Комплекс планирования и полётного контроля параметров съёмочной аппаратуры космических аппаратов серии «Ресурс-П»

А.А. Кащеев¹, С.А. Ларин¹, С.И. Гусев²

¹ Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» — Особое конструкторское бюро «Спектр», Рязань, 390005, Россия E-mail: alexeikaa81@yandex.ru

² Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина Рязань, 390005, Россия

В статье с единых позиций системного подхода рассматриваются основные принципы построения комплекса планирования и полётного контроля радиометрических параметров целевой аппаратуры гиперспектральной съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли серии «Ресурс-П», который к настоящему моменту времени не имеет аналогов как в России, так и в странах ближнего зарубежья. Приведена архитектура предлагаемого комплекса с кратким описанием его основных модулей: оценки положений шкалы длин волн и поля зрения прибора; контроля дефектных элементов; подготовки исходных данных для планирования маршрутов съёмки; оценки температурного состояния гиперспектральной аппаратуры; расчёта коэффициентов радиометрической коррекции. Рассмотрен алгоритм работы комплекса в части: подготовки массива исходных данных планирования режимов съёмки; оценки стабильности радиометрических параметров и температурного состояния гиперспектральной аппаратуры; контроля наличия дефектных элементов. В заключении отмечено, что рассматриваемый комплекс прошёл успешную апробацию на лётно-конструкторских испытаниях космической системы «Ресурс-П» с космическими аппаратами № 1, 2, 3 и введён в штатную эксплуатацию в составе наземного комплекса приёма, обработки и распространения информации космической системы «Ресурс-П».

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гиперспектральная аппаратура, шкала длин волн, поле зрения прибора, коэффициенты радиометрической коррекции, радиометрические параметры, градуировочные характеристики

Одобрена к печати: 14.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-85-93

Введение

В процессе решения отраслевых социально-экономических задач возникает острая необходимость в распознавании объектов съёмки по их спектральным характеристикам. Получившая широкое распространение оптико-электронная аппаратура космического базирования панхроматической и мультиспектральной съёмок не позволяет решить данную задачу с надлежащим качеством из-за малого числа спектральных каналов.

Для решения указанной проблемы в последнее время широкое распространение получила съёмка гиперспектральной аппаратурой (ГСА), в основе которой лежит принцип «расщепления» лучистой энергии, отражённой от объекта съёмки, на множество спектральных каналов (Кащеев, Ларин, 2017, 2020). Основные схемотехнические решения, архитектура и технические характеристики ГСА достаточно широко рассмотрены в литературе (Архипов и др., 2014; Кирилин и др., 2010; Bender et al., 2011).

Гиперспектральная съёмка позволяет решать важные государственные задачи в интересах социально-экономического развития Российской Федерации, например определять вид и состояние растительного покрова (Барталев и др., 2008), состав плёнки загрязнений на поверхности воды, идентифицировать минералы, устанавливать степень созревания злаковых культур (Лупян и др., 2018), проводить инвентаризацию природных ресурсов и т.д. Повышенные требования к стабильности спектрорадиометрических параметров аппаратуры приводят к необходимости проведения постоянного контроля состояния ГСА и планирования её работы с учётом многочисленных параметров съёмки.

Одно из решений поставленной задачи заключается в создании комплекса планирования и полётного контроля радиометрических параметров целевой аппаратуры гиперспектральной съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли серии «Ресурс-П» (далее — комплекс), основным принципам построения которого посвящена настоящая статья.

Цель и задачи комплекса

Основная цель построения комплекса — подготовка исходных данных для контроля и анализа текущего состояния и динамики изменения параметров ГСА.

Достижение поставленной цели возможно только при условии решения следующих задач:

- периодический контроль текущего температурного состояния и анализ динамики изменения температуры системы оптико-механической ГСА по данным протоколов измерительных циклов;
- периодический контроль стабильности и анализ динамики изменения радиометрических параметров;
- радиометрическая калибровка ГСА, при которой осуществляется расчёт величины смещения и нового положения шкалы длин волн, величины смещения положения поля зрения прибора, массива коэффициентов радиометрической коррекции для выравнивания чувствительности элементов матриц фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС);
- пополнение электронной базы данных эксплуатационных радиометрических параметров;
- периодический контроль появления новых дефектных элементов и их паспортизация;
- расчёт актуальных значений фотограмметрических параметров и пополнение электронной базы данных эксплуатационных фотограмметрических параметров.

Общие принципы построения комплекса

В основе создаваемого комплекса лежат следующие принципы построения, обусловленные требованиями открытости и возможности его наращивания дополнительными программными модулями (Кащеев, 2020; Кащеев, Ларин, 2017):

- переносимость разрабатываемое программное обеспечение должно позволять при минимальных изменениях функционировать на различных аппаратных и программных платформах;
- универсальность средства системы должны обеспечивать единые подходы при эксплуатации всей группировки космических аппаратов с установленной на них аппаратурой гиперспектральной съёмки земной поверхности;
- масштабируемость составные части системы должны обеспечивать возможность увеличения вычислительных ресурсов с учётом роста космической группировки;
- модульность средства системы должны обеспечивать наращивание её функциональных возможностей путём добавления программных модулей, гарантируя при этом высокую степень гибкости архитектуры программного обеспечения.

Упрощённая схема комплекса приведена на *рис.* 1 (см. с. 87), где ШДВ — шкала длин волн; ПЗ — поле зрения прибора; КРК — коэффициенты радиометрической коррекции; ИД — исходные данные; МИДР — массив исходных данных планирования режимов съёмки.

Модуль подготовки МИДР (см. *рис. 1*) формирует параметры съёмок калибровочных маршрутов и технологических режимов, которые затем направляет в комплекс целевого пла-

нирования и одновременно осуществляет их запись в базу данных. На основе заданных параметров осуществляется съёмка маршрута, его приём, первичная обработка, контроль качества и запись в оперативный архив.

Данные, полученные в технологических режимах включения аппаратуры, из оперативного архива копируются в файловую базу данных комплекса с целью дальнейшей оценки стабильности радиометрических параметров ГСА.



Рис. 1. Архитектура комплекса

Модуль оценки положений ШДВ и ПЗ осуществляет вычисление смещений ШДВ и положения ПЗ объектива (далее — смещения), на основании которых принимается решение о необходимости пересчёта коэффициентов радиометрической коррекции.

В том случае, если смещение превысило допустимый порог, осуществляется расчёт нового положения ШДВ и комплекта коэффициентов радиометрической коррекции с последующей записью в электронный радиометрический формуляр базы данных комплекса.

Модуль оценки температурного состояния ГСА (см. *рис. 1*) предназначен для обеспечения управления температурным режимом аппаратуры и решает следующие основные задачи: анализ протоколов измерительного цикла; расчёт характеристик температурного режима и определение его динамики в процессе эксплуатации изделия; принятие решения о необходимости регулирования температуры.

Схема информационного взаимодействия модуля и отчёт по его работе в виде графика температурного состояния ГСА приведены на *рис. 2* и *3* (см. с. 88) соответственно.



Рис. 2. Схема функционального взаимодействия модуля оценки температурного состояния ГСА



Рис. 3. График температурного состояния ГСА на каждом витке полёта космического аппарата дистанционного зондирования Земли

Модуль контроля дефектных элементов. В процессе лётной эксплуатации ГСА космических аппаратов оптико-электронного наблюдения происходит «старение» матриц ФПЗС и, как следствие, появление дефектных элементов матриц, для которых значение нелинейности градуировочной характеристики «входной – выходной сигнал» начинает превышать пороговое значение, определяемое эксплуатационной документацией на аппаратуру.

Модуль контроля дефектных элементов позволяет обнаруживать дефектные элементы матриц ФПЗС в процессе радиометрической калибровки аппаратуры при равномерной засветке фокальной плоскости телескопа. В случае обнаружения таких элементов программно-математическое обеспечение модуля рассчитывает их координаты (номер строки и номер столбца на матрице ФПЗС) с последующим включением в формуляр радиометрических параметров в виде карты дефектных элементов.

База данных содержит 32 таблицы для распределённого хранения следующей информации: данных радиометрического и фотограмметрического формуляров; априорных значений коэффициентов спектральной яркости объектов поверхности Земли; информации о снятых калибровочных маршрутах и результатах контроля стабильности параметров ГСА; параметров всех планируемых режимов съёмки. *Модуль расчёта коэффициентов радиометрической коррекции*. При лётной эксплуатации ГСА, как было отмечено ранее, происходит старение элементов матриц ФПЗС, что, в свою очередь, приводит к появлению неоднородности их градуировочных характеристик, превышающих допустимое пороговое значение.

С целью решения указанной проблемы в модуле осуществляется расчёт коэффициентов коррекции чувствительности, темновых сигналов и смещения градуировочных характеристик каждого элемента ФПЗС-матриц.



Рис. 4. Радиометрическая коррекция космического снимка: *a* — исходный космический снимок; *б* — космический снимок, обработанный с применением коэффициентов коррекции наземного формуляра; *в* — космический снимок, обработанный с применением коэффициентов коррекции, полученных по результатам полётной калибровки

Полученные коэффициенты применяются для «выравнивания» материалов гиперспектральной съёмки по полю зрения прибора и шкале длин волн (*puc. 4*).

Алгоритм работы комплекса

Планирование работы аппаратуры гиперспектральной съёмки осуществляется в режимах «съёмка» и «калибровка», последний из которых предназначен для уточнения измерительных характеристик прибора и проведения радиометрической коррекции сигналов с матриц ФПЗС.

Укрупнённый алгоритм работы комплекса представлен в виде блок-схемы на *puc. 5* (см. с. 90). Здесь на начальной стадии осуществляется *подготовка МИДР* (см. *puc. 5*), в рамках которой выполняются: автоматическая отработка заявок на режимы съёмки от комплекса целевого планирования; подготовка исходных данных для планирования калибровочных маршрутов; формирование заявок на типовые серии включений ГСА в режиме калибровки; ведение полной базы данных запланированных маршрутов съёмки.

МИДР формируется по заявкам от комплекса целевого планирования и формулярным данным на ГСА как в автоматическом, так и в ручном режимах.

На основе заданных параметров МИДР осуществляется съёмка маршрута, его приём, первичная обработка, контроль качества и запись в оперативный архив (см. *рис. 5*). Из оперативного архива маршрут, снятый в режиме «калибровка», записывается в базу данных комплекса с целью дальнейшей оценки стабильности радиометрических параметров ГСА, которая заключается в контроле положения шкалы длин волн и поля зрения прибора методом сравнения положения реперов в текущем сигнале с эталонным сигналом, приведённым в формуляре радиометрических параметров. Расчёт нового положения ШДВ осуществляется относительно текущего «эталонного» положения ШДВ с учётом оценённой величины смещения.

При изменении положения шкалы длин волн и поля зрения прибора выполняется расчёт новых положения ШДВ и массивов коэффициентов радиометрической коррекции с последующей записью в базу данных радиометрического формуляра (см. *puc. 5*).



Рис. 5. Укрупнённый алгоритм работы комплекса

Периодический контроль текущего температурного состояния и анализ динамики изменения температуры ГСА выполняется по данным протоколов измерительного цикла (см. *рис. 5*). При выходе температуры за допустимые пределы, определяемые эксплуатационной документацией на аппаратуру, принимается решение о включении режима терморегулирования.

Заключительной операцией работы комплекса — контроль наличия дефектных элементов матриц ФПЗС (см. *puc. 5*), в рамках которого осуществляется обнаружение дефектных элементов, расчёт их координат и запись в карту дефектных элементов базы данных комплекса.

По результатам работы комплекса формируется оперативный отчёт и пополняется долгосрочный отчёт о состоянии ГСА.

Заключение

В работе предложен уникальный комплекс планирования и полётного контроля радиометрических параметров целевой аппаратуры гиперспектральной съёмки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, который к настоящему моменту времени не имеет аналогов как в России, так и в странах ближнего зарубежья.

Основные назначения комплекса: подготовка исходных данных для планирования съёмки поверхности Земли и проведения технологических режимов; контроль и анализ текущего состояния и динамики изменения параметров гиперспектральной аппаратуры космических аппаратов «Ресурс-П».

Комплекс прошёл успешную апробацию на лётно-конструкторских испытаниях космической системы «Ресурс-П» и введён в штатную эксплуатацию в составе наземного комплекса приёма, обработки и распространения информации космической системы «Ресурс-П».

Представляется, что предлагаемый комплекс может успешно применяться для контроля спектрорадиометрических параметров ГСА других видов космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с подобными физическими принципами и алгоритмами работы.

Литература

- 1. Архипов С.А., Бакланов А.И., Линько В.М. Гиперспектральная съемочная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 3. С. 78–89. DOI: 10.7868/ S0205961414030014.
- Барталев С.А., Жижин М. Н., Лупян Е.А., Матвеев М. Ю., Матвеев А. М., Медведев М.А., Савин И. Ю., Толпин В.А. Возможности исследований влияния изменения климата на состояние растительного покрова: концепция проекта CLIVT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 272–278.
- Кащеев А.А. Система автоматизированного проектирования анализа и подтверждения целевых показателей космических систем оптико-электронного наблюдения земной поверхности // Современные технологии в науке и образовании — СТНО-2020: сб. тр. 3-го Международного научно-техн. форума. В 10 т. Т. 6. / под. общ. ред. О. В. Миловзорова. Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т, 2020. С. 227–230.
- 4. *Кащеев А.А., Ларин С.А.* Принципы построения комплекса планирования и работы гиперспектральной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / 7-я Международная научно-техн. конф. «К.Э. Циолковский 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: сб. тез. 4–6 окт. 2017, Рязань. 2017. С. 164–167.
- 5. *Кащеев А.А., Ларин С.А.* Комплекс полетного контроля параметров съемочной аппаратуры космических аппаратов оптико-электронного наблюдения // Люльевские чтения: материалы 12-й Межрегиональной отраслевой научно-техн. конф. Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2020. С. 117–119.
- 6. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р., Бакланов А. И., Федоров В. М., Новиков М. В. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. 2010. № 4. С. 23–26.
- 7. Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Толпин В.А., Бурцев М.А. Развитие яровых культур на Европейской территории России и в южных регионах Западной Сибири в 2018 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-275-281.

8. *Bender H.A., Mouroulis P., Eastwood M.L., Green R.O., Geier S., Hochberg E.* Alignment and characterization of high uniformity imaging spectrometers // Proc. SPIE. 2011. V. 8158. 11 p. URL: https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/43788/11-3592_A1b.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Complex of planning and flight control of imaging equipment parameters for Resurs-P spacecraft

A.A. Kascheev¹, S.A. Larin¹, S.I. Gusev²

¹ Branch of JSC Space Rocket Centre "Progress" — Special Design Bureau "Spectr" Ryazan 390005, Russia E-mail: alexeikaa81@yandex.ru
² Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin Ryazan 390005, Russia

The article considers basic principles of building a complex for planning and flight control of target equipment radiometric parameters for Earth remote sensing satellite hyperspectral imaging of the Resurs-P series from a unified position of system approach. The architecture of the proposed complex is presented with a brief description of its main modules: estimation of wavelength scale positions and visual field of instrument; checking of fault elements; preparation of initial data for planning session routes; estimation of temperature condition for hyperspectral equipment; calculating the coefficients of radiometric correction. An algorithm of the complex operation is considered in terms of: initial data array preparation for survey modes planning; estimation of radiometric parameters stability and temperature condition of hyperspectral equipment; checking the presence of fault elements. In the conclusion, it is noted that the complex under consideration has been successfully tested in flight-design tests of Resurs-P space system with spacecrafts No. 1–3 and was put into normal operation as a part of ground-based complex for receiving, processing and disseminating information from the space system Resurs-P.

Keywords: Earth remote sensing, hyperspectral equipment, wavelength scale, instrument field of vision, radiometric correction coefficients, radiometric parameters, calibration characteristics

Accepted: 14.09.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-85-93

References

- 1. Arkhipov S.A., Baklanov A.I., Linko V.M., Hyperspectral shooting apparatus for the Resource-P spacecraft, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 3, pp. 78–89 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414030014.
- Bartalev S. A., Zhizhin M. N., Loupian E. A., Matveev M. Yu., Matveev A. M., Medvedev M. A., Savin I. Yu., Tolpin V. A., The Possibilities of the studies of the influence of the change the climate on condition of the vegetable cover: concept of the project CLIVT, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 272–278 (in Russian).
- Kascheev A.A., The System of the computer aided designed analysis and acknowledgements of the target factors of the cosmic systems optometrist-electronic observation to terrestrial surface, *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii — STNO-2020: sbornik trudov 3-go Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma*, v 10 t., T. 6 (Modern technologies in science and formation — STNO-2020, Proc. Conf., V. 6), Milovzorov O. V. (ed.), Ryazan, 2020, pp. 227–230 (in Russian).
- 4. Kascheev A. A., Larin S. A., The Principles of the building of the complex of the planning and work hyperspectral equipments cosmic device remote flexing the Land, 7-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "K. E. Tsiolkovskii 160 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioelektronika. Geoinformatika" (7th Intern. Scientific and Technical Conf. "K. E. Tsiolkovsky 160 years since birth. Cosmonautics. Radionics. Geoinformatics"), Book of Abstr., Ryazan, 2017, pp. 164–167 (in Russian).

- Kascheev A.A., Larin S.A., The Complex of the flight checking parameter shooting equipment cosmic device optometrist-electronic observation, *Lyul'evskie chteniya: materialy 12-i Mezhregional'noi otraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Lyulievskie Reading: Proc. 12th Interregional Scientific and Technical Conf.), Chelyabinsk: Publ. Centre YUUrGU, 2020, pp. 117–119 (in Russian).
- 6. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Stratilatov N. R., Cormorant A. I., Fedorov V. M., Novikov M. V., Cosmic device Resurs-P, *Geomatika*, 2010, No. 4, pp. 23–26 (in Russian).
- Loupian E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S., Tolpin V.A., Burtsev M.A., Spring crops development in the European part of Russia and southern regions of West Siberia in 2018, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 275–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-275-281.
- Bender H. A., Mouroulis P., Eastwood M. L., Green R. O., Geier S., Hochberg E., Alignment and characterization of high uniformity imaging spectrometers, *Proc. SPIE*, 2011, Vol. 8158, 11 p., available at: https:// trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/43788/11-3592_A1b.pdf?sequence=1&isAllowed=y.