

Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА»

А.Е. Кузнецов, В.И. Побаруев, В.И. Пошихонов, О.А. Пресняков

Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

E-mail: foton@rsreu.ru

Основной отличительной особенностью космических аппаратов «Канопус-В» и «БКА» является целевая аппаратура, которая впервые в отечественной практике дистанционного зондирования реализует кадрово-сканерный принцип съемки земной поверхности. При таком способе съемки непрерывное изображение формируется из набора перекрывающихся микрокадров, полученных от отдельных ПЗС-матриц. В рамках федеральной космической программы разработан программный комплекс «NormSatB», который позволяет успешно обрабатывать изображения от систем ДЗЗ данного типа. В программном комплексе реализован весь спектр функциональных возможностей по формированию выходной продукции начиная от первичной обработки (декоммутации) до формирования мозаичных ортофотопланов. При обработке изображений от данных космических систем удалось обеспечить бесшовное геометрическое и яркостное совмещение микрокадров. Достигнута точность геопривязки маршрутов съемки по орбитальным измерениям по критерию CE90 – 52 м. Производительность программного комплекса составляет не менее 10^6 км² для данных с уровнем обработки 3. В статье подробно изложены архитектура комплекса, функциональный состав, алгоритм высокоточной географической привязки, алгоритм быстрого ортотрансформирования и технические характеристики специализированного программного комплекса «NormSatB». Технические характеристики комплекса получены на этапе летных испытаний космических аппаратов, а также на этапе опытной эксплуатации программы в НЦ ОМЗ. При разработке программного комплекса «NormSatB» применялась технология быстрого создания приложений, основанная на использовании универсальной программной платформы «ER-Set».

Ключевые слова: съемочная система, космические изображения, микрокадр, ортоплан, географическая привязка, ортотрансформирование.

Введение

В июле 2012 года был осуществлен успешный запуск двух идентичных малых космических аппаратов (КА), российского «Канопус-В» (ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», URL: <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=468>) и белорусского «БКА» (ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», URL: <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=467>), осуществляющих съемку земной поверхности в полосе обзора 920 км с высоты 510 км на восходящей стороне витка. Целевая аппаратура спутников представлена многозональной (МСС) и панхроматической (ПСС) съемочными системами, разработанными ОАО «Пеленг» Республики Беларусь, которые впервые в практике дистанционного зондирования реализуют кадрово-сканерный принцип съемки земной поверхности. В соответствии с этим принципом в фокальной плоскости съемочных систем устанавливаются кадровые ПЗС-матрицы, формирующие непрерывный маршрут съемки из набора перекрывающихся микрокадров. ПЗС-матрицы функционируют в режиме ВЗН (временной задержки и накопления заряда) и формируют микрокадры размером 1920x985 пикселей с радиометрическим разрешением 8 бит. В аппаратуре МСС используются четыре матрицы, по одной на каждый спектральный диапазон, расположенные в фокальной плоскости последовательно вдоль направле-

ния полета КА. В системе ПСС используются шесть матриц, расположенных в шахматном порядке как показано на *рис. 1*.

Навигационное обеспечение целевой аппаратуры представлено приемниками Глонасс/GPS и двумя звездными датчиками, обеспечивающими измерения углового положения КА с погрешностью не более 30". Передача целевой и телеметрической информации на приемный центр осуществляется по двум радиолиниям со скоростью до 122 Мбит/с.

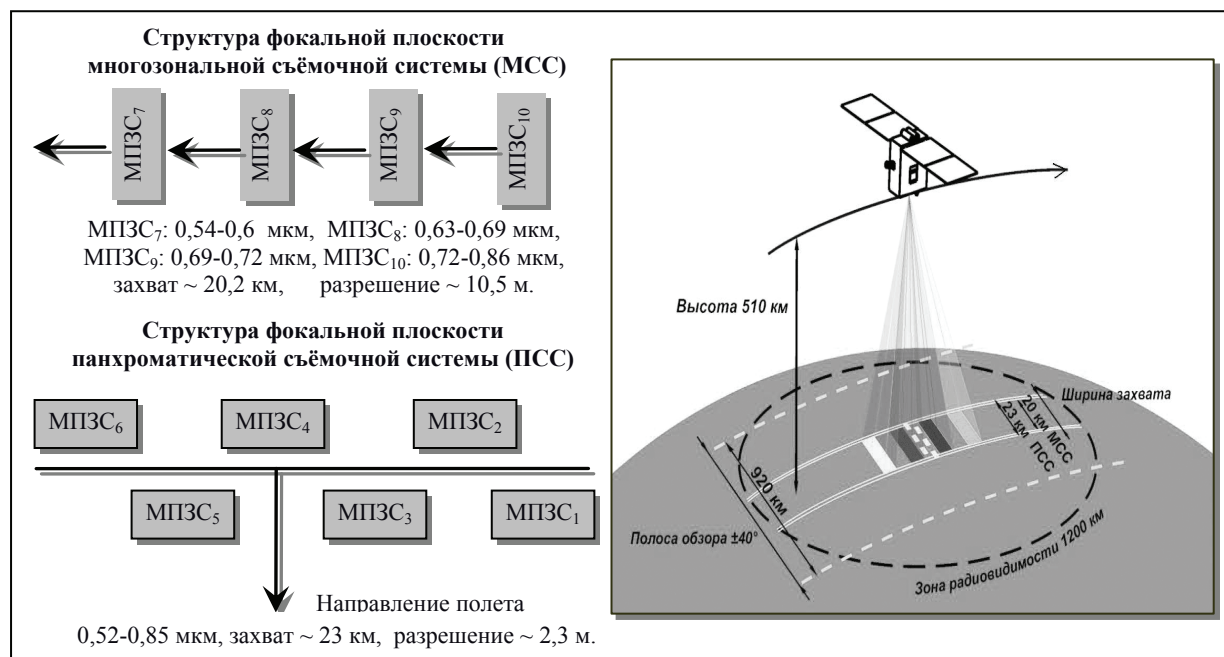


Рис. 1. Принцип съемки и конфигурация фокальной плоскости КА «Канопус-В» и «БКА»

Для наземной обработки, поступающей со спутников информации, Рязанский государственный радиотехнический университет по заказу ОАО «Российские космические системы» разработал многофункциональный программный комплекс NormSatB, представляющий собой 32-х разрядное приложение для ОС Windows 7/2008. Комплекс взаимодействует с базой данных электронного каталога, функционирующей под управлением СУБД MS SQL Server, и обеспечивает выполнение всего набора технологических операций, начиная от первичной обработки и заканчивая получением выходных информационных продуктов стандартных уровней обработки. Проектирование комплекса обработки данных КА «Канопус-В» и «БКА» в виде единой программной системы по отношению к многопрограммным комплексам, применяемым, например, для решения аналогичных задач от КА «Ресурс-ДК» и «Ресурс-П», имеет ряд существенных технических преимуществ.

Во-первых, это высокая скорость и качество формирования выходных продуктов, достигаемые за счет одноразового выполнения яркостных преобразований при геометрической и радиометрической обработке, а также за счет исключения операций сохранения промежуточных результатов и обменов информацией между программами.

Во-вторых, это высокая технологичность выполнения процессов геодезической привязки, расчета метаданных, геометрических и радиометрических преобразований, визуализации, обеспечиваемая за счет работы с массивом микрокадров, как с единым потоком информации. Например, при выполнении геодезического ориентирования датчика ПСС автоматически уточняются параметры геопривязки изображений от датчика МСС. То же самое относится и к сегментации облачности при каталогизации и другим операциям.

В-третьих, единую программную систему удобнее и быстрее отлаживать, легко масштабировать, проще эксплуатировать.

Проектирование программного комплекса NormSatB, обладающего перечисленными достоинствами, потребовало разработки специальных структурных решений при построении комплекса, а также алгоритмов обработки кадрово-сканерной видеоинформации. Рассмотрению этих вопросов и технических характеристик созданного комплекса посвящена настоящая статья.

Программная архитектура комплекса

При разработке ПК NormSatB в РГРТУ применялась технология быстрого создания приложений, основанная на использовании универсального ядра программной системы ER-Set (Побаруев, 2013) и интеграции его с унифицированными dll-модулями функционального расширения. Архитектура программного комплекса представлена на рисунке (рис. 2).

Основу ПК составляет интерфейс межпрограммного взаимодействия компонент. Интерфейс представляет собой набор функций, классов и данных, предназначенный для взаимодействия компонент между собой. Управление интерфейсом межпрограммного взаимодействия и компонентами осуществляется в ядре. Интерфейс по своей структуре является однородным, открытым и общим как для ядра, так и для DLL-модулей. Любой DLL-модуль может расширить интерфейс собственными функциями или данными. Взаимодействие компонент комплекса с файлами изображений производится посредством модулей импорта/экспорта. Данные модули обеспечивают преобразование информации из внешней структуры (файла) во внутреннее унифицированное представление и обратно. Все остальные модули работают только с унифицированным представлением данных, благодаря этому обеспечивается инвариантность процедур обработки к форматам исходных изображений.

Программный комплекс условно разделен на 2 сегмента. Первый сегмент (А) представляет собой объекто-зависимую часть, то есть модули и функции, являющиеся уникальными для конкретной системы ДЗЗ (в данном случае модули обработки для КА «Ка-

нопус-В» и «БКА»). Второй сегмент (В) – это набор унифицированного программного обеспечения, инвариантного к форматам входных данных.

Разработка модулей из второго сегмента в большинстве случаев не требуется (то есть при разработке новых комплексов данное программное обеспечение используется повторно). Такой подход при проектировании систем обработки данных ДЗЗ для вновь создаваемых КА позволяет осуществлять разработку ПК в сжатые сроки, сосредоточившись целиком на предметной задаче.

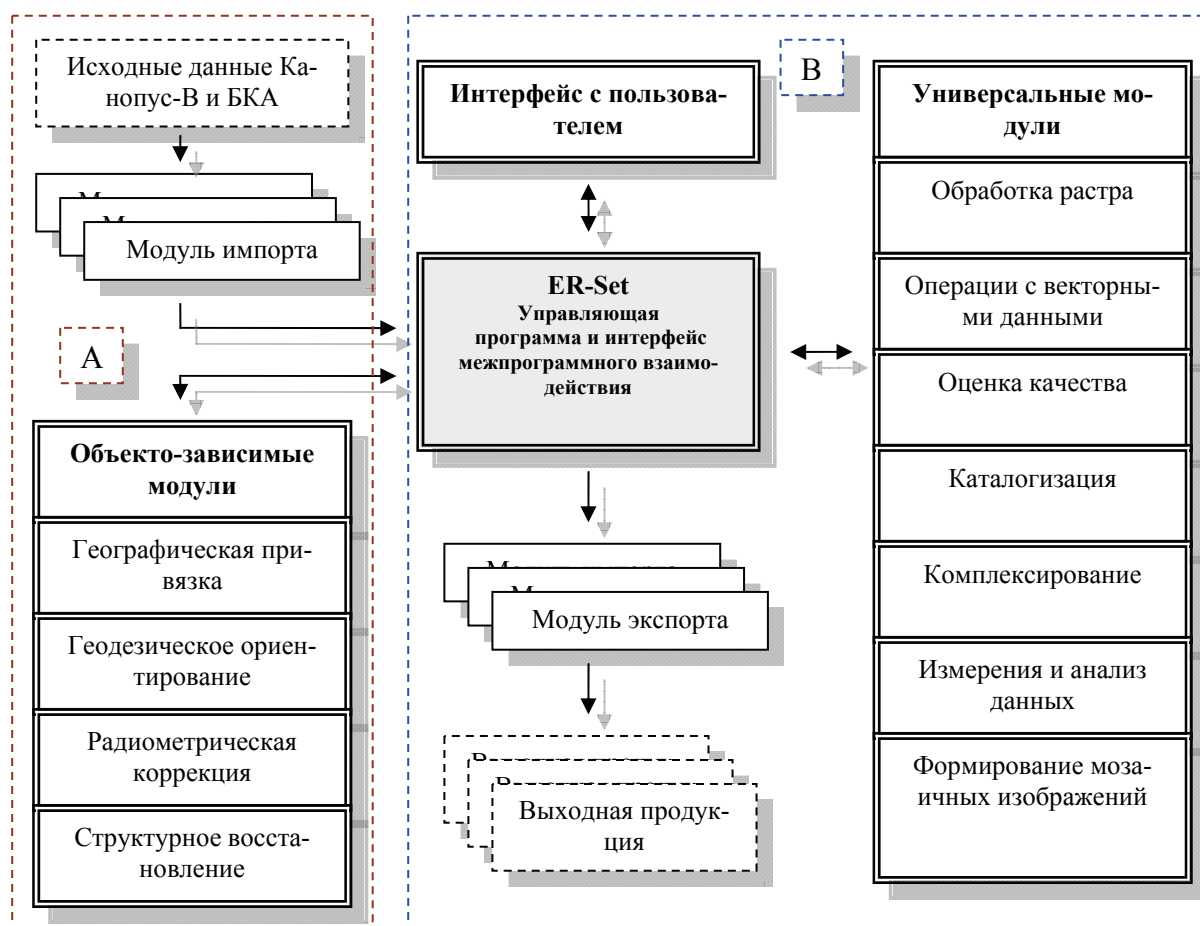


Рис. 2. – Архитектура программного комплекса

Функциональная структура комплекса

Как показано на рисунке (рис. 3), комплекс NormSatB условно состоит из 4-х функциональных подсистем.

Подсистема первичной обработки обеспечивает распаковку и декоммутацию регистрируемого антенным комплексом потока телеметрической и видеоинформации. В ходе этой операции происходит: восстановление структуры микрокадров, детектирование и фильтрация сбойных строк и импульсных помех, фильтрация навигационных измерений, разделение микрокадров по датчикам и их геопривязка по орбитальным параметрам. Результатом работы подсистемы является база данных отдельных микрокадров, представленных в виде псевдомозаичного изображения (рис. 4).

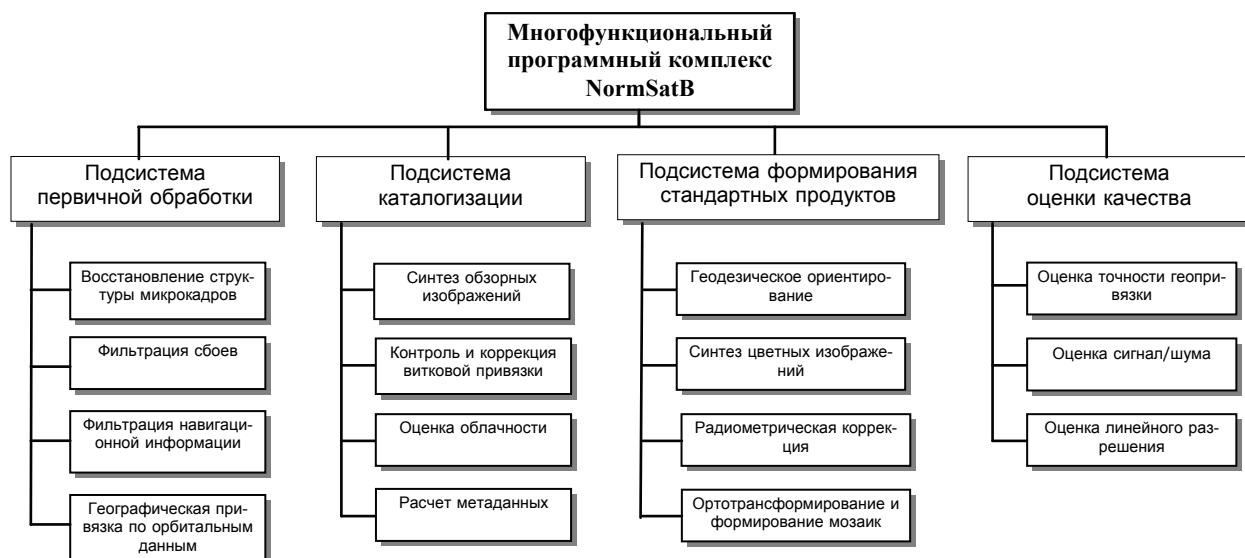


Рис. 3. Структура программного комплекса NormSatB

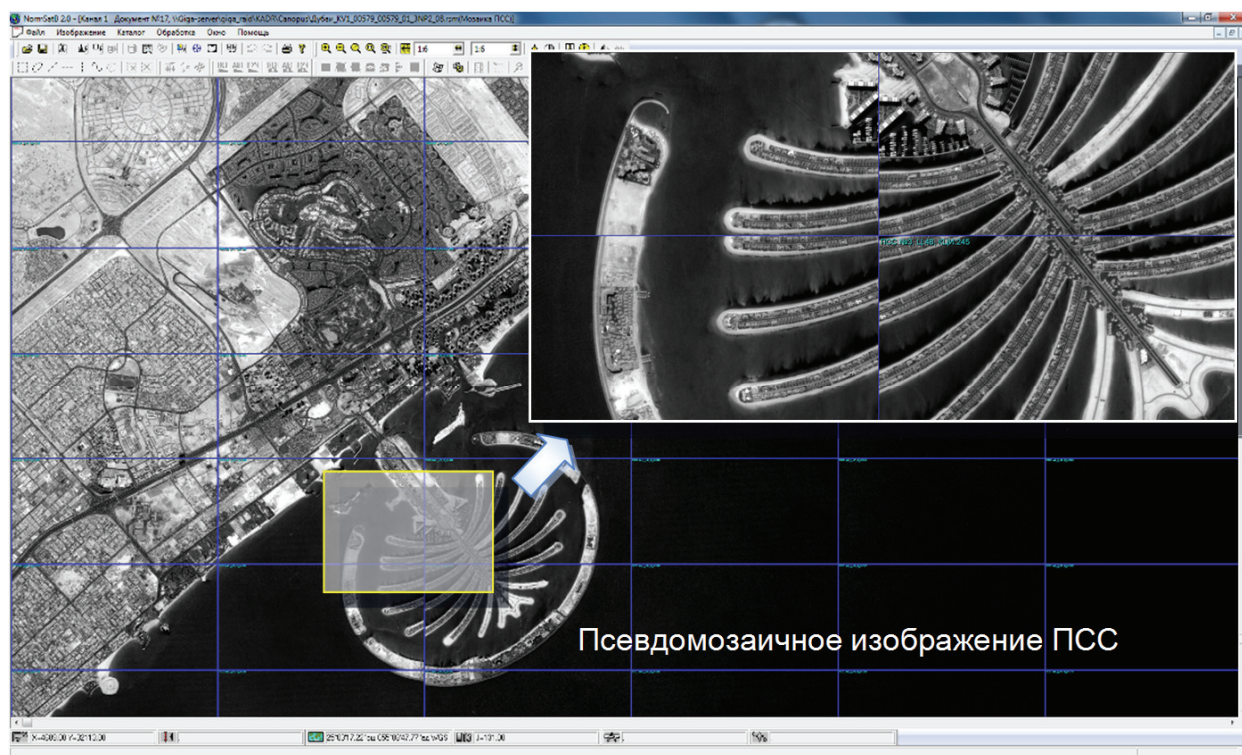


Рис. 4. Набор микрокадров датчика ПСС

Подсистема каталогизации. Задачей данной подсистемы является занесение в БД электронного каталога информации о зарегистрированных маршрутах съемки и поиск информации об интересующих районах съемки. При помещении информации в каталог происходит синтез непрерывного изображения маршрута съемки (для МСС – формирование цветного снимка), формирование квиклуков, оценка процента облачного покрытия, расчет метаданных и параметров качества.

Поиск информации, хранящейся в оперативном или долговременном архивах, осуществляется по следующим критериям: тип спутника, сканер, время съемки, географиче-

ские координаты района, допустимый процент облачного покрова и т.п. На *рис. 5* демонстрируются экранные формы подсистемы каталогизации.

Подсистема формирования выходной продукции стандартных уровней обработки.

По уровню обработки 1 выдаются отдельные микрокадры в форматах TIFF, BMP, с метаданными и RPC-полиномами для геопривязки.

По уровню обработки 2 формируются изображения отдельных микрокадров, представленные в картографической проекции. Трансформирование осуществляется на средней высоте.

По уровню обработки 3 формируются непрерывные изображения маршрутов съемки или их фрагменты, «сшитые» из отдельных микрокадров, ортотрансформированных в картографическую проекцию с использованием цифровой модели рельефа в форматах GeoTiff или Img (используются картографические проекции UTM, Гаусса-Крюгера, Меркатора).

Информация датчика МСС выдается после ее поканального совмещения с точностью не хуже 0,5 пикселя. Информация датчика ПСС может представляется в виде панхроматического или многоканального снимка, полученного на основе синтеза данных ПСС и МСС.

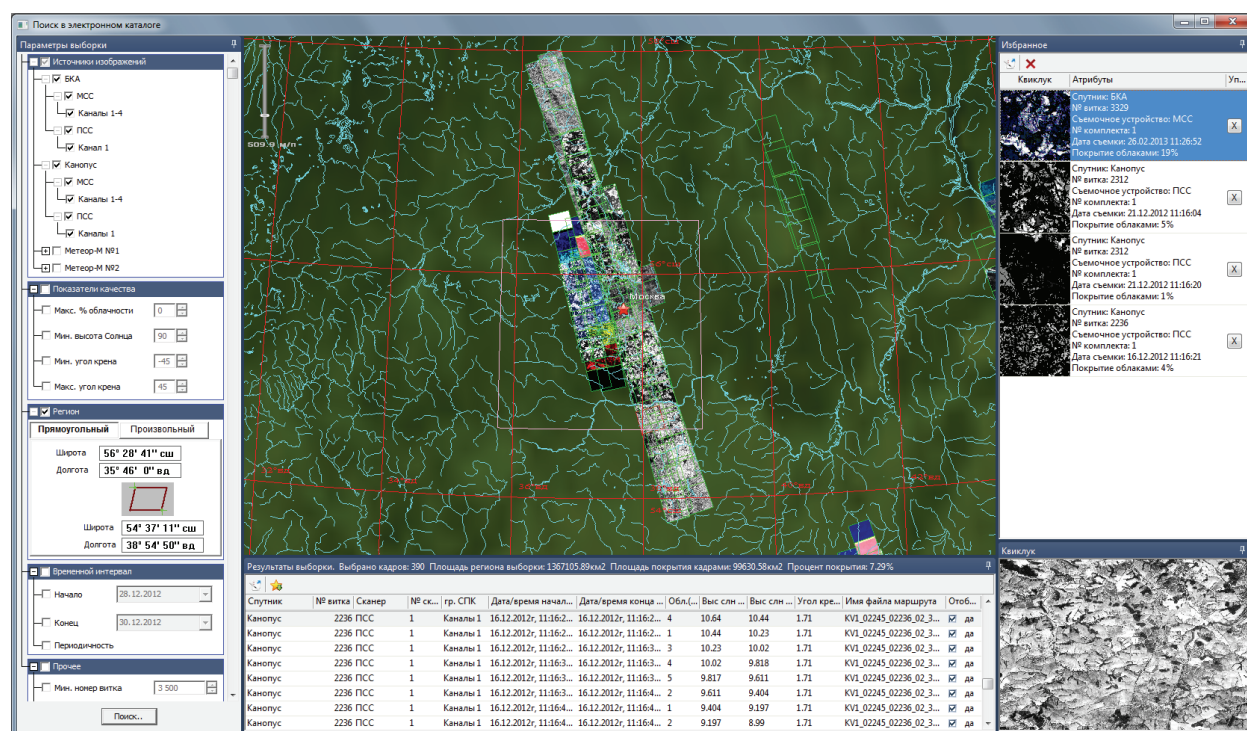


Рис. 5. Экранная форма подсистемы каталогизации

По уровню обработки 4 представляются мозаичные снимки, синтезированные на основе ортопланов. При формировании мозаичных снимков обеспечивается устранение остаточных взаимных рассогласований, яркостное выравнивание, удаление облачности.

Процесс получения высокоточного ортоплана из набора отдельных микрокадров

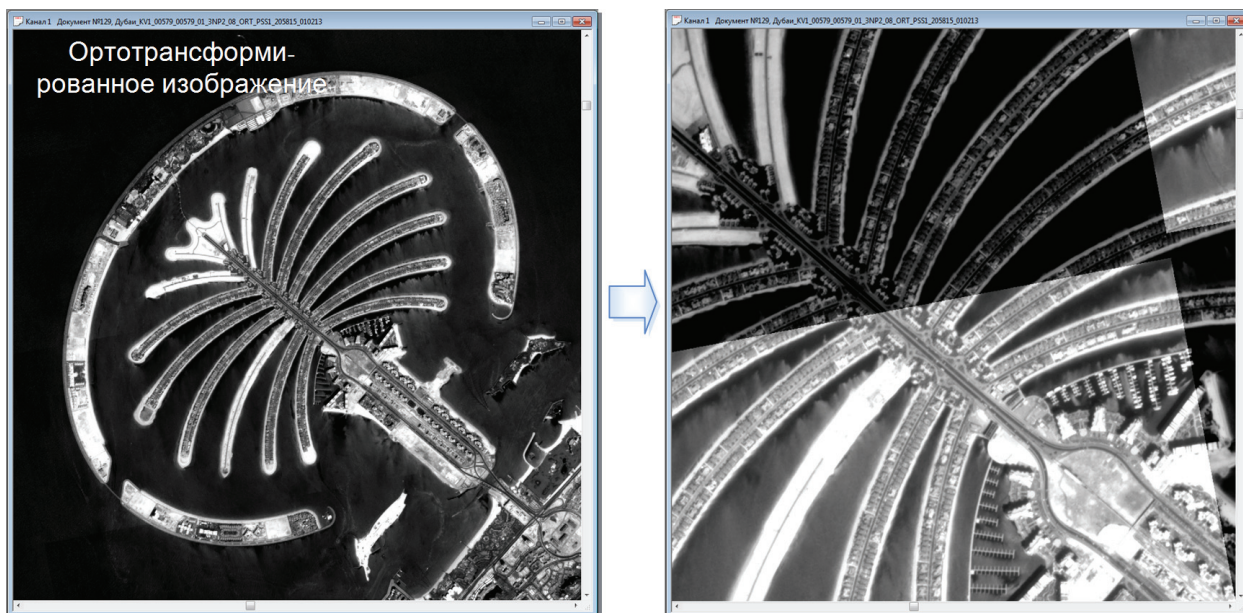


Рис. 6. Пример высокоточной «шивки» микрокадров датчика ПСС в ходе ортотрансформирования (для наглядности границы шивки микрокадров выделены разной яркостью)

На рис. 7 демонстрируется пример получения изображения высокого пространственного разрешения на основе комплексирования данных МСС и ПСС. Программа обеспечивает сохранение пространственного разрешения ПСС и спектральных компонент датчика МСС.

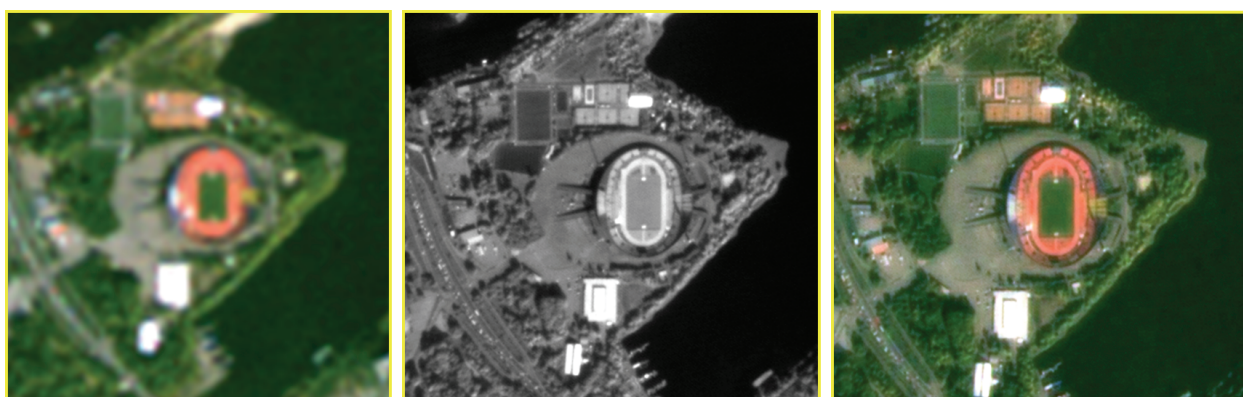


Рис. 7. Пример комплексирования данных МСС и ПСС (слева направо: снимок МСС, ПСС, комплексированное изображение)

Пример бесшовного мозаичного ортоплана, полученного с 3-х разновременных маршрутов съемки, показан на рис. 8.

Подсистема оценки качества функционирует в интерактивном режиме и предназначена для апостериорной оценки точности геопривязки, оценки линейного разрешения на местности и соотношения сигнал/шум, выдаваемых потребителям выходных и информационных продуктов.

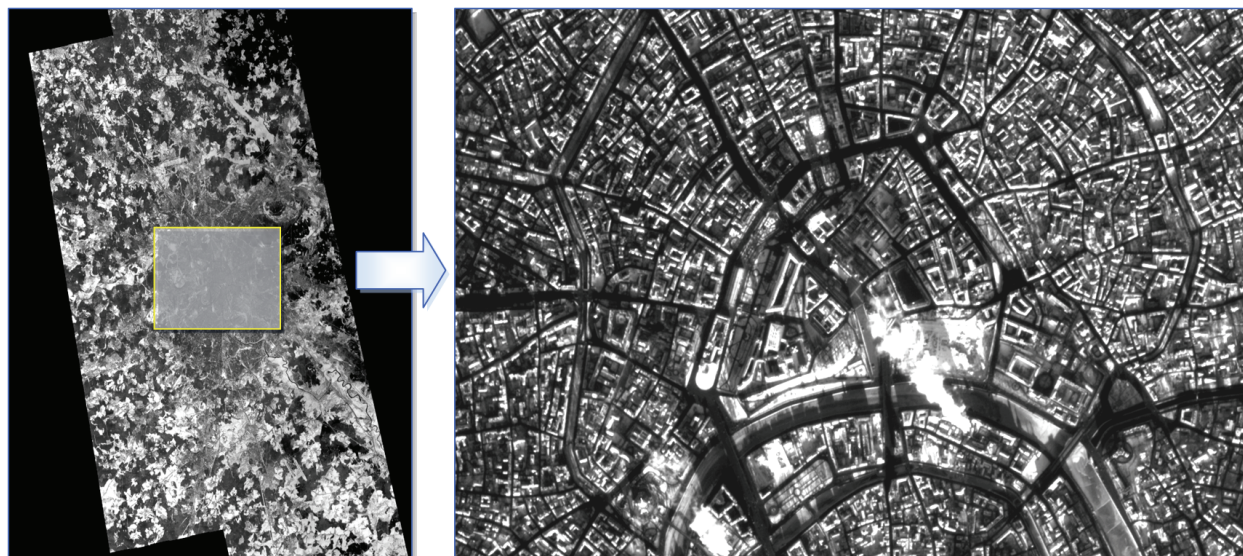


Рис. 8. Бесшовный мозаичный ортоплан города Москвы

Алгоритмы высокоточной географической привязки микрокадров

Алгоритм определения пространственного положения центра масс КА.

Измерения пространственного положения центра масс КА $\mathbf{p}_j(X, Y, Z)$ и его скорости $\mathbf{v}_j(V_x, V_y, V_z)$ в гринвичской геоцентрической системе координат (WGS-84) на заданные моменты времени t_j , $j = 1, 2, \dots$ поступают (в составе служебной информации микрокадров) от двух измерительных систем: от ГЛОНАСС/GPS приемника с частотой 0,1 Гц и от бортового интегратора с частотой 1 Гц. Эксперименты показали, что использование измерений от ГЛОНАСС/GPS приемника обеспечивает более высокую надежность и точность геопривязки.

Для высокоточного определения пространственного положения и скорости спутника была разработана процедура орбитального прогноза по возмущенной орбите. Входными данными этой процедуры являются векторы координат $\mathbf{p}_0$ и скорости $\mathbf{v}_0$ центра масс КА в ГСК на некоторый произвольный момент времени t_0 . Процедура орбитального прогноза учитывает влияние гравитационного поля Земли с заданным числом гармоник (максимум 70), возмущения от Солнца и Луны. Таким образом, по заданным начальным усло-

виям $\mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0, t_0$ определяется вектор координат $\mathbf{p}(t, \mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0, t_0)$ и скорости $\mathbf{v}(t, \mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0, t_0)$ КА на произвольный момент времени t .

Определение начальных условий $\mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0$ выполняется итерационно по методу наименьших квадратов с использованием исходных измерений от ГЛОНАСС/GPS приемника путем минимизации следующей целевой функции:

$$\arg \min_{\mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0} \sum_i \left[\frac{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}(t, \mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0, t_0)|^2}{\sigma_p^2} + \frac{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}(t, \mathbf{p}_0, \mathbf{v}_0, t_0)|^2}{\sigma_v^2} \right],$$

где σ_p, σ_v – СКО погрешности измерения пространственного положения и скорости спутника соответственно.

В результате выполняется расчет координат $\mathbf{p}(t_i)$ КА на моменты времени t_i съемки всех микрокадров маршрута.

Алгоритм определения ориентации КА.

Для определения ориентации съемочных устройств на КА «Канопус-В» установлены два звездных координатора, которые выполняют расчет параметров ориентации осей собственной приборной системы координат относительно осей инерциальной системы по изображениям произвольных участков небесной сферы. В результате обработки на борту КА измерений от этих приборов в служебной части микрокадра передаются значения углов ориентации $(\alpha, \omega, \kappa)_j$ КА в орбитальной системе координат и угловые скорости $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)_j$ на моменты времени t_j . Точность определения ориентации составляет $30''$, период выдачи измерений – 1 с.

Для нахождения параметров ориентации КА на моменты съемки микрокадров используются значения угловой скорости в кинематических уравнениях движения КА с целью аппроксимации измерений ориентации, полученных от звездных координаторов. Представим ориентацию КА, задаваемую углами $(\alpha, \omega, \kappa)_j$, в виде кватерниона $\mathbf{q}_j$ в инерциальной системе координат. Далее, интерполируя дискретные измерения $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)_j$ получим непрерывные функции по времени, которые используем для получения кватерниона $\mathbf{a}(t) = (0, \omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t))$. Запишем в общем виде уравнение производной кватерниона ориентации по времени:

$$\frac{d\mathbf{q}(t)}{dt} = \frac{1}{2} [\mathbf{a}(t) + \delta\omega] \mathbf{q}(t),$$

где $\delta\omega$ – смещение кватерниона угловых скоростей.

Отсюда, с использованием алгоритма численного интегрирования определим кватернион ориентации $\mathbf{q}(t)$ на произвольный момент времени. Кватернион $\mathbf{q}^{(1)}$ на некоторый начальный момент времени, относительно которого выполняется интегрирование, и значение $\delta\omega$ определим по измерениям $\mathbf{q}_j$ с использованием метода наименьших квадратов:

$$\arg \min_{\mathbf{q}^{(1)}, \delta\omega} \sum_j |\mathbf{q}(t_j) - \mathbf{q}_j|^2.$$

С использованием полученных параметров выполним интегрирование угловых скоростей на моменты времени t_i съемки микрокадров. Далее перейдем из инерциальной в гринвичскую систему координат и представим полученный результат в виде матрицы $\mathbf{R}(t_i)$ ориентации КА для каждого микрокадра.

Геодезические координаты произвольного пикселя микрокадра $\varphi_i(m, n)$, $\lambda_i(m, n)$ вычисляются на основе элементов внешнего $\mathbf{p}(t_i)$, $\mathbf{R}(t_i)$ и внутреннего Ω ориентирования съемочных устройств. Эти соотношения можно представить в общем случае выражениями:

$$\begin{aligned}\varphi_i(m, n) &= \Phi_{\varphi}[\mathbf{p}(t_i), \mathbf{R}(t_i), \Omega, m, n], \\ \lambda_i(m, n) &= \Phi_{\lambda}[\mathbf{p}(t_i), \mathbf{R}(t_i), \Omega, m, n]\end{aligned}$$

Алгоритм ортотрансформирования

При ортотрансформировании выполняется преобразование массива микрокадров в единое изображение в заданной картографической проекции с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР). Процедура ортотрансформирования совмещена с коррекцией ошибок совмещения микрокадров из-за неточностей ЦМР. При этом яркостная интерполяция выполняется однократно, что положительно сказывается на качестве выходной продукции. Программный комплекс NormSatB позволяет работать с виртуальным ортотрансформированным снимком «на лету», т.е. формировать выходное изображение в требуемом масштабе непосредственно в процессе его вывода на экран монитора, не дожидаясь создания целого снимка в памяти.

В процессе ортотрансформирования выполняются задачи координатной обработки, яркостной интерполяции и видеоинформационного обмена.

Координатная обработка выполняется по обратному закону и позволяет для точек ортотрансформированного изображения (x, y) установить соответствующие им точки исходных микрокадров (m_i, n_i) :

$$m_i = F_{mi}(x, y, h(x, y)), \quad n_i = F_{ni}(x, y, h(x, y)),$$

где i – номер микрокадра, $h(x, y)$ – высота в точке (x, y) .

При вычислении обратных функций геометрического соответствия F_{mi} , F_{ni} сначала выполняется численное обращение прямых функций F_{xi} , F_{yi} , полученных на основе привязки и параметров картографического проектирования, функциями G_{mi} , G_{ni} . Затем ошибки стыковки микрокадров из-за неточности ЦМР корректируются двумерными кусочно-линейными (триангуляционными) функциями $T_{mi}(m_i, n_i)$, $T_{ni}(m_i, n_i)$, параметры которых рассчитываются по общим точкам, идентифицированным в областях перекрытия соседних микрокадров при помощи корреляционно-экстремального анализа. Формулы для вычисления F_{mi} , F_{ni} в итоге принимают вид:

$$F_{mi}(x, y, h) = T_{mi}(G_{mi}(x, y, h), G_{ni}(x, y, h)), \quad n_i = T_{ni}(G_{mi}(x, y, h), G_{ni}(x, y, h)).$$

Численное обращение прямых функций производится на основе трехмерной кусочно-линейной аппроксимации. Для этого пространство (x, y, h) равномерно разбивается на параллелепипеды, которые, в свою очередь, разбиваются на пирамиды (рис. 9). В вершинах параллелепипедов рассчитываются соответствующие им координаты исходного изображения. В пределах пирамид выполняется трехмерная линейная интерполяция координат.

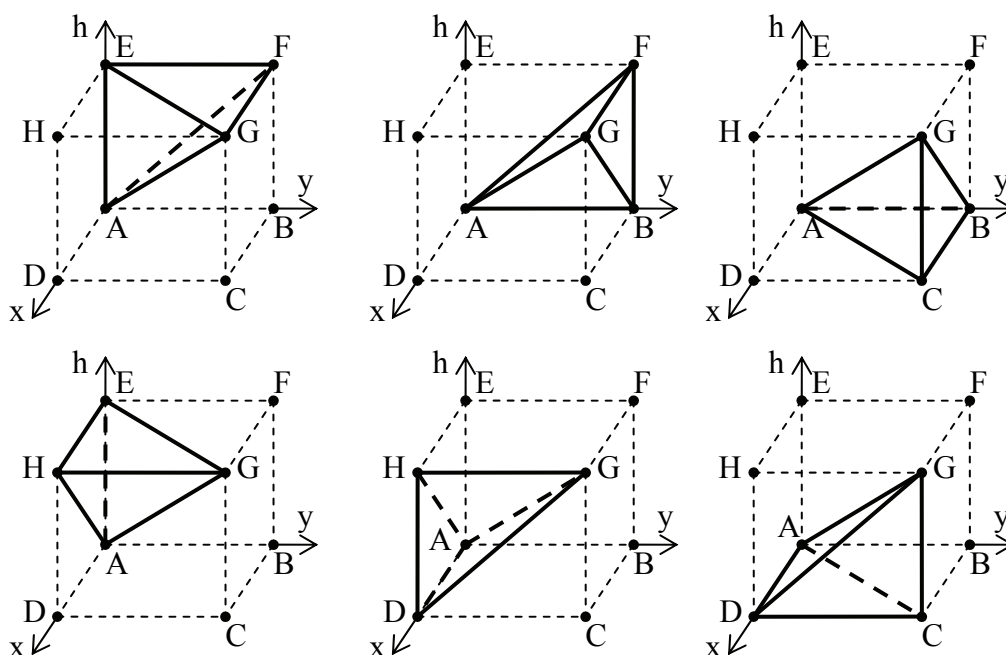


Рис. 9. Трехмерная кусочно-линейная интерполяция

Поскольку функция $h(x, y)$ при координатной обработке подразумевает выборку из ЦМР высоты, то ЦМР для выполнения скоростной обработки предварительно трансформируется в плоскость выходного изображения, что резко сокращает время на преобразование координат в пиксельную систему координат ЦМР.

Яркостная интерполяция позволяет получить яркость в точке i -го микрокадра с координатами (m_i, n_i) , представленными вещественными числами. В программном комплексе NormSatB используются традиционные для обработки по обратному закону геометрического соответствия формулы билинейной и бикубической интерполяции.

Видеоинформационный обмен определяет порядок загрузки в оперативную память формируемых пикселей ортотрансформированного изображения и необходимых для этого пикселей исходных микрокадров. Для обеспечения создания виртуального ортотрансформированного кадра в темпе просмотра оператором независимо от выбранного масштаба отображения, используется пирамидальная организация видеоданных (рис. 10). Для этого создаются прореженные изображения, которые используются при выводе на экран уменьшенных снимков.

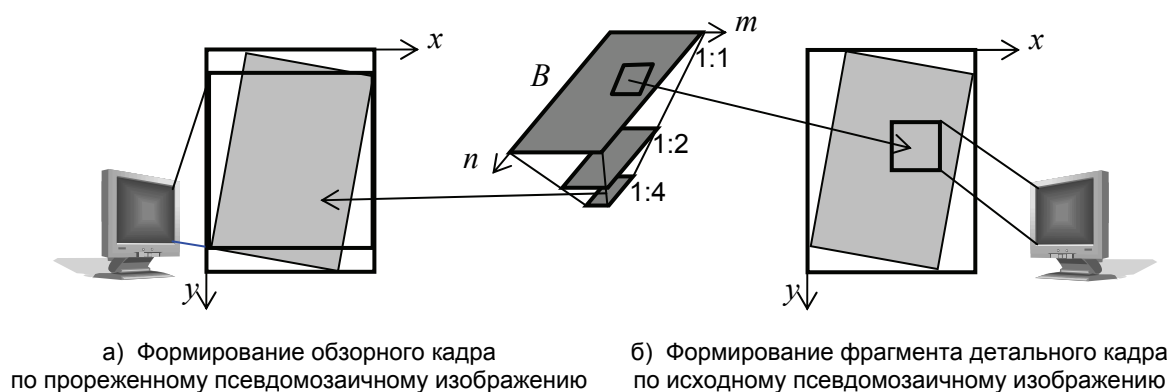


Рис. 10. Использование пирамиды для формирования виртуального ортотрансформированного снимка

Технические характеристики программного комплекса

При выполнении основных технологических операций, связанных с получением выходной продукции, комплекс функционирует в автоматическом режиме. Ручные операции выполняются только на этапе каталогизации, при обучении классификатора сегментации облачных объектов.

В комплексе эффективно используются вычислительные мощности ПЭВМ, связанные с распараллеливанием операций обработки, а также различные методы ускорения вычислений. Благодаря этому достигаются следующие временные характеристики на ПЭВМ с процессором Intel Core i7 – 3ГГц:

время обработки маршрута съемки датчика ПСС площадью 3000 км^2 из ~ 59000 строк составляет 3,5 минуты;

время комплексной обработки данных МСС и ПСС с сохранением 4-х канального изображения датчика ПСС того же маршрута составляет 6 минут.

При формировании выходной продукции только по орбитальным параметрам обеспечиваются следующие характеристики:

точность геопривязки маршрутов съемки по орбитальным измерениям по критерию CE90 – 52м;

СКО погрешности сшивки микрокадров датчика ПСС без использования одноименных точек ~ 0,3 пиксела;

точность совмещения маршрутов съемки от датчиков ПСС и МСС – 5 м;

уровень остаточных радиометрических рассогласований совмещаемых микрокадров не более 2%.

При использовании процедуры геодезического ориентирования (уточнения углового движения КА) на основе автоматически найденных координат опорных точек (с использованием сервиса Google) и одноименных точек обеспечиваются следующие характеристики выходной продукции:

точность сшивки микрокадров ~ 0,15 пиксела датчика ПСС;

точность геопривязки ортоплана 3-5 м.

Выходная продукция может быть сохранена: в ГИС-форматах img, geotiff, bil; а также в графических форматах bmp, tiff, jpg в сопровождении файла метаданных и обзорного изображения.

Литература

1. Космический комплекс «Канопус-В» [Электронный ресурс] / ОАО «Корпорация ВНИИЭМ». Режим доступа: <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=468>.
2. Белорусский космический комплекс [Электронный ресурс] / ОАО «Корпорация ВНИИЭМ». Режим доступа: <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=467>.
3. Универсальная платформа быстрой разработки приложений для обработки данных дистанционного зондирования Земли «ER-Set»: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610968, Рос. Федерация: *В.И. Побаруев*; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»; заявл. 04.12.2012; опубл. 09.01.2013.

A software system for information processing from scanner-frame imaging systems SC "Canopus-V" and "BKA"

A.E. Kuznetsov, V.I. Pobaruев, V.I. Poshekhonov, O.A. Presnyakov

*Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia
E-mail: foton@rsreu.ru*

The main feature of "Canopus-V" and "BKA" spacecrafts is the payload, which is the nation's first remote sensing instrument implementing frame-scanner Earth observation principle. With this method a continuous image is formed from a set of overlapping image chips obtained from the individual CCDs. Under the Federal Space Program, the

"NormSatB" software complex was developed, which can successfully handle images from remote sensing systems of this type. To obtain output products, the whole range of functionality was implemented in the software complex ranging from primary processing to formation of orthophoto mosaics. Processing of data from these space-based systems ensured a seamless geometrical and brightness combination of image chips. Accuracy of geolocation with the orbital measurements is 52 m (CE90). Performance of the software complex is not less than 10^6 km² for the level 3 data processing. The paper details the architecture of the complex, its functional composition, high precision georeferencing algorithm, fast orthorectification algorithm and technical specifications of the "NormSatB" specialized software complex. Technical characteristics of the complex were obtained during flight tests of spacecrafts, as well as during the operation testing of the program at NTs OMZ. While developing "NormSatB", a software technology for quick creation of applications was applied, which is based on the use of universal software platform "ER-Set".

Keywords: camera system, space images, microframe, orthoimage, georeferencing, orthorectification.

References

1. <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=468>.
2. <http://www.vniiem.ru/ru/index.php?id=467>.
3. Universal platform of rapid application development for remote sensing data processing "ER-Set", *Russian Federation state patent for computer programs No.2013610968*, publ. 09.01.2013.