

Методы обработки сигналов акселерометров на железнодорожном транспорте с использованием вейвлет-преобразования

А. М. Боронахин, А. В. Большакова, Д. М. Клионский[✉],
Д. Ю. Ларионов, Р. В. Шалымов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] klio2003@list.ru

Аннотация

Введение. Вопросы безопасности железнодорожного транспорта напрямую связаны с состоянием железнодорожного полотна, а также поверхности колес вагонов. Одной из причин возникновения нештатных ситуаций на железной дороге могут быть различные дефекты, например неровности рельсового пути, поэтому актуальной является задача измерения и расчета коротких и импульсных неровностей. Важным также является проведение совместного анализа сигналов виброускорений акселерометров с целью исследования типов и размеров неровностей рельсового пути.

Цель работы. Разработка алгоритма поиска дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с вертикальной измерительной осью, установленных на буксовых узлах колесной тележки вагона.

Материалы и методы. В рамках проведенного исследования использовались методы вейвлет-преобразования и вейвлет-обработки сигналов, включая дискретное вейвлет-преобразование и непрерывное вейвлет-преобразование, а также частотно-временной анализ на основе фурье-спектрограммы и непрерывной вейвлет-скалограммы. Данные методы обеспечивают частотно-временную локализацию событий в сигнале, в том числе обнаружение дефектов железнодорожного полотна и определение его параметров.

Результаты. Предложены алгоритмы обработки и анализа вибрационных сигналов с помощью непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования. Показано, что дискретное вейвлет-преобразование эффективно при проведении мультиразрешающего и мультиполосного анализа сигналов виброускорений, а непрерывное вейвлет-преобразование и вейвлет-скалограмма позволяют выявлять дефекты рельсового пути и определять их параметры. Относительная погрешность определения глубины неровности улучшилась на 18 %, а абсолютная погрешность определения длины неровности уменьшилась в 7 раз.

Заключение. Применение дискретного преобразования Фурье и фурье-спектрограммы к анализу сигналов виброускорений обеспечивает хорошее разрешение в частотной области, однако при этом затруднительным является разделение компонент во временной и частотно-временной областях. Ключевой является именно частотно-временная локализация. Непрерывное вейвлет-преобразование обеспечивает достаточное разрешение в низкочастотной области для локализации компонент, а также качественной и количественной визуализации дефектов.

Ключевые слова: дефект рельсового пути, непрерывное вейвлет-преобразование, дискретное вейвлет-преобразование, виброускорение, виброперемещение, вейвлет-скалограмма

Для цитирования: Методы обработки сигналов акселерометров на железнодорожном транспорте с использованием вейвлет-преобразования / А. М. Боронахин, А. В. Большакова, Д. М. Клионский, Д. Ю. Ларионов, Р. В. Шалымов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 1. С. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-6-16

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01428.

Статья поступила в редакцию 16.11.2023; принята к публикации после рецензирования 21.12.2023; опубликована онлайн 29.02.2024

Techniques for Accelerometer Reading Processing on Railway Transport Using Wavelet Transform

Alexander M. Boronakhin, Alexandra V. Bolshakova,
Dmitry M. Klionskiy[✉], Daniil Yu. Larionov, Roman V. Shalymov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ klio2003@list.ru

Abstract

Introduction. Safety issues of railway transport are inevitably connected with the condition of railway tracks and railway wheels. Various defects, such as irregularities of the railway track, may lead to emergencies and incidents. Therefore, it is important to measure and calculate short and impulse irregularities. A joint analysis of vibration acceleration signals is needed in order to study the types and size of railway track irregularities.

Aim. Development of an algorithm for irregularity search based on accelerometer readings with the vertical measurement axis.

Materials and methods. The research encompassed wavelet transformation and wavelet-based signal processing including discrete-time signal processing and continuous wavelet processing. In addition, time-frequency analysis based on Fourier transform and continuous wavelet scalogram was used. These methods provide for time-frequency localization for irregularity detection and measurement.

Results. Algorithms for vibrational signal processing using the continuous and discrete-time wavelet transform are proposed. The results show that the discrete wavelet transform is effective for multiresolution and multiband analysis, and continuous wavelet transform and wavelet scalogram allows extraction of irregularities and determination of their parameters. The relative error for irregularity depth was improved by 18 %, and the absolute error for irregularity length determinations was reduced by 7 times.

Conclusion. Application of the discrete Fourier transform and Fourier spectrogram provides for fine resolution in the frequency domain. However, separation of signal components in the time-frequency domain is impeded. The continuous-time wavelet transform ensures sufficient resolution in the low-frequency domain for component localization and visualization of irregularities.

Keywords: railway track irregularity, continuous wavelet transform, discrete-time wavelet transform, vibro acceleration, vibrational movement, wavelet scalogram

For citation: Boronakhin A. M., Bolshakova A. V., Klionskiy D. M., Larionov D. Yu., Shalymov R. V. Techniques for Accelerometer Reading Processing on Railway Transport Using Wavelet Transform. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 1, pp. 6–16. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-1-6-16

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01428.

Submitted 16.11.2023; accepted 21.12.2023; published online 29.02.2024

Введение. В настоящее время железнодорожный транспорт и железнодорожные перевозки играют важную роль в развитии нашей страны и функционировании различных промышленных областей, а также, что очень актуально, в области перевозки пассажиров между пунктами назначения. В связи с этим важной является задача обеспечения безопасности железнодорожных перевозок во всех сферах. Вопросы безопасности железнодорожного транспорта напрямую связаны с состоянием желез-

нодорожного полотна, включая рельсошпальную решетку, а также с состоянием поверхности колес вагонов.

Дефекты рельсового пути выявляются благодаря показаниям акселерометров – специальных приборов, устанавливаемых на буксу колеса железнодорожного вагона. При необходимости акселерометры могут устанавливаться на каждое колесо колесной тележки (в составе колесной тележки имеются четыре колеса, вагон включает в себя две колесные тележки),

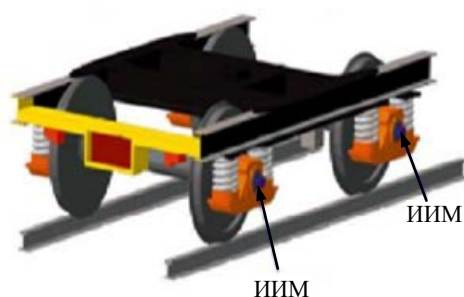


Рис. 1. Система обнаружения коротких импульсных неровностей
Fig. 1. System for detecting short impulse irregularities

тогда при совместном анализе, как правило, исследуют показания сигналов виброускорения от переднего и заднего колес одной тележки, проходящих по одному и тому же рельсу.

Анализ и обработка вибрационных сигналов являются актуальными задачами, возникающими в том числе при анализе неровностей рельсового пути при движении железнодорожного состава. При этом важное значение имеет анализ во временной, частотной и частотно-временной областях. В результате анализа и обработки данного типа вибрационных сигналов может быть получена важная информация о параметрах дефектов, а также свойствах сигнала в низкочастотной и высокочастотной областях, связанных с особенностями взаимодействия в динамической системе "вагон – рельсовый путь". Применение непрерывного вейвлет-преобразования на основе преобразования Фурье позволяет отделить низкочастотные компоненты от высокочастотных и тем самым восстановить вертикальное перемещение колеса вагона. При этом дискретное вейвлет-преобразование на основе схемы банка фильтров эффективно при очистке от шума и восстановлении сигнала. В статье приводятся разработанные на основе непрерывного вейвлет-преобразования алгоритмы, а также исследования реальных вибрационных сигналов с целью обнаружения дефектов и выявления их параметров.

Обнаружение дефектов железнодорожного полотна. На сегодняшний день важной задачей является разработка алгоритма поиска дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с вертикальной измерительной осью, установленных на буксовых узлах колесной тележки вагона. На рис. 1 приведено наглядное изображение разработанной системы определения коротких и им-

пульсных неровностей. При этом показано расположение инерциальных измерительных модулей (ИИМ) на буксе колеса вагона. Следует отметить, что в составе системы могут использоваться акселерометры с диапазонами измерения $\pm 8g$, $\pm 50g$, $\pm 100g$, $\pm 200g$, где g – ускорение свободного падения.

Акселерометры входят в состав модулей, установленных на одной из тележек вагона. При этом регистрация сигналов виброускорений осуществляется при их неэквидистантной пространственной записи [1–4]. Результатом совместного анализа сигналов акселерометров является снижение вероятности ошибки 1-го рода при определении дефекта. Для однозначного определения факта наличия дефекта должна обеспечиваться повторяемость сигнала акселерометра на следом идущих колесах железнодорожного состава – это является критерием определения дефекта. При этом необходимо вычислить взаимную корреляцию между сигналами виброускорения, регистрируемыми передним и задним колесами одной колесной тележки.

Применение дискретного вейвлет-преобразования к анализу сигналов виброускорений. В настоящее время аппарат дискретного вейвлет-преобразования [5–10] является востребованным для решения многочисленных научно-технических задач. В рамках проведенного авторами настоящей статьи исследования рассматривается применение данного подхода к анализу виброускорений от акселерометров. Кроме того, дискретное вейвлет-преобразование является подходящим средством для проведения мультиразрешающего и мультиполосного анализа [11, 12]. Первый из них означает, что проводятся исследования исходного сигнала посредством анализа ком-

понент с различным временным разрешением, а мультиполосный анализ означает, что обрабатываемый вибрационный сигнал исследуется в различных частотных полосах, и тем самым анализируются различные типы колебаний, возникающих в системе "колесо – рельс".

При применении к сигналу дискретного вейвлет-преобразования необходимо выбрать масштабирующую функцию $\phi(x)$ и базисный вейвлет $\psi(x)$. Вейвлет-базис дискретного вейвлет-преобразования состоит из функций

$$\psi_{jn}(x) = \sqrt{2^j} \psi(2^j x - n); \quad j, n \in Z,$$

где j – номер уровня вейвлет-разложения (номер масштаба); n – дискретное нормированное время (номер временного отсчета); ψ_{jn} – значения базисного вейвлета на j -м уровне разложения (на j -м масштабе) в момент времени n .

Дискретное вейвлет-преобразование имеет ряд полезных свойств в сравнении с преобразованием Фурье и математическим аппаратом, базирующемся на применении аппарата Фурье. Анализ Фурье применяется в основном к стационарным сигналам, в то время как сигналы виброускорений нестационарны. Кроме того, базисные функции – тригонометрические функции – не локализованы во временной области, в связи с чем затруднительно выявление локальных особенностей, которые часто представляют интерес при анализе сигналов виброускорений. Другими словами, функции тригонометрического базиса имеют неограниченный носитель во временной области (определены на всей временной оси).

При использовании дискретного вейвлет-преобразования для проведения вейвлет-анализа необходимо разложить функцию $f(x)$

по вейвлет-базису пространства $L^2(R)$:

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{j, n \in Z} d_{jn} \psi_{jn}(x); \\ f(x) &= \sum_{k \in Z} a_{j-N, k} \phi_{j-N, k}(x) + \\ &+ \sum_{k \in Z} d_{j-N, k} \psi_{j-N, k}(x) + \dots + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{k \in Z} d_{j-1, k} \psi_{j-1, k}(x),$$

где d_{jn} – детализирующий коэффициент вейвлет-разложения, соответствующий j -му уровню (j -му масштабу); $\phi_{j-N, k}$ – значение масштабирующей функции на уровне разложения (масштабе) с номером $(j-N)$; $\psi_{j-N, k}$ – значение базисного вейвлета на уровне разложения (масштабе) с номером $(j-N)$; N – общее число отсчетов (длина) функции $f(x)$; Z – множество целых чисел.

При использовании дискретного вейвлет-преобразования на каждом этапе декомпозиции формируются детализирующий и аппроксимирующий уровни разложения. При этом детализирующий уровень содержит высокочастотную спектральную составляющую, а аппроксимирующий уровень – низкочастотную спектральную составляющую. Пример дискретного вейвлет-разложения вибрационного сигнала приведен на рис. 2.

Из данного графика можно сделать следующие выводы:

- 1) начальные уровни вейвлет-разложения являются сильно осциллирующими (содержат большое число колебаний), что соответствует общей схеме вейвлет-разложения на основе диадического (двоичного) банка фильтров;
- 2) с увеличением номера уровня вейвлет-разложения средняя частота осцилляций компонент уменьшается, и сами компоненты становятся более низкочастотными и, как следствие, более медленно меняющимися.

Предлагаемый авторами алгоритм дискретного вейвлет-анализа сигналов виброускорений выглядит следующим образом:

- 1) выбирается уровень разрешения j такой, что данный уровень обеспечивает качественную аппроксимацию исходного сигнала $s(n)$;
- 2) выбирается глубина разложения сигнала и вычисляются коэффициенты разложения для каждого уровня;
- 3) проводится анализ вейвлет-коэффициентов и их модификация (изменение) в случае необходимости. Частным случаем модификации является зануление коэффициентов;

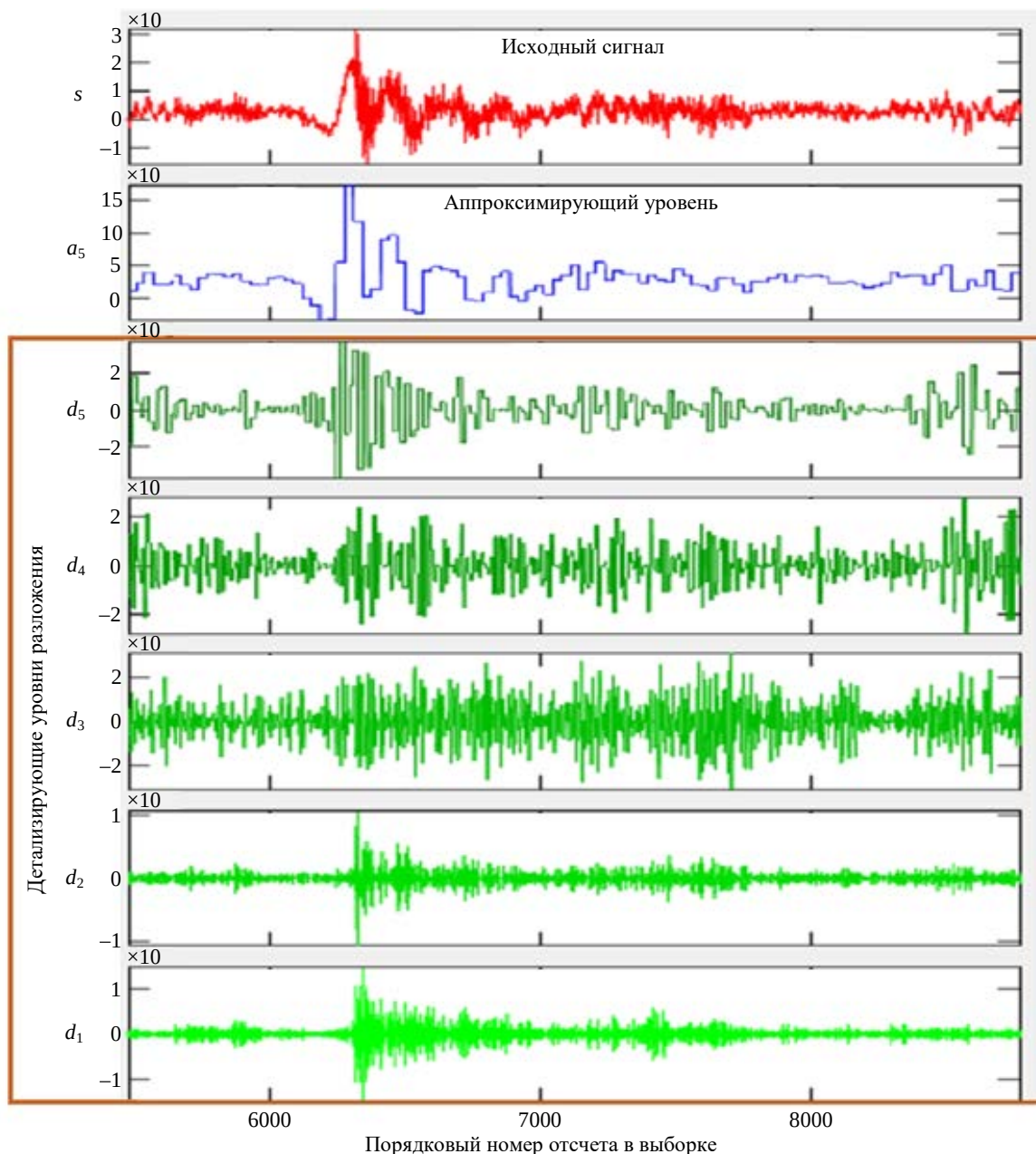


Рис. 2. Пример дискретного вейвлет-разложения сигнала виброускорений

Fig. 2. Discrete-time wavelet decomposition of a vibration acceleration signal (example)

4) проводится восстановление исходного сигнала $s(n)$ с использованием вейвлет-коэффициентов, возможно, измененных (модифицированных).

Наряду с преимуществами, дискретное вейвлет-разложение имеет определенные недостатки. Наиболее существенным является то, что оно не позволяет разделять низкочастотные компоненты, среди которых находятся вибрации, характеризующие систему "вагон – рельсовый путь". В частности, низкочастотные вибрации несут информацию о форме дефекта рельсового пути, а также информацию, связанную с

колебаниями рельсошпальной решетки. Высокочастотные вибрации соответствуют вибрациям, распространяющимся по рельсу.

Применение дискретного вейвлет-преобразования позволяет выполнить фильтрацию для дальнейшей обработки сигналов виброускорений.

Рассмотрим пример применения дискретного вейвлет-преобразования для фильтрации сигнала виброускорений (рис. 3). В результате применения дискретного вейвлет-преобразования получен отфильтрованный сигнал виброускорения за счет удаления существенной части высокочастотной составляющей.

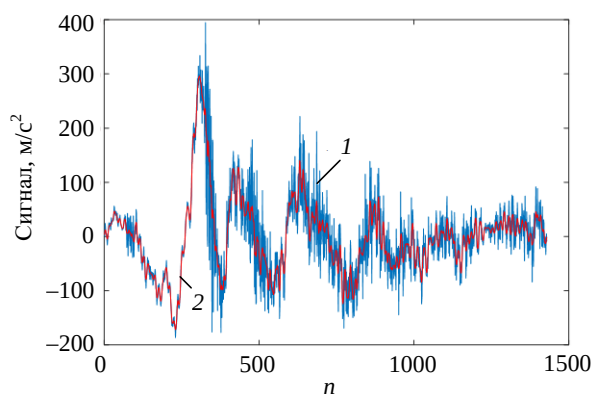


Рис. 3. Результат вейвлет-фильтрации с помощью дискретного вейвлет-преобразования

Fig. 3. Wavelet filtering result using the discrete-time wavelet transform

На рис. 3 отфильтрованный сигнал обозначен цифрой 2, исходный сигнал виброускорения обозначен цифрой 1. Таким образом, применение дискретного вейвлет-преобразования позволяет выполнить фильтрацию для дальнейшей обработки виброускорений.

Применение непрерывного вейвлет-преобразования к анализу сигналов виброускорений. Непрерывное вейвлет-преобразование получается, если в выражении вейвлета разрешить числам j и k принимать непрерывные значения, а суммы заменить на интегралы [13–15]. В этом случае после данной замены получаем семейство функций, зависящее от двух непрерывных параметров a и b , которые определяют параметр масштаба и параметр сдвига при применении непрерывного вейвлет-преобразования. В качестве базисного вейвлета в данном случае выступает двухпараметрическое семейство функций:

$$\psi_{ab}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right); \quad a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0,$$

где $\psi_{ab}(x)$ – базисный вейвлет, соответствующий параметру масштаба a и параметру сдвига b ; x – непрерывное (аналоговое) время.

Таким образом, непрерывное вейвлет-преобразование функции из пространства $L^2(\mathbb{R})$ определяется следующей формулой:

$$\begin{aligned} W_\psi[a, b] &= (f, \psi_{a,b}) = \\ &= |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx. \end{aligned}$$

Вейвлет-коэффициенты c_{jk} при этом можно определить через интегральное вейвлет-преобразование:

$$c_{jk} = W_\psi[f] \left(\frac{1}{2^j}, \frac{k}{2^j} \right).$$

По сравнению с дискретным вейвлет-преобразованием на основе схемы диадического (двоичного) банка фильтров непрерывное вейвлет-преобразование в ряде случаев более удобно за счет свойства избыточности. Суть данного свойства заключается в том, что в непрерывном вейвлет-преобразовании происходит непрерывное изменение масштабного коэффициента и параметра сдвига. Базисный вейвлет ψ при этом удовлетворяет условию

нормировки $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1$, кроме того, имеет

место конечность следующего интеграла:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty.$$

В рамках выполненного исследования осуществляется непрерывное вейвлет-преобразование сигнала виброускорения одного из модулей колесной тележки. К преимуществам использования непрерывного вейвлет-преобразования можно отнести следующее:

1) высокое разрешение вейвлет-скалограммы и способность выделять типичные локальные особенности при выполнении мультиразрешающего анализа в частотно-временной плоскости;

2) адаптивность предлагаемого подхода в связи с локальными свойствами вейвлетов и операций масштабирования и сдвига при конструировании вейвлет-базиса;

3) возможность разделения низкочастотных и высокочастотных составляющих, соответствующих движению железнодорожного состава по рельсовому пути;

4) быстрые вычислительные алгоритмы для расчета вейвлет-коэффициентов и, как следствие, удобство при работе с данными большого объема;

5) наглядный вид цветовой вейвлет-скалограммы в частотно-масштабной плоскости и возможность анализировать различные состав-

ляющие вибрационного сигнала.

Для расчета непрерывного вейвлет-преобразования сигнала виброускорений применялся следующий алгоритм:

- вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ) исходного сигнала;
- выполнение ДПФ анализирующего вейвлета для соответствующих частот и последующее масштабирование вейвлета на соответствующих масштабах;
- вычисление произведения ДПФ сигнала и ДПФ выбранного вейвлета на всех масштабах;
- вычисление обратного ДПФ для нахождения вейвлет-коэффициентов и последующее отображение рассчитанных вейвлет-коэффициентов на различных масштабах.

Анализ результатов обработки показаний акселерометров, полученных при прохождении колесом рельсового дефекта. В этом разделе анализировались показания микромеханических акселерометров при прохождении колесом дефекта типа "смятие в сварном стыке". При обработке данных применялось непрерывное вейвлет-преобразование. Параметры дефектов были предварительно измерены ручным шаблоном.

На графике, представленном на рис. 4, показана реконструкция вертикального виброперемещения колеса вагона.

На рис. 4 приведено виброперемещение, полученное путем двойного интегрирования

виброускорения. Кривая *a* означает зависимость вертикального перемещения колеса вагона, полученную путем двойного численного интегрирования сигнала виброускорения без их предварительных преобразований. Остальные кривые соответствуют вертикальному перемещению, полученному из того же сигнала после его предварительного прямого, а затем обратного вейвлет-преобразования. Кривая *b* означает зависимость вертикального перемещения, полученную с помощью вейвлета "dog"; кривая *c* – аналогичную зависимость, полученную с помощью вейвлета "bump"; кривая *d* – восстановление с помощью вейвлета "Pau1"; кривая *e* – восстановление с помощью вейвлета Морле. Из данных графиков видно, что наиболее точное восстановление виброперемещения обеспечивается с помощью вейвлета "bump". При проведении вычислений и обработки реальных данных использовались вейвлеты из библиотеки Wavelet Toolbox программной системы MATLAB, в которой проводились исследования.

Необходимо отметить, что критерием качества восстановления виброперемещения по сигналам виброускорения является верное определение глубины и длины неровности, которая представляет собой дефект.

Рассмотрим далее примеры обработки данных виброускорений со следующими параметрами. При восстановлении виброперемещения

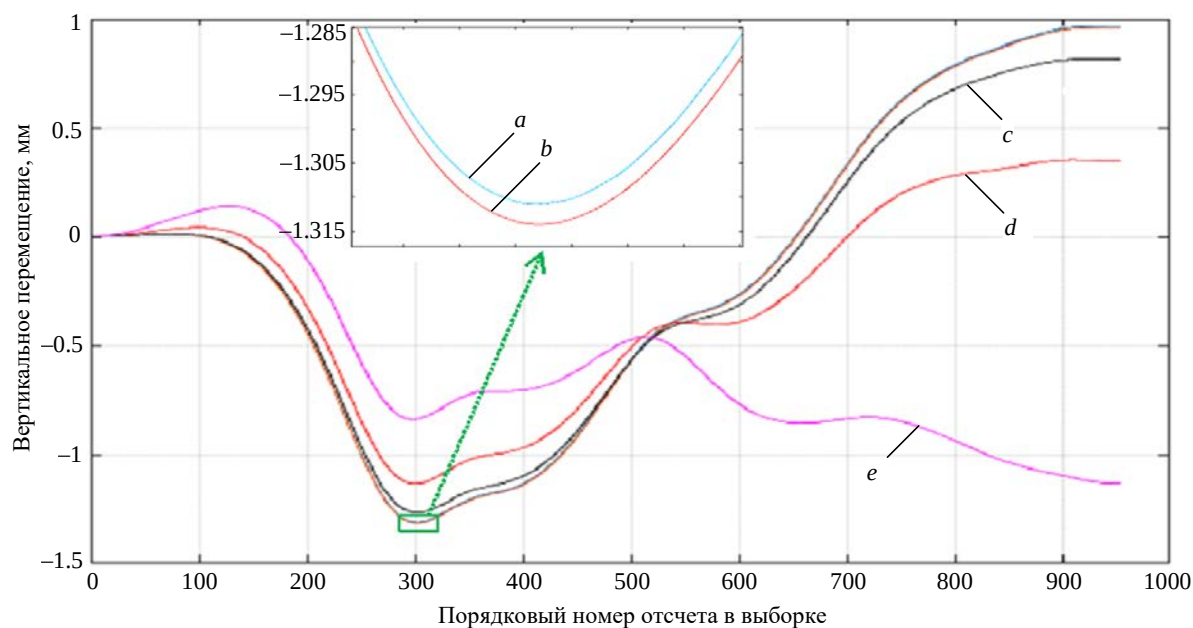


Рис. 4. Реконструкция вертикального виброперемещения колеса вагона

Fig. 4. Reconstruction of vertical vibration movement of a car's wheel

использовался вейвлет "мексиканская шляпа", при этом непрерывная вейвлет-скалограмма содержала 18 масштабов. При проведении обработки сигнала виброускорений осуществлялось зануление вейвлет-коэффициентов в области низких частот с 16-го по 18-й масштаб и высоких частот с 1-го по 12-й масштаб. Выбор зануляемых масштабов осуществлялся в соответствии с предварительным анализом вейвлет-скалограммы за счет выделения на ней области реакции на прохождение дефекта. Графики исходного и восстановленного виброперемещения показаны на рис. 5. Глубина рассматриваемой неровности рельсового пути по результатам ручных измерений составляет 1.1 мм, а длина – 400 дискретных отсчетов системы. Следует учитывать, что ручной метод измерения дает, как правило, заниженную на 0.1...0.2 мм глубину неровности.

В результате проведения вычислений было определено, что улучшилось (стало точнее) воспроизведение глубины неровности, по сравнению с другими опробованными вариантами обработки данных, в частности с использованием вейвлета "dog" или занулением других уровней при использовании "мексиканской шляпы". Последнее касается, например, зануления уровней с 1-го по 13-й в области высоких частот. В рамках результатов определения глубины неровности имеем 0.9 мм без применения ручной обработки и 1.1 мм с применением непрерывного вейвлет-преобразования. Таким образом, точность определения глубины неровности улучшилась на 18 %.

Также был проведен эксперимент, иллюстрирующий применение вейвлета "мексиканская шляпа" для повышения точности измерения длины неровности. При этом использовалось зануление уровней с 1-го по 12-й. Эксперимент соответствовал глубине неровности 1.2 мм и длине 300 дискретных отсчетов. В рамках данного эксперимента было также установлено, что точность определения глубины неровности с помощью вейвлет-преобразования улучшилась на 18 % аналогично предыдущему случаю (рис. 5).

Наконец, еще один пример (рис. 6) демонстрирует применение вейвлета "dog" с параметром 4, при этом точность измерения длины неровности здесь улучшилась. Исходная длина неровности составляла 380 мм, длина, определенная без применения вейвлет-преобра-

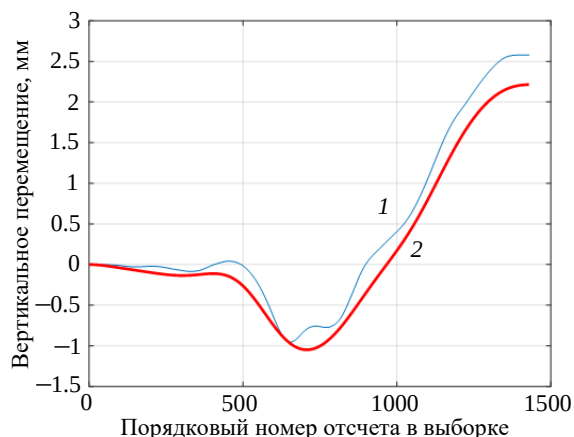


Рис. 5. Реконструкция вертикального виброперемещения колеса вагона с использованием вейвлета "мексиканская шляпа": 1 – исходное виброперемещение; 2 – восстановленное виброперемещение с помощью вейвлета "мексиканская шляпа"

Fig. 5. Reconstruction of vertical movement of a car's wheel using the "Mexican hat" wavelet: 1 – original vibration movement; 2 – reconstructed vibration movement using the "Mexican hat" wavelet

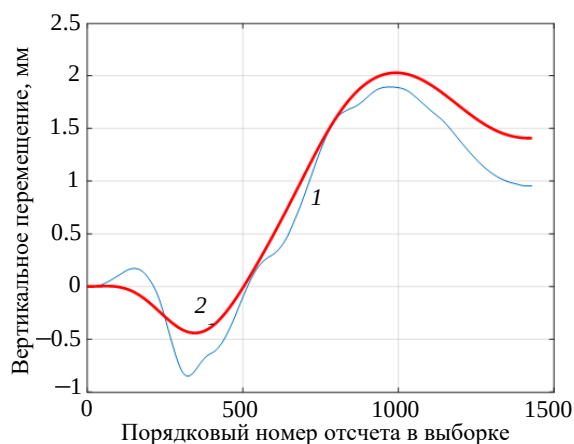


Рис. 6. Реконструкция вертикального виброперемещения колеса вагона с использованием вейвлета "dog": 1 – исходное виброперемещение; 2 – восстановленное виброперемещение с помощью вейвлета "dog"

Fig. 6. Reconstruction of vertical movement of a car's wheel using the "dog" wavelet: 1 – original vibration movement; 2 – reconstructed vibration movement using the "dog" wavelet

зования, составила 520 мм (кривая 1 на рис. 6), а длина неровности, определенная с помощью вейвлет-преобразования, составила 400 мм. Таким образом, в случае применения вейвлет-преобразования абсолютная погрешность определения длины неровности составила 20 мм, а в противном случае, без использования вейвлетов, абсолютная погрешность была больше, а именно 140 мм. Таким образом, абсолютная погрешность уменьшилась в 7 раз за счет применения вейвлетов.

Заключение. Компоненты, несущие в себе информацию о колебаниях рельсошпальной решетки, сосредоточены в низкочастотной области. Выделение данного типа низкочастотных компонент является актуальным для улучшения точности выявления неровностей рельсового пути. Применение для этих целей дискретного преобразования Фурье и фурье-спектрограммы обеспечивает хорошее разрешение в частотной области, однако при этом затруднительным является разделение компонент во временной и частотно-временной областях. Ключевой является именно

частотно-временная локализация. Непрерывное вейвлет-преобразование обеспечивает достаточное разрешение в низкочастотной области для локализации компонент, а также качественной и количественной визуализации дефектов. Относительная погрешность определения глубины неровности улучшилась на 18 %, а абсолютная погрешность уменьшилась в 7 раз. Наиболее качественные результаты получены с использованием вейвлетов "мексиканская шляпа" и "dog", поскольку в этом случае обеспечивается наиболее точное восстановление виброперемещения.

Авторский вклад

Боронахин Александр Михайлович – постановка задачи и руководство научными исследованиями.
Большакова Александра Васильевна – проведение эксперимента.
Клионский Дмитрий Михайлович – разработка алгоритмов, проведение эксперимента.
Ларионов Даниил Юрьевич – проведение эксперимента.
Шалымов Роман Вадимович – проведение эксперимента.

Author's contribution

Alexander M. Boronakhin, problem statement and scientific research management.
Alexandra V. Bolshakova, experiment.
Dmitry M. Klionskiy, algorithm development, experiment.
Daniil Yu. Larionov, experiment.
Roman V. Shalymov, experiment.

Список литературы

1. Inertial System for Railway Track Diagnostics / A. M. Boronahin, E. D. Bokhman, Yu.V. Filatov, D. Yu. Larionov, L. N. Podgornaya, R. V. Shalymov // Symp. Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe, Germany, 18–19 Sept. 2012. German Institute of Navigation (DGON), 2012. P. 17.1–17.20.
2. Inertial Method of Railway Track Diagnostics Incorporating the Condition of Rolling Surfaces of the Railcar's Wheels / A. M. Boronahin, D. Yu. Larionov, L. N. Podgornaya, A. N. Tkachenko, R. V. Shalymov // 4th Intern. Conf. on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2019. Singapore, 05–07 Sept. 2019. IEEE, 2019. P. 49–53. doi: 10.1109/ICITE.2019.8880194
3. Railway Track Diagnostics by Combined Kinematic and Vibroacoustic Analysis / A. V. Bolshakova, A. M. Boronakhin, D. M. Klionsky, D. Yu. Larionov, A. N. Tkachenko, R. V. Shalymov // Proc. of the 2022 Intern. Conf. on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Saint Petersburg, Russia, 26–30 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 188–192. doi: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976711
4. Peculiarities of Vibration Signal Processing Techniques Application to Inertial Way Diagnostics / A. V. Bolshakova, A. M. Boronakhin, D. M. Klionsky, D. Yu. Larionov, A. N. Tkachenko, R. V. Shalymov // Proc. of the 2023 Intern. Conf. on Quality Manage-

- ment, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Petrozavodsk, 25–29 Sept. 2023. IEEE Russia North West Section (в печати).
5. Geppener V. V., Klionsky D. M., Oreshko N. I. Classification of telemetric signals and their spectral density estimation with the help of wavelets // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. 2012. Vol. 22, № 4. P. 576–582. doi:10.1134/S1054661812040098
6. Newland D. E. An Introduction to Random vibrations, spectral and wavelet analysis, 3rd ed. Harlow: Longman; New York: John Wiley, 1993. 477 p.
7. Percival D. B., Walden A. T. Wavelet methods for time series analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 594 p.
8. Newland D. E. Harmonic and musical wavelets. Proc. of the Royal Society of London (Mathematical and Physical Sciences). 1994. Vol. 444, № 1922. P. 605–620. doi: 10.1098/rspa.1994.0042
9. Daubechies I. Ten lectures of wavelets. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 341 p.
10. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. San Diego: Academic Press, 1998. 577 p.
11. Декомпозиция на эмпирические моды в цифровой обработке сигналов / Н. И. Орешко, Д. М. Клионский, В. В. Геппенер, А. В. Экало // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 164 с.

12. Клионский Д. М., Геппенер В. В. Технология Гильберта–Хуанга и ее применение в цифровой обработке сигналов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2019. 150 с.

13. Chui C. K. An Introduction to Wavelets. Academic Press, 1992. 264 p.

14. Смоленцев Н. К. Вейвлет-анализ в MATLAB. 3-е изд. М.: ДМК Пресс, 2010. 448 с.

15. Donoho D. L., Johnstone J. M. Minimax estimation via wavelet shrinkage // Annals of Statistics. 1998. Vol. 26, № 3. P. 879–921. doi: 10.1214/aos/1024691081

Информация об авторах

Боронахин Александр Михайлович – доктор технических наук (2013), профессор (2020), профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем, декан факультета информационно-измерительных и биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 120 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Большакова Александра Васильевна – магистр по направлению "Приборостроение" (2019), ассистент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 20 научных публикаций. Сфера научных интересов – диагностика рельсового пути; вибрационный анализ; инерциальная навигация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: avbolshakova@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9294-8338>

Клионский Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук (2013), доцент (2017), доцент кафедры информационных систем, а также кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 150 научных публикаций. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; обработка и анализ вибрационных сигналов; математическое и компьютерное моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: klio2003@list.ru

Ларионов Даниил Юрьевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 60 научных публикаций. Сфера научных интересов – разработка интегрированных инерциальных технологий динамического мониторинга рельсового пути для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: lariondan@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6722-9211>

Шалымов Роман Вадимович – кандидат технических наук (2014), доцент кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 70 научных публикаций. Сфера научных интересов – инерциальные навигационные системы; обработка данных; гироскопические приборы; диагностика рельсового пути.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: rvshalymov@etu.ru

References

1. Boronahin A. M., Bokhman E. D., Filatov Yu. V., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Shalymov R. V. Inertial System for Railway Track Diagnostics. Symp. Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe, Germany, 18–19 Sept. 2012. German Institute of Navigation (DGON), 2012, pp. 17.1–17.20.

2. Boronahin A. M., Larionov D. Yu., Podgornaya L. N., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Inertial

Method of Railway Track Diagnostics Incorporating the Condition of Rolling Surfaces of the Railcar's Wheels. 4th Intern. Conf. on Intelligent Transportation Engineering, ICITE 2019. Singapore, 05–07 Sept. 2019. IEEE, 2019, pp. 49–53. doi: 10.1109/ICITE.2019.8880194

3. Bolshakova A. V., Boronahin A. M., Klionsky D. M., Larionov D. Yu., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Railway Track Diagnostics by Com-

bined Kinematic and Vibroacoustic Analysis. Proc. of the 2022 Intern. Conf. on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Saint Petersburg, Russia, 26–30 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 188–192. doi: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976711

4. Bolshakova A. V., Boronakhin A. M., Klionskiy D. M., Larionov D. Yu., Tkachenko A. N., Shalymov R. V. Peculiarities of Vibration Signal Processing Techniques Application to Inertial Way Diagnostics. Proc. of the 2023 Intern. Conf. on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). Petrozavodsk, 25–29 Sept. 2023. IEEE Russia North West Section (in press).

5. Geppener V. V., Klionskiy D. M., Oreshko N. I. Classification of Telemetric Signals and Their Spectral Density Estimation with the Help of Wavelets. Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. 2012, vol. 22, no. 4, pp. 576–582. doi:10.1134/S1054661812040098

6. Newland D. E. An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, 3rd ed. Harlow, Longman, and New York, John Wiley, 1993, 477 p.

7. Percival D. B., Walden A. T. Wavelet Methods for Time Series Analysis. Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 594 p.

8. Newland D. E. Harmonic and Musical Wavelets. Proc. of the Royal Society of London (Mathematical and Physical Sciences). 1994, vol. 444, no. 1922, pp. 605–620. doi: 10.1098/rspa.1994.0042

9. Daubechies I. Ten Lectures Of Wavelets. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, 341 p.

10. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. San Diego, Academic Press, 1998, 577 p.

11. Oreshko N. I., Klionskiy D. M., Geppener V. V., Ekalo A. V. *Decompositsia na empiricheskiye modi v tsifrovoi obrabotke signalov* [Empirical Mode Decomposition in Digital Signal Processing]. SPb, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2013, 164 p. (In Russ.)

12. Klionskiy D. M., Geppener V. V. *Technologia Hilberta-Huanga I jee primenenie v tsifrovoi obrabotke signalov* [Hilbert-Huang Technology and Its Applications in Digital Signal Processing]. SPb, Izd-vo SPbGETU "LETI", 2019, 150 p. (In Russ.)

13. Chui C. K. An Introduction to Wavelets. Academic Press, 1992, 264 p.

14. Smolentsev N. K. *Wavelet analiz v Matlab* [Wavelet Analysis in MATLAB]. 3rd ed. Moscow, DMK, 2010, 448 p. (In Russ.)

15. Donoho D. L., Johnstone J. M. Minimax Estimation via Wavelet Shrinkage. Annals of Statistics. 1998, vol. 26, no. 3, pp. 879–921. doi: 10.1214/aos/1024691081

Information about the authors

Alexander M. Boronakhin, Dr Sci. (Eng.) (2013), Professor (2020) of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 120 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: AMBoronahin@etu.ru

Alexandra V. Bolshakova, Master in instrumentation engineering (2019), Assistant Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: rail track diagnostics; vibration analysis; inertial navigation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: avbolshakova@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9294-8338>

Dmitry M. Klionskiy, Cand. Sci. (2013), Associate Professor (2017) Associate Professor of the Department of Information Systems and Department of Software Engineering and Computer Applications of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing; vibrational signal processing; mathematical and computer modelling.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: klio2003@list.ru

Daniil Yu. Larionov, Cand. Sci. (2016) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: development of integrated inertial technologies for dynamic monitoring of the rail track to ensure the safety of rail traffic.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: lariondan@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6722-9211>

Roman V. Shalymov, Cand. Sci. (2014) Associate Professor of the Department of Laser Measurement and Navigation Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 70 scientific publications. Area of expertise: inertial navigation systems; data processing; gyroscopic devices; rail track diagnostics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197002, Russia
E-mail: rvshalymov@etu.ru