

06.3;07

©1993

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СИГНАЛИЗАЦИИ

*А.М.Мамедов, В.Т.Потапов, С.В.Шаталин,
Р.Юшкайтис*

В настоящее время активно изучают возможные применения волоконно-оптических систем сигнализации для защиты людей и дорогостоящего оборудования [1]. В этих датчиках используются волокна, которые должны быть чувствительными к внешнему давлению и, в то же время, нечувствительными к электромагнитным и радиопомехам.

В некоторых схемах используется изменение межмодовой интерференции в многомодовых волокнах, обусловленное внешним давлением на волокно [2]. Однако такие системы не дают информации о координате локального механического возмущения вдоль волоконного контура, что является их существенным недостатком. Другой подход, основанный на использовании оптической временной рефлектометрии, дает возможность определить координату возмущения, но его применение ограничено низким уровнем чувствительности к давлению на волокно.

В этой статье мы описываем волоконно-оптический датчик сигнализации с индикацией координаты локального возмущения вдоль волоконной линии, в котором используется схема детектирования оптической фазы и, таким образом, обеспечивается многократное увеличение чувствительности к слабому возмущению по сравнению с амплитудными датчиками. Основу схемы составляет когерентный рефлектометр, пространственное разрешение которого меньше, чем длина когерентности источника. Будет показано, что соответствующая фильтрация сигнала рефлектометра дает возможность сконструировать датчик, характеристики которого близки к характеристикам мультиплексных интерферометрических датчиков.

Принцип обработки сигнала

Оптическая часть системы совпадает с обычной схемой рефлектометра (см. рис. 1). Электронная схема обработки выделяет оптические сигналы, рассеянные от участка $[z_0; z_0 + l]$ волокна, где l — пространственное разрешение рефлектометра. Пусть в точке $z_0 + y$ ($y < l$) действует фазовое возмущение $\frac{\varphi(t)}{2}$, тогда поле E рассеянного излучения дается уравнением

$$E(t) = \sum_{[z_0; z_0+l]} r_m \exp(-i\varphi_m) + \sum_{[z_0+y; z_0+l]} r_n \exp(-i(\varphi_n + \varphi(t))), \quad (1)$$

где r_m — амплитудные коэффициенты релеевских центров, а φ_m — набеги фаз рассеянных волн. Статистической мерой случайного

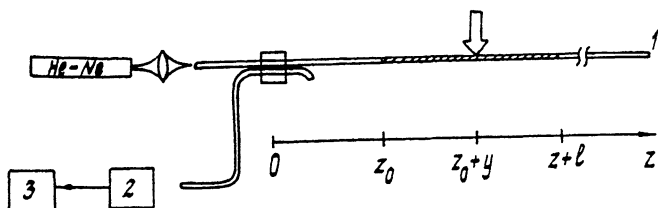


Рис. 1. Принцип работы датчика: 1 — волоконная линия, 2 — рефлектометр, 3 — коррелятор.

процесса $E(t)$ является автокорреляция интенсивности света

$$K(\tau) = \langle E(t)E^*(t)E(t+\tau)E^*(t+\tau) \rangle,$$

где * означает комплексное сопряжение, а $\langle \dots \rangle$ — усреднение по ансамблю.

$$K(\tau) = \frac{2}{l^2} \left(\sum_{[z_0; z_0+l]} \langle r_m^2 \rangle \right)^2 \times \{ y^2 + (y-l)^2 + y(l-y)[1 + \langle \cos(\varphi(t+\tau) - \varphi(t)) \rangle] \}. \quad (2)$$

Уравнение (2) получено в предположении, что r_m и φ_m являются независимыми случайными величинами и распределены равномерно, $m \gg 1$. Оно описывает вариации интенсивности в спекл-картине рассеянного излучения — явление, хорошо известное в когерентной рефлектометрии [3].

При линейной деформации волокна $\varphi(t) = \Omega t$, откуда получаем

$$K(\tau) = K_0 + K_\Omega \cos \Omega \tau.$$

Итак, автокорреляция выходного сигнала рефлектометра является периодической, другими словами, мы имеем компоненту K_Ω спектральной плотности сигнала рефлектометра. Вес компоненты K_Ω зависит от места возмущения в соответствии с уравнением (2) и его максимальное значение равно $\frac{K_\Omega}{K_0} = 0.5$. Видно, что наш подход налагает нестрогое ограничение на чувствительность рефлектометра. Если отношение сигнал/шум > 2 за время усреднения меньше, чем $\frac{1}{\Omega}$, мы сможем детектировать малые удлинения волокна, сравнимые с длиной волны излучения. Кроме того, анализ уравнения (3) показывает, что оно остается справедливым при $\varphi(t) = \varphi_m \cos(\Omega(t) + \mu)$, где $\varphi_m \ll 1$, μ — случайно распределена в интервале $[0; 2\pi]$. В этом случае $K_\Omega \sim \varphi_m^2$ и чувствительность системы зависит от отношения сигнал/шум как в мультиплексных интерферометрических датчиках.

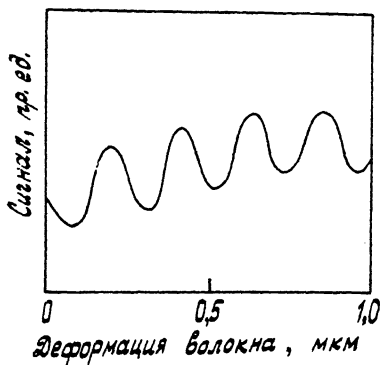


Рис. 2. Зависимость сигнала рефлектометра от деформации волокна.

Эксперимент

В лабораторном макете датчика мы использовали когерентный частотный рефлектометр [4] на длине волны 0.63 мкм и одномодовое волокно длиной 30 м. Выделение "точки" воздействия было осуществлено с помощью перестраиваемого узкополосного фильтра с полной шириной на полувысоте максимума 1.5 кГц. Согласно шкале соответствия между частотой и расстоянием $1\text{ м} \approx 300\text{ Гц}$, разрешение рефлектометра составляло 5 м, что намного меньше, чем длина когерентности He-Ne лазера.

Для того чтобы имитировать сигнал возмущения, мы использовали два пьезокерамических модулятора, причем расстояние от переднего торца волокна до "точки" приложения первого модулятора составляло 10 м, а до второго модулятора 20 м. Когда на первый модулятор подавали "пилообразное" напряжение и узкополосный фильтр был настроен на частоту 15 кГц, мы получили периодически модулированный выходной сигнал фильтра (см. рис. 2).

Для того чтобы выделить спектральную компоненту K_{Ω} , мы использовали еще один узкополосный фильтр (30–100 Гц). В этом случае на модуляторы поочередно подавали сигналы на частоте $\frac{\Omega}{2\pi} = 70\text{ Гц}$ с амплитудой $\varphi_m = 0.5$ рад. В соответствии с теорией пространственное разрешение системы, определяемое зависимостью $K_{\Omega}(z)$, было порядка разрешения рефлектометра (см. рис. 3).

Заключение

Мы описали новый волоконно-оптический датчик, способный определить координаты слабых механических возмущений вдоль оптического волокна. В настоящее время разрабатывается система, использующая лазер на длине волны $\lambda = 1.15\text{ мкм}$ и волоконный контур километровой длины.

Работа частично поддержана премией фонда Сороса, присужденной Американским физическим обществом.

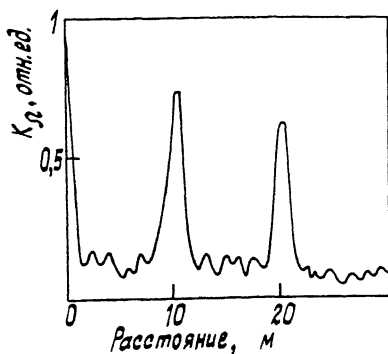


Рис. 3. Спектральная компонента $K_{\Omega}(z)$ сигнала рефлектометра для двух "точек" возмущения.

Список литературы

- [1] *Culshaw B., Dakin J.* Optical fiber sensors: systems and applications. V. 2. Boston, Artech House, 1989.
- [2] *Leung C., Huang C., Chang I.* // SPIE. 1987. V. 838. P. 365-371.
- [3] *Healey P.* // J. Lightwave Tech. 1985. V. 3. P. 876-886.
- [4] *Козел С.М., Листвин В.Н., Шаталин С.В., Юшкайтис Р.* // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 172-173.

Институт радиотехники
и электроники РАН
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию
5 марта 1993 г.