

# ПРИМЕНЕНИЕ ДПЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ И ПОЛОСЫ ОТВОДА В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ТЕРРОРИСТИЧЕСКИХ АКТОВ

**Разевиг В.В., Ивашов С.И.**

*Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва*  
vrazevig@rslab.ru, sivashov@rslab.ru

**Лёвин Б.А., Недорчук Б.Л.**

*Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва*

*В настоящее время поиск на железнодорожном полотне подозрительных объектов в основном осуществляется путем его визуального осмотра путевыми бригадами, что требует больших затрат рабочего времени и не дает нужного эффекта из-за большой протяженности железнодорожных линий. В целях повышения производительности и оперативности поисковых работ в рамках данной работы рассмотрена возможность использования для досмотра дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов с установленными на них сканерами, осуществляющими многозональную съемку в видимом и инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. Разработаны алгоритмы обработки получаемых изображений для выделения на них подозрительных объектов.*

Ключевые слова: противодействие терроризму, дистанционно-пилотируемые летательные аппараты, дефекты рельсов, поляризация света, распознавание дефектов и мин.

## **Введение**

В настоящее время проблема противодействия террористическим акциям с применением как штатных мин, так и самодельных взрывных устройств (СВУ) приобрела особую актуальность. Незаконные вооруженные формирования и террористические группировки, как в Российской Федерации, так и в других странах, широко используют мины и СВУ для совершения нападений на гражданские и военные объекты, в частности, на железные дороги.

Работы по поиску диверсионно-террористических средств, самодельных ВУ и иных взрывоопасных предметов на железнодорожном полотне в основном выполняются путем визуального осмотра полотна путевыми бригадами, что требует больших затрат рабочего времени и не дает нужного эффекта из-за большой протяженности железнодорожных линий.

В целях повышения производительности и оперативности поисковых работ в рамках проекта рассмотрена возможность использования для досмотра железнодорожного полотна дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) с установленными на них сканерами, осуществляющими многозональную съемку в видимом и инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра. Обнаружение мин и СВУ, а также следов подготовки террористических актов может осуществляться как в автоматическом режиме с использованием математических методов распознавания образов, так и человеком-оператором. Комбинированная система обработки изображений позволит повысить качество и оперативность принятия решений в случае обнаружения следов подготовки террористических актов. В качестве топопривязки может использоваться аппаратура системы GPS/ГЛОНАСС, а также возможно осуществлять привязку по изображениям местных предметов и опознавательных знаков на ж/д путях и в полосе отчуждения.

Предлагаемый подход основан на том, что установка взрывных устройств, даже в случае их маскировки, всегда сопровождается появлением неоднородностей вмещающей среды (нарушение поверхности грунта, нарушение цвета растительности или снежного покрова и т.д. [25, 7, 20]).

## **1. Анализ задач и методы их решения с помощью воздушной разведки при обследовании ж/д путей сообщения**

Во всем мире защита железнодорожных путей сообщения от террористических актов, а также общий контроль их состояния, является одной из важнейших задач. Это определяется как важностью железных дорог для экономики государств, так и большим числом жертв в случае крушения пассажирских поездов. Проблема безопасности на железнодорожном транспорте стала особенно актуальной после появления высокоскоростных поездов. Крушение таких поездов при скорости движения более 300 км/час может привести к жертвам, многократно превышающим аналогичные последствия для обычных составов при скорости движения 100-120 км/час. Это легко объяснимо, т.к. кинетическая энергия любого тела пропорциональна квадрату его скорости.

Традиционными методами решения задач обеспечения безопасности на железных дорогах является путевой обход и использование путеизмерительных вагонов. Первый метод является малопродуктивным и трудозатратным, а путеизмерительную технику невозможно использовать в оперативных целях.

Одним из возможных решений этой задачи является использование дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА). Подобного рода летательные аппараты уже нашли широкое применение в военном деле. Признанными лидерами, накопившими большой опыт в разработке и использовании ДПЛА, являются Израиль и США [25, 26].

Основной задачей предполагаемой системы мониторинга на базе ДПЛА является наблюдение за трассой ж/д путей с целью предотвращения террористических актов и обнаружения следов приготовления к ним. Эта задача должна решаться в комплексе с оперативно-розыскными мероприятиями, т.к. практически невозможно обеспечить непрерывное наблюдение за ж/д путями на всей их протяженности даже с помощью летательных аппаратов. Наличие оперативных данных о предполагаемом районе и времени совершения террористического акта может являться основанием для вылета в район патрулирования. Информация, требующая дополнительной проверки, может также поступать с систем видеонаблюдения, установленных вдоль ж/д путей [27].

Основными преимуществами использования ДПЛА для диагностики состояния ж/д путей сообщения являются:

- высокая оперативность использования, т.е. способность достичь заданного участка ж/д пути за относительно короткое время, т.к. скорости ДПЛА на маршруте могут достигать 200-250 км/час и более;
- относительно низкая стоимость использования ДПЛА по сравнению с другими типами летательных аппаратов: вертолетами и самолетами;
- использование ДПЛА не требует создания окон в расписании движения ж/д составов, что является необходимым при применении путеизмерительных вагонов;
- маршрут ДПЛА может корректироваться в соответствии с получаемой в полете информацией и может отклоняться от оси ж/д пути на значительное расстояние;
- управление всеми находящимися в полете ДПЛА при наличии с ними связи через спутниковые каналы или специально созданные оптоволоконные линии, проходящие вдоль ж/д путей (возможен также вариант использования другого ДПЛА в качестве ретранслятора), может осуществляться централизованно с единого командного пункта;
- при наличии инфракрасной техники на борту существует возможность контроля состояния электрифицированных железных дорог с определением мест повышенного нагрева электрических цепей из-за плохих контактов, а также дистанционной диагностики другой аппаратуры: трансформаторных будок и т.д. [18];
- инфракрасные датчики дают возможность вести наблюдение круглосуточно без использования дополнительного освещения;
- система на базе ДПЛА может быть дополнением к существующим и проектируемым системам охраны, в том числе включающих камеры видеонаблюдения. Использование

ДПЛА позволит расширить зоны поиска и оценить оперативную обстановку при поступлении тревожных сигналов из других источников [27].

Отметим, однако, что создание столь дорогостоящей системы для решения узкоспециализированной задачи вряд ли является целесообразным. Кроме указанной выше задачи, представляется возможным использовать систему на базе ДПЛА для решения и других задач, регулярно встречающихся на железной дороге. В первую очередь это:

- наблюдение за местом крушения ж/д составов, оценке причиненного ущерба и оперативного управления ликвидацией последствий;
- регулярный облет ж/д магистралей для оценки состояния пути с целью обеспечения безопасного движения поездов.

Задача поиска на изображениях железнодорожных путей посторонних объектов является задачей сегментации изображения (разбиения на однородные области) на основе использования цветовых и текстурных различий областей. Анализ изображений ж/д путей облегчается тем, что пути представляют собой регулярную структуру с известными геометрическими характеристиками.

Решение поставленной задачи начинается с вычленения на изображении рельс, затем шпал, а вся оставшаяся область считается балластным слоем. В результате первого этапа исходное изображение будет сегментировано на три области. Следует учитывать, что рельсы — это наиболее однородная область изображения, любые посторонние объекты на них недопустимы. Шпалы и балластный слой — не такие однородные области, их однородность может нарушаться травой, листьями, лужами, снегом, мусором и пр.

Предлагается следующий план обработки изображений:

1. Предварительная обработка изображения: коррекция гистограммы; компенсация движения носителя аппаратуры; компенсация неравномерности освещения; подавление и устранение шума.
2. Сегментация изображений: выделение рельсов; выделение шпал; выделение балластного слоя.
3. Поиск посторонних объектов: на рельсах; на шпалах; на балластном слое.

Необходимо отметить, что никакая система автоматической обработки изображений не может сравниться с оператором по качеству обработки. И наилучший результат решения поставленной задачи будет достигнут, если все полученные при пролете ДПЛА вдоль ж/д путей фотоматериалы будут просмотрены оператором. Но это очень трудоемкая задача. Например, при длине кадра 10 м и пролете 50 км будет получено 5 тысяч кадров.

Предлагаемая автоматическая обработка ценна тем, что система будет отмечать на изображениях подозрительные места, т.е. места, по статистическим характеристикам отличающиеся от регулярной структуры ж/д полотна. Среди этих мест значительное количество, конечно, будет ложными тревогами, но в результате оператору останется просмотреть только эти выделенные фрагменты, что многократно повысит производительность его труда.

Все разработанные в рамках данного проекта алгоритмы проверялись на изображениях, полученных на испытательном полигоне в подмосковной Щербинке (рис. 1). В результате был зарегистрирован ряд фотоизображений железнодорожных путей как с расположенными на них объектами, так и без них. Эти снимки и были положены в основу дальнейшей обработки с использованием предложенных алгоритмов. Съемка проводилась с высоты порядка 10 метров с монтажной автомотрисы АДМ зеркальной фотокамерой Canon 40D с установленным объективом Canon EF-S 17-55 f/2.8 IS USM (рис. 2). Использование автомотрисы было вынужденной мерой, т.к. позволило резко уменьшить расходы, которые могли быть связаны с аэрофотосъемкой и доработкой бортовой аппаратуры. Кроме того, финансовые и временные ограничения этапа работ не давали возможности использовать летательную технику.



Рис. 1. Место проведения экспериментов на полигоне в г. Щербинка



Рис. 2. Съемка ж/д пути с автотрисы АДМ

## 1.2. Сегментация изображений

Одним из фундаментальных этапов анализа видеоинформации является сегментация изображений, означающая разбиение поступающих изображений на множество областей, однородных в соответствии с теми или иными критериями, и тем самым ассоциируемых с объектами наблюдаемой сцены или их частями. Результатом сегментации является получение карты областей (сегментов) изображения.

### 1.2.1. Выделение рельсов на изображениях

На первом этапе обработки проводится операция выделения границ (выделение краев) — выделение точек цифрового изображения, в которых резко изменяется яркость или есть другие виды неоднородностей. Было опробовано несколько алгоритмов выделения границ, для данных изображений наилучшие результаты показал метод Кенни [10].

В результате применения метода выделения границ получается изображение, на котором выделены все пиксели, принадлежащие краям и перепадам яркости. Следующим этапом выполняется процедура компоновки выделенных пикселей в настоящие, осмысленные линии и краевые сегменты. Следует учитывать, что на обрабатываемом изображении есть края не только рельсов, а также шпал, щебня и т.д. Так как на данном этапе производится поиск рельсов, необходимо выделить на изображении прямые линии. Используя дополнительную информацию о том, что носитель фотоаппаратуры летит вдоль ж/д путей, можно заключить, что рельсы на изображении расположены вертикально или почти вертикально. Для группировки выделенных пикселей в прямые линии использовалось преобразование Хафа [17] — метод по выделению на изображениях элементов заданной формы (в данном случае осуществляется поиск прямых).

Зная координаты рельсов и учитывая то обстоятельство, что в рамках данной задачи необходимо находить посторонние объекты на ж/д путях либо в непосредственной близости от них, для увеличения скорости обработки можно обрезать обрабатываемое изображение, оставив на нем только ж/д путь с полосой отвода.

### 1.2.2. Выделение шпал

Выделение шпал облегчается тем, что они имеют predetermined размер и периодическое расположение. Для выделения шпал был использован *k-mean* алгоритм (алгоритм *k*-средних) [20], разбивающий множество элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров *k*. Основная идея заключается в том, что на каждой итерации перевычис-

ляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы вновь разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения кластеров.

Исходное изображение разбивалось на три кластера. Пиксели, принадлежащие каждому кластеру, отмечены своим оттенком серого цвета: от белого до черного. Из полученных кластеров выбирался кластер шпал.

Результата обработки обладал двумя существенными недостатками: не все точки, на самом деле принадлежащие шпалам, отнесены алгоритмом к кластеру шпал, и к классу шпал отнесены некоторые точки, на самом деле шпалам не принадлежащие. Для устранения этой проблемы использовалась морфологическая обработка — теория и техника анализа и обработки геометрических структур, основанная на теории множеств, топологии и случайных функциях.

В результате имеем изображение, в котором точки, принадлежащие шпалам, имеют единичное значение, все остальные — нулевое значение (черный цвет). И хотя, если посмотреть на изображение, кажется, что шпалы уже выделены, на самом деле есть только набор отдельных пикселей. Для вычисления координат шпал необходимо объединить эти точки в группы, т.е. провести выделение связных областей (связная область — это множество пикселей, у каждого из которых есть хотя бы один сосед, принадлежащий данному множеству), что позволит вычислить геометрические параметры шпал.

Зная вычисленные координаты рельс и прямоугольников, ограничивающие шпалы, а также учитывая следующую информацию о ж/д пути: расстояние между рельсами известно; рельсы параллельны друг другу; длина шпал известна; шпалы параллельны друг другу; шпалы уложены с равномерным шагом, можно провести коррекцию полученных результатов и получить окончательный результат кластеризации изображения по трем кластерам: рельсы, шпалы, балластный слой.

На рис. 3 приведено одно из исходных обрабатываемых изображений, полученных на полигоне в Щербинке, а на рис. 4 и 5 — результат кластеризации.

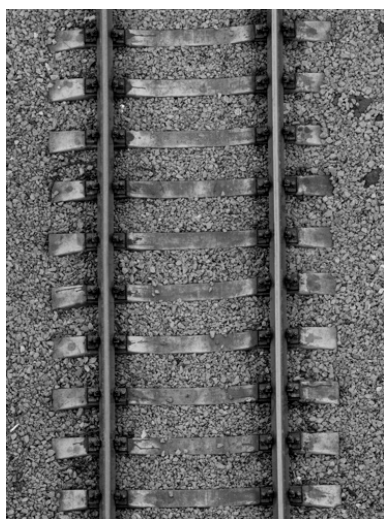


Рис. 3. Исходное изображение

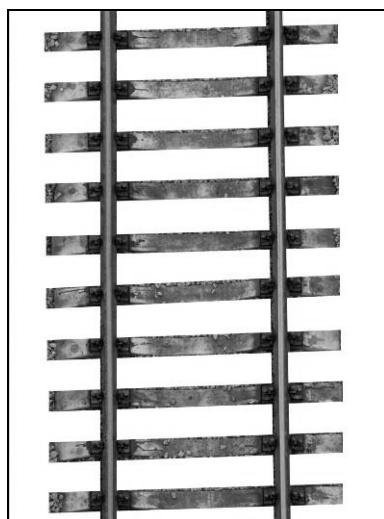


Рис. 4. Объединенный кластер рельсов и шпал

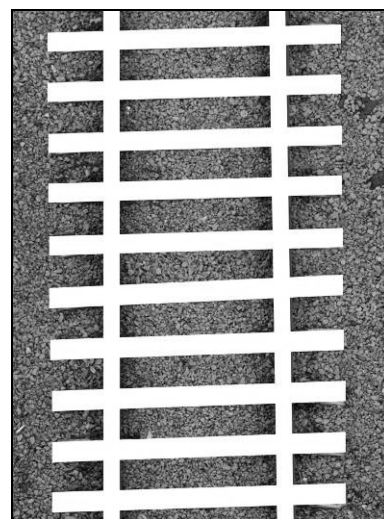


Рис. 5. Кластер балластного слоя

Так как обрабатываемые в рамках выполнения данного этапа работы изображения были получены не с ДПЛА, а автототрисы (рис. 2), из-за конфигурации которой невозможно было снимать в надир, а только под некоторым углом к вертикали, то на фотографиях присутствуют перспективные искажения, несколько затрудняющие обработку. При съемке строго в надир с использованием сканера подобные искажения будут отсутствовать, а результаты обработки будут лучше и могут быть получены с использованием упрощенных алгоритмов.

### 1.3. Поиск посторонних объектов

#### 1.3.1. Поиск посторонних объектов на рельсах

Поиск посторонних объектов на рельсах является наименее сложной задачей (по сравнению со шпалами и балластным слоем), т.к. рельсы являются наиболее однородными объектами. Для решения задачи поиска можно пройти скользящим окном вдоль всего рельса, вычисляя какую-нибудь характеристику попадающего в окно фрагмента изображения. Затем усреднить эту характеристику по всем окнам и выбрать те фрагменты, в которых разница между данной характеристикой в текущем окне и средним значением будет больше порогового значения.

При обработке полученных на полигоне фотографий ж/д путей использовалось скользящее окно размером  $5 \times 5$  точек, а в качестве характеристики было выбрано распределение точек по яркостям, т.е. гистограмма. На рис. 6 показано исходное изображение, а на рис. 7 — результат его обработки, где области, в которых зафиксировано сильное отличие гистограммы от средней по всему рельсу, отмечены белыми прямоугольниками.

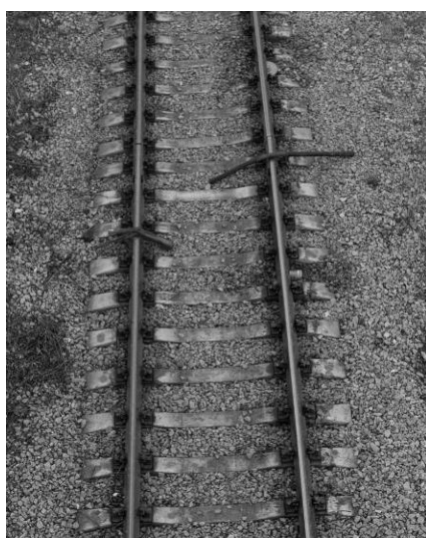


Рис. 6. Исходное изображение

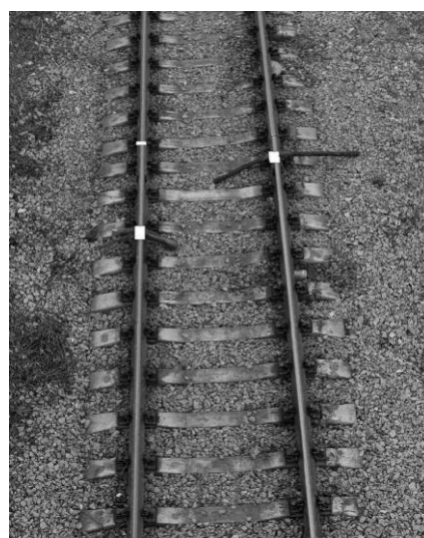


Рис. 7. Обнаруженные на рельсах посторонние объекты

Интересно, что на левом рельсе стык определился как посторонний объект. Но эту проблему нетрудно обойти, анализируя ширину выбросов и сравнивая их с эталонными изображениями для стыков между рельсами, а также привлекая данные о длине самих рельсов.

#### 1.3.2. Поиск посторонних объектов на балластном слое

Для решения этой задачи могут быть использованы два подхода:

1. На участке ж/д пути определенной длины анализируются все фрагменты балластного слоя. Для каждого фрагмента целиком вычисляется некоторая характеристика, например, гистограмма. Вычисляется средняя гистограмма по всем фрагментам на данном участке. Те фрагменты, гистограмма которых значительно отличается от средней, считаются подозрительными и требуют дополнительного анализа оператором.
2. Фрагменты балластного слоя анализируются независимо. По каждому фрагменту в скользящем окне, соответствующим по размеру предполагаемым посторонним объектам, производится вычисление некоторой характеристики, например, гистограммы. Далее вычисляется средняя гистограмма по всем окнам в пределах одного фрагмента, и выделяются те точки, гистограмма в окрестностях которых значительно отличается от средней.



*Рис. 8. Исходное изображение с макетом мины*



*Рис. 9. Результат применения первого подхода*



*Рис. 10. Результат применения второго подхода*

На рис. 8 показано исходное обрабатываемое изображение, на котором представлен фрагмент ж/д пути с заложенным под рельс натурным макетом противотанковой мины. На изображении, приведенном на рис. 9, прямоугольниками отмечены проанализированные с помощью первого подхода фрагменты балластного слоя, фрагмент с миной, характеристики которого заметно отличаются от всех остальных, отмечен белым прямоугольником. С применением второго подхода было проанализировано два фрагмента изображения. В первом фрагменте, содержащем макет мины, алгоритм покрасил черным цветом точки, принадлежащие отличающемуся от остальной поверхности объекту, в другом фрагменте особых точек найдено не было (рис. 10).

В данном разделе были рассмотрены методы обработки изображений для обнаружения взрывоопасных объектов, а также посторонних предметов в полосе движения железнодорожных составов. В дальнейшем предполагается собрать разработанные алгоритмы в единый автоматизированный комплекс обработки изображений, полученных методами аэрофотосъемки, с учетом специфики использования его в интересах ОАО «РЖД».

## **2. Использование эффекта поляризации отраженного света для бесконтактной диагностики железнодорожных рельсов**

Повышение безопасности движения пассажирских поездов и грузовых составов требует постоянного мониторинга железнодорожных путей, который осуществляется путевыми обходчиками как визуально, так и с помощью простейших технических средств, а также путевыми тележками и путеизмерительными вагонами, оснащенными разнообразными датчиками и путеизмерительной техникой.

В литературе описаны различные методы, применяемые для диагностики железнодорожных путей: ультразвуковые [1], механические [9], датчики ускорений [3] и угловых перемещений [14], в последнее время для диагностики балластного слоя стали применяться и подповерхностные радиолокаторы [21]. Однако существующие технические средства не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям по оперативности и достоверности получаемых данных о состоянии железнодорожных путей.

Разработка новых технических средств диагностики железнодорожных путей, в том числе допускающих их установку на летательных аппаратах, является насущной необходимостью при решении задач повышения безопасности движения железнодорожного транспорта. В настоящей работе рассматривается возможность использования поляризационного эффекта, который возникает при отражении электромагнитного излучения видимого диапазона от металлической поверхности головки рельса [12, 2]. При отражении излучения естественного дневного света, которое в силу его природы не является поляризованным, от границы раздела двух сред воздух-металл происходит его частичная поляризация, которая зависит с одной стороны от угла визирования, с другой стороны — от оптических свойств граничащих сред. Изменение поляризационных характеристик отраженного от изучаемой поверхности излучения несет информацию о параметрах поверхности. Отслеживая изменения поляризации отраженного излучения, можно судить о свойствах поверхности. В нашем случае объектом изучения являются головки рельсов, которые для нормальной эксплуатации должны иметь практически идеально ровную верхнюю поверхность. Все дефекты и посторонние объекты, отличные по

поляризационным характеристикам от гладкой поверхности рельсов, будут иметь повышенный контраст на изображениях после обработки описанным далее методом.

Изучение поляризационных характеристик отраженных электромагнитных волн достаточно широко применяется для анализа структуры металлических поверхностей, в том числе и для определения квантовомеханических свойств электронного газа вблизи поверхности металла [12]. Однако для решения задач диагностики железнодорожных рельсов, как показал обзор литературы и патентный поиск, этот метод не нашел пока сколь-нибудь широкого применения.

Учитывая значительные нагрузки, возникающие при прохождении железнодорожных составов, на поверхности головки рельсов возникают различные дефекты, а сам приповерхностный слой из-за ударных нагрузок обода колеса может деформироваться. Вследствие этого лучи, отраженные от элементарных площадок, будут иметь различные поляризационные характеристики [8]. Использование данного метода позволит выявлять на рельсах локальные дефекты (сколы, трещины и пр.), т.к. характеристики их поверхности будут отличны от поверхности рельсов, не содержащих дефектов. Также возможно определение такого дефекта, как волнистость рельса. Это обусловлено тем, что на участках с волнистостью в каждой точке меняется угол падения (и, соответственно, отражения) света, что будет влиять на поляризацию и проявляться на получаемых изображениях.

Для описания поляризованного света воспользуемся вектором Стокса, который является совокупностью четырех величин, называемых стоксовскими параметрами, которые характеризуют интенсивность и поляризацию света [15]. Эти параметры имеют размерность интенсивности; каждый параметр соответствует не мгновенной интенсивности, а интенсивности, усредненной во времени, практически необходимому для измерения. Четыре параметра представляют собой столбец-вектор. Однако часто для экономии места вектор записывается в виде строки; при этом используются фигурные скобки, чтобы напомнить о том, что вектор в действительности является столбцом:  $\{I, Q, U, V\}$ .

Первый параметр,  $I$ , называется интенсивностью. Параметры  $Q$ ,  $U$  и  $V$  называются соответственно: параметром преимущественной горизонтальной поляризации, параметром преимущественной поляризации под углом  $+45^\circ$  и параметром преимущественной правополяризованной поляризации. Когда параметр имеет отрицательное значение, это означает, что преимущественной является ортогональная форма поляризации [15].

Предлагаемый метод заключается в регистрации отраженного от поверхности рельсов света с помощью фотоприемного устройства, снабженного поляризационным фильтром (например, зеркальной фотокамеры). Железнодорожный путь обрабатывается пофрагментно, размер каждого фрагмента определяется размером матрицы регистрирующего устройства, фокусным расстоянием объектива и расстоянием, с которого проводится съемка. В силу этого каждый из параметров Стокса представляет собой прямоугольную матрицу, размер которой соответствует размеру матрицы регистрирующего устройства (в пикселях). Поляризацию светового луча на выходе фильтра будем описывать вектором  $\{I_c(\phi), Q_c(\phi), U_c(\phi), V_c(\phi)\}$ , зависящим от угла  $\phi$  между вертикальной плоскостью, проходящей через ось рельса, и осью пропускания поляризационного фильтра.

Для выявления связи поляризационных характеристик электромагнитной волны до и после фильтра воспользуемся методом Мюллера, который представляет собой матричное описание взаимодействия светового луча и оптического устройства, через которое проходит свет, и позволяет вычислить результат этого взаимодействия. Выражение, описывающее характеристики оптического устройства, называется матрицей Мюллера. Она состоит из четырех строк и четырех столбцов. Вектор Стокса световой волны на выходе оптического устройства вычисляется путем перемножения матрицы Мюллера и вектора Стокса входного луча. Используемый линейный поляризационный фильтр описывается следующей матрицей Мюллера [15]:

$$(1) \mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & C_2 & S_2 & 0 \\ C_2 & C_2^2 & C_2 S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 S_2 & S_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

где  $C_2 = \cos(2\phi)$ ,  $S_2 = \sin(2\phi)$ ,  $\phi$  — угол между вертикальной осью и осью пропускания поляризационного фильтра. Тогда для вектора Стокса световой волны на выходе фильтра справедливо следующее выражение:

$$(2) \begin{bmatrix} I_c(\phi) \\ Q_c(\phi) \\ U_c(\phi) \\ V_c(\phi) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I + QC_2 + US_2 \\ IC_2 + QC_2^2 + UC_2 S_2 \\ IS_2 + QC_2 S_2 + US_2^2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица фотокамеры нечувствительна к поляризации света и реагирует только на его интенсивность, соответственно, из полученного вектора Стокса выбираем первый параметр и получаем выражение для модели регистрируемого сигнала:

$$(3) I_c(\phi) = \frac{1}{2}[I + Q \cos(2\phi) + U \sin(2\phi)].$$

Для реализации предлагаемого метода необходимо вычислить параметры Стокса света, отраженного от поверхности рельса. В литературе [15] для этого предлагается поместить на пути луча детектор, и, используя линейный поляризационный фильтр, провести три измерения:  $I_1$  — без фильтра,  $I_2$  — с горизонтальным расположением оси пропускания фильтра,  $I_3$  — с расположением оси фильтра под углом  $45^\circ$ . После этого оценки параметров поляризации вычисляются следующим образом:

$$(4) \tilde{I} = I_1, \tilde{Q} = I_2 - I_1, \tilde{U} = I_3 - I_1.$$

Четвертый параметр  $V$ , определяющий циркулярную поляризацию, не может быть измерен с использованием только линейного поляризационного фильтра, поэтому в предлагаемом методе не используется.

В связи с тем, что снятие/установка фильтра вызывала бы перемещение фотокамеры и нарушала кадрирование, а также для повышения точности измерений, использовалась усовершенствованная методика, предложенная в [16], согласно которой для каждого фрагмента пути делалась серия кадров с разной ориентацией фильтра. По полученной серии кадров, используя модель (3), оценки трех параметров Стокса  $\tilde{I}$ ,  $\tilde{Q}$ ,  $\tilde{U}$  и ошибку модели  $err^2$  можно вычислить по следующим формулам:

$$(5) \tilde{I} = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N I_c(\phi_j),$$

$$(6) \tilde{Q} = \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N I_c(\phi_j) \cos(2\phi_j),$$

$$(7) \tilde{U} = \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N I_c(\phi_j) \sin(2\phi_j),$$

$$(8) err^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\tilde{I} + \tilde{Q} \cos(2\phi_j) + \tilde{U} \sin(2\phi_j) - I_c(\phi_j))^2,$$

где  $N$  — количество кадров;  $\phi_j = 2\pi j / N$  — угол поворота поляризационного фильтра для  $j$ -го кадра.

Всякие пространственные вариации значений любого из параметров в (5)–(8) свидетельствуют о том, что в данном месте присутствуют некоторая особенность поверхности, которая потенциально может быть дефектом рельса.

Для проверки возможности визуализации дефектов был проведен ряд экспериментов непосредственно на железнодорожных путях. Для этого был выбран участок пути на Октябрьской железной дороге в районе Крестовского моста, г. Москва (рис. 11). Для съемки использовалась профессиональная зеркальная камера Canon 40D с установленным объективом Canon EF-S 17-55 f/2.8 IS USM. Съемка проводилась через поляризационный фильтр Marumi DHG LENS CIRCULAR P.L.D. Использовалось фокусное расстояние 55 мм. Один из рабочих моментов съемки приведен на рис. 12, на заднем плане которого виден Крестовский мост.



*Рис. 11. Рельс в месте дефекта (указан стрелкой)*

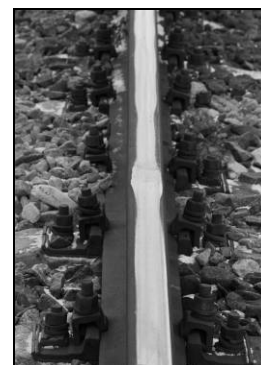


*Рис. 12. Рабочий момент фотосъемки*

На одном из рельсов была обнаружено смятие головки рельса длиной около 30 см и глубиной около 3 мм, рис. 13 и 14. Поверхность вмятины была гладкой, практически полированной, и не отличалась на глаз от других участков рельса.



*Рис. 13. Измерение параметров смятия головки рельса (длина — 30 см, глубина — около 3 мм)*

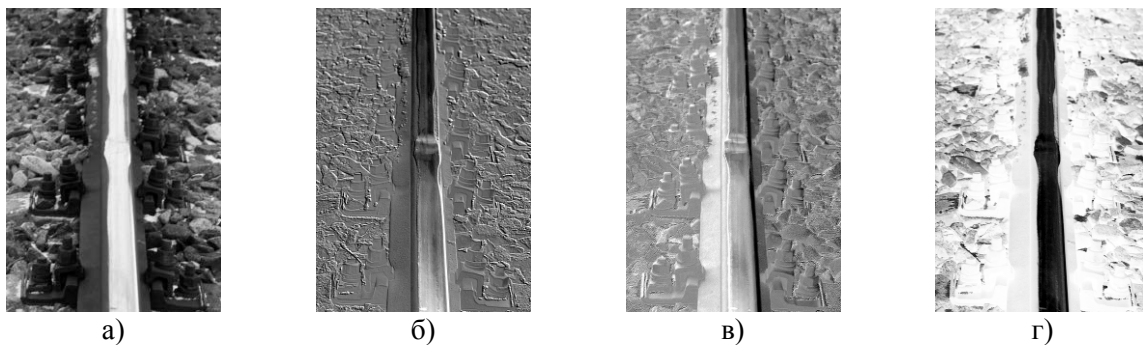


*Рис. 14. Смятие головки рельса крупным планом*

Производилась съемка поверхности дефекта, при которой поляризационный фильтр поворачивался с шагом 6 или 12 градусов до полного поворота на  $360^\circ$ , т.е. в каждом случае получалась серия снимков из 60 или 30 кадров соответственно. Параметры Стокса и ошибка модели, вычисленные по формулам (5)–(8), приведены на рис. 15. Видно, что вмятина головки рельса сильнее всего проявилась на рис. 15б. Визуально она предстает в виде некоторой выпуклости, что является результатом поляризационной обработки сигнала. Такое изображение пригодно для несложной автоматической обработки по выявлению дефектов.

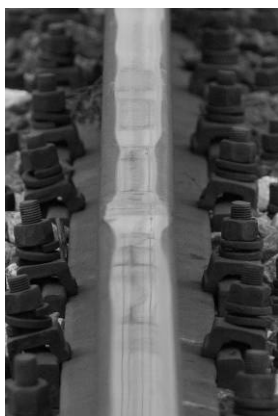
При увеличении угла визирования до  $82^\circ$  в месте вмятины головки проявились дефекты, которые не совпадают с ее рельефом (рис. 16). Изменения поляризационных характеристик в этом случае, по-видимому, связаны с деформацией кристаллической решетки поверхности рельса в результате ударных нагрузок, возникающих при движении колеса по неровной поверхности. Дальнейшее развитие деформаций может привести к появлению трещин и даже излому самого рельса. В этом случае желательным является использование ультразвуковой

дефектоскопии совместно с поляризационными измерениями для отслеживания динамики развития дефекта.



а) б) в) г)  
*Рис. 15. Оценки параметров Стокса для рельса с вмятиной головки рельса:  
 $\tilde{I}$  (а),  $\tilde{Q}$  (б),  $\tilde{U}$  (в) и ошибка модели (г)*

Вторым тестовым объектом был выбран рельс с локальными поверхностными дефектами, которые представляли собой выщербины на поверхности его головки (рис. 17). Хотя они легко обнаруживались визуально, рассматривалась задача повышения их контраста для последующей автоматизированной обработки с использованием алгоритмов распознавания образов. Результаты вычисления параметров Стокса показали, что дефекты такого рода лучше всего проявляются на изображении, отражающем ошибку модели поляризованного сигнала (рис. 18).



*Рис. 16. Изображение вмятины головки рельса при больших углах визирования*



*Рис. 17. Рельс с поверхностными дефектами*



*Рис. 18. Параметр «ошибка модели» для рельса на рис. 17*

В этом разделе рассматривался бесконтактный метод диагностики железнодорожных рельсов с использованием поляризационных характеристик отраженного естественного света. Показано, что в результате частичной поляризации света, возникающей при его отражении от поверхности головки рельсов и последующей алгоритмической обработки полученных изображений, возможно повышение контраста дефектов по сравнению с обычной видеосъемкой. Учитывая, что данный метод является сравнительно новым, необходимо проведение дополнительных исследований по определению оптимальных характеристик параметров поляризационной съемки с учетом разнообразия встречающихся дефектов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и ОАО «РЖД» (грант № 11-07-13112-офи-м-2011-РЖД).

## Литература

1. *Базулин Е.Г.* Получение изображений дефектов в перьях подошвы рельсов методом SAFT с учетом многократного отражения ультразвукового импульса от границ объекта контроля. — Дефектоскопия, 2010, №2, с. 63-77.
2. *Борн М., Вольф Э.*, Основы оптики, пер. с англ. 2 изд., М., 1973. — 716 с.
3. *Боронахин А.М., Гупалов В.И., Мочалов А.В.*, Способ инерциальных измерений неровностей рельсового пути, Патент №2242391 от 30.12.2002.
4. *М.А. Верховец, В.А. Лавров*, Сборник норм содержания железнодорожных путей, ЗАО «Уральский транспортный центр», 2005, 84 с.
5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
6. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976.
7. *Ивашов С.И., Разевиг В.В., Илющенко Р.Р., Харченко И.А., Цветков Д.В.*, Использование методов дистанционного зондирования в операциях по гуманитарному разминированию, Научно-технические технологии, т. 3, № 6, 2002, с. 27-37.
8. *Ивашов С.И., Разевиг В.В., Лёвин Б.А., Бугаев А.С., Воробьев В.Б., Недорчук Б.Л.*, Способ оптического определения неровностей и дефектов рельсового пути, Заявка на патент РФ, рег. № 2012103268 от 01.02.2012.
9. *Л.Н. Подгорная*, Разработка и исследование системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах, Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург, 2010.
10. *Прэнтл У.* Цифровая обработка изображений. т. 1 и 2. М.: Мир, 1982.
11. *Робертс Л.* Автоматическое восприятие трехмерных объектов. В кн.: Интегральные роботы. т. 1. М.: Мир, 1973, с. 162-208.
12. *Соколов А.В.*, Оптические свойства металлов М., 1961. — 464 с.
13. Техническая эксплуатация железных дорог и безопасность движения. Под редакцией Э.В. Воробьева, А.М. Никонова, Москва, 2005, 531 с.
14. *Ходорковский Я.И., Анучин О.Н., Гусинский В.З., Емельянец Г.И.*, Способ и устройство контроля состояния рельсовой колеи, Патент №2123445 от 20.12.1998.
15. *Шерклифф У.* Поляризованный свет. М.: Мир, 1965. — 264 с.
16. *Frank Cremer, Wim de Jong and Klamer Schutte*, "Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines", Opt. Eng. 41, 1021 (2002); doi:10.1117/1.1467362.
17. *Richard O. Duda, Peter E. Hart*. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, Published in the Comm. ACM, Vol 15, No. pp. 11-15 (January 1972).
18. *R. E. A. Eyre-Walker, G. K. Earp*, Application of Aerial Photography to Obtain Ideal Data for Condition Based Risk Management of Rail Networks, The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring 18 - 20 June 2008, Conference Centre, Derby, UK.
19. *S.I. Ivashov, V.V. Razevig, A.P. Sheyko, I.A. Vasilyev*, A Review of the Remote Sensing Laboratory's Techniques for Humanitarian Demining, Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15-18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 2003, Vol. 1, pp. 3-8.
20. *MacQueen J.* (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proc. 5th Berkeley Symp. on Math. Statistics and Probability, pp. 281-297.
21. *Gray R. Olhoeft, Ernest T. Selig*, "Ground Penetrating Radar Evaluation of Railway Track Substructure Conditions", Proceedings of SPIE, Vol. 4758, p. 48, 2002.
22. *Prewitt J. M. S.* Object Enhancement and Extraction. Picture Processing and Psychopictorics. New York: Academic Press, 1970, pp. 75-150.
23. *Rosenfeld A., Kak A. C.* Digital Picture Processing. vol. 1 and 2. New York: Academic Press, 1982.
24. *Sobel I. E.* Camera Models and Machine Perception. Ph.D. thesis. Palo Alto, Calif.: Stanford University, 1970.
25. <http://www.arms-expo.ru/049051124050051057057054.html>.
26. [http://ru.wikipedia.org/wiki/MQ-1\\_Predator](http://ru.wikipedia.org/wiki/MQ-1_Predator).
27. <http://www.miass-online.ru/novosti/2009/12/03/rzhd-potratit-tri-milliarda-rublei-na-okhranu-puti-moskva-peterburg.html>.
28. [http://www.missiles.ru/UAV\\_class.htm](http://www.missiles.ru/UAV_class.htm).
29. <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%BE%D1%80-600>.
30. [http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%83%D1%82%D1%8C).