

09

Применение волоконно-оптического интерферометра Маха—Цендера для создания длиннобазовых деформометров

© О.Т. Каменев, Ю.Н. Кульчин, Ю.С. Петров, Р.В. Хижняк

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток
E-mail: okamenev@iacp.dvo.ru

Поступило в Редакцию 10 октября 2013 г.

Представлены результаты исследований особенностей применения волоконно-оптического интерферометра Маха—Цендера для создания длиннобазовых деформометров, предназначенных для мониторинга состояния крупномасштабных объектов. Показано, что применение многовиткового чувствительного элемента обеспечивает возможность изменения его чувствительности, а также способствует снижению фединга выходного сигнала деформометра.

Развитие волоконной оптики обеспечило значительный рост интереса к разработке и созданию волоконно-оптических измерительных систем мониторинга крупномасштабных техногенных объектов (плотин, мостов, зданий и сооружений) [1], что объясняется преимуществами волоконно-оптической элементной базы: невосприимчивостью к электромагнитным помехам, высокой чувствительностью к внешним воздействиям, возможностью создания протяженных измерительных преобразователей с распределенной чувствительностью, устойчивостью к агрессивной внешней среде, обеспечением взрыво- и пожаробезопасности, низкой стоимостью. Система мониторинга, базирующаяся на волоконно-оптических датчиках (ВОД), имеет немаловажное свойство ясности физического принципа, что чрезвычайно существенно с точки зрения масштабного внедрения.

В области мониторинга состояния крупномасштабных объектов наибольший интерес представляет измерение параметров полей деформаций. Для решения этой задачи применяются: амплитудные ВОД, датчики на основе волоконных решеток Брэгга, датчики с распреде-

ленной чувствительностью на основе бриллюэновского и рамановского рассеивания, датчики с интегральной чувствительностью на основе волоконно-оптических двулучевых интерферометров Майкельсона и Маха–Цендера [2]. Интерферометрические ВОД на основе двулучевых интерферометров, не требующие дополнительной обработки выходных сигналов, представляются наиболее перспективными с точки зрения создания длинноволновых деформометров для решения практических задач мониторинга крупномасштабных объектов. Однако разнообразие условий проведения измерений требует обеспечения возможности изменения чувствительности деформометра, определяемой характеристиками волоконного световода, которые не могут быть существенно изменены. Кроме того, высокая чувствительность двулучевых волоконно-оптических интерферометров в сочетании с протяженной измерительной базой приводит к федингу выходного сигнала, вызванного дрейфом рабочей точки интерферометра. Указанные недостатки существенно ограничивают применение двулучевых волоконно-оптических интерферометров в системах мониторинга крупномасштабных объектов.

В данной работе предложены принципы построения чувствительного элемента длинноволнового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера, обеспечивающие возможность изменения чувствительности, а также снижение дрейфа рабочей точки.

Традиционный метод измерения продольных деформаций с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера состоит в том, что световод измерительного плеча интерферометра закрепляется в двух точках. Измерение расстояния между точками закрепления ΔL равно изменению длины световода, которое преобразуется в изменение фазы световой волны, распространяющейся в измерительном плече (сигнальная волна) [2]:

$$\Delta\varphi = \beta\Delta L, \quad (1)$$

где β — постоянная распространения моды волоконного световода. На выходе интерферометра изменение фазы преобразуется в изменение интенсивности излучения ΔI в результате интерференции со световой волной, распространяющейся в световоде опорного плеча (опорная волна). Если интенсивности опорной и сигнальной волн одинаковы и равны I_0 , а степень когерентности равна единице, то изменение

интенсивности излучения на выходе интерферометра при удлинении световода происходит по гармоническому закону

$$\Delta I = 2I_0 \sin(\Delta\varphi) = 2I_0 \sin(\beta\Delta L). \quad (2)$$

Тогда в режиме счета полос чувствительность интерферометра к продольным деформациям определяется выражением

$$c_1 = \frac{M_1}{\Delta L}, \quad (3)$$

где $M_1 = \Delta\varphi/2\pi$ — число периодов изменения интенсивности выходного излучения.

Из выражений (1) и (3) следует, что чувствительность традиционного деформометра на основе интерферометра Маха–Цендера в режиме счета полос зависит только от постоянной распространения моды световода

$$c_1 = \frac{\beta}{2\pi}. \quad (4)$$

Таким образом, существенное изменение чувствительности деформометра на основе традиционного интерферометра не представляется возможным. При этом длина измерительного плеча длиннобазового деформометра может достигать 10 м и более, что приводит к значительному дрейфу рабочей точки интерферометра.

Решение проблемы изменения чувствительности длиннобазового деформометра состоит в изменении принципа измерения деформаций с использованием интерферометра Маха–Цендера, при котором в состав измерительного преобразователя помимо волоконного световода входит дополнительный элемент, который может быть изготовлен из различных материалов. Решение проблемы снижения дрейфа рабочей точки интерферометра состоит в пространственной локализации интерферометра при сохранении длины измерительной базы. Указанные особенности построения длиннобазовых деформометров на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера легко реализуются в случае применения в измерительном плече специального многовиткового чувствительного элемента (МЧЭ). Функциональная схема длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера с многовитковым чувствительным элементом представлена на рис. 1.

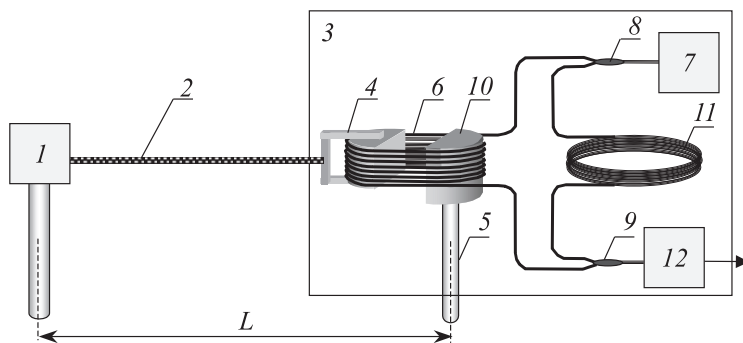


Рис. 1. Функциональная схема длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера: 1 — стойка для крепления троса, 2 — трос, 3 — герметичный корпус, 4 — подвижная половина цилиндра, 5 — стойка, 6 — жестко закрепленная половина цилиндра, 7 — полупроводниковый лазер, 8, 9 — Y-разветвитель, 10 — одномодовый волоконный световод измерительного плеча интерферометра Маха–Цендера, 11 — одномодовый волоконный световод опорного плеча интерферометра Маха–Цендера, 12 — фотоприемник.

Многовитковый чувствительный элемент состоит из разомкнутого металлического цилиндра, на который намотан волоконный световод измерительного плеча интерферометра. Неподвижная половина цилиндра жестко закреплена в одной точке контролируемого объекта, подвижная половина крепится к концу протяженного троса, второй конец которого закрепляется во второй точке объекта. Волоконный световод опорного плеча интерферометра Маха–Цендера размещен в непосредственной близости от световода измерительного плеча для снижения влияния флуктуаций температуры на работу устройства. Интерферометр с чувствительным элементом размещается в закрытом корпусе, снаружи находится только трос, чувствительность которого к нежелательным внешним воздействиям существенно ниже, чем чувствительность волоконного световода. Диаметр цилиндра выбирается таким образом, чтобы потери мощности излучения в намотанном на него волоконном световоде были незначительны. Для стандартного одномодового световода диаметр цилиндра должен быть не менее 3 см.

При изменении расстояния между точками закрепления на величину ΔL происходит совместное удлинение троса и чувствительного элемента. При этом вызванное удлинением приращение силы натяжения троса F_r компенсируется приращением силы натяжения витков световода F_N , которая складывается из сил натяжения отдельных световодов F_f :

$$F_r = F_N = 2NF_f, \quad (5)$$

где N — количество витков световода в чувствительном элементе. Если относительное удлинение световодов не превышает 1%, то выполняется закон Гука и выражение (5) можно переписать в виде

$$k_r \Delta l_r = 2Nk_f \Delta l_s, \quad (6)$$

где k_r — коэффициент упругости троса, k_f — коэффициент упругости световода, Δl_r — удлинение троса, Δl_s — удлинение чувствительного элемента.

Так как $\Delta l_r = \Delta L - \Delta l_s$, то с учетом выражения (6) связь между измеряемым удлинением ΔL и удлинением чувствительного элемента определяется выражением

$$\Delta l_s = \frac{\Delta L}{2N \frac{k_f}{k_r} + 1}.$$

При этом суммарное удлинение волоконного световода измерительного плеча

$$\Delta l_f = 2N \Delta l_s = \frac{\Delta L}{\frac{k_f}{k_r} + \frac{1}{2N}}.$$

Введем обозначение

$$K = \frac{1}{\frac{k_f}{k_r} + \frac{1}{2N}}. \quad (7)$$

Тогда

$$\Delta l_f = K \Delta L \quad (8)$$

и коэффициент K определяет, во сколько раз удлинение световода отличается от измеряемой деформации ΔL .

Чувствительность интерферометра в случае применения МЧЭ определяется выражением, аналогичным выражению (3):

$$c_2 = \frac{M_2}{\Delta L}, \quad (9)$$

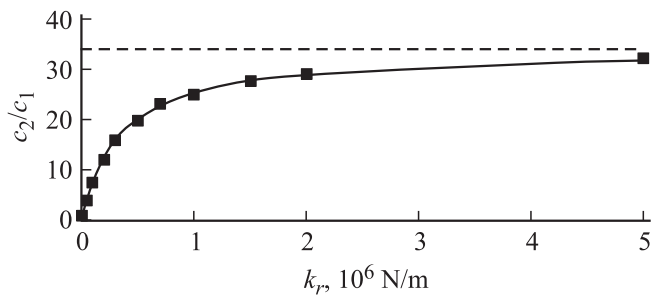


Рис. 2. Зависимость относительной чувствительности деформометра с многовитковым чувствительным элементом от коэффициента упругости k .

в котором число периодов изменения интенсивности выходного излучения M_2 определяется выражением

$$M_2 = \frac{\beta \Delta l_f}{2\pi}. \quad (10)$$

Тогда из выражений (8)–(10) следует, что чувствительность ВОД на основе интерферометра Маха–Цендера с многовитковым чувствительным элементом $c_2 = Kc_1$. Таким образом, коэффициент $K = c_2/c_1$ показывает, во сколько раз МЧЭ изменяет чувствительность волоконного интерферометра Маха–Цендера. С учетом (7) получаем зависимость отношения чувствительностей c_2/c_1 от отношения коэффициента упругости троса k_r :

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{1}{\frac{k_f}{k_r} + \frac{1}{2N}}.$$

Данная зависимость представлена на рис. 2 при следующих параметрах чувствительного элемента деформометра: число витков $N = 17$, коэффициент упругости световода (для отрезка длиной 10 см) $k_f = 8166 \text{ N/m}$. Маркерами представлены экспериментальные результаты. Пунктирная линия соответствует максимальной чувствительности деформометра, которая достигается при $k_r \rightarrow \infty$ и определяется количеством витков волоконного световода в МЧЭ: $c_2/c_1 = 2N$. Это соответствует случаю, когда трос отсутствует и $\Delta l_s = \Delta L$. Уменьшение коэффициента упругости троса приводит к уменьшению чувствительности деформометра практически до нуля.

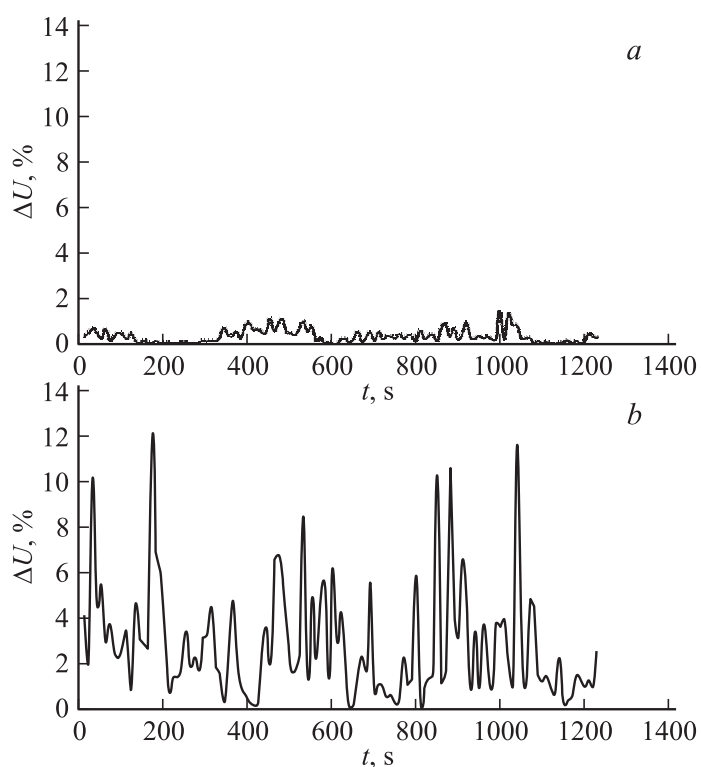


Рис. 3. Зависимость отклонения выходного сигнала от времени для деформометра с применением многовиткового чувствительного элемента (*a*) и для традиционного деформометра (*b*).

На рис. 3 представлены временные зависимости отклонения выходного сигнала ΔU деформометра на основе интерферометра Маха–Цендера с длиной базы $L = 50$ см: с многовитковым чувствительным элементом (рис. 3, *a*) и традиционного (рис. 3, *b*), записанные в интервале времени $t = 20$ min. Как видно из рис. 3, максимальное отклонение выходного сигнала деформометра многовитковым чувствительным элементом не превышает 2%, в то время как для традиционного деформометра максимальное отклонение превышает значение 12%.

Таким образом, в данной работе предложены принципы построения чувствительного элемента длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха—Цендера, обеспечивающие возможность изменения чувствительности, а также повышение стабильности выходного сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (ГК 11.519.11.5015).

Список литературы

- [1] *Glisic B., Inaudi D. Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring.* Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 276 p.
- [2] *Волоконно-оптические датчики / Под ред. Э. Удда. М.: Техносфера, 2008. 520 с. [Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientist / E.Udd, ed. N.Y.: John Wiley & Sons, Inc. 1991. 496 p.]*