

УДК 681.586.4

Двухволновый метод восстановления сигнала в волоконно-оптическом датчике на основе интерферометра Фабри–Перо

© 2018 г. **А. А. ВЕТРОВ**, КАНД. ТЕХН. НАУК; **Д. А. ДАНИЛОВ**;
С. С. КОМИССАРОВ, КАНД. ТЕХН. НАУК; **Т. Д. КОЦЮБИНСКИЙ**;
А. Н. СЕРГУШИЧЕВ, КАНД. ТЕХН. НАУК

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

E-mail: a_vetrov@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2017

Предложен метод восстановления сигнала в волоконно-оптическом датчике на основе интерферометра Фабри–Перо, использующий два канала с различными значениями длины волны, подобранной таким образом, чтобы сдвиг фаз сигналов в этих каналах составлял $\pi/2$. Приведены примеры применимости метода для восстановления сигналов в акустических и вибрационных датчиках. Показано значительное увеличение динамического диапазона регистрируемых перемещений в таких датчиках за счёт использования предложенного метода по сравнению с одноволновым вариантом.

Ключевые слова: волоконная оптика, волоконный интерферометр Фабри–Перо, виброакустический датчик, динамический диапазон.

Коды OCIS: 060.0060, 060.2370, 120.3180, 050.2230.

ВВЕДЕНИЕ

За последнее время интерференционные системы съёма информации прошли огромный путь от громоздких, сложных в настройке и дорогостоящих устройств до компактных, недорогих и, при этом, высокоточных оптико-электронных приборов. Большую роль в этом сыграл значительный прогресс в области телекоммуникации, что привело к созданию качественной и доступной волоконно-оптической элементной базы. Кроме того, использование в качестве оптической схемы торцевого интерферометра Фабри–Перо позволило создавать различные миниатюрные высокочувствительные датчики физических величин, основанные на регистрации перемещения чувствительного элемента (ЧЭ) относительно торца оптоволоконного волокна [1]. Однако из-за нелинейности (синусоидального вида) характеристики преобразования в интерферометрических датчиках динамический диапазон регистрируемых перемещений оказывается ограниченным четвертью длины волны лазерного излучения. Кроме того, на эксплуатационных характеристиках сенсорной системы сказывается нестабильность положения рабочей точки датчика [2]. Это приводит к необходимости усовершен-

ствования методов регистрации сигнала и стабилизации его характеристик. Среди используемых методов увеличения динамического диапазона интерферометров можно выделить сканирование по длине волны, подсчёт интерференционных полос, использование нескольких измерительных каналов с различной длиной волны [3, 5, 6]. Существуют методы стабилизации положения рабочей точки при помощи управления длиной волны лазерного излучения [2]. Также применяются методы регистрации сигналов, основанные на использовании нескольких измерительных каналов, фазы сигналов которых находятся в квадратуре, т.е. сдвинуты друг относительно друга на $\pi/2$ [4]. В данной работе рассматривается метод восстановления сигнала в волоконно-оптическом датчике на основе интерферометра Фабри–Перо, в котором используются два канала с различными значениями длины волны, подобранной таким образом, чтобы сдвиг фаз сигналов в этих каналах составлял $\pi/2$.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Основу метода составляет двухканальный интерферометр Фабри–Перо, каналы которого образо-

ваны частично отражающим торцом оптического волокна и отражающим ЧЭ и отличаются только длиной волны лазерного излучения λ_1 и λ_2 .

Представим сигналы в каналах интерферометра в виде

$$I_1(t) = I_f + I_m + 2\sqrt{I_f I_m} \cos(\varphi_1(t)), \quad (1)$$

$$I_2(t) = I_f + I_m + 2\sqrt{I_f I_m} \cos(\varphi_2(t)), \quad (2)$$

где I_f — интенсивность излучения, отражённого от торца волокна, I_m — интенсивность излучения, отражённого от мембраны, $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ — фазы сигналов, обусловленные изменением расстояния $l(t)$ от торца оптоволоконка до ЧЭ.

Для удобства будем считать сигналы в обоих каналах нормированными и не будем учитывать их постоянную составляющую. Тогда, выражения (1) и (2) можно переписать в виде:

$$I_1(t) = \cos\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_1}\right), \quad (3)$$

$$I_2(t) = \cos\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_2}\right), \quad (4)$$

где λ_1 и λ_2 — длины волн в каналах интерферометра.

Продифференцировав (3) и (4) получим выражения

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda_1} \frac{dl(t)}{dt} \sin\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_1}\right), \quad (5)$$

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = -\frac{4\pi}{\lambda_2} \frac{dl(t)}{dt} \sin\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_2}\right). \quad (6)$$

Введём функцию

$$S(t) = \frac{dI_1(t)}{dt} I_2(t) - \frac{dI_2(t)}{dt} I_1(t),$$

которую в дальнейшем будем называть результирующим сигналом. С учётом (3) и (4) результирующий сигнал примет вид

$$S(t) = \frac{4\pi}{\lambda_2} \frac{dl(t)}{dt} \sin\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_2}\right) \cos\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_1}\right) - \frac{4\pi}{\lambda_1} \frac{dl(t)}{dt} \sin\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_1}\right) \cos\left(\frac{4\pi l(t)}{\lambda_2}\right). \quad (7)$$

Для случая, когда разность значений длины волн излучения в каналах незначительна, т.е. $\Delta\lambda \ll \lambda_1$ и $\Delta\lambda \ll \lambda_2$, где $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$, выражение (7) после некоторых преобразований можно записать так:

$$S(t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dl(t)}{dt} \sin\left(\frac{4\pi l(t)\Delta\lambda}{\lambda^2}\right), \quad (8)$$

где $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

Тогда, фаза результирующего сигнала представляется выражением

$$\varphi(t) = \frac{4\pi l(t)\Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (9)$$

Расстояние от торца волокна до подвижного чувствительного элемента в этом соотношении можно представить в виде двух слагаемых $l(t) = L + l_-(t)$, где L — длина резонатора, $l_-(t)$ — перемещение чувствительного элемента за счёт регистрируемого воздействия. В практически важных случаях при работе в малосигнальном режиме, как правило, $L \gg l_-(t)$. Тогда, пренебрегая слагаемым второго порядка малости, зависящим от $l_-(t)$, фазу результирующего сигнала можно считать постоянной величиной, определяемой выражением

$$\varphi \approx \frac{4\pi L\Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (10)$$

Таким образом, зная длину резонатора, можно подобрать такую разницу в значениях λ_1 и λ_2 , чтобы фаза результирующего сигнала была $\varphi = \pi/2 \pm \pi n$. В этом случае выражение (8) запишем так

$$S(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dl(t)}{dt}. \quad (11)$$

Проинтегрировав выражение (8) или его приближенный вариант (11), найдём с точностью до постоянного коэффициента искомый сигнал $l_-(t)$.

$$l_-(t) = \int S(t) dt. \quad (12)$$

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Структурная схема интерференционного волоконно-оптического датчика перемещений, реализующего предлагаемый метод, показана на рис. 1. Лазерное излучение от двух источников (лазерных модулей) 1 с длиной волны излучения λ_1 и λ_2 соответственно объединяется с помощью CWDM мультиплексора 2 и через одномодовое оптоволоконно и разветвитель 3 попадает на торец оптоволоконка и далее — на чувствительный элемент 4. После

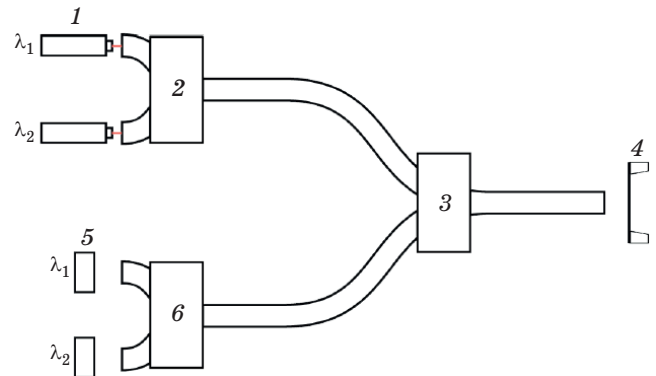


Рис. 1. Структурная схема виброакустического датчика.

интерференции отражённых от торца оптоволокна и чувствительного элемента составляющих, объединённый сигнал через оптоволокно и разветвитель 3 попадает на CWDM демультиплексор 6, где разделяется на два сигнала с длиной волны излучения λ_1 и λ_2 , каждый из которых затем попадает на свой фотоприёмник 5.

Как следует из выражения (10), длина резонатора L , при которой фаза результирующего сигнала $\varphi(t) = \pi/2$ определяется условием $L_{\pi/2} = \lambda^2/8\Delta\lambda$, из которого видно, что для увеличения допустимой длины резонатора разность длин волн $\Delta\lambda$ должна быть минимально возможной. Поэтому в данной системе использовались DFB лазеры с длиной волны излучения $\lambda_1 = 1510$ нм и $\lambda_2 = 1530$ нм, которые применяются в соседних каналах CWDM диапазона. Для того, чтобы добиться требуемой разности фаз $\varphi(t) = \pi/2$ в схеме использовалась подстройка длины волны излучения одного из лазеров путём управления его температурой с помощью встроенного в корпус лазера элемента Пельтье [2]. Таким образом, итоговая разность значений длины волны излучения в каналах может быть представлена как сумма двух составляющих $\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 + \Delta\lambda_p$, где $\Delta\lambda_0$ — начальная разность длин волн, $\Delta\lambda_p$ — корректируемая составляющая длин волн с помощью элемента Пельтье. В качестве фотоприёмников использовались pin диоды, применяемые в волоконно-оптических системах передачи информации.

При технической реализации предлагаемого метода отдельное внимание необходимо уделить аналого-цифровому преобразованию, а именно частоте дискретизации входного сигнала. Это обусловлено тем, что из-за нелинейной характеристики преобразования интерферометра с ростом амплитуды перемещений ЧЭ в выходном сигнале появляются дополнительные верхние гармоники. В связи с этим, при выборе частоты дискретизации нужно учитывать не только верхнюю частоту в спектре регистрируемого перемещения ЧЭ, но и его амплитуду.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА

В ходе эксперимента были записаны сигналы с выхода системы при подаче на ЧЭ в виде микромеханической мембраны тонового акустического сигнала частотой 100 Гц и амплитудой 10 Па. При таком уровне давления перемещение ЧЭ составляет 2000 нм. На рис. 2а приведён входной сигнал, а на рис. 2б показаны выходные сигналы 1, 2 с двух каналов интерферометрического датчика, находящихся в квадратуре. Хорошо видно, что из-за значительных искажений, обусловленных нелинейной характеристикой преобразования интерферометра, достаточно сложно определить исходный вид сигнала.

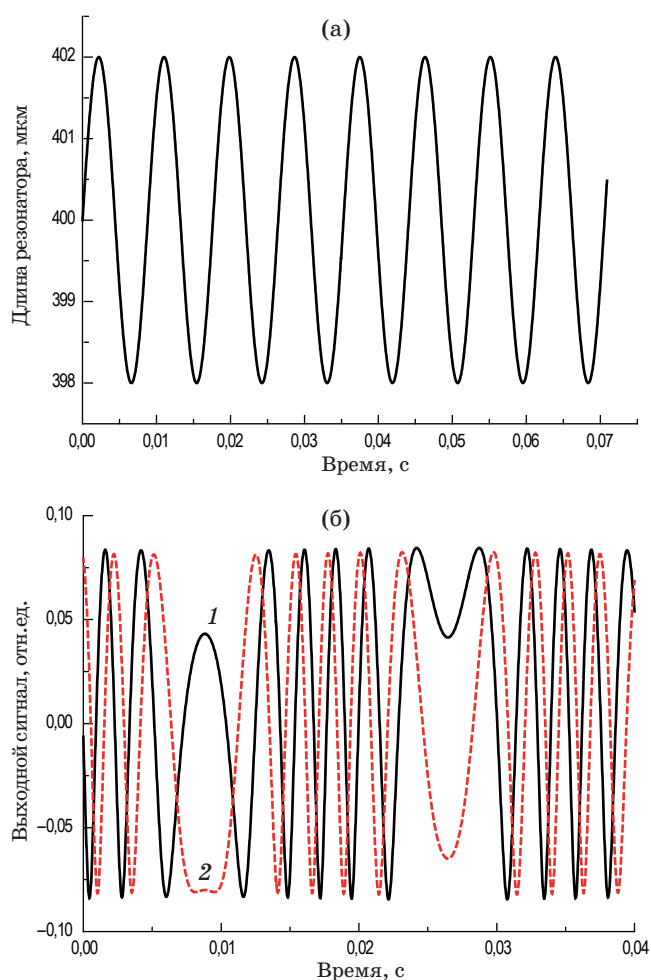


Рис. 2. Входные и выходные сигналы с интерферометрического датчика. а — входной сигнал, б — выходной сигнал перед цифровой обработкой.

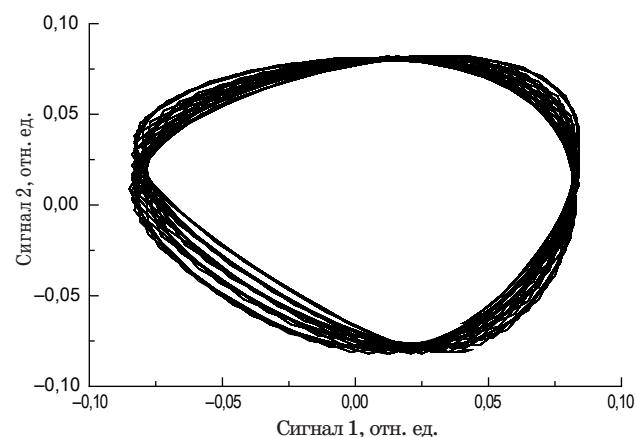


Рис. 3. Представление сигналов в каналах интерферометра в виде фигур Лиссажу.

На рис. 3 показан график, на оси абсцисс которого отображается амплитуда сигнала в одном из каналов, а по оси ординат амплитуда сигнала в другом канале (представление сигналов в виде

фигур Лиссажу). По этому графику можно сказать, что разность фаз в каналах составляет приблизительно $\pi/2$. Однако фигура не образует точного круга, поскольку, как видно из выражения (9), при достаточно больших перемещениях ЧЭ $L(t)$ текущий сдвиг фаз между каналами будет несколько отличаться от $\pi/2$.

После цифровой обработки в соответствии с выражением (12) на выходе устройства восстановленный сигнал имеет вид, показанный на рис. 4, откуда видно, что он с точностью до некоторого постоянного коэффициента повторяет входной тоновый сигнал.

Для оценки динамического диапазона регистрируемых перемещений с применением устройства на основе предложенного метода восстановления сигналов была проведена серия экспериментов, при которых на вход устройства подавался тоновый сигнал фиксированной частоты 1000 Гц с увеличивающейся амплитудой. При этом регистрировалась амплитуда выходного сигнала. Таким образом, можно оценить, когда характеристика преобразования отклоняется от линейной, и как на это влияют различные факторы, а именно, начальная разность длин волн лазерного излучения в каналах интерферометра и частота дискретизации входного сигнала.

На рис. 5 показана зависимость выходного сигнала от входного воздействия при начальных разностях длин волн 40, 20, 0 нм. Следует отметить, что кривая с разностью длин волн 0 нм получена на теоретической модели, поскольку разделение каналов при такой разности при помощи CWDM мультиплексора невозможно.

Из рис. 5 видно, что, используя предложенный двухволновый метод, при начальной разности длин волн 20 нм характеристика преобразования обладает приемлемой линейностью вплоть до амплитуды перемещения ЧЭ на величину $L(t) = 3\lambda$,

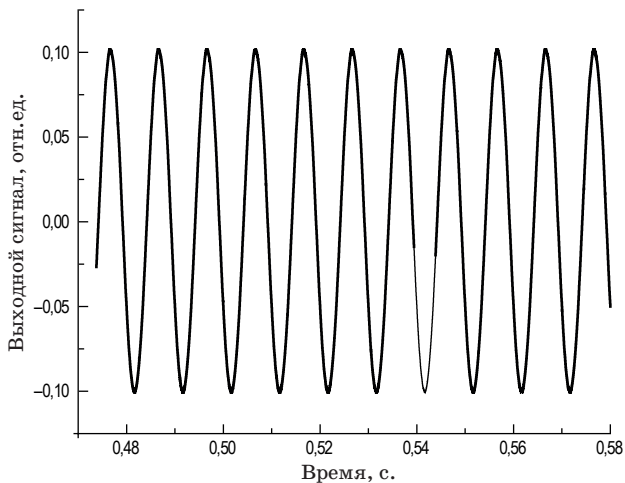


Рис. 4. Выходной сигнал с виброакустического датчика после цифровой обработки.

а диапазон монотонного изменения характеристики преобразования достигает 4λ . В то же время, в одноволновом интерферометре диапазон монотонного изменения характеристики преобразования ограничен значением $1/4\lambda$. Таким образом, выигрыш по допустимому уровню регистрируемых перемещений ЧЭ в предложенном датчике достигает 12 раз.

Далее было проанализировано влияние частоты дискретизации входного сигнала на характеристику преобразования (см. рис. 6).

Из рисунка видно, что при входном сигнале частотой 1000 Гц для получения квазилинейного диапазона характеристики преобразования при значениях амплитуды перемещений ЧЭ до 3λ необходима частота дискретизации 176,4 кГц, что требует применения специализированных микросхем АЦП. Снижение частоты дискретизации приводит к пропорциональному уменьшению амплитуды восстанавливаемых без искажений входных сигналов.

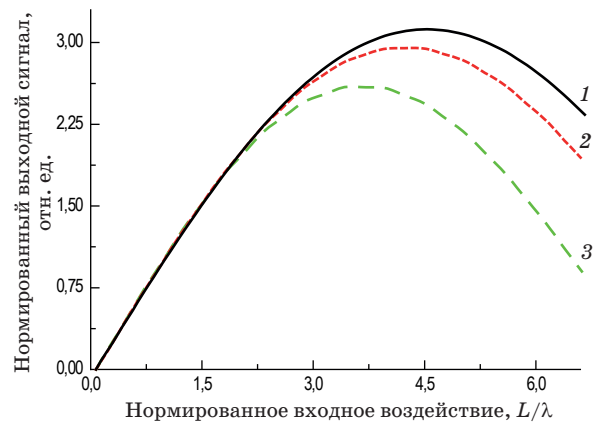


Рис. 5. Характеристика преобразования виброакустического датчика при различных начальных разностях длин волн между каналами $\Delta\lambda_0$. $\Delta\lambda_0 = 0$ нм (1), $\Delta\lambda_0 = 20$ нм (2), $\Delta\lambda_0 = 40$ нм (3).

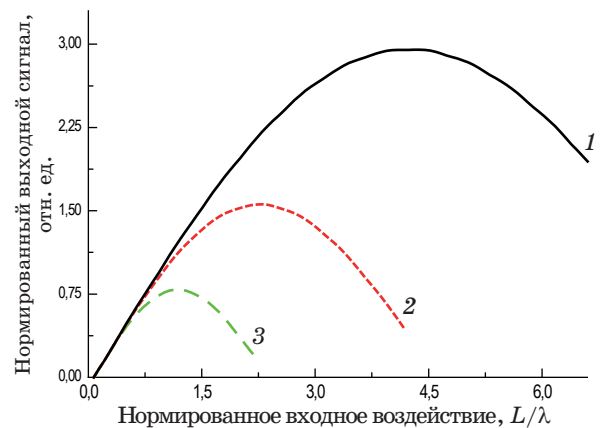


Рис. 6. Характеристика преобразования виброакустического датчика при различной частоте дискретизации входного сигнала f_s . $f_s = 176400$ Гц (1), $f_s = 88200$ Гц (2), $f_s = 44100$ Гц (3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод восстановления сигнала в волоконно-оптическом датчике на основе интерферометра Фабри–Перо, в котором используются два канала с различными значениями длины волны, подобранной таким образом, чтобы сдвиг фаз сигналов в этих каналах составлял $\pi/2$, показал свою работоспособность. С его помощью удалось не только значительно увеличить динамический диапазон регистрируемых входных воздействий (в 12 раз или 22 дБ при использовании частоты дискретизации 176,4 кГц), но и избавиться от не-

обходимости контролировать положение рабочей точки на характеристике преобразования интерферометра. Существенным преимуществом данного метода является возможность его технической реализации с использованием стандартной компонентной базы для волоконно-оптических линий связи, благодаря чему нет необходимости в юстировке оптической схемы, как в методах, использующих широкополосный источник света [4], в которых требуется применение специальных фильтров для вырезания из спектра требуемой длины волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н.* Волоконно-оптический торцевой интерферометр — универсальный элемент построения датчиков смещения // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 1. С. 3–6.
2. *Ветров А.А., Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н.* Адаптивная система управления интерференционным волоконно-оптическим датчиком перемещения // Оптический журнал. 2012. Т. 79. С. 29–37.
3. *Ветров А.А., Власов Р.А., Данилов Д.А., Комиссаров С.С., Коцюбинский Т.Д., Сергушичев А.Н.* Многоволновый метод расширения диапазона регистрируемых перемещений в виброакустическом датчике на основе волоконного интерферометра Фабри–Перо // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 48–53.
4. *Furstenau N., Schmidt M.* Fiber-optic extrinsic Fabry–Perot interferometer vibration sensor with two-wavelength passive quadrature readout // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Ottawa. Canada. May 19–21. 1997. С. 66–72.
5. *Базденков С.В.* Двухволновой лазерный интерферометр для измерения плотности плазмы на установках «Токамак» / Под ред. Базденкова С.В., Жуковского В.Г. М.: ИАЭ, 1983. С. 45.
6. *Арманд Н.А., Бахтияров В.Ф., Бисярин В.П.* и др. Двухволновый лазерный дальномер-рефрактометр // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 11. С. 2420.