

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ»
ИМ. А.Г. ИОСИФЬЯНА»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ. ТРУДЫ ВНИИЭМ

Главный редактор:

главный конструктор
д. т. н. Л. А. МАКРИДЕНКО

Редакционная коллегия:

д. т. н. С. Н. Волков,
д. т. н. В. Я. Геча
(зам. главного редактора),
к. т. н. А. В. Горбунов,
к. ф.-м. н. Т. Б. Дуйшеналиев
(Киргизская Республика),
д. т. н. А. Б. Захаренко,
к. ф.-м. н. С. А. Золотой
(Республика Беларусь),
д. т. н. С. Г. Казанцев,
д. т. н. Н. Д. Карачун,
д. т. н. И. В. Минаев,
д. т. н. М. Р. Нургужин
(Республика Казахстан),
к. в. н. А. В. Пинчук,
д. т. н. А. П. Сарычев,
д. ф.-м. н. А. П. Тютнев,
д. т. н. А. Ю. Федотов,
д. т. н. В. П. Ходненко,
О. А. Чунихина
(отв. секретарь редколлегии)

Ответственный редактор:

д. т. н. В. Я. Геча

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2022 ГОД

МАТЕРИАЛЫ

Десятой международной
научно-технической конференции

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**



МОСКВА 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Методика оценки экономических выгод от использования данных дистанционного зондирования Земли для развития Российской Федерации Н. С. Бояринова, А. Н. Жиганов, М. А. Лукьященко, Д. А. Перепелко, М. Е. Федосеев	5
Использование измерений спутниковых зондировщиков ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ в климатических исследованиях А. Б. Успенский, А. Н. Рублев, Ю. В. Киселева, В. В. Голомолзин	10
Организация распределенной многомашинной вычислительной системы управления группировкой космических аппаратов И. В. Ашарина, В. Ю. Гришин, В. Г. Сиренко	11
Особенности проектирования и разработки программных технологий НКПОР Российских КС ДЗЗ минимального состава А. И. Васильев, М. В. Мешков, А. В. Крылов, Р. А. Михаленков, А. М. Скачков	20
Возможность создания и оценка орбитального построения системы малых космических аппаратов для раннего обнаружения лесных пожаров И. Ю. Ильина	27
Перспективы развития высокоскоростных радиолиний для КА ДЗЗ Г.А. Ерохин, А.Н. Ершов, А.Е. Мордвинов	35
Обтекание ионосферным потоком космического аппарата в межпланетном пространстве Н. И. Сидняев	39
Разработка методики высокоточного определения общего содержания озона в атмосфере Земли по спектральным измерениям в ультрафиолетовом диапазоне спектра с борта международной космической станции Е. А. Лапшин, Ю. А. Пластинин	55
Расчет покрытия наземных объектов космической съемкой для группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли А. А. Золотой, А. Г. Кезик, Е. Е. Коноплин	63

Описание подходов к поиску корректирующих углов для повышения точности географической привязки данных МТВЗА-ГЯ И. Н. Садовский, Д. С. Сазонов, А. А. Мазуров, А. М. Матвеев А. М. Стрельцов, Г. Е. Евсеев	71
От традиционных гальванометров к высокоточным спутниковым акселерометрам и гравииоградиентометрам В. Б. Дубовской, В. И. Леонтьев, И. А. Боев, В. Г. Жильников	83
Бортовая антенная решетка для перспективного применения в составе радиолинии космического аппарата Е. В. Овчинникова, Нгуен Динь То, С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин, А. И. Гиголо, Т. А. Трофимова, А. Ю. Щербачев	89
Метод измерения коэффициента усиления антенных комплексов – метод «Солнечной кривой АК» А. К. Гончаров	95
Основные направления использования перспективных комплексов приема и обработки информации ДЗЗ для социально-экономического развития страны К. В. Некрасова	99
Поиск однородных по яркости фрагментов космических изображений Земли В. А. Еремеев	100
Статистический метод анализа ранжировок обработки информации при ДЗЗ Н. И. Сидняев, Е. С. Казанцева	102
Проблемные вопросы формирования глобального покрытия по данным Кмсс Ка «Метеор-М» А. И. Васильев, А. А. Михеев, М. В. Мешков, А. А. Пестряков	113
Алгоритм автоматического детектирования устойчивых характерных объектов на изображениях земной поверхности высокого разрешения А.С. Рыжиков	118
Применение нейронных сетей для дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли А. Т. Гизатуллин, В. В. Лабутин, И.С. Бушуева	120

Разработка методов детектирования пожаров по данным МСУ-МР на основе обучающей выборки с использованием данных MODIS Д. В. Лозин, А. В. Кашницкий, Е. А. Лупян	126
К вопросу о точности прямого геопозиционирования аэроснимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов Л. А. Гаврилова, А. Н. Лимонов	132
Результаты эксплуатации комплекса автоматической потоковой обработки информации в интересах потребителей федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли РФ Д. И. Федоткин, А. В. Ядыкин, Е. Н. Боровенский, Д. В. Сысенко	139
Технологии и решения, используемые в работе комплекса автоматической потоковой обработки информации Д. И. Федоткин, А. В. Ядыкин, Д. В. Сысенко, Е. Н. Боровенский	144
Подход к организации распределённой потоково-параллельной обработки информации ДЗЗ Я. В. Алексеенко, А. А. Антонова, В. И. Карташев, Ш. С. Фахми	152
Опыт разработки и эксплуатации в среде интернет веб-геоинформационных систем для оперативного мониторинга окружающей среды с использованием наземных и спутниковых данных В. В. Дерюгина, Е. В. Василенко, А. В. Кухарский, А. А. Невский	164
Организация автоматизированной потоковой обработки и предоставления данных КА «Арктика-М1» в объединенной системе работы с данными НИЦ «Планета» А. А. Бриль, М. А. Бурцев, А. А. Мазуров, А. В. Кашницкий	173
Нормализация данных в сканах изображений прибора MERIS-II спутника FY-3D А. А. Бриль, А. А. Мазуров, А. В. Кашницкий, Е. Е. Волкова	176

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ВЫГОД ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Н. С. Бояринова, А. Н. Жиганов, М. А. Лукьященко,
Д. А. Перепелко, М. Е. Федосеев

(АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев)

В методике рассматриваются зависимости оценки экономических выгод, получаемых Россией от использования данных ДЗЗ, в которых, в отличие от известных работ, оценивается не только прирост валового внутреннего продукта России и снижение ущерба, но и экономический эффект, возникающий за счет закупки отечественных данных ДЗЗ вместо зарубежных, а также налоговый возврат в бюджет от соответствующего ресурсного обеспечения и продаж. Это позволяет учесть наиболее значимые факторы извлечения указанных выгод. Методика применяется при экономической оценке результатов мероприятий федеральных проектов и при обосновании дальнейших перспектив развития космической деятельности.

Ключевые слова: оценка, экономическая выгода, эффект, отрасль экономики, сфера применения, данные, налоговый возврат.

Актуальность разработки методики оценки экономических выгод от использования данных ДЗЗ (ДДЗЗ) из космоса для развития Российской Федерации объясняется тем, что в настоящее время в области космической деятельности происходит разворот от бюджетного финансирования к все более широкому обеспечению коммерческой эффективности космической деятельности, получению экономических выгод от нее. Данное положение закреплено в федеральном законе «О государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» (ст. 7 п. 32) [1].

Целью решения задачи оценки экономических выгод от использования ДДЗЗ является оценка в стоимостном выражении эффектов, получаемых в отраслях экономики, различных сферах применения (транспорт, строительство, растениеводство и др.).

Методика позволяет определить суммарную экономическую выгоду по видам экономических эффектов использования ДДЗЗ (увеличения объемов производимой продукции, повышения доходов, производительности, прибыли, экономии, снижения ущерба, затрат, потерь, возврата налогов и т. д.) и сферам применения. При этом под экономической выгодой от использования ДДЗЗ понимается приращение валового внутреннего продукта (ВВП) страны, возникающее за счет эффектов от использования ДДЗЗ в различных отраслях экономики России: продаж, оцененных в денежном выражении, а также снижения ущерба в различных сферах, экономии за счет закупки отечественных ДДЗЗ вместо зарубежных и налоговых поступлений в бюджет Российской Федерации.

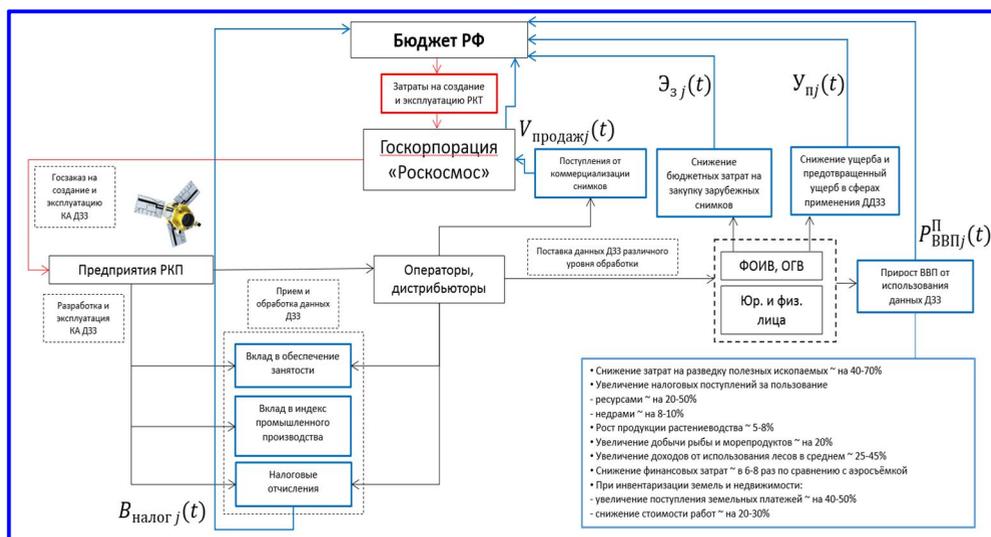


Рис. 1. Схема извлечения экономических выгод от использования ДДЗЗ для развития Российской Федерации

Исходными данными для проведения оценок по данной методике являются:

- исходные данные по пользовательским характеристикам ДДЗЗ (пространственное разрешение, ширина полосы обзора, спектральные диапазоны, радиометрическое разрешение, полоса захвата, периодичность наблюдения), поступающим от орбитальной группировки космических аппаратов (ОГ КА);
- требования федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации и других потребителей к ДДЗЗ, определяющие пригодность их использования в различных сферах применения (отраслях экономики);
- исходные данные по объемам областей экономики, в которых используются ДДЗЗ (транспорт, строительство, растениеводство и др.);
- исходные данные по уровням, внедрению и потенциальной востребованности (актуальности применения) экономических эффектов использования ДДЗЗ в различных сферах применения.

Данные статистики об объемах бюджетообразующих отраслей экономики Российской Федерации основываются на данных Росстата России, публикуемых в соответствующих ежегодных отчетах.

Схема извлечения экономических выгод от использования ДДЗЗ для развития Российской Федерации представлена на рис. 1.

Оценка экономических выгод от использования ДДЗЗ ведется от выявления исходных данных по характеристикам ДДЗЗ, поступающих от ОГ КА, сопоставления их с требованиями к ДДЗЗ, определяющими пригодность использования ДДЗЗ в различных сферах применения, систематизации исходных данных по объемам областей экономики, в которых используются ДДЗЗ, уровням и применимости экономических эффектов использования ДДЗЗ, на основе которых предоставляются космические продукты и услуги в различ-

ных сферах применения. При этом установлено, что наибольшие по объему экономики дополнительные доходы возникают не от денежной выручки прямых продаж космической информации, КА или пусков РН, а от эффектов получения экономической выгоды использования ДДЗЗ в отраслях экономики страны. Поэтому в основу рассматриваемой методики положен методический подход, основанный на применении эффектов, получаемых от использования космической информации в различных отраслях экономики.

Метод, используемый для решения рассматриваемой задачи, должен включать главные факторы, влияющие на требуемую оценку, и выстраивать их роль и место в методологической конструкции корректно и взаимосвязано. В конечном счете это и определяет полноту и достоверность оценки. Наиболее подходящим для оценки экономических выгод от использования ДДЗЗ представляется метод ВА (benefit analysis), метод анализа «выгод» [2], используемый экономической наукой, особенностью которого является то, что оценки в соответствии с ним предполагают выявление и монетизацию не максимально полного списка факторов, а учет главным образом тех результатов, которые в текущих условиях относительно доступны для оценки их в стоимостных единицах и являются значимыми в денежном выражении.

Суммарная экономическая выгода от использования ДДЗЗ, создающаяся с учетом всех отраслей экономики, сфер применения в России в целом, оценивается как:

$$S^{PФ} = \sum_{t_n}^{t_k} \sum_{j=1}^J P_{ВВПj}^{\Pi}(t) + Y_{nj}(t) + V_{продажj}(t) + \mathcal{E}_{зj}(t) + B_{налогj}(t),$$

где t – год, применительно к которому производится оценка экономического вклада, возникающего за счет использования ДДЗЗ; t_n, t_k – начальный и конечный годы оценки экономической выгоды; j – идентификатор вида ДДЗЗ, $j = \overline{1, J}$; $P_{ВВПj}^{\Pi}(t)$ – полный прирост ВВП России, который обеспечит использование j -го вида ДДЗЗ в сфере применения; $Y_{nj}(t)$ – снижение ущерба или ущерб, предотвращенный в сферах применения ДДЗЗ; $V_{продажj}(t)$ – финансовый объем продаж отечественных космических продуктов и услуг (КПУ), созданных на основе ДДЗЗ, на международном и внутреннем космическом рынке; $\mathcal{E}_{зj}(t)$ – экономический эффект, возникающий за счет закупки отечественных ДДЗЗ вместо зарубежных; $B_{налогj}(t)$ – налоговый возврат в бюджет Российской Федерации от соответствующего ресурсного обеспечения и продаж.

Прирост объема продукции оценивается, как правило, полным приростом ВВП России, который определен как сумма произведений экономических эффектов от использования ДДЗЗ на объем ВВП, создающийся в отрасли экономики, и поправочный коэффициент, зависящий от доли объема ВВП, к которому применим указанный эффект от использования в нем ДДЗЗ (доли ВВП, приходящейся на решение конкретной задачи с использованием ДДЗЗ), с учетом пригодности характеристик ДДЗЗ для решения задач в отрасли экономики [3].

Снижение ущерба за счет использования ДДЗЗ может быть оценено как произведение объема предотвращенного ущерба на долю снижения ущерба, достигнутого по виду экономической деятельности за счет использования j -го вида ДДЗЗ с учетом уровня удовлетворения значениями характеристик ДДЗЗ, требований к решению задач по этому виду экономической деятельности [4].

Объемы продаж на международном и внутреннем рынке отечественных КПУ, созданных на основе ДДЗЗ, за истекший период, как правило, известны из оценок консалтинговых агентств. Для оценки финансовых объемов продаж отечественных КПУ используется известный метод CAGR [5], то есть объем продаж КПУ в году t принимается равным произведению среднегодового темпа роста продаж на объем продаж КПУ в предыдущем году t_{-1} .

Экономический эффект, возникающий за счет закупки отечественных ДДЗЗ вместо зарубежных, оценивается как сумма таких выгод применительно к различным сферам, включая космический мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров, контроль ледовой обстановки, метеорология и т. д.

Налоговый возврат в бюджет Российской Федерации от ресурсного обеспечения, необходимого для создания j -того вида ДДЗЗ, зависит от общей стоимости мероприятий, фонда оплаты труда, накладных расходов, прибыли, страховых взносов и определяется как сумма налогов на добавленную стоимость (НДС), на прибыль, на доходы физических лиц (НДФЛ) и страховых отчислений.

В отличие от известных работ [4 – 7] при оценке экономических выгод от использования ДДЗЗ предложено оценивать не только прирост ВВП России и снижение ущерба, но и экономический эффект, возникающий за счет закупки отечественных ДДЗЗ вместо зарубежных, а также налоговый возврат в бюджет Российской Федерации от соответствующего ресурсного обеспечения и продаж. Это позволяет учесть наиболее значимые факторы извлечения выгод от использования ДДЗЗ Россией.

Методику оценки экономических эффектов от использования ДДЗЗ рекомендуется применять на этапе экономической оценки результатов, целевых индикаторов и показателей мероприятий федеральных проектов, а также обоснования перспектив развития космической деятельности. Целесообразно также использовать разработанную методику для экспертизы проектов, предполагающих обеспечение развития космических средств с учетом оценки экономических эффектов от использования ДДЗЗ.

Литература

1. О государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос»: Федер. закон [принят 13 июля 2015 года]. Консультант Плюс, 2015. – 15 с.
2. Андреева Е. И., Горшкова И. Д., Ковалевская А. С. Рекомендации по оценке социально-экономической эффективности социальных программ. Определения, подходы, практический опыт. – М.: Проспект, 2014. – 72 с.
3. Чурсин А. А., Жиганов А. Н. Методические положения оценки мероприятий стратегического планирования с целью повышения вклада результатов космической дея-

- тельности в реальный сектор экономики России. Бизнес в законе. Экономико-юридический журнал, 2016. – № 6. – С. 40 – 45.
4. Хандожко Л. А. Экономическая метеорология. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2005. – 491 с.
5. Совокупный среднегодовой темп роста. Финансовая математика: [сайт]. – URL: <http://ru.m.wikipedia.org/wiki/CAGR/> (дата обращения 13.04.2022).
6. Фокичева А. А., Тимофеева А. Г. Определение экономической полезности использования метеорологической информации на основе байесовского подхода к оценке средних потерь в погодозависимых отраслях. – М.: Росгидромет, 2016. – 24 с.
7. Прохорова Е. П., Ловчинская М. В., Куриленко А. Н. Проблемы оценки экономического эффекта реализации коммерческих услуг космической деятельности // Труды МАИ: электрон. журн., 2011. – № 44. – URL: <https://mai.ru/upload/iblock/53b/problemy-otsenki-ekonomicheskogo-effekta-realizatsii-kommercheskikh-uslug-kosmicheskoy-deyatelnosti.pdf?ysclid=I9sod0gg48755918933>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВЫХ ЗОНДИРОВЩИКОВ ИКФС-2 И МТВЗА-ГЯ В КЛИМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

А. Б. Успенский, А. Н. Рублев,
Ю. В. Киселева, В. В. Голомолзин

*(Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»,
г. Москва)*

Измерения инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 и микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ, входящих в состав полезной нагрузки полярно-орбитальных космических аппаратов (КА) серии «Метеор-М», а также информационные продукты дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) могут быть использованы в климатических исследованиях. Из продуктов ДЗА выделены атмосферные параметры, относящиеся к так называемым основным климатическим переменным (ОКП), мониторинг которых необходим для описания земной климатической системы и ее изменений. Перечень атмосферных ОКП включает концентрации основных парниковых газов (водяной пар, диоксид углерода, метан, озон), характеристики облачности и аэрозолей, вертикальные профили температуры и влажности, приповерхностную температуру и т. д. Дано краткое описание ИКФС-2, МТВЗА-ГЯ и результатов их эксплуатации на борту КА «Метеор-М» № 2, 2-2 в период с осени 2014 г. по настоящее время, включая получение продуктов ДЗА. Рассмотрена возможность формирования многолетних однородных рядов, содержащих измерения ИКФС-2 и МТВЗА-ГЯ, а также продукты ДЗА – спутниковые оценки отдельных атмосферных ОКП, для которых приведены сведения о погрешностях.

Литература

1. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» / В. В. Асмус [и др.] // Метеорология и гидрология, 2014. – № 6. – С. 5 – 16.
2. Мониторинг основных климатических переменных атмосферы по данным спутникового ИК-зондирующего ИКФС-2 / А. Б. Успенский [и др.] // Метеорология и гидрология, 2022. – № 11. В печати.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МНОГОМАШИННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И. В. Ашарина, В. Ю. Гришин, В. Г. Сиренко

(Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва)

Рассматриваются вопросы обеспечения сбоеустойчивости и отказоустойчивости группировок космических аппаратов применительно к перспективному проекту «Сфера». В качестве прототипа группировок космических аппаратов «Сфера» приведена функционирующая в настоящее время международная негеостационарная система спутниковой связи Iridium. Описаны принципы построения необслуживаемой многозадачной отказоустойчивой распределенной многомашинной вычислительной системы управления группировкой космических аппаратов, а также способы достижения взаимного информационного согласования в них.

Ключевые слова: *сбоеустойчивость, отказоустойчивость, группировки космических аппаратов, многомашинные вычислительные системы, неисправности «враждебно-го» («византийского») вида, комплекс, репликация.*

Задачи, решаемые группировками космических аппаратов, с каждым годом приобретают все большую актуальность практически во всех областях современной жизни – геологии, водном и лесном хозяйствах, вулканологии, метеорологических исследованиях, пожарной безопасности и ЧС и других областях.

«Главная задача проекта «Сфера» – улучшение качества жизни и безопасности людей. Не менее главная, основополагающая задача – устойчивое развитие России в условиях высококонкурентного мирового рынка "цифры"», – подчеркнул первый заместитель генерального директора по развитию орбитальной группировки и перспективным проектам Роскосмоса Юрий Урличич. До конца года на орбиту будет выведен первый спутник проекта – среднеорбитальный демонстратор широкополосного доступа в интернет «Скиф-Д». Шесть рабочих «Скифов» будут запущены в 2027 году и еще шесть – в 2029 году. Разработчиком и изготовителем этих аппаратов является АО «ИСС имени М. Ф. Решетнева». Развертывание низкоорбитальной группировки «Марафон IoT», включающей 264 аппарата, начнется в 2024 году. Запуск первого спутника группировки «Экспресс-РВ», еще одной связной составляющей «Сферы», запланирован на 2025 год. Четыре космических аппарата (КА), которые будут работать на высокоэллиптической орбите большого наклона, смогут обслуживать Арктику, а также значительную часть России и Казахстана. В состав «Сферы» войдут также два спутника «Ямал» компании «Газпром космические системы» и семь «Экспрессов» «Космической связи». Сегмент дистанционного зондирования будет представлен группировками из 84-х оптических спутников «Беркут-О» (обзорный), «Беркут-С» (среднего разрешения) и «Беркут-ВД» (высокодетальный), 12 аппаратов радиолокационного наблюдения «Беркут-Х» и «Беркут-XLP» и трех спутников «СМОТР», которые намерен запустить «Газпром космические системы». Развертывание всех этих группировок Роскосмос планирует начать в 2025 году. [1].

В качестве прототипа группировок КА «Сфера» рассмотрим негеостационарную систему спутниковой связи (ССС) Iridium [2].

Штатная орбитальная группировка СССР Iridium включает в себя 66 основных космических аппаратов (КА), равномерно размещенных на приполярных орбитах с наклоном $86,4^\circ$ и высотой около 780 км. Дополнительно к этому имеются 6 резервных КА, расположенных на орбите высотой 645 км. КА на основных орбитах распределены в 6 равноудаленных друг от друга орбитальных плоскостях по 11 КА в каждой плоскости.

Отличительная особенность СССР Iridium состоит в том, что в ней имеются средства межспутниковой связи, соединяющей каждый КА с четырьмя соседними: двумя КА, расположенными спереди и сзади в той же орбитальной плоскости, и двумя КА, расположенными слева и справа в соседних орбитальных плоскостях. В СССР Iridium предоставляются регулярные прогнозы времени, места и продолжительности любых результирующих перерывов обслуживания, пока обслуживание не будет полностью восстановлено. Система извещает о потере возможности связи не позднее, чем через 30 секунд с того момента, когда она обнаруживает возможность потери связи [2].

Совокупность бортовых вычислителей, находящихся на каждом из КА группировки в общем случае составляет распределенную многомашинную вычислительную систему (РМВС).

Высокие значения показателей живучести РМВС, обеспечивающие длительные сроки активного существования (САС), могут быть практически достигнуты путем реализации свойства сбое- и отказоустойчивости, обеспечивающего системе возможность продолжения правильной работы и при возникновении допустимого количества неисправностей оговоренного класса. Сложная структура современных РМВС обуславливает необходимость использования модели неисправности «враждебного» (byzantine, rigorous, malicious) вида, при которой поведение неисправного элемента допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы.

Предполагается, что РМВС должна параллельно выполнять совокупности взаимодействующих целевых задач в течение достаточно длительного времени, используя свои аппаратные средства, в которых могут возникать допустимые неисправности, совокупности неисправностей и их последовательности. Заданный уровень сбое- и отказоустойчивости каждой целевой задачи обеспечивается путем ее репликации – параллельного выполнения копий этой целевой задачи на нескольких избыточных вычислителях, образующих сбое- и отказоустойчивый комплекс [3, 4], с обменом результатами и выбором из них правильного в предположении, что только не более чем установленная часть этих результатов, определяющая меру сбое- и отказоустойчивости данной целевой задачи, будет ошибочной. Это гарантирует возможность получения правильного результата некоторой данной целевой задачи в других частях системы. Требуемые САС системы и траектория ее самоуправляемой деградации обеспечиваются введением в систему динамической избыточности, содержащей средства парирования допустимых совокупностей неисправностей задан-

ной модели, функционального и тестового самодиагностирования системы, самовосстановления ее целевой работы, структурной и/или функциональной самореконфигурации и самоуправляемой деградации.

В работе рассматриваются необслуживаемые РМВС, параллельно решающие взаимодействующие между собой целевые задачи с заданными для них уровнями сбое- и отказоустойчивости и обеспечивающие, во-первых, правильность выходной информации РМВС за счет маскирования допустимых совокупностей неисправностей и их допустимых последовательностей и, во-вторых, максимально длительные САС РМВС за счет парирования неисправностей и самоуправляемой деградации [5], направленной на повышение живучести РМВС.

Принципы построения отказоустойчивой РМВС управления группировкой космических аппаратов

Концептуальную основу построения РМВС управления группировкой КА представляет собой так называемая модель «коллектива вычислителей» [6, 7], которая определяется парой параметров:

$$RMVS = (K, A),$$

где K – описание конструкции РМВС; A – алгоритм работы коллектива вычислителей, которые представляют собой бортовые цифровые вычислительные машины (ЦВМ) КА группировки.

Конструкция группировки КА представляет собой графовую модель РМВС. Алгоритм работы определяет как способ выполнения целевой задачи в каждом из вычислителей, так и взаимодействие вычислителей между собой, то есть математический аппарат, обеспечивающий работу сети ЦВМ (или ее части) как распределенной системы, наличие автономных компьютеров в которой незаметно для внешних пользователей за счет связующего программного обеспечения (ПО). В этом заключается принципиальное отличие распределенной системы от компьютерной сети [8, 9].

Представим формализованную графовую модель РМВС. Номера ЦВМ и номера комплексов отображаются строчными латинскими буквами. Номер ЦВМ может иметь нижний индекс, определяющий номер комплекса, которому принадлежит эта ЦВМ.

Система, в которой каждый дуплексный канал может быть представлен разнонаправленной парой симплексных каналов, моделируется системным орграфом, например, G , в котором пронумерованные вершины, составляющие множество, например, A , отображают ЦВМ, а дуги, составляющие множество, например, B , – симплексные каналы связи между ними. Такой орграф задается записью $G = (A, B)$. Термины ЦВМ и вершина орграфа (орподграфа) рассматриваются как синонимы. Также синонимами являются термины двухточечный симплексный межмашинный канал связи и дуга орграфа (орподграфа), система или подсистема и ее орграфовая модель (ее орграф или орподграф) [4].

Рассматриваются системы, орграфы которых не имеют параллельных дуг.

Комплексом называется система или подсистема, удовлетворяющая определенным структурным требованиям [3, 5], каждая исправная ЦВМ в которой может определить упорядоченную совокупность (вектор) согласованных значений всех ЦВМ этого комплекса. Комплекс является необходимым инструментом при организации сбое- и отказоустойчивых вычислений на основе репликации задач в системах с динамической избыточностью [10] и управляемой деградацией.

Репликация состоит в решении одной и той же задачи на всех ЦВМ комплекса с обменом копиями результатов и выбором правильного результата в предположении, что только небольшая часть этих ЦВМ может быть неисправной. Тогда при параллельном решении в системе нескольких взаимосвязанных задач необходимо обеспечить наличие в этой системе нескольких взаимодействующих комплексов, каждый из которых решает одну из задач и в каждом из которых допускается существование определенного для данного комплекса количества неисправных ЦВМ.

Решение проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости многозапросных РМВС состоит в организации параллельного выполнения поступивших заданий (запросов), для каждого из которых создается многокомплексная (многозадачная) сбое- и отказоустойчивая прикладная система, параллельно выполняющая множество $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\}$ взаимодействующих целевых задач, для каждой Z_i из которых выделяется комплекс K_i этой задачи [4], а также сбое- и отказоустойчивые среды межкомплексного взаимодействия $W_{i \rightarrow j}$ [11], обеспечивающие достижение системного взаимное информационное согласование (ВИС) (рис. 1).

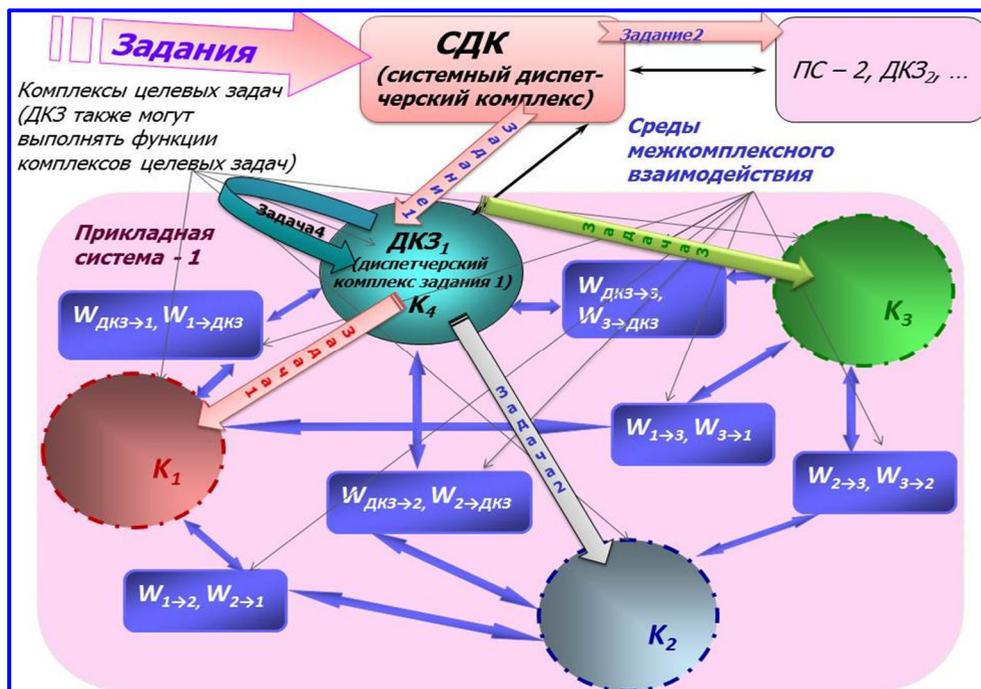


Рис. 1. Пример многозадачной РМВС

Если предполагается, что РМВС должна выполнять многозадачные задания и при этом мощность группировки позволяет это реализовать, осуществляется выделение следующей прикладной системы. Такого рода масштабирование приводит к возникновению следующего иерархического уровня управления РМВС.

Управляющим органом РМВС служит сбое- и отказоустойчивый распределенный системный диспетчерский комплекс (СДК). В общем случае СДК получает задание, состоящее из нескольких задач, и, в соответствии с поступившим заданием, выделяет прикладную систему, в которой выделяется необходимое количество комплексов, один из которых является диспетчерским комплексом задания (ДКЗ) для прикладной системы, выделенной для решения многозадачного задания (рис. 1). В случае поступления следующего задания СДК выделяет следующую прикладную подсистему. СДК выполняет общие диспетчерские функции для всей РМВС. Однако необходимо заметить, что существующие на данный момент группировки КА, принадлежащие Российской Федерации, не позволяют строить подобные иерархические структуры. Очевидно, это станет реальным в случае реализации проекта «Сфера».

Мощность перспективной группировки КА «Сфера», которая, согласно [1, 2], будет существенно больше мощности ССС Iridium, дает возможность в полной мере применить разработанные в АО «НИИ «Субмикрон» алгоритмы, методы и модели, представленные в [4, 11 – 15], направленные на повышение ее сбое- и отказоустойчивости, а, следовательно, и САС группировки КА «Сфера».

После выделения комплексов прикладной системы многозадачного задания и распределения по ним соответствующих задач, выполняется синхронизация ЦВМ (с точностью до неделимого далее временного отрезка – кванта, в течение которого происходит обмен сообщениями между соседними ЦВМ) и запуск работы прикладной системы на выполнение целевого задания. Синхронизация предполагает наличие службы единого системного времени.

В процессе функционирования вычислители всех КА выполняют тестовое и функциональное диагностирование с целью обнаружения возникших неисправностей, а также ВИС полученных результатов диагностирования.

В многокомплексных системах процесс достижения системного ВИС можно рассматривать в виде двух последовательных этапов:

1. Внутрикмплексное ВИС для каждого из комплексов, при котором во всех исправных ЦВМ комплекса вычисляется вектор согласованных значений этого комплекса.

2. Межкомплексное (системное) ВИС, включающее межкомплексный обмен согласуемой информацией по средам межкомплексного взаимодействия и вычисление в каждом комплексе вектора системного ВИС, при котором в каждой исправной ЦВМ системы формируется одинаковый вектор согласованных значений всех ЦВМ системы [4, 11].

Алгоритмы ВИС оцениваются величинами требуемых аппаратурной, временной и информационной избыточностей [16]. В комплексе при возможности возникновения «враждебных» неисправностей не более чем в μ ЦВМ аппаратурная избыточность n в виде общего количества ЦВМ комплекса должна быть $n > 3\mu$ [17, 18].

Принципы технической реализации и основные свойства РМВС

Согласно [6, 7] основными принципами технической реализации РМВС являются модульность и близкодействие.

Модульность предлагаемой РМВС в том, что она состоит из отдельных унифицированных конструктивно и функционально самостоятельных вычислителей (ЦВМ, бортовых вычислительных систем и т. д.), имеющих элементы сопряжения с другими элементами.

Модульность обеспечивает:

- возможность произвольного выделения в сети комплексов и сред межкомплексного взаимодействия, составляющих РМВС;
- возможность взаимозаменяемости модулей в процессе реконфигурации;
- масштабируемость РМВС.

Близкодействие – принцип, согласно которому вычислитель может непосредственно обмениваться сообщениями с ограниченным числом других вычислителей, то есть с «удаленными» вычислителями (число последовательных ребер (дуг) в графовой (орграфовой) модели между которыми больше 1). Обмен сообщениями происходит путем последовательных передач сообщений от ЦВМ к ЦВМ (в графовой модели, соответственно, от вершины к вершине графа).

Системы, построенные на принципах модульности и близкодействия, обладают свойствами децентрализованности и распределенности. Принцип децентрализованности соблюдается в предлагаемой РМВС на всех иерархических уровнях РМВС [4, 11 – 15].

Одним из основных принципов построения архитектуры РМВС является масштабируемость [6, 7], предполагающая способность системы к наращиванию и сокращению ресурсов, а также возможности варьирования производительности.

В любом случае в основе построения сбое- и отказоустойчивых систем лежит понятие избыточности, определяющее сбое- и отказоустойчивость РМВС. Существует два вида избыточности, используемой в РМВС для реализации в них сбое- и отказоустойчивости:

1. **Статическая избыточность**, гарантирующая только правильность выходной информации при возникновении допустимых совокупностей неисправностей («маскирование» неисправностей) за счет избыточного числа его копий (мажорирование, кворумирование), в предположении, что ошибочной может быть только меньшая часть этих результатов.

2. **Динамическая избыточность**, обеспечивающая целый набор действий, гарантирующий повышение живучести такой системы:

- парирование проявлений неисправностей (ошибок) в выходной информации системы;

- одновременное и согласованное обнаружение ошибок;
- непрерывная и сквозная идентификация ошибок по месту их возникновения и по типу (сбой, программный сбой, отказ);
- информационное восстановление элементов РМВС в состоянии программного сбоя со стороны исправных элементов РМВС и втягивание восстановленных элементов в совместную целевую работу РМВС;
- реконфигурация РМВС;
- самоуправляемая деградация РМВС со снижением ее надежностных и/или функциональных характеристик;
- при невозможности выполнения самоуправляемой деградации (при полном исчерпании ресурсов или возникновении недопустимых совокупностей неисправностей или их недопустимых последовательностей) безусловный переход РМВС или ее части в состояние безопасного останова и ожидание указаний из внешней среды с последующим выполнением поступивших указаний.

Заключение

Обязательными требованиями к рассматриваемым сбое- и отказоустойчивым РМВС являются:

- вычислительная целостность, определяющая возможность ошибки в вычислениях или недопустимой задержки;
- покрытие неисправностей, определяющее меру хорошей работы используемых механизмов отказоустойчивости и означающее условную вероятность правильного восстановления системы при возникновении неисправности.

В заключение необходимо отметить, что одновременность и согласованность во всех исправных ЦВМ многокомплексной системы результатов ее системного функционального диагностирования являются основой для гарантированной своевременности и согласованности возможно различающихся последующих действий всех исправных ЦВМ системы (что очень важно!) по ее автоматической реконфигурации, восстановлению целевой работы, самоуправляемой деградации или переходу в состояние безопасного останова.

Другой важной открытой областью научных исследований является снижение вычислительной сложности предлагаемых методов и повышение их практической эффективности [19].

В системе еще на этапе проектирования архитектуры должна быть предусмотрена возможность перераспределения имеющихся ресурсов с целью варьирования соотношением «производительность – достоверность» для различных параллельно решаемых взаимодействующих целевых задач. Поэтому при построении архитектурной модели РМВС необходимо предусмотреть возможность выполнения всеми ее вычислителями действий, связанных с согласованным обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей в случае их возникновения. Тогда должен выполняться весь комплекс восстановительных работ, связанных с реконфигурацией, восстановлением целевой работы, управляемой деградацией вплоть до безопасного останова. Все перечисленные действия направлены на повышение живучести сбое- и отказоустойчивых РМВС.

Литература

1. Сфера: От слов к делу / И. Афанасьев // Русский космос, 2022. – № 6. – С. 40 – 41.
2. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности, 2018. – № 4. – С. 1 – 34. – URL: <http://scs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf>.
3. Взаимное информационное согласование в неполносвязных многомашинных вычислительных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов, И. Г. Мищенко // Автоматика и телемеханика, 2003. – № 5. – С. 190 – 199.
4. Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика, 2014. – № 6. – С. 115 – 131.
5. Модели замкнутых многомашинных вычислительных систем со сбое- и отказоустойчивостью на основе репликации задач в условиях возникновения враждебных неисправностей / А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика, 2009. – № 2. – С. 171 – 189.
6. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем: Учеб. пособие для вузов. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 512 с.: ил.
7. Евреинов Э. В., Хорошевский В. Г. Однородные вычислительные системы. – Новосибирск: Наука, 1978. – 320 с.
8. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. – Санкт-Петербург: Питер, 2016. – 955 с.
9. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. – Санкт-Петербург: Питер, 2013. – 811 с.
10. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / Под ред. П. П. Пархоменко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 319 с.
11. Выделение структурной среды системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах / И. В. Ашарина, А. В. Лобанов // Автоматика и телемеханика, 2014. – № 8. – С. 146 – 156.
12. The Concept of Failure-and Fault-Tolerance on Base of the Dynamic Redundancy for Distributed Control Systems of Spacecraft Groups / I.V. Asharina // Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms, 2020. – V. 272. – P. 181 – 191.
13. Обеспечение отказоустойчивости в многомашинных вычислительных системах ДЗЗ / И. В. Ашарина // XLVII академические чтения по космонавтике: Сборник тезисов. – URL: <https://korolev.bmstu.press/preprints/1198/>.
14. Подходы к решению задачи реконфигурации отказоустойчивой распределенной системы управления группировкой ДЗЗ малых космических аппаратов / И. В. Ашарина // Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского», Москва, 29 – 30 октября 2021 г. Сборник докладов. – М: Издательский дом Академии им. Н. Е. Жуковского, 2022. – С. 269 – 276.
15. Подходы к созданию отказоустойчивой распределенной системы управления группировкой малых космических аппаратов / И. В. Ашарина // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции ИНФО-2021, 1 – 10 октября 2021, г. Сочи, Адлер / под. ред. С. У. Увайсова. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2021. – 296 с.
16. Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах / Б. А. Генинсон, Л. А. Панкова, Э. А. Трахтенгерц // Автоматика и телемеханика, 1989. – № 5. – С. 3 – 18.

17. Reaching agreement in the presence of faults / Pease M., Shostak R., Lamport L. // ACM, 1980. – V. 27. – №. 2. – P. 228 – 234.
18. Р 50-54-82-88: Надежность в технике. выбор способов и методов резервирования. // Государственный комитет СССР по стандартам (Госстандарт СССР), Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ) / Утверждены Приказом ВНИИНМАШ № 260 от 22.09.1988 г. – М.: 1988. – 94 с.
19. Архитектурная унификация методов и алгоритмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости распределенных многокомплексных бортовых цифровых вычислительных систем сетевой структуры / А. В. Лобанов, И. В. Ашарина // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции ИНФО-2018. / под. ред. С. У. Увайсова. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018. – С. 218 – 225.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НКПОР РОССИЙСКИХ КС ДЗЗ МИНИМАЛЬНОГО СОСТАВА

А. И. Васильев, М. В. Мешков, А. В. Крылов,
Р. А. Михаленков, А. М. Скачков

(НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы», г. Москва)

В статье рассматриваются особенности проектирования и разработки программных технологий наземного комплекса приема, обработки и распространения данных российских КС ДЗЗ минимального состава (НКПОР-МС). НКПОР-МС предназначен для реализации и обеспечения всего базового функционала по приему, обработке, формированию и предоставлению потребителям информационных продуктов российских КС ДЗЗ вне технологий ЕТРИС ДЗЗ. Для этого в рамках НКПОР-МС разрабатываются программные технологии, включающие компоненты каталогизации и архивирования принимаемых данных, автоматической потоковой и интерактивной обработки данных, предоставления доступа к сформированным информационным продуктам. Кроме того, рассматривается вопрос создания информационно-технологической инфраструктуры комплекса. Апробацию указанных выше технологий НКПОР-МС планируется провести по данным с КА «Метеор-М» № 2.2, КА «Канопус-В-ИК» и «Канопус-В» № 3 – 6.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, «Канопус-В», «Метеор-М», НКПОР, программные технологии, информационно-технологическая инфраструктура, информационные продукты.

Введение

Мировые тенденции развития наземной космической инфраструктуры (НКИ) ДЗЗ следует охарактеризовать доступностью и оперативностью предоставления космической информации благодаря широкому использованию облачных технологий (например, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://planet.com/>). В частности, в рамках веб-сервисов единой территориально-распределенной информационной системы (ЕТРИС) ДЗЗ облачные технологии активно задействуются для обработки принимаемых данных и обеспечения потребителей информационными продуктами ДЗЗ [1, 2]. Фактически данное обстоятельство обуславливает вектор развития отрасли ДЗЗ в Российской Федерации, в соответствии с которым обеспечивается комплексное использование ресурсов орбитальной группировки (ОГ) и НКИ ДЗЗ.

Вместе с тем следует выделить класс специальных задач, в рамках которых, во-первых, требуются независимые от интернет-каналов средства прямого доступа к космической информации, принятой непосредственно на антенные комплексы, в том числе мобильные. Во-вторых, требуется ведение архивов принятой информации, ее обработка в интересах формирования высокоуровневых продуктов и предоставление их без возможности использования информационно-телекоммуникационных сетей общего пользования. Таким об-

разом, обуславливается потребность в создании наземного комплекса приема, обработки и распространения информации ДЗЗ минимального состава (НКПОР-МС). Основной задачей данной комплекса является обеспечение базового функционала НКПОР вне технологий ЕТРИС с доступом в интернет.

Далее подробно рассматриваются особенности проектирования и разработки компонентов программных технологий НКПОР-МС, целью которого является формирование и предоставление информационных продуктов ДЗЗ (различных уровней обработки по классификации [3]) по данным КА «Метеор-М» № 2.2 и КА типа «Канопус-В».

Общая структура НКПОР-МС

Основываясь на технологических решениях НКПОР Оператора российских КС ДЗЗ (<http://www.ntsomz.ru>), а также технологиях «Банка базовых продуктов» [4], в основе общей структуры НКПОР-МС применяются следующие проектные решения:

- каталогизация и архивирование принятой на антенные комплексы L0-информации ДЗЗ;
- потоковая автоматическая обработка, включая контроль качества данных ДЗЗ;
- предоставление продуктов на основе интерактивного каталога (веб-сервиса);
- интерактивный контроль и формирование высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ.

На рис 1 приведена обобщенная структура НКПОР-МС, для которой выделены контуры автоматической и интерактивной обработки.

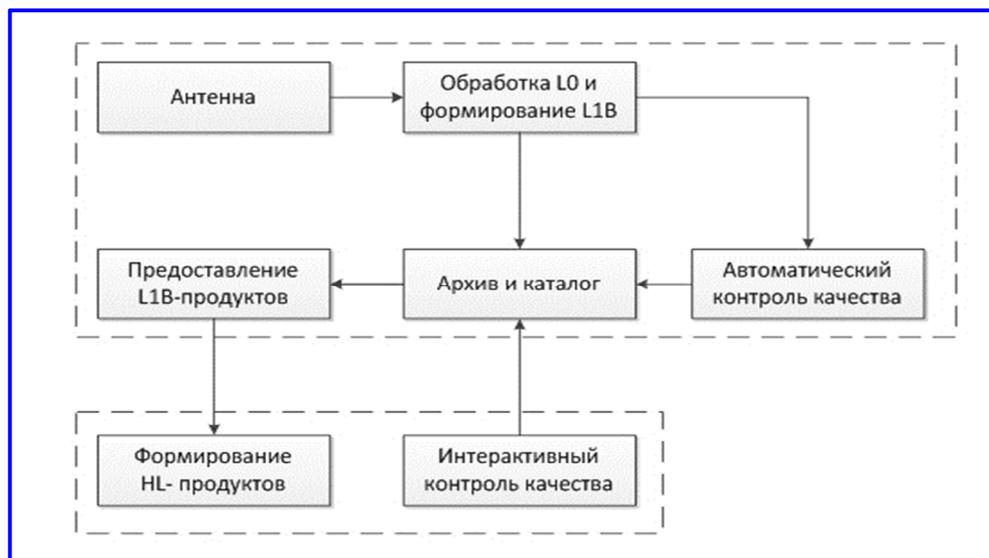


Рис. 1. Общая структура НКПОР-МС

Определим основные компоненты НКПОР-МС, которые обеспечивают базовый функционал по приему, обработке и предоставлению информационных продуктов:

- компонент каталогизации и архивирования предназначен для формирования и ведения каталога метаданных и архива полноразмерных данных ДЗЗ;
- компонент предоставления предназначен для интерактивного отображения сцен маршрутов съемки на картографической основе с поиском данных по каталогу по заданным критериям;
- компонент контроля качества предназначен для контроля качества данных и информационных продуктов ДЗЗ (в автоматическом и интерактивном режиме);
- компонент обработки данных предназначен для обработки в интересах автоматического формирования L1B-продуктов, а также формирования высокоуровневых (high-level – HL) продуктов в интерактивном режиме, в частности, орто- и паншарп-продуктов (L1D и L2, соответственно);
- компонент контроля процессов обработки – предназначен для контроля состояния и ведения статусов технологических процессов НКПОР-МС.

Далее более подробно рассмотрим особенности реализации рассмотренных выше компонентов НКПОР-МС.

Особенности проектирования и разработки компонентов программных технологий НКПОР-МС

Центральным компонентом программных технологий НКПОР-МС является каталог данных и информационных продуктов ДЗЗ, общая структура которого основана на стандарте ISO-19115. Ключевые элементы стандарта, реализованные в рамках каталога данных (на основе СУБД PostgreSQL), приведены на рис. 2.

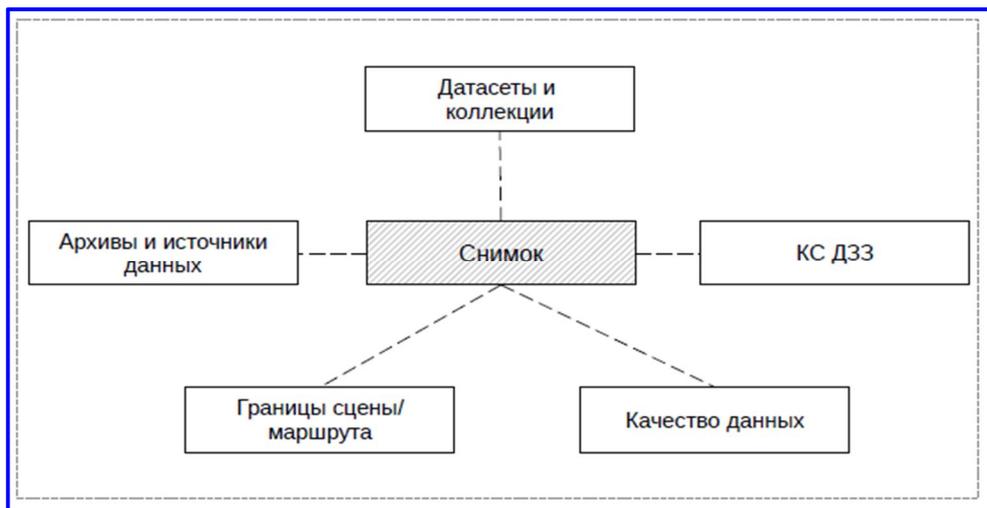


Рис. 2. Ключевые элементы ISO-19115, используемые в рамках каталога НКПОР-МС

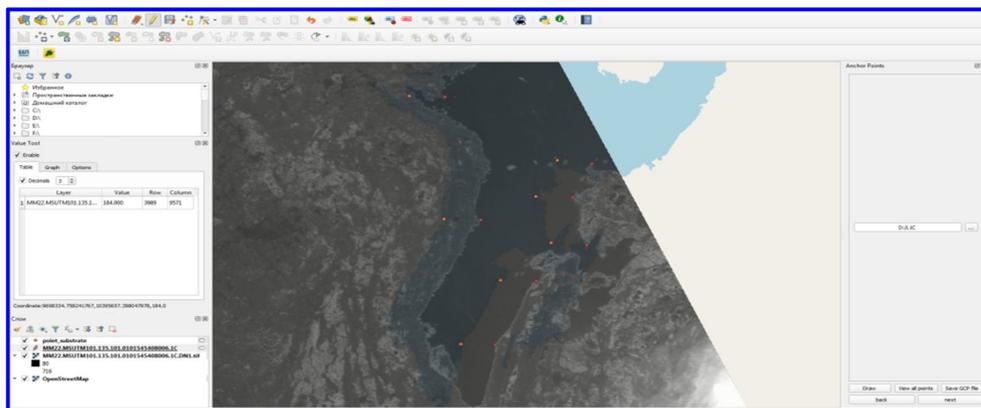


Рис. 3. Скриншот QGIS, демонстрирующий плагин контроля геопроецирования данных КМСС КА «Метеор-М» № 2.2 на основе задания опорных/контрольных точек

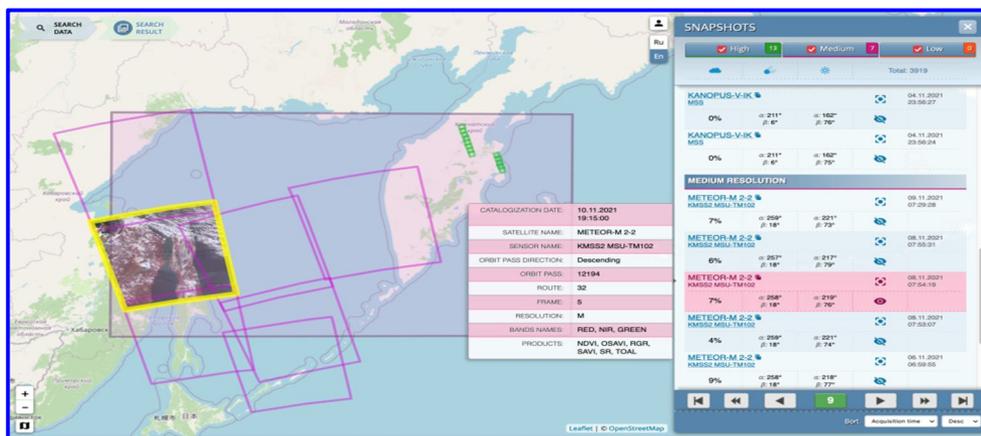


Рис. 4. Скриншот графического интерфейса веб-сервиса доступа к данным и информационным продуктам НКПОР-МС

Для разработки программного обеспечения интерактивной обработки используется открытая ГИС QGIS с поддержкой создания плагинов-расширений. На рис. 3 приведен скриншот QGIS, демонстрирующий плагин контроля геопроецирования данных КМСС КА «Метеор-М» №2.2 на основе задания опорных/контрольных точек.

Разработка программного обеспечения автоматической потоковой обработки данных (включая автоматический контроль качества) осуществляется с использованием технологий параллельной обработки OpenCL/CUDA.

Для поиска сцен/маршрутов в каталоге разрабатывается специализированный веб-сервис, обеспечивающий задание границ области интереса на картографической подложке, а также определение интересующих временных интервалов и т. д. На рис. 4 приведен скриншот результата поиска сцен в каталоге с использованием графического интерфейса разрабатываемого сервиса.

Для организации технологических процессов обработки данных и формирования информационных продуктов разрабатывается специализированный протокол квитанций, осуществляющий маркирование состояния любого компонента НКПОР-МС в БД. На основе данного протокола и истории статусов осуществляется контроль процессов обработки.

Помимо обеспечения работы технологических контуров, отвечающих за базовый функционал НКПОР-МС, разрабатывается вспомогательная система администрирования технологических процессов в части:

- оценки количества сбросов зарегистрированных в НКПОР за отчетный период (последние сутки/неделя/месяц/год/за все время);
- оценки количества Л1В-продуктов, сформированных в НКПОР за отчетный период (последние сутки/неделя/месяц/год/за все время) в определенном статусе качества;
- оценки доступных вычислительных ресурсов для архивирования сбросов и формируемых продуктов ДЗЗ;
- анализа процессов потоковой обработки данных.

Для отображения оценочных показателей, состояния всей системы НКПОР-МС и отдельных технологических процессов используется специальный инструмент, представленный в графическом веб-интерфейсе.

Общая структура информационно-вычислительных ресурсов НКПОР-МС

В качестве аппаратного обеспечения программных технологий НКПОР-МС планируется использовать вычислительный кластер в следующей конфигурации:

- система хранения данных предназначена для обеспечения долговременного и оперативного хранения данных ДЗЗ и информационных продуктов на их основе, а также для организации временных буферов обмена данными в ходе технологических процессов обработки;
- сервер виртуализации обеспечивает вычислительными ресурсами технологический контур НКПОР-МС в части общесистемных задач;
- сервер параллельной обработки обеспечивает высокопроизводительную обработку данных ДЗЗ с автоматическим контролем качества создаваемых продуктов;
- АРМ оперативного контроля качества предназначен для оперативного контроля состояния атрибутики метаданных L0-сбросов, а также определения/задания статуса сцен Л1В-продуктов;
- АРМ интерактивного контроля предназначен для интерактивного контроля и уточнения качества данных, а также формирования высокоуровневых информационных продуктов ДЗЗ.

На рис. 5 приведена общая структура информационно-вычислительных ресурсов НКПОР-МС.

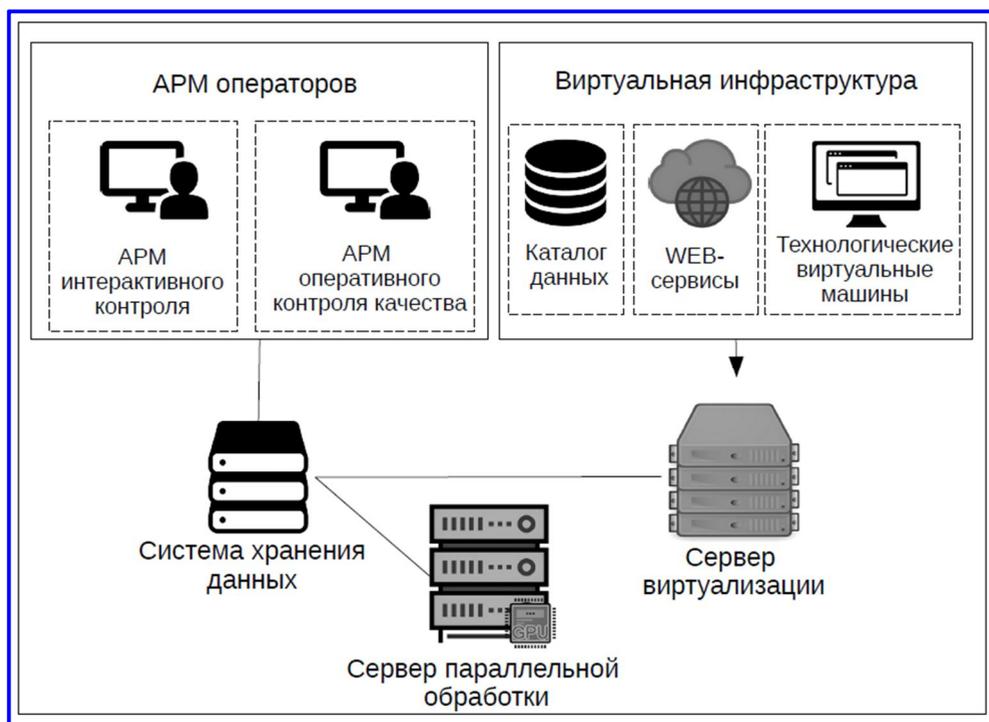


Рис. 5. Общая структура информационно-вычислительных ресурсов НКПОР-МС

Заключение

В работе рассматривается проблема создания программных технологий НКПОР-МС, функционирующего без доступа к сети Интернет и использования технологий ЕТРИС ДЗЗ. Приведен общий облик разрабатываемого комплекса программ, включающий компонент архивирования и каталогизации данных информационных продуктов, компоненты обработки данных и контроля качества информационных продуктов, компонент предоставления и т. д. Отмечены особенности разработки и реализации отдельных программных компонентов. Представлена общая структура информационно-вычислительных ресурсов НКПОР-МС.

Реализация программных технологий НКПОР-МС на основе данных ДЗЗ КА «Метеор-М» № 2.2 и КА типа «Канопус-В» планируется до конца 2023 года.

Литература

1. Гладков А. П., Курлыков А. М., Тохиян О. О. Облачные технологии в процессах обработки и распространения космической информации в ЕТРИС ДЗЗ / Материалы одиннадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 11 – 15 ноября 2013 г., Москва. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=78&thesis=4248>.

2. Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» / А. Н. Марков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. – Т. 13. – № 5. – С. 39 – 51.
3. Стрёмов А. С., Васильев А. И., Марков А. Н. Унифицированная классификация уровней обработки данных российских космических систем ДЗЗ // Материалы XVII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 11 – 15 ноября 2019 г., Москва. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=162&thesis=7985>
4. Технологии ведения банка базовых продуктов ДЗЗ для задач цифровой экономики РФ / А. Н. Марков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. – Т. 17. – № 5. – С. 79 – 90.

ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ И ОЦЕНКА ОРБИТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

И. Ю. Ильина

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва)

В 2017 году был запущен созданный в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» космический аппарат (КА) «Канопус-В-ИК» [1], на котором впервые появился широкозахватный ИК-радиометр МСУ-ИК-СРМ, разработанный в АО «РКС» [2]. Радиометр предназначен для обнаружения малоразмерных лесных пожаров (МЛП). Размещая подобные приборы на системе малых КА (МКА), появляется возможность обнаружения лесных пожаров на ранней стадии их развития. Важно рационально выбрать количество МКА, орбиты и другие параметры, фиксирующие орбитальное построение космической группировки. В докладе дается предельно краткое изложение решения этой задачи.

С целью решения поставленной задачи требуется: получить модель роста МЛП во времени; создать модель детектирования МЛП под разными углами визирования на полосе обзора ИК-радиометра; разработать схему (модель) обнаружения МЛП с помощью системы МКА; выбрать показатели эффективности работы такой системы и дать алгоритм их расчета; выполнить программу вычислений по сравнению различных вариантов системы МКА.

Основываясь на официальных методиках МЧС России [3], получена модель роста МЛП в виде следующей зависимости увеличения площади пожара S с течением времени T (час):

$$S = \text{square}(T) = S_{beg} + 1,32\sqrt{S_{beg}} V_{fr} T + 0,4356 V_{fr}^2 T^2, \quad (1)$$

где S_{beg} – начальная площадь МЛП, м²; $V_{fr} = 5199$ м/ч – скорость фронта МЛП.

Учитывая [2], минимальная площадь $\sigma(h)$ (м²) лесного пожара, обнаруживаемая в надире с высоты h (км) ИК-радиометром типа МСУ-ИК-СРМ, определяется по формуле:

$$\sigma(h) = \sigma(510)h^2/510^2 = 25h^2/510^2, \quad (2)$$

где $\sigma(510) = 25$ м² – обнаруживаемая площадь МЛП в надире для радиометра МСУ-ИК-СРМ с высоты орбиты спутника «Канопус-В-ИК», равной $h \approx 510$ км.

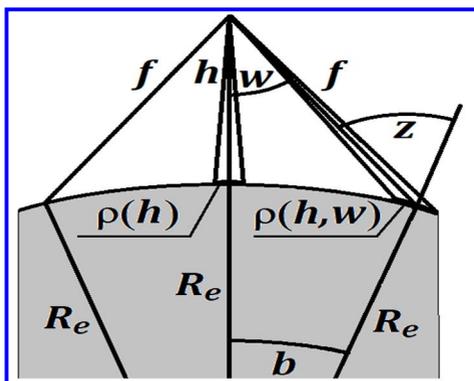


Рис. 1. Увеличение проекции пикселя $\rho(h, w)$ при росте угла визирования w

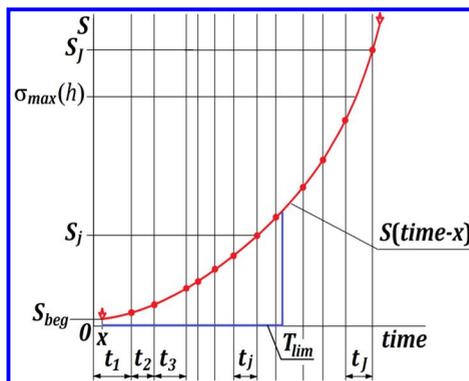


Рис. 2. Схема обнаружения МЛП с помощью системы спутников

Используя (2), по рис. 1, где показано увеличение проекции пикселя ИК-радиометра с ростом угла визирования w , выведена следующая пара формул для расчета минимально обнаружимой площади $\sigma(h, w)$ МЛП с высоты орбиты h при угле визирования w :

$$z = \sin^{-1}(\sin w(R_e + h)/R_e), \quad (3)$$

$$\sigma(h, w) = 25 R_e^2 \sin^2(z - w) / (510^2 \sin^2 w \cos z), \quad (4)$$

где z – зенитный угол; $R_e = 6371$ км – средний радиус Земли.

Пара формул (3) и (4) определяет модель детектирования МЛП на высоте h . Кроме того, далее понадобится еще и следующая формула для расчета центральных углов b на рис. 1:

$$b = z - w. \quad (5)$$

Далее рассмотрим представленную на рис. 2 схему обнаружения МЛП с помощью системы спутников.

На схеме по горизонтали откладывается время $time$ в часах, а по вертикали – площадь S пожара в m^2 . Выделены перерывы обзора $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_J$ между моментами наблюдения участка Земли, где развивается МЛП. Он достиг начальной обнаружимой площади S_{beg} на 1-ом перерыве обзора t_1 в момент x после его начала, а в конце перерыва t_j его площадь равна $S_j T_{lim}$. T_{lim} – предельное время, за которое желательно выявить МЛП. $\sigma_{max}(h)$ – минимально обнаружимая площадь на краю полосы захвата ИК-радиометра под наибольшим углом визирования W_{max} , равным для МСУ-ИК-СРМ $\pm 59^\circ$.

На рис. 2 дан график $S(time - x)$ роста площади МЛП по формуле (1) и отмечена минимально обнаружимая площадь $\sigma_{max}(h)$ на краю полосы захвата ИК-радиометра с высоты h . Отмечен J -й перерыв с длительностью t_j , когда $S_{j-1} < \sigma_{max}(h)$, а $S_j \geq \sigma_{max}(h)$. МЛП будет обязательно обнаружен в конце этого перерыва, если это не случилось ранее.

По схеме на рис. 2 можно определить вероятность F_j обнаружения МЛП в конце перерыва обзора t_j , если он не был обнаружен до этого. Обозначим через T_j время от момента x на 1-м перерыве обзора t_1 до окончания перерыва t_j :

$$T_j = \left(\sum_{m=1}^{m=j} t_m \right) - x. \quad (6)$$

Далее потребуется краткое обозначение для пары формул (3) и (4), используемой для вычисления минимальной обнаружимой площади $\sigma(h, w)$:

$$\sigma(h, w) = \text{finc}(h, w) \quad (7)$$

МЛП с площадью S_j обнаруживается при выполнении следующего неравенства:

$$\sigma(h, w) \leq S_j, \quad (8)$$

которое реализуется на всех углах визирования w , задаваемых неравенствами:

$$0 \leq w \leq \text{finc}^{-1}(h, S_j) \text{ при } S_j \leq \sigma_{\max}(h); \quad (9)$$

$$0 \leq w \leq W_{\max} \text{ при } S_j \leq \sigma_{\max}(h), \quad (10)$$

где finc^{-1} – функция, обратная к функции finc из (7); S_j вычисляется из (1).

Находим центральные углы $b(h, w)$ и $b_{\max}(h)$ для w и w_{\max} по формулам (3) и (5).

Появление МЛП в любом месте полосы обзора ИК-радиометра равновероятно, поэтому вероятность P_j обнаружения МЛП с площадью S_j в конце перерыва t_j равна:

$$P_j = b(h, w)/b_{\max}(h), \quad (11)$$

если реализуется условие (9), а при выполнении условия (10), очевидно:

$$P_j = 1. \quad (12)$$

Используя (11) и (12), находим искомую вероятность F_j обнаружения МЛП именно в конце перерыва обзора t_j , то есть при условии, что он не был обнаружен ранее:

$$F_j = P_j \prod_{m=1}^{m=j-1} (1 - P_m). \quad (13)$$

Любой показатель эффективности работы системы МКА для обнаружения МЛП должен учитывать найденную вероятность F_j . Будем применять следующие показатели:

– $V(T_{\text{lim}})$ – 9 вероятностей обнаружения МЛП после достижения им площади S_{beg} за лимиты времени T_{lim} из интервала 1 ÷ 5 часов, перечисляемые с шагом 0,5 часа (14);

– V_{mid} – средняя вероятность обнаружения МЛП на интервале $1 \div 5$ часов:

$$V_{\text{mid}} = \sum_{T_{\text{lim}}=1}^{T_{\text{lim}}=5} V(T_{\text{lim}}) / 9; \quad (15)$$

– T_{mid} , часов – среднее время обнаружения МЛП (после достижения S_{beg}) (16);

– S_{mid} , м^2 – средняя площадь обнаруженного МЛП (17).

Перечисленные показатели эффективности вычисляются по следующим формулам:

$$V(T_{\text{lim}}) = \sum_{m=1}^{m=j} F_m, \text{ при } T_j \leq T_{\text{lim}} < T_{j+1}; \quad (18)$$

$$T_{\text{mid}} = \sum_{j=1}^{j=J} T_j F_j; \quad (19)$$

$$S_{\text{mid}} = \sum_{j=1}^{j=J} S_j F_j = \sum_{j=1}^{j=J} \text{square}(T_j) F_j, \text{ с использованием формулы (1);} \quad (20)$$

а средняя вероятность V_{mid} по формуле (15) с использованием (18).

Расчеты по формулам (6) – (20) требуется повторить для всех последовательностей перерывов обзора, появляющихся в разных местах на территории лесов нашей страны. Затем нужно найти средние значения данных показателей по всему набору последовательностей. На основе этих средних значений, можно проводить анализ и выбор лучших вариантов орбитального построения систем МКА для обнаружения МЛП.

Для поиска всех последовательностей перерывов обзора использовалась компьютерная программа на базе «Векторной модели обзора Земли» [4]. Учитывая, что полный состав таких последовательностей чрезмерно велик, применялся метод Монте-Карло для выделения из этого состава репрезентативного подмножества, достаточного для высокой точности вычисления показателей эффективности.

Результаты проведенных расчетов

Исходные данные:

- территория обзора – область лесов России между 42° и 70° ;
- количество спутников в системе $N_{\text{sat}} = 2 - 20$ с шагом в 2 МКА;
- орбиты – круговые солнечно-синхронные с высотами $250 \div 1000$ км с шагом 50 км;
- начальная площадь МЛП $S_{\text{beg}} = 6 \text{ м}^2$ определена по формуле (2) на высоте 250 км;
- тип структуры системы МКА – «эквилибрантная».

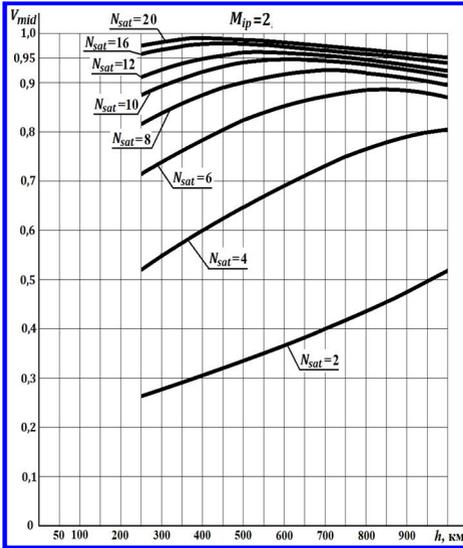


Рис. 3. Средняя вероятность V_{mid} обнаружения МЛП в зависимости от высоты орбиты h и числа спутников в системе N_{sat} при числе спутников $M_{ip} = 2$ в каждой плоскости орбиты

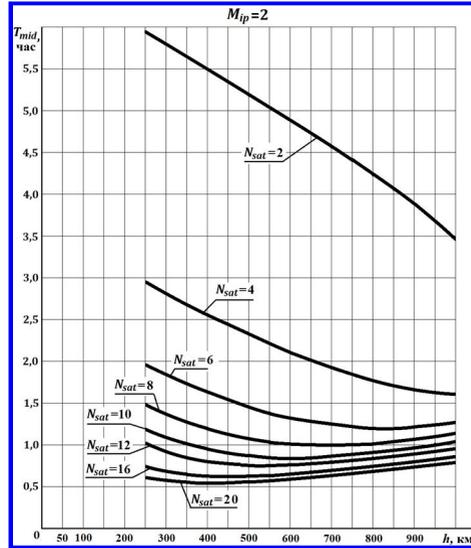


Рис. 4. Среднее время T_{mid} обнаружения МЛП в зависимости от высоты орбиты h и числа спутников в системе N_{sat} при числе спутников $M_{ip} = 2$ в каждой плоскости орбиты

«Эквидистантная» система включает: L -плоскости орбит по M_{ip} спутников в каждой, равномерно размещаемых в плоскости орбиты; фиксированные сдвиги $d\lambda$ (по долготе восходящих узлов соседних орбит) и dt (по фазе между 1-ми спутниками в соседних плоскостях); $M_{ip} = 2$ (при запуске МКА парами).

На рис. 3 – 4 представлены графики показателей эффективности V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} в зависимости от высоты орбиты h при разном числе спутников N_{sat} . Графики позволяют определить оптимальные высоты орбит h_{opt} , на которых реализуются наилучшие величины показателей эффективности. Они помогают также оценить, насколько быстро ухудшаются значения показателей при постепенном удалении от оптимальной высоты.

В окрестностях оптимальных высот орбит h_{opt} значения всех трех показателей: V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} ухудшаются не более, чем на 7%, даже при удалении от h_{opt} на ± 100 км. Это позволяет выбирать единые усредненные высоты орбит для совокупности: V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} без существенного их ухудшения по сравнению с оптимальными величинами.

С этой целью рассмотрим графики оптимальных высот орбит на рис. 5. Видно, что оптимальные высоты уменьшаются при увеличении числа МКА в системе. Графики для V_{mid} и T_{mid} близки друг к другу. График для S_{mid} проходит выше двух предыдущих на 50 – 150 км. Учитывая допустимость отклонения высоты орбиты от оптимального значения на ± 100 км, можно по рис. 6 выбирать лучшие высоты орбит одновременно для всех трех показателей эффективности: они находятся посередине между крайними графиками.

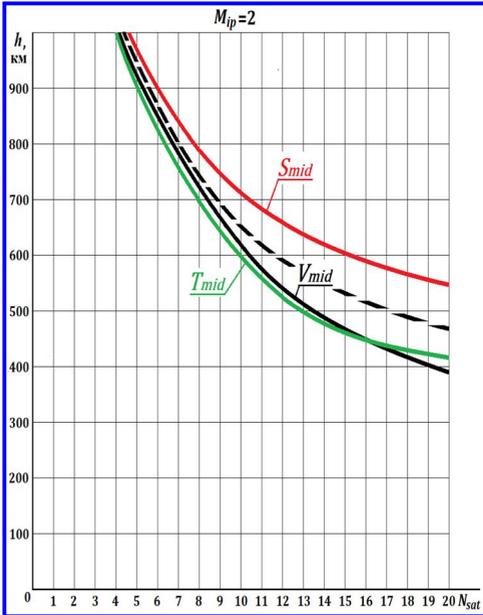


Рис. 5. Оптимальные высоты орбит при разных числах спутников N_{sat} для средней вероятности V_{mid} , среднего времени T_{mid} и средней площади S_{mid} обнаружения МЛП. Штрихами выделена средняя линия между крайними графиками

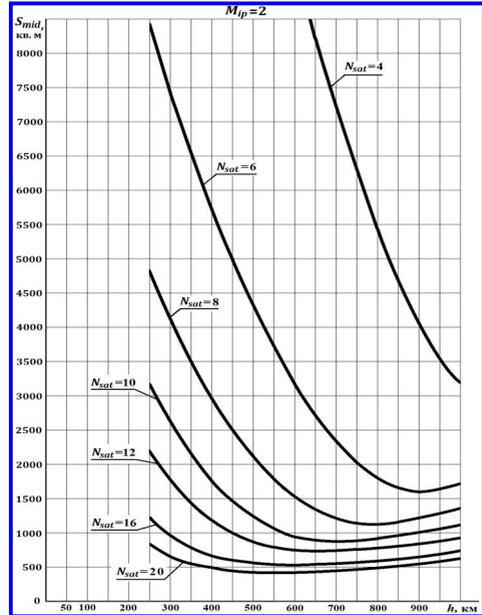


Рис. 6. Средняя площадь S_{mid} обнаруженного МЛП, в зависимости от высоты орбиты h и числа спутников в системе N_{sat} при числе спутников $M_{ip} = 2$ в каждой плоскости орбиты

Считаем приемлемыми следующие значения показателей: $V_{mid} \geq 0,9$; $T_{mid} \leq 1$ час; $S_{mid} \leq 1000 \text{ м}^2$. По графикам на рис. 3, 4, 6 видно, что они реализуются при $N_{sat} \geq 10$, почти удовлетворяются при $N_{sat} = 8$ и приближаются при $N_{sat} = 6$. Системы с $N_{sat} \geq 14$ в обозримое время вряд ли осуществимы. Поэтому далее рассматриваем лишь системы с $N_{sat} = 6, 8, 10$ и 12 МКА с их оптимальными орбитами (по рис. 5): $h_{opt} = 850$ км для 6 МКА; $h_{opt} = 750$ км для 8 МКА; $h_{opt} = 650$ км для 10 МКА; $h_{opt} = 600$ км для 12 МКА.

Очередная цель – выбор долготных сдвигов $d\lambda$. На рис. 7 представлены графики «средней вероятности» V_{mid} для диапазона $d\lambda = 0 \div 90^\circ$. Отмечены оптимальные $d\lambda$. На отсутствующих из-за экономии места аналогичных графиках для T_{mid} и S_{mid} можно было бы фиксировать практически те же оптимальные сдвиги $d\lambda$, поскольку в формулах (18) – (20) значения всех показателей эффективности зависят от одной и той же величины F_j .

На рис. 8 дан график «средней вероятности» V_{mid} обнаружения лесного пожара в зависимости от фазового сдвига $d\tau$ для системы из 8 МКА на орбитах с оптимальной высотой 750 км при оптимальном долготном сдвиге $d\lambda = 50^\circ$. На не представленных графиках $d\tau$ для T_{mid} и S_{mid} при 8 МКА, как и на рис. 8, лучший сдвиг $d\tau \approx 60^\circ$.

В табл. дан краткий перечень лучших результатов для систем из 6 ÷ 12 МКА.

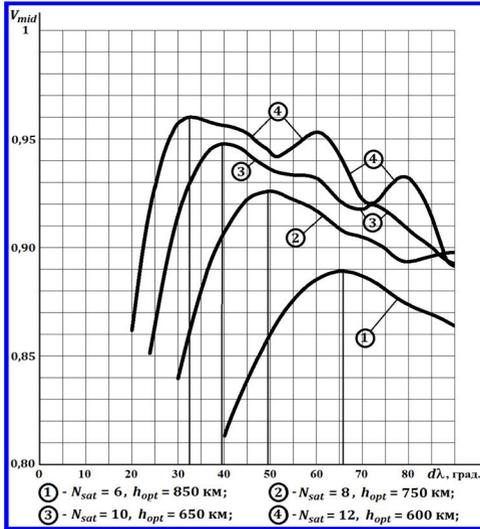


Рис. 7. Графики «средней вероятности» V_{mid} обнаружения МЛП в зависимости от долготного сдвига $d\lambda$ при фиксированных числах спутников N_{sf} и оптимальных высотах орбит h_{opt}

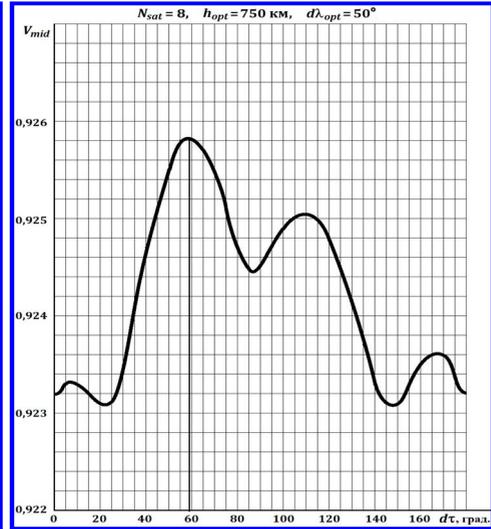


Рис. 8. График «средней вероятности» V_{mid} обнаружения МЛП в зависимости от фазового сдвига $d\tau$ для системы из 8 МКА на орбитах с оптимальной высотой 750 км при оптимальном долготном сдвиге 50°

Таблица

Лучшие показатели эффективности V_{mid} , T_{mid} и S_{mid} , достигаемые при оптимальных сочетаниях высот орбит h_{opt} , долготных сдвигов $d\lambda_{opt}$ и фазовых сдвигов $d\tau_{opt}$

N_{sat}	h_{opt} , км	$d\lambda_{opt}$, град.	$d\tau_{opt}$, град.	V_{mid}	T_{mid} , ч	S_{mid} , M^2
6	850	65	77	0,889	1,18	1610
8	750	50	60	0,926	0,98	1095
10	650	40	86	0,948	0,85	875
12	600	32	35	0,961	0,76	730

Выводы

По результатам выполненных расчетов целесообразно создание системы для раннего обнаружения МЛП из 6 – 8 МКА на 1-м этапе с доведением ее в дальнейшем до 10 – 12 МКА. Рекомендуемые параметры орбитального построения даны в табл.

Литература

1. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В-ИК» – Под редакцией Л. А. Макриденко, С. Н. Волкова, А. В. Горбунова, Р. С. Салихова, С. И. Терехова. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – 129 с.

2. Первые результаты работы ИК-радиометра МСУ-ИК-СРМ в составе КА «Канопус-В-ИК» / Н. П. Акимов [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018. – Т. 5 . – Вып. 4 . – С. 34 – 45.
3. Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РСЧС : Книга 2. – М.: Мин. ЧС, 1994. – URL: <https://pandia.ru/text/78/217/528.php?ysclid=la10hy15fc417594812>.
4. Анализ структуры группировок спутников типа «Метеор-М» / А. В. Горбунов, [и др.] // Космонавтика и Ракетостроение, 2020. – № 2 (113). – С. 5 – 21.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РАДИОЛИНИЙ ДЛЯ КА ДЗЗ

Г. А. Ерохин, А. Н. Ершов, А. Е. Мордвинов
(АО «Российские космические системы», г. Москва)

Рассмотрены вопросы дальнейшего развития высокоскоростных радиолиний для КА ДЗЗ. Отмечается, что до настоящего времени основные работы были сосредоточены в X-диапазоне частот, выделенном для систем ДЗЗ (8,025 – 8,4 ГГц). На данном направлении получены весьма хорошие результаты (более 2000 Мбит/с), но скорость передачи информации приближается к верхнему пределу для данной полосы частот. Для дальнейшего увеличения скорости радиолинии необходим переход в следующий выделенный для систем ДЗЗ Ka-диапазон частот (25,5 – 27,0 ГГц). Цель освоения Ka-диапазона – радиолиния со скоростью передачи не менее 10000 Мбит/с.

Ключевые слова: радиолиния, канал связи, поляризационная развязка, КА, ДЗЗ, модуляция с высокой кратностью, корректирующее кодирование, земная станция.

В настоящее время технические решения по созданию высокоскоростных радиолиний (ВРЛ) для КА ДЗЗ в основном сосредоточены в X-диапазоне радиочастот (8,025...8,4 ГГц с шириной полосы 375 МГц). Следует отметить серьезные успехи на этом направлении. В начале нулевых годов была создана бортовая и наземная аппаратура, позволившая передавать информацию по двум частотным каналам со скоростью до 245 Мбит/с. Такими радиолиниями были оснащены КА ДЗЗ «Монитор-Э», «Сич-1М», «БелКА», «Метеор-М», «Канопус-В», «Кондор-Э» и др.

В 2008 году в рамках ОКР «Прием» и в 2009 году для КА ДЗЗ нового поколения «Метеор-М» № 3 и «Метеор-МП» были начаты работы по созданию наземной и бортовой аппаратуры для радиолинии со скоростью передачи не менее 800 Мбит/с. К сожалению, были периоды, когда эти работы приостанавливались, но к настоящему времени созданы образцы аппаратуры, обеспечивающие передачу данных с частотой символов до 300 МГц и модуляцией до 32АФМ (5 бит на символ), что обеспечивает в разрешенной полосе частот транспортную скорость 1500 Мбит/с (информационная скорость не менее 1300 Мбит/с) [1] (рис. 1).

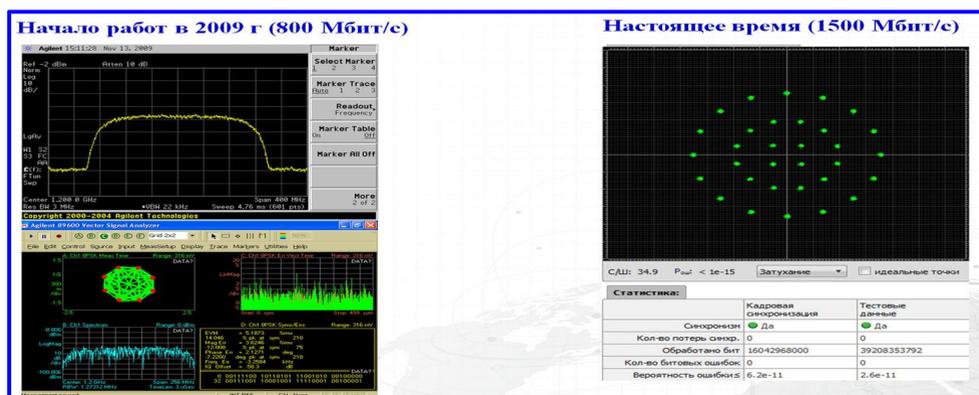


Рис. 1.

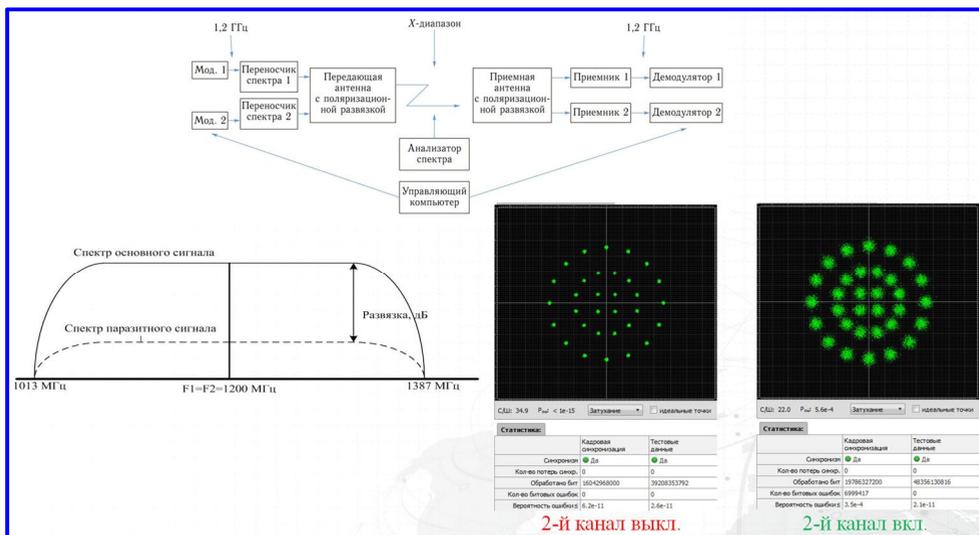


Рис. 2.

Следующим важным этапом работ было решение задачи удвоения скорости передачи информации за счет передачи двух радиосигналов на одной несущей частоте, но с разными направлениями вращения круговой поляризации при коэффициенте эллиптичности, стремящемся к единице. Такая НИОКР была организована в АО «Российские космические системы» в инициативном порядке. По разработанной документации были изготовлены экспериментальные образцы антенн с двухканальными облучателями с правой и левой круговой поляризацией. Экспериментальная проверка подтвердила возможность одновременной передачи двух радиосигналов на одной несущей частоте при видах модуляции до 32АФМ [2] (рис. 2).

Другим этапом совершенствования высокоскоростных радиолиний стала разработка СТО ГК Роскосмос 1018 – 2019 «Аппаратура бортовая автоматических космических аппаратов. Информационное взаимодействие. Высокоскоростная радиолиния». Стандарт предусматривает виды модуляции до 64АФМ, помехоустойчивое кодирование и динамически изменяемые сигнально-кодовые конструкции (ДИСКК), которые позволяют адаптировать режим передачи к изменяющемуся в ходе сеанса (изменение наклонной дальности) энергетическому балансу радиолинии.

Все вышеперечисленные достижения реализуются сегодня в создаваемой АО «Российские космические системы» высокоскоростной радиолинии для КА ДЗЗ «Ресурс-ПМ», где при передаче двух радиосигналов на одной несущей частоте с правой и левой круговой поляризацией информационная скорость превысит 2000 Мбит/с.

Создание бортовой аппаратуры для будущих КА ДЗЗ предполагается на базе унифицированных модулей, создаваемых сегодня в рамках ОКР «ИБИС». Разработка базируется исключительно на отечественной элемент-

ной базе, на разработанных и утвержденных СТО ГК Роскосмос. Примеры приборов и блоков представлены на рис. 3.

На последующем этапе, создав антенные системы с необходимой поляризационной развязкой, можно еще удвоить информационную скорость (рис. 5).

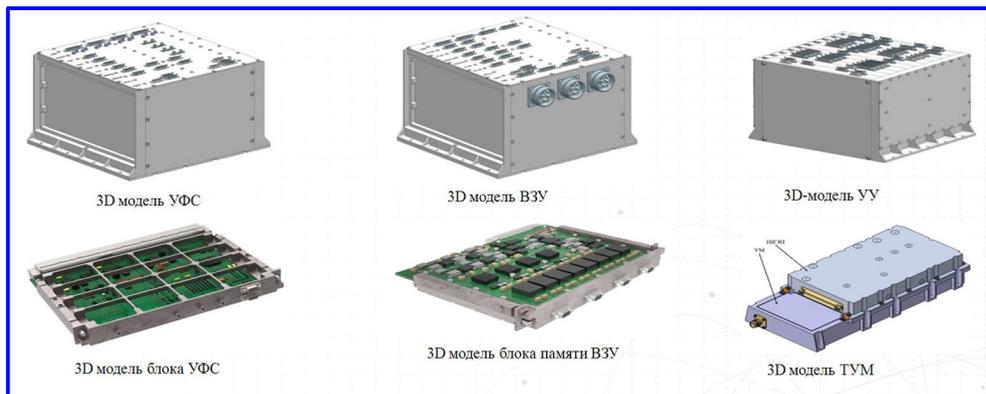


Рис. 3.

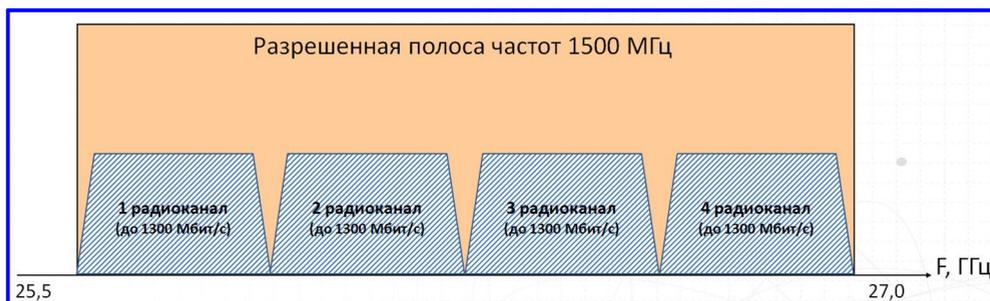


Рис. 4.



Рис. 5.

Параметр		Угол места					
		5	10	15	20	25	≥35
Ø 4,8 м	Транспорт.	N×900	N×1200	N×1200	N×1200	N×1500	N×1500
	Информ.	N×780	N×1040	N×1040	N×1040	N×1300	N×1300
Ø 6,0 м	Транспорт.	N×900	N×1200	N×1200	N×1500	N×1500	N×1500
	Информ.	N×780	N×1040	N×1040	N×1300	N×1300	N×1300
Ø 7,0 м	Транспорт.	N×900	N×1200	N×1500	N×1500	N×1500	N×1500
	Информ.	N×780	N×1040	N×1300	N×1300	N×1300	N×1300

N – число каналов. Виды модуляции: 8ФМ, 16АФМ, 32АФМ

Рис. 6.

Отличием радиолинии *Ka*-диапазона от радиолинии *X*-диапазона будет ее существенно большая зависимость от потерь при прохождении радиосигнала сквозь атмосферу Земли. Даже при отсутствии дождя потери в спокойной атмосфере [3] при угле места антенны земной станции 5° в *Ka*-диапазоне составят 6 дБ против 0,25 дБ в *X*-диапазоне. В дожде потери могут превышать 20 дБ [3].

Расчеты показывают, что для передачи с орбиты 800 км данных со скоростью в канале 1500 Мбит/с требуется передатчик с выходной мощностью в линейном режиме не менее 12 Вт, бортовая антенна диаметром 0,4 м и земная антенна диаметром 4,8...7 м. И даже при этом на низких углах места не обеспечиваются условия приема с максимальной скоростью (рис. 6).

При передаче с неизменной в сеансе связи скоростью пришлось бы либо ограничиться передачей с модуляцией 8ФМ, либо начинать сеанс связи при более высоких углах места антенны земной станции. Режим с ДИСКК позволяет начать передачу с модуляции 8ФМ, затем перейти на 16АФМ, затем на 32АФМ, а после прохождения максимального угла места по мере его снижения произвести переключение видов модуляции в обратном порядке. Радиолинии, создаваемые в соответствии с СТО ГК 1018-2019, обладают такими возможностями.

Создание ВРЛ *Ka*-диапазона с суммарной скоростью передачи полезной информации до 10 Гбит/с позволит решить проблему «узкого горла» для КА ДЗЗ с оптической и радиолокационной аппаратурой сверхвысокого разрешения.

Литература

1. Экспериментальная отработка комплексов высокоскоростной передачи информации для КА ДЗЗ / А. Н. Ершов [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 56 – 64.
2. Экспериментальное исследование эффективности поляризационного уплотнения для сверхскоростной радиолинии систем ДЗЗ / А. А. Аджибеков [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2020. – Т. 7. – Вып. 2. – С. 11 – 20.
3. Спутниковая связь и вещание: Справочник. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 95 – 100.

ОБТЕКАНИЕ ИОНОСФЕРНЫМ ПОТОКОМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Н. И. Сидняев

(Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва)

В статье изучается влияние электромагнитного поля космического пространства на космические аппараты. Получены аналитические зависимости для энергии, излучаемой спутником с учетом направления распространения волн Альвена. Постулируется, что линейный член в уравнении энергии влияет на индукцию при произвольном законе распределения тока в спутнике в электромагнитном поле. Доказано, что при движении спутника на средних высотах распределение тока в магнитосферной плазме может быть удовлетворительно аппроксимировано отрезками прямых линий с максимумом в точке нулевого потенциала, причем индуцированные компоненты магнитного поля можно определить интегрированием. Определена индуцированная компонента магнитного поля. Отмечено, что в отсутствие диссипации энергии полная энергия излучения выражается в виде произведения скорости спутника на индуктивное сопротивление.

Ключевые слова: космический аппарат, температура, давление, вакуум, энергия, скорость, спутник, ионосфера, волны, сопротивление, электроны, энергия, метод.

Введение

В космическом пространстве на КА в полете воздействует обширный комплекс факторов: потоки нейтральных атомов (O): $F \approx 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ при вакууме $P \approx 10^{-4} - 10^{-11} \text{ Па}$ вызывает сублимацию материалов, эрозию и потерю массы полимерных материалов загрязнению поверхности, рассеяние света в окрестности КА, снижение прочности и надежности оборудования. Вторичные (индуцированные факторы), как электризация КА ($0,1 - 10^{-4} \text{ В}$), объемное заряджение диэлектриков и собственная внутренняя атмосфера КА вызывает электрические заряды, электромагнитные помехи [1 – 3]. Холодная и горячая космическая плазма в ионосфере, магнитосфере (авроральные области) и плазмосфере Земли, солнечное электромагнитное излучение, электростатическое поле, метеорная материя, твердые частицы искусственного происхождения и другие факторы вызывают разнообразные физико-химические процессы. Некоторые из воздействующих космических факторов, например, космическая плазма и солнечное ультрафиолетовое излучение оказывают влияние лишь на приповерхностные слои материалов [4 – 8]. Другие, такие как заряженные частицы высокой энергии вместе с создаваемыми ими в элементах конструкции КА вторичными частицами и квантами способны проникать глубоко в толщу материалов, а также во внутренние отсеки КА [9 – 12]. При этом воздействие космических микрочастиц может приводить как к постепенному ухудшению свойств материалов и характеристик бортовых си-

стем и, как следствие, к отказам в работе КА по истечении некоторого периода эксплуатации, так и к возникновению внезапных отказов в работе бортовой аппаратуры, непосредственно сопровождающих воздействие [13 – 16].

Следует отдельно учесть электромагнитное солнечное излучения в межпланетном и околоземном пространстве, влияющие на корпус КА в корпусе спутника и направлены вниз по потоку [1 – 2]. Так, например, течение ионосферы у торцов вызывает поток, направленный над спутником от торцов к плоскости симметрии, а под спутником – от плоскости симметрии к торцам; в результате в спутной струе [3 – 4], или следе, за спутником происходит вращение каждой частицы вокруг оси, проходящей через нее и параллельной местному вектору скорости потока ионосферы. Для спутников большого удлинения можно считать, что свободные вихри образуют плоскую вихревую пелену; для корпуса малого удлинения вихревая система является пространственной. Свободные вихри вызывают (индуцируют) в области между торцами корпуса потоки, направленные вниз, которые, налагаясь на набегающий ионосферный поток, отклоняют последний вниз на определенный угол. В результате отклоняющая сила элемента корпуса спутника перпендикулярна к набегающему потоку, отклоняется назад на тот же угол [5 – 10]. Разлагая эту силу на компоненты вдоль и перпендикулярно вектора скорости, получаем дополнительное индуктивное сопротивление в электростатическом поле. Необходимо отметить, что индуктивное сопротивление (обусловленное волнами Ван Альвена) спутника, движущегося в электростатическом поле с постоянной скоростью v перпендикулярно линиям постоянного магнитного поля B_0 , исследовалось в работе [11 – 14]. Их исследование явилось развитием работы [2], посвященной изучению характеристик спутника заданной формы при переменной величине внутреннего тока.

Геомагнитную зону заряженных частиц космического излучения называют радиационным поясом (или поясами) Земли. Электроны с энергией 100 кэВ и больше образуют в геомагнитной области две зоны. Эти зоны получили название внутреннего и внешнего естественного радиационного пояса Земли (ЕРПЗ) [3]. Между внутренним и внешним поясами наблюдается пространство в интенсивности потока электронов. Внутренний пояс располагается на высоте от 1000 км над поверхностью Земли до 13000 км. Выше 13000 км и примерно до 65000 км располагается внешний радиационный пояс Земли с максимумом потока электронов ($E > 40$ кэВ) порядка 500 000 000 частиц/см²с на высоте около 16500 км.

Электростатические пояса представляют собой непрерывно изменяющуюся, динамичную систему, состояние которой зависит от состояния солнечной активности и процессов, которые реализуются в настоящий момент в магнитосфере Земли. Экспериментальные данные указывают на то, что увеличение скорости солнечного ветра приводит к увеличению потока высокоэнергичных электронов на границе магнитосферы, и усиливается диффузия этих электронов внутрь радиационных поясов (рис. 1).

Таблица 1

Факторы космического пространства	Области локализации и происхождение	Вызываемые эффекты
<p>Поток нейтральных атомов (О): $F \sim 10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ Вакуум $P \sim 10^{-4} - 10^{-11} \text{ Па}$</p>	Верхняя атмосфера Земли, межпланетное пространство	<ul style="list-style-type: none"> • Сублимация материалов. • Эрозия и потеря массы полимерных материалов
<p>Электромагнитное солнечное излучение: $F = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	Межпланетное и околоземное пространство	<ul style="list-style-type: none"> • Усиление потерь массы. • Изменение механических, оптических и электрофизических свойств материалов. • Фотозлектронная эмиссия. • Нагрев, термоциклирование
<p>Холодная плазма: $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ К}$ $n \sim 10^6 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$</p>	Ионосфера и плазмосфера Земли	<ul style="list-style-type: none"> • Заряжение материалов: $\varphi \sim 0,1 - 10 \text{ В}$. • Токи утечки. • Свечение в окрестности КА
<p>Плазма межпланетного пространства: $T \sim 10^5 \text{ К}$, $n \sim 10^7 \text{ м}^{-3}$ $v \sim 5 \cdot 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	Солнечный ветер	<ul style="list-style-type: none"> • То же, что холодная плазма, а также радиационное воздействие на приповерхностные слои материалов
<p>Горячая магнитосферная плазма: $T \sim 10^3 - 10^5 \text{ эВ}$ $n \sim 10^6 \text{ м}^{-3}$</p>	Магнитосфера Земли: область ГСО, плазменный слой, авроральные области	<ul style="list-style-type: none"> • Заряжение материалов: $\varphi \sim 1 - 30 \text{ кВ}$. • Радиационные эффекты
<p>Электроны и ионы РПЗ: $E \sim 0,1 - 30 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^8 - 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	Область захваченной радиации внутри магнитосферы Земли	<ul style="list-style-type: none"> • Радиационные эффекты (эффекты дозы и мощности дозы): изменение электрофизических, оптических и механических свойств
<p>Протоны солнечных вспышек: $E \sim 1 - 10^4 \text{ МэВ}$ $F \sim 10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	СКЛ	<ul style="list-style-type: none"> • Радиационные эффекты
<p>Потоки ядер высоких энергий: $E \sim 10^3 - 10^{14} \text{ МэВ}$ $F \sim 10^2 - 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	ГКЛ	<ul style="list-style-type: none"> • Локальные радиационные повреждения. • Сбой в элементах микроэлектроники. • Световые вспышки
<p>Потоки твердых частиц и тел: $F \sim 10^{-4} - 10^{-2} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ $v \sim 10^3 - 10^5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$</p>	Метеороиды, газопылевые оболочки ядра комет, космический мусор в ОКП	<ul style="list-style-type: none"> • Образование кратеров, эрозия поверхности, сквозной пробой стенок. • Образование вторичных продуктов, эмиссионные явления, инициирование электрических разрядов
<p>Вторичные (индуцированные) факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • электризация КА $\varphi \sim 0,1 - 10^4 \text{ В}$; • объемное заряджение диэлектриков; • СВЧ КА; • собственная внутренняя атмосфера КА 	Область пространства в окрестности КА, поверхность КА и его внутренние отсеки	<ul style="list-style-type: none"> • Электрические разряды: электромагнитные помехи, паразитные сигналы в кабелях, разрушение элементов оборудования и конструкции. • Загрязнение поверхности, рассеяние света в окрестности КА, снижение электрической прочности оборудования. • Окисление и коррозия элементов электронного оборудования

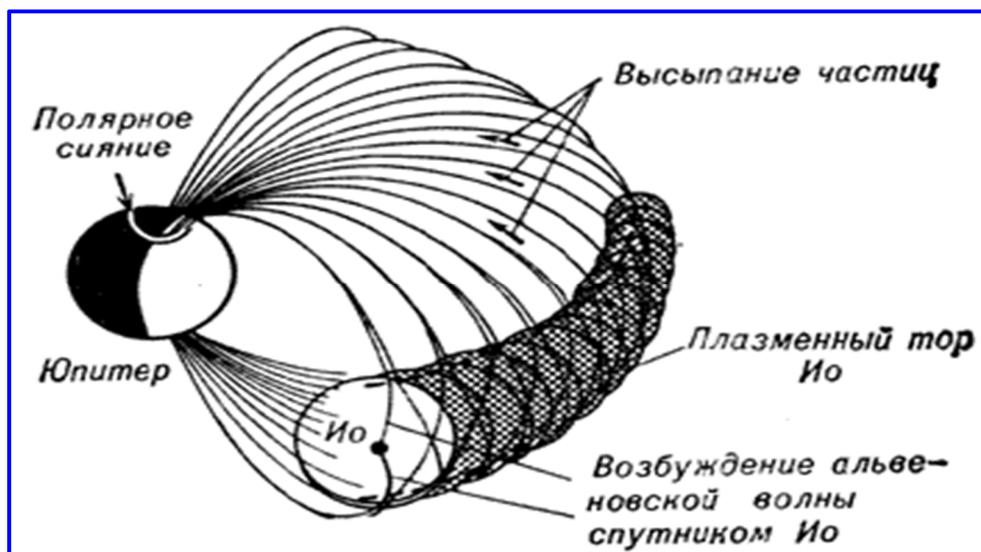


Рис. 1. Схема распределения альвеновской волны в межпланетном пространстве

Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты

Ионосфера, часть атмосферы планеты Земля, содержащая в значительном количестве свободные электроны и ионы, появляющиеся под воздействием идущих от Солнца ультрафиолетового излучения и рентгеновских лучей [4 – 6]. Степень ионизации в значительной степени зависит от солнечной активности. Протяженность ионосферы Земли – от 80 км до 1000 км над земной поверхностью (в пределах атмосферы в радиационных поясах Ван Альвена) [2, 3, 9]. Состоит из нескольких условных слоев, которые отличаются степенью концентрации в них электронов. Их принято обозначать по порядку снизу вверх: *D*, *E*, *F1*, *F2*, *G*. В самых нижних слоях *D* и *E* (слой Хевисайда-Кеннелли) ионизации подвергаются молекулы, в то время как в верхнем слое *F* ионизируются атомы [3]. На расстоянии 80 – 100 км над Землей расположен слой, называемый ионосферой, который обладает электропроводимостью (благодаря наличию ионизированных газов).

Целью исследования является выявление механизма возникновения индуцированного сопротивления спутников, а также индуцированных компонент магнитного поля в условиях электризации КА при воздействии вторичных индуцированных факторов.

Поскольку магнитное и электростатическое поля планеты полагаются неподвижными в пространстве, а поверхность спутника вращается относительно геомагнитных и геоэлектрических силовых линий, то униполярная и электродинамическая ЭДС наводится во всех токопроводящих контурах спутника, пересекающих геомагнитные силовые линии. Вполне понятно, что в любом искусственном электропроводном проводнике спутника также будет наводиться униполярная ЭДС. Ее величина зависит от протяженности проводника, параметров геомагнитного поля и от ориентации спутника относительно геомагнитных силовых линий и электростатического поля. Так, при обте-

кании спутника невозмущенным ионизированным потоком возникает разность давлений над спутником и под ним. В результате часть ионоплазмы на концах спутника перетекает из зоны большего давления в зону меньшего давления. Поток ионоферы перетекает с нижней поверхности спутника на верхнюю и накладывается на ионизированный поток, набегающий на верхнюю часть спутника, что приводит к образованию завихрений массы ионоплазмы за задней кромкой, то есть образуется вихревой жгут. Ионофера в вихревом жгуте вращается. Скорость вращения вихревого жгута различна, в центре она наибольшая, а по мере удаления от оси вихря – уменьшается.

Определение индуцированных компонент магнитного поля

В работах [1 – 2] были выполнены приближенные расчеты величины тока, поступающего в спутник из ионоферы, и на основании полученного распределения тока с использованием закона Био – Савара было рассчитано индуцируемое магнитное поле. Величина сопротивления определялась численной оценкой интегралов, в подынтегральные выражения которых входили также и индуцированные магнитные поля. Значения этих интегралов представляли собой энергию, излучаемую волнами Альвена (рис. 2).

Вывод работы [1] состоит в том, что в отсутствии диссипации энергии в следе полная энергия излучения выражается в виде произведения скорости спутника на электростатическое поле и что динамика спутника, обусловленная волнами Альвена, входит в величину индукции, а не является дополнительной составляющей.

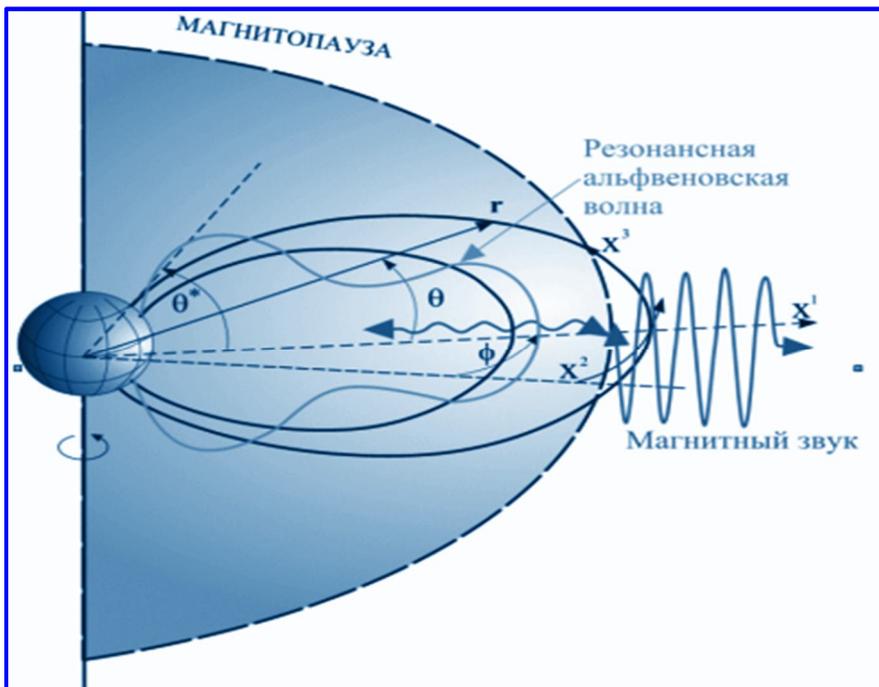


Рис. 2. Энергия, излучаемая волнами Альвена

Энергия, излучаемая спутником, определяется уравнением (1), которое приводится здесь (с учетом изменения обозначений осей) [1]:

$$P = V_A \mu \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[h_x^2 + 2h_y \left(\frac{B_0}{\mu} \right) \sin \alpha + h_y^2 \right] dx dy, \quad (1)$$

где

$$h_y = \frac{1}{2\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{j(\xi)(x-\xi)}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi. \quad (2)$$

Здесь h_x выражается аналогичным образом при замене $x - \xi$ на $-y$, а α – малый угол между направлением поля B_0 (осью z) и направлением распространения волн Альвена. Рассмотрим предварительно только часть уравнения (1), являющуюся линейной относительно h_y . После подстановки соотношения (2) будем иметь:

$$P' = \frac{B_0 V}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-l/2}^{l/2} \left[\frac{j(\xi)(x-\xi) d\xi}{(x-\xi)^2 + y^2} \right] dx dy, \quad (3)$$

где функция $j(\xi)$ является током в крыльях волн Альвена. Предполагается, что эта функция кусочно-непрерывная и может быть определена. Если интегрировать сперва по x , то можно отметить, что интеграл в этом случае не существует. Однако, если интегрировать сперва по y и переписать уравнение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** в виде:

$$P' = \frac{B_0 V}{\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy}{y^2 + (x-\xi)^2} \right] \times (x-\xi) dx \right\} j(\xi) d\xi, \quad (4)$$

то можно показать, что интеграл существует.

Рассмотрим несобственный интеграл:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy}{y^2 + (x-\xi)^2}. \quad (5)$$

Здесь особые точки $y = \pm|x - \xi|i$ – простые полюса подынтегральной функции интеграла **Ошибка! Источник ссылки не найден.** В верхней полуплоскости располагается точка $y = |x - \xi|i$.

Тогда по теореме вычетов получаем:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy}{y^2 + (x - \xi)^2} = 2\pi i \operatorname{Res}_{y=|x-\xi|} \frac{1}{y^2 + (x - \xi)^2} = 2\pi i \lim_{y \rightarrow |x-\xi|} \left[(y - |x - \xi|) \frac{1}{y^2 + (x - \xi)^2} \right] = 2\pi i \lim_{y \rightarrow |x-\xi|} \frac{1}{2y} = \frac{\pi}{|x - \xi|}.$$

Уравнение **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, следовательно, приобретает вид:

$$P' = B_0 V \int_{-l/2}^{l/2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - \xi)}{|x - \xi|} dx \right] j(\xi) d\xi. \quad (6)$$

Интеграл по x все же не может быть взят до тех пор, пока не будет определено его главное значение следующим образом:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - \xi)}{|x - \xi|} dx = \lim_{A \rightarrow \infty} \left[\int_{-A}^{\xi} (-dx) + \int_{\xi}^A dx \right] = \lim_{A \rightarrow \infty} \left[-x \Big|_{-A}^{\xi} + x \Big|_{\xi}^A \right] = \lim_{A \rightarrow \infty} [-\xi - A + A - \xi] = -2\xi.$$

Следовательно, уравнение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** может быть представлено в форме:

$$P' = -B_0 V \int_{-l/2}^{l/2} 2\xi j(\xi) d\xi, \quad (7)$$

но, согласно работе [1]:

$$j(\xi) = \frac{d I(\xi)}{d\xi} \frac{1}{2}, \quad (8)$$

где $I(\xi)$ – ток в спутнике.

Таким образом, подставляя выражение для $j(\xi)$ в уравнение (7), интегрируя его по частям, имея при этом в виду, что $I(\pm l/2) = 0$, получим:

$$P' = -B_0 V \int_{-l/2}^{l/2} \xi \frac{d}{d\xi} I(\xi) d\xi = -B_0 V \xi I(\xi) \Big|_{-l/2}^{l/2} + B_0 V \int_{-l/2}^{l/2} I(\xi) d\xi = VB_0 \int_{-l/2}^{l/2} I(\xi) d\xi \equiv VD, \quad (9)$$

где $-D$ по определению индуктивное сопротивление.

Этот результат показывает, что линейный относительно h_y член в уравнении (1) дает индуктивное сопротивление КА при произвольном законе распределения тока $I(\xi)$ в спутнике. Два других члена в уравнении (1) положительны, и поэтому ясно, что полное сопротивление будет больше индуктивного. В работах [1, 2] было показано, что при движении спутника на малых высотах распределение тока может быть удовлетворительно аппроксимировано отрезками прямых линий с максимумом в точке нулевого потенциала, то есть в точке, где потенциал спутника равен потенциалу плазмы. Математически это можно записать в виде:

$$I = \begin{cases} I_{\max} \frac{l/2 + \xi}{l/2 + a}, & -l/2 \leq \xi \leq a; \\ I_{\max} \frac{l/2 - \xi}{l/2 - a}, & a \leq \xi \leq l/2. \end{cases} \quad (10)$$

Из соотношения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** получаем:

$$j(\xi) = \begin{cases} \frac{I_{\max}}{2(l/2+a)}, & -l/2 \leq \xi \leq a; \\ \frac{I_{\max}}{2(l/2-a)}, & a \leq \xi \leq l/2. \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, индуцированные компоненты магнитного поля можно определить интегрированием. Предварительно рассмотрим компоненту h_x с учетом выражения **Ошибка! Источник ссылки не найден.**:

$$h_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{yj(\xi)}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi = \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \int_{-l/2}^a \frac{y}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi + \frac{1}{l/2-a} \int_a^{l/2} \frac{y}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi \right].$$

Произведем замену $t = \xi - x$:

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \int_{-x-l/2}^{-x+a} \frac{y}{t^2 + y^2} dt + \frac{1}{l/2-a} \int_{-x+a}^{-x+l/2} \frac{y}{t^2 + y^2} dt \right] = \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \frac{t}{y} \Big|_{t=-x-l/2}^{-x+a} + \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \frac{t}{y} \Big|_{t=-x+a}^{-x+l/2} \right] = \\ &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \left(\operatorname{arctg} \frac{-x+a}{y} - \operatorname{arctg} \frac{-x-l/2}{y} \right) + \frac{1}{l/2-a} \left(\operatorname{arctg} \frac{-x+l/2}{y} - \operatorname{arctg} \frac{-x+a}{y} \right) \right]. \end{aligned}$$

Для упрощения полученного выражения возьмем арктангенс тангенса от разности арктангенсов и используем формулу разности тангенсов:

$$\begin{aligned} h_x &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{-x+a}{y} - \operatorname{arctg} \frac{-x-l/2}{y} \right) + \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \left(\operatorname{arctg} \frac{-x+l/2}{y} - \operatorname{arctg} \frac{-x+a}{y} \right) \right] = \\ &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x+a)/y] - \operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x-l/2)/y]}{1 + \operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x+a)(-x-l/2)/y^2]} + \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x+l/2)/y] - \operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x+a)/y]}{1 + \operatorname{tg} \operatorname{arctg} [(-x+l/2)(-x+a)/y^2]} \right] = \\ &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \frac{(-x+a)/y - (-x-l/2)/y}{1 + (-x+a)(-x-l/2)/y^2} + \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \frac{(-x+l/2)/y - (-x+a)/y}{1 + (-x+l/2)(-x+a)/y^2} \right] = \\ &= \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \frac{y(a+l/2)}{y^2 + (-x+a)(-x-l/2)} + \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \frac{y(l/2-a)}{y^2 + (-x+l/2)(-x+a)} \right]. \end{aligned}$$

Внеся минус под знак арктангенса, в итоге получим:

$$h_x = \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[\frac{1}{l/2+a} \operatorname{arctg} \frac{y(-a-l/2)}{y^2 + (x-a)(x+l/2)} - \frac{1}{l/2-a} \operatorname{arctg} \frac{y(a-l/2)}{y^2 + (x-a)(x-l/2)} \right].$$

Аналогично ищем индуцированную компоненту магнитного поля h_y :

$$h_y = \frac{1}{2\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{j(\xi)(x-\xi)}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi = \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[\frac{1}{l/2+a} \int_{-l/2}^a \frac{x-\xi}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi - \frac{1}{l/2-a} \int_a^{l/2} \frac{x-\xi}{(x-\xi)^2 + y^2} d\xi \right]. \quad (12)$$

Делая замену вида $t = \xi - x$, получим:

$$h_y = \frac{I_{\max}}{4\pi} \left[-\frac{1}{l/2+a} \int_{-x-l/2}^{-x+a} \frac{t}{t^2 + y^2} dt + \frac{1}{l/2-a} \int_{-x+a}^{-x+l/2} \frac{t}{t^2 + y^2} dt \right].$$

Используя неопределенный интеграл вида:

$$\int \frac{t}{t^2 + y^2} dt = \frac{1}{2} \int \frac{d(t^2)}{t^2 + y^2} = \frac{1}{2} \ln[t^2 + y^2].$$

Выражение (12) примет вид:

$$\begin{aligned} h_y &= \frac{I_{\max}}{8\pi} \left[-\frac{1}{l/2 + a} \ln[t^2 + y^2] \Big|_{t=-x-l/2}^{-x+a} + \frac{1}{l/2 - a} \ln[t^2 + y^2] \Big|_{t=-x+a}^{-x+l/2} \right] = \\ &= \frac{I_{\max}}{8\pi} \left[-\frac{1}{l/2 + a} \ln \frac{(-x+a)^2 + y^2}{(x+l/2)^2 + y^2} + \frac{1}{l/2 - a} \ln \frac{(-x+l/2)^2 + y^2}{(-x+a)^2 + y^2} \right]. \end{aligned}$$

Окончательно получим выражение:

$$h_y = \frac{I_{\max}}{8\pi} \left[\frac{1}{l/2 - a} \ln \frac{(x-l/2)^2 + y^2}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{1}{l/2 + a} \ln \frac{(x-a)^2 + y^2}{(x+l/2)^2 + y^2} \right]. \quad (13)$$

Подставляя выражение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** в **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, получим:

$$\begin{aligned} P' &= VB_0 \int_{-l/2}^{l/2} I(\xi) d\xi = VB_0 I_{\max} \left[\frac{1}{l/2 + a} \int_{-l/2}^a (l/2 + \xi) d\xi + \frac{1}{l/2 - a} \int_a^{l/2} (l/2 - \xi) d\xi \right] = \\ &= \frac{VB_0 I_{\max}}{2} \left[\frac{1}{l/2 + a} \left(al + a^2 + \frac{l^2}{4} \right) + \frac{1}{l/2 - a} \left(\frac{l^2}{4} - al + a^2 \right) \right] = \frac{VB_0 I_{\max}}{2} \left[\frac{(l/2 + a)^2}{l/2 + a} + \frac{(l/2 - a)^2}{l/2 - a} \right] = \frac{I_{\max} B_0 l V}{2}. \end{aligned}$$

Необходимо отметить, что исследуемая величина, как следует из уравнения **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, тождественно равна произведению индуктивного сопротивления на скорость. При интегрировании сначала по x (при определении главного значения), а затем по y , величина энергии даст другие результаты, что не является необычным, так как это зависит от применения главного значения интеграла к физической проблеме. В работе преобразования сделаны так, чтобы результат имел определенный физический смысл.

Так, например, два члена в уравнении (1), включающие h_x^2 и h_y^2 , для типичных условий движения спутника обычно на несколько порядков величины меньше, чем индуктивное сопротивление. Так как в работе [1] результаты были получены на основании только численных расчетов (численной оценки расходящегося интеграла) и оценки каждого из трех членов, по-видимому, не производились, то ясно, почему в [1] пришли к выводу, что волновое сопротив-

ление КА является частью индуктивного сопротивления. Представленные в статье аналитические исследования дают понять, что их заключение ошибочно.

Дополнительно можно отметить, что в работах [4, 9] предложен механизм генерации узкополосного электромагнитного излучения в ультранизкочастотном диапазоне, сопровождающего полет КА на активном участке горизонтальной траектории полета. Такое излучение многократно регистрировалось как во время запуска, так и во время посадки КА наземной сетью электромагнитных обсерваторий на территории США (Rauscher and Van Bise, 1999). Рассмотренный механизм связывает регистрируемые колебания магнитного поля с распространением в нижней ионосфере гиротропных волн, генерируемых когерентными источниками (см. рис. 2). Такими источниками служат электростатические поля, наведенные фоновым электрическим полем в горизонтальных неоднородностях ионосферной проводимости.

Аналитические модели дают хорошую оценку этого принципа при условии спокойной геомагнитной обстановки, но в случае возмущенной ионосферы оценка полного электронного содержания становится существенно менее точной, что негативно сказывается на работе различных (в частности магнитных) спутниковых систем [15 – 18].

Методика определения распределения потенциала электромагнитного поля в космическом пространстве

Сложность исследования заключается в том, что все космические тела одновременно взаимодействуют между собой. Известно, что на заряженные частицы, которые движутся в магнитном поле, действует сила Лоренца. Такая же сила действует на заряженный спутник, который движется в магнитном поле Земли. Эта сила зависит от положения спутника и геометрии орбиты. Направление силы всегда перпендикулярно скорости аппарата. При заряджении в магнитосферной плазме характерные величины первичных токов составляют $\approx 10^{-10} - 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, ток фотоэлектронной эмиссии для большинства материалов лежит в пределах $(1 - 5) \cdot 10^{-9} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, характерные времена общего заряджения КА составляет 0,3 – 0,5 с, а дифференциальное заряджение – от единицы до десятков минут.

Для КА различной формы учет магнитосферной плазмы для определения сил сопротивления является крайне важным. Простейшая модель такого взаимодействия со спутником представляет собой Землю радиуса r_1 , который находится в поле двух полусферических ионосферных полей радиуса r_2 , разделенных между собой узким промежутком и имеющих потенциалы $+V$ и $-V$. Расчет электромагнитного поля, действующего на КА в пространстве между Землей и ионосферными полями $r_1 < r < r_2$ проведем для случая, когда центры Земли и ионосферных полей совпадают и потенциал Земли предположим не учитывается. В рассматриваемом случае нахождение потенциала $\varphi = \varphi(r, \theta)$ поля в космическом пространстве сводится к решению краевой задачи для

уравнения Лапласа, которая с учетом осевой симметрии поля может быть записана в следующем виде:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) = 0, \quad r_1 < r < r_2, \quad 0 \leq \theta \leq \pi; \quad (14)$$

$$\varphi = \varphi(r_1, \theta) = 0; \quad (15)$$

$$\varphi(r_2, \theta) = U(\theta) = \begin{cases} +V_0, & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}; \\ -V_0, & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi. \end{cases} \quad (16)$$

Используя метод разделения переменных, когда $\varphi = \varphi(r, \theta) = R(r)\Phi(\theta)$, получаем:

$$\frac{\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right)}{R(r)} = - \frac{\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Phi}{d\theta} \right)}{\Phi(\theta)} = \lambda = \text{const.} \quad (17)$$

Отсюда для нахождения функций $R(r)$ и $\Phi(\theta)$ получаем уравнения:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \lambda R = 0; \quad (18)$$

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Phi}{d\theta} \right) + \lambda \Phi = 0. \quad (19)$$

Если в уравнении (14) сделать замену переменного $\cos(\theta) = x$ и положить $\Phi(\theta) = X(x)$, то оно примет вид:

$$- \frac{d}{dx} \left[(1-x^2) \frac{dX}{dx} \right] = \lambda X, \quad -1 < x < 1. \quad (20)$$

Задача поиска ограниченного решения уравнения (20), удовлетворяющего условиям $|X(\pm 1)| < \infty$, соответствует задаче Штурма – Лиувилля. Эта задача имеет нетривиальное решение $X_n(x)$ лишь при $\lambda = \lambda_n = n(n+1)$. Эти решения (собственные функции) являются полиномами Лежандра n -го порядка, то есть $X_n(x) = P_n(x)$ или $\Phi(\theta) = P_n(\cos \theta)$, для $n=0, 1, 2, \dots$

Как собственная функция задачи Штурма – Лиувилля полиномы Лежандра удовлетворяют условию ортогональности:

$$\int_{-1}^1 P_n(x)P_m(x)dx = \int_0^\pi P_n(\cos\theta)P_m(\cos\theta)\sin\theta d\theta = \begin{cases} 0, & n \neq m; \\ \frac{2}{2n+1}, & n = m. \end{cases} \quad (21)$$

При $\lambda = \lambda_n = n(n+1)$ из уравнения (14) находим:

$$R(r) = a_n r^n + \frac{b_n}{r^{n+1}} \text{ или } R(\rho) = A_n \rho^n + \frac{B_n}{\rho^{n+1}},$$

где $\rho = \frac{r}{r_1}$; $A_n, B_n = \text{const}$.

Используя принцип суперпозиции решений для линейного уравнения (14), представим его решение рядом:

$$\varphi(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n \rho^n + \frac{B_n}{\rho^{n+1}} \right) P_n(\cos\theta), \quad 1 < \rho < \gamma, \quad 0 \leq \theta \leq \pi, \quad (22)$$

где $\rho = \frac{r}{r_1}$; $\gamma = \frac{r_2}{r_1} > 1$.

Удовлетворяя при $\rho=1$ граничному условию (15), получаем $A_n + B_n = 0$, то есть:

$$\varphi(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\rho^n - \frac{1}{\rho^{n+1}} \right) P_n(\cos\theta). \quad (23)$$

Теперь с учетом граничного условия (16) получаем соотношение:

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \Gamma_n P_n(\cos\theta) = U(\theta), \quad \Gamma_n = \frac{\gamma^{2n+1} - 1}{\gamma^{n+1}}. \quad (24)$$

Теперь найдем коэффициенты разложения Фурье. Заметим, что равенство (24) представляет собой разложение функции $U(\theta)$, заданной формулой (16), в ряд Фурье по полиномам Лежандра. Возможность такого разложения по собственным функциям задачи Штурма – Лиувилля (20) следует из теоремы Стеклова. С учетом условия ортогональности (21) находим коэффициенты этого разложения:

$$A_n \Gamma_n = \frac{2n+1}{2} \int_0^\pi U(\theta) P_n(\cos\theta) \sin\theta d\theta = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 \tilde{U}(x) P_n(x) dx, \quad (25)$$

$$\tilde{U}(x) = \begin{cases} -V_0, & -1 < x < 0; \\ +V_0, & 0 < x < 1. \end{cases}$$

Учитывая правила изменения знака аргумента для полиномов Лежандра:

$$P_n(-x) = (-1)^n P_n(x),$$

из (25) для искоемых коэффициентов A_n разложения (22) получим формулы:

$$A_n = 0 \text{ для } n = 2k$$

$$A_n = V_0 \frac{2n+1}{\Gamma_n} \int_0^1 P_n(x) dx \text{ для } n = 2k+1.$$

Используя известные для полиномов Лежандра формулы:

$$P_n(1) = 1; P_{n+1}(0) = -\frac{n}{n+1} P_{n-1}(0); P_n(x) = \frac{1}{2n+1} [P'_{n+1}(x) - P'_{n-1}(x)],$$

можно вычислить квадратуру:

$$\int_0^1 P_n(x) dx = \frac{1}{n+1} P_{n-1}(0);$$

$$P_0(0) = 1; P_{2k+1}(0) = 0; P_{2k}(0) = (-1)^k \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2k-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots 2k}, k \geq 1.$$

Таким образом, окончательное решение краевой задачи (14) – (16), описывающее распределение потенциала в космическом пространстве, запишем в виде:

$$\varphi(\rho, \theta) = V_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(4k+3)P_{2k}(0)}{2(k+1)\Gamma_{2k+1}} \left(\rho^{2k+1} - \frac{1}{\rho^{2k+2}} \right) P_{2k+1}(\cos \theta), \quad (26)$$

$$1 \leq \rho = \frac{r}{r_1} \leq \gamma, 0 \leq \theta \leq \pi.$$

$$\sigma = \varepsilon_0 E_n = -\varepsilon_0 \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_1} = -\frac{\varepsilon_0}{r_1} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=1},$$

Используя известную формулу электродинамики, с помощью решения (26) можно определить распределение индуцированных зарядов на определенном участке траектории КА и других произвольных космических объектов.

Необходимо отметить, что распределение электрического заряда около 1000 ионов на кубический сантиметр можно найти у поверхности Земли, причем один кубический сантиметр содержит $3 \cdot 10^{19}$ молекул при нормальном давлении. Поэтому атмосфера там слабо ионизирована, она содержит как положительные, так и отрицательные ионы. Однако количество положительных ионов преобладает. Плотность ионов увеличивается с высотой и имеет максимум в ионосфере. Здесь значительная часть молекул газа ионизирована

УФ-излучением Солнца. Из-за избытка положительных зарядов в нижних слоях атмосферы электрическое поле Земли частично экранировано, так что напряженность поля быстро уменьшается с высотой над землей, намного быстрее, чем в контексте. На уровне ионосферы и магнитосферы напряженность поля падает до нескольких вольт на километр.

Максимальные напряженности характерны для низких, приповерхностных слоев атмосферы, по мере увеличения высоты напряженность падает.

В результате было получено решение краевой задачи для уравнения Лапласа, описывающее распределение потенциала поля в космическом пространстве между Землей и ионосферой.

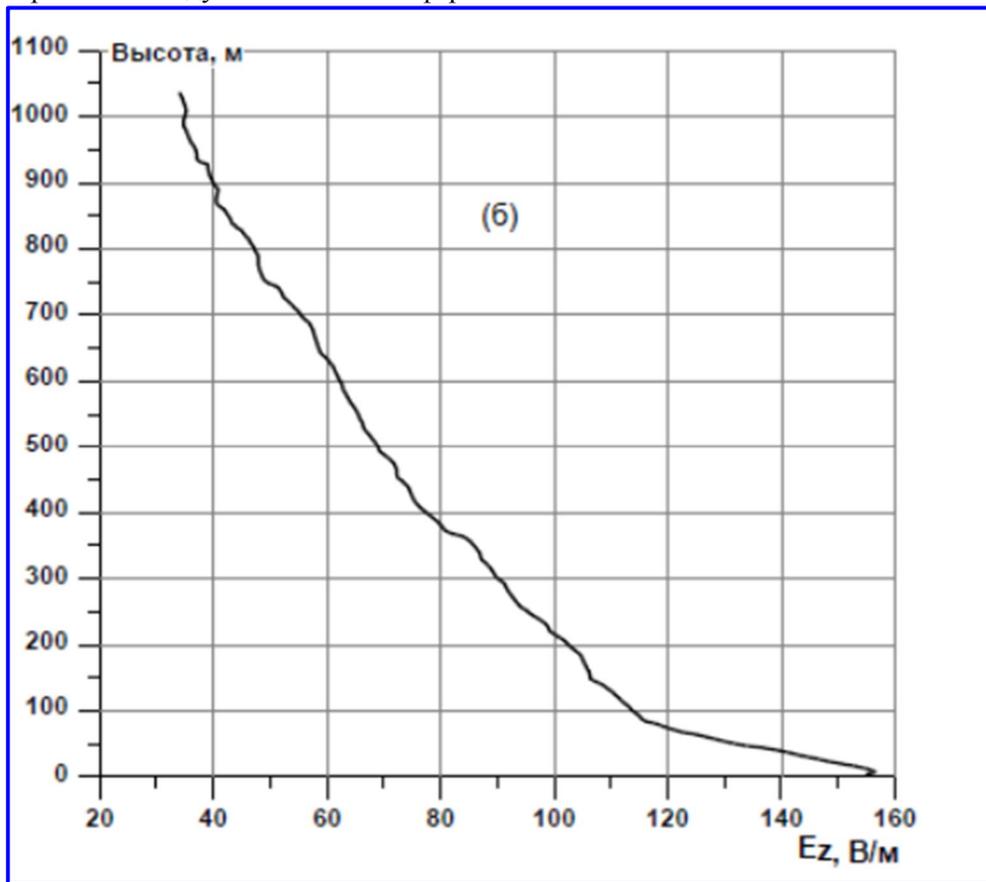


Рис. 3. Напряженность поля в зависимости от высоты

Заключение

Исследована аналитическая зависимость для энергии, излучаемой спутником с учетом направления распространения волн Альвена. Доказано, что порядок интегрирования влияет на существование интеграла для определения индуктивного сопротивления спутника и других удлиненных тел (например,

электродинамического троса для уводки с траектории). Отмечено, что линейный член в уравнении энергии влияет на индукцию при произвольном законе распределения тока в спутнике в электромагнитном поле и что полное сопротивление будет больше индуктивного. В результате исследований показано, что при движении спутника на средних высотах распределение тока в магнитосферной плазме может быть удовлетворительно аппроксимировано отрезками прямых линий с максимумом в точке нулевого потенциала, то есть в точке, где потенциал спутника равен потенциалу ионоплазмы. Выявлено, что индуцированные компоненты магнитного поля можно определить интегрированием. Определена индуцированная компонента магнитного поля. Необходимо отметить, что сила гравитационного притяжения Земли на три порядка превосходит силу кулоновского взаимодействия. Сила гравитационного притяжения и сила Лоренца, действующая на КА со стороны электромагнитного поля Земли одного порядка. Динамика частиц массой примерно 5 – 8 г определяется, в первую очередь, не гравитационной силой, а сложным движением в электромагнитном поле Земли. Альвеновская концепция магнитоплазмы справедлива при рассмотрении космических частиц. Для КА можно использовать одночастичное приближение, для массового компонента справедливо представление о континууме как о сплошной среде. Микрочастица в плазме заряжена отрицательно из-за столкновений с плазменными электронами. Однако она может «утратить» этот заряд за счет фотоэффекта, а также под действием автоэлектронной эмиссии и ударов положительных ионов. Частицы ионосферной плазмы относительно космического пространства имеют положительный или отрицательный потенциал порядка 1... 10 В. На частицу, обладающую электрическим зарядом, действует электромагнитная сила и электрическое и магнитное поля. Когда КА попадает в область плазмы с большим количеством надтепловых электронов, ее заряд может резко возрасти примерно в 1000 раз, в результате чего она окажется захваченной плазмой. К основным факторам, приводящим к электризации, следует отнести потоки электронов и ионов околоземной космической плазмы, жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца, вакуум, термоциклирование. Все перечисленное особенно существенно для высокоорбитальных КА во время суббурь в магнитосфере Земли. В результате происходит общее и дифференциальное заряджение поверхности КА.

Заряджение элементов КА в космической плазме происходит по причине значительного превышения электронного диффузионного тока над ионным током. При такой плотности тока время электризации КА, имеющего типичные размеры, до потенциала 10 кВ составляет всего 5 мс. Таким образом, общая зарядка КА происходит практически мгновенно в поле.

Литература

1. Chu C. K., Gross R. A. Alfvén Waves and Induction Drag on Long Cylindrical Satellites // AIAA Journal. – Dec. 1966. – Vol. 4. – № 12. – P. 2209 – 2214.
2. Drell S. D., Foley H. M., Ruderman M. A. Drag and Propulsion of Large Satellites in the

- Ionosphere: An Alfvén Propulsion Engine in Space // Journal of Geophysical Research, 1965. – Vol. 70. – P. 3131 – 3145.
3. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. – Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
4. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П., Плотников А. В. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запусках ракет-носителей // Геомагнетизм и аэронавигация, 2002. – Т. 42. – № 6. – С. 790 – 797.
5. Сидняев Н. И. Методики расчета влияния электродинамического поля в ионосфере на космический аппарат // Космические исследования, 2022. – Т. 60. – № 3. – С. 196 – 205.
6. Пулинец С. А., Давиденко Д. В. Изменчивость ионосферы и глобальная электрическая цепь / Глобальная электрическая цепь. Материалы Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта. – Ярославль, 2013. – 16 с.
7. Sidnyaev N. I. Study of heat and mass transfer for hypersonic flow past a complex body of revolution // Thermophysics and Aeromechanics, 2006. – Vol. 13. – № 1. – P. 2 – 16.
8. Sidnyaev N. I. Investigation of aerodynamic characteristics of a hypersonic flow around bodies of revolution with a permeable tip // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2007. – Vol. 48. – № 2. – P. 19 – 26.
9. Сорокин В. М. Волновые процессы в ионосфере, связанные с геомагнитным полем // Изв. ВУЗов, Радиофизика, 1988. – Т. 31. – С. 1169 – 1180.
10. Sidnyaev N. I. Aerodynamic Performances of Hypersonic Aircrafts with Surface Mass Transfer // Mathematical Models and Computer Simulations, 2009. – Vol. 1. – № 3. – P. 343 – 352.
11. Сидняев Н. И., Климова Н. С. Изменение поверхностных и объемных свойств космического аппарата при адсорбции и рекомбинация атомов кислорода и азота // Космические исследования, 2020. – Т. 58. – №3. – С. 208 – 222.
12. Альвен Х. Космическая плазма : Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 216 с.
13. Сидняев Н. И., Савченко В. П., Клочкова Д. В. Физические принципы и математическая модель управления индуктивным сопротивлением спутников в ионосфере планеты // Физические основы приборостроения, 2012. – Т. 1. – № 4. – С. 98 – 105.
14. Основы теории полета космических аппаратов / В. С. Авдеевский [и др.]; под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972. – 607 с.
15. Аэромеханика низкоорбитальных космических аппаратов / Н. И. Сидняев, Л. А. Макриденко, В. Я. Геча [и др.] // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 62 – 65.
16. Сидняев Н. И. Исследование разрушения поверхности КА при контактном взаимодействии с микрочастицами космической среды // Космические исследования, 2018. – Т. 56. – № 3. – С. 233 – 242.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫСОКОТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Е. А. Лапшин, Ю. А. Пластинин

(АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королев).

Представлена методика определения в ультрафиолетовом диапазоне спектра общего содержания озона в атмосфере Земли. Методика реализована с использованием оптико-электронного комплекса «Фиалка-МВ-Космос» в составе малогабаритного спектрометра и видеокамеры при проведении с борта Международной космической станции геофизических экспериментов ГФИ-1 «Релаксация». Калибровка спектрометра осуществлялась по данным измерений озона с наземных станций при прохождении Международной космической станции над ними или вблизи них. Для обработки спектров использовался метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии, адаптированный к данным, получаемым с малогабаритного автоматизированного спектрометра (массой менее 1 кг). Представлены результаты определения общего содержания озона по трассам полета Международной космической станции, приведено сравнение полученных результатов с данными зарубежной гиперспектральной аппаратуры ОМІ на борту КА Аига.

Ключевые слова: озон, общее содержание озона, малые компоненты атмосферы, малый космический аппарат, спектрометр, дистанционное зондирование Земли.

Введение

Озон (O_3) играет ключевую роль в химии атмосферы [0]. В стратосфере озон образуется в результате фотодиссоциации молекул кислорода (O_2) под действием ультрафиолетового (УФ) излучения ($\lambda < 242$ нм) на атомы кислорода (О) с последующим объединением получившегося атомарного кислорода и молекулярного кислорода (цикл Чепмэна). В тропосфере озон в основном формируется в результате взаимодействия NO с гидроксильными (ОН) и пероксидными (HO_2) радикалами, что приводит к появлению NO_2 , под действием излучения ($\lambda < 420$ нм) происходит диссоциация молекулы NO_2 на NO и O, и получившийся атом кислорода участвует в образовании озона. В результате всех процессов на высоте от 20 до 30 км образуется область с максимальной концентрацией озона – эту область называют озоновым слоем. Озоновый слой защищает поверхность Земли от губительного воздействия УФ-излучения на биосферу (за счет поглощения солнечного излучения на длинах волн $\lambda = 200 - 310$ нм) и определяет количество падающего УФ-излучения на поверхность Земли. В тропосфере озон является загрязнителем (так называемый озоновый смог) и одним из парниковых газов. В связи с вышесказанным изучение содержания озона в атмосфере является актуальной

задачей, однако пространственное распределение содержания озона по планете является очень неравномерным: на экваторе его меньше, чем в умеренных широтах, существуют области как с аномально повышенным, так и пониженным содержанием озона (озоновые дыры). В связи с этим спутниковые методы мониторинга содержания озона являются предпочтительными, поскольку только они могут обеспечить глобальное покрытие при проведении измерений содержания озона.

За рубежом глобальный мониторинг содержания озона спутниковыми методами осуществлялся космическими аппаратами серии Nimbus (1978 – 1993 гг.); ERS-2 (1995 – 2011 гг.), ENVISAT (2002 – 2012 гг.), MetOp-A (2006 – 2021 гг.) и продолжает осуществляться космическими аппаратами серии NOAA (с 1996 г.), EOS-AURA (с 2004 г.), MetOp-B (с 2012 г.), MetOp-C (с 2018 г.), Sentinel-5p (с 2017 г.) с гиперспектральной целевой аппаратурой на борту, работающей в УФ-диапазоне спектра [0]. В Российской Федерации оценка общего содержания озона (ОСО) осуществляется космическим аппаратом серии «Метеор» с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра «ИКФС-2» [0, 0], однако в основном используются данные с зарубежных космических аппаратов. В настоящее время в РФ отсутствует гиперспектральная аппаратура для мониторинга ОСО, работающая в УФ-диапазоне спектра.

В докладе представлена методика определения ОСО по трассе полета Международной космической станции (МКС) по спектральным данным маломассогабаритного спектрометра в УФ-диапазоне спектра от 320 до 340 нм, показаны результаты определения ОСО и проведено сравнение полученных результатов с данным прибора ОМІ.

Оптико-электронный комплекс

Исходные экспериментальные данные (спектры, изображения) были получены с помощью оптико-электронного комплекса «Фиалка-МВ-Космос» в составе малогабаритного спектрометра и видеокамеры при проведении с борта МКС геофизических экспериментов ГФИ-1 «Релаксация». Эксперименты проводились в течение длительного времени с 2002 по 2017 гг.

Основные характеристики спектрометра приведены в табл.

Таблица

Основные характеристики малогабаритного спектрометра [0]

Параметр	Значение
Рабочий спектральный диапазон, нм	от 200 до 1100
Приемник излучения	Hamamatsu S10420, back-thinned FFT-CCD
Среднее спектральное разрешение, нм	1,5
Разрядность аналого-цифрового преобразователя, бит	16
Глубина потенциальной ямы пикселя, тыс. эл.	200
Габаритные размеры, мм	150 × 110 × 50
Масса, кг	0,96

Съемка с помощью спектрометра и видеокамеры осуществлялась в надир, пространственное разрешение спектрометра определялось установленным объективом (4 или 40 км), поле зрения видеокамеры в несколько раз больше поля зрения спектрометра. Данные с видеокамеры необходимы для оценки типа подстилающей поверхности.

Спектральная и радиометрическая калибровка

Спектральная калибровка была проведена в результате сопоставления измеренных спектров с модельным спектром яркости системы атмосфера – Земля. На обоих спектрах идентифицировались линии поглощения атмосферных газов или фраунгоферовых линий Солнца и их положение. Далее шкалы длин волн всех модельных спектров, включая сечение поглощения озона, подстраивались под приборную шкалу длин волн. Аппаратная функция спектрометра аппроксимировалась гауссоидой с шириной на полувысоте около 1,45 нм.

При радиометрической калибровке все необходимые измеряемые величины приводятся к единой размерности – к единицам спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ). В точке траектории, где находится наземная озонная станция, рассчитывается опорный спектр по программе расчета переноса излучения в атмосфере (MODTRAN) с учетом альбедо подстилающей поверхности, зенитного и азимутального углов Солнца, а также содержания озона в этой точке.

Методика определения ОСО

В основе определения ОСО лежит метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (Differential Optical Absorption Spectroscopy – DOAS) [1] в УФ-области спектра электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от 320 до 340 нм по надирным спектральным измерениям с борта МКС.

Методика определения ОСО включает в себя следующие шаги:

- проведение спектральной и радиометрической калибровки;
- подготовка исходных данных и предварительная обработка спектров;
- расчет дифференциальной оптической толщины озона по спектрам;
- определение ОСО по рассчитанной дифференциальной оптической толщине.

DOAS основывается на законе Бугера – Ламберта – Бера для описания процесса ослабления излучения, прошедшего через атмосферу [0]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau(\lambda)}, \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность излучения после прохождения через атмосферу (то есть зарегистрированный спектр); $I_0(\lambda)$ – интенсивность излучения до прохождения через атмосферу (в настоящей методике – это солнечная постоянная); $\tau(\lambda)$ – оптическая толщина атмосферы. Здесь в качестве интенсивности излучения будет использоваться величина СПЭЯ с размерностью Вт/(см²·ср·нм). Оптическая толщина среды $\tau(\lambda)$ – сумма оптических толщин

отдельных компонент, ослабляющих излучение. В рамках методики определения ОСО принимается во внимание только следующие процессы ослабления излучения в атмосфере [0]:

- ослабление излучения за счет поглощения озона;
- ослабление излучения за счет рассеяния на молекулах воздуха (рассеяние Рэлея);
- ослабление излучения за счет рассеяния на аэрозолях (рассеяние Ми).

Можно записать:

$$\tau(\lambda) = \tau_{O_3}(\lambda) + \tau_p(\lambda) + \tau_{Ми}(\lambda), \quad (2)$$

где $\tau_{\Sigma}(\lambda)$ – общая оптическая толщина атмосферы; $\tau_{O_3}(\lambda)$ – оптическая толщина озона; $\tau_p(\lambda)$ – оптическая толщина молекул воздуха (за счет рассеяния Рэлея); $\tau_{Ми}(\lambda)$ – оптическая толщина аэрозолей (за счет рассеяния Ми).

Вклад других малых газовых составляющих атмосферы Земли, а также процесса вынужденного (комбинационного) рассеяния излучения на молекулах N_2 и O_2 (эффект Ринга) считается незначительным и не учитывается при определении ОСО в диапазоне длин волн от 320 до 340 нм.

Характер кривых оптической толщины озона $\tau_{O_3}(\lambda)$ и оптической толщины рассеивающих компонент $\tau_p(\lambda)$ и $\tau_{Ми}(\lambda)$ принципиально отличается: оптическая толщина озона имеет явно выраженные линии поглощения, в то время как оптическая толщина рассеивающих компонент является «гладкой» на рассматриваемом спектральном интервале. Из оптических толщин каждой из компонент можно выделить дифференциальную оптическую толщину, то есть только быстро меняющуюся часть оптической толщины относительно некоего среднего уровня. Под средним уровнем понимается аппроксимация оптической толщины полиномом низкой степени, который имеет «гладкий» характер. Дифференциальную оптическую толщину рассеивающих компонент можно считать равной нулю на всем рассматриваемом спектральном диапазоне (ввиду их изначально «гладкого» характера), а дифференциальную оптическую толщину озона можно получить вычитанием аппроксимирующего полинома из общей оптической толщины. В результате полученная дифференциальная оптическая толщина $\tau_{диф}(\lambda)$ будет относиться только к одной компоненте – озону, анализ этой величины позволяет количественно определить содержание озона в атмосфере. Переход от оптической толщины (т.е. от абсолютных измерений к относительным) позволяет исключить влияние тех погрешностей, которые содержатся во всех измеренных спектрах, в том числе погрешности, связанные с неопределенностью вклада рассеивающих компонент в общий сигнал.

Оптическая толщина озона τ_{O_3} и содержание озона в атмосфере связаны следующим соотношением:

$$\tau_{O_3}(\lambda) = \sigma_{O_3}(\lambda)c, \quad (3)$$

где $\sigma_{O_3}(\lambda)$ – сечение поглощения озона, $см^2$; c – содержание озона, $см^{-2}$.

Поскольку при получении дифференциальной оптической толщины озона был вычтен аппроксимирующий полином, то из сечения поглощения озона $\sigma_{O_3}(\lambda)$ также необходимо вычестть свой полином низкой степени и получить дифференциальное сечение поглощения озона $\sigma_{диффO_3}(\lambda)$. В результате дифференциальная оптическая толщина озона $\tau_{диффO_3}(\lambda)$ и дифференциальное сечение поглощения озона $\sigma_{диффO_3}(\lambda)$ будут связаны одним числом – содержанием c :

$$c = \frac{\tau_{диффO_3}(\lambda)}{\sigma_{диффO_3}(\lambda)}. \quad (4)$$

Таким образом, задача определения содержания озона сводится к подбору (например, методом наименьших квадратов) такого содержания озона c , при котором будет достигнуто максимальное совпадение рассчитанной дифференциальной оптической толщины $\tau_{диффO_3}(\lambda)$ с величиной $(c \cdot \sigma_{диффO_3}(\lambda))$.

Заключительным шагом является перевод полученного значения содержания озона c в ОСО (то есть содержание озона в вертикальном столбе атмосферы) за счет учета геометрии наблюдения: зенитного угла Солнца и угла визирной оси прибора [1, 6].

Результаты определения общего содержания озона

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены результаты определения ОСО в тропосфере вдоль двух трасс МКС длиной порядка 3600 км, с пространственным разрешением 40 и 4 км соответственно, время обработки ~ 8000 спектров составляет не более 15 с. Черным цветом показано ОСО (шкала слева), синим цветом – величина зарегистрированного сигнала на длине волны 350 нм (шкала справа). По величине этого сигнала можно идентифицировать облачность в поле зрения спектрометра. Также приведено среднеквадратическое отклонение (СКО) ОСО от среднего содержания озона по всей трассе. Видно, что мелкая и разрозненная облачность практически не влияет на зарегистрированное значение ОСО.

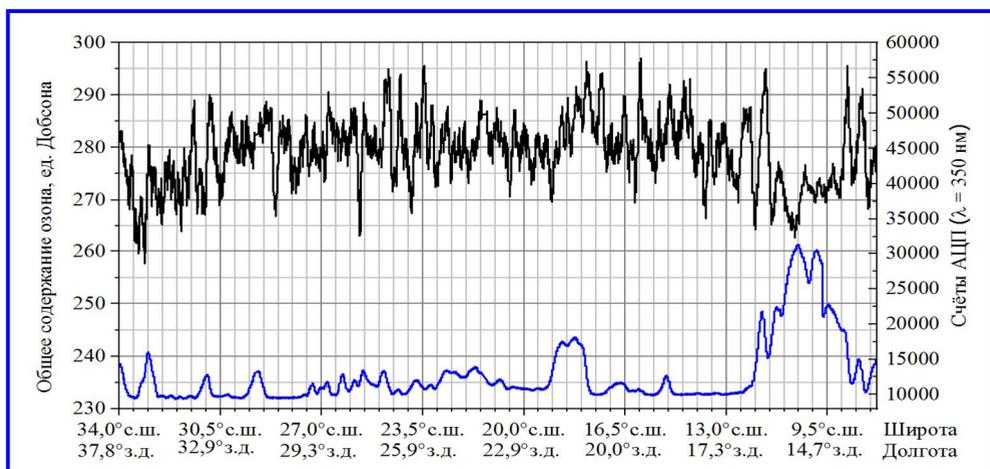


Рис. 1. ОСО по трассе МКС в КЭ 26.07.2012 г. с пересечением северного Срединно-Атлантического хребта, пространственное разрешение – 40 км, СКО – 1,2 %

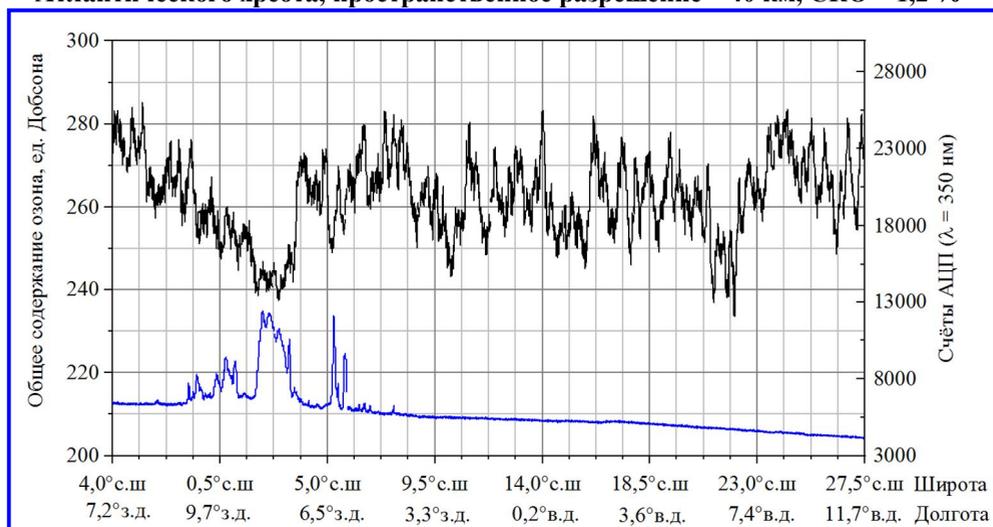


Рис. 2. ОСО по трассе МКС в КЭ 11.12.2014 (черный цвет) с пересечением южного Срединно-Атлантического хребта, пространственное разрешение – 4 км, СКО – 0,9 %

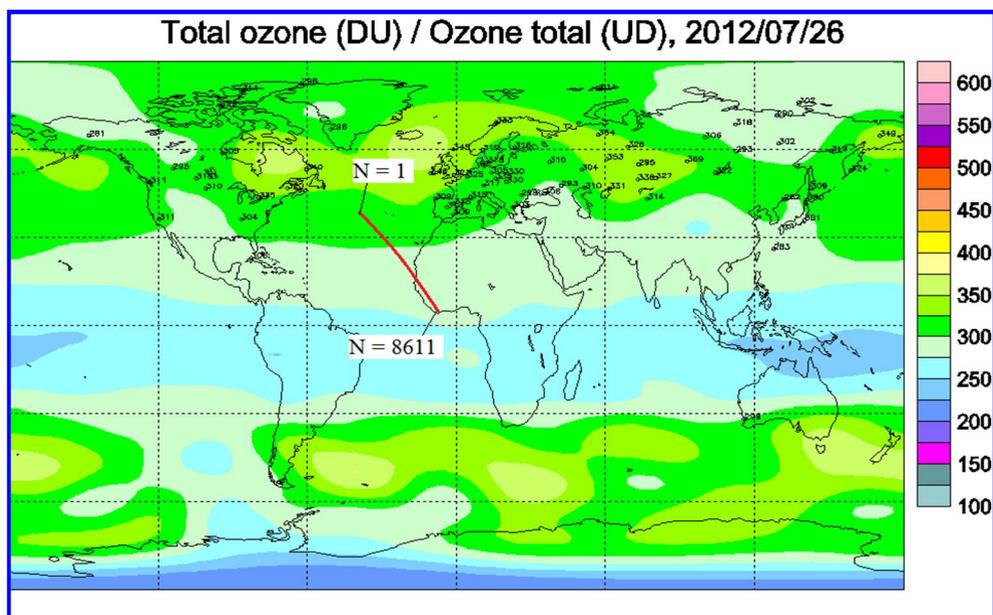


Рис. 3. Карта ОСО по данным спутникового прибора ОМІ для даты 26.07.2012 [7]

Полученные результаты хорошо согласуются с данными ОСО спутникового прибора ОМІ на борту КА Aura (например, рис. 3 для даты 26.07.2012). Красной линией показана траектория МКС, вдоль которой проводились измерения,

буквой N обозначены номер первого и последнего спектра. Значения озона на легенде справа выражены в единицах Добсона.

Приведенные трассы пересекают зоны сейсмической активности в районе северной ветви Срединно-Атлантического хребта и в области стыковки северной и южной его ветвей с координатами 9,73 ю. ш. 2,69 з. д. (рис. 4). Обнаружено, что при пересечении северной ветви существенно снижается ОСО (на 10 %), а в области пересечения наблюдается «озонная дыра» протяженностью ~ 400 км. Эти эффекты могут быть связаны с глобальным выделением озоноразрушающих элементов над зонами расширения тектонических плит. В тропосфере наблюдается интенсивное облачное образование под «озонной дырой» (рис. 5).

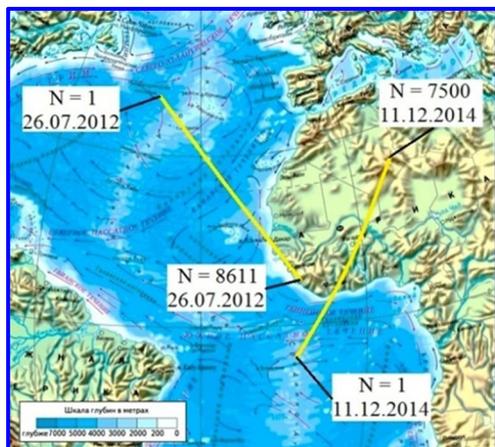


Рис. 4. Траектории МКС для дат 26.07.2012 и 11.12.2014, вдоль которых проводились измерения ОСО с пересечением Срединно-Атлантического хребта, буквой N обозначены номер первого и последнего спектра



Рис. 5. Снимок сплошной облачности с видекамеры

Заключение

Разработанная методика и малогабаритная гиперспектральная аппаратура позволяют в режиме реального времени определять с высокой точностью распределение ОСО в атмосфере Земли и обнаруживать аномальные области ОСО, особенно над районами сдвигов тектонических плит. Представляется целесообразным использовать результаты работы при разработке перспективных систем ДЗЗ.

Литература

1. Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). Principles and Applications. Berlin-Heidelberg: Springer, 2008. – URL: https://www.researchgate.net/publication/234080203_Differential_Optical_Absorption_Spectroscopy_DOAS-Principles_and_Applications.

2. Cracknell A. P., Varotsos C. A. Satellite Systems for Atmospheric Ozone Observations // *International Journal of Remote Sensing*, 2014. – V. 35. – № 15. – P. 5566 – 5597.
3. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли / Завелевич Ф. С. [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2006. – Т. 1. – № 3. – С. 224 – 230.
4. Пути модернизации бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 / Козлов Д. А. [и др.] // *Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. – М.: ИКИ РАН, 2021. – С. 137.
5. Maya2000 and Maya2000Pro Data Sheet: [Электронный ресурс] // Ocean Optics, Inc. URL: <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/2273-1476.pdf> (дата обращения: 01.08.2022).
6. Rozanov V. V., Rozanov A. V. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) and Air Mass Factor Concept for a Multiple Scattering Vertically Inhomogeneous Medium: Theoretical consideration // *Atmos. Meas. Tech.*, 2010. – V. 3. – P. 751 – 780.
7. Ozone map archive: [Электронный ресурс] // Environment and Climate Change Canada. URL: <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/clf2/e/main.html> (дата обращения: 01.08.2022).

РАСЧЕТ ПОКРЫТИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКОЙ ДЛЯ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ

А. А. Золотой, А. Г. Кезик, Е. Е. Коноплин

(Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларуси, г. Минск)

Рассматривается задача автоматизации построения покрытия наземных объектов наблюдения космической съемкой с использованием орбитальной группировки различного типа космических аппаратов ДЗЗ в условиях разнесенных станций приема и центров управления. Описаны общие подходы к расчету полос космической съемки с учетом их наложения для покрытия площадных объектов наблюдения при заданных ограничениях. Предложен алгоритм расчета геометрических характеристик объекта наблюдения с учетом построенных участков траектории космических аппаратов из состава орбитальной группировки.

Ключевые слова: покрытие, объект, космический аппарат, космическая съемка, планирование, алгоритм, траектория, участок, поверхность.

Расчет покрытия наземных объектов наблюдения космической съемкой является одним из приоритетных и наиболее сложных этапов решения общей задачи планирования целевого функционирования орбитальных группировок космических аппаратов (КА) ДЗЗ. В результате такого расчета за указанный период времени должны быть определены оптимальные полосы съемки для каждого объекта наблюдения КА ДЗЗ орбитальной группировки с учетом накладываемых ограничений на условия выполнения съемки. Математически данная задача относится к классу нелинейных задач многокритериальной оптимизации с учетом ограничений в виде равенств и неравенств в условиях частичной недетерминированности данных. Критерии оптимальности при решении задачи могут варьироваться по количеству и по важности. Основными критериями при решении задачи обычно являются:

- площадь покрытия съемкой объекта наблюдения за указанный период времени;
- количество полос съемки, обеспечивающих площадь покрытия объекта наблюдения за указанный период времени с учетом ограничений на условия съемки;
- углы съемки полос покрытия объекта наблюдения в рамках выполнения ограничений на условия съемки;
- период времени, требующийся для обеспечения площади покрытия объекта наблюдения с учетом ограничений на условия съемки.

Объекты наблюдения могут находиться в разных полушариях Земли и часовых поясах. По виду объекты наблюдения могут быть точечными, ли-

нейными и площадными. Положение и форма объектов наблюдения на поверхности Земли обычно задается геодезическими координатами точек. В данной работе будет рассматриваться решение задачи автоматического покрытия космической съемкой площадных объектов наблюдения как наиболее общий случай.

На рис. 1 приведена блок-схема общего алгоритма покрытия объекта наблюдения космической съемкой.

В блоке 1 определяются интервалы видимости объектов наблюдения с орбит КА ДЗЗ. Подходы и алгоритмы для нахождения интервалов видимости объектов наблюдения с орбит КА ДЗЗ подробно изложены в [1]. В блоке 2 вычисляются проекции вершин объекта наблюдения на нормаль к участкам траектории КА с дальнейшим вычислением углов крена КА до захвата сенсором ближайших точек объекта наблюдения. В блоке 3 производится определение средней линии объекта наблюдения из нормалей к участкам траектории КА и вычисление пересечения полос съемки с данной средней линией. В блоке 4 формируется покрытие объекта наблюдения с минимальным перекрытием полос съемки при учете ограничений.

Блок-схема алгоритма вычисления кренов КА орбитальной группировки для покрытия объекта наблюдения приведена на рис. 2. В блоке 1 строятся проекции точек объекта наблюдения на нормаль к участку траектории КА. В блоке 2 на рис. 2 рассчитываются расстояния вдоль нормали от участка траектории КА до проекций точек объекта наблюдения, построенных в блоке 1. В блоке 3 отыскивается проекция точки объекта наблюдения с наименьшим расстоянием, вычисленным в блоке 2.

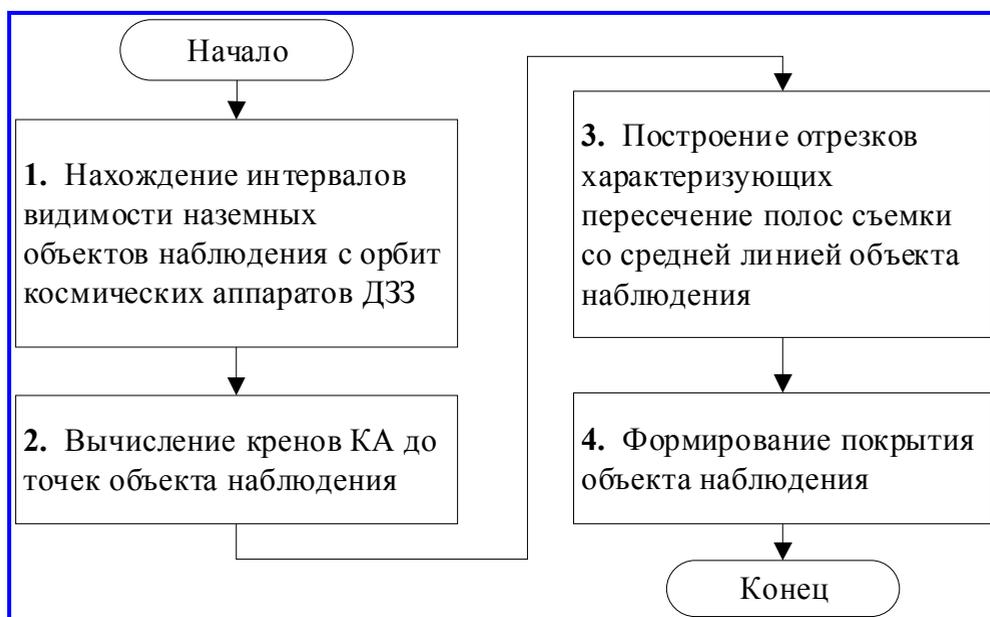


Рис. 1. Блок-схема алгоритма покрытия объекта наблюдения

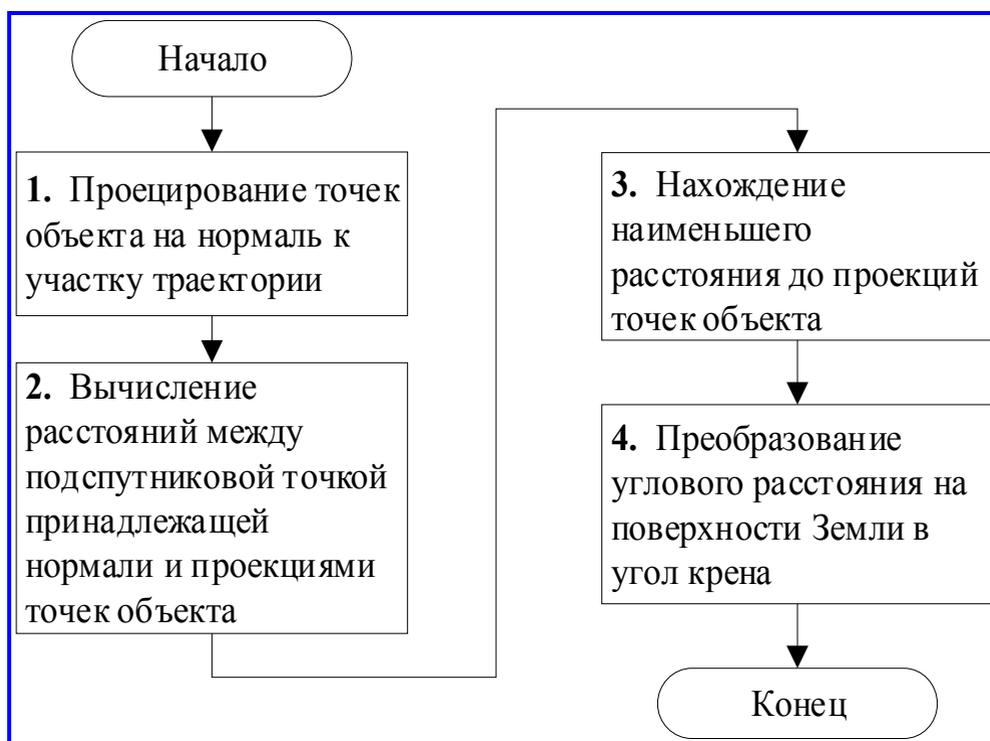


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления кренов КА орбитальной группировки

В блоке 4 угловое расстояние на поверхности Земли, соответствующее проекции точки объекта наблюдения с наименьшим расстоянием до участка траектории КА, пересчитывается в угол крена КА.

Заданное перекрытие полос съемки протяженных объектов наблюдения обеспечивается на основе построения некоторых средних линий для данных объектов. Средняя линия протяженного объекта наблюдения представляет собой геометрическое место точек, проходящее через условный центр объекта и пересекающееся со всеми участками траектории КА под углом, максимально близким к прямому в гномонической проекции.

Построение средней линии для протяженных объектов наблюдения целесообразно выполнять в одномерном пространстве, где удобно рассчитывать пересечение одномерных отрезков, получающихся в местах пересечений полос съемки со средней линией объекта. Средняя линия для объекта наблюдения является геодезической дугой, поэтому в гномонической проекции она будет представляться прямой линией. С увеличением размеров объекта наблюдения искривление его средней линии в геодезических координатах будет увеличиваться.

Блок-схема алгоритма построения отрезков, характеризующих пересечение полос съемки в одномерном пространстве, приведена на рис. 3.

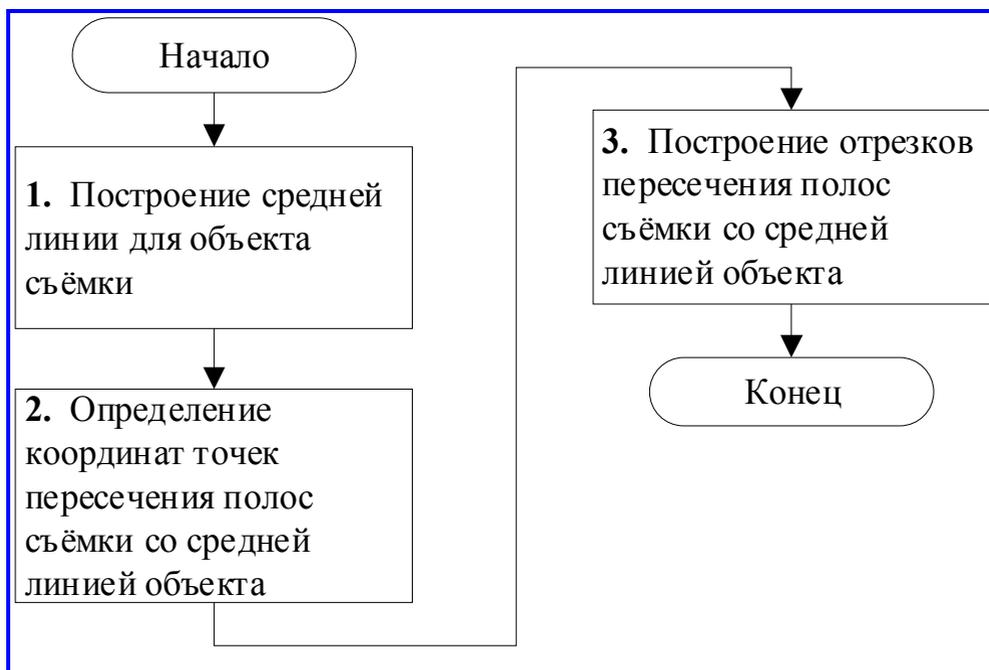


Рис. 3. Блок-схема алгоритма построения отрезков, характеризующих пересечения полос съёмки в одномерном пространстве

В блоке 1 выполняется построение обобщенной средней линии для объекта наблюдения на основе аппроксимации точек нормалей из участков траектории КА в условный центр объекта наблюдения в гномонической проекции. В блоке 2 определяются координаты точек пересечения полос съёмки объекта с его средней линией. Полосы съёмки объектов наблюдения задаются в виде полигонов точек с геодезическими координатами широты и долготы.

Точки пересечения боковых ребер полосы съёмки со средней линией объекта можно определить путем замещения боковых ребер их аналитическими прямыми линиями и нахождения пересечений данных прямых со средней линией объекта в гномонической проекции.

Координаты точек пересечения полос съёмки со средней линией объекта наблюдения можно найти приближенно, но с достаточной для этих целей точностью, решив простую систему уравнений вида:

$$\begin{cases} (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y + (x_1y_2 - x_2y_1) = 0; \\ -y_m x + x_m y = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где x_1, y_1 – координаты первой точки ребра полосы съёмки; x_2, y_2 – координаты второй точки ребра полосы съёмки; x_m, y_m – координаты вектора вдоль средней линии для объекта наблюдения.

В блоке 3 на рис. 3 координаты точек проецируются в одномерное пространство. Для этого выполняется поворот координат на угол, который является углом между средней линией объекта наблюдения и осью OX гномонической проекции. Поворот выполняется с использованием следующей матрицы вращения:

$$rot = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В результате поворота образуются отрезки, характеризующие полосы съемки объекта наблюдения в одномерном пространстве.

Блок-схема алгоритма формирования покрытия для объекта наблюдения приведена на рис. 4. В блоке 1 определяются углы наблюдения объекта с каждого участка траектории КА. Углом наблюдения объекта является угол, при котором расстояние от участка траектории КА до ближайшей точки объекта минимально.

В блоке 2 участки траектории КА ранжируются по возрастанию углов наблюдения объекта. В блоке 3 строится первый вариант покрытия объекта. Рассчитываются крены КА и наложения полос съемки объекта (рис. 5).

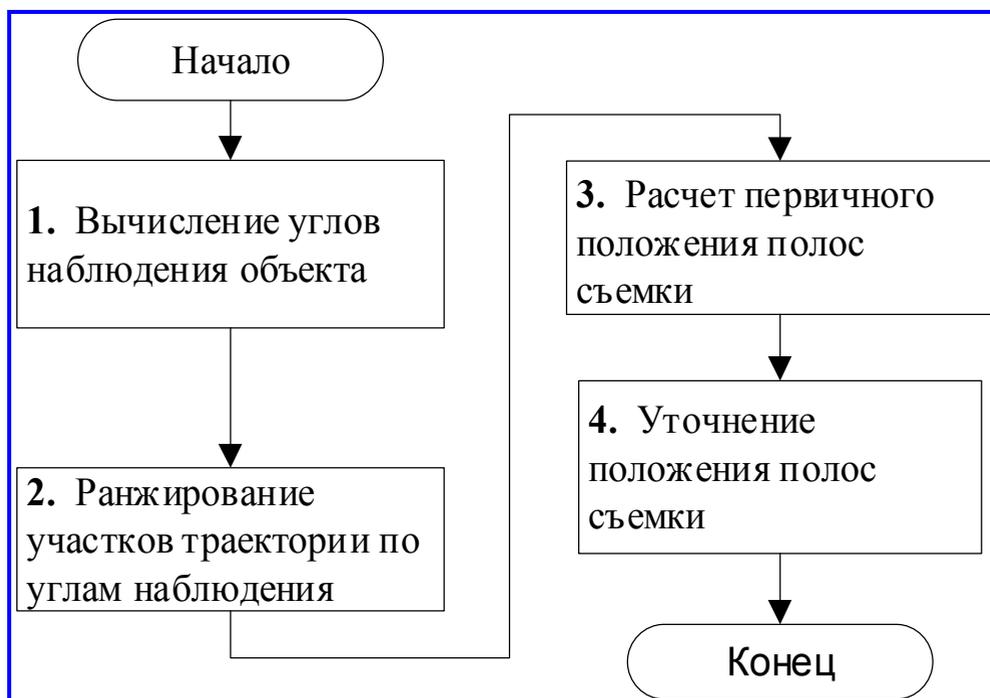


Рис. 4. Блок-схема алгоритма формирования покрытия для объекта наблюдения

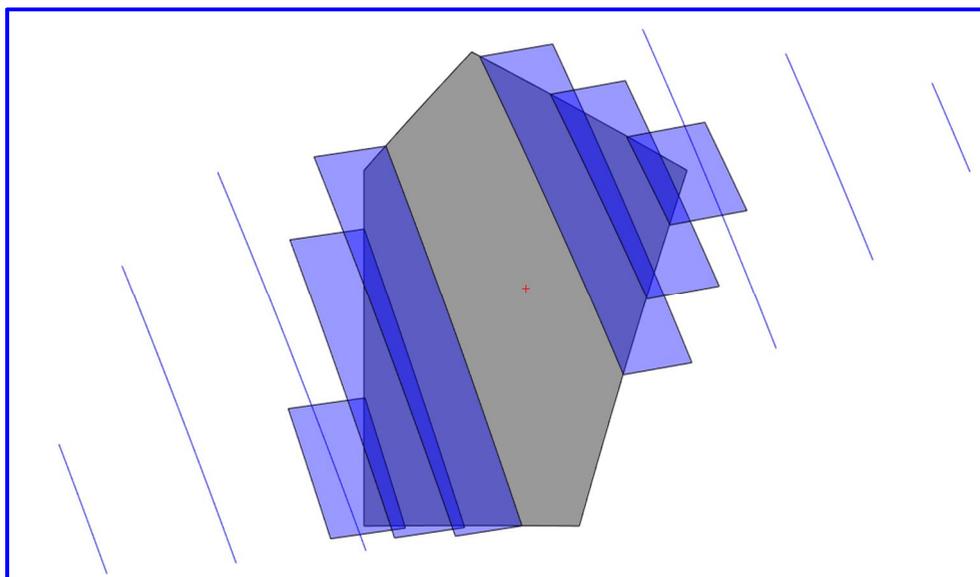


Рис. 5. Покрытие объекта наблюдения космической съемкой

Полосы съемки укладываются от краев объекта к его центру с обеспечением обязательного перекрытия полос не менее 20% от наименьшей ширины полосы. Размер перекрытия полос определяется с использованием предварительно построенных отрезков, характеризующие полосы съемки в одномерном пространстве. При добавлении новой полосы съемки на участке траектории КА, для нее строится характеризующий отрезок в одномерном пространстве и вычисляются пересечения этого отрезка с отрезками предыдущих полос съемки. По величине пересечения характеризующих отрезков в одномерном пространстве оцениваются величины перекрытия полос и корректируются углы крена КА.

Если пересечение отрезков больше нуля, то проверяется условие допустимости перекрытия полос по формуле (3):

$$\Delta S_{\text{доп}} \leq \Delta S \leq 3\Delta S_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где ΔS , $\Delta S_{\text{доп}}$ – текущее и допустимое перекрытия полос съемки.

Если величина пересечения отрезков меньше допустимой $\Delta S_{\text{доп}}$ или больше $3\Delta S_{\text{доп}}$, то выполняется итерационное изменение положений полос съемки путем пересчета углов крена КА с проверкой условий допустимости перекрытия полос вдоль средней линии объекта.

На рис. 5 показан результат частичного покрытия объекта наблюдения описанным способом. Покрытие выполнялось от краев объекта к центру с обеспечением минимально допустимого перекрытия полос съемки вдоль средней линии объекта. Алгоритм стремился формировать полосы покрытия

объекта с меньшими по возможности углами крена КА на каждом участке траектории КА. Это достигалось за счет предварительного упорядочивания участков траектории КА с учетом указанного предпочтения.

Первичное покрытие объекта наблюдения может быть неоптимальным по расположению полосы, закрывающей последнюю часть объекта. Поэтому в блоке 4 на рис. 4 производится итерационное уточнение положения полос съемки, опираясь на первичное покрытие объекта. Для этого участки траектории КА и соответствующие им полосы съемки объекта перепорядочиваются вдоль средней линии объекта. Затем выполняется перерасчет перекрытий полос съемки с учетом обеспечения минимально допустимой величины. Результат уточнения положений полос съемки показан на рис. 6. На рис. 6, *а* приведены положения полос съемки объекта наблюдения после построения первичного покрытия объекта (блок 3 на рис. 4). Видно, что расположение полосы съемки в центре объекта наблюдения не оптимально.

На рис. 6, *б* показаны положения полос съемки объекта после итерационного уточнения их положения (блок 4 на рис. 4). Здесь видно, что полосы съемки расположены равномерно и с обеспечением требуемого перекрытия вдоль средней линии объекта.

Орбитальная группировка в общем случае может состоять из КА, движущихся по орбитам разных форм, наклонений и высоты. Кроме того, КА орбитальной группировки могут иметь разные динамические и статические характеристики платформ и разные параметры оптико-электронных систем.

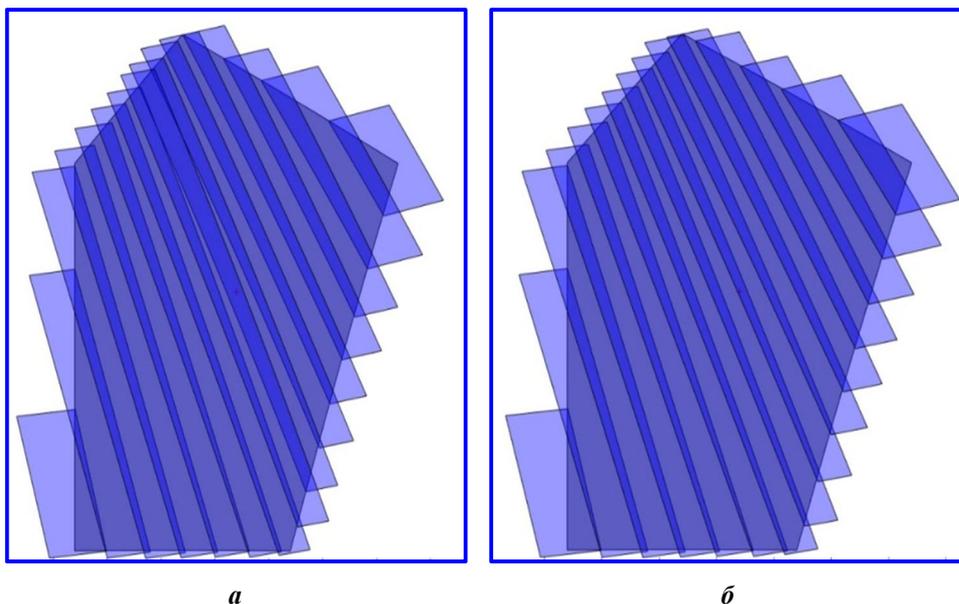


Рис. 6. Результат полного покрытия съемкой объекта наблюдения: *а* – первичное покрытие объекта; *б* – уточненное покрытие объекта

Осуществление покрытия объекта наблюдения орбитальной группировкой, состоящей из разнотипных КА, требует выполнения всех вышеописанных вычислений и построений для каждого КА.

Литература

1. Золотой А. А., Кезик А. Г. Нахождение интервалов видимости наземных объектов наблюдения с орбит космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Материалы девятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021. – С. 52 – 57.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДОВ К ПОИСКУ КОРРЕКТИРУЮЩИХ УГЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ МТВЗА-ГЯ

¹И. Н. Садовский, ¹Д. С. Сазонов, ¹А. А. Мазуров,
¹А. М. Матвеев, ²А. М. Стрельцов, ²Г. Е. Евсеев
(¹Институт космических исследований РАН, г. Москва;
²АО «Российские космические системы», г. Москва)

Работа посвящена рассмотрению вариантов определения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания прибора МТВЗА-ГЯ для уточнения географической привязки получаемых данных. Проведен анализ существующих подходов к решению данной задачи. Представлено описание трех методов, реализованных коллективом авторов настоящей статьи, позволяющих определять ориентацию МТВЗА-ГЯ в системе координат спутника-носителя «Метеор-М» № 2-2. Все методы основаны на анализе радиометрических изображений, формируемых инструментом при выполнении сканирования земной поверхности. Один из методов, основанный на сравнении радиотепловых портретов для нисходящих и восходящих витков, выделен в качестве приоритетного на данном этапе исследований. Разработано соответствующее программное обеспечение. Его применение к данным измерений МТВЗА-ГЯ за 2020 год позволило определить точные значения корректирующих углов крена, тангажа и рыскания. Включение последних в процедуру географической привязки данных позволило улучшить ее точность более чем в два раза.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, спутник, радиометр, географическая привязка данных ДЗЗ.

Введение

Спутниковые методы пассивной радиополяриметрии являются одним из основных источников информации о параметрах подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы в глобальном масштабе. По этой причине число функционирующих приборов на орбите Земли составляет порядка тридцати штук. Российский сегмент представлен лишь одним прибором – сканером/зондировщиком МТВЗА-ГЯ, установленном на борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-2 [1]. Данный инструмент позволяет решать широкий спектр научных и практических задач ДЗЗ [2]. Несмотря на это, практическое использование данных измерений МТВЗА-ГЯ встречает определенные затруднения, в силу нескольких причин. Среди них: отсутствие в литературе детального описания процесса формирования файлов уровня L1B, включающего этапы распаковки, фильтрации, геопривязки и калибровки (как, например, www.eos.jaxa.jp/amsr-e/amsr-e/format/l1e.pdf); отсутствие результатов научных работ (за исключением, вероятно, [3]), посвященных вопросам как непосредственно ошибок географической привязки и калибровки МТВЗА-ГЯ, так и рассмотрению возможности повышения их точности. Перечисленные факторы побудили коллектив сотрудников ИКИ РАН начать самостоятельные исследования в данном направлении. К настоящему моменту можно

говорить о разработке программного комплекса, реализующего операцию географической привязки МТВЗА-ГЯ [4], а также реализующего поиск оптимальных корректирующих углов крена, тангажа и рыскания, для повышения ее точности. В ходе выполнения работ по данному направлению авторами было рассмотрено несколько вариантов реализации поиска корректирующих геопривязку углов. Описанию этих подходов, а также возникающим при их реализации вопросам посвящена содержательная часть данной статьи.

Описание подходов к решению задачи корректировки географической привязки

Географическая привязка состоит в совмещении внутренней системы координат сформированного в результате конического сканирования и перемещения вдоль траектории КА прибором МТВЗА-ГЯ радиометрического изображения с географической системой координат. Другими словами, зная время проведения измерения и направление визирования прибора необходимо определить географическую широту и долготу точки пересечения луча визирования с поверхностью Земли.

Современные компьютерные технологии и средства обмена данными предоставляют возможность технической реализации даже самых сложных и точных алгоритмов географической привязки, учитывающих максимально широкий набор параметров, определяющих параметры движения и ориентации КА. Не смотря на это, всегда существует вероятность возникновения случайных ошибок, обусловленных сбоями в работе оборудования, аварийными ситуациями, погрешностями начальных установок, ошибками используемых моделей накопительного характера, смещением бортового времени относительно UTC и т. п., снижающими качество геопривязки. Контроль этого процесса, судя по количеству и частоте появления в открытой печати работ на эту тему, ведется постоянно в отношении всех сканирующих радиометров как функционирующих в настоящее время, так и закончивших свою работу на орбите.

Основываясь на анализе работ по этой тематике можно выделить несколько основных подходов к решению данной проблемы:

1. Использование данных звездных датчиков для постоянной оценки текущей ориентации инструмента и, в случае отклонения параметров движения от ожидаемых, внесение оперативных изменений в алгоритм геопривязки.

2. «Радиометрические» подходы разной степени сложности [5 – 11], основанные на сравнении реальных и ожидаемых радиометрических портретов поверхности Земли с последующей минимизацией расхождений между ними. При формировании ожидаемых образов используются как самые общие физические представления, так и сложные модели формирования и переноса излучения, иногда включающие в себя и модели функционирования оборудования. Для оценки близости ожидаемых и формируемых образов также имеется довольно обширный арсенал методов, начиная с простого сравнения средних значений яркостных температур в выделенном элементе поверхности и закан-

чивая многопараметрическими алгоритмами выделения береговых линий с последующим привлечением методов анализа динамических изображений.

3. Графические методы корректировки радиометрических изображений, широко применяемые при работе с фотоизображениями и включающими в себя масштабирование, повороты, проекционные трансформации и т. д.

Работы авторов настоящей публикации в направлении оценки точности геопривязки данных МТВЗА-ГЯ и ее последующей корректировки были начаты с рассмотрения вопроса возможности привлечения для этих целей информации, поступающей со звездных датчиков, установленных на борту спутника-носителя. КА оснащен тремя звездными датчиками, два из которых функционируют постоянно. Эта информация является служебной и не включается в состав HDF-файлов с результатами измерений МТВЗА-ГЯ, но по запросу может быть предоставлена. Работа с этими данными представляет собой отдельную задачу и встречает ряд затруднений, требующих отдельного обсуждения, выходящего за рамки настоящей публикации. Главной же причиной невозможности привлечения звездных датчиков для корректировки геопривязки МТВЗА-ГЯ является отсутствие данных о взаимном расположении систем координат прибора и КА. В отсутствие соответствующей матрицы, обеспечивающей прямой и обратный переходы между этими системами координат, данные об ориентации КА попросту бесполезны с точки зрения поставленной задачи. Таким образом, использование первого подхода при корректировке геопривязки данных МТВЗА-ГЯ оказалось невозможным.

Третий подход, в силу значительного прогресса в области обработки изображений, позволяет выполнить точное совпадение истинной географической карты с радиометрическим изображением поверхности Земли, однако не содержит информации о корректирующих углах ориентации инструмента в пространстве, что не позволяет выполнить расчет параметров (углы встречи с Землей, углы засветки Солнцем, кросс-поляризационные эффекты и т. д.), критически важных для последующего решения актуальных задач пассивной радиополяриметрии.

В связи с вышесказанным, усилия сотрудников ИКИ были сосредоточены на применении подходов из второй, «радиометрической», группы. Следует отметить, что в литературе отсутствуют любые описания корректировки геопривязки МТВЗА-ГЯ. При этом данный инструмент имеет отличные от зарубежных аналогов параметры сканирования (угол встречи с Землей в районе 65 градусов), а также неопisanную в литературе технологию аппаратного совмещения результатов измерений, относящихся к различным частотным каналам. Соответственно, заранее было неизвестно – возможно ли в данной ситуации применение хорошо зарекомендовавших себя методов корректировки геопривязки зарубежных аналогов МТВЗА-ГЯ? Кроме этого, наиболее современные методы корректировки географической привязки, применяемые при анализе данных таких инструментов, как AMSR и SSMIS, требуют привлечения значительных вычислительных мощностей, которыми группа авторов не располагает.

Поэтому коллективом авторов были опробованы три наиболее простые метода поиска корректирующих углов для выполнения геопривязки МТВЗА-ГЯ. Их описание представлено ниже.

Минимизация разности средних значений радиоярких температур океана и суши

Данный подход является наиболее простым в реализации и понятным с точки зрения радиофизики. Яркостная температура океана ($T_{я\text{по}}$) на низкочастотных каналах МТВЗА-ГЯ (на горизонтальной поляризации) имеет значения порядка 80 К. При этом аналогичные значения для суши ($T_{я\text{пс}}$) составляют 300 К. Таким образом, подбор корректирующих углов крена (α_k), тангажа (α_T) и рыскания (α_p) как самого КА, так и инструмента МТВЗА-ГЯ должны минимизировать функцию:

$$f(\alpha_p, \alpha_k, \alpha_T) = \langle T_{я\text{по}} - T_{я\text{пс}} \rangle,$$

где угловые скобки соответствует операции усреднения всех точек, лежащих внутри выделенного тестового полигона, а принадлежность точки к одному из двух классов (суша/океан) определяется через ее координаты и заранее подготовленную маску.

Очевидно, что при наличии ошибок геопривязки, точки с малыми значениями яркости (соответствующие водной поверхности) будут ложно идентифицированы как относящиеся к поверхности суши, снизят $\langle T_{я\text{пс}} \rangle$ и, как следствие, увеличат значение минимизируемой функции. Аналогичная ситуация происходит в случае отнесения измерений, соответствующих суше, к поверхности океана. В случае идеальной геопривязки минимизируемая функция будет принимать минимальные значения, зависящие от частоты, географических особенностей тестового полигона и суточных/годовых вариаций излучения. Минимизация функции $f(\alpha_p, \alpha_k, \alpha_T)$ выполнялась с использованием стандартного метода Нелдера – Мида (метод деформируемого многогранника). Для анализа в рамках одного дня измерений было выбрано 27 тестовых полигонов, схематичное расположение которых приведено на рис. 1. Тестовые полигоны выбирались для каждого полувитка (как восходящих, так и нисходящих) КА таким образом, чтобы в результатах измерений обязательно присутствовала береговая линия. Анализ выполнялся для всех частотных каналов МТВЗА-ГЯ, начиная с 91 ГГц и ниже.

Следует отметить, что использование данного алгоритма поиска корректирующих углов с их последующим использованием при выполнении геопривязки в рамках отдельно взятого полигона (и частоты излучения), позволило существенно повысить качество геопривязки. В качестве примера можно привести результаты, полученные для тестового полигона № 15, расположенного на восточном побережье Южной Америки (рис. 2). Видно, что найденные корректирующие углы позволили обеспечить точное совпадение истинной береговой линии с линией максимального перепада яркости на радиометрическом изображении.

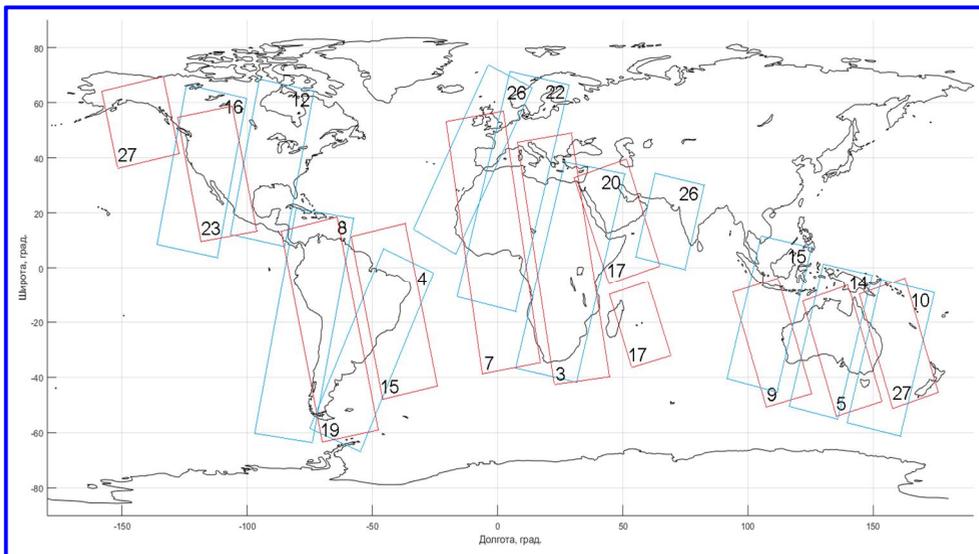


Рис. 1. Расположение тестовых полигонов

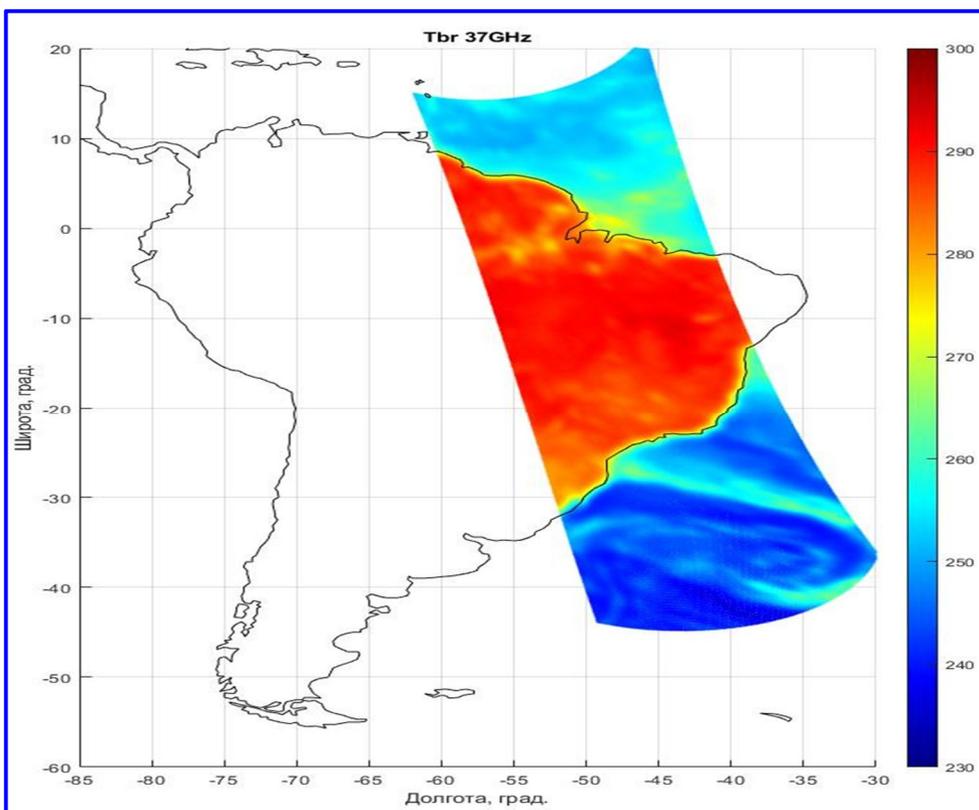


Рис. 2. Пример географической привязки данных МТВЗА-ГЯ. Вариант геопривязки с использованием корректирующих углов

В рамках проведенного анализа была отмечена следующая негативная особенность использованного подхода: существенный разброс найденных значений как для различных тестовых полигонов в пределах одного дня измерений МТВЗА-ГЯ, так и при работе с одним тестовым полигоном в течение нескольких дней. Аналогичная ситуация наблюдалась и при смене частоты, а также при работе с восходящими и нисходящими полувитками. Полученные значения среднеквадратического отклонения для всех трех углов превышали 1 градус. Исследования в данном направлении показали, что глобальный минимум выбранной оценочной функции не имеет ярко выраженного характера, что приводит к получению размытого облака решений (с характерным размером более 2 градусов) в пространстве углов (α_p , α_k , α_t).

С целью решения данной проблемы было введено ограничение на работу с элементами поверхности, лежащими в некоторой окрестности от истинной береговой линии. Уменьшение общего числа точек анализа за счет исключения элементов с максимальными и минимальными значениями яркости привело к незначительному повышению четкости границ минимизируемой функции и тем самым позволило снизить среднеквадратическое отклонение получаемых решений на 10% (рис. 3).

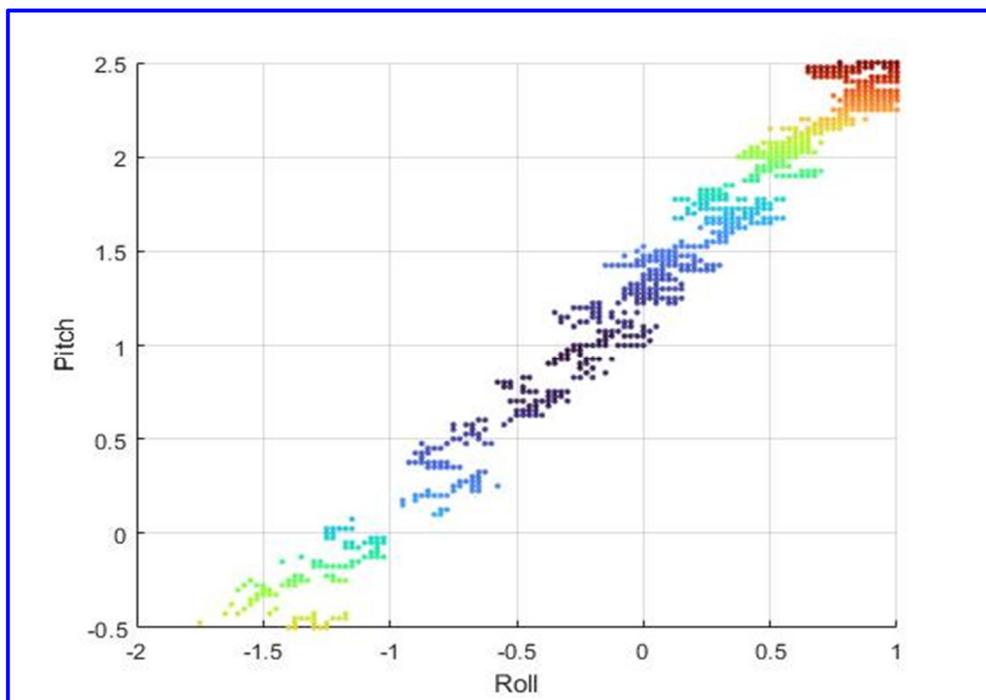


Рис. 3. Пример расчета значений минимизируемой функции при фиксированном значении угла рыскания. Случай горизонтальной поляризации, частота 10,6 ГГц. Темно синий цвет соответствует области возможных решений

Полученные в рамках данного подхода решения нельзя считать удовлетворительными. Возможно, что дальнейшие исследовательские работы в данном направлении могли бы улучшить качество получаемых результатов, однако на тот момент было принято решение о переходе к следующему методу поиска параметров, корректирующих геопривязку МТВЗА-ГЯ.

Минимизация разности измерений для восходящих и нисходящих витков

Данный метод поиска корректирующих параметров для выполнения геопривязки успешно используется при обработке данных инструментов AMSU, устанавливаемых на последних спутниках серии NOAA.

Физической основой метода является следующий принцип: если географическая привязка выполнена правильно, то расхождения между излучением одних и тех же элементов поверхности, наблюдаемых на восходящих и нисходящих витках, обусловлено лишь суточными вариациями температуры подстилающей поверхности (за счет временного сдвига витков), которое, исходя из теоретических оценок, не может превышать значения 20 К. Естественно, при наличии активных атмосферных возмущений (большие значения интегрального паросодержания, выпадение осадков и т. п.) и существенных временных сдвигах (данные измерений одного элемента относятся к разным суткам/месяцам) это условие не будет выполняться, но это уже предмет дополнительного анализа и требует введение ограничений на применимость метода в целом.

В случае, когда при выполнении геопривязки допущены ошибки, рассчитав разницу яркостных температур в каждом элементе разрешения поверхности, будет получена картина, аналогичная приведенной на рис.4.

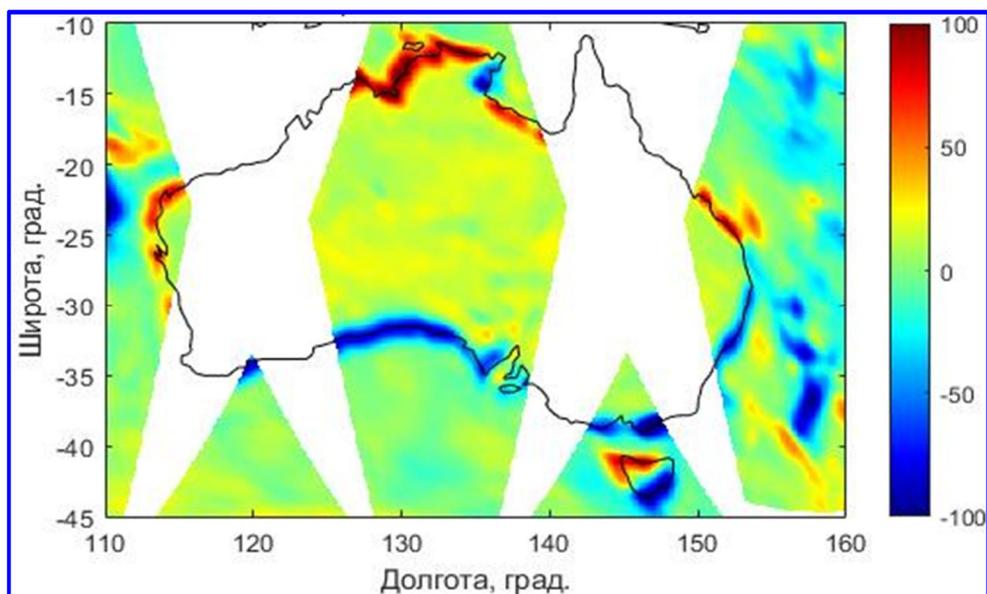


Рис. 4. Карта расхождений яркостных температур, измеренных на восходящих и нисходящих витках МТВЗА-ГЯ. Случай горизонтальной поляризации, частота 36,7 ГГц

Видно, что в данном случае одному и тому же элементу поверхности, на противоположных витках ставится в соответствие совершенно разные ее участки. Поясним – в результате геопривязки для восходящего полувитка считается, что данное измерение соответствует водному участку поверхности, хотя в реальности прибор в этот момент «смотрит» на участок суши. На следующем, нисходящем витке, ситуация обратная, наблюдается элемент морской поверхности, но в результате геопривязки он позиционируется на суше. Поскольку геопривязка «считает», что это один и тот же элемент поверхности, на восходящих и нисходящих витках мы получим разные значения яркости данного элемента. Картина разности, таким образом, наглядно демонстрирует ошибки геопривязки. Более того, уже при первом осмотре можно не только определить – какие из трех корректирующих углов (крен, тангаж и рыскание) имеют отличные от нуля значения, но и определить их знак, а также, если известна геометрия сканирования прибора, порядок их величин. С точки зрения составления алгоритма оценки качества геопривязки может быть использована функция количества элементов поверхности (или пикселей изображения), где разница яркостей превышает уже упомянутые 20 К.

Для устранения влияния сильных атмосферных образований, имеющих место в открытом океане, а также для ускорения операции поиска оптимальных корректирующих углов следует проводить анализ разностных изображений лишь в прибрежной зоне. Также наибольшую контрастность будут иметь изображения на горизонтальной поляризации и на частотах, слабо подверженных атмосферному влиянию.

Данный метод поиска корректирующих коэффициентов для инструмента МТВЗА-ГЯ был отработан и автоматизирован коллективом авторов. Полное его описание с учетом всех особенностей реализации будет представлено на страницах издания «Исследование Земли из космоса» в ближайшее время. В частности, будет описан итерационный алгоритм подбора корректирующих углов, рассмотрены вопросы влияния на результаты поиска ширины береговой линии, размеров элемента разрешения для выделенного частотного канала, сезонных вариаций состояния приземного слоя атмосферы, применимость накопления данных и т. д.

Однако уже в настоящий момент можно с уверенностью утверждать, что инструмент МТВЗА-ГЯ имеет ошибку ориентации относительно строительных осей спутника-носителя «Метеор-М» № 2-2, характеризующуюся следующими значениями: угол рыскания составляет $-0,84^{\circ} \pm 0,15^{\circ}$, угол крена составляет $-0,44^{\circ} \pm 0,14^{\circ}$, угол тангажа составляет $+1,13^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$.

Найденные значения корректирующих углов были использованы в процедуре геопривязки данных МТВЗА-ГЯ. Это позволило более чем в два улучшить ее качество (среднее значение расхождения истинной береговой линии и определенной по радиометрическим изображениям упало с 20 до 9 км). Количественная оценка качества геопривязки определялась на основе следующего метода, описание которого приведено ниже.

Минимизация расхождений истинной и восстановленной по радиотепловому изображению береговых линий

Физической основой данного подхода является наличие сильной разницы в излучении суши и океана, а также эффекта свертки наблюдаемой истинной картины уходящего излучения поверхности с диаграммой направленности антенны радиометрического приемника. Исходная картина излучения имеет резкие (в масштабах геометрии спутниковых измерений) границы в интенсивности излучения при переходе вода-суша (в случае горизонтальной поляризации, скачок составляет порядка 200 К). Антенная система приемника, двигаясь вдоль линии сканирования, пересекающей береговую линию, сглаживает этот переход. Таким образом, задача определения точки пересечения линии визирования радиометра с реальной береговой линией сводится к определению положения максимума производной яркостной температуры, как функции координат элемента разрешения на поверхности.

Исследованию особенностей поиска координат береговой линии по радиометрическим изображениям посвящено достаточно большое количество работ. Основные сложности представляют сильно изрезанные береговые линии, когда их радиус кривизны оказывается меньше характерных размеров элемента разрешения антенной системы радиометра. Дополнительные сложности вызывают атмосферные явления на частотах, чувствительных к вариациям температуры и влажности нижних слоев тропосферы. Помимо этого, усложнение задачи происходит в случае, если траектория сканирования отличается от прямой линии (как в случае систем с поперечным сканированием) и представляет собой сектор винтовой линии, вытянутой вдоль траектории подспутниковой точки (как в случае систем с коническим сканированием).

В качестве первой самостоятельной реализации указанного подхода к данным МТВЗА-ГЯ коллективом авторов была выполнена следующая последовательность. На первом шаге результаты измерений накладывались на регулярную сетку размером $0,25^\circ$. Далее были отобраны несколько тестовых полигонов, включающих протяженные участки береговых линий. При этом соблюдалось выполнение трех основных требований: максимальная гладкость, меридиональная или параллельная ориентация, наличие «зеркальных» пар тестовых участков (например, тестовый участок с меридиональным расположением береговой линии и восточным расположением суши дополнялся меридиональным полигоном с восточным расположением морской поверхности). Далее, в соответствии с описанным алгоритмом, определялось положение береговой линии на радиометрических изображениях (рис. 5, красная сплошная линия на левом изображении). Вместе с тем анализировались зависимости яркостной температуры не вдоль истинных траекторий сканирования на поверхности, а вдоль фиксированных меридианов и параллелей. На завершающем шаге определялось расстояние между истинной (рис. 5, черная сплошная линия на левом изображении) и восстановленной береговыми линиями. Здесь также вычислялось расстояние между кривыми вдоль одной широты (в примере из рис. 5). На последнем этапе оценивались статистические параметры полученных расхождений для каждого из тестовых участков (правое изображение на рис. 5).

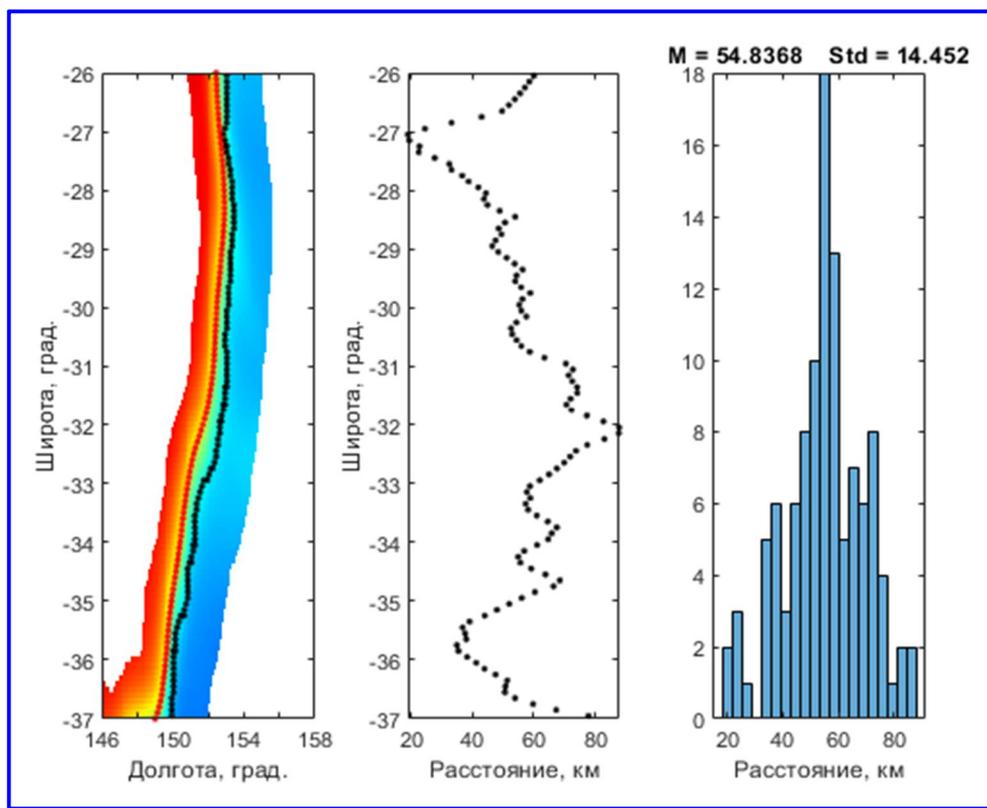


Рис. 5. К вопросу определения точности географической привязки по расположению истинной и восстановленной береговых линий. Оценка качества геопривязки без использования корректирующих коэффициентов. Тестовый участок на восточном побережье Австралии

Следует отметить, что вопрос о том, что считать расстоянием между двумя береговыми линиями и как его вычислять не имеет однозначного ответа в рамках описываемого подхода. Этот вопрос требует дополнительного исследования для ее (расстояния) выделения в качестве минимизируемой функции при поиске корректирующих геопривязку углов. Также подобный подход требует привлечения существенных вычислительных мощностей и затрат машинного времени, которыми авторы не располагают. В связи с этим работы по дальнейшей реализации данного подхода были приостановлены, а полученные наработки были использованы для независимой оценки качества геопривязки, выполняемой с использованием других подходов.

В частности, применение описанного подхода при анализе качества географической привязки данных МТВЗА-ГЯ позволило получить следующие результаты:

1. Если при географической привязке не используются корректирующие углы крена, тангажа и рыскания, средние значения расстояний между истин-

ной и восстановленной береговыми линиями (для 6 тестовых полигонов) составляют от 50 (пример на рис. 5.) до 70 км.

2. В настоящее время при использовании корректирующих углов (то, что углы используются известно из личного обсуждения с разработчиками аппаратуры, но их точные значения неизвестны) комплекс предварительной оперативной обработки данных МТВЗА-ГЯ обеспечивает точность геопривязки в диапазоне 15 – 40 км (разные значения для каждого из 6 полигонов).

3. Использование приведенных в настоящей работе значений корректирующих углов позволяет достичь расхождений между истинной и восстановленной береговыми линиями, составляющими 4 – 9 км.

Заключение

В результате выполнения работы были рассмотрены три метода поиска корректирующих углов для повышения точности географической привязки данных МТВЗА-ГЯ. Было показано, что два из них – метод сравнения результатов измерений на восходящих и нисходящих полувитках и метод оценки близости истинной и восстановленной береговых линий – позволяют с высокой степенью точности решать поставленную задачу. Метод оценки близости береговых линий имеет большой потенциал в случае продолжения исследований, однако авторы настоящей публикации не имеют необходимых вычислительных мощностей. Метод сравнения интенсивности излучения поверхности на восходящих и нисходящих витках был реализован в виде программного продукта, что позволило определить оптимальные значения корректирующих углов и повысить качество геопривязки более чем в два раза. В настоящее время на стадии опубликования находится серия работ (в том числе и [4]), детально описывающая операции географической привязки данных МТВЗА-ГЯ и разработанного алгоритма поиска корректирующих углов.

Авторы надеются, что наличие детального описания и, как следствие, возможности самостоятельной реализации и корректировки этого процесса заинтересованными пользователями, будет способствовать повышению востребованности данных МТВЗА-ГЯ при решении практических задач ДЗЗ.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. СВЧ-радиометрия для решения задач дистанционного зондирования Земли / И. А. Барсуков [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2021. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 11 – 23.
2. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» / Д. М. Ермаков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 298 – 303.

3. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 / Г. М. Чернявский [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 78 – 100.
4. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ / И. Н. Садовский, Д. С. Сазонов // Исследование Земли из космоса, 2022. В печати.
5. Characterization of geolocation accuracy of Suomi NPP Advanced Technology Microwave Sounder measurements / Han Y. [et al.] // J. Geophys. Res. Atmos., 2016. – V. 121 (9). – P. 4933 – 4950.
6. Moradi I., Meng H., Ferraro R. R. and Bilanow S. Correcting Geolocation Errors for Microwave Instruments Aboard NOAA Satellites // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013. – Vol. 51. – № 6. – P. 3625 – 2637.
7. Geolocation Error Analysis of the Special Sensor Microwave Imager/Sounder / G. A. Poe [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008. – Vol. 46. – № 4. – P. 913 – 922.
8. Geolocation and Pointing Accuracy Analysis for the WindSat Sensor / W. E. Purdy [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006. – Vol. 44. – № 3. – P. 496 – 505.
9. Wiebe H., Heygste G. and Meyer-Lerbs L. Geolocation of AMSR-E data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008. – Vol. 46. – № 10. – P. 3098 – 3103.
10. Zhou J., Yang H. and Anderson K. SNPP ATMS On-Orbit Geolocation Error Evaluation and Correction Algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019. – Vol. 57. – № 6. – P. 3802 – 3812.
11. Nelder J. A., Mead R. A Simplex Method for Function Minimization // Computer Journal, 1965. – Vol. 7. – P. 308 – 313.

ОТ ТРАДИЦИОННЫХ ГАЛЬВАНОМЕТРОВ К ВЫСОКОТОЧНЫМ СПУТНИКОВЫМ АКСЕЛЕРОМЕТРАМ И ГРАВИОГРАДИЕНТОМЕТРАМ

В. Б. Дубовской, В. И. Леонтьев,
И. А. Боев, В. Г. Жильников

(Федеральное государственное бюджетное учреждение наук Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва)

Рассматривается методология трансформации многолетнего опыта, накопленного в разработках традиционных гальванометров как базового элемента при конструировании высокотехнологичных спутниковых акселерометров с торсионным подвесом. Приводятся критерии конструктивных решений акселерометров для достижения предельного разрешения и рассматривается возможность использования этих приборов для космической геодезической системы и ДЗЗ. Приводятся параметры и конструкция последней модификации спутниковых акселерометра высокого разрешения (10^{-10} g) как базового элемента спутникового гравигradientометра, результаты его испытаний и перспективы его использования для гравинерциальных спутниковых систем.

Ключевые слова: акселерометр, гравигradientометр, конструкция, спутник, микроускорение, gradient, сила тяжести, гравитационное поле Земли.

Первые образцы гальванометров с магнитоэлектрическими измерительными системами появились практически одновременно с открытием взаимодействия магнитной стрелки с проводником при прохождении через него электрического тока. Измерительный механизм гальванометра с подвижной рамкой был предложен У. Томсоном в 1867 году. Дальнейшее развитие конструкций гальванометров определялось улучшением параметров измерительной системы, особенно магнитных систем, способов крепления и конструкции подвижных частей, отсчетных и регистрирующих устройств и т. д. В 1931 году Л. Бергман [1] предложил ввести в состав гальванометра источник света, подвижную рамку с зеркалом и фотоэлементы, выходной сигнал с которых приходил на регистрирующее устройство. Подобное устройство, называемое фотогальванометрическим усилителем (ФГУ), обладало очень высокой разрешающей способностью, преобразованные в дальнейшем Л. Ф. Куликовским в фотогальванометрические автокомпенсаторы, показания которых благодаря глубокой отрицательной связи практически не зависели от колебаний питающих напряжений.

Этот прибор практически содержит все элементы конструкции акселерометра, отличается только тем, что подвижная система гальванометра сбалансирована относительно торсионной подвески.

Первый спутниковый акселерометр этого типа был изготовлен с использованием фотогальванометрического усилителя с незначительными изменениями: была введена пробная масса, осуществляющая дебаланс относительно оси подвеса рамки, в фотоэлектрическом датчике перемещений лампа накаливания заменена на светодиод, корпус прибора был заполнен силиконовой жидкостью для защиты от перегрузок при запуске спутника.



Рис. 1. Линейка спутниковых акселерометров, разработанных в ИФЗ РАН

Последующие многочисленные модификации спутниковых акселерометров этого типа (рис. 1) имели значительные конструктивные изменения, а в системах обработки полезного сигнала использовались последние достижения в области микроэлектроники, светотехники, магнитных материалов и т. д.

В течение почти полувека эти акселерометры функционировали на российских космических аппаратах «Салют», «Союз», «Прогресс», станции «Мир», и в настоящее время последняя модификация «ИМУ-Ц» является штатным прибором на Международной космической станции (МКС).

Технологии построения спутниковых акселерометров были использованы для разработок наземных геофизических приборов: наклономеров, микроинвельриров [2], скважинных инклинометров [3], стрейн-сейсмометров, прецизионных гравиметров, таких как серийно выпускавшиеся ГАГ-3М с рекордным разрешением $3 - 5 \times 10^{-10}$ g. [4].

На базе этих приборов ведется разработка спутникового гравииградиентометрического комплекса для картирования гравитационного поля Земли (ГПЗ).

Одной из последних разработок Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) является экспериментальный образец высокочувствительного акселерометра (ВА) с торсионным подвесом пробной массы, магнитоэлектрической обратной связью и разрешением порядка 10^{-10} g (g – ускорение свободного падения) в частотном диапазоне 0,001 – 0,1 Гц.

По сравнению с аналогичными зарубежными разработками в области гравииградиентометрии на основе гравинерциальных датчиков с электростатическим подвесом пробной массы, требующих сложной и дорогостоящей технологии изготовления, при создании данных приборов применялись подходы, позволяющие достичь сравнимые с зарубежными аналогами выходные характеристики приборов путем использования оригинальной и менее затратной технологии. На конструктивные элементы этих разработок получены патенты [5 – 11].

Эта технология позволяет обеспечить высокое разрешение, линейность масштабного коэффициента и минимальное смещение нуля.

Упругая связь маятника с корпусом прибора позволяет реализовать строгое задание оси чувствительности акселерометра, возможность проведения полномасштабных испытаний в наземных условиях, а наличие ограничителей движения маятника по всем степеням свободы не приводит к потере работоспособности акселерометров после воздействия больших перегрузок при выведении на орбиту.

Проект создания перспективной космической геодезической системы (КГС) «ГЕО-ИК-3» может быть реализован только при наличии в составе космических аппаратов гравинерциальной и гравиградиентометрической аппаратуры с уровнем разрешения порядка $10-11 \dots 10-13$ г и $0,1 \dots 0,01$ Этвеш (Э) соответственно. Завершенных отечественных образцов такой аппаратуры, выполненных на современном технологическом уровне, к сожалению, не существует.

Технические характеристики акселерометра ВА приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики акселерометра ВА

Характеристика	Значение
Диапазон (два диапазона), g	8×10^{-5} и 8×10^{-4}
Разрешение, g	10^{-10}
Нелинейность, %	0,1
Частотный диапазон, Гц	0,1 – 0,001
Температурный диапазон, °С	-20 – +50
Температурный коэффициент масштаба, %/°С	0,03
Потребление, Вт	менее 1
Габариты, мм	115×55×65
Масса, г	350

Для создания высокоточного спутникового гравинерциального датчика компенсационного типа, который содержит корпус; маятник с инерционной массой; торсионный подвес; датчик перемещений; систему магнитоэлектрической обратной связи необходимо выполнить ряд условий.

Условием, ограничивающим регистрацию малых ускорений, является ограничение по броуновским шумам, определяемым соотношением:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{4kT\omega_0\Delta f}{mQ}},$$

где $\sigma(x)$ – ускорение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; ω_0 – собственная частота упругой системы; Δf – частота среза регистрируемого сигнала; m – масса пробного тела; Q – добротность.

Из приведенного соотношения следует, что шумы акселерометра можно минимизировать за счет уменьшения собственной частоты и колебательной системы, увеличения ее добротности и увеличения массы пробного тела.

Для достижения уровня броуновских шумов системы до величин менее 10^{-12} м/с² на частоте 0,1 Гц конструкция акселерометра должна обеспечивать следующие параметры: масса пробного тела акселерометра должна быть не менее 40 г, $\omega_0 = 0,01$ рад/с, при длине маятника 3 см и удельном упругом моменте торсионной подвески $W = 0,18$ дн см/рад., $Q = 100$.

Другим условием регистрации малых ускорений, является высокое разрешение датчика перемещений пробной массы $\sigma(x)$, собственные шумы которого не должны провоцировать ускорения более 10^{-12} м/с². Это условие достигается, когда шумы датчика перемещений не превышают величины 0,1 ангстрем (Å).

В акселерометрах маятникового типа возникает ошибка, вызываемая совместным действием на маятник чувствительной системы горизонтальных и вертикальных ускорений. Максимальные изменения отсчета акселерометра, обусловленные этим явлением, определяются следующим выражением:

$$\sigma(x) \leq \frac{xyQ(\omega)}{8\pi^2 f^2 l} \sin \Delta\phi,$$

где x и y – амплитуды возмущающих горизонтальных и вертикальных ускорений; $Q(\omega)$ – добротность резонирующего звена; l – длина маятника; f – частота; $\Delta\phi$ – разность фаз горизонтальной и вертикальной составляющей возмущения.

При $Q(\omega) = 100$; $x = y = 10^{-6} \div 10^{-5}$ м/с²; $l = 30$ см; $\Delta\phi = 90^\circ$; $f = 10$ Гц; $\sigma(x) = (4 \times 10^{-14} - 4 \times 10^{-12})$ м/с².

Наиболее эффективным методом борьбы с этим эффектом является применение средств виброзащиты.

Приведенные теоретические расчеты показывают, что технические характеристики рассмотренного типа акселерометров соответствуют требованиям, необходимым для реализации проекта КГС [12]. Эти расчеты в основном подтверждены экспериментальными исследованиями.

На рис. 2 приведены результаты лабораторных испытаний высокочувствительных акселерометров, созданных в ИФЗ РАН, для качественной оценки верхнего уровня шумов акселерометров. С этой целью два ВА с максимально близкими амплитудно-частотными характеристиками устанавливались параллельно друг другу на антисейсмической платформе. Разностный сигнал двух акселерометров позволяет качественно оценить верхний предел уровня шумов приборов.

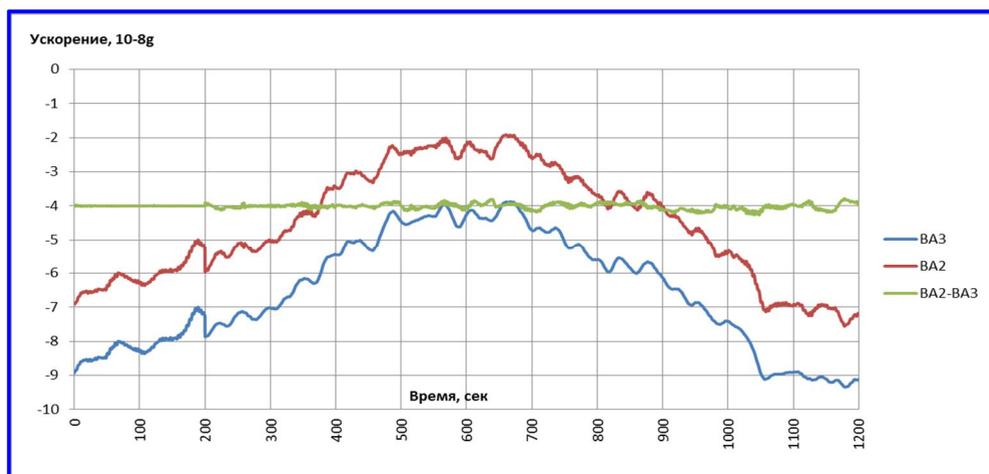


Рис. 2. Фрагмент записи сигналов двух высокочувствительных акселерометров, созданных в ИФЗ РАН

На фрагменте записи продолжительностью более 1200 с видны вариации наклона антисейсмической платформы амплитудой примерно 2 – 4 мс. Разностный сигнал двух ВА на рис. 2 не превышает величины $\pm (1,5 - 2) \times 10^{-9}$ g. Разрешение сигнала регистрации ускорений составляет величину 10^{-10} g.

Анализ технических характеристик, разработанных датчиков ускорений по чувствительности и динамическому диапазону показал, что они находятся на уровне соответствующих передовых зарубежных разработок (табл. 2) и способны решать широкий спектр задач в области космической техники и космических исследований.

Таблица 2

**Технический уровень спутниковых акселерометров
в составе градиентометра**

№	Градиентометр	Разрешение (порог чувствительности) акселерометров
1	На базе акселерометров ВА разработки ИФЗ РАН, 2020 г.	$(1 - 5) \times 10^{-10}$ g
2	На основе акселерометров типа «Кактус» фирмы ONERA, проект «Градио», Франция, 1982 г.	2×10^{-10} g
3	На основе акселерометров STAR фирмы ONERA, проект CHAMP, 2000 г.	3×10^{-10} g
4	На основе акселерометров STAR фирмы ONERA, Франция, проект GRACE, 2002 г.	3×10^{-10} g
5	На основе акселерометров Super STAR фирм ONERA и Thales Alenia Space, Франция, проект GOCE, 2009 г.	2×10^{-13} g
6	На базе перспективных отечественных акселерометров, построенных на основе предлагаемого изобретения ИФЗ РАН и НИИ КС имени А. А. Максимова	10^{-12} g

В частности, они могут с успехом применяться в отечественных низкоорбитальных КА ДЗЗ для повышения точности прогноза параметров орбит и качества решения целевых задач в космических геодезических системах серии ГЕО–ИК, для уточнения параметров гравитационного поля Земли и т. д. [13].

С нашей точки зрения, как показали результаты лабораторных исследований, идеология построения гравинерциальных приборов с торсионным подвесом, используемая ИФЗ РАН, является конкурентноспособной и самостоятельным направлением, альтернативным широко используемым в приборах с электростатическим подвесом и МЭМС технологиями.

Литература

1. Минц М. Б. Гальванометрические приборы. – Ленинград: Энергоиздат, 1982. – 181 с.
2. Микронивелир НИ-3 / В. Б. Дубовской [и др.] // Гравиметрия и геодезия. – М.: Научный мир, 2010. – С. 495 – 497.
3. Скважинный инклинометр НИ-2 / Дубовской В. Б. [и др.] // Гравиметрия и геодезия. – М.: Научный мир, 2010. – С. 497–500.
4. Дубовской В. Б., Леонтьев В. И., Сбитнев А. В. Модернизация гравиметра ГАГ-3 // Гравиметрия и геодезия. – М.: Научный мир, 2010. – С. 493–495.
5. Спутниковый акселерометр : пат. 2627014 Рос. Федерация. № 2016130705; заявл. 27.07.16; опубл. 02.08.17, Бюл. № 22. – 18 с.
6. Термостат : пат. 9970006 СССР № 3267732/18-24; заявл. 31.03.81; опубл. 15.02.83, Бюл. № 6. – 4 с.
7. Способ регистрации деформации земной коры : пат. 93048638 Рос. Федерация № 93048638/25; заявл. 20.10.93; опубл. 20.04.96.
8. Способ ориентации космических аппаратов : пат. 239398 СССР; опубл. 01.07.86.
9. Способ определения гравитационных градиентов : пат. 230520 СССР; опубл. 02.01.86.
10. Стрейн-сейсмометр: пат. 93048611 Рос. Федерация. В. Б. Дубовской, В. И. Леонтьев; опубл. 20.10.93.
11. Стрейн-сейсмограф: пат. 2053527 Рос. Федерация. № 93048611/25; заявл. 20.10.1993; опубл. 27.01.96. – 5 с.
12. Разработки высокоточных космических и наземных акселерометрических и гравиметрических приборов / В. Г. Пшеничник [и др.] // Сборник тезисов конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение». – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2017. – С. 84 – 86.
13. Милюков В. К., Филеткин А. И., Жамков А. С. Космический гравитационный градиентометр: пути повышения точности моделей гравитационного поля Земли. ЖЭТФ, 2022. – Т. 161. – Вып. 4. – С. 596 – 609.

БОРТОВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ РАДИОЛИНИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

¹Е. В. Овчинникова, ¹Нгуен Динь То,
^{1,2}С. Г. Кондратьева, ^{1,2}П. А. Шмачилин,

¹А. И. Гиголо, ¹Т. А. Трофимова, ¹А. Ю. Щербачев

(¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва;

²Математический институт им. С. М. Никольского (Российский университет дружбы народов (РУДН)), г. Москва)

В работе рассмотрена и предложена бортовая антенная решетка для перспективного применения в составе радиолинии космического аппарата. В частности, разработана электродинамическая модель антенной решетки сантиметрового диапазона для применения в составе радиолинии передачи целевой информации космических аппаратов. В качестве излучателей антенной решетки предложено применение волноводного излучателя на основе поляризатора с линейной и ступенчатой вставкой путем включения в него выступов. Приведены частотные, поляризационные характеристики и характеристики направленности. Даны частотные, поляризационные характеристики и характеристики направленности. Показано, что уменьшение продольного габарита в два раза приводит к незначительному изменению частотных и поляризационных характеристик, а взаимодействие излучателей существенно влияет на характеристики направленности и поляризационные характеристики. Выполнено моделирование антенного полотна и распределительной системы линейной антенной решетки из волноводных излучателей с линейной перегородкой и выступами.

Ключевые слова: антенные решетки, космический аппарат, волноводные поляризаторы, ступенчатые поляризаторы, поляризаторы с линейной перегородкой.

Введение

В настоящее время к радиолинии передачи целевой информации (РЛЦИ) существенно выросли и ужесточились требования. Повышение пространственного разрешения снимков современных КА ДЗЗ приводит к возрастанию объемов информации, которые необходимо оперативно сбрасывать на наземные пункты приема информации [1, 2].

Поэтому дальнейшим направлением развития РЛЦИ является повышение скорости передачи информации, а именно разработка высокоскоростной радиолинии (ВРЛ) [3].

Основная часть

Рупорные и волноводные излучатели находят широкое применение в мобильных телекоммуникационных системах. Они используются в качестве облучателей зеркальных антенн и как элементы антенных решеток. Волноводные

антенны и элементы фидерного тракта отличает высокая технологичность, а также слабая зависимость характеристик от неточностей изготовления.

Волноводные антенны на основе квадратных поляризаторов технологичны, работают в широкой полосе частот, обладают хорошими поляризационными характеристиками и низким уровнем кроссполяризационного излучения. Однако продольные габариты ограничивают области применения таких антенн. От продольных габаритов зависит формирование необходимого фазового сдвига 90° между волнами H_{10} и H_{01} , который обеспечивает замедляющая система. Применение комбинированных замедляющих систем различных типов позволяет получить фазовый сдвиг при меньшей длине поляризатора.

В работе в качестве элемента волноводной антенной решетки рассмотрен волноводный излучатель на основе квадратного волновода с линейной перегородкой и выступами, представленный на рис. 1 [4, 5].

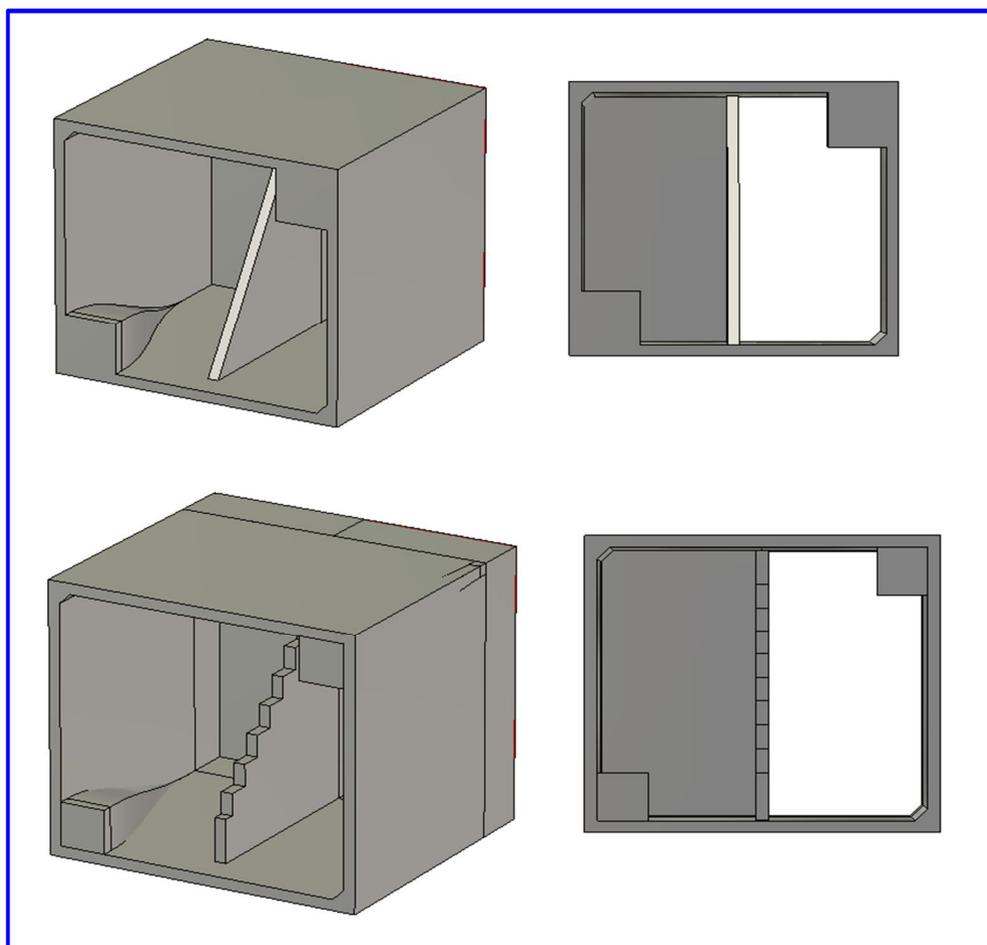


Рис. 1. Общий вид волноводного излучателя с линейной перегородкой

В результате параметрической оптимизации поляризатора, возбуждаемого прямоугольным волноводом, его длина получилась $0,6 - 0,7\lambda$ в рабочем диапазоне частот $8 - 8,5$ ГГц.

Многочисленные результаты исследования волноводных поляризаторов показывают, что использование ступенчатой перегородки улучшает частотные характеристики, но влиянию формы перегородки на поляризационные характеристики в литературе уделяется недостаточно большое внимание. В работе [6] показано, что путем сглаживания ступеней ступенчатого поляризатора достигается уменьшение коэффициента отражения и, соответственно, улучшение энергетических характеристик. Но это приводит к ухудшению зависимостей коэффициента эллиптичности от пространственных координат.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента эллиптичности от азимутальной угловой координаты для излучателя с линейной и ступенчатой перегородкой.

На рис. 2 черными линиями обозначены характеристики для излучателя с линейной перегородкой, а красными – для излучателя со ступенчатой перегородкой. Из рис. 2 видно, что коэффициент эллиптичности не менее $0,7$ в секторе углов $\pm 70^\circ$. Для оценки характеристик разработанной конструкции целесообразно ее сравнить с конструкцией антенны-прототипа, рассмотренной в работе [7].

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента эллиптичности для антенны-прототипа и волноводного излучателя с выступами, линейной перегородкой и волноводным возбуждением.

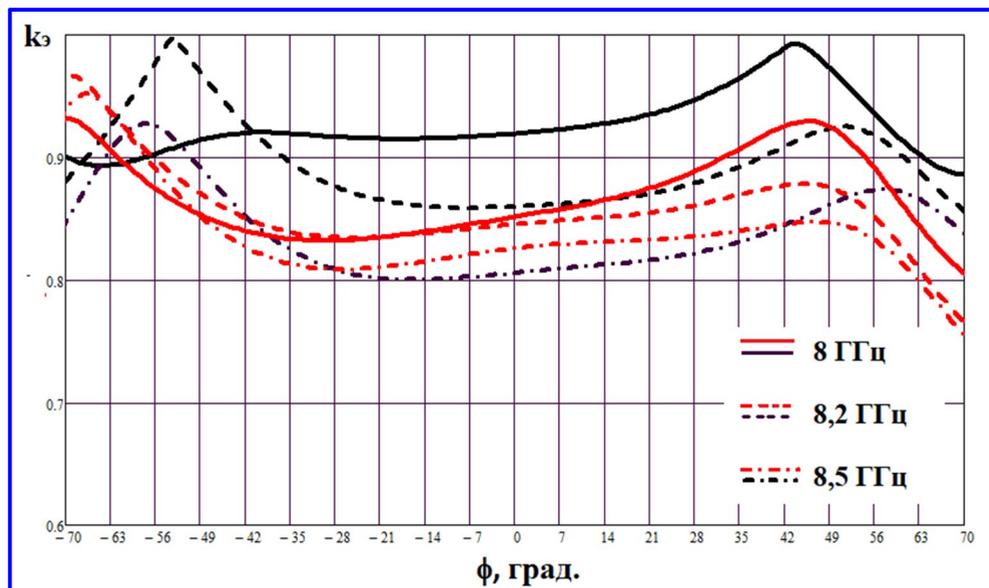


Рис. 2. Зависимости коэффициента эллиптичности от азимутальной угловой координаты

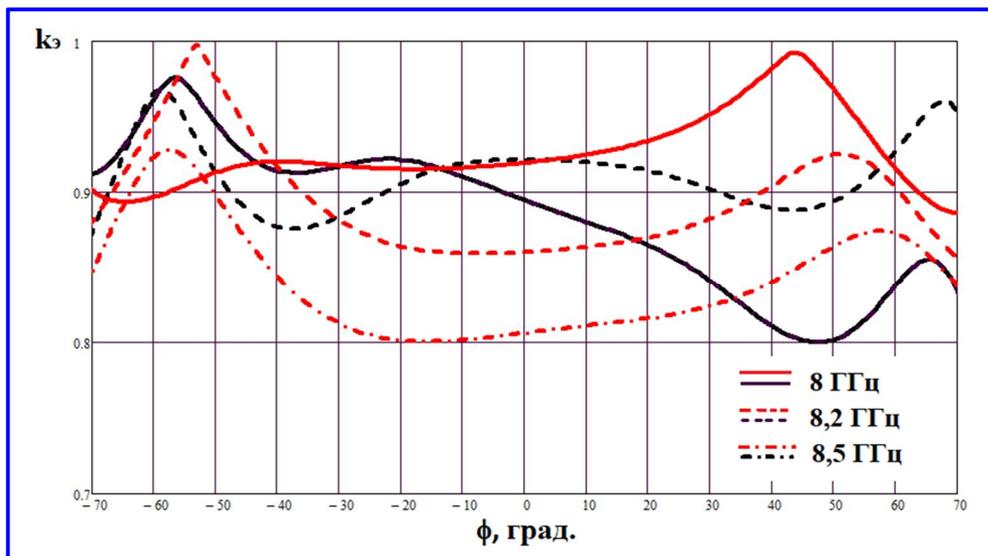


Рис. 3. Зависимости коэффициента эллиптичности от азимутальной угловой координаты

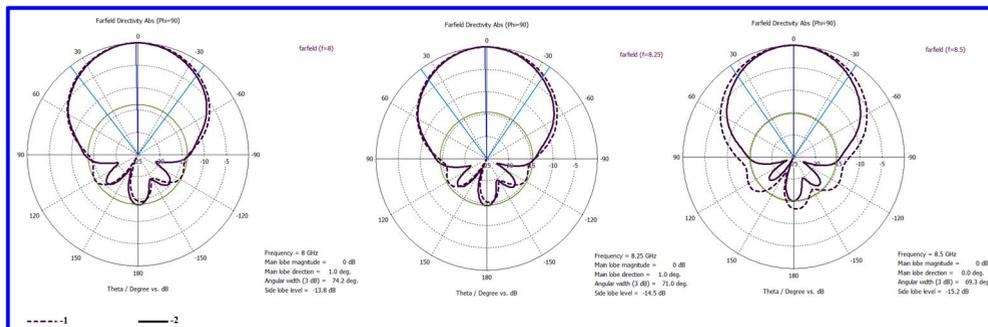


Рис. 4. Диаграммы направленности: 1 – с выступами, линейной перегородкой и волноводным возбуждением; 2 – с линейной перегородкой и волноводным возбуждением

На рис. 3 черными линиями обозначены характеристики для излучателя с линейной перегородкой, а красными – для излучателя с линейной перегородкой и выступами. Из рис. 3 видно, что зависимость коэффициента эллиптичности в секторе углов не зависит от типа замедляющей системы.

На рис. 4 показаны диаграммы направленности (ДН) для антенны-прототипа и волноводного излучателя с выступами, линейной перегородкой и волноводным возбуждением.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты для поляризаторов с линейной перегородкой, линейной перегородкой и выступами, ступенчатой перегородкой и выступами.

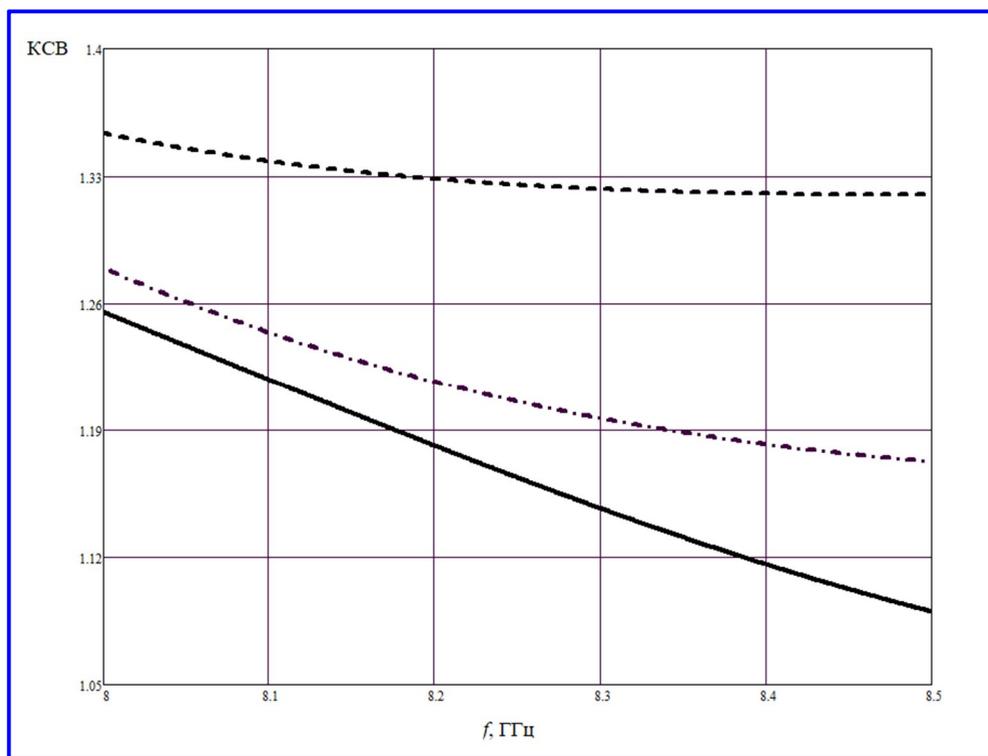


Рис. 5. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты

Сплошной линией на рис. 5 показана зависимость для поляризатора с линейной перегородкой, пунктирной линией – для поляризатора с линейной перегородкой и выступами, а штрихпунктирной линией – для поляризатора со ступенчатой перегородкой.

Разработанная конструкция позволяет в два раза уменьшить длину излучателя при сохранении его частотных и поляризационных характеристик. Также рассмотрены различные способы возбуждения антенны.

Существенное влияние на характеристики волноводных излучателей оказывает взаимодействие элементов в антенной решетке. Поэтому важнейшим этапом проектирования антенной системы является разработка структуры антенного полотна. Безусловно, оптимальное размещение элементов позволяет снизить эффект взаимодействия элементов. В работе рассмотрены характеристики антенной решетки из восьми элементов. Приведены характеристики направленности, частотные и поляризационные характеристики.

Следующая немаловажная задача связана с повышением энергетического потенциала антенных систем, которая может осуществляться различными способами: путем увеличения излучаемой мощности или коэффициента усиления антенны. Для повышения коэффициента усиления антенн целесообразно использовать многоэлементные антенные системы.

Заключение

Таким образом, разработана модель компактного волноводного излучателя с линейной перегородкой и выступами. Проведено моделирование и параметрическая оптимизация такого излучателя. Приведены модели антенных систем из излучателей на основе квадратного волновода. Показано влияние распределительной системы и взаимодействия излучателей на поляризационные характеристики элемента.

Литература

1. Бахтин А. А., Омелянчук Е. В., Семенова А. Ю. Анализ современных возможностей организации сверхвысокоскоростных спутниковых радиолиний // Труды МАИ, 2017. – № 96. – URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/838/Bakhtin_Omelyanchuk_Semenova_rus.pdf?ysclid=la2lwyle7307793169&referer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F.
2. Бекренев О. В., Гончаров А. К., Мартынов С. И. Антенные системы приемных комплексов для оснащения приемных станций ЕТРИС. // Тезисы докладов конференции «Иосифьяновские чтения 2017». – Истра: НИИЭМ, 2017. – С. 240–241.
3. Антенные системы радиолинии передачи информации космических аппаратов: состояние и перспективы развития / Е. В. Овчинникова [и др.] // Радиотехника, 2021. – Т. 85. – № 3. – С. 86 – 95. – DOI 10.18127/j00338486-202103-09.
4. Моделирование антенной решетки из волноводных излучателей на основе септум-поляризаторов / Е. В. Овчинникова [и др.] // Радиотехника, 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 108 – 118. – DOI 10.18127/j00338486-202104-12.
5. Малогабаритный волноводный излучатель / Е. В. Овчинникова [и др.] // Инжиниринг и телекоммуникации – En&T 2021 : Сборник тезисов VIII Международной конференции, Долгопрудный, 24–25 ноября 2021 года. – Москва/Долгопрудный: Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 2021. – С. 59 – 62.
6. I. Kim, J. M. Kovitz and Y. Rahmat-Samii, «Enhancing The Power Capabilities of the Stepped Septum Using an Optimized Smooth Sigmoid Profile», in IEEE Antennas and Propagation Magazine, Oct. 2014. – Vol. 56. – № 5. – P. 16 – 42. – DOI: 10.1109 / MAP.2014.6971913.
7. Фролов О. П., Вальд В. В. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ АНТЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ – МЕТОД «СОЛНЕЧНОЙ КРИВОЙ АК»**А. К. Гончаров**

(АО «Российские космические системы», г. Москва)

Метод основан на определении коэффициента усиления антенных комплексов по измеренному значению уровня сигнала при наведении антенны на Солнце. Существующий радиоастрономический метод измерения коэффициента усиления по Солнцу требует учета соотношения ширины диаграммы направленности и углового размера солнечного диска, то есть знания ширины диаграммы направленности или измерения ее дополнительным способом [1, 2]. Использование этого метода достаточно трудоемко, а точность измерения невысокая. Предлагаемый метод измерения коэффициента усиления не требует проведения измерения ширины диаграммы направленности исследуемой антенны, прост в реализации и имеет потенциально высокую точность определения коэффициента усиления исследуемой антенны и может быть применен для приемных комплексов независимо от их территориального размещения. Метод основан на применении так называемой солнечной кривой АК, которая формируется путем измерения уровня сигнала при наведении эталонных приемных комплексов с разными и известными коэффициентами усиления на Солнце. Эталонные приемные комплексы коэффициентов усиления входят в состав группового эталона, обеспечивая воспроизведение коэффициентов усиления разного уровня. Солнце в данном случае выполняет роль эталона сравнения рабочих эталонов коэффициента усиления, роль которых выполняют антенные комплексы, аттестованные наземными средствами измерений коэффициента усиления [4, 5].

Ключевые слова: коэффициент усиления, антенный комплекс, групповой эталон, солнечная кривая, измерение, приемный комплекс, погрешность измерения, диаграмма направленности.

На этапе отработки предлагаемого метода измерений коэффициента усиления функции группового эталона будут выполнять антенные комплексы разных диаметров антенн и, соответственно, коэффициентов усиления, аттестованными наземными средствами и введенными в эксплуатацию в ЕТРИС ДЗЗ. Большой парк приемных комплексов обеспечит получение усредненной «солнечной кривой АК», пригодной для использования для вновь вводимых приемных комплексов и комплексов после проведения ремонтных работ и модернизации.

В табл. представлены диаметры антенн, коэффициенты усиления антенных комплексов, аттестованных наземными средствами калибровки, и соотношение С/Ш при наведении на Солнце. Диаметры антенн от 2,4 до 12,0 м, частотный диапазон – 7,4 ÷ 8,4 ГГц. Значение С/Ш определяется путем отсчета разницы показаний уровня сигнала при наблюдении диска солнца и при направлении в зенит. Измерения проводятся с помощью спектроанализатора в линейном режиме приемного комплекса.

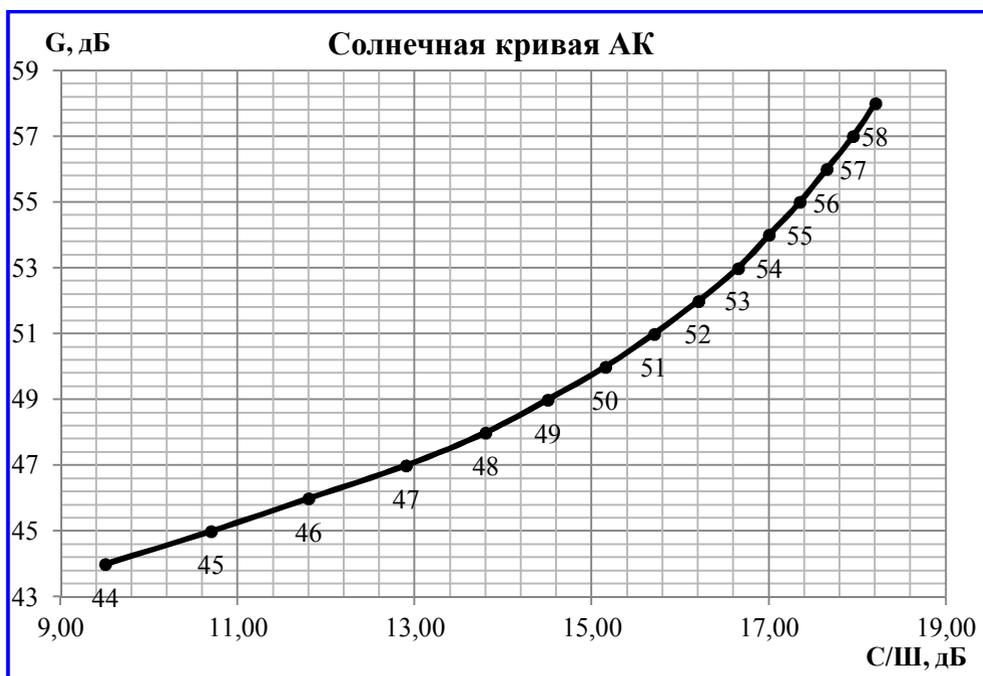


Рис. 1. Солнечная кривая АК

Таблица

Диаметр антенны, м	Коэффициент усиления, дБ	С/Ш Солнце – зенит, дБ
2,4	44,0	9,5
3,7	48,8	14,4
7,0	53,1	16,7
9,0	54,8	17,4
12,0	57,6	18,1

Принимая представленные в табл. данные в качестве опорных, построим «солнечную кривую» коэффициента усиления антенных комплексов (рис. 1).

Погрешность измерения коэффициента усиления в данном методе будет складываться из погрешности формирования «солнечной кривой АК» и стабильности источника излучения. Методическая погрешность равна нулю. Погрешность формирования «кривой» будет определяться инструментальной погрешностью измерения С/Ш и погрешностью эталонных комплексов и ожидается в районе $\pm 0,2$ дБ. Стабильность излучения источника-солнца в X-диапазоне была исследована в АН РФ в течение 20 лет и подтверждается неизменностью уровня излучения с инструментальной погрешностью не превышающей $\pm 0,2$ дБ [3]. Интегральная суммарная погрешность измерения коэффициента усиления ожидается в районе $\pm 0,3$ дБ. Измерения необходимо проводить в полдень, в безоблачную погоду. При необходимости влияние облачности можно учесть.

Результаты наблюдений стабильности уровня излучения солнца, представленные в работе [3], позволяют использовать данную кривую для определения коэффициента усиления антенных комплексов в диапазоне спектра $5,0 \div 10,0$ ГГц. Таким образом, имеем достаточно широкий частотный диапазон применения. При этом, одновременно имеем и хороший диапазон значений коэффициентов усиления.

Удобство использования данной кривой определяется простотой реализации, возможностью применения после ремонтных работ или модернизации антенных комплексов. Легко обеспечивается контроль сохранности коэффициента усиления в период эксплуатации. Применение этой кривой не зависит от места размещения антенного комплекса. АК может размещаться как в стране, так и за рубежом. Это обстоятельство может оказаться очень важным при необходимости периодического контроля характеристик приемных комплексов, установленных за рубежом.

Контрольная проверка достоверности измерений коэффициента усиления антенных комплексов может быть проведена путем прямого приема сигнала с КА приемными комплексами с разными и известными коэффициентами усиления. Пример такого измерения представлен на рис. 2.

Отличие коэффициентов усиления соответствует паспортным данным коэффициентов усиления.

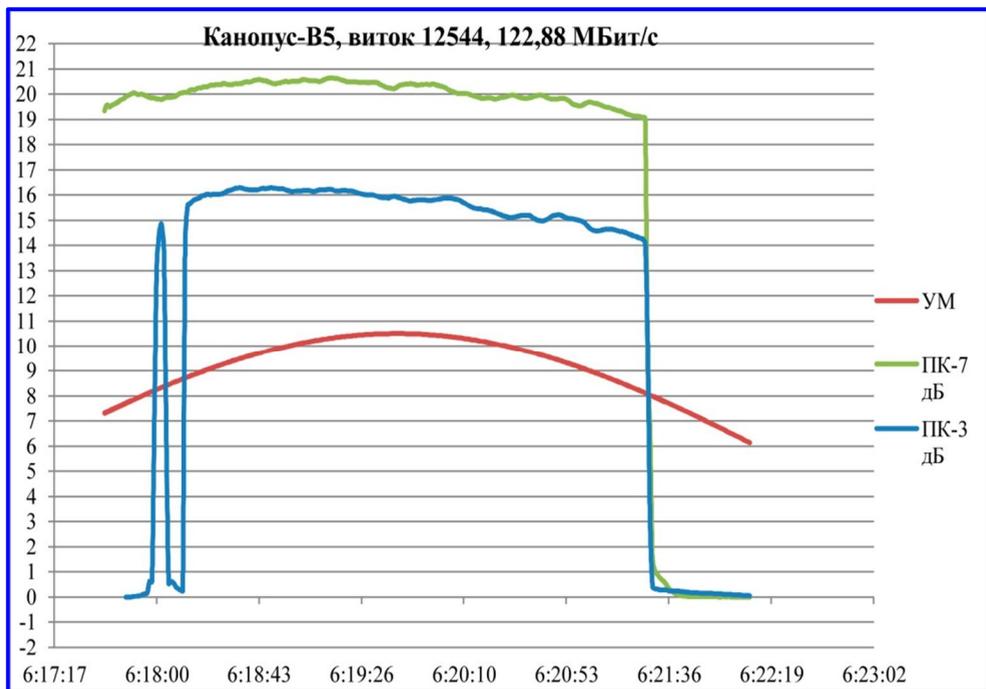


Рис. 2. Пример регистрации сигнала с КА «Канопус-В» на приемные комплексы с разными и известными коэффициентами усиления

Представленный метод определения коэффициента усиления распространяется на указанный диапазон частот. Возможность распространения на другие диапазоны частот требует дальнейшей проработки.

Литература

1. Основные методы измерения коэффициента усиления антенн / Е. Н. Шестаков [и др.]. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 2019. – Т. 1. – С. 500 – 502.
2. Гавриленко В. Г., Калинин А. В. Методы измерения характеристик антенн по сигналам внеземных радиоисточников: Электронное учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2012. – 58 с.
3. Боровик В. Н. Исследование спокойного солнца в микроволновом диапазоне на радиотелескопах РАТАН-600 и БПР в XX–XXII циклах солнечной активности: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук : 01.03.02 / Специальная астрофиз. обсерватория. – Нижний Архыз, 1997. – 42 с.
4. Методы измерения характеристик антенн СВЧ // Под ред. Н. М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. – 368 с.
5. Фролов О. П., Вальд В. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковых связи. – Смоленск: Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЗЗ ДЛЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СТРАНЫ

К. В. Некрасова

*(Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В. Ф. Уткина, г. Рязань)*

В докладе рассматриваются следующие направления использования перспективных комплексов приема и обработки информации ДЗЗ для социально-экономического развития страны и отдельно взятых регионов.

Первое направление – создание средств обработки данных ДЗЗ от систем космического наблюдения в видимом тепловом и радиолокационном диапазонах спектра с целью социально-экономического развития региона.

Второе направление – взаимодействие регионально-отраслевых служб управления народным хозяйством (сельское, лесное хозяйство и т. п.) с аэрокосмическим сегментом получения данных ДЗЗ.

Третье направление – Изучение потребностей региональных служб управления народным хозяйством в том или ином виде аэрокосмических наблюдений Земли.

Литература

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / С. В. Антонушкина [и др.] // Под ред. В. В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.
2. Повышение информативности космических изображений Земли: монография / Н. А. Егошкин [и др.] // Под ред. В. В. Еремеева. – Москва: КУРС, 2022. – 368 с.
3. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли / Н. А. Егошкин [и др.] // – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. – 320 с.

ПОИСК ОДНОРОДНЫХ ПО ЯРКОСТИ ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМЛИ

В. А. Еремеев

*(Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина,
г. Рязань)*

В докладе представлен подход к автоматическому поиску однородных областей на снимках от космических систем наблюдения Земли с целью оценки отношения «сигнал/шум». Традиционно отбор эталонных фрагментов изображения для анализа производится с привлечением труда оператора, что в значительной мере замедляет выполнение этой процедуры. Применение технологий искусственного интеллекта позволит значительно ускорить процесс оценки отношения «сигнал/шум» и исключить ошибки, связанные с человеческим фактором.

Задача сегментации однородных областей остается актуальной уже не одно десятилетие, в связи с этим существует множество различных подходов [1]: пороговая сегментация (пиксель относят в ту или иную категорию на основе некоторых пороговых значений), сегментация на основе областей с однородной яркостью, контурная сегментация (детекторы обнаружения границ), текстурная сегментация (текстурный анализ изображения). Указанные подходы имеют ряд ограничений и нуждаются в дополнительной постобработке. Кроме того, традиционные методы сегментации не обладают какой-либо устойчивостью к изображениям, имеющим характерные радиометрические искажения. Технологии искусственного интеллекта, а именно сверточные нейронные сети, позволяют учесть эти недостатки и реализовать поиск однородных фрагментов в автоматическом режиме.

Предлагаемое решение основано на использовании сверточной нейронной сети U-Net [2] и текстурных признаках изображения. Архитектура U-Net показала свою эффективность в сегментации спутниковых снимков и, благодаря своим свойствам, не требует большого объема обучающей выборки. Для обучения сети сформирован набор данных на основе мультиспектральных снимков от космического аппарата «Ресурс-П». Входными данными для сети являются фрагменты размером 256×256 , при этом первым трем каналам соответствуют полосы красного, зеленого и синего спектра, а в четвертый канал помещаются текстурные признаки изображения, позволяющие значительно повысить точность сегментации. В качестве текстурных признаков используются признаки [3], вычисление которых основано на матрице смежности уровней серого и статистических показателях. При помощи матрицы уровней серого извлекаются все 14 известных признаков, однако экспериментальным путем установлено, что для обнаружения однородных областей достаточно наиболее информативного признака Sum of square, который не подвержен

избыточной детализации и с достаточной точностью описывает границы однородных областей для используемых изображений.

В докладе приводятся примеры, иллюстрирующие результат работы предложенного метода поиска однородных фрагментов на видеоданных от космического аппарата «Ресурс-П», а также численные оценки качества работы алгоритма.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012. – 797 с.
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Springer, LNCS, 2015. – V. 9351. – P. 234–241.
3. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973. – V. 3. – № 6. – С. 610–621.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА РАНЖИРОВОК ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДЗЗ

Н. И. Сидняев, Е. С. Казанцева

(Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
г. Москва)

В статье изучается вопрос статистического метода анализа ранжировок обработки информации при ДЗЗ, а также упорядочения объектов по степени обладания ими определенных свойств. Постулируются модели ранжировок со связями, табулируются точные распределения статистик ранговых критериев и строятся приближенные критерии, использующие те или иные приближения соответствующих точных распределений. Рассматривается проблема использования определенных коэффициентов ранговой корреляции, сравнение их друг с другом. Приведены результаты таблиц распределения, рассмотрена сложность вычисления критериев и свойства коэффициентов, соответствующих им параметров.

Ключевые слова: Ранжировка, коэффициент ранговой корреляции, информация, сравнение критериев, обработка, статистика.

Введение

Цифровые космические изображения в оптическом диапазоне получают с помощью оптико-электронных систем. Большинство современных съемочных систем видимого и ближнего инфракрасного диапазонов используют в качестве оптико-электронного преобразователя [1 – 3]. Формирование изображений в таких системах осуществляется путем преобразования светового потока в электрический сигнал. Линейный сканер содержит расположенные в линию неподвижные миниатюрные фоточувствительные элементы, размеры которых порядка 5 – 10 мкм, или несколько таких линеек. Число фотоприемников в линейке составляет от 2048 и более, длина линейки – порядка 1 см. На линейки через объектив фокусируется изображение земной поверхности, все элементы находятся в фокальной плоскости. Линейка ориентирована поперек направления движения спутника, она перемещается вместе со спутником, последовательно «считывая» сигнал, пропорциональный яркости различных участков поверхности [2 – 4]. Формирование снимка такими системами производится построчно, причем изображение может быть сформировано как неподвижной линейкой во время движения аппарата, так и самим перемещением линейки внутри съемочной камеры или проекции части зоны обзора относительно неподвижной линейки перпендикулярно к линии полета аппарата. Таким образом, изображение цифрового снимка, полученного оптико-электронной съемочной системой, представляет собой матрицу цифровых кодов яркостей [3 – 5]. Как отмечалось выше, содержание этапа предварительной обработки не стандартизовано. Каждый поставщик ДЗЗ разрабатывает свою систему и наименования [2 – 6]. Условно можно выделить следующие общие для всех систем процедуры, входящие в этап предварительной обработки: радиометрическая коррекция – R ; приведение снимков в картографическую проекцию по орбитальным данным – G ; орторектификация (ортотрансформирование) – O .



Рис. 1. Дистанционное аэрокосмическое зондирование

Информационные продукты, соответствующие каждой процедуре предварительной обработки, отличаются гарантированной точностью географической привязки, параметрами кадра и форматом представления графической информации. Радиометрическая коррекция выполняется с целью формирования единого изображения из отдельных строк, введения поправок, учитывающих внутренние искажения съемочной системы (дисторсия объектива, пропуски пикселей), а также отклонение сенсора, кривизну Земли. Информационные продукты, прошедшие только радиометрическую коррекцию, содержат наименьшие изменения и лучше всего подходят для фотограмметрической обработки (рис. 1).

Широко распространенным приемом экспертного оценивания информационного продукта является упорядочение объектов по степени обладания ими определенным свойством [6 – 9]. После упорядочения каждый из объектов получает ранг, то есть номер занятого им места. Допустим, перед нами совокупность трех объектов a , b , c , после упорядочения которой оказалось, что информационный объект b лучше объекта a , который, в свою очередь, лучше объекта c . В результате объект b получает ранг 1, объект a – ранг 2, объект c – ранг 3. Ранги объектов, записанные в том порядке, в каком стоят объекты в первоначальном списке, образуют ранжировку R . В рассмотренном примере $R = (2, 1, 3)$. Процедура приписывания объектам рангов называется ранжированием [7 – 11].

Если выраженность интересующего нас признака у объектов a , b , c можно измерить и получить таким образом количественные результаты x , y , z , то можно (и часто нужно) расположить эти числа по убыванию или по возрастанию. В нашем примере $y > x > z$, при ранжировании по убыванию информационный объект a получает ранг 2, b – ранг 1, c – ранг 3, а при ранжировании по возрастанию объект c получит ранг 3, объект b – $(3 - 1)$, a – $(3 - 2)$, причем ранги 1 и 2 получают те объекты, количественные результаты которых имеют наименьшее и второе по величине значение. Если для двух и более объектов выраженность признака одинакова, то этим объектам назначают одинаковые ранги. Это делается следующим образом. Пусть l -объекты более важны, чем группа из t одинаково важных объектов. В таком случае каждый из t -объектов получает ранг $r = l + (t + 1)/2$. Для контроля полезно проверить, равна ли сумма рангов всех n -объектов $n(n + 1)/2$.

Например, пусть количественные результаты измерения для 8 объектов равны 8, 16, 16, 16, 21, 27, 27, 40, тогда ранги (по возрастанию) 1; 3; 3; 3; 5; 6,5; 6,5; 8. Пусть R_i – ранг i -го объекта, $i=1, \dots, n$. Связанные ранги получают следующим образом: $R_6 = R_7 = 5 + (2 + 1)/2 = 5 + 1,5 = 6,5$. Неправильно было бы приписать ранг 6 объектам 6 и 7, или ранг 3 объектам 2, 3, 4, как это иногда делается. Числа t будут длиной связи (связки). В примере длина 1-й связки $t_1 = 3$, а второй $t_2 = 2$. Ключевой момент анализа экспертных ранжировок – выбор способа измерения согласованности (близости) двух экспертных ранжировок. В статистике традиционно мера близости вводится в виде коэффициента ранговой корреляции (КРК), который обозначим $r'(R, Q)$, где R, Q – две ранжировки заданных n -объектов. Часто применяются несколько различных КРК: Спирмена (ρ), Кендалла (τ), простого правила (d). Для объяснения выбора того или иного из них обсудим проблему использования КРК. В экспертных оценках мера близости играет двоякую роль: во-первых, с ее помощью составляется коллективное (результатирующее) упорядочение (в ГОСТ 24554.2 – 81 оно трактуется как обобщенное суждение экспертов); во-вторых, с ее помощью предварительно проверяется согласованность собранных упорядочений (ранжировок). В том и другом случае меру близости в виде КРК можно рассматривать как случайную величину, поскольку она является функцией случайных ранжировок. Последнее допущение (о случайности ранжировок) – основа всего статистического подхода к анализу ранжировок (см., например, [8 – 10]). КРК $r' = r'(R_i, Q_s)$ применяются для проверки согласованности между двумя ранжировками $R_i, R_s, i = 1, \dots, m, s = 1, \dots, m, i \neq s$. Согласованность трех и более экспертных ранжировок можно проверять с помощью случайной величины:

$$A = \sum_{1 \leq i \leq s \leq m} r'(R_i, R_s) / C_2^m, \quad (1)$$

где C_2^m – число сочетаний из m по 2; r' – средний КРК по всем $C_2^m = m(m-1)/2$ парам ранжировок.

Вопрос согласованности традиционно трансформируется в другой: можно ли считать данную выборку из m -ранжировок, полученной за счет чистой случайности (то есть путем случайного назначения рангов) или же это маловероятно? Решение этого вопроса достигается следующим образом: вводится вероятностная модель, обеспечивающая равномерное распределение на пространстве всех возможных исходов эксперимента. Это означает, что каждый из возможных $(n!)^m$ -наборов ранжировок без одинаковых рангов (связей) $R_1 = (R_{11}, \dots, R_{1m}), \dots, R_i = (R_{i1}, \dots, R_{im}), \dots, R_m = (R_{m1}, \dots, R_{mn})$ появляется с вероятностью $1/(n!)^m$. Это и есть гипотеза чистой случайности H_0 , означающая несогласованность m -ранжировок R_1, \dots, R_m . Если допускаются связанные ранги, то множество возможных исходов экспериментов обычно составляется из всех ранжировок той же самой конфигурации [7 – 13], то есть с тем же набором длин связей t_1, t_2, \dots, t_g , что и наблюдаемая. Например, если в ран-

жировке имелись две связи ($g = 2$) длиной $t_1 = 2$ и $t_2 = 3$, то к ней мысленно присоединяются все возможные ранжировки такой же длины n с двумя связями длины 2 и 3. Именно на основании такой модели ранжировок со связями табулируются точные распределения статистик ранговых критериев и строятся приближенные критерии, использующие те или иные приближения соответствующих точных распределений. Традиция построения такого множества исходов не имеет серьезного обоснования, однако весьма распространена из-за относительной простоты получения распределений. Согласованность трактуется как невыполнение нулевой гипотезы H_0 , причем величина статистики r' или A должна быть настолько велика, чтобы вероятность отклонения H_0 , когда она на самом деле верна, была равна или меньше α , где α – выбранный заранее уровень значимости (см., например [14 – 16]). Величина α обычно выбирается одной из следующих: 0,001; 0,005; 0,01; 0,05; 0,10. В ГОСТ 23554.2-81 рекомендованы три последних значения. В качестве примера укажем связь с дисперсионным анализом. Гипотеза H_0 и альтернатива к ней имеют следующую формулировку в терминах двухфакторного дисперсионного анализа:

1. Используется модель:

$$X_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + e_{ij}, \quad (2)$$

где μ – неизвестное общее среднее; β – эффект блока i ; τ_j – эффект обработки j ; $\sum_{1 \leq j \leq n} \tau_j = \sum_{1 \leq i \leq m} \beta_i = 0$.

2. Все e_{ij} (случайные ошибки) взаимно независимы;

3. Все e_{ij} извлечены из одной непрерывной совокупности $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$.

Тогда $H_0 : \tau_1 = \dots = \tau_m$ против альтернативы о том, что не все τ равны между собой.

Если вместо X_{i1}, \dots, X_{im} известны лишь ранги R_{i1}, \dots, R_{im} , то получим частный случай предыдущей ситуации. Для поиска так называемых критических значений r_0, A_0 критериев r', A (и других, им подобных) для тех или иных ансамблей требуется вычислять и табулировать законы распределения статистик r', A при гипотезе H_0 . При больших n, m для большинства ранговых критериев трудоемкость этой работы не позволяет ее выполнить и точное распределение заменяется асимптотическим. Как табулирование, так и подбор приближенного распределения не являются простыми операциями. Для табулирования требуются специальные алгоритмы, программы и большие затраты машинного времени. Предлагавшиеся ранее приближения нормальным t, χ^2 и F – распределениями слишком грубы (неточны) и их применение сейчас уже не оправдано при умеренных значениях n, m^* . В ГОСТ 23554.2-81 (разделы 3.2 и 3.3) даны улучшенные аппроксимации. Заметим, что при работе с ранговыми критериями имеет место следующая ситуация, связанная с быстрым ростом объема перебора вариантов (элементарных событий). Даже при наличии на ЭВМ программы вычисления распределения статистики

нужного нам критерия вычисление любой процентной точки его распределения требует времени.

Вернемся к выбору одного из КРК. Помимо проверки согласованности 2-х, 3-х и более ранжировок, необходимо проверять согласованность «между» группой из 2-х и более ранжировок и отдельной ранжировкой, а также согласованность между двумя группами, в каждой из которых не менее 2-х ранжировок. Более сложна задача проверки согласия $m(m \geq 2)$ неполных ранжировок, т. е. ранжировок, где некоторые объекты не ранжированы. Для решения этих задач проверки согласованности строятся критерии со статистиками – средними из КРК. Например, пусть требуется проверить согласие между ранжировками R_1, \dots, R_m и ранжировкой R^0 . Тогда статистика соответствующего критерия:

$$B = \sum_{1 \leq i \leq m} r'(R_i, R^0) / m. \quad (3)$$

Такой подход к построению критериев проверки согласованности по средним КРК (3) требует выбора (единого) КРК для всех перечисленных процедур проверки согласованности. Особенно важен этот выбор потому, что обобщенное суждение по отношению к R_1, \dots, R_m в виде ранжировки обычно находится следующим образом:

$$\sum_{1 \leq i \leq m} r'(R_i, R) \rightarrow \max_{\{R\}}, \quad (4)$$

где максимум берется по всем возможным $n!$ -ранжировкам n -объектов [7]. Таким образом, при выборе для обработки экспертных оценок того или иного КРК r' надо учитывать следующие факторы: сложность вычисления по формуле (4); наличие таблиц точного распределения для всех критериев; наличие аппроксимации для всех критериев; сложность вычисления критериев; наличие программ или сложность их разработки; свойства различных мер близости. Последний фактор, безусловно, один из самых важных, но он же и самый малоизученный. Практически приходится исходить из первых пяти факторов.

Рассмотрим наиболее известные меры близости – конкуренты с точки зрения приведенных факторов. Выпишем известные КРК:

1. КРК Спирмена:

$$\rho(R, Q) = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{1 \leq j \leq n} (R_j - Q_j)^2, \quad (5)$$

случай наличия связей описан в ГОСТ 23554.2-81, п. 3.2.3.

2. КРК Кендалла:

$$\tau^*(R, Q) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i \neq j \leq n} \text{sign}(R_i - R_j) \text{sign}(Q_i - Q_j), \quad (6)$$

где $\text{sign } x = \begin{cases} 1, & \text{если } x > 0, \\ -1, & \text{если } x < 0. \end{cases}$

3. КРК простое правило:

$$d(R, Q) = 1 - 2 \sum_{1 \leq j \leq n} |R_j - Q_j| / \left[\frac{n^2}{2} \right], \quad (7)$$

где $[x]$ – целая часть числа x .

Более подробное описание можно найти в работах [12, 13, 15, 16]. КРК (7) менее известен, чем ρ и τ , хотя и предложен Спирменом еще в 1904 – 1906 гг. В последнее время он приобретает популярность. Для всех трех КРК есть таблицы точного распределения: для ρ сведения о них см. в ГОСТ 23554.2-81 [9], где есть и сами таблицы для τ : при $n \leq 40$ [7, 9], $n \leq 100$ [10], для d при $n \leq 10$ [8 – 9]. Все КРК асимптотически при $n \rightarrow \infty$ нормальны [7, 11]. Для ρ есть более точные аппроксимации, причем одна из них особенно удачна [11]. Приведем для D -величины $E_0(D)$, $\sigma^2_0(D)$ поскольку именно для этой статистики табулировано точное распределение (при $2 \leq n \leq 10$) и его приближение по методу Монте-Карло (при $11 \leq n \leq 15$):

$$E_0(D) = (n+1)(n-1) / 3; \quad \sigma^2_0(D) = (n+1)(2n^2 + 7) / 45. \quad (8)$$

Эти выражения приводятся без доказательства со ссылкой на Хаусдорфа [7 – 9]. Авторы настоящей статьи проверяли приближение (8), пользуясь тем, что (7) линейная ранговая статистика, для нее есть выражения математического ожидания и дисперсии [8, 12], теорема A , и убедились, что они верны.

При сравнении выражений (5), (6), (7), можно отметить, что обобщенная ранжировка при использовании (5) получается как ранжировка по суммам рангов? которые затем ранжируются обычным путем [7]:

$$S_1 = \sum_{1 \leq i \leq m} R_{i1}, \dots, \quad S_n = \sum_{1 \leq i \leq m} R_{in}. \quad (9)$$

Для КРК (6), (7) такого простого способа поиска обобщенной ранжировки нет. Требуются процедуры, близкие к перебору всех $n!$ -ранжировок. Для (6) искомая ранжировка, это так называемая медиана Кемени [7, 12]. Упомянутые процедуры требуют для $n \geq 5$, 6 сложных алгоритмов и программ, а время счета с ростом n быстро растет [10]. Поэтому КРК (6) и (7) пока нельзя рекомендовать для методик, ГОСТов и т. п. Таблицы точного распределения для (5) и (6) несколько обширнее, чем для (7). Здесь следует уточнить, что таблицы нужны тем большие по n , чем меньше точность имеющегося приближе-

ния, под которой понимается относительная ошибка величины ошибки 1-го рода критериев (разность между величинами ошибок 1-го рода для точного и приближенного критериев, деленная на первую из них). Далее обратимся к статистикам проверки согласованности (1). Если заменить в выражении (1) r' на (5), (6) или (7), то мы получим различные статистики. Используя также правило: отклонить H_0 , если $A \geq A_0(n, m, \alpha)$, или принять H_0 , если $A < A_0(n, m, \alpha)$, где $A_0(n, m, \alpha)$ – верхняя критическая точка соответствующего нулевого распределения, мы получим критерий. Согласованность отождествляется с отклонением H_0 . Таким образом, все сводится к наличию $A_0(n, m, \alpha)$ для различных критериев (2), полученных при подстановке различных КРК (5), (6), (7) в выражение (1). Обеспеченность таблицами здесь очень разная. Для КРК Спирмена A эквивалентна статистике χ^2 п. 3.3 ГОСТ 23554.2-81, причем $\chi^2 = m(n-1)W$, где W – коэффициент конкордации Кендалла [8]. В этом случае имеются обширные таблицы распределения χ^2 [9, 14]. В ГОСТ 23554.2-81 для более обширного набора n, m , чем во всех остальных источниках, приведены лишь критические значения $\chi^2_{\alpha}(n, m, \alpha)$.

Для статистики A , построенной по КРК Кендала τ , есть малодоступные таблицы [11 – 14]. Для A , основанной на представлении (7), авторам неизвестны какие-либо таблицы точного распределения, хотя есть приближение [10]. Теперь сравним состояние дел по статистике (3). Для КРК (5), подставленного в выражение (3), имеются таблицы распределения более или менее достаточного объема, критические точки из этих таблиц приведены в приложении 11 из ГОСТ 23554.2-81. Для КРК τ (6), подставленного в B (3), такие таблицы вычислил Скиллинс [8]. Для (7), подставленного в B , такие таблицы неизвестны. Сам критерий строится следующим образом. Статистику удобно заменить на эквивалентную ей:

$$D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |R_{ij} - R_j^0|. \quad (10)$$

При H_0 она будет асимптотически нормальна, то есть при $n \rightarrow \infty$:

$$(D - E_0(D)) / \sqrt{\text{var}_0 D} \sim N(0, 1), \quad (11)$$

где $E_0(D) = m(n+1)(n-1)/3$; $\text{var}_0(D) = m(n+1)(2n^2 + 7)/45$.

Доказательство этого факта простое [7 – 10], аналогичное тому, что дается в работе [12]. Рассмотрим наличие приближений. Для КРК ρ (5) есть улучшенная аппроксимация [11], для (6) и (7) наиболее точная аппроксимация нормальным распределением. Для A , основанного на ρ (5), есть очень точное приближение [10]; для A , построенного по формуле (6), имеется грубое χ^2 – приближение Эренберга [7]; в работе [9] получена улучшенная, но сложная аппроксимация. Для A , построенного по выражению (7), какое-либо приближение неизвестно. Для статистики B , основанной на ρ (5), τ (6), d (7), неплохо (в смысле

упомянутой относительной ошибки) действуют нормальные приближения, обеспечивая величину этой ошибки $\sim 10\%$ при $k, n \geq 10$.

Заметим, что проверка согласованности между группами ранжировок и внутри группы неполных ранжировок возможна лишь методами, основанными на ρ (неполными называются ранжировки, в которых отсутствуют ранги некоторых объектов). Критерии, основанные на ρ , немного проще, чем конкуренты, основанные на τ и d . Что касается программного обеспечения, то оно более развито для ρ и его «родственников» A и B , чем для τ и тем более – d . Следует отметить, что в последние годы работа по созданию программного обеспечения по ранговым методам ведется достаточно активно [15 – 18]. Рассмотрим некоторые свойства ρ , τ и d . Можно выделить несколько групп свойств КРК, по которым их целесообразно сравнивать.

Таблица 1

Весовые коэффициенты S_{ij} и h_{ij} для модифицированных КРК. Кендалла и Спирмена

Соотношение между R_i, R_j	Соотношение между Q_i, Q_j	S_{ij}	h_{ij}
<	<	1	1
>	>	1	1
>	<	0	-1
<	>	0	-1
=	>	1/2	0
=	<	1/2	0
>	=	1/2	0
<	=	1/2	0
=	=	1/2	0

Во-первых, аксиоматические свойства самих КРК, или правила получения упорядочения (4). Аксиоматика, в частности, группового выбора (4) по τ Кендалла дана в работе [8]. Второй группой свойств являются свойства изменчивости КРК. Специалист в конкретной области может быть заинтересован в выборе КРК с большими или меньшими дисперсиями. Приведем далее дисперсии для выражений (5), (6) и (7) при отсутствии связей и H_0 :

$$\text{var}_0\rho = (n - 1)^{-1}; \quad (12)$$

$$\text{var}_0\tau = (2n + 5) / 9n(n - 1); \quad (13)$$

$$\text{var}_0d = 4(n + 1)(2n^2 + 7) / 45 / (n^2 / 2). \quad (14)$$

Для случая связей дисперсия τ приведена в работе [3]. Кроме этого, существует ряд неравенств, связывающих ρ , τ и d [7, 10 – 18]. Иногда выдвигаются требования достижения тех или иных значений на заранее заданных парах

ранжировок. Исходя из этого, разные авторы предлагают различные нормировки в знаменателях КРК, управляя таким образом «граничными» значениями КРК [8]. Рассмотрим один пример такого рода. Он показывает, что нормировка не всегда позволяет достичь желаемых значений КРК на всех возможных парах ранжировок.

Пример 1. Пусть имеются следующие избранные пары ранжировок:

$$1. R = (1, 2, \dots, n), \quad Q = \left(\frac{n+1}{2}, \dots, \frac{n+1}{2}\right);$$

$$2. R = Q = \left(\frac{n}{2}, \frac{n}{2}, \dots, \frac{n}{2}, n\right).$$

Было бы желательно так провести нормировку модифицированных вариантов ρ Спирмена и τ Кендалла (ρ_1 и τ_1), чтобы в случае 1 $\rho_1 = \tau_1 = 0,5$, а в случае 2 $\rho_1 = \tau_1 = 0$, поскольку ρ дает ∞ в случае 1), а τ – не определен для равных рангов, что одинаково нас не устраивает.

Таблица 2

Граничные значения модифицированных КРК

КРК	Случай	
	1	2
ρ (с учетом связей, ф-ла (2) п.3.2.3 ГОСТ 23544 2-81)	∞	1
ρ_1	1/2	$\frac{n-2}{2(n+1)}$
τ_1	1/2	$(n+2)/2n$
d	0	1

Определим вариант КРК Кендалла, учитывающий возможность связанных рангов:

$$\tau_1 = \sum_{1 \leq i < j \leq n} S_{ij} / C_2^n, \quad (15)$$

где величины S_{ij} задаются табл. 1. Определим вариант КРК Спирмена:

$$\rho_1 = 1 - \frac{\sum_{1 \leq i < j \leq n} h_{ij}(j-i)}{n(n^2-1)/6}, \quad (16)$$

здесь $\rho_1 = \rho$; h_{ij} берутся из табл. 1. В табл. 2 приводятся значения ρ , ρ_1 , τ_1 , d в случаях 1, 2 (то есть $\rho(R, Q)$, $\rho_1(R, Q)$, $\tau_1(R, Q)$, $d(R, Q)$). Заметим, что в случае 2 ρ_1 и τ_1 при больших n близки к 1/2. Из табл. 2 видно, что, меняя норми-

ровку, можно получить некоторые заданные значения на «граничных» парах ранжировок. Однако этот прием не «всесилен», например, нельзя, видимо, для модификации ρ и τ (ρ_{mod} и τ_{mod}) одновременно сделать $\rho_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod}}$ в случае 1 и $\rho_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod}} = 1$ в случае 2. Можно сделать следующее: либо $\rho_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod}}$ на 1 и 1 на 2, либо $\rho_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod}} = 1$ на 1 и 1 на 2. Видно, что поведение в граничных точках может быть отчасти улучшено (как это сделано переходом от ρ к ρ_1 в табл. 2). Кроме перечисленных соображений, иногда поднимается вопрос об адекватности различных КРК в различных шкалах. Здесь уместно напомнить, что в порядковой шкале адекватны любые статистики, основанные на рангах [16].

Заключение

Суммируя все сказанное о сравнении КРК, можно сказать, что пока трудно найти веские доводы «нестатистического» характера в пользу той или иной меры близости. Аксиоматика для КРК еще недостаточно разработана, поэтому свойства «измерять близость» пока не являются достаточно основательными для выбора КРК. Остается выбирать ту меру близости и тот КРК, которые обеспечивают относительно простые вычисления и для которых при этом известны распределения различных статистик – обобщений. Эти соображения привели авторов ГОСТ 23554.2-81 к КРК Спирмена. Обработка с помощью других методов, не предусмотренных ГОСТ, производится примерно так же. Уровень необработанных, «сырых» или «нефокусированных» данных в системах радиолокационной съемки соответствует преобразованным в цифровую форму сигналам с выхода фазовых детекторов двух квадратурных каналов приемника. Проведенное исследование может быть полезным для разработки различных методик анализа нечисловых данных.

Литература

1. Кашкин В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухонин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
2. Лабутина И. А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ : метод. пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – М., 2011. – 88 с.
3. Савиных В. П. Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2001. – 228 с.
4. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / О. С. Токарева. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2010. – 148 с.
5. Трифонова Т. А. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях / Т. А. Трифонова, Н. В. Мищенко, А. Н. Краснощеков. – М.: Академический проект, 2005. – 350 с.
6. Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
7. Сидняев Н. И. Статистический анализ и теория планирования эксперимента: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 195 с.
8. Сидняев Н. И., Вилисова Н. Т. Введение в теорию планирования эксперимента: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумна, 2011 г. – 399 с.

9. ГОСТ 23554.2-81. Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Обработка значений экспертных оценок качества продукции. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1992. – С. 63.
10. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2011. – 399 с.
11. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2007. – 912 с.
12. Мещеряков В. В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB. – М.: Диалог-Мифи, 2019. – 448 с.
13. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для бакалавров. – М.: Юрайт, 2013. – 479 с.
14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 816 с.
15. Сидняев Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники / Н. И. Сидняев, Г. С. Садыхов, В. П. Савченко. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 382 с.
16. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
17. Есаулов И. Г. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: Учебное пособие. – СПб.: Лань П, 2016. – 224 с.
18. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере. – М., ИНФРА-М, 2003. – 544 с.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ПО ДАННЫМ КМСС КА «МЕТЕОР-М»

А. И. Васильев, А. А. Михеев,
М. В. Мешков, А. А. Пестряков
(НЦ ОМЗ АО «Российские космические системы», г. Москва)

Возможности съемки и формирования глобального покрытия (среднего и/или высокого пространственного разрешения) по данным орбитальной группировки национальных КС ДЗЗ выступают в качестве одного из знаковых показателей технологического уровня страны. В рамках статьи рассматриваются проблемные вопросы формирования такого покрытия на основе данных российских КС ДЗЗ среднего разрешения. Для этого выполнен анализ архивов данных Оператора КС ДЗЗ за период 2017 – 2022 гг., по результатам которого установлено, что данными КМСС-М КА «Метеор-М» №2 покрыто более 80% материковой территории суши земного шара. По отобранным и обработанным L1B-данным архивов было сформировано более 10 тысяч сцен ортопродуктов, пригодных для формирования глобального покрытия. Дополнительно отмечены локальные регионы, для которых присутствуют преимущественно облачные данные, либо съемка отсутствует вообще. При этом новая съемка отдельных районов фактически невозможна вследствие особенностей эксплуатации КС ДЗЗ типа «Метеор-М». Вместе с тем в рамках работы демонстрируется покрытие, частично сформированное на территорию Евразии, а также рассматриваются технологические аспекты его формирования.

Ключевые слова: ДЗЗ, КМСС, «Метеор-М», бесшовное сплошное покрытие, глобальное покрытие.

Введение

Возможности съемки и формирования глобального покрытия (среднего и/или высокого пространственного разрешения) по данным орбитальной группировки национальных КС ДЗЗ являются одним из знаковых показателей технологического уровня страны. Такого вида покрытия в настоящее время (2022 г.), в частности, по данным среднего разрешения предоставляют США (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) и ЕС (<https://www.sentinel-hub.com/>). Отечественные сервисы, в частности <https://bbp.ntsomz.ru/>, предоставляют глобальные покрытия, сформированные преимущественно по данным низкого пространственного разрешения.

В свою очередь, анализ характеристик съемочных устройств орбитальной группировки российских КС ДЗЗ позволяет выделить комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения КМСС в составе КА типа «Метеор-М» (GSD – 60м). На рис. 1 приведены периоды эксплуатации КС «Метеор-3М» с КА «Метеор-М» №№ 1, 2, 2-2, в соответствии с которыми рассмотрим задачу формирования глобального покрытия за период 2017 – 2022 гг.

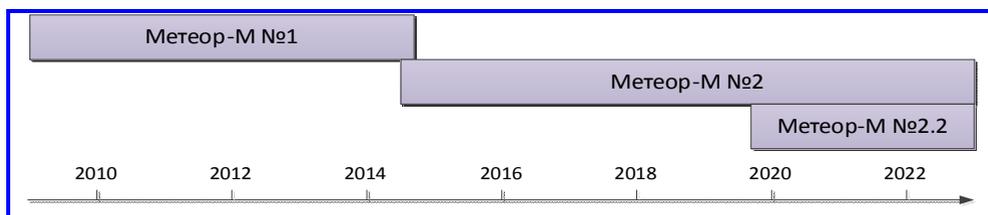


Рис. 1. Период эксплуатации КА типа «Метеор-М»

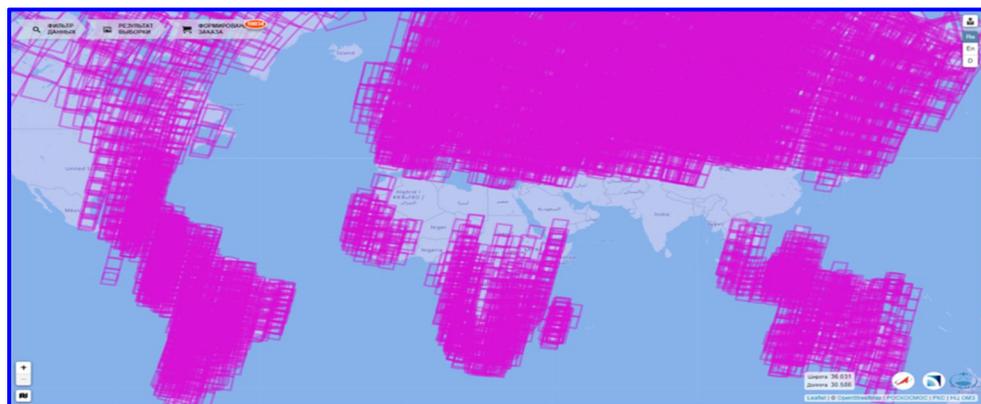


Рис. 2. Покрывтие сценами данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 (отснятыми за период 2017 – 2021 гг.), отобранными для формирования глобальной мозаики

Анализ данных архивной съемки НКПОР Оператора

Общая схема анализа архивной съемки КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 за период 2017 – 2021 гг. заключалась в следующем:

- фрагментирование пространства на ячейки (30×30°);
- для каждой ячейки отбирались безоблачные сцены L1B-продуктов архива НКПОР [1].

Далее для отобранных сцен выполнялась обработка и формирование L1D-продуктов (ортотрансформированные изображения).

Учитывая последовательный отбор сцен и последующую обработку сцен с контролем качества геопроецирования, общее процессорное время обработки (при частичной загруженности вычислительных ресурсов) для более 10000 сцен КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 заняло около 3 месяцев. В качестве аппаратного обеспечения применялся вычислительный сервер в следующей конфигурации – CPU Intel Xeon Gold 6242 2.8 GHz 32 Cores (×2), RAM 768 Gb, GPU NVidia V100 (×2).

Обработанные сцены L1D-продуктов были загружены в геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» [2], область покрытия которыми приведена на рис. 2. Для приведенной области следует отметить значимые «пустоты», обусловленные отсутствием данных съемки для севера Африки, а также южной части Евразии между 5° и 35° с. ш. (Аравийского полуострова, Пакистана, Индии и Китая). Данные для Северной Америки имеются, однако не были загружены в ББП.

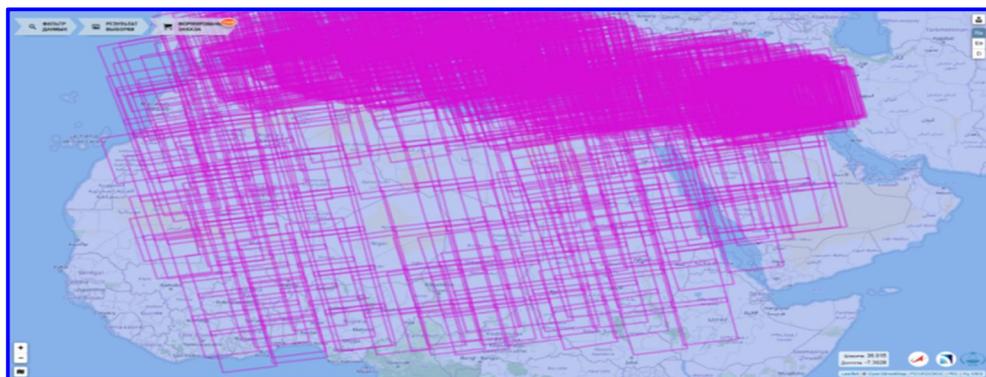


Рис. 3. Покрытие сценами КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 территории Центральной и Северной Африки (отснятыми за период 2019 – 2021 гг.), отобранными для формирования глобальной мозаики

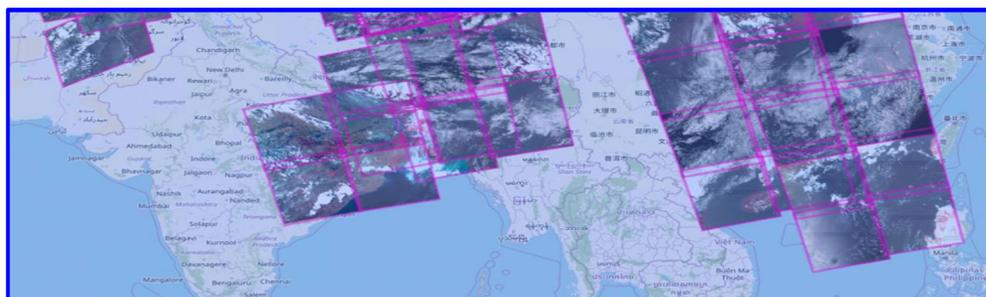


Рис. 4. Покрытие сценами КМСС-2 КА «Метеор-М» №2-2 южной части Евразии, отснятыми весной 2022 г

Для исключения/сокращения количества «пустот» (регионов непокрытых данными ДЗЗ) были проведены мероприятия, аналогичные указанным выше по данным архивной съемки КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 (рис. 3).

Съемка КМСС КА «Метеор-М» в интересах глобального покрытия

Учитывая, что в настоящее время (2022 г.) КА «Метеор-М» № 2 эксплуатируется за пределами гарантийного срока и проводит съемку только в режиме НП (непосредственная передача на пункт приема), то получение данных по не отснятым районам возможно только для КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2.

В свою очередь, специфика целевого применения КА «Метеор-М» № 2-2 обуславливает приоритетную съемку территории РФ в интересах тематических потребителей, в частности Росгидромет и МЧС. Вместе с тем особенности функционирования съемочных систем требуют перезагрузки после съемки/пролета территории РФ для дальнейшей съемки в режиме ЗИ (запись информации на бортовые накопители). Таким образом, съемка «пустот» особенно в период лесных пожаров (период апрель – октябрь), практически невозможна.

Вместе с тем, удалось выполнить съемку отдельных маршрутов, результаты которой (преимущественно облачной) приведены на рис. 4.

Технология формирования глобального покрытия

Для формирования покрытия применяется технология, рассматриваемая в [3, 4]. В рамках этой технологии обеспечивается интерактивное создание линий-порезов (с использованием ПО Photomod) для отобранных сцен, что в итоге дает возможность формирования безоблачного покрытия. После чего выполняется выравнивание яркости для всех смежных фрагментов сцен, участвующих в результирующем покрытии. Для этого был разработан специализированный алгоритм, в общем соответствующий традиционной стратегии (в том числе Photomod) и включающий глобальное, локальное и пограничное выравнивание.

В рамках глобального выравнивания яркости обеспечивается минимизация разницы яркости, цвета и контраста для каждого фрагмента целиком по отношению к соседним фрагментам, в том числе с учетом маски воды, а также специализированного этапа балансировки тональности покрытия. В свою очередь, локальное выравнивание обеспечивает расчет поправочных коэффициентов яркости в окрестности линий пореза для смежных фрагментов. Пограничное выравнивание устраняет эффекты «резкого края» на основе «смешивания» в области перекрытия соседних фрагментов с учетом полупрозрачности. На рис. 5 приведены результаты сравнения предложенного алгоритма и выравнивания с использованием Photomod.

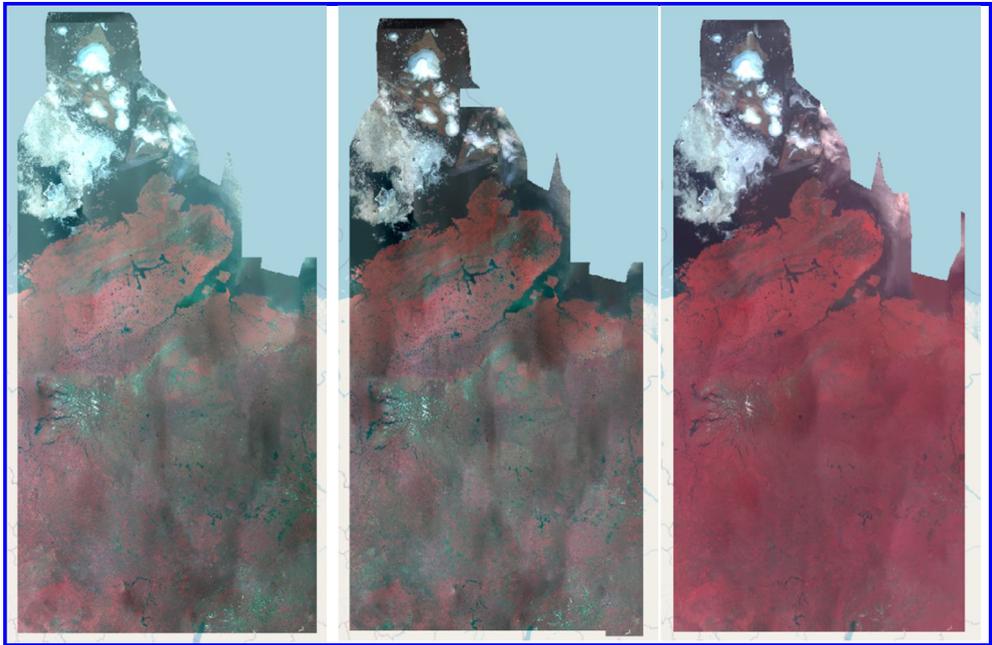


Рис. 5. Пример формирования покрытия с использованием различных алгоритмов: слева – ПО Photomod с использованием глобального и локального выравнивания; в центре – ПО Photomod с использованием только локального выравнивания; справа – предложенный алгоритм

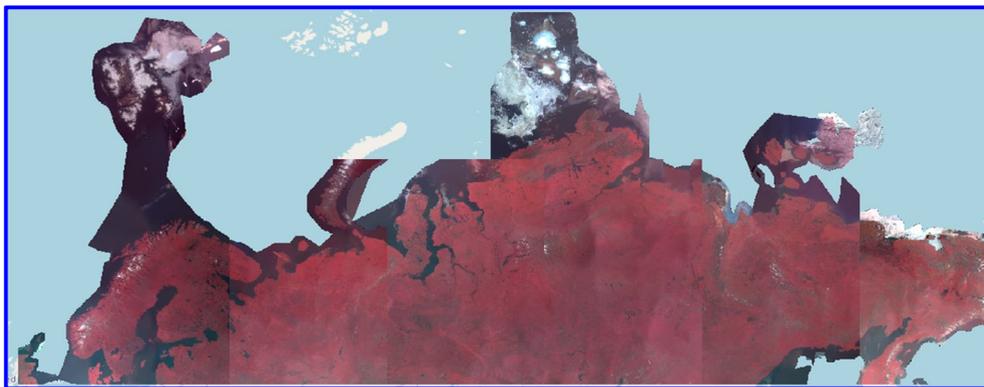


Рис. 6. Фрагмент глобального покрытия (на территорию Евразии)

Фрагмент глобального покрытия (на территорию Евразии), сформированный с использованием рассмотренной технологии приведен на рис. 6.

Заключение

В работе рассмотрены проблемные вопросы формирования глобального покрытия по данным КМСС КА типа «Метеор-М» за период 2017 – 2022 гг. Отмечено, что данные архивной съемки КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 обеспечивают около 80% глобального покрытия. В свою очередь, данные архивной съемки КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 позволяют существенно сократить имеющиеся «пустоты». Однако остаются районы, съемка которых фактически не выполняется вследствие специфики целевого назначения КК «Метеор-3М».

Отдельно отмечены технологические и алгоритмические аспекты формирования глобального покрытия. Демонстрируется фрагмент покрытия на территорию Евразии.

Литература

1. Особенности автоматической потоковой обработки данных КМСС космического комплекса «Метеор-3М» / О. В. Бекренев [и др.] // Геоматика, 2015. – № 2. – С. 32 – 36.
2. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» / В. А. Селин [и др.] // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019. – Т. 6. – Вып. 1. – С. 40 – 48.
3. Эксперимент по формированию сплошного бесшовного покрытия на территорию Российской Федерации по данным КМСС КА «Метеор-М» / А. Н. Марков [и др.] // Материалы XVI Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 12–16 ноября 2018 г. – URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6692.
4. Технологии формирования и предоставления глобального опорного покрытия Земли на основе данных Landsat / А. И. Васильев [и др.] // Материалы XVIII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16 – 20 ноября 2020 г. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8262>

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ХАРАКТЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А. С. Рыжиков

*(Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В. Ф. Уткина, г. Рязань)*

Рассмотрены вопросы наполнения и актуализации базы данных абрисов в автоматическом режиме. Предлагается новый алгоритм автоматического детектирования координат устойчивых характерных объектов для формирования абрисов. Отличительной чертой алгоритма является обнаружение искусственных прямоугольных объектов путем анализа морфологических свойств изображения. Приводятся результаты работы предложенного алгоритма на натурных данных от КА «Ресурс-П» и сведения о быстродействии.

Ключевые слова: абрис, характерный объект, детектор границ, контур.

Операция контроля и уточнения геодезической привязки снимков высокого разрешения в автоматическом режиме основана на точной идентификации абрисов, содержащих характерные объекты с известными геодезическими координатами. Наполнение базы данных абрисов и поддержание ее в актуальном состоянии – сложная задача, успешное решение которой возможно только при условии полной автоматизации процесса, включая этап детектирования характерных объектов.

Известны решения по детектированию характерных объектов при формировании абрисов на снимках среднего разрешения [1] и с привлечением данных стереоскопической съемки с глобальным покрытием [2]. В работе [3] предложен подход к детектированию характерных объектов (перекрестков и тому подобных участков дорожной сети) на основе открытых картографических данных OpenStreetMap (OSM). Однако покрытие OSM детально не во всех странах, а многие второстепенные дороги, грунтовые, например, меняются со временем и могут быть слабо различимы на изображении.

В докладе представлен алгоритм автоматического детектирования устойчивых характерных объектов на изображениях ДЗЗ высокого разрешения, не требующий привлечения внешних данных. Под устойчивостью понимается возможность точной идентификации содержащего объект фрагмента на изображениях, полученных при иных условиях съемки, включая сезон, время суток, углы съемки и т. д. Это ключевое свойство, определяющее возможность применения детектора характерных объектов для формирования абрисов.

Предложенный алгоритм обеспечивает детектирование распространенных контрастных прямоугольных объектов с ровными границами, таких как

крыши домов, навесы и т. д. Он основан на морфологическом анализе текстуры изображения.

На первом этапе изображение обрабатывается детектором границ Кэнни [4], из полученного бинарного изображения извлекаются контуры объектов [5], после чего выполняется аппроксимация (сглаживание) контуров по алгоритму Рамера – Дугласа – Пекера.

На втором этапе осуществляется отбраковка контуров объектов по ряду критериев, включая анализ площади, оценку симметрии и схожести его формы объекта с прямоугольной и т. п.

На третьем этапе производится оценка контрастности объекта и резкости его границ, после чего координаты угла объекта с наибольшим значением автокорреляционной функции заносятся в очередь с приоритетом, в качестве приоритета задается величина оценки (1; 100).

На заключительном этапе осуществляется последовательное извлечение координат из очереди и занесение в БД абриса с центром в точке с соответствующими координатами в том случае, если расстояние от вновь добавляемого объекта до уже существующих превышает заданный порог.

В докладе приводятся результат работы предложенного алгоритма на панхроматических изображениях от КА «Ресурс-П» и сведения о быстродействии реализованного алгоритма на CPU и GPU.

Литература

1. Orti F., Garcia A. and Martin M. A. Geometric correction of Landsat MSS images using a ground control point library// Proceedings of the Fifth Annual Conference of the Remote Sensing Society, 1979. – P. 17 – 26.
2. A worldwide 3D GCP database inherited from 20 years of massive multi-satellite observations / L. Chandelier et al // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 2020. – V. 2. – P. 15 – 23.
3. Кузнецов А. Е., Рыжиков А. С. Алгоритм автоматического формирования абрисов по высокодетальным данным дистанционного зондирования Земли // IV Международный научно-технический форум СТНО-2021. – Т. 6. – С. 38 – 43.
4. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection// IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-8(6), 1986. – P. 679 – 698.
5. Satoshi Suzuki, Keiichi A. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 32 – 46.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДАННЫХ ДЗЗ

^{1,2}А. Т. Гизатуллин, ²В. В. Лабутин, ²И.С. Бушуева

¹ Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва;

² АО НПК «БАРЛ», г. Москва)

В последнее время нейронные сети все чаще применяются для решения различных прикладных задач, в том числе и для анализа изображений, и данные ДЗЗ не являются исключением. В статье сделан обзор современного состояния и особенностей применения нейронных сетей для дешифрирования данных ДЗЗ, описаны критические отличия между наборами наземных изображений и космических снимков. Во второй части статьи представлен опыт разработки специального программного обеспечения, позволяющего дешифрировать данные ДЗЗ (выделение объектов, классификация снимков). В статье описаны этапы создания специального программного обеспечения: постановка задачи и создание классификатора, формирование обучающих наборов данных и, собственно, создание и применение нейронных сетей. Приведены примеры работы программы.

Ключевые слова: нейронная сеть, данные ДЗЗ, большие данные, специальное программное обеспечение.

Введение

Искусственная нейронная сеть представляет собой математическую модель, структурно сформированную по аналогии с системой биологических нейронов с попыткой воссоздания интеллектуального процесса. Первые теоретические исследования в этой области относятся к 1940-м гг. [1]. Однако для практического применения нейронные сети массово стали внедряться с 2010 г. благодаря накоплению огромных массивов данных («большие данные») и развитию технологических возможностей их обработки. Одним из таких приложений является использование нейронных сетей для дешифрирования данных ДЗЗ.

Рост количества космических систем наблюдения Земли, организация единых платформ хранения для доступа пользователей обуславливают феномен «больших пространственных данных», которые требуют быстрых и масштабируемых технологий для их непрерывного полезного использования. В практику дешифрирования космических снимков вошли такие нейронные сети, как RCNN и его подвиды, U-Net, YOLO и т. д. Они используются для классификации фрагментов изображений, локализации и сегментации наземных объектов в различных отраслях сельского хозяйства и промышленности. Однако, несмотря на текущие достижения, развитие области нейросетевого дешифрирования находится в начальном состоянии и имеет ряд недостатков:

- малое количество и качество эталонных наборов обучения наряду со сложностью их формирования;
- математическая сложность интерпретации результатов обучения, препятствующая универсальности и переносимости моделей.

Целью исследования является обзор особенностей и разработка платформы применения нейронных сетей для дешифрирования данных ДЗЗ в аспекте решения следующих задач:

- создание эталонных обучающих наборов данных ДЗЗ, отличающихся разнообразием и репрезентативностью;
- автоматизация процесса, ориентированная на воспроизведение полного цикла от физической съемки до геопространственных продуктов через глубокое нейросетевое обучение.

Материалы и методы

ДЗЗ из космоса представляет собой источник периодических данных, сформированных в типовые форматы изображений. На сегодняшний день разнообразие и объем материалов исчисляется порядком между 1 Эбайт и 1 Збайт [2], что приводит к неоднозначности информации на единицу площади. По сравнению с наземными изображениями, на наборах которых обучены успешные образцы современных нейронных сетей, космические снимки обладают рядом отличительных характеристик: большее количество спектральных каналов, меньшее соотношение сигнал-шум, сложная геометрия формирования снимков, высокий объем файлов.

В связи с этим требуется адаптация данных ДЗЗ при формировании обучающих наборов. Как правило, они представляют собой совокупность одно-размерных фрагментов изображений (например 256×256), аннотированных согласно целевой задаче. С их помощью с нуля производятся попытки обучения нейронных сетей, то есть для каждой новой элементарной задачи используются новые экземпляры сетей и их весов. Во многом это является следствием недостатков формируемых обучающих наборов с точки зрения репрезентативности по следующим параметрам:

1. Объем. Наборы наземных изображений (ImageNet, Google's Open Images) включают десятки и сотни миллионов изображений с сотнями классов объектов, тогда как наборы данных ДЗЗ – тысячи изображений и зачастую несколько классов, что делает их менее универсальными и пригодными для сетей, требующих большое количество данных.

2. Неоднородность. Дистанционное зондирование происходит на основе средств, различающихся по съемочному диапазону, спектральной и пространственной чувствительности и др., что позволяет комплексно описать объект съемки. Однако наборы обучающих данных ДЗЗ в большинстве случаев состоят из изображений одного узкого типа. Это ограничивает возможность совместного применения различных типов данных для более широкого анализа и синтеза результатов.

3. Содержательное разнообразие. Большинство текущих наборов изображений ДЗЗ представляют собой наиболее «идеальные» фрагменты, вырезанные из одной или нескольких больших сцен, при этом игнорируются различия в условиях съемки (участки с облачностью, объекты под тенью). Кроме того, в тематическом плане доминируют антропогенные, в частности город-

ские районы, тогда как природные участки остаются вне поля внимания. Все это усложняет применимость моделей на основе этих данных к использованию в реальных условиях наблюдения Земли.

4. Сложность аннотирования данных. На наземных изображениях объекты представляются такими, какими их видит человек в привычном окружающем мире, соответственно, сложность их распознавания и аннотирования достаточно низкая. В случае космической съемки изображения объектов искажаются вследствие проекции, параметров аппаратуры и других условий съемки, что приводит к необходимости экспертов для их дешифрирования (синоним аннотирования для данных ДЗЗ) при подготовке качественных обучающих наборов.

С учетом вышеперечисленных недостатков в настоящее время существует проблема создания разнородных наборов данных, обеспечивающих надежность, универсальность и репрезентативность с точки зрения разнообразия условий съемки и типов данных. Попытка ее решения и снижения в текущем исследовании рассматривается в разделе «Результаты».

Методическое развитие нейронных сетей заключается в обеспечении автоматизированного получения совокупности явных и скрытых характеристик в различных пространствах входных изображений, позволяющих отличить целевые объекты друг от друга. Эти характеристики вычисляются на основе послойной архитектуры сетей, где каждый слой привносит качественно новую информацию о содержании изображений. Наиболее успешными в области ДЗЗ являются сверточные нейронные сети, которые позволяют получать обобщающие мультимасштабные характеристики на основе операций свертки.

В настоящее время подходы к внедрению нейронных сетей для дешифрирования данных ДЗЗ можно разделить на четыре категории:

- контролируемое обучение (с учителем) в случае небольших по объему и территории задач, например [3], для решения которых достаточно существующих или самостоятельно созданных ограниченных обучающих наборов;

- предварительное обучение и тонкая настройка сетей – наиболее частый подход, который заключается в использовании предварительно обученных на основе наземных изображений нейронных сетей и адаптации их параметров для данных ДЗЗ, точность решения задачи при этом зависит от схожести классов объектов, также существуют ограничения в их производительности [4];

- продвинутое обучение, при котором контроль за результатом осуществляется на основе генеративно-состязательной модели: две подсети соревнуются друг с другом для повышения эффективности выполнения задачи [5];

- разработка новых типов нейронных сетей, специализированных под особенности данных ДЗЗ, в частности, в архитектуру включаются элементы оценки пространственной информации в виде широт и долгот пикселей [6], кроме того, диапазон вычислений расширяется до комплексной области для представления фазово-частотных значений сигнала [7].

Все описанные подходы пользуются спросом в научных и производственных процессах и применяются в зависимости от целевой задачи и масштабов проекта. В этой статье производится автоматизация общего алгоритма использования нейронных сетей в области ДЗЗ в рамках единой платформы.

Результаты

В ходе исследования сложилась следующая последовательность этапов реализации нейронной сети для дешифрирования объектов по данным ДЗЗ, которая легла в основу автоматизированного программного обеспечения:

1. Постановка задачи и создание классификатора. При дешифрировании космических снимков существует несколько типовых задач – распознавание и классификация объекта (определение наличия объекта и его характеристик), его локализация (указание точного местоположения), сегментация (выявление контуров). Классификатор дешифрируемых объектов ограничивает диапазон применения нейронной сети (рис. 1, *а*), однако в последующем редактировании возможно его расширение.

2. Формирование обучающего набора данных – организация входных данных в определенном формате, включающих фрагменты изображений и соответствующие им аннотации объектов согласно классификатору (рис. 1, *б*). В рамках разрабатываемой платформы для компенсации недостатков обучающих наборов ДЗЗ предусмотрены различные функциональные возможности. Программа позволяет загружать большое количество форматов пространственных данных, что делает возможным объединение в наборы разнородных источников. При этом объем и количество загружаемых файлов не ограничивается.

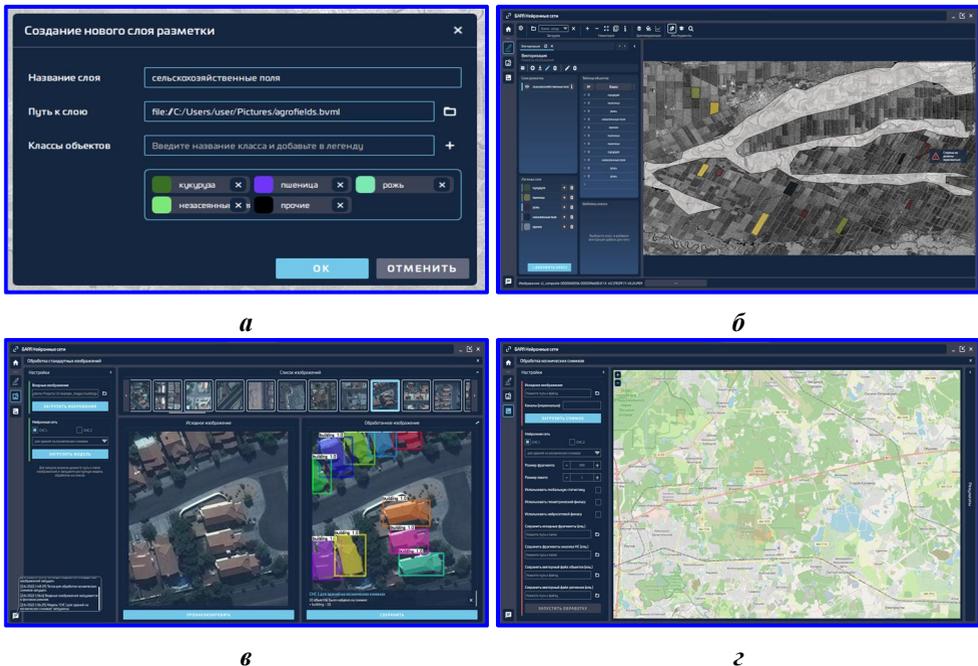


Рис. 1. Функциональные элементы специального программного обеспечения по нейронным сетям: *а* – создание классификатора; *б* – аннотирование объектов; *в* – сегментирование объектов нейронной сетью; *г* – интеграция с открытыми источниками (OpenStreetMaps)

Сложность дешифрирования объектов при подготовке аннотаций снижается за счет управления гистограммой изображений, улучшающего их визуальное качество. Кроме того, реализована загрузка готовых наборов аннотаций в виде пространственных векторных слоев в двух формах:

- из других программ, используемых для дешифрирования, например, ГИС-среды являются весьма удобными для этих целей;
- импорт открытых слоев объектов веб-карты OpenStreetMaps (рис. 1, з), который является источником большого количества размеченных данных.

Также реализован алгоритм преобразования загруженных снимков и подготовленных аннотаций в набор данных, пригодных для обучения нейронной сети. Он включает в себя нарезку снимков и аннотаций на фрагменты с сохранением спектральной информации и пространственной привязки, причем ни один участок изображения не теряется, тем самым учитываются примеры отсутствия объектов и сохраняется содержательное разнообразие.

2.1. Обогащение обучающих данных производится для искусственного воссоздания разнообразия условий съемки на основе геометрических преобразований и фильтрации. В частности, реализованы аффинная коррекция фрагментов и аннотаций, а также система фильтров с настраиваемыми ядрами, которые учитывают искажения сигналов при движениях космического аппарата, при прохождении через атмосферу.

3. Обучение и применение нейронной сети. Для реализации этого шага была использована библиотека TensorFlow, позволяющая конструировать различные архитектуры нейронных сетей. В качестве встроенных сетей были добавлены MaskRCNN и U-Net (примеры их работы для различных объектов, полученных в ходе разработки, приведены на рис. 2). Однако программный интерфейс на языке Python позволяет импортировать собственные решения, не ограничивая пользователя в объеме и масштабах архитектуры. Также планируется увеличить количество встроенных сетей. Помимо этого, следует отметить, что существует возможность подключения к вычислениям графических видеокарт, значительно повышающих производительность.

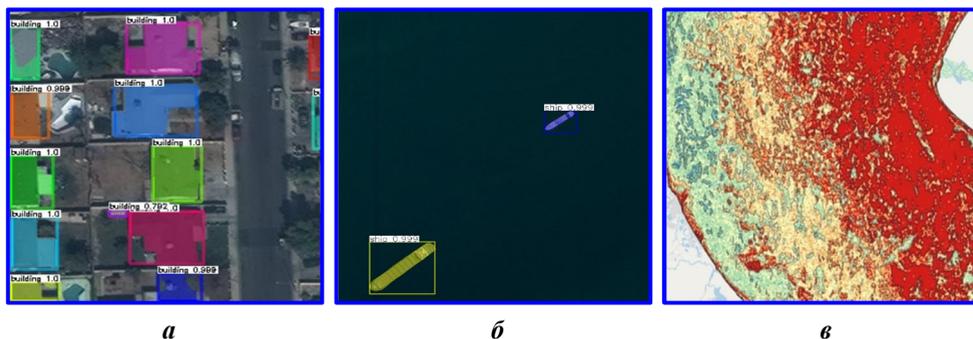


Рис. 2. Дешифрирование различных типов объектов сверточными нейронными сетями: а – зданий (Mask-RCNN); б – морских судов (Mask-RCNN); в – морских льдов (U-Net)

Обсуждение результатов

До сегодняшнего времени в области ДЗЗ отсутствуют примеры прорывных исследований внедрения нейронных сетей, в большинстве своем они представляют собой адаптацию существующих решений из других областей. Состояние их текущего развития указывает на возможность решения локальных элементарных задач, однако сложные случаи регулярного использования данных ДЗЗ на основе нейронных сетей остаются в будущем.

Таким образом, разрабатываемая платформа была инициирована как первая попытка облегчить внедрение нейронных сетей для использования разнонаправленными специалистами: с одной стороны, исследователями в области ДЗЗ, которые могли бы создавать свои тематические продукты и приложения, концентрируясь на работе с данными, а с другой – разработчиками сетей, которые пополняли бы инструментальную базу и оптимизировали вычислительные решения.

Литература

1. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // The bulletin of mathematical biophysics, 1943. – 5(4). – P. 115 – 133.
2. Ramapriyan H. Managing big data: NASA tackles complex data challenges [Электронный ресурс] / H. Ramapriyan, J. Brennan, J. Walter [et al.] // Earth Imaging Journal, 2013. – URL: <http://ejournal.com/print/articles/managing-bigdata>.
3. Li Y. Learning source-invariant deep hashing convolutional neural networks for cross-source remote sensing image retrieval / Y. Li, Y. Zhang, X. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. – 56(11). – P. 6521 – 6536.
4. Amirkolaei H. A., Arefi H. Height estimation from single aerial images using a deep convolutional encoder-decoder network // ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2019. – 149. – P. 50 – 66.
5. Li Y. Unsupervised deep feature learning for urban village detection from high-resolution remote sensing images / Y. Li, X. Huang, H. Liu // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2017. – 83(8). – P. 567 – 579.
6. Ma J. A temporal-spatial interpolation and extrapolation method based on geographic Long Short-Term Memory neural network for PM2 / J. Ma., Y. Ding, J.C. Cheng [et al.] // Journal of Cleaner Production, 2019. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.jclepro.2019.117729?ysclid=49vk19i85a64309162>.
7. Zhu X. X. Deep learning meets SAR: Concepts, models, pitfalls, and perspectives / X. X. Zhu, S. Montazeri., M. Ali [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021. – 9(4). – P. 143 – 172.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ МСУ-МР НА ОСНОВЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ MODIS

Д. В. Лозин, А. В. Кашницкий, Е. А. Лупян
(Институт космических исследований РАН, г. Москва)

В работе исследуется возможность автоматического детектирования пожаров по данным с прибора МСУ-МР. Представлены два метода детектирования – модификация алгоритма MOD14, изначально используемого на данных с прибора MODIS, и алгоритм, основанный на методах машинного обучения. Для каждого метода приведено его краткое описание, представлены конкретные примеры работы данных алгоритмов и проведен первичный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: детектирование пожаров, МСУ-МР, MOD14, машинное обучение.

Введение

В настоящее время одним из наиболее устойчивых и надежных алгоритмов детектирования пожаров по спутниковым данным является алгоритм MOD14 [1 – 3], рассчитанный на работу с данными прибора MODIS [4], установленного на спутниках TERRA и AQUA. Алгоритм разработан специалистами Мерилендского университета. Этот алгоритм обеспечивает достаточно достоверное детектирование пожаров и дает очень низкий процент ложных тревог. Вместе с тем большой интерес представляет исследование возможностей детектирования пожаров по данным с приборов, для которых еще не было разработано подобных алгоритмов. В июле 2019 года был запущен новый отечественный метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-2. На его борту функционирует многоканальное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР. Съемка с этого устройства ведется во всех спектральных диапазонах, необходимых при детектировании пожаров по алгоритму MOD14. Так же снимки МСУ-МР имеют одинаковое пространственное разрешение со снимками MODIS (1 км). Все это позволяет говорить о возможности адаптации алгоритма MOD14 для работы с данными МСУ-МР.

Данная работа посвящена описанию методов и представлению первых результатов детектирования пожаров по МСУ-МР, основанных на использовании обучающей выборки, составленной по информации о пожарах, детектированных по данным MODIS. Первый метод представляет собой модификацию MOD14 для работы с данными МСУ-МР. Так же представлен подход к детектированию, использующий методы машинного обучения.

Методы решения

В основе предложенных подходов к детектированию пожаров лежит построение обучающей выборки. Выборка составлялась из наборов параметров, рассчитанных по данным МСУ-МР в точках, где был зарегистрирован пожар.

Параметры аналогичны тем, что используются при детектировании по алгоритму MOD14, их описание представлено в табл. Для локализации пожаров на снимках МСУ-МР использовалась информация о горячих точках, детектированных по данным MODIS на территории РФ за 2021 год. Каждой такой точке подбирался покрывающий ее сеанс МСУ-МР. Время такого сеанса отличалось от времени регистрации точки не более чем на 30 минут.

Таблица

Описание параметров горячих точек выборки

Параметр	Краткое описание
R_2	Коэффициент отражения во 2-м канале (700 – 1100 нм)
T_4	Яркостная температура в 4-м канале (3500 – 4100 нм)
T_5	Яркостная температура в 5-м канале (10500 – 11500 нм)
dT	$T_4 - T_5$
$T_4_mean, T_5_mean, dT_mean$	Средние значения фона вокруг горячей точки
T_4_mad, T_5_mad, dT_mad	Абсолютное среднее отклонение фона
Bkg_fire_mad	Статистика по высокотемпературной части фона

В процессе такого сопоставления было установлено, что географическая привязка сцен МСУ-МР «плавает» относительно сцен MODIS. На краях сцен МСУ-МР расхождение с MODIS достигает девяти километров (на сценах 2021 года). В связи с этим на сцене МСУ-МР выбиралась точка с максимальной яркостной температурой в 4-м канале в радиусе девяти километров вокруг центра с координатами горячей точки MODIS. Она принималась за горячую точку на сцене МСУ-МР, для нее рассчитывался описанный выше набор параметров, после чего этот набор добавлялся в выборку. Далее в автоматизированном режиме выборка проходила различные фильтрации. В результате объем итоговой выборки превысил 12000 наборов.

Далее составлялась отрицательная выборка для точек, не являющихся горячими. Для этого был взят набор сеансов МСУ-МР, покрывающих области, на которых не было зарегистрировано горячих точек MODIS в день этого сеанса.

Модифицированный MOD14

Основная часть алгоритма MOD14 заключается в вычислении тестовых выражений, использующих параметры из наборов для каждой точки сцены. Помимо этого данные параметры сравниваются с пороговыми значениями, отсеивающими заведомо отрицательные случаи. Предложенная модификация алгоритма MOD14 представляет собой изменение коэффициентов тестовых выражений и пороговых значений таким образом, чтобы алгоритм срабатывал положительно на обучающей выборке горячих точек и отрицательно на выборке точек, не являющихся горячими. Для этого был проведен анализ распределений яркостных температур горячих точек в каналах со схожим спектральным диапазоном МСУ-МР (4 и 5 каналы) и MODIS (21 и 31 каналы) (рис. 1).

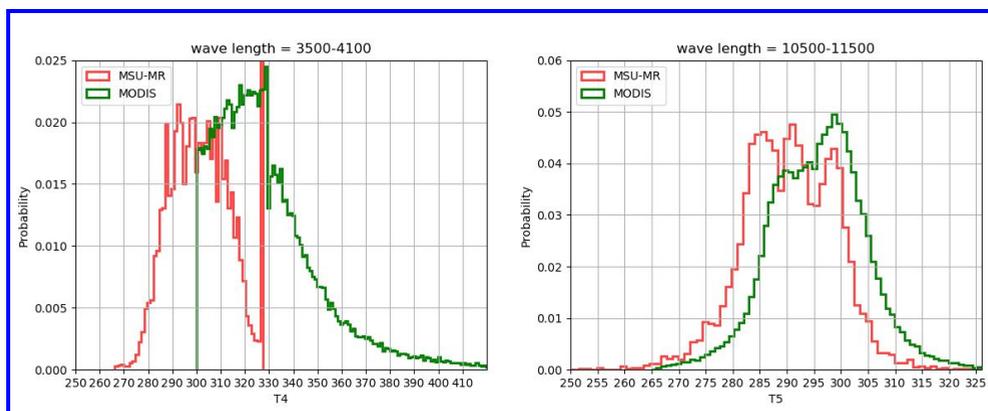


Рис. 1. Распределения яркостных температур горячих точек по данным МСУ-МР и MODIS. Слева: канал 4 МСУ-МР (3500 – 4100 нм) и канал 21 MODIS (3929 – 3989 нм) (значение по вертикальной оси красной линии в точке 327 по горизонтальной оси достигает 0,28). Справа: канал 5 МСУ-МР (10500 – 11500 нм) и канал 31 MODIS (10780 – 11280 нм)

Методы машинного обучения

Альтернативным подходом к автоматическому детектированию горячих точек по данным прибора МСУ-МР является использование полученной выборки горячих точек для настройки алгоритма на основе машинного обучения. Описанным выше способом было взята достаточно представительная выборка горячих точек, включающая всего 13351 горячую точку. Также выборка была дополнена 451848 точками из разных сцен, в которых описанным выше методом сопоставления не детектировались горячие точки по данным MODIS в радиусе 9 км. В качестве признаков использовались те же параметры, что и в алгоритме MOD14. Полученная выборка была разбита на первом этапе случайным образом на две части – обучающую и контрольную в соотношении 50 на 50%. Было проведено исследование, включающее подбор наиболее оптимального метода машинного обучения. В результате был выбран метод случайных лесов [5], дающий по контрольной выборке следующие параметры точности: точность – 98,5; полноту – 95,1; $f1$ оценку – 96,8 (количество верных срабатываний – 12424; пропусков – 640; ложных тревог – 187; верных отсутствий горячих точек – 225736). Дальнейший поиск оптимального метода и настройка его параметров были признаны нецелесообразным из-за предполагаемых проблем обучающей выборки. Отметим, что даже при корректности предположения, что в горячих точках по данным MODIS не было ложных срабатываний и пропусков, в выборке могло появиться существенное число неверных данных. Такие ошибки могли появиться из-за следующих основных факторов: задымление или появление над точкой облачности за период между съемкой приборами MODIS и МСУ-МР; нестабильность калибровки данных МСУ-МР, которая могла приводить к невозможности обнаружения по данным МСУ-МР никаких горячих точек; ошибки в привязке бо-

лее чем в 9 км. На момент написания данной работы объем в обучающей выборке ошибочных данных из-за перечисленных факторов не оценивался. Именно этот фактор, вместе с неполнотой выборки по отдельным случаям (например, в выборке явно не хватало случаев с разогретой поверхностью пустыни) и является причиной всех ложных срабатываний метода детектирования на основе машинного обучения. В связи с этим принято решение о дополнительной фильтрации выборки и ее дополнении на основе анализа проблем текущей версии. После уточнения выборки возникнет необходимость в новой настройке алгоритма машинного обучения, что, возможно, приведет к выбору иного метода. Однако, даже текущая версия на основе метода случайных лесов, как будет показано далее, дает достаточно многообещающие результаты.

Результаты

Описанные выше методы детектирования пожаров были интегрированы в информационную систему «Вега-Science» [6], которая обеспечивает доступ к потоку данных МСУ-МР в режиме реального времени. Таким образом, появилась возможность оценить фактическую эффективность методов на всех доступных сценах. Анализ полученных результатов показал, что большинство ложных детектирований приходится на горячие (пустыни и т. п.) и водные поверхности, а также «битые» пиксели сцен. Так же проблемы возникают при работе с низкотемпературными горячими точками ($T_4 < 300$ К). В настоящий момент алгоритм отбрасывает их для гарантии отсутствия ложных детектирований в этом диапазоне температур.

На многих сценах, содержащих потенциальные горячие точки, оба метода показывают достаточно достоверный результат детектирования (рис. 2 – 4).

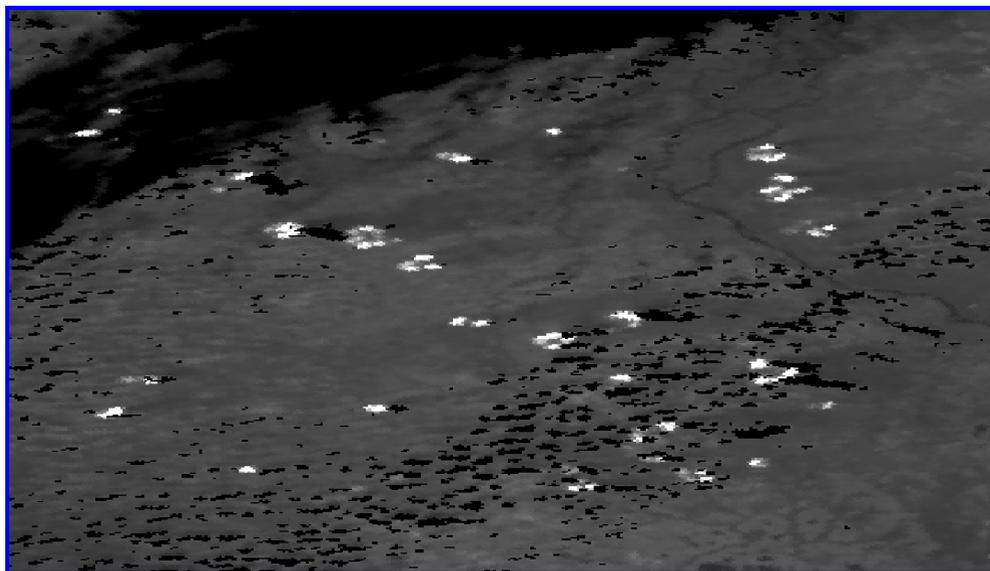


Рис. 2. Область сцены, снятой спутником МСУ-МР (04.08.2022 08:51:45). Черным выделена маска облачности; область отображена в 4-м канале в диапазоне от 280 до 327 К (от черного к белому)

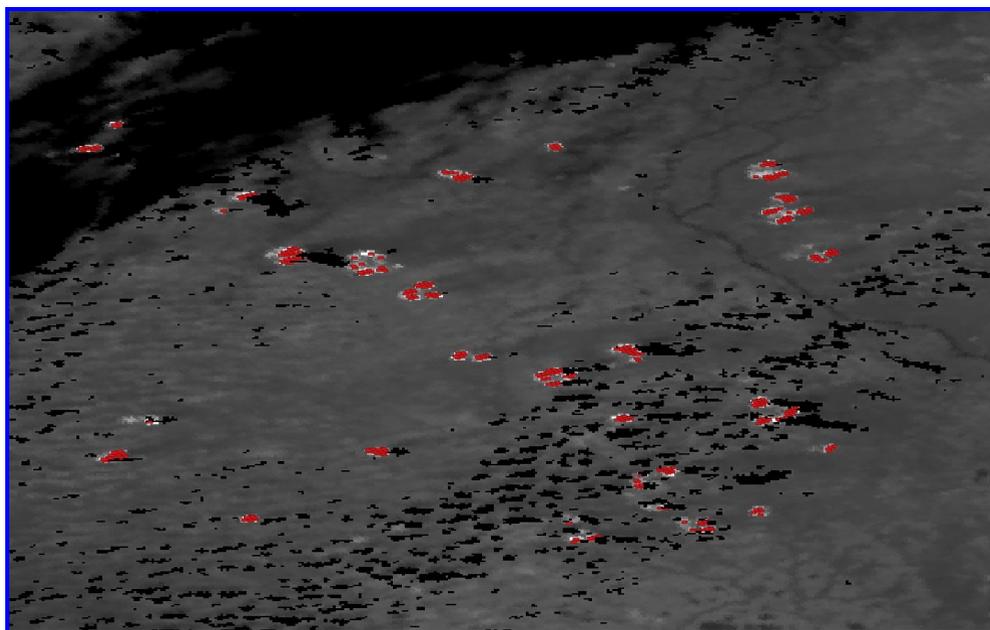


Рис. 3. Пример работы модифицированного алгоритма MOD14 на области сцены, изображенной на рис. 2. Красным выделен результат работы алгоритма

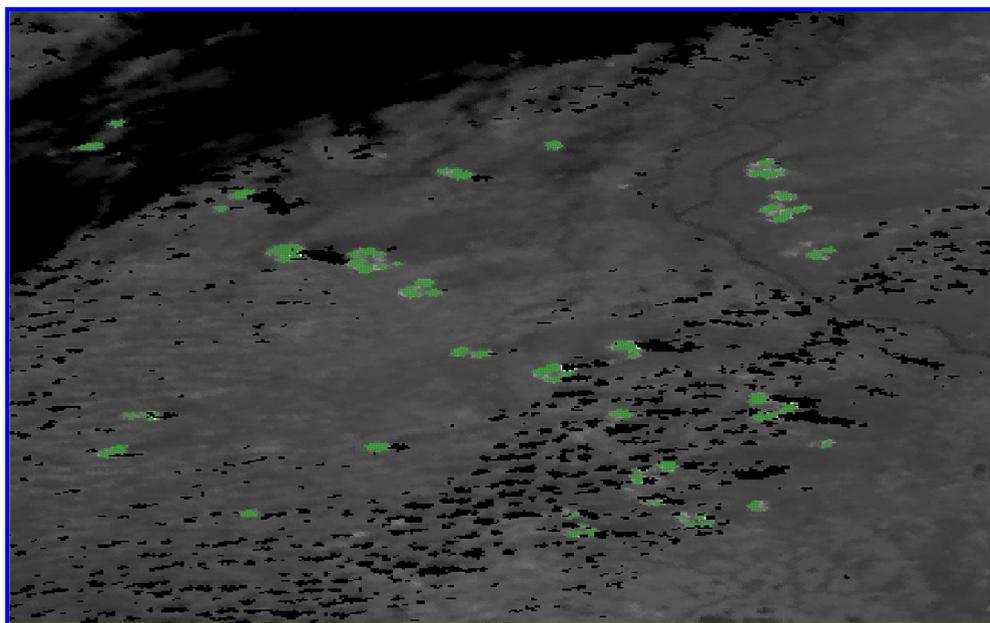


Рис. 4. Пример работы алгоритма детектирования, основанного на методах машинного обучения, на области сцены, изображенной на рис. 2. Зеленым выделен результат работы алгоритма

При этом алгоритм, основанный на методах машинного обучения, дает больше достоверных детектирований, чем модифицированный MOD14. Однако количество ложных детектирований у метода на основе машинного обучения больше, чем у модифицированного MOD14.

Заключение

Данные, получаемые с прибора МСУ-МР, безусловно, могут быть использованы для детектирования пожаров. Предложенные в работе методы детектирования уже показывают хороший результат на части доступных сцен. Алгоритм детектирования, основанный на методах машинного обучения, показывает более высокий процент определения достоверных горячих точек. Вместе с тем остаются проблемы, связанные с ложным детектированием и функциональностью методов на низкотемпературных пожарах. Так же отдельной проблемой является фильтрация сеансов с некорректными данными. В настоящее время ведутся активные работы по устранению этих проблем.

Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг [7] и Объединенной системы работы с данными центров «НИЦ Планета» [8]. Работа выполнена в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Литература

1. The MODIS fire products / C.O. Justice [et al.] // Remote Sensing of Environment, 2002. – V. 83. – P. 244 – 262.
2. Yoram Kaufman, Chris Justice. Algorithm Technical Background Document MODIS FIRE PRODUCTS (Version 2.2 Nov. 10 1998) (EOS ID# 2741). – URL: https://www.researchgate.net/publication/242167755_Algorithm_Technical_Background_Document.
3. Louis Giglio, Jacques Desclotres, Christopher O. Justice, Yoram J. Kaufman. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS // Remote Sensing of Environment, 2003. – V. 87. – 273–282.
4. MODIS Land Rapid Response System: implementation with USDA Forest Service and implications for active fire detection and land cover change products from future moderate resolution sensors / T. Bobbe [et al.] // NPOESS MAXI Review 2002, Silver Spring, MD. – URL: https://www.researchgate.net/publication/252299995_The_MODIS_Land_Rapid_Response_Project_A_Comprehensive_Suite_of_Products_to_Support_USDA_Forest_Service_Fire_Management
5. Breiman L. Random Forests. Machine Learning 45, 5 – 32 (2001). – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.
6. Система «Bera-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования / Е. А. Луян [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2021. – Т. 18. – № 6. – С. 9 – 31. – DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
7. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е. А. Луян [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 151 – 170. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
8. Система работы с распределенными архивами результатов обработки спутниковых данных центров приема НИЦ «Планета» / М. А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т. 9. – № 5. – С. 55 – 76.

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ПРЯМОГО ГЕОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АЭРОСНИМКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Л. А. Гаврилова, А. Н. Лимонов

(ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству»,
г. Москва)

В статье рассмотрены и проанализированы основные методики геопозиционирования снимков, полученных с БПЛА, с целью разработки технологии, которая обеспечивает наилучшую точность определения координат точек местности фотограмметрическим методом. Приведены результаты теоретического обоснования влияния точности прямого геопозиционирования на точность фотограмметрических построений. Представлены результаты исследования влияния различных факторов на точность определения координат точек местности прямой фотограмметрической засечкой. Приведены формулы для определения необходимой точности линейных элементов внешнего ориентирования (ЭВО) аэроснимков, полученных с помощью ГНСС-аппаратуры, установленной на борту БПЛА, для создания картографической продукции заданной точности. Рассчитана необходимая точность определения линейных ЭВО при использовании различных цифровых камер для наклонных снимков при создании ортофотопланов масштаба 1:1000. Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальными работами на макетных снимках.

Ключевые слова: прямое геопозиционирование, косвенное геопозиционирование, элементы внешнего ориентирования снимков, ГНСС-аппаратура, фототриангуляционные построения, наземные опорные точки, уравнения коллинеарности.

В настоящее время аэрофотосъемка (АФС) с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) весьма актуальна для решения многих задач: крупномасштабное картографирование, мониторинг объектов недвижимости, окружающей среды и т.п. Согласно статье Н. М. Бабашкина, С. А. Кадничанского, С. С. Нехина [1] связано это в основном с экономической целесообразностью, поскольку стоимость съемочного комплекса, включая стоимость воздушного судна, съемочной аппаратуры и аэросъемки значительно ниже традиционной. Кроме того, БПЛА не нуждаются в аэродроме или специальной подготовительной площадке, а также эксплуатация и содержание БПЛА гораздо легче и менее затратно.

Однако наряду с достоинствами применения БПЛА для аэрофотосъемки существуют и ряд недостатков, которые описываются в статье А. Т. Зверева, Е. В. Фисенко [2]. Самыми значимыми из них являются большие углы разворота и наклона носителя съемочной аппаратуры. Связано это с тем, что применяемые БПЛА обладают значительной нестабильностью положения в полете, как следствие имеются значительные углы сноса, разворота, продольные и поперечные углы наклона съемочной аппаратуры. Поэтому при прове-

дении аэрофотосъемки с БПЛА для компенсации нестабильности полета используют продольные перекрытия равные 80 – 90%, а поперечные 60 – 80%. Это влечет за собой увеличение числа маршрутов и аэроснимков, что вызывает сложности при их фотограмметрической обработке.

Конструктивные особенности БПЛА также отрицательно влияют на параметры аэросъемки: в первую очередь – это колебание высоты полета, что приводит к разномасштабности получаемых снимков.

Кроме того, на недорогих БПЛА с малыми габаритами используется только один ГНСС-приемник, который определяет координаты центра фотографирования с невысокой точностью.

Как известно, элементы внешнего ориентирования (ЭВО) можно получить двумя способами: прямым и косвенным геопозиционированием.

Данные методы подробно рассмотрены в работах Forlani G. [3], где раскрывается их основная суть: при косвенном геопозиционировании ЭВО вычисляются в процессе фототриангуляционных построений с использованием наземных опорных точек. При прямом – ЭВО определяют с помощью специальных приборов, установленных на борту летательного аппарата: координаты центров проекций – по показаниям ГНСС-приемников, а угловые элементы внешнего ориентирования определяют с помощью инерциальных систем навигации.

В исследованиях специалистов Rehak M., Skaloud J. [4] с целью определения технологии, которая обеспечивает наилучшую точность определения координат точек местности, были рассмотрены четыре разных методики геопозиционирования:

1. Прямое геопозиционирование с применением исходных (необработанных) данных с бортовых ГНСС-приемников (GNSSNAV);
2. Прямое геопозиционирование с применением постобработанных кинематических одночастотных данных ГНСС-приемников с фазой несущей без наземной поддержки на месте (РПК1),
3. Прямое геопозиционирование с применением постобработанных кинематических двухчастотных данных ГНСС-приемников с фазой несущей с наземной поддержкой на месте (РПК2),
4. Традиционное косвенное геопозиционирование.

В результате проведенного эксперимента было установлено, что первый способ дает погрешности в плановых координатах точек местности равные 1,062 метра, а погрешности в высотных координатах в 4 раза больше.

Метод РПК1 позволил получить плановые и высотные координаты с погрешностями 0,256 метра и 0,238 метра соответственно.

Метод РПК2, по сравнению с перечисленными методами прямого геопозиционирования, дал наивысшую точность определения координат, равную 0,036 метра.

И самым точным методом, согласно данному эксперименту, оказалось косвенное геопозиционирование, точность его результатов составила 0,023 метра для плановых координат и 0,030 метра для высотных.

Точность определения углов инерциальных систем навигации, установленных на борту БПЛА зависит от динамики полета и качества используемого оборудования и составляет для углов наклона $0,015^0$, для угла разворота $0,030^0$ [5].

Существует третий вариант определения ЭВО, когда линейные элементы получают с помощью ГНСС-аппаратуры, а угловые вычисляют из решения системы уравнений компланарности, составленных для связующих точек.

На точность определения линейных ЭВО снимков при прямом геопозиционировании влияют следующие факторы:

- тип ГНСС-аппаратуры;
- асинхронность фиксации координат центра фотографирования ГНСС-приемником и срабатывания затвора съемочной камеры;
- скорость БПЛА;
- учет расстояния между антенной ГНСС-приемника и центром фотографирования;
- параметры АФС и съемочной камеры.

Как было отмечено, главным недостатком способа прямого геопозиционирования является его невысокая точность. Возникает вопрос: какова необходимая точность определения линейных ЭВО с помощью ГНСС-аппаратуры, установленной на борту БПЛА, для создания картографической продукции заданной точности?

Для определения зависимости между погрешностями вычисления координат точек местности фотограмметрическим методом от погрешности определения линейных ЭВО используемых снимков воспользуемся уравнениями коллинеарности, которые устанавливают зависимость между координатами точек местности (X^F, Y^F, Z^F) и координатами их изображения на снимке (x, y) [6]:

$$X^\Gamma = X^\Gamma_s + (Z^\Gamma - Z^\Gamma_s) \frac{a_1(x - x_0) + a_2(y - y_0) - a_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}; \quad (1)$$

$$Y^\Gamma = Y^\Gamma_s + (Z^\Gamma - Z^\Gamma_s) \frac{b_1(x - x_0) + b_2(y - y_0) - b_3f}{c_1(x - x_0) + c_2(y - y_0) - c_3f}, \quad (2)$$

где a_j, b_j, c_j – направляющие косинусы, являющиеся функциями угловых ЭВО снимков ω, α, χ .

Анализ уравнений коллинеарности позволяет сделать вывод, что на точность вычисления плановых геодезических координат точек местности влияют 9 параметров:

- погрешности определения линейных ЭВО снимка $(m_{X^\Gamma_s}, m_{Y^\Gamma_s}, m_{Z^\Gamma_s})$
- погрешности измерения координат точек на снимке (m_x, m_y)
- погрешность определения угловых ЭВО снимка $(m_\omega, m_\alpha, m_\chi)$
- погрешность определения высотной координаты точки местности с помощью ЦМР, построенной стереофотограмметрическим способом (m_{Z^Γ})

От уравнений коллинеарности (1; 2) переходим к уравнениям СКП плановых координат точек местности (3; 4). В данных уравнениях СКП определения элементов внутреннего ориентирования снимков принимаем равными нулю.

$$m_{X^r}^2 = A_1^2 m_{X^r_s}^2 + A_2^2 m_{Z^r}^2 + A_3^2 m_{Z^r_s}^2 + A_4^2 m_x^2 + A_5^2 m_y^2 + A_6^2 m_a^2 + A_7^2 m_\omega^2 + A_8^2 m_\chi^2; \quad (3)$$

$$m_{Y^r}^2 = B_1^2 m_{Y^r_s}^2 + B_2^2 m_{Z^r}^2 + B_3^2 m_{Z^r_s}^2 + B_4^2 m_x^2 + B_5^2 m_y^2 + B_6^2 m_a^2 + B_7^2 m_\omega^2 + B_8^2 m_\chi^2, \quad (4)$$

где A_i, B_i – частные производные исходных функций (1) и (2) по переменным аргументам:

$$A_1 = \frac{\delta X^r}{\delta X^r_s} = dX^r_s; \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{\delta X^r}{\delta Z^r} = -\frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} dZ^r; \quad (6)$$

$$A_3 = \frac{\delta X^r}{\delta Z^r_s} = \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} dZ^r_s; \quad (7)$$

$$A_4 = \frac{\delta X^r}{\delta x} = mf \frac{a_1 [c_1 x + c_2 y - c_3 f] - c_1 [a_1 x + a_2 y - a_3 f]}{[c_1 x + c_2 y - c_3 f]^2} dx; \quad (8)$$

$$A_5 = \frac{\delta X^r}{\delta y} = mf \frac{a_2 [c_1 x + c_2 y - c_3 f] - c_2 [a_1 x + a_2 y - a_3 f]}{[c_1 x + c_2 y - c_3 f]^2} dy; \quad (9)$$

$$A_6 = \frac{\delta X^r}{\delta a} = mf \left(\frac{[-c_1 x - c_2 y - c_3 f][c_1 x + c_2 y - c_3 f] - [a_1 x + a_2 y][a_1 x + a_2 y - a_3 f]}{[c_1 x + c_2 y - c_3 f]^2} \right) da; \quad (10)$$

$$A_7 = \frac{\delta X^r}{\delta \omega} = mf \left(\frac{a_3 x \sin \kappa + a_3 y \cos \kappa + b_3 f \sin \alpha}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} - \frac{[c_3 x \sin \kappa + c_3 y \cos \kappa + b_3 f \sin \alpha][a_1 x + a_2 y - a_3 f]}{[c_1 x + c_2 y - c_3 f]^2} \right) d\omega; \quad (11)$$

$$A_8 = \frac{\delta X^r}{\delta \chi} = mf \left(\frac{[a_2 x - a_1 y][c_2 x - c_1 y][a_1 x + a_2 y - a_3 f]}{[c_1 x + c_2 y - c_3 f]^2} \right) d\chi; \quad (12)$$

$$B_1 = \frac{\partial Y^r}{\partial Y^r_s} = dY^r_s; \quad (13)$$

$$B_2 = \frac{\partial Y^r}{\partial Z^r} = -\frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f} dZ^r; \quad (14)$$

$$B_3 = \frac{\partial Y^r}{\partial Z^r_s} = \frac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} dZ^r_s ; \quad (15)$$

$$B_4 = \frac{\partial Y^r}{\partial x} = mf \frac{b_1 [c_1x + c_2y - c_3f] - c_1 [b_1x + b_2y - b_3f]}{[c_1x + c_2y - c_3f]^2} dx ; \quad (16)$$

$$B_5 = \frac{\partial Y^r}{\partial y} = mf \frac{b_2 [c_1x + c_2y - c_3f] - c_2 [b_1x + b_2y - b_3f]}{[c_1x + c_2y - c_3f]^2} dy ; \quad (17)$$

$$B_7 = \frac{\partial Y^r}{\partial \omega} = mf \left(\frac{b_3x \sin \alpha + b_3y \cos \alpha + f \cos \alpha}{c_1x + c_2y - c_3f} - \frac{[c_3x \sin \alpha + c_3y \cos \alpha - b_3f \cos \alpha][a_1x + a_2y - a_3f]}{[c_1x + c_2y - c_3f]^2} \right) d\omega ; \quad (19)$$

$$B_8 = \frac{\partial Y^r}{\partial \chi} = mf \left(\frac{b_2x - b_1y}{c_1x + c_2y - c_3f} - \frac{[c_2x - c_1y][b_1x + b_2y - b_3f]}{[c_1x + c_2y - c_3f]^2} \right) d\chi . \quad (20)$$

Таким образом, используя уравнения (3 – 20) можно определить допустимую погрешность линейных ЭВО, полученных с помощью GNSS-аппаратуры, установленной на борту БПЛА, для достижения заданной точности вычисления плановых координат точек местности ($m_{X^r_s}; m_{Y^r_s}$). Однако, для одной точки местности можно составить два уравнения вида (3 – 4) с тремя неизвестными ($m_{X^r_s}; m_{Y^r_s}; m_{Z^r_s}$). В данном случае система уравнений не имеет однозначного решения в связи с недостатком условий.

Для поиска необходимых условий, при которых данная система уравнений разрешается однозначно, были разработаны макетные снимки. Также макетные снимки использовались для контроля результатов вычислений.

Макетные снимки создавались таким образом, чтобы в их перекрытиях изображались как минимум 30 контрольных точек. Для этого на условной местности была создана сетка квадратов с предрасчитанным шагом, вершинами которых являлись контрольные точки с заданными планово-высотными геодезическими координатами. Макетным снимкам присвоены элементы внутреннего и внешнего ориентирования ($x_0, y_0, f, X^r_s, Y^r_s, Z^r_s, \omega, \alpha, \chi$).

Для экспериментальных исследований были приняты следующие параметры аэросъемки:

– продольное перекрытие $P_x = 80\%$;

– масштаб аэросъемки в 5 раз мельче масштаба создаваемого плана ($m_c = 5 M_{пл}$).

Высота фотографирования (H) вычислена для различных камер по известной формуле $H = mf$.

В качестве исходных данных были приняты следующие угловые ЭВО:

– для горизонтального снимка: $\alpha = 0^\circ$, $\square = 0^\circ$, $\varkappa = 0^\circ$;

– для снимка с максимальными значениями угловых ЭВО: $\alpha = \pm 45^\circ$, $\square = \pm 25^\circ$, $\varkappa = \pm 50^\circ$.

По данным значениям были вычислены координаты контрольных точек на макетных снимках ($x; y$).

Результаты, полученные по макетным снимкам, позволяют учесть погрешности в перечисленные элементы и с помощью уравнений коллинеарности вычислять плановые геодезические координаты контрольных точек с известными исходными данными. Таким образом, сравнивая идеальные и вычисленные результаты можно определить влияние погрешностей исходных данных на точность планового положения контрольных точек местности.

В табл. 1 приведены расчеты необходимой точности линейных ЭВО при создании ортофотопланов в масштабе 1:М=1:1000 по снимкам, полученным различными цифровыми съемочными камерами.

Эффективность прямого геопозиционирования во многом зависит от наличия полноценной и достоверной информации. Анализ существующих технологий применения снимков, полученных с БПЛА, для картографирования выявляет существенную проблему – отсутствие комплексного учета взаимосвязей основных технологических компонентов, влияющих на точность прямого геопозиционирования, таких как априорные расчеты параметров аэрофотосъемки с использованием БПЛА и получением ЭВО с помощью установленных на его борту ГНСС-приемников и инерциальных систем навигации; оптимальный подбор (или учет) параметров съемочной аппаратуры для проведения аэрофотосъемки; учет влияния ЭВО, а также других факторов на точность вычисления координат точек местности.

Таблица 1

Необходимая точность определения линейных ЭВО при использовании различных цифровых камер для наклонных снимков при создании планов масштаба 1:1000

Параметры съемочной камеры и АФС	Nikon D800	Ricoh GR	Canon IXUS	Sony RX1	Sony NEX5	Canon EO S 5D mark2	Phase One IXU 150
Ширина матрицы (pix)	4912	2736	3000	4000	3264	3744	6208
Длина матрицы (pix)	7360	3168	4000	6000	4912	5616	8280
Размер пикселя (мкм)	5	2	1,5	6	4,9	6,5	5,3
Фокусное расстояние (мм)	50	6	4	35	16	50	55
Высота фотографирования (м)	250	30	20	175	80	250	275
Масштаб аэросъемки	1:5000	1:5000	1:5000	1:5000	1:5000	1:5000	1:5000
Масштаб создаваемого ортофотоплана	1:1000	1:1000	1:1000	1:1000	1:1000	1:1000	1:1000
Погрешность определения высотной координаты точки местности по ЦМР, построенной стереофотограмметрическим способом m_Z^{Γ} (м)	0,25	0,07	0,04	0,22	0,12	0,33	0,25
$m_{Y_S}^{\Gamma}$ (м)	0,11	0,16	0,14	0,06	0,05	0,08	0,09
$m_{Y_S}^{\Gamma}$ (м)	0,11	0,16	0,14	0,06	0,05	0,08	0,09
$m_{Z_S}^{\Gamma}$ (м)	0,15	0,25	0,20	0,10	0,10	0,10	0,15

Литература

1. Бабашкин Н. М., Кадничанский С. А., Нехин С. С. Сравнение эффективности аэрофототопографической съемки с использованием беспилотных и пилотируемых авиационных систем // *Геопрофи*, 2017. – №. 1. – С. 14.
2. Зверев А. Т., Фисенко Е. В. Специфика получения данных с беспилотного летательного аппарата // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2014. – №. 5. – С. 27 – 29.
3. Forlani G. et al. Indirect UAV strip georeferencing by on-board GNSS data under poor satellite coverage // *Remote Sensing*, 2019. – Т. 11. – №. 15. – С. 1765.
4. Rehak M., Skaloud J. Fixed-wing micro aerial vehicle for accurate corridor mapping // *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2015. – Т. 2. – <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-1-W1/23/2015/>.
5. Zhang D. et al. A new medium access control protocol based on perceived data reliability and spatial correlation in wireless sensor network // *Computers & Electrical Engineering*, 2012. – Т. 38. – №. 3. – С. 694 – 702.
6. Лимонов А. Н., Гаврилова Л. А. *Прикладная фотограмметрия: Учебник для вузов.* – М.: Академический проект, 2016. – 255 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕРЕСАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ФЕДЕРАЛЬНОГО ФОНДА ДАННЫХ ДЗЗ РФ

Д. И. Федоткин, А. В. Ядыкин,
Е. Н. Боровенский, Д. В. Сысенко
(АО «НИИ ТП», г. Москва)

В докладе рассматриваются статистика по результатам работы комплекса автоматической потоковой обработки информации в интересах федерального фонда данных ДЗЗ. Комплекс автоматической потоковой обработки информации работает полностью в автоматическом режиме на вычислительном кластере, состоящем из 10 серверов установленных в ЦОД, и обрабатывает данные панхроматической и мультиспектральной съемки с КА серий «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М». Высокопроизводительный комплекс автоматической потоковой обработки информации генерирует из архивных данных более 3 тысяч стандартных ортокорректированных продуктов (сцен) общей площадью около 1,5 млн. км² в сутки, включая продукты BUNDLE и PANSHARP. При этом комплекс автоматической потоковой обработки информации в автоматическом режиме повышает точность геопривязки данных ДЗЗ с десятков и сотен метров до единиц метров. Приводится статистика обработки комплексом более чем 10 тыс. архивных маршрутов съемки за полгода эксплуатации ФФД ДЗЗ.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, наземные комплексы обработки, автоматическая потоковая обработка информации (АПОИ), распределенная обработка данных.

Комплекс автоматической потоковой обработки информации (АПОИ), разработанный коллективом специалистов АО «НИИ ТП», функционирует в составе федерального фонда данных (ФФД) ДЗЗ. В октябре 2021 года комплекс АПОИ введен в штатную эксплуатацию в контуре Оператора КС ДЗЗ и осуществляет полностью в автоматическом режиме обработку всех заявок российских потребителей в рамках эксплуатации ФФД ДЗЗ, обеспечивая в том числе заявки федеральных и региональных органов государственной власти.

В докладе рассматриваются результаты работы комплекса АПОИ за первое полугодие 2022 года, в том числе пиковые характеристики комплекса при максимальной нагрузке. Комплекс АПОИ установлен и функционирует на вычислительном кластере, состоящем из 10 серверов (на базе 2-х процессорных материнских плат без GPU) и размещенном в центре обработки данных (ЦОД).

Комплекс АПОИ позволяет выполнять первичную (распаковку сеансов сброса до продуктов архивного уровня хранения) и стандартную обработку (вплоть до ортокорректированных продуктов). Комплекс способен обрабатывать панхроматические (ПАН) и мультиспектральные (МС) данные съемочных систем ГЕОТОН, ШМСА с КА «Ресурс-П», данные панхроматической камеры (ПСС) и

мультиспектральной (МСС) камеры с КА серий «Канопус-В», данные съемочных систем КМСС и МСУ-МР с КА серий «Метеор-М». Комплекс автоматически формирует продукты уровней обработки L0 (архивные), L1 (геопривязанные в системе координат сенсора), L2 (ортокорректированные в картографической проекции), включая продукты BUNDLE (геометрически совмещенная пара ПАН и МС) и PANSHARP (повышенного пространственного разрешения).

В первом полугодии 2022 года (в период с 01.01.2022 по 30.06.2022 г.), согласно статистике обработки данных, комплексом АПОИ было обработано 18404 задания на создание различных продуктов ДЗЗ в интересах потребителей ФФД ДЗЗ, при этом было обработано 11116 уникальных архивных маршрутов и создано 130896 продуктов (сцен) общим объемом более 100 ТБ. Важно отметить, что средняя загрузка кластера за полгода не превышает 10%.

На рис. 1, 2 приведена статистика по месяцам количества сформированных по заявкам потребителей продуктов и статистика потребительских запросов на создание продуктов разного типа за период с 01.01.2022 по 30.06.2022 гг.

Отдельно стоит отметить, что доля заказа продуктов BUNDLE и PANSHARP составляет подавляющие 78%. То есть с введением в эксплуатацию комплекса АПОИ, впервые обеспечившего возможность полностью автоматической (без участия оператора) обработки данных, основные заказы приходятся именно на продукты PANSHARP (которые ранее требовали несколько суток и трудоемких усилий оператора по их созданию в ручном режиме) и продуктов BUNDLE (новый тип продукта, который ранее не создавался и не поставлялся потребителям).

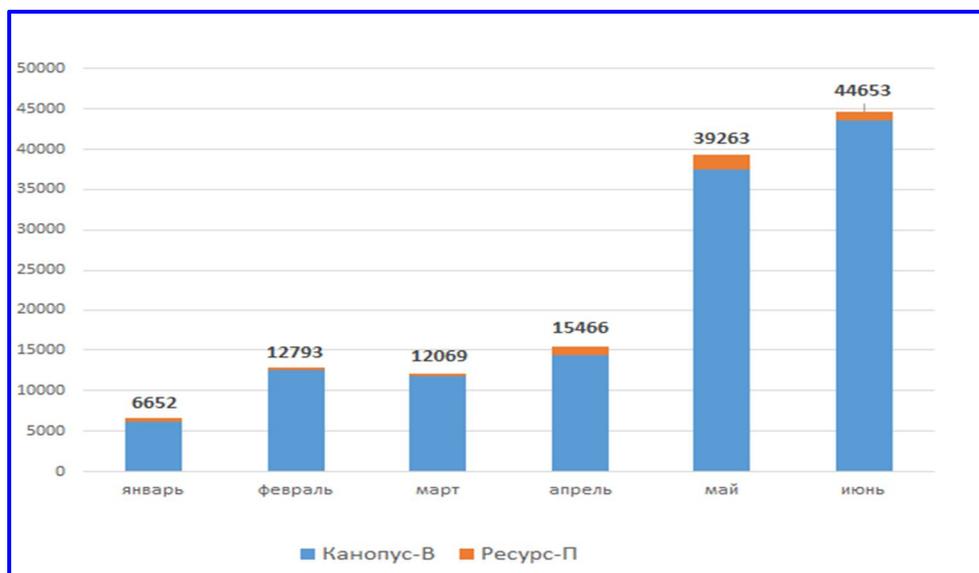


Рис. 1. Количество продуктов (сцен), сформированных комплексом АПОИ за первое полугодие 2022 г.

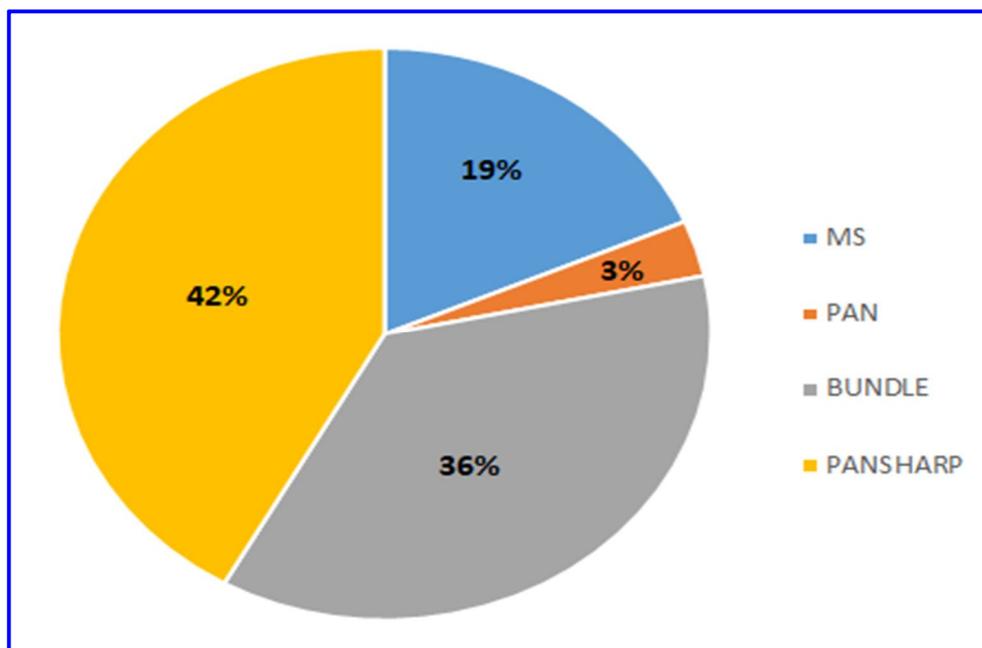


Рис. 2. Соотношение продуктов MS, PAN, BUNDLE и PANSARP, сформированных комплексом АПОИ

Таблица 1

Показатели пиковой производительности работы комплекса АПОИ на вычислительном кластере из 10 серверов

Среднее количество заданий в сутки	359 заданий (эквивалентно 4 минутам на задание)
Среднее количество продуктов (сцен) в сутки	3346 продуктов (эквивалентно 25 секундам на продукт)
Средняя площадь обработанной территории в сутки	1,5 млн. км ² .
Средний объем созданной продукции в сутки	3 – 7 ТБ (в зависимости от типа КА)

Пиковая производительность комплекса АПОИ, оценивалась по периоду максимальной нагрузки с точки зрения потока заявок потребителей (период 5 суток с 16.05.2022 по 20.05.2022 при средней загрузке комплекса в 95%). Результаты представлены в табл. 1 (для 10 серверного кластера).

Существенное улучшение качества геопривязки продуктов ДЗЗ и сведения спектральных каналов в процессе наземной обработки информации комплексом АПОИ обеспечивается за счет алгоритма уточнения бортовых парамет-

ров ориентации и навигации КА, выполняемого в автоматическом режиме с использованием опорного покрытия. Согласно статистическим данным за 6 месяцев эксплуатации АПОИ в составе ФФД ДЗЗ при обработке более чем 11 тысяч маршрутов автоматический алгоритм коррекции геопривязки успешно отработал для 99,3%, (из них геопривязка не улучшилась лишь для 0,2% маршрутов, еще 0,5% маршрутов содержали сплошную облачность, воду, лед, то есть были некондиционными с точки зрения потребителя информации). Сама коррекция геопривязки данных приводила к улучшению точности в среднем на один-два порядка, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Показатели улучшения точности геопривязки комплексом АПОИ по статистике обработки более 11 тысяч маршрутов съемки

КА	Средняя точность геопривязки в метрах до коррекции (по бортовым данным)	Средняя точность геопривязки в метрах после коррекции (с использованием опоры)
«Канопус-В» № 3, 4, 5, 6, ИК	62,3	5,7
«Ресурс-П» № 2, 3	23,6	4,4
«Канопус-В» № 1, БКА*	2419,2	33,1
«Ресурс-П» №1*	1177,3	10,2

* Данные КА имеют существенные проблемы в работе бортовых систем ориентации и навигации

На рис. 3, 4, 5, 6 приведена статистика работы алгоритма автоматической коррекции геопривязки комплекса АПОИ. Две пары диаграмм показывают исходную геопривязку по бортовым данным и результат после коррекции для данных КА «Ресурс-П» и «Канопус-В». По оси *X* – ошибка в метрах, по оси *Y* – количество продуктов (сцен) с такой ошибкой.

Комплекс АПОИ успешно функционирует в составе ФФД ДЗЗ, работая полностью в автоматическом режиме и демонстрируя высокую скорость обработки. Реализованные в АПОИ алгоритмы обработки позволили компенсировать основные проблемы бортовых систем КА, за счет чего наблюдается существенное улучшение качества геопривязки информационных продуктов и качество сведения спектральных каналов.

В комплексе АПОИ унифицирована обработка данных с различной съемочной аппаратуры и различных КА на едином наборе технических средств (вычислительном кластере), при этом платформенная реализация комплекса АПОИ позволяет легко модернизировать его под обработку новых типов данных, в том числе и радиолокационных, а также масштабировать его под большие потоки данных с многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ).

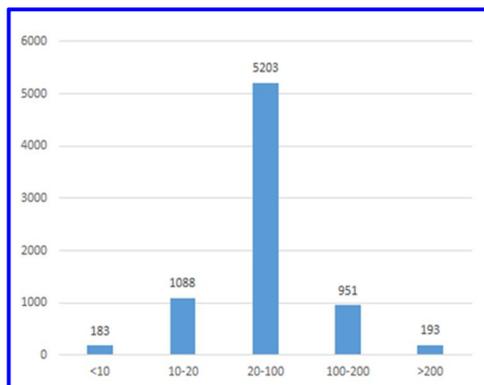


Рис. 3. СКО геопривязки в метрах до коррекции для данных КА «Канопус-В» ИК, 3, 4, 5, 6

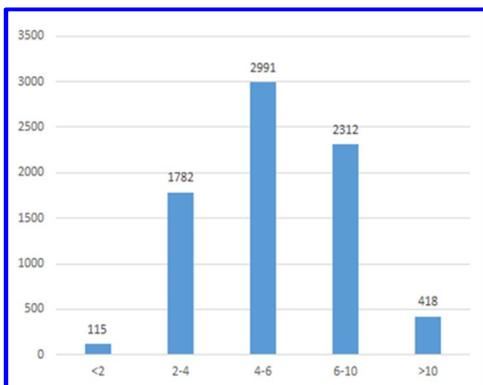


Рис. 4. СКО геопривязки в метрах после коррекции для данных КА «Канопус-В» ИК, 3, 4, 5, 6

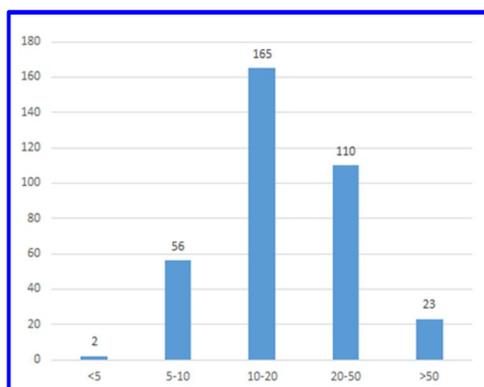


Рис. 5. СКО геопривязки в метрах до коррекции для данных КА «Ресурс-П» № 2, 3

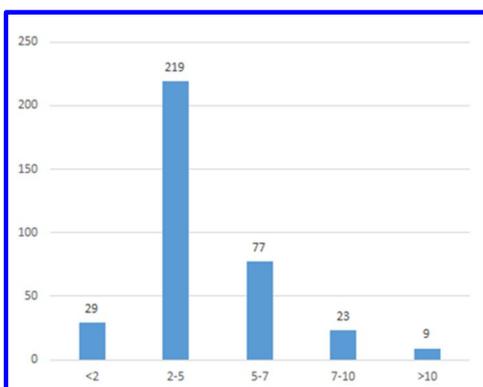


Рис. 6. СКО геопривязки в метрах после коррекции для данных КА «Ресурс-П» № 2, 3

Два года фактической эксплуатации комплекса АПОИ у Оператора КС ДЗЗ (опытная эксплуатация в рамках ЕТРИС и штатная эксплуатация в рамках ФФД ДЗЗ) подтверждают правильность выбранных технологических решений и вектора будущего развития наземного сегмента отечественной ОГ ДЗЗ, а информационная система «Цифровая Земля», создаваемая на базе вышеуказанных технологий АПОИ, позволит в ближайшее время вывести наземный сегмент ДЗЗ РФ на технологический уровень лучших мировых аналогов.

ТЕХНОЛОГИИ И РЕШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАБОТЕ КОМПЛЕКСА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Д. И. Федоткин, А. В. Ядыкин,
Д. В. Сысенко, Е. Н. Боровенский
(АО «НИИ ТП», г. Москва)

В докладе представлено описание подходов к решению основных задач обработки данных ДЗЗ, реализованных в комплексе автоматической потоковой обработки информации. Данный комплекс предназначен для высокоскоростной обработки данных ДЗЗ в полностью автоматическом режиме. Реализована распаковка данных из «сырого» потока с антенной системы, коррекция геопривязки данных, создание стандартных информационных продуктов, калибровка геометрических параметров съемочной аппаратуры и многое другое. Для достижения указанных целей при создании комплекса автоматической потоковой обработки информации были решены различные инженерные задачи, разработаны уникальные алгоритмы и технологии. Особенностью комплекса автоматической потоковой обработки информации является обработка больших объемов информации на вычислительном кластере в распределенном режиме и полностью автоматически. Такая реализация комплекса позволила существенно снизить время получения готовой информационной продукции (от нескольких суток до нескольких минут). Для обеспечения автоматической высокоточной геопривязки (единицы метров) была реализована процедура поиска опорных точек (GCP) по опорным покрытиям с последующим использованием данных точек для коррекции параметров баллистического и углового движения КА. Реализованные в комплексе автоматической потоковой обработки информации технологические и алгоритмические подходы позволили обеспечить полностью автоматическую высокопроизводительную обработку данных с российской орбитальной группировки КА ДЗЗ высокого и среднего разрешения («Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М») и формирование информационных продуктов высокого качества. Это позволило сделать технологический скачок в наземной обработке данных с российской орбитальной группировки КА ДЗЗ и вывести на качественно новый уровень использование отечественных данных ДЗЗ различными потребителями, а также обеспечить бесперебойную работу ФФД ДЗЗ в автоматическом режиме.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, наземные комплексы обработки, автоматическая потоковая обработка информации (АПОИ), распределенная обработка данных.

В настоящее время усиливается потребность использования данных ДЗЗ в различных сферах жизни общества. Возрастают требования как по качеству информационных продуктов, так и по оперативности их получения. Расширяется группировка космических аппаратов (КА) ДЗЗ с перспективой увеличения их числа до нескольких сотен, что предполагает соответствующее увеличение объема данных, требующих оперативной обработки. Для обеспечения этих требований возникает острая необходимость создания комплекса полностью автомати-

ческой обработки данных ДЗЗ с высокой скоростью и высоким качеством. В результате работ в этом направлении в АО «НИИ ТП» был создан комплекс автоматической потоковой обработки информации (АПОИ) и в октябре 2021 года введен в штатную эксплуатацию в контуре Оператора КС ДЗЗ для обеспечения функционирования федерального фонда данных ДЗЗ (ФФД ДЗЗ).

Основными особенностями обработки данных ДЗЗ, реализованными в комплексе АПОИ являются:

- унифицированная обработка данных с различных КА ДЗЗ в едином комплексе от «сырого» сигнала до стандартных ортокорректированных продуктов;
- полностью автоматическая обработка без участия оператора;
- высокопроизводительная обработка в течение нескольких минут;
- масштабируемость под большие потоки данных;
- формирование качественных стандартных информационных продуктов (со сведенными спектральными каналами, продуктов BUNDLE, PANSHARP) на основе строгих математических моделей съемки;
- автоматическая коррекция геопривязки данных ДЗЗ до единиц метров за счет уточнения бортовой навигационной информации.

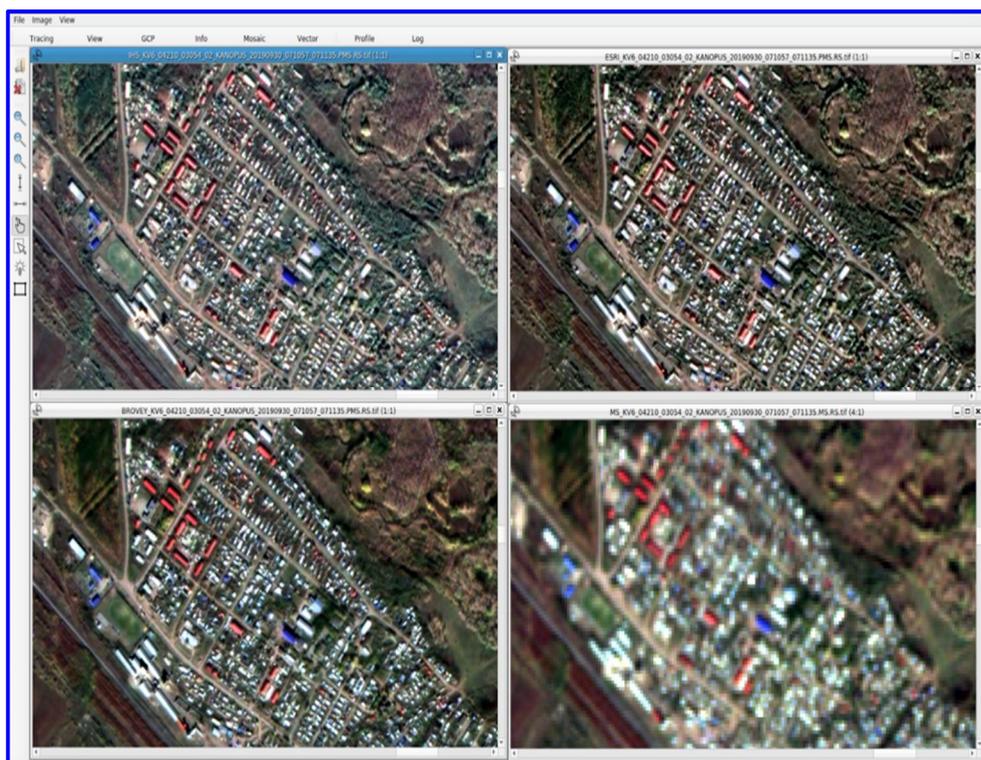


Рис. 1. Пример изображений ПАНШАРП (различные алгоритмы преобразования) в сравнении с МС. Слева сверху – IHS, справа сверху – ESRI, слева снизу – BROVEY, справа снизу – оригинал MS

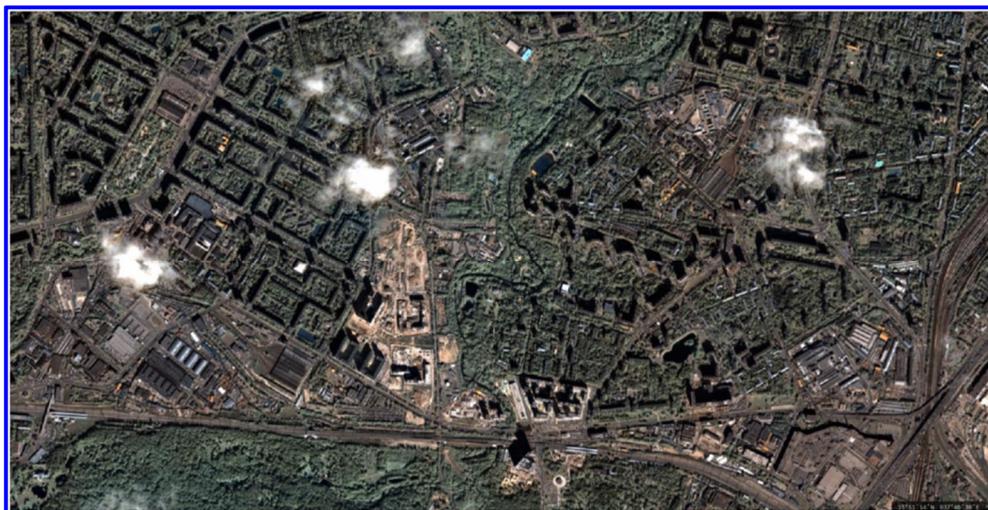


Рис. 2. Пример ортопродукта ПАНШАРП

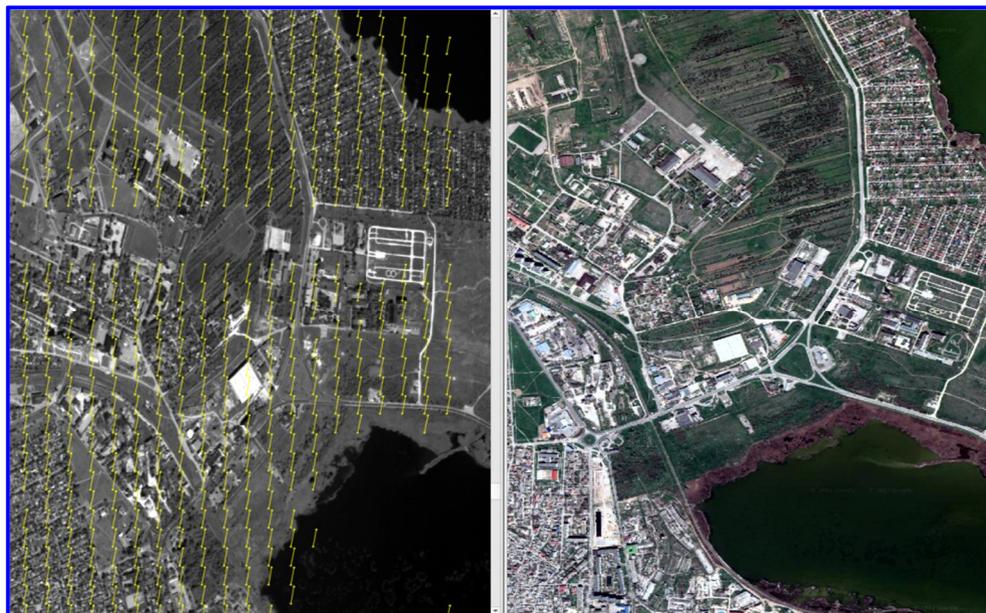


Рис. 3. Результат автоматического поиска опорных точек (слева – фрагмент изображения с точками; справа – соответствующий фрагмент опоры)

Особенностью комплекса АПОИ является обработка больших объемов информации на вычислительном кластере в распределенном режиме и полностью автоматически. Такая реализация комплекса позволила существенно снизить время получения готовой информационной продукции (от нескольких суток до нескольких минут).



Рис. 4. Статистика уточнения геопривязки

Отдельно стоит отметить функцию коррекции геопривязки данных ДЗЗ, основанную на алгоритмах автоматического уточнения параметров ориентации и баллистики КА за счет сопоставления данных с опорной информацией. Низкая точность бортовой навигационной информации КА ДЗЗ приводит не только к ухудшению точности геопривязки данных ДЗЗ, но и внутренней геометрии данных (проблемам сшивки матриц, сведения спектральных каналов, совмещения продуктов панхроматической и мультиспектральной съемки). Для обеспечения автоматической высокоточной геопривязки (единицы метров) была реализована процедура поиска опорных точек (GCP) по опорным покрытиям с последующим использованием данных точек для коррекции параметров баллистического и углового движения КА.

Для обеспечения высокого качества выходных информационных продуктов в автоматическом режиме с высокой скоростью обработки при создании комплекса АПОИ были решены различные инженерные задачи, разработаны уникальные алгоритмы и технологии. В докладе представлено описание подходов к решению основных задач обработки данных ДЗЗ, реализованных в комплексе АПОИ.

Обработка данных комплексом АПОИ включает в себя решение следующих основных задач:

- автоматическая распаковка, фильтрация и восстановление исходных «сырых» данных ДЗЗ, принимаемых с борта КА;
- построение модели баллистического движения КА;
- построение модели ориентации КА на период съемки путем интегрирования измерений различных источников ориентации и данных измерителя угловых скоростей (ИУС);

- построение модели сенсора (геометрия съемочного устройства, фокальной плоскости и др.);
- реализация алгоритмов прямой и обратной географической привязки на основе строгих математических моделей;
- автоматический корреляционный поиск множества (сотни тысяч) опорных точек местности по опорным данным, а также межматричных связующих точек, их фильтрация и регуляризация;
- уточнение моделей баллистического движения и ориентации КА с использованием полученных массивов опорных точек;
- сшивка изображений отдельных матриц (линеек) фотоприемного устройства с формированием на выходе единого изображения в геометрии псевдо-сенсора (в случае сложных фотоприемных устройств, состоящих из нескольких фотоприемных линеек или кадровых матриц ПЗС);
- геометрическое сведение (совмещение) между собой изображений, полученных в различных спектральных каналах целевой аппаратуры ДЗЗ из космоса;
- относительная и абсолютная радиометрическая коррекция;
- повышение резкости изображения;
- ортокоррекция изображений с учетом цифровой модели рельефа;
- расчет RPC-коэффициентов;
- формирование стандартных информационных продуктов в заданной картографической проекции;
- формирование продуктов BUNDLE и PANSHARP;
- маскирование (обрезка) по контуру.

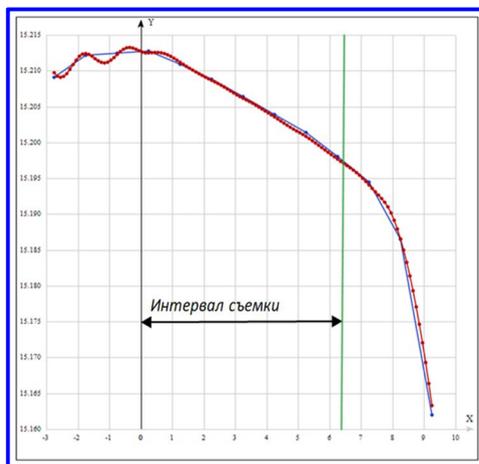


Рис. 5. Графики построения ориентации по крену (синий – результат интегрирования измерений БОКЗ; красный – результат интегрирования ИУС; зеленая линия – момент окончания маршрута). Ось X – время (с); ось Y – значение крена (град.)

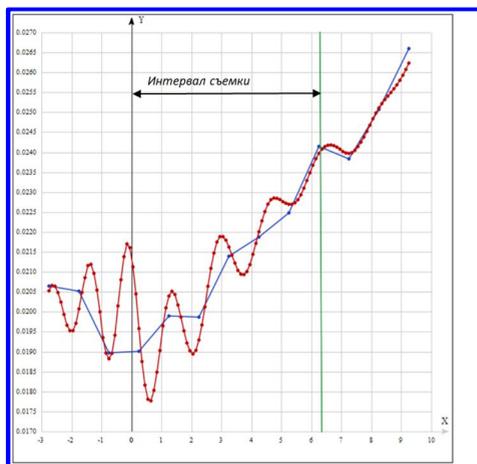


Рис. 6. Графики построения ориентации по тангажу (синий – результат интегрирования измерений БОКЗ; красный – результат интегрирования ИУС; зеленая линия – момент окончания маршрута). Ось X – время (с); ось Y – значение крена (град.)

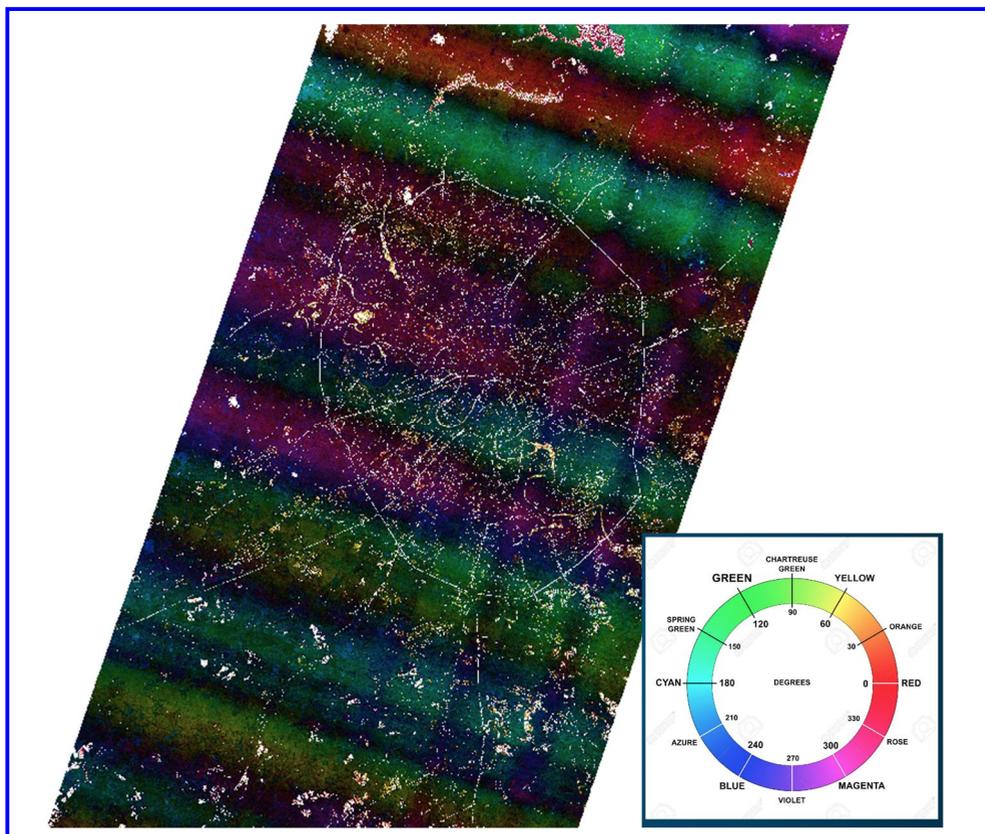


Рис. 7. Исследование влияния неточностей ориентации на параллакс при наложении двух маршрутов друг на друга

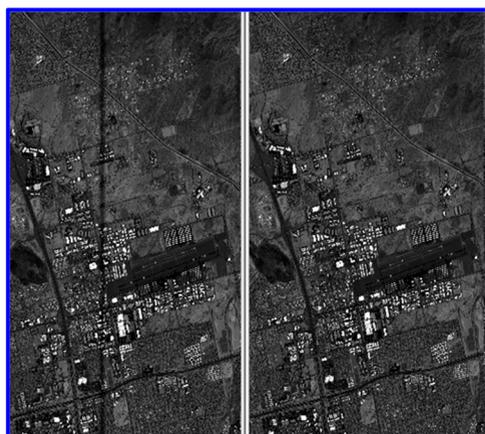


Рис. 8. Пример радиометрической коррекции деградирующих пикселей на фотоприемном детекторе (слева – до коррекции; справа – после)

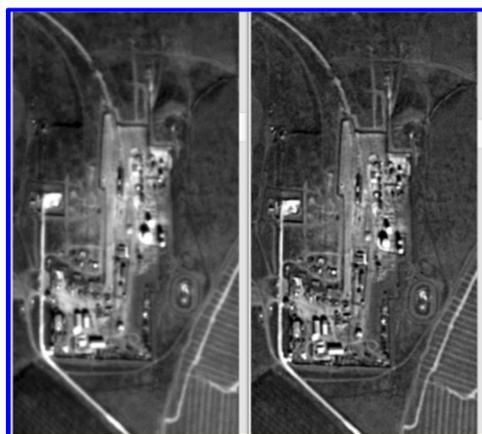


Рис. 9. Повышение резкости изображения (слева: исходное изображение, справа – изображение с повышенной резкостью)

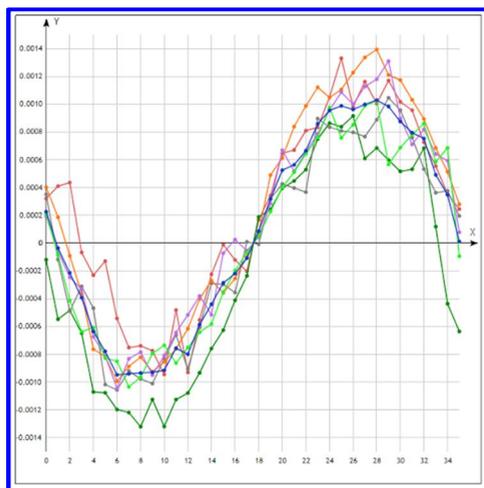


Рис. 10. Графики дисторсии, рассчитанные для различных маршрутов

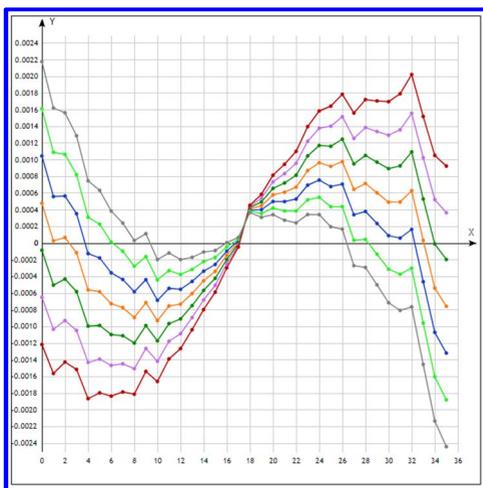


Рис. 11. Зависимость дисторсии от фокусного расстояния

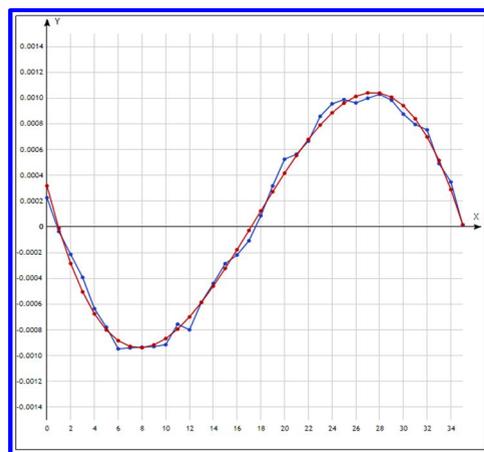


Рис. 12. Результат усреднения дисторсии различных маршрутов (синий график) и результат аппроксимации (красный график)

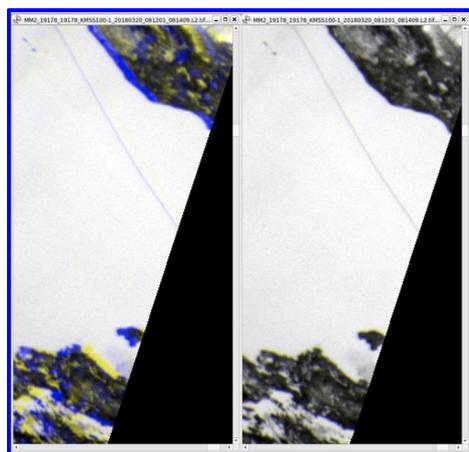


Рис. 13. Влияние коррекции дисторсии на сведение спектральных каналов у сенсора КМСС КА Метеор-М-2

Отдельный контур – калибровка параметров съемочной системы КА. Калибровка осуществляется вне процесса обработки периодически по мере необходимости. В результате калибровки формируется файл параметров, который в дальнейшем используется при обработке. Калибровке подлежат следующие параметры:

- установочные углы съемочной системы относительно конструктивных осей КА;
- фокусное расстояние объектива;
- дисторсия объектива;
- смещение и угловое положение светочувствительных элементов в фокальной плоскости.

Калибровка может осуществляться как с использованием калибровочных полигонов, так и без них в автоматическом режиме на основе десятков или сотен маршрутов и результатов их корреляционного совмещения с опорными данными.

Реализованные в комплексе АПОИ технологические и алгоритмические подходы позволили обеспечить полностью автоматическую высокопроизводительную обработку данных с российской орбитальной группировки КА ДЗЗ высокого и среднего разрешения («Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М») и формирование информационных продуктов высокого качества. Это позволило сделать технологический скачок в наземной обработке данных с российской орбитальной группировки КА ДЗЗ и вывести на качественно новый уровень использование отечественных данных ДЗЗ различными потребителями, а также обеспечило бесперебойную работу ФФД ДЗЗ в автоматическом режиме.

ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОТОКОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЗЗ

¹Я. В. Алексеев, ²А. А. Антонова, ²В. И. Карташев, ³Ш. С. Фахми
(¹Главное управление «Национальный центр управления в кризисных ситуациях»
МЧС России, г. Москва;
²АО «Российские космические системы», г. Москва;
³Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко, Санкт-Петербург)

Развитие научно-технического прогресса привело к бурному развитию информационных технологий. В последнее десятилетие наблюдается взрывной рост количества источников получения данных ДЗЗ из космоса. А также, что немаловажно, специализированного программного обеспечения и информационных систем, позволяющих в онлайн-режиме решать практические тематические задачи с использованием результатов космической деятельности. В работе представлен подход к построению распределенной потоково-параллельной обработки данных ДЗЗ из космоса, получаемых в режиме прямого вещания с космических аппаратов Suomi-NPP и NOAA-20 (на примере данных с прибора VIIRS). Для обработки данных ДЗЗ применяется открытое программное обеспечение, которое зарекомендовало себя с положительной стороны при обработке больших данных (Big Data) и построении автоматизированных цепочек сбора и обработки данных.

Ключевые слова: обработка данных ДЗЗ, распределенное хранение данных, параллельная обработка данных, мониторинг чрезвычайных ситуаций, сбор данных

Введение

В последнее десятилетие наблюдается активное развитие космических систем, данные с которых имеют открытый доступ. Широко применяются космические системы низкого разрешения, которые могут обеспечивать глобальное покрытие с одновременным получением данных в широком спектральном диапазоне. Опыт применения подобных систем описан в большом количестве работ [1 – 11].

Наряду с открытостью данных разработчиками систем и сообществом предоставляется набор программного обеспечения для создания различных тематических продуктов. Яркий пример – спутниковая группировка космических аппаратов NOAA-20 и Suomi-NPP, которые являются частью программы NASA – Joint Polar Satellite System (JPSS). Срок действия данной программы рассчитан на период с 2011 по 2039 годы [12].

Для обработки данных используется набор программных продуктов – Community Satellite Processing Package (CSPP) [13]. Данный набор программных продуктов позволяет обрабатывать данные, в том числе полученные при прямом вещании. Программное обеспечение распространяется с открытым исходным кодом, что позволяет, в случае необходимости, доработать его для

решения узконаправленных задач пользователя. Финансирование и поддержку CSPP обеспечивает NOAA по программе JPSS.

Набор программного обеспечения CSPP является набором различных скриптов для решения задач по обработке данных ДЗЗ. Для автоматизации процесса обработки данных (от получения данных на станцию приема и получения тематического продукта) в данной статье предлагается подход к организации распределенной потоково-параллельной обработки информации ДЗЗ (РППИ ДЗЗ). Реализация предлагаемого подхода полностью основана на открытом программном обеспечении и открытых данных.

Предлагаемый подход позволяет обеспечить автоматизированный сбор и обработку данных, получаемых как со станций приема космической информации в режиме прямого вещания, так и из открытых источников информации. Обработка получаемых данных и создание тематических продуктов выполняется CSPP. Сбор и предварительная подготовка данных обеспечивается программным продуктом Apache NIFI [14], хранение данных осуществляется в распределенной файловой системе, оркестрация запуска необходимых скриптов выполняется с помощью Apache Airflow [15].

Общее описание подхода РППИ ДЗЗ

Общая схема реализации предлагаемого подхода РППИ ДЗЗ представлена на рис. 1.

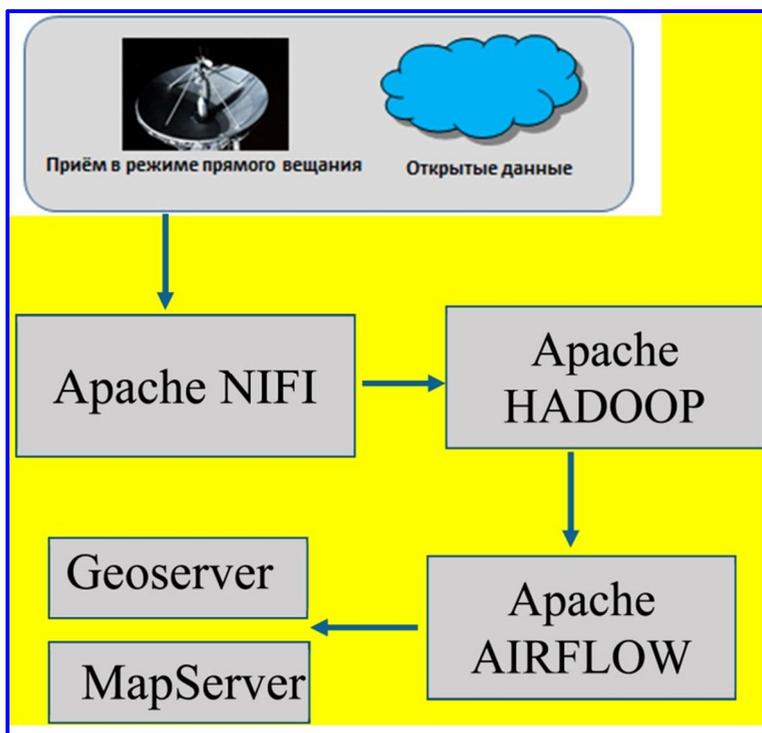


Рис. 1. Общая схема функционирования подхода РППИ ДЗЗ

Источниками информации могут выступать как станции приема данных ДЗЗ (режим прямого вещания), так и открытые источники информации. Новые данные от источников информации поступают в определенный каталог. Доступ к нему организован либо по протоколу smb, либо по протоколу ftp. В Apache NIFI (NIFI) настраиваются процессоры, которые обеспечивают автоматическое сканирование источников (каталогов обмена информацией) на получение новых данных и их последующую обработку. Результаты обработки сохраняются в распределенную файловую систему Apache HADOOP (HDFS). После этого запускаются процессоры в Apache AIRFLOW (AirFlow), которые оркестрируют запуск скриптов CSPP, результаты обработки (тематические продукты) сохраняются как слой в геоинформационную систему, которая основана на Geoserver или MapServer (геопортал).

Реализация предлагаемого подхода позволяет в автоматизированном режиме осуществлять всю цепочку обработки: от получения «сырых» данных до получения тематических продуктов. Роль оператора сводится только к мониторингу системы и обеспечению работоспособности при возникновении сбоев.

Описание основных узлов подхода РППИ ДЗЗ

В подходе РППИ ДЗЗ применяются программные системы, которые зарекомендовали себя при обработке больших данных и построении озер данных. Ниже будет дано краткое описание применяемых систем и примеров использования в РППИ ДЗЗ.

Apache NiFi – система, которая гармонично сочетает в себе мощь и надежность с простотой использования для обработки и распространения данных. Функционирование NiFi основано на применении направленных графов (могут масштабироваться в случае необходимости) маршрутизации потоков обработки данных, а также логики взаимодействия системы.

Основными возможностями NiFi являются:

- интерфейс пользователя реализован в браузере (проектирование, управление, мониторинг);
- отслеживание потока данных (полное отображение потока передачи информации);
- устойчивость к потерям и гарантированная доставка данных;
- низкая задержка и высокая пропускная способность;
- динамическая расстановка приоритетов;
- изменение конфигурации потока во время выполнения;
- компонентная архитектура для пользовательских процессоров и сервисов;
- быстрая разработка и итеративное тестирование;
- поддержка HTTPS с настраиваемыми стратегиями аутентификации;
- мультитенантная авторизация и управление политиками;
- стандартные протоколы для зашифрованной связи, включая TLS и SSH.

NiFi был создан для автоматизации обеспечения потока данных между различными системами. Под термином «поток данных» в NiFi подразумева-

ется автоматизированный и управляемый поток информации между несколькими системами. Таким образом, NiFi позволяет решать проблему обмена данными между несколькими системами, где одни системы создают данные, а другие потребляют данные.

На рис. 2 – 5 представлены практические примеры использования NiFi для реализации РППИ ДЗЗ.

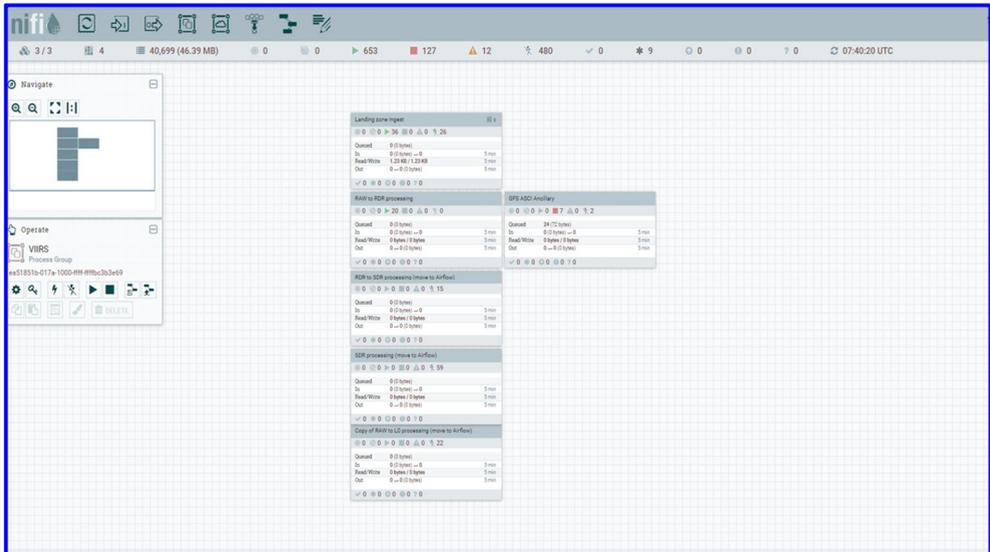


Рис. 2. Применение NiFi в РППИ ДЗЗ

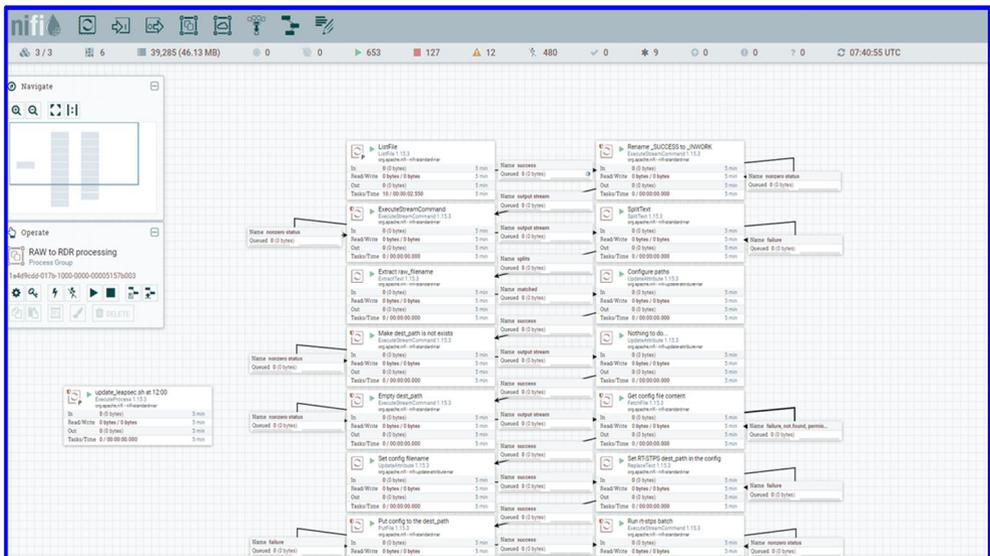


Рис. 3. Применение NiFi в РППИ ДЗЗ

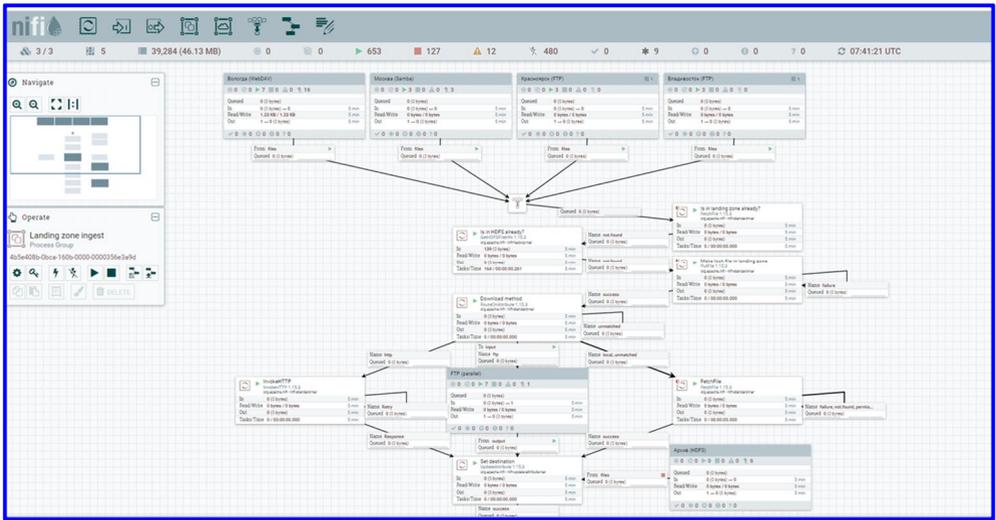


Рис. 4. Применение NiFi в РППИ ДЗЗ

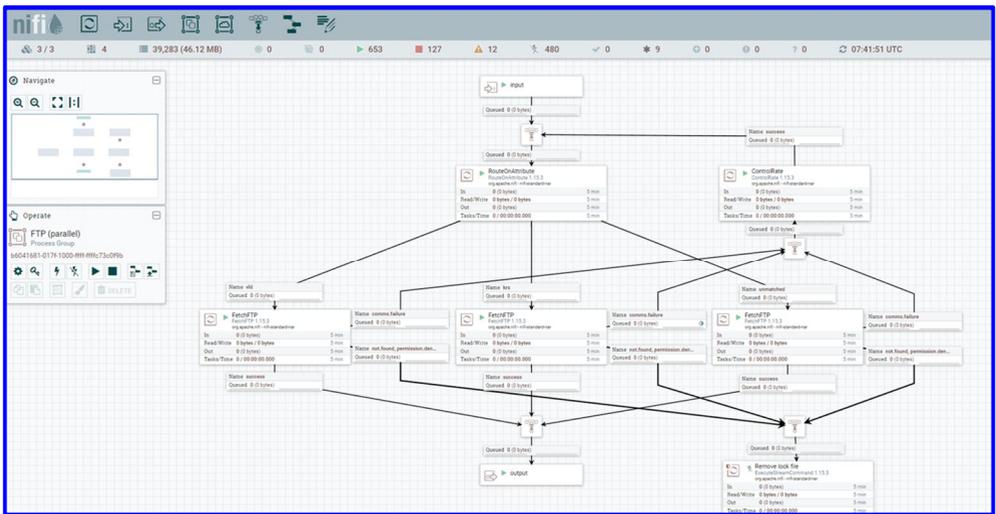


Рис. 5. Применение NiFi в РППИ ДЗЗ

Таким образом, NiFi в РППИ ДЗЗ обеспечивает сбор, трансформацию и хранение данных, получаемых со сторонних источников информации.

AirFlow представляет собой платформу, которая была создана сообществом для программной оркестрации (создание, планирование и мониторинг) рабочих процессов.

AirFlow имеет большие возможности по масштабируемости за счет модульной архитектуры и использования очереди сообщений для управления произвольным количеством рабочих процессов.

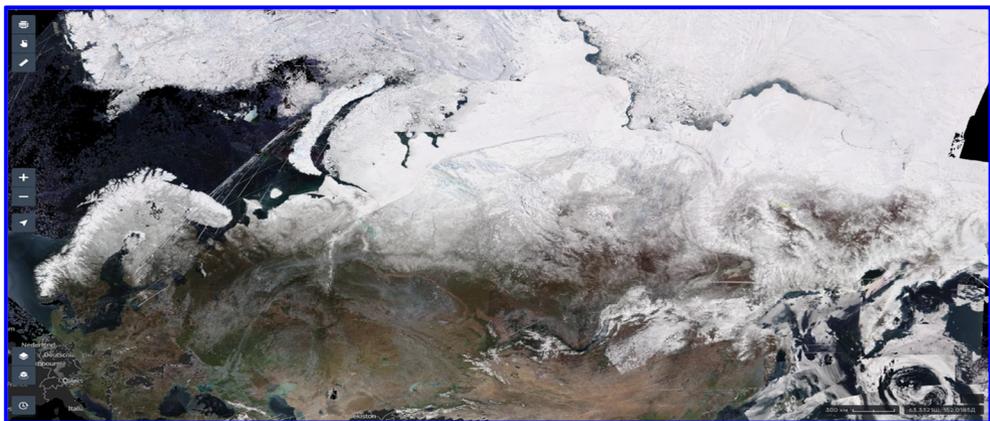


Рис. 10. Тематические продукты в геопортале. Безоблачный композит (7-ми суточный) VIIRS

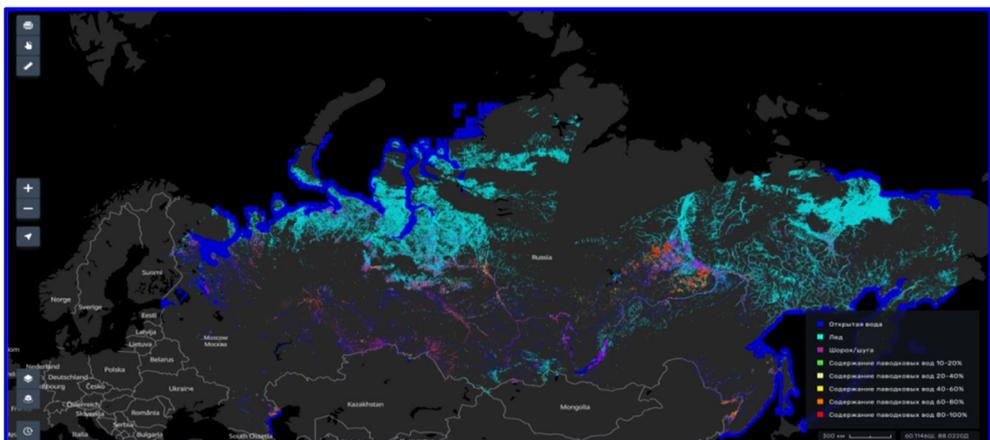


Рис. 11. Тематические продукты в геопортале. Продукт наводнений VIIRS

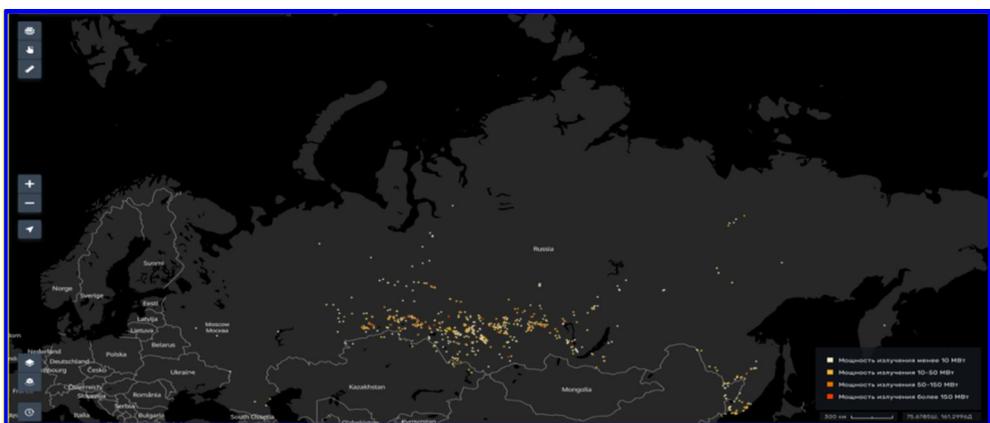


Рис. 12. Тематические продукты в геопортале. Интенсивность термических аномалий VIIRS

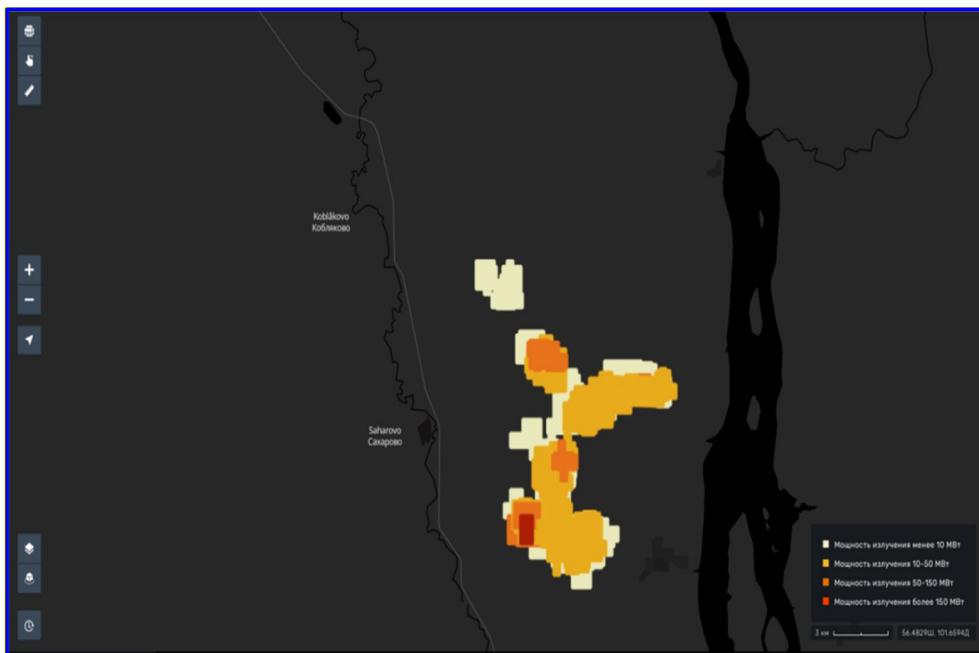


Рис. 13. Тематические продукты в геопортале. Интенсивность термических аномалий VIIRS



Рис. 14. Тематические продукты в геопортале. Гари термических аномалий по M-каналам VIIRS



Рис. 15. Тематические продукты в геопортале. Гари термических аномалий по I-каналам VIIRS



Рис. 16. Тематические продукты в геопортале. Гари термических аномалий по I-каналам VIIRS

Публикация соответствующих тематических слоев в геопортале происходит автоматически, сразу после окончания обработки цепочки обработки и подготовки соответствующего тематического продукта. Таким образом, осуществляется параллельная потоковая обработка данных и подготовка тематических продуктов.

Заключение

Предлагаемый подход РППИ ДЗЗ основан на открытых данных и открытом программном обеспечении, которое активно применяется сообществом для решения задач как по обработке и подготовке тематических продуктов ДЗЗ, так и для построения систем сбора, трансформации и хранения больших объемов данных, в том числе для построения озер данных.

Предлагаемый подход был апробирован для обработки данных, получаемых в режиме прямого вещания с космических аппаратов Suomi-NPP и NOAA-20 сенсором VIIRS. Подход РППИ ДЗЗ позволил достичь:

- высокой степени автоматизации всего цикла обработки данных (с момента получения до момента публикации в геопортале) – пользователь осуществляет только мониторинг и при сбоях происходит восстановление работоспособности;
- низкой стоимости реализации (данные и программное обеспечение являются открытыми);
- высокой степени масштабируемости за счет использования программного обеспечения из стека больших данных;
- обеспечения высокой степени сохранности данных при использовании HDFS;
- алгоритмов обработки данных ДЗЗ и создания тематических продуктов, апробированных сообществом и рекомендуемых для использования;
- уменьшения времени на рутинные процессы специалистов по обработке данных (специалистов тематической обработки).

Для повышения эффективности РППИ ДЗЗ требуется обеспечить:

- использование контейнеров Docker для гибкости развертывания и масштабируемости РППИ ДЗЗ;
- расширение перечня тематических продуктов, в том числе с различных космических аппаратов и сенсоров;
- консолидацию результатов обработки с различных космических аппаратов и сенсоров для повышения точности тематических продуктов;
- повышение производительности обработки за счет применения концепции MapReduce и резидентных вычислений (Apache Spark).

Авторами проводится работа по реализации данных мероприятий и дальнейшему совершенствованию РППИ ДЗЗ.

Литература

1. Наземно-космический мониторинг чрезвычайных ситуаций / В. А. Акимов, А. П. Краминцев, М. Ю. Курбатов и др. // – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2016. – 128 с.
2. Алексеенко Я. В. Организация функционирования Системы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций МЧС России в аспекте применения информационных технологий распределенного хранения и многопоточной обработки данных для улучшения качества и эффективности решений, принимаемых при прогнозировании и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Электронный сборник статей 16-й конфе-

ренции «Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли – RORSE 2018». Институт космических исследований Российской академии наук, 2018. – С. 335 – 342. – URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/files/articles/2018/alekseenko-organization.pdf>.

3. Белкин К. А. Интеграция и практическое применение информационных технологий в системах космического мониторинга МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, 2015. – №. 1 – 2 (4). – С. 21 – 23.

4. Исаев Е. А., Корнилов В. В. Проблема обработки и хранения больших объемов научных данных и подходы к ее решению // Математическая биология и биоинформатика, 2013. – Т. 8. – №. 1. – С. 49 – 65.

5. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, И. В. Балашов, М. А. Бурцев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 53 – 75.

6. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263 – 284.

7. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока / Ю. И. Шокин, И. А. Пестунов, В. В. Смирнов и др. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2008. – 4 (2008 1). – С. 291 – 314.

8. Распределенная система приема и обработки спутниковых данных Сибири и Дальнего Востока. Текущее состояние и перспективы развития / Ю. И. Шокин, В. Н. Антонов, Н. Н. Добрецов и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т. 9. – №. 5. – С. 45 – 54.

9. A token-based authentication security scheme for Hadoop distributed file system using elliptic curve cryptography / Y. S. Jeong, Y. T. Kim // Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, 2015. – Т. 11. – №. 3. – С. 137 – 142.

10. Secure cloud distributed file system / K. K. Mar et al. // 2016 11th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). – IEEE, 2016. – С. 17 – 181.

11. A Caching evaluation of the Hadoop distributed file system / Newberry E. // Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking. – URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=b6tDvPUAAA-AJ&citation_for_view=b6tDvPUAAA-AJ:kNdYIx-mwKoC.

12. [Электронный ресурс] URL: <https://space.oscar.wmo.int/satelliteprogrammes/view/jpss>. (дата обращения: 21.08.2022).

13. [Электронный ресурс] URL: <https://cimss.ssec.wisc.edu/cspp/>. (дата обращения: 21.08.2022).

14. [Электронный ресурс] URL: <https://nifi.apache.org/>, (дата обращения: 21.08.2022).

15. [Электронный ресурс] URL: <https://airflow.apache.org/>. (дата обращения: 21.08.2022).

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ В СРЕДЕ ИНТЕРНЕТ ВЕБ-ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

**В. В. Дерюгина, Е. В. Василенко,
А. В. Кухарский, А. А. Невский**
(НИЦ «Планета», г. Новосибирск)

В настоящей статье представлены системы мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки: «ГИС Амур», «ГИС Волга», «ГИС Гидрология», система мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации «ГИС Союз». Системы были созданы на основе Веб-ГИС технологий, что позволило объединить спутниковую, наземную и прогностическую информацию от территориально удаленных друг от друга организаций в единой информационной среде. Пользователю с помощью обычного веб-браузера предоставляется быстрый доступ ко всему массиву данных для принятия своевременных управленческих решений. Выпускаемая в информационных системах продукция используется не только для мониторинга опасных природных явлений, но и для изучения долговременных изменений окружающей среды.

Ключевые слова: веб-сервисы, мониторинг окружающей среды, Веб-геоинформационная система, спутниковые изображения, гидрометеорологические данные, гидрологический прогноз.

Введение

В последние годы из-за глобального потепления возросло количество и масштаб опасных природных явлений (пожары, засухи, наводнения и т. д.). Наиболее эффективным средством мониторинга окружающей среды являются спутниковые данные. Нередко они становятся единственным источником информации, особенно для территорий России с редкой сетью наземных наблюдений. В научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета») Росгидромета проводится регулярный спутниковый мониторинг по всей территории России с 11 отечественных космических аппаратов (КА), включая Электро-Л № 2 и №3, Метеор-М № 2, № 2-2, Канопус-В № 3, №4, № 5 и № 6, Канопус-В-ИК, а также 23 зарубежных КА серий NOAA, Metop, EOS Terra/Aqua, Suomi NPP, Meteosat, GOES, Himawari и др. Ведется оперативное получение данных с гидрометеорологических КА по системе международного обмена EARS (EUMETSAT Advanced Retransmission Service) в соответствии с соглашениями Росгидромет – EUMETSAT от 2009 г. и Минприроды России – EUMETSAT от 2015 г. и от 2020 г.

Спутниковая информация предоставляет в основном сведения о фактическом состоянии окружающей среды, поэтому для полноты картины требуется комплексирование ее с другими видами наземной и прогностической информации. В НИЦ «Планета» совместно с другими организациями были

созданы и развиваются современные информационные технологии, позволяющие осуществлять сбор и интеграцию данных и продукции от территориально удаленных источников информации и оперативно доводить до удаленных пользователей.

Системы мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки

Катастрофическое наводнение в июле-октябре 2013 г. охватило весь бассейн р. Амур и по своим масштабам превзошло все наводнения в этом районе за все время наблюдений. При этом продолжительность стояния высоких уровней (с превышением опасных отметок) в районе больших городов Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре составила около месяца и более, а продолжительность затопления поймы на глубины 2 – 4 метра в отдельных ее местах – более двух месяцев [1]. Это обстоятельство предопределило необходимость проведения регулярного мониторинга гидрометеорологической обстановки в регионе. В рамках поручения Правительственной комиссии по обеспечению устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса Сибири и Дальнего Востока от 26 февраля 2014 г. Гидрометцентром России и НИЦ «Планета» была создана и введена в эксплуатацию Веб-геоинформационная система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения гидрологической обстановки в бассейне р. Амур («ГИС Амур»).

«ГИС Амур» стала первой в России системой, воспроизводящей в автоматическом режиме краткосрочные прогнозы уровней и расходов воды в бассейне р. Амур и использующая современные достижения Веб-ГИС-технологий [2 – 4]. Система основана на использовании информации с гидрологических постов и метеорологических станций, данных расчетов и прогнозов гидрологической обстановки, выполненных по 4 моделям, спутниковых данных и спутниковой информационной продукции среднего и высокого пространственного разрешения (в том числе отечественных КА серии «Метеор-М» и «Канопус-В»).

Система является территориально-распределенной: главная расчетная компонента находится в Гидрометцентре России, а спутниковые изображения и спутниковая информационная продукция в виде готовых веб-сервисов поставляют Европейский, Сибирский и Дальневосточный центры НИЦ «Планета». Система обладает высоким быстродействием и надежностью, реализована на платформе промышленного уровня ArcGIS и поддерживается СУБД MS SQL Server. Для обеспечения бесперебойной работы и распределения нагрузки на ГИС-серверах, обслуживающих систему, была реализована кластерная технология. В технологиях тематической обработки спутниковых данных преимущественно используется российское программное обеспечение (например, выделение границ затоплений) [5].

Доступ пользователей в систему осуществляется через обычный веб-браузер без использования дополнительных программных средств с помощью интерфейса пользователя, который разрабатывался с учетом пожеланий пользователей.

В ходе эксплуатации системы за последние годы была отмечена повышенная активность муссонных процессов, которая приводила к затоплениям различных частей бассейна р. Амур и р. Уссури. В сентябре 2016 г. на р. Уссури регистрировались значительные подъемы уровня воды в связи с дождевыми паводками, приведшими к существенным затоплениям прибрежных территорий. В августе-сентябре 2019 г. на среднем и нижнем течении р. Амур наблюдался значительный паводок, который по своим масштабам уступил только паводку 2013 г. В сентябре 2021 г. на среднем течении р. Амур также наблюдался подъем воды выше уровня опасных отметок. Пример результатов дешифрирования спутниковых данных за 2014 г. и представление гидрологической обстановки за 2019 г. (фактические и прогностические уровни воды на гидрологическом посту «Хабаровск») в системе «ГИС Амур» приведены на рис. 1 и 2.

Система «ГИС Амур» прошла опытные испытания и решением центральной методической комиссии Росгидромета в 2016 г. внедрена в оперативную практику. Она стала прототипом для разработанных в настоящее время информационных систем мониторинга и прогнозирования гидрологической обстановки всей территории России «ГИС Гидрология» и гидрологической обстановки бассейна р. Волга «ГИС Волга» [6].

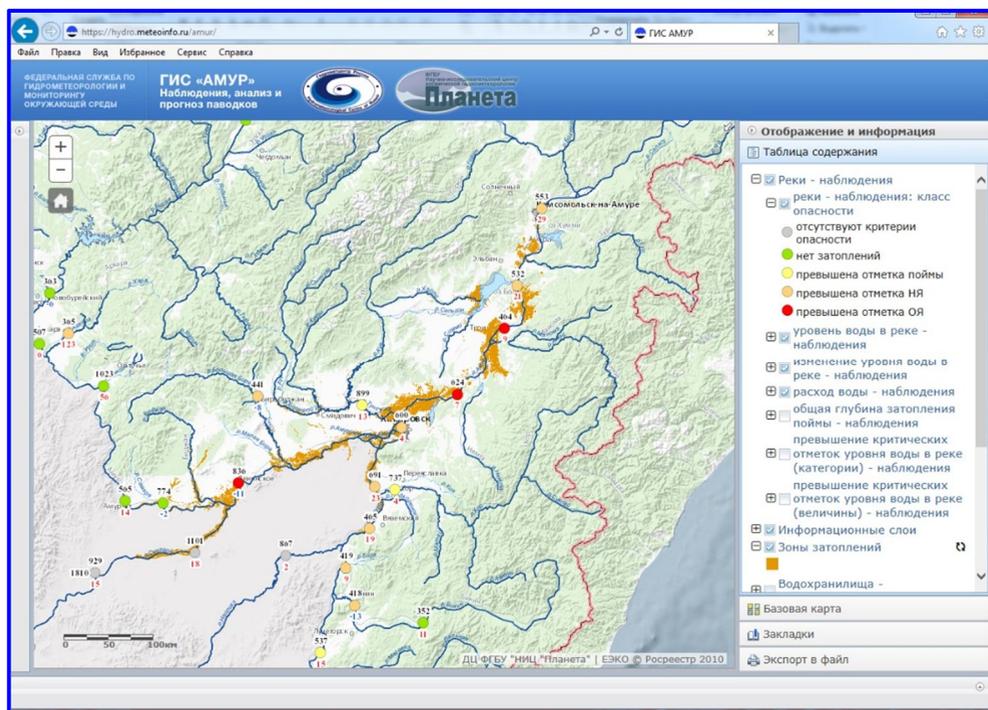


Рис. 1. Зона затопления р. Амур, сентябрь 2019, выделенная по спутниковым данным, совмещенная с данными уровня и тенденции уровня воды гидрологических постов Росгидромета в системе «ГИС Амур»

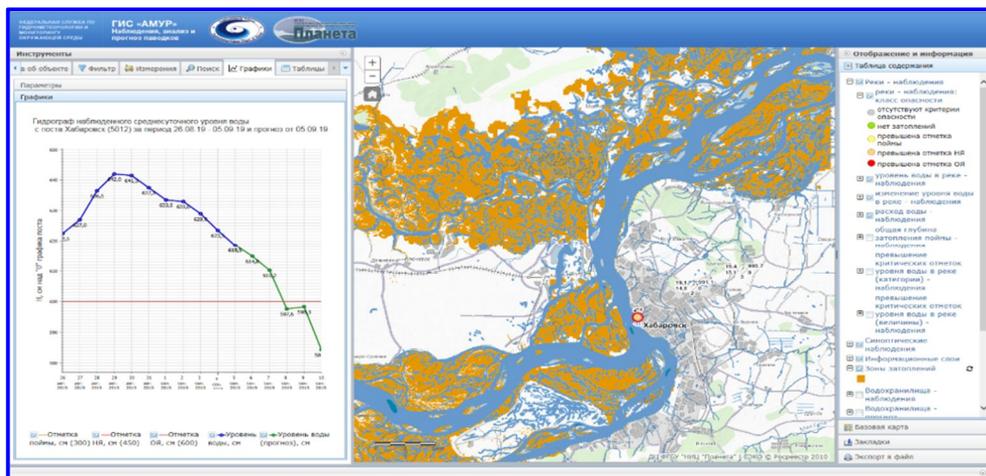


Рис. 2. Гидрограф наблюдаемого среднесуточного уровня воды с поста Хабаровск за период 26.08.2019 – 05.09.2019 г. и прогноз для 5 суток

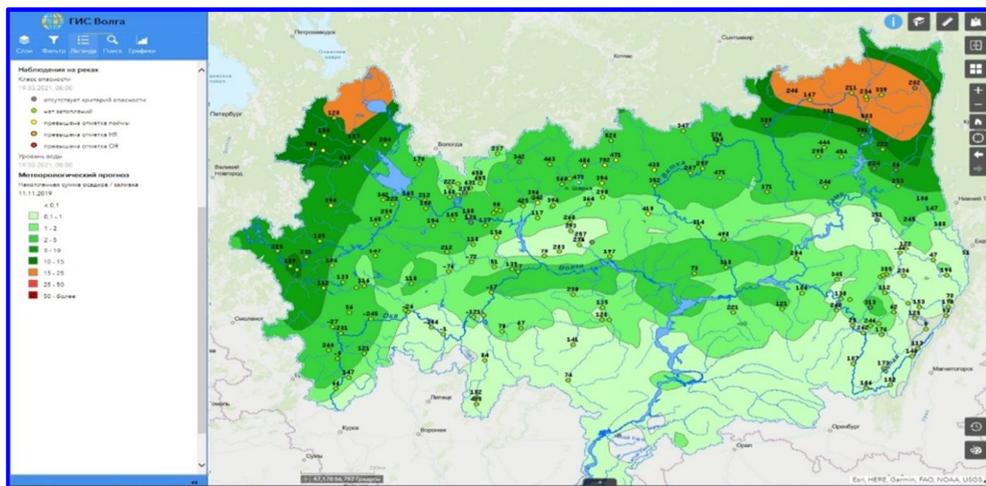


Рис. 3 Неблагоприятная гидрологическая обстановка на р. Ветлуга (превышение отметки поймы на посту г. Шарья), на р. Кама и реках выше Рыбинского водохранилища по данным гидрологических постов от 10.11.2019 г. и метеорологического прогноза Гидрометцентра России от 11.11.2019 г. в «ГИС Волга»

Системы «ГИС Гидрология» и «ГИС Волга» были значительно усовершенствованы, в частности, расширился перечень представляемых в системе данных (добавлены агрометеорологические данные, данные снегомерных маршрутов, данные о ледовых явлениях и высоте снежного покрова с гидропостов, ежечасные данные автоматизированных гидропостов, спутниковая информация из системы международного обмена данными EARS), созданы и введены новые модели расчета прогноза уровней рек Волги [7], добавлен метеорологический прогноз по модели COSMO – RU (модель Гидрометцентра России на рис. 3).

Для ускоренного отображения на экране монитора некоторых видов спутниковой продукции в информационных системах была применена технология мультимасштабного представления (агрегация «на лету» параметров спутниковых данных в соответствии с выбранным масштабом), введены групповые операции с данными (для выбранного набора данных применение операций: фильтрация по времени, по принадлежности к географическим и/или административным объектам, прозрачность, шторка), добавлена отметка в календаре дат, на которые имеются данные.

При создании систем были использованы современные геоинформационные технологии для автоматической обработки и визуализации больших массивов информации, добавлена возможность импорта (ввод данных пользователей в систему, подключение сторонних веб-сервисов) и экспорта данных (в форматах kml, shp, csv) непосредственно через веб-интерфейс пользователя.

В системах результаты могут предоставляться в виде цифровых карт, таблиц, графиков, анимаций и документов (справки, бюллетени, обзоры с комментариями гидрологов), оформляться в печатном и электронном виде. Для ведения электронного документооборота был разработан веб-интерфейс гидролога, с помощью которого реализуется технология он-лайн ввода справочного и отчетного материала и возможность его отображения/скачивания через веб-интерфейс пользователя.

В ходе оперативной эксплуатации системы «ГИС Волга» в 2019 г. за первую декаду ноября был выявлен аномально интенсивный подъем уровня воды из-за осадков в верхней части бассейна р. Волга (на большинстве участков затопление поймы достигало глубины 0,1 – 3,7 м.). В 2020 г. сложная гидрологическая обстановка, обусловленная формированием затора льда и резким ростом уровня воды выше затора, отмечалась в речной части Горьковского водохранилища. В 2021 г. прошли снегодождевые паводки на Верхней Волге и р. Оке с ростом уровня воды на 20 – 134 см за сутки.

Система спутникового мониторинга окружающей среды

В рамках реализации программы Союзного государства «Развитие системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства» на 2017 – 2021 годы НИЦ «Планета» и Белгидромет (Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды») разработали информационную систему космического мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации «ГИС Союз»[8]. Система состоит из 2-х сегментов (белорусского и российского), использующих унифицированные технологии и программное обеспечение, объединенных в единую распределенную вычислительную сеть. Белорусский сегмент системы находится в Белгидромете (г. Минск), российский сегмент – в ФГБУ «НИЦ «Планета» (г. Москва). При этом все научно-исследовательские центры, Белгидромет и ФГБУ «НИЦ «Планета», территориально удалены друг от друга, однако в среде Интернет они образуют единую систему с предоставлением результа-

тов в виде веб-сервисов. Каждый сегмент системы обеспечивает космический мониторинг окружающей среды своих сопредельных территорий.

Белорусский сегмент информационной системы предназначен для решения задач мониторинга окружающей среды для Витебской, Могилевской и Гомельской областей по 3 направлениям:

- картирование наводнений, в том числе на малых реках;
- мониторинг выбросов в атмосферу загрязняющих веществ;
- контроль уровня режима рек.

Российский сегмент информационной системы предназначен для решения задач мониторинга окружающей среды для Псковской, Смоленской и Брянской областей по 5 направлениям:

- картирование наводнений, в том числе на малых реках;
- мониторинг выбросов в атмосферу загрязняющих веществ;
- мониторинг пожарной обстановки;
- картирование состояния водной среды;
- картирование состояния растительного покрова.

Белорусский и российский сегменты системы ежедневно пополняются спутниковыми данными среднего и высокого пространственного разрешения по своей территории, получаемыми с российских и зарубежных КА «Канопус-В» (ПСС, МСС), БКА (ПСС, МСС), Метеор-М №2 и №2-2 (КМСС), Sentinel-1a и -1b (SAR), Landsat-8 (OLI), Terra/Aqua (MODIS), Sentinel-2a и -2b (MSI). Таким образом, система «ГИС СОЮЗ» сделала возможным обмен информацией: российской стороне стали доступны данные с белорусского спутника БКА, а белорусской стороне – данные с российского спутника Канопус-В.

Система «ГИС СОЮЗ» реализована на платформе ArcGIS серверного и настольного исполнения, СУБД БД Microsoft SQL Server 2014. В российском сегменте для каждого направления были созданы или усовершенствованы технологии обработки спутниковых данных с применением собственного специализированного программного обеспечения «PlanetaMonitoring», «PlanetaMultisat» (разработка ФГБУ «НИЦ «Планета») [8 – 9].

Архитектура системы отличается своей уникальной особенностью присоединения белорусского сегмента к системе. Так на российской стороне по 5 направлениям данные проходят тематическую обработку и автоматически приводятся к необходимому виду для их дальнейшего использования, подгружаются в базу данных и далее преобразуются в веб-сервисы. Они становятся доступны потребителям в режиме реального времени с помощью веб-интерфейса пользователя (рис. 4 – 6). На белорусской стороне данные напрямую через настольную ГИС подгружаются в систему, автоматически попадая в зеркальную базу на российской стороне и одновременно отображаются в системе «ГИС Союз». Кроме того, в системе реализована технология параллельной обработки данных, что существенно ускоряет (в 3 – 4 раза) процессы управления данными от тематической обработки спутниковых изображений до представления в веб-сервисах. К спутниковым данным применяется операция «разбиение снимка на пирамидальные слои», что существенно увеличивает скорость его отображения в веб-сервисах при изменении фрагмента карты или ее масштаба.

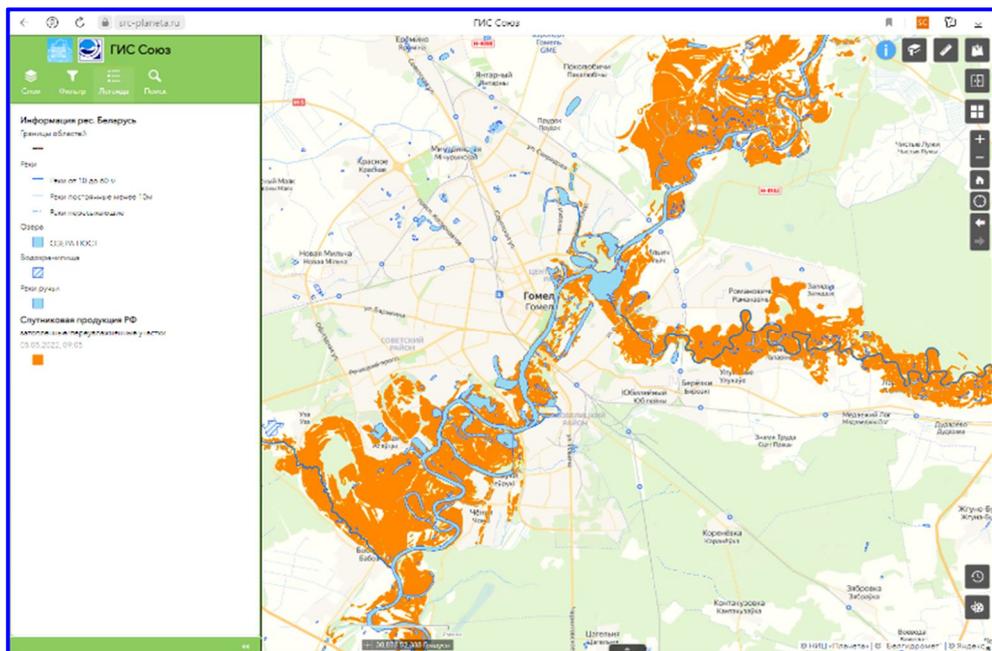


Рис. 4. Представление информации о гидрологической ситуации на р. Сож-Ипуть по результатам интерпретации спутникового изображения Sentinel-2 от 05.05.2022 г. в интерфейсе пользователя системы «ГИС Союз»

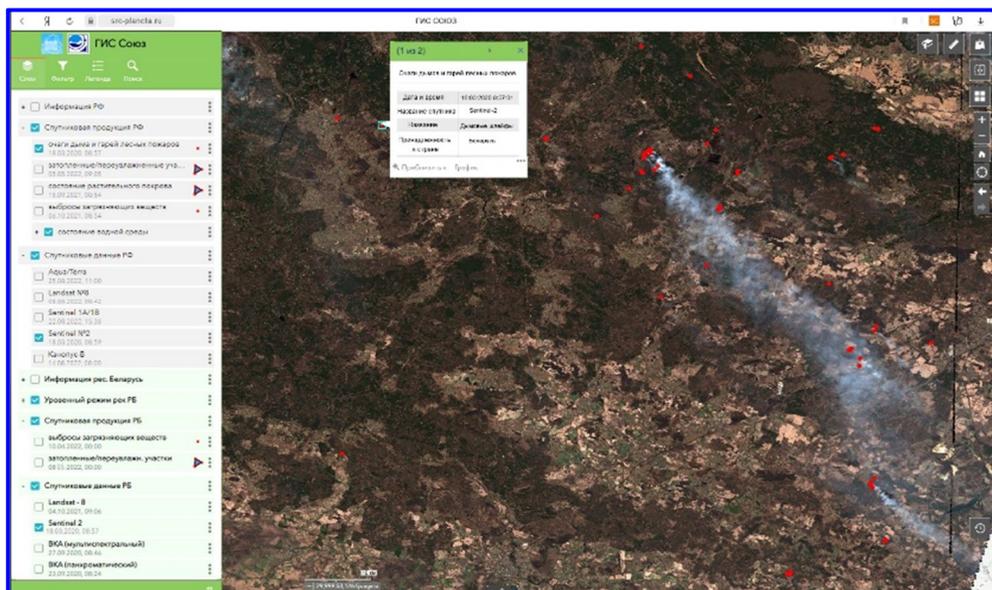


Рис. 5. Представление информации о пожарной обстановке по результатам интерпретирования спутниковой информации от 18.03.2020 в интерфейсе пользователя системы «ГИС Союз»

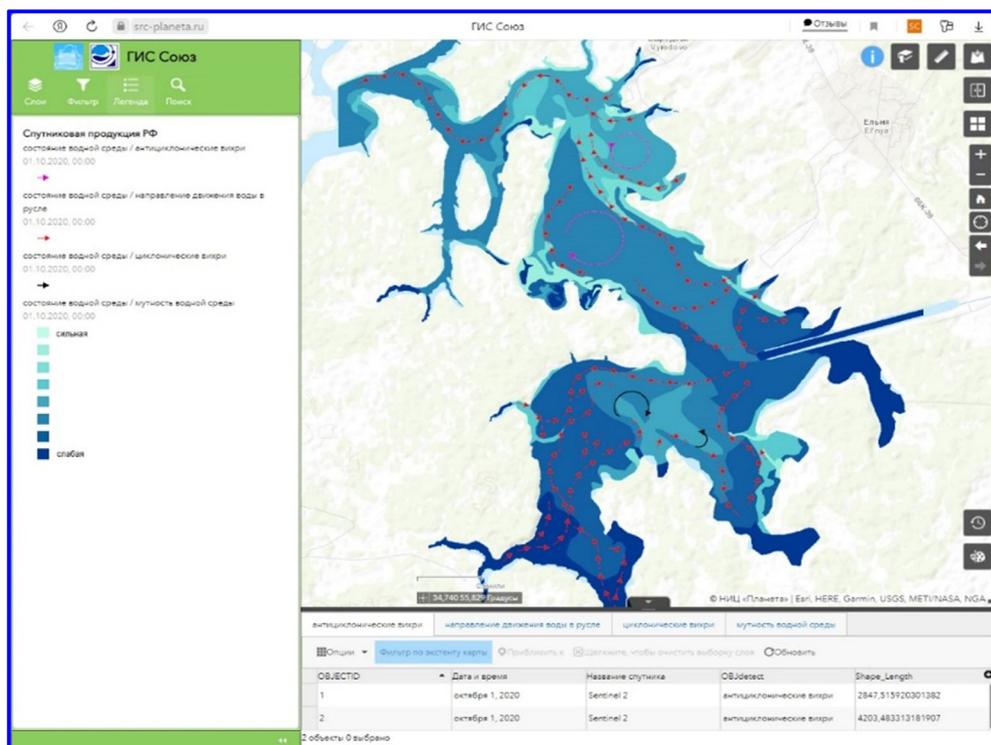


Рис. 6. Представление информации о состоянии водной среды Вазузского вдхр. по результатам интерпретирования данных КА Sentinel-2 №2 от 1 октября 2020 г. в интерфейсе пользователя системы «ГИС Союз»

Интерфейс пользователя был разработан на языке программирования Java Script API ArcGIS. Он доступен пользователям через авторизованный вход в обычном веб-браузере. При этом в системе «ГИС Союз» реализована трехуровневая система защиты: на уровне базы данных, веб-сервисов в геопортале, веб-приложения. Для того, чтобы пользователь не вводил пароль на каждом уровне, была реализована сквозная авторизация через веб-приложение (пользователю достаточно ввести пароль только в веб-приложении). Дополнительная защита информации в системе обеспечивается установленным ПО ArcGIS Web Adaptor.

Для наглядного представления результатов спутникового и наземного мониторинга в веб-приложении можно выбрать разнообразную картографическую подложку. К системе были подключены веб-сервисы с топографическими картами из открытых источников (русифицированные карты Google maps, Yandex maps, топографические карты ESRI, Росреестра, Bing Maps, OpenStreetMaps).

Система является масштабируемой, легко может быть расширена за счет подключения подсистем других организаций или подразделений Белгидромета и Росгидромета с новыми видами информации, а также за счет увеличения вычислительных мощностей и подключения новых функциональных модулей.

Заключение

В заключение следует отметить, что использование веб- и ГИС-технологий значительно укоряет процесс доставки продукции пользователю и существенно уменьшает затраты (нет необходимости пересылать огромные объемы спутниковых данных, где только один снимок составляет 300 – 500 Мб.). Веб-сервисы с результатами спутникового и наземного мониторинга можно легко подключить к геоинформационным системам пользователей. Использование систем «ГИС Амур», «ГИС Гидрология», «ГИС Волга», «ГИС Союз» позволяет эффективно объединить разнотипные спутниковые, наземные и прогнозистические данные, полученные от разных организаций, в виде веб-сервисов и отобразить полную картину состояния окружающей среды в единой системе.

Литература

1. Фролов А. В., Георгиевский Ю. В. Экстремальный паводок 2013 года в бассейне реки Амур // В сб.: Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации. – М., Росгидромет, 2014. – С. 5 – 39.
2. ГИС Амур: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях / А. В. Фролов [и др.] // Метеорология и гидрология, 2016. – № 3. – С. 5 – 21.
3. Система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях «ГИС Амур» / С. В. Борщ [и др.] // Автоматизация в промышленности, 2016. – № 12. – С. 18 – 23.
4. Basin Approach to a Hydrological Service Delivery System in the Amur River Basin / S. Borsch [et al.] // Geosciences, 2018. – № 8 (3). – P. 1 – 16. – doi: 10.3390/geosciences8030093.
5. Пестунов И. А., Рылов С. А., Бериков В. Б. Иерархические алгоритмы кластеризации для сегментации мультиспектральных изображений // Автометрия, 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 12 – 22.
6. ВЕБ-ГИС-технологии обработки и анализа спутниковых данных и гидрологических измерений и для мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки в бассейне р. Волги / В. В. Дерюгина // Материалы VI Международной научно-практической Конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности», 2021. – Ч. 2. – С. 80 – 92.
7. Экстраполяция гидрографов как метод краткосрочного прогнозирования речного стока / С. В. Борщ [и др.] // – М.: Гидрологические исследования и прогнозы, 2018. – № 3 (369). – С. 74 – 86.
8. Информационная система спутникового мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации (ГИС Союз) / С. В. Тасенко [и др.] // Материалы IV Всероссийской конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск: ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», 2021. – С. 479 – 485.
9. Компьютерные технологии формирования гидрометеорологических карт по спутниковым изображениям / А. А. Воронин [и др.] // Исследование Земли из космоса, 2009. – № 4. – С. 24 – 35.

ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОТОКОВОЙ ОБРАБОТКИ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ КА «АРКТИКА-М» № 1 В ОБЪЕДИНЕННОЙ СИСТЕМЕ РАБОТЫ С ДАННЫМИ НИЦ «ПЛАНЕТА»

А. А. Бриль, М. А. Бурцев, А. А. Мазуров, А. В. Кашницкий
(Институт космических исследований РАН, г. Москва)

Работа посвящена построению цепочки потоковой обработки данных космического аппарата «Арктика-М» № 1. Рассказано о проблемах геопривязки данных и способах их решений.

Ключевые слова: КА «Арктика-М» № 1, геопривязка, автоматическая обработка данных, ОСД НИЦ «Планета».

Введение

КА «Арктика-М» № 1, оснащенный аппаратом «МСУ-ГС-ВЭ», предоставляет 10 каналов: 3 видимых и 7 ИК со средним пространственным разрешением в 1 и 4 км соответственно. Исходный поток данных каждые 15 минут поступает с приемных комплексов на комплекс распаковки и первичной обработки данных, где данные доводятся до уровня обработки L15. Унифицированный формат данных L15 представляет из себя бинарный файл, построенный по теговому принципу, содержащий первичный заголовок и набор тегов, в том числе информацию о геодезической привязке, радиометрической обработке и растровом изображении. Автоматизированная потоковая обработка данных читает бинарный файл по известной структуре, рассчитывает широты и долготы каждой точки, выполняет географическую привязку, перепроекцию и перепаковку данных в формат GeoTif с дальнейшим занесением данных в архивы ОСД «НИЦ Планета». Поскольку данные поступают каждые 15 минут, при организации потоковой обработки данных важным критерием является скорость работы. При этом важна точность географической привязки.

Географическая привязка данных

Основной проблемой организации автоматизированной оперативной обработки данных КА «Арктика-М» № 1 является геопривязка данных. Данные уровня L15 хранятся в так называемой проекции виртуального спутника, учитывающей изменения пространственного разрешения между сеансами. Поскольку проекция «виртуального спутника» крайне близка к азимутальной проекции вертикальной ближней перспективы Near-Sided Perspective (NSPER), которая поддерживается Proj, то для решения проблемы привязки и перепроецирования данных на первом этапе организации потоковой обработки было выбрано использование стандартных библиотек работы с растровыми данными GDAL/Proj на базе встроенных проекций. Основными плюсами данного решения была быстрая и хорошо оптимизированная работа потока обработки. Однако, поскольку исходные данные представлены на эллипсоиде, а реализация проекции NSPER в связке с GDAL работает только на сфероиде, привязка данных давала очень большие ошибки до нескольких десятков пикселей (рис. 1).

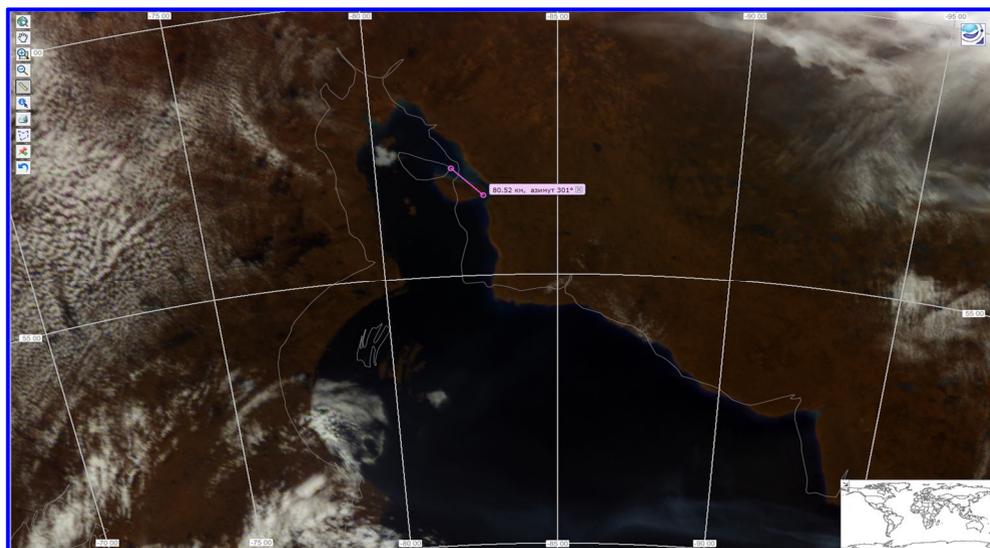


Рис. 1. Точность привязки на основе продукта поверхности по данным КА «Арктика-М» № 1 с помощью NSPER

Для улучшения точности привязки данных было принято решение отказаться от использования проецирования по формулам с помощью проекции NSPER в связке с GDAL и использовать другие методы. Оптимальной результирующей проекцией для данных КА «Арктика-М» № 1 является полярная стереографическая проекция. Для организации потоковой обработки данных и географической привязки был выбран метод привязки данных по контрольным точкам на основе библиотеки GDAL. Таким образом каждый угол долгот и широт для каждой точки переводится в стереографическую проекцию, после чего средствами GDAL привязываются к изображению. Такой способ обеспечивает стабильную работу перепроецирования и хороший результат привязки. Однако, ввиду ограничения на максимальное количество GCP на изображении, возникает необходимость фрагментации исходного изображения и последующей склейки спроецированных фрагментов в одно изображение. Чем больше фрагментов обрабатывается таким образом, тем точнее получается результирующее изображение. Этот метод привязки данных работает стабильно, но требует больших вычислительных ресурсов и может занимать неприемлемо долгое время.

Для оптимизации потоковой обработки было найдено другое решение на основе библиотек GDAL и SatPy/PyResample на базе Proj8, разработанных на языке Python. Таким образом, для решения поставленной задачи создается массив точек в стереографической проекции с помощью GDAL, определяются параметры результирующей проекции и вместе с исходным растровым изображением передаются в функцию библиотеки SatPy. Такой способ обеспечивает оптимальную скорость работы с точной привязкой, и полностью решает задачу привязки данных (рис. 2).

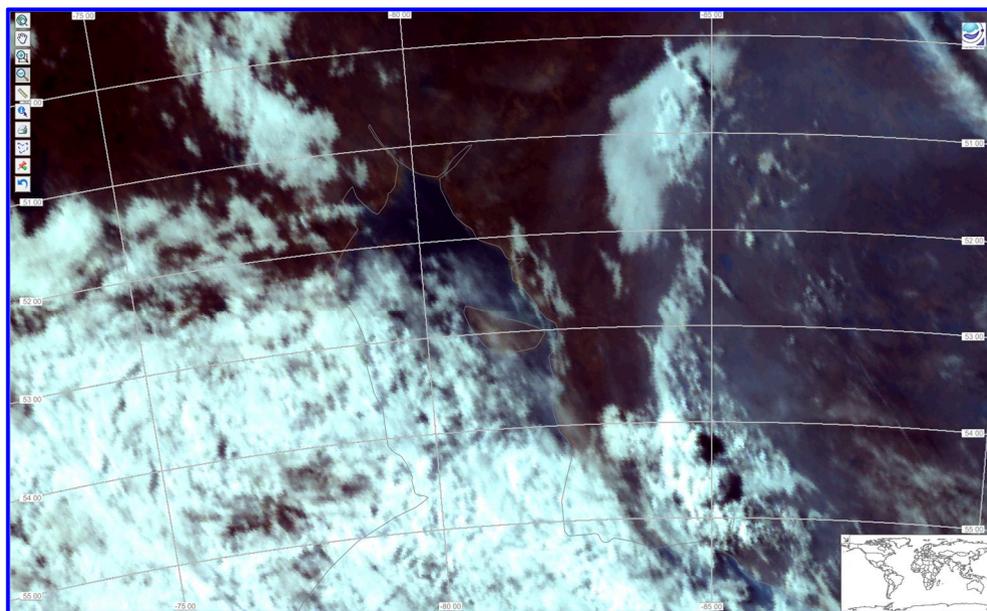


Рис. 2. Точность привязки на основе продукта поверхности по данным КА «Арктика-М» № 1 с помощью библиотек GDAL – python

Заключение

В работе предложено техническое решение по организации автоматизированной обработки данных КА «Арктика-М» № 1. Для решения задачи были выбраны широко используемые и регулярно обновляемые в ГИС-сообществе библиотеки работы с растровыми данными: GDAL/OGR, SatPy, Proj. В результате была организована оперативная потоковая обработка данных.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Развитие системы диспетчеризации, управления и контроля обработки данных КА «Электро-Л» и «Арктика-М» для работы с объединенной группировкой / М. А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы Восемнадцатой Всероссийской открытой конференции, 16 – 20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. – С. 70. – DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
2. Современные возможности и перспективы развития Объединенной системы распределенной работы с данными НИЦ «Планета» / М. А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 198 – 212. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
3. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е. А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 151 – 170. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

НОРМАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ В СКАНАХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИБОРА MERSI-II СПУТНИКА FY-3D

А. А. Бриль, А. А. Мазуров, А. В. Кашницкий, Е. Е. Волкова
(Институт космических исследований РАН, г. Москва)

Работа посвящена нормализации яркостных характеристик в сканах изображений спутника FY-3D. Предлагается метод, который убирает явно проявляющиеся шумовые эффекты в сканах изображений тепловых каналов на основе анализа распределения значений температур.

Ключевые слова: FY-3D, нормализация, дестринг, удаление полос, FY-3D, MERSI-II.

Введение

FengYun-3 – серия из 8-ми китайских полярно-орбитальных метеорологических спутников на солнечно-синхронной орбите второго поколения. Серия FY-3 представляет собой совместную программу СМА и CNSA (китайской национальное космическое управление). FY-3D был запущен в 2017 году и оснащен прибором MERSI-II (medium-resolution spectral imager). Он имеет 25 спектральных каналов пространственного разрешения 250 и 1000 метров и является аналогом приборов VIIRS и MODIS. На изображениях в среднем ИК-диапазоне наблюдается заметный шумовой эффект, который проявляется в виде полос вдоль скана, явно связанный с небольшими отличиями в радиометрических характеристиках датчиков в линейке приемной системы – до 1° К. Для полноценной работы стандартных алгоритмов обработки, анализирующих текстуру снимков, необходимо устранить данный эффект. Для удаления эффекта полос предлагается использовать кросс-калибровку датчиков в сканах изображений.

Нормализация изображения

На изображениях прибора MERSI-II в каналах визуально видны полосы в системе сканирования. Эффект полос явно проявляется на изображениях ИК-каналов прибора MERSI-II с длинами волн 3,8 и 4 мкм с пространственным разрешением 1000 метров. На одно изображение прибора приходится 200 сканов. Полоса сканирования представляет собой информацию с 10 датчиков. На рис. 1 показана средняя температура, построенная по 100 сканам изображения для каждого датчика.

В нашем методе будет использоваться предположение, что при сканировании каждый из датчиков принимает информацию примерно по одной и той же большой территории (покрываемой сценой) и в целом, при разрешении прибора более 1 км, статистически в большом объеме данных мы получаем сравнимые характеристики для анализа.

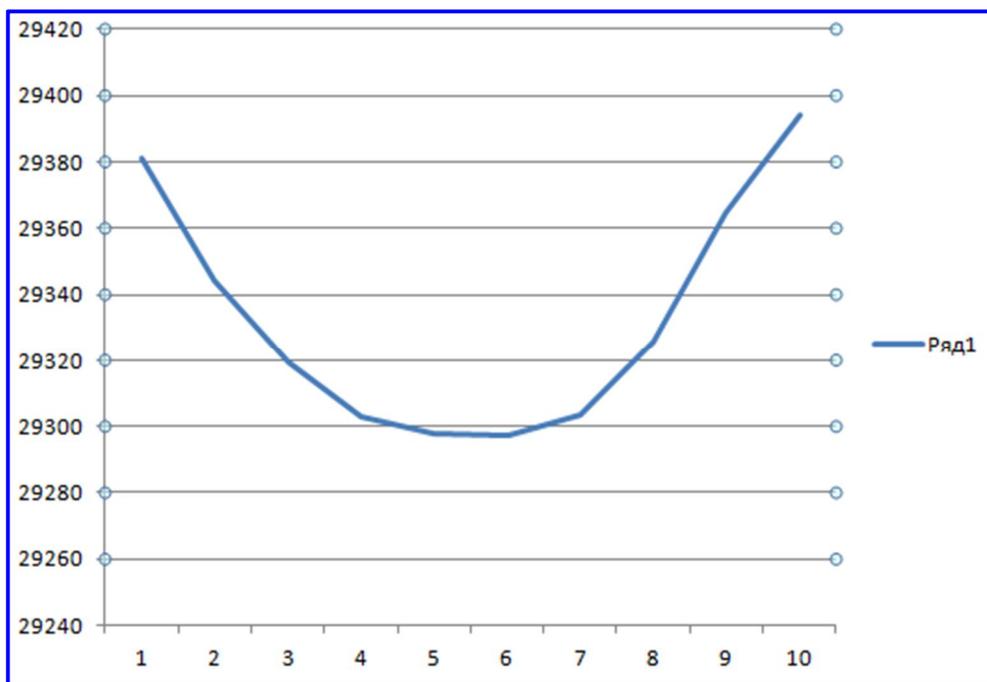


Рис. 1. Средняя температура по сканам для 10 датчиков

Таким образом, в данной работе предлагается нормализовывать изображения тепловых каналов спутника FY-3D методом калибровки данных с помощью анализа гистограмм. Вообще говоря, сутью метода кросс-калибровки является приведение гистограммы яркостей изображения, снятого одним прибором к гистограмме изображения, снятого другим (эталонного изображения). После чего строится таблица преобразования яркости одного изображения в яркость на другом изображении путем сопоставления частичных интегралов площадей гистограмм изображений (так называемый look-up-table или LUT).

В случае с изображениями FengYun предлагается использовать этот же подход. В каждом из 200 сканов изображения ИК-каналов содержится информация, полученная с помощью 10 датчиков. Таким образом, если рассматривать информацию с каждого датчика, как отдельное изображение, то можно применить предлагаемый метод, но не к двум изображениям, снятым различными приборами, а к изображениям, полученным с разных датчиков. При этом один датчик выбирается, как эталонный, а к оставшимся 9 применяется LUT.

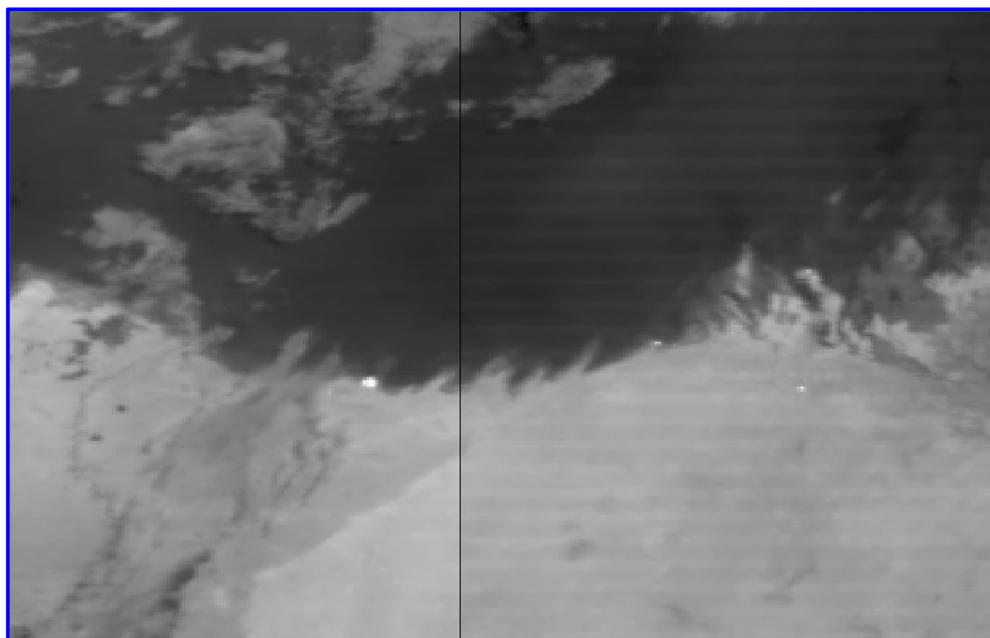


Рис. 2. Изображение FY-3D после и до нормализации

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Использование кросскалибровки методом сопоставления гистограмм для оценки качества данных «Канопус-В-ИК» / М. А. Бурцев [и др.] // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VI Международной научной конференции. Сибирский федеральный университет (Красноярск), 2019. С. 3 – 8.
2. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») / Е. А. Лупян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. – Т. 16. – № 3. – С. 151 – 170. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.
ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2022 ГОД

Материалы
Десятой международной
научно-технической конференции
**«Актуальные проблемы
создания космических систем
дистанционного зондирования Земли»**

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 15.11.2022.

Адрес редакции: АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,
105187, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вольная, д. 30.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

© АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2022