

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций**

На правах рукописи

Петров Александр Викторович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ МЕЖМОДОВОГО
ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование

Направленность 03.06.01_03 Радиофизика

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Петров А.В.
Научный руководитель: д.ф.-м.н.,
профессор, Котов О.И.

Санкт-Петербург – 2021

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

- Директор ВШ : *– Величко Елена Николаевна,
к.т.н., доцент*
- Научный руководитель: *– Котов Олег Иванович,
д.ф.-м.н., профессор*
- Рецензент: *– Рогов Сергей Александрович
д. ф.-м. н., профессор
СПбГУТ им. Проф. М.А. Бонч-Бруевича, профессор кафедры
ФиЛС (фотоника и линии
связи)*

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

Актуальность работы

Волоконно-оптические интерференционные датчики на протяжении последних 30 лет являются постоянно развивающейся областью научных исследований и активно применяются для решения широкого класса научных и промышленных задач. Привлекательность таких датчиков обусловлена тем, что они обладают рядом преимуществ, таких как малые габариты и масса, электромагнитная нейтральность, способность работать в условиях высоких и низких температур, в агрессивных химических средах, большой потенциал для реализации распределенных или удаленных от опросного устройства измерений.

Важным и бурно развивающимся направлением волоконно-оптических интерферометрических датчиков являются датчики на основе межмодового волоконного интерферометра (МВИ). В основе данного типа датчиков лежит многомодовое оптическое волокно, в котором высококогерентным оптическим источником возбуждается некоторое количество мод. Моды интерферируют друг с другом, в результате чего на выходном торце многомодового волокна формируется интерференционная картина (спекл-картина), изменяющаяся под влиянием внешних воздействий, приводящих к изменению разности фаз мод. При помощи пространственной фильтрации выходного излучения пространственные изменения спекл-картины преобразуются в изменения интенсивности. Данные изменения интенсивности являются сигналом МВИ, путем анализа которого можно производить измерения различных внешних воздействий.

Датчики на основе (МВИ) представляют собой интенсивно развивающуюся область исследований в последнее время года. Эти датчики активно исследуются для использования в биомедицине [1,2], химическом анализе [3,4], системах безопасности [5], для измерения вибрации [6], температуры [7,8], давления [9] и во многих других приложениях приложения [10–13].

Однако существует ряд сложностей, серьезно усложняющих возможность использования МВИ в измерительных целях. Во-первых, принципиальная сложность возбудить в многомодовом волокне детерминированный набор мод с

определенными начальными амплитудами и фазами. Кроме того, при изменении условий окружающей среды амплитуды и фазы мод могут изменяться, что будет приводить к федингу полезного сигнала. Кроме того, контраст и интенсивность принимаемого интерференционного сигнала сильно зависят от выбранной точки на выходном торце многомодового световода. Это связано с тем, что каждая из возбужденных мод имеет собственное пространственное поперечное распределение, и интерференционный сигнал в каждой точке на поперечном торце волокна определяется амплитудой и фазой каждой моды в данной точке. С учетом того, что при изменении условий окружающей среды происходит изменение амплитуд и фаз мод, задача получения стабильного интерференционного сигнала является очень сложной.

Для преодоления данного ограничения используются различные методы обработки сигналов МВИ. Два основных подхода, традиционно применяемых к стохастическим системам, а именно усреднение сигналов и корреляционный анализ, получили широкое распространение и были исследованы для решения перечисленных выше проблем с датчиками на основе МВИ [13–19]. Многоканальная регистрация сигнала [14, 20, 21], методы и алгоритмы обработки сигналов [22–26] относительно хорошо разработаны для этой цели. Однако существующие публикации нацелены, как правило, исключительно на получения линейного и стабильного отклика МВИ, и в них не затрагивался вопрос получения и описания передаточной характеристики МВИ, определяющей такие важные его параметры как чувствительность, динамический диапазон и амплитуду отклика

В связи с вышеизложенным, исследование методов обработки сигналов межмодового интерферометра с целью разработки методов математического моделирования и экспериментального получения его стабильных передаточных характеристик, а также методов обработки сигналов МВИ, позволяющих получать стабильный и линейный отклик на внешнее воздействие представляется актуальным.

Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование возможности существенного улучшения измерительных характеристик МВИ путем применения различных методов обработки сигналов межмодовой интерференции.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Международная конференция «International youth conference on electronics, telecommunications and information technologies (YETI)» (Санкт-Петербург, 2019 и 2020 гг.);
2. Всероссийская конференция «Неделя Науки ИФНиТ» (Санкт-Петербург, 2020)
3. Международная конференция «SPIE Optics + Optoelectronics» (Прага, 2019 г.)
4. Научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2017, 2018 и 2019)

Научные результаты, полученные в ходе выполнения работы, позволили сформулировать следующие **научные положения**:

1. Усредненные амплитудные характеристики могут быть использованы в качестве передаточных характеристик измерительной схемы на основе МВИ.
2. Усредненная амплитудная характеристика связана с корреляционной функцией структурной функцией и может быть получена из нее путем прямого вычисления.
3. Метод корреляционной обработки сигналов МВИ может быть использован в схеме с некогерентным источником оптического излучения и спектроанализатором. Контраст получаемых интерференционных сигналов и эффективность подавления фединга в этом случае определяется параметрами

многомодового волокна, условиями возбуждения и параметрами спектроанализатора.

4. Метод корреляционной обработки сигналов МВИ со сканируемом по оптической длине волны источником излучения и МВИ с некогерентным оптическим источником и спектроанализатором может быть использован для получения линейного и стабильного отклика на внешнее воздействие при сильно изменяющихся условиях окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основные результаты, полученные в рамках подготовки научного доклада, можно сформулировать следующим образом:

Разработана комплексная физико-математическая модель МВИ, позволяющая производить расчет сигналов МВИ, усредненных различными методами и производить их корреляционный анализ в зависимости от параметров волокна и условий возбуждения МВИ. При помощи предложенной модели был произведен ряд расчетов, направленных на исследование влияния на сигналы МВИ числа возбужденных мод, профиля показателя преломления волокна, условий приема излучения, произведена оценка эффективности различных методов усреднения. Были получены экспериментальные зависимости, продемонстрировавшие хорошее согласие с модельными расчетами.

Был разработан метод корреляционной обработки сигналов МВИ, основанный корреляционном анализе сигналов МВИ, возникающих при сканировании частоты излучения лазера, который может быть использован для получения линейного и стабильного отклика МВИ на внешнее воздействие в режиме реального времени. Разработана математическая модель данного метода, проведены модельные расчеты и эксперименты, показавшие, что данный метод может быть использован для получения стабильного и линейного отклика МВИ на внешнее воздействие. Также предложенный метод был развит на МВИ с источником некогерентного излучения и спектроанализатором. Сформулированы критерии, описывающие условия когерентной и стабильной работы МВИ. Проведено подробное экспериментальное исследование методов SAC, SAC with SCF и SCF, оценен динамический диапазон схемы на основе такого МВИ, подробно обсуждена задача выбора опорного скана.

Собран лабораторный макет датчика на основе МВИ, обеспечивающий линейный и стабильный отклик на внешнее воздействие.

Полученные в ходе выполнения настоящего проекта результаты могут быть применены при проектировании волоконно-оптических датчиков деформации, вибрации, температуры, а также в распределенных системах охраны периметра.

Список литературы

1. Rodríguez-Cuevas A. et al. Low-cost fiber specklegram sensor for noncontact continuous patient monitoring //Journal of biomedical optics. – 2017. – Т. 22. – №. 3. – С. 037001.
2. Feng F. et al. In-situ ultrasensitive label-free DNA hybridization detection using optical fiber specklegram //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2018. – Т. 272. – С. 160-165.
3. Fujiwara E. et al. Optical fiber chemical sensor based on the analysis of fiber specklegrams characteristics //2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). – IEEE, 2018. – С. 1-5.
4. Wang B. et al. A novel fiber chemical sensor using inner-product multimode fiber speckle fields //Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications IX. – International Society for Optics and Photonics, 2003. – Т. 5206. – С. 299-304.
5. Zyczkowski M. et al. Simple fiber optic sensor for applications in security systems //Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks X. – International Society for Optics and Photonics, 2014. – Т. 9248. – С. 92480B.
6. Pinzón P. J. et al. Dual-wavelength speckle-based SI-POF sensor for cost-effective detection of microvibrations //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2016. – Т. 23. – №. 2. – С. 217-222.
7. Wang J. J., Yan S., Xu F. Speckle-based fiber sensor for temperature measurement //2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). – IEEE, 2017. – С. 1-3.
8. Musin F., Mégret P., Wuilpart M. Fiber-optic surface temperature sensor based on modal interference //Sensors. – 2016. – Т. 16. – №. 8. – С. 1189.
9. Sperandio V. M. et al. A new optical pressure sensor interrogated by speckles pattern for oil industry //24th International Conference on Optical Fibre Sensors. – International Society for Optics and Photonics, 2015. – Т. 9634. – С. 96347W.
10. Murray M. J. et al. Speckle-based strain sensing in multimode fiber //Optics express. – 2019. – Т. 27. – №. 20. – С. 28494-28506.

11. Reis F. M. et al. Structural health monitoring suitable for airborne components using the speckle pattern in plastic optical fibers //IEEE Sensors Journal. – 2017. – T. 17. – №. 15. – C. 4791-4796.
12. Chen W. et al. Precision non-contact displacement sensor based on the near-field characteristics of fiber specklegrams //Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – T. 296. – C. 1-6.
13. Mu G. et al. Refractive index sensing based on the analysis of D-shaped multimode fiber specklegrams //IEEE Photonics Technology Letters. – 2020. – T. 32. – №. 8. – C. 485-488.
14. Spillman W. B. et al. Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses //Applied optics. – 1989. – T. 28. – №. 15. – C. 3166-3176.
15. Wang J. J. et al. Fiber-optic point-based sensor using specklegram measurement //Sensors. – 2017. – T. 17. – №. 10. – C. 2429.
16. Fujiwara E. et al. Evaluation of image matching techniques for optical fiber specklegram sensor analysis //Applied optics. – 2018. – T. 57. – №. 33. – C. 9845-9854.
17. Chapalo I. et al. Methods of signal averaging for a multimode fiber interferometer: an experimental study //Optical Sensors 2019. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – T. 11028. – C. 110282Q.
18. Chapalo I. et al. Averaging methods for a multimode fiber interferometer: experimental and interpretation //Journal of Lightwave Technology. – 2020. – T. 38. – №. 20. – C. 5809-5816.
19. Petrov A. V., Chapalo I. E., Kotov O. I. Theoretical analysis of averaging methods for intermodal fiber interferometer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1326. – №. 1. – C. 012023.Kotov O. I. et al. Multichannel signal detection in a multimode optical-fiber interferometer: Ways to reduce the effect of amplitude fading //Technical Physics Letters. – 2000. – T. 26. – №. 9. – C. 844-848.
20. Kotov O. I. et al. Multichannel signal detection in a multimode optical-fiber interferometer: Reducing the effect of spurious signals //Technical Physics Letters. – 2000. – T. 26. – №. 11. – C. 991-995.

21. Fujiwara E., Dos Santos M. F. M., Suzuki C. K. Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division //Applied optics. – 2017. – T. 56. – №. 6. – C. 1585-1590.
22. Kotov O. I., Liokumovich G. B., Markov S. I. Registration of influence on optical fiber by mode-mode interference //Lasers for Measurements and Information Transfer 2003. – International Society for Optics and Photonics, 2004. – T. 5381. – C. 91-102.
23. Satar S. M. A., Ali A. H., Abbas M. K. Designing of an optical fiber sensors of statistical mode via image processing of speckle pattern changes //International Journal of Scientific and Research Publications. – 2015. – T. 5. – №. 11.
24. Efendioglu H. S. et al. Intelligent fiber optic statistical mode sensors using novel features and artificial neural networks //Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration 2013. – International Society for Optics and Photonics, 2013. – T. 8693. – C. 86930B.
25. Efendioglu H. S. et al. New statistical features for the design of fiber optic statistical mode sensors //Optical Fiber Technology. – 2013. – T. 19. – №. 4. – C. 279-284.
26. Varyshchuk V., Bobitski Y., Poisel H. Using a multimode polymer optical fiber as a high sensitivity strain sensor //2014 Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES). – IEEE, 2014. – C. 464-467.
27. Redding B., Popoff S. M., Cao H. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction //Optics express. – 2013. – T. 21. – №. 5. – C. 6584-6600.
28. Kotov O. I. et al. Simulation of a multimode fiber interferometer using averaged characteristics approach //JOSA B. – 2018. – T. 35. – №. 8. – C. 1990-1999.
29. Goodman J. W. Statistical optics. – John Wiley & Sons, 2015.
30. Petrov A. V. et al. Intermodal fiber interferometer with frequency scanning laser for sensor application //Applied Optics. – 2020. – T. 59. – №. 33. – C. 10422-10431.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы

1. Petrov A., Chapalo I., Kotov O. Intermodal Fiber Interferometer with Scanning Laser and Correlation Signal Processing: An Experimental Study //International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. – Springer, Cham, 2021. – С. 307-316.
2. Petrov A. V. et al. Intermodal fiber interferometer with frequency scanning laser for sensor application //Applied Optics. – 2020. – Т. 59. – №. 33. – С. 10422-10431.
3. Пелевин И. Д., Котов О. И., Петров А. В. Сигналы многомодового волоконного интерферометра при модуляции частоты излучения лазера //НЕДЕЛЯ НАУКИ ИФНиТ. – 2020. – С. 184-187.
4. Chapalo I. et al. Averaging methods for a multimode fiber interferometer: experimental and interpretation //Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Т. 38. – №. 20. – С. 5809-5816.
5. Petrov A. V., Chapalo I. E., Kotov O. I. Theoretical analysis of averaging methods for intermodal fiber interferometer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1. – С. 012023.
6. Карамышева А. Р. и др. Оценка качества усреднения сигналов МВИ //Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 65-68.
7. Chapalo I. et al. Methods of signal averaging for a multimode fiber interferometer: an experimental study //Optical Sensors 2019. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11028. – С. 110282Q.
8. Kotov O. I. et al. Simulation of a multimode fiber interferometer using averaged characteristics approach //JOSA B. – 2018. – Т. 35. – №. 8. – С. 1990-1999.
9. Карамышева А. Р. и др. Корреляционные характеристики сигналов межмодового волоконного интерферометра в случае изменения длины световода и частоты излучения лазера //Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 128-132.
10. Карамышева А. Р. и др. Статистические характеристики многомодовых интерферометров: эргодические свойства сигналов //Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 88-91.

11. Карамышева А. Р. и др. Корреляционные характеристики сигнала межмодового волоконного интерферометра при модуляции длины световода и частоты излучения лазера //Неделя науки СПбПУ. – 2017. – С. 108-110.
12. Гонгелев А. В. и др. Метод амплитудных характеристик для анализа сигналов дифференциальной фазовой модуляции в межмодовых волоконных интерферометрах, вызванных взаимодействием мод на изгибах световода //Неделя науки СПбПУ. – 2017. – С. 116-119.