

09.5

Локализация внешнего воздействия в распределенном межмодовом волоконном интерферометре

© О.И. Котов, И.Е. Чапало

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: kotov@rphf.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2015 г.

Рассмотрен межмодовый волоконный интерферометр в двунаправленном непрерывном режиме возбуждения с возрастающим числом распространяющихся мод вдоль световода. Экспериментально показана возможность определения места возмущения световода независимо от условий воздействия.

Волоконно-оптические датчики физических величин с использованием эффектов межмодовой интерференции интенсивно исследуются в последние годы [1,2]. Одной из нерешенных проблем в таких устройствах является задача определения места воздействия на многомодовый волоконный световод (МВС) в случае распределенного датчика с протяженным чувствительным элементом [3]. Последние устройства находят применение, например, в волоконно-оптических охранных системах, где проблема локализации воздействия обычно решается простым увеличением количества чувствительных элементов [4].

Целью данной работы является демонстрация возможности локализации произвольных внешних воздействий межмодовым волоконным интерферометром (МВИ) с непрерывным режимом работы лазера. Для этого предлагается использовать схему МВИ в режиме непрерывного двунаправленного оптического возбуждения с двумя фотоприемными системами регистрации сигналов и неравномерным распределением вдоль световода количества распространяющихся мод. Подобная, но однонаправленная схема представлена в нашей предыдущей работе [5], где продемонстрирована возможность локализации при условии одинакового внешнего воздействия на разные участки протяженного световодного тракта. В данной работе использование двунаправленного режима распространения света позволяет снять указанное ограничение

и определить место воздействия независимо от величины внешнего возмущения МВС. Подчеркнем, что основным физическим механизмом работы рассматриваемого измерительного устройства остается дифференциальная фазовая модуляция (ДФМ) между модами, распространяющимися в волокне, которая приводит к изменениям регистрируемой на выходе МВС интерференционной картины [6].

В работе [5] продемонстрировано, что характеристики выходных сигналов МВИ зависят от количества распространяющихся мод в месте воздействия. Одной из таких характеристик является ширина спектра выходного сигнала ДФМ. Для определения места произвольного воздействия на чувствительный элемент (ЧЭ) прежде всего поясним характер зависимости спектра сигналов от количества распространяющихся в месте воздействия мод.

Известно, что ширина спектра сигналов фазовой модуляции определяется индексом модуляции. При гармонической модуляции с частотой Ω это свойство отражено так называемой формулой Карсона [7]: с ростом индекса модуляции m расширяется полоса частот ΔF , занимаемая сигналом $\Delta F = (m + 1)\Omega$. В МВС индекс дифференциальной фазовой модуляции определяется произведением разности постоянных распространения $(\beta_k - \beta_n)$ интерферирующих мод на величину изменения длины волокна ΔL от внешнего воздействия: $m = \Delta L(\beta_k - \beta_n)$. При числе распространяющихся мод более двух возникает набор индексов модуляции с разными величинами $\Delta\beta_{kn} = (\beta_k - \beta_n)$.

Обобщим формулу Карсона для случая ДФМ в многомодовых световодах. Полоса частот сигналов МВИ ΔF будет определяться в основном наибольшим индексом ДФМ $m_{\max} = \Delta L(\beta_k - \beta_n)_{\max}$, т.е. $\Delta F = (m_{\max} + 1)\Omega$. При больших индексах модуляции $m \gg 1$ можно записать простое выражение $\Delta F = \Delta L(\beta_0 - \beta_M)\Omega$, где индексом M отмечено число распространяющихся мод в данном отрезке волоконного световода, подверженного внешнему воздействию. Если учесть свойство эквидистантности постоянных распространения в параболическом волокне $(\beta_0 - \beta_1 = \beta_1 - \beta_2 = \beta_2 - \beta_3 = \dots = \Delta\beta)$, ширина полосы записывается в виде $\Delta F = \Delta L(\beta_0 - \beta_M)\Omega = \Delta L\Delta\beta M\Omega$, т.е. ширина спектра сигналов многомодового интерферометра зависит линейно от количества мод M , распространяющихся на участке волоконного световода, подверженного внешнему воздействию.

Спектр сигналов межмодового интерферометра может иметь довольно сложный вид вследствие случайного характера амплитуд и фаз

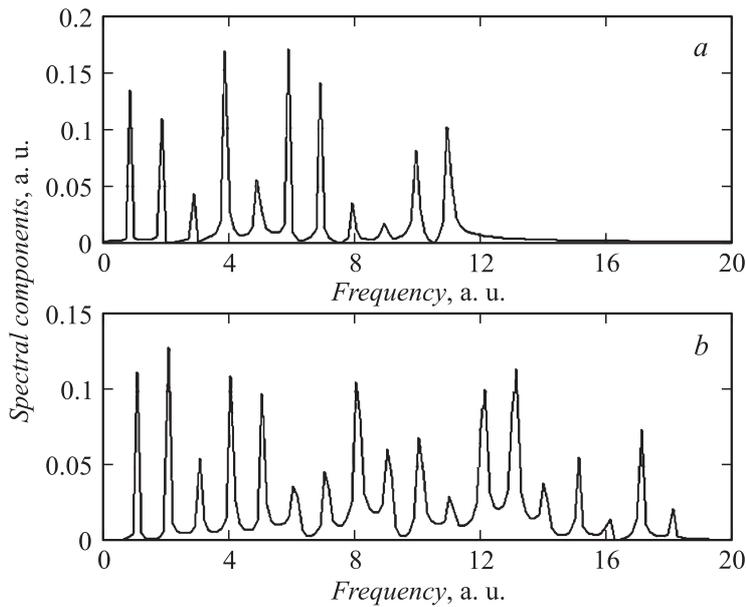


Рис. 1. Модельные расчеты спектров сигналов МВИ для случаев 12 (*a*) и 19 (*b*) мод, распространяющихся в многомодовом световоде с параметром профиля $\alpha = 2$. Ось абсцисс соответствует номеру гармоники. Ось ординат — амплитуды гармоник в относительных единицах. Внешнее воздействие имитировано линейным увеличением длины волокна на $\Delta L = 1100 \mu\text{m}$.

интерферирующих мод, возникающего при распространении света в реальных световодах с различными продольными нерегулярностями (изгибы, сжатия, скрутки). Это подтверждается результатами модельных расчетов при линейном воздействии на участок волокна (рис. 1).

Применяя полученный результат связи ширины спектра с числом мод, локально распространяющихся в световоде, представим простую модель, поясняющую принцип локализации внешнего воздействия в распределенном МВИ. Как показано на рис. 2, *a*, одновременно регистрируются два оптических сигнала, полученных от световых потоков, распространяющихся в противоположных направлениях. В обоих направлениях обеспечивается нарастающее количество мод по мере

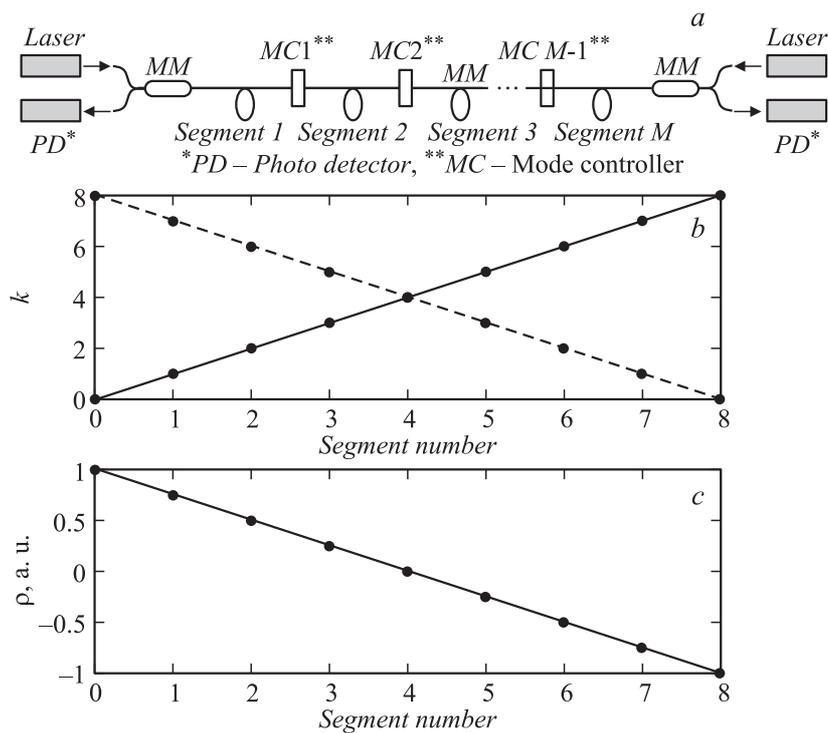


Рис. 2. Схема МВИ для работы в двунаправленном режиме с увеличением количества мод по мере прохождения волоконного тракта (а), иллюстрация изменения количества распространяющихся мод в МВС в двух противоположных направлениях (b) и соответствующая зависимость параметра локализации ρ от номера сегмента тракта (c).

распространения света от входного торца волокна к выходному с помощью модовых контроллеров [8].

Предположим, что каждый модовый контроллер увеличивает количество мод на одну единицу, так что число локализуемых сегментов равно числу распространяющихся мод на выходе тракта. Ширины спектров двух сигналов, полученных с противоположных концов линии, в такой схеме имеют разные величины в зависимости от места воздействия на световод.

Если воздействие осуществляется на участок волокна, в котором распространяется k мод для одного из направлений, то количество мод для другого направления будет равно разности $(M - k)$. В соответствии с этим подходом ширины спектров двух сигналов будут иметь величины: $\Delta F_1 = k\Delta L\Delta\beta\Omega$ и $\Delta F_2 = (M - k)\Delta L\Delta\beta\Omega$. Далее удобно ввести „параметр локализации“ $\rho = (\Delta F_2 - \Delta F_1)/(\Delta F_1 + \Delta F_2) = (M - 2k)/M$. Последнее выражение показывает важное свойство введенного параметра — его величина не зависит от условий возмущения световода, поскольку параметры, характеризующие воздействие $(\Delta L\Omega)$, являются одинаковыми для сигналов от встречных волн. Параметр ρ определяется только координатой воздействия, отраженной числом k . Принципы формирования параметра локализации ρ продемонстрированы на рис. 2, *b, c*. Здесь же показана зависимость ρ от продольной координаты (номера сегмента тракта), связанной с числом мод k в соответствии с принципами работы предлагаемого устройства. Крайние точки на этой линии ($\rho = +1, -1$) соответствуют случаям возбуждения на начальных участках волокна в двух направлениях одномодового режима распространения и режимов полного возбуждения всех мод на конечных участках ($k = 0, M$). Средняя точка ($\rho = 0$) возникает в середине волоконного тракта в условиях равенства ширин спектра двух сигналов ($k = M/2$).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3, *a*. В качестве источника оптического излучения используется когерентный полупроводниковый лазер DFB, работающий на длине волны 1310 nm. Излучение лазера распространяется по одномодовому волокну и при помощи одномодового Y-разветвителя разделяется на две части в пропорциях 50/50. ЧЭ возбуждается с двух сторон в противоположных направлениях посредством двух многомодовых Y-разветвителей. Возбуждение МВС посредством одномодового световода обеспечивало маломодовый режим распространения света на начальных участках. ЧЭ состоит из трех сегментов градиентных МВС с двумя одинаковыми модовыми контроллерами между ними. Выходная спекл-картина каждого из направлений регистрируется на выходных торцах многомодового разветвителя одной из двух веб-камер посредством микрообъектива и с применением поляризатора для повышения контраста.

Три участка волокна нагревались поочередно в разных режимах с изменением максимальной температуры и скорости нагрева. Для определения места воздействия вычислялись спектры сигналов двух веб-камер, после чего вычислялся введенный выше параметр локализации ρ . Результаты вычислений параметра локализации в соответствии

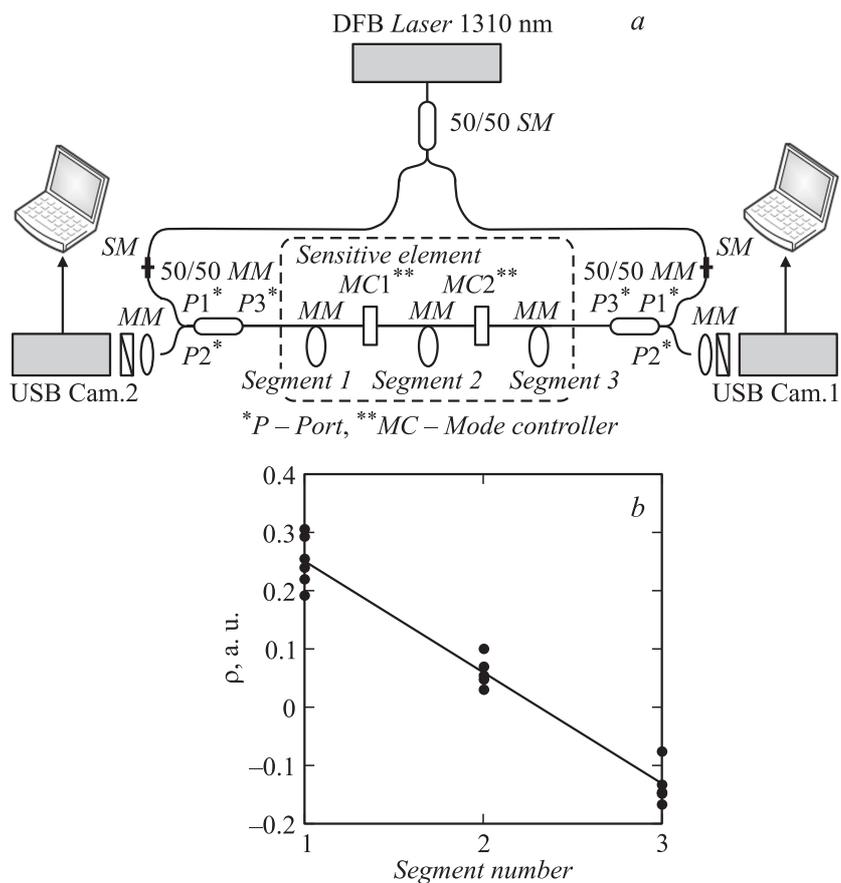


Рис. 3. Схема экспериментальной установки (*a*) и соответствие вычисленных по результатам экспериментов значений параметра локализации ρ и номеров сегментов МВС, подверженных внешнему воздействию (*b*).

с сегментом, подверженным внешнему воздействию, представлены на рис. 3, *b*. Хорошо видно, что значения параметра локализации концентрируются вокруг некоторого уникального значения в зависимости от номера сегмента, подверженного воздействию.

Следует отметить, что значения ρ для случая воздействия на центральный сегмент отличаются от нуля, а модули значений ρ для

двух крайних сегментов не равны друг другу. Это объясняется тем, что в данной схеме не удастся простыми настройками обеспечить одинаковые условия возбуждения модового состава в противоположных направлениях.

Следует подчеркнуть, что все рассмотренные выше результаты являются корректными лишь при условии использования сигнальных параметров ($\Delta F_{1,2}$) после операции их усреднения по множеству сигналов от различных частей интерференционной картины, т.е. после устранения влияния на них эффекта фединга сигналов [9].

Представленные выше экспериментальные результаты и простая модель межмодового волоконного интерферометра в режиме двунаправленного возбуждения с неравномерным распределением мод вдоль световода демонстрируют возможность определения места воздействия на волокно не зависимо от условий возмущения. Отмеченное свойство многомодового волоконного интерферометра, выявленное впервые в данной работе, представляется полезным для повышения эффективности многомодовых распределенных интерферометрических датчиков.

Список литературы

- [1] Luan P, Tong Z, Cao Y, Zhang W // Opt. Eng. 2015. V. 54(3). P. 036 104-(1–5).
- [2] Li C, Ning T, Wen X, Li J et al. // Opt. Communications. 2015. V. 343. P. 6–9.
- [3] Куликов А., Игнатьев А. // Алгоритм безопасности. 2010. № 4. С. 56–61.
- [4] Горбачев О.В. // Информост Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2006. № 1 (43). С. 54–57.
- [5] Котов О.И., Чапало И.Е., Медведев А.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 31–36.
- [6] Котов О.И., Косарева Л.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 2. С. 52–63.
- [7] Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 2000. 462 с.
- [8] Hallam A.G. Mode control in multimode optical fibre and its applications. PhD dissertation, Aston University, 2007. 203 p.
- [9] Котов О.И., Косарева Л.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 18. С. 85–94.