

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт электроники и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Маркварт Александр Александрович

Оптическая спектральная интерферометрия для измерительных систем на основе малогабаритных волоконно-оптических интерферометров

Направление подготовки 03.06.01

Код и наименование

Направленность 03.06.01_03

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах выпускной квалификационной работы

Автор работы: Маркварт Александр Александрович

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Лиокумович Леонид Борисович

Санкт Петербург – 2021

Выпускная квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института электроники и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

- Директор ВШ. : *– Гельгор Александр Леонидович,
кандидат технических наук*
- Научный руководитель: *– Лиокумович Леонид Борисович,
доктор физико-математических
наук*
- Рецензент: *– Бисярин Михаил Александрович,
доктор физико-математических
наук,
Санкт-Петербургский государ-
ственный университет, ведущий
научный сотрудник*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Список сокращений

ВОД – волоконно-оптический датчик

ВБР – волоконная брэгговская решётка

МИОП – межмодовый интерферометр с одномодовым подключением

СПФ – спектральная передаточная функция

РТИ – растяжение, температура, изгиб

ПФ – преобразование Фурье

Актуальность работы. Волоконно-оптические датчики (ВОД) являются предметом активных исследований благодаря высокой потенциальной точности, электромагнитной нейтральности, компактным размерам, возможности мультиплексирования и возможности удаленного опроса. ВОД позволяют измерять различные физические воздействия, такие как температура, растяжение, изгиб и т.п., что необходимо в самых разнообразных сферах, начиная от мониторинга состояния мостов, зданий, трубопроводов, летательных аппаратов в промышленной области [1-4], и заканчивая сопровождением хирургических операций [5-7], измерением ритма дыхания [8], манометрии высокого разрешения [9] в медицине. В настоящий момент для измерения температуры или растяжения широко используются датчики на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Для измерения изгиба используются датчики, фиксирующие изменение мощности сигнала при изгибе многомодовых волокон, обусловленном потерями в оболочке, однако они применимы только для довольно сильных изгибов, а также могут давать неверные показания при нестабильности оптической системы [10]. Другим вариантом исполнения такого датчика является использование ВБР в специальном волокне с сердцевинной D-формы или с несколькими сердцевинами. Его недостатками являются сложность изготовления и совмещения с обычным волокном. Общим ограничением данных датчиков является невозможность измерения нескольких воздействий одновременно и, следовательно, кросс-чувствительность измерений воздействия одного типа к воздействиям другого типа. В связи с этим, приходится использовать набор датчиков с дифференцированной чувствительностью к заданным воздействиям, что значительно усложняет измерительную систему.

В последнее десятилетие предметом активных научных исследований стали волоконно-оптические межмодовые интерферометры с одномодовым подключением (МИОП), с конфигурацией в виде последовательно соединённых одномодовой, чувствительной многомодовой (длиной от единиц до десятков мм) и одномодовой волоконными секций. Такие интерферометры в англоязычной литературе именуют-

ся SMS структурами (от singlemode – multimode – singlemode). При этом опрос МИОП производится методом спектральной интерферометрии, подразумевающим регистрацию и анализ спектральной передаточной функции [11]. В работах [12-14] было продемонстрировано одновременное измерение температуры и растяжения, а также температуры и изгиба, что является одним из основных преимуществ МИОП по сравнению с другими датчиками, в частности, ВБР. Другими преимуществами МИОП являются в несколько раз большая чувствительность к растяжению по сравнению с ВБР [15], возможность измерения более слабых изгибов по сравнению с датчиками изгиба, фиксирующими изменение интенсивности сигнала, а также простота и низкая стоимость изготовления.

Перспективным методом опроса ВОД является использование принципов спектральной интерферометрии, которые заключаются в регистрации и последующей обработке зависимости интенсивности прошедшего через ВОД света от длины волны или спектральной передаточной функции (СПФ). Данный метод позволяет достичь высоких точностей измерений, большого динамического диапазона измерений, а также предоставляет возможность проведения абсолютных измерений [16]. При этом активно развиваются соответствующие опросные установки. Обычно опрос ВОД производится при помощи специального оборудования, стоимость которого довольно высока и варьируется от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов рублей. Однако прогресс в области электроники и широкая популярность мобильных устройств привели к развитию новых волоконно-оптических систем, в которых опрос датчиков производится с помощью смартфона [17-22]. В них светодиод смартфона используется в качестве источника излучения, а камера – в качестве детектора. Мобильные процессоры смартфонов можно использовать для обработки полученных данных или для их передачи в режиме онлайн на вычислительные серверы. Волоконно-оптические датчиковые системы на основе смартфона могут использоваться в качестве мобильных лабораторий биохимического анализа, сенсорных систем персональной медицины и других мобильных измерительных систем. Доступность смартфонов и недорогие волоконно-оптические компоненты позволяют создавать недорогие сенсорные системы как для персонального использования, так и в качестве замены более дорогостоящих установок для промышленных применений. При этом стоимость смартфонных систем на один-два порядка ниже, чем стоимость коммерческих аналогов и практически идентична затратам на приобретение смартфона, в то время как точность измерений, как правило, отличается не более, чем на порядок.

Несмотря на активное исследование МИОП и широкое использование методов спектральной интерферометрии, в литературе недостаточно полно освещены ряд важных вопросов, касающихся проведения одновременных измерений и улучшению характеристик опросных систем на основе смартфона. В частности, отсутствуют

полные физико-математические модели сигналов МИОП при одновременном воздействии растяжения, температуры и изгиба (РТИ), отсутствует опыт применения эффективных методов обработки сигналов для проведения одновременных измерений РТИ при помощи МИОП, мало внимания уделено опросу различных типов ВОД при помощи смартфона и повышению стабильности работы портативной опросной аппаратуры на основе смартфона.

Целью работы является повышение эффективности методов спектральной интерферометрии при проведении одновременных измерений нескольких физических величин и опросе волоконно-оптических датчиков при помощи смартфона.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать физико-математические модели сигналов МИОП при одновременном воздействии на них РТИ.
2. Разработать эффективные методы и алгоритмы обработки сигналов МИОП для проведения одновременных измерений нескольких физических величин
3. Разработать концепцию одновременной с измерениями сигналов ВОД калибровки измерительной опросной аппаратуры на основе смартфона, провести опрос различных типов ВОД.

Научная новизна данной работы заключается в том, что в ней впервые:

1. Разработаны физико-математические модели сигналов МИОП, которые позволяют рассчитать изменение сигнала МИОП при одновременном изменении РТИ.
2. Продемонстрирована возможность одновременного измерения нескольких физических величин при использовании спектрального опроса МИОП и преобразования Фурье (ПФ).
3. Предложен оригинальный метод непрерывной калибровки шкалы длин волн опросного устройства спектральной интерферометрии, позволяющей ее реализовывать одновременно со спектральными измерениями сигналов ВОД.
4. Впервые при помощи смартфона произведен опрос ВБР и рассчитаны теоретически достижимые разрешающие способности измерений при помощи ВБР.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что результаты работы могут быть непосредственно использованы при проектировании волоконно-оптических датчиковых многопараметрических систем со спектральным опросом. Разработанные физико-математические модели могут быть использованы как для предварительной оценки и оптимизации параметров ВОД, так и для расчета произвольных волоконных многомодовых недатчиковых систем, в которых имеет место влияние РТИ. Предложенный метод непрерывной калибровки шкалы длин волн опросного устройства спектральной интерферометрии может быть использован для создания недорогих опросных устройств с высокими точностными характеристиками.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференции «International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies» (YETI-2021), » (Россия, Санкт-Петербург, 2021 г.)

Также первая часть работы была поддержана грантом РФФИ «Аспиранты» 19-32-90262 «Физико-математическая модель сигналов межмодовых волоконно-оптических интерферометров подверженных одновременному влиянию воздействий различного характера при спектральном интерферометрическом опросе», а вторая часть работы была поддержана в рамках мероприятия №4.2.1.2 "Лаборатория передовых волоконно-оптических датчиков для биомедицинских применений" программы повышения конкурентоспособности «5-100-2020».

Публикации. По материалам работы опубликовано 3 статьи, из них 3 – в рецензируемых журналах, входящих в международные системы цитирования Scopus и Web of Science, 1 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 2 – в рецензируемых журналах, приравниваемых к журналам, входящим в перечень ВАК. Также принята к печати еще 1 статья в журнале, входящем в перечень ВАК и в системы цитирования Scopus и Web of Science.

Список работ, опубликованных по теме выпускной квалификационной работы в изданиях, рецензируемых ВАК

1. **Маркварт А.А.**, Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А. Анализ поправок к постоянным распространения в изогнутом многомодовом параболическом оптическом волокне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 2. С. 104–117. DOI: 10.18721/JPM.14209

2. **Markvart A. A.**, Liokumovich, L. B., Medvedev, I. O., Ushakov, N. A. Continuous hue-based self-calibration of a smartphone spectrometer applied to optical fiber fabry-perot sensor interrogation // Sensors. 2020. Т. 20. №. 21. С. 6304. DOI: 10.3390/s20216304

3. **Markvart A. A.**, Liokumovich, L. B., Medvedev, I. O., Ushakov, N. A. Smartphone-Based Interrogation of a Chirped FBG Strain Sensor Inscribed in a Multi-mode Fiber // Journal of Lightwave Technology. 2020. Т. 39. №. 1. С. 282–289. DOI: 10.1109/JLT.2020.3024713

4. **Маркварт А.А.**, Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А. Волоконно-оптический датчик на основе межмодового интерферометра с одномодовым подключением для одновременного измерения изгиба и растяжения // Письма в Журнал технической физики (принята в печать)

Список литературы

1. Lin Y. B. et al. Online monitoring of highway bridge construction using fiber Bragg grating sensors //Smart Materials and Structures. – 2005. – Т. 14. – №. 5. – С. 1075.
2. Hongo A., Kojima S., Komatsuzaki S. Applications of fiber Bragg grating sensors and high-speed interrogation techniques //Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures. – 2005. – Т. 12. – №. 3-4. – С. 269-282.
3. Дышлюк А. В., Макарова Н. В., Витрик О. Б., Кульчин Ю. Н., Бабин С. А. Особенности мониторинга деформационных процессов в железобетонных конструкциях с применением рефлектометрического метода регистрации сигналов волоконных брэгговских решеток. //Измерительная техника. – 2017. – №. 7. – С. 37-40.
4. Махсидов В. В., Кашарина Л. А., Евдокимов А. А., Раскутин А. Е. Применение волоконных брэгговских решеток для определения деформации авиационных и строительных конструкций из полимерных композиционных материалов. //Прикладная фотоника. – 2017. – Т. 4. – №. 4. – С. 257-270.
5. Королёв В. А., Потапов В. Т. Разработка лечебно-диагностической аппаратуры и инструментария. Программное обеспечение новых медицинских технологий //Вестник новых медицинских технологий. – 2009. – Т. 16. – №. 2. – С. 148-150.
6. Бокерия Л. А., Румянцев Л. Н. Внутриаортальная баллонная контрпульсация с применением волоконно-оптических катетеров //Клиническая физиология кровообращения. – 2018. – Т. 15. – №. 4. – С. 237-248.
7. Gonenc B. et al. 3-DOF force-sensing motorized micro-forceps for robot-assisted vitreoretinal surgery //IEEE sensors journal. – 2017. – Т. 17. – №. 11. – С. 3526-3541.
8. Ciocchetti M. et al. Smart textile based on fiber bragg grating sensors for respiratory monitoring: Design and preliminary trials //Biosensors. – 2015. – Т. 5. – №. 3. – С. 602-615.
9. Пуртов В. В., Сахабутдинов А. Ж., Нуреев И. И., Морозов О. Г., Аглиуллин А. Ф. Мало- и многосенсорные катетеры для манометрии высокого разрешения на основе адресных волоконных брэгговских решеток. //Прикладная фотоника. – 2018. – Т. 5. – №. 4. – С. 310-335.
10. Su J., Dong X. P., Lu C. Characteristics of few mode fiber under bending //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2016. – Т. 22. – №. 2. – С. 139-145.
11. Tripathi S. M. et al. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode–multimode–single-mode structures //Journal of Lightwave Technology. – 2009. – Т. 27. – №. 13. – С. 2348-2356.

12. Lu C. et al. Simultaneous measurement of strain and temperature with a few-mode fiber-based sensor //Journal of Lightwave Technology. – 2018. – T. 36. – №. 13. – C. 2796-2802.
13. Wu Q. et al. Simultaneous measurement of displacement and temperature with a single singlemode-multimode-singlemode (SMS) fiber structure //Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition. – Optical Society of America, 2010. – C. 79900Q.
14. Wu Q. et al. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing //IEEE photonics technology letters. – 2010. – T. 23. – №. 2. – C. 130-132.
15. Lalam N. et al. Perfluorinated polymer optical fiber for precision strain sensing based on novel SMS fiber structure //2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). – IEEE, 2016. – C. 1-3.
16. Liokumovich L., Markvart A., Ushakov N. Utilization of extrinsic fabry-perot interferometers with spectral interferometric interrogation for microdisplacement measurement //Journal of Electronic Science and Technology. – 2020. – T. 18. – №. 1. – C. 100030.
17. Aitkulov A., Tosi D. Optical fiber sensor based on plastic optical fiber and smartphone for measurement of the breathing rate //IEEE Sensors Journal. – 2019. – T. 19. – №. 9. – C. 3282-3287.
18. Bremer K., Roth B. Fibre optic surface plasmon resonance sensor system designed for smartphones //Optics express. – 2015. – T. 23. – №. 13. – C. 17179-17184.
19. Lu L. et al. A portable optical fiber SPR temperature sensor based on a smart-phone //Optics express. – 2019. – T. 27. – №. 18. – C. 25420-25427.
20. Pan T., Cao W., Wang M. TiO₂ thin film temperature sensor monitored by smartphone //Optical Fiber Technology. – 2018. – T. 45. – C. 359-362.
21. Liu T. et al. Development of a handheld dual-channel optical fiber fluorescence sensor based on a smartphone //Applied Optics. – 2020. – T. 59. – №. 3. – C. 601-606.
22. Chen Y. et al. A Portable Smartphone-Based Vector-Magnetometer Illuminated and Imaged via a Side-Polished-Fiber Functionalized With Magnetic Fluid //IEEE Sensors Journal. – 2019. – T. 20. – №. 3. – C. 1283-1289.