

Robotic Railway Multi-Sensing and Profiling Unit Based on Artificial Intelligence and Data Fusion

Marius Minea ,Cătălin Marian Dumitrescu and Mihai Dima

Sensors 2021, 21(20), 6876; https://doi.org/10.3390/s21206876

https://www.mdpi.com/1424-8220/21/20/6876/htm

(Эта статья относится к специальному выпуску «Современные датчики в Румынии, 2021 г.»)

Сигнальный перевод 2022 г. Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital

Абстракт

В этой статье представлены исследования и результаты полевых испытаний и моделирования роботизированного железнодорожного автономного транспортного средства, предназначенного для сбора различной информации о безопасности и функциональных параметрах наземной железной дороги и / или участка метро на основе слияния данных и машинного обучения. Обслуживание сложных железных дорог или сетей метро с длительным сроком эксплуатации - сложный процесс и требует значительных ресурсов. Предлагаемое решение избавляет операторов от трудоемкой задачи по проверке и измерениям железных дорог за счет интеграции нескольких датчиков и сбора наиболее актуальной информации о железной дороге, соответствующем оборудовании автоматизации и инфраструктуре на единой интеллектуальной платформе. Роботизированная тележка объединяет автономность, дистанционное зондирование, искусственный интеллект и способность обнаруживать даже инфраструктурные аномалии. Более того, с помощью будущего процесса комплексной статистической фильтрации данных предполагается, что решение может быть настроено так, чтобы предлагать информацию второго порядка об изменениях инфраструктуры, таких как оползень, затопление или аналогичные модификации. Результаты моделирования и полевых испытаний показывают способность платформы интегрировать несколько операций по устранению неисправностей в один процесс, что полезно для увеличения пропускной способности и устойчивости железных дорог.

Ключевые слова: железнодорожная автоматизация; мультисенсорная платформа; обнаружение сбоев инфраструктуры; слияние данных; машинное обучение; статистическая фильтрация данных

1. Введение

Современная эволюция интеллектуальных транспортных систем и политики в этой области указывает на сокращение выбросов в окружающую среду, использование зеленой и / или возобновляемой энергии и повышение эффективности процессов. В последние годы железнодорожному транспорту придавалось меньшее значение из-за быстрого роста

автомобильного транспорта, его гибкости в достижении различных пунктов назначения и мобильности. Однако для больших объемов грузов или большого количества пассажиров железная дорога остается одним из наиболее эффективных и быстрых способов передвижения наземного транспорта. Таким образом, политика ЕС в области железнодорожного транспорта предлагает единое европейское железнодорожное пространство [1]. В документе рекомендуются несколько направлений, в которых должна развиваться железнодорожная транспортная система: (i) функциональная совместимость - это означает, что все системы автоматизации и инфраструктуры высокоскоростных железных дорог должны быть совместимы; (ii) социальная гармонизация - гармонизация минимальных квалификационных требований для рабочих, занятых в функциональной совместимости. (ііі) снижение выбросов в окружающую среду, особенно шума в данном случае. В этом контексте можно заметить, что нагрузка на совместимых сотрудников будет выше, и соответствующие необходимые знания об оборудовании, инфраструктуре и операциях должны быть на более высоком уровне. Таким образом, мы считаем, что настоящее решение автоматизированного профилактического обслуживания, обеспечиваемое использованием автономной платформы, способной собирать, обрабатывать, хранить и удаленно представлять интегрированные данные и предупреждать о потенциально опасных модификациях железнодорожной инфраструктуры, могло бы стать реальной помощью в профилактические работы.

Целью данного исследования является решение проблемы обнаружения механических дефектов в рельсах метрополитена и колесах поездов метрополитена.

Масштабное развитие городских метрополитенов ставит большую проблему, а именно обнаружение дефектов тоннелей и ходовых путей, которые приобретают особую актуальность. Из-за сложности туннельной среды традиционным алгоритмам обнаружения неисправностей в туннелях сложно быстро и точно обнаруживать такие неисправности. В этой статье представлена интегрированная модель для одновременного обнаружения дефектов, которые могут возникнуть в туннеле, а также в рельсах метро, с использованием сложной батареи датчиков LIDAR, ультразвука, видеокамер, а также высокопроизводительного алгоритма обучения PCA T2Q для машинного обучения. модуль, который может быстро и точно обнаруживать больше туннельных дефектов и дефектов протектора

Новизна работы заключается в разработке автономной железнодорожной тележки, оснащенной несколькими типами датчиков, способных перемещаться по железной дороге, обнаруживать дефекты путем непрерывных измерений и интегрировать данные посредством процесса объединения данных. Та же платформа может быть использована с небольшими модификациями для работ по техническому обслуживанию наземных железных дорог. Предлагается конкретный метод обнаружения дефектов на железной дороге, основанный на ультразвуковой системе, анализирующей внутреннюю структуру линии метрополитена. Анализ собранных данных основан на оценке распространения сигнала и ультразвуковой визуализации с использованием декомпозиций, основанных на алгоритме анализа главных компонент (РСА) в классической версии. Кроме того, анализ также основан на РСА ядра (КРСА). На первом этапе дефекты обнаруживаются, классифицируются и подсчитываются путем анализа расположения и геометрических особенностей. Затем, в зависимости от максимальной разницы между различными типами дефектов и максимального допуска однотипных дефектов, извлекаются обобщенные характеристики дефектов. Наконец, создаются функции обобщения и обучающие шаблоны для использования архитектуры машинного обучения, использующей РСА. Цель - классифицировать внутренние дефекты железной дороги метрополитена. На этом базовом сильном и обобщенном признаке после уменьшения размера формулируются ограничения, а алгоритм группировки КРСА разрабатывается для выполнения слияния данных для обнаружения дефектов. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод может быть использован для обнаружения внутренних дефектов с приемлемым уровнем точности и скорости обнаружения.

Остальная часть статьи организована следующим образом: в разделе 2 представлена соответствующая работа в этой области, основанная на изучении литературы, раздел 3 посвящен разработке предлагаемого решения для мобильного автономного сбора данных, раздел 4 предназначен для представления теста. установка кровати и результаты экспериментов, Раздел 5 Обсуждение и, наконец, выводы.

2. Сопутствующая работа

2.1. Контекст

Благодаря высокой степени безопасности железная дорога является эффективным видом транспорта как для пассажиров, так и для грузов. С появлением высокоскоростных поездов со специальной контролируемой инфраструктурой наземный транспорт конкурентоспособным по сравнению с воздушным транспортом, в основном на средние расстояния. В Европе Германия начала использовать концепцию высокоскоростного железнодорожного транспорта с поездами ІСЕ в 1991 году, а в 1994 году Великобритания была связана с европейским континентом через услугу Eurostar, соединяющую Париж и Лондон через туннель под Ла-Маншем. В документе [2] говорится, что «из-за раннего принятия Францией высокоскоростных железных дорог и ее центрального положения между Пиренейским полуостровом, Британскими островами и Центральной Европой, большинство других высокоскоростных железнодорожных линий в Европе были построены по французским стандартам. для скоростей, напряжения и сигнализации, за исключением Германии, которая построена в соответствии с существующими немецкими железнодорожными стандартами». В настоящее время продолжается тенденция к увеличению эксплуатационной скорости поездов, независимо от того, идет ли речь о наземной или подземной железной дороге, поэтому возникает большее давление на качество инфраструктуры, технического обслуживания и эксплуатации. Поэтому мы считаем, что автоматизация процесса планово-предупредительного ремонта становится необходимостью для железнодорожной отрасли.

Метро — еще один вид железнодорожного транспорта, предназначенный в основном для городских районов. Он также представляет собой лучшую альтернативу автомобильному индивидуальному транспорту в крупных городских условиях. Однако во многих случаях сети железных дорог или метро подвержены сильному износу и требуют больших капитальных затрат для поддержания достаточного уровня производительности. Кроме того, исходя из этих аспектов, было сочтено, что необходима разработка интегрированного решения, позволяющего сделать операции по устранению неисправностей максимально эффективными. В этих условиях цель настоящего исследования, представленного в этой статье, заключалась в разработке автономной интеллектуальной платформы для измерения профилирования железнодорожных станций и/или станций метро и туннелей с учетом инфраструктурных, электрических и механических компонентов.

2.2. Литературное исследование

Научный литрПрирода относительно богата областью автоматизированных измерений и нетрадиционных решений для быстрой оценки состояния различных функциональных компонентов железнодорожной или подземной сети. Современные системы сигнализации, блокировки и централизованного диспетчерского управления в настоящее время используют широко стандартизированные решения, использующие принципы отказоустойчивости и мажоритарного (тройного) резервирования в железнодорожной автоматике. К ним относятся многочисленные элементы с высокой функциональной ответственностью, нетерпимостью к

критическим неисправностям, приводящим к катастрофическим событиям на железной дороге. Следовательно, ответственность в системах технического обслуживания при неисправностях очень высока, поэтому интенсивные исследования в этом направлении направлены на получение новых решений и процедур для быстрых и эффективных измерений правильного состояния работы. Кроме того, сама железнодорожная механическая инфраструктура представляет собой совокупность конструкций, механических элементов, вспомогательного оборудования, постоянно подвергающихся интенсивному износу и нагрузкам, которые нуждаются в постоянном контроле для раннего выявления неисправных элементов. До настоящего времени мало разработок в области автономных железнодорожных транспортных средств, предназначенных для обнаружения и маркировки дефектов, и линии метрополитена не составляют исключения. Анализ применимости путевой створки и других методов геометрических измерений проанализирован в [3], где авторы приходят к выводу, что «Выбор оптимального метода измерения геометрии путевой системы зависит от технико-экономических условий подрядчика и условий, сложившихся в поле." Они также говорят, что «...автоматические системы, такие как измерительные системы с использованием измерительных автомобилей, будут оптимальным выбором». Пэнью Пан и др. В [4] представлено решение для измерения импеданса тяговой сети скоростных поездов. Они предлагают метод определения эквивалентных импедансов тяговой сети и 4QC электропоезда в стационарной раме для анализа устойчивости, а также определения проблем устойчивости и механических колебаний, характерных для высоких скоростей. Комплексные измерения магнитной проницаемости используются для расчета внутреннего сопротивления рельса с помощью метода конечных элементов, представленного в [5] Альберто Долара и Соня Лева. Они рассмотрели нормальную кривую намагничивания и комплексную магнитную проницаемость и включили эти данные в предложенные модели метода конечных элементов. Авторы также представляют электрическую модель динамического поведения суперконденсаторов для этой методологии измерения. Переходя к контактному анализу качения для железнодорожных систем, в [6] автор исследует дефекты (трещины) с помощью роботизированной системы контроля. Даниэль Ламас и др. представили новую технологию, включающую мобильные картографические системы, которая применяется на участке железной дороги протяженностью 90 км для сбора данных, касающихся классификации рельсов, мачт, проводки, капельниц, светофоров и сигналов. Методология состоит из этапа предварительной обработки, на котором каждое облако точек разделяется на части и вокселизируется (процесс, в котором создается любой из дискретных элементов, составляющих трехмерный объект); затем выполняется процесс сегментации, за которым следует процесс слияния. Представленная методология автоматически извлекает соответствующие активы железнодорожной инфраструктуры, такие как рельсы, проводка и знаки, светофоры и знаки, из трехмерных данных облака точек [7]. Чжан И и др. представили в своей статье [8] адаптированный метод измерения сопротивления заземления интегрированной системы заземления высокоскоростных поездов с измерителем сопротивления четырех клемм заземления с методологией компенсации для получения более точных результатов. Здесь представлено решение для осмотра внешней железнодорожной инфраструктуры, где авторы используют комбинацию инерциальной системы с приемником GNSS для осмотра высокоскоростных железнодорожных путей. По мнению авторов и их экспериментов, представленная методика и приборы позволяют производить измерение параметров трека с точностью лучше 0,2 мм при скорости обнаружения около 3 км/ч. Авторы констатируют, что «по сравнению с традиционным методом фильтра Калмана предложенная конструкция повысила точность измерения и удовлетворила требованиям, предъявляемым к определению геометрических параметров высокоскоростных железнодорожных путей».

Система визуальных измерений для оценки ширины колеи была разработана, опробована и представлена в [9], включающая установку некоторых точек измерения, обнаружение этих точек

и измерение расстояния между ними. Эксперименты проводились в депо Вильнюсского железнодорожного вокзала. Авторы пишут, что преимуществами предлагаемого метода являются простота интеграции, низкая стоимость и энергоэффективность. Кроме того, в этой области измерительной деятельности Chen, et al. [10] описывают свою работу, используя интеграцию инерциальной навигационной системы с геодезическим прибором для создания модульной системы тележек для измерения ширины колеи. Кампчик [11] представляет анализ и оценку условий геометрии стрелочного перевода, а также описываетб) причинами деформаций стрелочных переводов. Такие исследователи, как Wootae Jeong и Dahae Jeong [12], представили метод точного измерения шероховатости колес и рельсов, которая считается основной причиной возникновения шума во время движения поездов. Они предлагают улучшить алгоритм синхронизации смещения хорды, применяемый к существующему ARCer, для обеспечения высокой точности измерений всего с двумя датчиками смещения. Были также предложены альтернативные решения, такие как синхронизация смещения хорды, которая предполагает, что поверхность рельса представляет собой синусоидальную волну, состоящую из различных длин волн, и использует несколько датчиков, так что каждый из них компенсирует измеренные значения других. Эта процедура использовалась для подготовки к конструктивным недостаткам мобильных измерительных систем, оснащенных датчиками перемещения [13,14]. Визуальное обнаружение, такое как распознавание двумерного изображения, также используется для измерения и/или обнаружения аномального крепежа в системе контроля рельсового пути. Авторы [15] предлагают метод обнаружения визуальных данных из нескольких источников, а также точное и надежное определение местоположения крепежа и алгоритм сегментации гаек или болтов. Они пишут, что «Комбинируя двухмерную информацию об интенсивности и трехмерную информацию о глубине, генерируемую проекцией линейного структурного света, можно реализовать определение положения гайки или болта и точное восприятие информации о высоте в динамической среде движения железной дороги. " Кроме того, в аналогичной работе Лю [16] описывает метод обнаружения посторонних объектов, основанный на сети глубокого доверия для защиты окружающей среды и безопасности поездов. Автор [17] использует визуальную методологию определения состояния крепежа, основанную на модели глубокой сети Siamese, где на вход подается пара изображений. Признаки застежки извлекаются путем определения сходства пары изображений. В [18] описан способ выравнивания и центровки железнодорожного пути, где для повышения точности до приемлемого уровня используется комбинация глобальной навигационной спутниковой системы, инерциального измерительного блока и лазерного сканера. Комбинация вышеописанных методов дала наилучший результат для пути, по которому двигалась машина-измеритель в практических экспериментах, картографируя почти 100% пути. Точно так же Эльберинк и Хошелхэм [19] опубликовали результаты своих исследований по автоматическому извлечению центральной линии железнодорожных путей из данных лазерного сканирования с использованием подходов, управляемых данными и моделями. Воздушное наблюдение для обнаружения интрузивных объектов в пространстве движения железнодорожного транспорта представлено в [20] Нойбертом М. и другими, такими как Жу Л. [21], который предлагает использовать бортовой лазер и мобильное лазерное сканирование для моделирования железнодорожная среда. Обычно путем слияния данных визуального и лазерного изображений можно агрегировать всю железнодорожную среду и проводить ее дальнейший анализ с использованием различных методов, обнаруживать посторонние предметы на железнодорожном пространстве, оценивать состояние различных элементов инфраструктуры и т. д. Корректировки, в этом случае может оказаться необходимым использовать, например, описанные в различных других работах [22,23,24].

Технологии GNSS хороши для использования в экспериментах, измерениях и записи на открытом воздухе. Однако, как было показано ранее, такие технологии нельзя использовать для железных

дорог в туннелях или для линий метрополитена, где наличие глубоких бетонных стен препятствует приему маломощных сигналов ГНСС. Вот новинка предлагаемого нами решения, в котором роботизированная тележка определяет свое положение с помощью одометров и имеет возможность интегрировать измеренные данные с положением. Для внутренней среды должны быть приняты различные технологии для позиционирования, измерения датчиков и геолокации. Одним из таких является, конечно же, лазерное сканирование. Как представлено в [25] Qian Wang, et al., мобильная система лазерного сканирования (MLSS) использовалась для осмотра туннелей метро, и была исследована ключевая технология системы позиционирования и ориентации (POS). Авторы получили «точность 3D-координат облаков точек 8 мм, а также эксперимент показал, что на выполнение всех работ по обследованию тоннеля протяженностью 5-6 км требуется менее 4 часов». Отсутствие очень практичной технологии GNSS для точного позиционирования в туннелях или радиозатененных местах должно быть заменено лазерным сканированием, ультразвуковым сканированием, методами, которые также должны быть дополнены сопоставлением карт (ММ), прерывистыми ответчиками, координатами контрольных точек и так далее [26].

Все становится еще сложнее, когда необходимо выполнить специальные измерения для определения кривизны или элементов, расположенных на криволинейном участке железной дороги или в тоннеле. Аркадиуш Кампчик [27] предлагает инновационное измерительное устройство, называемое магнитным измерительным угольником (MMS).

Исследователь описывает метод шнуровки/струнной подкладки и измерения перпендикулярности стыков рельсов. Он также использует устройство MMS для измерения версинов и различий в длине рельсов, особенно на кривых. Для этого используется лазерный луч с визирной крестовиной, камерой и обзорным диском для измерения.

В целях профилактического обслуживания Pacifique Turabimana и Celestin Nkundineza предлагают в своей статье [28] тестирование нового измерительного инструмента, в котором используется индуктивный датчик перемещения. Утверждается, что предлагаемая система работает как в статическом, так и в динамическом состоянии железнодорожного транспортного средства и способна сохранять исторические записи толщины гребня колеса для дальнейшего анализа. В родственных работах с использованием различных измерительных технологий и платформ, таких как камеры, лазеры, ультразвуковые преобразователи, представлено в [29] и [30]. В аналогичной работе использование лидара для трехмерного моделирования железнодорожных рельсов описано в [31]. В своем исследовании [32] Li Q. и соавт. проанализировать возможности точного измерения геометрии железнодорожного пути и показать решение, основанное на интеграции инерциальной навигационной системы (ИНС) с геодезическим маркшейдерским оборудованием. Они также разработали модульную систему TGMT (TGMT — общественный транспорт с защитой поездов — позволяет сократить расстояние между поездами и позволяет использовать поезда без машинистов) на основе вспомогательной INS, с возможностью настройки в соответствии с различными геодезическими задачами, включая точную настройку бездорожье, обеспечивающее измерение трамбовки, измерение деформации и неровностей пути, а также определение оси пути. Авторы также заявляют, что предложенный ими метод позволяет повысить производительность и эффективность съемки не менее чем в 20 раз по сравнению с традиционными методами. Снаружи неровности путей можно измерять с помощью GPS-приемников для позиционирования и выравнивания, но в тоннелях метро эта процедура недоступна. В. Чен и другие используют интегрированную систему ИНС / одометра с лазерной поддержкой для определения неровностей пути метро, а абсолютное положение географической привязки относительно геодезической контрольной сети определяется лазерным сканером для оценки дрейфа ИНС. В аналогичной работе Jiang Q. et al. представляют новый алгоритм фильтрации для съемки железнодорожных путей с использованием также ориентиров и инерциальных единиц измерения, дополненных одометрами [33], а приложения, использующие инерциальные датчики и одометры, проанализированы в [34].

Что касается электрифицированной линии и связанного с ней оборудования для силовой тяги, Моррис Дж. и др. В работе [35] представлено исследование по моделированию участка короткой нейтрали для электрификации линий переменного тока — источника частых неисправностей сети электроснабжения. Кроме того, принимая во внимание автоматизированные методы измерения, Чен Л. и его коллеги используют методологию для сбора информации о компоненте контактной системы над головой, используя анализ данных по облакам точек, импортированным с мобильного 2D-лидара. Они также разработали алгоритм итеративного разделения точек и модуль, названный сетью пространственного слияния [36].

Возвращаясь к мобильным решениям для дистанционного измерения параметров железнодорожной техники, чаще всего используются специальные вагоны, оснащенные разнообразными измерительными приборами, как, например, в [37,38,39,40,41,42,43,44]. В то время как специализированный вагон может вместить большее количество оборудования и датчиков, его доступность, мобильность и гибкость маневрирования менее адекватны, чем у небольших, полностью автономных устройств, таких как железнодорожные тележки. Особенно для метро, где площадь и ширина колеи в целом меньше, чем в железнодорожных системах открытого пространства, полезность тележки намного выше. Таким образом, одним из аспектов этой статьи является то, что она фокусируется на относительно новом процессе использования интегрированного подхода для решения максимально автоматизированных измерений с помощью одной компактной автономной тележки. Использование специального решения с несколькими датчиками, объединение данных и анализ записанных данных на основе методов машинного обучения может облегчить работу операторов и автоматически собирать соответствующую информацию об устранении неисправностей в нерабочее время в метрополитене. Нижеследующее представляет аспекты новизны в настоящем исследовании:

- -Автономность метода: роботизированная тележка может перемещаться в одиночку, собирать информацию о местоположении относительно ширины колеи, отклонений от стандартов, наличия посторонних предметов на рельсах, визуализации и профилирования внешней ширины колеи;
- -Собранные данные могут быть либо переданы по Wi-Fi на выделенные точки доступа, либо локально сохранены для автономного анализа;
- -Интегрирует различные методы машинного обучения для слияния данных;
- -Имеет возможность тонкой настройки большого количества параметров измерений и приращений скорости;
- -Разработан специально для линий метро без сигналов позиционирования GPS, но может быть адаптирован для работы во внешних условиях, используя дополнительную информацию GPS для определения местоположения;
- -Снижает нагрузку на обслуживающий персонал, выполняя некоторые задачи при выполнении обычных работ по техническому обслуживанию во время отключения метро. -сроки службы;
- -Ниже приведены сравнения с другими ранее опубликованными работами, связанными с подходами к железнодорожной инспекции:
- -Rowshandel, Н. [6] в своей докторской диссертации предлагает роботизированную систему контроля для обнаружения усталостных трещин в системе качения наземной железной дороги. В системе используется датчик измерения поля переменного тока (АСFM) в сочетании с

экспертной системой на основе правил. Решение предназначено для сбора одного типа данных, например, только для обнаружения трещин, а не для проверки ширины колеи;

- -Только 3% операций по техническому обслуживанию в железнодорожных тоннелях (включая метрополитен) в последнее время подлежат роботизированной деятельности [45] следовательно, преимущества такого решения;
- -Роботизированные автономные системы использовались в основном для целей очистки [46], замены жидкости подвижного состава [47];
- -Киллиан К. [48] предлагает систему технического зрения, основанную на придорожных датчиках, для проверки целостности колес и рельсов поезда (здесь для автоматической измерительной системы не используется мобильность);
- -Предлагается автоматическая инспекция контактной сети и ЛЭП с помощью системы с лазерными лучами и образным анализом одновременно для четырех проводов [49] решение предназначено для установки на двигатель поезда и работоспособно на скоростях до 90 км/ч. . Измерение других параметров не предусмотрено;
- -Железнодорожная роботизированная инспекция при техническом обслуживании путей: алгоритмы машинного зрения и классификации используются для обнаружения и / или локализации трещин на поверхности качения путей. Используется лазерный сканер, установленный на автомобиле, который использует алгоритм обучения случайной классификации леса [50] и для геометрии гусениц [51]. Измерение других параметров не предусмотрено;
- -Георадар также используется для некоторых роботизированных проверок в туннелях [52].

Обычно эти системы для автоматического измерения и сбора данных предназначены для меньшего количества специализированных операций и/или конкретных действий. Предлагаемое нами решение может использовать различные датчики для определения параметров колеи, обнаружения посторонних предметов на путях, дыма и газа, а в будущем тележка будет оснащена системой измерения полного сопротивления пути (для настройки рельсовых цепей).

Еще одна новинка, которую приносит наше решение, — это интеграция датчиков в сложную систему, а для прогнозирования мы используем алгоритм машинного обучения на основе PCA T2Q.

3. Дизайн предлагаемого решения для мобильного автономного сбора данных

3.1. Дефекты рельсов

В зависимости от правил каждой конкретной железнодорожной администрации существует несколько типов сбоев инфраструктуры (железной дороги) или дефектов, которые вызывают серьезные проблемы с безопасностью. Соблюдение требований безопасности становится еще более строгим при увеличении максимально допустимой скорости поезда; поэтому высокоскоростные линии имеют четкий коридор, точки для этих линий имеют более длинную касательную и двойное механическое запирание, а также предъявляются особые требования к контактной сети и вибрациям. С этой точки зрения высокоскоростные линии нуждаются в интенсивном процессе обслуживания, начиная с визуального осмотра и заканчивая специальными измерениями на предмет механической целостности, блокировки точек и деформаций. Важно даже обнаружение посторонних предметов, которые могут упасть между линиями или между рычагами стрелочных переводов. С другой стороны, для линий метрополитена применяются те же ограничения, но с оговоркой, что раннее визуальное

обнаружение постороннего предмета на рельсах может быть задержано из-за низкой интенсивности света в туннелях. Кроме того, на линиях метрополитена в основном используется третий рельс для электроснабжения, который также нуждается в постоянном контроле для выявления дефектов.

К обычным дефектам инфраструктуры, которые могут возникнуть при нормальной эксплуатации железных дорог (как наземных, так и подземных), относятся:

- -Трещина рельса (может быть обнаружена на ранней стадии с помощью ультразвуковых и/или видеорешений). В случае полного разрушения рельсовые цепи также могут обнаруживать этот тип дефекта с помощью электрического управления и блокировать вход поезда на определенный участок с помощью сигнала покрытия;
- -Интенсивное засверливание изоляционных стыков соседних купонов рельсов может вызвать короткое замыкание между соседними рельсовыми цепями, что приведет к задержке движения поездов;
- -Механические деформации колеи (между параллельными рельсами, либо между элементами стрелочного перевода, переезда) могут быть вызваны превышением допустимой нагрузки на ось, грязью под рельсами и другими явлениями. Это также может быть вызвано падением на соответствующие части тяжелых предметов, особенно с грузовых поездов. В интенсивное и продолжительное теплое лето температура на уровне рельсов может превышать 50 °C, вызывая механические деформации из-за расширения. Это очень опасный дефект, который необходимо вовремя обнаружить. Поэтому в очень жаркое лето администрация железных дорог вводит ограничения по скорости и весу;
- -Интенсивная эрозия, ржавчина или износ поверхности качения рельса. Этот тип дефекта можно рассматривать с двух точек зрения: во-первых, если линияинтенсивно разрушается, электрический контакт между рельсом и колесом поезда неидеален и может привести к нарушению работы рельсовой цепи, что также может привести к ложному срабатыванию железнодорожной сигнализации с возможными катастрофическими последствиями, приводящими к столкновению поездов. Очень важно использовать на таких линиях безопасные с этой точки зрения рельсовые цепи (на основе импульсов высокого напряжения) или осуществлять регулярное движение для уменьшения эрозии от механического трения. С другой стороны, если рельсы подвержены интенсивному износу, поверхность становится неровной или неровной, что вызывает вибрации подвижного состава или возможную потерю электрического контакта на высоких скоростях. Следовательно, и эти виды механических деформаций необходимо своевременно выявлять и устранять.

Для выявления таких специфических механических и геометрических дефектов обычно проводятся регулярные наблюдения железнодорожным персоналом, совершающим пешеходные расстояния между железнодорожными станциями и отмечающими, где наблюдаются такие аномалии. Кроме того, полуавтоматические измерения повышенной точности выполняются с помощью специальных вагонов (вагонов), которые периодически передвигаются по рельсам. Однако эти методы труднее применить к подземным железным дорогам из-за условий плохой видимости и очень коротких перерывов в работе, особенно в ночное время.

С этой точки зрения мы считаем крайне необходимой разработку автоматизированной платформы, способной перемещать, собирать и передавать соответствующую информацию о целостности инфраструктуры.

3.2. Методы диагностики рельсов. Описание оборудования

Предлагаемое решение для мобильного автономного сбора данных для железнодорожных приложений состоит из набора датчиков, установленных на самоходной тележке, с возможностью использования методов самоопределения (включая позиционирование в помещении, основанное на сочетании одометрии и комбинации INS на первом этапе).). Первая версия изначально была задумана в основном для применения в метрополитене, включая анализ пределов внешних датчиков, тестирование бортовой/наземной связи и электромагнитных маяков, обнаружение препятствий и/или посторонних предметов, а также раннее обнаружение и предупреждение о возгорании. Блок-схема первой версии изображена на рисунке 1.

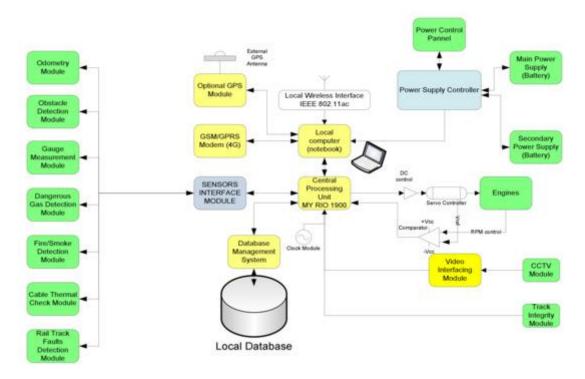


Рис. 1. Общая схема функциональных блоков автономной тележки.

Аппаратное обеспечение в первом варианте включает в себя несколько функциональных компонентов, таких как:

Центральный процессор (ЦП) на базе myRIO — содержит все элементы управления и команды для мобильной платформы, программируемые через ноутбук;

Модуль одометрии (ОМ) — отвечает за подсчет импульсов от колес, измерение пройденного расстояния, скорости и обновление информации о положении автоматизированной платформы в ЦП. Для вычисления пройденного расстояния и скорости использовался датчик Холла NPN. Для определения скорости используется следующая формула:

$$V\left[\frac{m}{s}\right] = n \cdot \frac{2\pi R}{60} \tag{1}$$

где n — число счетных импульсов, переданных датчиком Холла, R — радиус фланца, обеспечивающего счет импульсов.

Модуль обнаружения препятствий (ODM) — состоит из комбинации инфракрасного и ультразвукового датчиков, установленных в передней части мобильной платформы для быстрого обнаружения и/или идентификации препятствий на путях. Обнаружение препятствий, находящихся перед платформой, осуществляется с помощью ИК-датчика типа Sharp GP2YOA710KOF и ультразвукового датчика XL Maxbotix EZO. Sharp GP2YOA710KOF — это встроенный датчик расстояния для передних препятствий, который обеспечивает обнаружение ИК-светодиода на λ = 850 нм. Рабочее расстояние составляет от 100 до 550 см. Его диаграмма чувствительности представлена на рис. 2. Коэффициент отражения 90% рассматривался для белой бумаги, установленной в качестве эталонной цели. Габариты, качество и простота использования ультразвукового датчика XL Махbotix EZO также обеспечивают высокую точность показаний от 0 до 765 см с разрешением 1 см. Датчик может питаться напряжением от 3,3 до 5 В постоянного тока.

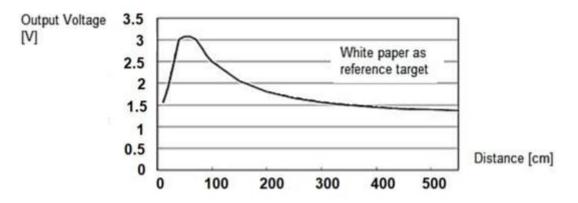


Рисунок 2. Чувствительность датчика обнаружения препятствий в зависимости от расстояния (контрольный образец: белая бумага).

Модуль оценки колеи (GAM) — состоит из ультразвуковых и лазерных датчиков для проверки размеров внешней колеи туннелей, обнаружения и определения местоположения возможных препятствий или выступающих объектов. Для гораздо более точной проверки калибра также был представлен лазерный комплект RPLIDAR A1M8-360 с максимальной частотой считывания 10 Гц и расстоянием обнаружения около 6 м. Форма колеи свободного прохода под землей Бухареста представлена на рисунке 3.

Модуль обнаружения пожара (FDM) — состоит из специального ИК-датчика и взаимодействует с GAM для обнаружения возгорания, обнаружения обогреваемых кабелей и сигнализации.

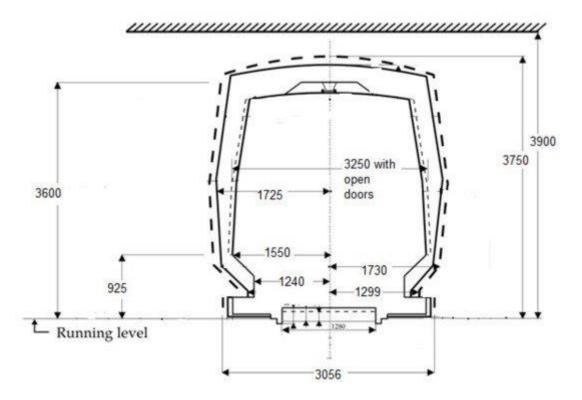


Рисунок **3.** Форма и основные размеры колеи Бухарестского метрополитена (поперечное сечение, типовое сечение тоннеля, полупрямоугольное сечение. Существуют также овальные и круглые сечения).

Для разработки программного обеспечения использовалась программа LabVIEW, исходный код которой выполнялся программой сбора данных NI myRIO m. odule, используя комбинацию модульного аппаратного и программного обеспечения для преобразования персонального компьютера (планшета, ноутбука, смартфона) в настраиваемую пользователем систему дистанционного управления.

Ниже приведены изображения реального оборудования, испытанного в тоннелях метро.

На рис. 4 в центральной части белым прямоугольником обозначен модуль обнаружения газа/дыма, в правом верхнем углу — Wi-Fi роутер, центральный блок находится в центре изображения.

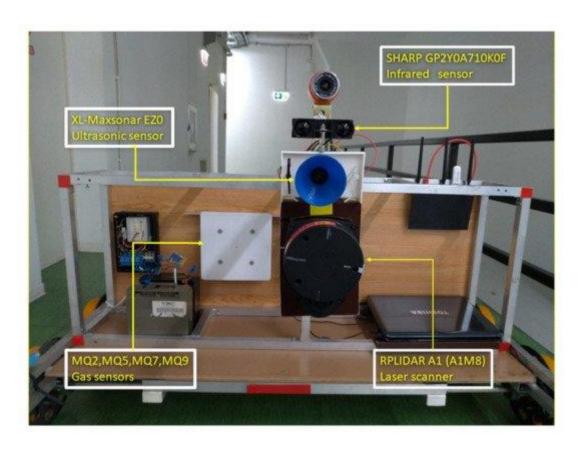


Рис. 4. Вид оборудования спереди.

На Рисунке 4, Рисунке 5 и Рисунке 6 представлены некоторые физические детали экспериментальной роботизированной тележки. Движение тележки обеспечивают двигатели, установленные на каждой оси колес (на представленных изображениях не видны). Можно регулировать скорость перемещения и задавать скорость выборки набора датчиков.

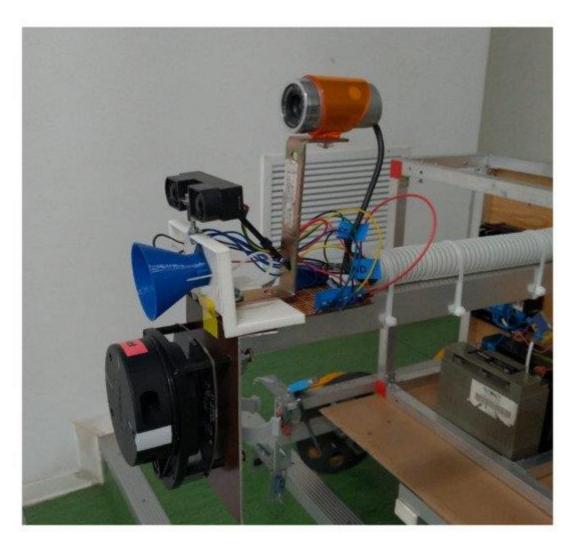


Рис. 5. Фрагмент вида сбоку: веб-камера вверху, модули обнаружения препятствий и обнаружения огня/дыма.



Рис. 6. Деталь модуля оценки манометра со сканером LIDAR и модулем обнаружения препятствий (ультразвук).

4. Настройка испытательного стенда и результаты

4.1. Введение

Для большинства задач, возлагаемых на мобильную систему обнаружения дефектов пути, использование одного типа датчика может не дать удовлетворительных результатов. Например, в навигации одни объекты в окружающей среде могут быть обнаружены только ИК-датчиками, лазеры, другие - только ультразвуковыми датчиками, и лишь немногие всеми типами датчиков. Таким образом, проблема состоит в том, чтобы найти метод, эффективно объединяющий информацию от множества датчиков с различными категориями и характеристиками. Наиболее распространенным термином в литературе для этого процесса является «слияние сенсоров». Однако в контексте мобильных систем объединение данных должно решать следующие проблемы:

- -Объединение измерений датчиков разных категорий;
- -Объединение измерений с разных позиций и углов;
- -Объединение измерений, сделанных в разные промежутки времени.

Для экспериментальных испытаний роботизированная платформа была установлена в бухарестском метро возле станции Страулешть в туннеле с целью определения путем измерения ширины колеи до третьего рельса (используемого для питания поездов патиной). Установка испытательного стенда представлена на рисунке 7 ниже.

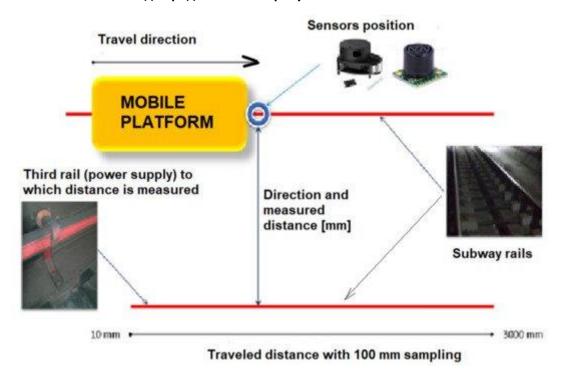


Рис. 7. Установка испытательного стенда, размещение датчиков и измеряемых элементов.

Используя систему измерения и сбора данных, представленную на рисунке 1, были получены результаты, представленные в таблице 1. Пример прямого выхода данных с 3-х датчиков XL-Maxsonar EZ, одного из набора датчиков, установленных на этой платформе, представлен на рисунке 8.

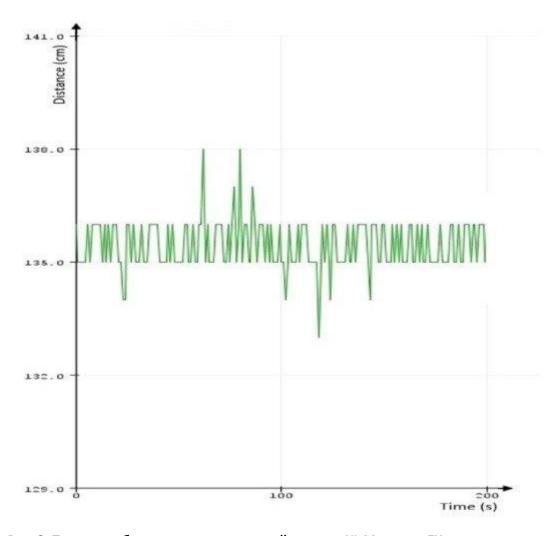
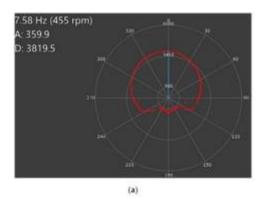


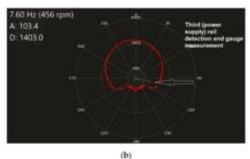
Рис. 8. Прямая выборка данных измерений датчика XL Maxsonar EX.

Таблица 1. Измерения на рельсах метро (температура окружающей среды: 24 °C).

Sample Interval [mm]	Measured Distance [mm] RP Lidar A1	Measured Distance [mm] XL-Maxsonar EZ *	Measured Distance [mm] BOSCH Professional GLM 50C
100	1403.1	1340	1391
200	1401.0	1350	1390
300	1400.0	1360	1390
400	1400.2	1350	1394
500	1395.8	1350	1394
600	1401.1	1340	1394
700	1403.2	1340	1392
800	1404.1	1340	1394
900	1401.4	1400	1393
1000	1402.8	1350	1393
1100	1403.1	1340	1392
1200	1397.6	1400	1390
1300	1398.3	1350	1390
1400	1400.1	1340	1390
1500	1404.8	1340	1391
1600	1403.6	1350	1390
1700	1402.8	1350	1393
1800	1398.7	1360	1393
1900	1402.3	1340	1390
2000	1400.0	1340	1394
2100	1398.1	1350	1391
2200	1401.2	1350	1391
2300	1399.0	1348	1394
2400	1405.9	1380	1394
2500	1406.3	1340	1393
2800	1404.1	1350	1394
2700	1400.2	1340	1391
2800	1399.1	1350	1392
2900	1401.0	1350	1392
3000	1406.0	1380	1394

На рис. 9 представлена форма поперечного датчика, полученная в режиме реального времени с помощью лидара. Детали различных контролируемых элементов описаны на рисунке: общий поперечный размер, рисунок 9а, третий рельс, используемый для питания поездов постоянным током, рисунок 9b, и рисунок 9c, ящик для оборудования, установленный в определенном продольном положении на стене туннеля. Полный набор данных, собранных в ходе экспериментального испытания, представлен в таблице 1.





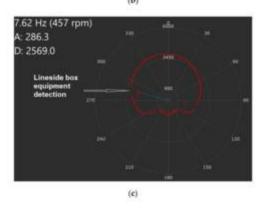


Рисунок 9. Измерение ширины колеи с помощью LIDAR, (а) профилирование ширины туннеля, (b) третий рельс (используется в метро для подачи электроэнергии), (с) измерение ширины колеи линейного оборудования (LDE) (LDE установлен на стена тоннеля, круглый профиль тоннеля метро между станциями).

Как видно из таблицы 1, результаты для более длинных железнодорожных путей включают сбор больших объемов данных, демонстрирующих относительно большую вариацию, факт, который требует уменьшения размера без потери соответствующих функций, чтобы оставаться пригодными для использования в архитектуре. контролируемое машинное обучение.

Результирующее изменение расстояния, измеренного до третьего рельса, показано на диаграмме ниже (Рисунок 10). Можно заметить, что датчик XL Maxsonar демонстрирует самые большие различия в точности, в то время как датчик RP Lidar A1 более постоянен в точности. В качестве эталона для дополнительного сравнения использовали лазерный измерительный прибор GLM 50C. Очевидно, что в проблеме слияния данных необходимо учитывать некоторые элементы, среди которых точность, задержка, положение измерения и синхронизация. Все эти факторы должны быть согласованы в процессе объединения данных. В случае мобильной платформы механическая конструкция, в которой установлены датчики, ее устойчивость к вибрациям и общий наклон также являются дополнительными факторами, которые следует учитывать или компенсировать. На практике вибрации можно уменьшить, установив наиболее чувствительные датчики на гироскопически стабилизированную платформу.

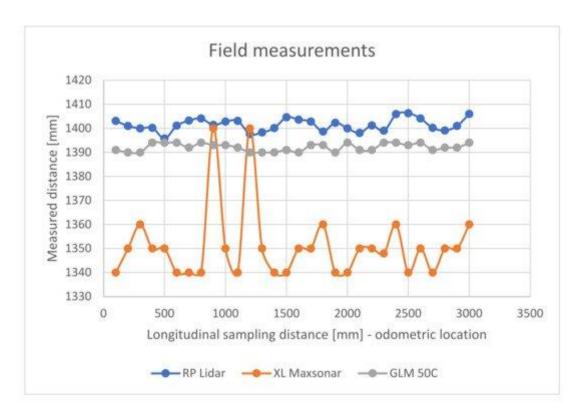


Рис. 10. Диаграмма, показывающая изменение измерений расстояния между тремя датчиками.

Для слияния данных и обнаружения дефектов (аномалий) предлагается разработка системы машинного обучения. алгоритм, основанный на анализе главных компонентов (РСА).

РСА — это алгоритм уменьшения линейной размерности и обнаружения аномалий. Ядро РСА (КРСА) представляет собой нелинейное представление РСА, которое может быть успешно применено к сложным пространственным структурам, а функция ядра связана с нелинейными преобразованиями, применяемыми к общему алгоритму РСА.

Применение КРСА требует высокой вычислительной мощности и значительного объема памяти, особенно если применяется к большим наборам данных дисков. Чтобы применить КРСА для больших наборов обучающих данных, мы предлагаем использовать сокращенную версию КРСА в процессе обнаружения структурных аномалий внутри тоннелей метрополитена.

4.2. Разработка модели машинного обучения с помощью PCA T2Q

Предлагаемая методология будет использоваться для уменьшения размерности собранных данных, полученных с помощью системы, показанной на рисунке 1, с сохранением ее соответствующих характеристик. На основе предложенного сокращенного алгоритма КРСА была разработана система машинного обучения, объединяющая обучение и тестирование процесса обработки размерных данных, обучение с учителем и возможность выбора основной функции. Для обнаружения дефектов (аномалий) используется модель Т2 и квадрат ошибки предсказания Q (статистика Q). Комбинация результатов T2Q затем используется в качестве значения обнаружения дефекта (индекса). Т2-статистика измеряет вариацию в каждой выборке и указывает расстояние каждой выборки от центра модели РСА. Q-статистика показывает, насколько хорошо каждая выборка соответствует модели РСА, путем измерения расстояния, на которое точка данных падает от модели РСА.

На первом этапе размеры уменьшаются с помощью алгоритма КРСА. Для этого алгоритм был реализован на языке программирования LabVIEW. На рис. 11 представлен алгоритм манипулирования признаками.

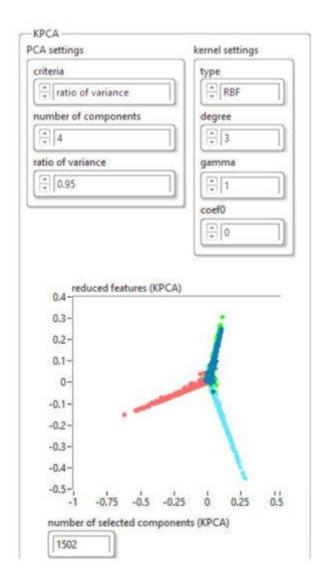


Рис. 11. Реализация алгоритма КРСА для манипулирования признаками.

Результаты, полученные для уменьшения размера базы данных с помощью алгоритма КРСА, показаны на рисунке 12. Файл диска был сохранен в формате «json».

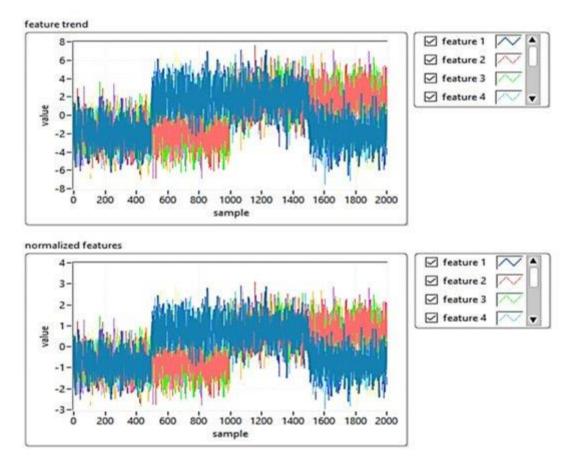


Рисунок 12. Результаты, полученные для уменьшения размера базы данных с использованием алгоритма КРСА.

Для построения модели РСА T2Q входная матрица была разделена на обучающую выборку (для разработки модели) и тестовую выборку четно-нечетным образом. Входная матрица была центрирована по среднему значению и масштабирована до единичной дисперсии. Это необходимо для разработки модели РСА. Функции РСА в LabVIEW и MATLAB использовались для вычисления главных компонентов, собственных значений и величины дисперсии, объясняемой каждым компонентом РСА.

На втором этапе была реализована архитектура машинного обучения на основе алгоритма PCA T2Q, приложений для обучения и обнаружения дефектов.

На рис. 13 показана реализация обучающего алгоритма PCA T2Q, а на рис. 14 — результаты обучающих шаблонов.

	atio of variance
4	0.95
nfidence level	
0.95	
ij	

Рис. 13. Программная реализация обучающего алгоритма PCA T2Q.

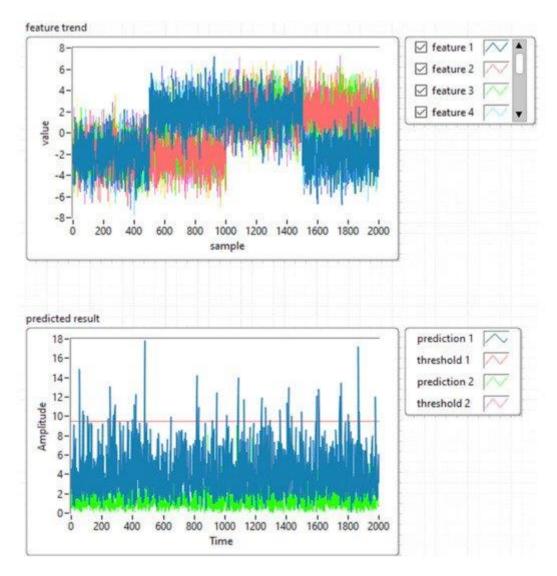


Рис. 14. Результаты обучающих шаблонов с использованием PCA T2Q.

4.3. Моделирование и экспериментальная проверка модели

В этом экспериментальном исследовании предлагается алгоритм машинного обучения с анализом главных компонентов (РСА), который используется для разработки прогностической оценки на основе модели состояния нагрузки.

Обнаружение структурных повреждений с использованием анализа главных компонентов и индексов отказов основано на разработке исходной базовой модели для неповрежденной конструкции. Этот построен путем применения анализа основных компонентов к данным, собранным в ходе нескольких экспериментов, и после того, как текущая структура (поврежденная или нет) подвергается тем же экспериментам, а собранные данные проецируются в модели анализа основных компонентов. Две из этих проекций и четыре индекса повреждения (статистика Т2, статистика Q, комбинированный индекс и индекс I2) каждой фазы срабатывания используются для определения наличия аномалии и их различия. Эти индексы рассчитываются на основе анализа матрицы остаточных данных для представления изменчивости прогнозируемых данных в остаточном подпространстве и новом пространстве основных компонентов.

На рис. 15 представлена архитектура программного обеспечения для обнаружения структурных аномалий. Фактические данные сравниваются с эталонной моделью, которая формулируется как ковариационные матрицы и средние значения измеряемых переменных.

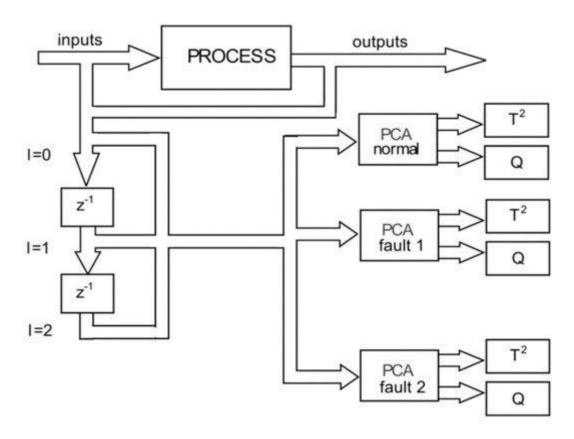


Рис. 15. Архитектура программного обеспечения для обнаружения дефектов и аномалий.

4.4. Тематическое исследование

-Методы обнаружения дефектов рельсов на основе анализа ультразвуковых волн и машинного обучения. Экспериментальные исследования поведения ультразвуковых датчиков в процессе обнаружения.

С целью расширения измерительных возможностей по обнаружению внутренних и/или механических деформаций и трещин в рельсах исследования также были направлены на проверку эффективности использования высокочастотного ультразвука при дефектоскопии аномалий. Однако это связано с некоторыми проблемами:

Размещение датчика очень близко к цели для минимизации затухания в воздухе;

Требуется размещение сенсорного узла на стабилизированной платформе или с хорошей механической амортизацией вибраций;

Требуется более глубокий экспериментальный анализ характеристик высокочастотного ультразвукового сканера на различных материалах в различных условиях.

Производительность мобильных платформ зависит не только от целей и задач, которые они должны выполнять, но и от пространства, в котором они осуществляют свою деятельность. Выбор правильной сенсорной системы требует серьезного анализа пространства, в котором будет работать мобильная платформа, и ее особенностей, т. е. ослабления среды распространения, препятствий (объектов), которые могут быть как подвижными, так и неподвижными. После измерений, выполненных с помощью различных ультразвуковых датчиков на различных типах препятствий, необходимо установить зависимости между ними и различными возможностями обнаружения.

-Ошибки измерения

Для измерений ультразвуковыми датчиками, как и для любой другой методики измерения, на результаты влияет определенное количество погрешностей. При измерении возникают ошибки, имеющие одинаковые амплитуды при измерении процесса в одинаковых условиях, или ошибки, имеющие переменную амплитуду, изменение которых зависит от определенных законов. Ошибки, возникающие в результате процессов измерения, можно разделить на:

Грубые ошибки, возникшие в результате неправильного прочтения или невнимательности, должны быть устранены;

Систематические ошибки, возникающие из-за каких-либо конструктивных особенностей оборудования или могут быть вызваны внешними факторами (температура, давление, влажность, шум и т.д.);

Случайные ошибки, возникающие в результате разнообразия процессов и явлений, а также взаимодействия эксперимента с другими процессами и явлениями, протекающими одновременно.

В процессе анализа данных измерений ультразвуковыми датчиками необходимо рассчитать абсолютную погрешность, относительную погрешность и определить максимально допустимую погрешность. Абсолютная ошибка определяется соотношением:

$$\Delta x = |x_m - x_r| \tag{2}$$

где xm — значение, полученное путем измерения, а xr — реальное значение.

Относительная ошибка определяется соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_r} \times 100 \tag{3}$$

где Δx — абсолютная ошибка, а xr — действительное значение. Относительная ошибка выражается в процентах. Максимально допустимая погрешность определяется путем выбора максимального значения абсолютной погрешности.

$$\Delta x_{per} = \Delta x_{max}$$
 (4)

Таким образом, для измерений расстояний ультразвуковыми датчиками абсолютная погрешность будет иметь вид:

$$\Delta d = |d_m - d_r| \qquad (5)$$

где dm — значение расстояния, полученное путем измерения, а dr — реальное значение расстояния. Относительная ошибка будет:

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_r} \times 100$$
 (6)

где Δd — абсолютная ошибка, а dr — действительное значение расстояния.

Максимально допустимая ошибка будет отмечена следующим образом:

 $\Delta d_{per} = \Delta d_{max}$ (7)

-Определение расстояния до препятствий разного размера

Еще одна проблема с датчиками — обнаружение небольших препятствий. Точно так же ультразвуковые датчики не обнаруживают объекты очень малых размеров — в зависимости от частоты зондирования — (рис. 16б), а если и обнаруживают, то определяемое расстояние может иметь значения, отличные от фактического расстояния от датчика.

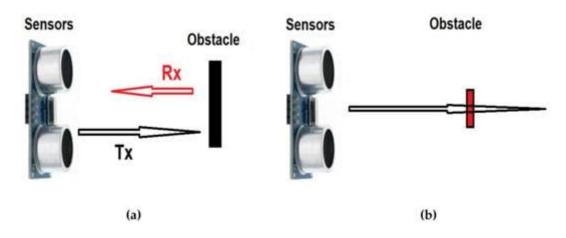


Рис. 16. Ультразвуковые датчики для обнаружения небольших препятствий. Отражение, полученное от целей, превышающих длину волны (а), и ошибка обнаружения объектов меньшего размера, чем длина волны (б).

Ультразвуковой датчик XL Maxbotix EZO использовался для определения расстояния до препятствий разного размера в условиях атмосферного давления 714,5 мм рт. ст. и температуры 22,5 °C (295,65 K). В этом случае скорость распространения звука имеет значение cair = 345,16 м/с.

Линейка датчиков XL Maxbotix EZ0 обеспечивает высокую точность и высокое разрешение ультразвукового обнаружения близости и дальности в воздухе в корпусе менее одного кубического дюйма. Эта линейка датчиков имеет разрешение 1 мм, компенсацию размера цели для повышения точности, превосходное подавление внешних источников шума, внутреннюю температурную компенсацию скорости звука. Этот ультразвуковой датчик обнаруживает объекты размером от 1 мм до 5 м, воспринимает объекты размером от 30 см до 5 м. Датчик работает на частоте 42 кГц. Препятствия, используемые для проверки ультразвукового датчика, были установлены на мобильной платформе, а направляющая линейного потенциометра использовалась для настройки интенсивности генерируемого зондирования. Использовались плоские препятствия из алюминия высотой 150 мм и шириной 20 мм, 40 мм и 60 мм соответственно. Расстояния, на которых располагалось препятствие, варьируются от 100 мм до 1000 мм, от 100 до 100 мм.

На рис. 17 показано изменение относительной ошибки для препятствий разных размеров: а) изменение относительной ошибки для препятствий шириной 60 мм; б) изменение относительной ошибки для препятствий шириной 40 мм; и с) изменение относительной ошибки для препятствий шириной 20 мм.

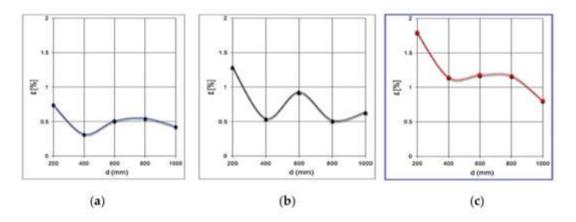


Рисунок 17. Варианты отн. погрешность для препятствий разного размера. Ошибка обнаружения для объектов шириной 60 мм (а), 40 мм (б) и 20 мм (в). Ошибка увеличивается обратно пропорционально ширине объекта.

Замечено, что среднее значение относительной ошибки увеличивается обратно пропорционально ширине препятствия, которое вдвое больше у препятствия шириной 20 мм по сравнению с препятствием шириной 60 мм.

-Определение расстояния до препятствий разной формы

Детектирование железнодорожной техники в линиях метрополитена может включать объекты разного размера и формы, с разной фактурой. Как и в случаях, представленных выше, одна другая проблема с ультразвуковым зондированием возникает при обнаружении препятствий, имеющих разную форму. Измеренное расстояние между датчиком и препятствием может иметь разные значения в зависимости от формы препятствия.

Для наблюдения за влиянием формы препятствия были выполнены измерения расстояния между ультразвуковым датчиком XL Maxbotix EZO и тремя препятствиями с разным поперечным сечением, имеющими размеры, показанные на рисунке 18. Они были расположены по очереди на одинаковых расстояниях от 0,2 м до 2 м от ультразвукового датчика.

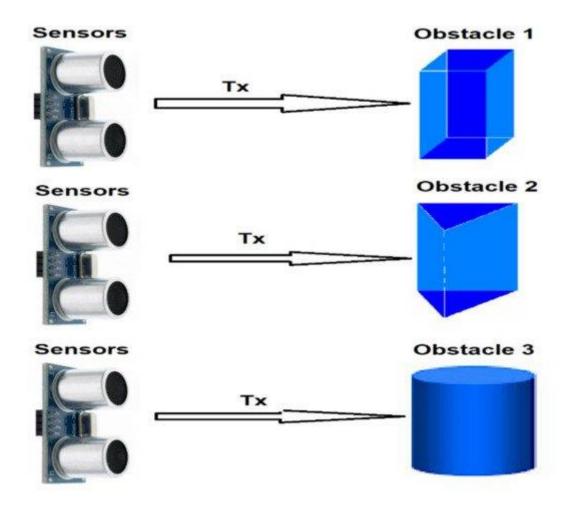


Рисунок 18. Препятствия различной формы.

Для упрощения выражения препятствие прямоугольного сечения было названо Препятствием 1, препятствие треугольного сечения — Препятствием 2, а цилиндрическое препятствие — Препятствием 3.

На рис. 19 показано измерение расстояния до таких препятствий различной формы: на рис. 19а — изменение относительной погрешности для препятствия 1; Рис. 19b — изменение относительной ошибки для препятствия 2; На рис. 19в показано изменение относительной ошибки для препятствия 3.

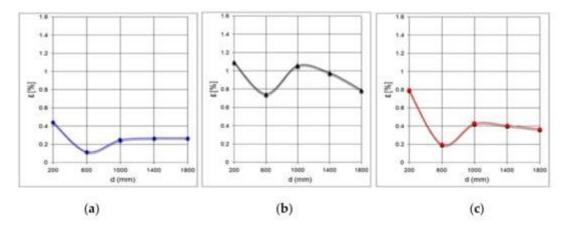


Рис. 19. Измерение расстояния до препятствий различной формы. (a): ошибка вариации для прямоугольных объектов, (b): ошибка вариации для треугольной призмы, (c): ошибка вариации для цилиндрического объекта.

Измерения ультразвуковым датчиком XL Maxbotix EZ0 проводились при атмосферном давлении 711,4 мм рт. ст. и температуре 20,6 °C (293,75 K). В этом случае скорость распространения звука имеет значение cair = 344 м/с.

Можно отметить, что среднее значение относительной ошибки является самым высоким в случае Препятствия 2. Кроме того, значения измеренного расстояния являются самыми высокими в случае Препятствия 2, которое обнаруживается на большем расстоянии, чем фактическое расстояние. В случае цилиндрического препятствия 3 измеренные значения расстояния не сильно отличаются от значений, полученных для препятствия 1.

-Определение расстояния до препятствий из материалов с разной фактурой

Помимо размера и формы препятствия, на обнаружение ультразвукового датчика может влиять и текстура материала, из которого изготовлено препятствие.

Для наблюдения за влиянием текстуры материала, из которого изготовлено препятствие, были проведены измерения расстояния между ультразвуковым датчиком XL Maxbotix EZO и шестью препятствиями, изготовленными из различных материалов образцов. Они были расположены по очереди на одинаковых расстояниях от 50 мм до 250 мм от ультразвукового датчика. Материалы, из которых изготовлены препятствия, используемые для определений, были:

Нержавеющая сталь;
алюминий;
Медь;
Древесина;
Резина;
Пластик.

Полевые измерения ультразвуковым датчиком XL Maxbotix EZO проводились при атмосферном давлении 705,6 мм рт. ст. и температуре 21,3 °C (294,45 K). В этом случае скорость распространения звука имеет значение cair = 344,43 м/с.

На рис. 20 показано изменение относительной ошибки для различных материалов.

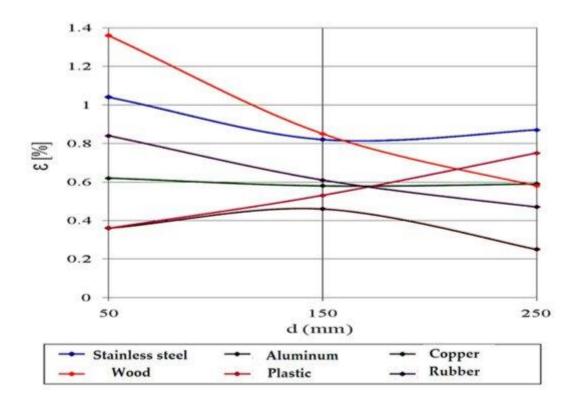


Рисунок 20. Изменение относительной погрешности для различных материалов.

При измерении расстояния до препятствий из металлов можно заметить, что значения выше фактического расстояния для стали и меди (металлы с блестящей поверхностью) и меньше для алюминия (металл с матовой поверхностью).

При измерении расстояния до препятствий из неметаллов можно заметить, что измеренные значения выше, чем фактическое расстояние для пластика (материал с глянцевой поверхностью) и меньше для дерева и резины (материалы с матовой поверхностью).

-Определение расстояния датчиком, установленным на вращающейся платформе (радар)

Для имитации поворотного датчика измерения проводились ультразвуковым датчиком XL Maxbotix EZO, расположенным на мобильной платформе, которая имеет возможность поворачиваться максимум на 90 градусов от фиксированной точки. Эксперимент проводился в течение 12 с для каждого препятствия, частота дискретизации составляла 10 отсчетов в секунду. Первую серию измерений проводили без препятствий, определяя размеры рабочего пространства.

Для упрощения выражения препятствие с сечением в виде прямоугольника было названо Препятствием 1, препятствие с сечением в виде прямоугольного треугольника — Препятствием 2, а цилиндрическое препятствие — Препятствием 3 (см. рис. 18). Препятствия располагались на одинаковом расстоянии от ультразвукового датчика.

После замеров была определена форма рабочего пространства. d с каждым препятствием, воспринимаемым ультразвуковым датчиком. На рис. 21 показаны различия в восприятии ультразвукового датчика.

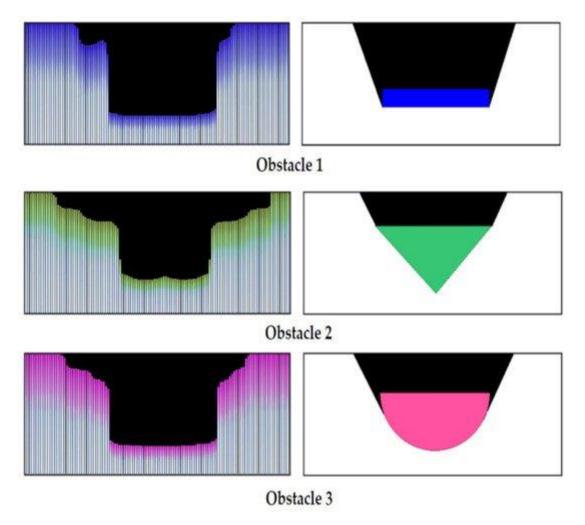


Рис. 21. Разница между реальными формами (справа) и формами, определенными радаром (слева).

Анализируя три диаграммы на Рисунке 21, можно заметить, что большие различия в измерении расстояния возникают в случае Препятствия 2 с сечением прямоугольного треугольника (прогноз 1 — синий сигнал для Препятствия 2). После экспериментов с ультразвуковыми датчиками Maxbotix EZO можно сказать, что на точность определения расстояния между датчиком и объектом влияют размер, текстура и форма объекта, а также атмосферные параметры, особенно температура и атмосферное давление [53]. Однако на уровне земли последние влияния минимальны, а погрешности, определяемые измерениями, невелики, мы рекомендуем использовать ультразвуковые датчики для этого типа мобильных тележек.

На рис. 22 показана схема предварительной обработки полученных ультразвуковых сигналов.



Рис. 22. Этапы предварительной обработки полученных ультразвуковых сигналов.

На основании лабораторных испытаний, представленных выше, мы одновременно проанализировали два пути метрополитена, используя зону ультразвуковых датчиков на основе анализа полученных сигналов и представления ультразвуковой визуализации, для определения профиля рельса и возможности выявления механических дефектов внутри рельсов. . Результаты показаны на рисунке 23 и рисунке 24.

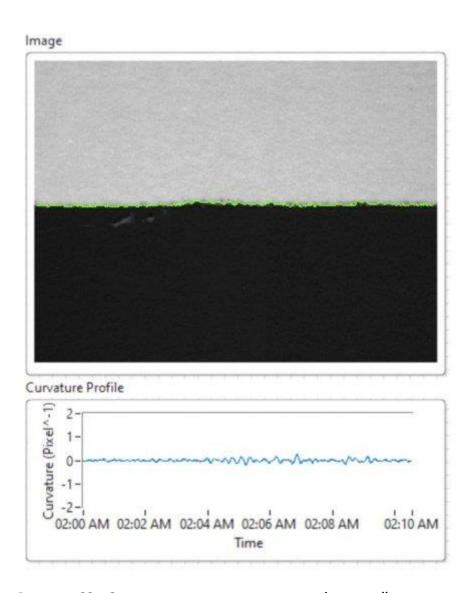
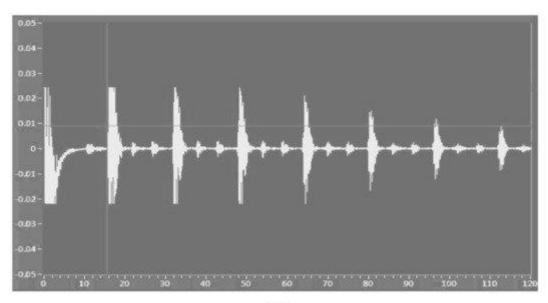


Рисунок 23. Определение механических деформаций рельсов на основе ультразвуковых датчиков.



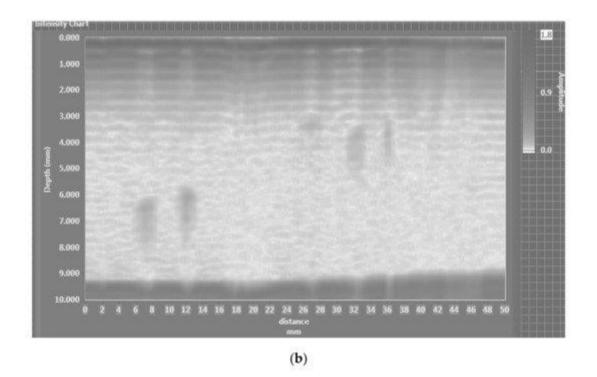


Рисунок 24. Метод ультразвукового измерения (a); амплитудно-модулированное сканирование данных; (b) ультразвуковая визуализация для анализа разрушения рельсов внутри линии метро.

Для построения модели PCA T2Q входная матрица была разделена на обучающую выборку (для разработки модели) и тестовую выборку в нечетно-четном порядке. Ультразвуковая визуализация использовалась для определения качества поверхности рельсов метрополитена и/или трещин.

В подразделе 3.1 мы описали реализацию модели машинного обучения с помощью алгоритма PCA T2Q. Во время разработки и лабораторных испытаний мы смоделировали модель с четырьмя ультразвуковыми датчиками, которые работают независимо, таким образом, используя четыре компонента для алгоритма PCA T2Q. По результатам испытаний, проведенных для выявления дефектов рельсов метрополитена, были выполнены две конфигурации ультразвуковых датчиков: четыре датчика работали независимо и анализ выполнялся на компонентах PCA 4 или группировка четырех датчиков в группы по два датчика и выполнялся анализ PCA с двумя компонентами. Наилучшие результаты были получены при группировании ультразвуковых датчиков в пары по два датчика в каждой.

На рис. 25 представлена схема предлагаемого алгоритма.

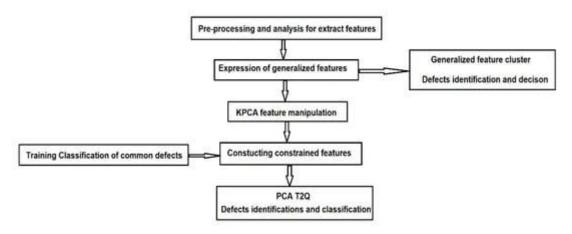


Рисунок 25. Блок-схема предлагаемого алгоритма.

Алгоритм, предложенный в этом исследовании, был использован для проверки правильности анализа. Результаты представлены на Рисунке 26 и Рисунке 27. На Рисунке 26 показаны результаты манипулирования признаками, уменьшающие размер базы данных с помощью алгоритма КРСА, полученные для формы рабочей области с каждым препятствием (см. Рисунок 21) с использованием ультразвукового датчика.

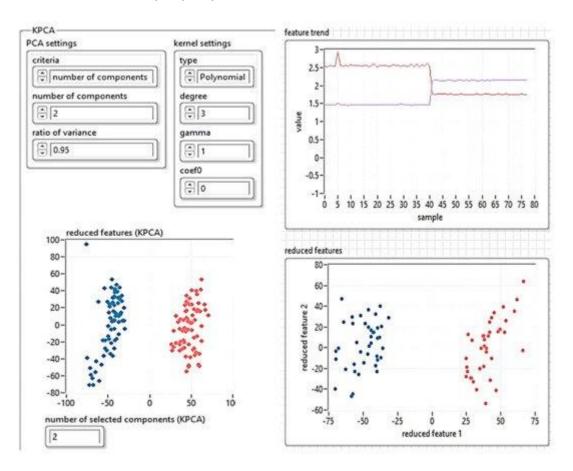


Рис. 26. Манипуляции с функциями, уменьшающие размер базы данных с помощью алгоритма КРСА.

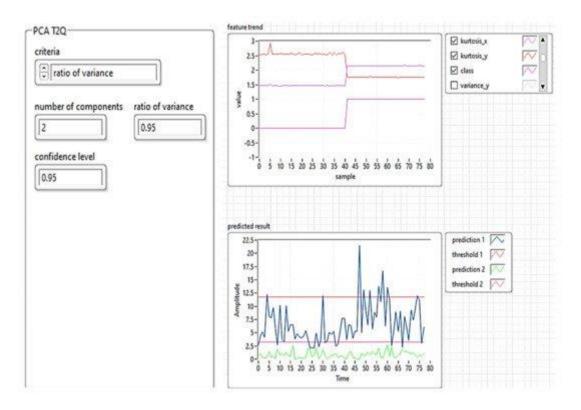


Рис. 27. Оценка обнаружения аномалий рельсов и прогнозируемый результат — моделирование машинного обучения с использованием PCA с T2Q и ультразвуковыми датчиками.

На рис. 27 представлены результаты, полученные при анализе дефектов беговых путей метрополитена с помощью ультразвуковых датчиков воздуха и алгоритма машинного обучения с PCA T2Q. Результаты прогнозирования были получены путем сопоставления данных, полученных при ультразвуковом исследовании, и определения профиля бегущей линии.

5. Обсуждение

Для построения модели РСА Т2Q входная матрица была разделена на обучающую выборку (для отработки модели) и тестовую выборку в нечетно-четном порядке, для возможности проведения ультразвуковых исследований металлических деталей с различной геометрией и размеры. В результате измерений, полученных с помощью этой системы, в повторных экспериментах можно констатировать, что устройство соответствует условиям, для которых оно было разработано.

Исходя из вышеизложенного, в ходе лабораторных испытаний было обнаружено специфическое влияние кромок мишеней на точность анализа механических деформаций на поверхности стали, особенно при измерении скорости звука. Таким образом, гипотеза состоит в том, что граничный эффект влияет на измерения скорости звука, и необходимо провести новые эксперименты, чтобы найти решения, позволяющие избежать или уменьшить эффект отражения звука от краев.

Хотя при ультразвуковом контроле необходимо учитывать распространение луча, важно отметить, что в удаленном поле максимальное звуковое давление всегда приходится на звуковую ось (центральную линию) преобразователя. Следовательно, сильная st отражения, скорее всего, исходят от передней области преобразователя.

Научная работа, выполненная по статье, позволила проанализировать обширную и сложную область ультразвукового исследования с аппликативно-технологической точки зрения. С этой точки зрения теоретические исследования были продолжены экспериментально в полевых условиях, и результаты позволили сформулировать следующие гипотезы:

Ультразвуковые исследования позволяют с приемлемой точностью оценить амплитуду в объеме, в металлических компонентах. Для получения значений напряжений необходимо учитывать константы упругости материала. В этом направлении необходимы дальнейшие исследования и полевые испытания, чтобы также определить возможность использования высокочастотной ультразвуковой визуализации для практического применения в метро.

Некоторые технологические и/или эксплуатационно-нагрузочные процессы (литье, пластическая деформация, сварка, механическая обработка) могут вносить в материал деталей остаточные напряжения, существенно изменяющие их эксплуатационные характеристики. Их трудно обнаружить с помощью классической настройки ультразвуковых датчиков, необходимо более глубокое исследование, возможно, с использованием более близкого ультразвукового зондирования и более высоких частот.

Большими преимуществами ультразвуковых методов являются быстрый сбор данных, портативность приборов, безрадиационный контроль, возможность измерения геометрического положения точек или непрерывного времени и низкие затраты. Однако для получения количественных значений амплитуды сигнала ультразвуковые методы требуют оценки упругих свойств. Поэтому важно точно знать задачу анализа состояния амплитуды звука.

Ультразвуковые методы позволяют оценить поверхностные и объемные напряжения исследуемых деталей.

Ультразвуковой метод исследования может применяться к металлическим и неметаллическим материалам, способным распространять ультразвуковые волны с частотой до 20 МГц.

При анализе внутренних структурных напряжений уменьшение времени распространения можно интерпретировать как уменьшение напряжения растяжения или увеличение напряжения сжатия, изменение напряжения можно аппроксимировать, используя относительное изменение во времени и соответствующие константы упругости.

Алгоритм, предложенный в этой статье, хорошо реагирует на нестабильность и на верхние или нижние ограничения, накладываемые характеристиками рельсов поезда при анализе возможных дефектов.

6. Выводы

Научные подходы, представленные в этом исследовании, позволили проанализировать сложную область ультразвуковых исследований с прикладно-технологической точки зрения.

Чтобы сделать обнаружение геометрических дефектов в механической структуре рельсов надежным, в этой статье мы предложили метод, основанный на алгоритме манипулирования признаками с КРСА, и структуру машинного обучения на основе алгоритма РСА Т2Q для определения характеристик обобщения. Основные выводы следующие:

(1)Предлагаемый метод позволяет избежать нестабильности, верхних или нижних ограничений, вызванных характеристиками рельсов во время обработки обнаружения аномалий. Экспериментальные результаты показали, что предлагаемый метод может работать лучше, чем представленные аналогичные методы, с точностью 98,65% и средним временем обнаружения 0,15 с. Однако для получения лучших результатов следует ограничить скорость автоматизированной тележки и сократить интервалы отбора проб (для интервалов отбора проб 100 мм рекомендуется скорость 0,36 км/ч);

(2)Метод PCA T2Q используется для группировки обобщенных характеристик, ограниченных после уменьшения размера с помощью КРСА. Кроме того, для оценки результатов используются

индекс эксцесса и точность алгоритма PCA T2Q, а результаты обнаружения получаются с точностью более 95%;

(3)Результаты экспериментов показывают, что предлагаемый метод имеет более высокую точность обнаружения дефектов рельсов (изломов, механических деформаций, интенсивной эрозии из-за ржавчины) и имеет лучшие перспективы применения, чем методы, описанные в литературе.

Будущие полевые эксперименты по-прежнему необходимы для разработки интегрированного решения, которое будет сосредоточено на интеграции данных ультразвуковых и акустических датчиков с видеокамерами для обнаружения дефектов снаружи и внутри рельсов с использованием постобработки с глубоким обучением. Мы также стремимся исследовать возможность использования более близких высокочастотных ультразвуковых датчиков для анализа внутренней целостности рельсов.

Вклад автора

Концептуализация, ММ, МD и СМD; методология, М.М. и доктор медицины; программное обеспечение, С.М.D.; валидация, М.М., С.М.D.; формальный анализ, С.М.D.; расследование, доктор медицины; ресурсы, доктор медицины; курирование данных, С.М.D.; написание - подготовка первоначального проекта, М.М. и С.М.D.; написание - обзор и редактирование, М.М.; визуализация, М.М. и С.М.D.; надзор, М.М.; сбор данных, доктор медицины. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование

Это исследование не получило внешнего финансирования.

Заявление Институционального контрольного совета

Не заявка бле.

Заявление об информированном согласии

Непригодный.

Заявление о доступности данных

Используемые данные были получены в лаборатории интеллектуальных транспортных систем факультета транспорта Политехнического университета Бухареста. Тесты в реальном времени проводились в реальной сети метро в Румынии. Полученные данные не являются публичными.

Благодарности

Техническая поддержка MD (роботизированная платформа и датчики, используемые для экспериментов).

Конфликт интересов

Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.

References

1. Fact Sheets on the European Union—2021. Available online: https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/en/FTU_3.4.5.pdf (accessed on 22 July 2021).

- 2. Fact Sheet | High Speed Rail Development Worldwide. Available online: https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-high-speed-rail-development-worldwide (accessed on 25 July 2021).
- 3. Odziemczyk, W.; Woźniak, M. Analysis of railway track geometry measurement methods usability. *Transp. Overv.-Przeglad Komun.* **2018**, 2018, 40–50. [Google Scholar] [CrossRef]
- 4. Pan, P.; Hu, H.; Yang, X.; Blaabjerg, F.; Wang, X.; He, Z. Impedance Measurement of Traction Network and Electric Train for Stability Analysis in High-Speed Railways. *IEEE Trans. Power Electron.* **2018**, *33*, 10086–10100. [Google Scholar] [CrossRef]
- 5. Dolara, A.; Leva, S. Calculation of Rail Internal Impedance by Using Finite Elements Methods and Complex Magnetic Permeability. *Int. J. Veh. Technol.* **2009**, 2009, 1–10. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 6. Rowshandel, H. The Development of an Autonomous Robotic Inspection System to Detect and Characterize Rolling Contact Fatigue Cracks in Railway Track. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK, September 2013. [Google Scholar]
- 7. Lamas, D.; Soilán, M.; Grandío, J.; Riveiro, B. Automatic Point Cloud Semantic Segmentation of Complex Railway Environments. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2332. [Google Scholar] [CrossRef]
- 8. Zhang, X.; Cui, X.; Huang, B. The Design and Implementation of an Inertial GNSS Odometer Integrated Navigation System Based on a Federated Kalman Filter for High-Speed Railway Track Inspection. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 5244. [Google Scholar] [CrossRef]
- 9. Skrickij, V.; Šabanovič, E.; Shi, D.; Ricci, S.; Rizzetto, L.; Bureika, G. Visual Measurement System for Wheel–Rail Lateral Position Evaluation. *Sensors* **2021**, *21*, 1297. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- 10. Chen, Q.; Niu, X.; Zuo, L.; Zhang, T.; Xiao, F.; Liu, Y.; Liu, J. A Railway Track Geometry Measuring Trolley System Based on Aided INS. *Sensors* **2018**, *18*, 538. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 11. Kampczyk, A. Magnetic-Measuring Square in the Measurement of the Circular Curve of Rail Transport Tracks. *Sensors* **2020**, *20*, 560. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 12. Jeong, W.; Jeong, D. Acoustic Roughness Measurement of Railhead Surface Using an Optimal Sensor Batch Algorithm. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 2110. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 13. Jeong, W.; Jeon, S.; Jeong, D.; Choi, H.S. Effect of Design variables of Rail Surface Measuring Device on Acoustic Roughness and Spectral Analysis. *J. Korean Soc. Railway* **2017**, *20*, 440–447. [Google Scholar] [CrossRef]
- 14. Jeong, D.; Choi, H.S.; Choi, Y.J.; Jeong, W. Measuring acoustic roughness of a longitudinal railhead profile using a multi-sensor integration technique. *Sensors* **2019**, *19*, 1610. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version]
- 15. Han, Q.; Wang, S.; Fang, Y.; Wang, L.; Du, X.; Li, H.; He, Q.; Feng, Q. A Rail Fastener Tightness Detection Approach Using Multi-source Visual Sensor. *Sensors* **2020**, *20*, 1367. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version]
- 16. Liu, W.Q. Railway Obstacle Detection Algorithm Based on Deep Neural Network. Master's Thesis, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 2016. [Google Scholar]
- 17. Zhao, X.X. Railway Fastener Detection Based on Convolution Neural Network. Master's Thesis, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 2016. [Google Scholar]
- 18. Shankar, S.; Roth, M.; Schubert, L.A.; Verstegen, J.A. Automatic Mapping of Center Line of Railway Tracks using Global Navigation Satellite System, Inertial Measurement Unit and Laser Scanner. *Remote Sens.* 2020, *12*, 411. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 19. Elberink, S.O.; Khoshelham, K. Automatic Extraction of Railroad Centerlines from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 5565–5583. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 20. Neubert, M.; Hecht, R.; Gedrange, C.; Trommler, M.; Herold, H.; Krüger, T.; Brimmer, F. Extraction of Railroad Objects from Very High Resolution Helicopter-borne Lidar and Orthoimage Data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2008**, *38*, 25–30. [Google Scholar]

- 21. Zhu, L.; Hyyppa, J. The Use of Airborne and Mobile Laser Scanning for Modeling Railway Environments in 3D. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 3075–3100. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 22. Kaasalainen, S.; Jaakkola, A.; Kaasalainen, M.; Krooks, A.; Kukko, A. Analysis of Incidence Angle and Distance Effects on Terrestrial Laser Scanner Intensity: Search for Correction Methods. *Remote Sens.* **2011**, *3*, 2207–2221. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 23. Höfle, B.; Pfeifer, N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2007**, *62*, 415–433. [Google Scholar] [CrossRef]
- 24. Krooks, A.; Kaasalainen, S.; Hakala, T.; Nevalainen, O. Correction of Intensity Incidence Angle Effect in Terrestrial Laser Scanning. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2013**, 2, 145–150. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 25. Wang, Q.; Tang, C.; Dong, C.; Mao, Q.; Tang, F.; Chen, J.; Hou, H.; Xiong, Y. Absolute Positioning and Orientation of MLSS in a Subway Tunnel Based on Sparse Point-Assisted DR. Sensors 2020, 20, 645. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version]
- 26. Larsen, M.B. High performance Doppler-inertial navigation-experimental results. In Proceedings of the OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Providence, RI, USA, 11–14 September 2000; Volume 2, pp. 1449–1456. [Google Scholar]
- 27. Kampczyk, A. Measurement innovations in railway infrastructure safety. *World Sci. News* **2017**, 89, 336–347. [Google Scholar]
- 28. Turabimana, P.; Nkundineza, C. Development of an On-Board Measurement System for Railway Vehicle Wheel Flange Wear. *Sensors* **2020**, *20*, 303. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 29. Alemi, A.; Corman, F.; Lodewijks, G. Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit.* **2016**, 231, 961–981. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 30. Bernal, E.; Spiryagin, M.; Cole, C. Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehi-cles: A Review. *IEEE Sens. J.* **2019**, *19*, 4–24. [Google Scholar] [CrossRef]
- 31. Benito, D.D. Automatic 3D Modeling of Train Rails in a Lidar Point Cloud. Master's Thesis, Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, Enschede, The Netherlands, February 2012. [Google Scholar]
- 32. Li, Q.; Chen, Z.; Hu, Q.; Zhang, L. Laser-Aided INS and Odometer Navigation System for Subway Track Irregularity Meas-urement. *J. Surv. Eng.* **2017**, *143*, 04017014. [Google Scholar] [CrossRef]
- 33. Jiang, Q.; Wu, W.; Jiang, M.; Li, Y. A New Filtering and Smoothing Algorithm for Railway Track Surveying Based on Landmark and IMU/Odometer. *Sensors* **2017**, *17*, 1438. [Google Scholar] [CrossRef]
- 34. Wu, Y.; Wu, M.; Hu, X.; Hu, D. Self-Calibration for Land Navigation Using Inertial Sensors and Odometer: Observability Analysis. In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, IL, USA, 10–13 August 2009. [Google Scholar]
- 35. Morris, J.; Robinson, M.; Palacin, R. Use of Dynamic Analysis to Investigate the Behaviour of Short Neutral Sections in the Overhead Line Electrification. *Infrastructures* **2021**, *6*, 62. [Google Scholar] [CrossRef]
- 36. Chen, L.; Xu, C.; Lin, S.; Li, S.; Tu, X. A Deep Learning-Based Method for Overhead Contact System Component Recognition Using Mobile 2D LiDAR. *Sensors* **2020**, *20*, 2224. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 37. Mosleh, A.; Montenegro, P.; Costa, P.; Calçada, R. Railway Vehicle Wheel Flat Detection with Multiple Records Using Spectral Kurtosis Analysis. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 4002. [Google Scholar] [CrossRef]
- 38. Specht, C.; Wilk, A.; Koc, W.; Karwowski, K.; Dąbrowski, P.; Specht, M.; Grulkowski, S.; Chrostowski, P.; Szmagliński, J.; Czaplewski, K.; et al. Verification of GNSS Measurements of

- the Railway Track Using Standard Techniques for Determining Coordinates. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 2874. [Google Scholar] [CrossRef]
- 39. Wilk, A.; Koc, W.; Specht, C.; Judek, S.; Karwowski, K.; Chrostowski, P.; Czaplewski, K.; Dabrowski, P.S.; Grulkowski, S.; Licow, R.; et al. Digital Filtering of Railway Track Coordinates in Mobile Multi–Receiver GNSS Measurements. *Sensors* **2020**, *20*, 5018. [Google Scholar] [CrossRef]
- 40. Czaplewski, K.; Wisniewski, Z.; Specht, C.; Wilk, A.; Koc, W.; Karwowski, K.; Skibicki, J.; Dabrowski, P.; Czaplewski, B.; Specht, M.; et al. Application of Least Squares with Conditional Equations Method for Railway Track Inventory Using GNSS Observations. *Sensors* **2020**, *20*, 4948. [Google Scholar] [CrossRef]
- 41. Specht, M.; Specht, C.; Wilk, A.; Koc, W.; Smolarek, L.; Czaplewski, K.; Karwowski, K.; Dąbrowski, P.S.; Skibicki, J.; Chrostowski, P.; et al. Testing the Positioning Accuracy of GNSS Solutions during the Tramway Track Mobile Satellite Measurements in Diverse Urban Signal Reception Conditions. *Energies* **2020**, *13*, 3646. [Google Scholar] [CrossRef]
- 42. Spinsante, S.; Stallo, C. Hybridized-GNSS Approaches to Train Positioning: Challenges and Open Issues on Uncertainty. *Sensors* **2020**, *20*, 1885. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed][Green Version]
- 43. Koc, W.; Specht, C.; Szmaglinski, J.; Chrostowski, P. A Method for Determination and Compensation of a Cant Influence in a Track Centerline Identification Using GNSS Methods and Inertial Measurement. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 4347. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 44. Lou, Y.; Zhang, T.; Tang, J.; Song, W.; Zhang, Y.; Chen, L. A Fast Algorithm for Rail Extraction Using Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1998. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 45. Vithanage, R.K.W.; Harrison, C.S.; DeSilva, A.K.M. Importance and Applications of Robotic and Autonomous Systems (RAS) in Railway Maintenance Sector: A Review. *Computers* **2019**, *8*, 56. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 46. Yaguchi, H. Robot Introduction to Cleaning Work in the East Japan Railway Company. *Adv. Robot.* **1995**, *10*, 403–414. [Google Scholar] [CrossRef]
- 47. Farnsworth, M.; Tomiyama, T. Capturing, classification and concept generation for automated maintenance tasks. *CIRP Ann.* **2014**, *63*, 149–152. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 48. Kilian, K.; Kilian, M.; Mazur, V.; Phelan, J. Rethinking reliability engineering using machine vision systems. *J. Rail Rapid Transit.* **2016**, 230, 1006–1014. [Google Scholar] [CrossRef]
- 49. Smorenburg, C.; Van Valkenburg, A.L. Automatic Inspection of Railway Overhead Wires. In 1988 International Congress on Optical Science and Engineering; SPIE: Bellingham, WA, USA, 1989; pp. 107–117. [Google Scholar]
- 50. Resendiz, E.; Hart, J.M.; Ahuja, N. Automated Visual Inspection of Railroad Tracks. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2013**, *14*, 751–760. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 51. Madejski, J. Autonomous track geometry diagnostics system. *J. Mater. Process. Technol.* **2004**, *157*, 194–202. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
- 52. Montero, R.; Victores, J.; Martínez, S.; Jardón, A.; Balaguer, C. Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Autom. Constr.* **2015**, *59*, 99–112. [Google Scholar] [CrossRef]
- 53. Tarulescu, R. Contribution to the Optimization of Sensors Used on Mobil Robots. Ph.D. Thesis, Technical University of Brasov, Brasov, Romania, 2014. [Google Scholar]