

И.В. Оньков (ЗАО «Мобиле», Пермь)

В 1970 г. окончил МИИГАиК по специальности «астрономо-геодезия». В настоящее время — научный консультант ЗАО «Мобиле» (Пермь). Кандидат технических наук, доцент.

Анализ точности ортоснимков WorldView-2 в зависимости от метода геометрической коррекции по опорным точкам

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Наиболее распространенными данными дистанционного зондирования Земли, которые используются в настоящее время для решения задач крупномасштабного картографирования, создания и обновления топографических планов, являются снимки со спутников WorldView-1 и WorldView-2. За период съемочного сезона 2012 г. ими покрыто соответственно 39 и 43% всей территории РФ [1].

Продукты стандартного уровня обработки (Ortho Ready Standard) космических аппаратов WorldView-1 и WorldView-2 поставляются с элементами ориентирования снимков в виде коэффициентов рациональных полиномов (RPC), которые позволяют самостоятельно выполнять их ортотрансформирование при наличии внешней цифровой модели рельефа местности (ЦМР).

Полученные ортоснимки могут быть использованы для создания и обновления планов масштаба 1:25 000–1:10 000, а дополнительная геометрическая коррекция ортоснимков по 6–8 наземным опорным точкам позволяет повысить их точность до требований, предъявляемым к планам масштаба 1:5000–1:2000 [2].

В то же время вопросы, связанные с выбором метода геометрической коррекции ортоснимков и влияния геометрии пространственного расположения опорных точек на точность ортоснимков, не нашли должного отражения в имеющихся публикациях и, на наш взгляд, требуют более полного их изучения и анализа.

С этой целью в данной работе выполнены экспериментальные исследования точности ортоснимков WorldView-2 в зависимости от типа математической модели преобразования координат, используемой для их геометрической коррекции, а также рассмотрены особые случаи конфигурации опорных точек, при которых задача корректировки ортоснимков по опорным точкам не имеет решения.

Основные характеристики шести математических моделей, выбранные для исследований в данной работе, приведены в табл. 1.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные снимки WorldView-2 стандартного уровня обработки (Ortho Ready Standard) на территорию г. Перми и пригородной зоны были любезно предоставлены компанией «Совзонд» для выполнения работ исследовательского характера. Основные характеристики условий съемки приведены в табл. 2.

Ортотрансформирование снимков выполнялось в программном комплексе ПК ENVI 6.1 без наземных опорных точек привязки с использованием коэффициентов рациональных полиномов RPC и внешней цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной по топографической карте масштаба 1:25 000 с высотой сечения рельефа 5 м.

В качестве опорных и контрольных точек для геометрической коррекции и оценки точности ортоснимков использовались хорошо отобразившиеся на

Таблица 1

Преобразования координат, используемые для коррекции ортоснимков

№ метода	Формулы преобразования	Число определяемых параметров m	Число избыточных измерений g	
			$n=6$	$n=8$
1	$X = \Delta x + x;$ $Y = \Delta y + y$	2	10	14
2	$X = \Delta x + s \times x;$ $Y = \Delta y + s \times y$	3	9	13
3	$X = \Delta x + a_1x - a_2y;$ $Y = \Delta y + a_3x - a_4y;$	4	8	12
4	$X = \Delta x + a_1x + a_2y;$ $Y = \Delta y + a_3x + a_4y;$	6	6	10
5	$X = \Delta x + a_1x + a_2y + a_3xy;$ $Y = \Delta y + a_4x + a_5y + a_6xy;$	8	4	8
6	$X = \Delta x + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2;$ $Y = \Delta y + a_6x + a_7y + a_8xy + a_9x^2 + a_{10}y^2$	12	0	4

В табл. 1 обозначены: Δx , Δy — сдвиги по осям координат, s — коэффициент масштаба, a_1, \dots, a_{10} — коэффициенты преобразований, n — число опорных точек.

Таблица 2

Основные характеристики условий съемки

Параметр	Значение параметра	
ID снимка	206440	425610
Дата съемки	22.07.2010	17.05.2011
Азимут солнца	165,0°	176,7°
Высота солнца над горизонтом	51,8°	51,4°
Азимут направления на спутник	57,8°	231,8°
Средний угол возвышения спутника	77,7°	77,5°

снимках четкие контуры местности, ошибка опознавания которых не превышала 1–2 пикселей раstra (опознаки). Геодезические координаты опознаков были определены из GPS-измерений. Схемы про-

странственного расположения опознаков на ортоснимках показаны на рис. 1, 2.

На каждом ортоснимке были измерены координаты 68 опознаков, часть из которых использовалась

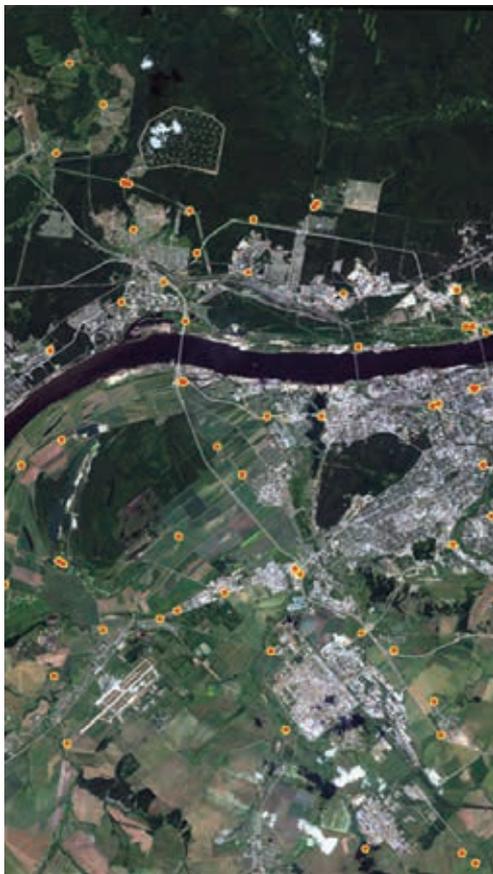


Рис. 1. Расположение опознаков на ортоснимке 206440

для определения параметров математической модели преобразования координат и геометрической коррекции ортоснимков в качестве опорных точек, а оставшиеся опознаки — для оценки точности ортоснимков в качестве контрольных точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ОРТОСНИМКОВ

Числовые характеристики точности ортоснимков вычислялись по расхождениям измеренных на снимках координат контрольных точек x_i, y_i , исправленных за коррекцию, и их геодезических координат



Рис. 2. Расположение опознаков на ортоснимке 425610

$X_i, Y_i; \Delta x_i = x_i - X_i, \Delta y_i = y_i - Y_i, i = 1, k.$

В качестве основных показателей точности были выбраны следующие широко распространенные в отечественной и международной практике ошибки:

- систематический сдвиг (систематическая ошибка)

$$d = \sqrt{\bar{\Delta}_x^2 + \bar{\Delta}_y^2}, \text{ где } \bar{\Delta}_x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta x_i, \bar{\Delta}_y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta y_i;$$

- средняя квадратическая ошибка

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2},$$

$$\text{где } RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta x_i^2}, RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta y_i^2};$$

Таблица 3

Показатели точности ортоснимка 206440 по 6 опорным точкам

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,25	0,25	0,26	0,26	0,24	0,33
$RMSE$, м	0,64	0,65	0,67	0,69	0,69	1,05
MRE , м	0,56	0,57	0,59	0,60	0,59	0,89
$CE90$, м	0,99	1,00	1,02	1,03	1,02	1,54
Δr_{max} , м	1,38	1,42	1,48	1,56	1,86	2,61

Таблица 4

Показатели точности ортоснимка 425610 по 6 опорным точкам

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,19	0,19	0,20	0,18	0,20	0,34
$RMSE$, м	0,59	0,60	0,61	0,63	0,65	1,08
MRE , м	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,93
$CE90$, м	0,85	0,87	0,89	0,96	0,97	1,76
Δr_{max} , м	1,02	1,09	1,18	1,35	1,45	2,51

Таблица 5

Показатели точности ортоснимка 206440 по 8 опорным точкам

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,14	0,14	0,13	0,11	0,12	0,16
$RMSE$, м	0,59	0,60	0,60	0,61	0,63	0,74
MRE , м	0,52	0,53	0,53	0,53	0,55	0,64
$CE90$, м	0,91	0,92	0,94	0,92	0,95	1,19
Δr_{max} , м	1,13	1,19	1,23	1,28	1,59	1,82

Таблица 6

Показатели точности ортоснимка 425610 по 8 опорным точкам

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,22	0,21	0,21	0,22	0,26	0,27
$RMSE$, м	0,60	0,59	0,59	0,63	0,71	0,75
MRE , м	0,52	0,52	0,51	0,54	0,61	0,64
$CE90$, м	0,91	0,91	0,92	1,01	1,14	1,18
Δr_{max} , м	1,05	1,05	1,16	1,33	1,57	1,84

- средняя радиальная ошибка $MRE = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta r_i$,
где $\Delta r_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$;
- круговая вероятная 90% ошибка $CE90$;
- максимальная ошибка в выборке Δr_{max} .

Исследования выполнялись для каждого ортоснимка по шести и восьми опорным точкам. Опорные точки выбирались по возможности равномерно по площади снимка на открытых участках со спокойным рельефом.

Для повышения статистической надежности оценок и достоверности выводов расчеты выполнялись

по четырем вариантам выбора опорных точек на каждом ортоснимке.

В табл. 3, 4 приведены осредненные по четырем вариантам значения показателей точности ортоснимков, скорректированных по 6 опорным точкам (число контрольных точек – 62).

В табл. 5, 6 приведены осредненные по четырем вариантам значения показателей точности ортоснимков, скорректированных по 8 опорным точкам (число контрольных точек – 60).

На рис. 3–6 приведены графики ошибок, соответствующие данным, приведенным в табл. 3–6.

На основании анализа приведенных в табл. 3–6 данных и графиков, показанных на рис. 3–6,

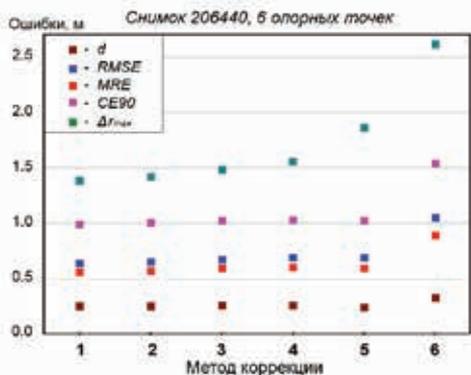


Рис. 3. Показатели точности ортоснимка 206440 по 6 опорным точкам

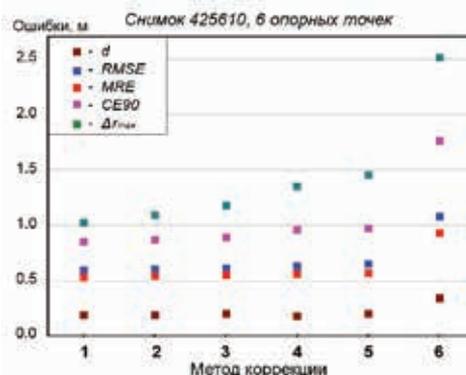


Рис. 4. Показатели точности ортоснимка 425610 по 6 опорным точкам

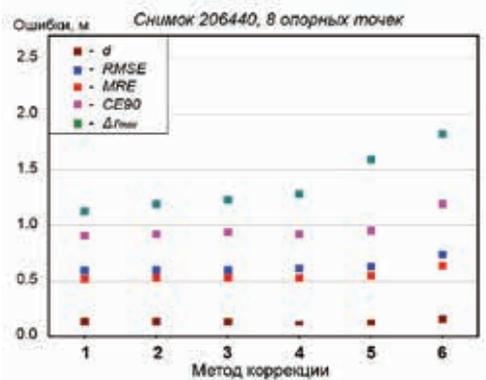


Рис. 5. Показатели точности ортоснимка 206440 по 8 опорным точкам

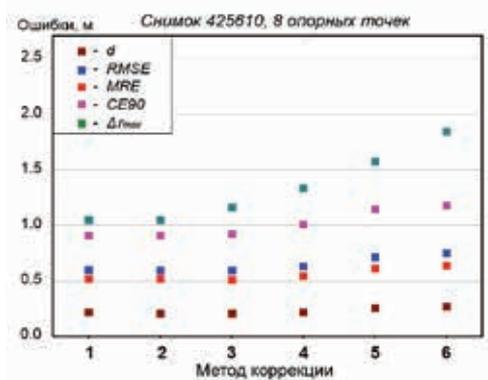


Рис. 6. Показатели точности ортоснимка 425610 по 8 опорным точкам

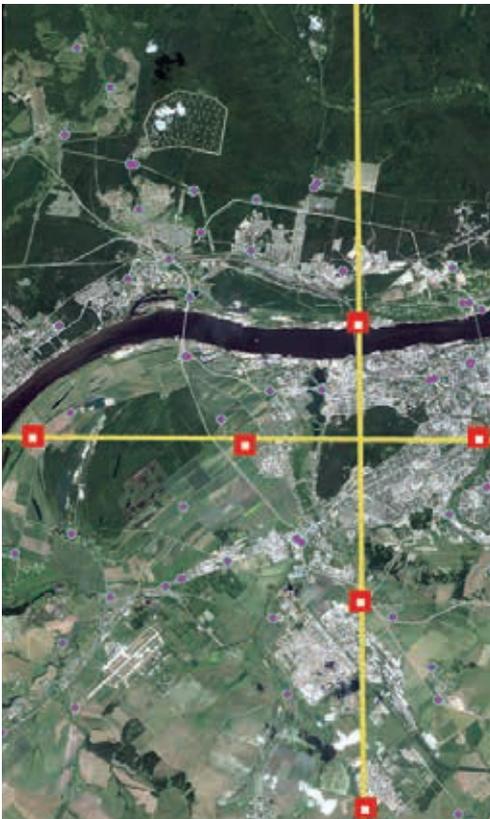


Рис. 7. Пример критического расположения 6 опорных точек на двух перпендикулярных прямых



Рис. 8. Пример критического расположения 8 опорных точек на двух произвольных прямых

Таблица 7

Показатели точности ортоснимка 425610 по 6 опорным точкам, расположенным на двух взаимно перпендикулярных прямых линиях

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,12	0,19	0,24	0,20	2,08	2,86
$RMSE$, м	0,59	0,60	0,65	0,64	12,26	18,77
MRE , м	0,52	0,53	0,58	0,55	9,09	13,95
$CE90$, м	0,91	0,88	0,94	0,92	19,90	29,27
Δr_{max} , м	1,28	1,47	1,43	1,71	33,76	51,47
$Sigma$	0,47	0,42	0,45	0,42	0,45	–

Таблица 8

Показатели точности ортоснимка 425610 по 8 опорным точкам, расположенным на двух произвольных прямых линиях

Показатель точности	Метод геометрического преобразования					
	1	2	3	4	5	6
d , м	0,16	0,22	0,26	0,23	0,42	11,45
$RMSE$, м	0,59	0,61	0,64	0,62	0,94	32,98
MRE , м	0,52	0,54	0,57	0,54	0,78	22,32
$CE90$, м	0,91	0,87	0,91	0,94	1,62	66,74
Δr_{max} , м	1,12	1,37	1,48	1,56	2,73	112,88
$Sigma$	0,57	0,52	0,54	0,59	0,61	0,46

можно сделать следующие выводы:

- по критериям средней ошибки MRE и круговой вероятной ошибки $CE90$ геометрическая коррекция ортоснимков с использованием линейных методов преобразования (методы 1–4) равноценна по точности;
- использование нелинейных методов преобразования (методы 5 и 6) приводит к снижению точности ортоснимков по всем показателям;

- по критерию максимальной ошибки Δr_{max} предпочтение во всех случаях имеет первый метод.

КРИТИЧЕСКИЕ КОНФИГУРАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОПОРНЫХ ТОЧЕК

Как известно, задача определения коэффициентов геометрических преобразований по опорным точкам не имеет решения, если ранг матрицы урав-

нения поправок, элементами которой являются координаты опорных точек, меньше числа определяемых параметров.

Такие случаи возникают, если координаты опорных точек удовлетворяют некоторым геометрическим условиям, например лежат на одной или нескольких прямых, окружностях, эллипсах, гиперболах и т. д. На практике эти условия, как правило, математически строго не выполняются, но если опорные точки оказываются вблизи этих «критических» конфигураций, то ошибки скорректированных ортоснимков могут резко возрасти.

Особенно опасно использование полиномиальных методов коррекции, так как визуально оценить по картинке принадлежность опорных точек кривым соответствующего порядка, кроме тривиальных случаев прямых линий, достаточно сложно.

Для экспериментального подтверждения сказанным замечаниям были подобраны из имеющихся опознаков два наиболее простых варианта критического расположения опорных точек: в первом случае точки расположены на двух взаимно перпендикулярных прямых — эта конфигурация является вырожденной для коррекции полиномами первой степени (рис. 7), во втором случае точки расположены на двух произвольных прямых — эта конфигурация является вырожденной для коррекции полиномами второй степени (рис. 8).

В табл. 7–8 приведены значения показателей точности ортоснимков, скорректированных по 6 и 8 опорным точкам, геометрическая конфигурация которых на снимке близка вырожденной. В последней строке таблиц приведена для сравнения стандартная средняя квадратическая ошибка Sigma, вычисленная по отклонениям координат на опорных точках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя в целом результаты выполненных исследований точности ортоснимков WorldView-2, можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- Точность ортоснимка в основном зависит от метода его геометрической коррекции и пространственного расположения опорных точек и в меньшей степени от их числа (при $n = 6-8$).
- Вне зависимости от числа опорных точек и метода

геометрической коррекции ортоснимка средние радиальные ошибки (MRE) не превышают допустимого значения 1,0 м, установленного Инструкцией по фотограмметрической обработке [3] для фотопланов масштаба 1:2000, а круговые вероятные ошибки CE90 не превышают значения 2,0 м, заявленного фирмой-поставщиком продукции [4].

- Нелинейные методы преобразования (полиномы 1-й и 2-й степени) не следует использовать для геометрической коррекции ортоснимков при числе опорных точек менее 8-ми из-за отсутствия или малого числа избыточных измерений и высокой вероятности попадания опорных точек в зону «критических» конфигураций, при которых ошибки ортоснимков резко возрастают.
- Величина стандартной средней квадратической ошибки Sigma, вычисляемая по остаточным отклонениям координат на опорных точках, которую обычно используют в качестве критерия выбора оптимальной модели преобразования, не отражает реальной точности корректируемого ортоснимка.
- Наиболее оптимальный по точности и не имеющий «критических» конфигураций метод геометрической коррекции ортоснимков WorldView-2 – смещение ортоизображения на среднюю величину разности измеренных на снимке и геодезических координат опорных точек. Этот метод не требует выполнения дополнительной процедуры трансформирования растра (warping) и заключается в изменении координат верхнего левого угла ортоснимка в текстовом заголовочном файле на средние значения сдвигов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.sovzond.ru/about/news/190395.html>
Оньков И.В. Исследование геометрической точности ортоснимков WorldView-2, созданных с использованием цифровой модели рельефа SRTM // Геоматика. – 2011. – №4. – С. 48–55.
2. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.
3. http://www.digitalglobe.com/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf