

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-86-93

УДК 681.787.6

Разработка метода прямой демодуляции фазы интерферометра Фабри–Перо для температурных измерений с использованием частотного сканирования

Ирина Дмитриевна Казачкова^{1✉}, Михаил Юрьевич Плотников²,
Кирилл Александрович Коннов³, Дмитрий Александрович Коннов⁴

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹irin.kazachkova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

²mplotnikov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

³kirillkonnov1991@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁴dakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

Аннотация

Предмет исследования. Спектральные характеристики интерференционного сигнала при использовании метода прямой демодуляции фазы в устройстве опроса волоконно-оптического датчика высокотемпературных измерений. **Цель работы.** Разработка метода измерения абсолютных значений температуры с помощью интерферометра Фабри–Перо на основе демодуляции фазы с использованием частотного сканирования. **Метод.** Реализована математическая модель прямой демодуляции фазы в среде MATLAB. Разработанный метод позволяет оценивать изменение оптической длины интерферометра под действием температуры за счет осуществления частотной модуляции длины волны источника оптического излучения по периодическому пилообразному закону. В результате многолучевой интерференции в резонаторе Фабри–Перо фотоприемным устройством регистрируется отраженный интерференционный отклик со сложным спектральным составом. Текущее значение разности фаз в интерферометре восстанавливается путем оценки положения локальных минимумов интерференционного сигнала и определяется абсолютная температура интерферометра. **Основные результаты.** Представлены результаты математического моделирования метода прямой демодуляции фазы для диапазона длин волн источника излучения 1308–1310 нм. Проведено согласование длины резонатора интерферометра с допустимым диапазоном перестройки длины волны вертикально-излучающего лазера для достижения максимальной фазовой чувствительности. Подобран цифровой фильтр для метода демодуляции фазы интерферометра Фабри–Перо и вычислена потенциальная точность метода определения температуры с учетом наличия шумов в измерительной системе. **Практическая значимость.** Предложенный в работе метод может быть использован в системе опроса волоконно-оптического интерферометрического датчика Фабри–Перо, а также для высокоточных систем мониторинга температуры свыше 300 °C.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, интерферометр Фабри–Перо, фазовая демодуляция, интерропатор, измерение температуры

Ссылка для цитирования: Казачкова И.Д., Плотников М.Ю., Коннов К.А., Коннов Д.А. Разработка метода прямой демодуляции фазы интерферометра Фабри–Перо для температурных измерений с использованием частотного сканирования // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 86–93. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-86-93>

Коды OCIS: 120.5050, 120.2230, 060.2370, 070.6020

Development the method of direct phase demodulation Fabry–Perot interferometer for temperature measurements using frequency scanning

IRINA D. KAZACHKOVA¹✉, MICHAEL Y. PLOTNIKOV²,
KIRILL A. KONNOV³, DMITRIY A. KONNOV⁴

University ITMO, St. Petersburg, Russia

¹irin.kazachkova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>

²mplotnikov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

³kirillkonnov1991@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>

⁴dakonnov@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>

Abstract

Subject of study. The spectral characteristics of interference signal were studied using the method of direct phase demodulation for interrogator of fiber-optic sensor for high-temperature measurements. The aim of study is development of the method for measurement of absolute temperature of Fabry–Perot interferometer based on phase demodulation using frequency scanning. **Method.** A mathematical model of direct phase demodulation was implemented in the MATLAB environment. The developed method allows evaluating the change in the optical length of the interferometer under the influence of temperature by performing frequency modulation of the wavelength of the optical source according to the periodic sawtooth law. As a result of multipath interference in the resonator of Fabry–Perot interferometer, the photodetector registers a reflected interference response with a complex spectral composition. The current value of the phase difference in the interferometer is restored by estimation of the position of the local minima of the interference signal, and the absolute temperature of the interferometer is determined. **Main results.** The results of mathematical modeling of the method of direct phase demodulation for the wavelength range of the optical source 1308–1310 nm are presented. The length of the interferometer resonator was matched to the allowable range of vertical-cavity surface-emitting laser wavelength tuning to achieve the maximum phase sensitivity. The digital filter for the phase demodulation method of Fabry–Perot interferometer was selected and the potential accuracy of the temperature determination method was calculated considering the presence of noise in the measuring system. **Practical significance.** The method proposed in this work can be used in the interrogation system of the fiber-optic interferometric Fabry–Perot sensors, as well as for high-precision temperature monitoring systems above 300 °C.

Keywords: fiber optic sensor, Fabry–Perot interferometer, phase demodulation, interrogator, temperature measurement

For citation: Kazachkova I.D., Plotnikov M.Y., Konnov K.A., Konnov D.A. Development the method of direct phase demodulation Fabry–Perot interferometer for temperature measurements using frequency scanning [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 86–93. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-86-93>

OCIS codes: 120.5050, 120.2230, 060.2370, 070.6020

ВВЕДЕНИЕ

В течение нескольких последних десятилетий исследователи активно разрабатывают интерферометрические датчики температуры для различных сфер и условий применения: в медицинских целях — в качестве биосенсоров [1], для измерений в условиях высоких температур — пожарной инженерии [2], отслежива-

ния состояния двигателей [3], а также в различных сферах промышленности для температурного мониторинга.

Одним из перспективных направлений измерения температуры является применение волоконно-оптических датчиков на основе интерферометра Фабри–Перо (ИФП). Подобные датчики обладают такими преимуществами

как высокая чувствительность, стойкость к электромагнитным помехам и компактный размер, что делает их удобными для проведения широкого спектра измерений.

Принцип работы датчиков температуры на основе ИФП заключается в следующем: изменение температуры влияет на длину резонатора ИФП, на показатель преломления среды в резонаторе ИФП и как следствие на оптическую разность хода лучей в интерферометре, что проявляется в изменении полной фазы интерферометра и колебаниях интенсивности интерференционного сигнала. Для демодуляции фазы интерферометра могут использоваться различные методы демодуляции, такие как демодуляция интенсивности, квадратурная фазовая демодуляция и демодуляция абсолютной длины резонатора [4].

Как правило, методы демодуляции сигнала в значительной степени определяют производительность всей измерительной системы. Например, в схемах демодуляции интенсивности детектирование ее на одной длине волн имеет очень быстрый отклик, так как изменение длины резонатора напрямую влияет на колебания интенсивности света [5, 6]. Но изменение длины резонатора приводит также к дрейфу рабочей точки интерферометра. И для поддержания высокой чувствительности в этом случае требуется механизм стабилизации рабочей точки интерферометра с обратной связью, который может быть реализован регулировкой выходной длины волны источника света [7] или регулировкой длины резонатора ИФП [8]. Это ограничивает динамический диапазон ИФП до четверти длины волны, но делает его пригодным для измерения высокочастотных и слабых сигналов. Кроме того, квадратурные точки нескольких датчиков ИФП трудно контролировать одновременно, что увеличивает сложность их мультиплексирования.

С другой стороны, схемы квадратурной фазовой демодуляции имеют больший динамический диапазон обнаружения. Для восстановления фазы в этом случае требуются два ортогональных сигнала, которые могут быть получены пассивным или активным способами. Пассивная фазовая модуляция может быть получена за счет источников света с двумя длинами волн [9], двойных резонаторов ИФП [10] и двулучепреломляющих кристаллов [11]. Квадратурная активная фазовая де-

модуляция, такая как двухволновая квадратурная фазовая демодуляция [12, 13], и методы гомодинной демодуляции фазы [14, 15] вводят внешнюю фазовую модуляцию через пьезоэлектрические преобразователи или напрямую модулируют лазерный источник излучения.

Интерферометрия белого света на основе широкополосных источников света или перестраиваемых лазеров может обеспечить измерение абсолютной длины резонатора с субнанометровым разрешением [16]. Однако для обычного сканирования по длине волны динамическое изменение длины резонатора ИФП во время процесса построения спектра может приводить к погрешностям из-за доплеровского смещения оптической частоты [17]. Попрежнему отсутствуют эффективные методы модуляции и демодуляции для решения этой проблемы. Частота измерения абсолютной длины резонатора в современных методах интерферометрии белого света достигает 70 кГц [18], что удовлетворяет требованиям демодуляции температуры, хотя дальнее увеличение частоты опроса затруднено.

Цель настоящей работы — разработка метода прямой демодуляции фазы для измерения абсолютных значений температуры с помощью ИФП с использованием частотного сканирования.

Метод позволяет измерять текущую оптическую длину ИФП без введения вспомогательной фазовой модуляции и без использования петли обратной связи для стабилизации положения рабочей точки интерферометра, что создает возможность применения метода для опроса интерферометрических волоконно-оптических датчиков в широком диапазоне рабочих температур и не ограничивает возможности мультиплексирования ИФП для создания массивов компактных волоконно-оптических сенсоров. Представленный метод прямой демодуляции фазы не требует использования в системе опроса дорогостоящих устройств спектрального анализа (спектроанализатора), а также применим в волоконно-оптических измерительных системах для создания высокоточных компактных датчиков температуры.

ПРИНЦИП МЕТОДА

Датчик температуры на основе ИФП состоит из источника света, чувствительного элемента — ИФП и блока детектирования. Основной

принцип работы ИФП основан на многолучевой интерференции между двумя частично пропускающими зеркалами. Резонатором ИФП является воздушный зазор, ограниченный двумя одномодовыми волокнами с нанесенными диэлектрическими зеркалами на их торцах. На рис. 1 приведена оптическая схема опроса ИФП.

Схема, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Свет от источника оптического излучения — вертикально излучающего лазера (ВИЛ) после оптического циркулятора попадает на ИФП и затем с интерферометром на фотоприемное устройство, где и регистрируется интерференционный отраженный отклик ИФП, дискретизируемый для дальнейшей обработки с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

В общем случае интерференционный сигнал на фотоприемнике может быть представлен как [14]

$$I_R(t) = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi(t)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi(t)}, \quad (1)$$

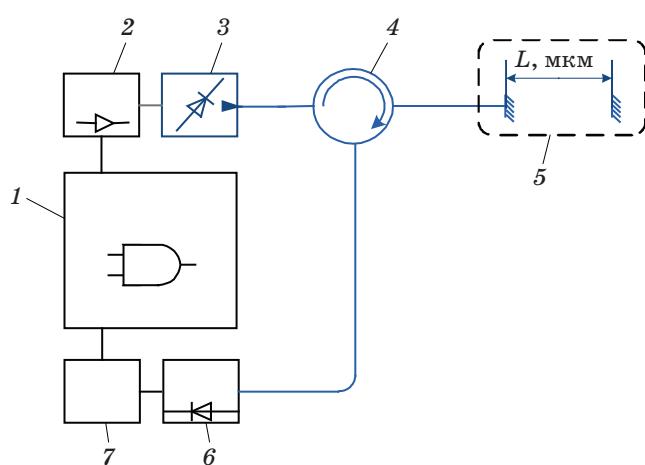


Рис. 1. Оптическая схема опроса ИФП. 1 — программируемая логическая интегральная схема, 2 — драйвер (источник питания), 3 — ВИЛ, 4 — циркулятор на одномодовом оптическом волокне, 5 — ИФП, 6 — фотоприемник, 7 — АЦП, L — расстояние между зеркалами

Fig. 1. Optical survey scheme of the Fabry—Perot interferometer. (1) Programmable logic integrated circuit, (2) driver (power supply), (3) vertically emitting laser, (4) circulator on single-mode optical fiber, (5) Fabry—Perot interferometer, (6) photodetector, (7) analog-to-digital converter, L is the distance between the mirrors

где R_1, R_2 — коэффициенты отражения зеркал ИФП, $\cos \varphi(t)$ — разность фаз интерферирующих лучей между зеркалами ИФП.

Под действием температуры происходит изменение интерференционного отклика — фазовый (временной) сдвиг в интерференционном сигнале. Он возникает из-за изменения показателя преломления среды и расстояния между зеркалами под действием температуры и может быть в общем случае представлен выражением

$$\varphi(t) = \frac{4\pi n(t)}{\lambda(t)} L(t), \quad (2)$$

где $n(t)L(t)$ — оптическая разность хода, $\lambda(t)$ — заданный закон изменения длины волны источника оптического излучения.

Фазовая чувствительность к температуре определяется как [19]

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n \frac{dL}{dT} + L \frac{dn}{dT} \right) \Delta T, \quad (3)$$

где λ — центральная длина волны источника излучения, n — показатель преломления резонатора, L — длина резонатора.

Изменение показателя преломления под действием температуры можно рассчитать по формуле

$$n(t) = n_0 + aT(t), \quad (4)$$

где n_0 — показатель преломления среды, a — термооптический коэффициент среды резонатора ИФП, $T(t)$ — изменение температуры во времени.

Изменение расстояния между зеркалами под действием температуры устанавливается следующим образом:

$$L(t) = L_0 + bL_0T(t), \quad (5)$$

где L_0 — длина резонатора ИФП, b — температурный коэффициент линейного теплового расширения.

Для опроса ИФП использовалась периодическая пилообразная модуляция центральной длины волны источника излучения, ее график представлен на рис. 2. Вертикально излучающий лазер опрашивает ИФП с частотой 1 кГц, при этом один период опроса соответствует одному периоду сигнала интерференции.

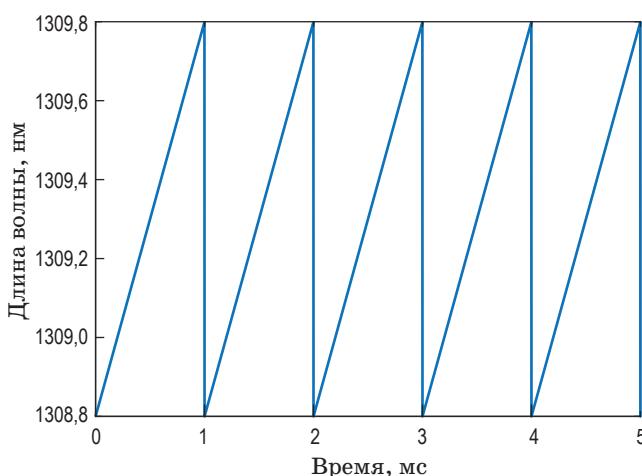


Рис. 2. Модуляция длины волны источника излучения во времени по пилообразному закону

Fig. 2. The modulation the wavelength of the optical source in time according to the sawtooth law

Принцип предлагаемого метода прямой демодуляции фазы заключается в определении положения локального минимума интерференционного сигнала (1). При этом ключевым требованием к ИФП является выбор длины резонатора с учетом доступного диапазона перестройки длины волны источника излучения. Длина резонатора должна быть подобрана таким образом, чтобы за один период модуляции длины волны источника излучения рабочая точка интерферометра сдвигалась не более чем на 2π . В этом случае за один период сканирования можно регистрировать один период интерференционного сигнала с ярко выраженным минимумом. При этом коэффициенты отражения зеркал ИФП могут быть выбраны любыми. В результате при воздействии температуры на ИФП изменяются его оптическая длина и положение локального минимума интерференционного сигнала. По изменению положения минимума интерференционного сигнала относительно его начального положения, определяемого, например, при комнатной температуре, можно найти текущую температуру резонатора ИФП.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С целью исследования спектральных характеристик ИФП и предложенного метода измерения температуры была реализована математическая модель прямой демодуляции фазы в среде MATLAB.

В соответствии с формулой (1) локальный минимум интерференционного сигнала тем уже, чем больше коэффициенты отражения зеркал, однако ширина минимума слабо влияет на точность его определения, поэтому метод применим при любых коэффициентах отражения зеркал ИФП.

В ходе моделирования были выбраны следующие параметры модели: коэффициенты отражения обоих зеркал резонатора 0,8, максимальный диапазон перестройки центральной длины волны источника 1308,8–1310,8 нм, соответствующий реальному ВИЛ, используемому в оптической схеме опроса ИФП.

Предполагаемая конструкция резонатора ИФП содержит воздушный зазор между зеркалами, поэтому в модели используется показатель преломления воздуха $n_0 = 0$, термооптический коэффициент воздуха $a = 0$, температурный коэффициент линейного расширения кварцевой ферулы, формирующей резонатор ИФН, $b = 5,5 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Для проверки метода при быстром нагреве в моделировании использовалось линейное изменение температуры от 0 до 1000 $^{\circ}\text{C}$, график представлен на рис. 3.

При расчете конструкции (длины резонатора) интерферометра требуется согласование с доступным диапазоном перестройки длины волны источника излучения. Благодаря тому, что между измеряемой разностью фаз и длиной резонатора существует линейная

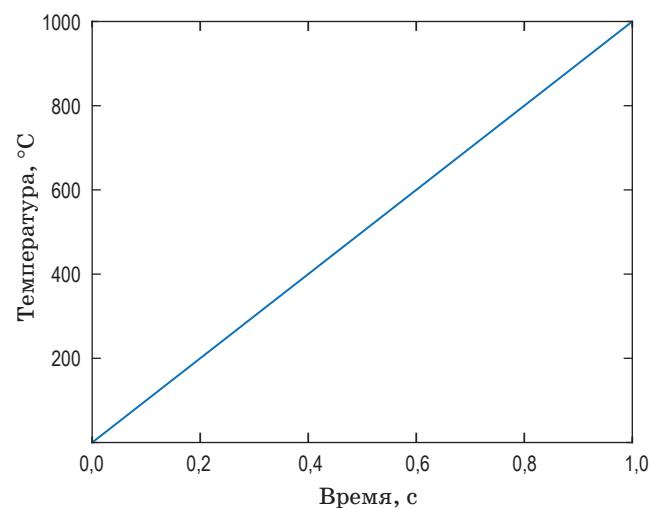


Рис. 3. Моделируемое изменение температуры во времени

Fig. 3. Simulated temperature change over time

зависимость, подбор этого параметра позволяет достичь дальнейшего однозначного определения температуры.

Исходя из формулы (3) рассчитаны параметры модели для достижения максимальной фазовой чувствительности к температуре: диапазон длин волн для частотного сканирования — 1308,8–1309,8 нм, длина резонатора ИФП — 700 мкм.

Для более полного соответствия реальным условиям в модель сигналов с ИФП были добавлены шумы оптоэлектронного каскада АЦП, эквивалентные 7-ми разрядам 16-битного АЦП, используемого для регистрации сигналов в блоке обработки.

Для повышения точности метода и сглаживания шумов был использован фильтр низких частот на основе скользящего среднего с окном в 32 отсчета. Данный цифровой фильтр был выбран ввиду простоты его реализации в системе опроса. Временная зависимость сигнала интерференции за три периода опроса с применением фильтра скользящего среднего представлена на рис. 4а.

На рис. 4б, в приведены временные зависимости индексов минимумов до и после калибровки. По результатам моделирования после проведения калибровки временная зависимость индексов локальных минимумов прямо пропорциональна изменению температуры

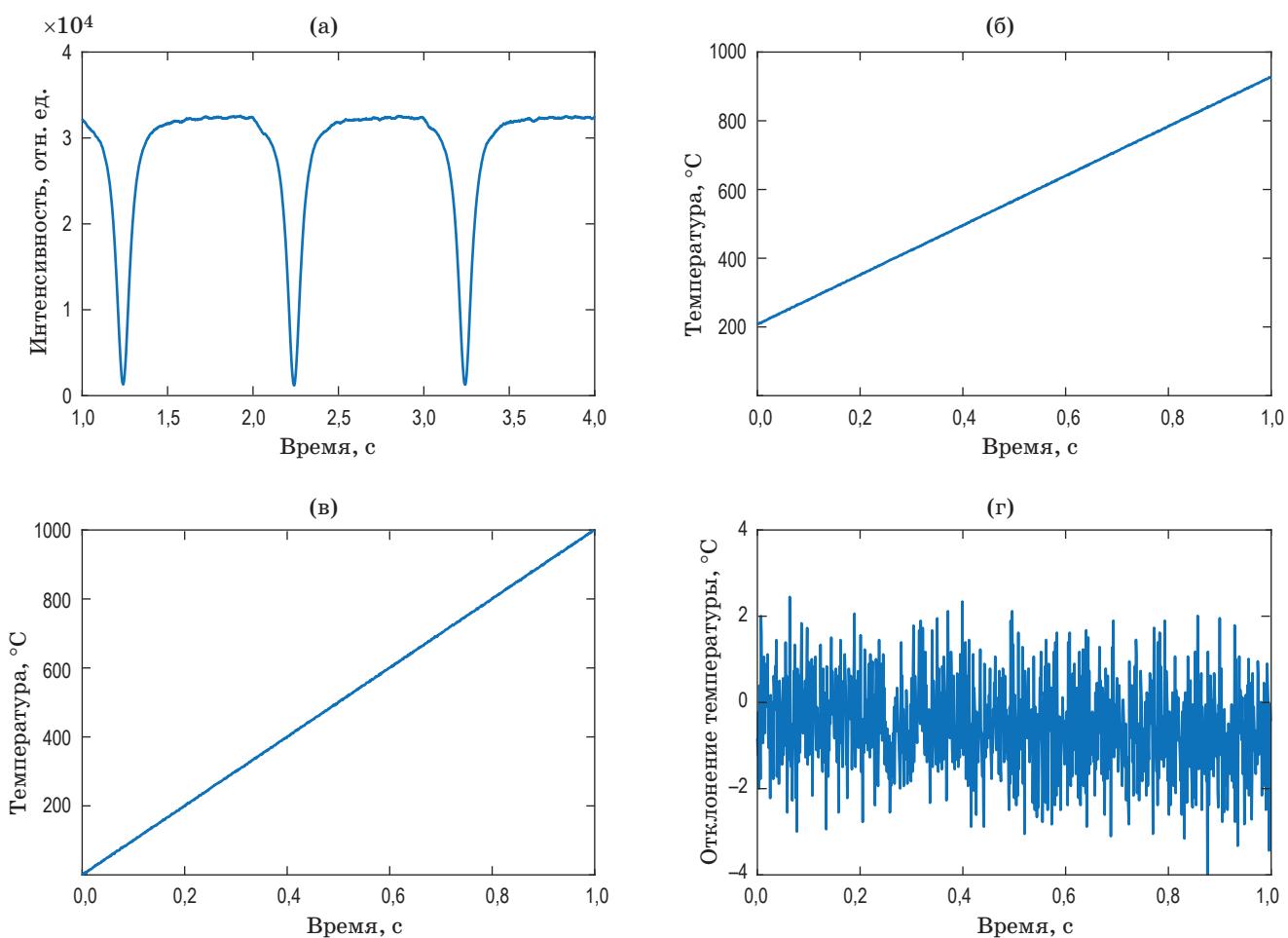


Рис. 4. Восстановление значений температуры по локальным минимумам сигнала. Сигнал интерференции за три периода опроса с применением фильтра скользящего среднего (а). Временная зависимость индексов минимумов до (б) и после калибровки (в). Отклонение результатов моделирования от температурной зависимости модели (г)

Fig. 4. Restoration of temperature values from local minimum of the signal. (a) Interference signal for three polling periods using a moving average filter, time dependence of the minimum indices (б) before and (в) after calibration. (г) Deviation of the simulation results from the temperature dependence of the model

и рабочей точки интерферометра. Таким образом осуществляется прямое измерение фазы ИФП. Отклонение результатов моделирования от температурной зависимости модели представлено на рис. 4г, среднеквадратическое отклонение (СКО) температуры по результатам моделирования составило 1,1 °C.

Полученные результаты моделирования сопоставимы с существующими данными по датчикам температуры аналогичной конструкции на основе ИФП. Так, в работе [20] описан волоконно-оптический датчик на основе ИФП с внутриволоконной воздушной микрополосью. При изменении температуры окружающей среды от 25 до 300 °C средняя погрешность определения температуры при использовании интерrogатора (SM125, MOI, США) составила 0,67 °C ($\lambda = 1520\text{--}1570$ нм). В статье [21] описан датчик температуры, резонатор ИФП которого собран в кварцевой трубке из двух одномодовых волокон с использованием специального клея, полимеризующегося под действием ультрафиолетового излучения. Метод измерения основан на линейной зависимости свободного спектрального диапазона от температуры. Измерения проводились от 0 до 70 °C, СКО в результате экспериментов составило 0,89 °C, в работе также использовался спектроанализатор.

Таким образом, предложенный метод измерения температуры на основе ИФП прост в реализации, не зависит от коэффициентов отражения его зеркал, не требует сложного спектрального оборудования для опроса ИФП и теоретически обеспечивает сопоставимые результаты по точности измерения температу-

ры в сравнении с существующими методами. Дальнейшим направлением работы являются аprobация предложенного метода и проверка его точности в реальных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод прямой демодуляции фазы, позволяющий оценивать изменение фазы интерферометра под действием температуры за счет осуществления модуляции длины волны источника излучения по периодическому линейному закону. Представлены результаты математического моделирования метода прямой демодуляции фазы схемы обработки сигналов ИФП, применяемого для высокотемпературных измерений. Проведен расчет требуемой длины резонатора интерферометра с учетом допустимого диапазона перестройки длины волны ВИЛ для достижения максимальной фазовой чувствительности. Оценен фазовый (временной) сдвиг локального минимума интерференционного отраженного сигнала, соответствующий изменению температуры, временная зависимость индексов локальных минимумов сигнала после калибровки совпадает с текущей температурой. Определена потенциальная погрешность метода определения температуры для ИФП с длиной резонатора 700 мкм, она составила 1,1 °C. Полученные результаты по погрешности измерения температуры сопоставимы с существующими образцами высокотемпературных датчиков на основе ИФП. Результаты данной работы могут быть использованы для создания систем мониторинга температуры свыше 300 °C.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Hirsch M., Majchrowicz D., Wierzba P., et al. Low-coherence interferometric fiber-optic sensors with potential applications as biosensors // Sensors. 2017. V. 17. P. 261. <https://doi.org/10.3390/s17020261>
- Bao Y., Huang Y., Hoehler M.S., et al. Review of fiber optic sensors for structural fire engineering // Sensors (Basel). 2019. V. 19. № 4. P. 877. <http://dx.doi.org/10.3390/s19040877>
- Jia P., Liang H., Fang G., et al. Batch-producible MEMS fiber-optic Fabry–Perot pressure sensor for high-temperature application // Appl. Opt. 2018. V. 57 № 23. P. 6687–6692. <https://doi.org/10.1364/AO.57.006687>
- Liu Q., Peng W. Fast interrogation of dynamic low-finesse Fabry–Perot interferometers: A review // Microwave and Opt. Technol. Lett. 2021. V. 63. № 9. P. 2279–2291. <https://doi.org/10.1002/mop.32922>
- Wang Q., Ma Z. Feedback-stabilized interrogation technique for optical Fabry–Perot acoustic sensor using a tunable fiber laser // Opt. Laser Technol. 2013. V. 51. P. 43–46. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2011.2140104>
- Mao X., Zhou X., Yu Q. Stabilizing operation point technique based on the tunable distributed feedback laser for interferometric sensors // Opt. Commun. 2016. V. 361. P. 17–20. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.10.022>
- Ma J., Zhao M., Huang X., et al. Low cost, high performance white-light fiber-optic hydrophone system with a trackable working point // Opt. Exp. 2016. V. 24. № 17. P. 19008–19019. <https://doi.org/10.1364/OE.24.019008>
- Mao X., Yuan S., Zheng P., et al. Stabilized fiber-optic Fabry–Perot acoustic sensor based on improved wave-

- length tuning technique // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35 № 11. P. 2311–2314.
9. Jia J., Jiang Y., Zhang L., et al. Dual-wavelength DC compensation technique for the demodulation of EFPI fiber sensors // IEEE Photonics Technol. Lett. 2018. V. 30 № 15. P. 1380–1383. <https://doi.org/10.1109/LPT.2018.2848934>
10. Cheng J., Lu D.-f., Gao R., et al. Fiber optic microphone with large dynamic range based on bi-fiber Fabry–Perot cavity // Fiber Opt. Sensing and Opt. Commun. 2017. <https://doi.org/10.1117/12.22283009>
11. Huang Y., Wang S., Jiang J., et al. Orthogonal phase demodulation of optical fiber Fabry–Perot interferometer based on Birefringent crystals and polarization technology // IEEE Photonics J. 2020. V. 12. № 3. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.2977952>
12. Jiang J., Zhang T., Wang S., et al. Noncontact ultrasonic detection in low-pressure carbon dioxide medium using high sensitivity fiber-optic Fabry–Perot sensor system // J. Lightwave Technol. 2017. V. 35. № 23. P. 5079–5085. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2765693>
13. Liao H., Lu P., Liu L., et al. Phase demodulation of short-cavity Fabry–Perot interferometric acoustic sensors with two wavelengths // IEEE Photonics J. 2017. V. 9. № 2. P. 1–9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2689771>
14. Jia P.G., Wang D.H. Self-calibrated non-contact fiber-optic Fabry–Perot interferometric vibration displacement sensor system using laser emission frequency modulated phase generated carrier demodulation scheme // Meas. Sci. Technol. 2012. V. 23. № 11. P. 115201. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/11/115201>
15. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhrengin M.V., et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // IEEE Sens. J. 2017. V. 17. № 13. P. 4143–4150. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287>
16. Zhou X., Yu Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry–Perot interferometer for subnanometer measurement // IEEE Sens. J. 2011. V. 11. № 7. P. 1602–1606. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2103307>
17. Moro E.A., Todd M.D., Puckett A.D. Understanding the effects of Doppler phenomena in white light Fabry–Perot interferometers for simultaneous position and velocity measurement // Appl. Opt. 2012. V. 51. № 27. P. 6518–6527. <https://doi.org/10.1364/AO.51.006518>
18. Yu Z., Wang A. Fast white light interferometry demodulation algorithm for low-finesse Fabry–Pérot sensors // IEEE Photonics Technol. Lett. 2015. V. 27. № 8. P. 817–820. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2391912>
19. Lee C.E., Atkins R.A., Taylor H.F. Performance of a fiber-optic temperature sensor from –200 to 1050 °C // Opt. Lett. 1988. V. 13. № 11. P. 1038–1040. <https://doi.org/10.1364/OL.13.001038>
20. Liu Y., Zhang T., Wang Y., et al. Simultaneous measurement of gas pressure and temperature with integrated optical fiber FPI sensor based on in-fiber micro-cavity and fiber-tip // Opt. Fiber Technol. 2018. V. 46. P. 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.09.021>
21. Zhang C., Cui G., Miao C., et al. A Fabry–Perot temperature sensor sealed with thermo-sensitive polymer // Results in Optics. 2021. V. 5. P. 100163. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100163>

АВТОРЫ

Ирина Дмитриевна Казачкова — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Михаил Юрьевич Плотников — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57193069973; <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>; mplotnikov@itmo.ru

Кирилл Александрович Коннов — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Дмитрий Александрович Коннов — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2023

Одобрена после рецензирования 25.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

AUTHORS

Irina D. Kazachkova — Student, Engineer, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-3031-3625>; irin.kazachkova@gmail.com

Michael Y. Plotnikov — Candidate of Technical Sciences, Head of laboratory, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57193069973; <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>; mplotnikov@itmo.ru

Kirill A. Konnov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of laboratory, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 56032492300; <https://orcid.org/0000-0002-8888-3527>; kakonnov@itmo.ru

Dmitriy A. Konnov — PhD Student, Engineer, University ITMO, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-8256-973X>; dakonnov@itmo.ru

The article was submitted to the editorial office 28.02.2023

Approved after review 25.04.2023

Accepted for publication 29.05.2023