

*На правах рукописи*



**КНЯЗЬКОВ Павел Александрович**

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОЦЕНКИ  
РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

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 Рязанском государственном  
радиотехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Еремеев Виктор Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
**Бехтин Юрий Станиславович**

кандидат технических наук, доцент  
**Гусев Сергей Игоревич**

Ведущая организация: **ФГУП «Государственный научно-  
производственный ракетно-космический  
центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара**

Защита состоится **29 декабря 2010 года в 12 ч** на заседании диссертаци-  
онного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом  
университете по адресу:  
**390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государст-  
венного радиотехнического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_ ноября 2010 года.

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



**Пржегорлинский В.Н.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Важнейшими техническими характеристиками современных космических систем наблюдения Земли (КСНЗ) являются пространственная и радиометрическая разрешающие способности. Первая характеристика определяет наименьшие размеры объектов на поверхности Земли, которые еще наблюдаются раздельно на изображениях. Радиометрическое разрешение обычно измеряется отношением сигнал/шум и характеризует степень различимости полезного видеосигнала на фоне различного рода шумов.

В процессе эксплуатации КСНЗ эти характеристики могут значительно изменяться по отношению к характеристикам, полученным в ходе предполетных калибровок и испытаний бортовой видеоаппаратуры. В то же время, как и любой другой информационный продукт, космические снимки (как исходные, так и обработанные) должны сопровождаться достоверными показателями качества, определяющими возможность их использования по назначению конечными потребителями.

При предполетных испытаниях КСНЗ оценка их геометрических и радиометрических характеристик осуществляется в лабораторных условиях путем подачи на вход видеодатчиков специальных мир и опорных сигналов. В процессе же эксплуатации КСНЗ получение этих характеристик подобным образом не представляется возможным. Поэтому единственным вариантом оценки пространственного и радиометрического разрешения снимков является создание технологий, основанных на статистическом анализе изображений, получаемых в процессе эксплуатации КСНЗ. Решению этой актуальной задачи посвящена настоящая диссертационная работа.

**Степень разработанности темы.** Вопросам оценки качества космических изображений посвящены труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов: Ахметова Р.Н., Бакланова А.И., Батракова А.С., Гектина Ю.М., Кондратьева Ю.М., Красильникова Н.Н., Миркина Л.И., Петрищева В.Ф., Савченко А.В., Сойфера В.А., Федорова В.М., Ярославского Л.П., Anuta P., Burns P., Choi T., Freeman W., Helder D., Leger D., Szeliski R. и др. Работы этих авторов составляют научно-методическую основу для решения задач, поставленных в диссертации.

В работах Батракова А.С., Anuta P., Burns P., Choi T., Helder D., Leger D., Cook M., Rangaswamy M. и др. предложены подходы к оценке пространственного разрешения по материалам съемки земной поверхности.

Первый подход основан на анализе контрастных тестовых объектов, специально созданных на поверхности Земли. Разрешающая способность в данном случае оценивается по степени размытия этих объектов на получаемых изображениях. В качестве тестовых объектов Helder D. и Rangaswamy M. предложили использовать систему точечных источников излучения, Leger D. - штриховые миры, а Anuta P., Cook M. и др. - мосты и аэродромные разметки. Такой подход ориентирован на конкретную КСНЗ, требует ее наведения на район расположения тестовых объектов, не дает возможности оценить разрешающую способность по всему полю изображения.

Второй подход представлен в работах Батракова А.С., Burns P., Choi T. Он основан на анализе степени размытия изображений резких границ естественных объектов поверхности Земли (пристаней, зданий, береговых линий

и т.п.) и в значительной степени свободен от недостатков первого подхода. Однако его узким местом является низкая точность оценки разрешающей способности из-за малой выборки измерений от анализируемых объектов. В настоящей диссертационной работе за основу принят второй подход и главное внимание уделено разработке алгоритмов комплексирования измерений от серии объектов, что позволяет многократно увеличить статистическую выборку измерений и обеспечить высокую точность решения поставленной задачи. Эти вопросы рассмотрены во второй главе.

Определение радиометрической разрешающей способности КСНЗ в процессе их эксплуатации сводится к достоверной оценке уровня шума на изображении. Freeman W., Szeliski R. и др. предложили решение этой задачи на основе анализа однородных по яркости участков изображения (пустынь, засохших морей, водной поверхности). Дисперсия изменения яркости на таких участках принимается в качестве уровня шума. Недостатком такого подхода является допущение о полной однородности анализируемых фрагментов в условиях отсутствия шума. В итоге любая сюжетная составляющая полезного видеосигнала ошибочно относится к шуму видеодатчика, что снижает точность решения рассматриваемой задачи.

В ряде работ показано, что при вполне определенных направлениях сканирования однородных по яркости фрагментов изображений шум может быть описан аддитивной независимой моделью. В этом случае, как показали Миркин Л.И. и Ярославский Л.П., дисперсия шума может быть оценена как разность измеренного нулевого отсчета автокорреляционной функции и нулевого отсчета, полученного на основе экстраполяции по соседним не зашумленным отсчетам. Точность экстраполяции, а следовательно, и точность оценки дисперсии шума полностью определяются степенью адекватности модели автокорреляционной функции статистическим свойствам анализируемых видеоданных. Экспериментальные исследования такого подхода с привлечением реальных космических изображений показали, что даже в рамках выбранной адекватной модели автокорреляционной функции ее параметры при переходе от одного участка изображения к другому значительно изменяются. Это не позволяет достичь высокой точности оценки уровня шума. В третьей главе диссертации предложены адаптивные модели автокорреляционной функции, параметры которых устанавливаются такими, чтобы с максимальной степенью учитывались статистические свойства изображений. Благодаря этому достигнута высокая точность решения рассматриваемой задачи.

Ключевым вопросом при создании технологий оценки пространственного и радиометрического разрешения КСНЗ непосредственно по космическим снимкам является разработка методик метрологической аттестации этих технологий. Публикации по этому вопросу в существующей литературе отсутствуют. В связи с этим в четвертой главе представлены методики достоверной оценки точности предложенных технологий, а также результаты экспериментальной апробации и практического внедрения.

**Цель диссертации** состоит в разработке алгоритмов и технологий высокоточной оценки разрешающей способности космических систем наблюдения Земли непосредственно по получаемым ими в процессе эксплуатации изображениям, а также решению вопросов метрологической аттестации этих технологий.

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

- проводится сравнительный анализ различных технологий оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности КСНЗ; определяются направления исследований по созданию новых высокоточных технологий решения этой задачи;
- разрабатываются алгоритмы и технология высокоточной оценки пространственной разрешающей способности на основе анализа резких краев границ объектов изображений;
- разрабатываются алгоритмы и технология высокоточной оценки радиометрической разрешающей способности изображений на основе анализа автокорреляционных функций;
- разрабатываются методики метрологической аттестации технологий оценки разрешающей способности КСНЗ по формируемым ими изображениям;
- реализуется комплекс анализа и оценки качества космических изображений на основе предложенных алгоритмов и технологий.

**Научная новизна** диссертационной работы в целом определяется тем, что впервые разработаны алгоритмы и технологии достоверной оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации, которые основаны на адаптивных моделях автокорреляционных функций, высокоточном описании на изображениях яркостных перепадов, их нормализации и объединении.

Конкретно **на защиту выносятся** следующие новые научные результаты:

- технология высокоточной оценки пространственной разрешающей способности космических систем наблюдения Земли, основанная на прецизионном описании на изображениях границ яркостных перепадов и их объединении после яркостной и геометрической нормализации;
- алгоритм высокоточного определения на изображениях положений резких границ объектов наблюдаемой сцены, основанный на помехоустойчивом субпиксельном определении координат яркостных перепадов, что позволило значительно повысить точность оценки пространственного разрешения КСНЗ;
- алгоритм объединения данных от серии яркостных перепадов, учитывающий их различные контрасты и наклоны, позволяющий увеличить число отсчетов функции рассеяния края и тем самым повысить точность оценки пространственной разрешающей способности;
- алгоритм и технология высокоточной оценки радиометрической разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации, которые основаны на адаптивных моделях автокорреляционных функций, адекватно описывающих статистические свойства реальных изображений;

- методики метрологической аттестации предложенных технологий, основанные на сопоставлении заданных и найденных показателей качества изображений и позволяющие получить достоверные оценки точности их пространственной и радиометрической разрешающей способности.

**Практическая ценность работы.** На базе разработанных алгоритмов и технологий создан программный комплекс анализа и оценки качества космических систем наблюдения Земли, обеспечивающий автоматизированную оценку пространственной и радиометрической разрешающей способности видеоданных от космических аппаратов «Ресурс-ДК» и «MeteoSat-8».

**Реализация и внедрение.** Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в процессе выполнения ОКР 25-08, НИР 23-09Г, ОКР 1-09, ОКР 12-10. Результаты работы в виде математических моделей, алгоритмов, программного обеспечения и информационных технологий внедрены в ОАО «Российские космические системы» и ФГУП «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 6 международных и 10 всероссийских конференциях: 5-й международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань-2007); 8-й и 9-й международных научно-технических конференциях «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (Курск-2008, 2010); 12, 13 и 14-й всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань-2007, 2008, 2009 – 2 доклада); всероссийских научно-технических конференциях «Интеллектуальные и информационные системы» (Тула-2007, 2009); 15-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань-2008); 6-й и 7-й всероссийских конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва-2008, 2009); международной научно-технической конференции «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы» (Курск-2009); 2-й и 3-й всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва-2009, 2010); 36-й международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва-2010).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 25 работ: 9 статей (в том числе 4 статьи по списку ВАК) и 16 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 122 с., 24 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 13 с. и включает 127 наименований. В приложении приведены документы о практическом использовании результатов диссертации.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*В главе 1 выполнен анализ существующих подходов и технологий оценки пространственного и радиометрического разрешения КСНЗ, выявлены их узкие места. Сформулированы направления научных исследований по созданию информационных технологий оценки этих характеристик на основе анализа резких яркостных перепадов границ объектов наблюдаемой сцены и корреляционного анализа изображений.*

Знание пространственной и радиометрической разрешающей способности позволяет оценить информативность сквозного информационного тракта КСНЗ, описать его частотное и энергетическое воздействия на получаемые изображения. Наиболее полно пространственная разрешающая способность КСНЗ описывается через частотно-контрастную характеристику (ЧКХ)  $T(\nu)$  – зависимость коэффициента передачи контраста  $T$  наблюдаемых объектов от их пространственной частоты  $\nu$ . Радиометрическое разрешение  $\gamma_\varepsilon$ , измеряемое обычно отношением сигнал/шум, характеризует степень различимости полезного видеосигнала на фоне различного рода шумов:  $\gamma_\varepsilon = \Delta B / \sigma_\varepsilon$  где  $\Delta B$  – амплитуда яркостного перепада объекта на изображении,  $\sigma_\varepsilon$  – СКО шума.

Наиболее агрегированным параметром информативности космических изображений является линейное разрешение  $l_{пред} = 1 / (2\nu_{пред})$ , соответствующее предельной пространственной частоте  $\nu_{пред}$ , которая находится из равенства  $\gamma_\varepsilon \cdot T(\nu_{пред}) = K_3(P_3)$ , где  $K_3$  – заданное отношение сигнала к шуму, обеспечивающее дешифрование объекта с вероятностью  $P_3$ . Определение  $K_3(P_3)$  основано на моделях распознавания человеком-наблюдателем конкретного вида тестового объекта, в качестве которого обычно используются штриховые миры. Таким образом, пространственное и радиометрическое разрешения оказывают обоюдное влияние на дешифрируемость объектов наблюдаемой сцены и их совокупное действие подлежит оценке для анализа информативности конкретной КСНЗ.

Систематизация известных подходов к оценке пространственной разрешающей способности систем наблюдения Земли позволила выделить два подхода к решению этой задачи. *Первый подход* основан на получении ЧКХ путем оценки степени размытия изображений специальных объектов, геометрические размеры которых на поверхности Земли точно известны: штриховые миры, точечные объекты в виде зеркал, мосты, аэродромная разметка, дороги и т.п. *Второй подход* основан на анализе степени размытия контрастных границ изображений объектов, для которых заранее известно только то, что размеры их яркостного перепада на поверхности Земли многократно меньше, чем оцениваемое разрешение (крыши зданий, береговые линии и др.). Анализ показал, что первый подход обладает следующими ограничениями: он ориентирован на конкретную КСНЗ; требует осуществления съемки тестовых объектов; не обеспечивает оценку разрешения по всему полю зрения. Второй подход в значи-

тельной степени свободен от этих ограничений, поскольку необходимые для анализа объекты в достаточном количестве присутствуют на большинстве снимках земной поверхности. По этим соображениям в диссертационной работе данный подход принят за основу. Вместе с тем, экспериментально установлено, что основным ограничением второго подхода является низкая точность оценки пространственного разрешения. Это обусловлено неточностью определения границ яркостных перепадов и параметрическим представлением функции рассеяния края, которое часто не соответствует реальному распределению яркости на границах объектов. Поэтому во второй главе диссертации главное внимание уделено разработке алгоритмов и технологии оценки пространственной разрешающей способности КСНЗ на основе высокоточного определения границ яркостных перепадов и комплексирования измерений по множеству анализируемых фрагментов.

Систематизация известных подходов к оценке радиометрической разрешающей способности изображений позволила выделить три направления решения этой задачи.

*Первое направление* основано на оценке шумовой составляющей изображений в сигнальном пространстве. В известных работах эта задача решается путем оценки дисперсии однородных по яркости участков изображений и кусочно-полиномиального приближения видеоданных. При повышении яркостной неоднородности анализируемых областей резко возрастает ошибка оценки дисперсии шума.

*Второе направление* базируется на анализе изображений, представленных в частотном или волновом пространстве (Фурье- и вейвлет-преобразований), и выделении информации о шуме из компонент преобразований, в которых он наиболее сильно проявляется по отношению к полезному видеосигналу. В данном случае коэффициенты преобразований, по которым осуществляется оценка уровня шума, содержат в себе информацию и о полезном видеосигнале, что приводит к завышению оценки уровня шума.

*Третье направление* основано на анализе автокорреляционной функции (АКФ) изображения. В диссертации показано, что на однородных по яркости участках изображения его шум корректно описывается аддитивной независимой моделью. В этом случае нулевой отсчет АКФ численно равен сумме дисперсии полезного сигнала и дисперсии шума, а другие отсчеты не подвержены искажению шумом и могут быть использованы для предсказания нулевого отсчета, т.е. имеется потенциальная возможность адекватно описать АКФ. По этим соображениям этот подход принят за основу и его развитие в третьей главе диссертации потребовало разработки алгоритмов и технологии высокоточной оценки уровня шума на изображениях на основе адаптивных моделей автокорреляционных функций, наиболее полно учитывающих статистические свойства реальных видеоданных.

При практическом использовании технологий определения пространственного и радиометрического разрешения их важным показателем является точность получаемых результатов. В известной литературе этот вопрос практи-

чески не освещен. В связи с этим в четвертой главе диссертации возникла необходимость в разработке методик метрологической аттестации предложенных технологий, а также практической реализации программного комплекса анализа и оценки качества космических изображений.

*В главе 2 разработаны алгоритмы и информационная технология высокоточной оценки пространственной разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации, основанные на анализе резких перепадов яркости объектов на изображениях.*

Спроектирована технология высокоточной оценки пространственной разрешающей способности КСНЗ в процессе их эксплуатации. Ее конструктивными элементами являются: использование помехозащищенного индикатора яркостного перепада; процедура субпиксельного уточнения границ; алгоритм комплексирования результатов измерений по множеству фрагментов; высокоточная кусочно-полиномиальная аппроксимация функции рассеяния края. Эта технология предполагает последовательное выполнение следующих этапов:

- выбор оператором серии прямоугольных фрагментов  $\Phi \in \{\Phi_k, k = \overline{1, K}\}$ , содержащих резкие яркостные переходы;
- высокоточное определение для каждого фрагмента границ яркостных перепадов в виде набора функций  $X \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$ , где  $m$  - номер строки фрагмента;
- нахождение для фрагментов функций рассеяния края (ФРК)  $G \in \{G_k, k = \overline{1, K}\}$ , описывающих изменение яркости в перепадах, нормализация этих функций и объединение;
- определение по результирующей ФРК функции рассеяния линии (ФРЛ), как производной от ФРК, и частотно-контрастной характеристики (ЧКХ), наиболее полно характеризующей пространственную разрешающую способность изображения.

Разработан алгоритм высокоточного координатного описания границ  $X \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$ , который в полной мере учитывает три особенности решаемой задачи: наличие в каждом фрагменте только одного резкого края, разделяющего однородные по яркости области; непрерывность границы и требование к определению границ с субпиксельной точностью.

Алгоритм предполагает вначале выделение границы в каждой строке фрагмента с помощью индикатора яркостного перепада  $\gamma_{kmn} = |B_{kmn}^{\text{Л}} - B_{kmn}^{\text{П}}|$ , где  $B_{kmn}^{\text{Л}}$  и  $B_{kmn}^{\text{П}}$  – средние значения отсчетов яркости в левой и правой частях скользящей апертуры, имеющей четное число элементов  $2h$  (рис. 1);  $m$ ,  $n$  и  $k$  – соответственно номера строки, столбца и фрагмента.

Далее положение контура в каждой строке уточняется до долей пикселя как «центр тяжести»: 
$$N_{km} = \frac{\sum_{i=i_{km}-h-1}^{i_{km}+h+1} i \gamma_{kmi}}{\sum_{i=i_{km}-h-1}^{i_{km}+h+1} \gamma_{kmi}}, \text{ где } i_{km} = \arg \max_n (\gamma_{kmn}).$$

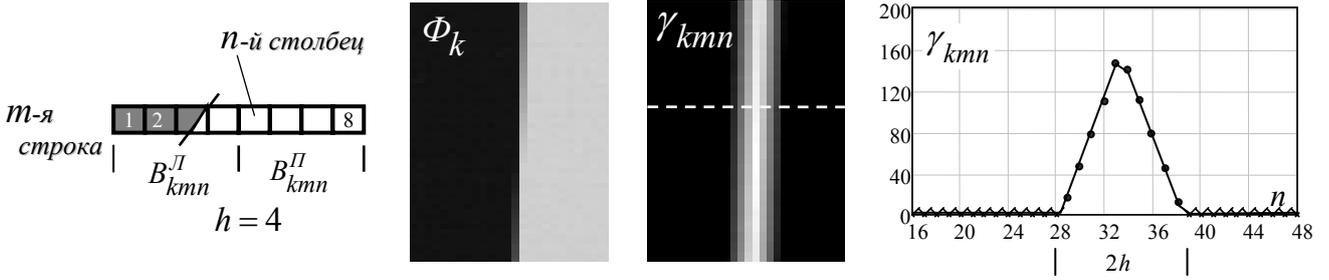


Рис. 1. Слева направо: индикатор перепада  $\gamma_{kmn}$ ; фрагмент  $\Phi_k$ ; изображение индикатора  $\gamma_{kmn}$ ; профиль строки  $\gamma_{kmn}$  для  $n \in [16 \dots 48]$

Из ряда альтернативных решений, рассмотренных в диссертации, уточнение границы этим способом обеспечило наибольшую точность. На заключительном этапе на основе координат  $(m, N_{km})$  по МНК находятся аналитические описания резких краев  $X_k(m)$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Все эти меры позволили описать границы яркостного перепада с точностью  $10^{-2}$  пикселя.

Разработан алгоритм комплексирования отсчетов функции рассеяния края от множества фрагментов, содержащих резкие яркостные перепады, на основе их приведения к единому углу ориентации и одинаковым яркостным уровням. Это позволило значительно увеличить объем статистической выборки и тем самым повысить точность оценки разрешающей способности КСНЗ. Согласно этому алгоритму на основе найденных  $X \in \{X_k(m), k = \overline{1, K}\}$  определяются ФРК  $G_k(x)$  для каждого фрагмента  $\Phi_k$  как  $G_k((n - X_k(m)) \cos \theta_k) = \Phi_k(m, n)$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $m = \overline{1, M_k}$ ,  $n = \overline{1, N_k}$ , где  $\theta_k$  – угол между границей и кадровым направлением изображения. Аргументом функции  $G_k(x)$  является расстояние от пикселя до яркостного перепада, а ее значением – яркость этого пикселя (рис. 2). При переходе от одной строки к соседней элементы изображения приближаются или удаляются от наклонной границы на субпиксельные расстояния, чем и достигается формирование ФРК с высокой детальностью. Далее измерения ФРК от всего набора фрагментов преобразуются к единым нижнему

$G_{JI}$  и верхнему  $G_{II}$  уровням яркости:  $\hat{G}_k(x) = \left( \frac{G_{JI} - G_{II}}{G_{Jk} - G_{Ik}} \right) (G_k(x) - G_{Jk}) + G_{JI}$ .

После чего  $\hat{G}_k(x)$ ,  $k = \overline{1, K}$ , приводятся к единому углу границы ( $\pi/2$ ) путем изменения масштаба по оси  $x$  в  $\mu_{\theta k} = \sqrt{1 + (b/a)^2 \text{ctg}^2 \theta_k}$  раз, где  $a$  и  $b$  – полуоси эллипсоидальной апертуры видеодатчика. После этого процедура объединения всех измерений в единую ФРК  $G(x) = \bigcup_{k=1}^K \hat{G}_k(x \mu_{\theta k})$  является корректной.

Исследованы вопросы точности восстановления функции  $G(x)$  по зашумленным отсчетам с использованием параметрических моделей ФРК и кусочно-полиномиальной аппроксимации. Установлено, что наиболее достоверные результаты дает кусочно-полиномиальное приближение ФРК. Такая операция выполняется для регулярно расположенных узловых точек, используемых как центральные точки скользящей апертуры с размером  $2a$ .

Для произвольного отсчета  $x_0$  по точкам  $G(x)$ , попавшим в апертуру, строится полином  $P(x) = p_0 + p_1(x - x_0) + p_2(x - x_0)^2 + p_3(x - x_0)^3$ , коэффициенты которого находятся из условия  $\sum_i [P(x_i) - G(x_i)]^2 = \min, x_i \in [x_0 - a, x_0 + a]$ .

Уточненное значение отсчета ФРК

в центральной точке апертуры  $x_0$  определяется коэффициентом  $p_0$ , а отсчет функции рассеяния линии – коэффициентом  $p_1 = F(x_0) = \left. \frac{dP(x)}{dx} \right|_{x=x_0}$ . Ис-

комая частотно-контрастная характеристика вычисляется как  $T(\nu) = \frac{|\Omega(\nu)|}{|\Omega(0)|}$ , где  $\Omega(\nu) = \mathfrak{F}[F(x)]$ ,  $\mathfrak{F}$  – преобразование Фурье.

Экспериментально установлено, что благодаря принятию всех перечисленных выше мер, рассматриваемая технология обеспечивает точность оценки пространственного разрешения не хуже 2 %.

*В главе 3 разработаны алгоритмы и информационная технология оценки радиометрической разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации, основанные на определении уровня шума на изображении с использованием адаптивных моделей автокорреляционных функций.*

В работе обоснована корректность использования аддитивно-независимой модели шума. Здесь прежде всего учитывались такие факторы, как независимость действия структурного и электронного шума, вполне определенный принцип сканирования изображения, яркостная однородность анализируемых фрагментов. В этом случае оценка дисперсии шума  $D_\varepsilon$  основана на том факте, что шум искажает только нулевой отсчет автокорреляционной функции (АКФ)  $\hat{K}_\tau(\tau = 0)$ , увеличивая его ровно на  $D_\varepsilon$ , и не искажает все ее другие отсчеты  $\hat{K}_\tau(\tau = 1, 2, \dots)$ . Значение не зашумленного нулевого отсчета  $K_0$

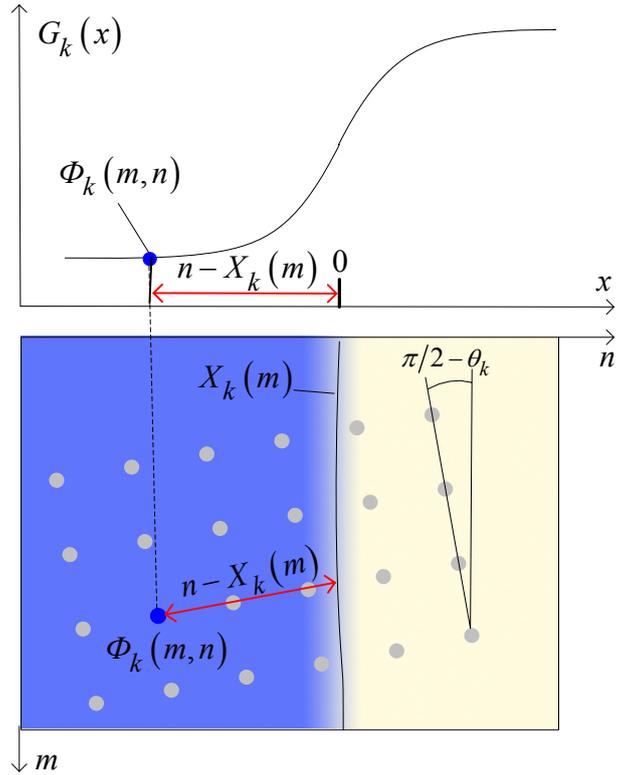


Рис. 2. Принцип формирования ФРК

может быть оценено по ряду не зависящих от шума отсчетов  $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \dots$  с использованием той или иной адекватной модели АКФ в виде функции  $K_\tau = f(\tau; \hat{K}_1, \hat{K}_2, \dots)$ . После этого  $D_\varepsilon$  находится как  $D_\varepsilon = \hat{K}_0 - K_0$ , где  $K_0 = f(0; \hat{K}_1, \hat{K}_2, \dots)$ . Здесь принципиально важным вопросом является выбор адекватной модели АКФ. С этой целью исследованы три адаптивные модели АКФ вида

$$K_\tau = ae^{-c\tau^\gamma}, \quad K_\tau = a/(1+c\tau^\gamma), \quad K_\tau = a+c\tau^\gamma, \quad (1)$$

где  $a$  и  $c$  находятся из условия прохождения функций через отсчеты  $\hat{K}_1 = K_1$  и  $\hat{K}_2 = K_2$ , а параметр  $\gamma$  определяется так, чтобы модель наиболее полно соответствовала статистическим свойствам видеоданных. В работе показано, что путем соответствующих преобразований отсчетов функции  $K_\tau$  показательная и дробно-рациональная модели АКФ сводятся к степенной, для которой проще получить аналитическое решение по оценке уровня шума. Поэтому все рассуждения в диссертации выполнены применительно к степенной модели  $K_\tau = a+c\tau^\gamma$  с учетом того, что полученные результаты после соответствующих функциональных преобразований отсчетов АКФ могут быть в равной степени отнесены и к показательной, и к дробно-рациональной моделям.

Разработан алгоритм высокоточной оценки дисперсии шума изображения на основе адаптивных моделей автокорреляционных функций, наиболее полно учитывающих статистические свойства видеоданных. Оптимальные значения параметра модели  $\gamma$  определяются из условия:

$$R = \sum_{i=1}^N (\hat{K}_{0i} - a_i - D_\varepsilon)^2 = \min, \quad (2)$$

где  $a_i = K_{1i} + (K_{1i} - K_{2i})x$ ,  $x = 1/(2^\gamma - 1)$ ,  $K_{1i}$ ,  $K_{2i}$  – значения АКФ для  $i$ -го столбца изображения при  $\tau = 1, 2$ . Значения  $K_\tau$  определяются по отдельным столбцам изображения, формируемым вполне определенными фотоприемными элементами, и поэтому не влияют на экстраполяцию нулевого отсчета. Выражение (2) определяет такое значение  $\gamma$ , при котором минимизируется разброс оценок дисперсий шума, найденных по отдельным столбцам. Из системы  $dR/dD_\varepsilon = 0$ ,  $dR/dx = 0$  определяются искомые параметры

$$D_\varepsilon = \overline{\hat{K}_0} - \overline{K_1} - (\overline{K_1} - \overline{K_2})x \quad (3)$$

и

$$x = \left[ \overline{\hat{K}_0 K_1} - \overline{\hat{K}_0 K_2} - (\overline{K_1} - \overline{K_2})(\overline{\hat{K}_0} - \overline{K_1}) - \overline{K_1^2} + \overline{K_1 K_2} \right] / \left[ (\overline{K_1} - \overline{K_2})^2 - (\overline{K_1} - \overline{K_2})^2 \right], \quad (4)$$

где черта над переменными означает операцию усреднения по множеству столбцов. Параметр модели АКФ  $\gamma$  определяется из выражения  $x = (2^\gamma - 1)^{-1}$ :

$\gamma = \frac{1}{\ln 2} \ln(1 - 1/x)$ . Найденное таким образом значение параметра  $\gamma$  является оптимальным в смысле критерия (2) для анализируемого набора видеоданных, т.е. модель автокорреляционной функции наилучшим образом адаптируется к статистическим свойствам изображения.

Рассматриваемая модель АКФ получила развитие в виде групповой адаптивной модели, что позволило значительно повысить точность оценки дисперсии шума  $D_\varepsilon$ . На этой основе разработан алгоритм оценки уровня шума. В этом алгоритме вначале определяется оптимальное значение  $\gamma$  для всего набора данных и затем по критерию (2) для каждого  $i$ -го столбца фрагмента изображения оценивается  $\gamma_i$  как

$$\gamma_i = \frac{1}{\ln 2} \ln \left( \frac{a_i - K_{2i}}{a_i - K_{1i}} \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

После этого столбцы изображения упорядочиваются по мере возрастания  $\gamma_i$ . Полученный таким образом упорядоченный набор столбцов разбивается на  $K$  групп так, чтобы количество столбцов в каждой группе было примерно одинаковым. Параметры модели  $K_{k\tau} = a_k + c_k \tau^{\gamma_k}$  для каждой  $k$ -й группы находятся из условия

$$R = \sum_k \sum_i \left( \hat{K}_{0ki} - a_{ki} \right)^2 - \left( \bar{K}_0 - \bar{a} \right)^2 = \min, \quad (6)$$

где  $a_{ki} = K_{1ki} + (K_{1ki} - K_{2ki})x_k$ ,  $\bar{a} = \bar{K}_1 + \frac{1}{K} \sum_k (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k$ ,  $x_k = (2^{\gamma_k} - 1)^{-1}$ ,  $\bar{K}_{1k}$  и  $\bar{K}_{2k}$  – средние значения  $K_{1ki}$  и  $K_{2ki}$  для  $k$ -й группы. По аналогии с (2) условие (6) определяет такие значения параметров  $\gamma_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , при которых минимизируются разбросы оценок дисперсий в каждой из сформированных групп. Искомые параметры  $x_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , определяются из системы уравнений  $dR/dx_k = 0$ ,  $k = \overline{1, K}$ , которая приводится к матричной форме:

$$\begin{bmatrix} (\alpha_1 S_1 - \beta_1) + \alpha_1 S_2 + \dots + \alpha_1 S_K \\ \alpha_2 S_1 + (\alpha_2 S_2 - \beta_2) + \dots + \alpha_2 S_K \\ \dots \\ \alpha_K S_1 + \alpha_K S_2 + \dots + (\alpha_K S_K - \beta_K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \dots \\ \omega_K \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\alpha_k = \frac{1}{K} (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})$ ,  $S_k = (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})$ ,  $\beta_k = (K_{1k} - K_{2k})^2$ ,  
 $\omega_k = (\bar{K}_0 - \bar{K}_1) (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k}) + \bar{K}_{1k}^2 - \bar{K}_{0k} \bar{K}_{1k} + \bar{K}_{0k} \bar{K}_{2k} - \bar{K}_{1k} \bar{K}_{2k}$ ,  $k = \overline{1, K}$ .

После определения из системы линейных уравнений (7)  $x_k$ ,  $k = \overline{1, K}$ , оцениваются дисперсии шума в каждой  $k$ -й группе  $D_{\varepsilon k} = \bar{K}_{0k} - \bar{K}_{1k} - (\bar{K}_{1k} - \bar{K}_{2k})x_k$ , и путем их усреднения находится итоговая оценка  $D_{\varepsilon}$  как взвешенное среднее

$$D_{\varepsilon} = \sum_{k=1}^K (N_k/N) D_{\varepsilon k}. \quad (8)$$

Выполнены экспериментальные исследования алгоритма, основанного на групповой адаптивной модели АКФ, с привлечением снимков от космического аппарата «Ресурс-ДК». В результате установлено, что этот алгоритм позволяет выполнить оценку дисперсии шума с точностью порядка 0,03.

*В главе 4 разработаны методики метрологической аттестации технологий оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности КСНЗ, позволяющие получить достоверные оценки точности решения этих задач, спроектирован программный комплекс анализа и оценки качества космических изображений.*

Разработана методика оценки точности определения пространственного разрешения, основанная на формировании эталонных перепадов яркости, их размытии и зашумлении и сравнении эталонных значений показателей разрешающей способности со значениями, полученными с использованием разработанной технологии. В результате проведения экспериментов установлено:

– точность оценивания положения яркостного перепада составляет порядка  $10^{-2}$  от размера пикселя при СКО добавляемого шума порядка одной градации яркости;

– относительная точность оценки пространственной разрешающей способности не хуже 2 % при том же уровне шума изображения.

Спроектирована методика оценки точности определения дисперсии шума изображения, основанная на нахождении СКО разброса оценок дисперсии шума отдельных наборов видеоданных, образующих в совокупности полную статистическую выборку. В результате экспериментальных исследований с привлечением изображений от космического аппарата «MeteoSat-8» установлено:

– точность оценки дисперсии шума не зависит от его уровня;

– СКО ошибки определения дисперсии шума составляет 0,02, что дает возможность выполнить оценку малых уровней шумов, сопоставимых с шумом квантования по яркости.

Сформулированы принципы построения программного комплекса анализа и оценки качества (ПК АОК) космических изображений и меры, направленные на обеспечение его максимальной производительности и универсальности. Выполнена разработка ПК АОК, основу которого составляют алгоритмы и информационные технологии высокоточной оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности, предложенные в главах 2 и 3.

Разработанные автором модули функционального наполнения программного комплекса анализа и оценки качества написаны на объектно-ориентированном языке программирования С++ и включают более 40 файлов (около 45 000 программных строк) с определениями различных классов и

функций. Программный комплекс построен с использованием интегрированной среды разработки приложений Microsoft Visual C++ 2005 и функционирует в виде 32-разрядного приложения в среде MS Windows XP/2000/2003.

Предложена эффективная организация вычислительного процесса оценки разрешающей способности изображений на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двухядерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0 GHz/667 MHz, обладающей оперативной памятью 8 Гбайт. Благодаря распараллеливанию вычислительного процесса на восемь потоков, по сравнению с однопоточным процессом, удалось сократить время анализа изображений в 6 раз.

Комплекс введен в опытную эксплуатацию и используется для анализа снимков от космических аппаратов «Ресурс-ДК» и «MeteoSat-8».

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Выполнен анализ подходов и технологий численной оценки разрешающей способности КСНЗ в процессе их эксплуатации. Обоснована целесообразность построения технологий, основанных на анализе резких яркостных перепадов границ объектов и корреляционном анализе изображений. Определены первоочередные научные исследования, направленные на создание алгоритмов и технологий высокоточной оценки разрешающей способности КСНЗ.

2. Разработана информационная технология высокоточной оценки пространственной разрешающей способности КСНЗ на основе анализа резких яркостных перепадов границ объектов наблюдаемой сцены. Конструктивными элементами технологии являются: помехозащищенная идентификация яркостного перепада; субпиксельное уточнение границ; комплексирование результатов измерений по множеству фрагментов; кусочно-полиномиальная аппроксимация функции рассеяния края. Реализация этих мер позволила достичь высокой точности оценки пространственного разрешения изображения, порядка 2 %.

В рамках этой технологии разработаны:

- алгоритм определения резких яркостных перепадов, позволяющий их описать с точностью  $10^{-2}$  пикселя;
- алгоритм комплексирования отсчетов функций рассеяния края от множества фрагментов на основе их приведения к единым яркостным уровням и углу ориентации;
- процедура кусочно-полиномиальной аппроксимации зашумленных отсчетов функции рассеяния края яркостных перепадов, которая дает более точные решения для произвольных распределений яркости на границах объектов.

3. Разработаны алгоритмы оценки дисперсии шума на изображении, основанные на его корреляционном анализе. Для этого исследованы показательная, степенная и дробно-рациональная модели автокорреляционных функций. Предложен и исследован алгоритм оценки уровня шума на основе анализа разностного изображения.

4. Разработана информационная технология высокоточной оценки радиометрического разрешения изображений, основанная на адаптивных моделях АКФ. Отличительным элементом этой технологии является настройка параметров модели АКФ под статистические свойства анализируемых видеоданных. Экспериментально установлено, что эта технология позволяет выполнить оценку дисперсии шума с точностью 0,02.

В рамках этой технологии разработаны:

- алгоритм оценки дисперсии шума изображения на основе адаптивной модели АКФ;
- алгоритм оценки дисперсии шума на основе групповой адаптивной модели автокорреляционной функции, основанный на разбиении всего набора видеоданных на группы с близкими статистическими свойствами и определении для них оптимальных параметров модели АКФ.

5. Разработана методика оценки точности определения пространственного разрешения, основанная на формировании эталонных перепадов яркости, их размытии и зашумлении и сравнении эталонных значений показателей разрешающей способности с измеренными. В результате проведения серии экспериментов установлено, что относительная точность оценки пространственного разрешения не хуже 2 %.

6. Спроектирована методика оценки точности определения дисперсии шума изображения, основанная на нахождении СКО разброса оценок дисперсии шума для отдельных наборов видеоданных. В результате экспериментальных исследований с привлечением изображений от космического аппарата «MeteoSat-8» установлено, что точность определения дисперсии шума составляет 0,02.

7. Сформулированы принципы построения программного комплекса анализа и оценки качества космических изображений и меры, направленные на обеспечение максимальной производительности и универсальности комплекса. Выполнена разработка программного комплекса анализа и оценки качества космических изображений, основу которого составляют алгоритмы и информационные технологии высокоточной оценки пространственной и радиометрической разрешающей способности, предложенные в главах 2 и 3.

Комплекс введен в опытную эксплуатацию и используется для анализа видеоданных от космических аппаратов «Ресурс-ДК» и «MeteoSat-8».

Предложена эффективная организация вычислительного процесса оценки пространственной разрешающей способности на серверной ЭВМ IBM x3850 с 4-мя двудерными процессорами Intel Xeon 7120N 4x3.0 GHz/667 MHz, обладающей оперативной памятью 8 Гбайт. Благодаря распараллеливанию вычислительного процесса на восемь потоков, по сравнению с однопоточным процессом, удалось сократить время анализа изображений в 6 раз.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Князьков П.А., Москвитин А.Э. Особенности разработки программы анализа и визуализации спутниковых изображений в ОС МСВС // Тез. докл. 12-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 323–325.
2. Князьков П.А. Особенности использования СУБД PostgreSQL при создании системы анализа и оценки качества спутниковых изображений // Тез. докл. 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2007. С. 242–244.
3. Каплин А.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. Программная система оценки качества информации от космического аппарата «Ресурс-ДК» // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы». Тула, 2007. С. 104.
4. Князьков П.А. Оценка частотно-контрастной характеристики систем формирования изображений на основе анализа яркостных перепадов // Тез. докл. 8-й междунар. конф. «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации». Курск, 2008. Ч. 1. С. 150–152.
5. Князьков П.А. Оценка разрешающей способности космических изображений на основе анализа границ объектов наблюдаемой сцены // Материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2008. Ч.2 С. 113–115.
6. Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А. Статистическая оценка степени зашумленности космических изображений земной поверхности // Вестник РГРТУ. Рязань, 2008. № 24. С. 3–7.
7. Князьков П.А. Оценка степени зашумленности изображения на основе анализа его битовых плоскостей // Тез. докл. 13-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2008. С. 60–62.
8. Еремеев В.В., Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка степени зашумленности изображений. РГРТУ, Рязань, 2008. Деп. в ВИМИ. Исходящий № ДО-9042 от 10.06.08.
9. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» опτικο-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Тез. докл. 6-й всерос. открытой ежегодной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 2008.
10. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка разрешающей способности систем дистанционного зондирования Земли // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. РГУ им. С.А. Есенина. Рязань, 2008. С. 64–68.
11. Князьков П.А. Программно-математическое обеспечение определения функции рассеивания точки систем дистанционного зондирования Земли // Тез.

докл. междунар. конф. «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы». Курск, 2009. Ч. 1. С. 176–177.

12. Князьков П.А. Технология оценки разрешающей способности систем ДЗЗ в процессе их эксплуатации // Тез. докл. 2-й всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва: РНИИ КП, 2009.

13. Князьков П.А., Москвитин А.Э. Программно-математическое обеспечение оценки измерительных свойств данных дистанционного зондирования Земли // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные и информационные системы». Тула, 2009. С. 71–72.

14. Князьков П.А. Технологии оценки пространственного и радиометрического разрешения материалов космической съемки на основе их статистического анализа // Тез. докл. 14-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2009. С. 310–311.

15. Князьков П.А., Москвитин А.Э. Информационная поддержка процесса испытаний систем дистанционного зондирования Земли // Тез. докл. 14-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2009. С. 318.

16. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка разрешающей способности материалов космической съемки на основе их статистического анализа // Тез. докл. 7-й всерос. открытой ежегодной конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 2009.

17. Зенин В.А., Князьков П.А. Оценка отношения «сигнал/шум» оптико-электронных приборов по изображениям земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Выпуск 6. Том I. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 160–166.

18. Еремеев В.В., Князьков П.А., Москвитин А.Э. // Оценка разрешающей способности аэрокосмических изображений на основе их статистического анализа // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 3. С. 27–30.

19. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка уровня аддитивного шума на аэрокосмических изображениях поверхности Земли // Вестник РГРТУ. Рязань, 2010. № 32. С. 8–11.

20. Князьков П.А. Повышение точности определения положения резких краев на космических изображениях Земли в задаче оценки линейного разрешения // Тез. докл. междунар. молодежной науч. конф. «XXXVI Гагаринские чтения», Москва, МАТИ. 2010. Т. 8. С. 202.

21. Князьков П.А. Методика высокоточной оценки дисперсии шума на аэрокосмических изображениях // Тез. докл. 3-й всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Москва: РНИИ КП, 2010.

22. Еремеев В.В., Князьков П.А. Аттестация методики оценки разрешающей способности оптико-электронных систем формирования аэрокосмических изображений // Тез. докл. 9-й междунар. конф. «Оптико-электронные приборы

и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации». Курск, 2010. С. 135–136.

23. Еремеев В.В., Князьков П.А. Оценка разрешающей способности материалов космической съемки на основе их статистического анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Выпуск 7. Том 2. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 26–34.

24. Еремеев В.В., Князьков П.А. Высокоточное и помехоустойчивое нахождение положения яркостных перепадов на изображениях при оценке линейного разрешения // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. С. 62–67.

25. Еремеев В.В., Князьков П.А., Козлов Е.П., Москвитин А.Э. // Технологии анализа и оценки качества космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2010. № 3. С. 30–37.

**Князьков Павел Александрович**

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОЦЕНКИ  
РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**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.