждой из стереопар, которые можно из них составить (три стереопары) и по триpletу. После приведения конфигурации проекта в соответствие с применяемой схемой, выполнялось его уравнивание и оценивалась точность полученных результатов, используя опорные и контрольные точки.

Для повышения достоверности полученных результатов, при уравнивании в системе PHOTOMOD значение параметра «Пороговое приращение координат (пикс.)», определяющего момент прекращения итераций, было уменьшено по сравнению со значением, установленным по умолчанию, до 0.0001.

При выполнении уравнивания отбраковка или повторное измерение точек с большими ошибками не производилась, чтобы условия проведения эксперимента были близки к часто встречающемуся на практике случаю, когда недостаточное количество точек с известными координатами на местности не позволяет выявлять такие точки.

Таблица 2. Схемы уравнивания, применявшиеся в различных экспериментах.

№ схемы	Число опорных точек	Геометрическая модель	Цель эксперимента
I	0	RPC	Оценка точности исходных RPC (без использования опорных и связующих точек)
II	1	RPC + сдвиг	Оценка точности, достижимой с использованием RPC и единственной опорной точки
III	4	RPC + аффинная поправка	Оценка точности, достижимой с использованием RPC и минимально-избыточного набора опорных точек с введением аффинной поправки
IV	4	RPC + сдвиг	Сравнение эффективности сдвига и аффинной поправки в RPC при использовании набора опорных точек предыдущей схемы
V	10	RPC + сдвиг	Выяснение целесообразности увеличения числа опорных точек при использовании поправки типа сдвиг
VI	10	RPC + аффинная поправка	Выяснение целесообразности увеличения числа опорных точек при использовании аффинной поправки
VII	все имеющиеся	RPC + сдвиг	Оценка наилучшей достижимой точности при использовании RPC и поправки типа сдвиг
VIII	все имеющиеся	RPC + аффинная поправка	Оценка наилучшей достижимой точности при использовании RPC и аффинной поправки
IX	4	Аффинная	Оценка точности аффинной универсальной модели при использовании минимального достаточного набора опорных точек, и сравнение с точностью ориентирования по RPC (набор опорных точек тот же, что и в схемах III и IV).
X	10	Параллельно-перспективная	Оценка точности различных универсальных моделей, и сравнение с точностью ориентирования по RPC (набор опорных точек тот же, что и в схемах V и VI).
XI	10	DLT	
XII	10	Аффинная	

3. Исследуемые модели ориентирования снимков

Существуют три основных подхода к ориентированию сканерных снимков.

Строгий подход заключается в восстановлении пространственной конфигурации лучей, сформировавших снимок. Теоретически этот метод является наиболее точным, так как два других подхода основаны на аппроксимации строгой модели. Тем не менее, в 2012 году корпорация *Airbus Defense and Space* (в то время соответствующее подразделение входило в компанию *ASTRIUM*) внедрила процедуру вычисления RPC, которая аппроксимирует строгую модель с погрешностью, не превышающей несколько тысячных пикселя. Поэтому, хотя метаданные SPOT 6/7 содержат полный набор данных, необходимых для применения как строгой модели, так и RPC, скорее всего, именно RPC будут использоваться наиболее часто – во-первых, они гораздо проще с точки зрения программной реализации; во-вторых, в основе процедуры ортотрансформирования лежит многократное решение обратной засечки, которое в случае RPC представляет собой расчет по прямым формулам, а в случае строгой модели – итерационный процесс; в-третьих, если блок включает в себя снимки, полученные различными съёмочными системами сверхвысокого разрешения, наиболее вероятно, что все они будут снабжены RPC, поэтому именно RPC целесообразно будет выбрать в качестве общей модели для уравнивания блока.

Второй подход, уже упоминавшийся выше RPC (Rational Polynomial Coefficients, или Rapid Positioning Capability), заключается в аппроксимации строгой модели формулами, представляющими координаты x, y точки на снимке в виде рациональных функций, в числителях и знаменателях которых находятся полиномы третьего порядка от координат этой точки на местности (точнее, от нормализованных широты, долготы и высоты над эллипсоидом). В процессе уравнивания определяются поправки к координатам x, y , вычисленным по RPC; в данном исследовании рассматривались поправки следующих типов:

- сдвиг

$$\begin{aligned}x' &= x + a \\y' &= y + b\end{aligned}$$

- аффинная

$$\begin{aligned}x' &= a_1x + a_2y + a_3 \\y' &= b_1x + b_2y + b_3\end{aligned}$$

Третий подход основан на применении так называемых универсальных, или обобщенных, моделей сканерных снимков. Их особенностью является то, что эти модели не используют метаданные снимка; значения всех входящих в них коэффициентов вычисляются при уравнивании по опорным точкам – по их пиксельным x, y координатам на снимке и координатам X, Y, Z на местности. В данном исследовании рассматривались следующие модели:

- DLT (Direct Linear Transformation):

$$\begin{aligned}x &= \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \\y &= \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}\end{aligned}$$

Эта модель изначально применялась для обработки снимков, полученных некалиброванной камерой центральной проекции; позже DLT стали пользоваться и при обработке сканерных снимков, без достаточных на то оснований, но, тем не менее, достаточно широко.

- Параллельно-перспективная модель:

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1}$$
$$y = B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4$$

Эти формулы получены на основе строгой модели в предположении, что в процессе получения снимка спутник двигался прямолинейно и равномерно, с неизменной ориентацией, и геометрическая модель сенсора соответствует центральной проекции с линейкой детекторов в фокальной плоскости.

- Аффинная модель:

$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4$$
$$y = B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4$$

Эта формула получена в предположении, что, помимо условий, упомянутых выше, сенсор обладает узким полем зрения, и угол отклонения от надира не очень велик.

Исходя из условий получения формул универсальных моделей, ясно, что от них не следует ожидать высокой точности. Еще один их недостаток заключается в том, что для вычисления значений входящих в них коэффициентов требуется достаточно много опорных точек. Тем не менее, эти модели иногда находят применение, когда по каким-либо причинам невозможно использовать метаданные – например, если проект должен быть выполнен в местной системе координат, параметры связи которой с WGS 84 неизвестны.

Таким образом, настоящее исследование посвящено, в первую очередь, ориентированию снимков SPOT 6 с использованием RPC.

4. Эксперименты по одиночным снимкам

Результаты выполненных экспериментов приведены в Таблицах 3-5.

Таблица 3. Снимок SEN_SPOT6_20140816_070207900_000

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м	МАХ по оп. точкам, м	Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м	МАХ по контр. точкам, м
I	0	RPC	-	-	25	3.8	8.8
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	24	2.7	6.9
III	4	RPC+афф.	1.9	2.4	21	2.0	5.8
IV	4	RPC+сдвиг	2.3	2.7	21	2.5	6.4
V	10	RPC+сдвиг	2.2	3.3	15	2.5	6.1
VI	10	RPC+афф.	1.6	2.3	15	2.1	5.7
VII	25	RPC+сдвиг	2.1	5.9	0	-	-
VIII	25	RPC+афф.	1.5	4.4	0	-	-
IX	4	аффинная	0.0	0.0	21	63.8	130.51
X	10	пар.персп.	13.7	22.2	15	18.3	42.6
XI	10	DLT	30.7	56.7	15	69.9	212.5
XII	10	аффинная	47.4	81.4	15	64.9	128.6

Таблица 4. Снимок SEN_SPOT6_20140816_070240500_000

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м	МАХ по оп. точкам, м	Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м	МАХ по контр. точкам, м
I	0	RPC	-	-	25	4.2	6.5
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	24	2.2	5.0
III	4	RPC+афф.	1.8	2.3	21	2.0	6.0
IV	4	RPC+сдвиг	2.2	3.6	21	2.0	4.5
V	10	RPC+сдвиг	2.1	4.0	15	1.9	4.2
VI	10	RPC+афф.	1.6	2.8	15	1.9	5.3
VII	25	RPC+сдвиг	2.0	4.2	0	-	-
VIII	25	RPC+афф.	1.7	4.1	0	-	-
IX	4	аффинная	0.0	0.0	21	22.3	41.2
X	10	пар.персп.	4.6	8.0	15	6.5	15.3
XI	10	DLT	4.2	5.7	15	10.4	30.5
XII	10	аффинная	13.9	22.9	15	18.8	43.7

Таблица 5. Снимок SEN_SPOT6_20140816_070258900_000

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м	МАХ по оп. точкам, м	Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м	МАХ по контр. точкам, м
I	0	RPC	-	-	25	5.3	7.8
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	24	2.5	4.6
III	4	RPC+афф.	1.5	1.9	21	2.1	5.5
IV	4	RPC+сдвиг	2.3	3.4	21	2.4	4.6
V	10	RPC+сдвиг	2.5	4.7	15	2.2	4.2
VI	10	RPC+афф.	1.4	2.2	15	2.2	5.7
VII	25	RPC+сдвиг	2.3	4.5	0	-	-
VIII	25	RPC+афф.	1.7	4.4	0	-	-
IX	4	аффинная	0.0	0.0	21	45.7	131.7
X	10	пар.персп.	16.0	25.2	15	21.0	47.3
XI	10	DLT	14.7	29.8	15	29.3	86.1
XII	10	аффинная	16.7	25.6	15	22.6	54.6

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- СКО вычисленного по исходным RPC планового положения контрольных точек составило 3.8-5.3 м. Следует отметить, что эти значения соответствуют спецификации (и даже превосходят ее) компании *Airbus Defense and Space*, согласно которой $CE90 = 35$ м. (см. *SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide*)
- Используя единственную опорную точку на снимок и вычисляя по ней поправку типа сдвиг в исходные RPC, можно добиться точности 2.2-2.7 м (СКО по контрольным точкам).
- Использование 4 опорных точек и аффинной поправки позволяет достичь точности 2.0-2.1 м (СКО на контрольных точках). Учитывая физическое пространственное разрешение исходных снимков (около 2 м при съёмке в надир), точность координат точек на местности и точность выполнения измерений точек на снимках, в данном случае при использовании любого метода уравнивания вряд ли можно рассчитывать на получение результатов существенно более высокой точности. Примечательно, что поправка типа сдвиг дает несколько худший результат для снимков, полученных с отклонением от надира вперед и назад вдоль трассы – СКО на контрольных точкам составляет 2.4-2.5 м, в то время как на снимке, полученном в надир, поправки типов сдвиг и аффинная дают одинаковый результат – причем картина, фактически, не меняется ни качественно, ни количественно при увеличении (до 10) числа опорных точек. Данное обстоятельство может быть вызвано и случайными факторами, однако в любом случае можно утверждать, что уравнивание с применением аффинной поправки обеспечивает достижение точности, примерно равной физическому разрешению снимка.
- Точность, достигаемая при использовании универсальных методов, совершенно неудовлетворительна, значительно хуже чем результаты, получаемые при использовании исходных RPC без поправок. Можно говорить о непригодности этой группы методов для ориентирования снимков SPOT 6/7.

5. Уравнивание триплета с использованием связующих точек и без них

Поскольку на триплете влияние связующих точек должно быть заметно в большей степени, чем при уравнивании стереопар, именно на триплете проводились эксперименты, призванные выявить роль связующих точек в уравнивании снимков SPOT 6/7.

Полученные результаты приведены ниже в Таблицах 6 и 7. Эти данные позволяют сделать следующие выводы:

- При использовании исходных RPC без введения поправок СКО на контрольных точках составляет в плане 3.9 м, по высоте 12.7 м.
- В том случае, если уравнивание выполняется по RPC с привлечением опорных точек, связующие точки фактически не влияют на его точность.
- Оптимальной схемой уравнивания является использование как минимум четырех опорных точек и вычисление аффинной поправки к RPC. В этом случае СКО планового положения контрольных точек составила 1.9 м, а СКО высоты – 1.5 м. Учитывая, что размер проекции пикселя на местность составляет 1.5 м для поставляемого растра и около 2 м (при съемке в надир) для исходного растра, достигнутая точность по высоте является очень высокой. Увеличение числа опорных точек не приводит к повышению точности.
- Точность уравнивания универсальными методами крайне низка вне зависимости от того, используются связующие точки или нет, поэтому вывод о непригодности этих методов для ориентирования снимков SPOT 6/7 можно распространить и на случай трехмерной обработки этих снимков.

Таблица 6. Уравнивание триплета без использования связующих точек

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	3.9	12.7	8.1	19.1
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	0.0	0.0	24	2.3	4.0	5.9	7.1
III	4	RPC+афф.	1.7	0.0	2.2	0.0	21	1.9	1.4	5.8	3.4
IV	4	RPC+сдвиг	2.0	3.6	3.1	5.2	21	2.0	3.9	5.1	7.1
V	10	RPC+сдвиг	1.9	4.1	3.3	6.1	15	2.1	3.7	4.9	7.1
VI	10	RPC+афф.	1.4	0.7	2.2	1.4	15	2.0	1.4	5.6	3.7
VII	25	RPC+сдвиг	2.0	3.9	4.9	7.0	0	-	-	-	-
VIII	25	RPC+афф.	1.7	1.1	4.3	3.0	0	-	-	-	-
IX	4	аффинная	0.0	0.0	0.0	0.0	21	21.4	28.1	48.7	84.0
X	10	пар.персп.	3.1	21.1	5.2	32.8	15	4.1	27.7	8.5	64.1
XI	10	DLT	4.5	12.2	8.2	28.2	15	5.7	27.4	11.1	80.3
XII	10	аффинная	15.8	19.8	26.4	42.4	15	20.8	35.3	50.0	88.7

Таблица 7. Уравнивание триплета с использованием связующих точек.

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	3.9	12.7	8.1	19.1
II	1	RPC+сдвиг	0.8	0.6	0.8	0.6	24	2.1	4.0	5.2	7.1
III	4	RPC+афф.	1.7	0.6	2.2	0.8	21	1.9	1.4	5.7	4.2
IV	4	RPC+сдвиг	2.0	3.6	3.3	5.0	21	2.1	4.0	4.9	6.9
V	10	RPC+сдвиг	1.9	4.1	3.4	6.2	15	2.1	3.7	4.9	7.0
VI	10	RPC+афф.	1.4	0.7	2.2	1.3	15	2.0	1.5	5.6	3.9
VII	25	RPC+сдвиг	2.0	3.9	4.9	6.9	0	-	-	-	-
VIII	25	RPC+афф.	1.7	1.1	4.3	3.1	0	-	-	-	-
IX	4	аффинная	0.0	0.0	0.0	0.0	21	18.7	30.4	41.0	76.3
X	10	пар.персп.	3.1	21.0	5.3	32.4	15	4.2	27.5	8.8	63.4
XI	10	DLT	4.5	13.1	7.8	28.0	15	5.9	27.0	10.8	76.4
XII	10	аффинная	26.2	69.3	43.7	131.0	15	32.6	69.9	75.4	151.8

6. Сравнение точности уравнивания триплета и стереопар

Результаты уравнивания триплета и стереопар приведены в Таблицах 8-11. Уравнивание выполнялось только с использованием RPC, так как нецелесообразность применения универсальных методов была продемонстрирована в предыдущих экспериментах.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Точность ориентирования триплета и стереопары, составленной из снимков, полученных с отклонением от надира вперед и назад вдоль трассы (то есть стереопары с наибольшим отношением базиса съёмки к высоте), примерно одинакова.
- Точность ориентирования триплета в большинстве экспериментов несколько лучше, чем в случае стереопар, включающих надирные снимки (то есть с отношением базиса съёмки к высоте меньше, чем у крайних снимков триплета). СКО плановых координат контрольных точек, определенных по результатам уравнивания с привлечением опорных точек, практически одинакова во всех случаях, в то время как СКО высот, определенных по стереопаре с наименьшим отношением базиса к высоте, по результатам некоторых экспериментов оказалась в полтора-два раза хуже, чем в случае триплета или стереопары с наибольшим углом конвергенции.

Таблица 8. Уравнивание триплета (В:Н=0.55)

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	3.9	12.7	8.1	19.1
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	0.0	0.0	24	2.3	4.0	5.9	7.1
III	4	RPC+афф.	1.7	0.0	2.2	0.0	21	1.9	1.4	5.8	3.4
IV	4	RPC+сдвиг	2.0	3.6	3.1	5.2	21	2.0	3.9	5.1	7.1
V	10	RPC+сдвиг	1.9	4.1	3.3	6.1	15	2.1	3.7	4.9	7.1
VI	10	RPC+афф.	1.4	0.7	2.2	1.4	15	2.0	1.4	5.6	3.7

Таблица 9. Уравнивание стереопары из снимков с отклонениями от надира вперед и назад вдоль трассы (В:Н=0.55).

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	3.7	12.4	8.1	18.8
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	0.0	0.0	24	2.3	4.2	6.0	7.9
III	4	RPC+афф.	1.7	0.1	2.1	0.1	21	2.0	1.3	5.7	3.3
IV	4	RPC+сдвиг	1.9	3.6	3.0	5.3	21	2.0	4.1	5.1	7.2
V	10	RPC+сдвиг	1.8	4.3	3.0	6.4	15	2.1	3.8	5.0	7.2
VI	10	RPC+афф.	1.4	0.8	2.2	1.5	15	2.1	1.4	5.7	3.7

Таблица 10. Уравнивание стереопары из снимков в надир и с отклонением от надира вперед вдоль трассы. (В:Н=0.35)

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	4.2	15.4	8.4	21.2
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	0.0	0.0	24	2.2	3.3	6.1	6.5
III	4	RPC+афф.	1.8	0.6	2.4	0.8	21	2.0	2.1	5.9	4.5
IV	4	RPC+сдвиг	2.0	3.3	3.1	4.3	21	2.0	3.3	5.5	6.0
V	10	RPC+сдвиг	1.8	3.2	3.4	4.2	15	2.0	3.3	5.2	6.3
VI	10	RPC+афф.	1.5	0.9	2.6	2.1	15	2.0	1.8	5.6	3.3

Таблица 11. Уравнивание стереопары из снимков в надир и с отклонением от надира назад вдоль трассы. (В:Н=0.19)

Схема	Число опорных точек	Геом. модель	СКО по оп. точкам, м		МАХ по оп. точкам, м		Число контр. точек	СКО по контр. точкам, м		МАХ по контр. точкам, м	
			dS	dZ	dS	dZ		dS	dZ	dS	dZ
I	0	RPC	-	-	-	-	25	4.5	8.5	7.7	16.5
II	1	RPC+сдвиг	0.0	0.0	0.0	0.0	24	2.4	6.5	5.9	12.6
III	4	RPC+афф.	1.8	1.4	2.3	1.8	21	2.0	3.5	5.9	8.1
IV	4	RPC+сдвиг	2.3	5.0	3.7	7.9	21	2.2	6.3	5.1	11.4
V	10	RPC+сдвиг	2.1	6.7	4.1	10.8	15	2.2	5.6	4.8	11.2
VI	10	RPC+афф.	1.5	2.7	2.8	4.5	15	2.0	2.8	5.3	5.3

Следует также иметь в виду, что существенным преимуществом триплета перед стереопарами является уменьшение «мертвых» зон.

7. Заключение

Подводя итоги проведенных экспериментов, можно сделать следующие выводы:

Обработка одиночных снимков:

- При обработке одиночных снимков SPOT 6 непосредственно по поставляемым с ними RPC, СКО вычисленного планового положения контрольных точек составляет приблизительно 4-5 м, что соответствует спецификации компании *Airbus Defense and Space* $CE90 = 35$ м, и даже значительно превосходит ее по точности.
- При обработке одиночного снимка, используя единственную опорную точку на снимок и вычисляя по ней поправку типа сдвиг в исходные RPC, можно добиться точности уравнивания 2.2-2.7 м (СКО в плане по контрольным точкам).
- Использование 4 опорных точек и аффинной поправки в RPC позволяет достичь точности 2.0-2.1 м (СКО планового положения по контрольным точкам). Увеличением числа опорных точек существенно улучшить этот показатель не удастся. Тем не менее, применение дополнительных точек полезно с точки зрения обеспечения избыточности измерений и, как следствие, надежности результатов.
- Точность, достигаемая при использовании универсальных методов неудовлетворительна, значительно хуже, чем результаты, получаемые при использовании исходных RPC без поправок. Можно говорить о непригодности этой группы методов для ориентирования снимков SPOT 6/7.

Обработка триплета и стереопар

- При уравнивании триплета по исходным RPC без введения поправок СКО на контрольных точках в плане составляет 3.9 м, по высоте 12.7 м.
- В том случае, если уравнивание триплета выполняется по RPC с привлечением опорных точек, связующие точки фактически не влияют на его точность.
- Оптимальной схемой уравнивания триплета является использование как минимум четырех опорных точек и вычисление аффинной поправки к RPC. В этом случае СКО планового положения контрольных точек составила 1.9 м, а СКО высоты – 1.5 м. Учитывая, что размер проекции пикселя на местность составляет 1.5 м для поставляемого растра и около 2 м (при съемке в надира, и несколько хуже при наклонной съемке) для исходного растра, достигнутая точность по высоте является очень высокой. Увеличение числа опорных точек не приводит к повышению точности.
- Точность ориентирования триплета и стереопары, составленной из снимков, полученных с отклонением от надира вперед и назад вдоль трассы (то есть стереопары с наибольшим отношением базиса съемки к высоте), примерно одинакова.
- Точность ориентирования триплета в большинстве экспериментов несколько лучше, чем в случае стереопар, включающих надирные снимки (то есть с отношением базиса съемки к высоте меньше, чем у крайних снимков триплета). СКО плановых координат контрольных точек, определенных по результатам уравнивания с привлечением опорных точек, практически одинакова во всех случаях, в то время как СКО высот, определенных по стереопаре с наименьшим отношением базиса к высоте, по результатам некоторых экспериментов оказалась в полтора-два раза хуже, чем в случае триплета или стереопары с наибольшим углом конвергенции.
- Следует также иметь в виду, что существенным преимуществом триплета перед стереопарами является уменьшение «мертвых» зон.

- Точность уравнивания универсальными методами крайне низка вне зависимости от того, используются связующие точки или нет, поэтому вывод о непригодности этих методов для ориентирования снимков SPOT 6/7 можно распространить и на случай трехмерной обработки этих снимков.