

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117>

МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА

Научная статья

Хусенов Д.Н.^{1,*}, Алексеев В.М.², Кузнецов В.И.³

¹ORCID : 0009-0003-4178-6935;

^{1,2} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (d.husenov[at]inbox.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается модель идентификации состояния подвижного состава при его движении на основе оптического сенсора. Актуальность исследования обусловлена необходимостью точного определения местоположения и состояния движущихся объектов на железнодорожной инфраструктуре, особенно в условиях высокоскоростного движения. В данной работе для контроля целостности состава и оценки состояния инфраструктуры впереди движущегося поезда предложен метод использования оптического сенсора, расположенного вдоль железнодорожной инфраструктуры. Основное внимание уделено анализу сигналов, поступающих с оптического сенсора, и их обработке с использованием нетрадиционных подходов, таких как нелинейная фильтрация и мультиплексирование с разделением по длинам волн (WDM). Разработана математическая модель, позволяющая оценить достоверность контроля проезда колесных пар и определить теоретические основы для модели контроля состояния подвижного состава с использованием технологии WDM.

В работе также рассмотрены вопросы влияния помех на достоверность модели и предложены методы повышения точности определения местоположения и состояния состава. Проведен анализ различных способов контроля местоположения и целостности подвижного состава, включая использование точечных датчиков и сенсорных оптических кабелей. Результаты исследования показали, что предложенная модель позволяет эффективно контролировать целостность состава и оценивать состояние инфраструктуры, что особенно важно при реализации высокоскоростного движения. Разработанные методы и модели могут быть использованы для повышения безопасности и надежности железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: оптический сенсор, подвижной состав, высокоскоростное движение, целостность состава, мультиплексирование с разделением по длинам волн (WDM), нелинейная фильтрация, контроль местоположения, обработка сигналов, достоверность модели, железнодорожная инфраструктура.

MODEL OF ROLLING STOCK STATE IDENTIFICATION DURING ITS MOVEMENT ON THE BASIS OF OPTICAL SENSOR

Research article

Khusenov D.N.^{1,*}, Alekseev V.M.², Kuznetsov V.I.³

¹ORCID : 0009-0003-4178-6935;

^{1,2} Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

³ Scientific Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (d.husenov[at]inbox.ru)

Abstract

This work examines the model of identification of the state of rolling stock during its movement on the basis of an optical sensor. The relevance of the study is due to the necessity to accurately determine the location and condition of moving objects on the railway infrastructure, especially in high-speed traffic. In this paper, a method of using an optical sensor located along the railway infrastructure is proposed to monitor the integrity of the train and evaluate the condition of the infrastructure ahead of a moving train. The focus is on analysing the signals from the optical sensor and processing them using non-traditional approaches such as nonlinear filtering and wavelength division multiplexing (WDM). A mathematical model has been developed to evaluate the reliability of wheel set passage control and to determine the theoretical basis for the model of rolling stock condition control using WDM technology.

The work also discusses the influence of interference on the reliability of the model and suggests methods to improve the accuracy of determining the location and condition of the rolling stock. Various methods of monitoring the location and integrity of rolling stock, including the use of point sensors and sensor optical cables, have been analysed. The results of the research have shown that the proposed model allows to effectively control the integrity of the rolling stock and assess the state of the infrastructure, which is especially important in the implementation of high-speed traffic. The developed methods and models can be used to improve the safety and reliability of railway transport.

Keywords: optical sensor, rolling stock, high-speed traffic, train integrity, wavelength-division multiplexing (WDM), nonlinear filtering, location control, signal processing, model validity, railway infrastructure.

Введение

Одним из наиболее значимых является вопрос определения состояния состава, движущегося на инфраструктуре, и его местоположения. Сигнал, поступающий с оптического сенсора, содержит достаточно много информации. Обработка этой информации с использованием нетрадиционных подходов позволит по-новому решить актуальные вопросы оценки состояния движущихся по инфраструктуре объектов.

Известно, что целостность состава определяется с использованием точечных датчиков, устанавливаемых на пути. При известном количестве вагонов рассчитывается число срабатываний датчика, тем самым подтверждается, что разрыва состава не произошло. В работах [1], [2], [3], [4], [5], [6] проведен анализ различных способов контроля местоположения подвижного состава и его целостности, включая точечные датчики, срабатывающие при проезде колесных пар. Делается вывод о целесообразности контроля точечными датчиками на подходах к станциям. Однако задача определения целостности состава приобретает большую актуальность в связи с реализацией высокоскоростного движения. Это связано прежде всего с переходом на технологию управления с подвижными блок-участками, когда тормозной путь рассчитывается на контроллере локомотива с учетом сложившейся ситуации впереди поезда (при этом необходима проверка целостности состава). С этой точки зрения контроль целостности состава и его местоположение на инфраструктуре – важные составляющие процесса управления. Точечные датчики дают информацию о состоянии состава в месте их размещения. При использовании высокоскоростного движения необходимо не только знать, где находится состав, но и оценивать состояние инфраструктуры впереди, на большом расстоянии от идущего поезда. Эта задача может быть возложена на сенсор оптический кабель, расположенный вдоль железнодорожной инфраструктуры. Достоинством этого подхода является его способность анализировать по возникающим шумам состояние впереди лежащей на большом расстоянии инфраструктуры независимо от времени суток, состояния погоды и других факторов.

Необходимо отметить, что частота опроса сенсора позволяет с достаточной точностью определять местоположение состава, конкурируя с инерциальными системами, с системами спутниковой навигации, подверженными, как известно, влиянию систем радиоэлектронной борьбы.

Переход к использованию высокоскоростного транспорта (в особенности магнитолевитационного) требует совершенного построения системы управления движением, где не будет использоваться в качестве основного датчика определения местоположения поезда рельсовая цепь.

Достоверность определения проезда состава с использованием оптического сенсора зависит от помех, в частности, когда присутствует максимальный уровень помех при проезде двух встречно идущих составов. Модель, реализованная на использовании одного распределенного сенсора (рефлектометра), не точно оценивает данную ситуацию, а это ведет к тому, что достоверность существенно снижается и использовать данное техническое решение не представляется возможным. В этой связи предложен другой подход, основанный на использовании технологии мультиплексирования с разделением по длинам волн (WDM).

Цель работы – оценить достоверность контроля проезда колесных пар с использованием технического решения без технологии WDM и разработать теоретические основы для модели контроля состояния подвижного состава с использованием технологии WDM.

Модель контроля проследования колесных пар в составе

Рассмотрим сигнал, поступающий с сенсорного датчика от движущегося состава. Сигнал дискретен по времени частота 0.0004 (2500 Гц). Матрица $n \times n$ по горизонтали продолжительность считывания $n \times \Delta t$ количество отсчетов с $\Delta t = 0,000001$ с, по вертикали продолжительность снятия отсчетов дискретностью 0,004 с.

Измеряемые значения нормализуем с использованием $\min - \max$ нормализацией:

$$u_t = \frac{u_t - \min(u_t)}{\max(u_t) - \min(u_t)} \quad (1)$$

где:

$\min(u_t)$ – минимальное значение u_t в рассматриваемом интервале;

$\max(u_t)$ – максимальное значение u_t в том же интервале.

Все значения u с рефлектометра будут находиться в интервале от 0 до 1.

Для оценки проезда колесных пар проведем нелинейную фильтрацию сигнала – экспандирование. Фильтрация необходима для масштабирования сигнала в области больших значений амплитуд сигналов с целью более четкого представления картины воздействия колебаний на сенсор. Это осуществляется с использованием формулы $u = u^2$.

Рассмотрим сигнал от подвижного состава, получаемый при проезде колесных пар. Определяем среднее значение сигнала на интервалах s_j

$$\bar{u}_{s_j} = (1/n) \times \sum_i^n u_i \quad (2)$$

где $i = 1, \bar{n}, n$ определяется количеством отсчетов в матрице на принятом интервале.

При скорости 360 км/ч ошибка определения локации колеса при соседних отсчетах 4 см. Это расстояние, проходимое колесом между двумя измерениями с частотой 2500 Гц. Рефлектометр измеряет сигнал с сенсора частотой до 100 мГц. Это соответствует точности измерения 4 мм при длине участка 40 км. Выбираем $n = 10$. Рассчитываем средние значения по всей длине состава. Матрица свертки 100×1 . Превышения среднего значения в 1,2 раза свидетельствует о проезде колеса в точке локации пути.

При проезде колесной пары координаты \bar{s}_j на инфраструктуре в ближайшей области сенсора возникают большие по амплитуде колебания. Через расстояние l_k между колесными парами присутствует максимальный сигнал от второй колесной пары. Находим максимальные величины амплитуды в этих областях, показанных на рисунке 1 – это $U_{\max 1}, U_{\max 2}$. Строим через эти точки прямую u_l , решая систему:

$$U_{\max 1} = a_0^1 + a_1^1 \times \bar{s}_1 \tag{3}$$

$$U_{\max 2} = a_0^1 + a_1^1 \times \bar{s}_2$$

где:

a_0^1, a_1^1 – коэффициенты уравнения;
 \bar{s}_1, \bar{s}_2 – точки локации на инфраструктуре.

Получаем уравнение прямой u_1 :

$$u_1 = a_0^1 + a_1^1 \times \bar{s} \tag{4}$$

Находим точку с минимальным значением амплитуды U_{\min} . Далее строим две прямые проходящие через точки $U_{\max 1}, U_{\min}$ и $U_{\max 2}, U_{\min}$ аналогично формуле (1), получаем уравнения прямых u_2, u_3 :

$$u_2 = a_0^2 + a_1^2 \times \bar{s}$$

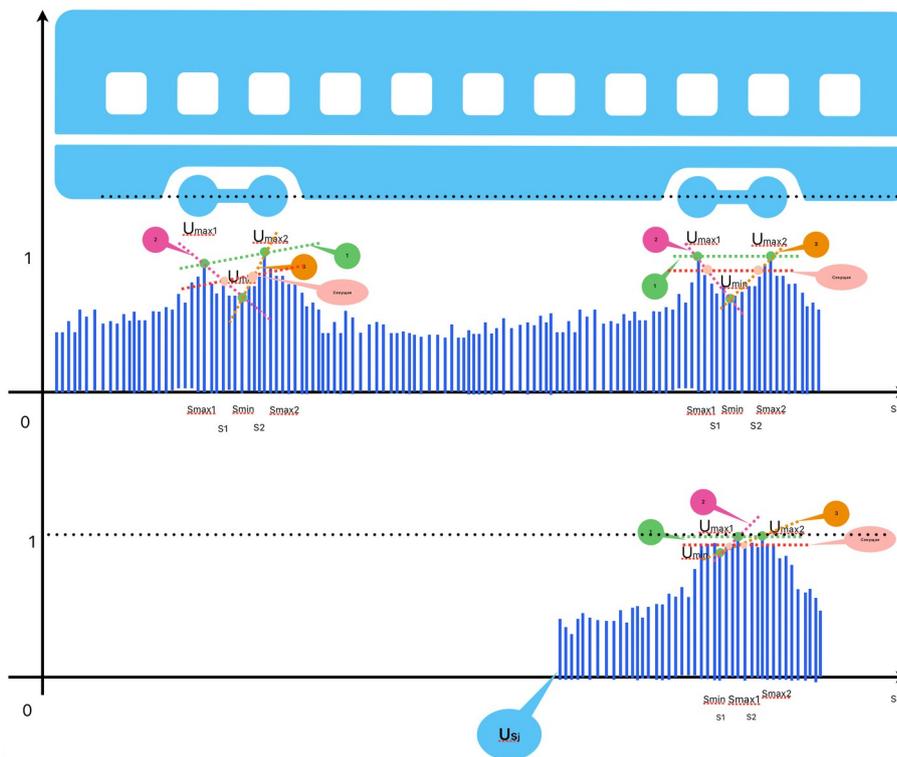


Рисунок 1 - К модели определение проезда колесных пар
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.1>

$$u_3 = a_0^3 + a_1^3 \times \bar{s}. \tag{5}$$

По сути, это преобразование представляет линеаризацию участка характеристики между проезжающими колесами и формирование изображения с помощью двух прямых, характеризующих возникающую зависимость между сигналами при проезде колесных пар.

Строим секущую параллельную прямой $u_s \parallel u_1$:

$$u_s = (a_0^1 - \delta) + a_1^1 \times \bar{s} \tag{6}$$

где δ – смещение секущей u_s , выбираем $\delta = (U_{\max} - U_{\min}) / 2$.

Определяем две точки пересечения секущей u_s с прямыми u_2, u_3 решая системы:

- точка пересечения секуще u_s и прямой u_2

$$u_s = (a_0^1 - \delta) + a_1^1 \times \bar{s} \tag{7}$$

$$u_2 = a_0^2 + a_1^2 \times \bar{s}$$

получаем точку s_3 ;

- точка пересечения секуще u_s и прямой u_3

$$u_s = (a_0^1 - \delta) + a_1^1 \times \bar{s} \tag{8}$$

$$u_3 = a_0^3 + a_1^3 \times \bar{s}$$

получаем точку s_4 .

Полученные точки показывают, что определены колесные пары, проследовавшие точки локации s_1, s_2 и s_3, s_4 .

Далее, зная число вагонов в составе n_c , определяем число колесных пар, которые находятся на заданном расстоянии друг от друга (рисунок 2). На рисунке 2 l_1, l_2, l_3 зависят от типа подвижного состава, в случае разрыва состава изменится параметр l_2 — расстояние между колесными парами в соседних вагонах. Таким образом, обеспечивается контроль целостности состава.

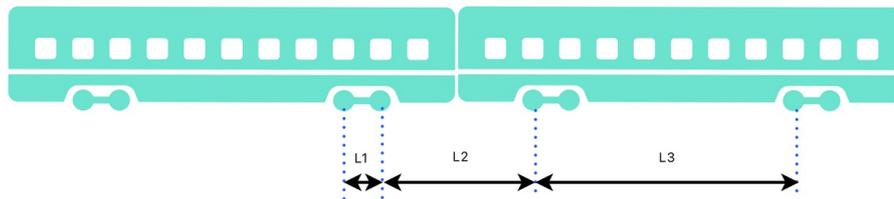


Рисунок 2 - Размеры расстояний колесных пар в вагоне
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.2>

Примечание: l_1 — расстояние между колесами тележки; l_2 — расстояние между колесными парами соседних вагонов по всему составу; l_3 — расстояние между тележками вагона

Поставим задачу определения достоверности модели определения целостности состава. Обратимся к рисунку 3. Модель будет работоспособна, если помехи, действующие на максимальные и минимальные значения амплитуды при проезде колесных пар, не приводят к тому, что сигнал от максимальной амплитуды становится ниже, чем сигнал, соответствующий секущей U_s , а минимальный сигнал становится выше по уровню, нежели сигнал от секущей U_s :

$$U_{\max 1,2} - U_n \leq U_s \tag{9}$$

$$U_{\min} + U_n \geq U_s$$

где U_s — сигнал помехи.

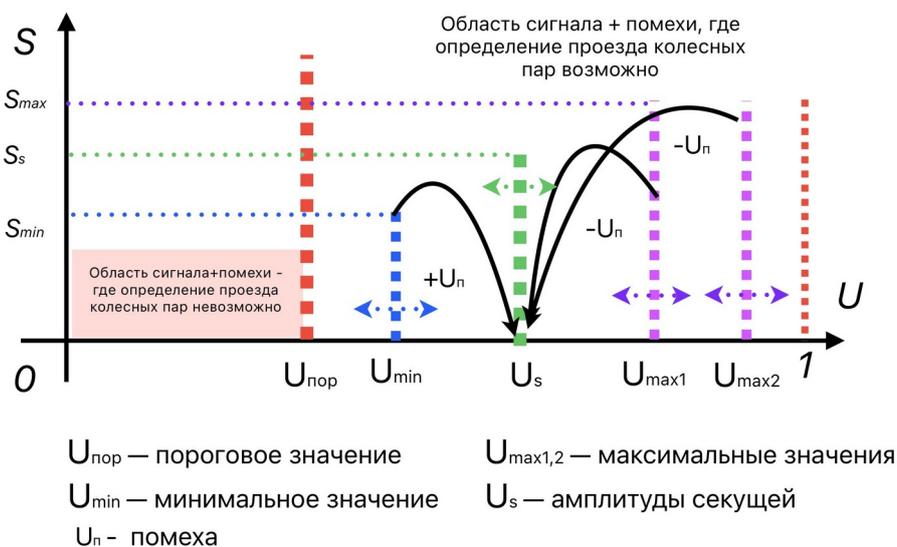


Рисунок 3 - Воздействие помех для определения проезда колесных пар
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.3>

На рисунке 3 отображена область, где из-за действия помех определение проезда колесных пар невозможно. Величина порогового значения $U_{\text{пор}}$, ниже которого невозможно определить проезд колесных пар, вычисляется:

$$U_{\text{пор}} = 1/m \times \sum_{j=1}^m U_j, \tag{10}$$

где U_j — значения амплитуд сигнала и помехи, измеренные по всей длине состава. Значение достоверности P_d модели определяется в соответствии с [7]:

$$P_d = 1 - (P_1 + P_2), \quad (11)$$

где $P_{1,2}$ – вероятности ошибок первого и второго рода или вероятности ложного и необнаруженного отказа модели. Величина вероятности ошибки первого и второго рода определяется в соответствии с рисунком 3 и вычисляется:

$$P_1 + P_2 = \left(\int_{u_{\min} - u_{\text{нор}}}^{u_{\min}} p(u_{\max}) \times du \right) \times \int_{(u_{\max} - u_{\min})/2}^1 p(u_n) \times du_n + \\ + \left(\int_{u_{\max} - u_{\min}}^1 p(u_{\min}) \times du \right) \times \int_{(u_{\max} - u_{\min})/2}^1 p(u_n) \times du_n, \quad (12)$$

где $p(u_{\max}), p(u_{\min}), p(u_n)$ – плотности распределения сигналов максимальной и минимальной амплитуд и помехи.

Величина 1 в верхнем пределе интегралов соответствует нормированной величине амплитуды. Обработка сигналов и помехи по критерию X^2 – Пирсона [8], поступающих с рефлектометра, показала, что они имеют нормальное распределение.

Плотность нормального распределения u_{\max} и u_{\min} сигналов [8], [9]

$$p(u_{\max, \min}) = \frac{1}{\sigma \times \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(u - U_m)^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

где σ – дисперсия сигнала.

Плотность распределения помехи представляет сигнал нулевым средним $U_m = 0$ [9]

$$p(u_n) = \frac{1}{\sigma \times \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{u^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

где σ – дисперсия сигнала.

Решение (2) осуществляем через замену экспоненты рядом Маклорена (Тейлора) [10], получаем

$$Z = \frac{-(u)^2}{2\sigma}; dz = -\frac{-(u)}{\sigma} \quad (15)$$

Подставим (5), (4), (3) в (2) получим

$$P_1 + P_2 = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times \left(\int_a^b e^z \times dz \right) \times \left(\int_c^d e^z \times dz \right) + \\ + \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times \left(\int_e^f e^z \times dz \right) \times \left(\int_c^d e^z \times dz \right), \quad (16)$$

где a, b, c, d, e, f – новые пределы интегрирования:

$$a = \frac{-(u_{\min} - u_{\text{нор}})^2}{2\sigma}; b = \frac{-(u_{\min})^2}{2\sigma}; c = \frac{-(u_{\min} - u_{\text{нор}})^2}{4\sigma}; d = f = 1; \\ e = \frac{-(u_{\max} - u_{\min})^2}{2\sigma}. \quad (17)$$

Заменяя $e^z = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{z^j}{j!}$ интегрируем и применяя формулу Коши [13] для перемножения проинтегрированных рядов получаем:

$$P_1 + P_2 = \frac{1}{\pi\sigma^2} \times \sum_{k=0}^n \left(\frac{1}{(k+1) \times k!} \times \frac{1}{(n-k-1) \times (n-k)!} \times z^k \right) \quad (18)$$

где $Z = \frac{-(u-U_m)^2}{2\sigma}$, n – количество членов определяющих точность вычисления интегралов.

Результаты расчета достоверности приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчета достоверности
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.4>

$P_d = 1 - (P_1 + P_2)$	σ	U_{max}	U_{min}	Примечание
0,991	2	0,8	0,5	
0,997	4	0,8	0,5	
0,994	5	0,8	0,5	
0,62	2	0,9	0,9	Проезд состава по соседнему пути
0,75	2	0,86	0,82	Проезд переезда

При проезде по соседнему пути поезда наблюдается сильное шумовое воздействие, которое приводит к невозможности определения прохода колесной пары. Почти аналогичная картина наблюдается при проезде поездом переезда, если на нем стоят автомобили с включенными двигателями. Модель определения прохода колесных пар работоспособна только при условии отсутствия встречного движения по соседнему пути, а также при проследовании по местам инфраструктуры без большой генерации шума. В сравнении с магнитным датчиком фиксации прохода колеса рассмотренная модель имеет меньшие технические возможности, *так как не может работать при наложении сигнала от двух поездов*.

Дальнейшее развитие метода связано с применением технологии WDM в сенсорном датчике, проложенном вдоль железнодорожной инфраструктуры [12].

Модель сенсора с использованием технологии мультиплексирования с разделением по длинам волн

При использовании технологии мультиплексирования с разделением по длинам волн (Wavelength Division Multiplexing, WDM) в оптических кабелях происходит интерференция световых потоков, обусловленная механическим воздействием на кабель. Это происходит в связи с тем, что механические деформации, такие как изгибы, сжатие или вибрации, изменяют свойства оптического волокна, влияя на распространение световых сигналов.

Физическое объяснение возникновения механизма интерференции. Интерференция световых потоков в WDM-системах возникает из-за изменений фазовых характеристик световых волн при их прохождении через деформированное оптическое волокно. В оптических системах, где используются несколько длин волн, механическое воздействие приводит к следующим эффектам:

- изменение длины пути света: когда оптическое волокно деформируется, длина пути, по которому проходит свет, может изменяться. Это влияет на фазу световых волн, что может привести к изменению условий интерференции между различными длинами волн;

- поляризационные эффекты: механические деформации могут также изменять поляризацию световых волн. В результате разные моды или длины волн могут интерферировать друг с другом, что приводит к искажениям в световых потоках;

- модовые интерференции: в многомодовом волокне механическое воздействие может вызвать смешивание мод, что также ведет к интерференции и появлению новых частот сигналов (четырёхволновое смешение FWM: если в волокне передаются три сигнала с частотами $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, FWM может создавать новые частоты ω_4 , которые удовлетворяют условию: $\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$).

Реакция на механические колебания, создаваемые различными источниками, зависит от ряда факторов, таких как тип и частота колебаний, длины волн, используемые в системе, а также характеристики самого оптического волокна.

Основные аспекты реакции оптического сенсора:

- на колебания, создаваемые поездом, обычно имеют более низкую частоту и большую амплитуду. Такие колебания могут вызывать значительные механические деформации оптического волокна, что приводит к заметным изменениям в фазе и интенсивности сигналов;

- на колебания, создаваемые человеком, обычно имеют более высокую частоту и меньшую амплитуду;

Зависимость реакции оптического сенсора от длины волны (WDM):

- в системе WDM различные длины волн могут по-разному реагировать на одни и те же механические колебания из-за различий в фазовой чувствительности. Это связано с тем, что различные длины волн могут испытывать разные фазовые сдвиги и изменения интенсивности при прохождении через одно и то же деформированное волокно. Более короткие длины волн могут быть более чувствительны к небольшим деформациям, тогда как более длинные волны могут лучше отражать крупные деформации;

Интерференционные эффекты:

- в результате механических колебаний возникает фазовый сдвиг сигналов на различных длинах волн, что приводит к интерференции между этими сигналами. Например, для поезда, создающего сильные низкочастотные колебания, интерференция может быть более выраженной для длин волн, которые лучше чувствительны к низкочастотным деформациям. Для человека, создающего высокочастотные, но менее интенсивные колебания, интерференция будет более заметна на тех длинах волн, которые более чувствительны к высоким частотам;

- эффекты дисперсии и нелинейности: в одномодовом волокне нелинейные эффекты, такие как четырёхволновое смешение (FWM), могут усиливаться при наличии механических воздействий, особенно если используются высокие мощности сигналов. Эти эффекты могут влиять на качество демультиплексирования и приводить к дополнительной интерференции.

Модель реакции сенсора. Допустим, что система DAS использует оптический кабель с WDM и способна измерять изменения фазовых характеристик на нескольких длинах волн одновременно. При воздействии поезда колебания могут привести к следующей реакции:

- на определённой длине волны (например, λ_1) может возникнуть фазовый сдвиг $\Delta\phi_1$, который пропорционален величине деформации ϵ .

- на другой длине волны (например, λ_2) фазовый сдвиг $\Delta\phi_2$ может быть меньше или больше в зависимости от чувствительности этой длины волны к деформации.

Фазовые сдвиги для различных длин волн можно описать следующим образом [12]:

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \cdot \Delta L_i \quad (19)$$

где:

λ_i – длина волны;

ΔL_i – изменение длины волокна для данной длины волны, вызванное механическим воздействием.

Для системы DAS с WDM важно учитывать реакцию разных длин волн на различные типы колебаний. Например:

1) для обнаружения и классификации поездов можно использовать длины волн, которые более чувствительны к низкочастотным и мощным колебаниям;

2) для определения целостности составов, при встречном движении.

3) для обнаружения присутствия человека можно использовать длины волн, чувствительные к высокочастотным и менее интенсивным колебаниям.

Такой подход позволяет отслеживать движение поездов, людей и других объектов в реальном времени, используя преимущества мультиплексирования с разделением по длинам волн.

Предлагаем математическое описание процесса определения параметров движения поезда с использованием фазовых данных осуществить следующим образом. Процесс включает анализ изменений фазового сдвига вдоль оптического кабеля и интерпретацию этих изменений для определения скорости и направления движения поезда.

Оценка фазового сдвига. Фазовые сдвиги в оптическом кабеле могут быть выражены как функция расстояния d и времени t . Пусть $\phi(t, d)$ – это фазовый сдвиг, который регистрируется в точке на расстоянии d от начальной точки и в момент времени t . Свяжем движение поезда с изменением фазы. Когда поезд проходит мимо определённого участка, фаза света изменяется. Можно записать изменение фазы $\Delta\phi$ как разницу фаз между двумя точками d_1 и d_2 : $\Delta\phi(t) = \phi(t, d_2) - \phi(t, d_1)$.

Определим скорость. Чтобы определить скорость поезда, можно использовать временные изменения фазового сдвига. Если поезд проходит между точками d_1 и d_2 , изменение фазы во времени можно использовать для вычисления скорости v . Вычислим время Δt , за которое поезд проходит между двумя точками. Это можно сделать на основе временных меток изменений фаз: $\Delta t = t_2 - t_1$. Если расстояние между точками d_1 и d_2 известно, скорость поезда v вычисляем как: $v = \frac{d_2 - d_1}{\Delta t}$.

Свяжем параметры изменения фазы во времени и по длине через дифференциальные уравнения для фазовых изменений:

$$\frac{\partial\phi(t, d)}{\partial t} = - \frac{\partial\phi(t, d)}{\partial d} \cdot v \quad (20)$$

где $\frac{\partial\phi(t, d)}{\partial t}$ – это изменение фазы во времени, а $\frac{\partial\phi(t, d)}{\partial d}$ – это изменение фазы по длине кабеля. Эта модель позволяет связать фазовые изменения с движением поезда.

Применим ряд Калмогорова-Габор к фазовому сдвигу [13]. Ряд позволяет учитывать нелинейные зависимости фазы от времени и расстояния, моделируя их совместное влияние. В нашем случае функция фазы $\phi(t, d)$ зависит от времени t и расстояния d .

Ее разложение может быть представлено как:

$$\phi(t, d) = \sum_{m, n} A_{mn} P_m(t) Q_n(d), \quad (21)$$

где:

A_{mn} – коэффициенты, учитывающие ковариацию времени и расстояния:

$P_m(t)$ и $Q_n(d)$ – ортогональные функции времени и расстояния соответственно.

Для конкретного применения можно рационально выбрать подходящие ортогональные функции $P_m(t)$ и $Q_n(d)$, например, полиномы или другие базисные функции, которые лучше всего соответствуют физическим условиям задачи. Суть применения многомерного ряда Калмогорова-Габора для анализа фазового сдвига от времени и расстояния состоит в том, что он позволяет провести анализ динамических процессов в оптическом кабеле. Для формализации задачи рассмотрим фазовый сигнал $\phi(t, d)$ как функцию времени t и расстояния d , разложенную через ряд Калмогорова-Габора:

$$\phi(t, d) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \frac{\partial^m P(t)}{\partial t^m} \frac{\partial^n Q(d)}{\partial d^n} \quad (22)$$

где:

A_{mn} – коэффициенты, характеризующие ковариацию временных и пространственных переменных;

$P(t)$ и $Q(d)$ – базисные функции времени и расстояния.

Представим базисные функции через степенной ряд $P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \times t^n$, а $Q(d) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m \times d^m$.

Перемножив ряды по формуле Коши [11], получаем ряд от переменных t и d :

$$\phi(t, d) = \sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k} \quad (23)$$

Далее подставим это разложение в исходное дифференциальное уравнение, связывающее фазу со временем и расстоянием, получим:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k} \right) + v \frac{\partial}{\partial d} \left(\sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k} \right) = 0 \quad (24)$$

Решая это уравнение для каждого члена ряда, можно оценить изменения фазы как функцию времени и расстояния, что позволяет определить такие параметры, как скорость и направление движения поезда, анализируя фазовые сдвиги на каждой λ_i из длин волн задействованных в WDM.

Альтернативным подходом является использование искусственной нейронной сети. Суть подхода состоит в том, что изменения механических параметров оптического сенсора приводит к интерференции волн. В результате получаем множество интерференционных изображений, зависящих от местоположения объектов на инфраструктуре. Каждый объект создает свой спектр механического воздействия на сенсор. В работе разработана модель распространения световых волн и возникновения интерференционных изображений при движении различных объектов по инфраструктуре. Как правило, для моделирования распространения оптических волн используют уравнение Шрёдингера [14] для оптики, аналогичное уравнению Шрёдингера в квантовой механике, описывающее распространение световых волн и учитывающее как линейные, так и нелинейные эффекты. В общем виде оно может быть записано:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(z, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(z, t)}{\partial z^2} + V(z) \Psi(z, t) \quad (25)$$

где:

$\Psi(z, t)$ – комплексная амплитуда волны;

$V(z)$ – потенциальная энергия;

\hbar и m – постоянная Планка и масса.

Это уравнение (11) позволяет анализировать как линейные, так и нелинейные волновые эффекты в оптических материалах. Амплитуду светового поля в уравнении Шрёдингера задаем как комплексную функцию, которая зависит от пространства и времени:

$$\Psi(z, t) = A(z, t) e^{i\phi(z, t)} \quad (26)$$

где:

$A(z, t)$ – амплитуда, зависящая от координаты z и времени t ;

$\phi(z, t)$ – фаза, также зависящая от z и t .

На основе (25, 26, 27) разработана имитационная модель описывающая пути прохождения световых потоков в одномодовом кабеле. Рассмотрены следующие случаи:

- встречное движение составов;
- движение одиночного состава с расцепкой вагонов.

В модели приняты ограничения:

- состав рассматривается точечным, воздействие на сенсор в определенной точке пути;

- механические воздействия задаются частотами грузовыми $\sum_i f_{g_i}; i = 1, 3$, пассажирскими $\sum_i f_{p_i}/1, 5; i = 1, 3$ и пригородными $\sum_i f_{gr_i}/2; i = 1, 3$ составами;

- максимальная деформация сенсора составляет 0,5 мк;
- диаметр сердцевины оптического кабеля 5 мк.

В зависимости от условий задачи амплитуда (12) может быть задана как постоянная величина, или как функция, зависящая от затухания или других параметров.

Решение уравнения Шрёдингера для оптики можно проводить несколькими методами, среди которых выбираем аналитический метод разложения в ряд (ряд Фурье):

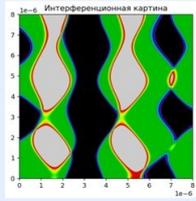
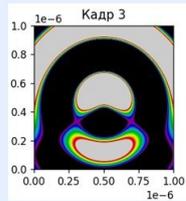
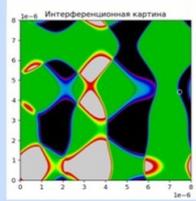
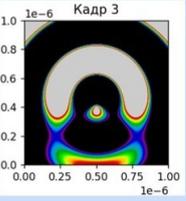
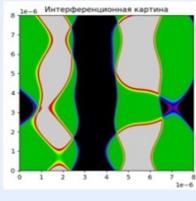
$$\Psi(z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(t) \phi_n(z), \quad (27)$$

где $\phi_n(z)$ – базисные функции ряда Фурье.

Результаты моделирования представлены ниже в таблице 2. Рассмотрен случай встречного движения подвижных составов, а также нахождения одиночного состава.

Таблица 2 - Интерференционные изображения, возникающие при движении подвижных составов навстречу друг другу, и одиночного состава

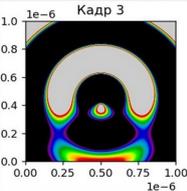
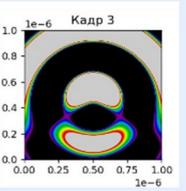
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.5>

Местоположение составов	Интерференционная картина	Местоположение состава	Интерференционная картина
Составы движутся навстречу и находятся на расстоянии 25 км друг от друга		Состав на расстоянии 15 км от станции	
Составы движутся навстречу и находятся на расстоянии 15 км друг от друга		Состав на расстоянии 16 км от станции	
Составы движутся навстречу и находятся на расстоянии 5 км друг от друга			

Смоделировано движение состава и разрыв на расстоянии 16 км от станции. При разрыве изменяется спектральный состав механических колебаний (спектр становится более высокочастотный). Из интерференционных картин (таблица 3) видно резкое изменение интерференционных изображений, что является признаком о аномальности в состоянии подвижного состава.

Таблица 3 - Интерференционные изображения при расцепке состава

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.117.6>

Местоположение составов	Интерференционная картина	Местоположение составов	Интерференционная картина
Расцепка состава при движении на расстоянии 16 км от станции		Нормальное движение состава до момента расцепки на расстоянии 16 км от станции	

Заключение

Математическое описание процесса определения движения поезда с использованием фазовых данных включает моделирование фазовых сдвигов, вычисление скорости и направление на основе анализа временных изменений фаз. Эти методы позволяют определять характеристики движения поезда, используя данные, собранные с оптического кабеля.

Использование многомерного ряда Калмогорова-Габор для описания фазового сдвига в оптическом кабеле позволил связать фазовые изменения со временем и локализацией места проезда составом.

Оптические сенсоры на базе DAS с использованием технологии WDM могут различным образом реагировать на механические колебания, создаваемые различными источниками, такими как поезд или человек. Эта реакция зависит от частоты и амплитуды колебаний, а также от длины волны, используемой в системе. Многоволновые системы позволяют более качественно анализировать и классифицировать различные стадии состояния объектов на инфраструктуре, за счет появления множества признаков, обусловленных множеством световых потоков, реализующих WDM технологию в реальном времени.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Осадчий Г.В. Система диагностики и удаленного мониторинга состояния железнодорожного пути / Г.В. Осадчий, А.А. Лыков // Открытое образование. — 2011. — № 2. — С. 221–222.
- Ефанов Д.В. Применение оптических датчиков в системах управления движением поездов / Д.В. Ефанов, Г.В. Осадчий, В.В. Хорошев // Известия вузов. Приборостроение. — 2019. — Т. 62. — № 4. — С. 364–371. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-364-371.
- Попов П.А. Основные принципы контроля корректности бортовой системы позиционирования средствами железнодорожной автоматики / П.А. Попов, И.Н. Королев, П.Д. Мыльников // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 4. — С. 355–366.
- Никитин А.Б. Результаты исследования технических средств контроля целостности поездов / А.Б. Никитин, И.В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2020. — № 4. — Т. 6. — С. 411–434. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.
- Бахтиярова Е.А. Технология будущего: распределенное акустическое зондирование DAS в режиме реального времени / Е.А. Бахтиярова, Т.О. Чигамбаев, К.М. Сансызбай // Материалы XLI Международной научно-практической конференции КазАТК им. М. Тынышпаева на тему: «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». — Т. 2. — С. 49–54.
- Frauscher Tracking Solutions FTS. — URL: <https://railway-news.com/wp-content/uploads/2018/02/Frauscher-Tracking-Solutions-FTS-EN.pdf> (accessed: 27.12.2023).
- Данилевич С.Б. Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля / С.Б. Данилевич // Системы управления, связи и безопасности. — 2015. — № 4. — С. 171–179.
- Дуплякин В.М. Особенности идентификации нормального закона распределения / В.М. Дуплякин // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. — 2020. — Т. 11. — № 3. — С. 176–183.
- Нормальное распределение // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нормальное_распределение (дата обращения: 09.09.2024).
- Ряд Тейлора // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ряд_Тейлора (дата обращения: 09.09.2024).
- Библиотека по математике. — URL: <http://mathemlib.ru/books/item/f00/s00/z0000019/st029.shtml> (дата обращения: 09.09.2024).
- Трециков В.Н. DWDM системы / В.Н. Трециков, В.Н. Листвин // Радиотехника. — 2021. — С. 420.
- Метод группового учёта аргументов // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_группового_учёта_аргументов (дата обращения: 09.09.2024).
- Уравнение Шрёдингера // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Уравнение_Шрёдингера (дата обращения: 17.11.2024).

Список литературы на английском языке / References in English

- Osadchiy G.V. Sistema diagnostiki i udalennogo monitoringa sostojanija zhelezнодорожного пути [System for diagnostics and remote monitoring of railway track condition] / G.V. Osadchiy, A.A. Lykov // Otkrytoe obrazovanie [Open Education]. — 2011. — № 2. — P. 221–222. [in Russian]
- Efanov D.V. Primenenie opticheskikh datchikov v sistemah upravlenija dvizheniem poezdov [Application of optical sensors in train traffic control systems] / D.V. Efanov, G.V. Osadchiy, V.V. Khoroshev // Izvestija vuzov. Priborostroenie [Proceedings of Universities. Instrument Engineering]. — 2019. — Vol. 62. — № 4. — P. 364–371. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-364-371. [in Russian]

3. Popov P.A. Osnovnye principy kontrolja korrektnosti bortovoj sistemy pozicionirovanija sredstvami zheleznodorozhnoj avtomatiki [Basic principles of onboard positioning system verification using railway automation tools] / P.A. Popov, I.N. Korolev, P.D. Mylnikov // Avtomatika na transporte [Automation in Transport]. — 2015. — Vol. 1. — № 4. — P. 355–366. [in Russian]
4. Nikitin A.B. Rezul'taty issledovanija tehniceskikh sredstv kontrolja celostnosti poezdov [Results of research on technical means of train integrity control] / A.B. Nikitin, I.V. Kushpil // Avtomatika na transporte [Automation in Transport]. — 2020. — № 4. — Vol. 6. — P. 411–434. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434. [in Russian]
5. Bakhtiyarova E.A. Tehnologija budushhego: raspredelennoe akusticheskoe zondirovanie DAS v rezhime real'nogo vremeni [Technology of the future: distributed acoustic sensing (DAS) in real-time mode] / E.A. Bakhtiyarova, T.O. Chigambaev, K.M. Sansyzbay // Materialy XLI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii KazATK im. M. Tynyshpaeva na temu : «Innovacionnye tehnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika» [Proceedings of the XLI International Scientific and Practical Conference of KazATC named after M. Tynyshpaev on the topic : "Innovative Technologies in Transport: Education, Science, Practice"]. — Vol. 2. — P. 49–54. [in Russian]
6. Frauscher Tracking Solutions FTS. — URL: <https://railway-news.com/wp-content/uploads/2018/02/Frauscher-Tracking-Solutions-FTS-EN.pdf> (accessed: 27.12.2023).
7. Danilevich S.B. Dostovernost' rezul'tatov mnogoparametricheskogo izmeritel'nogo kontrolja [Reliability of multiparameter measurement control results] / S.B. Danilevich // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti [Control, Communication, and Security Systems]. — 2015. — № 4. — P. 171–179. [in Russian]
8. Duplyakin V.M. Osobennosti identifikacii normal'nogo zakona raspredelenija [Features of identifying the normal distribution law] / V.M. Duplyakin // Vestnik Samarskogo universiteta. Jekonomika i upravlenie [Bulletin of Samara University. Economics and Management]. — 2020. — Vol. 11. — № 3. — P. 176–183. [in Russian]
9. Normal'noe raspredelenie [Normal distribution] // Wikipedia. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Нормальное_распределение (accessed: 09.09.2024). [in Russian]
10. Rjad Tejlora [Taylor series] // Wikipedia. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ряд_Тейлора (accessed: 09.09.2024). [in Russian]
11. Biblioteka po matematike [Mathematics Library]. — URL: <http://mathemlib.ru/books/item/f00/s00/z0000019/st029.shtml> (accessed: 09.09.2024). [in Russian]
12. Treschikov V.N. DWDM sistemy [DWDM systems] / V.N. Treschikov, V.N. Listvin // Radioelektronika [Radioelectronics]. — 2021. — P. 420. [in Russian]
13. Metod gruppovogo uchjota argumentov [Group method of data handling] // Wikipedia. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_группового_учёта_аргументов (accessed: 09.09.2024). [in Russian]
14. Uravnenie Shrjodingera [Schrödinger equation] // Wikipedia. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Уравнение_Шрёдингера (accessed: 17.11.2024). [in Russian]