

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ПОМЕХ НА МАГНИТНЫХ И ВИХРЕТОКОВЫХ ДЕФЕКТОГРАММАХ

Аннотация. В данной работе рассматривается задача подавления периодических помех на магнитных и вихретоковых дефектограммах. Для решения задачи предложены 4 метода: метод подавления, метод Савицкого-Голея, метод спектрального вычитания и пороговая обработка вейвлет-коэффициентов. После сравнения данных методов лучшим для решения поставленной задачи оказался метод спектрального вычитания.

Ключевые слова: магнитная и вихретоковая дефектоскопия, периодические помехи, метод накопления, метод Савицкого-Голея, метод спектрального вычитания, вейвлет-анализ.

Введение. Отслеживание состояния железнодорожных путей может осуществляться различными методами. Одним из способов является магнитная и вихретоковая дефектоскопия. Полученные дефектоскопами сигналы нуждаются в анализе, то есть в выявлении в большом массиве данных элементов, указывающих на дефекты рельсов, на фоне всевозможных помех и сигналов от конструктивных отражателей [1].

Для обнаружения полезных сигналов на дефектограммах требуется определять пороговый уровень шума рельсов, который разнится от одного участка дефектограммы к другому [2]. Задача осложняется наложением на сигнал периодических помех, которые искажают реальные значения амплитуд сигнала.

Как правило полезные сигналы на дефектограммах имеют непериодический характер. Поэтому периодичность можно считать главной характеристикой помехи. Пример фрагмента вихретоковой дефектограммы с периодическими помехами представлен на рис. 1.

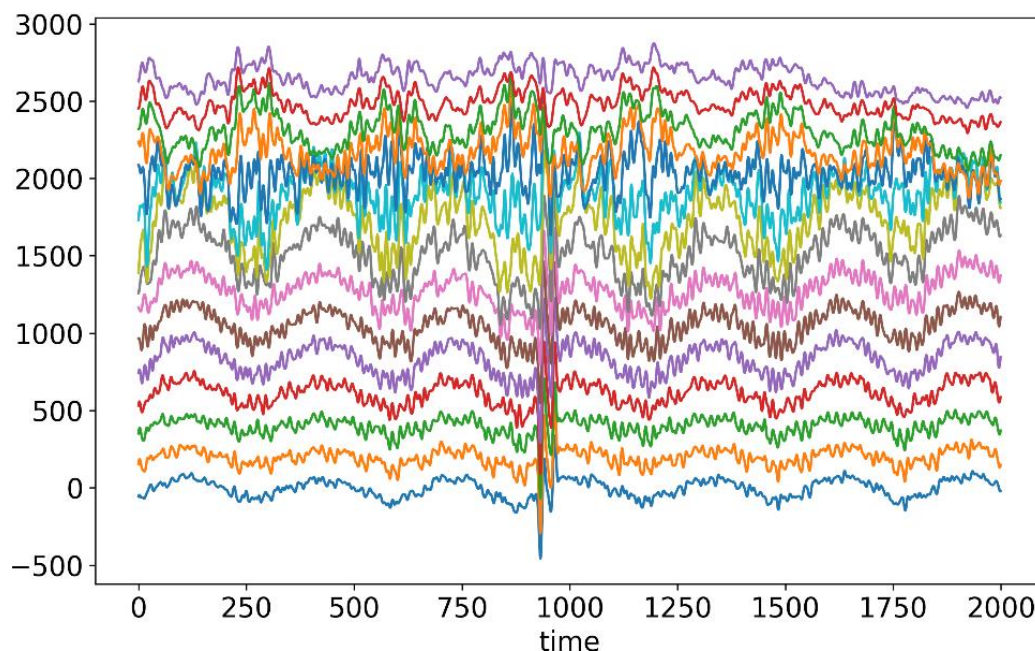


Рис. 1. Периодические помехи на дефектограмме

Материалы и методы. В этой работе рассматриваются различные методы подавления периодических помех, возникающих в магнитных и вихретоковых дефектограммах. Для сравнения и оценки эффективности каждого из рассматриваемых методов считаются следующие характеристики:

- MSE — среднеквадратическое отклонение нового сигнала от исходного. Чем меньше значение MSE, тем меньше сигналы отличаются друг от друга.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(s_{new}(i) - s_{orig}(i) \right)^2. \quad (1)$$

- NCC — корреляция между новым и исходным сигналами. Чем NCC ближе к 1, тем выше корреляция между сигналами [3].

$$NCC = \frac{\sum_{i=1}^N s_{orig}(i) \cdot s_{new}(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N s_{orig}^2(i) \sum_{i=1}^N s_{new}^2(i)}}. \quad (2)$$

- PRD — это метрика искажений, которая часто используется для оценки алгоритмов подавления помех в сигнале. Чем меньше значение PRD, тем преобразованный сигнал более похож на исходный [4].

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(s_{new}(i) - s_{orig}(i) \right)^2}{\sum_{i=1}^N s_{orig}^2(i)}} \cdot 100. \quad (3)$$

- AAD (Absolute Autocorrelation Deviation) — введенная нами метрика для сравнения периодичности нового сигнала с периодичностью исходного. Периодичность определяется через функцию автокорреляции. Чем больше значение AAD, тем менее периодичным стал новый сигнал по сравнению с исходным.

$$AAD = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| autocorrelation_{orig}(i) \right| - \left| autocorrelation_{new}(i) \right|. \quad (4)$$

Главным подходом для подавления периодических помех в магнитных и вихретоковых дефектограммах является использование аддитивной природы помех. Основная природа помех — электромагнитные наводки от оборудования, сопровождающего дефектоскоп, и внешних источников электромагнитного излучения. Все это внешнее по отношению к рельсу и к системе дефектоскопа воздействие. Поэтому можно считать, что периодические помехи p прибавляются к чистому сигналу s_{clear} и получается сигнал s_{orig} :

$$s_{orig}(i) = s_{clear}(i) + p(i). \quad (5)$$

В след за [2] полагаем, что полезные сигналы составляют менее 10 % исходных данных, поэтому для больших данных s_{clear} можно воспринимать как шум n .

$$s_{orig}(i) = n(i) + p(i). \quad (6)$$

При таком упрощении задачи мы можем применять существующие методы шумоподавления сигнала, чтобы вычислять функцию p . В дальнейшем, вычитая полученную оценку p из исходного сигнала s_{orig} , будем приближенно получать искомую функцию s_{clear} .

Метод накопления. Для нахождения функции p из формулы (6) можно использовать метод накопления, основанный на том, что исходной сигнал s_{orig} раскладывается на сумму

периодической и шумовой составляющих [5]. Для точки i сформируем множество точек $\{i, i + T, i + 2T, \dots, i + KT\}$, где T — период функции s_{orig} , тогда будет справедливым следующее

$$\frac{1}{K} \sum_{T=0}^K s_{orig}(i + T) \stackrel{K \rightarrow \infty}{\approx} p(i). \quad (7)$$

Чистый сигнал s_{clear} может быть найден как

$$s_{clear}(i) = s_{orig}(i) - \frac{1}{K} \sum_{T=0}^K s_{orig}(i + T). \quad (8)$$

Метод скользящего среднего (Савицкого-Голея). Одним из наиболее простых методов шумоподавления является метод скользящего среднего, основанный на замене равных участков сигнала на подсчитанные на них средние значения. В данной работе используется наилучший метод, основанный на скользящем среднем, — метод Савицкого-Голея [6].

Пользуясь тем, что математическое ожидание чистого шума равно 0, из формулы (6) получим

$$Ms_{orig} = Mn + Mp = 0 + Mp = Mp. \quad (9)$$

Таким образом, вычитая из исходного сигнала s_{orig} его математическое ожидание, мы будем вычитать математическое ожидание помех.

$$s_{clear} \approx s_{orig} - Ms_{orig}. \quad (10)$$

Спектральное вычитание. Данный метод широко применяется на практике и имеет множество модернизаций [3, 7]. Он базируется на разложении сигнала в спектр с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и основан на предположении, что спектр мощности $|s_{orig}|^2$ функции s_{orig} является суммой спектров мощности чистого сигнала $|s_{clear}|^2$ и помех $|P|^2$. Тогда, если известны амплитудный и фазовый спектр P , их можно вычесть из соответствующих спектров s_{orig} и, применив обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ), получить чистый сигнал s_{clear} .

В нашем случае задача является более простой. Помехи определяются только первыми гармониками исходного сигнала, которые, в то же время, не присутствуют в полезных сигналах. Поэтому спектр $P(\omega)$ можно считать совпадающим с $s_{orig}(\omega)$ для $\omega \leq M$ и равным 0 для $\omega > M$. Задача состоит в аккуратном подборе числа M . Сигнал, очищенный от помех, можно вычислить следующим образом

$$s_{clear} = s_{orig} - \text{ОДПФ}(s_{orig}(\omega)), \omega \leq M. \quad (11)$$

Пороговая обработка вейвлет-коэффициентов. В данной работе применяется целочисленное статическое вейвлет-преобразование Добеши 10-го порядка (SWT db10). Использование статического преобразования вместо классического дискретного (DWT) обусловлено тем, что DWT не обладает трансляционной инвариантностью, т. е. DWT, в отличие от SWT, изменяет частоту дискретизации сигнала на каждом новом уровне и, соответственно, происходит потеря данных [8].

При вейвлет-преобразовании используется та же идея, что и при спектральном вычитании. Вейвлет-разложение представляет сигнал через вейвлет-функции с аппроксимирующими $c_{k,i}$ и детализирующими $d_{k,j}$ коэффициентами для каждого уровня k и $i, j \in \overline{1, 10}$.

Разложение по аппроксимирующим коэффициентам образует низкочастотную составляющую исходного сигнала s_{orig} , а разложение по детализирующим коэффициентам — высокочастотную составляющую. Помехи определяются низкочастотной составляющей исходного сигнала. Поэтому, чтобы очистить сигнал от помех, необходимо удалить низкочастотную составляющую.

Для этого применяется простейший вариант пороговой обработки, но, в отличие от классического подхода, когда требуется подавить шум [9], изменяются не детализирующие, а аппроксимирующие коэффициенты. Обратим аппроксимирующие коэффициенты старшего уровня K в ноль и выполним обратное вейвлет-преобразование (ISWT):

$$s_{clear} = ISWT(SWT(s_{orig})\{c_{Ki} = 0, \forall i \in \overline{1,10}\}). \quad (12)$$

Результаты. Посчитаем метрики (1), (2), (3) и (4) для описанных выше методов. Пример вычисления метрик и применения методов приведен на рис. 2 и табл. 1.

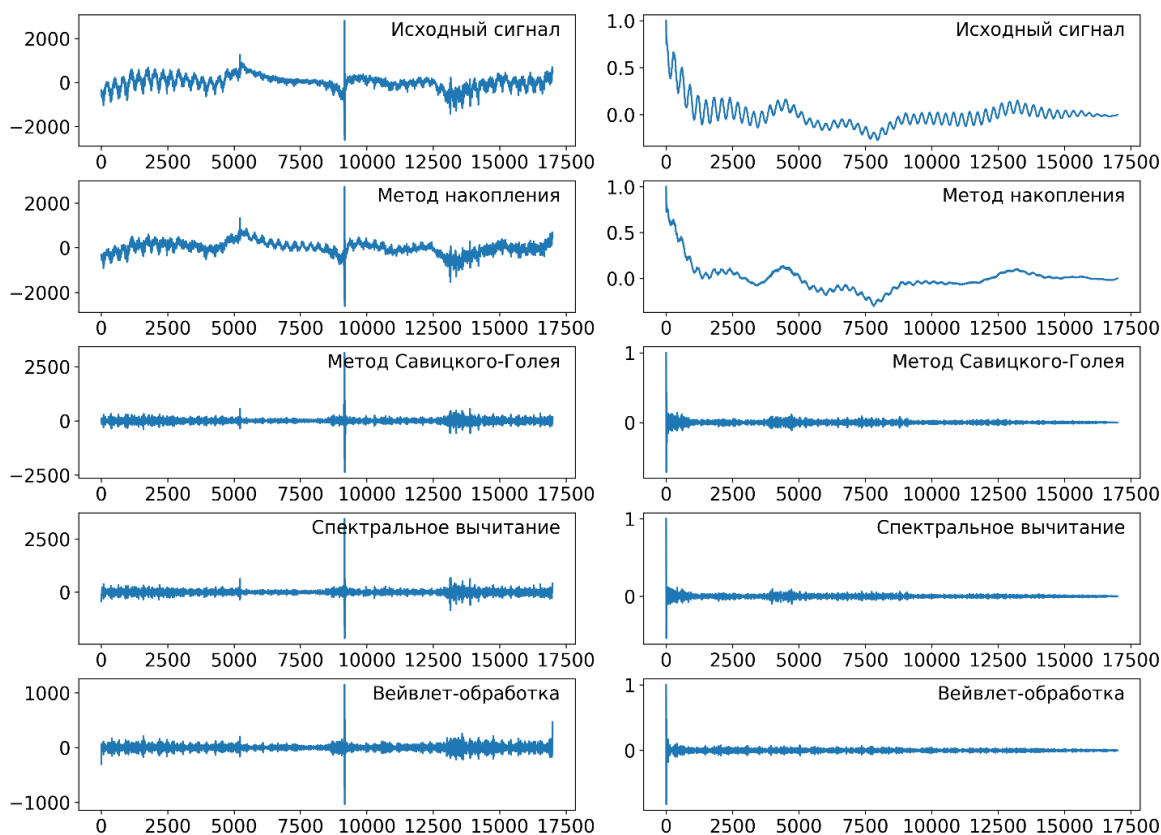


Рис. 2. Сигнал (слева); автокорреляция сигнала (справа)

Таблица 1

Метрики для разных методов подавления помех

Метрики	Метод накопления	Метод Савицкого-Голея	Спектральное вычитание	Вейвлет-обработка
MSE	12347.595765	80114.30259	78249.15959	87116.39312
NCC	0.93112	0.37027	0.39637	0.26896
PRD	36.47026	92.89722	91.80948	96.87185
AAD	-0.00169	0.07029	0.07459	0.07356

Метод накопления оказался совершенно нерелевантным для данной задачи. Хотя метрики MSE, NCC и PRD говорят, что данный метод не добавляет новых шумов и оказывается наиболее близким к исходному сигналу, он практически не устраняет периодические помехи, о чем свидетельствует метрика AAD, которая в некоторых случаях оказывается даже отрицательной. Это означает, что метод накопления может не только не устранять периодичность в сигнале, но добавлять ее, т. е. вместо устранения помех еще больше искажать сигнал.

Главная проблема метода накопления состоит в том, что он требует указания единого периода для функции s_{orig} , тогда как s_{orig} на одном участке дефектограммы может быть представлена не одной периодической функцией (или их суммой), а целым набором последовательных периодических функций со своими периодами.

Метод Савицкого-Голея, спектрального вычитания и пороговой обработки вейвлет-коэффициентов имеют близкие друг к другу метрики. Тем не менее, спектральное вычитание имеет среди них ряд преимуществ.

Во-первых, при спектральном вычитании преобразованный сигнал оказывается всегда более близким к исходному сигналу. Об этом свидетельствуют наименьшие по сравнению с другими методами значения MSE и PRD и наибольшая корреляция NCC.

Во-вторых, для участков сигнала, содержащих ярко выраженные периодические помехи, спектральное вычитание имеет наибольшее по сравнению с остальными методами значение AAD, то есть данный метод лучше остальных устраняет периодичность в сигнале. Для участков, где помехи малозаметны, спектральное вычитание по величине AAD может уступать вейвлет-обработке.

Пороговая обработка вейвлет-коэффициентов имеет наибольшие среди всех методов значения метрик MSE и PRD, а также наименьшую корреляцию с исходным сигналом NCC. Это означает, что вейвлет-обработка вносит наибольшее по сравнению с остальными методами число искажений в сигнал.

Заключение. Таким образом, среди описанных методов подавления периодических помех на магнитных и вихретоковых дефектограммах лучшим оказывается метод спектрального вычитания. Методы Савицкого-Голея и пороговой обработки вейвлет-коэффициентов успешно справляются с задачей, хоть и уступают спектральному вычитанию. Тогда как метод подавления оказывается совершенно не применим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 2. Расшифровка дефектограмм / А.А. Марков, Е.А. Кузнецова. — СПб.: Ультра Принт, 2014. — 332 с. — Текст: непосредственный.
2. Об определении уровня полезных сигналов при расшифровке магнитных и вихретоковых дефектограмм / Е.В. Кузьмин, О.Е. Горбунов, П.О. Плотников, В.А. Тюкин. — Текст: непосредственный // Моделирование и анализ информационных систем. — 2017. — Т. 24, № 6. — С. 760-771.
3. Liu Q. An Improved Spectral Subtraction Method for Eliminating Additive Noise in Condition Monitoring System Using Fiber Bragg Grating Sensors / Q. Liu, Y. Yu, B. S. Han, W. Zhou. — DOI 10.3390/s24020443. — Text: Electronic // Sensors. — 2024. — Vol. 24 (2). — P. 443. — URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/2/443> (Access Date: 19.04.2024).
4. Performance Assessment of Discrete Wavelet Transform for De-Noising of FBG Sensors Signals Embedded in Asphalt Pavement / A. Golmohammadi, N. Hasheminejad, D. Hernando [et al.]. — DOI

- 10.1016/j.yofte.2023.103596. — Text: Electronic // Optical Fiber Technology. — 2024. — Vol. 82 (January). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520023003772?via%3Dihub> (Access Date: 19.04.2024).
5. Качанов К.В. Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / К.В. Качанов. — М.: МЭИ, 2014. — 220 с. — Текст: непосредственный.
 6. Каламбет Ю.А. Фильтрация шумов. Сравнительный анализ методов / Ю.А. Каламбет, Ю.П. Козьмин, А.С. Самохин. — Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Аналитика». — 2017. — Вып. 5. — С. 88-101.
 7. Kamath S.D. A Multi-Band Spectral Subtraction Method for Enhancing Speech Corrupted by Colored Noise / S.D. Kamath, P.C. Loizou. — Text: Electronic // 2002 IEEE ICASSP. — Minneapolis, 2002. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5745591> (Access date: 20.04.2024).
 8. Kompella K.C.D. Bearing fault detection in a 3 phase induction motor using stator current frequency spectral subtraction with various wavelet decomposition techniques / K.C.D. Kompella, M.V.G. Rao, R.S. Rao. — Text: Direct // Ain Shams Engineering Journal. — 2018. — Vol. 9, Issue 4. — P. 2427-2439.
 9. Московский С.Б. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет-преобразования / С.Б. Московский, А.Н. Сергеев, Н.А. Лалина. — Текст: электронный // Universum: Технические науки. — 2015. — Т. 2, № 15. — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/1958> (Access date: 22.04.2024).