

На правах рукописи



ПАШЕНЦЕВ Дмитрий Юрьевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ
ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВЁЗДНОГО НЕБА
ОТ ВИДЕОДАТЧИКОВ СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2013

Работа выполнена
в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Тишкин Роман Валентинович

Официальные оппоненты: Кузнецов Павел Константинович
доктор технических наук, профессор,
НИИ ПНМС при ФГБОУ ВПО «СГТУ»,
г. Самара, директор

Бабаян Павел Варганович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «РГРТУ» г. Рязань,
начальник лаборатории

Ведущая организация: Научный центр оперативного мониторинга Зем-
ли ОАО «Российские космические системы»,
г. Москва

Защита состоится **26 июня 2013 года в 13 час.** на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.211.01 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный ра-
диотехнический университет» по адресу:

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязан-
ский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан 20 мая 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из приоритетных направлений современной науки. Сферы практического применения систем ДЗЗ распространяются на многие отрасли народного хозяйства: сельское, рыбное и лесное, геологии и разведки недр, контроля окружающей среды, гидрометеорологии, военную разведку и др. В последнее время широко применяются системы ДЗЗ с оптической аппаратурой сканового принципа действия. Тем не менее, в исходном виде полученные изображения не могут быть применены по назначению, так как имеют значительные геометрические искажения по отношению к объектам наблюдаемой территории. Для проведения высокоточной автоматической геометрической коррекции видеоданных, получаемых при дистанционном зондировании Земли, необходимо наличие информации об элементах внутреннего ориентирования съемочного устройства и внешнего ориентирования космического аппарата (КА). К элементам внешнего ориентирования относятся данные, полученные от гироскопических систем, звездных датчиков, солнечных датчиков и систем позиционирования, таких как ГЛОНАСС и GPS. К элементам внутреннего ориентирования относятся: дисторсию объектива, координаты главной точки, расположение матриц в фокальной плоскости и фокусное расстояние.

Первоначально параметры внутреннего ориентирования измеряются при наземной калибровке съемочной аппаратуры, и их точность во многом определяет качество дальнейшей обработки полученных изображений земной поверхности. Однако под различными воздействиями, возникающими при выводе и эксплуатации КА на орбите, параметры внутреннего ориентирования меняются. Данный факт вызывает необходимость калибровки аппаратуры не только в лабораторных условиях, но и в штатном режиме работы.

Анализ публикаций в зарубежной печати показал, что для решения задач полетной калибровки принято использовать опорные геодезические полигоны с большим числом опорных точек. Однако такой подход требует специально обустроенных полигонов, которые в нашей стране только создаются.

При эксплуатации КА ДЗЗ «Ресурс-П» впервые в отечественной практике реализуется новый способ решения этой задачи – геометрическая калибровка целевой аппаратуры (ЦА) по звёздному небу.

В режиме калибровки по звёздному небу КА отклоняется по крену на определенный угол и производит сканирование участка небесной сферы. В качестве опорных точек вместо известных геодезических координат выступают координаты звёзд, полученные из специализированного высокоточного звездного каталога (СВЗК), который соответствующим образом обработан.

В данном режиме, в отличие от калибровки по полигонам, исключается искажающее действие таких факторов, как:

- панорамный эффект,
- кривизна Земли,
- эллиптичность орбиты,
- влияние атмосферы,
- влияние рельефа местности.

Калибровка по звёздному небу является наиболее предпочтительной, но только в том случае, если во время съемки будет зарегистрировано и распознано достаточное количество звёзд для выполнения задачи уточнения параметров внутреннего ориентирования.

К выполнению задачи калибровки по звёздному небу выдвигаются жесткие временные ограничения, соблюдение которых невозможно без использования алгоритмических решений, описанных в данной работе.

Основными этапами задачи калибровки по звёздному небу являются:

- предварительная обработка, включающая сегментацию сканового изображения участка небесной сферы для выявления объектов, представляющих звёзды, и дальнейшая идентификация их координат с координатами из высокоточного астрономического каталога звёзд;
- тематическая обработка по уточнению параметров внутреннего ориентирования.

Наиболее продолжительным по временным характеристикам является этап предварительной обработки. Актуальность работы связана с необходимостью разработки скоростных методов и алгоритмов предварительной обработки изображений, полученных с помощью оптико-электронных систем высокого разрешения сканового принципа действия, для решения задачи полётной калибровки параметров внутреннего ориентирования.

Степень разработанности темы. Существующие автоматические методы сегментации ориентированы на разбиение изображения на однородные области. Данное направление представлено работами Алпатова Б.А., Сойфера В.А., Вудса Р., Гонсалеса Р., Прэтта У. и основано на обработке всей поступающей информации с изображения.

Однако объем видеоданных, полученных в результате выполнения режима полётной калибровки, может составлять порядка пятидесяти гигабайт и более, что не обеспечивает необходимую скорость выполнения задачи сегментации. С учетом узкоспециализированной области по обработке изображений звёздного неба первое направление исследований связано с поиском и выделением областей сканового изображения с известными свойствами.

Второе направление, связанное с распознаванием координат звёзд на изображении по астрономическому каталогу, широко представлено работами Еремеева В.В., Злобина В.К., Лупяна Е.А. и др.

Классические решения отождествления основаны на двух подходах: поиске максимума взаимной корреляционной функции двух идентифицируемых изображений и сравнении угловых расстояний между выявленными звёздами на изображении и звёздами из астрокаталога.

Данные методы используются в приборах ориентации космического аппарата по звездам. Осуществление ориентации с помощью блоков определения координат звёзд (БОКЗ) затруднено наличием оптических искажений (дисторсия, хроматическая аберрация и т.д.), собственными шумами матрицы и наличием «ложных» звёзд.

Высокая точность астронавигационных приборов достигается благодаря использованию алгоритмов идентификации наиболее ярких кластеров звёзд, а также анализу серий изображений при покадровой съемке. Однако применение

методов отождествления к скановым изображениям без модификации невозможно. Это обусловлено меняющимися геометрическими искажениями на всем маршруте сканирования.

Для задачи калибровки по звёздному небу необходимо наибольшее количество распознанных звёзд. Однако оптические системы высокого разрешения имеют узкую полосу захвата по сравнению с БОКЗ, что обуславливает необходимость в распознавании максимального количества звёзд, зафиксированных на изображениях, полученных от видеодатчиков сканового принципа действия.

Цель работы заключается в разработке высокоскоростных и эффективных методов и алгоритмов сегментации и идентификации звёздных узоров на скановых космических изображениях, полученных в условиях нелинейности геометрических искажений на всем маршруте съемки, и создании на их основе высокопроизводительного программного обеспечения оперативного получения информации для задачи полетной калибровки целевой аппаратуры.

Основные задачи:

- анализ современных и классических методов идентификации и сегментации изображений звёздных узоров;
- разработка высокоскоростного метода сегментации звёздных узоров на космических многозональных изображениях небесной сферы с использованием априорных данных высокоточных астрокаталогов;
- разработка алгоритма идентификации звездных узоров, полученных от видеодатчиков сканового принципа действия;
- проектирование высокопроизводительного программного комплекса идентификации звёздных узоров на основе технологий параллельных вычислений.

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что в ней разработан высокоскоростной метод сегментации изображений небесной сферы, полученных от видеодатчиков сканового принципа действия космических систем наблюдения Земли, основанный на априорных данных из высокоточных астрокаталогов. Данный метод позволяет снизить время предварительной обработки скановых изображений небесной сферы и позволяет решить задачу уточнения параметров внутреннего ориентирования целевой аппаратуры в заданные тактико-технические временные характеристики. Также в диссертационной работе представлены алгоритмы распознавания звёзд на скановых снимках в условиях нелинейных искажений, которые позволяют повысить точность сопоставления распознанных звёзд с эталонами, полученными из астрокаталогов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритм формирования эталонного снимка звёздного неба на основе высокоточного каталога звёзд для систем сканирующего типа;
- метод высокоскоростной сегментации космических многозональных скановых изображений небесной сферы с учетом априорных данных;
- гибридный алгоритм идентификации звёздных узоров на скановых изображениях небесной сферы;
- алгоритм идентификации изображений двойных звёзд.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенные методы и алгоритмы идентификации и сегментации скановых изображений

звёздных узоров используются в программных комплексах по уточнению и оценке параметров внутреннего ориентирования целевой аппаратуры космического аппарата. Также данные технологии функционируют в составе систем обработки информации от КА «Ресурс-П» и других КА.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на шести Всероссийских и международных научно-технических конференциях.

1. Всероссийская конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2009 г. – 2012 г.).

2. Всероссийская конференция «Наука и технологии» (Екатеринбург, 2010).

3. Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (Самара, 2011).

4. Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2012).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах, в том числе две работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. В федеральном государственном бюджетном учреждении «Федеральный институт промышленной собственности» получено свидетельство (№ 2012614221 от 12.05.2012) о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

Внедрение результатов работы. Диссертационная работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете. Результаты диссертационной работы в виде математического и специализированного программного обеспечения внедрены в филиале ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»–ОКБ «Спектр» (акт внедрения от 23.05.2012) и в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета по специальности 230105 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» (акт внедрения от 11.09.2012), что подтверждается актами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основной текст работы содержит 139 с., 50 рисунков и 16 таблиц. Список литературы на 10 с. включает 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и соответствующие ей задачи, представлена структура работы.

В первой главе выполнен анализ известных подходов к решению задачи сегментации изображений, а также методов отождествления звёздных узоров.

Анализ методов сегментации показал, что для космических изображений звёздных узоров наиболее эффективными являются методы обработки изображений, базирующихся на свойстве однородности точек изображения относительно некоторого заданного критерия.

В таблице 1 представлены суммарные оценки качества бинаризации трех модельных изображений, отражающих особенности применения алгоритмов, базирующиеся на свойстве однородности точек изображения относительно некоторого заданного критерия. Для получения количественной оценки каждый из четырёх типов ошибок (разрывы на линиях; размывание изображения линий; потеря целостности объектов; появление шума в однородных областях) оценивался экспертами по 6-балльной шкале (от 0 до 5).

Таблица 1 – Суммарная оценка точности бинаризации трех модельных изображений

Метод	Изображение			Суммарный критерий качества	Длительность обработки, с
	Карта 1, сумм. баллы	Карта 2, сумм. баллы	Карта 3, сумм. баллы		
<i>Яновица и Брукштэйна</i>	17	19	19	55	98
<i>Эйквеля</i>	15	14	16	45	15
<i>Локально-адаптивный</i>	14	13	15	42	1
<i>Отсу</i>	14	12	13	39	0.3

Также **в первой главе** проведён анализ существующих методов отождествления звёзд, фиксированных на изображениях, с их аналогами из астрономических каталогов. В результате анализа определена область применения существующих методов отождествления звёзд на изображениях, полученных от систем ДЗЗ покадровой съемки, и выявлены их достоинства и недостатки. Применение данных методов отождествления звёзд на изображениях, полученных от скановой аппаратуры, без дополнительных модификаций невозможно, что обусловлено изменяющимися геометрическими искажениями изображения на всем маршруте сканирования, узкой полосой захвата, неточностью внутреннего и внешнего ориентирования.

Во второй главе выполнен анализ алгоритмов формирования эталонного изображения из астрономических каталогов звёзд. Данные алгоритмы используются в системах покадровой съемки. Показано, что для повышения точности построения эталонного изображения звёзд для систем сканового принципа действия необходимо модифицировать существующие алгоритмы. Разработан алгоритм формирования эталонного изображения для систем сканирующего типа.

Эталонное (идеальное) изображение представляет собой изображение, которое формируется при точно известных параметрах внешнего ориентирования КА и внутреннего ориентирования съемочного устройства.

На рисунке 1 показано проецирование звезды в фокальной плоскости визирной системы координат (ВСК). Звезда фиксируется оптико-электронной аппаратурой высокого разрешения (ОЭАВР) тогда, когда луч-вектор звёзды S попадет на одну из ПЗС-матриц.

Произвольная звезда S в ВСК характеризуется радиусом-вектором V_s :

$$\mathbf{V}_s = \begin{pmatrix} f \\ -y_s \\ -z_s \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние ОЭАВР; z_s и y_s – координаты точки проекции звезды S на плоскость YOZ в ВСК.

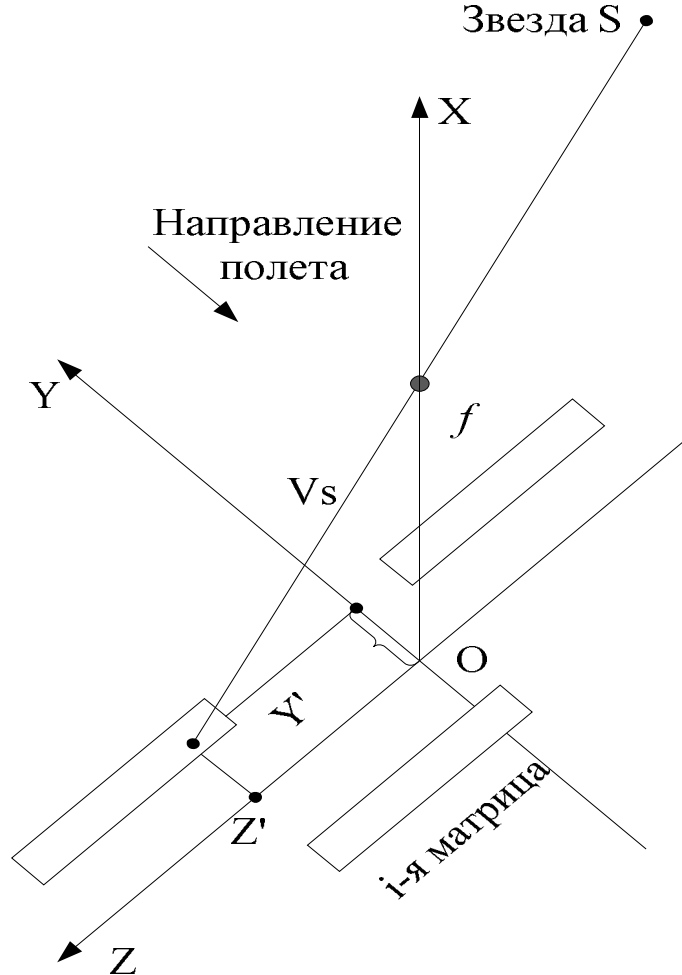


Рисунок 1 – Проецирование звезды в фокальной плоскости визирной системы координат оптико-электронной аппаратуры высокого разрешения

По экваториальным координатам звезды S (прямое восхождение α и склонение δ) и кватерниону ориентации ВСК относительно инерциальной системы координат (ИСК) на момент времени t_0 определим вектор $\mathbf{V}_s$. Нормированный вектор звезды S описывается как:

$$\mathbf{V}_{sn} = L(t_0)^{-1} \circ \mathbf{R} \circ L(t_0);$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \sin \alpha \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $L(t_0)$ – кватернион ориентации визирной системы координат в момент времени t_0 ; $L(t_0)^{-1}$ – обратный кватернион; $\mathbf{R}$ – радиус-вектор звезды в ИСК.

Кватернионная функция движения ВСК относительно ИСК задается по следующей формуле:

$$L(t) = \begin{pmatrix} L_0(t) \\ L_1(t) \\ L_2(t) \\ L_3(t) \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для построения эталонного изображения выразим кватернионную функцию от времени $L(t)$ через матрицу перехода:

$$\begin{aligned} c_{11}(t) &= \lambda_0^2(t) + \lambda_0^2(t) - \lambda_0^2(t) - \lambda_0^2(t); \\ c_{12}(t) &= 2(\lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) + \lambda_0(t) \cdot \lambda_3(t)); \\ c_{13}(t) &= 2(\lambda_1(t) \cdot \lambda_3(t) + \lambda_0(t) \cdot \lambda_2(t)); \\ c_{21}(t) &= 2(\lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_3(t)); \\ c_{22}(t) &= \lambda_0^2(t) - \lambda_1^2(t) + \lambda_2^2(t) - \lambda_3^2(t); \\ c_{23}(t) &= 2(\lambda_2(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_1(t)); \\ c_{31}(t) &= 2(\lambda_1(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_2(t)); \\ c_{32}(t) &= 2(\lambda_2(t) \cdot \lambda_3(t) - \lambda_0(t) \cdot \lambda_1(t)); \\ c_{33}(t) &= \lambda_0^2(t) - \lambda_1^2(t) - \lambda_2^2(t) - \lambda_3^2(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда нормированный вектор V_{sn} звезды в ВСК выразим как $V_{sn} = C \cdot R$.

Геометрическое расположение ПЗС-матрицы таково, что координата первой строки ПЗС-матрицы y_{cm} в ВСК равна постоянной величине y' . Необходимым условием попадания звезды S на ПЗС-матрицу является условие равенства координат y_s вектора V_s и y' :

$$y_s = y'. \quad (5)$$

Учитывая матрицу перехода C , для момента времени t , условие (5) записываем следующим образом:

$$y' = y_s = -f \cdot \frac{c_{21}(t) \cdot r_1 + c_{22}(t) \cdot r_2 + c_{23}(t) \cdot r_3}{c_{11}(t) \cdot r_1 + c_{12}(t) \cdot r_2 + c_{13}(t) \cdot r_3}. \quad (6)$$

Если условиться, что $\tilde{y}_0 = y' / f$, то выражение (6) примет следующий вид:

$$(c_{21}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{11}(t)) \cdot r_1 + (c_{22}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{12}(t)) \cdot r_2 + (c_{23}(t) - \tilde{y}_0 \cdot c_{13}(t)) \cdot r_3 = 0. \quad (7)$$

Функция $L(t)$ на промежутке построения эталонного кадра является монотонной, так как сканирование звёздного неба происходит без пропусков. Таким образом, решив уравнение (7), найдем время, для которого выполняется необходимое условие (5). Вторым необходимым условием попадания звезды на

ПЗС-матрицу, является принадлежность координаты z_s множеству значений положений z_{cm} пикселей первой строки ПЗС-матриц. Координата z_s рассчитывается как:

$$z_s = -f \cdot \frac{c_{31}(t) \cdot r_1 + c_{32}(t) \cdot r_2 + c_{33}(t) \cdot r_3}{c_{11}(t) \cdot r_1 + c_{12}(t) \cdot r_2 + c_{13}(t) \cdot r_3}. \quad (8)$$

Выполнение (6) и (8) является необходимым и достаточным условием для попадания звезды на ПЗС-матрицу.

Координата звезды $z_{распр}$ (номер пикселя) в системе координат раstra рассчитывается по формуле (8), а координата $y_{распр}$ (номер строки) – с использованием найденного времени попадания звезды (7) и учетом частоты формирования строк: $y_{распр} = t \cdot \nu$.

Проведен сравнительный анализ существующих алгоритмов и модифицированного алгоритма построения эталонных изображений для систем покадровой съемки и сканового принципа действия. Результаты анализа зависимости количества звёзд, попавших в эталонные изображения, сформированных для различных систем съемки, приведены на рисунке 2. Для применения алгоритма построения эталонного изображения систем покадровой съемки к изображениям, полученным путем сканирования, прямоугольная область проецирования формировалась на основании положения КА на момент начала и окончания сканирования. Алгоритм формирования эталонного изображения для систем сканового принципа действия зависит от таких параметров, как внешнее ориентирование КА и внутреннее ориентирование съемочной аппаратуры.

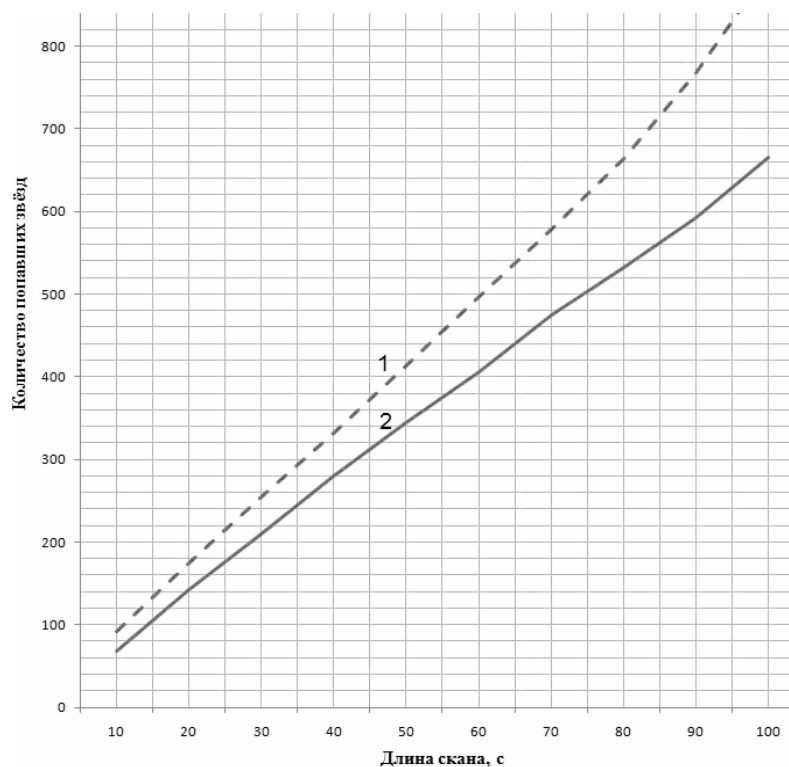


Рисунок 2 – Количество звёзд попавших в сформированные эталонные изображения для различных систем съемки:

1 – скановая аппаратура; 2 – покадровая аппаратура

Данный алгоритм позволяет зафиксировать на 20 % больше звёзд, чем при использовании алгоритма покадровой съемки. Сформированное эталонное изображение для скановых систем в последующем используется при решении задачи сегментации и идентификации звёзд на изображениях, полученных от систем ДЗЗ сканирующего типа.

Также *во второй главе* разработан алгоритм формирования рабочего каталога звёзд, который позволяет сократить объем исходного высокоточного астрокаталога за счет фильтрации по следующим критериям:

- полосе обзора космического аппарата на небесной сфере;
- максимальной эффективной звёздной величине.

Критерий фильтрации по полосе обзора космического аппарата заключается в отбраковке звёзд, которые не попали в область максимального отклонения космического аппарата по тангажу в неподвижной орбитальной системе координат. Данная система координат определяется наклоном орбиты i и прямым восхождением восходящего узла орбиты $-\Omega$.

С учётом того, что область полосы обзора спутника задается максимальным отклонением визирной системы координат относительно неподвижной орбитальной системы координат (значение максимального отклонения КА по углу тангажа), в неподвижной орбитальной системе координат данное отклонение ($\alpha_{КАmax}$) является максимальным отклонением по склонению (рисунок 3). Зная положение визирной системы координат КА ДЗЗ в инерциальной системе координат (определяется по внешнему ориентированию КА), матрицу перехода из инерциальной системы координат в неподвижную орбитальную систему координат представим в виде:

$$\mathbf{M}_{иск/носк} = \begin{vmatrix} \cos i \cos \Omega & -\cos i \sin \Omega & -\sin i \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ \sin i \cos \Omega & -\sin i \sin \Omega & \cos i \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Для звезды S с инерциальными координатами (α_s, δ_s) с помощью матрицы перехода (9) получим условие ее попадания в рабочий каталог звёзд, заключающееся в попадании ее склонения в интервал $-\alpha_{КАmax} \leq \alpha_{Sno} \leq \alpha_{КАmax}$.

Критерий фильтрации по эффективной звёздной величине заключается в определении порогового значения звёздной величины, воспринимаемой съемочной аппаратурой. Эффективное значение звёздной величины рассчитывается по формуле:

$$M_{эф} \leq -2.5 \cdot \lg \left(\frac{K_{max}(\lambda) \cdot m \cdot \eta \cdot K_{\varepsilon} \cdot F_{nop}}{A_{ex} \cdot K_p} \right) - 13.86, \quad (10)$$

где K_{ε} – коэффициент поглощения ПЗС-матрицей излучения от эталонного источника; $K_{max}(\lambda)$ – коэффициент перевода; K_p – коэффициент использования излучения реального источника; η – коэффициент поглощения глазом излучения от звезды; A_{ex} – площадь входного зрачка; m – соотношение сигнал/шум; F_{nop} – пороговый поток фотоприемника.

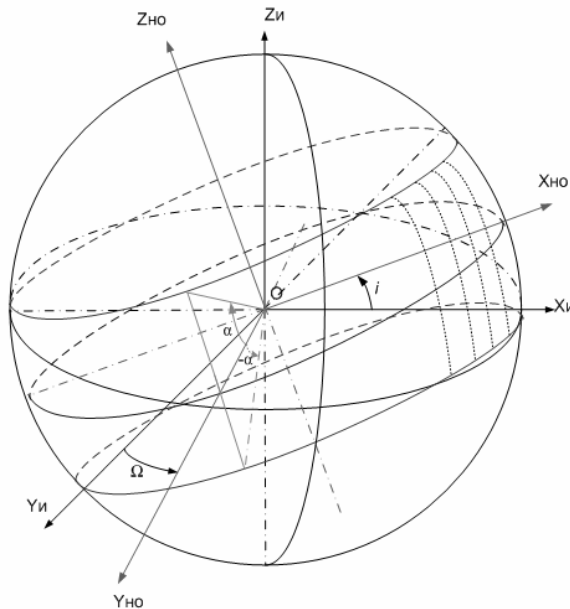


Рисунок 3 – Максимальное отклонение КА по углу тангажа α в неподвижной орбитальной системе координат

В третьей главе разработан модифицированный метод высокоскоростной сегментации изображений звёздного неба, полученных с помощью видеодатчиков сканового принципа действия, основанный на автоматическом глобально-оптимальном методе сегментации.

Суть модифицированного высокоскоростного метода сегментации состоит в том, что при сегментации изображений звёзд не учитывается тот факт, что объем целевой информации (изображения звёзд) значительно меньше объема данных, содержащих фон.

С учетом того, что параметры внутреннего ориентирования съемочного устройства и внешнего ориентирования КА заданы неточно, положение звёзд на снимке меняется в пределах определенного локального окна, построенного относительно каждой координаты эталонной звезды. С помощью разработанного алгоритма формирования эталонного изображения для систем сканирующего типа можно построить эталонный снимок на заданный маршрут съемки. Тем самым позволяя определить по эталонному изображению локальные области на исходном скановом снимке, которые должны содержать изображения звёзд при идеальных условиях съемки. Из этого следует, что возможно производить сегментацию не всего снимка, а только в пределах локальных фрагментов, чем и обуславливается модифицированный высокоскоростной метод сегментации.

На основе модифицированного метода высокоскоростной сегментации разработан высокоскоростной алгоритм сегментации изображений звёздного неба, полученных от видеодатчиков сканового принципа действия.

Высокоскоростной алгоритм сегментации в задаче сегментации скановых изображений $B(m,n)$ участков небесной сферы, полученных с помощью КА ДЗЗ, заключается в следующем.

Пусть имеется космическое изображение звёздного неба $B(m,n)$, в системе координат mn , в которой при идеально точной координатной привязке координаты центров изображений звёзд должны совпадать с одноименными объектами эталонного снимка $E(m,n)$, сформированного из высокоточных звёздных ка-

талогов. Пусть эталонный снимок $E(m,n)$ имеет множество звёзд с координатами в точках $(m_{ei}, n_{ei}), i = \overline{1, I}$.

Путем эмпирических исследований, оптимальный размер локального окна сканирования, определяющий необходимую точность и скорость сегментирования, находится в области 200 - 350 пикселей. Более точный размер локального окна сканирования подбирается оператором на этапе летных испытаний и на основании визуального контроля обработки предварительных скановых изображений $B(m,n)$.

Высокоскоростной алгоритм сегментации в задаче локализации центров звёзд на снимке $B(m,n)$, включает следующие этапы.

1. Выборка звёзд из эталонного снимка E , имеющие координаты в системе координат mn .
2. Построение локального окна сканирования Ω_e для каждой эталонной звезды $S_e \in E$.
3. Сопоставление каждого локального окна сканирования Ω_e фрагменту Ω_b на исходном снимке.
4. Фильтрация каждого локального фрагмента Ω_b снимка $B(m,n)$.
5. Поиск оптимального порога бинаризации для каждого локального фрагмента Ω_b .
6. Расчет координат локализованных звёзд в каждом локальном фрагменте на снимке $B(m,n)$.

В таблице 2 представлены результаты выполнения высокоскоростного алгоритма сегментации в сравнении с алгоритмом сегментации по всей площади на сканерных снимках различных маршрутов.

Таблица 2 – Скорость выполнения алгоритмов сегментации для различного времени сканирования

Длительность сканирования, с	Сегментация по всей площади, с	Высокоскоростная сегментация, с
15	24	17
35	75	41
45	118	44
75	204	74
88	272	87
104	463	145

Из результатов исследования видно, что на маршруте съемки длиной около ста секунд применение алгоритма высокоскоростной сегментации основанного на модифицированном методе высокоскоростной сегментации скановых изображений участков небесной сферы, позволяет сократить время на обработку снимка звёздного неба более чем на шестьдесят процентов.

Также *в третьей главе* разработан специализированный алгоритм сегментации для случаев присутствия на изображении двойных звёзд.

Приведенные в работе исследования свидетельствуют о том, что основным методом сегментации двойных звёзд является метод водораздела. Однако

основным недостатком при реализации данного метода является его избыточная сегментация.

Для уменьшения избыточной сегментации, возникающей в классическом алгоритме водораздела, предлагается модифицировать данный алгоритм в части выполнения предварительной обработки изображения многомасштабным морфологическим градиентом. Для модифицированного алгоритма необходимо выполнить следующие шаги.

1. Применение многомасштабного морфологического градиента к исследуемому изображению с коэффициентом масштабирования n , где $n = 3, 5, 7 \dots t$ на каждом шаге итерации.

2. Вычитание из исходного снимка изображения многомасштабного морфологического градиента.

3. Применение алгоритма водораздела.

4. Принятие решения о дополнительной итерации.

Были проведены экспериментальные исследования по обработке изображений стандартным методом водораздела и с учетом предварительного многомасштабного морфологического градиента. Оценка сегментации выполнена по двум критериям: количество распознанных объектов и точность определения координат (таблица 3).

Оценка по количеству распознанных объектов производилась на основе визуального восприятия количества объектов на тестируемом изображении и сравнении полученной количественной оценки с количеством распознанных объектов с помощью алгоритма.

Таблица 3 – СКО точности определения координат объектов

Метод водораздела		Модифицированный метод водораздела с учетом многомасштабного градиента	
СКО определения координат, пикс.	СКО количества объектов	СКО определения координат, пикс.	СКО количества объектов
0,751	1,789	0,638	0,823

Установлено, что наиболее эффективным алгоритмом по распознаванию групп звёзд является алгоритм водораздела, основанный на многомасштабной морфологической фильтрации.

Также *в третьей главе* было промоделировано движение визирной оси телескопа относительно начала сканирования для различных маршрутов. На рисунке 4 представлено движение визирной оси телескопа по модельным данным для КА ДЗЗ «Ресурс-П». Моделирование внешнего ориентирования КА производилось по данным, полученным от КА ДЗЗ «Ресурс-ДК».

Массив положений визирной оси телескопа относительно начала маршрута сканирования для каждого дискретного времени сканирования с шагом Δt задается следующим отношением:

$$\mathbf{R}_{vsk,i}^0 = L_0^{-1} \circ L_i \circ \mathbf{R}_{vsk} \circ L_i^{-1} \circ L_0, \quad (11)$$

где L_i – кватернион ориентации ВСК относительно ИСК на момент времени t_i , $i = 0, 1, \dots (t_{\text{маршрута}}/\Delta t)$; L_0 – кватернион на начало маршрута сканирования;

$R_{vsk,i}^0$ – координаты положения оси визирования в ВСК относительно начала маршрута сканирования на момент времени t_i ; R_{vsk} – вектор центральной оси визирования телескопа.

Как видно из рисунка 4, движение центральной оси не является прямолинейным, а имеет геометрические искажения на всем маршруте сканирования. Помимо геометрических искажений, вызванных внешним ориентированием, на формирование скана также влияет ошибки внутреннего ориентирования съемочной аппаратуры.

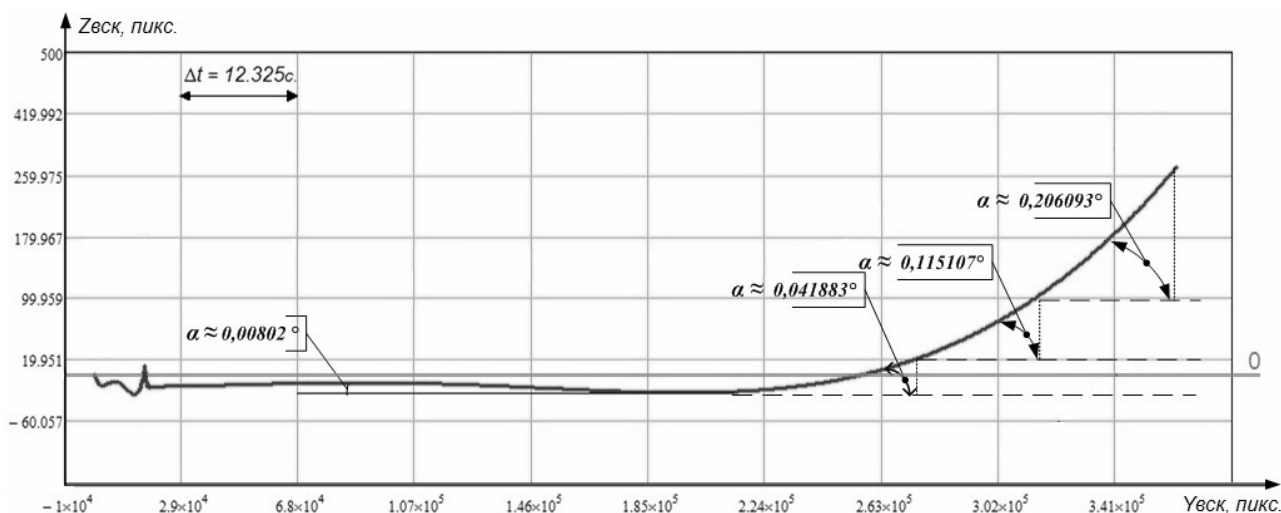


Рисунок 4 – Движение визирной оси телескопа относительно начала маршрута сканирования

Также *в третьей главе* предлагается использовать гибридный алгоритм отождествления звёзд для устранения недостатков существующих методов отождествления. Данный алгоритм использует достоинства корреляционно-экстремального метода, а также метода отождествления по угловым расстояниям и нивелирует их недостатки применительно к скановым изображениям.

Основные этапы гибридного алгоритма.

1. Разбиение изображения вдоль оси сканирования на локальные участки по 5-8 звёзд.
2. В каждом локальном сегменте выполняется процедура отождествления по корреляционно-экстремальному методу.
3. Параллельно с пунктом 2 выполняется процедура отождествления по методу угловых расстояний. После отождествления рассчитываются параметры рассогласования.
4. Если процент распознанных звезд по пункту 2 не удовлетворяет заданному критерию (определяется из тактико-технических условий), то исходные координаты звёзд компенсируются на рассчитанные параметры рассогласования в пункте 3.
5. Повторить пункт 2.

Гибридный алгоритм отождествления позволяет повысить точность идентификации звёзд более чем на десять процентов в условиях нелинейных иска-

жений снимка, появляющихся в процессе сканирования, и из-за неточных параметров внутреннего и внешнего ориентирования.

В четвертой главе рассматриваются вопросы проектирования высокопроизводительного комплекса распознавания звёздных узоров.

Для увеличения скорости обработки данных, а также унификации программного обеспечения под различные платформы можно выделить ряд направлений: использование специализированных аппаратных средств, архитектура которых поддерживает параллельную обработку; применение кросс-платформенных инструментов разработки программного обеспечения.

При разработке программного обеспечения геометрической калибровки целевой аппаратуры по звёздному небу применяются библиотека Qt, которая является кросс-платформенным инструментарием разработки программного обеспечения, а также графический процессор с платформой CUDA для реализации параллельных вычислений.

После получения сопроводительной и измерительной информации о маршруте съемки звёздного неба обработка разбивается на два направления: создание эталонного изображения и обработка сканового снимка.

Процесс формирования рабочего каталога звёзд (РКЗ) выделяется в отдельный модуль и используется на этапе инициализации программного обеспечения, а также периодически с учетом годовой прецессии и нутации звезд. На рисунке 5 приведена обобщенная схема передачи данных в программном комплексе.

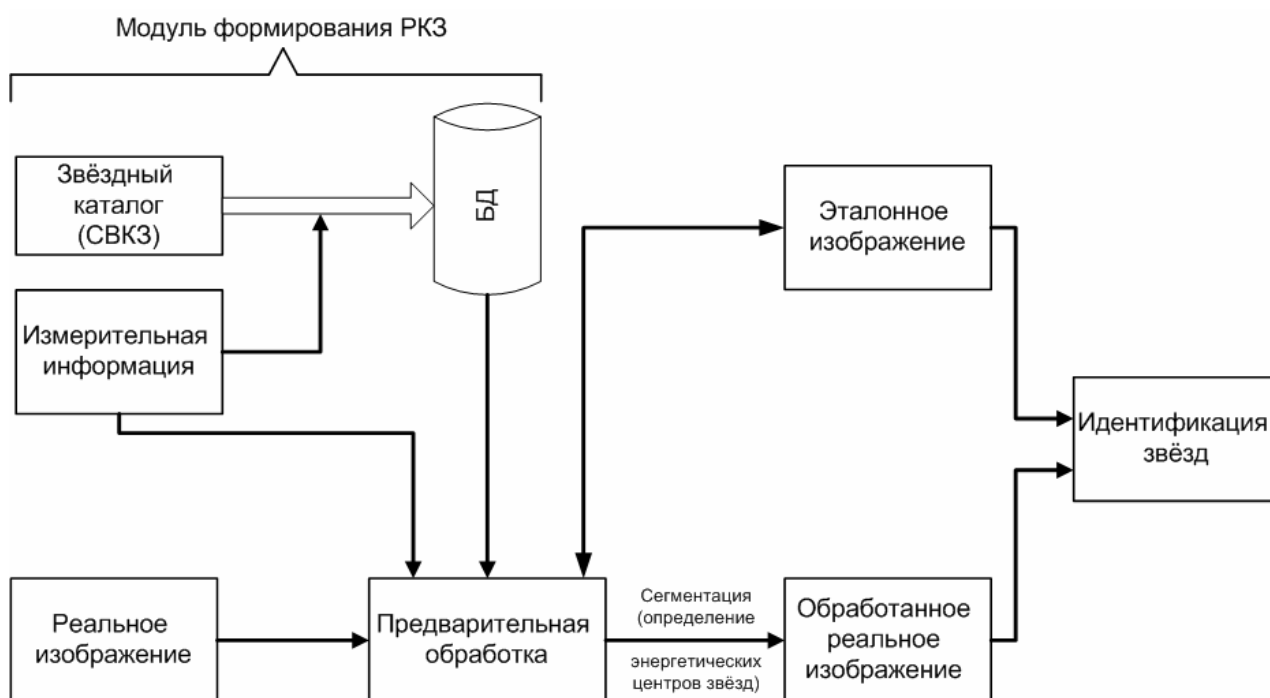


Рисунок 5 – Обобщенная схема передачи данных в программном комплексе

Распараллеливание процесса сегментации и идентификации звёзд в программном комплексе «Высокоскоростная обработка изображений небесной сферы на основании априорных данных, полученных из астрокаталогов» приведено на рисунке 6.

Программное обеспечение, реализующее технологию обработки снимков высокого разрешения звёздного неба, выполняет следующие основные операции:

- 1) формирования оперативного каталога звезд на заданный маршрут из рабочего каталога звезд;
- 2) формирования координат звезд (из оперативного каталога) в системе координат раstra изображения;
- 3) запуска высокоскоростной сегментации для каждого зонального изображения в параллельных потоках;
- 4) отождествления распознанных звезд на изображении с их аналогами из рабочего каталога звезд.

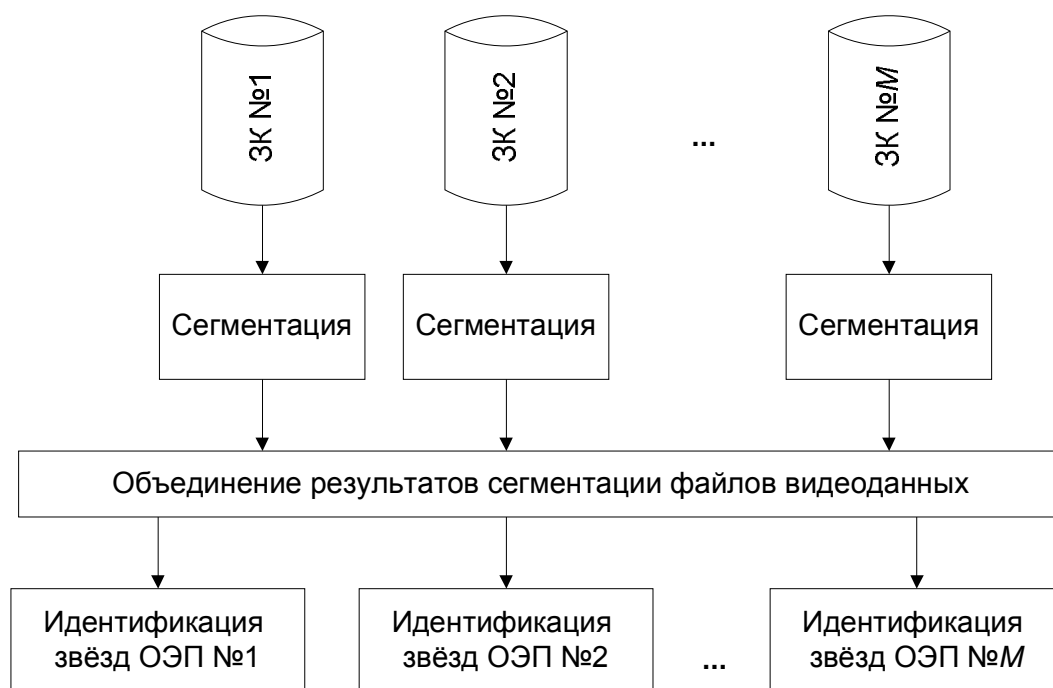


Рисунок 6 – Распараллеливание процесса сегментации и идентификации звёзд в программном комплексе

Программные модули реализованы на языке программирования C++ в среде программирования QtCreator 2.4.1. Разработанные модули предназначены для функционирования в операционных системах семейства Windows и Linux.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, состоят в следующем.

1. Исследованы существующие методы сегментации изображений и отождествления звёздных узоров. Установлены недостатки существующих методов отождествления звёздных узоров применительно к многозональным изображениям звёздного неба, полученным с помощью систем сканирующего типа. Показано, что одним из эффективных путей устранения недостатков является использование комбинированных подходов обработки.

2. Разработан алгоритм формирования эталонного изображения звёздного неба для видеодатчиков сканового принципа действия. Приведено сравне-

ние построенных эталонных изображений для датчиков сканового принципа действия с альтернативными сформированными моделями. Показано, что разработанный алгоритм позволяет увеличить количество звёзд в эталонном изображении при увеличении времени сканирования по сравнению с альтернативными способами формирования.

3. Предложена модификация метода высокоскоростной сегментации скановых изображений небесной сферы, основанная на глобально-оптимальном методе сегментации. С учетом априорной информации из высокоточных звёздных каталогов данная модификация позволяет сократить время сегментации на 15 % и более, а также повысить точность определения координат звёзд на изображении.

4. Разработан алгоритм формирования рабочего каталога звёзд, основанный на процедуре фильтрации исходных данных астрокаталога, позволяющий снизить объем обрабатываемой информации при формировании эталонного изображения для систем сканового принципа действия.

5. Разработан алгоритм идентификации двойных звёзд на изображениях звёздного неба, основанный на методе водораздела с предварительной обработкой многомасштабным морфологическим градиентом, для обеспечения дальнейшей тематической обработки необходимыми данными. Данный алгоритм позволяет повысить точность определения координат звёзд, представленных на изображении в виде кластеров скоплений двух и более звёзд.

6. В связи с постоянно меняющимися геометрическими искажениями изображения на всем маршруте сканирования для изображений звёздного неба, полученных от видеодатчиков сканового принципа действия, предложен гибридный алгоритм отождествления звёзд. Данный алгоритм позволяет повысить точность отождествления звёзд по сравнению с существующими методами за счет уточнения постоянно меняющихся геометрических искажений сканового изображения на всем маршруте съемки.

7. На основе разработанных методов и алгоритмов создан высокопроизводительный программный комплекс, а также его модификации, предварительной обработки скановых изображений звёздного неба, полученных от космических систем ДЗЗ «Ресурс-П» и др.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Высокоскоростной алгоритм сегментации изображений звездного неба, полученных от датчиков сканерного типа / Д.Ю. Пашенцев [и др.] // Цифровая обработка сигналов: научно-технический журнал. 2011. №3. С. 42–46.

2. Пашенцев Д.Ю., Иванов А.В., Тишкин Р.В. Алгоритмы идентификации звёздных узоров в задаче уточнения элементов внутреннего ориентирования // Вестник СГАУ. Вып. 4. Самара, 2012. С. 80–87.

3. Моделирование точечных изображений звездного неба, получаемых от датчика сканерной съемки / Д.Ю. Пашенцев [и др.] // Наука и технологии: труды XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы. М.: РАН, 2010. С. 164–172.

4. Пашенцев Д.Ю. Программно-математическая реализация комплекса

формирования рабочего астрокаталога // Итоги диссертационных исследований: сб. науч. тр. М.: РАН, 2011. С. 32–39.

5. Пашенцев Д.Ю., Пылькин А.Н., Тишкин Р.В. Обзор систем поиска информации в звёздных каталогах // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. [под ред. А.Н. Пылькина]. Рязань: РГРТУ, 2011. С. 179–182.

6. Пашенцев Д.Ю. Подавление шумов ПЗС-матриц на скановых изображениях звёздного неба // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. [под ред. А.Н. Пылькина]. Рязань: РГРТУ, 2012. С. 194–199.

7. Пашенцев Д.Ю., Пылькин А.Н., Тишкин Р.В. Моделирование точечных изображений звездного неба, получаемых от датчика сканерной съемки // Наука и технологии: краткие сообщения XXX Российской школы. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. Т. 2. С. 44–47.

8. Пашенцев Д.Ю., Тишкин Р.В. Алгоритмы распознавания двойных звёзд на изображении звездного неба // Программные информационные системы: межвуз. сб. науч. тр. [под ред. А.Н. Пылькина]. Рязань: РГРТУ, 2011. С. 36–42.

9. Пашенцев Д.Ю., Иванов А.В., Тишкин Р.В. Алгоритмы идентификации звездных узоров в задаче уточнения элементов внутреннего ориентирования // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: материалы 2-й всероссийской науч.-техн. конф. [под ред. А.Н. Кирилина], 12-16 сентября 2011 г. Самара: СамНЦ РАН-Самара, 2011. С. 277–278.

10. Пашенцев Д.Ю., Кондрашов А.В., Тишкин Р.В. Использование параллельных вычислений для отождествления точечных изображений звездных узоров // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. [под ред. А.Н. Пылькина]. Рязань: РГРТУ, 2010. С. 19–22.

11. Пашенцев Д.Ю., Иванов А.В., Зинина И.И. Обработка данных современных звёздных каталогов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 17-й Международной науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ 2012. С. 123–124

12. Пашенцев Д. Ю., Тишкин Р. В. Оценка экстремально-корреляционного алгоритма совмещения точечных изображений звездных узоров // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании (НИТ-2009): XIV Всероссийская науч.-техн. конф. студ., молодых учен. и спец. Рязань: РГРТУ, 2009. С.321–323.

13. Пашенцев Д.Ю., Алпатов Ю.Б., Тишкин Р.В. Скоростной алгоритм сегментации точечных изображений // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании (НИТ-2010): XV всероссийская науч.-техн. конф. студ., молодых учен. и спец. Рязань: РГРТУ, 2010. С. 288–289.

14. Пашенцев Д. Ю., Тишкин Р. В. Метод распознавания двойных звёзд на изображении звёздного неба // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании (НИТ-2011): XVI всероссийская науч.-техн. конф. студ., молодых учен. и спец. Рязань: РГРТУ. 2011. С.242–244.

Пашенцев Дмитрий Юрьевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ
ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗВЁЗДНОГО НЕБА
ОТ ВИДЕОДАТЧИКОВ СКАНОВОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.05.13 Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл.печ.л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ