

На правах рукописи



СВЕТЕЛКИН Павел Николаевич

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузнецов Алексей Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Клочко Владимир Константинович

кандидат технических наук
Тищенко Юрий Григорьевич

Ведущая организация: **ФГУП «Научно-исследовательский институт точных приборов», г. Москва**

Защита состоится **18 декабря 2009 года в 12 ч** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан ___ ноября 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в последние годы широкое распространение получают многоматричные сканирующие устройства. В этих устройствах для формирования изображений земной поверхности в фокальной плоскости устанавливаются несколько матриц приемников с зарядовой связью (ПЗС-матрицы) с одномоментной регистрацией входного излучения или работающих в режиме накопления заряда. Каждая из таких матриц обеспечивает формирование изображения в определенном спектральном диапазоне. Традиционный вариант построения многоматричных сканеров основан на принципе спектрального разделения поступающего от земной поверхности потока лучистой энергии по ПЗС-матрицам и реализован в сканирующих устройствах МСУ-Э, РДСА, HRV, установленных на космических аппаратах (КА) «Ресурс-О1», «Метеор-3М» №1, «Монитор-Э», SPOT и др.

Достоинством подобного типа сканеров является то, что ими формируются пространственно совмещенные снимки. Однако спектральное разделение лучистой энергии приводит к ослаблению регистрируемого сигнала и снижению радиометрического разрешения видеоинформации. Поэтому в последнее время в системах ДЗЗ стали использовать съемочные устройства, реализующие принцип пространственного разделения потока лучистой энергии по ПЗС-матрицам. По этому принципу спроектированы сканеры, установленные на КА «Ресурс-ДК», «Метеор-М», «Ресурс-П» и др., в которых ПЗС-матрицы в фокальной плоскости установлены поперек направления полета КА последовательно друг за другом. Съемка земной поверхности такими отдельными ПЗС-матрицами выполняется под разными углами и с разницей во времени, поэтому получаемые разновременные изображения имеют взаимные геометрические искажения. Часто съемка земной поверхности осуществляется в режимах съемки, при которых не формируются RGB-компоненты, необходимые для получения цветных снимков.

При разновременном формировании изображений возникает необходимость в решении задач прецизионного геометрического и радиометрического совмещения с целью последующего получения высококачественных цветных изображений.

Для повышения разрешающей способности и качества изображений в современных тепловизионных сканирующих устройствах используются матрицы с субпиксельно смещенными рядами ПЗС-приемников. Здесь также необходимо решить задачу геометрического и радиометрического объединения пространственно смещенных отсчетов яркости.

Таким образом, на сегодняшний день остро стоит задача по разработке алгоритмического и программного обеспечения систем комплексирования видеоданных от многоматричных сканирующих устройств нового поколения. Ее решению посвящена настоящая диссертационная работа.

Степень разработанности темы. Вопросы геометрической и радиометрической обработки разновременных изображений достаточно широко отражены в трудах Алпатова Б.А., Асмуса В.В., Журавлева Ю.И., Лупяна Е.А., Сойфера В.А., Ташлинского А.Г., Урличича Ю.М., Gonzalez R., Kronberg P., Pratt W., Rosenfeld A., Woods R. и других отечественных и зарубежных ученых.

Работы этих авторов составляют научно-методическую основу для решения задач, поставленных в диссертации. Вместе с тем получение высококачественных цветных изображений по данным разновременной съемки требует решения новых задач, связанных с прецизионным высокоскоростным геометрическим совмещением изображений и высококачественным отображением высотных и движущихся объектов.

Задачи геометрического совмещения разновременных снимков рассматривались в работах многих авторов, имеются и программные реализации этой функции в ГИС-системах. Однако вопросы проектирования алгоритмов, адекватных реальным геометрическим искажениям изображений и позволяющих выполнить поставленную задачу в приемлемое время, в должной степени в публикациях не рассмотрены.

Практически не рассмотрены вопросы формирования по данным разновременной панхроматической и спектральной съемки таких RGB-компонент, которые позволяли бы высококачественно отображать на цветном изображении высотные и движущиеся объекты наблюдаемой сцены.

Цель диссертации состоит в разработке алгоритмического и программного обеспечения высокопроизводительных прецизионных систем комплексирования разновременных изображений от многоматричных сканирующих устройств для получения высококачественных цветосинтезированных и тепловизионных изображений наблюдаемых объектов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **основные задачи**:

- анализ принципов формирования изображений многоматричными сканирующими устройствами и обоснование алгоритмов и технологии комплексирования видеоданных;
- разработка моделей и алгоритмов определения параметров геометрического совмещения снимков от датчиков среднего и высокого пространственного разрешения;
- разработка алгоритмов радиометрического комплексирования снимков видимого и ИК-диапазонов;
- проектирование программного обеспечения для систем комплексирования изображений от многоматричных сканирующих устройств.

Научная новизна работы предопределяется тем, что в практику ДЗЗ в последние годы стали внедряться многоматричные сканирующие устройства, реализующие принцип разновременного формирования изображений. Этот процесс сопровождается искажающим действием ряда специфических факторов, что требует адекватного их описания и проектирования эффективных алгоритмов геометрического и радиометрического комплексирования видеоданных с целью формирования высококачественных изображений.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- аналитическая модель геометрического соответствия спектральных снимков, основанная на численном обращении прямых уравнений геодезической привязки разновременных изображений от ПЗС-матриц с представлени-

ем результата в виде набора кусочно-билинейных функций, что позволяет организовать высокоскоростную обработку протяженных маршрутов съемки от систем ДЗЗ среднего пространственного разрешения;

- алгоритм определения координат одноименных точек на спектрально-нальных снимках в условиях их значительных геометрических рассогласований, основанный на пирамидальной корреляционно-экстремальной идентификации фрагментов изображений и обеспечивающий высоконадежное решение этой задачи;

- аналитико-регрессионный алгоритм совмещения снимков от КА высокодетального наблюдения, основанный на аналитическом описании взаимных смещений видеоданных по измерениям угловых скоростей движения спутника и на триангуляционной модели координатного соответствия, позволяющий геометрически комплексировать изображения протяженных маршрутов съемки со сложными рельефными искажениями;

- модуляционный алгоритм радиометрического комплексирования спектрально-нальных изображений, позволяющий синтезировать недостающие компоненты цветных снимков и устранить на них яркостные искажения от высотных и движущихся объектов;

- алгоритмы организации высокоскоростного вычислительного процесса в системах комплексирования изображений, основанные на хэш-тейловом представлении матрицы видеоданных, механизмах буферизации и распараллеливании процессов обработки снимков.

Практическая ценность работы состоит в том, что на базе предложенных моделей и алгоритмов разработаны подсистемы комплексирования изображений от КА «Ресурс-ДК», «Метеор-М» для программных комплексов OrthoNormScan, GeoScan, MobilCatalog, ScanCatalog, MeteorSatN и др., которые функционируют в ГУ «НИЦ «Планета», НИЦ ОМЗ, ЦПОИ «Самара» и на приемном центре в г. Ереване, а также создана подсистема получения высококачественных тепловизионных изображений в комплексе видеонаблюдения «Панорама».

Реализация и внедрение. Диссертационная работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР №20-03, №14-05, №10-06, №12-06, №30-06, №23-08. Результаты диссертационной работы в виде математического и программного обеспечения внедрены в ФГУП «НИИ точных приборов», ФГУП «Российский НИИ космического приборостроения», ЗАО «Центр наукоемких технологий», что подтверждается актами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 3 международных и 7 всероссийских научно-технических конференциях: международной конференции «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2007); международной конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2008); международной конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск, 2008);

всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2006, 2007, 2008); всероссийской конференции «Информационные технологии в науке, проектировании, производстве» (Нижний Новгород, 2006); всероссийской конференции «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2007); всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2008); всероссийской конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества» (Самара, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ: 7 статей (в том числе 3 статьи по списку ВАК), 10 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 129 страниц, 49 рисунков и 9 таблиц. Список литературы на 11 страницах включает 107 наименований. В приложении на 3 страницах приведены акты внедрения результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проанализированы принципы съемки земной поверхности многоматричными сканирующими устройствами, выполнена оценка взаимных искажений формируемых снимков и обоснованы требования к алгоритмам их обработки, предложена технология комплексирования изображений и определены задачи диссертационного исследования.

На рис. 1 показан принцип функционирования сканирующего устройства, реализующего пространственное разделение потока лучистой энергии по ПЗС-матрицам и обеспечивающего съемку земной поверхности в видимом диапазоне спектра с использованием трех ПЗС-матриц (МПЗС), которые установлены в фокальной плоскости на расстоянии Θ друг от друга перпендикулярно к направлению полета КА. Наблюдение одноименных участков земной поверхности с помощью МПЗС $_{\gamma}$ где γ – обозначение спектрального диапазона, $\gamma \in \{b, g, r\}$, выполняется под разными углами и в разное время.

В результате такой съемки формируются геометрически искаженные друг относительно друга разновременные изображения $B_{\gamma} = \{b_{\gamma}(m, n)\}$, $m = \overline{0, M_{\gamma} - 1}$, $n = \overline{0, N_{\gamma} - 1}$, на которых одноименные объекты T смещены друг относительно друга на величины Δm и Δn .

Показано, что при обработке информации от сканирующих устройств подобного типа возникает новая задача, связанная с комплексированием спектрально-зональных изображений B_{γ} с целью получения цветных снимков $D = \{d_{\gamma}(m, n)\}$, $m = \overline{0, M - 1}$, $n = \overline{0, N - 1}$, и основанная на решении двух групп проблемных вопросов:

– геометрическое совмещение между собой разновременных спектрально-зональных изображений B_{γ} ;

– синтезирование спектральных RGB-компонент цветного снимка D в условиях отсутствия отдельных изображений B_γ .

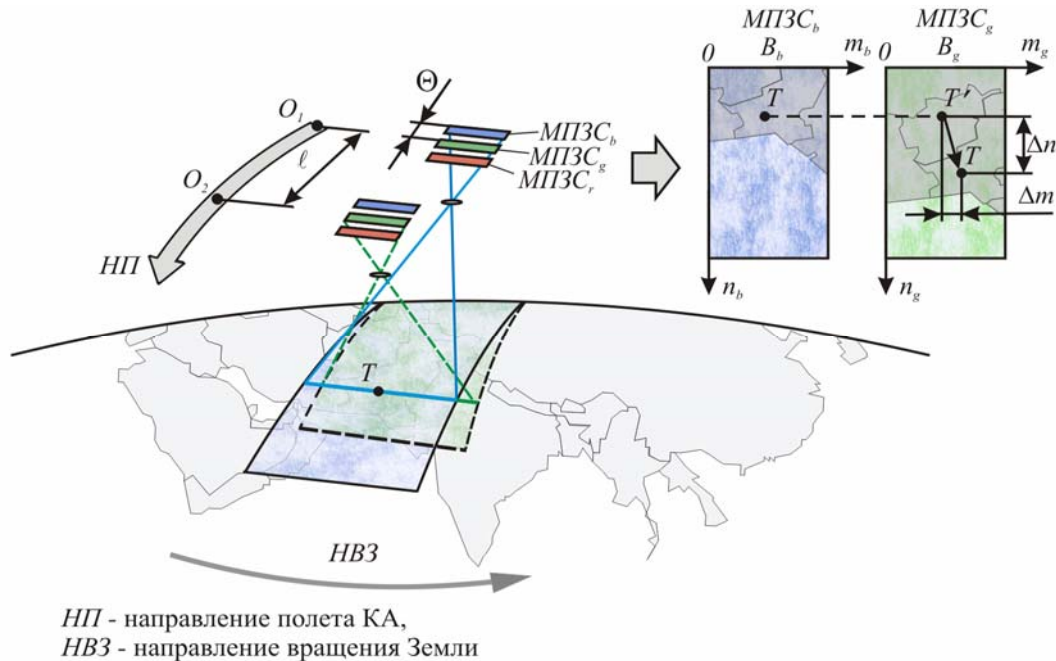


Рис. 1. Схема съемки одноименных точек земной поверхности соседними ПЗС-матрицами

Рассмотрена топология построения перспективных многоматричных ИК-сканеров. Показано, что получение высококачественных тепловизионных снимков также связано с операцией геометрического и радиометрического комплексирования данных от отдельных ИК-матриц.

Разработаны математические соотношения для оценки уровней взаимных геометрических искажений разновременных снимков, к которым относятся: вращение Земли, перепады высот снимаемой местности, изменение углов ориентации КА во время съемки, различные траектории движения ПЗС-матриц.

Выполнен анализ известных алгоритмов геометрического совмещения разновременных изображений с точки зрения производительности, уровня автоматизации и учета взаимных искажений разновременных спектральных изображений. Установлено, что для совмещения снимков среднего пространственного разрешения, для которых рельефными искажениями можно пренебречь, необходимо разработать математическую модель на основе аналитического описания взаимных искажений видеоданных, формируемых в условиях орбитального полета КА.

Отмечено, что для совмещения снимков местности с высотными перепадами можно использовать триангуляционную модель координатного соответствия, оптимизированную по быстродействию и точности и основанную на высоконадежной идентификации одноименных точек изображений. Показано, что задача радиометрического комплексирования, связанная с синтезом недостающих компонент и устранением влияния движущихся объектов, в литературе должным образом не освещена.

Проанализированы две технологии геометрического комплексирования

спектрозональных изображений. Показано, что с точки зрения временных затрат и удовлетворения требований международной практики к видам выходных информационных продуктов геометрически комплексировать следует исходные изображения с последующим их трансформированием в картографическую проекцию.

На основе проведенного в первой главе анализа определены задачи диссертационного исследования.

В главе 2 выполнена разработка геометрических моделей координатного соответствия спектрозональных изображений, применяемых для комплексирования видеоданных от КА среднего и высокого пространственного разрешения.

Разработана аналитическая модель геометрического совмещения снимков от ПЗС-матриц, исходными данными для которой являются функции геодезической привязки. Эти функции по данным внешнего и внутреннего ориентирования сканирующего устройства позволяют определить геодезические координаты $(\varphi_\gamma, \lambda_\gamma)$ пикселей изображений B_γ ,

$$\varphi_\gamma = F_{\varphi_\gamma}(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m_\gamma, n_\gamma), \quad \lambda_\gamma = F_{\lambda_\gamma}(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m_\gamma, n_\gamma), \quad \gamma \in \{b, g, r\}, \quad (1)$$

где \mathbf{R} , $\mathbf{\Omega}$ – векторы элементов внешнего и внутреннего ориентирования сканирующего устройства.

Тогда взаимное геометрическое соответствие между базовым и совмещаемыми изображениями представляется в виде:

$$\begin{aligned} m_\gamma &= F_{m_\gamma}^{-1} \left[F_\varphi(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m, n), F_\lambda(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m, n) \right], \\ n_\gamma &= F_{n_\gamma}^{-1} \left[F_\varphi(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m, n), F_\lambda(\mathbf{R}, \mathbf{\Omega}, m, n) \right], \\ m &= m_g, \quad n = n_g, \quad F_\lambda = F_{\lambda_g}, \quad F_\varphi = F_{\varphi_g}, \quad \gamma \in \{b, r\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{m_\gamma}^{-1}$, $F_{n_\gamma}^{-1}$ – искомые функции обратного геодезического преобразования.

Основная сложность построения аналитической модели координатного соответствия заключается в том, что на основе модели орбитальной съемки обратные функции $F_{m_\gamma}^{-1}$, $F_{n_\gamma}^{-1}$ получить не удастся. Поэтому для определения зависимости планарных координат (m_γ, n_γ) от геодезических $(\varphi_\gamma, \lambda_\gamma)$ снимка предлагается следующий итерационный алгоритм. Сначала определяется начальное приближение планарных координат $(m_{\gamma_0}, n_{\gamma_0})$ искомой точки. Затем на основе формулы приращения функции нескольких переменных применительно к прямым зависимостям составляется система уравнений:

$$\varphi_\gamma = \varphi + \frac{\partial F_{\varphi_\gamma}}{\partial m_\gamma} \Delta m_k + \frac{\partial F_{\varphi_\gamma}}{\partial n_\gamma} \Delta n_\gamma, \quad \lambda_\gamma = \lambda + \frac{\partial F_{\varphi_\gamma}}{\partial m_\gamma} \Delta m_\gamma + \frac{\partial F_{\lambda_\gamma}}{\partial n_\gamma} \Delta n_\gamma, \quad \varphi = \varphi_g, \quad \lambda = \lambda_g, \quad (3)$$

из которой итеративно находятся планарные координаты искомой точки (m_γ, n_γ) . С учетом такого решения схема вычисления значений координат (m_γ, n_γ) выглядит следующим образом:

$$(m, n) \xrightarrow{F_\varphi, F_\lambda} (\varphi, \lambda) \xrightarrow{F_{m_\gamma}^{-1}, F_{n_\gamma}^{-1}} (m_\gamma, n_\gamma), \quad \gamma \in \{b, r\}. \quad (4)$$

Поскольку итерационный расчет координат пикселей совмещаемых изо-

бражений в системе координат базового снимка занимает значительное время, предлагается выполнить аппроксимацию аналитических функций (2) функциями $\hat{F}_{m\gamma}^{-1}$, $\hat{F}_{n\gamma}^{-1}$. Показано, что высокая скорость и точность геометрической обработки достигаются при представлении функций $\hat{F}_{m\gamma}^{-1}$, $\hat{F}_{n\gamma}^{-1}$ в кусочно-билинейном виде:

$$\begin{aligned} \hat{m}_\gamma &= \hat{F}_{m\gamma}^*(m, n) = \{c_{j_0} + c_{j_1}m + c_{j_2}n + c_{j_3}mn\}, \\ \hat{n}_\gamma &= \hat{F}_{n\gamma}^*(m, n) = \{c_{j_4} + c_{j_5}m + c_{j_6}n + c_{j_7}mn\}, \quad j = \overline{0, J-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где J – количество ячеек регулярной билинейной решетки, шаг которой вычисляется с учетом соблюдения требуемой точности аппроксимации.

На базе разработанной модели реализован алгоритм формирования цветосинтезированных изображений по снимкам среднего пространственного разрешения от сканирующих устройств МСУ-50 и МСУ-100 космического аппарата «Метеор-М» №1.

Исследования показали, что для аппроксимации функций $F_{m\gamma}^{-1}$, $F_{n\gamma}^{-1}$, полученных для маршрутных снимков высокого пространственного разрешения, достаточно использовать полиномы первой степени. Однако из-за ошибок внешних параметров ориентирования сканирующих устройств эти функции для изображений B_γ , $\gamma \in \{b, g, r\}$, определяются со случайными ошибками, величина которых может достигать нескольких сотен пикселей. Эти ошибки не характерны для КА типа «Метеор-М», но являются значительными для КА высокодетального наблюдения типа «Ресурс-ДК», совершающих во время съемки компенсационное угловое движение.

Для геометрического комплексирования высокодетальных снимков предложен аналитико-регрессионный алгоритм, в соответствии с которым на первом этапе устраняются начальные рассогласования по линейной модели координатного соответствия с учетом искажений, вызванных изменением углов ориентации КА, а на втором этапе компенсируются остаточные рассогласования, обусловленные рельефными искажениями.

В рамках первого этапа для определения координат одноименных точек на спектрональных изображениях, имеющих случайные пространственные рассогласования значительной величины, предложен пирамидальный алгоритм корреляционно-экстремального отождествления (КЭО) фрагментов. В соответствии с этим алгоритмом на базовом снимке определяются высокоинформативные фрагменты, подходящие для дальнейшего КЭО по дисперсионным критериям: превышения СКО яркости фрагмента пороговой величины σ_{Π} , $\sigma_i > \sigma_{\Pi}$, $i = \overline{1, I}$, где σ_i – СКО базового фрагмента; отбора высокоинформативных фрагментов в соответствии с условием

$$\sigma_{y,1} / \sigma_{y,i} > 3; \quad i = \overline{2, I}, \quad (6)$$

где $\sigma_{y,i}$ – упорядоченные по убыванию СКО σ_i , $i = \overline{1, I}$, базовых фрагментов. Если фрагмент отбраковывается по одному из приведенных критериев, то выполняется его повторный поиск. Затем формируется пирамида разномасштаб-

ных фрагментов $\tilde{B}_{g\phi si}$ и $\tilde{B}_{\gamma si}$, $s = \overline{1, S}$,

$$\begin{aligned} B_{g\phi i} &= \tilde{B}_{g\phi i1} \xrightarrow{\Psi_2} \tilde{B}_{g\phi i2} \xrightarrow{\Psi_3} \dots \xrightarrow{\Psi_s} \tilde{B}_{g\phi is}, \\ B_{\gamma i} &= \tilde{B}_{\gamma i1} \xrightarrow{\Psi_2} \tilde{B}_{\gamma i2} \xrightarrow{\Psi_3} \dots \xrightarrow{\Psi_s} \tilde{B}_{\gamma is}, \quad i = \overline{1, I}, \quad \gamma \in \{b, r\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Идея алгоритма состоит в том, что если на нижнем уровне пирамиды наблюдается рассогласование δ_γ пикселей, то на верхнем уровне пирамиды это рассогласование равняется $\delta_\gamma / \prod_{s=2}^S \mu_s$ пикселей, т.е. можно значительно сократить время вычисления корреляционной функции за счет сокращения области поиска на следующем уровне пирамиды.

Поскольку одноименные объекты, наблюдаемые в различных спектральных диапазонах, могут иметь инверсию по яркости, то для КЭО каждый фрагмент пирамиды приводится к контурному виду:

$$C : \{ \tilde{B}_{\gamma is} \rightarrow \tilde{B}_{\gamma is}^*, \quad i = \overline{1, I} \}, \quad \gamma \in \{b, g, r\}, \quad (8)$$

где C – оператор пространственного дифференцирования Собела.

Показано, что надежное КЭО достигается с использованием трех уровней пирамидального представления изображений ($S = 3$) при координатном рассогласовании, достигающем 1024 пикселей, с коэффициентами масштабного сжатия $\mu_2 = 8$ и $\mu_3 = 2$. Исследованы два варианта построения оператора Ψ_s – на основе прореживания и усреднения видеоданных. Обоснован выбор в качестве Ψ_2 оператора прореживания, а в качестве Ψ_3 – усреднения.

Разработан комплекс проверок результатов КЭО, основанный на известных критериях анализа вида корреляционной функции и предложенном критерии прямого и обратного корреляционного поиска. Последний позволяет отбраковать ложные результаты идентификации фрагментов, центр которых располагается на границах полей, на дороге и т.п. Применение пирамидального алгоритма позволило полностью автоматизировать операцию поиска одноименных точек на совмещаемых изображениях.

По найденным одноименным точкам на нулевом уровне пирамиды на основе МНК строится линейная модель взаимного соответствия спектрально-зональных изображений

$$\begin{aligned} \hat{B}_\gamma &= \{ \hat{b}_\gamma(m, n) = b_\gamma(m_\gamma, n_\gamma) \}, \\ m_\gamma &= c_{0\gamma} + c_{1\gamma}m + c_{2\gamma}n, \quad n_\gamma = c_{3\gamma} + c_{4\gamma}m + c_{5\gamma}n, \quad \gamma \in \{b, r\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где \hat{B}_γ – геометрически преобразованные в систему координат (m, n) снимки B_γ .

Модель (9) обеспечивает совмещение небольших фрагментов изображений равнинной местности. Практика показала, что при совмещении протяженных маршрутов следует учитывать искажения, вызываемые изменением углов ориентации КА за время съемки объекта соседними ПЗС-матрицами. С учетом этого модель (9) представляется в виде:

$$\begin{aligned} m_\gamma &= c_{\gamma 0} + c_{\gamma 1} [m + \Delta_{m\gamma}(n)] + c_{\gamma 2} [n + \Delta_{n\gamma}(n)], \\ n_\gamma &= c_{\gamma 3} + c_{\gamma 4} [m + \Delta_{m\gamma}(n)] + c_{\gamma 5} [n + \Delta_{n\gamma}(n)], \quad \gamma \in \{b, r\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta_{m\gamma}(n)$, $\Delta_{n\gamma}(n)$ – взаимные смещения совмещаемых снимков B_γ , вызванные изменением углов ориентации КА, относительно базового в строчном и кадровом направлениях. Предложено определять смещения $\Delta_{m\gamma}(n)$ и $\Delta_{n\gamma}(n)$ по отфильтрованным измерениям угловых скоростей, выполняемых более точно и чаще по отношению к кватернионам ориентации КА, в соответствии с формулами:

$$\Delta_{m\gamma}(n) \approx [\Delta_\omega(t, \Delta_{r\gamma}) - \Delta_\omega(t_0, \Delta_{r\gamma})] f/r, \quad \Delta_{n\gamma}(n) \approx [\Delta_\alpha(t, \Delta_{r\gamma}) - \Delta_\alpha(t_0, \Delta_{r\gamma})] f/r, \quad (11)$$

где $\Delta_\omega(t, \Delta_{r\gamma})$, $\Delta_\alpha(t, \Delta_{r\gamma})$ – изменение угла крена и тангажа за время $\Delta_{r\gamma}$, t_0 – момент времени формирования первой строки изображения базовой ПЗС-матрицы, f – фокусное расстояние сканирующего устройства, r – размер фотоэлемента ПЗС-матрицы.

На основе модели (10) реализована технология формирования цветных обзорных изображений, применяемая при каталогизации данных ДЗЗ. Пример совмещения маршрута съемки «Париж» по модели (9) показан на рис. 2, а, а по модели (10) – на рис. 2, б. В центре снимка на рис. 2, а видны рассогласования, достигающие сотни пикселей, на снимке рис. 2, б эти рассогласования устранены.

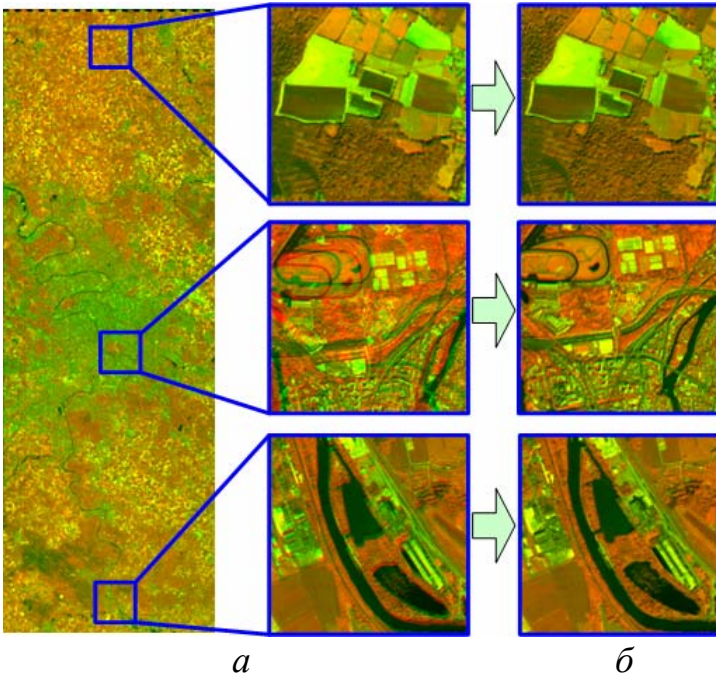


Рис. 2. Пример совмещения двух снимков:
а – без учета изменения углов ориентации КА,
б – с учетом изменения углов ориентации

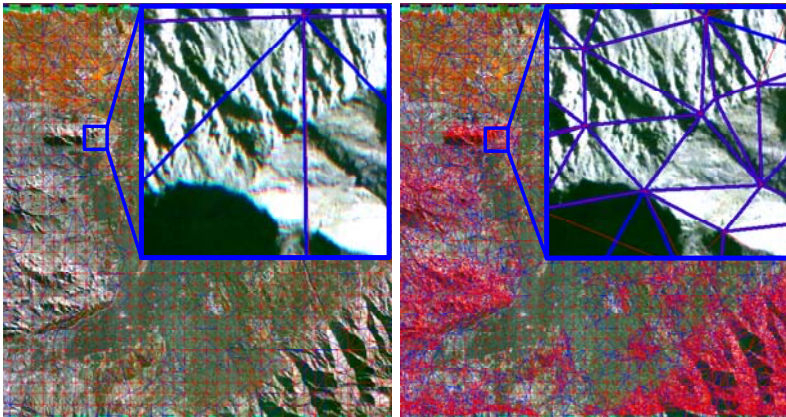
На втором этапе аналитико-регрессионного алгоритма комплексирования для компенсации рельефных искажений видеоданных используется триангуляционная модель геометрического совмещения. В соответствии с ней плоскость совмещаемого снимка разбивается на треугольные фрагменты по алгоритму Делоне. В пределах каждого треугольника с порядковым номером u на изображении B_b геометрические соотношения выглядят следующим образом:

$$m_b = a_{u0} + a_{u1} m + a_{u2} n, \quad n_b = a_{u3} + a_{u4} m + a_{u5} n. \quad (12)$$

Вершинами триангуляционной решетки являются идентифицированные на изображениях \hat{B}_b , B_g , \hat{B}_r одноименные точки. Изначально точки на базовом снимке формируются в узлах регулярной прямоугольной решетки с шагом, по-

зволяющим аппроксимировать с заданной точностью соотношения (10). Далее триангуляционная модель автоматически загущается до требуемой точности совмещения, которая, как правило, составляет 0,5 пикселя.

На рис. 3 показан маршрут «Тегеран», совмещенный с использованием регулярной триангуляционной сети (рис. 3, а) и сети, загущенной с учетом рельефа



а

б

Рис. 3. Маршрут «Тегеран», совмещенный по триангуляционной модели:

а – регулярная сеть, б – сеть, загущенная с учетом рельефа местности

местности (рис. 3, б). На рис. 3, б видно, что триангуляционная сеть загущается на горных районах маршрута, а на относительно ровных участках остается без изменения.

При совмещении по триангуляционной модели в качестве координат одноименных точек могут выступать движущиеся объекты, что приводит к ошибкам построения функций геометрического соответствия (12).

Для отбраковки подобных точек предложен следующий алгоритм.

Установлено, что перепады высот снимаемых объектов влияют на рассогласования в кадровом направлении и практически не оказывают влияния на рассогласования в строчном направлении. Соответственно строчные смещения совмещаемого снимка относительно базового в одноименных точках местности распределены по нормальному закону, а одноименные точки, попавшие на движущиеся объекты, можно отбраковать по их строчным смещениям по критерию «3 σ ». На рис. 4 приведен пример смещений Δt в строчном направлении. На рис. 4, а видно два пика, которые образованы точками, попавшими на движущиеся объекты, а на рис. 4, б показан график смещений, не содержащих движущиеся объекты.

Разработанный аналитико-регрессионный алгоритм реализован в программных комплексах GeoScan, OrthoNormScan и используется для совмещения протяженных маршрутов съемки КА высокодетального наблюдения, содержащих сложные рельефные искажения.

Для оценки эффективности предложенных технических решений были выполнены исследования разработанных алгоритмов на информации от КА «Ресурс-ДК». Так, для формирования цветосинтезированного изображения горной территории размером 36000×105000 пикселей, которое занимает 21,1 ГБ дискового пространства, было идентифицировано 889389 точек, из них 112521 точка была использована для построения триангуляционной сети; 450797 – использовано в качестве контрольных для оценки точности геометрического совмещения; 62820 – отбраковано по минимальному значению СКО базового фрагмента КЭО; 260634 – отбраковано по критерию минимального значения

взаимной корреляционной функции (ВКФ); 526 – отбраковано по критерию СКО пика ВКФ в окрестности максимума; 267 – отбраковано по критерию эксцесса ВКФ; 1584 – отбраковано с использованием алгоритма обратного поиска; 240 точек идентифицировано как движущиеся объекты и отбраковано.

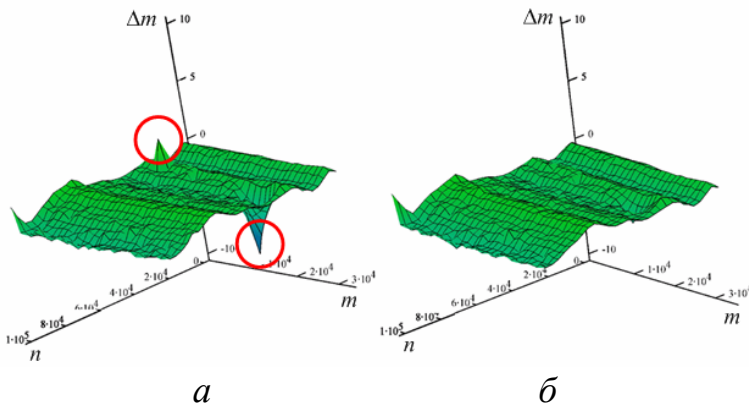


Рис. 4. Графики строчных смещений одноименных точек: *а* – смещения до отбраковки движущихся объектов, *б* – после отбраковки

5,7 минуты – начальное совмещение; 14,2 минуты – построение триангуляционной сети; 104,8 минуты – загущение триангуляционной сети.

В главе 3 разработаны алгоритмы радиометрического комплексирования видеоданных от сканирующих устройств видимого и ИК-диапазона, обеспечивающие формирование спектральных компонент цветных снимков и формирование высококачественных тепловизионных изображений.

При радиометрическом комплексировании видеоданных видимого диапазона решаются две задачи.

Первая задача связана с синтезом недостающих RGB-компонент цветного снимка для режимов съемки, когда одна ПЗС-матрица обеспечивает формирование панхроматического изображения, а другая формирует одну из спектральных компонент: R, G или B.

Вторая задача направлена на устранение ложных цветных контуров, вызванных высотными и движущимися объектами.

В рамках решения первой задачи предложен гистограммный алгоритм, позволяющий на основе известного спектрального изображения и спектральных чувствительностей ПЗС-матриц синтезировать недостающие цветные компоненты.

Для решения второй задачи предложен модуляционный алгоритм, который в отличие от известных технических решений не требует идентификации и выделения движущихся объектов, обладает высоким быстродействием, позволяет снизить требования к точности геометрического совмещения спектральных изображений и получать цветные изображения с пространственным разрешением панхроматической съемки. В соответствии с этим алгоритмом спектральные компоненты для режима съемки, когда имеются одно панхроматическое и два спектральных изображения, формируются следующим образом:

$$d_r = \frac{3\hat{b}_r^*}{b_p + \hat{b}_b^* + \hat{b}_r^*} b_p, \quad d_g = b_p, \quad d_b = \frac{3\hat{b}_b^*}{b_p + \hat{b}_b^* + \hat{b}_r^*} b_p, \quad (13)$$

$$\hat{B}_b^* = \hat{B}_b \otimes \hat{h}_{j \times j}, \quad \hat{B}_r^* = \hat{B}_r \otimes \hat{h}_{j \times j},$$

где \otimes – операция свертки с маской размытия \hat{h} размером $j \times j$ элементов.

Для режима RGB-съемки модифицированные спектрзональные компоненты изображения D формируются следующим образом:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{M}\mathbf{B}, \quad \mathbf{B} = [\hat{B}_b, B_g, \hat{B}_r]^T, \quad \mathbf{Y} = [Y, C_b, C_r]^T, \quad (14)$$

$$C_b^* = C_b \otimes h_{j \times j}, \quad C_r^* = C_r \otimes h_{j \times j}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Y}^*, \quad \mathbf{Y}^* = [Y, C_b^*, C_r^*]^T,$$

где \mathbf{M} , \mathbf{M}^{-1} – матрицы прямого и обратного преобразования цветового пространства. Результат работы модуляционного алгоритма представлен на рис. 5.

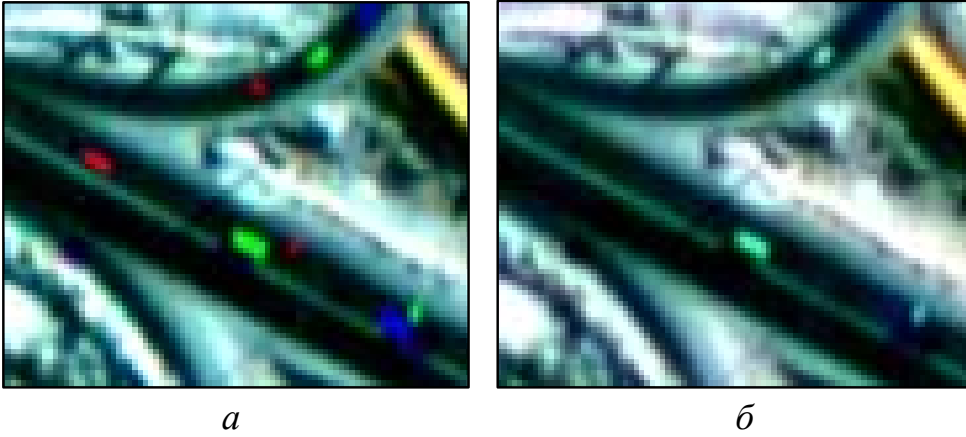


Рис. 5. Маскирование движущихся объектов: исходный (*a*) и результирующий (*б*) снимки

Комплексирование тепловизионных снимков предложено выполнять в два этапа. На первом этапе выполняется радиометрическая коррекция тепловизионных снимков по результатам съемки опорных излучателей. Если ПЗС-элемент не сбойный, то

$$b_l^*(m_j, n_j) = \frac{b_{\text{э}}^+ - b_{\text{э}}^-}{\bar{b}_j^+(n_j) - \bar{b}_j^-(n_j)} [b_j(m_j, n_j) - \bar{b}_j^-(n_j)] + b_{\text{э}}^-,$$

$$b_{\text{э}}^- = \frac{1}{JN\Delta M^- - N_{\text{сб}}} \sum_{j=1}^J \sum_{n_j=1}^N \sum_{m_j=M^-}^{M^- + \Delta M^-} b_j(m_j, n_j),$$

$$b_{\text{э}}^+ = \frac{1}{JN\Delta M^+ - N_{\text{сб}}} \sum_{j=1}^J \sum_{n_j=1}^N \sum_{m_j=M^+}^{M^+ + \Delta M^+} b_j(m_j, n_j), \quad \bar{b}_j^+(n_j) = \frac{1}{\Delta M^+} \sum_{m_j=M^+}^{M^+ + \Delta M^+} b_j(m_j, n_j),$$

$$\bar{b}_j^-(n_j) = \frac{1}{\Delta M^-} \sum_{m_j=M^-}^{M^- + \Delta M^-} b_j(m_j, n_j),$$

где ΔM^- , ΔM^+ – количество столбцов изображения, принадлежащих холодному и горячему эталонному источнику, $N_{\text{сб}}$ – общее количество сбойных элементов в J рядах матрицы.

На втором этапе совместно выполняются операции геометрического и взвешенного радиометрического комплексирования:

$$d(m, n) = W_1(n_1)b_1(m_1, n_1) + W_2(n_2)b_2(m_2, n_2) + W_3(n_3)b_3(m_3, n_3) + W_4(n_4)b_4(m_4, n_4), \quad (16)$$

$$m_j = f_m(m, n), \quad n_j = f_n(m, n),$$

где $W_j(n_j)$ – вес пикселя изображения, рассчитываемый на основе показателей качества ПЗС-элементов; f_m, f_n – функции геометрического соответствия.

Предложенный алгоритм позволяет увеличить вертикальное разрешение результирующего снимка в два раза и соотношение сигнал/шум более чем в 3 раза.

Результаты выполнения этапов комплексирования тепловизионных снимков показаны на рис. 6.

В главе 4 рассмотрены алгоритмы организации вычислительного процесса в системах комплексирования изображений, а также структуры программного обеспечения формирования цветосинтезированных и тепловизионных снимков.

Предложен комплекс алгоритмов по организации высокоскоростного вычислительного процесса, включающий:

- алгоритм хэш-тейловой организации видеоданных в памяти компьютера, обеспечивающий высокую скорость доступа к спутниковым изображениям сверхбольшого объема в уменьшенных масштабах при визуализации и обработке;
- механизмы буферизации видеоданных, что позволяет ускорить видеоинформационный обмен между различными уровнями памяти;
- распараллеливание вычислительного процесса по имеющимся ядрам процессоров и использование инструкций SSE и SSE2.

Хэш-тейловое представление основано на разбиении матрицы видеоданных на тейлы, в которых фрагменты строк изображения хэшируются с определенным шагом. Для исключения перезагрузки строк при просмотре и обработке изображения в уменьшенных масштабах реализована так называемая подмена строк. В отличие от известных алгоритмов хэш-тейловое представление не требует дополнительного хранения в памяти и на диске нескольких пирамидальных уровней изображения.

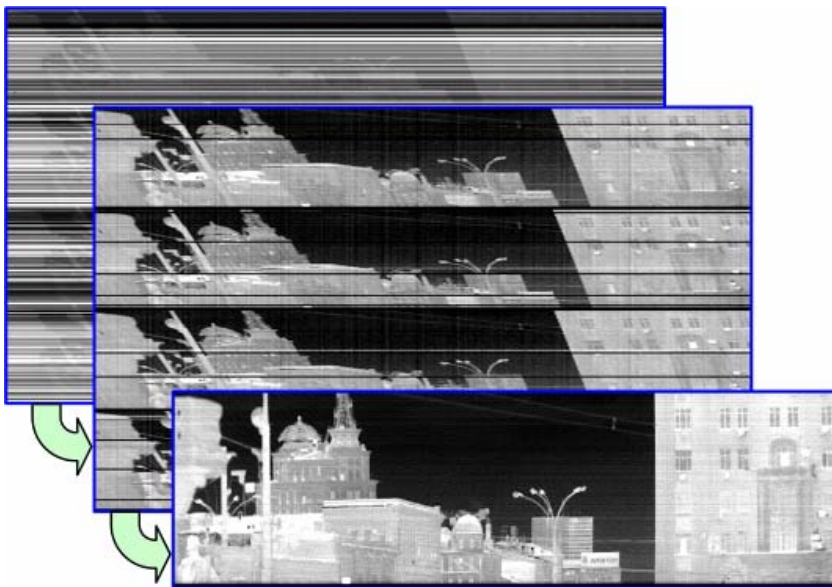


Рис. 6. Этапы получения тепловизионных изображений

Для реализации технологии высокоскоростного виртуального комплексирования предложена двухуровневая схема ис-

Для реализации технологии высокоскоростного виртуального комплексирования предложена двухуровневая схема ис-

пользования оперативной памяти, позволяющая повысить быстродействие по отношению к безбуферной обработке в 3,9 раза.

Предложены алгоритмы распараллеливания корреляционно-экстремального поиска и формирования строки цветного изображения на многоядерной ПЭВМ. На рис. 7 представлены временные характеристики при распараллеливании загушения триангуляционной сети с использованием многопроцессорной обработки.

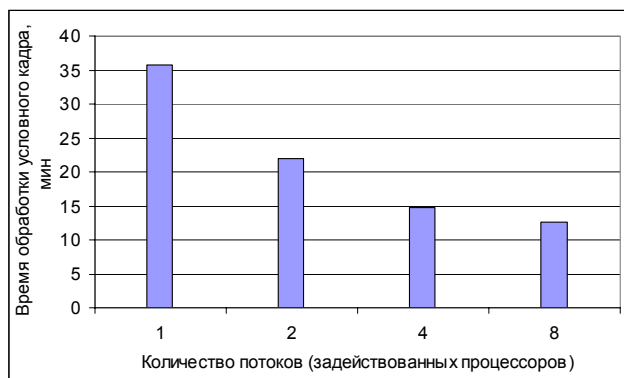


Рис. 7. Зависимость времени загушения триангуляционной сети от количества процессоров

Замеры времени проводились на ПЭВМ с четырьмя двоядерными процессорами Intel Xeon 3ГГц и объемом ОП 8 ГБ. Алгоритмы обработки запускались в один, два, четыре и восемь потоков. Видно, что время обработки при вовлечении всех восьми ядер процессоров меньше в 2,7 раза по сравнению с одноядерной обработкой.

Рассмотрены структуры программного обеспечения комплексирования изображений по данным от КА «Ресурс-ДК» и «Метеор-М». Это программное обеспечение на уровне подсистем входит в ряд программных комплексов каталогизации и формирования выходной продукции: GeoScan, OrthoNormScan, ScanCatalog, MobilCatalog, Meteor-SatN. Данные комплексы успешно функционируют на центрах приема и обработки спутниковой информации: в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ), г. Москва; Центрах приема спутниковой информации г. Самары, Еревана; ГУ «НИЦ «Планета»; НИИ точных приборов, г. Москва; Российском НИИ космического приборостроения (ФГУП «РНИИ КП») и др.

Для комплексирования видеоданных от ИК-матрицы разработан программный комплекс «Панорама», который занимает 1,15 МБ дискового пространства и требует для работы 240 МБ свободной оперативной памяти. Этот программный комплекс совместно с аппаратурой тепловизионного наблюдения получил эффективное внедрение в Российском НИИ космического приборостроения и ЗАО «Центр наукоемких технологий».

Рассмотренные программные комплексы реализованы на языке программирования C++, в среде программирования MS Visual C++ 6.0 в операционной среде MS Windows 2000. Многолетнее практическое использование созданного программного обеспечения подтвердило эффективность предложенных технических решений, что отражено в актах по практическому использованию результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных исследований решена важная научно-техническая задача, связанная с созданием алгоритмического и программного обеспечения систем комплексирования изображений от многоматричных сканирующих устройств. К основным научным и практическим результатам диссертационной работы относятся:

1. Анализ уровней взаимных геометрических искажений разновременных снимков и обоснование требований к алгоритмам и технологиям комплексирования разновременных изображений.

2. Аналитическая модель геометрического совмещения разновременных спутниковых снимков, основанная на численном обращении прямых уравнений геодезической привязки и используемая для создания цветных снимков по видеоданным среднего пространственного разрешения от КА «Метеор-М».

3. Алгоритм поиска одноименных точек на спектральнональных снимках по их пирамидально представленным фрагментам, что позволяет надежно идентифицировать одинаковые сюжеты в условиях случайных пространственных расогласований значительной величины.

4. Аналитико-регрессионный алгоритм координатного соответствия спектральнональных снимков, который основан на математических соотношениях, учитывающих изменение углов ориентации КА во время съемки и на триангуляционной модели геометрического соответствия изображений, позволяющей совмещать снимки с рельефными искажениями. Алгоритм применяется для получения цветных изображений по обзорным и детальным снимкам от КА высокодетального наблюдения.

5. Алгоритмы синтеза спектральнональных RGB-компонент, позволяющие формировать недостающие составляющие и получать высококачественные цветные изображения с высоким пространственным разрешением.

6. Алгоритмы комплексирования ИК-изображений, основанные на радиометрической коррекции по результатам съемки опорных излучателей и геометрическом и радиометрическом комплексировании видеоданных. Алгоритм позволяет формировать высококачественные тепловизионные снимки с повышенным вертикальным разрешением и увеличенным отношением сигнал/шум.

7. Комплекс алгоритмов по реализации высокоскоростных систем комплексирования видеоданных, включающий:

- хэш-тейловое представление видеоданных в памяти компьютера, обеспечивающее высокую скорость доступа к спутниковым изображениям сверхбольшого объема;
- механизмы буферизации видеоданных, позволяющие ускорить видеоинформационный обмен между различными уровнями памяти;
- распараллеливание вычислительного процесса по имеющимся ядрам процессоров и использование инструкций SSE и SSE2.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Алгоритм синтеза изображений в панорамной тепловизионной системе наблюдения // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. РГПУ, Рязань, 2006. С. 69–76.
2. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование непрерывного изображения на основе видеоданных от многорядной тепловизионной линейки // Тез. докл. XI всероссийской науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2006. С. 153–154.
3. Светелкин П.Н. Восстановление изображений, формируемых многорядными линейками приемников с зарядовой связью в системах тепловидения // Тез. докл. XVIII всероссийской науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке, проектировании, производстве». Нижний Новгород, 2006. С. 22.
4. Светелкин П.Н. Технология определения начальных параметров взаимного смещения изображений от КА «Ресурс-ДК» для их последующего комплексирования // Тез. докл. XII всероссийской науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». РГРТУ, Рязань, 2007. С. 313–315.
5. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Оперативное совмещение спектрально-нальных изображений при цветосинтезе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 22, 2007. С. 3–7.
6. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Геометрическое комплексирование спектрально-нальных изображений при цветосинтезе // Тез. докл. 5-й международной науч.-техн. конф. «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 254–255.
7. Побаруев В.И., Светелкин П.Н. Применение методов пирамидального представления при обработке и визуализации цветосинтезированных изображений // Тез. докл. всероссийской науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект 2007)». Тула, 2007. С. 77.
8. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Побаруев В.И., Светелкин П.Н. Организация видеоинформационного обмена в программной системе обработки изображений // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. С. 41-47.
9. Светелкин П.Н. Организация вычислительного процесса при формировании цветосинтезированных изображений // Тез. докл. 15-й международной науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2008. С. 133–135.
10. Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Алгоритмы геометрического совмещения спектрально-нальных изображений от КА «Ресурс-ДК» // Тез. докл. XIII всероссийской науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». РГРТУ, Рязань, 2008. С. 64–65.
11. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Алгоритмы формирования цветосинтезированных изображений по данным панхроматической и спектрально-нальной съемки // Тез. докл. VIII международной конф. «Оптико-электронные приборы

и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации (Распознавание-2008)». Курск, 2008. С. 190–191.

12. Гомозов О.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Алгоритмы формирования цветосинтезированных изображений по информации от спутника «Ресурс-ДК» // Тез. докл. 6-й всероссийской открытой ежегодной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 2008.

13. Кузнецов А.Е., Пресняков О.А., Светелкин П.Н. Модели координатного соответствия спектрально-аналитических снимков сверхвысокого разрешения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, №2 (выпуск 28). 2009. С. 12–17.

14. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Оценка взаимных геометрических искажений цветосинтезированных изображений. РГРТУ, Рязань, 2009. 6 с. Деп. в ВИМИ. Исходящий № ДО9045 от 24.02.09.

15. Кузнецов А.Е., Нефедов В.И., Светелкин П.Н. Создание цветосинтезированных изображений по данным аппаратуры КМСС космического аппарата «Метеор-М». РГРТУ, Рязань, 2009. 14 с. Деп. в ВИМИ. Исходящий № ДО9046 от 25.06.09.

16. Кузнецов А.Е., Максимов С.В., Светелкин П.Н. Формирование цветосинтезированных изображений по данным разновременной космической съемки Земли // Тез. докл. всероссийской науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества». СамНЦ РАН. Самара, 2009. С. 187–188.

17. Кузнецов А.Е., Светелкин П.Н. Формирование цветных снимков по спутниковым изображениям среднего и высокого пространственного разрешения // Цифровая обработка сигналов. 2009. №3. С. 36–40.

Светелкин Павел Николаевич

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.