

управлением поездов должен содержать автоматизированные средства защиты информации и доверенных программно-аппаратный комплекс системы защиты.

Литература:

1. Баранов Л.А., Иконников С.Е., Ермакова А.Е. Информационная безопасность систем диспетчерского управления на железнодорожном транспорте / Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXXI Международной научной конференции – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2023. – С. 244-249.

2. Иконников С.Е. Создание системы защиты и автоматизация информационной безопасности на объектах критической информационной инфраструктуры / Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции (г. Москва, 30 мая 2024 года). – Москва: РУТ (МИИТ), 2024. – С. 575-578.

3. Иконников С.Е., Ермакова А.Е., Нурждин О.О. Особенности централизованного управления средствами защиты информации / Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции (г. Москва, 30 мая 2024 года). – Москва: РУТ (МИИТ), 2024. – С. 579-583.

---

**Алексеев В.М., Хусенов Д.Н.**

### **Модель распределенного сенсора с использованием технологии многоволоконного мультиплексирования для контроля местоположения подвижного состава**

**Аннотация:** В работе рассматривается решение определения целостности состава поезда и его местоположения на железнодорожной инфраструктуре, что актуально для высокоскоростного движения. Традиционные методы контроля целостности состава, не обеспечивают оценку состояния инфраструктуры на большом расстоянии впереди идущего поезда. В этой связи, предлагается использование оптического сенсора,

расположенного вдоль железнодорожной инфраструктуры, для решения этой задачи. Сенсор позволяет анализировать состояние инфраструктуры на большом расстоянии, независимо от времени суток и погодных условий, и с высокой точностью определять местоположение состава. Однако, при проезде двух встречных составов, точность определения проезда состава с использованием одного распределенного сенсора снижается. Для решения идентификации при встречном движении предлагается использовать технологию мультиплексирования с разделением по длинам волн DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Цель работы – разработать теоретические основы для модели контроля проезда колесных пар с использованием технологии WDM.

**Ключевые слова:** целостность состава, местоположение поезда, высокоскоростное движение, мультиплексирование, DWDM, достоверность, контроль проезда колесных пар, встречные составы, железнодорожная инфраструктура

### **Актуальность**

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

Известно, что целостность состава определяется с использованием точечных датчиков, устанавливаемых на пути. Зная число вагонов, рассчитывается число срабатываний датчика, тем самым подтверждая, что разрыва состава не произошло. В работах [1-6] проведен анализ различных способов контроля местоположения подвижного состава и его целостности, включая точечные датчики, срабатывающие при проезде колесных пар. В работах делаются выводы 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 (нужна проверка целостности состава). С этой точки зрения контроль целостности состава и его местоположение на инфраструктуре важные составляющие процесса контроля. 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 (проникновение посторонних объектов) 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 инфраструктуры на большом расстоянии, 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 влиянию систем радиоэлектронной борьбы.

Переход к использованию высокоскоростного транспорта требует совершенного иного построения системы управления движением, где не будет использоваться рельсовая цепь в качестве основного датчика определения местоположения поезда, поскольку она нацеливается на выполнение функции – контроля целостности рельсов, что является важным в обеспечении безопасности движения.

Существенно отметить, что достоверность определения проезда состава с использованием оптического сенсора, зависит от помех, в частности, при проезде двух встречно идущих составов, когда присутствует максимальный уровень помех. Модель, реализованная на использовании одного распределенного сенсора, 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

новый подход, основанный на использовании технологии мультиплексирования с разделением по длинам волн (dwdm) [7].

Цель работы – разработать теоретические основы для модели контроля проезда колесных пар с использованием технологии dwdm.

### **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 [8].

Физическое объяснение возникновения механизма интерференции. Интерференция световых потоков в dwdm – 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 смещение FWM: если в волокне передаются три сигнала с частотами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  fwm может создавать новые частоты  $\omega_4$ , 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, используемых в системе, а также характеристики самого оптического волокна. Основные аспекты реакции оптического сенсора на колебания создаваемые:

- поездом: 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 [9];

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

Зависимость реакции оптического сенсора от длины волны:

- в системе *dwdm* 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 демультимплексирования и приводить к дополнительной интерференции.

Модель реакции сенсора [10]. Допустим, что система DAS (Distributed Acoustic Sensing) 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,  $\lambda_1$ ) может возникнуть фазовый сдвиг  $\Delta\phi_1$ , который пропорционален величине деформации  $\epsilon$ ;
- на другой длине волны (например,  $\lambda_2$ ) 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:

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \cdot \Delta L_i, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – длина волны;

$\Delta L_i$  – изменение длины волокна для данной длины волны, вызванное механическим воздействием.

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

- для обнаружения и классификации поездов можно использовать длины волн, которые более чувствительны к низкочастотным и мощным колебаниям;
- для определения целостности составов, при встречном движении;
- 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 мультимплексирования с разделением по длинам волн [11].

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 [12]. 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  $\Delta t$ , 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:

$$\frac{\partial\phi(t,d)}{\partial t} = -\frac{\partial\phi(t,d)}{\partial d} \cdot v, \quad (2)$$

где  $\frac{\partial\phi(t,d)}{\partial t}$  – это изменение фазы во времени;

$\frac{\partial\phi(t,d)}{\partial d}$  – 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:

$$\phi(t, d) = \sum_{m,n} A_{mn} P_m(t) Q_n(d), \quad (3)$$

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-Габор 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-Габор:

$$\phi(t, d) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \frac{\partial^m P(t)}{\partial t^m} \frac{\partial^n Q(d)}{\partial d^n}, \quad (4)$$

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

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

Представим через степенной ряд:

$$P(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \times t^n, \quad Q(d) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m \times d^m. \quad (5)$$

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

$$\phi(t, d) = \sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k}. \quad (6)$$

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



$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k} \right) + v \frac{\partial}{\partial d} \left( \sum_{k=0}^n a_k \times b_{n-k} \times t^k \times d^{n-k} \right) = 0. \quad (7)$$

Решая это уравнение для каждого члена ряда, можно оценить изменения фазы как функцию времени и расстояния и позволяет определить такие параметры, как скорость и направление движения поезда, анализируя фазовые сдвиги.

### **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 DWDM 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 лучше анализировать и классифицировать различные типы воздействия, что повышает точность мониторинга и безопасности в реальном времени.

### **Литература:**

1. *Осадчий Г.В., Лыков А.А.* Система диагностики и удаленного мониторинга состояния железнодорожного пути // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 221-224.
2. *Ефанов Д.В., Осадчий Г.В., Хорошев В.В.* Применение оптических датчиков в системах управления движением поездов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 364-371. – DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-364-37.
3. *Попов П.А., Королев И.Н., Мыльников П.Д.* Основные

принципы контроля корректности бортовой системы позиционирования средствами железнодорожной автоматики // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. № 4. – С. 355-366.

4. *Никитин А.Б., Кушпиль И.В.*, Результаты исследования технических средств контроля целостности поездов // Автоматика на транспорте. – 2020. – № 4, Т. 6. – DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.

5. *Бахтиярова Е.А., Чигамбаев Т.О., Сансызбай К.М.* Технология будущего: распределенное акустическое зондирование *das* в режиме реального времени / Материалы XLI Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (3-4 апреля 2017 г.). Т. 2. – Алматы: Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 49-54.

6. *Frauscher.* – URL: <https://railway-news.com/wp-content/uploads/2018/02/Frauscher-Tracking-Solutions-FTS-EN.pdf> (дата обращения 27.12.2023).

7. *Данилевич С.Б.* Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – №4. – С. 171-179.

8. *Дуплякин В.М.* Особенности идентификации нормального закона распределения // *Vestnik of Samara University. Economics and Management.* – 2020. – №11(3). – С. 176-183.

9. Нормальное распределение. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Нормальное\\_распределение](https://ru.wikipedia.org/wiki/Нормальное_распределение) (дата обращения 09.09.2024).

10. Ряд Тейлора. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ряд\\_Тейлора](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ряд_Тейлора). (дата обращения 09.09.2024).

11. Сложение и умножение рядов. – URL: <http://mathemlib.ru/books/item/f00/s00/z0000019/st029.shtml> (дата обращения 09.09.2024).

12. *Трещиков В.Н., Листвин В.Н.* DWDM системы. – Радиоэлектроника, 2021. – 420 с.

13. Метод группового учёта аргументов. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод\\_группового\\_учёта\\_аргументов](https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_группового_учёта_аргументов) (дата обращения 09.09.2024).