



- **Автоматическое обновление бесшовного покрытия по данным спутников Канопус-В**

А.И. Алексанин, М.А. Морозов, Е.В. Фомин

e-mail: aleks@iacp.dvo.ru

**Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Владивосток**



Введение

В настоящее время в рамках Национальной программы «Цифровая экономика» Роскосмосом реализуется проект «Цифровая Земля» (*Заичко В.А., Шведов Д.О., Сизов О.С. Особенности реализации проекта «Цифровая Земля» в Российской Федерации// Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2019. Вып.2. С.6-13.*). Проект посвящен созданию информационной системы, позволяющей обеспечивать доступ потребителей к спутниковой информации и сервисам ее тематической обработки. Концепция информационной системы базируется на создании единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП) территории данными ДЗЗ.

Проект «Цифровая Земля», реализуемый в настоящее время Роскосмосом, базируется на создании единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП) территории РФ данными ДЗЗ. Базовыми спутниками являются 6 спутников Канопус-В, обеспечивающие регулярное наблюдение земной поверхности нашей страны. Подробная методика построения ЕСМДП приведена в работе (А. Н. Марков и др. Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата «Ресурс-П» при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ// Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. том 7, выпуск 1. С. 72–83). Географическая привязка изображений осуществляется по опорным реперным точкам, для отбора которых используется уже созданное покрытие, предоставляемое PlanetLabs (пространственное разрешение — 3 м), точность геодезической привязки которого не хуже 10 м. Следует отметить, что применение методики трудоемко и субъективно. Две трети времени обработки проходит с участием оператора, основная функция которого – обнаружение реперных точек на совмещаемом с референсным покрытием изображении. Для хорошего совмещения требуется плотная сеть точек, которых может и не быть, особенно на заснеженных участках. Требуется также совмещение изображений с камер ПСС и МСС у каждого спутника.



Постановка задачи

Цель - разработка автоматического метода совмещения изображений спутников Канопус-В (камеры ПСС и МСС) на основе эталонного покрытия.

Проблемы.

- 1. Автоматическое совмещение изображений разных каналов одного спутника с пиксельной точностью**
- 2. Автоматический расчет реперных точек с оценкой точности их расчета**
- 3. Совмещение изображений в областях с редкой сеткой надежных реперных точек или их отсутствии.**
- 4. Нелинейная коррекция изображений**



Алгоритм совмещения изображений-2020

- 1. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПРОЦЕДУРА «ПРИСТРЕЛКИ» ПО РЕДКОЙ СЕТКЕ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК . ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЕСКРИПТОРА С ОЦЕНКОЙ АПРИОРНОЙ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА РЕПЕРНОЙ ТОЧКИ, ФИЛЬТРАЦИЯ РЕПЕРОВ ПО ПОРОГУ.**
- 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ НАХОЖДЕНИЕ ОБРАЗА ПЕРВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ВТОРОМ. ПРОВЕДЕНИЕ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АФФИННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ГРУБОЕ СОВМЕЩЕНИЕ).**
- 3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК ПРИ ПОМОЩИ ДЕТЕКТОРА УГЛОВ ХАРРИСА (HARRIS ET AL., 1998).**
- 4. ПОСТРОЕНИЕ ДЕСКРИПТОРОВ РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК МЕТОДОМ SURF (BAU ET AL., 2008). В ОСНОВНОМ ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ НОРМАЛИЗОВАННЫЕ НА ЕДИНИЦУ ВЕКТОРА-ДЕСКРИПТОРЫ РАЗМЕРНОСТЬЮ 64. ИНОГДА РАЗМЕРНОСТЬЮ 128.**
- 5. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕПЕРОВ ПО ИХ ДЕСКРИПТОРАМ. ДЕСКРИПТОРЫ СОПОСТАВЛЯЮТСЯ ПУТЕМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЕВКЛИДОВА РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ НИМИ. СОПОСТАВЛЕНИЕ СЧИТАЕТСЯ УДАЧНЫМ, ЕСЛИ ДЛЯ ДЕСКРИПТОРА С НОМЕРОМ I В ЗАДАННОЙ ОКРЕСТНОСТИ НАХОДИТСЯ НА ВТОРОМ ИЗОБРАЖЕНИИ ЕГО ОБРАЗ С НОМЕРОМ J , ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ МИНИМАЛЬНОЕ РАССТОЯНИЕ D_{IJ} , УДОВЛЕТВОРЯЮЩЕЕ ЗАДАННОМУ ПОРОГУ - $D_{IJ} \leq D_{THRESHOLD}$.**
- 6. РАЗБИЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ФРАГМЕНТЫ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО РАЗМЕРА (НО НЕ МЕНЕЕ 200 ВЕКТОРОВ НА ФРАГМЕНТ). ПОСТРОЕНИЕ ДВУМЕРНОГО АФФИННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ КАЖДОГО ФРАГМЕНТА С НАИЛУЧШЕЙ ТОЧНОСТЬЮ. ФИЛЬТРАЦИЯ СОПОСТАВЛЕННЫХ ПАР РЕПЕРОВ В КАЖДОМ ФРАГМЕНТЕ: ПРИ ПОМОЩИ АФФИННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ; ПО ПЛОТНОСТИ ОТОБРАННЫХ РЕПЕРОВ НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ И ПО ОДНОРОДНОСТИ ВЕЛИЧИН И НАПРАВЛЕНИЙ ВЕКТОРОВ.**
- 7. ПОСТРОЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ КАЖДОГО ПИКСЕЛЯ КОРРЕКТИРУЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ УСРЕДНЕНИЯ ВЕКТОРОВ В ОКРЕСТНОСТИ ПИКСЕЛЯ. КОРРЕКЦИЯ ОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГОГО.**
- 8. ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ТОЧНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ КАЖДОГО ПИКСЕЛЯ: $E = \Sigma / \sqrt{N}$, ГДЕ Σ – СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ВЕКТОРОВ ОКРЕСТНОСТИ СМЕЩАЕМОГО ПИКСЕЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНО СРЕДНЕГО ВЕКТОРА, N – ЧИСЛО ВЕКТОРОВ ОКРЕСТНОСТИ, В КОТОРОЙ СЧИТАЕТСЯ СМЕЩЕНИЕ.**

Детально используемый алгоритм приведен в работе (А.И. Алексанин, С.М. Краснопеев, М.А. Морозов, Е.В. Фомин Совмещение изображений с российских спутников Ресурс-П // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 18-28).

МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОЗВОЛИЛА РЕШИТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ:

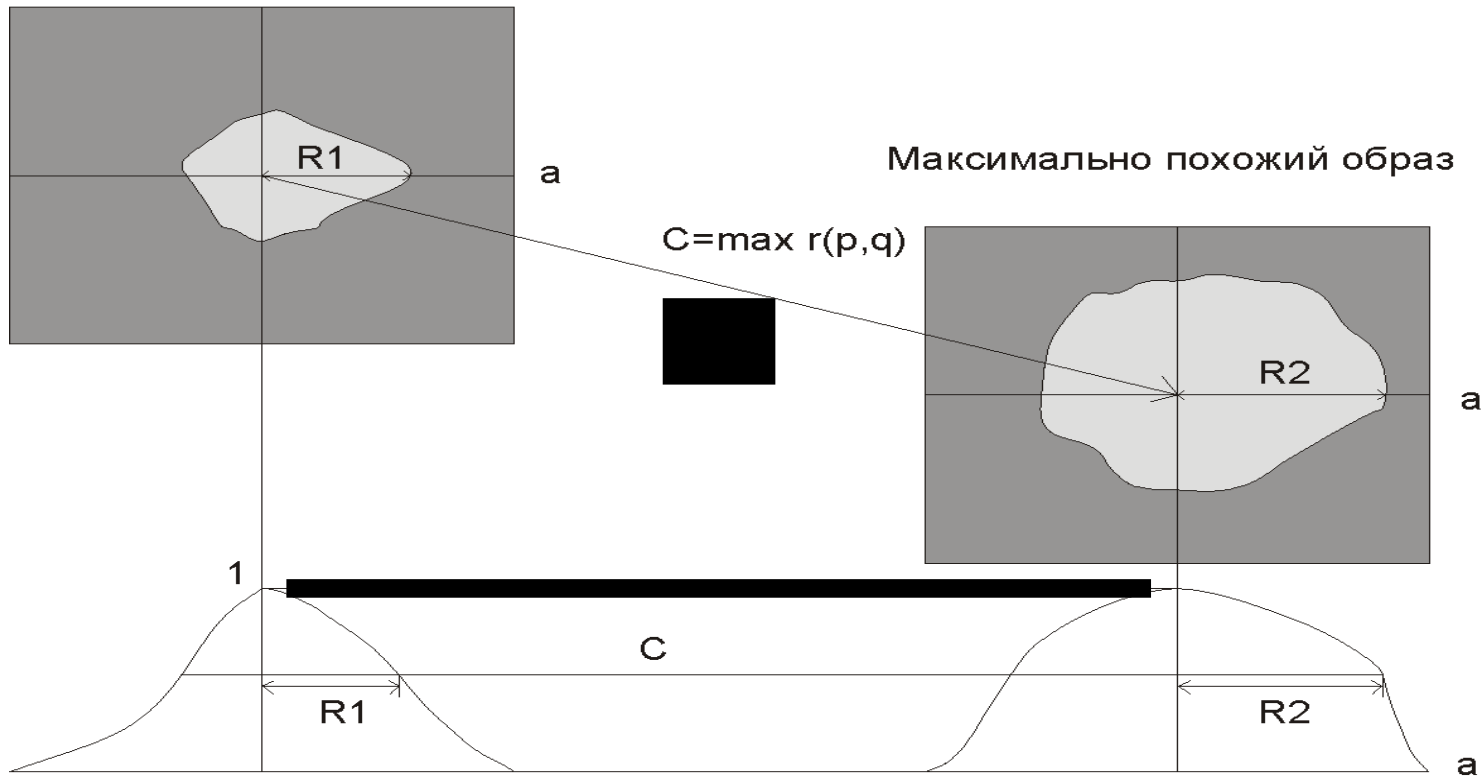
- ПОЛУЧИТЬ ГАРАНТИЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО ГРУБОГО СОВМЕЩЕНИЯ ДВУХ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**
- УМЕНЬШИТЬ РАДИУС ПОИСКА РЕПЕРНЫХ ТОЧЕК , РЕЗКО СНИЗИВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ И КОЛИЧЕСТВО НЕКОРРЕКТНЫХ СОВМЕЩЕНИЙ (НИЖЕ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ).**



Автоматический расчет реперных точек с оценкой точности их расчета

Окно-шаблон

Расчет точности совмещения площадок



• Критерий априорной точности

• Пусть $A_E = \max(R1, R2)$ при $C = \max r(p, q)$

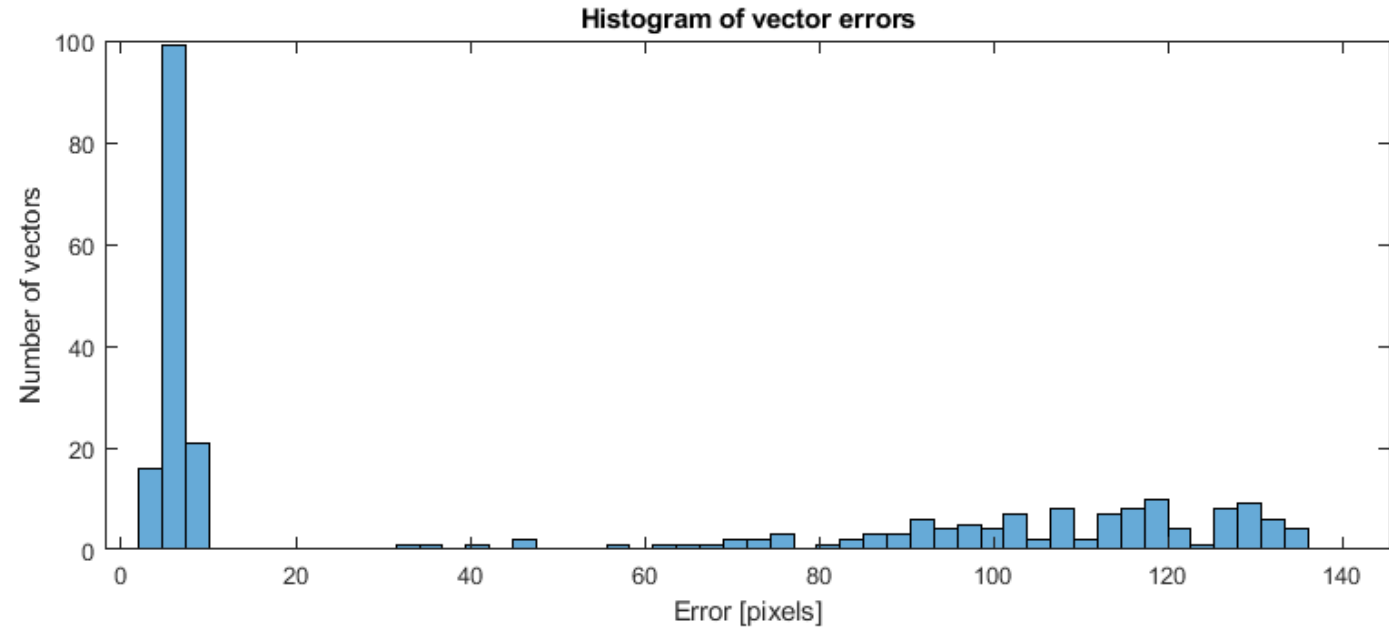
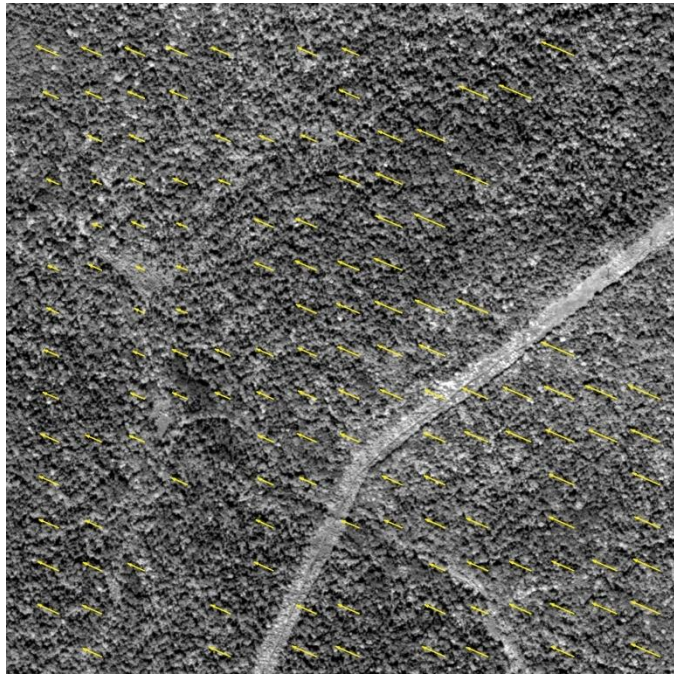
• Зададим порог P

Если $A_E < P$, совмещение удовлетворяет нас с заданной точностью, иначе - вектор смещения площадок удаляется.

Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Карнацкий А. Ю. Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 131–142.



Пример расчета реперных точек с оценкой априорной точности



Слева - панхроматическое изображение лесного полога со спутника Ресурс-П (Геотон) за 25.08.2015 с векторами смещений реперных точек с изображением за 05.08.2015. Рассогласование углов съемки изображений около 30° . Такое рассогласование обеспечивает разный масштаб изображений и разные относительные размеры теней (сложный случай). Справа – гистограмма априорной точности расчета реперов

Подавляющая масса реперных точек на изображениях спутника Канопус-В имеет точность расчета 0-3 пикселя. В сложных случаях (спутник Ресурс-П) 0-10 пикселей. Увеличение площадки расчета дескриптера улучшает точность. Реальная точность обычно лучше расчетной. Если есть эталонное хорошо привязанное изображение, то метод позволяет автоматически искать подходящие реперные точки с заданной точностью.



Проверка качества изображений с российских спутников

В следующих работах на изображениях с некоторых спутников серий Ресурс-П (Геотон) и Канопус-В (камеры ПСС и МСС) проверялось наличие нелинейных аберраций на изображениях уровня обработки 1 и 2А : А.И. Алексанин, М.А. Морозов, Е.В. Фомин *Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9-16.*); Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Качур В.А., Морозов М.А., Фомин Е.В. *Качество первичной обработки данных спутников Ресурс-П и Канопус-В // Материалы семнадцатой всероссийской открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)».* 2019. М.: ИКИ РАН. С.507. <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=162&thesis=7574>).

Методика проверки.

Проверяется точность совмещения изображений разных спектральных каналов конкретного спутника как с одного сеанса съемки, так и с разных сеансов, снятых под существенно разными углами относительно надира.

Проверка проходила на изображениях льда Амурского залива Японского моря. В силу отсутствия приливов (максимальный прилив 40 см) поверхность льда можно рассматривать как плоскую и неподвижную. Все проанализированные изображения получены в течение месяца. От НЦ ОМЗ были получены изображения с одного и того же сеанса съемки как уровня 1 так и 2. Размер фрагментов изображений был не более 9X9км. Рабочий размер – 6X6 км.

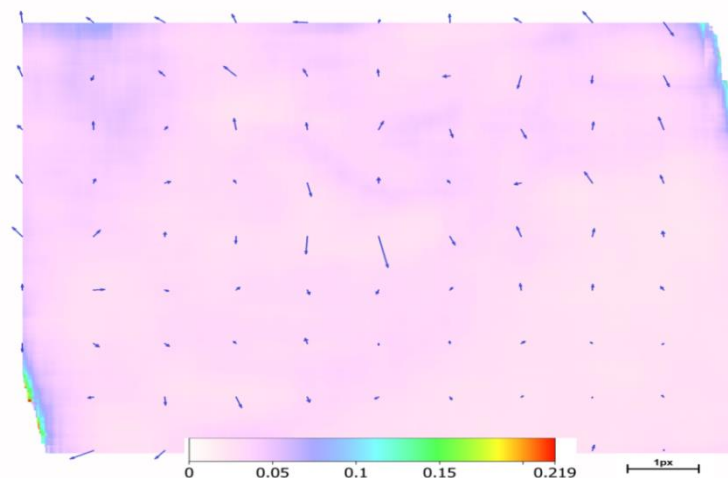
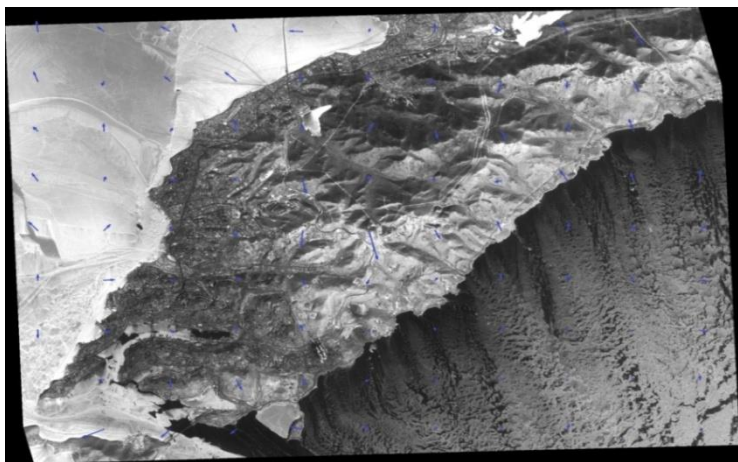
Совмещение изображений проводилось автоматически разработанным авторами алгоритмом, позволяющим рассчитывать точность совмещения в каждом пикселе. Все изображения масштабировались на наилучшее пространственное разрешение (0.7м для Геотона, 2м для Канопуса).

Считалось, что искажений нет, если два изображения совмещаются с пиксельной точностью в каждой точке сцены некоторым аффинным преобразованием.

Эксперименты показали, что у изображений уровня обработки 2 нелинейных аберраций не наблюдается как у спутников Ресурс-П, так и у Канопус-В (№ 3,4 и -ИК).



Совмещение изображений разных каналов спутников Канопус-В



Изображение г. Владивосток (синий канал, Канопус-ИК) за 25.01.2018 (слева) и вектора смещений между этим изображением и отмасштабированным и трансформированным изображением ПСС на изображении льда (справа).

Изображения льда со спутников Канопус-В (-ИК, -3,-4) совмещаются с подпиксельной точностью относительно разрешения камер ПСС для разных спектральных каналов разных спутников с помощью аффинного преобразования. То есть нелинейных искажений нет. Можно было бы ожидать полное совмещение изображений камер ПСС и МСС одного спутника на плоских изображениях. Но этого нет на изображениях уровня обработки 2.

			Каналы МСС			
			1	2	3	4
Канопус-ИК	Lev 2	Rot(deg)	0,012	0,013	0,012	0,03
2018-01-25T02:24:47		Scale	1,009518	1,009527	1,009496	1,009435
anglesum=-24,7017		Shear	0,000237	0,000223	0,000227	0,000269
	Lev 1	Rot(deg)	-1,847	-0,711	0,405	1,519
		Scale	0,99509	0,995158	0,995443	0,996075
		Shear	-0,03351	-0,01237	0,008226	0,029187
Канопус-ИК	Lev 2	Rot(deg)	0,052	0,012	-0,026	-0,066
2018-01-31T02:18:05		Scale	0,99024	0,990063	0,989839	0,98978
anglesum=-11,9629		Shear	0,001054	0,000269	-0,00037	-0,00117
	Lev 1	Rot(deg)	-0,935	-0,413	0,119	0,638
		Scale	0,995917	0,995666	0,995193	0,994825
		Shear	-0,01639	-0,0068	0,002777	0,012661



Проверка автоматических средств обработки НЦ ОМЗ и АПОИ (НИИ ТП).

В текущем году введены средства автоматической обработки изображений с российских космических аппаратов Канопус-В и Ресурс-П.

С помощью созданной технологии проверялось наличие/отсутствие нелинейных искажений изображений, получаемых в результате обработки. Проверялись изображения уровня обработки 2.

Автоматические средства НЦ ОМЗ. Заказанные нами изображения уровня 1 и 2 совпали с теми, что были получены ранее оператором. То есть нелинейных искажений нет.

Автоматические средства НИИ ТП (АПОИ). К сожалению изображения уровня 1А, 2А и 2В получены совсем недавно и до конца не исследованы. Тем не менее, для уровня обработки 2А и 2В2 были проведены некоторые расчеты и сравнения на изображениях камер ПСС и МСС спутников Канопус-В –ИК и №3 и 4, а также мультиспектральных каналов прибора Геотон спутника Ресурс-П №2.

Сравнение технологий НЦ ОМЗ и АПОИ

Параметры аффинного преобразования изображения ПСС для совмещения с каналами МСС

Мелкие недочеты:

Для уровня обработки L2A (Канопус-ИК) изображение камеры ПСС развернуто относительно изображений каналов МСС на ~4°. Изображение ПСС уровня L2B2 отсутствует.

Причина разворота - зоны УТМ для МСС и ПСС разные - одна для Владивостока, другая для Китая.

				L2A				
Канопус-V-ИК	PSS1	2018-01-3:	-11,9629	nVec	139116	145097	145363	137474
Канопус-V-ИК	MSS1	2018-01-3:	-11,9849	RMSE (<15)	4,685065	4,103647	4,113612	4,562744
				Rot(deg)	0,052	0,012	-0,026	-0,066
				Scale	0,99024	0,990063	0,989839	0,98978
				Shear	0,001054	0,000269	-0,00037	-0,00117
				L2A-АПОИ				
Канопус-V-ИК	PSS1_АПС	2018-01-3:	-12,3011	nVec	39752	38493	37972	39052
Канопус-V-ИК	MSS1_АП	2018-01-3:	-12,3012	RMSE (<15)	4,246193	4,25069	4,683575	4,441694
				Rot(deg)	-4,108	-4,091	-4,101	-4,103
				Scale	0,999999	1,000179	0,999958	1,00035
				Shear	-0,00042	-9,9E-05	-0,00028	-0,00077
				L2B2-АПОИ				
Канопус-V-ИК	PSS1_АПС	2018-01-3:	-12,3011	nVec	43300	42154	42325	43112
Канопус-V-ИК	MSS1_АП	2018-01-3:	-12,3012	RMSE (<15)	4,345562	4,426824	4,912272	4,679921
				Rot(deg)	-4,142	-4,125	-4,13	-4,137
				Scale	1,000153	1,000339	1,000257	1,000415
				Shear	-0,00218	-0,00188	-0,00207	-0,00254

Выводы. Изображения уровня обработки L2A по технологии АПОИ отмасштабированы с подпиксельной точностью, каналы МСС совмещены с той же точностью. Масштабы изображений ПСС и МСС отличаются ровно в 5 раз. Технология скорее всего основана на точном восстановлении орбитальных параметров и геометрии сканирования. Пространственное рассогласование осей спектральных каналов для такой технологии является достоинством съемочной системы.

Анализ результатов обработки уровня L2B2, Канопус-В-ИК

а

б

в

Сцена (а) и изменчивость фрагментов уровня обработки L2A (б) и L2B2 (в) на каналах 2 и 3.

Геопривязка на основе RPC-полиномов: L2A – лед совмещен, суша нет; L2B2 – суша как-то совмещена, лед нет.
На фоне нормальной технологии совмещения каналов RPC-технология смотрится архаично.

Анализ результатов обработки изображений прибора Геотон

Недостатки заказа – заказали только один сеанс с плохими характеристиками (Ресурс-П2, съемка почти в надир (7°)).
Заказ сеанса с хорошими характеристиками (Ресурс-П1 с углом съемки около 40°) не сделали по недосмотру.
Поэтому предельные значения точности технологии АПОИ пока оценить не можем.
Результаты по заказанному сеансу.
Уровень L2A – совмещение мультиспектральных каналов идеальное (на льду, да и на суше тоже не плохое).
Уровень L2B2 – геопривязку по имеющейся базе опорных точек проверить не успели. Но из-за использования RPC-полиномов рассогласования будут.



Выводы

1. Существующие в НЦ ОМЗ методики обработки изображений уровня 2А со спутников Канопус-В не вносят нелинейных искажений. Исходные данные также их не содержат.
2. Изображения уровня обработки 2А камер ПСС и МСС одного спутника не совмещены. Технология АПОИ решает эту проблему.
3. Поскольку изображения разных спектральных каналов разных камер совмещены, то совмещение вновь полученного набора изображений с эталонным на плоских поверхностях можно проводить с помощью трехмерного аффинного преобразования с пиксельной точностью. Если изображения прошли корректно ортотрансформирование, то они также будут с пиксельной точностью совмещаться аффинным преобразованием. Если изображения не совмещаются с эталоном, то значит у них некорректная географическая привязка, либо некорректно задан рельеф местности. Других источников ошибок нет.
4. Использование предложенной в докладе технологии совмещения произвольных изображений может решить проблему. Следует применить итерационную процедуру для совмещения аффинным преобразованием ортотрансформированного изображения с эталоном с расчетом точности совмещения. Есть рассогласования по всей сцене – корректируем геопривязку аффинным преобразованием. Если есть локальные рассогласования – корректируем рельеф.

Коррекция с помощью аффинного преобразования аккуратно совместит всю сцену. Совместится даже та ее часть, где нет хороших реперных точек, например море. RPC-технология такого сделать не позволяет.



Благодарим за внимание!