

07;12
©1994

ПСЕВДОГЕТЕРОДИННЫЙ МЕТОД ПРИЕМА СИГНАЛОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ В ДВУХМОДОВОМ ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ

*С.П.Гиневский, О.И.Котов,
А.В.Медведев, В.М.Николаев*

В последнее время, наряду с традиционными локальными волоконно-оптическими датчиками (ВОД) различных физических величин, все больший интерес представляют распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети на их основе. К таким системам относятся, например, ВОД пространственных распределений физических величин, использующие в своей основе принципы реконструктивной томографии [1-3]. В ряде случаев такие измерительные сети должны охватывать достаточно большие пространства и протяженность волоконно-оптических трактов может достигать десятков километров. Например, для контроля обстановки в сейсмически неустойчивых регионах может быть использована сеть волоконно-оптических измерительных линий, определенным образом проложенных по заданной территории. На выходе каждой линии мы получаем некую интегральную величину, характеризующую усредненное вдоль волоконного тракта внешнее воздействие. Имея набор таких интегральных характеристик, с определенной степенью точности можно реконструировать картину пространственного распределения интенсивности колебаний грунта в заданном районе. Интересная область применения томографических ВОД рассмотрена в работе [1]. Автор обсуждает возможность использования распределенных волоконных датчиков акустических полей применительно к программе акустической глубоководной регистрации космических мюонов и нейтрино (проект ДЮМАНД).

В силу больших протяженности и количества измерительных линий в таких системах наиболее привлекательными из известных интерферометрических схем регистрации сигналов датчика становятся одноволоконные схемы — интерферометр Фабри-Перо и схема с межмодовой интерференцией (ДФМ). Метод приема сигналов интерферометра Фабри-Перо, аналогичный рассматриваемому, был предложен авторами ранее и представлен достаточно подробно в

работе [4]. Однако его применение в протяженных линиях может встретить серьезные затруднения, связанные с недостаточной когерентностью источника излучения и сложностью обеспечения режима интерферометра. Кроме того, обладая высокой чувствительностью, интерферометр Фабри-Перо сильно подвержен влиянию различных паразитных воздействий, что при больших длинах может привести к значительному федингу сигнала и потерям информации. Предлагаемый ниже метод приема сигналов ДФМ в двухмодовом волоконном световоде, несмотря на более низкую фазовую чувствительность, позволяет устранить эти недостатки и может быть с успехом использован при построении распределенных ВОД большой протяженности и измерительных сетей на их основе.

Рассмотрим работу ВОД на двухмодовом оптическом волокне с регистрацией сигнала ДФМ с помощью предлагаемого метода. Запишем выражение для интенсивности выходного пучка двухмодового волоконного световода:

$$I(x, y, L) = A_1^2 E_1^2(x, y) + A_2^2 E_2^2(x, y) + 2E_1(x, y)E_2(x, y)A_1A_2 \cos \Delta\beta L, \quad (1)$$

где x, y — координаты точки в плоскости торца световода, A_k — множитель, учитывающий степень возбуждения k -ой моды на входе волокна, коэффициента пропускания торцов и затухание в волокне, $E_k(x, y)$ — функция распределения напряженности поля k -й моды, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ — разность постоянных, распространения двух мод, L — длина световода.

Интерференционная составляющая выделяется на выходе выбором соответствующей диафрагмы $D(x, y)$ (максимизация произведения E_1E_2), и в дальнейшем рассмотрении ограничимся анализом информативного множителя $\cos \Delta\beta L$.

Предположим, что осуществлен режим двухчастотной модуляции длины волоконного световода таким образом, что

$$L = L_0 + \Delta L_1 \sin(\Omega_1 t + \varphi_1) + \Delta L_2 \sin(\Omega_2 t + \varphi_2), \quad (2)$$

где L_0 — длина невозмущенного световода, $\Delta L_1, \Omega_1, \varphi_1, \Delta L_2, \Omega_2, \varphi_2$ — соответственно амплитуды, частоты и начальные фазы воздействий.

В этом случае информационный множитель в интерференционном члене выражения (1) можно записать как

$$\cos \Delta\beta L = \cos \Delta\beta L_0$$

$$[\cos(\xi_1 \sin \Omega_1 t) \cos(\xi_2 \sin \Omega_2 t) - \sin(\xi_1 \sin \Omega_1 t) \sin(\xi_2 \sin \Omega_2 t)] -$$

$$-\sin \Delta\beta L_0$$

$$[\sin(\xi_1 \sin \Omega_1 t) \cos(\xi_2 \sin \Omega_2 t) + \sin(\xi_2 \sin \Omega_2 t) \cos(\xi_1 \sin \Omega_1 t)], \quad (3)$$

где $\xi_1 = \Delta\beta \Delta L_1$, $\xi_2 = \Delta\beta \Delta L_2$, а также положили для упрощения рассмотрения $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Далее, раскладывая в правой части выражения (3) члены вида $\cos(a \sin b)$ и $\sin(a \sin b)$ в ряды Фурье, можно получить выражение, содержащее полный набор гармоник комбинационных частот $m\Omega_1 + n\Omega_2$. Анализ полученного выражения показывает, что, выбрав слагаемое определенной комбинационной частоты, можно добиться для него таких условий модуляции (выбрать величины ξ_1 и ξ_2), что результирующая составляющая данной частоты будет представлять собой гармоническую функцию с неизменной амплитудой и фазой, равной $\Delta\beta L_0$. Так для режима $\Omega_2 = 2\Omega_1 = 2\Omega$ $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, выделяя из результата разложения выражения (3) составляющие частоты 2Ω , получим:

$$(\cos \Delta\beta L)_{2\Omega} = 2F_1(\xi_1, \xi_2) \cos \Delta\beta L_0 \cos 2\Omega t - 2F_2(\xi_1, \xi_2) \sin \Delta\beta L_0 \sin 2\Omega t, \quad (4)$$

$$F_1(\xi_1, \xi_2) = \sum_{n=1}^{\infty} J_{2(2n-1)}(\xi_1) [J_{2(n-1)}(\xi_2) + J_{2n}(\xi_2)], \quad (5)$$

$$F_2(\xi_1, \xi_2) = \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\xi_2) [J_{4(n-1)}(\xi_1) - J_{4n}(\xi_1)], \quad (6)$$

где $J_k(x)$ — функция Бесселя 1-го рода k -го порядка.

Если добиться выполнения условия

$$F_1(\xi_1, \xi_2) = \pm F_2(\xi_1, \xi_2), \quad (7)$$

то выражение (4) преобразуется к виду

$$(\cos \Delta\beta L)_{2\Omega} = 2F_1(\xi_1, \xi_2) \cos(\Delta\beta L_0 \pm 2\Omega t). \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), составляющая интерференционного сигнала регистрируемой частоты 2Ω имеет неизменную (независящую от внешних воздействий) амплитуду и фазу $\Delta\beta L_0$, которая в свою очередь и является информативной частью полученного выражения. Внешнее воздействие на сигнальный отрезок световода (изменение температуры, давления, акустическая волна) приводит к соответствующему изменению фазы сигнала. Таким образом, измерение флуктуаций оптической фазы $\Delta\beta L_0$ сводится к

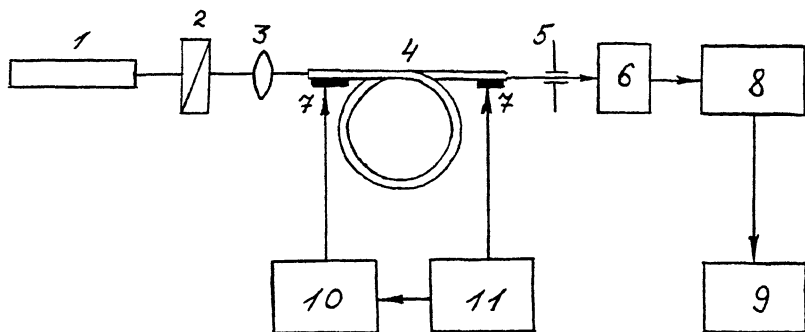


Рис. 1. Структурная схема датчика. 1 — лазер, 2 — пластинка $\lambda/2$, 3 — микрообъектив, 4 — волоконный световод, 5 — диафрагма, 6 — фотоприемник, 7 — волоконно-оптические модуляторы, 8 — селективный усилитель, 9 — фазометр, 10 — генератор частоты Ω , 11 — генератор частоты 2Ω .

измерению фазы электрического сигнала на выходе датчика.

В общем случае коэффициенты F_1 и F_2 являются также функциями начальных фаз модулирующих сигналов, и уравнение (7) имеет решения и при $\varphi_1 \neq 0$, $\varphi_2 \neq 0$. При выборе режима модуляции необходимо задаться значениями Ω_1 , Ω_2 , φ_1 , φ_2 , записать аналитическое выражение для составляющей той частоты, которая будет регистрироваться, и искать значения ξ_1 и ξ_2 , обеспечивающие равенство коэффициентов F_1 и F_2 . Уравнение (7) решалось относительно ξ_1 и ξ_2 при помощи ЭВМ для различных условий модуляции (Ω_1 , Ω_2 , φ_1 , φ_2) и для регистрации различных комбинационных частот. Следует отметить, что желательно выбирать максимальные по абсолютной величине решения и учитывать реальные возможности волоконно-оптических модуляторов, при помощи которых будут достигаться необходимые условия модуляции. Интересно также то, что при определенных условиях модуляции возможен режим "противоположный" используемому — фаза сигнала остается постоянной, а меняется амплитуда.

Экспериментально был реализован случай кратных частот $\Omega_2 = 2\Omega_1 = 2\Omega$. Оптическая схема датчика (рис. 1) содержала HeNe-лазер 1, излучение которого через пластинку $\lambda/2$ 2 и микрообъектив 3 вводилось в двухмодовый анизотропный волоконный световод 4, диафрагму 5 и фотоприемник 6. Использование анизотропного волокна, в ось которого с помощью пластинки $\lambda/2$ вводилось линейно поляризованное излучение лазера, позволяло избежать паразитной поляризационной модуляции и стабилизировать режим ДФМ. Часть волоконного световода укреплялась на пьезо-

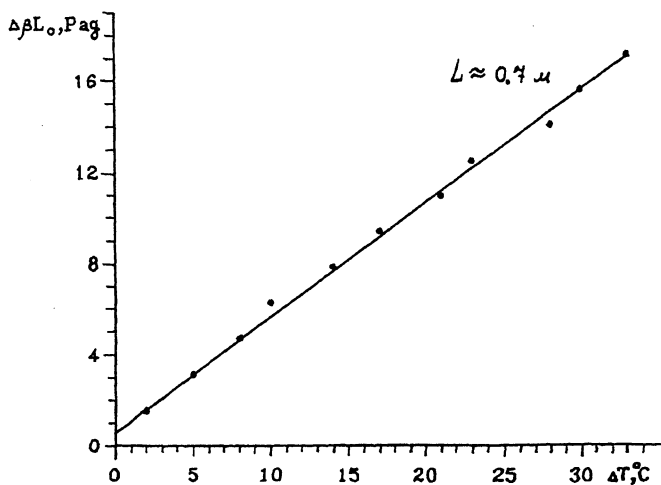


Рис. 2. Зависимость оптической фазы от температуры волокна.

зокерамических пластинах, образуя волоконно-оптические модуляторы 7. Длины пьезокерамик отличались в два раза, обеспечивая требуемое соотношение резонансных частот ВОМ (17.5 и 35 кГц). Для выполнения точного соотношения частот и фаз модулирующих сигналов использовался режим внешнего запуска генератора частоты Ω частотой 2Ω . Сигнал с выхода фотоприемника подавался на селективный усилитель 8, настроенный на частоту 2Ω , и далее на фазометр 9. Точность измерения фазы и динамический диапазон определяются как устройством регистрации фазы, так и настройкой оптической схемы. Возможности реальных устройств регистрации фазы обеспечивают чувствительность $\Delta\varphi_{\min}$ не хуже 10^{-2} Рад при динамическом диапазоне порядка 10^5 Рад. Однако для достижения указанного значения чувствительности необходимо получение достаточно высокого (порядка $1/\Delta\varphi_{\min}$) отношения сигнал-шум в рабочей полосе частот, что также выгодно отличает схему с ДФМ от интерферометра Фабри-Перо, где контраст интерференционной картины существенно ниже.

Для демонстрации работы предлагаемого метода приема сигналов ДФМ в двухмодовом волоконном световоде в режиме датчика была измерена фазовая чувствительность к изменению температуры волокна. Свободный участок световода помещался в термостат и медленно нагревался при непрерывном контроле амплитуды и фазы сигнала на выходе селективного усилителя. При правильном выборе режи-

мов модуляции флуктуации амплитуды сигнала не превышали 10–15%, а фаза изменялась пропорционально температуре (рис. 2). Несложно оценить фазовую чувствительность ВОД к температуре – около 0.75 Рад/°С на метр волокна.

Акустическая чувствительность датчика помимо значения минимального регистрируемого фазового сдвига зависит от типа используемого волокна и покрытия, условий прокладки на объекте и может быть оптимизирована под конкретные воздействия по величине и частотному диапазону. Оптическая схема ВОД не содержит сложных и дорогостоящих оптических элементов, относительно проста и надежна. Волоконно-оптические модуляторы и все электронные устройства схемы могут быть сконцентрированы на приемном конце линии в пункте конечной обработки информации. ВОД, построенные на основе предлагаемого метода регистрации сигналов ДФМ, по чувствительности занимают промежуточное положение между фазовыми ВОД, работающими в пределах одной интерференционной полосы, и датчиками с режимом “счета полос”; но в реализации они существенно проще первых и лишь немного сложнее последних. При использовании различных типов волокон и покрытий предложенный метод позволяет строить как локальные, так и протяженные распределенные, относительно простые, дешевые и надежные волоконно-оптические датчики различных физических величин и полей.

Список литературы,

- [1] Малезанов А.И. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1988. Т. 31. В. 11. С. 1388-1393.
- [2] Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кириченко О.В., Петров Ю.С. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. В. 5. С. 513-516.
- [3] Ginevsky S.P., Kosareva L.I., Kotov O.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M. // Fiber Optic Tomographic Sensor. Second International Russian Fiber Optics and Telecommunications Conference, St. Petersburg, Russia, October 5-9, 1992. Proc. 328-329.
- [4] Ginevsky S.P., Kotov O.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M., Filippov M.T. // Fiber Optic Interferometric Sensors Using a Novel Signal Detection Technique. First International Soviet Fiber Optics and Telecommunications Conference, Leningrad, USSR, April-9, 1991. Proc. P. 309-312.

Поступило в Редакцию
5 ноября 1993 г.