

Метод детектирования малых колебаний на основе гомодинной демодуляции с тандемным низкокогерентным интерферометром

© П.В. Волков, Д.А. Семиков, О.С. Вязанкин, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тertyшник

Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: semikovda@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 9 апреля 2023 г.

Принято к публикации 9 апреля 2023 г.

Предложен метод детектирования малых колебаний длины интерференционных волоконно-оптических датчиков, позволяющий компенсировать проблему медленного дрейфа рабочей точки при удаленном сенсоре. Результат достигается за счет объединения методов гомодинной демодуляции с тандемным низкокогерентным интерферометром. Теоретически и экспериментально показана возможность детектирования акустического воздействия в рабочей полосе частот 4 kHz с чувствительностью до 0.3 nm.

Ключевые слова: гомодинная демодуляция, тандемная низкокогерентная интерферометрия, интерферометр Майкельсона, волоконно-оптические датчики.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55753.78-23

Введение

Волоконно-оптические сенсоры получают все большее распространение в настоящее время в различных задачах мониторинга. Достаточно широкое распространение получили интерференционные датчики, в которых внешнее воздействие приводит к изменению оптической разности хода интерферирующих волн [1–4]. Соответственно вопрос разработки систем детектирования сигналов с таких датчиков, обладающих высокой чувствительностью и стабильностью, является очень актуальным.

Одним из широко распространенных методов регистрации сигналов с интерференционных датчиков является обработка спектра отраженного или прошедшего сигнала [5–7], при котором отслеживается сдвиг минимумов и максимумов в спектре отражения. Несмотря на относительную простоту реализации, в данной схеме сложно осуществить мультиплексирование датчиков, а также есть ограничения по регистрируемым частотам.

Для регистрации высокочастотных процессов, как правило, используют интерференционные схемы [8–10]. В простейшем варианте при когерентном освещении изменение длины резонатора приводит к изменению интенсивности света на выходе устройства, что может быть зарегистрировано с достаточно высокой точностью. Основной проблемой такого подхода является настройка рабочей точки сенсорного интерферометра в положение максимальной чувствительности и ее удержание в этом состоянии, что осложняется случайным дрейфом оптической длины резонатора, вызванным паразитными деформациями и изменениями температуры. Существуют различные методы борьбы с данным эффектом: подстройка длины волны лазера [11], методы гомодинной демодуляции [12–14] и различные методы низ-

когерентной интерферометрии [15–19]. В настоящее время методы гомодинной демодуляции, основанные на введении дополнительной модуляции в чувствительный элемент, хорошо разработаны для когерентных схем детектирования. Однако необходимость модулирования именно сенсорной части приводит к сложности в мультиплексировании датчиков, а также к сложности создания удаленных сенсоров. В настоящей работе предложен метод детектирования малых колебаний оптической задержки в интерференционных волоконно-оптических сенсорах, объединяющий алгоритм гомодинной демодуляции и низкокогерентную интерферометрию, что позволило развязать сенсорную зону и зону модуляции, что, в свою очередь, сняло ограничение на расстояние до сенсора от источника и системы детектирования.

1. Описание схемы

Рассмотрим два последовательно соединенных интерферометра (рис. 1). Пусть оба интерферометра представляют собой волоконный интерферометр Майкельсона, где роль разветвителя играет волоконный сплиттер (FC), а оптическое волокно в каждом плече намотано с некоторым натяжением на пьезокерамический цилиндр (РТ). Это позволяет изменять разность длин плеч за счет подачи напряжения на цилиндр, при котором происходит увеличение или уменьшение его диаметра, что, в свою очередь, приводит к изменению длины намотанного волокна. Между интерферометрами устанавливался оптический изолятор, что позволило исключить многократную интерференцию отраженных волн. Интерферометр Int1 выступал в роли опорного, а интерферометр Int2 в роли сенсорного. Очевидно, что реальный сенсор может иметь любую другую конструкцию, представляющую

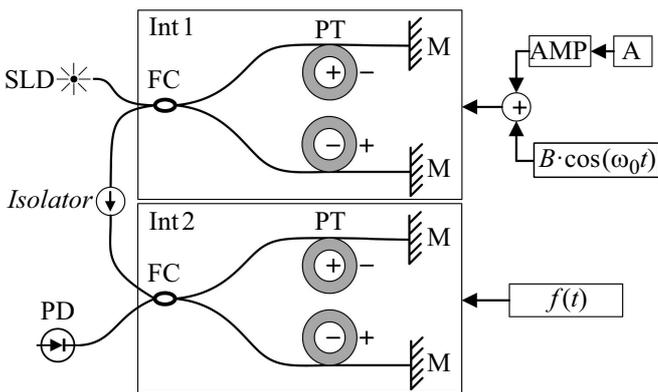


Рис. 1. Схема тандемного интерферометра (ТИ), собранного в эксперименте. Обозначения: Int1 и Int2 — опорный и сенсорный интерферометр соответственно, SLD — суперлюминесцентный диод, FC — волоконно-оптический делитель 2×2, PT — пьезокерамические катушки, M — зеркало Фарадея, Isolator — волоконно-оптический изолятор, PD — фотоприемное устройство, А — цифро-аналоговый преобразователь, AMP — высоковольтный усилитель, $B \cdot \cos(\omega_0 t)$ — опорная модуляция, $f(t)$ — измеряемое воздействие.

собой интерферометр, в частности внутриволоконный резонатор типа Фабри–Перо или оптомеханическую систему [20], но в рамках настоящей работы стояла задача апробации метода, что требовало возможности контролируемого воздействия на сенсор с заранее известными параметрами. Предложенный вариант позволял задавать колебание разности длин плеч сенсорного интерферометра с требуемой амплитудой в широком диапазоне частот.

Схема работает следующим образом. Сначала свет от широкополосного источника (суперлюминесцентный диод, $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$, $P = 1 \text{ mW}$) оптического излучения проходит через делитель FC и попадает в опорный интерферометр, изолированный от внешних воздействий, где происходит высокочастотная (относительно измеряемого воздействия) модуляция разности длин плеч, т.е. задержки между интерферирующими волнами. Затем через оптический изолятор и второй делитель FC попадает в сенсорный интерферометр. На сенсорный интерферометр оказывается некоторое воздействие $f(t)$. Данное воздействие может оказываться как за счет подачи напряжения на катушки интерферометра (для калибровки схемы и отработки алгоритмов обработки сигналов), так и за счет внешнего воздействия в виде щелчка, хлопка и проч. Далее сигнал попадает на фотоприемник, и с помощью платы АЦП вводится в компьютер, где впоследствии обрабатывается.

Известно, что при использовании широкополосного источника интерференция наблюдается только при условии, что разность оптических путей интерферирующих волн меньше длины когерентности [15–19]. Соответственно сигнал на фотоприемнике при выполнении усло-

вия

$$\Delta = |\Delta_1 - \Delta_2| < L_{coh},$$

где $\Delta_{1,2}$ — разности оптический путей в интерферометрах Int1 и Int2, $L_{coh} = c/\Delta\omega$ — длина когерентности, c — скорость света в вакууме, $\Delta\omega$ — ширина спектра источника, будет иметь вид

$$I(\Delta) = a + b \cdot \gamma(\Delta) \cos(k\Delta),$$

где a, b — константы, определяемые коэффициентами отражения зеркал, параметрами разветвителей и потерями в схеме и определяющие интерференционный контраст, $k = 2\pi/\lambda$ — модуль волнового вектора, λ — центральная длина волны источника, $\gamma(\Delta)$ — функция когерентности источника. Форма $\gamma(\Delta)$ определяется спектром источника, для источника с гауссовым распределением спектральной плотности мощности имеет вид

$$\gamma(\Delta) = \exp\left(-\frac{\Delta^2}{2L_{coh}^2}\right)$$

Пусть на опорный интерферометр подано некоторое синусоидальное напряжение, приводящее к модуляции оптической разности длин плеч по закону:

$$\Delta_1 = B \cos(\omega_0 t) + \Delta_{10},$$

где B — некоторая амплитуда модуляции, ω_0 — опорная частота, Δ_{10} — постоянная разность длин плеч, которую можно контролируемо изменять подачей электрического напряжения на катушки интерферометра. Пусть при этом на сенсорный интерферометр осуществляется некоторое воздействие, при котором разность длин плеч изменяется по закону

$$\Delta_2 = f(t) + \Delta_{20},$$

где $f(t)$ — искомое воздействие, Δ_{20} — разность длин плеч, медленно (по сравнению с характерными временами измеряемых процессов) меняющаяся во времени случайным образом в результате температурных и деформационных дрейфов. Если путем подстройки опорного интерферометра сделать так, чтобы выполнялось условие

$$|\Delta| = |\Delta_1 - \Delta_2| < L_{coh},$$

то после обработки получаемого сигнала с использованием стандартного алгоритма гомодинной демодуляции с перекрестным перемножением [13] получим сигнал на выходе

$$S_{out}(t) = K J_1(B) J_2(B) f(t) \gamma^2(\Delta(t)), \quad (1)$$

где K — множитель, описывающий общий коэффициент передачи системы, $J_{1,2}$ — функции Бесселя первого и второго рода.

Из (1) видно, что зависимость контраста от средней Δ может вносить достаточно сильные искажения, тем не

менее для колебаний сравнимых и меньше длины волны, при выполнении условия

$$|\Delta| = |\Delta_1 - \Delta_2| \ll L_{coh}$$

данные искажения оказываются достаточно малыми. При этом опорная модуляция осуществляется в опорном интерферометре, а сенсорный интерферометр может быть вынесен на практически любое расстояние, ограниченное только потерями в оптическом волокне.

2. Моделирование и эксперимент

В отличие от когерентной схемы, где контраст интерференционного сигнала остается постоянным вне зависимости от разности оптических путей интерферирующих волн, в тандемной низкокогерентной схеме видность интерференционных полос падает при расогласовании интерферометров. Условие постоянства амплитуды интерференционного сигнала хорошо выполняется только вблизи нулевой разности хода, т.е. в области максимальной видности интерференционной картины. Поэтому при математическом моделировании были рассмотрены два случая, соответствующие точной подстройке задержки волн в опорном интерферометре под сенсорный интерферометр ($\Delta = 0$) и подстройке со смещением в 4 интерференционные полосы. На рис. 2 представлены результаты моделирования. Система регистрации имеет гладкую амплитудно-частотную характеристику до некоторой частоты, которая зависит от глубины модуляции сенсорного интерферометра, что связано с перекрытием компонент спектра 1 и 2 гармоник. Смещение рабочей точки из оптимального положения не приводит к искажениям АЧХ, только уменьшает амплитуду выходного сигнала, поскольку алгоритм перекрестного перемножения чувствителен к изменению количества света и видности интерференционных полос.

Для экспериментальной проверки предложенного метода была собрана измерительная установка в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. Подстройка

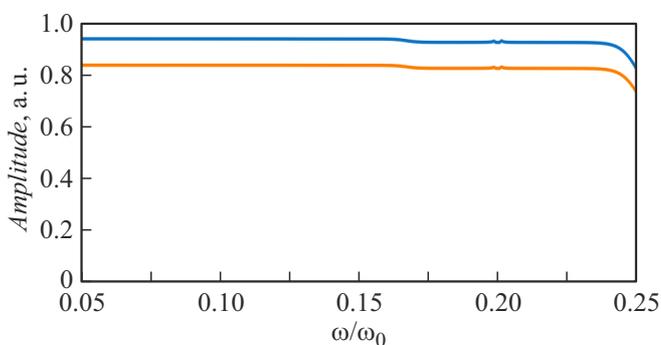


Рис. 2. Расчетная амплитуда выходного сигнала предложенной схемы при постоянном входе для точной подстройки интерферометров (синяя кривая (в онлайн версии)) и для случая сдвига на 4 полосы интерференционной картины (оранжевая кривая (в онлайн версии)).

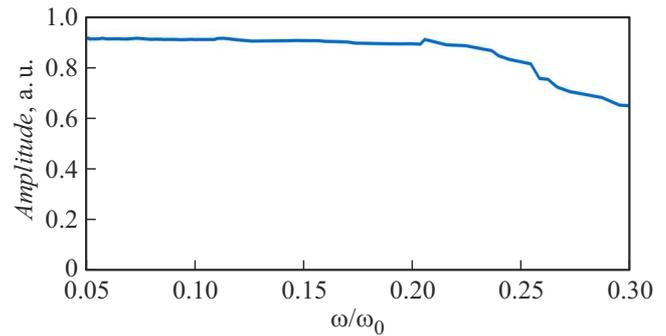


Рис. 3. Экспериментально измеренная амплитуда выходного сигнала предложенной схемы при постоянном входе.

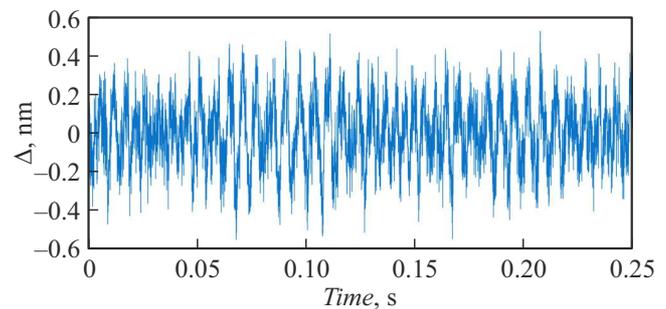


Рис. 4. Шумовая дорожка системы регистрации, пересчитанная в нанометры.

опорного интерферометра под сенсорный производилась путем подачи высокого напряжения на пьезокерамические катушки. Для этого управляющий подстройкой сигнал усиливался высоковольтным усилителем АМР. К высокому напряжению подмешивался низковольтный сигнал высокочастотной модуляции на частоте $\omega_0 = 20$ kHz. Амплитуда напряжения подбиралась, чтобы обеспечить оптимальную глубину фазовой модуляции и составляла единицы вольт.

На сенсорный интерферометр подавались тестовые сигналы, представлявшие собой синусоидальный сигнал с амплитудой 0.1 V (глубина модуляции 92 nm), и частотой ω от 1 до 8 kHz, частота дискретизации АЦП составляла 700 kHz.

Результаты показаны на рис. 3. Наблюдается качественное совпадение с результатами моделирования.

На рис. 4 представлена шумовая дорожка, записанная измерительной схемой при отсутствии внешнего воздействия. Видно, что она содержит низкочастотные составляющие с пиковыми значениями амплитуды до 0.5 nm, связанные с воздействием внешних шумов на интерферометры. Шумовая дорожка за вычетом низкочастотных шумов составляет 0.3 nm от пика до пика.

Для демонстрации работы системы регистрации были также проведены измерения акустического воздействия. В качестве сенсорного интерферометра использовался тот же волоконный интерферометр Майкельсона, но

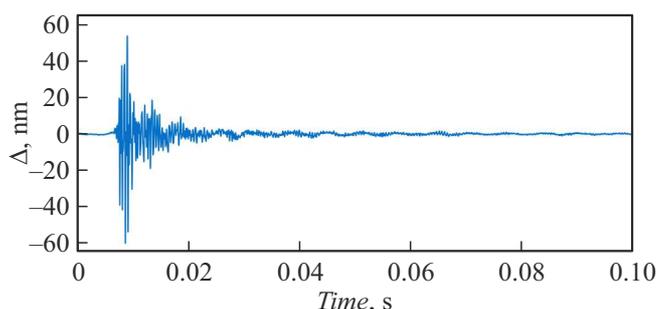


Рис. 5. Сигнал щелчка пальцами рядом с сенсорным интерферометром.

напряжение на пьезокерамические катушки не подавалось. На рис. 5 приведена запись щелчка пальцами на расстоянии 10 см от интерферометра.

Заключение

В работе предложен метод, объединяющий достоинства алгоритмов гомодинной демодуляции (нечувствительность к дрейфу рабочей точки интерферометра) и тандемной низкокогерентной интерферометрии (возможность вынесения чувствительного интерферометра на большое расстояние от источника и системы регистрации). Получена чувствительность на уровне 0.3–0.5 нм в полосе 4 кГц. Продемонстрирована возможность применения предложенной схемы для регистрации акустических сигналов. Предложенная схема имеет хорошие перспективы в области создания систем регистрации сигналов с интерференционных волоконно-оптических датчиков.

Благодарности

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования „Физика и технология микро- и наноструктур“ на базе Института физики микроструктур Российской академии наук.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики микроструктур Российской академии наук (тема № 0030-2021-0023).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Zhang, Y. Mei, T. Xia, Z. Cao, Z. Liu, Z. Li. *Sensors*, **22** (13), 4979 (2022). DOI: /10.3390/s22134979

- [2] C.L. Lee, C.T. Ma, K.C. Yeh, Y.M. Chen. *Polymers*, **14** (22), 4966 (2022). DOI: /10.3390/polym14224966
- [3] M.S. Ferreira, P. Roriz, S.O. Silva, J.L. Santos, O. Frazao. *Opt. Fiber Technol.*, **19** (6), 833 (2013). DOI: /10.1016/j.yofte.2013.07.006.
- [4] Y.J. Rao. *Opt. Fiber Technol.*, **12** (3), 227 (2006). DOI: /10.1016/j.yofte.2006.03.004
- [5] H. Yu, Z. Luo, Y. Zheng, J. Ma, Z. Li, X. Jiang, J. Light Technol., **37** (10), 2261 (2019). DOI: 10.1109/JLT.2019.2901845
- [6] D. Tosi, J. Light Technol., **34** (15), 3622 (2016). DOI: 10.1109/JLT.2016.2575041
- [7] Y. Yang, Y. Wang, K. Chen. *Opt. Express*, **29** (5), 6768 (2021). DOI: /10.1364/OE.415750
- [8] M.J.F. Digonnet, O.C. Akkaya, G.S. Kino, O. Solgaard. *Imaging Appl. Opt. Technical Digest, STu3F.1* (2012). DOI: /10.1364/SENSORS.2012.STu3F.1
- [9] C. Zhou, S.V. Letcher, A. Shukla. *J. Acoust. Soc. Am.*, **98** (2), 1042 (1995). DOI: /10.1121/1.413669
- [10] O.C. Akkaya, O. Akkaya, M.J.F. Digonnet, G.S. Kino, O. Solgaard. *J. Microelectromech. Syst.*, **21** (6), 1347 (2012). DOI: 10.1109/JMEMS.2012.2196494
- [11] O. Kilic, M. Digonnet, G. Kino, O. Solgaard. *Meas. Sci. Technol.*, **18** (10), 3049 (2007). DOI: /10.1088/0957-0233/18/10/S01
- [12] Y. Tong, H. Zeng, L. Li, Y. Zhou. *Appl. Opt.*, **51** (29), 6962 (2012). DOI: /10.1364/AO.51.006962
- [13] A. Dandridge, A. Tveten, T. Giallorenzi. *IEEE J. Quant. Electron*, **18** (10), 1647 (1982). DOI: 10.1109/JQE.1982.1071416
- [14] L. Wang, M. Zhang, X. Mao, Y. Liao. *Interferometry XIII: Techniques and Analysis*, 62921E (2006). DOI: /10.1117/12.678455
- [15] K. Chen, Z. Yu, Z. Gong, Q. Yu, *Opt. Lett.*, **43** (20), 5038 (2018). DOI: /10.1364/OL.43.005038
- [16] P. Volkov, D. Semikov, A. Goryunov, A. Luk'yanov, A. Tertyshnik, E. Vopilkin, S. Kraev. *Sens. Actuator A Phys.*, **316**, 112385 (2020). DOI: /10.1016/j.sna.2020.112385
- [17] P. Volkov, A. Goryunov, A. Luk'yanov, A. Tertyshnik, N. Baidakova, I. Luk'yanov. *Optik*, **124** (15), 1982 (2013). DOI: /10.1016/j.ijleo.2012.06.043
- [18] B. Yu, A. Wang, G.R. Pickrell. *J. Light Technol.*, **24** (4), 1758 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2005.863336
- [19] P. Volkov, A. Lukyanov, A. Goryunov, D. Semikov, E. Vopilkin, S. Kraev. *Sensors*, **23** (2) 772 (2023). DOI: /10.3390/s23020772
- [20] P. Volkov, A. Lukyanov, A. Goryunov, D. Semikov, E. Vopilkin, S. Kraev, A. Okhapkin, A. Tertyshnik, E. Arkhipova. *Sensors*, **21** (21) 7343 (2021). DOI: /10.3390/s21217343