

09.5

## **Зависимость сигналов межмодового волоконного интерферометра от распределения мощности по модам**

© О.И. Котов, И.Е. Чапало, А.В. Медведев

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

Поступило в Редакцию 22 января 2014 г.

Рассмотрены сигналы межмодового волоконного интерферометра в условиях внешних воздействий и изменения распределения оптической мощности по модам вдоль волокна. Экспериментально показано, что параметры выходных сигналов интерферометра существенно зависят от количества распространяющихся мод на участке воздействия на световод.

При непрерывном когерентном возбуждении многомодового световода на его выходном торце формируется пятнистая картина (спекл-картина) в результате интерференции мод с различными фазами [1,2]. Такие межмодовые волоконные интерферометры (МВИ) достаточно изучены и находят применение в распределенных и сосредоточенных датчиках физических величин [3–9].

Традиционный режим работы МВИ характеризуется непрерывным возбуждением световода, а также не зависящими от продольной координаты распределением мощности по модам и числом распространяющихся мод. Свойства сигналов таких МВИ не зависят от координаты внешнего локального возмущения световода, что ограничивает их функциональные возможности и затрудняет применение в распределенных сенсорных устройствах. Судя по литературным данным, например [10,11], эффективное решение этой проблемы, на наш взгляд, до сих пор не найдено.

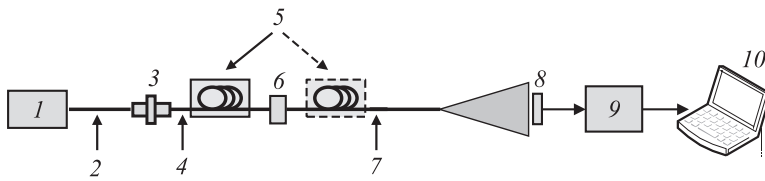
В данной работе экспериментально исследованы выходные сигналы МВИ, состоящего из 2 последовательно соединенных одинаковых многомодовых световодов, в которых возбуждено различное количество распространяющихся мод. Продемонстрированы различия сигналов в зависимости от того, какой из световодов подвергнут возмущению.

Выходной сигнал МВИ — это изменение интенсивности света  $\Delta I(t)$  в заданном сегменте спекл-картины при внешнем воздействии на волокно  $V(t)$ . Величина  $\Delta I(t)$  регистрируется как выходной сигнал фотоприемника  $U(t)$ , на который поступает излучение данного сегмента спекл-картины. При использовании нескольких фотоприемников и регистрации различных фрагментов спекл-картины МВИ может формировать ряд выходных сигналов, одновременная обработка которых позволяет бороться с амплитудным федингом, а также снизить нелинейность амплитудной характеристики [4,5]. Однако в данной работе для простоты рассматривается случай регистрации одного выходного сигнала МВИ.

Отметим, что природа сигналов МВИ связана с интерференцией излучения мод на выходе волоконного тракта, в результате которой изменения фазовых задержек мод от внешнего воздействия на световод приводят к изменению спекл-картины. При этом подчеркнем, что для формирования выходного сигнала МВИ обязательна пространственная фильтрация (диафрагмирование) выходного излучения многомодового световода. При регистрации всего выходного излучения его мощность постоянна и не меняется от трансформации структуры спекл-картины вследствие воздействий.

Чувствительность МВИ к внешним воздействиям можно характеризовать отношением  $\Delta I(t)/V(t)$ . Величина изменения интенсивности  $\Delta I(t)$  определяется совокупным вкладом в спекл-картину различных пар мод  $\Delta I_{ik}(t)$ . В свою очередь  $\Delta I_{ik}(t)$  зависят от разности фаз интерферирующих мод  $(\varphi_i - \varphi_k)$ , которые определяются разностью постоянных распространения мод  $(\beta_i - \beta_k)$ . Зависимость  $\Delta I(t)$  от количества интерферирующих мод  $N$  имеет сложный характер и зависит от ряда параметров МВИ. Однако можно утверждать, что при росте  $N$  максимальная разность постоянных распространения и количество пар мод с большой разностью  $\Delta\beta_{ik}$  растет и происходит увеличение чувствительности МВИ  $\Delta I(t)/V(t)$ . Далее в работе экспериментально показано, что это свойство приводит к различиям выходных сигналов МВИ в зависимости от участка, который подвергается внешнему возмущению при различии числа распространяющихся мод на этих участках.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Использовался He–Ne-лазер с длиной волны 632 nm, излучение которого вводилось в волоконно-оптический тракт посредством одномодового волокна  $9/125\ \mu\text{m}$  длиной 2 m. Тракт состоял из двух одинаковых многомодовых световодов 4, 7 длиной 15 m с включенным между ними

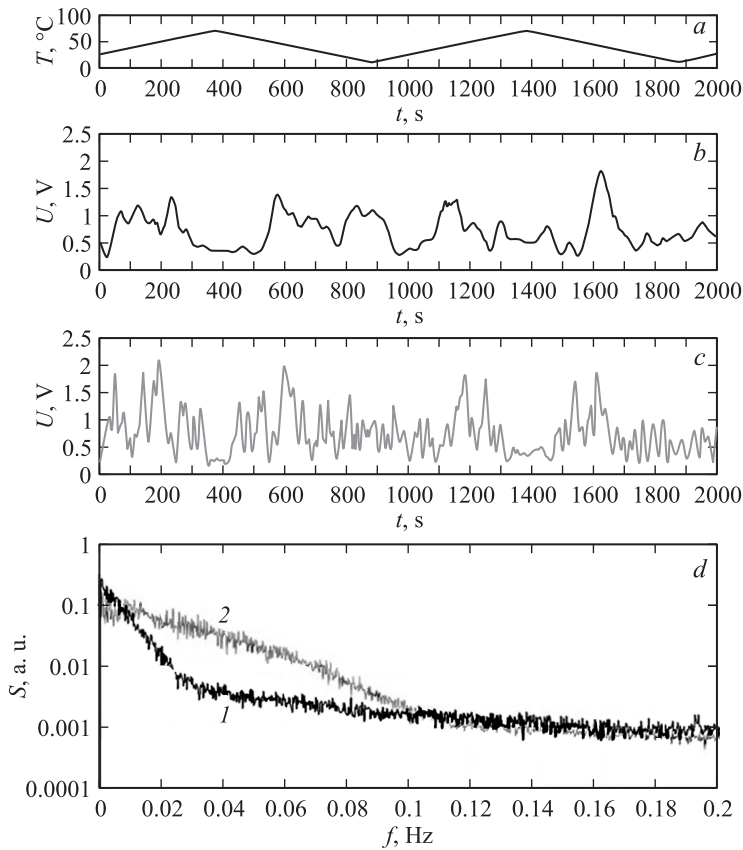


**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки: 1 — источник когерентного излучения (мощность 2 мВт); 2 — одномодовый волоконный вывод (pig-tail); 3 — волоконно-оптический разъем; 4, 7 — многомодовые волокна corning 50/125  $\mu\text{m}$ ; 5 — устройство контроля температуры волокна на основе элементов Пельтье; 6 — модовый контроллер; 8 — фотоприемное устройство, 9 — устройство сбора данных (DAQ), 10 — компьютер.

модовым контроллером 6, преобразующим количество распространяющихся мод [12] и выполненным на основе малого воздушного зазора между торцами световодов с юстируемой регулировкой. Небольшое количество мод, возбужденных в первом многомодовом световоде 4, преобразовывалось в существенно большее количество мод во втором световоде 7 без внесения заметных оптических потерь в месте зазора. Интерференционная картина на выходе первого световода 4 контролировалась в процессе настройки схемы и демонстрировала 5–6 основных пятен. Интерференционная картина на выходе второго световода 7, часть которой детектировалась фотоприемником 8, демонстрировала около 30 пятен.

Внешнему воздействию (изменению температуры участков световода при помощи элемента Пельтье 5) подвергались поочередно световоды 4 и 7. При этом все остальные условия эксперимента (положение и количество световодов, условия возбуждения, форма и амплитуда воздействия, мощность источника, положение выходного торца волокна и фотоприемника и пр.) были неизменны. Температурное воздействие в каждом эксперименте носило периодический характер с интервалами равномерного нагревания и охлаждения в диапазоне 10–70 °С. Цикл каждого нагревания и охлаждения длился примерно 8 min, при этом длительность измерений составляла 4 цикла нагревания и охлаждения.

На рис. 2, *b* и *c* представлены фрагменты полученных в ходе эксперимента зависимостей выходного сигнала от времени при температурном возмущении световодов 4 и 7 соответственно. Зависимости их температуры от времени представлена на рис. 2, *a*. Из зависимостей видно, что при возмущении световода 4 наблюдается существенно



**Рис. 2.** Зависимости выходного сигнала МВИ от времени при нагревании одного из участков тракта: *a* — зависимость температуры нагреваемого участка от времени; *b* — выходной сигнал МВИ при нагревании 1-го МВС; *c* — выходной сигнал МВИ при нагревании 2-го МВС; *d* — спектры представленных выходных сигналов МВИ: *1* — на фрагменте *b*, *2* — на фрагменте *c*.

меньшее количество осцилляций (пар экстремумов) сигнала (около 20) по сравнению со случаем возмущения световода 7 (более 50).

Рис. 2, *d*, на котором представлены спектры соответствующих сигналов, наглядно демонстрирует, что при воздействии на первый многомодовый световод ширина спектра существенно (в несколько раз) меньше, чем при воздействии на второй световод.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что выходные сигналы в двух указанных случаях возмущения тракта существенно отличаются. Для количественных оценок наблюдаемого эффекта можно использовать различные характеристики выходных сигналов. Это может быть, например, спектр сигнала в случае относительно больших величин внешнего возмущения, амплитуда сигнала в случае относительно слабых внешних воздействий или характеристики пространственного распределения оптических сигналов МВИ в дальней или ближней зоне излучения многомодового световода. Также, на наш взгляд, возможно использование функций распределения выходных сигналов МВИ по интенсивности [13].

Ключевым моментом данной работы являлось использование многомодового волоконного тракта с изменяющимся модовым составом вдоль волокна. Осуществление такого режима возможно разными способами. В нашем случае применялся модовый контроллер на основе регулируемого зазора. Однако такой способ, по нашему мнению, не является единственным. Можно изменять количество мод с помощью локальных устройств, вносящих взаимодействие мод посредством изгибов, скруток, сжатия участков волокна без его разрыва.

Представляется возможным также использовать многомодовый световод в режиме селективного маломодового возбуждения и неустановившегося распределения мощности по модам. Такой режим хорошо известен в многомодовых волоконных системах связи [14] и характеризуется диффузионным расширением модового состава вдоль волокна вследствие взаимодействия мод на микронеоднородностях. Часто применяется термин „длина межмодовой связи“ многомодового волокна, на которой устанавливается стационарный режим распределения мощности по модам (функция, описывающая распределение мощности по модам перестает зависеть от продольной координаты) [14]. Для многомодового параболического волокна эта длина может составлять  $\sim 10$  km. В неустановившемся режиме (при длинах световода меньше 10 km) количество распространяющихся мод зависит от продольной координаты и отклик МВИ может зависеть от места воздействия на световод. В этом случае количество разрешимых зон будет определяться максимальным числом модовых групп данного световода, что для связных волокон составляет  $\sim 30$ , в предположении возможности регистрации изменения модового состава на одну модовую группу. Для более точных оценок необходимо рассматривать конкретное сенсорное устройство.

Следует отметить важность эффектов связи мод в работе МВИ в режиме с изменением модового состава. Наиболее сложным является анализ преобразования фазовых соотношений мод с учетом их взаимодействия вдоль волокна, который практически отсутствует в известной литературе. Этот сложный теоретический вопрос требует отдельного рассмотрения.

Представленные выше результаты исследования МВИ в режиме с возрастанием числа мод вдоль волокна впервые демонстрируют возможность дискриминации сигналов от места воздействия на многомодовый световод при непрерывном когерентном возбуждении. Авторы полагают, что использование рассмотренного режима МВИ в распределенных волоконных датчиках позволит решить проблему локализации внешних воздействий.

## Список литературы

- [1] *Layton M.R., Bucaro J.A.* // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 5. P. 666–670.
- [2] *Joseph W. Goodman* Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications. Roberts & Company publ, 2010.
- [3] *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.
- [4] *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.
- [5] *Котов О.И., Косарева Л.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 22. С. 26–35.
- [6] *Кульчин Ю.Н.* Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001. 272 с.
- [7] *Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ланцов А.Д.* // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 4. С. 339–342.
- [8] *Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ланцов А.Д.* // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 1. С. 56–58.
- [9] *Bradley Regez, Mohammad Sayeh, Ajay Mahajan, Fernando Figueroa* // Measurement. 2009. V. 42. P. 183–188.
- [10] *Куликов А., Игнатьев А.* // Алгоритм безопасности. 2010. № 4. С. 56–61.
- [11] *Горбачев О.В.* // Информост. Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2006. № 1 (43). С. 54–57.
- [12] *Hallam A.G.* Mode control in multimode optical fibre and its applications. PhD dissertation. Aston University, 2007. 203 p.
- [13] *Papen G.C., Murphy G.M.* // J. Lightwave Technology. 1999. V. 17. N 5. P. 817–822.
- [14] *Убайдуллаев Р.Р.* Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000. 268 с.