

УДК 53.083

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АДАПТИВНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Р. В. Ромашко<sup>1</sup>, М. Н. Безрук<sup>1</sup>, С. А. Ермолаев<sup>1</sup>, И. Н. Завестовская<sup>2,3</sup>

*В настоящей работе предложен метод экспериментального определения чувствительности и порога детектирования фазы интерферометра, и на его основе проведена оценка указанных параметров для адаптивного волоконно-оптического интерферометра на основе динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле CdTe.*

**Ключевые слова:** адаптивный интерферометр, динамическая голограмма, чувствительность, порог детектирования.

Отличие адаптивного интерферометра от классического состоит в том, что светоделительный куб, который объединяет сигнальный и опорный световые пучки, в адаптивном интерферометре заменен на фоторефрактивный кристалл (ФРК) [1]. Сигнальный и опорный световые пучки интерферометра, пересекаясь в фоторефрактивном кристалле, формируют динамическую голограмму, на которой происходит преобразование фазовой модуляции в модуляцию интенсивности. Динамическая голограмма, постоянно перезаписываясь в кристалле, позволяет интерферометру адаптироваться под неконтролируемые воздействия внешних шумовых факторов. Схема адаптивного волоконно-оптического (ВО) интерферометра представлена на рис. 1.

Непрерывное излучение твердотельного лазера 1 ( $\lambda = 1064$  нм) посредством светоделиителя 2 разделяется на объектный и опорный световые пучки. Объектный пучок вводится в волоконный многомодовый световод 5, использующийся в качестве чувствительного элемента. Затем объектный пучок 3, полученный на выходе волоконного световода, проходит через фоторефрактивный кристалл 8, где за счет взаимодействия с опорным пучком 7 формирует динамическую голограмму. Интенсивность объектного

<sup>1</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: romashko@iacr.dvo.ru.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

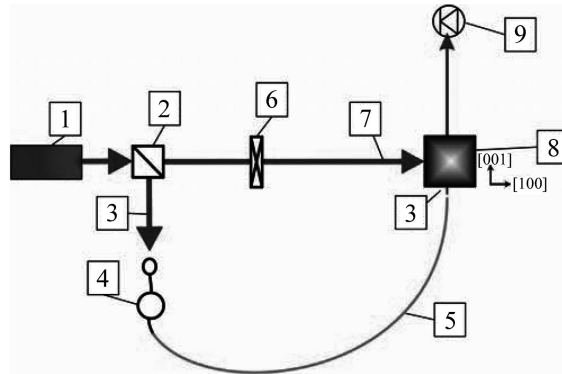


Рис. 1: Схема адаптивного волоконно-оптического интерферометра. 1 – лазер; 2 – светоделительный куб; 3 – объектный пучок; 4 – калибровочный пьезоэлектрический модулятор; 5 – волоконно-оптический чувствительный элемент; 6 – четвертьволновая пластинка; 7 – опорный пучок; 8 – фоторефрактивный кристалл; 9 – фотодетектор.

пучка, прошедшего через ФРК, регистрируется фотодетектором 9. Воздействие измеряемой величины на волоконный световод приводит к фазовой модуляции излучения в нем. В свою очередь в адаптивном интерферометре модуляция фазы  $\Delta\varphi$  преобразуется в изменение интенсивности  $\Delta I$ , которое описывается выражением [2]:

$$\Delta I = A J_0(\Delta\varphi) \cdot J_1(\Delta\varphi), \quad (1)$$

где  $J_q$  – функции Бесселя  $q$ -го порядка;  $A$  – коэффициент, который определяет чувствительность интерферометра и учитывает эффективность взаимодействия объектной и опорной волн в фоторефрактивном кристалле.

В настоящей работе модуляция фазы осуществлялась при помощи пьезоэлектрического модулятора, подача электрического напряжения  $V$  на который приводило к изменению длины навитого на него волоконного световода и соответственно фазы:  $\Delta\varphi = BV$ ;  $B$  – коэффициент пропорциональности между воздействием на ВО чувствительный элемент и модуляцией фазы распространяющегося в нем излучения.

Калибровочные коэффициенты  $A$  и  $B$  определялись экспериментально следующим образом. К волоконному световоду, использующемуся в роли чувствительного элемента, подключался дополнительный световод, намотанный на калиброванный пьезоэлектрический модулятор. На модулятор подавалось переменное синусоидальное напряжение, амплитуда которого  $V_{\text{gen}}$  плавно увеличивалась, а затем уменьшалась, при этом за выходной сигнал интерферометра принималась глубина модуляции интенсивности объектной волны  $M = \Delta I/I_0$ . На рис. 2 представлена зависимость выходного сигнала

интерферометра  $M$  от амплитуды модуляционного сигнала  $V_{\text{gen}}$ . Подобные измерения циклически повторялись в течение двух минут. При этом была проведена серия таких экспериментов (8 измерений по 5 циклов в каждом) общей продолжительностью 40 мин.

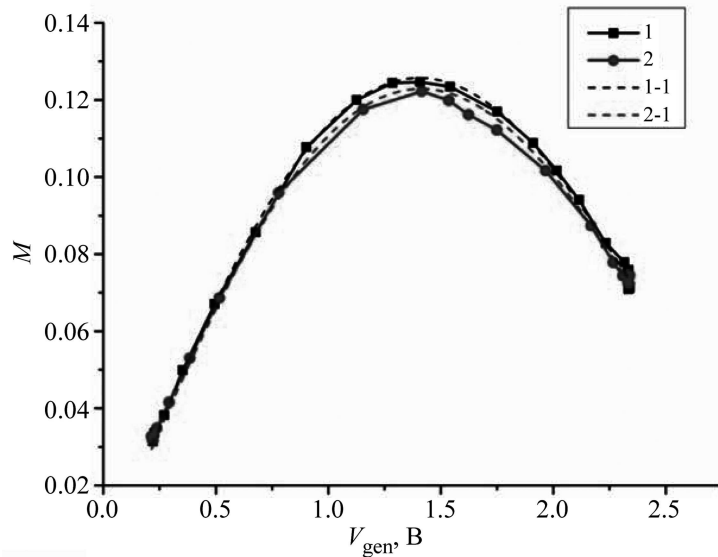


Рис. 2: Зависимость выходного сигнала интерферометра от амплитуды модуляционного сигнала, представленная для двух отдельно взятых измерений (1 и 2): 1-1, 2-1 – аппроксимационные кривые для измерений 1 и 2, соответственно.

Кривые зависимостей выходного сигнала, представленные на рис. 2, были аппроксимированы с помощью выражения (1), в результате чего были получены значения калибровочных коэффициентов  $A$  и  $B$ . На рис. 3 представлена динамика изменения коэффициентов  $A$  и  $B$  за весь период измерений.

Стабильность коэффициентов  $A$  и  $B$  определяет стабильность выходного сигнала адаптивного интерферометра. На основе данных, представленных на рис. 3, были получены среднеквадратичные отклонения указанных коэффициентов:  $\Delta A$  и  $\Delta B$ . Кратковременные значения отклонений  $A$  и  $B$  (в течение 5 циклов) составили 3% и 0.6% соответственно, а за время проведения всей серии экспериментов – 10% для коэффициента  $A$  и 2% для коэффициента  $B$ , что является достаточно хорошим результатом для такого времени наблюдения.

Критерием чувствительности адаптивного интерферометра является относительный порог детектирования, определяемый с помощью выражения [3]:

$$\delta_R = \frac{\varphi_A}{\varphi_C}, \quad (2)$$

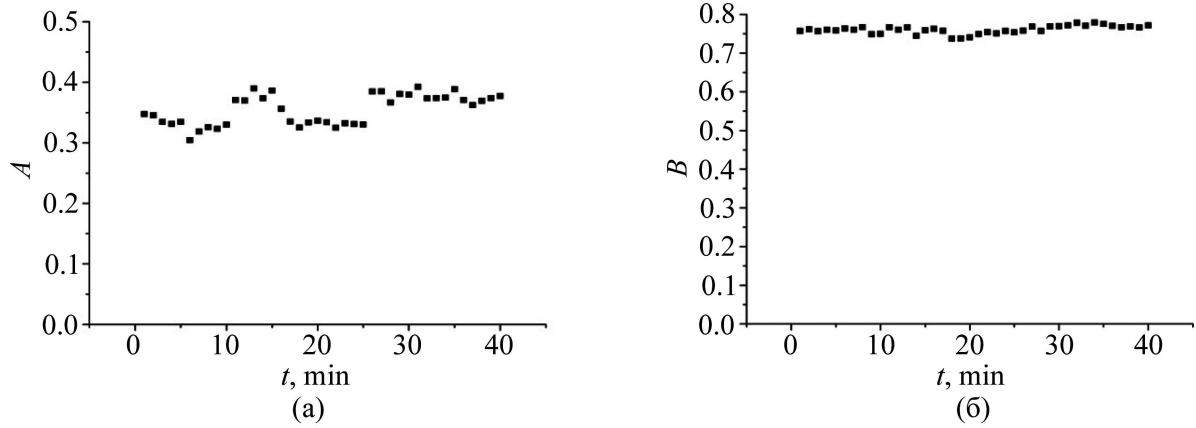


Рис. 3: Динамика изменения калибровочных коэффициентов  $A$  (а) и  $B$  (б) за время проведения эксперимента.

где  $\varphi_A$  и  $\varphi_C$  – минимальные значения модуляции фазы, которые способны теоретически зарегистрировать адаптивный и классический гомодинный интерферометр, соответственно. Величина  $\varphi_C$  известна и составляет  $1.5 \cdot 10^{-9}$  рад(Вт/Гц) $^{1/2}$  [4]. Таким образом, минимальная модуляция фазы, теоретически детектируемая адаптивным интерферометром, может быть найдена как  $\varphi_A = \delta_R \varphi_C$ . В свою очередь относительный порог детектирования  $\delta_R$  может быть определен экспериментально [3]:

$$\delta_R = \frac{\Phi}{\sqrt{TG}} \cdot M^{-1}, \quad (3)$$

где  $\Phi$  – величина фазовой модуляции (максимальное изменение фазы световой волны),  $T$  – коэффициент, учитывающий потери объектной волны, а  $G$  – коэффициент усиления объектной волны за счет ее взаимодействия с опорной волной в ФРК. Экспериментально полученное в настоящей работе значение  $\delta_R \cdot \sqrt{TG}$  составило 2.0.

Следует отметить, что величина  $\varphi_A$  получена в условиях, когда в адаптивном интерферометре устранены все шумы, за исключением дробового шума фотоприемника, имеющего квантовую природу. На практике в измерительной системе присутствуют различные шумы, а также нестабильности параметров, которые повышают порог детектирования. В этом случае минимальная фазовая модуляция, которая может быть зарегистрирована адаптивным интерферометром, может быть найдена из выражения (3):

$$\Phi_A^{\min} = \delta_{\text{rel}} \cdot \sqrt{TG} \cdot \Delta M_{\text{noise}}, \quad (4)$$

где  $\Delta M_{\text{noise}}$  – уровень шумов в выходном сигнале адаптивного интерферометра, включающих шумы электронных цепей измерительной аппаратуры,  $\Delta M_E$ , и шумы, свя-

занные с флуктуациями уровня выходного сигнала, вызванными изменениями параметров кристалла (например, температуры) и формируемой в нем динамической голограммы,  $\Delta M_{fl}$ . Последний фактор проявляется в стохастическом изменении калибровочных коэффициентов  $A$  и  $B$ , представленных на рис. 3, и может быть найден как  $\Delta M_{fl} = [\Delta A^2 + \Delta B^2]^{1/2}$ . В свою очередь общий уровень шума может быть найден как  $\Delta M_{noise} = [\Delta M_E^2 + \Delta M_{fl}^2]^{1/2}$ .

Используя полученные выше значения для  $\Delta A$  и  $\Delta B$ , а также для  $\delta_{rel} \cdot \sqrt{TG}$ , и учитывая, что уровень шумов электроники не превышал 1%, получим с помощью выражения (4) значение минимально детектируемой модуляции фазы. В адаптивном интерферометре на основе динамической голограммы, формируемой в кристалле CdTe, фазовая модуляция  $\Phi_A^{min}$  составила 0.2 рад.

Таким образом, в настоящей работе предложена и экспериментально опробована методика определения чувствительности адаптивного интерферометра на основе динамической голограммы, формируемой в фоторефрактивном кристалле. Данный подход позволит определить пути снижения порога детектирования и повышения чувствительности адаптивного интерферометра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-12-01122).

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. I. Stepanov, in *International Trends in Optics*, Ed. by J. W. Goodman (Academic Press, Inc., New York, London, 1991), Chap. 9.
- [2] А. А. Колегов, С. М. Шандаров, Ю. Ф. Каргин, Доклады ТУСУРа **22**(2), 66 (2010).
- [3] А. А. Kamshilin, R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, J. Appl. Phys. **105**, 031101 (2009).
- [4] J. W. Wagner, J. Spicer, J. Opt. Soc. Am. B **4**(8), 1316 (1987).

Поступила в редакцию 17 ноября 2014 г.