

Система контроля трафика движения с использованием волоконно-оптических решеток Брэгга с фазовым сдвигом

В.И. Баязитова, А.А. Василец

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)

Казанский инновационный университет им. В.Г. Тимирязова (ИЭУП)

Аннотация: В статье рассматриваются способ модернизации решений построения систем контроля характеристик транспортных средств, выполненных при помощи стандартных волоконных брэгговских решеток (ВБР). Приведена оценка применимости ВБР со структурными дефектами такими как фазовые π -сдвиги. В данной статье предложена волоконно-оптическая сенсорная система (ВОСС) на основе ВБР с фазовым π -сдвигом, которая позволяет перейти от оптоэлектронных методов интеррогации к радиофотонным. Представлен радиофотонный подход как эффективный метод обнаружения транспортных средств во время обычного транспортного потока. Показаны принципы формирования информационного сигнала при измерении параметров движения автомобиля.

Ключевые слова: волоконные брэгговские решетки, фазовый сдвиг, распределенные сенсорные сети, переносной сенсор, мониторинг плотности дорожного движения.

Введение

Технологии «умного города» находятся сегодня в центре внимания муниципальных властей, научно-исследовательских организаций и их индустриальных партнеров [1]. Интеллектуальные системы, строящиеся по указанным технологиям разрабатываются с учетом требований Указа Президента Российской Федерации «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» (Указ Президента Российской Федерации "О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года" от 7 мая 2018 г. № 204, Российская газета. 2018 г. № 97. ст. 75601) и стандарта Правительства Российской Федерации «Умный город» (Стандарт Правительства РФ «Базовые и дополнительные требования к умным городам (стандарт “Умный город”»)» Минстрой России: официальный сайт URL: minstroyrf.gov.ru/docs/18039/). В этом контексте волоконно-оптические технологии и основной тип волоконно-оптических датчиков ВБР способны

обеспечить «умный город» «нервной» системой, состоящей из каналов связи и квази-распределенных вдоль них сенсорных узлов [2].

Среди ВОСС умного города выделяются транспортные сенсорные системы [3], которые выполняют функции определения интенсивности транспортного потока, состава транспортных средств, их средней скорости движения, плотности движения, а также пропускной способности автодорог. К их преимуществам относятся присущие ВБР возможность проведения прямых измерений деформаций, вызванных контактом с движущимся транспортом, по длине волны, невосприимчивость к электромагнитным помехам, отличная конфигурируемость с возможностью мультиплексирования (несколько десятков ВБР на разных длинах волн в одном оптическом волокне), защищенность от молний, коррозионная стойкость, а также малый размер.

Главным недостатком ВОСС на классических гауссовых аподизированных ВБР [4] является использование оптоэлектронного интеррогатора с очень высокой стоимостью и достаточно низким спектральным разрешением 10-20 пм. В данной статье предложена ВОСС на основе нескольких ВБР с фазовым π -сдвигом [4], которая позволяет перейти от оптоэлектронных методов интеррогации к радиофотонным. Изменение оптической длины волны ВБР при наезде на нее транспортного средства, вызывает изменение частоты биений между окнами прозрачности двух соседних ВБР в радиодиапазоне.

Основная часть

Как показано на рис. 1, ВОСС состоит из модуля трансивера, содержащего лазерный широкополосный диод (ЛШД) и фотоприемник (ФП) в одном корпусе, и сенсорной платформы, содержащей оптическое волокно с

записанными датчиками ВБР с фазовым π -сдвигом, подключенное одним концом к ЛШД и другим к ФП.

На удаленном конце сенсорной платформы волокно разворачивается с радиусом кривизны, допустимым для используемого типа волокна SMF-28. Питание активных элементов ВОСС осуществляется от солнечной батареи, разрешенной к применению в системах безопасности дорожного движения. Данные с выхода фотоприемника через АЦП, ЦПУ и мобильную связь или интерфейс LoRaWan передаются в общую информационную сеть по протоколам Интернета или Интернета вещей.

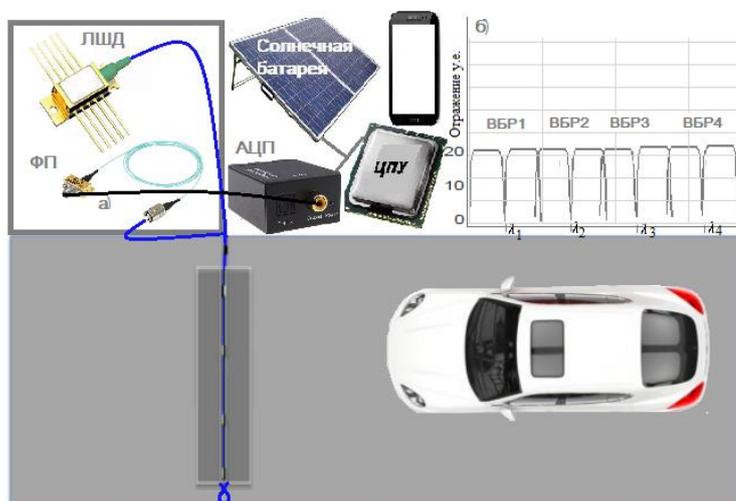


Рис. 1. – Схема ВОСС на ВБР с фазовым π -сдвигом:

а) модуль трансивера и сенсорная платформа; б) окна прозрачности ВБР

Более детально на рис. 1 схематически представлена ВОСС на ВБР с фазовым π -сдвигом на одну полосу движения, которая содержит 4 ВБР с фазовым π -сдвигом. ВБР имеют П-образную форму, в силу высокого коэффициента связи мод, и окна прозрачности в зоне фазового π -сдвига с полосой пропускания 50 МГц (λ_1 - λ_4). Поскольку ВОСС должна работать в условиях ± 40 °С, ширина ВБР должна составлять 0,8 нм при ее температурной чувствительности 10 пм/°С. При этом даже в крайней ситуации, которая практически невозможна, когда одна решетка находится

при температуре $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вторая при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, окно прозрачности одной решетки не перекрывается отражающей частью соседней. В случае температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ окна прозрачности разнесены на 100 ГГц друг от друга (рис. 1, б).

Данные частоты определяют требования к трансиверу. Ширина полосы излучения ЛШД должна составлять около 4 нм, что не является проблемой для любого SOA источника. Полоса пропускания фотоприемника не должна быть меньше 100 ГГц, что возможно при использовании GaAs фотоприемников сетей связи 100G, широко применяемые на магистральных сетях связи.

С другой стороны, необходимо рассмотреть сдвиг окон прозрачности ВБР в силу деформации, вызванной наездом на одну или несколько ВБР автомобиля. По данным работ [5, 6] диапазон изменения деформационного сдвига длины волны составляет от $+300$ до -500 пм при этом чувствительность используемых ВБР была повышена в 3 раза за счет конструктивных решений. Обычные ВБР имеют чувствительность к деформации [4] $1\text{ пм}/\mu\text{ε}$. В этом случае величина отклика составит ± 100 пм или 0,1 нм. Тогда полоса фотоприемника может быть выбрана более узкой – в 40 ГГц (с полуторакратным запасом).

Исключим из рассмотрения «невероятные» случаи по температуре. При равномерном изменении температуры центральные длины волн сместятся на одинаковую величину в одну и ту же сторону, как показано на рис. 2, б).

На рис. 2, в представлен случай воздействия автомобиля на две ВБР. Наезд первого колеса попал на зону расположения ВБР1, второе колесо прошло в зоне свободной от расположения ВБР рядом с ВБР3.

Таким образом, учитывая чувствительность решеток по деформации, пересечение автомобилем оптического волокна вызвало сдвиг длины волны ВБР1 на 100 пм, что эквивалентно 12 ГГц, а ВБР3 – в 4 раза меньше 3 ГГц.

В исходном случае (рис. 2,а) на выходе фотоприемника будет регистрироваться частота биений равная разностной частоте между решетками 25 ГГц. Частоты биений в 50, 75 и 100 ГГц регистрироваться не будут, поскольку не попадают в полосу пропускания приемника 40 ГГц.

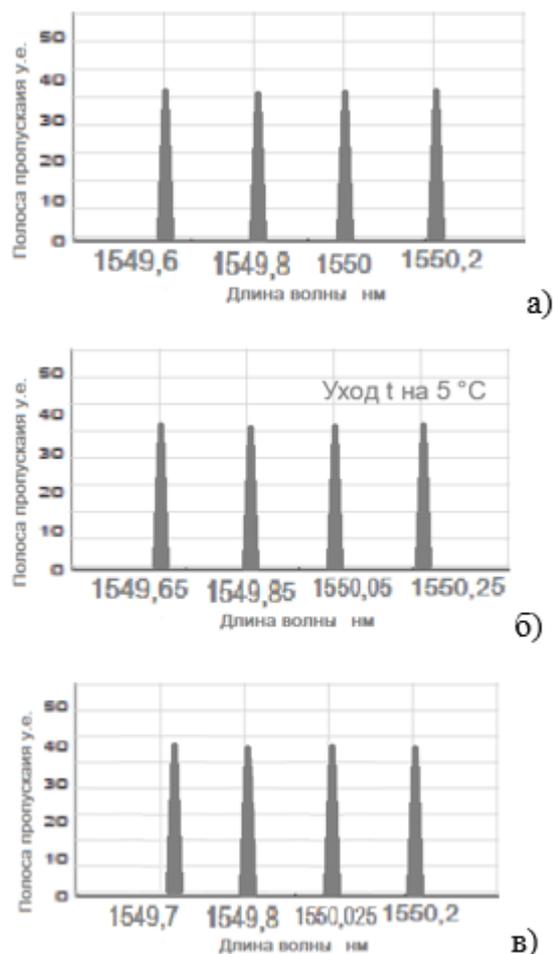


Рис. 2. – Спектральная ситуация расположения окон прозрачности ВБР1-4:

- а) невозмущенное состояние; б) изменение температуры на 5°C ;
- в) проезд автомобиля по ВБР1 и рядом с ВБР3
(расстояние между ВБР1 и ВБР3 около 1 м)

В рассматриваемом случае проезда автомобиля получим набор частот биений:

- между 1-ой и 2-ой – 13 ГГц;
- между 2-ой и 3-ой – 28 ГГц;

между 3-ой и 4-ой – 22 ГГц.

Остальные частоты биений регистрироваться также не будут, поскольку выходят за пределы полосы пропускания приемника 40 ГГц.

Полученные значения частот биений в соответствии с радиофотонным подходом [7, 8] могут быть сравнены со значения нейросетевой модели ВОСС, ранее составленной по классификационным данным различных типов автомобилей, их грузоподъемности, межколесной базе и т.д. Данная нейросетевая модель может быть реализована на многослойном персептроне, аналогичном [9]. Дополнительные слои персептрона могут учитывать скорость движения, наличие снежного или ледяного покрова на сенсорной платформе [10], разницу температур между различными решетками, которая определяется в паузах между движением автомобиля.

Заключение

В этой работе была эскизно представлена ВОСС с мобильной измерительной платформой, содержащей четыре каскадированные ВБР с фазовым π -сдвигом. Представлен радиофотонный подход как эффективный метод обнаружения транспортных средств во время обычного транспортного потока.

Предварительные качественные результаты показали возможность исключения температуры из данных о деформации решеток, вызванных наездом колес автомобиля. Показаны принципы формирования информационного сигнала при измерении параметров движения автомобиля. Данная ВОСС позволяет с одной стороны избавиться от дорогостоящего оптико-электронного интеррогатора, с другой стороны требует для своей работы построения нейросетевой модели для определения автомобилей разных типов и веса. Таким образом, сенсорная платформа требует всесторонней калибровки, после которой можно получить дополнительное

повышение точности измерений во взаимосвязи скорости, положения транспортного средства и реакцией ВБР на траекторию его движения.

Литература

1. Kara De Maeijer, P., Van den bergh, W., Vuye, C. Fiber Bragg Grating Sensors in Three Asphalt Pavement Layers // Infrastructures. 2018. №3. p. 16.
2. Морозов О. Г., Сахабутдинов А. Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах // Компьютерная оптика. 2019. №4. С. 535-543.
3. Интеллектуальная система управления дорожным движением "INCOEL SMART TRAFFIC" // Умный город URL: russiasmartcity.ru/projects/407-intellektualnaya-sistema-upravleniya-dorozhnym-dvizheniem-incoel-smart-traffic (дата обращения: 12.08.2020).
4. Белов А. В., Курков А. С., Семенов В. А., Чиколини А. В. Измерение хроматической дисперсии в одномодовых волоконных световодах методом кольцевого интерферометра // Квантовая электроника. 1988. №10. С. 2152–2155.
5. Fridrich M., Fajkus M., Pavel Mec P., Nedoma J., Kostelansky M., Bednar E. Portable Optical Fiber Bragg Grating Sensor for Monitoring Traffic Density // Applied Sciences. 2019. №9 URL: doi.org/10.3390/app9224796.
6. Yuksel K., Kinet D., Chah K., Caucheteur C. Implementation of a Mobile Platform Based on Fiber Bragg Grating Sensors for Automotive Traffic Monitoring // Sensors. 2020. №20. URL: doi.org/10.3390/s20061567
7. Сахабутдинов А.Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры на основе двух идентичных сверхузкополосных решеток // Инженерный вестник Дона. 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142
8. Мисбахов Рус.Ш., Мисбахов Рин.Ш., Морозов О.Г., Кузнецов А.А., Артемьев В.И., Куревин В.В., Пуртов В.В., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как

чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343

9. Насыбуллин А. Р., Веденькин Д. А. Пространственная фильтрация ионосферных мод в адаптивной антенне на основе нейросетевых технологий // Вестник Поволжского государственного технологического университета. 2017. №4. С. 26-32.

10. Мисбахов Р.Ш., Васёв А.Н., Сахабутдинов А.Ж., Нуреев И.И., Морозов О.Г., Липатников К.А., Василец А.А. Адресный волоконно-оптический датчик для измерения относительной влажности в комплектных распределительных устройствах // Радиостроение. 2020. №1. С. 1-16.

References

1. Kara De Maeijer, P., Van den bergh, W., Vuye, C. Infrastructures. 2018. №3. p. 16.

2. Morozov O. G., Sakhabutdinov A. Zh. Komp'yuternaya optika. 2019. №4. pp. 535-543.

3. Intellektual'naya sistema upravleniya dorozhnym dvizheniem "INCOEL SMART TRAFFIC" [Intelligent Traffic Management System "INCOEL SMART TRAFFIC" Smart city]. Umnyy gorod URL: russiasmartcity.ru/projects/407-intellektualnaya-sistema-upravleniya-dorozhnym-dvizheniem-incoel-smart-traffic (12.08.2020).

4. Belov A. V., Kurkov A. S., Semenov V. A., Chikolini A. V. Kvantovaya elektronika. 1988. №10. pp. 2152–2155.

5. Fridrich M., Fajkus M., Pavel Mec P., Nedoma J., Kostelansky M., Bednar E. Applied Sciences. 2019. №9 URL: doi.org/10.3390/app9224796.

6. Yuksel K., Kinet D., Chah K., Caucheteur C. Sensors. 2020. №20 URL: doi.org/10.3390/s20061567



7. Sahabutdinov A.Zh. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5142

8. Misbahov Rus.Sh., Misbahov Rin.Sh., Morozov O.G., Kuznecov A.A., Artem'ev V.I., Kurevin V.V., Purtov V.V., Nureev I.I., Sahabutdinov A.Zh. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017. №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343

9. Nasybullin A. R., Veden'kin D. A. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2017. №4. pp. 26-32.

10. Misbakhov R.Sh., Vasev A.N., Sakhabutdinov A.Zh., Nureev I.I., Morozov O.G., Lipatnikov K.A., Vasilets A.A. Radiostroenie. 2020. №1. pp. 1-16.