

*На правах рукописи*

**ПОШЕХОНОВ Василий Ильич**

**АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ  
СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ДАННЫХ ОТ СИСТЕМ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Рязань 2010**

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, доцент  
**Муртазов Андрей Константинович**

Ведущая организация: **Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии «Планета»,  
г. Москва**

Защита состоится **22 декабря 2010 года в 12 ч** на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.211.01 в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотех-  
нический университет» по адресу:  
**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

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

Автореферат разослан 19 ноября 2010 года.

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

**Пржегорлинский В.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В ряде современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для формирования изображений подстилающей поверхности в нескольких спектральных диапазонах используется принцип пространственного разделения потока отраженной лучистой энергии по нескольким оптико-электронным преобразователям (ОЭП). Для этого в фокальной плоскости сканирующего устройства устанавливаются с небольшим смещением друг относительно друга вдоль направления полета спутника одиночные линейки или составные матрицы на базе приборов с зарядовой связью (ПЗС) с одномоментной регистрацией или работающие в режиме накопления заряда. Для обеспечения спектрально-зональной съемки перед каждым ОЭП устанавливают соответствующие полосовые светофильтры. Преимущество данного подхода заключается в отсутствии традиционно используемой при построении сканирующих устройств сложной и дорогостоящей спектроразделительной системы, которая приводит к ослаблению регистрируемого сигнала и снижению радиометрического разрешения видеоинформации.

В соответствии с рассмотренным принципом спроектированы: съемочное устройство высокого разрешения «Геотон-Л1» космического аппарата (КА) «Ресурс-ДК», аппаратура комплекса многозональной сканерной съемки (КМСС) гидрометеорологического спутника «Метеор-М», а также съемочные устройства на проектируемом КА «Ресурс-П». В данных системах наблюдение одних и тех же объектов подстилающей поверхности в разных спектральных диапазонах происходит, во-первых, с небольшой временной задержкой, а во-вторых, под разными углами от надира. Отсюда возникает возможность стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений, что позволяет получать информацию о трехмерной структуре сцены и решать ряд важных практических задач, связанных с определением высоты верхней границы и скорости движения облачности, объёмным дешифрированием снимков и др.

В отличие от традиционно используемых вариантов реализации стереоскопических наблюдений на одном витке полета спутника, основанных на применении нескольких съемочных устройств или сложных механизмов управления движением КА, каких-либо доработок рассмотренные системы спектрально-зональной съемки не требуют. Однако вопросы стереообработки получаемых от них изображений и формирования востребованных практикой информационных продуктов оставлены без внимания. С учетом этого в диссертации даётся решение актуальной научно-технической задачи, связанной с созданием алгоритмического и математического обеспечения стереофотограмметрической обработки информации от систем спектрально-зональной съемки земной поверхности и направленной на расширение сферы практического применения средств ДЗЗ.

**Степень разработанности темы.** Проблемы обработки спутниковых изображений достаточно широко отражены в трудах Агапова С.В., Асмуса В.В., Журкина И.Г., Лобанова А.Н., Лупяна Е.А., Погорелова В.В., Тюфлина Ю.С., Урмаева М.С., Ackermann F., 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.

Вопросы стереофотограмметрической обработки изображений рассматривались в работах многих авторов, на сегодняшний день имеется ряд программных реализаций этой функции в известных геоинформационных системах (ГИС). К сожалению, непосредственное использование готовых ГИС для обработки спектрально-зональных стереоизображений затруднительно, поскольку, во-первых, эти системы базируются на обобщенных моделях формирования сканерных снимков, использование которых для ориентирования отдельных кадров требует большого числа опорных точек, в то время как необходимо оперативно обрабатывать протяженные маршруты съемки с изменяющейся ориентацией спутника; во-вторых, с низкой достоверностью идентифицируются одноименные точки на стереоизображениях разного спектрального содержания, что требует большого количества ручных операций по контролю и проверке результатов; в-третьих, данные ГИС не позволяют формировать важные для практики информационные продукты по данным от спектрально-зональных съемочных устройств.

В ряде работ, связанных с разработкой математических моделей сканерной съемки, для определения элементов внешнего ориентирования применяется метод дифференциального уточнения параметров с использованием опорной информации. Однако при этом не всегда удается достичь высокой точности расчетов, поскольку наряду с ошибками динамических параметров внешнего ориентирования в моделях присутствуют и статические погрешности, вызванные неточностью задания элементов внутреннего ориентирования съемочных устройств и установочных углов навигационного оборудования. Кроме того, в известных решениях не учитываются особенности спектрально-зональной съемки, для которой законы изменения элементов внешнего ориентирования в процессе получения определенных участков снимков одинаковы. В этой связи важными являются исследования по получению моделей формирования видеоданных сканирующими устройствами в условиях орбитального полета, для которых представляется возможным надежно определить статические параметры и оперативно устранить погрешности динамических параметров при ограниченном объеме опорной информации.

В недостаточной степени рассмотрены вопросы высоконадежного автоматического поиска одноименных и опорных точек на спектрально-зональных изображениях при их значительном координатном рассогласовании. Оставлена без внимания проблема обработки стереоизображений, полученных при съемке движущихся объектов, что приводит к смещению координат одноименных точек не только в строчном, но и в кадровом направлениях на стереопаре.

Актуальными являются исследования по организации высокоскоростного вычислительного процесса на современных многоядерных и графических процессорах, что является важным при создании высокопроизводительных систем стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений.

**Цель диссертации** состоит в разработке математических моделей и алгоритмов стереофотограмметрической обработки спектрозональной спутниковой видеоинформации для проектирования на их основе программного обеспечения оперативного получения трехмерных изображений земной поверхности от систем ДЗЗ, реализующих принцип разновременной съемки подстилающей поверхности.

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

- обоснование возможности практического применения результатов обработки спектрозональных стереоизображений земной поверхности;
- разработка моделей формирования и стереофотограмметрической обработки спектрозональных спутниковых снимков;
- разработка алгоритмов совместного анализа разновременных изображений;
- проектирование программного обеспечения стереообработки данных от систем спектрозональной съемки Земли.

**Научная новизна** работы определяется тем, что в ней разрабатываются математические модели, описывающие процесс формирования изображений с учетом статических и динамических искажающих факторов, эффективные алгоритмы совместного анализа снимков разных спектральных диапазонов и организации вычислительного процесса, позволяющие выполнять стереофотограмметрическую обработку видеоданных от систем разновременной спектрозональной съемки для получения новых видов информационных продуктов.

**На защиту выносятся** следующие новые научные результаты:

- предложения по практическому применению результатов стереообработки данных от систем спектрозональной съемки Земли;
- математическая модель формирования и стереофотограмметрической обработки спектрозональных видеоданных, основанная на полиномиальном описании геометрических параметров сканерной съемочной системы, методике её калибровки по опорным и одноименным точкам, а также алгоритмах оперативного уточнения элементов внешнего ориентирования;
- алгоритмы установления соответствия точек на разновременных спектрозональных изображениях, основанные на формировании двумерных карт диспаратностей по стереопарам и отбраковке недостоверных точек с помощью симметричного пирамидального критерия;
- комплекс алгоритмов высокоскоростной стереообработки снимков, основанных на совместном использовании графического и центрального процессоров, тейловой организации вычислений, распараллеливании функций и конвейерной обработке видеоданных.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что на базе предложенных математических моделей и алгоритмов разработаны модули для программных комплексов PlanetaMeteor, OrthoNormScan, GeoScan, MeteorSatN, обеспечивающие высокоточную геопривязку и стереофотограмметрическую обработку изображений от КА «Метеор-М» и «Ресурс-ДК» в режиме как спектрозо-

нальной, так и межмаршрутной съемки. С использованием этих модулей выполняется оперативное получение трехмерных моделей подстилающей поверхности, надежная сегментация облачных образований, в том числе на фоне снежного покрова, а также впервые в отечественной практике реализована технология определения высоты верхней границы и скорости движения облачности по данным от пассивных сканирующих устройств.

**Реализация и внедрение.** Диссертационная работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР № 4-10, № 12-06, № 14-05, № 30-06, № 39-09. Результаты диссертационной работы в виде программного обеспечения внедрены в ОАО «НИИ точных приборов», ОАО «Российские космические системы» и используются на центрах приема и обработки спутниковой информации в г. Москве, Новосибирске, Хабаровске и г. Минске Республики Беларусь.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 3 международных и 8 всероссийских научно-технических конференциях: международных конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2008, 2010); международной конференции «Оптико-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, 2007 – 2 доклада, 2008, 2009); всероссийских конференциях «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула, 2007, 2009); всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2008, 2009); всероссийской конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2010).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 работа: 9 статей (в том числе 4 статьи по списку ВАК), 12 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 175 страниц, 48 рисунков и 8 таблиц. Список литературы на 14 страницах включает 135 наименований. В приложении на 2 страницах приведены акты внедрения результатов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В главе 1 рассматривается принцип формирования стереоизображений в системах спектральной съемки, обосновывается возможность практического применения результатов их стереообработки, анализируются известные математические модели и алгоритмы обработки стереоснимков, определяются задачи диссертационного исследования.*

Выполнен анализ современных сканерных систем стереоскопического наблюдения Земли с точки зрения оперативности получения информации и сложности технической реализации. Показано, что спектрональные съемочные устройства, реализующие принцип одновременного наблюдения подстилающей поверхности, в отличие от традиционных подходов позволяют оперативно и без дополнительных технических затрат получать стереопары по изображениям разных спектральных каналов. На рис. 1 на примере сканирующего устройства, формирующего видеоданные в трех спектральных диапазонах, поясняется принцип стереонаблюдения объектов земной поверхности.

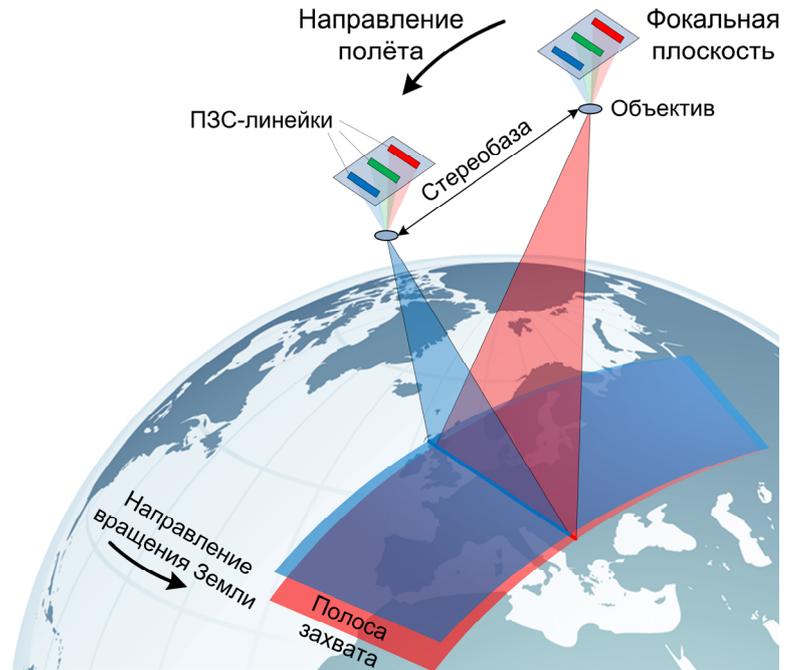


Рис. 1. Принцип формирования стереоснимков в системах спектрональной съемки

Выполнена априорная оценка точности определения высоты и скорости движения объектов, наблюдаемых на спектрональных изображениях. На основе сравнения полученных оценок с альтернативными источниками подобной информации показано, что помимо получения цветных снимков подстилающей поверхности открываются новые дополнительные возможности практического использования данных от систем спектрональной съемки Земли. К числу новых информационных продуктов, оперативно получаемых по результатам стереофотограмметрической обработки, относятся: анаглифические стереоизображения; растровые 3D-модели подстилающей поверхности; карты высоты верхней границы и скорости движения облачности; результаты высоконадежной сегментации облачных образований.

Проанализированы известные математические модели формирования сканерных изображений. Показано, что для высокоточного определения трехмерных координат наблюдаемых на спектрональных изображениях объектов должны решаться задачи геометрической калибровки съемочного устройства для уточнения статических параметров модели и ориентирования снимков для коррекции параметров линейного и углового движения спутника. Отмечено, что эти вопросы представляют собой сложную научно-техническую проблему и использование для их решения известных подходов вызывает определенные трудности в реализации и не отвечает требованиям практики по оперативности обработки. Сформулированы требования по разработке математической модели формирования видеоданных в условиях орбитального полета и алгоритмов уточнения элементов внутреннего и внешнего ориентирования, обладающих

вычислительной устойчивостью и учитывающих специфику регистрации спектрональных изображений.

Рассмотрены алгоритмы установления соответствия одноименных точек на паре изображений. Показана необходимость в дополнительных исследованиях, связанных с повышением надежности поиска в условиях значительного координатного рассогласования обрабатываемых снимков, полученных в разных спектральных диапазонах. Отмечено, что для корректной обработки разновременных стереоизображений требуется модификация известных алгоритмов формирования карты диспаратности с учетом рассогласования координат одноименных точек как в строчном, так и в кадровом направлениях.

По результатам выполненного анализа сформулированы основные задачи диссертационного исследования: создание моделей формирования изображений для выполнения высокоточных стереоизмерений, разработка алгоритмов совместного анализа снимков с целью надежного установления соответствия одноименных точек, практическая реализация высокопроизводительной стереофотограмметрической обработки спектрональных изображений.

*В главе 2 разрабатывается высокоточная математическая модель формирования спектрональных изображений, лежащая в основе их стереофотограмметрической обработки.*

Предложена модель геометрического функционирования сканерной съемочной системы, описывающая с помощью полиномиальной функции компоненты вектора направляющих косинусов визирного луча в зависимости от номера светочувствительного элемента  $m$  для каждой ПЗС-линейки заданного спектрального канала  $\ell$ :

$$\mathbf{r}_{A\ell}(m) = \sum_{i=0}^N \mathbf{a}_i m^i, \quad \mathbf{a}_i = (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi})^T;$$

$$\mathbf{r}_{A\ell}(m) = \mathbf{A}_\ell \mathbf{m}, \quad \mathbf{A}_\ell = [\mathbf{a}_0 \ \mathbf{a}_1 \ \dots \ \mathbf{a}_N], \quad \mathbf{m} = (1, m, m^2, \dots, m^N)^T,$$

где  $\mathbf{r}_{A\ell}(m)$  – вектор, задающий направление визирного луча в приборной системе координат звездного координатора.

В отличие от известных подходов, эта модель комплексно учитывает влияние сложных геометрических искажений, обусловленных элементами внутреннего ориентирования сканера, включая дисторсию оптической схемы объектива, установочных углов измерительной и съемочной аппаратуры, что позволяет сократить число неизвестных параметров, которые возможно уточнить по опорной информации. В соответствии с данной моделью вектор  $\mathbf{r}_{G\ell}$  направления визирного луча в гринвичской геоцентрической системе координат, требуемый для решения задач стереофотограмметрической обработки, определяется по формуле:

$$\mathbf{r}_{G\ell}(m, n) = \mathbf{R}_{GA}(t) \mathbf{A}_\ell \mathbf{m}.$$

Здесь  $\mathbf{R}_{GA}(t)$  – матрица, задающая ориентацию звездного координатора на заданный момент времени  $t = t_0 + n/f$ ;  $t_0$  – время начала формирования видеоданных;  $n$  – номер строки изображения;  $f$  – строчная частота сканирования.

На основе модели получены математические соотношения  $\varphi = \Phi(m, n, h)$  и  $\lambda = F(m, n, h)$  для геопривязки снимков, лежащие в основе формирования анаглифических стереоизображений. Данные функции задают для произвольного пикселя  $(m, n)$  геодезические координаты точки пересечения визирного луча с общеземным эллипсоидом на некоторой высоте  $h$ . Получены формулы для расчета как трехмерных координат наблюдаемых на спектрональных изображениях объектов, так и скорости их перемещения поперек трассы полета КА.

Разработана методика геометрической калибровки сканерной съемочной системы, описываемой полиномиальной моделью, основанная на определении неизвестных параметров модели по методу наименьших квадратов с нелинейными ограничениями-равенствами. Такой подход позволяет использовать как опорные, так и одноименные точки при составлении уравнений связи точек снимков и наблюдаемых объектов в трехмерной системе координат для уточнения абсолютных и относительных геометрических параметров спектрональных сканирующих устройств.

В соответствии с методикой определение вектора неизвестных параметров  $\theta$  сводится к решению задачи минимизации функционала

$$Q(\zeta) = (\mathbf{z} - \zeta)^T \mathbf{V}_0^{-1} (\mathbf{z} - \zeta) \rightarrow \min$$

с ограничениями вида  $\mathbf{e}(\theta, \zeta) = \mathbf{0}$ . Вектор  $\theta$  включает компоненты матриц  $\mathbf{A}_\ell$ ,  $\ell = \overline{1, L}$ , картографические координаты точек местности  $(\tilde{x}_c, \tilde{y}_c, \tilde{h}_c)$ ,  $c = \overline{1, C}$ , соответствующие измеренным на изображениях одноименным точкам. Вектор измерений  $\zeta$  включает координаты опорных точек  $(x_k, y_k, h_k)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , параметры внешнего ориентирования модели и пиксельные координаты точек. Измерения содержат случайные ошибки, таким образом, наблюдаются зашумленные значения  $\mathbf{z} = \zeta + \varepsilon$ ,  $\varepsilon \in N(0, \mathbf{V}_0)$ , где  $\mathbf{V}_0$  – ковариационная матрица погрешностей.

Каждая точка  $(x, y, h)$  должна лежать на восстановленном по навигационным измерениям и калибровочным коэффициентам  $\mathbf{A}_\ell$  проектирующем луче, сформировавшем изображение точки  $(m, n)$  на снимке. Отсюда формулируются ограничения, задаваемые для опорных и одноименных точек:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_k(\theta, \zeta) &= \mathbf{d}(m_k, n_k, x_k, y_k, h_k) = \mathbf{0}, \quad k = \overline{1, K}; \\ \mathbf{e}_{K+Lc+\ell}(\theta, \zeta) &= \mathbf{d}(m_{c\ell}, n_{c\ell}, \tilde{x}_c, \tilde{y}_c, \tilde{h}_c) = \mathbf{0}, \quad c = \overline{1, C}, \quad \ell = \overline{1, L}, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{d}$  – вектор рассогласования координат заданной точки трехмерного пространства и ближайшей точки, лежащей на визирном луче.

Поставленная задача минимизации решается итерационно с помощью определения поправок  $\delta\zeta_i$  и  $\delta\theta_i$  к текущим значениям  $\zeta_i$  и  $\theta_i$  на  $i$ -м шаге по формулам:

$$\begin{aligned} \delta\theta_i &= \hat{\theta} - \theta_i = -\mathbf{C}_i^{-1} \mathbf{T}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} [\mathbf{e}(\theta_i, \zeta_i) + \mathbf{S}_i (\mathbf{z} - \zeta_i)]; \\ \delta\zeta_i &= \hat{\zeta} - \zeta_i = \mathbf{z} - \zeta_i - \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} [\mathbf{e}(\theta_i, \zeta_i) + \mathbf{S}_i (\mathbf{z} - \zeta_i) + \mathbf{T}_i \delta\theta_i], \end{aligned}$$

где  $\mathbf{C}_i = \mathbf{T}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{T}_i$ ;  $\mathbf{D}_i = \mathbf{S}_i \mathbf{V}_0 \mathbf{S}_i^T$ ;  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{T}$  – матрицы частных производных ограничений  $\mathbf{e}$  по параметрам  $\boldsymbol{\theta}$  и измерениям  $\boldsymbol{\zeta}$  соответственно.

Получены математические соотношения для оценки требуемого числа опорных точек, при использовании которых удается устранить влияние погрешностей навигационных измерений, определения геодезических и пиксельных координат. С целью контроля точности получаемых значений статических параметров модели получены выражения для оценки погрешностей  $\sigma_\alpha$ ,  $\sigma_\beta$ ,  $\sigma_\gamma$  определения углового положения визирного луча  $\mathbf{r}_{Al}(m)$ . Для этого вначале рассчитываются дисперсии и ковариации компонентов вектора  $\mathbf{r}_{Al} = (X, Y, Z)^T$ ,

$$\sigma_i^2 = \mathbf{m}^T \mathbf{V}_i \mathbf{m}; \quad \sigma_{ij} = \mathbf{m}^T \mathbf{V}_{ij} \mathbf{m}, \quad \forall i, j \in \{X, Y, Z\}, \quad i \neq j,$$

где матрицы  $\mathbf{V}_i$ ,  $\mathbf{V}_{ij}$  размером  $(N+1) \times (N+1)$  компонентов задают точность представления коэффициентов калибровочных полиномов вдоль соответствующих осей и определяются по ковариационной матрице полученных на последней итерации оценок  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  неизвестных параметров.

Тогда искомые оценки для каждого угла  $i \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$  рассчитываются по формуле

$$\sigma_i^2 = \left( \frac{\partial i}{\partial X} \right)^2 \sigma_X^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial Y} \right)^2 \sigma_Y^2 + \left( \frac{\partial i}{\partial Z} \right)^2 \sigma_Z^2 + 2 \frac{\partial i}{\partial X} \frac{\partial i}{\partial Y} \sigma_{XY} + 2 \frac{\partial i}{\partial X} \frac{\partial i}{\partial Z} \sigma_{XZ} + 2 \frac{\partial i}{\partial Y} \frac{\partial i}{\partial Z} \sigma_{YZ}.$$

Получены соотношения для оценки погрешности взаимного ориентирования отдельных ПЗС-линеек, которая определяет точность последующих стереофотограмметрических расчетов. Для этого оценивается точность определения угла  $\eta$  между векторами  $\mathbf{r}_{A1}(X_1, Y_1, Z_1)$  и  $\mathbf{r}_{A3}(X_3, Y_3, Z_3)$  направляющих косинусов визирных лучей для первого и третьего спектральных каналов, используемых для стереообработки:

$$\sigma_\eta^2 = \sum_{i \in G} \left( \frac{\partial \eta}{\partial i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i \in G} \sum_{\substack{j \in G \\ j \neq i}} \frac{\partial \eta}{\partial i} \frac{\partial \eta}{\partial j} \sigma_{ij}, \quad G = \{X_1, Y_1, Z_1, X_3, Y_3, Z_3\}.$$

Разработаны алгоритмы оперативного ориентирования спектральнональных изображений для случая, когда получение достаточного объема опорной информации затруднительно. Поскольку законы линейного и углового движения КА в процессе получения определенных участков снимков одинаковы, то с учетом высокой точности определения взаимного положения ПЗС-линеек разных спектральных каналов предложено выполнять совместное ориентирование всех изображений по одному набору параметров.

Показано, что основным источником погрешностей стереофотограмметрических расчетов являются ошибки определения угловых элементов внешнего ориентирования, для устранения которых с минимальным числом параметров достаточно уточнить ориентацию КА на начальный момент времени  $t_0$  и определить параметры дрейфа датчиков угловых скоростей. Для высокоточного нахождения данных параметров разработан двухэтапный подход, в соответствии с которым начальная оценка выполняется с использованием измерений звезд-

ного координатора, а затем корректируется по опорной информации. Предложено привлекать априорную информацию о высоте объекта местности для одноименных точек и оценивать её по существующим цифровым моделям рельефа. Апробация алгоритма показала, что это позволяет в оперативном режиме обеспечить высокую точность стереообработки протяженных маршрутов съемки даже без использования опорных точек.

*В главе 3 разрабатываются алгоритмы совместного анализа разновременных изображений, основная цель которых состоит в высокондежном установлении соответствия точек на паре снимков.*

Показано, что получение высокоточной информации о трехмерной структуре сцены с помощью разработанных моделей формирования изображений основано на решении задачи совместной обработки разновременных снимков. Сформулированы проблемные вопросы, которые необходимо решить на этапах предобработки исходных изображений, определения координат одноименных точек на паре снимков и опорных точек с использованием абрисов, получения карт диспаратностей по стереопаре и формирования трехмерных моделей сцены.

В рамках предварительной обработки изображений разработан алгоритм установления геометрического соответствия снимков  $I_1(m_1, n_1)$  и  $I_2(m_2, n_2)$ , под которым понимается устранение их масштабных искажений и взаимного разворота, с целью формирования идеальной стереопары. Алгоритм базируется на спроектированных прямых и обратных уравнениях геопривязки видеоданных:

$$\begin{cases} m_2 = \Phi_2^{-1}[\Phi_1(m_1, n_1), F_1(m_1, n_1)]; \\ n_2 = F_2^{-1}[\Phi_1(m_1, n_1), F_1(m_1, n_1)]. \end{cases}$$

Разработан алгоритм предварительной сегментации снимков, позволяющий исключать из последующей обработки однородные по яркости объекты, для которых идентифицировать одноименные точки не представляется возможным. Алгоритм основан на применении клеточного автомата с его предварительной автоматической инициализацией с использованием гистограммы значений СКО кодов яркости фрагментов изображения.

Выполнены исследования по анализу надежности и точности установления соответствия точек корреляционно-экстремальным алгоритмом в условиях значительного координатного рассогласования изображений разного спектрального содержания, на основе которых сделан ряд выводов:

- увеличение размера эталона приводит к практически линейному уменьшению числа ложных идентификаций, однако точность определения координат ухудшается из-за геометрических искажений в пределах сопоставляемых фрагментов стереоизображений;

- предварительный поиск характерных объектов позволяет сократить число ошибок установления соответствия точек до 20 %, установлено, что использование для этой цели алгоритма Харриса в среднем на 8 % эффективнее по отношению к традиционному дисперсионному критерию;

– на основе анализа с помощью ROC-кривых эффективности критериев отбраковки ненадежных точек показано, что алгоритм обратного поиска позволяет сократить долю исключаемых истинных точек в среднем на 33 % при том же уровне ошибочно принятых по сравнению с использованием порогового значения коэффициента корреляции и не зависит от дополнительных параметров, однако вычислительная сложность увеличивается в 2 раза.

Предложен двухшаговый алгоритм точного выделения угловых точек объектов, в соответствии с которым вначале применяется алгоритм Харриса с СКО фильтра Гаусса для усреднения производных, равным половине размера эталонного фрагмента, используемого для последующего установления соответствия точек, что обеспечивает минимальное число ложных идентификаций. Затем в небольшой области поиска выполняется повторное применение алгоритма с СКО, равным единице, для точной локализации характерного объекта.

Разработан каскадный критерий исключения ненадежных точек, позволяющий повысить эффективность отбраковки по сравнению с использованием только порогового значения коэффициента корреляции, а также снизить вычислительные затраты относительно алгоритма обратного поиска.

На основе выполненных исследований и предложенных алгоритмов сформулированы рекомендации по выбору основных параметров корреляционного алгоритма для следующих основных случаев:

- для поиска одноименных точек с целью минимизации ложных идентификаций использовать эталон  $32 \times 32$  пикселя с последующим применением каскадного критерия отбраковки;
- для поиска опорных точек по абрисам с целью обеспечения максимального числа правильных точек использовать эталон  $64 \times 64$  пикселя с последующим уточнением координат;
- при формировании карты диспаратности для получения высокодетальной информации и сокращения временных затрат использовать эталонный фрагмент малых размеров –  $5 \times 5$  пикселей.

Разработан оптимизационный алгоритм массовой идентификации одноименных точек на стереопаре, который в отличие от известных подходов обеспечивает одновременное формирование двух карт диспаратностей  $D_m$  и  $D_n$  в строчном и кадровом направлениях соответственно. Это позволяет надежно определять координаты одноименных точек на стереоизображениях, содержащих движущиеся объекты. Алгоритм основан на минимизации целевой функции  $E$ , включающей сумму цен сопоставления  $E_u$  всех одноименных точек стереопары и слагаемого  $E_c$ , задающего требование кусочной гладкости карт диспаратностей:

$$(D_m, D_n) = \arg \min_{D_m, D_n} E(D_m, D_n); E(D_m, D_n) = E_u(D_m, D_n) + E_c(D_m, D_n).$$

Разработан алгоритм минимизации функции  $E$  вдоль отдельных строк изображения, основанный на использовании принципа динамического программирования. Для этого формулируется задача поиска кратчайшего пути на

графе, схематичное изображение которого представлено на рис. 2, и выполняется накопление цены сопоставления  $L$  вдоль данной строки  $n = const$ :

$$L(1, d_m, d_n) = C(1, n, d_m, d_n); L(m, d_m, d_n) = C(m, n, d_m, d_n) + \\ + \min \left[ L(m-1, d_m, d_n), L(m-1, d_m-1, d_n) + P_1, L(m-1, d_m+1, d_n) + P_1, \right. \\ \left. L(m-1, d_m, d_n-1) + gP_1, L(m-1, d_m, d_n+1) + gP_1, \min_{i,j} L(m-1, i, j) + P_2 \right], \\ i = \overline{-l_m, l_m}, j = \overline{-l_n, l_n}, m = \overline{2, M},$$

где  $P_1, gP_1, P_2$  – определяемые функцией штрафов  $\rho$  значения, которые задаются при изменении диспаратности  $d_m$  или  $d_n$  между соседними пикселями;  $C(m, n, d_m, d_n)$  – цена сопоставления точек  $I_1(m, n)$  и  $I_2(m-d_m, n-d_n)$ ;  $l_m, l_n$  – размеры области поиска одноименных точек.

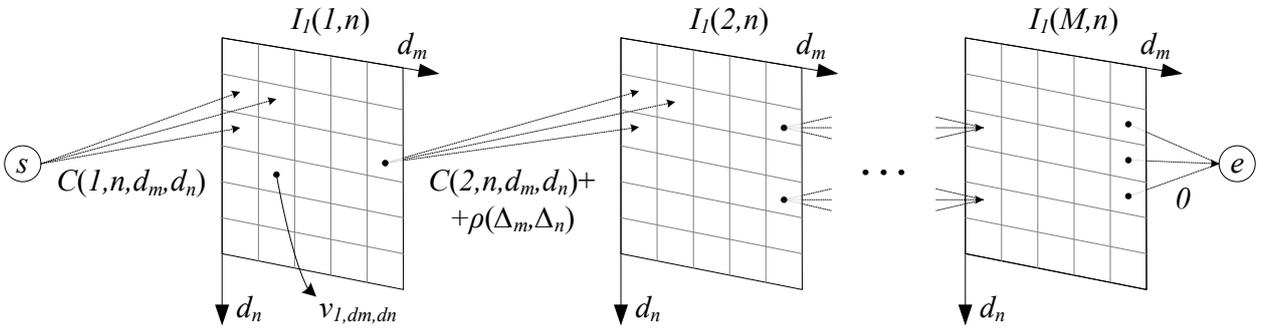


Рис. 2. Схематичное изображение графа для минимизации функции  $E$

Оптимальные значения смещений координат для последнего пикселя  $(M, n)$  в строке определяются по формуле

$$(D_m(M, n), D_n(M, n)) = \arg \min_{d_m, d_n} L(M, d_m, d_n).$$

Для получения остальных смещений используются таблицы обратного хода  $T_m, T_n$ . Апробация алгоритма показала, что обеспечить согласованность между отдельными строками изображения оказывается затруднительно, что приводит к характерной горизонтальной «полосатости» итоговых карт диспаратностей. Поэтому для повышения качества обработки аналогично алгоритму полуглобального сопоставления минимум функции  $E(D_m, D_n)$  аппроксимируется с помощью 1D-минимизаций вдоль  $k = 8$  направлений, задаваемых векторами  $\mathbf{r}_k = (r_{km}, r_{kn})$ ,  $\mathbf{r}_{k+1} = -\mathbf{r}_k$ ,  $r_{km} \in \{0, \pm 1\}$ ,  $r_{kn} \in \{0, \pm 1\}$ . Для этого вычисляются накопленные цены  $L_k$  для каждого направления, после чего определяются оптимальные смещения координат:

$$S(m, n, d_m, d_n) = \sum_k L_k(m, n, d_m, d_n); (D_m(m, n), D_n(m, n)) = \arg \min_{d_m, d_n} S(m, n, d_m, d_n).$$

По результатам практической апробации разработанного алгоритма на модельных стереоизображениях с известными смещениями координат одноименных точек показано, что надежность установления соответствия точек повышается более чем на 20 % в случае погрешностей ориентирования снимков

(смещения координат в кадровом направлении не более 2 пикселей) по сравнению с алгоритмом однокоординатного поиска.

Предложен алгоритм отбраковки ненадежных точек с помощью симметричного пирамидального критерия проверки согласованности изображений стереопары. Детальные карты  $D_m$  и  $D_n$ , полученные по исходным снимкам  $I_1$  и  $I_2$ , используются в качестве выходных, а для отбраковки в соответствии с алгоритмом обратного поиска формируются карты  $\hat{D}_m^1$  и  $\hat{D}_n^1$  по уменьшенным в 2 раза изображениям  $I_2^1$  и  $I_1^1$ . Критерий обеспечивает сокращение числа ложных точек на 15 %, а по быстродействию и числу ошибочно отбракованных истинных точек находится между симметричным и несимметричным алгоритмами.

Разработаны алгоритмы формирования трехмерных моделей наблюдаемых объектов, включая карты высот  $H$  и скоростей  $V$ , основанные на непосредственном использовании карт диспаратностей  $D_m$  и  $D_n$  или предварительном получении триангуляционной модели  $T$ , которая позволяет интерполировать отбракованные или исключенные области. Предложен итерационный двухшаговый алгоритм формирования триангуляционной модели, обладающий высоким быстродействием и позволяющий точно аппроксимировать исходные карты диспаратностей с использованием небольшого числа вершин.

*В главе 4 разрабатываются информационная технология и алгоритмы организации высокоскоростного вычислительного процесса, лежащие в основе программного обеспечения стереофотограмметрической обработки спектрально-зональных изображений.*

Спроектирована технология стереофотограмметрической обработки данных от систем спектрально-зональной съемки Земли, основанная на разработанных математических моделях и алгоритмах совместного анализа стереоизображений. Технология описывает процесс получения новых информационных продуктов, которые были рассмотрены в первой главе диссертации.

Предложен комплекс алгоритмов организации высокоскоростной стереообработки видеоданных с использованием современной вычислительной техники. При формировании карт диспаратностей на многоядерных и многопроцессорных ЭВМ разработан ряд решений, основанных на организации конвейерной обработки, что позволяет уменьшить влияние медленных операций ввода-вывода и обеспечить постоянную загрузку всех процессоров; применении параллельных вычислений при обработке потоков данных с использованием принципа SPMD на всех шагах алгоритма. Обоснована необходимость использования динамического расписания выполнения параллельной программы, что обусловлено сложностью распределения задач равной вычислительной трудоемкости на этапе минимизации целевой функции. Практическая апробация алгоритмов на ЭВМ с четырьмя двухядерными процессорами Intel Xeon 3 ГГц показала, что по сравнению с однопроцессорной обработкой обеспечивается повышение производительности в 6.2 раза.

Для вычисления нормализованной кросскорреляционной функции фрагментов изображений предложены алгоритмы, задействующие графический процессор (ГП) и основанные на распараллеливании процесса по координатному пространству области поиска, использовании тейловой организации вычислений с целью повышения арифметической интенсивности, оптимальном распределении общей нагрузки между центральным и графическим процессорами. На рис. 3 представлены графики ускорения вычислений при реализации корреляционно-экстремального алгоритма установления соответствия точек на ГП AMD Radeon HD4770, из которых следует, что время обработки удастся сократить до 25 раз. Оценки приведены по отношению к времени, полученному на ЦП Intel Core2Duo E8400 3 ГГц. Для этого алгоритм был реализован на ассемблере с использованием векторных команд SSE2, что обеспечило прирост производительности примерно в 2.7 раза относительно версии на языке С.

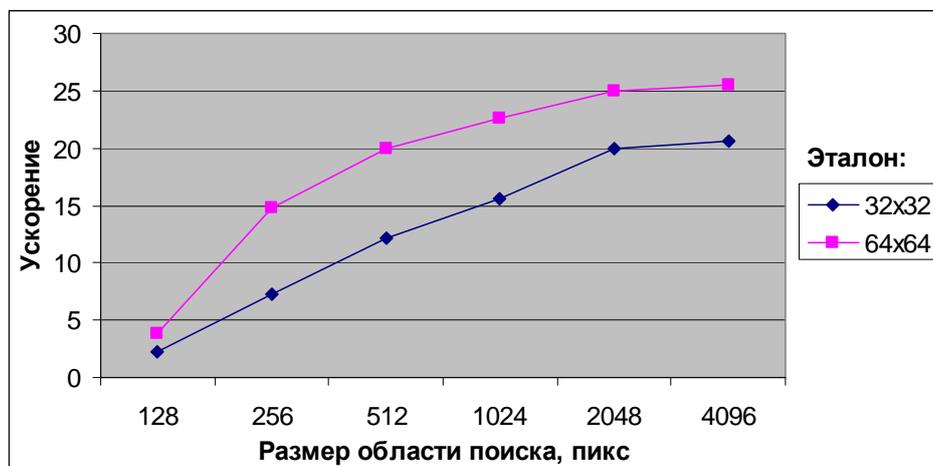


Рис. 3. Графики ускорения вычислений при реализации корреляционного алгоритма на графическом процессоре

Таким образом, за счет предложенных алгоритмических решений достигается более чем 10-кратное сокращение общего времени формирования выходных продуктов, которое для стереоизображений размером  $36000 \times 36000$  пикселей составляет порядка 3 часов на 8-процессорной ЭВМ.

Рассмотрены принципы построения и обобщенная структура специализированного программного обеспечения систем оперативной обработки спектрональных стереоизображений, которые были положены в основу реализации комплекса PlanetaMeteor. Разработанные программные модули получили применение в комплексах GeoScan, MeteorSatN, OrthoNormScan, которые введены в опытную эксплуатацию и используются для обработки изображений от космических систем ДЗЗ «Ресурс-ДК» и «Метеор-М».

Рассмотренные комплексы реализованы на языке программирования C++ в среде MS Visual Studio 2008 и предназначены для функционирования в составе ядра ГИС ERSet в операционных системах MS Windows 2000/XP/Vista/7. Практическое использование созданного программного обеспечения подтвердило эффективность предложенных в работе решений, что отражено в актах внедрения результатов диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача, связанная с разработкой алгоритмов и моделей стереофотограмметрической обработки данных от систем спектрозональной съемки Земли. Созданное на их основе программное обеспечение позволяет получать новые виды информационных продуктов, что расширяет сферу практического применения систем ДЗЗ, реализующих принцип пространственного разделения отраженного от подстилающей поверхности потока лучистой энергии по нескольким ОЭП. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ современных сканерных систем стереоскопического наблюдения Земли, показано, что спектрозональные съемочные устройства позволяют оперативно и без дополнительных технических затрат получать стереопары по изображениям разных спектральных каналов. Предложено выполнять стереофотограмметрическую обработку спектрозональных изображений в интересах решения гидрометеорологических задач, оценки качества информации при каталогизации, а также дешифрирования материалов съемки.

2. Разработана математическая модель формирования и стереофотограмметрической обработки спектрозональных изображений, включающая:

- модель геометрического функционирования сканерной съемочной системы, описывающую с помощью полиномиальной функции компоненты вектора направляющих косинусов визирного луча;

- методику геометрической калибровки съемочной системы, описываемой полиномиальной моделью, основанную на определении неизвестных параметров по методу наименьших квадратов с нелинейными ограничениями-равенствами;

- алгоритмы оперативного уточнения элементов внешнего ориентирования всей спектрозональной съемочной системы, основанные на комплексировании измерений датчиков угловых скоростей и звездного координатора, использовании одноименных точек с привлечением априорной информации о высоте местности по цифровой модели рельефа.

3. Разработан комплекс алгоритмов совместного анализа разновременных изображений, в том числе:

- алгоритм установления геометрического соответствия снимков, базирующийся на моделях геопривязки спектрозональных изображений, алгоритм сегментации снимков, основанный на использовании клеточного автомата с его предварительной автоматической инициализацией, позволяющий исключать из последующей обработки однородные по яркости объекты;

- двухшаговый алгоритм точного выделения угловых точек объектов, основанный на детекторе Харриса, с целью их последующей надежной идентификации на втором изображении;

- алгоритм формирования карт диспаратностей в строчном и кадровом направлениях на стереопаре, позволяющий обрабатывать стереоизображения в условиях значительных координатных рассогласований снимков;

- алгоритм отбраковки ненадежных точек с помощью симметричного пирамидального критерия проверки согласованности изображений стереопары;
- алгоритмы построения трехмерных моделей наблюдаемых объектов, включая карты высот и скоростей, основанные на непосредственном использовании карт диспаратностей или предварительном получении триангуляционной модели;
- итерационный двухшаговый алгоритм формирования триангуляционной модели, обладающий высоким быстродействием и позволяющий точно аппроксимировать исходные карты диспаратностей с использованием небольшого числа вершин.

4. Предложены технические решения по практической реализации программного обеспечения стереофотограмметрической обработки спектральной видеoinформации, а именно:

- технология формирования новых видов информационных продуктов;
- алгоритмы организации высокоскоростной стереообработки на современных многоядерных и многопроцессорных ЭВМ в ходе формирования карт диспаратностей, а также на графическом процессоре при вычислении значений нормализованной кросскорреляционной функции;
- принципы построения и обобщенная структура специализированного программного обеспечения систем оперативной обработки спектральных стереоизображений.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Алгоритм построения растровой цифровой модели рельефа на основе ее триангуляционного описания // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: тез. докл. XII всерос. науч.-техн. конф. – Рязань, 2007. – С. 325-326.
2. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Высокопроизводительные алгоритмы формирования цифровой модели рельефа на основе точечного описания // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2007. – С. 81-86.
3. Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Технология аннотирования космических изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: тез. докл. XII всерос. науч.-техн. конф. – Рязань, 2007. – С. 326-327.
4. Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Технология обработки стереоскопических сканерных снимков высокого разрешения // Интеллектуальные и информационные системы: тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Тула, 2007. – С. 76-77.
5. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Алгоритмы построения карты диспаратности по стереоизображениям // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: тез. докл. 15-й междунар. науч.-техн. конф. – Рязань, 2008. – С. 118-120.

6. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Идентификация одноименных точек на стереоснимках с использованием алгоритмов оптимизационного поиска // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2008. – С. 83-90.

7. Пошехонов В.И. Организация вычислительного процесса при построении карты диспаратности по стереоизображениям // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: тез. докл. XIII всерос. науч.-техн. конф. – Рязань, 2008. – С. 62-64.

8. Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Организация процесса построения карты диспаратности по стереоизображениям // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Москва, 2008. – С. 85-91.

9. Пошехонов В.И. Алгоритмы параллельной обработки стереоснимков // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2008. – С. 112-118.

10. Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Алгоритмы идентификации общих точек на стереоизображениях // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: тез. докл. VIII междунар. конф. – Курск, 2008. – С. 59-61.

11. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Сухов А.А., Третьяков А.А. Технология обработки стереоизображений от систем ДЗЗ высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. докл. 6-й всерос. конф. – Москва, 2008.

12. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И., Сухов А.А. Алгоритмы формирования цифровых моделей рельефа по данным от КА «Ресурс-ДК» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Вып.6. Т.1. – Москва, 2009. – С. 96-104.

13. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов В.И. Программно-математическое обеспечение системы обработки космических стереоизображений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2009. – № 1(27). – С. 17-22.

14. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Оценка высоты облачности по данным комплекса многозональной сканерной съемки КА «Метеор-М» // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 3. – С. 41-46.

15. Пошехонов В.И. Реализация корреляционного алгоритма идентификации одноименных точек на графическом процессоре // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: тез. докл. XIV всерос. науч.-техн. конф. – Рязань, 2009. – С. 325-326.

16. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Определение высоты верхней границы облачности по данным КМСС космического аппарата «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: тез. докл. 7-й всерос. конф. – Москва, 2009.

17. Пошехонов В.И. Алгоритм формирования триангуляционной модели рельефа земной поверхности на основе карты диспаратности // Интеллекту-

альные и информационные системы: тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Тула, 2009. – С. 96-97.

18. Кузнецов А.Е., Пошихонов В.И. Технология стереофотограмметрической обработки спектрзональных изображений облачного покрова по данным КМСС // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: тез. докл. III всерос. науч.-техн. конф. – Москва, 2010.

19. Кузнецов А.Е., Пошихонов В.И. Методика геометрической калибровки комплекса многозональной сканерной съемки КА «Метеор-М» // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 3(33). – С. 12-18.

20. Пошихонов В.И. Геодезическое ориентирование спектрзональных изображений // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: тез. докл. 16-й междунар. науч.-техн. конф. – Рязань, 2010. – С. 148-149.

21. Кузнецов А.Е., Пошихонов В.И. Информационная технология стереофотограмметрической обработки видеоданных от многоматричных сканирующих устройств // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 3. – С. 44-49.

**Пошихонов Василий Ильич**

**АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ  
СТЕРЕОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ДАННЫХ ОТ СИСТЕМ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ЗЕМЛИ**

**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.