

УДК 681.518

В.К. Злобин, А.Е. Кузнецов, Р.С. Пронченко

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Рассматриваются алгоритмы функционирования системы дистанционного обследования контактной сети железнодорожного транспорта. Система обеспечивает съемку контактной сети электропитания и обработку изображений, в ходе которой выявляются участки контактного провода с повышенной степенью износа.

Введение. На железнодорожном транспорте подача питания к двигателям электропоездов осуществляется через подвесную контактную сеть с помощью токосъемника (пантографа), обеспечивающего скользящий контакт с медным проводом. По мере эксплуатации происходит износ провода и увеличивается вероятность его обрыва, что неизбежно вызывает аварии, приводящие к экономическому ущербу и трагическим последствиям.

Для поддержания контактной сети в надлежащем состоянии на железной дороге существует специальный комплекс мер, включающий в себя плановую замену контактных проводов по истечении срока их службы, а также визуальный осмотр и ручные микрометрические измерения остаточной высоты провода. Однако данные меры малопродуктивны и не позволяют полностью исключить ситуации, связанные с обрывами. Поэтому в настоящее время в нашей стране и за рубежом ведутся активные разработки по созданию оперативных систем дистанционного обследования контактной сети электропитания, основанные на сканерной съемке так называемой площадки износа провода [1,2]. При трении контактного провода и пантографа нижняя часть провода изнашивается и приобретает зеркальный блеск. Измеряя ширину зеркальной площадки износа, можно по известным геометрическим размерам рассчитать остаточную высоту провода и степень его износа. В настоящей работе рассматриваются структура созданной для Московской железной дороги системы обследования контактной сети, а также алгоритмы обра-

ботки и интерпретации получаемых в результате съемки материалов.

Описание системы мониторинга. Для диагностики контактной сети передвижной вагон-лаборатория оснащается специализированной системой мониторинга контактной сети, структура которой показана на рисунке 1 [3]. На крыше вагона-лаборатории устанавливается оптическая система, содержащая две ПЗС-линейки высокого разрешения (ПЗС1, ПЗС2) и осуществляющая съемку контактного провода. Установка двух, а не одной ПЗС-линейки позволяет расширить поле зрения оптической системы и в то же время обеспечить высокое пространственное разрешение порядка 0,1 мм на пиксел.

Для надежного наблюдения площадки износа контактный провод дополнительно освещается лампой, также расположенной на крыше вагона. Лампа подбирается таким образом, чтобы спектр её излучения совпадал со спектральной чувствительностью ПЗС-линейки.

Высота контактного провода железнодорожной сети не является постоянной величиной и колеблется в широких пределах. Поэтому для получения изображения контактного провода с постоянными геометрическими характеристиками на всем протяжении съемки используется автофокусировка. Для этого на крыше вагона устанавливается третья ПЗС-линейка (ПЗС3), при помощи которой определяется текущая высота провода. На основе данных о текущей высоте выдается соответствующая команда на шаговый двигатель, который корректирует положение оптической системы, выполняющей съемку контактного провода.

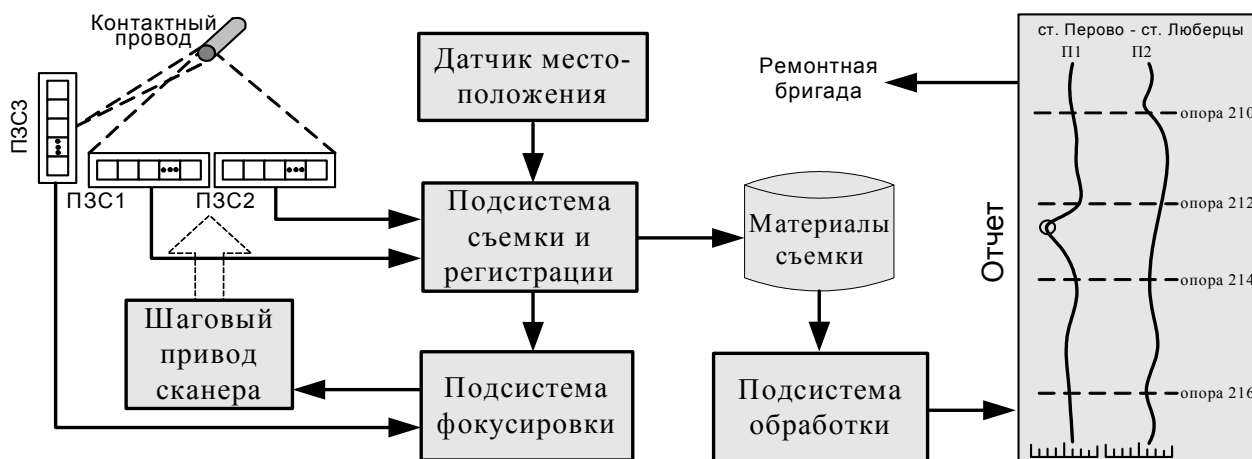


Рисунок 1 – Структура системы мониторинга контактной сети железнодорожного транспорта

За счет движения вагона-лаборатории происходит кадровая развертка формируемых изображений (рисунок 2), которые записываются на жесткий диск. При этом в служебную часть каждой строки заносятся текущие координаты вагона, привязанные к номеру опоры и формируемые специальным датчиком. Определение параметров износа провода происходит в ходе послесъемной обработки. В результате формируется отчет, на котором отмечаются участки контактного провода с повышенной степенью износа (рисунок 1).

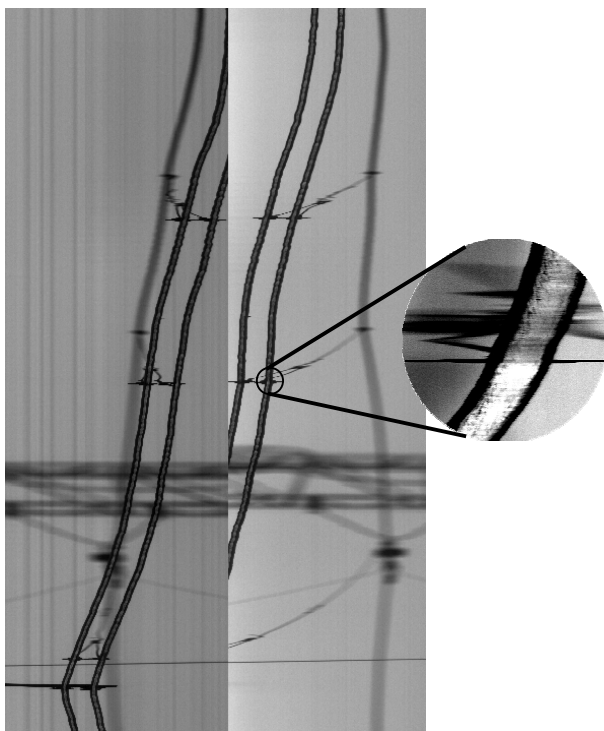


Рисунок 2 – Пример сканерной съемки контактного провода двумя ПЗС-линейками

Алгоритмы обработки материалов съемки. Задача обработки материалов съемки имеет ряд особенностей. Во-первых, поскольку прихо-

дится работать со сверхбольшими по объему массивами видеоданных (кадровое разрешение изображений составляет 2-5 см), то требуется разработать надежные алгоритмы автоматического распознавания на снимках контактного провода, в том числе при переходе провода с поля зрения одной ПЗС-линейки на другую. Во-вторых, следует разработать высокоточные алгоритмы измерения ширины площадки скольжения для каждого контактного провода в условиях действия помех и различных форм её представления на снимке.

С учетом этих особенностей были проанализированы следующие варианты обработки изображений контактного провода.

Первый вариант основан на применении классических методов сегментации для выделения на изображении пикселей, принадлежащих площадке скольжения, с последующей оценкой по ним степени износа провода.

Площадку скольжения (рисунок 2), обладающую повышенным по отношению к другим частям провода яркостью $b_{\Pi}(x, y) - b(x, y) \geq \Delta b$, где $b_{\Pi}(x, y)$ – яркость пикселей, принадлежащих площадке скольжения; $b(x, y)$ – яркость пикселей, принадлежащих другим частям провода, можно выделить, используя *волновой алгоритм* при известном значении яркостного порога Δb [4]. Эксперименты показали низкую эффективность этого алгоритма. Дело в том, что в местах, где не распознается площадка скольжения, происходит остановка процесса обработки и требуется вмешательство оператора для задания новой точки распространения волны $b(x_0, y_0)$.

Более устойчивая сегментация провода обеспечивается с помощью *верного алгоритма*, в соответствии с которым на каждой итерации из

предыдущей точки P_{k-1} с координатами (x_{k-1}, y_{k-1}) формируется множество разнонаправленных векторов N_k , состоящее из L элементов:

$$N_k = \{\mathbf{n}_{ki}; i = \overline{1, L}\}, \mathbf{n}_{ki} = [b_k(x_{iv}, y_{iv})], v = \overline{1, L},$$

где L – длина сканирующего вектора. Далее вычисляется энергия каждого вектора \mathbf{n}_{ki} ,

$$e_{ki} = \sum_{v=1}^L b_k(x_{iv}, y_{iv}).$$

Направление дальнейшего распространения на снимке площадки скольжения, задаваемое индексом i^0 , совпадает с направлением вектора, для которого выполняется условие $i^0 = \arg \max_i e_{ki}$. Затем происходит перемещение

точки P_k в найденном направлении i^0 на расстояние, равное длине сканирующего отрезка L , и последовательность действий повторяется.

Данный алгоритм, в отличие от волнового, обеспечивает сегментацию площадки скольжения при её кратковременном пропадании, но он не позволяет выполнить трассировку при переходе провода с поля зрения одной ПЗС-линейки на другую. Кроме того, использование жестко заданных порогов для всего маршрута съемки дает результаты по измерению ширины площадки скольжения, существенно отличающиеся от данных ручных измерений.

Второй вариант. В его основе лежит следующий конструктивный подход: вначале выделить и оттрассировать на снимке изображение всего контактного провода, а не только площадки скольжения, после чего организовать измерение ширины площадки скольжения на основе анализа яркостного профиля провода.

Трассировку контактного провода выполним с помощью *стробового алгоритма*. Скользящий строб представляет собой три примыкающие друг к другу прямоугольные области B_1, B_2 и B_3 , каждая из которых содержит n_1, n_2 и n_3 пикселей соответственно (рисунок 3) [4].

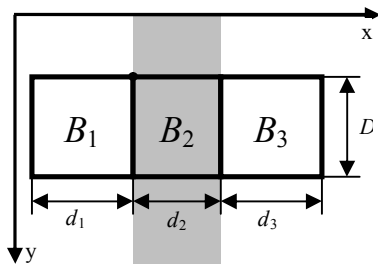


Рисунок 3 – Форма строба для трассировки провода

Пусть $b_1 = (b_{1,1}, b_{1,2}, \dots, b_{1,n_1})$, $b_2 = (b_{2,1}, b_{2,2}, \dots, b_{2,n_2})$ и $b_3 = (b_{3,1}, b_{3,2}, \dots, b_{3,n_3})$ – независимые выборки значений яркости в окнах B_1, B_2 и B_3 соответственно. По выборкам b_1, b_2 и b_3 получим оценки генеральных средних \bar{b}_1 для области B_1 , \bar{b}_2 для области B_2 и \bar{b}_3 для области B_3 . В качестве наблюдаемой статистики используем нормированную разность оценок генеральных средних с учетом того, что в нашем распоряжении вместо дисперсии генеральной совокупности σ^2 имеются ее оценки, полученные по выборкам b_1, b_2 и b_3 :

$$t_{1,2} = \frac{\bar{b}_1 - \bar{b}_2}{\sqrt{\sigma_1^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2}}, t_{3,2} = \frac{\bar{b}_3 - \bar{b}_2}{\sqrt{\sigma_3^2 / n_1 + \sigma_2^2 / n_2}},$$

где σ_1^2, σ_2^2 и σ_3^2 – дисперсии для выборок b_1, b_2 и b_3 соответственно. Тогда при $t_{1,2} \geq t_{\Pi}$ и $t_{3,2} \geq t_{\Pi}$, где t_{Π} – пороговое значение критерия, установленного в соответствии с принятой величиной доверительной вероятности P , принимается гипотеза о том, что точки, образующие область B_2 , относятся к изображению контактного провода, а точки, образующие области B_1 и B_3 , принадлежат фону. В процессе работы алгоритма происходит адаптация строба, т.е. определяется оптимальное его положение и ширина d_2 центральной части B_2 , при которых достигаются максимальные значения $t_{1,2}$ и $t_{3,2}$.

Достоинством данного алгоритма является возможность автоматического преодоления разрывов изображения. Для этого достаточно при переходе через разрыв расширить область адаптации положения строба и алгоритм автоматически обнаружит новое положение контактного провода. Экспериментальные исследования показали, что алгоритм обеспечивает надежный переход между полями зрения ПЗС-линейки, не требуя вмешательства оператора. Однако кроме контактных проводов на снимках находится большое количество других вспомогательных элементов подвесной системы. Их наличие приводит к тому, что стробовый алгоритм нередко ложно срабатывает и выделяет вместо контактных проводов другие элементы.

Для решения этой проблемы разработан *корреляционный алгоритм*, учитывающий форму и геометрические размеры провода. Определим шаблон $S = [s(l)]$, $l = \overline{1, L}$, как яркостной срез сечения контактного провода в начальной точке трассировки. Поиск провода выполняется независимо в каждой строке изображения y в соответствии с функционалом

$$F(x) = \sum_{j=1}^L [b(x+j-1, y) - s(j)]^2,$$

где x – номер элемента строки, с которого начинается шаблон. Функционал минимизируется путем сдвига шаблона влево и вправо, в результате находится значение $x_0 = \arg \min_x [F(x)]$.

Считается, что провод располагается в элементах строки с номерами $x_0 \dots x_0 + L - 1$. Далее происходит модификация шаблона $s(l) = b(x_0 + l - 1, y), l = \overline{1, L}$ и осуществляется переход к следующей строке изображения.

Использование корреляционного алгоритма позволяет избавиться от влияния посторонних элементов на изображение. Однако в процессе работы алгоритма из-за накопления ошибок происходит постепенное искажение шаблона и сбой трассировки. Задать шаблон постоянным и тем самым избежать накопления ошибок оказалось невозможным, так как на разных участках маршрута съемки контактный провод имеет различные по форме яркостные срезы.

Для снижения негативного влияния от накопления ошибок предлагается запоминать несколько предыдущих шаблонов $S_q, q = \overline{1, Q}$, и при вычислении функционала вместо одного шаблона использовать среднее арифметическое Q предыдущих шаблонов [5, 6],

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

Такая модификация позволяет в 2-3 раза увеличить среднюю длину оттрассированного без ошибок участка, но полностью проблему не решает. Необходимо периодически производить коррекцию шаблона, устанавливая его точно на контактный провод. Для этого предлагается воспользоваться априорными знаниями о геометрических размерах контактного провода, учитывая, что благодаря подсистеме автофокусировки ширина провода на снимке практически постоянна и колеблется в диапазоне 5-10 пикселей.

Выполним операцию дифференцирования изображения контактной сети $b'(x, y) = b(x+1, y) - b(x, y), x = \overline{1, X-1}$, и вычислим функционал

$$G(x) = G_1(x) + G_2(x),$$

$$G_1(x) = \sum_{j=1}^R b'(x+j, y),$$

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

где W – номинальная ширина контактного провода, R – ширина области перепада яркости от уровня фона до уровня контактного провода. Затем находится значение $x_1 = \arg \max_x [G(x)]$.

Если выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} G(x_1) \geq \Delta G, \\ \frac{\min(G_1(x_1), G_2(x_1))}{\max(G_1(x_1), G_2(x_1))} \geq 0.8, \end{cases}$$

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 . Второе условие в неравенстве позволяет отбросить ложные обнаружения, вызванные сильными перепадами яркости на снимке, и основано на том факте, что перепады яркости на левой и правой границах провода отличаются незначительно.

В этом алгоритме автоматически через 50-100 строк производится поиск контактного провода при помощи функционала G . Если провод удастся обнаружить, то выполняется коррекция шаблона и текущего положения провода,

$$s_Q(l) = b(x_1 + l - 1, y), l = \overline{1, L}.$$

Этот же функционал G используется при поиске провода в месте стыковки изображений от двух ПЗС-линеек.

Экспериментальные исследования предложенного алгоритма показали его высокую скорость и отсутствие сбоев при трассировке, что и определило его использование в системе мониторинга контактной сети железнодорожного транспорта.

Алгоритм измерения ширины площадки скольжения. Используя данные, полученные на этапе трассировки, сформируем новое изображение $\tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{b}(x, y)], x = \overline{1, W}, y = \overline{1, Y}$, содержащее в себе только образ контактного провода. Продифференцируем изображение $\tilde{\mathbf{V}}$,

$$\tilde{b}'(x, y) = \tilde{b}(x+1, y) - \tilde{b}(x, y), x = \overline{1, W-1},$$

сгладим полученные значения и вычислим левую и правую границы площадки скольжения в точках, в которых происходит максимальный скачок яркости,

$$W_{ЛЕВ}(y) = \max_x (\tilde{b}'(x, y)),$$

$$W_{ПРАВ}(y) = \min_x (\tilde{b}'(x, y)).$$

Полная ширина площадки скольжения вычисляется по формуле: $W_y = W_{ПРАВ}(y) - W_{ЛЕВ}(y) + 1$.

Данный алгоритм, в отличие от порогового критерия, обеспечивает выполнение измерения ширины площадки скольжения при любых флуктуациях уровня яркости. Однако на контактном проводе встречаются участки, где значение производной внутри площадки скольжения превышает значения на её границах, что приводит к некорректным измерениям положения границ. С учетом этого разработан специ-

альный алгоритм уточнения границ площадки скольжения, основанный на многоуровневом анализе яркостных профилей. Рассмотрим образец яркостного профиля контактного провода (рисунок 4).

Алгоритм описывается следующей последовательностью действий.

1. Вычисляется минимальное и максимальное значения уровней яркости в строке:

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

2. Устанавливается порог $b_{\Pi} = b_{\min}(y) + 1$.

3. Находятся все точки $x_{\Pi m}, m = \overline{1, M}$, для которых $\tilde{b}(x_{\Pi m}, y) = b_{\Pi}$.

4. Если выполняется условие

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

то площадка износа считается найденной и имеющей границы $W_{ЛЕВ}(y) = x_{\Pi 2}$, $W_{ПРАВ}(y) = x_{\Pi 3}$.

В противном случае порог b_{Π} увеличивается на единицу и алгоритм повторяется со второго шага. Если же ни для одного значения порога $b_{\min}(y) + 1 \leq b_{\Pi} \leq b_{\max}(y) - 1$ условие (1) не выполняется, то измерение в данной строке изображения не выполняется и ситуация передается для анализа оператору.

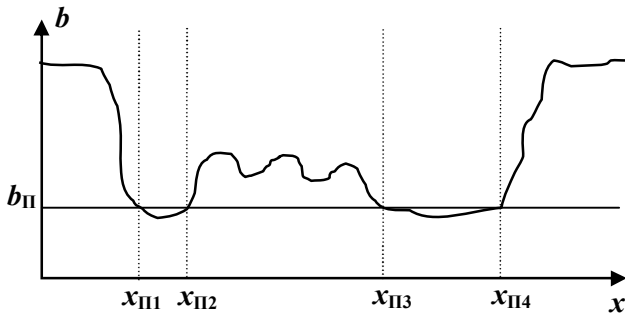


Рисунок 4 – Яркостной профиль контактного провода

При вычислении границ площадки износа получают дискретные значения, кратные одному пикселу. Однако реальная ширина площадки не является дискретной. Пусть d - линейные размеры пиксела в строчном направлении. Тогда средняя квадратичная погрешность определения границ $W_{ЛЕВ}$ и $W_{ПРАВ}$ для равномерного закона распределения ошибки измерения рассчитывается как

$$\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}}.$$

Соответственно погрешность измерения ширины площадки

$$\sigma_{ПОЛН} = \sigma_{ЛЕВ} + \sigma_{ПРАВ} = 2\sigma = \frac{d}{\sqrt{3}}.$$

Для повышения точности измерения последовательность $W_y, y = \overline{1, Y}$ ширины площадки скольжения подвергается скользящей полиномиальной аппроксимации. Скорректированное значение $\tilde{W}_y, y = \overline{N+1, Y-N}$, определяется при помощи коэффициентов полинома порядка J , рассчитанных по значениям самого элемента и N ближайших к нему слева и справа элементов.

Пусть $J=2$ и $N=5$. Тогда $\tilde{W}_l = a_0(l) + a_1(l) \cdot W_l + a_2(l) \cdot W_l^2$, где $a_j(l)$ - коэффициенты полинома, которые находятся из матричного уравнения $\mathbf{Y}(l) = \mathbf{H}\mathbf{A}(l)$, где

$$\mathbf{Y}(l) = \begin{bmatrix} W_{l-5} \\ \dots \\ W_{l+5} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & l-5 & (l-5)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & l+5 & (l+5)^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}(l) = \begin{bmatrix} a_0(l) \\ a_1(l) \\ a_2(l) \end{bmatrix}.$$

Решение получим при помощи метода наименьших квадратов: $\mathbf{A}(l) = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y}(l)$. Тогда погрешность скорректированных значений ширины площадки скольжения вычисляется по формуле,

$$\sigma_{ПОЛН} = \sigma_{ПОЛН} \cdot \mathbf{H}_0^T (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}_0 \approx \frac{\sigma_{ПОЛН}}{5},$$

$$\mathbf{H}_0 = [1 \quad l \quad l^2]^T.$$

Заключение. Рассмотренные в статье алгоритмы анализа и обработки изображений контактной сети реализованы в системе «Блик», созданной по заказу Московской железной дороги. Для аттестации системы были произведены ручные микрометрические измерения на тестовом участке контактной сети. Сравнение ручных измерений с аналогичными результатами, полученными системой «Блик», показало, что различие не превышает 0.5 мм. Этого оказывается достаточно для проведения мониторинга контактной сети.

С помощью системы «Блик» было произведено обследование контактной сети на участках Москва-Рязань и Москва-Владимир, по результатам которого выполнены ремонтные работы по внеплановой замене изношенных участков контактного провода, что еще раз подтвердило эффективность предложенной системы.

Библиографический список

1. Патент №2155678 РФ. Устройство для контроля износа и зигзага контактного провода электрической сети железнодорожного транспорта / Арбузов Е.В., Егиязарян А.В.
2. Устройство для определения износа контактного провода // Железные дороги мира. 2001. №9.

3. Ковалев А.О., Пронченко Р.С. Программный комплекс анализа изображений воздушной контактной электросети. // Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. Рязань, 2004.

4. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Под ред. Фурмана Я.А. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 592 с.

5. Алтатов Б.А., Селяев А.А., Степашкин А.И. Цифровая обработка изображения в задаче отслеживания движущегося объекта // Приборостроение. 1985. №2.

6. Алтатов Б.А., Селяев А.А. Алгоритм оценки местоположения объекта на двумерном изображении // Приборостроение. 1988. №5.