

На правах рукописи

ЕГОШКИН Николай Анатольевич

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
КОЛЕСНЫХ ТЕЛЕЖЕК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ
НА ОСНОВЕ СКАНЕРНОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена в Рязанском государственном
радиотехническом университете

Научный руководитель: Заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор
Еремеев Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мусолин Александр Константинович

кандидат технических наук
Гусев Сергей Игоревич

Ведущая организация: **ЗАО «Центр перспективных наукоемких
технологий», г. Москва**

Защита состоится **15 мая 2007 года в 12 час.** 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 5 апреля 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
к.т.н., доцент

Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Железнодорожный транспорт составляет основу транспортной системы Российской Федерации. В результате интенсивной эксплуатации в сложных метеорологических условиях быстро изнашиваются несущие части подвижного состава: колеса, буксы, рамы колесных тележек, элементы тормозной системы, что может приводить к транспортным авариям, огромному экономическому ущербу и трагическим последствиям. Прежде всего это касается транспортировки людей и опасных грузов, доля которых для территории России составляет примерно 50 % от общего объема перевозок. Остро стоит задача упреждающего выявления различного рода дефектов, которые проявляются в возникновении трещин и изломов на колесных дисках и раме, износе поверхности катания, заклинивании подшипников букс и др.

По мнению многих специалистов современное состояние средств обследования подвижных частей железнодорожного транспорта является неудовлетворительным. Существующие технологии обследования характеризуются низкой эффективностью и недостаточным уровнем автоматизации. Основными инструментами осмотрщиков вагонов были и остаются зрение и слух. Существующие автоматизированные средства контроля морально устарели и мало пригодны для массового обследования подвижного состава. Поэтому разработка современных высокоавтоматизированных систем оперативного обследования железнодорожных тележек является актуальной и практически важной задачей.

Сложность решения данной задачи определяется рядом факторов. Во-первых, массовое обследование транспорта наиболее эффективно проводить во время штатного движения поездов, без дополнительных остановок. В связи с этим возникает проблема создания новых конструкций датчиков, способных измерять те или иные параметры состава во время его движения, поскольку традиционные методы активного обследования (например, ультразвуковые, магнитные) в данном случае не применимы. Во-вторых, возникает проблема выбора контролируемых параметров, так как дефекты чаще всего являются скрытыми и проявляются в незначительных отклонениях состояния объектов от нормы. В-третьих, сложной задачей является анализ и интерпретация измеряемых параметров, поскольку состояние объекта определяется массой случайных факторов (изменение скорости движения, размеров и взаимного положения движущихся частей; различные погодные условия - дождь, снег, туман, температура среды и др). Задача строгого учета мешающих факторов трудно формализуема.

В настоящей диссертации спроектирована система обработки и анализа изображений колесных тележек, в которой используется сканерный принцип тепловизионной съемки. Датчик, построенный на этом принципе, позволяет в сложных условиях наблюдения железнодорожных составов сформировать качественные двумерные изображения подвижных частей. В рамках этой системы разработаны алгоритмы и информационные технологии геометрической и яркостной обработки и анализа тепловизионных изображений, позволяющие в условиях движения поезда и изменения погодных условий выявлять возможные неисправности колесных тележек.

Степень разработанности темы. Проблеме автоматического анализа состояния железнодорожных тележек в нашей стране и за рубежом уделяется большое внимание. Эта проблема нашла достаточно глубокое освещение в трудах отечественных и зарубежных ученых: Гридюшко В.И., Сендеров Г.К., Шайдуров П.С., Свалухин В.Г., Образцов В.Л., Самодуров В.И., Лозинский С.Н., Алексеев А.Г., Трестман Е.Е., Serafini R., Violi A.G., Бернес Р.Б., Стамфорд Ф.Ш., Сиблей Г.С., Pelino W.M.

В нашей стране решение вопросов обследования тележек сконцентрировано во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). В нем было разработано семейство автоматических диагностических систем ПОНАБ/ДИСК/КТСМ, которые нашли широкое применение на железных дорогах страны (первая система ПОНАБ-1 спроектирована в 1958г, последняя КТСМ-02БТВ в 2002г и внедряется в настоящее время). Разработанные системы служат для комплексного обследования тележек железнодорожного состава; их основу составляют тепловые детекторы перегретых букс и заторможенных колес. Основным недостатком подобных систем является то, что в качестве датчиков используются *одноэлементные* инфракрасные приемники (ИК-приемники). Поскольку эти приемники не обладают электронной разверткой, то они не обеспечивают детального анализа тепловых полей.

В США и других странах выполнена серия схожих разработок (патенты US 3169735, US 4928910, EP 0276201, EP 0265538, EP 0263896, FR 1217002 и др.), в которых также предлагаются различные одноэлементные детекторы для измерения температуры букс и тормозов проезжающих поездов и которые имеют такие же функциональные ограничения.

В связи с этим предпринимались попытки создания диагностических систем, в которых формируются и обрабатываются двумерные тепловизионные изображения тележки в целом. Так, в патентах DE 2534123 B2, US 3697744 A, RU 2126754 C1 предложены *кадровые* тепловизионные системы. Однако из-за конечного времени экспозиции при съемке движущихся поездов в таких системах возникает «смаз» изображений, приводящий к потере точности измерения температуры и, как следствие, к снижению качества контроля.

Специалистами Рязанского государственного радиотехнического университета, ЗАО «Центр перспективных наукоемких технологий» и Российского НИИ космического приборостроения предложена иная концепция построения системы обследования, основанная на сканерном принципе тепловизионной съемки. Формирование тепловых изображений в данной системе осуществляется двумя линейками ИК - приемников, которые устанавливаются с двух сторон от железнодорожного полотна в вертикальном направлении (рис. 1). Развертка изображения по горизонтали достигается за счет движения поезда, а по вертикали за счет периодического высокоскоростного опроса элементов линейки, что позволяет получать изображения без «смаза». Основное содержание настоящей диссертации составляет разработка математических моделей, алгоритмов и программ, обеспечивающих эффективное функционирование систем такого класса.

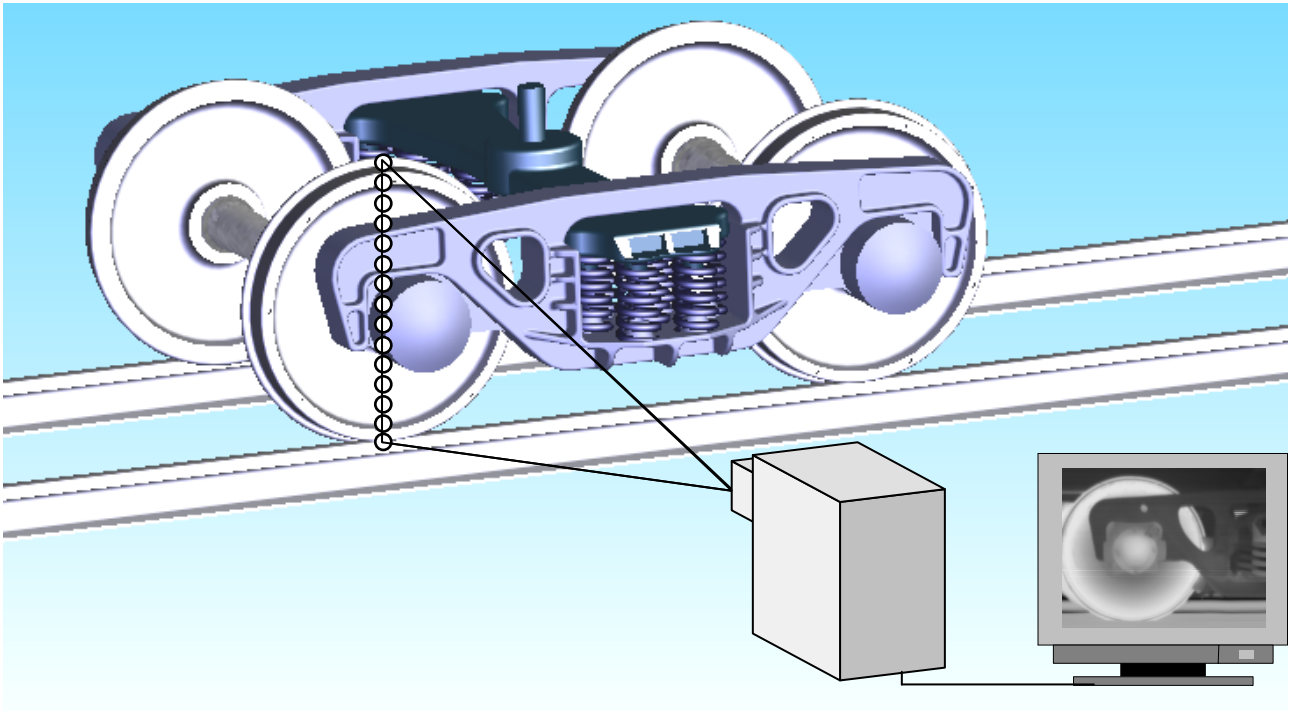


Рис 1. Сканерный принцип съемки тележки ИК - линейкой

Цель диссертации состоит в проектировании системы обработки и анализа изображений колесных тележек железнодорожных составов на основе сканерной тепловизионной съемки, позволяющей в условиях движения поезда и изменения погодных условий выявлять возможные неисправности подвижных частей.

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

- системный анализ технологий дистанционного обследования колесных тележек и формальное описание основных задач обработки тепловизионных изображений при сканерном принципе их формирования;
- разработка алгоритмов и общей технологии геометрической коррекции и анализа тепловизионных изображений колесных тележек;
- построение алгоритмов поиска и идентификации колесных тележек и отдельных деталей и определения их геометрических характеристик по данным тепловизионной съемки;
- разработка алгоритмов и технологии яркостной коррекции и анализа тепловизионных изображений;
- проектирование системы признаков дефектов колесных тележек на основе анализа тепловизионных изображений;
- практическая реализация системы обработки и анализа изображений колесных тележек железнодорожных составов, основанной на сканерном тепловизионном принципе съемки.

Научная новизна диссертации предопределяется тем, что в ней впервые выполнена разработка системы обследования колесных тележек железнодорожных вагонов на основе сканерной тепловизионной съемки. Использование для тепловизионной съемки линеек приемников ИК - излучения потребовало разработки новых математических моделей, алгоритмов и технологий формирования, коррекции и анализа изображений колесных тележек.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- геометрическая модель формирования и алгоритм коррекции изображений от тепловизионного сканирующего устройства, которые позволяют устранить координатные искажения, обусловленные изменениями условий тепловизионной съемки;
- алгоритмы идентификации колесных тележек и высокоточной оценки их геометрических характеристик на основе сканерной тепловизионной съемки;
- модель тракта формирования сканерных ИК - изображений, основанная на аналитическом описании процесса тепловизионной сканерной съемки и позволяющая реализовать высококачественную коррекцию возникающих радиометрических искажений;
- система признаков дефектов колесных тележек, основанная на двумерном анализе тепловых изображений и позволяющая повысить эффективность выявления тепловых аномалий и возможных неисправностей;
- информационная технология обработки и анализа изображений колесных тележек на основе тепловизионной сканерной съемки, позволяющая автоматизировать трудоемкие процессы обследования железнодорожных составов.

Практическая ценность работы состоит в том, что в ней предложены математические модели, алгоритмы, технологии и программная система анализа колесных тележек железнодорожных составов по их изображениям, формируемым на основе сканерной тепловизионной съемки в процессе движения поезда при различных метеорологических условиях наблюдения. Данная система позволяет вести комплексный анализ состояния колесных тележек всех проходящих поездов, выявлять неисправности тормозной системы, буксовых узлов, обнаруживать трещины на колесных дисках. Разработанные модели, алгоритмы и технологии создают теоретическую основу для построения эффективных систем тепловизионного обследования движущихся объектов самого различного назначения.

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках НИР 43-04, ОКР 13-05, ОКР 23-06.

Результаты диссертационной работы в виде математических моделей, алгоритмов и технологий внедрены в ЗАО «Центр перспективных наукоемких технологий», Российском НИИ космического приборостроения и депо ст. Рыбное Московской железной дороги.

Система TermoScan прошла натурные испытания на станции Рыбное. В результате обработки информации по 93 железнодорожным составам уста-

новлена ее высокая эффективность в плане обнаружения наиболее встречающихся дефектов: неисправностей тормозной системы, буксовых узлов и трещин на колесных дисках.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 13-й и 14-й международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань-2004; Рязань-2005, 2 доклада); 3-й всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва-2005); 9-й, 10-й, 11-й, 12-й всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань-2004, 2005, 2006; Рязань-2007, 2 доклада); 15-й и 18-й всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» (Нижний Новгород - 2005, 2006).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ: 7 статей и 11 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 148 стр., 33 рисунка и 5 таблиц. Список литературы на 13 стр. включает 119 наименований. В приложении на 3 стр. приведены документы о внедрении и практическом использовании результатов диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен системный анализ задачи обследования колесных тележек железнодорожных составов. Выявлены узкие места существующих технологий и сформулированы направления совершенствования процессов обследования на основе использования сканерной тепловизионной съемки.

В результате систематизации установлено, что колесные тележки железнодорожных составов представляют собой сложные динамические объекты, их структура является иерархической и может быть описана ориентированным деревом $G(O, U)$. Дано формальное определение понятия дефекта в терминах динамических систем. Показано, что процесс описания и выявления неисправностей неразрывно связан с используемыми технологиями измерения параметров и состояний объектов, исследована соответствующая нормативная документация. В настоящее время на железнодорожном транспорте существует комплекс мер, направленных на обеспечение безаварийной работы и состоящих в обследовании тележек в депо, на стоянках и во время движения. Рассмотрены преимущества и недостатки конкретных мер, показано, что в наибольшей степени для массового оперативного обследования подходят методы полностью автоматического контроля подвижных составов при помощи специальных напольных датчиков.

Показано, что одним из самых информативных признаков дефектов является структура теплового поля тележки $T(X, Y, Z)$, где X, Y, Z – пространст-

венные координаты. Дистанционное исследование этого поля может быть выполнено при помощи тепловизоров, регистрирующих инфракрасное излучение $E(X, Y, Z, \lambda)$ от поверхности, которую можно описать уравнением $P(X, Y, Z) = 0$. Связь излучения $E(X, Y, Z, \lambda)$ с полем $T(X, Y, Z)$ зависит от состоянием поверхности $S(\lambda)$, где λ – длина волны излучения, и описывается законом Планка.

Исследованы и систематизированы известные технологии тепловизионного обследования. Показано, что широко применяемые однолучевые системы (ПОНАБ/ДИСК/КТСМ и зарубежные аналоги) не обеспечивают детального анализа структуры тепловых полей объектов, поскольку ориентированны на точечные измерения температуры. Кроме того, эти измерения зависят от действия ряда случайных факторов – особенностей формы, характера движения, характеристик тепловизора и др., причем это влияние принципиально невозможно устранить при обработке информации.

Изучены известные решения, направленные на получение детальных тепловых полей объектов. Показано, что используемые для этих целей *одноэлементные* сканирующие датчики, а также *кадровые* системы на основе тепловизоров третьего поколения не обеспечивают требуемого качества съемки, поскольку в результате движения составов возникает «смаз» изображений. На основе результатов анализа этого явления обоснована целесообразность использования тепловизоров на базе линеек фоторезисторов Cd-Hg-Te (ИК - линеек), которые позволяют за счет малого времени накопления лучистой энергии формировать изображения без эффекта «смаза», с высокими температурным и пространственным разрешениями. Построение тепловизоров на основе таких линеек требует решения ряда новых задач по координатной и сигнальной обработке изображений.

Исследованы основные задачи, решаемые в системах тепловизионного обследования колесных тележек. Показано, что геометрическая структура изображения $B(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$, формируемого сканерной тепловизионной системой, отражает строение $G(O, U)$ железнодорожного состава, но зависит от большого числа детерминированных и случайных факторов. Вначале исследована задача идентификации отдельных объектов наблюдения. Она состоит в том, чтобы выделить на изображении соответствующие этим объектам сегменты S_{ki} , $i = \overline{1, N_{Tk}}$, $k = \overline{1, K}$, где k – номер типа объекта, i – номер экземпляра. Множество этих сегментов эквивалентно множеству O объектов состава. В известных системах идентификация объектов осуществляется двумя способами. Во-первых, с помощью датчиков, устанавливаемых на рельсах. В данном случае возникают ошибки распознавания объектов, так как в процессе идентификации не используются тепловизионные видеоданные. Во-вторых, процесс идентификации осуществляется с участием оператора, что не позволяет вести массовое, оперативное обследование подвижного состава. В связи с этим обосновано *первое направление совершенствования* систем обследования, основанное на комплексном использовании информации от путевых датчиков и тепло-

визионных изображений, с целью полной автоматизации процесса идентификации объектов состава.

Следующая задача связана с анализом тепловизионного изображения $B(m, n)$ в пределах идентифицированных участков S_o , $o \in O$, с целью выявления дефектов. Решение этой задачи предполагает построение и анализ динамических моделей объектов железнодорожного транспорта вида $\mathbf{D}_o(t) = \mathbf{D}_o(t - t_n, \mathbf{D}(t_n), \mathbf{S}(t - t_n), \mathbf{P}_o)$, где $\mathbf{D}_o(t)$ – вектор состояния объекта $o \in O$, описывающий распределение температур; \mathbf{P}_o – вектор параметров объекта; t_n – начальный момент времени; $\mathbf{S}(t)$ – вектор внешних воздействий. Показано, что строгие модели такого типа, основанные на решении обратной задачи нестационарной теплопроводности и используемые при активной тепловой диагностике, оказываются не применимыми к обследованию движущихся поездов. Исследованы также имитационные модели. В результате установлено, что они сложны в вычислительном плане и не позволяют использовать структуру теплового поля для поиска дефектов. Поэтому в качестве *второго направления совершенствования* тепловизионного обследования обоснована необходимость построения для объектов подвижного состава системы признаков дефектов, основанной на анализе структуры тепловых полей, и разработки соответствующих алгоритмов выявления возможных неисправностей.

Показано, что решение задач анализа тепловизионных изображений $B(m, n)$ существенно затруднено влиянием на их структуру массы случайных и детерминированных искажающих факторов, что требует предварительной нормализации изображений обследуемых объектов. Фактически, для каждого объекта $o \in O$ из фрагментов $B(m, n)$, $(m, n) \in S_o$, необходимо сформировать новые изображения $D_o(x, y)$, $(x, y) \in s_o$, геометрическая структура которых практически не зависит от условий формирования (расположения и формы объектов, закона движения, механизма сканирования конкретного датчика), а радиометрические искажения отсутствуют. В результате по $D_o(x, y)$ становится возможным с высокой точностью измерять поверхностные температуры. Эти вопросы составляют *третье направление совершенствования* систем тепловизионного обследования. В рамках этого направления необходимо построить для каждого объекта модели съемки, устанавливающие связь между изображением $B(m, n)$ и динамическими полями спектральной яркости $E(X, Y, Z, \lambda, t)$ и температуры $T(X, Y, Z, t)$.

Наконец, *четвертое направление* связано с созданием полностью автоматизированной системы обследования колесных тележек движущихся железнодорожных составов на основе сканерной тепловизионной съемки, включая и специализированное программное обеспечение.

В главе 2 разработаны модели, алгоритмы и технология геометрической обработки и комплексирования сканерных тепловизионных изображений движущегося состава с целью идентификации обследуемых объектов и измерения их геометрических характеристик.

Разработана общая технология геометрической обработки и анализа теп-

ловизионной информации. В основе технологии лежит аналитическое описание процесса формирования изображения $B(m, n)$ для каждого объекта подвижного состава:

$$X = F_X(m, n; \mathbf{P}), \quad Y = F_Y(m, n; \mathbf{P}), \quad Z = F_Z(m, n; \mathbf{P}), \quad (1)$$

где \mathbf{P} – искомый вектор случайных факторов. На основе этого описания решается задача идентификации отдельных объектов состава и производится оценка вектора \mathbf{P} , описывающего процесс съемки конкретного объекта. В конечном счете формируются нормализованные изображения отдельных объектов $D(x, y)$, инвариантные к условиям их съемки.

В рамках этой технологии решается также задача комплексирования серии изображений $B_q(m, n)$, $q = \overline{1, Q}$, от различных ИК - линеек. Дело в том, что в современных тепловизорах высокие пространственное и температурное разрешения достигаются за счет использования нескольких линеек ИК - приемников, размещаемых в единой фокальной плоскости. В результате комплексирования формируется новое изображение $D(x, y)$, на котором с более высокой четкостью отображаются объекты состава. Решение этого вопроса потребовало распространения моделей (1) на все комплекслируемые изображения. В самом общем виде данная технология реализуется по схеме:

$$\{B_q(m, n), q = \overline{1, Q}\} \xrightarrow{\{F_q(m, n), G_q(m, n), q = \overline{1, Q}\}} D(x, y), \quad (2)$$

где $F_q(m, n)$, $G_q(m, n)$, $q = \overline{1, Q}$, – функции геометрической обработки, найденные с учетом оценки параметров вектора \mathbf{P} .

Получены и исследованы аналитические модели вида (1) для случая сканерной съемки объектов железнодорожного состава одной ИК - линейкой, установленной под углом β к вертикали. Координатные соответствия между одноименными точками искаженного (m, n) и нормализованного (x, y) изображений для случая поступательного движения объектов со скоростью V определяются выражениями:

$$x = -VT(m - m_{\text{ц}}) + d \sin \beta (n - n_{\text{ц}}), \quad y = d \cos \beta (n - n_{\text{ц}}), \quad (3)$$

где $\mathbf{P} = (m_{\text{ц}}, n_{\text{ц}}, VT, d, \beta)$ – вектор параметров, в котором $(m_{\text{ц}}, n_{\text{ц}})$ – координаты центра объекта, T – период опроса линейки, d – расстояние между элементами линейки.

Объекты типа «колесо» с радиусом R движутся поступательно - вращательно. Для них координатные соответствия представлены в виде двухэтапного преобразования $(m, n) \rightarrow (\alpha, \gamma) \rightarrow (x, y)$:

$$\alpha = VT(m - m_{\text{ц}}) / R, \quad \gamma = d(n - n_{\text{ц}}) / R; \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = (\gamma \sin \beta - \alpha) \cos \alpha - \gamma \cos \beta \sin \alpha, \\ y = \gamma \cos \beta \cos \alpha + (\gamma \sin \beta - \alpha) \sin \alpha. \end{cases} \quad (5)$$

Исследован характер геометрических искажений, возникающих при таких преобразованиях. Разработаны подходы к обращению функциональных преобразований (3)-(5).

Изучен характер заслонения колес другими объектами тележки. Исследованы различные пути увеличения площади доступных для обследования областей колес. Показано, что при $\beta \neq 0$ можно достичь увеличения видимой части колеса на 10 % (для стандартной грузовой тележки).

Исследованы вопросы повышения разрешающей способности съемки и обследуемой площади колес на основе использования набора ИК - линеек. На этот случай обобщены модели (3)-(5). Показано, что при комплексировании информации от линеек, разнесенных вдоль направления движения на 1.5 м, удается увеличить наблюдаемую площадь колеса на 20 % на каждую дополнительную линейку.

Показано, что максимальное повышение разрешающей способности съемки за счет использования нескольких ИК - линеек для поступательно движущихся объектов достигается при использовании оптимального оператора комплексирования:

$$D(x, y) = \sum_{q \in \mathcal{E}} \sum_n \sum_m B_q(m, n) h_\pi(m - m_q) h_\pi(2(n - n_q)), \quad (6)$$

где $m_q = F_q^{-1}(x, y)$, $n_q = G_q^{-1}(m, n)$, \mathcal{E} – множество линеек, $h_\pi(z) = \text{sinc}(z)$.

Для комплексирования изображений колес разработан алгоритм, основанный на интерполяции по прямому закону с использованием восстанавливающего фильтра с круговой симметрией. Предложена эффективная в вычислительном плане процедура такой интерполяции, основанная на кусочно-линейной аппроксимации координатных соответствий (4), (5). Например, при объединении информации от 2-х субпиксельно смещенных линеек достигается почти 2-кратное повышение пространственного разрешения.

Разработаны алгоритмы идентификации объектов колесных тележек, основанные на анализе их формы. Задача обнаружения объектов формулируется как параметрическая относительно вектора $\mathbf{R} = (K, L, R, R_{\text{рб}}, \Pi_{\text{р}})$, где K , R , $R_{\text{рб}}$ – соответственно количество колес, внутренний и внешний радиусы, L – расстояние между ними, $\Pi_{\text{р}}$ – область, описывающая раму. Первый алгоритм основан на предположении о связности областей изображения $B(m, n)$, соответствующих тележкам. В нем вводятся правила оценивания параметров \mathbf{R} и \mathbf{P} на основе анализа формы связных областей, а также критерии достоверности обнаружения. Второй алгоритм является развитием первого. Он основан на обнаружении отдельных колес и определении их принадлежности конкретным тележкам. Это достигается путем максимизации меры достоверности обнаружения, вводимой с использованием ряда эвристических нечетких правил. Такие

правила учитывают структуру изображения между найденными колесами и меру достоверности обнаружения следующих тележек. Это позволяет надежно определять типы тележек для состава в целом. Данная задача оптимального обнаружения решается методами динамического программирования. Рассмотрен также алгоритм идентификации, основанный на использовании информации от дополнительных датчиков колес и определении типов тележек путем анализа расстояний между осями.

После обнаружения тележек выполняется высокоточное определение параметров моделей (1), уточнение оценок вектора \mathbf{P} , полученных при идентификации объектов. Решение этой задачи основано на нахождении по изображению параметров эллипсов, соответствующих искаженным образам колес. Для достижения субпиксельной точности такого оценивания вводится модель изображения колеса, учитывающая эффекты пространственной дискретизации круглых колес при съемке ИК - линейками. Исследование этой модели проведено по трем направлениям: путем анализа площадей сегментов эллипса; анализа моментов фрагментов эллипса и определения и анализа краевых точек. Предложены решения, позволяющие повысить точность оценивания параметров за счет комплексирования изображений от пары ИК - линеек.

В главе 3 рассмотрены вопросы предварительной обработки и теплового анализа изображений объектов движущегося состава; предложена и исследована система признаков, основанная на анализе структуры тепловых полей и ориентированная на достоверное выявление возможных дефектов.

Разработана модель тракта формирования изображений тепловизорами, построенными на основе ИК - линеек, вида $B(m, n) = f(f_{qn}(f_{In}(E(m, n, \lambda)), \tau))$, где $E(m, n, \lambda)$ – спектральная яркость точки, соответствующей элементу (m, n) изображения; f , f_{qn} , f_{In} – соответственно функции преобразования заряда в код, инжектируемого тока в накопленный заряд и яркости в ток; τ – время накопления. Особенностью этой модели является то, что она, в отличие от известных, более адекватно описывает процессы передачи сигнала в виде функций f , f_{qn} , f_{In} , которые в развернутом виде представлены в диссертации.

Разработана аналитическая модель функции f в виде последовательного соединения нелинейного и инерционного звеньев. Предложен алгоритм оценивания нелинейности функции f , основанный на вариациях времени накопления τ в процессе съемки. Нелинейная часть функция f ищется в виде полинома, для которого $\sum_s \sum_g \sum_n [B_{sg}(n) - f(q_{n0} + \tau_g I_{sn})]^2 = \min$, где $B_{sg}(n)$ – сигнал от n -го элемента на выходе датчика при наблюдении s -го сюжета при времени накопления τ_g ; I_{sn} , q_{n0} – искомые параметры. Разработана и апробирована на реальной информации итерационная процедура нахождения f , I_{sn} , q_{n0} .

Предложен алгоритм оценки и коррекции интермодуляционных искажений, обусловленных инерционностью канала связи. Получена формула для коррекции таких искажений: $B^0(k) = (1 + \alpha)B(k) - \alpha B^0(k - 1)$, где α – уровень

искажений. Для оценивания α исследуется структурная неоднородность сигналов на выходе датчика вблизи дефектных элементов. Выполненные оценки точности алгоритмов нахождения f показали адекватность ее математического описания (остаточные невязки сравнимы с уровнем шумов датчика).

Разработаны алгоритмы коррекции тепловизионных изображений на основе данных калибровки. Методика оценки чувствительностей приемников ИК-излучения, постоянной составляющей и градуировочной характеристики датчика основана на решении уравнения
$$\sum_{n=1}^N \sum_{s=1}^S [a_n \varepsilon_s R_s + d_n - I_{sn}]^2 = \min,$$
 где

a_n, d_n – коэффициенты, характеризующие искажения датчика в рамках линейной модели; $R_s = R(T_s)$ – значения градуировочной характеристики при наблюдении уровней с температурами $T_s, s = \overline{1, S}$; I_{sn} – скорректированные градуировочные сигналы. Предложен алгоритм определения $a_n, d_n, n = \overline{1, N}$, и $R_s, s = \overline{1, S}$, дающий аналитическое решение.

Построена модель оптимальной аппроксимации градуировочной характеристики датчика, обеспечивающая по отношению к часто используемой полиномиальной модели более высокие фильтрационные и экстраполяционные показатели:

$$R(T) = B + \sum_{l=1}^L \frac{A_l}{e^{\theta/(\lambda_l T)} - 1}, \quad (7)$$

где $B, A_l, \lambda_l, l = \overline{1, L}$, – параметры модели. Оценка этих параметров осуществляется путем решения задачи нелинейного программирования.

Исследованы вопросы радиометрического комплексирования изображений от нескольких ИК - линеек, размещенных в единой фокальной плоскости, с целью повышения температурного разрешения съемки. Предложен алгоритм оценивания радиометрического качества всех элементов линейки в виде СКО шумов и флуктуаций $\sigma(n)$. Показано, что процессы геометрического и радиометрического комплексирования могут быть описаны единым оператором вида (6), дополненным весовыми коэффициентами $1/\sigma(n)$ при соответствующей нормировке.

Предложены и исследованы модели комплексирования изображений от датчиков с различающимися трактами калибровки. Во-первых, предложена процедура построения функций, приводящих все изображения к единой градуировочной характеристике по формуле $F_{qp}(D_q) = R_p(R_q^{-1}(D_q))$, где p и q – номера эталонного и корректируемого изображений. Во-вторых, получена формула для радиометрической коррекции отличий трактов калибровки: $D_{qp}(m, n) = F_{qp}(a_q D_q(m, n) + b_q)$, где a_q, b_q – корректирующие коэффициенты, которые находятся путем анализа общих частей геометрически нормализованных изображений $D_p(x, y)$ и $D_q(x, y)$.

Разработаны алгоритмы предварительного яркостного анализа изображе-

ний с целью их последующей сегментации. Модель сканерного изображения представлена как $B(m, n) = B_o(m, n)$ при $(m, n) \in H$ и $B(m, n) = B_\phi(m, n)$ при $(m, n) \notin H$, где $B_\phi(m, n)$ – фон, который сформировал бы сканер в отсутствии железнодорожного состава, $B_o(m, n)$ – изображение объектов состава. Оценка H находится по пороговому алгоритму с использованием критерия Неймана-Пирсона. Начальные оценки параметров фона формируются по сканерному изображению в момент отсутствия состава. Выполнено исследование качества работы алгоритма на реальных тепловизионных изображениях, полученных при различных погодных условиях. Рассмотрен еще один алгоритм, ориентированный на использование в качестве фона нагретого тела и более устойчивый к «капризам» погоды. В качестве порога используется точка, разделяющая моды гистограммы, которые соответствуют фону и объектам.

Предложена система признаков и алгоритм их комплексного анализа для выявления различных дефектов. В качестве признаков используются средние и максимальные температуры объектов, меры интенсивности локальных источников тепла, степени нарушения симметрии теплового поля и др. На представительном экспериментальном материале установлена связь признаков с конкретными дефектами и их инвариантность к изменению погодных условий и рабочих режимов железнодорожного состава.

В главе 4 рассмотрены вопросы практической реализации системы обработки и анализа тепловизионных изображений колесных тележек (системы TermoScan). Представлена комплексная автоматическая технология обработки сканерных тепловизионных изображений и соответствующая программная система. Выполнен анализ точности алгоритмов обработки видеoinформации и общего качества функционирования системы TermoScan.

Рассмотрены принципы построения и функционирования системы TermoScan для обследования колесных тележек железнодорожных составов на основе сканерной тепловизионной съемки. В этой системе реализованы рассмотренные выше подходы, модели, алгоритмы и технологии.

Система TermoScan включает четыре тепловизионных сканера, 4 компьютера, сервер и рабочее место оператора. С каждой из двух сторон от железнодорожного полотна установлены по два сканера, которые связаны с соответствующими компьютерами, а те, в свою очередь, подключены к серверу, соединенному с рабочим местом оператора. Использование с каждой стороны по паре сканеров позволяет повысить эффективную площадь обследуемых деталей. В процессе движения поезда осуществляется съемка, и тепловые данные от 4-х сканеров передаются в закрепленные за ними компьютеры. На них решаются задачи идентификации объектов, геометрической и радиометрической коррекции, после чего нормализованные изображения передаются на сервер. В нем выполняется комплексирование изображений, осуществляется поиск и идентификация дефектов. Изображения и отчеты о дефектных объектах с сервера передаются на рабочее место оператора, расположенное в пункте технического осмотра. Оператор доводит информацию до осмотрщиков вагонов. Рассмотрены вопросы оптимальной организации вычислительного процесса в распреде-

ленной многомашинной системе; меры, направленные на обеспечение ее надежности и быстродействия.

На основе анализа натурной информации по структуре тепловых полей проведена систематизация различных дефектов. Выполнена оценка эффективности функционирования системы по следующим направлениям.

1-е направление. На представительном материале (352 состава, 42536 тележек) проведена оценка качества идентификации объектов подвижного состава. В результате экспериментов выявлено практически безошибочное обнаружение тележек, их типов и отдельных частей. Лишь в 0.9% случаев имели место ошибки, вызванные аппаратными сбоями или наличием нестандартных подвижных предметов. Для этих случаев предложены критерии отбраковки результатов неправильной идентификации.

2-е направление. Исследовано качество решения задачи определения геометрических параметров объектов подвижного состава. Путем имитационного моделирования выполнен сравнительный анализ альтернативных подходов по оцениванию параметров и обоснована целесообразность использования того или иного подхода в конкретных условиях. Предложена методика оценки точности определения геометрических параметров по тепловизионным изображениям, основанная на сопоставлении результатов с показаниями путевых датчиков. Установлено, что предложенные алгоритмы обеспечивают оценку параметров с СКО порядка 0.15 пикселя, что вполне достаточно для качественного геометрического комплексирования и нормализации изображений.

3-е направление. Разработаны методики оценки качества радиометрической коррекции тепловизионных изображений. Одна из них основана на анализе высокочастотных составляющих видеосигнала и позволяет оценить уровень остаточных структурных искажений по отношению к внутреннему шуму датчика. Установлено, что этот уровень составляет $0.1 \div 0.2$ и не влияет на качество выявления аномалий теплового поля. Вторая методика позволяет оценить дрейф показаний сканера в течение сеанса съемки. Полученные оценки лежат в диапазоне $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \div 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, что не влияет на статистический анализ значений признаков дефектов. Данные методики используются в системе TeploScan для допускового контроля качества работы тепловизионных датчиков.

4-е направление. Выполнены оценки достоверности решения центральной задачи обследования – выявления дефектов. Для этого проводились испытания системы TeploScan в различных погодных условиях по 93 железнодорожным составам (6527 вагонам, 13154 тележкам). Результаты анализа передавались осмотрщикам вагонов. Из обнаруженных 40 неисправностей подтвердились 34 (85 %).

Разработка системы TeploScan выполнена в среде программирования Visual C++ версии 6.0 на базе Windows API 32 и библиотек MFC. Программное обеспечение системы включает 100 файлов общим объемом порядка 1 Мб (около 30000 программных строк) с определением различных классов и функций.

В настоящее время система TeploScan проходит опытную эксплуатацию на станции Рыбное Московской железной дороги.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен системный анализ проблемы обследования колесных тележек железнодорожных составов. Показано, что известные методы и технологии не позволяют эффективно решать эту задачу. Обосновано новое направление повышения уровня автоматизации и качества обследования за счет использования современных сканерных тепловизионных датчиков, построенных на основе линеек приемников теплового излучения (ИК - линеек).

2. Исследованы основные задачи обработки данных, решаемые в тепловизионных системах обследования, получены их формальные описания. Выявлены недостатки известных технологий обработки тепловизионной информации, в том числе применительно к сканерному принципу съемки. Определены направления совершенствования, основанные на предварительной коррекции сканерных изображений и их двумерном анализе.

3. Разработана и исследована общая технология обработки сканерных тепловизионных изображений в системе обследования нового типа, позволяющая выполнять анализ двумерных тепловых полей контролируемых объектов и выявлять различные дефекты инвариантно относительно скорости движения состава и параметров тепловизионных съемочных систем. Определены центральные задачи координатной и яркостной обработки сканерной видеоинформации, а именно:

- идентификация отдельных обследуемых объектов колесных тележек на изображениях;
- совместная геометрическая коррекция сканерных видеоданных от нескольких датчиков с целью формирования нормализованных изображений с высоким пространственным разрешением и повышенной площадью обследуемых объектов;
- радиометрическая коррекция изображений с целью высокоточных измерений температур;
- анализ нормализованных изображений тепловых полей объектов с целью выявления тепловых аномалий и возможных дефектов.

4. Получены и исследованы геометрические модели формирования сканерных тепловизионных изображений ИК - линейкой. Исследован характер координатных искажений, предложены эффективные алгоритмы их компенсации. Разработаны модели и алгоритмы комплексирования изображений от нескольких ИК - линеек, имеющих субпиксельные смещения полей зрения. Показано, что в результате комплексирования видеоинформации достигается 2-кратное повышение разрешающей способности тепловизионной съемки и увеличение площади обследуемых объектов на 20 %.

5. Разработаны алгоритмы идентификации объектов колесных тележек на сканерных тепловизионных изображениях, основанные на анализе видеоинформации и данных от дополнительных датчиков положения колес. Предложены алгоритмы высокоточного определения геометрических параметров моделей съемки. Эти алгоритмы позволяют организовать прецизионную (с точно-

стью до 0.15 пикселя) геометрическую обработку и достичь требуемой глубины локализации дефектов. Выполнены оценки точности предложенных алгоритмов.

6. Получены модели и алгоритмы радиометрической коррекции сканерных изображений, основанные на аналитическом описании процессов преобразования сигналов в тепловизионной системе и наиболее полном использовании данных калибровки. Эти алгоритмы обеспечивают высокую точность измерения радиационных температур (до 0.5 °С) объектов по изображениям. Разработаны методики контроля качества коррекции и работоспособности тепловизора.

7. Предложена система признаков неисправностей объектов тележек, основанная на двумерном анализе тепловых полей, алгоритмы вычисления признаков и выявления дефектов тележек. В ходе испытаний и опытной эксплуатации сканерной тепловизионной системы обследования установлена ее высокая эффективность в плане выявления таких дефектов как трещины на колесных дисках и раме, дефекты поверхности катания колеса, неисправности тормозной системы и буксовых узлов. При обследовании 93 железнодорожных составов (6527 вагонов, 13154 тележек) было идентифицировано 40 неисправностей, из которых 85 % подтверждены в ходе натурального осмотра.

8. На базе разработанных моделей, алгоритмов и технологий создана программная система сканерного тепловизионного обследования TermoScan, которая введена в опытную эксплуатацию в депо станции Рыбное Московской железной дороги. Система TermoScan позволяет в темпе прохождения железнодорожных составов выявлять возможные неисправности и формировать дефектные ведомости с целью последующего выполнения ремонтно - восстановительных работ. Время обработки информации по типовому железнодорожному составу не превышает 5 мин.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Кузнецов А.Е. и др. Технология комплексной диагностики неисправностей колесных тележек железнодорожных составов. Рязань: РГРТА, 2004. 12 с. Деп. в ВИМИ 03.09.04, № ДО-8961.

2. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Кузнецов А.Е. Геометрическая обработка изображений железнодорожных колес. Рязань: РГРТА, 2004. 7 с. Деп. в ВИМИ 21.05.04, № ДО-8951.

3. Егошкин Н.А. Нормализация изображений подвижных объектов, формируемых системой технического зрения // Тез. докл. всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТА, 2004. С. 174.

4. Егошкин Н.А., Ковалев А.О. Технология обработки тепловизионных изображений движущихся объектов // Тез. докл. 13-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2004. С. 128.

5. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Ковалев А.О. Геометрическая обработка изображений движущихся объектов в системе диагностики // Информатика и прикладная математика : межвуз. сб. науч. тр. Рязань: Рязанский государственный педагогический университет имени С.А. Есенина, 2005. С. 122-125.

6. Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Распознавание изображений колесных тележек железнодорожных вагонов. Рязань: РГРТА, 2005. 6 с. Деп. в ВИМИ 10.06.05, № ДО 8980.

7. Егошкин Н.А. Алгоритмы распознавания тележек железнодорожных вагонов на тепловизионных изображениях // Тез. докл. всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТА, 2005. С. 117-118.

8. Еремеев В.В., Егошкин Н.А. Технология аттестации видеодатчиков на основе анализа изображений тестовых объектов // Тез. докл. 14-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 210-211.

9. Еремеев В.В., Егошкин Н.А., Кузнецов А.Е. и др. Организация вычислительного процесса в тепловизионном комплексе диагностики // Тез. докл. 14-й междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТА, 2005. С. 209-210.

10. Егошкин Н.А., Ковалев А.О. Алгоритмы температурного анализа изображений колес грузовых железнодорожных вагонов // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве». Н. Новгород, 2005. С. 15.

11. Еремеев В.В., Кочергин А.М., Егошкин Н.А. Математическая модель оценки геометрических параметров диска Земли // Информатика и прикладная математика: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: Рязанский государственный педагогический университет имени С.А. Есенина, 2005. С. 114-117.

12. Егошкин Н.А., Кочергин А.М. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по диску Земли // Тез. докл. 3-й всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ, 2005. С. 128.

13. Еремеев В.В., Егошкин Н.А. Система тепловизионного дистанционного контроля колесных тележек железнодорожных составов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 8. С. 55-59.

14. Егошкин Н.А. Идентификация на тепловизионных изображениях объектов заданной формы на основе нечеткого вывода // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. М.: Горячая линия - Телеком, 2006. С. 92-96.

15. Егошкин Н.А. Использование нечетких множеств для решения задачи идентификации объектов на тепловизионных изображениях // Тез. докл. всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2006. С. 161-162.

16. Егошкин Н.А. Определение параметров круглых объектов по тепловизионным изображениям // Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве». Н. Новгород, 2006. С. 21.

17. Егошкин Н.А. Оценка и коррекция радиометрических искажений в тепловизорах сканерного типа // Тез. докл. всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 128.

18. Егошкин Н.А., Москвитин А.Э. Комплексирование изображений от многоэлементных сканирующих датчиков // Тез. докл. всерос. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 132.

Егошкин Николай Анатольевич

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
КОЛЕСНЫХ ТЕЛЕЖЕК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ
НА ОСНОВЕ СКАНЕРНОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЕМКИ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 2.04.2007г. Формат бумаги 60 × 80 1/16.
Бумага офисная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

Редакционно-издательский центр
Рязанского государственного радиотехнического университета.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.