

09.5

Межмодовый волоконный интерферометр на основе широкополосного источника света и анализатора оптического спектра для измерения внешних воздействий

© А.В. Петров¹, И.Е. Чапало¹, М.А. Бисярин², О.И. Котов¹¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: petrov.av1@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2021 г.

В окончательной редакции 13 августа 2021 г.

Принято к публикации 15 августа 2021 г.

Представлена и экспериментально исследована схема межмодового волоконного интерферометра с широкополосным некогерентным возбуждением и спектральной обработкой сигналов. Продемонстрировано влияние параметров спектроанализатора (диапазон сканирования и ширина аппаратной функции) на выходной сигнал. Показано, что использование метода корреляционной обработки сигналов позволяет получить линейный и стабильный отклик на внешние воздействия. Представленная схема интерферометра может быть использована для разработки датчиков физических величин, работающих в режиме реального времени.

Ключевые слова: межмодовый волоконный интерферометр, волоконно-оптические датчики, волоконная оптика, многомодовое волокно, интерферометры.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51775.18968

Применение межмодовых волоконных интерферометров (МВИ) в различных измерительных схемах является активно развивающимся направлением исследований в области разработки волоконно-оптических датчиков [1]. В последние годы предложен ряд измерительных схем на базе МВИ для измерения различных физических величин, например температуры, давления, вибраций [2–4]. Основными преимуществами МВИ являются относительно низкая стоимость, простота схемы, высокая чувствительность и возможность проведения распределенных измерений. Принцип работы классического МВИ состоит в анализе интерференционной спекл-картины на выходе многомодового волоконного световода (МВС), возбуждаемого когерентным источником: внешние воздействия на МВС вызывают изменения разностей фаз распространяющихся мод, что приводит к преобразованиям спекл-картины [5]. Основными недостатками подобной схемы являются фединг сигнала и сильная нелинейность передаточной характеристики, что делает проблематичным воспроизведение формы и величины сигналов внешних воздействий. Поиск методов решения указанных проблем является актуальной темой исследований [6,7].

Выглядит привлекательной идея реализации МВИ с использованием низкокогерентного широкополосного источника света (ШИС) вместо лазера и анализатора оптического спектра (АОС) вместо фотодетектора (БСМВИ — белосветный межмодовый волоконный интерферометр). Работы в данном направлении уже велись ранее [8–10], однако в них в основном рассматривались так называемые SMS-структуры (single

mode—multimode—single mode) с относительно короткими участками многомодового волокна в качестве чувствительного элемента (< 1 cm). В существующих работах основной упор делается на исследование специальных конфигураций МВС и применение сложных методов обработки интерференционных сигналов. При этом должным образом не рассматривается вопрос улучшения и стабилизации параметров измерительного МВИ.

В настоящей работе предложена схема БСМВИ с протяженным МВС в качестве чувствительного элемента. Экспериментально показана работоспособность БСМВИ, исследовано влияние параметров АОС на характеристики выходного сигнала. Представлено эффективное решение указанных выше проблем фединга и нелинейности при помощи ранее разработанного метода корреляционной обработки сигналов МВИ, формируемых периодическим сканированием длины волны источника света [6]. Показана возможность работы БСМВИ в режиме измерения внешних воздействий различной формы и амплитуды в реальном времени с применением современного высокоскоростного АОС (1000 спектров в секунду).

АОС преобразует излучение ШИС в набор дискретных спектральных компонент ν_a , расположенных эквидистантно в соответствии с шириной аппаратной функции АОС $\Delta\nu_a$. Таким образом, применение пары АОС—ШИС позволяет рассматривать МВИ не как единственный интерферометр, а как набор интерферометров, работающих каждый на своей оптической частоте ν_a , что открывает широкие возможности для борьбы с федингом и нелинейностью передаточной характеристики.

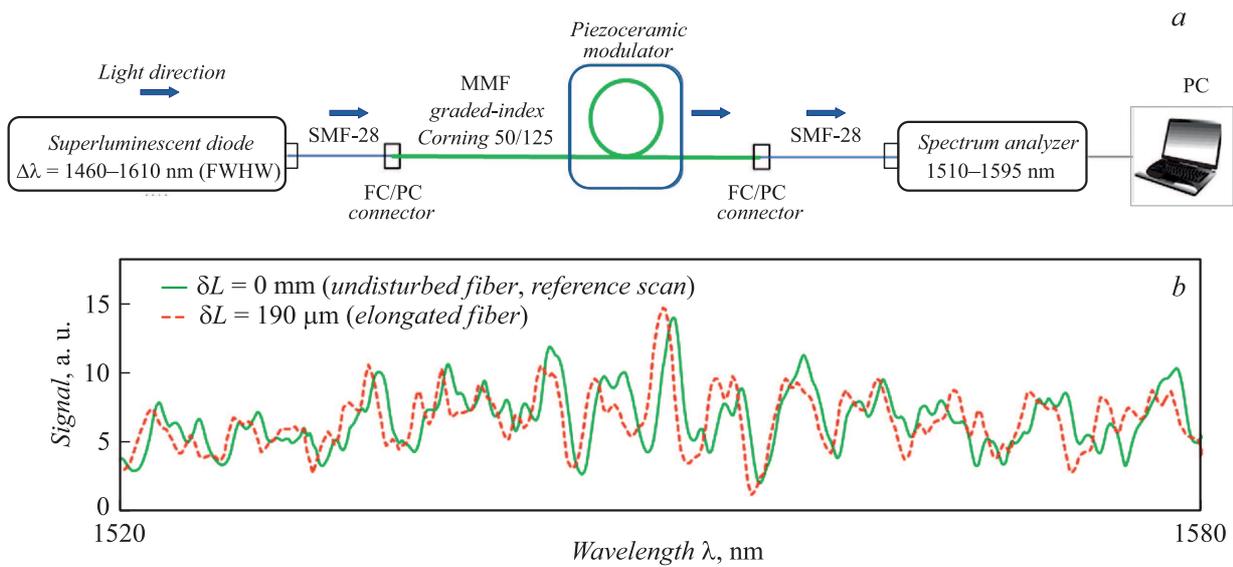


Рис. 1. Схема экспериментальной установки БСМВИ (а) и экспериментально полученные частотные сканы БСМВИ для невозмущенного волокна и волокна под внешним воздействием (b).

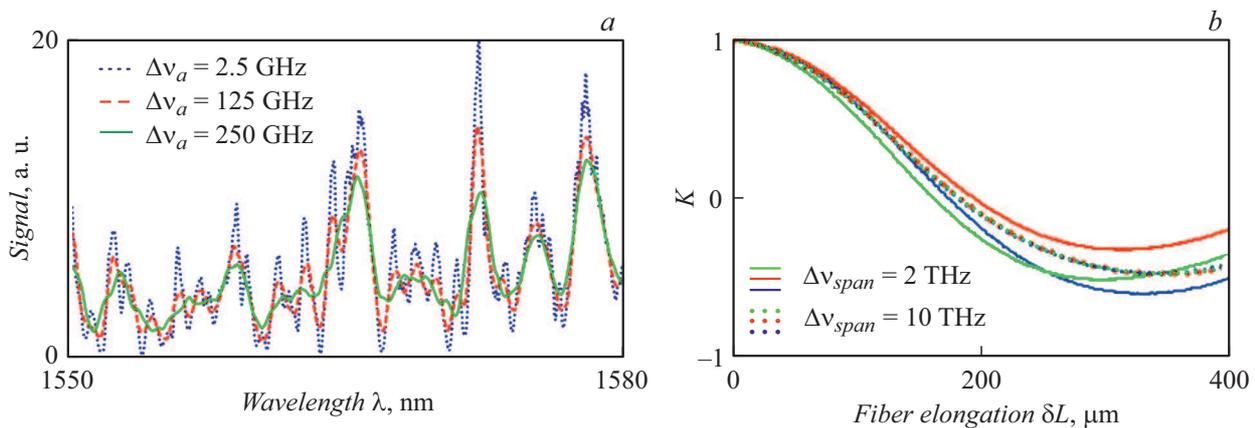


Рис. 2. а — экспериментально полученные частотные сканы БСМВИ для трех значений ширины аппаратной функции $\Delta\nu_a$. б — корреляционные функции, полученные при линейном удлинении волокна на $400\ \mu\text{m}$. Сплошные линии — $\Delta\nu_{span} = 2\ \text{THz}$, пунктирные $\Delta\nu_{span} = 10\ \text{THz}$.

В экспериментальной установке (рис. 1, а) в качестве ШИС был применен суперлюминесцентный диод Exalos EXS210066-01 (выходная мощность $5\ \text{mW}$, диапазон длин волн $1460\text{--}1610\ \text{nm}$ (FWHM), с одномодовым пигтейлом на выходе). В качестве АОС мы использовали Yokogawa AQ6370C (диапазон сканирования $600\text{--}1700\ \text{nm}$, настраиваемая величина спектрального разрешения в диапазоне от 2.5 до $250\ \text{GHz}$) для снятия частотных сканов при различной ширине аппаратной функции (рис. 2, а). При проведении остальных измерений мы использовали АОС I-MON 512 USB (диапазон сканирования $1510\text{--}1595\ \text{nm}$, спектральное разрешение $160\ \text{pm}$, скорость сканирования 1000 спектров в секунду). Входной одномодовый пигтейл анализатора использовался в качестве диафрагмы МВИ за счет разницы диаметров многомодового и одномодового волоконных световодов. Длина МВС (Corning, 50/125, градиентный

профиль показателя преломления) в тракте составляла $60\ \text{m}$, из которых $50\ \text{m}$ были намотаны (и приклеены) на пьезокерамический модулятор цилиндрической формы диаметром $5\ \text{cm}$, используемый для формирования внешних воздействий заданной формы и амплитуды. Модуляция длины волокна осуществлялась по гармоническому и треугольному законам с частотой $\Omega = 10\ \text{Hz}$.

Известно, что МВИ чувствителен как к внешним воздействиям на МВС, так и к изменениям частоты излучения лазера [11]. В нашей схеме с учетом диафрагмирования спекл-картины регистрируемый АОС спектр в диапазоне частот излучения ШИС представляет собой сигнал межмодовой интерференции аналогично схеме МВИ со сканирующим лазером и фотоприемником, рассмотренной в [6]. Будем называть зависимость интенсивности сигнала АОС от оптической частоты ν_a (т.е. каждый зарегистрированный АОС спектр) ча-

стотным сканом. Скорость сканирования анализатора определяет период дискретизации сигнала БСМВИ.

На рис. 1, *b* представлены два частотных скана, полученные экспериментально для покоящегося и удлиненного на $190 \mu\text{m}$ МВС. Видно, что внешнее воздействие, вызывающее изменения длины волокна, приводит к изменению вида частотного скана аналогично [6]. Поэтому обработку сигналов БСМВИ можно проводить методом корреляционной обработки частотных сканов [6]. Суть данного метода заключается в измерении коэффициента корреляции $k(t)$ опорного (при отсутствии внешних воздействий) и текущего частотных сканов в режиме реального времени. Как было показано в [6], данный подход позволяет эффективно подавить фединг сигнала МВИ и добиться линейности передаточной характеристики МВИ.

Прежде всего рассмотрим влияние параметров схемы БСМВИ на качество измеряемых сигналов. На рис. 2, *a* приведены частотные сканы, полученные при различных значениях ширины аппаратной функции АОС. Для проведения данных измерений мы использовали АОС Yokogawa AQ6370C, так как в нем предусмотрена аппаратная возможность изменения ширины аппаратной функции в диапазоне от 2.5 до 250 GHz. Видно, что с ростом ширины аппаратной функции снижаются контраст и количество экстремумов сигнала, вследствие чего снижается чувствительность БСМВИ: пары мод с временной задержкой, превышающей время когерентности эквивалентного источника, определяемое шириной аппаратной функции АОС, перестают вносить вклад в интерференцию.

При проведении эксперимента внешние воздействия на БСМВИ осуществлялись модуляцией длины волокна при помощи пьезокерамического модулятора. Зависимость величины коэффициента корреляции k от величины удлинения волокна обозначим корреляционной функцией $K(\delta L)$. На рис. 2, *b* приведены примеры корреляционных функций $K(\delta L)$, полученных экспериментально в диапазоне удлинений МВС от 0 до $400 \mu\text{m}$, для двух

значений ширины диапазона сканирования АОС $\Delta\nu_{span}$ (изменение величины диапазона сканирования осуществлялось при обработке записанных в виде численных массивов частотных сканов). Для каждого диапазона $K(\delta L)$ измерялись несколько раз; каждому измерению предшествовала процедура смены положения свободных участков МВС, обеспечивающая реализацию различных случайных соотношений фаз мод перед удлинением МВС [7]. Видно, что для случая малого $\Delta\nu_{span}$ зависимости значительно разошлись, что наглядно иллюстрирует неустойчивость к влиянию внешних условий (наличие фединга). В случае большего $\Delta\nu_{span}$ корреляционные функции практически совпали. Данный пример показывает важность выбора величины частотного скана для обеспечения стабильности сигнала БСМВИ и подавления фединга.

Покажем работоспособность и оценим эффективность БСМВИ. В соответствии с [6] для получения линейного отклика значений $k(t)$ на удлинение МВС $K(\delta L)$ преобразуется в так называемую корреляционную амплитудную характеристику (САХ) с применением сдвига по частоте ξ между сигнальными и опорными частотными сканами:

$$\text{CAC}(\delta L, \xi) = \sqrt{1 - K(\delta L, \xi)/K(\delta L = 0, \xi = 0)}, \quad (1)$$

где $K(\delta L, \xi)$ — корреляционная функция, рассмотренная выше, с введенным сдвигом по частоте ξ . В экспериментах сигнал БСМВИ вычислялся согласно (1) в виде САХ при использовании $\Delta\nu_{span} = 10 \text{ THz}$ (максимальный диапазон сканирования АОС) и $\xi = 38 \text{ GHz}$ (вопрос выбора ξ подробно рассмотрен в [6]). Опорный скан записывался при отсутствии внешних воздействий на МВС. Сигнальное воздействие обеспечивалось напряжением заданной формы и амплитуды, подаваемым на пьезокерамический модулятор. Вычисление САХ проводилось в режиме реального времени.

На рис. 3 представлен сигнал БСМВИ в случае гармонического (*a*) и треугольного (*b*) внешних воз-

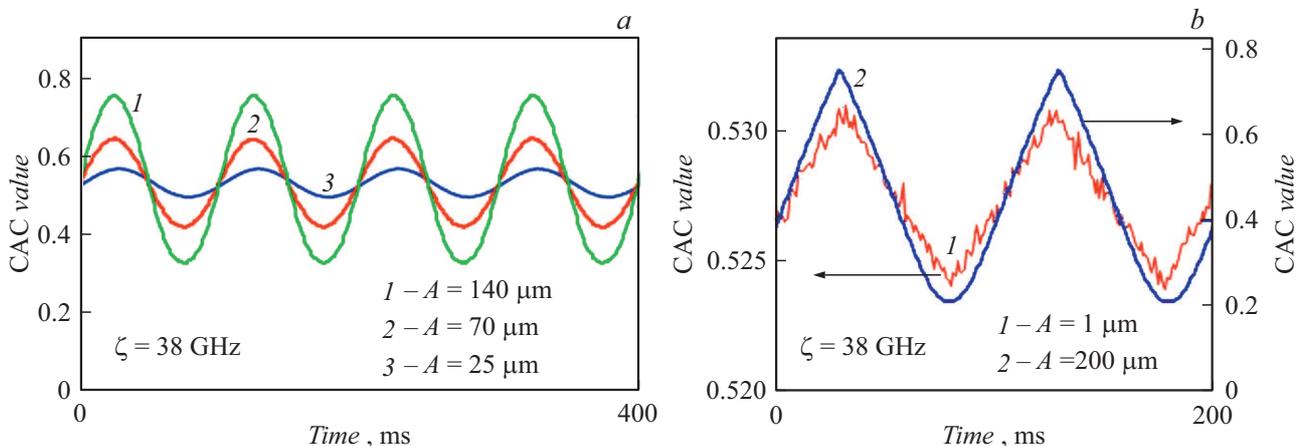


Рис. 3. Экспериментально полученные отклики БСМВИ на изменение длины волокна по гармоническому закону $\delta L = (A/2) \sin(\Omega t)$, $\Omega = 10 \text{ Hz}$ (*a*) и изменение длины волокна по треугольному закону $\delta L = (A/2) \text{triangle}(\Omega t)$, $\Omega = 10 \text{ Hz}$ (*b*).

действий различных амплитуд. Из рис. 3, *a* видно, что амплитуда сигнала линейно зависит от амплитуды внешнего воздействия. Форма полученного отклика также соответствует форме внешнего воздействия. Отметим, что в случае слабых удлинений (рис. 3, *b*, $A = 1 \mu\text{m}$) на сигнал оказывают влияние шумы БСМВИ (модовые шумы, шумы квантования АОС и т.д.). В случае сильного воздействия происходит искажение формы отклика БСМВИ ввиду влияния нелинейного участка корреляционной амплитудной характеристики (рис. 3, *b*, $A = 200 \mu\text{m}$). Это накладывает соответствующие ограничения на динамический диапазон схемы БСМВИ, что необходимо учитывать при выборе параметров БСМВИ при реализации измерительной схемы.

Таким образом, в данной работе рассмотрен межмодовый волоконный интерферометр на основе широкополосного низкокогерентного источника света и анализатора оптического спектра. Экспериментально показано влияние параметров схемы, таких как ширина аппаратной функции АОС и ширина диапазона сканирования, на сигналы БСМВИ. Показана возможность использования БСМВИ для получения стабильного линейного отклика на внешние воздействия, что является существенным преимуществом по сравнению с традиционными схемами МВИ.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-32-90238.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.S. Efendioglu, IEEE Sens. J., **17** (7), 2055 (2017). DOI: 10.1109/JSEN.2017.2658683
- [2] J.J. Wang, S.C. Yan, F. Xu, in *Int. Conf. on optical communications and networks (ICOON)* (IEEE, Wuzhen, 2017), p. 1. DOI: 10.1109/ICOON.2017.8121187
- [3] V.M. Sperandio, M.J. Pontes, M.J. Neto, L. Goncalves, Proc. SPIE, **9634**, 96347W (2015). DOI: 10.1117/12.2185464
- [4] P.J. Pinzon, D.S. Montero, A. Tapetado, C. Vazquez, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron., **23** (2), 5600406 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2611596
- [5] W.B. Spillman, B.R. Kline, L.B. Maurice, P.L. Fuhr, Appl. Opt., **28** (15), 3166 (1989). DOI: 10.1364/AO.28.003166
- [6] A.V. Petrov, I.E. Chapalo, M.A. Bisyarin, O.I. Kotov, Appl. Opt., **59** (32), 10422 (2020). DOI: 10.1364/AO.400345
- [7] I. Chapalo, A. Petrov, D. Bozhko, M. Bisyarin, O. Kotov, J. Lightwave Technol., **38** (20), 5809 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2020.3002617
- [8] P. Wang, S. Zhang, R. Wang, G. Farrell, M. Zhang, T. Geng, E. Lewis, K. Tian, Opt. Express, **27** (10), 13754 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.013754
- [9] D. Liu, R. Kumar, F. Wei, J. Lightwave Technol., **36** (17), 3672 (2018). DOI: 10.1109/JLT.2018.2842111
- [10] I. Del Villar, J. Goni, A. Vicente, F.J. Arregui, I.R. Matias, J. Lightwave Technol., **37** (18), 4665 (2019). DOI: 10.1364/JLT.37.004665
- [11] O.I. Kotov, M.A. Bisyarin, I.E. Chapalo, A.V. Petrov, J. Opt. Soc. Am. B, **35** (8), 1990 (2018). DOI: 10.1364/JOSAB.35.001990