

09.5

Волоконно-оптический датчик на основе межмодового интерферометра с одномодовым подключением для одновременного измерения изгиба и растяжения

© А.А. Маркварт, Л.Б. Лиюкумович, Н.А. Ушаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: markvart_aa@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2021 г.

В окончательной редакции 23 августа 2021 г.

Принято к публикации 31 августа 2021 г.

Представлен волоконно-оптический датчик на базе структуры одномодовое–многомодовое–одномодовое волокно для одновременного измерения растяжения и изгиба. Показано, что одновременная демодуляция растяжения и изгиба может быть реализована при использовании фурье-анализа регистрируемых интерференционных колебаний.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, межмодовая интерференция, одномодовый–многомодовый–одномодовый, растяжение, изгиб.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.23.51784.18969

Волоконно-оптические датчики (ВОД) являются методом активных исследований благодаря высокой потенциальной точности, электромагнитной нейтральности, компактному размеру, возможности мультиплексирования и возможности удаленного опроса. ВОД позволяют измерять различные физические воздействия, такие как температура, растяжение, изгиб и т.п., что необходимо для различных приложений: от мониторинга зданий и сооружений до медицинской диагностики [1,2]. Одним из наиболее используемых типов ВОД являются датчики на основе волоконных интерферометров или волоконных брэгговских решеток. Однако типичными недостатками таких датчиков являются перекрестная чувствительность к различным физическим воздействиям и невозможность их одновременных измерений. Для устранения этих недостатков необходимо использовать сложные структуры с различными чувствительными элементами, имеющими разные чувствительности к измеряемым воздействиям.

Перспективным типом ВОД является датчик, основанный на структуре одномодовое–многомодовое–одномодовое волокно (от англ. singlemode–multimode–singlemode) [3,4]. Чувствительной частью здесь является секция многомодового волокна (ММВ) длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Эта секция с обеих сторон стыкуется к одномодовым волокнам (ОМВ) для подключения к источнику света и фотоприемнику. Излучение первого ОМВ возбуждает несколько мод в ММВ, которые после прохождения всей длины ММВ возбуждают основную моду второго ОМВ. Распределение поля на выходе ММВ является результатом интерференции мод и зависит от разности оптических путей (РОП) мод. При приложении физического воздействия к чувствительной секции изменяется РОП мод ММВ, что ведет к изменению поля на выходе ММВ

и мощности, поступающей из ММВ во второе ОМВ, которая фиксируется фотоприемником. Фактически такой датчик является вариантом межмодового интерферометра [5], поэтому его можно назвать межмодовым интерферометром с одномодовым подключением (МИОП). Обычно опрос такого датчика производится методом спектральной интерферометрии [6,7]: регистрируется зависимость уровня интенсивности прошедшего через МИОП света от длины волны $I(\lambda)$. В ряде публикаций было показано, что в сигнале МИОП можно учесть перекрестную чувствительность датчика к нескольким физическим воздействиям и измерить их одновременно [8–10]. В работе [8] продемонстрирован МИОП-датчик изгиба со скомпенсированной чувствительностью к температуре. В [9] реализовано одновременное измерение температуры и смещения, вызванного изгибом, а в [10] — температуры и растяжения. Однако на данный момент для демодуляции сигнала МИОП используются довольно простые алгоритмы обработки сигналов, такие как отслеживания смещения экстремумов сигнала $I(\lambda)$ и измерение их полуширины. Вследствие сложного характера и поведения зависимости $I(\lambda)$ такие простые подходы вряд ли смогут стать основой эффективных унифицированных алгоритмов определения возмущений. Более детальный анализ сигналов МИОП, в частности анализ их спектров, может привести к лучшим и более универсальным результатам. Существуют примеры применения усложненных алгоритмов обработки к сигналу МИОП [11–13], однако они до сих пор не были экспериментально апробированы для одновременных измерений нескольких физических воздействий. Настоящая работа посвящена экспериментальному анализу сигнала МИОП с применением преобразования Фурье (ПФ) для демонстрации одновременного измерения растяжения и изгиба.

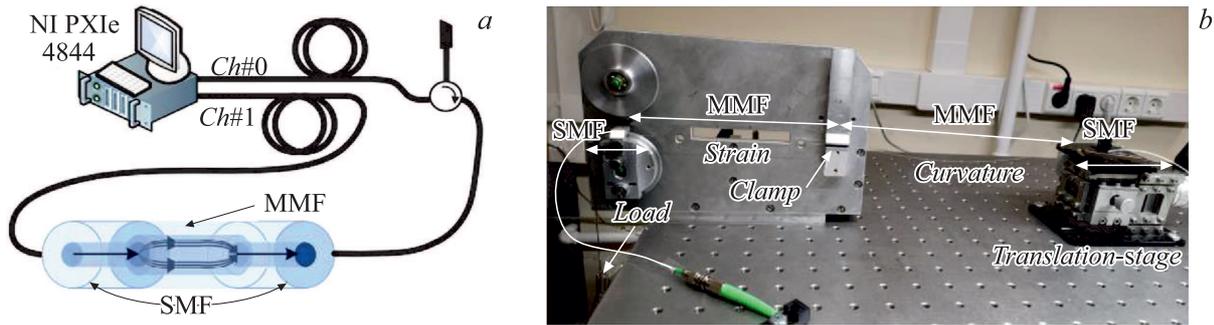


Рис. 1. Схема опроса МИОП (а) и фотография экспериментальной установки (b).

Возможность разделения эффекта растяжения и изгиба обусловлена их разным влиянием на РОП мод. В случае растяжения ММВ приращения РОП мод всегда практически пропорциональны исходному РОП мод с коэффициентом, не зависящим от номеров мод, а при изгибе ММВ ситуация зависит от типа волокна. Для параболического волокна также имеет место коэффициент пропорциональности, не зависящий от номеров мод, что препятствует реализации многопараметрических измерений [14]. В ступенчатых ММВ коэффициент пропорциональности зависит от номеров мод, что можно показать при помощи численного моделирования. Однако настоящая работа посвящена экспериментальной демонстрации возможности одновременного измерения натяжения и изгиба с использованием анализа спектров $I(\lambda)$. При этом теоретическое рассмотрение данного вопроса требует отдельного изучения, поскольку нужен анализ не только РОП мод, но целого ряда других факторов, определяющих сложную структуру сигнала $I(\lambda)$.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Оптоволоконная часть МИОП реализована посредством сварки отрезка многомодового волокна Thorlabs FG050LGA длиной 32 см со стандартными одномодовыми волокнами SMF-28. Волокна сваривались автоматическим сварочным аппаратом без каких-либо преднамеренных смещений в месте стыка. В этом случае возбуждаются только осесимметричные LP_{0p} моды многомодового волокна, что обеспечивает меньшее количество интерференционных компонент в $I(\lambda)$ и делает сигнал МИОП более приемлемым для обработки. Опрос МИОП производился при помощи четырехканального оптического интеррогатора NI PXIe 4844, который регистрирует спектральную зависимость отражения опрашиваемого оптического устройства в области $1.51\text{--}1.59\ \mu\text{m}$ (ширина диапазона сканирования $\Delta\lambda = 80\ \text{nm}$, шаг $d = 4\ \text{pm}$, количество точек $N = 20\ 000$). Поскольку данный интеррогатор регистрирует отраженное оптическое излучение, для измерения спектрального пропускания МИОП первый канал интеррогатора использовался как источник света, а нулевой канал — для регистрации выходного сигнала МИОП (рис. 1, а). Для исключения влияния отражения от МИОП при таком подключении

использовались циркулятор и поглощающая волоконная вилка. В результате регистрировался сигнал $I(\lambda)$ в виде последовательности отсчетов $I_i = I(\lambda_i)$, $i = 1, \dots, N$.

Для осуществления воздействий ММВ было разделено на две секции, одна подвергалась растяжению, а другая — изгибу. Это соответствует одновременному воздействию изгиба и растяжения на МИОП, поскольку изменение сигнала $I(\lambda)$ формируется интегральными межмодовыми фазовыми задержками и не зависит от места воздействия. При этом разделение на секции позволило вводить независимые и четко контролируемые по величине воздействия. Середина ММВ была зафиксирована прижимом (рис. 1, b). ОМВ с левой стороны МИОП было прижато к ролику, на который крепились грузики разной массы, вызывавшие определенное растяжение левой секции ММВ. ОМВ с правой стороны МИОП было зафиксировано на площадке микропозиционера на расстоянии $2A$ от точки прижима середины ММВ. Поскольку длина волокон в правой части МИОП между точками была больше, чем $2A$, то волокно имело естественный изгиб, который регулировался за счет смещения площадки микропозиционера. При этом можно приближенно считать, что волокно изогнуто с постоянным значением кривизны ρ , приращение которой оценивалось по формуле $2dA/(dA^2 + A^2)$ [8], где dA — смещение площадки микропозиционера.

Примеры исходных сигналов $I(\lambda)$ для трех наборов значений растяжения и кривизны изгиба представлены на рис. 2, а. На увеличенных фрагментах отчетливо видно, что вызванные воздействием сдвиги провалов и изменения их ширины имеют различный и труднопредсказуемый характер. Поэтому простые методы обработки зависимостей $I(\lambda)$ для определения воздействий вряд ли могут быть эффективны и универсальны. В настоящей работе предлагается использовать анализ спектра зависимости $I(\lambda)$, для этого к последовательности I_i применялось ПФ.

Для интерференции только двух мод (двухлучевая интерференция) с РОП, равной L , переменная часть сигнала $I(\lambda)$ представляет собой колебание $\cos(2\pi L/\lambda)$. Если изменение длины волны $\delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ мало по сравнению с центром диапазона λ_0 , то получим

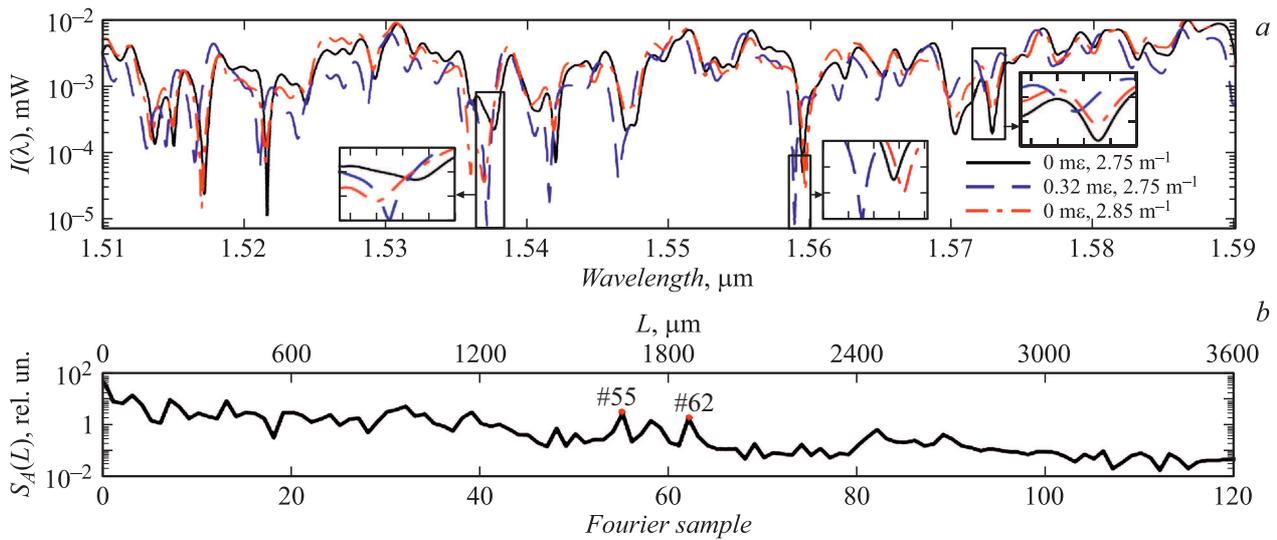


Рис. 2. Экспериментальные сигналы МИОП (а) и их спектры (б).

$\cos(2\pi L/\lambda) \approx \cos[(2\pi L/\lambda_0^2)\delta\lambda + \theta(L)]$, т. е. квазигармоническое колебание с частотой L/λ_0^2 и начальной фазой $\theta(L)$. Поэтому применение ПФ к последовательности I_i дает последовательность отсчетов S_i , где индексу i можно поставить в соответствие значения РОП L , выражаемые в виде $L = i\lambda_0^2/\Delta\lambda$. Также целесообразно рассматривать амплитуды $S_{Ai} = |S_i|$ и фазы спектральных компонент $\varphi_i = \arg[S_i]$.

Пример экспериментального спектра S_A представлен на рис. 2, б. По горизонтальным осям указаны номера отсчетов i и соответствующие значения L . Максимумы S_{Ai} характеризуют присутствие в сигнале I_i интерференции определенных пар мод (компоненты с близкими РОП могут сливаться из-за ограниченного разрешения РОП, равного $\Delta L = \lambda_0^2/\Delta\lambda \approx 30 \mu\text{m}$). Отметим, что при используемых в экспериментах диапазонах растяжений и изгибов ММВ наблюдаемые зависимости S_{Ai} практически не изменялись. В соответствии с предлагаемой концепцией для определения влияния возмущений были выбраны два максимума S_{A1} и S_{A2} и анализировались фазы φ_1 и φ_2 .

В проведенных измерениях растяжение ε менялось от 0 до $0.32 \text{ m}\varepsilon$ с шагом в $0.08 \text{ m}\varepsilon$, а кривизна изгиба ρ менялась от 2.75 до 2.85 m^{-1} с шагом 0.02 m^{-1} . В результате было зарегистрировано 30 зависимостей I_i , по которым далее находились спектры S_i и фазы спектральных компонент. В итоге на основе анализа зависимости фаз φ_i от воздействий были выбраны две точки спектра (отсчеты #55 и #62) с соответствующими значениями L_1 и L_2 , равными 1651 и $1861 \mu\text{m}$. В этих точках наблюдаются характерные максимумы амплитудного спектра (рис. 2, б), а зависимости фаз этих компонент от воздействий показали лучшую линейность.

Примеры зависимостей φ_{55} и φ_{62} от одного из параметров при фиксированном значении другого показаны на рис. 3, из которого нетрудно видеть, что зависимости

близки к прямым линиям. Аппроксимация зависимостей φ_{55} и φ_{62} от разных возмущений уравнением плоскости дает

$$\begin{aligned} \varphi_{55} &= -5.4692 + 5.4025\varepsilon + 1.0745\rho, \\ \varphi_{62} &= -18.0707 + 6.6437\varepsilon + 6.04\rho, \end{aligned} \quad (1)$$

где растяжение ε и кривизна изгиба ρ приведены в единицах $[\text{m}\varepsilon]$ и $[\text{m}^{-1}]$ соответственно. Скорректированный R^2 -параметр (коэффициент детерминации) аппроксимации двумерной зависимости $\varphi(\varepsilon, \rho)$ плоскостью составил 0.9997 для φ_{55} и 0.9992 для φ_{62} , что демонстрирует высокую адекватность аппроксимации (1). Уравнения (1) обладают линейной независимостью: число обусловленности для (1) равно 4, что указывает на малую чувствительность решения к небольшим ошибкам фаз Фурье-отсчетов. Для оценки растяжения и изгиба по сигналам данной схемы МИОП система уравнений (1) может быть решена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.534 + 0.237\varphi_{55} + 0.0421\varphi_{62}, \\ \rho &= 2.4 + 0.261\varphi_{55} + 0.212\varphi_{62}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, на примере растяжения и изгиба ММВ в схеме МИОП экспериментально продемонстрирована возможность одновременного измерения нескольких физических параметров при использовании опроса МИОП со сканированием длины волны, вычислением спектра полученных осцилляций $I(\lambda)$ и анализом фаз пары спектральных компонент. Такая обработка сложного по виду и поведению сигнала МИОП позволяет извлечь из него информацию, непосредственно связанную с изменением РОП мод ММВ. При этом используемые операции являются относительно простыми стандартными преобразованиями исходно регистрируемого сигнала $I(\lambda)$. Поэтому предложенный подход к реализации измерений с МИОП может стать основой

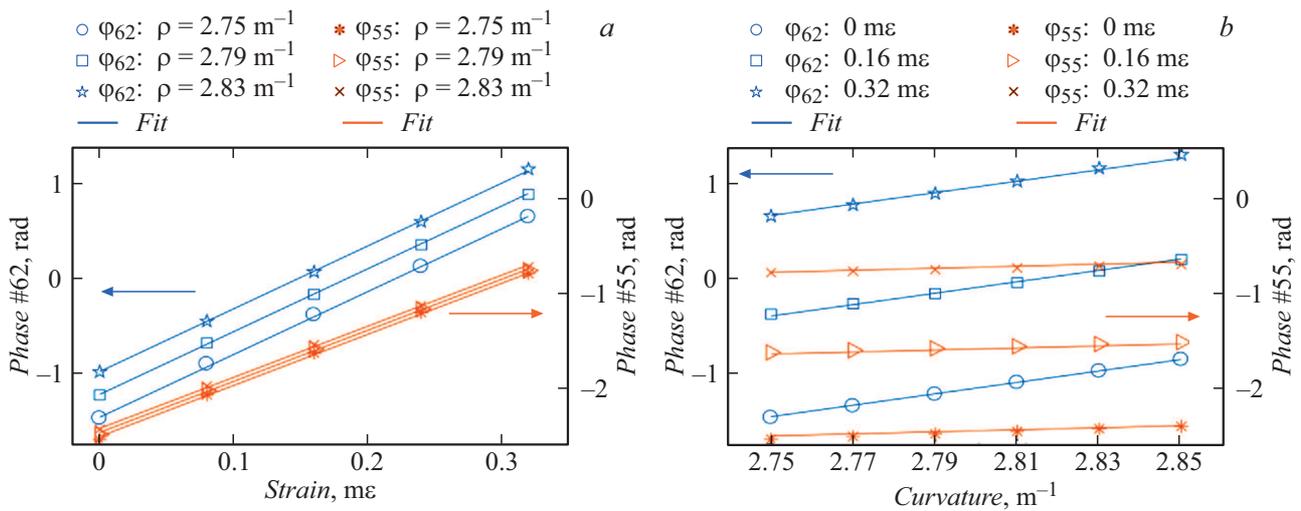


Рис. 3. Зависимости фаз ϕ_{55} и ϕ_{62} от растяжения (a) и кривизны изгиба (b).

эффективного унифицированного принципа реализации измерений в структурах на основе межмодовых интерферометров с одномодовым подключением, в том числе одновременных измерений разных физических величин.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90262.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I.R. Matias, S. Ikezawa, J. Corres, *Fiber optic sensors. Current status and future possibilities* (Springer International Publ., Switzerland, 2017). DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9
- [2] N.A. Ushakov, A.A. Markvart, D.D. Kulik, L.B. Liokumovich, *Photonics*, **8** (5), 142 (2021). DOI: 10.3390/photonics8050142
- [3] A. Kumar, R.K. Varshney, S. Antony, P. Sharma, *Opt. Commun.*, **219** (1-6), 215 (2003). DOI: 10.1016/S0030-4018(03)01289-6
- [4] Q. Wu, Y. Qu, J. Liu, J. Yuan, S.P. Wan, T. Wu, X.D. He, B. Liu, D. Liu, Y. Ma, Y. Semenova, P. Wang, X. Xin, G. Farrell, *IEEE Sens. J.*, **21** (11), 12734 (2020). DOI: 10.1109/JSEN.2020.3039912
- [5] 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
- [6] S.M. Tripathi, A. Kumar, R.K. Varshney, Y.B.P. Kumar, E. Marin, J.P. Meunier, *J. Light. Technol.*, **27** (13), 2348 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2008.2008
- [7] M. Kumar, A. Kumar, S.M. Tripathi, *Opt. Commun.*, **312**, 222 (2014). DOI: 10.1016/j.optcom.2013.09.034
- [8] S. Silva, O. Frazão, J. Viegas, L.A. Ferreira, F.M. Araújo, F.X. Malcata, J.L. Santos, *Meas. Sci. Technol.*, **22** (8), 085201 (2011). DOI: 10.1088/0957-0233/22/8/085201
- [9] Q. Wu, A.M. Hatta, P. Wang, Y. Semenova, G. Farrell, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23** (2), 130 (2011). DOI: 10.1109/LPT.2010.2093515
- [10] C. Lu, J. Su, X. Dong, T. Sun, K.T.V. Grattan, *J. Light. Technol.*, **36** (13), 2796 (2018). DOI: 10.1109/JLT.2018.2825294
- [11] Y. Cardona-Maya, I. Del Villar, A.B. Socorro, J.M. Corres, I.R. Matias, J.F. Botero-Cadavid, *J. Light. Technol.*, **35** (17), 3743 (2017). DOI: 10.1109/JLT.2017.2719923
- [12] A. Ahrens, A. Sandmann, K. Bremer, B. Roth, S. Lochmann, *Proc. SPIE*, **9634**, 96345W (2015). DOI: 10.1117/12.2195114
- [13] A.V. Petrov, I.E. Chapalo, M.A. Bisyarin, O.I. Kotov, *Appl. Opt.*, **59** (33), 10422 (2020). DOI: 10.1364/AO.400345
- [14] А.А. Маркварт, Л.Б. Лиокумович, Н.А. Ушаков, *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки*, **14** (2), 104 (2021). DOI: 10.18721/JPM.14209