На правах рукописи

СОНЮШКИН АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ

Совершенствование технологии создания ортофотопланов по космическим изображениям высокого разрешения

Специальность 25.00.34

«Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре фотограмметрии
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии»
(МИИГАиК)

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Чибуничев Александр Георгиевич.

Официальные оппоненты: **Гук Александр Петрович**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУГиТ)», профессор-консультант кафедры физической геодезии и ДЗ
Кадничанский Сергей Алексеевич,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», начальник отдела аэрокосмосъемки и фотограмметрии

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»

Защита состоится «24» марта 2016 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 в Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., д.4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИИГАиК и на сайте по ссылке: http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionyy_sovet/dissertatsii/20151015112918-3628.pdf.
Автореферат разослан «___»_____2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Беленко В. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Количество космических аппаратов (КА), позволяющих получать сканерные снимки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, благодаря коммерческой и государственной поддержке различных стран и организаций, постоянно увеличивается. Наряду с этим улучшаются и технические характеристики установленной на них аппаратуры. Следствием такого развития является всевозрастающий объем данных как численно, так и в количестве информации на единицу хранения, например, размер стандартного (квадратного) снимка с КА IKONOS-2 составляет 370 Мб, а снимка WorldView-3 – около 3.5 Гб. В случае если речь идет о комплексированных изображениях, размер возрастает кратно количеству спектральных каналов и может достигать 28 Гб (8 мультиспектральных каналов WorldView-3). Такой рост объемов информации требует модернизации (оптимизации) существующих методов цифрового ортотрансформирования с целью увеличения их производительности за счет сокращения времени обработки.

Одним из потенциальных источников ЦМР необходимых для высокоточного ортотрансформирования является космическая стереосъемка высокого пространственного разрешения. В связи с развитием методов плотного стереоотождествления, в том числе в смежных дисциплинах, актуальной задачей становится качественное и количественное сопоставление результатов автоматизированного построения ЦМР различными методами, и выработка практических рекомендаций по их использованию при ортотрансформировании.

Кроме того, более детального изучения требует возможность использования общедоступных (полученных из открытых источников) ЦМР при ортотрансформировании космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения.

Объектом исследования являются методы цифрового трансформирования космической сканерной съемки, а также методы автоматизированного стереоотождествления. **Предметом исследования** является технология создания ортофотопланов по космической съемке высокого разрешения.

Цели и задачи диссертации. Целью диссертационной работы является разработка технологии создания ортофотопланов по космическим снимкам сверхвысокого и высокого пространственного разрешения, позволяющей выполнять фотограмметрическую обработку в режиме близком к реальному времени.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование существующих методов цифрового ортотрансформирования космической сканерной съемки, а также подходов к увеличению их производительности.
2. Изучение современных методов стереоотождествления, сопоставление результатов автоматизированного построения плотных ЦМР различными методами, и выработка рекомендаций по использованию результатов автоматизированного стереоотождествления по космической стереосъемке высокого разрешения при ортотрансформировании.
3. Разработка алгоритма аппроксимации геометрической модели космического снимка сверхвысокого пространственного разрешения, оценка точности аппроксимации и скорости вычислений по сравнению с традиционными методами. Выработка рекомендаций по практическому применению алгоритма.
4. Изучение степени влияния факторов точности и плотности узлов ЦМР, на точность ортофотоплана, при различных условиях съемки и типах рельефа местности. Выработка практических рекомендаций по использованию ЦМР различной плотности при ортотрансформировании космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Научная новизна

Разработаны оригинальные алгоритмы построения регулярной сетки трансформирования с использованием коэффициентов прямой дробно-рациональной функции (RFM) и топологической коррекции узлов сетки трансформирования в «мертвых зонах», а также метод учета систематической погрешности прямой RFM модели, позволяющий компенсировать ошибки линейных элементов внешнего ориентирования. На базе разработанных алгоритмов и методов была реализована технология создания ортофотопланов по космической сканерной съемке высокого разрешения.

Выработаны рекомендации по использованию методов автоматизированного стереоотождествления при построении плотных ЦМР по стереопарам космической съемки высокого (1.5 – 2.5 м в пикселе).

Выработаны рекомендации по использованию ЦМР различной плотности при создании ортофотопланов по космической сканерной съемке сверхвысокого разрешения в крупных масштабах.

Теоретическая и практическая ценность. Предложенный в работе алгоритм построения регулярной сетки трансформирования позволяет увеличить, без существенного снижения точности, скорость ортотрансформирования от четырех до более чем двадцати семи раз, по сравнению с традиционным методом ортотрансформирования. Созданная на его базе технология позволяет выполнять фотограмметрическую обработку в режиме близком к реальному времени, а также сохранять фотометрические характеристики исходных снимков, что является критическим фактором при автоматизированном тематическом дешифрировании.

Предложенный метод учета систематической погрешности может быть успешно использован при малом количестве либо неудачном расположении, точек планово-высотной подготовки при фотограмметрической обработке снимков (условных кадров), полученных на одном маршруте, но не имеющих взаимного перекрытия.

Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших теоретических исследований, как в фотограмметрии, так и в смежных дисциплинах (компьютерное зрение), модификации существующих алгоритмов и методов цифровой фотограмметрии, а также учтены в новых редакциях нормативной документации используемой для регулирования фотограмметрических работ.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы цифровой фотограмметрии, статистические методы, численные методы, а также методы цифровой обработки изображений.

Реализация и внедрение. Разработанные в работе алгоритмы и методы были реализованы в виде программного кода на языке C++ и включены в состав программного продукта ScanEx IMAGE Processor, использованного в качестве основного программного средства при выполнении ряда Государственных и коммерческих контрактов, в том числе ГК 157Д; при формировании спутникового покрытия для вэб-порталов «Яндекс.Карты», www.kosmosnimki.ru и др. Кроме того, программный продукт внедрен в образовательный процесс более чем в тридцати Высших учебных заведениях, и коммерчески распространяется более чем в двадцати странах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на ряде научных и научно-практических конференций, в том числе: Вторая международная конференция "Земля из космоса – наиболее эффективные решения" (Москва 2005); Международная конференция «Геоинформационные

технологии и космический мониторинг» (Дюрсо 2013); VII Всероссийская конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (Дюрсо 2014); XII Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва 2014); 14-ая Международная научно-техническая конференция «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии» (Хайнань, Китай 2014).

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена проведенными в диссертационной работе экспериментальными исследованиями на статистически значимом множестве данных.

Публикации. Основные результаты работы изложены в восьми работах, в том числе пять публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки Российской Федерации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. В конце каждой главы приводятся полученные результаты и рекомендации. Текст работы изложен на 117 листах машинописного текста, содержит 31 рисунок и 22 таблицы. Библиографический список содержит 103 наименования в том числе 54 на английском языке.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм построения регулярной сетки трансформирования по коэффициентам прямой RFM модели.
2. Алгоритм топологической коррекции сетки трансформирования.
3. Метод учета систематической погрешности прямой RFM модели.
4. Обоснование рекомендации по автоматизированному построению плотных ЦМР по космическим снимкам высокого разрешения.
5. Обоснование требований к плотности узлов ЦМР в зависимости от угла наклона поверхности и угла отклонения от надира при ортотрансформировании в крупных масштабах.

В первой главе рассмотрены методы цифрового трансформирования космических снимков, формируемых линейными сканирующими системами, а также факторы, влияющие на точность ортофотопланов. Процесс цифрового трансформирования можно разделить на два этапа: 1) вычисление координат ортофотоплана с учетом рельефа местности, 2) перенос плотностей (интерполяция яркостей) исходного снимка в базис ортофотоплана.

По способу вычисления координат можно выделить строгий и аппроксимирующий методы. Реализация строго метода основана на физической

модели движения КА и ориентации камеры в момент формирования строки изображения.

Среди аппроксимирующих методов, наиболее распространённым является метод, в котором связь между координатами объекта и снимка задается рациональным многочленом третьей степени (RFM), коэффициенты многочлена (RPC) предоставляются поставщиком съемки. В работе подробно рассмотрены строгий метод, на примере физической модели КА Pleiades, а также «рельеф-зависимый» и «рельеф-независимый» способы вычисления дробно-рациональной функции.

Еще одним способом аппроксимации строгого подхода является метод интерполяции на сетке (Grid Interpolation Image Geometry Model), описанный в стандарте The OpenGIS Abstract Specification. Принцип этого подхода заключается в следующем: исходный снимок разбивается на сетку с регулярным шагом в пикселях, координаты узлов сетки в целевой системе координат вычисляются при помощи строгой модели. Тогда координаты (в целевой системе координат) пикселей исходного снимка, принадлежащие узлам сетки, вычисляются напрямую, а координаты пикселей, лежащих между узлами сетки – при помощи трилинейной либо билинейной интерполяции. Принцип прямого трансформирования на регулярной сетке показан на рисунке 1.

а) б)

Рис. 1. Схема прямого трансформирования по регулярной сетке. а) Исходный снимок и сетка с регулярным шагом в пикселях; б) Сетка, трансформированная в целевую систему координат.

Далее, в главе рассмотрены методы интерполяции яркости пикселей. Подробно рассмотрены методы ближайший сосед, билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция и интерполяция при помощи усеченных sinc-функций (на примере фильтра Ланцоша). Даны рекомендации по применению методов интерполяции в зависимости от типа последующего использования

обрабатываемого растрового изображения (ортофотоплан, результат автоматизированного дешифрирования, картографический веб-сервис).

Затем, в главе рассмотрены существующие подходы по алгоритмической и вычислительной (с использованием технологий параллельных вычислений) оптимизации фотограмметрических процессов в первую очередь связанные с ускорением вычисления координат.

Далее, показано, что основными факторами (при условии точности строгой или аппроксимирующей модели), влияющими на точность ортофотоплана, являются точность и плотность узлов используемой при ортотрансформировании ЦМР. Приведен метод уточнения ЭВО (для строгой модели) и метод полиномиальных поправок для RFM модели.

Рассмотрены нормативные требования к точности ЦМР, а также альтернативный подход к вычислению оптимальной плотности узлов ЦМР, обеспечивающей высокоточное ортотрансформирование.

Рассмотрены основные источники ЦМР, используемые при ортотрансформировании космических снимков.

В конце главы сформулированы следующие выводы:

Необходимо совершенствование существующих методов ортотрансформирования, с целью увеличения их производительности при сохранении максимально возможной точности.

Необходима разработка практических рекомендаций по использованию ЦМР различной плотности и точности при ортотрансформировании космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Необходимо провести дополнительное исследование методов автоматического стереоотождествления, с целью выбора оптимального, с точки зрения точности и плотности узлов, метода построения ЦМР.

Во второй главе проведен анализ алгоритмов стереоотождествления и выполнена качественная и количественная оценка ЦМР, построенных различными методами по космическим снимкам высокого разрешения.

В разделе «Обзор методов стереоотождествления» подробно рассмотрены три класса методов стереоотождествления: локальный, глобальный и полуглобальный. Рассмотрены основные этапы работы реализующих их алгоритмов: вычисление стоимости соответствия, агрегация стоимостей соответствия и вычисление карт продольных параллаксов. Подробно описаны метрики соответствия, используемые в различных алгоритмах.

В качестве программных реализаций методов стереоотождествления были выбраны: пакет ENVI 5 (локальный метод); программный код библиотеки OpenCV (полуглобальный алгоритм SGM); и пакет ScanEx IMAGE Processor 4.0 (SIP) в котором реализован глобальный метод на базе алгоритма «имитации отжига» (Simulated Annealing), использующий для оптимизации функции глобальной энергии алгоритм Метрополиса-Гастингса, подробное описание которого приведено в разделе «Программные реализации методов стереоотождествления».

Далее, представлены результаты сопоставления ЦМР, полученных различными методами.

Исходными данными для построения ЦМР являлись стереопары, полученные с КА IRS-P5 и SPOT-6, в качестве опорной информации использовались: ЦМР полученная по результатам обработки данных воздушного лазерного сканирования с точностью по высоте 10.2 см и точностью в плане 25 см; ортофотоплан с разрешением 10 см на пиксель и точностью в плане 25 см. Площадь полигона на котором проводились исследования составляла 20 кв. км.

Фотограмметрическая обработка стереопар выполнялась в следующей последовательности: ориентирование снимков и исключение систематической погрешности; трансформирование левых и правых стереоснимков в базисную плоскость; автоматизированное построение ЦМР; автоматизированное построение ортофотопланов по левым снимкам.

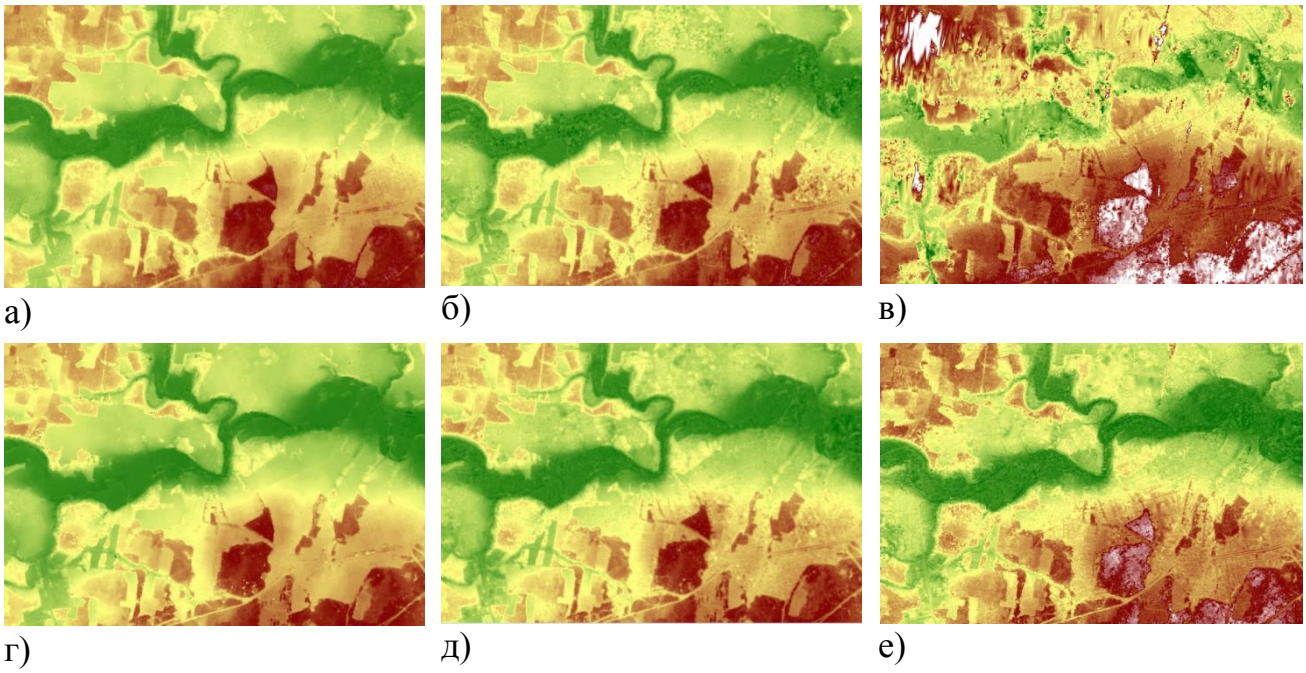
Автоматизированное стереоотождествление по базисным изображениям выполнялось со следующими параметрами:

- Локальный метод (LM) – локальное окно размером 5x5 пикселей, пороговое значение коэффициента корреляции 0.7, пакет ENVI 5.
- Полуглобальный метод (SGM) – штраф $P_1 = 8$, штраф $P_2 = 32$, пакет OpenCV.
- Глобальный метод (GM) – алгоритм оптимизации Метрополиса-Гастингса, локальное окно размером 3x3 пикселя, 30 итераций на каждом уровне, штраф при изменении E_{smooth} = 0.1, начальная температура 0.06, пакет SIP.

При обработке полуглобальным методом использовались базисные изображения, полученные в пакете SIP.

В результате автоматизированного стереоотождествления были получены шесть ЦМР, с плотностью узлов 3.2 м (стереопара SPOT-6) и 4.8 м (стереопара IRS-P5). Полученные ЦМР показаны на рисунке 2.

Далее, по согласованным с ЦМР ортофотопланам, была проведена оценка точности в плане. На опорном ортофотоплане было измерено четырнадцать равномерно распределенных по территории полигона, хорошо опознаваемых точек. Затем соответствующие им точки были опознаны и измерены на ортофотоснимках SPOT-6 и IRS-P5, и вычислены значения абсолютной разности пространственных координат. В качестве критериев при оценке точности в плане использовались следующие характеристики: минимальное значение, максимальное значение, среднее арифметическое, стандартное отклонение (СКО), среднеквадратическая погрешность (СКП) и погрешность с доверительной вероятностью 90% (CE90). Полученные значения представлены в таблице 1.



а) б) в)

г) д) е)

Рис. 2. Результат автоматизированного построения ЦМР: а) SPOT-6 алгоритм SGM; б) SPOT-6 алгоритм GM; в) SPOT-6 алгоритм LM; г) IRS-P5 алгоритм SGM; д) IRS-P5 алгоритм GM; е) IRS-P5 алгоритм LM.

Как хорошо видно из таблицы 1 точность ЦМР в плане достаточно высока и во всех случаях по показателю СКП не превышает размерности пикселя исходных снимков, что позволяет провести анализ точности ЦМР по высоте.

Для оценки точности по высоте были построены карты абсолютной разницы значений пикселей (высот), исследуемых и опорной ЦМР. Для этого, опорная ЦМР была передискретизирована в соответствии с шагом 3.2 м и 4.8 м при помощи билинейной интерполяции, а затем выполнена операция вычитания значений пикселей опорной ЦМР из значений соответствующих им пикселей, исследуемых ЦМР. Полученные таким образом карты абсолютной разницы высот

показаны на рисунке 3. В результате анализа полученных карт, была выявлена существенная разница значений высот для открытых и лесных территорий, которая была учтена при численном сопоставлении результатов.

Таблица 1

Точность ЦМР в плане

Метод	Макс.	Мин.	Среднее	СКО	СКП	CE90
SPOT-6 (SGM)	2.19	0.19	1.17	0.57	1.35	2.89
SPOT-6 (GM)	2.02	0.06	1.07	0.56	1.20	2.57
SPOT-6 (LM)	2.24	0.30	1.45	0.55	1.54	3.31
IRS-P5 (SGM)	2.76	0.45	1.37	0.78	1.56	3.35
IRS-P5 (GM)	2.82	0.47	1.38	0.82	1.59	3.42
IRS-P5 (LM)	3.23	0.15	1.39	0.91	1.64	3.53

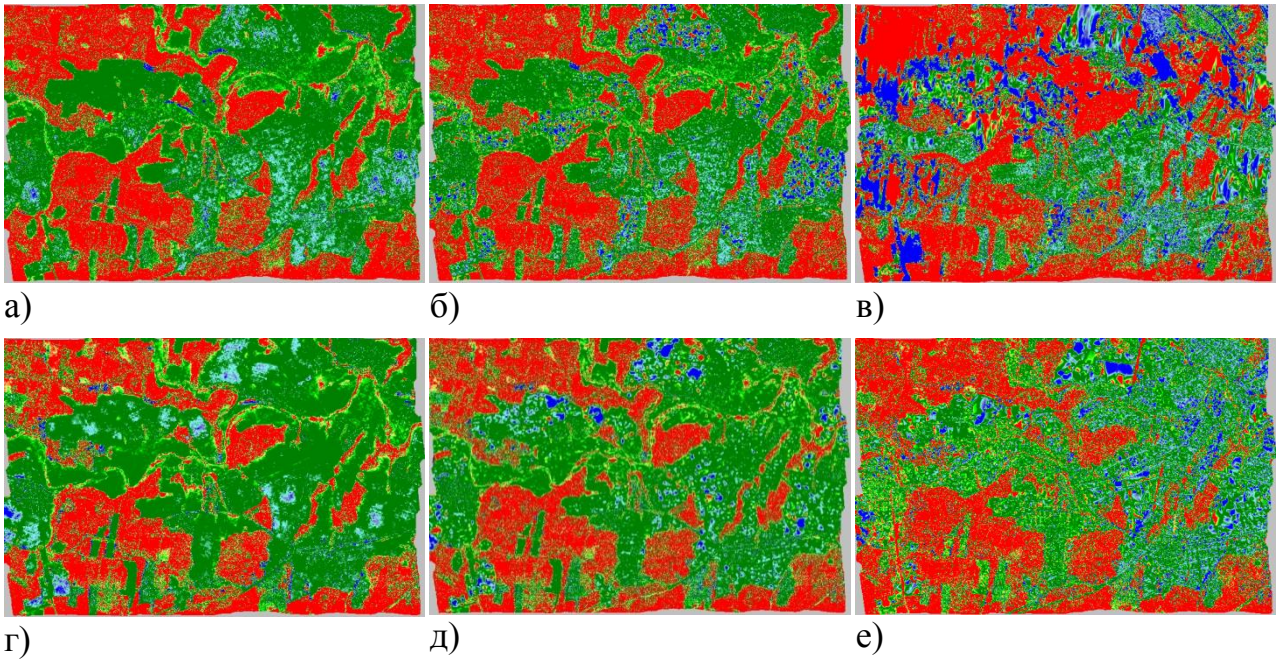


Рис. 3. Карты абсолютной разницы высот опорной и полученных по стереопарам ЦМР: а) SPOT-6 алгоритм SGM; б) SPOT-6 алгоритм GM; в) SPOT-6 алгоритм LM; г) IRS-P5 алгоритм SGM; д) IRS-P5 алгоритм GM; е) IRS-P5 алгоритм LM.

При численной оценке высотной точности моделей использовались следующие критерии: среднее арифметическое ($\overline{\Delta h}$), абсолютное среднее (АС), стандартное отклонение (СКО), среднеквадратическая погрешность (СКП) и погрешность с доверительной вероятностью 90% (LE90). Дополнительно был вычислен процент от общего количества пикселей, лежащих в интервалах: 0.5σ, 1σ, 2σ и 3σ. Основные характеристики, использованные при оценке точности ЦМР по высоте как по всей площади моделей, так и за исключением, лесных территорий (пов.) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Точность ЦМР по высоте

ЦМР / Метод	$\overline{\Delta h}$	АС	СКО	СКП	LE90	0.5 σ	1 σ	2 σ	3 σ
SPOT-6									
SGM	3.86	5.19	6.90	7.90	13.00	59.27	72.81	87.59	97.91
SGM пов.	0.01	1.77	2.61	2.61	4.30	49.94	80.02	95.64	98.46
GM	3.87	5.48	7.06	8.05	13.25	54.85	71.50	88.32	98.23
GM пов.	0.04	2.38	3.50	3.50	5.75	53.37	79.48	94.07	98.17
LM	4.01	8.75	12.81	13.42	22.08	55.06	77.09	95.13	97.94
LM пов.	0.00	6.25	10.52	10.52	17.31	63.94	84.49	94.86	97.83
IRS-P5									
SGM	2.99	4.60	6.53	7.18	11.81	60.78	75.37	89.60	97.35
SGM пов.	0.01	1.66	2.56	2.56	4.21	53.46	82.50	95.55	98.37
GM	3.14	4.80	6.55	7.26	11.95	57.13	74.18	89.61	97.47
GM пов.	0.06	2.00	2.95	2.95	4.85	53.34	79.53	94.37	98.26
LM	3.18	5.55	7.23	7.89	12.99	50.76	73.17	90.65	98.22
LM пов.	0.00	3.10	4.30	4.30	7.07	47.18	76.24	94.75	98.57

В результате анализа полученных значений установлено, что наиболее точными являются ЦМР построенные полуглобальным методом (SGM). Среднеквадратические погрешности моделей SPOT-6 (SGM) и IRS-P5 (SGM) не превышают трех метров, для открытых территорий. При этом около 50% значений разницы высот этих моделей и опорной ЦМР лежат в диапазоне [-1.3;1.3] (0.5 σ), то есть их высота определена с субпиксельной точностью. Глобальный метод (GM) в среднем практически не уступает полуглобальному. Характеристики

точности ЦМР, полученной локальным методом (LM), заметно уступают аналогичным показателям моделей, построенных глобальным и полуглобальным методами.

Далее, было проведено качественное сопоставление ЦМР, полученных разными методами. В качестве опорных использовались ЦМР, полученные методом SGM, а в качестве сопоставляемых – построенные глобальным и локальным методами. При сопоставлении аналогично эксперименту по оценке высотной точности были построены карты абсолютной разницы высот, которые показаны на рисунке 4.

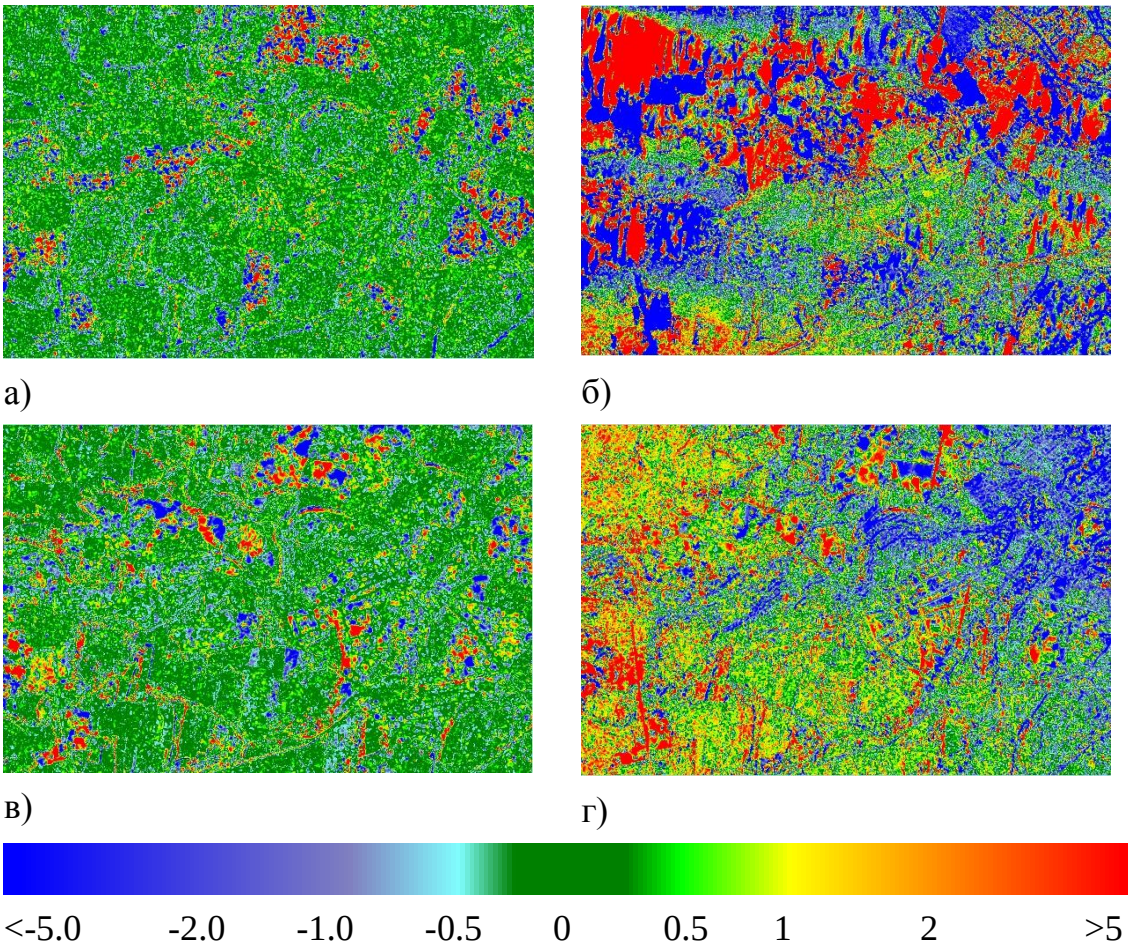


Рис. 4. Карты абсолютной разницы высот ЦМР, полученных разными методами: а) SPOT-6 алгоритмы SGM и GM; б) SPOT-6 алгоритмы SGM и LM; в) IRS-P5 алгоритмы SGM и GM; г) IRS-P5 алгоритмы SGM и LM.

При анализе было установлено, что для моделей, построенных полуглобальным (SGM) и глобальным методами (GM), преобладающее количество значений разности высот лежит в диапазоне [-0.5;0.5] метра, в то же время на некоторых участках были выявлены аномалии с большими (по модулю) значениями разности.

ЦМР, построенные локальным методом, существенно отличаются от моделей, полученных методом SGM, как видно по картам абсолютной разницы высот, ошибка имеет большую амплитуду и носит скорее случайный характер.

В результате анализа карт абсолютной разницы высот ЦМР, полученных методом SGM и глобальным методом, было выявлено два типа аномалий: приуроченные к малоконтрастным плохотекстурированным участкам на исходных снимках (в основном сельскохозяйственные угодья); узкие протяженные области (лесные просеки и дороги, а также русла малых рек и ручьев, в пределах лесных массивов). Было показано, что в первом случае предпочтительнее выглядят результаты полуглобального метода, а во втором глобального.

В заключение главы были сделаны следующие выводы:

Наилучшие результаты, с точки зрения точности по высоте, были получены полуглобальным (SGM) и глобальным (GM) методами. Данный факт позволяет рекомендовать использование этих методов для построения ЦМР по стереопарам космической съемки высокого разрешения пригодных для ортотрансформирования космических снимков сверхвысокого разрешения, в масштабе 1:2000 и мельче, в том числе для горных территорий.

Основную сложность для всех тестируемых алгоритмов представляют плохотекстурированные малоконтрастные участки. Методы глобальной оптимизации позволяют улучшить результаты, но все равно не позволяют получить гладкую (без существенных перепадов в значениях высоты) поверхность. При этом полуглобальный метод SGM показал на таких участках наилучший результат, хотя в сложных случаях (плохотекстурированный участок узкий и протяженный, либо имеет большой размер) данный метод может работать некорректно.

В третьей главе предложен алгоритм вычисления регулярной сетки трансформирования с использованием коэффициентов RFM модели (RPC).

Для построения регулярной сетки трансформирования по прямой RFM модели, необходимо иметь RPC коэффициенты дробно-рациональной функции (RPC), цифровую модель рельефа и начальное приближение широты и долготы в узлах сетки.

Математически задачу можно записать следующим образом. Допустим, что

$$x = p(\varphi, \lambda, h) \quad (1)$$

$$y = r(\varphi, \lambda, h) \quad (2)$$

$$h = H(\varphi, \lambda)$$

(3)

где φ, λ, h геодезическая широта долгота и высота, x, y – координаты снимка (номер столбца и строки), p, r денормализованная дробно-рациональная функция, H функция, возвращающая значение высоты местности h по широте и долготе в системе координат объекта.

Имеются начальные долгота, широта и высота $\varphi_0, \lambda_0, h_0$, для которых вычислены строка и столбец y_0, x_0, в то время как координаты узлов сетки равны y_{GGT}, x_{GGT}. Необходимо найти такие поправки для φ_0, λ_0, равные $\Delta\varphi, \Delta\lambda$, что

$$x_{GGT} = p\left(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda, H\left(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda\right)\right) \tag{4}$$

$$y_{GGT} = r\left(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda, H\left(\varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda_0 + \Delta\lambda\right)\right) \tag{5}$$

Используя разложение первого порядка в окрестностях точки $\varphi_0, \lambda_0, h_0$, получаем

$$x_{GGT} \approx x_0 + \frac{dp}{d\varphi}\Delta\varphi + \frac{dp}{d\lambda}\Delta\lambda + \frac{dp}{dh}\Delta h\left(\Delta\varphi, \Delta\lambda\right) \tag{6}$$

$$y_{GGT} \approx y_0 + \frac{dr}{d\varphi}\Delta\varphi + \frac{dr}{d\lambda}\Delta\lambda + \frac{dr}{dh}\Delta h\left(\Delta\varphi, \Delta\lambda\right) \tag{7}$$

$$\Delta h\left(\Delta\varphi, \Delta\lambda\right) \approx \frac{dh}{d\varphi}\Delta\varphi + \frac{dh}{d\lambda}\Delta\lambda \tag{8}$$

Поправки $\Delta h(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$, вычисляются по цифровой модели рельефа. В итоге уравнения принимают вид

$$x_{GGT} \approx x_0 + \left(\frac{dp}{d\varphi} + \frac{dp}{dh}\frac{dh}{d\varphi}\right)\Delta\varphi + \left(\frac{dp}{d\lambda} + \frac{dp}{dh}\frac{dh}{d\lambda}\right)\Delta\lambda \tag{9}$$

$$y_{GGT} \approx y_0 + \left(\frac{dr}{d\varphi} + \frac{dr}{dh}\frac{dh}{d\varphi}\right)\Delta\varphi + \left(\frac{dr}{d\lambda} + \frac{dr}{dh}\frac{dh}{d\lambda}\right)\Delta\lambda \tag{10}$$

Значения производных от $p(\varphi, \lambda, h)$, $r(\varphi, \lambda, h)$ вычисляются аналитически, а значения производных $\frac{dh}{d\varphi}, \frac{dh}{d\lambda}$ – численно, по модели рельефа.

При наличии всех производных поиск поправок сводится к решению системы линейных уравнений относительно $\Delta\varphi, \Delta\lambda$

$$\begin{cases} \left(\frac{dp}{d\varphi} + \frac{dp}{dh}\frac{dh}{d\varphi}\right)\Delta\varphi + \left(\frac{dp}{d\lambda} + \frac{dp}{dh}\frac{dh}{d\lambda}\right)\Delta\lambda = x_{GGT} - x_0 \\ \left(\frac{dr}{d\varphi} + \frac{dr}{dh}\frac{dh}{d\varphi}\right)\Delta\varphi + \left(\frac{dr}{d\lambda} + \frac{dr}{dh}\frac{dh}{d\lambda}\right)\Delta\lambda = y_{GGT} - y_0 \end{cases} \tag{11}$$

Однако, при больших углах отклонения от надира, полученные таким образом, значения координат могут привести к самопересечениям сетки в «мертвых зонах» (см. рисунок 5а).

Для исключения подобных самопересечений и разрывов, для полученных в результате решения уравнения (11) координат узлов сетки выполняется обратная проверка. По значениям координат узлов сетки (в системе координат объекта) и соответствующих им высот местности при помощи исходных RPC коэффициентов вычисляются координаты снимка (*x, y*), и сравниваются со значениями координат снимка, записанными в сетке. В случае если ошибка (разница значений координат снимка) превышает некоторое установленное пороговое значение, в нашем случае пороговое значение равнялось 0.025 пикселя, такие узлы интерполируют следующим способом.

По координатам, для которых ошибка не превышает заданного порогового значения, строится линейная модель долготы, широты и высоты в зависимости от координат снимка (пикселей):

$$\varphi(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \tag{12}$$

$$\lambda(x, y) = b_0 + b_1 x + b_2 y \tag{13}$$

$$H(x, y) = c_0 + c_1 x + c_2 y \tag{14}$$

Затем, для ошибок линейной модели, на том же множестве «хороших» (ошибка не превышает порогового значения) узлов строится многоуровневый сплайн.

$$\varphi_{GGT}(x, y) - \varphi(x, y) = A_{mba}(x, y) \tag{15}$$

$$\lambda_{GGT}(x, y) - \lambda(x, y) = B_{mba}(x, y) \tag{16}$$

$$H_{GGT}(x, y) - H(x, y) = C_{mba}(x, y) \tag{17}$$

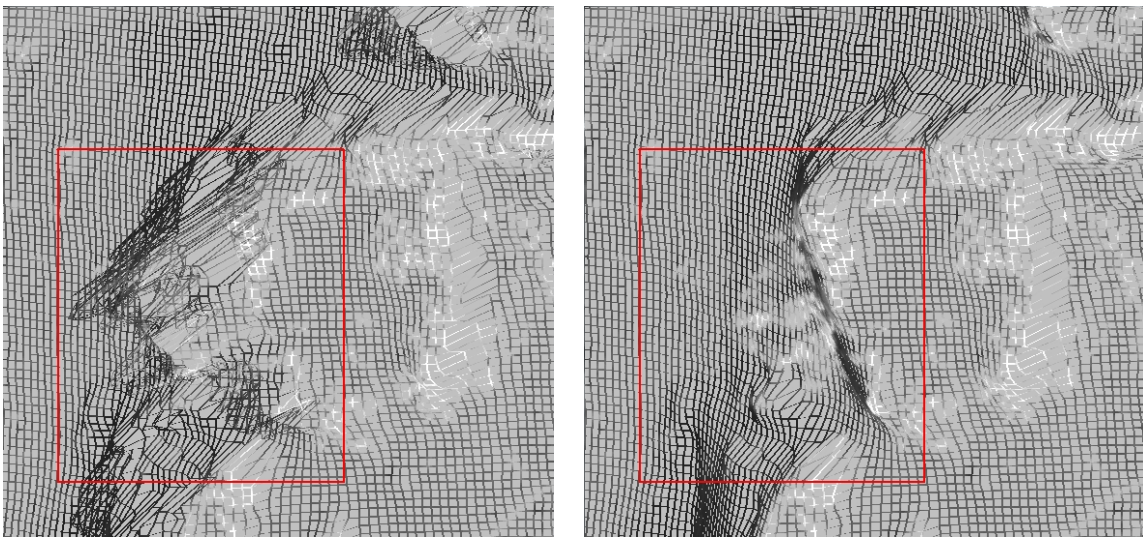
Полученные таким образом значения интерполируют и заменяют «плохие» (ошибка превышает пороговое значение) узлы.

$$\varphi^{new}_{GGT}(x, y) - \varphi(x, y) = A_{mba}(x, y) \tag{18}$$

$$\lambda^{new}_{GGT}(x, y) - \lambda(x, y) = B_{mba}(x, y) \tag{19}$$

$$H^{new}_{GGT}(x, y) - H(x, y) = C_{mba}(x, y) \tag{20}$$

Результат коррекции сетки трансформирования показан на рисунке 5б.



а) б)

Рисунок 5. Коррекция топологии узлов сетки трансформирования. а) – до коррекции; б) – после коррекции

Далее, была проведена оценка точности аппроксимации геометрической модели снимка предложенным методом. Оценка проводилась на территории тестового полигона площадью 134 кв. км. При тестировании использовались снимки от КА QuickBird, с углами отклонения от надира 2°, 8.4°, 16.1°, 25.5° и 35.3°. Территория полигона обеспечена тридцатью тремя точками планово-высотной подготовки (ПВП), измеренными инструментально и двумя ЦМР с плотностью узлов 2 м и 20 м, и точностью по высоте 0.75 м и 1.5 м (модели ADS-40 и TOPO DEM). Дополнительно в экспериментах участвовали ЦМР доступные в открытых источниках (SRTM X-SAR, ASTER GDEM и SRTM SIR-C) с плотностью узлов около 30 м и 90 м, а также ЦМР построенные по двум из тестируемых снимков, методами SGM и GM, с плотностью узлов, 0.6, 5 и 10 м (модели SGM06, GM5 и GM10).

По каждому снимку с использованием всех доступных ЦМР были построены ортофотопланы по сеткам с шагом 2x2, 4x4, 8x8, 16x16, и 32x32 пикселя. Затем, по каждой ЦМР для каждого снимка, традиционным методом были построены ортофотопланы и созданы вспомогательные растровые матрицы, хранящие в качестве значений координаты пикселей исходных снимков (отдельно координаты строк и столбцов по каждому ортофотоплану). Это позволило провести попиксельное сопоставление координат ортофотопланов, полученных традиционным и предложенным методом, а также выработать рекомендации по

выбору оптимального, с точки зрения точности аппроксимации, шага сетки в зависимости от плотности узлов, использованной ЦМР.

В сопоставлении участвовало 200 ортофотопланов, полученных предложенным методом и 40 ортофотопланов, полученных традиционным методом. Для каждой пары сопоставляемых ортофотопланов, использовалось более 280 млн значений разницы координат по которым были вычислены следующие показатели: абсолютное среднее значение, среднеквадратическая погрешность, максимальное значение, процент пикселей с ошибками более 0.5 м, более 1 м, более 2.5 м и более 5 м. В результате проведенного анализа было установлено, что предложенный метод с вероятностью 95% обеспечивает субпиксельную точность аппроксимации геометрической модели снимков при углах отклонения от надира более 25° (при меньших углах вероятность увеличивается до 99%), при условии, что шаг сетки трансформирования (в метрах), соответствует плотности узлов ЦМР, использованной при ортотрансформировании. При уменьшении угла отклонения от надира допускается увеличить шаг сетки в два и четыре раза. В то же время при использовании ЦМР с плотностью узлов соответствующей размеру пикселя обрабатываемого снимка, точность аппроксимации снижается. Показано, что наибольшие значения ошибки приурочены к «мертвым зонам». В работе приведены оптимальные значения шага стеки трансформирования в зависимости от плотности узлов ЦМР и угла отклонения от надира.

Затем, была проведена оценка скорости вычислений при ортотрансформировании предложенным и традиционным методом, показавшая, прирост производительности при использовании предложенного метода, от четырех до более чем двадцати семи раз, в зависимости от шага сетки.

Далее, были проведены эксперименты по оценке абсолютной точности ортофотопланов, полученных по снимкам с различными углами отклонения от надира с использованием каждой из доступных ЦМР.

Для исключения при оценке точности в плане систематической составляющей был предложен метод коррекции коэффициентов дробно-рациональной функции. Учет систематической погрешности снимков, геометрическая модель которых описывается прямой RFM моделью, можно выполнить по методу, описанному в первой главе работы. Однако при таком подходе возникает опасность того, что значения высот, используемые при ортотрансформировании, будут взяты неверно, поскольку систематическая

ошибка, как правило, является следствием неточности определения линейных элементов внешнего ориентирования. Тогда, систематическую погрешность можно учесть при вычислении координат снимка по RFM модели следующим образом,

$$\left.\begin{aligned} x_n &= \frac{Num_x(\varphi_N + \Delta\varphi, \lambda_N + \Delta\lambda, h_N)}{Den_x(\varphi_N + \Delta\varphi, \lambda_N + \Delta\lambda, h_N)} \\ y_n &= \frac{Num_y(\varphi_N + \Delta\varphi, \lambda_N + \Delta\lambda, h_N)}{Den_y(\varphi_N + \Delta\varphi, \lambda_N + \Delta\lambda, h_N)} \end{aligned}\right\},$$

где $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ – поправки к широте и долготе.

Для вычисления поправок, в центральной части исследуемой территории, была выбрана одна хорошо опознаваемая на всех снимках точка с известными широтой, долготой и высотой. Затем для каждого снимка по уравнениям RFM модели были вычислены соответствующие ей точки в системе координат снимков. После чего, полученные координаты были сопоставлены с измеренными на снимках координатами, и вычислены смещения в плане отдельно по широте и долготе, которые затем были учтены в параметрах «latOffset» и «longOffset» используемых для нормирования широты и долготы при вычислении дробно-рациональной функции, что позволило единообразно исключить систематическую погрешность RFM модели при ортотрансформировании.

Точность в плане оценивалась относительно тридцати двух точек ПВП, не участвующих при коррекции систематической погрешности. При оценке точности ортофотопланов использовались критерии, приведенные в Инструкции по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов, применительно к масштабам 1:1000 и мельче. Согласно полученным результатам точность ортофотопланов, созданных по снимкам с углами отклонения от надира 2°, 8.4° и 16.1° по всему набору ЦМР, за исключением моделей ASTER GDEM (при углах 8.4° и 16.1°) и SRTM SIR-C (при угле 16.1°), удовлетворяет требованиям инструкции применительно к масштабам 1:1000. При угле отклонения от надира 25.5° точность соответствует требованиям для масштаба 1:1000 в случае использования ЦМР: ADS-40, SGM06 и TOPO DEM; 1:2000 при использовании GM5, GM10, SRTM X-SAR и SRTM SIR-C; 1:5000 по ЦМР ASTER GDEM. При увеличении угла отклонения от надира до 35.3° точность ортофотопланов снижается и соответствует требованиям для масштабов: 1:1000 – ADS-40; 1:2000 – SGM06, ЦМР GM5, GM10 и TOPO DEM; 1:5000 – SRTM X-SAR,

ASTER GDEM и SRTM SIR-C. Дополнительно, по точкам ПВП, была оценена точность по высоте ЦМР, использованных при ортотрансформировании.

Приведенные в первой главе нормативы и теоретические выкладки по требованиям к точности и плотности ЦМР, используемой при ортотрансформировании, позволяют выдвинуть предположение о том, что полученная относительно точек ПВП точность соблюдается не по всей площади ортофотопланов. Для подтверждения выдвинутого предположения, а также с целью выработки рекомендаций по использованию ЦМР различной точности и плотности, при ортотрансформировании космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, была проведена оценка точности полученных ортофотопланов при различных уклонах. Для получения статистически значимых результатов, точность оценивалась относительно наиболее точных по результатам предыдущей оценки ортофотопланов. Территория полигона была разделена на четыре зоны по преобладающим углам наклона поверхности (менее 2°, менее 4°, менее 6° и более и равно 6°), в пределах каждой зоны было проведено попиксельное сопоставление разницы координат полученных ортофотопланов относительно ортофотопланов, полученных по наиболее точной и плотной ЦМР. При численной оценке учитывалась точность эталонных ортофотопланов относительно точек ПВП.

Согласно полученным результатам, оценка точности ортофотопланов, полученная относительно точек ПВП, отличается от аналогичной оценки, полученной путем сопоставления координат тестируемых и эталонных ортофотопланов. Так, в большинстве случаев ошибки, полученные относительно точек ПВП занижены в полтора раза для равнинных территорий (уклон менее 6°) и в два и более раза для всхолмленных территорий (с уклонами равными и превышающими 6°), по сравнению с ошибками, полученными относительно эталонного ортофотоплана. В то же время это различие в среднем не превышает размерности пикселя исходных снимков и может быть связано с точностью опознания контрольных точек. Разброс значений ошибок для всхолмленной и равнинной территории увеличивается при снижении плотности узлов ЦМР. Ортофотопланы, построенные по ЦМР, имеющим близкие показатели точности по высоте и различную плотность, дают близкие по значениям результаты при оценке точности в плане для равнинных территорий и существенно более высокие значения ошибки для всхолмленных территорий, причем отчетливо виден тренд увеличения ошибки при снижении плотности узлов ЦМР. Максимальная

амплитуда разницы значений ошибок для горных и равнинных территорий наблюдается при использовании наименее плотных моделей (плотность менее 20 м). При плотности узлов 10 м и плотнее распределение ошибки при различных уклонах практически не меняется, и укладывается в требования инструкции, что позволяет рекомендовать, при условии соблюдения требований к точности по высоте, такие ЦМР для ортотрансформирования сверхвысокодетальных космических снимков в масштабах 1:2000 и мельче.

В конце главы сформулированы следующие выводы:

Предложенный алгоритм построения сетки, с вероятностью 95% аппроксимирует геометрическую модель снимка с субпиксельной точностью, даже при больших углах отклонения от надира. Основными преимуществами предложенного метода являются: возможность выполнения трансформирования «на лету»; сохранение фотометрических характеристик исходного снимка; а также существенно более высокая производительность по сравнению с традиционным методом ортотрансформирования.

Оптимальным с точки зрения точности ортотрансформирования космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения являются ЦМР с плотностью узлов 10 м и плотнее.

Общедоступные ЦМР пригодны для ортотрансформирования космических снимков сверхвысокого разрешения: ЦМР SRTM X-SAR и SRTM SIR-C в масштабах 1:2000 при уклонах менее 6° и 1:5000 при уклонах равных и превышающих 6°; ЦМР ASTER GDEM в масштабах 1:5000.

В заключении сформулированы следующие выводы:

Вследствие увеличения группировки КА выполняющих съемку Земной поверхности с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением, а также совершенствования технических характеристик установленной на них аппаратуры, доступный конечному пользователю объем информации постоянно увеличивается, что в свою очередь, требует модернизации существующих методов цифрового трансформирования с целью увеличения их производительности. Не менее актуальным является вопрос точности ортотрансформирования. Одним из основных факторов, при условии точности измерения ЭВО, влияющих на точность ортофотопланов является точность и плотность использованной при ортотрансформировании ЦМР. В диссертационной работе рассмотрены вопросы совершенствования технологии создания ортофотопланов по космическим снимкам высокого разрешения.

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором сделаны следующие основные выводы:

1. В результате проведенного сопоставления методов автоматизированного стереоотождествления при построении ЦМР по стереопарам космической съемки высокого (1.5 – 2.5 м на пиксель) разрешения установлено:
   - При построении плотных ЦМР наилучшие характеристики точности по высоте дают глобальный и полуглобальный методы стереоотождествления.
   - Основная часть ошибок при определении высот связана с разрывом продольного параллакса на малоконтрастных плохотекстурированных участках стереопар. Алгоритм глобальной оптимизации Метрополиса-Гастингса позволяет увеличить точность определения высот, однако, не позволяет получить гладкую поверхность. Полуглобальный алгоритм SGM позволяет, в таких местах, точнее определить высоты, но в некоторых случаях (плохотекстурированный участок узкий и протяженный либо имеет большой размер) работает некорректно.
   - ЦМР полученные глобальным и полуглобальным методами по космической съемке высокого разрешения могут быть использованы при ортотрансформировании в масштабах 1:2000 и мельче.
2. Разработана и программно реализована технология создания ортофотопланов по космическим снимкам высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, при помощи регулярной сетки трансформирования, позволяющая в несколько раз (в зависимости от шага сетки) увеличить производительность при фотограмметрической обработке, в рамках которой:
   - Предложен и реализован алгоритм построения регулярной сетки трансформирования по коэффициентам прямой RFM модели.
   - Предложен и реализован алгоритм топологической коррекции сетки трансформирования в «мертвых зонах».
   - Предложен оптимальный, с точки зрения точности аппроксимации геометрической модели снимка, шаг сетки в зависимости от плотности узлов ЦМР.
   - Экспериментально доказано, что предложенный метод с вероятностью 95% аппроксимирует геометрическую модель снимка с субпиксельной

точностью. При этом производительность предложенного метода более чем в двадцать семь раз выше по сравнению с традиционным методом.

3. Предложен метод коррекции систематической погрешности прямой RFM модели, позволяющий при недостаточном количестве точек ПВП единообразно учесть систематическую составляющую ошибки линейных ЭВО, при фотограмметрической обработке снимков, полученных на одном маршруте.
4. Выработаны рекомендации по использованию ЦМР при ортотрансформировании космических снимков сверхвысокого разрешения:
   - Оптимальными с точки зрения точности ортотрансформирования космических снимков сверхвысокого разрешения, вне зависимости от уклона, являются ЦМР с плотностью узлов 10 метров и плотнее.
   - ЦМР из открытых источников SRTM X-SAR (плотность 30 м) и SRTM SIR-C (плотность 90 м) пригодны для ортотрансформирования в масштабах 1:2000 (при уклонах менее 6°), и в масштабе 1:5000 (при уклонах более 6°), ЦМР ASTER GDEM – для масштаба 1:5000.

Все поставленные в диссертационной работе задачи успешно решены, цель достигнута, результаты проанализированы. Итогом работы стала новая, основанная на исследованных и предложенных методах и алгоритмах технология создания ортофотопланов, реализованная в виде программного кода в продукте ScanEx IMAGE Processor.

Публикации автора по теме диссертации

Издания рекомендованные ВАК:

1. *Сонюшкин А.* Сравнение геометрических характеристик данных, полученных со спутников th-01-1 И spot 5 // *Исследование Земли из космоса*. — 2014. — № 4. — С. 62–74.
2. *Зимин М., Сонюшкин А.* Автоматизированная система обработки сверхвысокодетальных космических снимков // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. — 2014. — № 1. — С. 38–43.
3. *Сонюшкин А., Зимин М.* Создание ортофотопланов по данным с отечественного космического аппарата Канопус-В // *Исследование Земли из космоса*. — 2015. — № 1. — С. 74–83.

4. *Сонюшкин А. В.* Сравнение методов построения ЦМР по стереопарам космической съемки высокого пространственного разрешения // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. — 2015. — № 1. — С. 43–52.
5. *Чибуничев А.Г., Сонюшкин А. В.* Метод ортотрансформирования по регулярной сетке для космических снимков, геометрическая модель которых представлена в виде коэффициентов дробно рационального многочлена // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. — 2015. — № 5. — С. 40–46.

Прочие издания:

6. *Сонюшкин А., Савельев А.* Метод ортотрансформирования по регулярной сетке для космических снимков геометрическая модель которых представлена в виде коэффициентов дробно рационального многочлена // Экология. Экономика. Информатика (7-12 сентября 2014). — Т. 2 из *Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. — Издательство ЮФУ Ростов-на-Дону, 2014. — С. 175–183.
7. Создание цифровой модели рельефа на обширные территории по стереопарам снимков КА irs p5 / А. Сонюшкин, А. Гречищев и др. // Материалы конференции Геоинформационные технологии и космический мониторинг (8-13 сентября 2013 г.), т. 2 Геоиформационные науки и экологическое развитие: новые подходы, методы, технологии. — Т. 2. — Издательство ЮФУ Ростов-на-Дону, 2013. — С. 336–349.
8. *Сонюшкин А.* Метод ортотрансформирования космических снимков при помощи регулярной сетки трансформации // XII Всероссийская Открытая конференция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов 10–14 ноября 2014 года Москва, ИКИ РАН. — ИКИ РАН Москва, 2014. — С. 81.