DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-83-96

УДК 629.4.052.2 ББК 39.28

М.В. МАРКЕВИЧ, В.В. АНДРЕЕВ

АЛГОРИТМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Ключевые слова: дистанционное виброакустическое зондирование, позиционирование движущихся железнодорожных составов, автоматизация движения поездов, C-OTDR, φ-OTDR.

В основе многих технологий позиционирования движущихся поездов с применением дистанционного виброакустического зондирования лежат частотные и пороговые методы анализа сигналов. Сильная зашумленность сторонними помехами виброакустического сигнала, распространяющегося по оптическому волокну, проложенному вдоль железнодорожного пути, является причиной существенной погрешности в позиционировании поезда. Поэтому актуальной задачей является разработка метода, который позволил бы с желаемой точностью позиционировать подвижный железнодорожный состав.

Цель исследования – разработка эффективного метода обработки и анализа виброакустического сигнала, обеспечивающего позиционирование с требуемой точностью движущегося железнодорожного состава.

Материалы и методы. Исследования проводились с применением записей виброакустических сигналов, генерированных проходящими по железнодорожному участку длиной около 42 км грузовыми поездами длиной больше 800 м. Этот участок оснащен системой виброакустического зондирования. Для обработки виброакустических сигналов использовались разностный метод, а также методы быстрого преобразования Фурье и сегментации изображений уровня серого. Исходный сигнал был предварительно отфильтрован разностным методом. После этого было выполнено быстрое преобразование Фурье вдоль оси времени с последующим вычислением нормированной суммы модулей коэффициентов Фурье в заданном диапазоне частот. Полученный двумерный массив спектрограмм был представлен в виде изображения. Задача нахождения границ поезда была сведена к задаче выбора порога, который позволит разделить изображение на два класса – «поезд» и «фон». В качестве порога было выбрано значение, при котором дисперсия между классами «фон» и «поезд» достигала своего максимального значения.

Результаты. Основываясь на уникальных частотных характеристиках каждого железнодорожного состава, разработан алгоритм определения в реальном времени местоположения движущихся поездов. Примененный непараметрический метод выбора порога дает возможность выполнить оценку оптимальности порога на текущих данных без привлечения дополнительных входных параметров. Первоначально происходит фильтрашия исходных рефлектограмм путем нахождения разности между соседними. Этот процесс необходим для удаления статического шума. Затем выполняется быстрое преобразование Фурье по времени с последующим вычислением нормированной суммы его амплитуд. Рассматривая результат быстрого преобразования Фурье как изображение (пикселями являются нормированные суммы модулей амплитуд дискретного быстрого преобразования Фурье для каждого отсчета оптоволокна), можно применить к нему метод сегментации изображений для разделения классов «фон» и «поезд». Метод основан на вычислении оптимального порога, при котором дисперсия между классами «фон» и «поезд» достигает своего максимума. В процессе сравнения яркости каждого пикселя с полученным порогом пикселю присваивается значение 0 или 1. В результате получаем бинарный массив. Далее выполняется постобработка бинарного массива, в котором все изолированные единицы устанавливаются в 0. Далее

вычисляются границы поезда: левой границей поезда считается первая единица от начала бинарного массива, а первая единица от конца массива – правой границей поезда. Для сглаживания границ поезда выполняется аппроксимация полученных значений методом наименьших квадратов. На обработанных записях рефлектограмм с помощью предложенного метода были определены границы движущегося поезда по железнодорожному участку с отклонением в пределах 20 м.

Выводы. Предложенный алгоритм позволяет позиционировать железнодорожные составы пассажирского и грузового типов, в том числе состоящих из смешанных типов вагонов. У грузовых поездов чаще имеются дефекты колесных пар, которые вносят искажение в виброакустические сигналы. Обработка виброакустических сигналов в частотной области и анализ заданного диапазона частот, характерных движущимся поездам, позволяет устранить описанный эффект, а также динамические факторы внешней среды. Использование непараметрического метода для вычисления порога позволяет оценить оптимальность выбранного порогового значения по критерию максимальной дисперсии между классами «фон» и «поезд». Вычисление частотных характеристик через равные короткие промежутки времени при движении поезда позволяет подстраиваться под текущую ситуацию на участке железнодорожного пути.

Введение. На железнодорожном транспорте безопасность и эффективность процесса перевозок обеспечивается применением системы интервального регулирования движения поездов. Автоматизация управления движением на железнодорожных путях за счет внедрения систем автоматического ведения транспорта (автопилотов) позволит оптимизировать режимы разгона, выбега и торможения. Результатом такого управления станет экономия электроэнергии и топлива при комфортном графике движения. В связи с этим особую значимость приобретают технологии позиционирования железнодорожных составов, среди которых активно разрабатывается в последние годы технология дистанционного виброакустического зондирования. Она основана на распределенном мониторинге вибраций вдоль железнодорожных путей. Эта технология экономически выгодна в задачах интервального регулирования движения железнодорожного транспорта при замене технологии рельсовых цепей, характеризующейся крайне высокой стоимостью сервисного обслуживания, значительным потреблением электрической энергии, а также только частично удовлетворяет современным стандартам безопасности.

Внедрение технологии дистанционного виброакустического зондирования движущегося железнодорожного транспорта сопряжена с непрерывным совершенствованием применяемых методов хранения, обработки и передачи данных. В работе [7] для уменьшения случайного шума осуществлено линейное сглаживание на основе метода наименьших квадратов, в работах [17, 18, 21] применен для этого метод дифференцирования, а в [8, 9] – вейвлет-фильтрация. Авторы исследования [5] проанализировали возможности и эффективность Фурье-преобразования для подавления случайного шума на финальных результатах. Метод энергетического анализа с разложением по эмпирическим модам предложен в [19]. В работе [20] для шумоподавления использовано спектральное вычитание.

В работе [16] проанализирован виброакустический сигнал, представленный соответствующим набором мел-частотных кепстральных коэффициентов. В [10, 12] для выделения необходимых компонент виброакустического сигнала применены искусственные нейронные сети (ИНС). В [7, 18] для позиционирования движущегося поезда применен метод выделения границ изображения операторами Кэнни и Прюитта, а в [8] – алгоритм маркировки связанных компонент. В [13] предложен корреляционный метод для поиска пространственных точек оптоволоконного кабеля, в которых формы акустических волн повторяются. Авторами работы [15] выполнено исследование с применением нормированной скользящей дисперсии. В работе [11] для определения границ движущегося поезда был применен порог, равный трехкратному стандартному отклонению данных, а в [7] – порог, равный максимальному значению межклассовой дисперсии [14]. В результате определение положения движущегося поезда сводится к выбору методов фильтрации и преобразования виброакустических сигналов и их кластеризации на два класса – «поезд» и «фон».

Преобразование Фурье лучше работает со стационарными сигналами, а методы, которые могут интерпретировать сигналы в частотно-временной области, такие как оконное преобразование Фурье и непрерывное вейвлет-преобразование, требуют много времени. ИНС позволяют увеличить скорость обработки данных по сравнению с традиционными алгоритмами, а также являются устойчивыми к локальным пространственным или временным особенностям. Однако для достижения высокой точности результата, получаемого с помощью ИНС, необходимо большое количество образцов для обучения с соответствующей маркировкой.

Цель исследования – разработка эффективного метода обработки и анализа виброакустического сигнала, обеспечивающего позиционирование с требуемой точностью движущегося железнодорожного состава.

Материалы и методы. Регистрация виброакустических сигналов производилась когерентным фазочувствительным рефлектометром с амплитуднофазовой модуляцией зондирующих импульсов компании ООО «Т8 Сенсор» [1]. Схема рефлектометра представлена на рис. 1 [4].



Рис. 1. Схема когерентного импульсного оптического рефлектометра

Когерентное излучение полупроводникового лазера через акустооптический модулятор (AOM) трансформируется в оптические импульсы прямоугольной формы длительностью 120 нс. Частота следования сканирующих оптических импульсов составляет 2 кГц. Оптическое излучение усиливается эрбиевым волоконно-оптическим усилителем (EDFA), после чего оно с помощью циркулятора вводится в оптическое волокно. Рассеянное оптическое излучение выводится из волокна с помощью этого же циркулятора и поступает на фотоприемник [2], сопряженный с АЦП с частотой дискретизации 64 МГц. Зондирующее оптическое излучение в волокне рассеивается обратно на пространственно-временных неоднородностях, называемых рассеивающими центрами (РЦ), которые представляют собой статические пространственные неоднородности в оптоволокие, такие как места сварки, трещины, френелевское отражение на конце волокна и т.д. Поскольку в фазочувствительном рефлектометре время когерентности превышает длительность импульса, то наблюдается интерференция волн, отраженных от разных РЦ. На участках пути, на которых на оптоволокно воздействуют виброакустические сигналы, генерируемые движущимися поездами и другими изменяющимися во времени и пространстве источниками, происходит изменение интерференционной картины. Оцифрованное обратно-рассеянное излучение за время прохождения сканирующим импульсом всей длины оптоволокна называется рефлектограммой. Период получения новой рефлектограммы равен 500 мкс, что обратно пропорционально частоте отправки сканирующих импульсов ($F_s = 2 \kappa \Gamma \mu$). Длина на рефлектограмме измеряется в отсчетах АЦП. Для вычисления координаты волокна в метрах необходимо номер отсчета умножить на коэффициент k, зависящий от частоты регистрации отсчетов АЦП. Этот коэффициент вычисляется так:

$$k = \frac{c}{2fn},\tag{1}$$

где c – скорость света в вакууме, м/с; f – частота дискретизации АЦП, МГц; n – показатель преломления света в оптоволокне.

За время дискретизации АЦП импульс доходит до РЦ и возвращается обратно в виде рассеянного излучения, что соответствует расстоянию 2*l*, поэтому в знаменателе формулы (1) присутствует 2.

В данном исследовании для f = 64 МГц и n = 1,468 было получено k = 1,595 м. Участок мониторинга состоит из четырех железнодорожных станций, разделенных тремя перегонами. Общая протяженность участка составляет 42 км. Оптоволоконный кабель на перегонах уложен вдоль железнодорожного пути на расстоянии 2,5 м от нее на глубину 0,8–0,9 м. На железнодорожных станциях оптоволоконный кабель проходит открыто по воздуху. Когерентный рефлектометр установлен на посту электрической централизации граничной станции контролируемого участка.

Было произведено несколько записей рефлектограмм проезда грузовых поездов с длиной состава больше 800 м.

На рис. 2 показана интерференционная картина грузового поезда при движении слева направо, а на рис. 3 – в противоположном направлении. Интенсивность обратно-рассеянного излучения представлена в градациях серого, где максимальной интенсивности излучения соответствует абсолютно черный цвет, минимальной интенсивности – абсолютно белый цвет. Значения интенсивности лежат в диапазоне от –32 768 до 32 767. По оси абсцисс отображены координаты оптоволокна в отсчетах, а по оси ординат – моменты времени прихода новой рефлектограммы.



Рис. 2. Совокупность рефлектограмм, отстоящих друг от друга на 500 мкс, движущегося слева направо поезда. По оси ординат отложено время, с, по оси абсцисс – координата оптоволокна в отсчетах АЦП



Рис. 3. Совокупность рефлектограмм, отстоящих друг от друга на 500 мкс, движущегося справа налево поезда. По оси ординат отложено время, с, по оси абсцисс – координата оптоволокна в отсчетах АЦП

Результаты исследования. Алгоритм позиционирования включает в себя фильтрацию исходных рефлектограмм, предварительную обработку и вычисление порога для нахождения границ поезда. Структура алгоритма представлена на рис. 4.



Фильтрация. Сначала рефлектограммы были подвергнуты необходимой для удаления статического шума фильтрации [21], заключающейся в нахождении разности между последовательно приходящими с интервалом 500 мкс рефлектограммами:

$$\mathbf{REF}_{m} = (I_{m1} \quad I_{m2} \quad \dots \quad I_{mj} \quad \dots \quad I_{mJ});$$

$$\mathbf{REF}_{m-1} = (I_{(m-1)1} \quad I_{(m-1)2} \quad \dots \quad I_{(m-1)j} \quad \dots \quad I_{(m-1)J});$$

где $m \in [1, 2, ..., M]$ – текущий номер отсчета времени; M – полное число отсчетов сигнала по времени; J – полная ширина участка (в отсчетах АЦП), в котором был обнаружен поезд; $j \in [1, 2, ..., J]$ – текущий индекс пространственной координаты; I_{mj} – интенсивность (в оттенках серого) пространственнов временной ячейки с текущими номерами отсчетов времени m и пространственной координаты j.

Таким образом, на основе (*M* + 1)-й рефлектограммы была получена матрица

$$\mathbf{R}_{M \times J} = \left\| R_{mj} \right\|_{M \times J} = \left\| \mathbf{REF}_m - \mathbf{REF}_{m-1} \right\|_{M \times J}.$$

Предобработка данных. Обработке была подвергнута двумерная матрица $\mathbf{R}_{M \! \times \! J}$ разностных рефлек-

позиционирования поездов тограмм, полученная на этапе фильтрации. На этом этапе M была разделена на M_{FFT} частей (подвекторов), каждая из которых содержит l_{FFT} элементов, т.е. $M_{FFT} = M / l_{FFT}$. Далее над каждым таким подвектором

$$\mathbf{R}_{j}(1) = \begin{pmatrix} R_{1j} \\ R_{2j} \\ \vdots \\ R_{l_{FFT}\,j} \end{pmatrix}, \ \mathbf{R}_{j}(2) = \begin{pmatrix} R_{l_{FFT}+1j} \\ R_{l_{FFT}+2j} \\ \vdots \\ R_{2l_{FFT}\,j} \end{pmatrix}, \ \mathbf{R}_{j}(M_{FFT}) = \begin{pmatrix} R_{(M_{FFT}-1)l_{FFT}+1j} \\ R_{(M_{FFT}-1)l_{FFT}+2j} \\ \vdots \\ R_{M_{FFT}l_{FFT}\,j} \end{pmatrix}$$

во всех столбцах $j \in [1, 2, ..., J]$ было выполнено дискретное быстрое преобразование Фурье (БПФ). Обозначив Фурье-образы через Y, формулы для подвектор-столбцов были преобразованы в следующий вид:

$$Y_{j}(1) = \begin{pmatrix} Y_{1j} \\ Y_{2j} \\ \vdots \\ Y_{l_{FFT} j} \end{pmatrix}, \quad Y_{j}(2) = \begin{pmatrix} Y_{l_{FFT}+1j} \\ Y_{l_{FFT}+2j} \\ \vdots \\ Y_{2l_{FFT} j} \end{pmatrix}, \quad Y_{j}(M_{FFT}) = \begin{pmatrix} Y_{(M_{FFT}-1)l_{FFT}+1j} \\ Y_{(M_{FFT}-1)l_{FFT}+2j} \\ \vdots \\ Y_{M_{FFT}l_{FFT} j} \end{pmatrix}$$

Для каждого подвектор-столбца

$$Y_{j}(m_{FFT}) = \begin{pmatrix} Y_{(m_{FFT}-1)l_{FFT}+1j} \\ Y_{(m_{FFT}-1)l_{FFT}+2j} \\ \vdots \\ Y_{m_{FFT}l_{FFT}j} \end{pmatrix}, m_{FFT} \in [1, 2, ..., M_{FFT}]$$

были вычислены величины

$$S_{m_{FFT}\,j} = \frac{\sum_{l=a_{m_{FFT}\,j}}^{b_{m_{FFT}\,j}} \left| Y_{(m_{FFT}-1)l_{FFT}+l\,j} \right|^2}{b_{m_{FFT}\,j} - a_{m_{FFT}\,j} + 1},$$
(2)

где $a_{m_{FFT}j}$ – номер амплитуды дискретного БПФ, соответствующий минимальной частоте в спектре; $b_{m_{FFT}j}$ – номер амплитуды дискретного БПФ, соответствующий максимальной частоте в спектре; $|Y_{(m_{FFT}-1)l_{FFT}+l_j}|$ – амплитуда дискретного БПФ с номером $l \in [a_{m_{FFT}j}, a_{m_{FFT}j} + 1, ..., b_{m_{FFT}j} - 1, b_{m_{FFT}j}]$ (частоты, соответствующие номерам l, возникают при движении поезда, в фоновом сигнале они отсутствуют).

В результате был получен массив спектрограмм

$$S_{M_{FFT} \times J} = \left\| S_{m_{FFT} j} \right\|_{M_{FFT} \times J}$$

Соответствие между номером и частотой амплитуды сигнала было определено по формуле

$$f_{j_A} = \frac{j_A F_s}{l_{FFT}},\tag{3}$$

где $j_A \in [1, l_{FFT}/2]$, так как для вещественных сигналов результат БПФ обладает двусторонней симметрией: значения спектра на положительных частотах зеркально отображаются через комплексное сопряжение на соответствующих отрицательных частотах.

Нахождение границ движущегося поезда. Массив спектрограмм был рассмотрен как изображение (рис. 5), пиксели которого соответствуют нормированным суммам модулей амплитуд частотных составляющих сигнала для каждого отсчета сигнала, распространяющегося по оптоволокну.



Рис. 5. Фильтрованное изображение движущегося поезда

В этом случае задача нахождения границ поезда была сведена к задаче выбора оптимального порогового значения спектральной мощности обратно-рассеянного излучения, которое позволило разделить пиксели изображения на два класса – «поезд» и «фон». В основу метода вычисления порога был взят метод сегментации изображений уровня серого [14], так как он не требует на входе дополнительных параметров для подбора порога, кроме самого изображения, и предлагает критерий оценки его оптимальности. Оптимальный порог был выбран по дискриминантному критерию таким образом, чтобы разделимость результирующих классов по уровням серого была максимальной [6, 14]. Для вычисления меры разделимости классов были использованы кумулятивные моменты нулевого и первого порядка гистограммы уровней серого [14].

Оптимальным порогом считается уровень серого, при котором дисперсия между классами «фон» и «поезд» [14], вычисляемая по формуле

$$s_B^2(K) = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2, \qquad (4)$$

достигает своего максимума

$$\sigma_B^2(K^*) = \max_{1 \le K \le L} \sigma_B^2(K), \tag{5}$$

где K – уровень серого в исходном изображении; K^* – оптимальный порог для разделения изображения на «фон» и «поезд»; L – максимальное значение уровня серого в исходном изображении; ω_0 и ω_1 – доли «фона» и «поезда» для всего изображения соответственно; μ_0 и μ_1 – средний уровень серого «фона» и «поезда» соответственно.

Применив формулу (4) к массиву спектрограмм $S_{M_{FFT} \times J}$, значения элементов которого лежат в диапазоне 0 до 4,97·10⁴ (рис. 5), в качестве порога было выбрано значение 1,14·10⁴, для которого межклассовая дисперсия принимает свое максимальное значение. Применив этот порог к массиву спектрограмм, был получен бинарный массив **SB** размерности $M_{FFT} \times J$ (рис. 6).



Рис. 6. Бинарное изображение движущегося поезда

Аппроксимация границ поезда. В бинарном массиве могут присутствовать единичные выплески, которые вносят искажения в границы поезда. Они были подавлены дополнительной фильтрацией – все изолированные единицы были установлены в 0. Далее были вычислены границы поезда. В качестве левой границы поезда была взята первая единица от начала бинарного массива, а в качестве правой границы поезда – первая единица от конца массива. В результате был получен массив Z, состоящий из M_{FFT} строк и двух столбцов. В первом столбце содержатся координаты левой границы поезда, во втором столбце – координаты правой границы поезда. Для сглаживания границ поезда была выполнена аппроксимация значений массива Z методом наименьших квадратов [3]. Результирующие границы поезда были определены по аппроксимирующей прямой

$$z = Au + B, (6)$$

для которой сумма квадратов отклонений была минимальна:

$$F(A,B) = \sum_{u=1}^{M_{FFT}} \left(Z_u - Au - B \right)^2 \to \min,$$
(7)

где u – номера строк массива **Z**.

Были обработаны данные, соответствующие проезду двух грузовых поездов на контролируемом участке. На рис. 7, *а* изображен график изменения координат левой и правой границ первого поезда при движении по первому перегону. Положение локомотива обозначено сплошной линией, а последнего вагона – штрихпунктиром. Правый нижний угол соответствует началу движения, т.е. поезд двигался справа налево.



Рис. 7. Результаты обработки записи рефлектограмм проезда поезда № 1: *a* – график изменения координат границ поезда; *б* – график изменения длины поезда; *в* – график изменения порога

График изменения длины в процессе движения поезда представлен на рис. 7, б. Нарастание длины соответствует процессу въезда поезда на перегон (поезд не полностью выехал на перегон), спад длины – процесс выезда поезда с перегона. График изменения порога отображен на рис. 7, *в*. Значения порога лежат в диапазоне от 0 до 1 путем нормирования на максимальное значение порога. На рис. 8, *а* показан график изменения координат левой и правой границ второго поезда при движении по третьему перегону. Движение осуществлялось справа налево. Графики изменения длины и порога (рис. 8, *б* и *в*) начинаются с момента времени, близкого 300 с.



Рис. 8. Результаты обработки записи рефлектограмм проезда поезда № 3: а – график изменения координат границ поезда; *б* – график изменения длины поезда; *в* – график изменения порога

На обрабатываемой записи рефлектограмм было зафиксировано движение двух поездов на разных перегонах: поезд № 2 и поезд № 3. Момент начала записи рефлектограмм соответствует выезду поезда № 2 на второй перегон, а примерно через 300 с после начала записи рефлектограмм на третий перегон выехал поезд № 3 (рис. 8). Запись рефлектограмм была остановлена после прибытия поезда № 2 на станцию. При этом поезд № 3 еще следовал по перегону. Поэтому графики на рис. 8, *а*–*в* отображают не весь проезд перегона поездом № 3.

Результаты обработки записей рефлектограмм приведены в таблице.

Номер поезда	Отклонение длины, м	Средняя длина поезда, м	Стандартное отклонение (σ)
1	18,39	825,83	4,62
3	16,48	838,26	4,51

Результаты обработки рефлектограмм

Согласно таблице, отклонение длины для каждого поезда лежит в диапазоне шириной 6σ при предположении, что распределение результирующей длины соответствует нормальному закону. **Выводы.** Предложен алгоритм определения местоположения движущихся железнодорожных составов в реальном времени, который не требует предварительного обучения и длительных вычислений. Метод, используемый в предложенном алгоритме, построен на основе дифференцирования исходного сигнала с нормированием суммы квадратов модуля амплитуды быстрого преобразования Фурье (см. формулу (2)) в заданном диапазоне частот с дальнейшим вычислением порога на основе непараметрического метода Оцу [14].

По сравнению с работой [7], в которой линейное сглаживание методом наименьших квадратов применено к исходному сигналу, в нашем алгоритме сглаживание производилось на вычисленных границах поезда. Необходимо отметить, что аппроксимация исходного сигнала может привести к изменению его частотных характеристик. В предложенном алгоритме для вычисления спектральной мощности обратно-рассеянного излучения был применен алгоритм БПФ, который имеет преимущество в вычислительной эффективности по сравнению с дискретным вейвлет-преобразованием, который использован в работах [8, 9]. Скорость вычислений является важным фактором для программы, исполняемой в реальном времени. БПФ предполагает, что исходный сигнал является периодическим, и лучший результат достигается при преобразовании сигнала с длительностью, кратной периоду сигнала, что на практике сделать не удается. Это может привести к расширению расчетного частотного спектра и, следовательно, искажению результатов. В нашем случае анализируется широкий диапазон частот, и рассмотренный недостаток не оказывает существенного влияния.

Преимуществом предложенного алгоритма также является применение непараметрического метода выбора порога, который предлагает критерий оценки оптимальности порога на текущих данных без применения дополнительных входных параметров.

Литература

1. Когерентный фазовочувствительный рефлектометр с амплитудно-фазовой модуляцией зондирующих импульсов / А.Э. Алексеев, В.С. Вдовенко, Б.Г. Горшков и др. // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41, № 2. С. 41–48.

2. Когерентный фазочувствительный рефлектометр с дифференциальной фазовой модуляцией зондирующих импульсов / А.Э. Алексеев, В.С. Вдовенко, Б.Г. Горшков и др. // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 10. С. 965–969.

3. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985. 272 с.

4. Точность измерения и пространственная разрешающая способность распределенного температурного датчика на основе двухимпульсного дифференциального когерентного рефлектометра / *Т.О. Лукашова, О.Е. Наний, С.П. Никитин, В.Н. Трещиков* // Квантовая электроника. 2020. Т. 50, № 9. С. 882–887.

5. Cao C., Fan X., Liu Q., He Z. Practical Pattern Recognition System for Distributed Optical Fiber Intrusion Monitoring Based on Φ-COTDR. ZTE Commun., 2017, vol. 15, no. 3, pp. 52–55.

6. *Fukunage K.* Introduction to Statistical Pattern Recognition. New York, Academic Press, 1972, 369 p.

7. *He M., Feng L., Fan J.* A method for real-time monitoring of running trains using Φ-OTDR and the improved Canny. *Optik*, 2019, vol. 184, pp. 356–363. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.04.112.

8. *He M., Feng L., Zhao D.* Application of distributed acoustic sensor technology in train running condition monitoring of the heavy-haul railway. *Optik*, 2019, vol. 181, pp. 343–350. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.12.074.

9. *Kandamali D.F., Cao X., Tian M. et al.* Machine learning methods for identification and classification of events in ϕ -OTDR systems: a review. *Applied Optics*, 2022, vol. 61(11), pp. 2975–2997. DOI: 10.1364/AO.444811.

10. Karapanagiotis C., Hicke K., Krebber K. A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring. *Technisches Messen*, 2023, vol. 90(3), pp. 177–195. DOI: 10.1515/teme-2022-0098.

11. Kowarik S., Hussels M.-T., Chruscicki S. et al. Fiber Optic Train Monitoring with Distributed Acoustic Sensing: Conventional and Neural Network Data Analysis. Sensors, 2020, vol. 20(2), 450. DOI: 10.3390/s20020450.

12. Lämmerhirt A., Schubert M., Drapp B., Zeilinger R. Fiber Optic Sensing for Railways – Ready to use?! SIGNAL + DRAHT, 2022, vol. 114, no. 9, pp. 60–69.

13. Muñoz F., Urricelqui J., Soto M.A., Jimenez-Rodriguez M. Finding Well-Coupled Optical Fiber Locations for Railway Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing. Sensors, 2023, vol. 23(14), 6599. DOI: 10.3390/s23146599.

14. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, vol. 9(1), pp. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.

15. Peng F., Duan N., Rao Y.-J., Li J. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26(20), pp. 2055–2057. DOI: 10.1109/LPT.2014.2346760.

16. *Shi Y., Dai S., Liu X. et al.* Event recognition method based on dual-augmentation for a Φ-OTDR system with a few training samples. *Optics Express*, 2022, vol. 30(17), pp. 31232–31243. DOI: 10.1364/OE.468779.

17. *Timofeev A.V.* Monitoring the Railways by Means of C-OTDR Technology. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2015, vol. 9(5), pp. 717–720. DOI: 10.5281/zenodo.1100523.

18. Wang Y., Jin B., Wang Y. et al. Real-Time Distributed Vibration Monitoring System Using Φ-OTDR. *IEEE sensors journal*, 2017, vol. 17(5), pp. 1333–1341. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2642221.

19. Wang Z., Lou S., Liang S., Sheng X. Multi-Class Disturbance Events Recognition Based on EMD and XGBoost in φ-OTDR. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 63551–63558. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984022.

20. Wen T., Zhu P., Ye W. et al. Application of graphics processing unit parallel computing in pattern recognition for vibration events based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer. *Applied Optics*, 2019, vol. 58(26), pp. 7127–7133. DOI: 10.1364/AO.58.007127.

21. Zhu T., He Q., Xiao X., Bao X. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution. *Optics Express*, 2013, vol. 21(3), pp. 2953–2963. DOI: 10.1364/OE.21.002953.

МАРКЕВИЧ МАРИЯ ВАЛЕРЬЕВНА – аспирант кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mariya.komandirova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0643-1282).

АНДРЕЕВ ВСЕВОЛОД ВЛАДИМИРОВИЧ – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплоэнергетических установок, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (andreev_vsevolod@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6969-9468).

Maria V. MARKEVICH, Vsevolod V. ANDREEV

ALGORITHM FOR POSITIONING A MOVING RAILWAY TRAINS USING RE-MOTE VIBROACOUSTIC SENSING TECHNOLOGY

Key words: remote vibroacoustic sensing, positioning of moving railway trains, automation of train traffic, C-OTDR, φ -OTDR.

Many train positioning technologies utilizing remote vibroacoustic sensing rely on frequencybased and threshold-based signal analysis methods. The vibroacoustic signal propagating through optical fibers laid along railway tracks suffers from significant contamination by external noise, leading to substantial positioning inaccuracies. Consequently, developing a method to accurately localize moving railway vehicles with desired precision remains a critical challenge.

The aim of the study is to develop an effective method for processing and analyzing vibroacoustic signals to enable positioning of a moving railway trains with the required accuracy. Materials and methods. The study was conducted using vibroacoustic signal recordings generated by freight trains exceeding 800 meters in length traveling along a 42 km railway section. This section is equipped with a vibroacoustic sensing system. For processing the vibroacoustic signals, the difference method, fast Fourier transform method, and grayscale image segmentation techniques were employed. The original signal was pre-filtered using the difference method. Subsequently, a fast Fourier transform method was applied along the time axis, followed by the calculation of the normalized sum of the discrete fast Fourier transform amplitude moduli. The resulting two-dimensional array of spectrograms was represented as an image. The task of identifying train boundaries was reduced to selecting a threshold hat would separate the image into two classes: "train" and "background". As the threshold value was chosen the one at which the inter-class variance between "background" and "train" reached its maximum.

Results. Based on the unique frequency characteristics of each railway rolling stock, an algorithm has been developed to determine the real-time location of moving trains. The applied nonparametric threshold selection method enables the evaluation of threshold optimality using current data without requiring additional input parameters. The process begins with filtering the original reflectograms by calculating the difference between adjacent traces. This step is essential for removing static noise. Next, a time-domain fast Fourier transform is performed followed by the computation of the normalized sum of fast Fourier transform amplitudes. By treating the fast Fourier transform result as an image (where pixels represent normalized sums of absolute amplitudes from the discrete fast Fourier transform for each fiber optic sample), an image segmentation method can be applied to separate the "background" and "train" classes. The method relies on calculating an optimal threshold that maximizes the inter-class variance between "background" and "train". During the comparison of each pixel's brightness with the derived threshold, pixels are assigned values of $0 \text{ or } \overline{I}$, producing a binary array. Post-processing is then applied to the binary array, where all isolated 1s are set to 0. Subsequently, train boundaries are determined: the left boundary is identified as the first 1 from the start of the binary array, and the right boundary is the first 1 from the end of the array. To smooth the train boundaries, a least squares approximation method is applied. Using the proposed method on processed reflectogram recordings, the boundaries of moving trains along a railway section were identified with a deviation of within 20 meters.

Conclusions. The proposed algorithm enables the positioning of both passenger and freight railway trains, including those composed of mixed carriages. Freight trains exhibit a higher susceptibility to wheel pair defects, which introduce distortions into vibroacoustic signals. Processing vibroacoustic signals in the frequency domain and analyzing a specific frequency range characteristic of moving trains mitigates the described effect, as well as dynamic environmental factors. The use of a non-parametric method for threshold calculation allows evaluating the optimality of the selected threshold value based on the criterion of maximum variance between the "background" and "train" classes. Computing frequency characteristics at equal short intervals during train movement enables adaptation to the current conditions of the railway track section.

References

1. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G. et al. *Kogerentnyi fazovochuvstvitel'nyi reflektometr s amplitudno-fazovoi modulyatsiei zondiruyushchikh impul'sov* [A phase-sensitive coherence reflectometer with amplitude-phase modulation of probing pulses]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2015, vol. 41, no. 2, pp. 41–48.

2. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G. et al. *Kogerentnyi fazochuvstvitel'nyi reflektometr s differentsial'noi fazovoi modulyatsiei zondiruyushchikh impul'sov* [Phase-sensitive optical coherence reflectometer with differential phase-shift keying of probe pulses]. *Kvantovaya elektronika*, 2014, vol. 44, no. 10, pp. 965–969.

3. Taylor J.R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books, 1997 (Russ. ed.: *Vvedenie v teoriyu oshibok*. Moscow, Mir Publ., 1985).

4. Lukashova T.O., Nanii O.E., Nikitin S.P., Treshchikov V.N. Tochnost' izmereniya i prostranstvennaya razreshayushchaya sposobnost' raspredelennogo temperaturnogo datchika na osnove dvukhimpul'snogo differentsial'nogo kogerentnogo reflektometra [Measurement accuracy and spatial resolution of a distributed temperature sensor based on a two-pulse differential coherent reflectometer]. Kvantovaya elektronika, 2020, vol. 50, no. 9., pp. 882–887. 5. Cao C., Fan X., Liu Q., He Z. Practical Pattern Recognition System for Distributed Optical Fiber Intrusion Monitoring Based on Φ-COTDR. *ZTE Commun.*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 52–55.

6. Fukunage K. Introduction to Statistical Pattern Recognition. New York, Academic Press, 1972, 369 p.

7. He M., Feng L., Fan J. A method for real-time monitoring of running trains using Φ -OTDR and the improved Canny. *Optik*, 2019, vol. 184, pp. 356–363. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.04.112.

8. He M., Feng L., Zhao D. Application of distributed acoustic sensor technology in train running condition monitoring of the heavy-haul railway. *Optik*, 2019, vol. 181, pp. 343–350. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.12.074.

9. Kandamali D.F., Cao X., Tian M. et al. Machine learning methods for identification and classification of events in ϕ -OTDR systems: a review. *Applied Optics*, 2022, vol. 61(11), pp. 2975–2997. DOI: 10.1364/AO.444811.

10. Karapanagiotis C., Hicke K., Krebber K. A collection of machine learning assisted distributed fiber optic sensors for infrastructure monitoring. *Technisches Messen*, 2023, vol. 90(3), pp. 177–195. DOI: 10.1515/teme-2022-0098.

11. Kowarik S., Hussels M.-T., Chruscicki S. et al. Fiber Optic Train Monitoring with Distributed Acoustic Sensing: Conventional and Neural Network Data Analysis. *Sensors*, 2020, vol. 20(2), 450. DOI: 10.3390/s20020450.

12. Lämmerhirt A., Schubert M., Drapp B., Zeilinger R. Fiber Optic Sensing for Railways – Ready to use?! *SIGNAL* + *DRAHT*, 2022, vol. 114, no. 9, pp. 60–69.

13. Muñoz F., Urricelqui J., Soto M.A., Jimenez-Rodriguez M. Finding Well-Coupled Optical Fiber Locations for Railway Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing. *Sensors*, 2023, vol. 23(14), 6599. DOI: 10.3390/s23146599.

14. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, vol. 9(1), pp. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.

15. Peng F., Duan N., Rao Y.-J., Li J. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26(20), pp. 2055–2057. DOI: 10.1109/LPT.2014.2346760.

16. Shi Y., Dai S., Liu X. et al. Event recognition method based on dual-augmentation for a Φ -OTDR system with a few training samples. *Optics Express*, 2022, vol. 30(17), pp. 31232–31243. DOI: 10.1364/OE.468779.

17. Timofeev A.V. Monitoring the Railways by Means of C-OTDR Technology. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 2015, vol. 9(5), pp. 717–720. DOI: 10.5281/-zenodo.1100523.

18. Wang Y., Jin B., Wang Y. et al. Real-Time Distributed Vibration Monitoring System Using Φ-OTDR. *IEEE sensors journal*, 2017, vol. 17(5), pp. 1333–1341. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2642221.

19. Wang Z., Lou S., Liang S., Sheng X. Multi-Class Disturbance Events Recognition Based on EMD and XGBoost in φ-OTDR. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 63551–63558. DOI: 10.1109/-ACCESS.2020.2984022.

20. Wen T., Zhu P., Ye W. et al. Application of graphics processing unit parallel computing in pattern recognition for vibration events based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer. *Applied Optics*, 2019, vol. 58(26), pp. 7127–7133. DOI: 10.1364/AO.58.007127.

21. Zhu T., He Q., Xiao X., Bao X. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution. *Optics Express*, 2013, vol. 21(3), pp. 2953–2963. DOI: 10.1364/OE.21.002953.

MARIA V. MARKEVICH – Post-Graduate Student, Department of Thermal Power Plants, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mariya.komandirova@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0643-1282).

VSEVOLOD V. ANDREEV – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Thermal Power Plants, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (andreev_vsevolod@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6969-9468).

Формат цитирования: *Маркевич М.В., Андреев В.В.* Алгоритм позиционирования движущегося железнодорожного состава с применением технологии дистанционного виброакустического зондирования // Вестник Чувашского университета. 2025. № 2. С. 83–96. DOI: 10.47026/1810-1909-2025-2-83-96.