

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОРТОМОЗАИКИ, СОЗДАННОЙ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НОВЫМ ПК ИЗ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В.А. Заичко (Госкорпорация «Роскосмос»)

В 1983 г. окончил факультет сбора и обработки информации Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского по специальности «инженер радиоэлектронной техники». С 2008 г. работает в Госкорпорации «Роскосмос», в настоящее время — заместитель директора Департамента автоматических космических комплексов, систем навигации и ДЗЗ.

А.А. Кутумов (Госкорпорация «Роскосмос»)

В 2014 г. окончил факультет картографии и геоинформатики МИИГАиК по специальности «картография». С 2013 г. работал в АО «Российские космические системы». С 2023 г. работает в Госкорпорации «Роскосмос», в настоящее время — специалист Департамента автоматических космических комплексов, систем навигации и ДЗЗ.

Д.И. Федоткин (АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»)

В 1997 г. окончил факультет вычислительной техники Рязанского государственного радиотехнического университета по специальности «математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов, систем и сетей». С 2016 г. работает в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», в настоящее время — начальник сектора. Кандидат технических наук.

Е.Н. Боровенский (АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»)

В 2012 г. окончил факультет робототехнических и интеллектуальных систем Московского авиационного института по специальности «прицельно-навигационные системы летательных аппаратов». С 2016 г. работает в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», в настоящее время — ведущий инженер.

Д.В. Сысенко (АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»)

В 2001 г. окончил аэрокосмический факультет Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана по специальности «прикладная математика». С 2016 г. работает в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», в настоящее время — ведущий инженер. Кандидат технических наук.

А.В. Ядыкин (АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»)

В 2007 г. окончил факультет информатики и систем управления Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, инженер по специальности «приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации». С 2016 г. работает в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», в настоящее время — ведущий инженер.

В настоящее время небольшой коллектив разработчиков АО «Научно-исследовательский

институт точных приборов» (авторы комплекса АПОИ — автоматической потоковой обработ-

ки информации, созданного в рамках ОКР «ЕТРИС-ДЗЗ» [1]) завершает работы по созданию

подсистемы обработки данных информационной системы «Цифровая Земля» (ПОД ИС ЦЗ) в рамках ОКР «Цифровая Земля — Покрытие». Эта подсистема предназначена для высокоскоростной обработки в автоматическом режиме всего архива данных российской орбитальной группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ОГ КА ДЗЗ) как единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП). При этом подсистема спроектирована таким образом, чтобы «сырая» оперативная информация, поступающая с антенных систем в виде сеансов съемки, также обрабатывалась в автоматическом режиме и становилась частью ЕСМДП, тем самым непрерывно обновляя его.

В ПОД ИС ЦЗ помимо автоматического создания стандартной продукции Уровня 1 (геопривязанные) и Уровня 2 (ортокорректированные) по заявкам потребителей была реализована инновационная, не имеющая

аналогов в России, технология полностью автоматического формирования производной продукции Уровня 3, включая высококачественные бесшовные покрытия (ортомозаики) с точностью геопривязки до единиц метров. Бесшовная ортомозаика — результат объединения нескольких снимков поверхности Земли в одно непрерывное, тонально сбалансированное изображение территории большой площади.

▼ Решенные задачи

При реализации автоматических алгоритмов построения ортомозаик были решены такие задачи [2], как:

- коррекция геопривязки маршрутов съемки до единиц метров с использованием опорных данных методом уточнения параметров строгой модели съемки;

- блочное уравнивание отдельных маршрутов между собой с точностью до долей пикселя параметрами строгих моделей съемки;

- семантическая сегментация с использованием нейронных сетей, позволяющая определять маски облачности, воды, леса, застройки, детектировать дефекты на снимках для повышения качества результирующих ортомозаик;

- тональная балансировка маршрутов съемки при построении ортомозаик;

- построение оптимальных линий пореза между маршрутами в ортомозаиках;

- генерация ортокорректированных с учетом рельефа покрытий как из одноканальной продукции панхроматической съемки, так и из мультиспектральных данных, а также создание ортомозаик типа PANSARP.

▼ Обоснование выбранного региона

При построении бесшовной ортомозаики площадью 27 тыс. км² на территорию Республики Крым был задействован макет ПОД ИС ЦЗ и Федеральный фонд данных ДЗЗ (ФФД ДЗЗ). На создание данной ортомозаики в

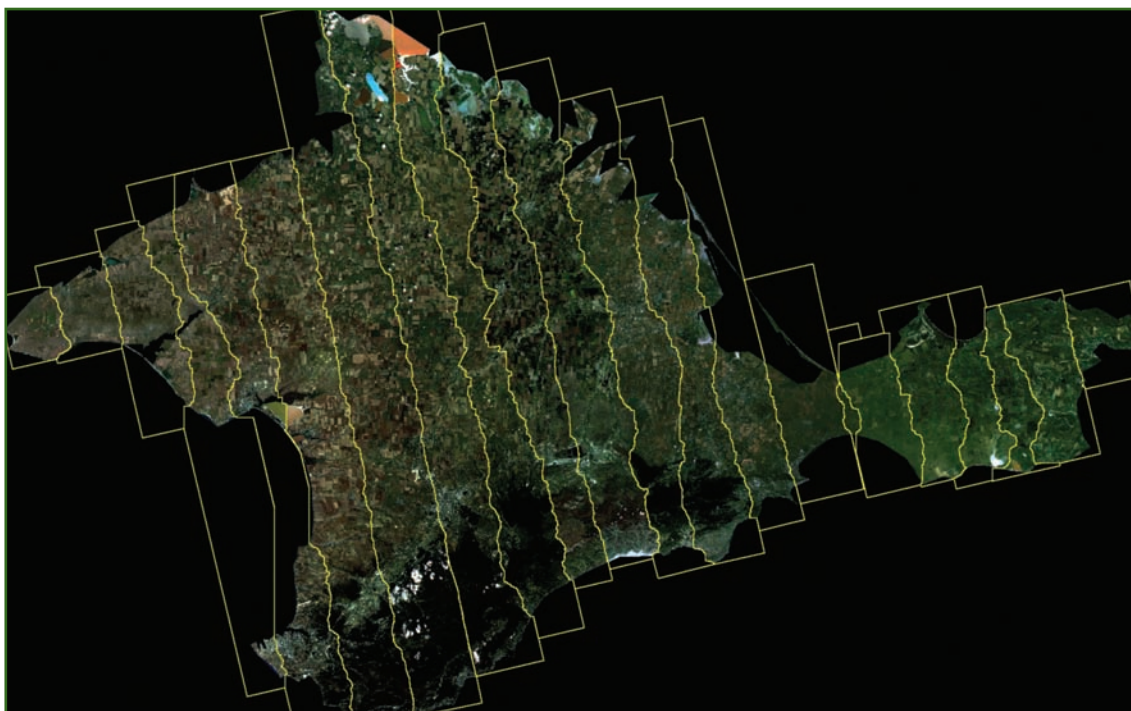


Рис. 1

Ортомозаика PANSARP на территорию Республики Крым, построенная в автоматическом режиме по данным с КА «Канопус-В», и векторный слой линий пореза

автоматическом режиме было потрачено около 2 часов [3]. Выбор полуострова Крым в качестве региона для отработки алгоритмов автоматического формирования ортомозаик и анализа их точностных характеристик обусловлен разнородностью и сложностью территории: равнины и горы, городская застройка, обширные сельхозугодия и лесные массивы, наличие морской береговой линии — все это факторы, усложняющие обработку.

▼ Создание ортомозаики

На рис. 1 представлена результирующая ортомозаика из 22 маршрутов с КА «Канопус-В» с комбинацией каналов

PANSHARP. Наиболее подходящие маршруты по заданному набору критериев для построения мозаики (сезонность, безоблачность, качество) были отобраны и обработаны в автоматическом режиме из более чем 700 маршрутов различных КА серии «Канопус-В», находящихся в ФФД ДЗЗ. Данные автономной системы навигации (АЧН) маршрутов были скорректированы в автоматическом режиме. При создании мозаики все операции выполнялись без участия оператора: отбор и предварительная обработка маршрутов, набор опорных и связующих точек, блочное уравнивание маршрутов относи-

тельно друг друга, тональная балансировка, а также построение линий порезов [2].

В процессе автоматического создания ортомозаики использовалось созданное по космическим снимкам опорное покрытие с пространственным разрешением 1,2 м и средней ошибкой геодезической привязки 4,5 м.

▼ Методика анализа точностных характеристик

Анализ точности геопривязки ортомозаики проводился двумя способами:

— автоматическими алгоритмами относительно опорного покрытия в процессе создания ортомозаики;

Статистика средней точности геопривязки по бортовым данным АЧН, после коррекции по строгим моделям и блочного уравнивания

Идентификатор маршрута	Количество опорных точек	Ср. точность геопривязки по данным АЧН, м	Ср. точность геопривязки после коррекции, м	Ср. точность геопривязки после блочного уравнивания, м
KV3_12438_09706-00_20200430_084210	11 518	24,09	0,86	1,98
KV3_19650_16138-00_20210818_083357	4958	5,74	1,58	2,15
KV3_19817_16288-00_20210829_082956	9476	16,05	2,31	1,91
KV3_24009_22231-00_20220601_083216	10 588	4,18	2,06	1,19
KV4_14337_10639-00_20200902_083038	7966	67,71	1,86	1,94
KV4_18057_13849-00_20210505_083741	15 934	61,89	3,25	3,36
KV5_03907_02993-02_20190910_084422	8420	106,01	3,91	1,15
KV5_13001_10286-00_20210501_083316	18 214	66,23	2,33	2,18
KV6_14201_11258-00_20210719_083010	6390	53,58	2,92	1,59
KV6_14277_11318-00_20210724_083802	24 192	40,43	2,21	2,73
KV6_14353_11386-00_20210729_084446	18 780	25,86	2,11	1,81
KVI_10659_07295-01_20190616_083717	24 670	26,31	3,27	1,65
KVI_10826_07421-01_20190627_083838	20 188	9,78	1,88	1,84
KVI_10917_07470-02_20190703_083049	4082	14,01	1,78	0,84
KVI_16367_12027-00_20200626_082852	26 726	90,79	4,57	2,53
KVI_16534_12162-00_20200707_082849	19 312	50,94	3,49	2,49
KVI_16610_12219-00_20200712_083715	22 934	37,05	2,33	2,91
KVI_21666_16522-00_20210610_083318	3258	43,27	2,19	1,54
KVI_21818_16651-00_20210620_084724	1718	46,49	0,91	1,94
KVI_22228_17007-00_20210717_084657	21 604	47,21	3,97	2,64
KVI_22243_17019-00_20210718_082936	6892	54,57	1,56	1,49
KVI_23048_17749-00_20210909_084512	11 600	57,96	1,15	1,74
Средняя точность геопривязки		43,19	2,39	1,98
Общее количество опорных точек	299 420			

— ручным способом фотограмметристами относительно опорного покрытия и высокоточных опорных точек местности (ОТМ), полученных с помощью геодезических GPS измерений с погрешностью не более 0,5 м.

Средняя точность геопривязки рассчитывалась по формуле средней абсолютной ошибки — Mean Absolute Error (MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{n}$$

▼ Результаты автоматического анализа точности геопривязки

Из таблицы, в которой приведены основные статистические показатели автоматического анализа точности геопривязки созданной ортомозаики относи-

тельно используемого опорного покрытия, видно, что:

— исходная средняя точность геопривязки по бортовым данным АСН составляла более 40 м (для архивных маршрутов, участвовавших в создании ортомозаики);

— результирующая средняя точность геопривязки по всему полю созданной ортомозаики составила 1,98 м (при пространственном разрешении ортомозаики 2,1 м);

— общее количество опорных точек, участвовавших в автоматическом расчете точности геопривязки относительно опорного покрытия, составило около 300 тысяч. Равномерное расположение такого количества точек по всей площади ортомозаики является хорошим статистическим показателем

достоверности полученных оценок точности.

Маршруты между собой в мозаике совмещены с точностью до пикселя (рис. 2).

▼ Результаты фотограмметрического анализа точности геопривязки

Для фотограмметрического анализа точности геопривязки относительно опорного покрытия ручным способом было выполнено 208 измерений равномерно по всей ортомозаике (рис. 3). Средняя точность составила 4,17 м.

Отличие оценок средней точности геопривязки автоматическими корреляционными методами (1,98 м, что эквивалентно 0,94 пикселя) и ручным «сколом» точек (4,17 м, что эквивалентно 1,98 пикселя), скорее всего, объясняется тем фактом, что при автоматическом корреляционном поиске точек точности определения координат достигает субпиксельных значений, а при ручном «сколе» точек экспертом — не превышает 1 пикселя.

Для анализа точности геопривязки ручным фотограмметрическим способом относительно высокоточных наземных опорных точек было выполнено 98 измерений (рис. 4). Средняя точность составила 2,54 м.

Таким образом, измеренная ручным способом точность геопривязки ортомозаики к наземным ОТМ (2,54 м, что эквивалентно 1,21 пикселя) оказалась почти вдвое выше, чем к опорному покрытию, используемому для коррекции геопривязки (4,17 м, что эквивалентно 1,98 пикселя). А учитывая этот факт, имеются основания полагать, что реальная точность геопривязки ортомозаики к точкам на Земле, скорее всего, лучше, чем пространственное разрешение ортомозаики (1 пиксель = 2,1 м).

Стоит также обратить внимание, что полученные экспертами оценки точности ортомозаи-



Рис. 2

Примеры бесшовного стыка между двумя маршрутами в мозаике в масштабе 1:1 (линии пореза отображены зеленым цветом)



Рис. 3

Расположение контрольных точек на ортомозаике, набранных с использованием опорного покрытия (контрольные точки отображены желтым цветом)



Рис. 4

Расположение контрольных точек на ортомозаике, набранных с использованием высокоточных наземных ОТМ (контрольные точки отображены желтым цветом)

ки относительно наземных ОТМ (2,54 м) оказались почти вдвое выше заявленной точности используемого опорного покрытия (4,5 м). Это объясняется тем, что в процессе блочного уравнивания в мозаике, несмотря на то, что набор точек проводился по опорному покрытию (имеющему свои ошибки), коррекция геопривязки маршрутов выполнялась исключительно по строгим математическим моделям съемки (баллистическому движению КА, ориентации КА в процессе космической съемки, модели съемочного сенсора) с сохранением корректной внут-

ренней геометрии маршрутов, а не «подтягиванием» их к наземным ОТМ (по типу «резинового листа»). Это позволило при создании ортомозаики обеспечить «игнорирование» локальных ошибок опорного покрытия.

▼ Заключение

Полученные в результате анализа высокие показатели точности подтвердили и даже превзошли ожидания разработчиков. Новое программное обеспечение позволяет оперативно и, главное, полностью в автоматическом режиме получать высокоточные бесшовные ортомозаичные покрытия на

большие территории по данным оптико-электронной съемки в интересах потребителей как в рамках создаваемой информационной системы «Цифровая Земля», так и в перспективных проектах. Это, безусловно, является значимым шагом в развитии наземного сегмента российского ДЗЗ для массовой потоковой обработки огромных объемов информации, планируемой к получению в соответствии с заданным государством направлением на формирование отечественной многоспутниковой группировки с сотнями космических аппаратов на орбите.

▼ Список литературы

1. Лошкарев П.А., Федоткин Д.И., Ядыкин А.В., Боровенский Е.Н., Сысенко Д.В. Комплекс автоматической обработки информации от сеанса сброса до продуктов ДЗЗ, обеспечивающий высокопроизводительную унифицированную обработку данных с космических аппаратов типа «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М» // Материалы 17-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 2019.
2. Федоткин Д.И., Боровенский Е.Н., Сысенко Д.В., Ядыкин А.В. Программные комплексы и технологии автоматической обработки космической съемки, обеспечивающие работу Федерального Фонда данных ДЗЗ и информационной системы «Цифровая Земля» // Материалы 3-й Совместной международной научно-технической конференции «ЦИФРОВАЯ РЕАЛЬНОСТЬ: космические и пространственные данные, технологии обработки». — Сочи: АО «Ракурс», 2023. — С. 8–16. — https://conf.racurs.ru/upload/2023/Materials23_www.pdf.
3. Федоткин Д.И., Боровенский Е.Н., Сысенко Д.В., Ядыкин А.В. Автоматическая обработка данных космической съемки в наземном сегменте отечественной многоспутниковой группировки КА ДЗЗ // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — М.: ИКИ РАН, 2023. — С. 58. — <http://conf.rse.geosmis.ru/files/books/2023/9608.htm>.