

На правах рукописи



ПРОНЧЕНКО Роман Сергеевич

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ПО ДАННЫМ СКАНЕРНОЙ СЪЕМКИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена в Рязанском государственном
радиотехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кузнецов Алексей Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Алпатов Борис Алексеевич

кандидат технических наук, доцент
Муртазов Андрей Константинович

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

Защита состоится **23 сентября 2009 года в 12 час.** на заседании диссертационного 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 государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан августа 2009 года.

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



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На электрифицированном железнодорожном транспорте подача питания к двигателям электропоездов осуществляется через подвесную контактную сеть с помощью токосъемного пантографа, обеспечивающего скользящий контакт с медным проводом. В результате интенсивной эксплуатации происходит износ токонесущих проводов, что может приводить к их обрывам и, как следствие, к транспортным авариям, экономическому ущербу и трагическим последствиям.

Для предотвращения аварийных ситуаций применяются профилактические меры, основанные на ручном измерении остаточного диаметра контактного провода и плановых ремонтных работах. Однако подобные средства контроля весьма трудоемки, требуют полного перекрытия движения на обследуемом участке и, главное, не могут полностью исключить ситуации, связанные с перегоранием токонесущих проводов. Известные технологии дистанционного обследования подвесной контактной сети характеризуются низкой точностью и малоприспособны для практического использования. Поэтому разработка современных высокопроизводительных систем оперативного обследования контактной сети железнодорожного транспорта является актуальной и практически важной задачей.

Сложность решения поставленной задачи определяется следующими обстоятельствами. Во-первых, необходимо организовать высокоточное дистанционное наблюдение контактной сети. При этом возникает проблема создания нового вида съемочного комплекса и соответствующего алгоритмического и программного обеспечения управления его работой в реальном масштабе времени. Во-вторых, остро стоит задача высокоавтоматизированной обработки сверхбольших по объему материалов съемки в части распознавания и измерения параметров контактного провода в условиях действия целого ряда мешающих факторов (яркостные помехи, посторонние объекты, искажения формы представления сигнала и др.).

В настоящей работе спроектирована система обработки и анализа изображений контактной сети «Блик», в которой используется сканерная съемка площадки скольжения токонесущего провода. В рамках этой системы разработано алгоритмическое и программное обеспечение управления и обработки информации в съемочном комплексе, а также послесъемочного анализа материалов съемки, что позволяет с высокой точностью и надежностью выявлять места повышенного износа контактного провода.

Степень разработанности темы. Вопросам автоматического обследования контактной сети электропитания в нашей стране и за рубежом уделяется большое внимание. Так, в ООО «МСД Холдинг» создан информационно-вычислительный комплекс для вагонов-лабораторий сети железных дорог РФ, который выполняет измерения основных параметров контактного провода за исключением степени его износа.

Установлено, что наиболее перспективной является разработка видеосистем измерения ширины площадки скольжения, а по ней и степени износа контактного провода. Такие системы можно разделить на два класса. В системах первого класса съемочная аппаратура располагается на пантографе в непосред-

ственной близости от контактного провода. Такие системы сложны в технической реализации, поскольку требуют гальванической развязки для устранения воздействия больших токов, и обладают низкой точностью и надежностью вследствие быстрого загрязнения оптических элементов под воздействием внешней среды.

В системах второго класса съемочная аппаратура располагается на крыше или внутри вагона-лаборатории и для съемки используются несколько ПЗС-линеек с перекрывающимися полями зрения (патент РФ 2137622). Главным их недостатком является низкая точность, обусловленная расфокусировкой изображения и использованием для распознавания площадки скольжения фиксированного яркостного порога. Наиболее качественные результаты измерения параметров контактного провода достигаются в зарубежных системах, обеспечивающих постоянный масштаб изображения на всем протяжении съемки. Однако сведения об алгоритмах функционирования и обработки материалов съемки в таких системах отсутствуют.

Специалистами Рязанского государственного радиотехнического университета, ЗАО «Центр наукоемких технологий» и Российского НИИ космического приборостроения предложена структура системы обследования контактной сети (патент РФ 2264930), в которой для съемки контактного провода с высоким пространственным разрешением используется несколько ПЗС-линеек, а для обеспечения постоянного масштаба изображения применяется подсистема автофокусировки. В отличие от аналогов в предложенной системе изображения контактной сети вначале регистрируются на внешних накопителях, а затем выполняется их послесенная обработка. При этом возникает необходимость в решении двух групп вопросов: первичной обработки видеоданных в процессе съемки и затем распознавании и сегментации площадки скольжения на изображениях в ходе послесенного анализа. Теоретическую основу для решения этих вопросов составляют работы отечественных и зарубежных ученых: Алпатова Б.А., Гонсалеса Р., Грузмана И.С., Журавлева Ю.И., Злобина В.К., Претта У., Фурмана Я.А. и др.

Вместе с тем вопросы, связанные со спецификой управления работой съемочного комплекса и высокоавтоматизированной обработкой изображений контактной сети, в литературе должным образом не отражены. Поэтому основное содержание настоящей диссертации составляет разработка алгоритмов и программ, обеспечивающих эффективное функционирование нового типа систем обследования контактной сети железнодорожного транспорта.

Цель диссертации состоит в проектировании высокопроизводительной системы обработки и анализа изображений контактной сети железнодорожного транспорта на основе сканерной съемки, позволяющей надежно и с высокой точностью выявлять участки токонесущего провода с повышенной степенью износа.

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

- анализ систем и технологий дистанционного обследования контактной сети и формулирование задач по управлению съёмочным комплексом и обработки формируемых им изображений;
- проектирование съёмочного комплекса, обеспечивающего бесперебойную высокоточную сканерную съёмку контактной сети при минимальных аппаратных затратах;
- разработка алгоритмов функционирования подсистемы анализа и обработки формируемых изображений, обеспечивающей распознавание контактных проводов и измерение степени их износа;
- практическая реализация системы обработки и анализа изображений контактной сети и исследование её точностных характеристик.

Научная новизна диссертации предопределяется тем, что в ней выполнена разработка высокоточной системы обработки и анализа изображений контактной сети железнодорожного транспорта на основе сканерной съёмки. Это потребовало создания новых математических моделей, алгоритмов управления съёмочным комплексом и высокоавтоматизированной обработки формируемых изображений контактной сети.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- математическая модель функционирования вычислительного комплекса, позволяющая определить минимальную конфигурацию аппаратных средств, при которой обеспечивается непрерывная работа комплекса в реальном времени без потерь данных;
- алгоритм управления подсистемой автофокусировки, основанный на использовании информации о форме опорного сигнала и позволяющий надёжно определить положение точечного источника света в условиях помех и колебаний уровня освещённости;
- алгоритм выделения на сканерных изображениях контактных проводов, использующий априорную информацию о форме и геометрических размерах провода и позволяющий быстро и надёжно провести его сегментацию при различных мешающих факторах;
- алгоритм измерения ширины площадки скольжения, основанный на анализе по изображениям яркостного профиля контактного провода и обеспечивающий точность, сопоставимую с результатами ручных измерений.

Практическая ценность работы состоит в том, что в ней предложены математические модели, алгоритмы и программная система дистанционного обследования контактной сети железнодорожного транспорта. Система позволяет при скорости движения поезда 60 км/ч выявлять участки повышенного износа контактных проводов, имеющие линейные размеры порядка 2 см. Разработанные модели и алгоритмы создают теоретическую основу для построения эффективных систем обследования контактной сети различных видов транспорта.

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

Результаты диссертационной работы в виде математических моделей и алгоритмов управления съёмочным комплексом и обработки полученных материалов реализованы в программном обеспечении системы «Блик», внедренной в ЗАО «Центр наукоемких технологий», Российском НИИ космического приборостроения и Дорожном центре диагностики хозяйства электрификации и электроснабжения Московской железной дороги.

Спроектированная система «Блик» прошла натурные испытания на участке Москва Казанская – Кустаревка. В результате обработки материалов съёмки установлена ее высокая эффективность в плане обнаружения участков повышенного износа контактной сети.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: 13-й, 14-й и 15-й международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань-2004, 2005, 2008); 10-й, 11-й и 12-й всероссийских научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань-2005, 2006, 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ: 6 статей (1 статья в издании, рекомендованном ВАК РФ) и 6 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит документы о внедрении и практическом использовании результатов. Основной текст работы содержит 127 с., 55 рисунков и 5 таблиц. Список литературы на 11 с. включает 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен анализ систем обследования контактной сети железнодорожного транспорта. Сформулированы направления исследований, в рамках которых обеспечивается эффективное функционирование нового типа систем измерения износа контактного провода.

Рассмотрено предметное содержание типовых задач, решаемых при обследовании контактной сети железнодорожного транспорта. Показано, что наиболее перспективным является создание систем, основанных на дистанционной сканерной съёмке и последующем анализе ширины площадки износа контактного провода.

Выполнен анализ существующих отечественных и зарубежных систем обследования контактной сети железнодорожного транспорта. Отмечены перспективные технические решения, которые следует учитывать при проектировании новой системы измерения степени износа контактных проводов, обла-

дающей по отношению к аналогам более высокими точностными и эксплуатационными характеристиками. На рис. 1 представлена структура этой системы, которая включает в себя съемочный комплекс, подсистему управления и подсистему послесъемочной обработки материалов съемки.

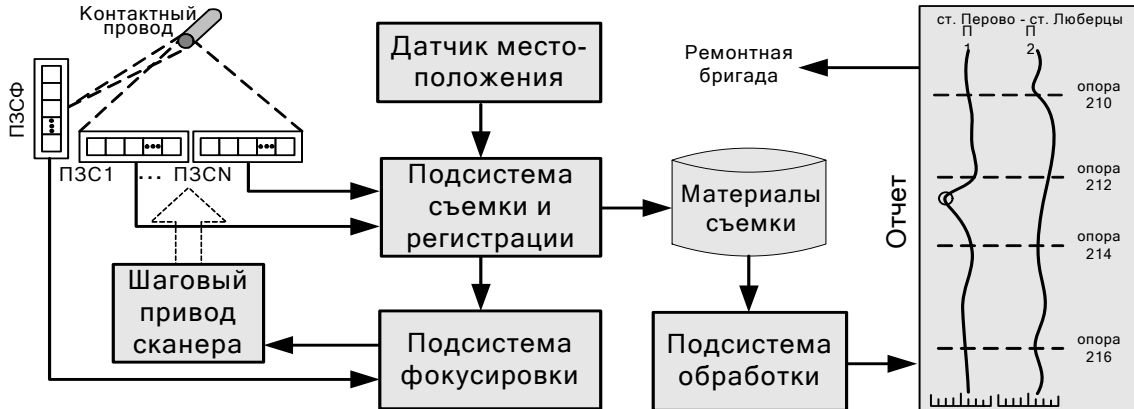


Рис.1. Структура системы обследования контактной сети

Съемочный комплекс монтируется в специализированном вагоне-лаборатории контактной сети. На крыше устанавливается оптическая система высокого разрешения, содержащая N ПЗС-линеек с перекрывающимися полями зрения. Для надежного наблюдения площадки скольжения контактный провод дополнительно освещается лампой.

Для получения изображения контактного провода с постоянными геометрическими характеристиками используется подсистема автофокусировки. Для этого на крыше вагона устанавливается вертикально расположенная ПЗС-линейка (ПЗСФ), формирующая изображение с сигналом от опорного излучателя, закрепленного на пантографе. По результатам обработки этого изображения вычисляется текущая высота контактного провода и выдается соответствующая команда на привод шагового двигателя, корректирующего положение оптической системы.

В отличие от известных решений в проектируемой системе измерения ширины площадки скольжения выполняются не в процессе съемки, а послесъемочно. Для этого информационные потоки от ПЗС-линеек комплексируются с информацией от датчика местоположения и регистрируются на внешних носителях.

Таким образом, для обеспечения эффективного функционирования рассмотренной системы обследования контактной сети необходимо провести исследования по трем направлениям. Первое направление исследований связано с организацией работы съемочного комплекса. Здесь необходимо:

- обосновать выбор основных компонентов съемочного комплекса, позволяющих формировать изображение без «смаза», с высоким пространственным разрешением и привязкой к местности;
- разработать функционирующие в реальном масштабе времени алгоритмы обработки информации и управления подсистемой автофокусировки;

– синтезировать вычислительный комплекс, обеспечивающий управление подсистемой автофокусировки, комплексирование и регистрацию сверхбольших по объему данных в реальном времени без сбоев и потерь и в то же время имеющий минимальную стоимость.

Следующая задача связана с анализом полученных изображений и выявлением мест повышенного износа контактного провода. Поскольку получаемые изображения контактной сети характеризуются сверхбольшим объемом, то ручные методы определения размеров площадки скольжения крайне неэффективны. Поэтому исследованы два основных типа алгоритмов сегментации площадки скольжения на изображении $\mathbf{B} = [b(x, y)]$:

– на основе яркостного порога b_0 , вычисляемого, например, с помощью

дискриминантного критерия $b_0 = \arg \max_{b_0^*} \frac{\sigma_B^2(b_0^*)}{\sigma_T^2}$, где b_0^* – гипотетическое

значение порога, разбивающее изображение на два класса, σ_B^2 – межклассовая дисперсия, σ_T^2 – дисперсия всего изображения;

– с использованием методов выделения границ, основанных на вычисле-

нии модуля градиента всего изображения $|\nabla b(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial b(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial b(x, y)}{\partial y}\right)^2}$ и

его последующей пороговой обработке.

Показано, что из-за присутствия на изображениях большого количества различных элементов цепной подвески возникают серьезные трудности с распознаванием контактных проводов. Отсюда возникает второе направление исследований, связанных с разработкой высокоавтоматизированных алгоритмов сегментации площадки скольжения и высокоточным измерением её размеров.

Наконец, третье направление работ связано с практической реализацией системы обследования контактной сети, её натурными испытаниями и оценкой точностных характеристик.

В главе 2 разработаны алгоритмы управления и обработки информации в съемочном комплексе, обеспечивающие его непрерывную работу в режиме реального времени без потерь данных.

Показано, что для съемки контактного провода с пространственным разрешением 0,1 мм в строчном направлении и 2,1 см в кадровом направлении (при скорости движения 60 км/ч) достаточно использовать две ПЗС-линейки с частотой опроса 800 Гц, имеющие перекрывающиеся поля зрения и содержащие 5100 элементов. Произведена оценка требуемых параметров ПЗС-линейки подсистемы автофокусировки, при которых обеспечивается точность измерения высоты контактного провода 1 см при существующих ограничениях на перепады высот цепной подвески.

Рассмотрены три подхода по привязке материалов съемки к местности на основе: датчика системы GPS, анализа кривизны провода на изображении и применения специализированного датчика вагона-лаборатории. В ходе экспе-

риментальной обработки установлено, что наиболее эффективным является датчик вагона-лаборатории. Он обладает высокой точностью и позволяет определять места износа контактного провода в привычной для работников железной дороги системе координат (номера опор и удаление в метрах от них).

Разработан алгоритм управления подсистемой автофокусировки, в которой подстройка фокусного расстояния выполняется с помощью поворотного зеркала на основе данных, формируемых блоком обработки информации от вертикально расположенной линейки ПЗСФ (рис. 1). Показано, что формируемое ею изображение $b(x)$ описывается моделью

$$b(x) = r(x)g(x) + (1 - r(x))\eta(x) + \varepsilon(x),$$

где $r(x) = \begin{cases} 1, & \text{если сигнал в точке } x \text{ принадлежит источнику света,} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$

$g(x)$ - сигнал от точечного источника света; $\eta(x)$ - фон, $\varepsilon(x)$ - шумовая составляющая.

Для определения центра сигнала $b(x)$ в реальном масштабе времени разработаны два алгоритма. Первый алгоритм основан на удалении фоновой составляющей $\eta(x)$ из изображения $b(x)$ с помощью порогового критерия и последующего расчета положения центра точечного источника x_0 по формуле центра масс.

При съемке контактной сети в объектив нередко попадают посторонние блики, яркость которых больше яркости полезного сигнала $\eta(x) > g(x)$, что приводит к расфокусировкам изображения. Для повышения надежности работы подсистемы автофокусировки предложен алгоритм, основанный на корреляционном сопоставлении изображения \mathbf{B} с эталоном \mathbf{S} сигнала от источника света и последующем вычислении центра источника света:

$$\mathbf{S} = [s(l)], \quad l = \overline{1, L}, \quad L = \lceil 6\sigma \rceil, \quad s(l) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-L/2)^2}{2\sigma^2}},$$

$$x_0^* = L/2 + \arg \min_x \sum_{l=1}^L (s(l) - b(x+l-1))^2, \quad x_0 = \left[\begin{array}{c} x=x_0^*+3\sigma \\ \sum x \cdot b(x) \\ x=x_0^*-3\sigma \end{array} \right] / \left[\begin{array}{c} x=x_0^*+3\sigma \\ \sum b(x) \\ x=x_0^*-3\sigma \end{array} \right].$$

Для ускорения работы алгоритма координата центра источника света рассчитывается рекурсивно с учетом его положения в предыдущий момент времени и максимальной скорости изменения высоты контактного провода.

Экспериментальные исследования подтвердили высокую точность и надежность работы предложенного алгоритма при наличии помех и изменений уровня внешней освещенности.

Вторым вопросом обеспечения работоспособности системы обследования контактной сети является синтез её вычислительного комплекса, обеспечивающего в режиме реального времени управление подсистемой автофокусировки, комплексирование и регистрацию потоков данных от внешних носителей. Для решения этой задачи в диссертации разработана модель функционирования вы-

числительного комплекса, описывающая условия обработки и регистрации информации без сбоев и потерь при реальных ограничениях на быстродействие процессоров и внешних накопителей. Модель представлена целевой функцией и системой ограничений:

$$\sum_{q=1}^{Q_v} [s(\psi_q) + c(\psi_q)] \rightarrow \min_v,$$

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N x_{n1} \cdot s(\theta_n) \leq s(\psi_1), \sum_{n=1}^N x_{n2} \cdot s(\theta_n) \leq s(\psi_2), \dots, \sum_{n=1}^N x_{nQ_v} \cdot s(\theta_n) \leq s(\psi_{Q_v}), \\ \sum_{n=1}^N x_{n1} \cdot c(\theta_n) \leq c(\psi_1), \sum_{n=1}^N x_{n2} \cdot c(\theta_n) \leq c(\psi_2), \dots, \sum_{n=1}^N x_{nQ_v} \cdot c(\theta_n) \leq c(\psi_{Q_v}), \end{cases}$$

где $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ - потоки входных данных; $\Psi = \{\psi_{mn}, m = \overline{1, M}, n = \overline{1, N}\}$ - множество носителей, доступных для регистрации; $s(\theta_n)$ и $s(\psi_{mn})$ - их скорости; $c(\psi_{mn})$ - быстродействие используемых процессоров, $c(\theta_n)$ - требования программных модулей к ресурсам процессора; $\Psi_v = \{\psi_q\}, q = \overline{1, Q_v}, \Psi_v \subset \Psi$ - подмножество из Q_v носителей, использованных в v -м варианте распределения; x_{nq} - булева переменная, задающая распределение потоков по носителям. Разработана методика оценки производительности процессоров и быстродействия накопителей с использованием критериев относительной загрузки и блочного обмена данными.

Предложенная модель сводит задачу определения минимальной конфигурации вычислительного комплекса к задаче упаковки двумерных векторов в контейнеры, где предметами являются входные потоки данных, а контейнерами – носители, на которых эти данные регистрируются. Проанализированы алгоритмы, находящие приближенное решение этой задачи. Для небольшой размерности входных данных возможно использовать полный перебор вариантов.

На базе модели функционирования вычислительного комплекса определены минимальное количество ЭВМ и порядок распределения по ним задач управления, обработки и регистрации информации. Результаты опытной эксплуатации подтвердили, что спроектированный таким образом вычислительный комплекс обеспечивает ввод, комплексирование, обработку и регистрацию изображений контактной сети в режиме реального времени без потерь данных.

В главе 3 рассмотрены вопросы послесеансной обработки изображений контактной сети железнодорожного транспорта; предложены алгоритм автоматической трассировки контактных проводов и высокоточный алгоритм измерения ширины площадки скольжения.

На рис. 2 показан пример сканерного изображения контактной сети от двух ПЗС-линеек. Автоматическая обработка таких изображений выдвигает ряд специфических требований:

– во-первых, надежное распознавание площадки скольжения, в том числе при наличии на изображениях посторонних элементов (элементы опор, подвесные тросы) и при переходах между полями зрения ПЗС-линеек;

- во-вторых, обеспечение высокоточных измерений ширины площадки скольжения для каждого из двух контактных проводов в условиях помех, структурных шумов и неоднородной яркости по полю изображения;
- в-третьих, обеспечение высокой скорости обработки получаемых в результате съемки высокоинформативных файлов (более гигабайта на километр пути).

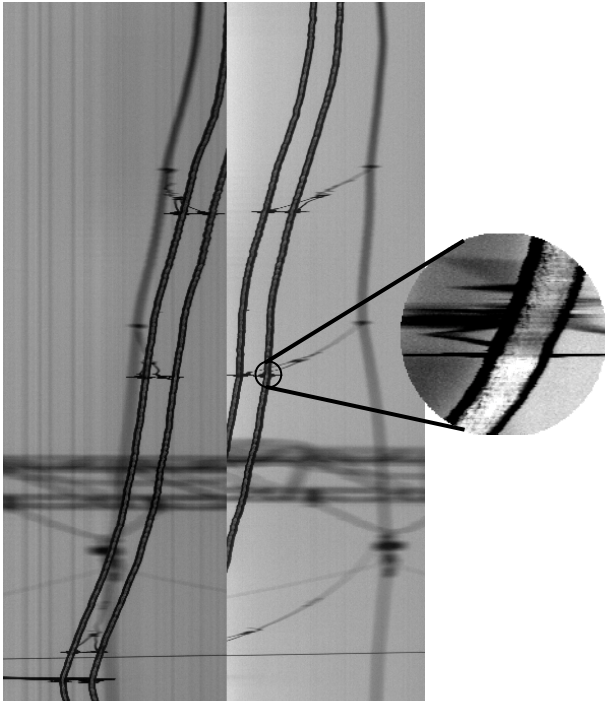


Рис.2. Пример сканерной съемки контактной сети двумя ПЗС-линейками

полями зрения ПЗС-линеек.

В рамках второй технологии задача обработки изображений контактной сети разбивается на два этапа: вначале выполнить трассировку контактных проводов, а затем измерить ширину площадки скольжения в пределах сегментированных изображений контактных проводов.

Проведены исследования стробового алгоритма трассировки контактных проводов, основанного на поиске статистических различий между пикселями контактного провода и окружающего его фона. Показано, что данный алгоритм позволяет реализовать автоматическое преодоление разрывов при переходе с поля зрения одной ПЗС-линейки на другую. Однако наличие на изображениях кроме контактных проводов большого количества различных вспомогательных элементов подвесной системы часто приводит к сбоям алгоритма.

Для высоконадежного распознавания контактных проводов разработан корреляционный алгоритм трассировки, учитывающий их форму и геометрические размеры. Поиск провода выполняется независимо в каждой строке изображения с координатой y в соответствии с функционалом

$$F(x) = \sum_{j=1}^L [b(x+j-1, y) - z(j)]^2, \text{ где } \mathbf{Z} = [z(l)], l = \overline{1, L}, - \text{ яркостный срез изо-}$$

Рассмотрены две технологии организации обработки изображений контактной сети. Первая из них основана на применении методов сегментации для выделения на изображении пикселей, принадлежащих непосредственно площадке скольжения. Показано, что известный волновой алгоритм не обеспечивает требуемой надежности в условиях постоянно изменяющейся яркости изображения и пропадания сигнала, а также не способен автоматически продолжать трассировку на стыках изображения. Применение веерного алгоритма трассировки позволяет корректно обрабатывать участки пропадания площадки скольжения, но он также не обеспечивает продолжение трассировки при переходе между

бражения контактного провода в начальной точке трассировки (шаблон); x – номер элемента строки, с которого шаблон начинается.

Функционал минимизируется путем сдвига шаблона влево и вправо, в результате находится значение $x_0 = \arg \min_x [F(x)]$ и считается, что провод располагается в элементах строки с номерами $x_0, \dots, x_0 + L - 1$. Далее осуществляются модификация шаблона $z(l) = b(x_0 + l - 1, y), l = \overline{1, L}$, и переход к следующей строке изображения.

Использование корреляционного алгоритма позволяет избавиться от влияния посторонних элементов на изображении контактной сети. Однако в процессе работы алгоритма из-за накопления ошибок происходят постепенное искажение шаблона и сбой трассировки. Для снижения негативного влияния накопления ошибок предложены два конструктивных решения.

Во-первых, запоминать несколько предыдущих шаблонов $Z_r, r = \overline{1, R}$, и при вычислении функционала вместо одного шаблона использовать среднее арифметическое R предыдущих шаблонов:

$$F(x) = \sum_{j=1}^L [b(x + j - 1, y) - \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R z_r(j)]^2.$$

Во-вторых, производить через 50-100 строк изображения автоматический поиск контактного провода и выполнять коррекцию последнего шаблона $z_R(l) = b(x_1 + l - 1, y), l = \overline{1, L}$, где x_1 – первый элемент строки, в котором располагается контактный провод.

Автоматический поиск изображения контактного провода выполняется на основе априорных знаний о его геометрических размерах. Для этого изображение дифференцируется $b'(x, y) = b(x + 1, y) - b(x, y), x = \overline{1, X - 1}$, а затем вычисляется функционал $G(x) = G_1(x) + G_2(x)$,

$$G_1(x) = \sum_{j=1}^U b'(x + j, y), \quad G_2(x) = -\sum_{j=1}^U b'(x + j + W, y),$$

где W – номинальная ширина контактного провода, U – размер области перепада яркости от уровня фона до уровня контактного провода. Если $x_1 = \arg \max_x [G(x)]$ и выполняется система неравенств:

$$\left\{ G(x_1) \geq \Delta G, \quad \frac{\min(G_1(x_1), G_2(x_1))}{\max(G_1(x_1), G_2(x_1))} \geq 0.8, \right.$$

где ΔG – заданное пороговое значение, то образ провода считается найденным и располагающимся в элементах строки с номерами $x_1, x_1 + 1, \dots, x_1 + W$. Система неравенств позволяет исключить ложные обнаружения, вызванные сильными скачками яркости на изображении, и использует тот факт, что перепады яркости на левой и правой границах контактного провода практически не отличаются.

Сложность решения задачи высокоточного измерения ширины площадки скользящего определяется тем, что сформированное после трассировки изобра-

жение $\tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{b}(x, y)]$, $x = \overline{1, W}$, $y = \overline{1, Y}$, имеет нечеткие границы площадки скольжения, а также содержит кроме контактного провода часть окружающего его фона (рис. 3).

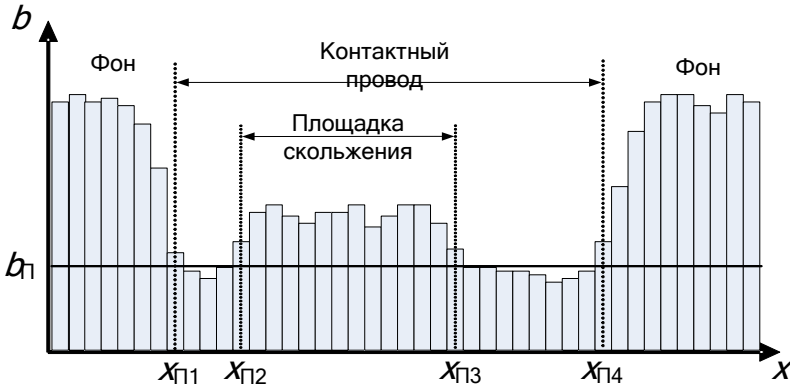


Рис.3. Пояснения к алгоритму измерения ширины площадки скольжения контактного провода на основе анализа его яркостного профиля

Для измерения ширины площадки скольжения исследованы два варианта порогового алгоритма сегментации (с использованием дискриминантного критерия и рекурсивного вычисления порога), а также алгоритм, основанный на поиске яркостных перепадов. Показано, что они не обеспечивают требуемой точности измерения остаточной высоты контактного провода вследствие того, что площадка скольжения имеет нечеткие границы. Для лучшего совпадения с результатами ручных эталонных измерений требуется находить не середину границы, как это выполняется в рассмотренных выше алгоритмах, а её крайние точки.

Предложен алгоритм измерения ширины площадки скольжения, основанный на анализе яркостного профиля контактного провода с использованием априорных знаний о его форме. Алгоритм вычисляет ширину площадки скольжения в каждой строке изображения и описывается следующей последовательностью действий:

1) вычисляются минимальное и максимальное значения уровней яркости в яркостном срезе контактного провода:

$$b_{\min}(y) = \min_x(\tilde{b}(x, y)), \quad b_{\max}(y) = \max_x(\tilde{b}(x, y));$$

2) устанавливается порог $b_{П} = b_{\min}(y) + 1$;

3) находятся все точки $x_{Пm}$, $m = \overline{1, M}$, для которых $\tilde{b}(x_{Пm}, y) = b_{П}$;

4) если выполняется условие

$$\begin{cases} M = 4, \\ \tilde{b}(1, y) > b_{П}, \end{cases}$$

то площадка износа считается найденной и имеющей границы $V_{Л}(y) = x_{П2}$, $V_{П}(y) = x_{П3}$. В противном случае порог $b_{П}$ увеличивается на единицу и алгоритм повторяется со второго шага. Если же ни для одного значения порога $b_{\min}(y) + 1 \leq b_{П} \leq b_{\max}(y) - 1$ условие 4 не выполняется, то измерение в данной строке изображения не выполняется и ситуация передается для анализа оператору.

Полная ширина площадки скольжения вычисляется как $V_y = V_{П}(y) - V_{Л}(y) + 1$. Для повышения точности последовательность

Для измерения ширины площадки скольжения исследованы два варианта порогового алгоритма сегментации (с использованием дискриминантного критерия и рекурсивного вычисления порога), а также алгоритм, основанный на поиске яркостных перепадов. Показано, что они не обеспечивают требуемой

V_y , $y = \overline{1, Y}$, измерений ширины площадки скольжения подвергается скользящей полиномиальной аппроксимации. Скорректированное значение \tilde{V}_y , $y = \overline{6, Y-5}$, определяется с помощью коэффициентов полинома второго порядка, рассчитанных по значениям самого элемента и 5 ближайших к нему слева и справа элементов $\tilde{V}_y = a_0(y) + a_1(y) \cdot V_y + a_2(y) \cdot V_y^2$, где $a_i(y)$ – коэффициенты полинома, которые находятся из матричного уравнения $\mathbf{V}(y) = \mathbf{H}\mathbf{A}(y)$, где

$$\mathbf{V}(y) = \begin{bmatrix} V_{y-5} \\ \dots \\ V_{y+5} \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & y-5 & (y-5)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & y+5 & (y+5)^2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}(y) = \begin{bmatrix} a_0(y) \\ a_1(y) \\ a_2(y) \end{bmatrix}.$$

Выполнен сравнительный анализ исследованных алгоритмов с данными ручных микрометрических измерений остаточной высоты контактного провода на тестовом участке железной дороги. Результаты сравнения приведены в таблице. Из неё следует, что предложенный алгоритм анализа яркостного профиля обеспечивает точность измерения остаточной высоты контактного провода 0,3 мм, что соответствует лучшим зарубежным аналогам.

Результаты оценки точности алгоритмов измерения степени износа контактного провода в сравнении с данными ручных измерений

Алгоритм	Средняя ошибка измерения остаточной высоты контактного провода, мм
Дискриминантный критерий	0,75
Итерационный алгоритм	0,77
Поиск яркостных перепадов	1,1
Предложенный алгоритм	0,3

В главе 4 рассмотрены вопросы программной реализации системы обработки и анализа изображений контактной сети «Блик». Приведены результаты экспериментальной апробации системы на натурных данных.

В рамках системы «Блик» разработаны программное обеспечение съёмочного комплекса, и программное обеспечение послесъёмочной обработки материалов съёмки. Предложена структура программного обеспечения съёмочного комплекса, состоящая из модулей управления аппаратурой и модулей регистрации видеоданных. Модули управления аппаратурой обеспечивают:

- включение/выключение, установку режимов обмена данных и других параметров работы ПЗС-линеек;
- непрерывный контроль состояния комплекса и работы всех его компонентов;
- первоначальную калибровку подсистемы автофокусировки при монтаже комплекса;
- расчет в реальном времени положения точечного источника на пантографе и выдачу команд управления на шаговый двигатель.

Модули регистрации видеоданных обеспечивают:

- прием видеоданных от ПЗС-линеек, снимающих контактную сеть;
- прием данных от датчика местоположения;
- визуальный контроль поступающих видеоданных и данных о текущем местоположении вагона-лаборатории;
- комплексирование данных и их запись на жесткий диск с использованием механизмов буферизации.

Для регистрации материалов съемки предложена структура файла, в которой в начале каждой строки видеоинформации располагается блок служебных данных, хранящий информацию о текущем местоположении и телеметрию. Подобная структура файла позволяет организовать последующую обработку материалов съемки.

Разработана структура программного обеспечения подсистемы обработки материалов съемки, содержащей модули работы с файлами, модули автоматической обработки изображений и инструментальные средства анализа видеоданных и выполнения ручных измерений.

Для обеспечения высокоскоростной обработки сверхбольших массивов данных, а также для снижения затрат на разработку предложена архитектура программного комплекса обработки материалов съемки, состоящая из базового ядра, реализующего быстродействующие механизмы доступа к данным, и подключаемых к ядру модулей. Использование ядра позволяет реализовать механизм виртуального открытия файлов. Данная технология позволяет избежать длительного процесса загрузки изображений в оперативную (виртуальную) память, сохраняя при этом возможность интерактивной обработки. Суть используемой технологии состоит в изменении порядка загрузки, то есть во время работы загружаются лишь те области данных, которые необходимы на текущий момент обработки.

В состав программного обеспечения обработки изображений контактной сети входят следующие модули:

1) модуль импорта, предназначенный для распаковки изображений из внутреннего формата файла, выделения информации о текущем местоположении и преобразования данных во внутренний унифицированный формат ядра;

2) модуль экспорта, позволяющий сохранять в файле не весь поток видеоданных, а только его часть, содержащую непосредственно контактные провода (остальная часть изображения не содержит полезной информации). Дополнительно перед сохранением на жесткий диск изображение подвергается компрессии с использованием стандартных алгоритмов JPEG. Модуль экспорта позволяет сократить объем видеоинформации, а следовательно, и объем требуемых для архивации носителей в 20-40 раз (в зависимости от коэффициента сжатия JPEG);

3) модули выделения контактных проводов и измерения ширины площадки скольжения. Для обеспечения высокой скорости обработки материалов съемки при программной реализации данных модулей принят ряд дополнительных мер. Во-первых, обработка организована таким образом, что измере-

ние износа осуществляется параллельно с выделением контактных проводов, что позволяет избежать повторного считывания данных из файла. Во-вторых, произведена программная оптимизация критических участков кода модулей, основанная на написании быстродействующего машинного кода (в том числе с использованием специализированных команд MMX и SSE), повысившая общую скорость обработки в два раза;

4) модуль генерации отчетов, который анализирует данные измерений износа контактных проводов, сравнивает их с предельными величинами, формирует общий список дефектных участков и генерирует конечный отчет, передаваемый в дальнейшем ремонтной бригаде. На отчете отмечаются дефектные участки и осуществляется привязка изображения к местности с использованием данных о текущем местоположении вагона-лаборатории;

5) модули ручного анализа изображений, позволяющие просматривать, контрастировать и масштабировать изображения контактной сети, также реализуют «электронную линейку», позволяющую оператору самостоятельно измерить ширину площадки скольжения.

Разработка всего программного обеспечения системы «Блик» 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 25000 программных строк) с определением различных классов и функций.

В период с декабря 2008 г. по март 2009 г. с помощью системы «Блик» было обследовано 600 км контактной сети Московской железной дороги. По результатам натурной проверки обнаруженных системой дефектов бригадами монтажников контактной сети проведен ряд профилактических работ:

- вывод контактного провода из работы – 18 точек;
- правка провода – 2 точки;
- установка шунта – 3 точки;
- установка стыковых зажимов – 18 точек;
- монтаж вставки – 3 точки.

В настоящее время система «Блик» находится в опытной эксплуатации в Дорожной электротехнической лаборатории Московской железной дороги.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена важная научно-техническая задача, связанная с проектированием высокопроизводительной системы обработки и анализа изображений контактной сети железнодорожного транспорта на основе сканерной съемки, позволяющей надежно и с высокой точностью выявлять участки токонесущего провода, имеющие повышенную степень износа. В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ существующих отечественных и зарубежных систем обследования контактной сети железнодорожного транспорта. Отмечены пер-

спективные технические решения, которые следует учитывать при проектировании новой системы обработки и анализа изображений контактной сети, обладающей по отношению к аналогам более высокими точностными и эксплуатационными характеристиками, и сформулированы задачи диссертационного исследования.

2. Разработан функционирующий в реальном масштабе времени алгоритм управления подсистемой автофокусировки, основанный на корреляционной обработке поступающих от ПЗС-линейки сигналов и обеспечивающий высокую точность измерения высоты контактного провода при наличии помех и изменений уровня внешней освещенности.

3. Разработана математическая модель функционирования вычислительного комплекса, представленная системой ограничений, описывающей условия регистрации потоков данных на внешних носителях при реальных ограничениях на производительность процессоров и накопителей, а также целевой функцией, описывающей распределение информационных потоков по ЭВМ. Модель позволяет определить минимальную аппаратную конфигурацию съемочного комплекса, при которой обеспечивается его непрерывная работа в реальном масштабе времени без сбоев и потерь данных.

4. Предложена технология обработки материалов съемки, в рамках которой первоначально выполняется трассировка изображений контактных проводов, а затем в пределах выделенных образов выполняется измерение ширины площадки скольжения.

5. Разработан адаптивный корреляционный алгоритм трассировки контактных проводов, основанный на сопоставлении наблюдаемого изображения с шаблоном, учитывающим форму и геометрические размеры провода. Алгоритм обеспечивает надежную и высокоскоростную трассировку в условиях перехода контактных проводов между полями зрения ПЗС-линеек и наличия на снимках других элементов сети электропитания.

6. Предложен высокоточный алгоритм измерения ширины площадки скольжения (с точностью 0,3 мм), основанный на анализе яркостного профиля контактного провода в каждой строке изображения с использованием априорных знаний о его форме и последующем сглаживании полученных отсчетов.

7. Разработана структура программной системы обследования контактной сети «Блик», состоящая из подсистемы управления, отвечающей за работу аппаратуры и регистрацию видеоданных, и подсистемы обработки материалов съемки. Для обеспечения высокоскоростной обработки сверхбольших массивов данных, а также для снижения затрат на разработку предложена архитектура программного обеспечения обработки материалов съемки, состоящая из базового ядра, реализующего быстродействующие механизмы доступа к данным, и подключаемых к ядру модулей, в которых широко используются распараллеливание вычислительного процесса и оптимизация наиболее часто используемых участков кода за счет использования языка низкого уровня.

Достигнутая скорость обработки материалов съемки составила в среднем 40 ГБ/ч, что эквивалентно 50 км пути (при скорости проведения съемки 60

км/ч). Опытная эксплуатация подтвердила высокую эффективность системы в плане обнаружения участков контактной сети, имеющих повышенную степень износа.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Пронченко Р.С. Технология выявления мест локального износа контактной сети электропитания железнодорожных составов по данным тепловизионной съемки. – Рязань: РГРТА, 2004. – 12 с. – Деп. в ВИМИ 29.04.2004, № ДО-8950.

2. Пронченко Р.С. Применение целочисленного программирования для поиска оптимальной конфигурации вычислительной системы // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : тез. докл. XI всерос. конф. – Рязань: РГРТА, 2006. – С. 159-160.

3. Пронченко Р.С. Алгоритм определения оптимальной аппаратной конфигурации вычислительного комплекса. – Рязань: РГРТУ, 2008. – 8 с. – Деп. в ВИМИ 10.06.2008, № ДО-9043.

4. Пономарев А.Ю., Пронченко, Р.С. Применение алгоритма сегментации для устранения геометрических искажений на самолетных сканерных снимках. – Рязань: РГРТА, 2004. – 9 с. – Деп. в ВИМИ 03.09.2004, № ДО-8956.

5. Пронченко Р.С. Алгоритм сегментации изображений контактной сети железнодорожного транспорта // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : тез. докл. XII всерос. конф. – Рязань: РГРТА, 2007. – С. 328.

6. Пронченко Р.С. Алгоритм измерения линейных размеров протяженных объектов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании : тез. докл. X всерос. конф. – Рязань: РГРТА, 2005. – С. 122-123.

7. Пронченко Р.С. Измерение по цифровым изображениям линейных размеров протяженных объектов // Информатика и прикладная математика : межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: Рязанский государственный педагогический университет имени С.А. Есенина, 2005. – С. 160-166.

8. Ковалев А.О., Пронченко Р.С. Программный комплекс анализа изображений воздушной контактной электросети // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : тез. докл. 13-й междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТА, 2004. – С. 105.

9. Злобин В.К., Ковалев А.О., Кузнецов А.Е., Пронченко Р.С. Архитектура программно-аппаратного комплекса обследования контактного провода // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : тез. докл. 14-й междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТА, 2005. – С. 212-213.

10. Пронченко Р.С. Математическое обеспечение комплекса диагностики контактной сети железнодорожного транспорта // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – С. 15-20.

11. Злобин В.К., Кузнецов А.Е., Пронченко Р.С. Система мониторинга состояния контактной сети железнодорожного транспорта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета №2. – Рязань: РГРТУ, 2008. – С. 28-33.

12. Пронченко Р.С. Технология обработки материалов съёмки контактной сети железнодорожного транспорта // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций : тез. докл. 15-й междунар. науч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2008. – С. 128-129.

Пронченко Роман Сергеевич

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ПО ДАННЫМ СКАНЕРНОЙ СЪЕМКИ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.06.2009г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

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

Редакционно-издательский центр РГРТУ.