

Алгоритмы и технологии обработки информации от КА «Ресурс-ДК»

О.А. Гомозов¹, В.В. Еремеев², А.Е. Кузнецов², В.В. Лось¹,
О.А. Пресняков², К.К. Соловьева¹

¹Научно-исследовательский институт точных приборов
127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51
E-mail: ctc@comail.ru

²Рязанский государственный радиотехнический университет
390005 г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
E-mail: gislab@org.etr.ru

Рассматриваются алгоритмы и технологии, лежащие в основе программного обеспечения обработки видеоданных от КА «Ресурс-ДК». Описываются особенности формирования изображений этим спутником, последовательность выполнения основных технологических операций по коррекции информации и их содержание, приводятся сведения об организации программного обеспечения и примеры получаемых выходных продуктов.

Введение

На космическом аппарате (КА) «Ресурс-ДК» для достижения высокого пространственного разрешения порядка 1-2 м при полосе обзора ~ 30 км и получения высококачественных изображений земной поверхности используется сканирующий датчик, разработанный ОПТЭКС. Датчик состоит из трех оптико-электронных преобразователей (ОЭП). ОЭП расположены в фокальной плоскости датчика перпендикулярно направлению полета спутника с взаимным смещением друг относительно друга (рис. 1) и обеспечивают съемку земной поверхности либо в трех спектральных диапазонах (0,5-0,6 мкм; 0,6-0,7 мкм; 0,7-0,8 мкм), либо в панхроматическом (0,58-0,8 мкм) и двух спектральнональных диапазонах (0,5-0,6 мкм и 0,7-0,8 мкм).

В состав ОЭП входят 36 матриц, расположенных в шахматном порядке и сгруппированных в 6 зон компенсации, одна из которых схематично представлена на рис. 1. Каждая зона имеет собственную частоту опроса входящих в нее матриц. При этом четные и нечетные матрицы установлены с небольшим перекрытием полей обзора, а размерность каждой из них составляет 1024×128 элементов.

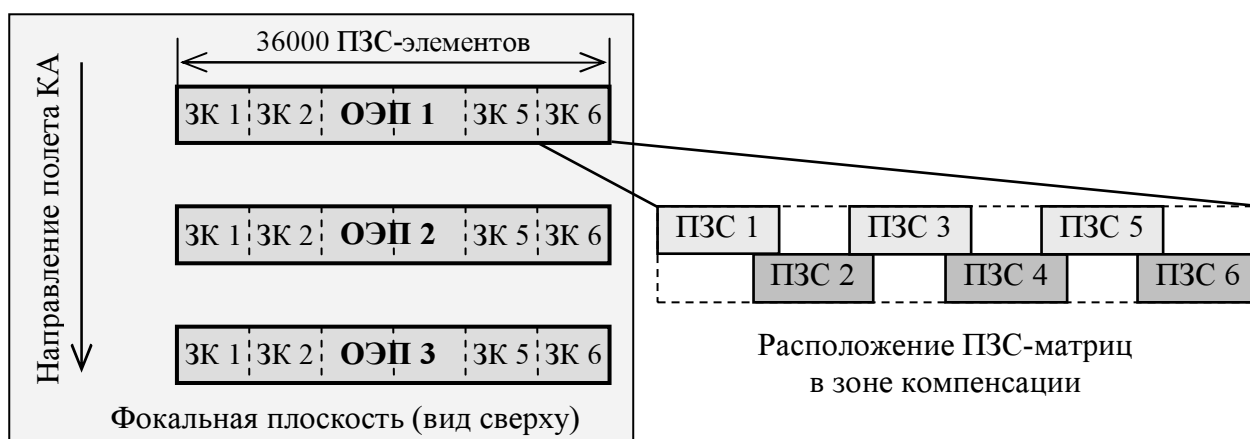


Рис. 1. Схема размещения ОЭП в фокальной плоскости

Каждый ОЭП формирует шесть изображений в результате опроса шести зон компенсации. Моменты времени опроса зон компенсации определяются текущей частотой опроса для каждой

зоны и не совпадают для всех зон. Изображение, сформированное в одной зоне компенсации, в целом представляет собой шесть перекрывающихся и сдвинутых друг относительно друга в кадровом и строчном направлениях фрагментов.

Обработка изображений от КА «Ресурс-ДК» предполагает выполнение следующих основных операций.

Во-первых, структурное восстановление видеоданных, связанное с получением непрерывного изображения из отдельных перекрывающихся фрагментов.

Во-вторых, радиометрической коррекции видеоинформации, направленной на устранение вертикальной «полосатости» снимка, обусловленной различием передаточных характеристик как отдельных фотоприемников, так и ПЗС-матриц.

В-третьих, получение цветосинтезированных снимков путем геометрического совмещения видеоданных от 3-х ОЭП, имеющих сложный характер геометрических расогласований в зависимости от условий съемки и рельефа местности.

В-четвертых, географическая привязка и трансформирование изображений в картографические проекции, которые в отличие от снимков низкого и среднего пространственного разрешения должны выполняться по высокоточным моделям с учетом рельефа местности.

В-пятых, эффективная системная организация программного обеспечения, позволяющая обрабатывать сверхбольшие по объему массивы видеоданных за минимальное время.

В настоящей работе рассматриваются разработанные НИИ точных приборов (НИИ ТП) и Рязанским государственным радиотехническим университетом (РГРТУ) алгоритмы и технологии решения перечисленных задач, обеспечивающие высокие точность, скорость обработки и принятые в международной практике формы выходных информационных продуктов.

Технологическая схема обработки информации

На рис. 2 представлена схема выполнения основных технологических операций по обработке маршрутов съемки от КА «Ресурс-ДК», представленных в виде файла-паспорта и файла видеоданных в формате TIFF.

Первый этап связан с анализом и обработкой служебной информации, считываемой из файла-паспорта, и видеоданных. В результате его выполнения рассчитываются параметры функций измерения географических координат и трансформирования снимков.

На втором этапе выполняется предварительная обработка видеоданных, которая включает радиометрическую коррекцию и структурное восстановление информации. После этого этапа формируются непрерывные изображения от трех ОЭП.

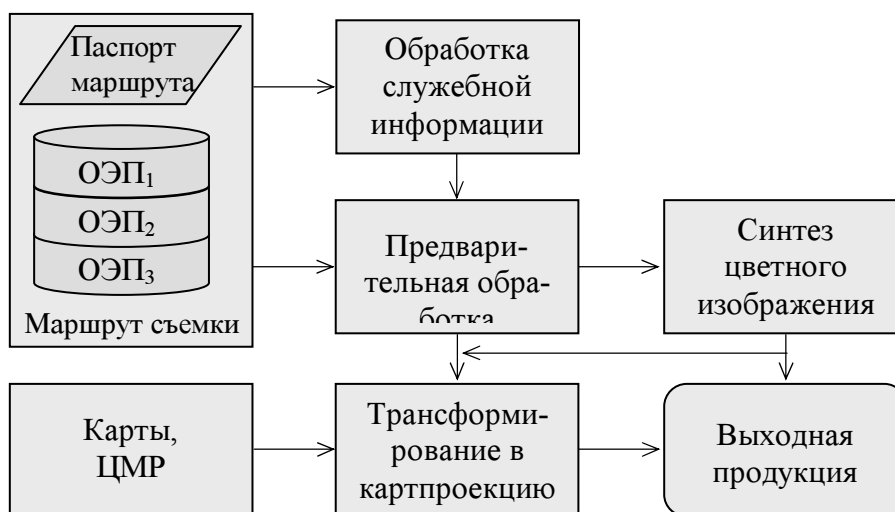


Рис. 2. Схема обработки информации от КА «Ресурс-ДК»

На третьем этапе формируется цветосинтезированное изображение всего маршрута съемки. Это изображение может сохраняться в виде отдельного выходного продукта либо использоваться для последующего преобразования в картографическую проекцию.

Четвертый заключительный этап связан с получением картографического измерительного документа. На этом этапе цветной или одноканальный черно-белый снимок может быть:

- трансформирован в картографическую проекцию по орбитальным параметрам;
- ортотрансформирован в картпроекцию с использованием орбитальных параметров и привлечением опорных точек местности и цифровых матриц рельефа (ЦМР). Выходной документ может сохраняться в графических (BMP, TIFF, PCX) или ГИС-форматах (LAN, IMG, GeoTIFF, ERS, Idrisi, BIL).

Алгоритмы обработки служебной информации

При обработке служебной информации КА «Ресурс-ДК1» выполняются следующие задачи:

- считывание данных о линейном и угловом движении КА;
- обработка этих данных с целью фильтрации ошибок и получения вектора состояния КА на первую строку изображения, углов ориентации и полиномов углового движения КА в процессе съемки;
- инициализация функции измерения геодезических координат на изображении.

Получение вектора состояния КА на начало съемки выполняется путем решения системы уравнений:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + \mu \frac{X}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial X} + Q_X, \quad \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} + \mu \frac{Y}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial Y} + Q_Y, \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} + \mu \frac{Z}{r^3} = \frac{\partial R}{\partial Z} + Q_Z, \quad (1)$$

где μ - геоцентрическая гравитационная постоянная; R - пертурбационная функция; $R = V - V_{сф}$; V - потенциал реальной Земли; $V_{сф}$ - потенциал сферической Земли; Q_X, Q_Y, Q_Z - возмущающее сопротивление атмосферы; r - геоцентрический радиус КА.

Получение вектора углового положения съемочной системы Ω_m выполняется для каждой строки изображения путем решения системы уравнений:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \quad \omega(t) = \omega_0 + \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad \kappa(t) = \kappa_0 + \frac{\partial \kappa}{\partial t}, \quad (2)$$

где $\alpha_0, \omega_0, \kappa_0$ - угловые элементы ориентирования съемочной системы на начало съемки; $\partial \alpha / \partial t, \partial \omega / \partial t, \partial \kappa / \partial t$ - угловые скорости.

На основе выражений (1) и (2) рассчитывается закон геометрического соответствия одноименных точек исходного, структурно восстановленного и преобразованного изображений, который представляется как

$$x = F_x(m, n, h, \mathbf{D}, \mathbf{V}_m, \Omega_m, \mathbf{P}), \quad y = F_y(m, n, h, \mathbf{D}, \mathbf{V}_m, \Omega_m, \mathbf{P}), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где (m, n) и (x, y) - координаты одноименных точек исходного и преобразованного изображений соответственно; h - высота точки на местности; $\mathbf{D} = (f, x_0, y_0, d_1, \dots, d_5)$ - вектор фотограмметрических параметров съемочной системы: фокусное расстояние, координаты главной точки, параметры суммарной дисторсии съемочной системы; $\mathbf{V}_m = (X^0, Y^0, Z^0)$ - вектор пространственного положения КА; $\Omega_m = [\alpha, \omega, \kappa]$ - вектор углового положения съемочной системы; $\mathbf{P}_m = (p_1, p_2, \dots)$ - вектор параметров, описывающих картографическую проекцию и земной эллипсоид.

В качестве модели параметров Земли и картографических проекций положена схема описания и кодирования систем координат POSC/EPSC, принятая также в спецификации формата GeoTIFF и доработанная с учетом специфики использования в российской системе «нормальных»

высот, в отличие от «ортометрической», используемой за рубежом.

Для уточнения параметров внешнего ориентирования съемочной системы предложен метод дифференциального уточнения параметров ее орбитального и углового движений. Согласно этому методу для каждой опорной точки $(x, y, h)_i$, отождествленной на местности, составляются линейризованные уравнения

$$\mathbf{A}_i \delta \mathbf{P}_{V\Omega} = \mathbf{L}_i + \mathbf{V}_i, \quad (4)$$

где \mathbf{A}_i – матрица частных производных измеряемых величин $(x, y, h)_i$ по определяемым параметрам $\mathbf{P}_{V\Omega} = (X, Y, Z, \alpha, \omega, k)_1$; $\delta \mathbf{P}_{V\Omega}$ – вектор поправок к определяемым параметрам; \mathbf{L}_i – вектор свободных членов; \mathbf{V}_i – погрешности координат, обусловленные ошибками систем навигации и ориентации КА. Для решения (4) используется итерационный метод Ньютона в сочетании с методом наименьших квадратов.

Предварительная обработка изображений

Как был отмечено, в ходе предварительной обработки последовательно корректируются радиометрические искажения, а затем выполняется структурное восстановление изображения от каждого ОЭП. Для коррекции радиометрических искажений разработан статистический алгоритм, в котором параметры яркостного преобразования m -го столбца рассчитываются на основе анализа исходного изображения. В соответствии с этим алгоритмом функция радиометрической коррекции определяется как

$$\Phi_m(b) = f_s^{-1}(f_m(b)), \quad m = \overline{0, M-1}, \quad b = 0, 1, 2, \dots, 1023, \quad (5)$$

что обеспечивает компенсацию шумов за счет приведения эмпирической функции распределения яркости данных b от анализируемого фотоприемника f_m к характеристикам эталонной функции f_s . Для одновременной компенсации искажений отдельных фотоприемников и ПЗС-матриц f_s рассчитывается в скользящем «окне», включающем фиксированное число столбцов видеоданных от нескольких матриц.

Сложность решения задачи структурного восстановления непрерывного изображения обусловлена тем, что съемка одного и того же участка местности соседними ПЗС-матрицами ведется с временным интервалом около 0,05 сек. За это время изменяются положение спутника на орбите и углы его ориентации, а за счет вращения Земли происходит смещение подстилающей поверхности. В результате геометрическое соответствие изображений, сформированных соседними матрицами, описывается сложным законом. Уровень взаимных искажений иллюстрирует рис. 3,а, на котором показано рассогласование в пикселах между номерами строк одноименных точек в об-

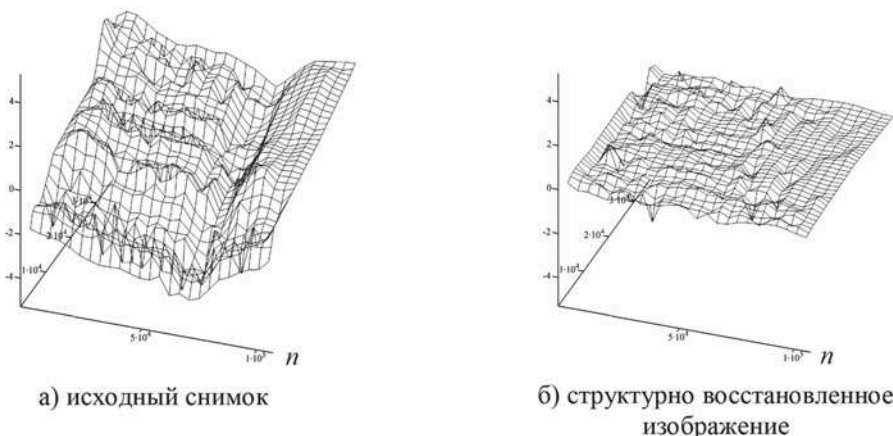


Рис. 3. График рассогласования номеров строк одноименных точек соседних матриц

ластях перекрытия соседних ПЗС-матриц. График построен по 100 000 строкам изображения. Разработанная технология структурного восстановления предусматривает совмещение видеоданных от матриц в плоскости изображения, сформированного виртуальным датчиком, который отличается от реального тем, что содержит в фокальной плоскости одну ПЗС-линейку с полосой обзора всего ОЭП. Положение ПЗС-линейки виртуального датчика выбрано таким образом, чтобы она проходила через номинальное геометрическое место строк нечетных ПЗС-матриц реального датчика. При таком расположении виртуальной ПЗС-линейки изображения от нечетных матриц с точностью установочных параметров трансформируются в плоскость «сшитого» кадра путем плоскопараллельного сдвига.

В результате анализа основных искажающих факторов установлено, что соответствие между координатами четных ПЗС-матриц (m_i, n_i) , $i = 2, 4, \dots$, и структурно восстановленного изображения (m, n) с учетом выравнивания строчной частоты отдельных зон компенсации (рис. 4) может быть представлено как

$$\begin{aligned} m_i(m, n) &= U_i^m(m) + P^m[m, t(n)] + A^m[t(n)], \\ n_i(m, n) &= t_i^{-1} \left[U_i^n(m) + P^n[m, t(n)] + A^n[t(n)] \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где:

- $U_i^m(m)$, $U_i^n(m)$ – функции, позволяющие скомпенсировать неточность установки ПЗС-матриц в фокальной плоскости;
- $P^m(m, t) = a_0 + a_1 t + a_2 m + a_3 t^2 + a_4 m^2$, $P^n(m, t) = b_0 + b_1 t + b_2 m + b_3 t^2 + b_4 m^2$ – полиномы, компенсирующие отклонение видеоданных отдельных ПЗС-матриц от номинального положения из-за вращения Земли, орбитального движения и изменения ориентации КА;
- $A^m(t)$, $A^n(t)$ – кусочно-линейные функции, учитывающие высокочастотные изменения углов ориентации КА;
- $t(n)$, $t^{-1}(n)$ – прямая и обратная функции, устанавливающие связь между номером строки и временем ее съемки.

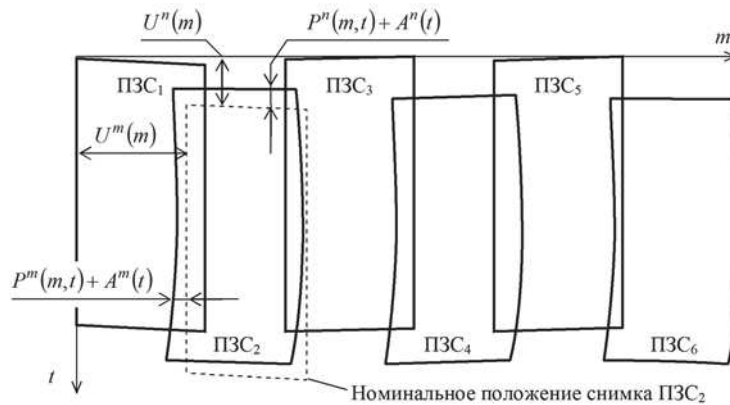


Рис. 4. Параметры, определяющие взаимное положение ПЗС-матриц

Для оценки параметров смещений U_i^m , U_i^n разработана методика калибровки, основанная на корреляционном анализе видеоданных из перекрывающихся частей изображений от соседних матриц и сопоставлении снимков с опорными изображениями и топографическими картами.

Параметры функций P^m , P^n , A^m и A^n вычисляются на основе уравнений (3) и уточняются при помощи корреляционно-экстремального анализа перекрывающихся частей изображений.

Остаточные рассогласования координат одноименных точек на структурно восстановленном изображении представлены на рис. 3б. На рис. 5 показан пример выполнения радиометрической коррекции и формирования непрерывного изображения.

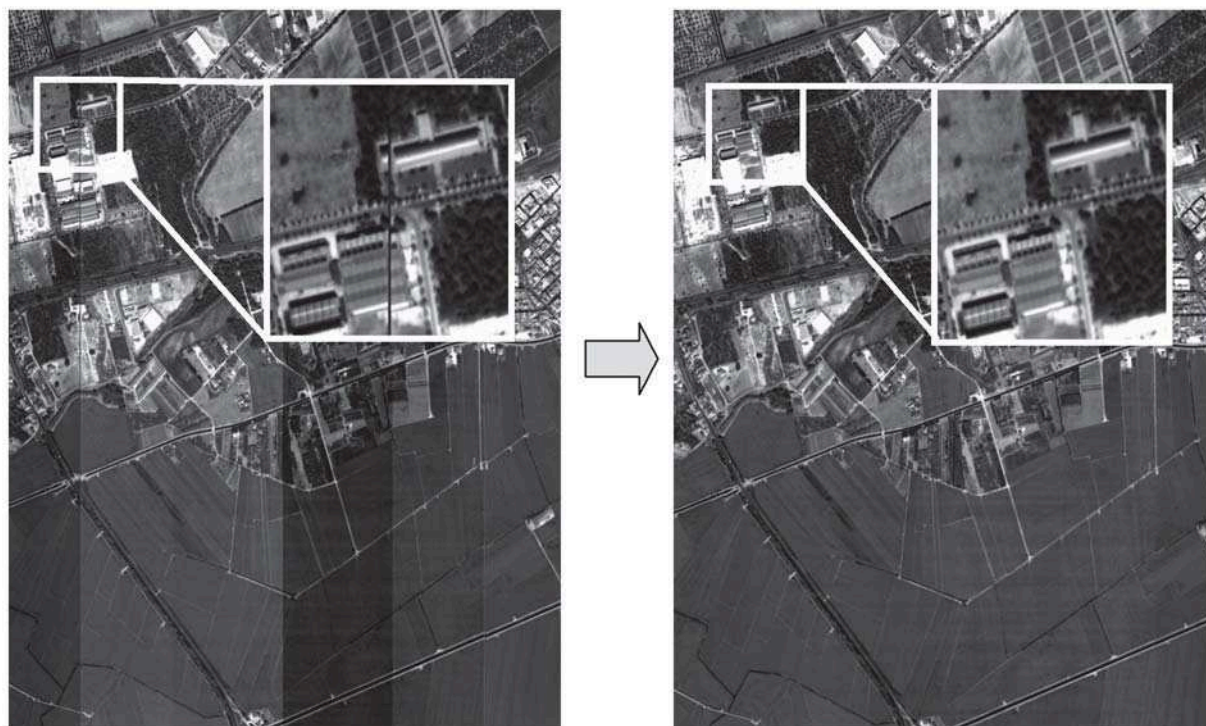


Рис. 5. Пример предварительной обработки изображения от КА «Ресурс-ДК»

Алгоритм формирования цветосинтезированных изображений

Получение цветных изображений по видеоданным от трех смещенных в фокальной плоскости ОЭП сводится к геометрическому совмещению двух спектрозональных снимков с базовым. Сложность решения этой задачи обусловлена тем, что из-за ошибок измерения входных параметров точное совмещение снимков по модели (3) не обеспечивается. Кроме того, аналитическая модель не учитывает искажений, обусловленных рельефом. Поэтому геометрическое совмещение выполняется по триангуляционной модели, наилучшим образом описывающей локальные деформации снимков. Причем параметры модели определяются с субпиксельной точностью на основе корреляционно-экстремального анализа спектрозональных снимков. Алгоритм получения цветосинтезированных изображений включает в себя следующие шаги.

Шаг 1. Определение начальных параметров геометрического рассогласования снимков на основе корреляционного анализа пирамидальных изображений, предварительно преобразованных к контурному виду.

Шаг 2. Уточнение по найденным параметрам аналитической модели координатного соответствия снимков и грубое совмещение изображений.

Шаг 3. Построение триангуляционной модели геометрического совмещения снимков и загрузка модели в локальных областях, где не обеспечивается точность координатного соответствия менее 0,5 пиксела. Для достижения высокой производительности построения модели, во-первых, минимизируется зона поиска одноименных точек за счет учета величины взаимного смещения сюжетов из-за перепада высот и направления поиска, во-вторых, распараллеливается вычислительный процесс в многоядерной архитектуре современных ПЭВМ.

Таким образом, по видеоданным от 3-х ОЭП (рис. 6 – три верхних снимка) формируются: цветное изображение с грубым совмещением данных (рис. 6 – нижний левый снимок), а после прецизионного совмещения – окончательное цветосинтезированное изображение (рис. 6 – ниж-

ний правый снимок). На этом примере показан механизм уточнения параметров совмещения в локальной области.

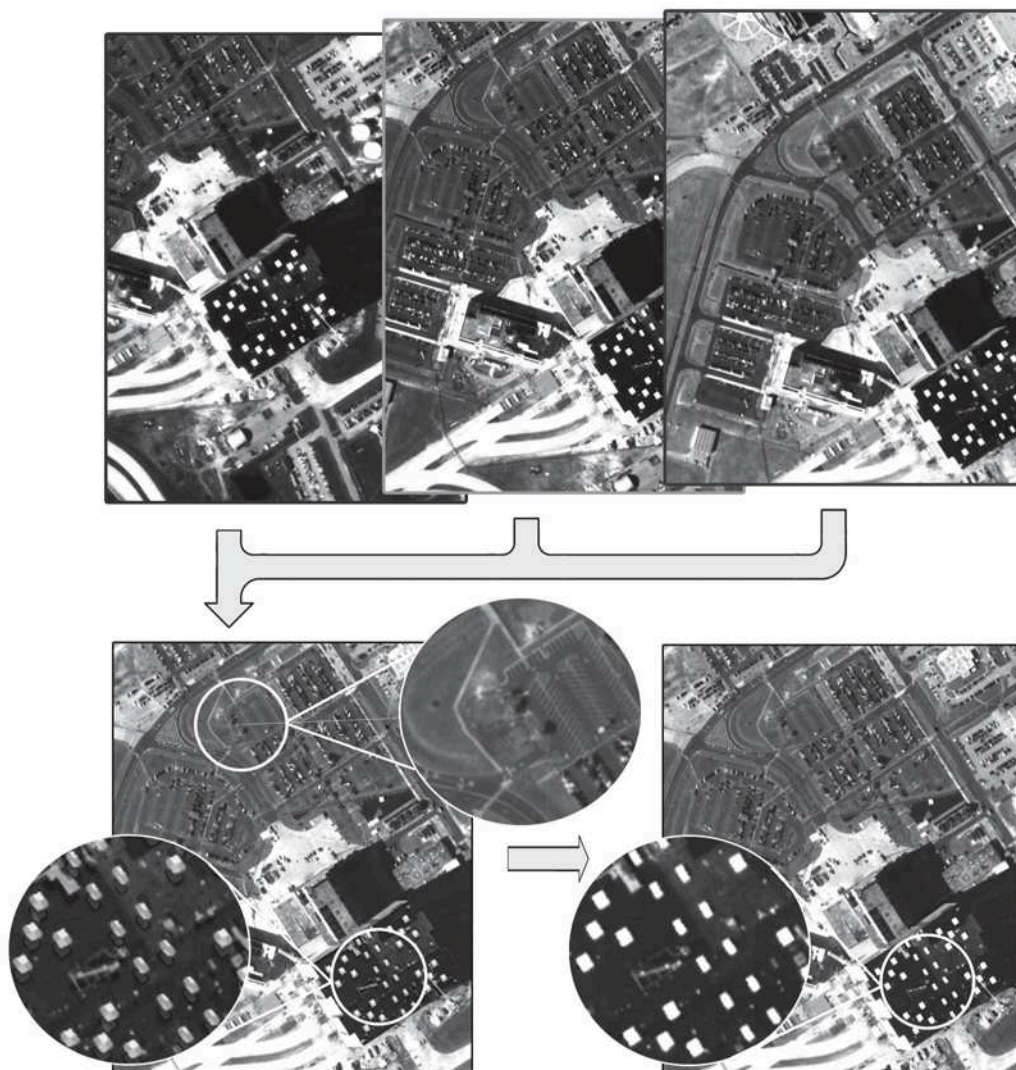


Рис. 6. Получение цветосинтезированного изображения от трех ОЭП

Системная организация программного обеспечения

Разработка программного комплекса обработки информации от КА «Ресурс-ДК» выполнена коллективами НИИ ТП (г. Москва) и РГРТУ (г. Рязань). Программный комплекс спроектирован в виде базового ядра и подключаемых к нему DLL-модулей. При этом ядро предоставляет интерфейсы доступа к различным форматам исходных данных, что позволяет создавать DLL-модули, не зависящие от структуры входной информации.

Для достижения высокой точности и скорости обработки в программном комплексе широко используются:

- технологии сквозной обработки с использованием фильтров, что позволяет исключить накопление ошибок из-за многократного округления, например, при последовательном выполнении радиометрической, а затем геометрической коррекций;
- технологии виртуальной обработки данных, обеспечивающие контроль качества выполнения промежуточных шагов преобразования изображений без дополнительных затрат;
- пирамидальное кодирование изображений, обеспечивающее высокое быстродействие при визуализации информации сверхбольшого объема;

- распараллеливание вычислительного процесса.

На сегодняшний день на компьютере, функционирующем в MS Windows Server 2003 (8 Gb RAM, процессор Intel Xeon 3 ГГц 4 шт.), достигнуты следующие временные характеристики при обработке одного условного кадра размером 36000×36000 пикселей:

- формирование цветосинтезированного изображения – 15 мин;
- трансформирование цветного снимка без ЦМР – 28 мин;
- ортотрансформирование цветного снимка с ЦМР 10-метрового разрешения – 125 мин.

Заключение

При аттестации созданного программного обеспечения были оценены его точностные характеристики. Так при геометрических преобразованиях по орбитальным данным и сравнении результатов с картой масштаба 1:100 000 случайная составляющая ошибки локализации, полученная по большому количеству контрольных точек, соответствует точности карты. После уточнения параметров модели (3) и ортотрансформирования по минимальному количеству опорных точек случайные ошибки уменьшились до 30-40 метров. При этом потребовалось только 7 точек для согласования модели и достижения указанной точности на маршруте протяженностью 90 км. С использованием карты масштаба 1:24 000 на зарубежную территорию маршрут протяженностью 82 км по 8 точкам был геопривязан с точностью 14 м по широте и 8 м по долготе.

По результатам экспериментов установлено, что изображения, получаемые с КА «Ресурс-ДК», обладают хорошими геометрическими характеристиками, что позволяет использовать их для обновления карт вплоть до масштаба 1:25 000. При этом разработанное программно-математическое обеспечение отвечает современным требованиям совместимости по картографическим проекциям и форматам представления данных, обладает развитой системой сервисных функций, обеспечивает высокую скорость визуализации и обработки больших потоков данных.