

07; 08

© 1992

АКУСТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

М.П. Петров, А.А. Фотиади

В последнее время большой интерес вызывают волоконно-оптические датчики с распределенными параметрами [1]. Разработаны конструкции таких датчиков для определения пространственных распределений в среде некоторых физических величин (например, давления). Применение принципа распределенного воздействия в акустических ВОД позволяет совместить в чувствительном волокне функции приема сигнала и его пространственного спектрального анализа. Это дает возможность построить приемник, чувствительный лишь к определенным пространственно-временным компонентам акустического поля, т.е. обладающий собственной диаграммой направленности. Известна конструкция такого приемника, работающего на поляризационном механизме [2]. В настоящей статье рассмотрена модель датчика фазового типа, основанного на использовании волокон с заданным распределением по длине коэффициента чувствительности к акустическому давлению $\chi(z)$.

Принцип действия ВОД акустического поля фазового типа основан на линейном изменении оптического пути света в волокне под действием акустического давления. С учетом заданного распределения по длине волокна коэффициента чувствительности $\chi(z)$ и заданного расположения волокна в пространстве выражение для выходного сигнала датчика $\Delta\varphi(t)$ (разность фаз света на входе и выходе волокна) может быть записано следующим образом:

$$\Delta\varphi(t) = \int_{\mathcal{L}} p(\vec{r}, t) \chi(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (1)$$

где интеграл берется по кривой \mathcal{L} , совпадающей с осью волокна, $p(\vec{r}, t)$ — акустическое поле.

При распределенном характере воздействия акустического поля на волокно, когда протяженность области расположения волокна превышает длину акустической волны λ , различные пространственно-временные компоненты поля с разным весом участвуют в формировании выходного сигнала (1) и в этом смысле датчик обладает собственной диаграммой направленности.

Выражение (1), позволяет целенаправленно формировать диаграмму направленности фазового акустического приемника как за счет выбора геометрии расположения оптического волокна в пространстве

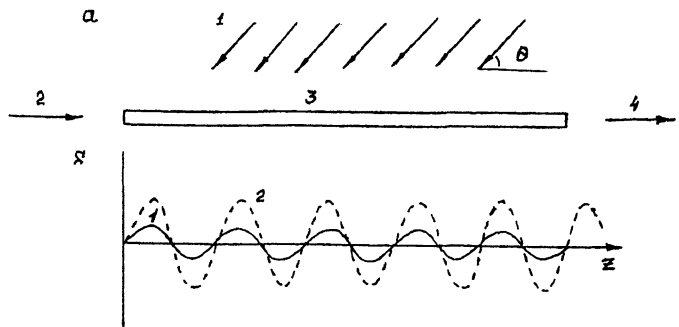


Рис. 1. Акустический датчик на основе оптического волокна с распределенными параметрами. а) 1 - акустическое поле, 2 - когерентное излучение, 3 - оптическое волокно, 4 - нижнее излучение, подаваемое на фазоанализатор для регистрации $\Delta\varphi(t)$; б) распределение вдоль волокна коэффициента чувствительности к акустическому давлению (1) и компоненты акустического поля в момент максимума сигнала (2).

(выбора кривой \mathcal{L}) [3], так и за счет выбора волокна с нужным распределением $x(z)$.

Рассмотрим в качестве примера распределенный датчик селективно настроенный на прием отдельных плоских волновых компонент акустического поля (рис. 1). Пусть оптическое волокно датчика вытянуто в прямую линию и имеет собственное распределение коэффициента чувствительности $x(z)$, аппроксимируемое выражением:

$$x(z) = x_1 \cos(\nu z + \varphi_0), \quad (2)$$

где ν - заданная пространственная частота, x_1, φ_0 - параметры аппроксимации. Тогда выходной сигнал датчика представляет собой ν -компоненту пространственного преобразования Фурье по координате z :

$$\Delta\varphi(t) = x_1 \int_0^L p(z, t) \cos(\nu z + \varphi_0) dz, \quad (3)$$

где L - длина волокна. Следовательно, сам датчик регистрирует лишь те плоские компоненты поля, которые имеют проекцию волнового вектора на ось z , равную $\pm \nu$:

$$k_{||}^0 = |\vec{k}| \cos \theta_0 = \pm \nu. \quad (4)$$

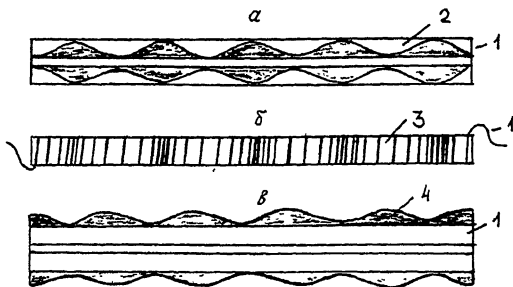


Рис. 2. Варианты устройства оптических волокон, с распределенными параметрами. 1 - оптическое волокно, 2 - оболочка волокна, 3 - эластичная основа, 4 - защитная оболочка, снижающая воздействие акустического поля.

Пусть $A_{\omega}^{k_{||}}$ - амплитуда плоской компоненты поля с частотой ω и проекцией волнового вектора на ось $k_{||}$, а U_{ω} - величина ω - гармоника сигнала. Тогда, из (4) для U_{ω} имеем

$$U_{\omega} = A_{\omega}^{k_{||}} \cdot \frac{x_1 L}{2} \frac{\sin(|k_{||}| - \nu)L}{(|k_{||}| - \nu)L}, \quad (5)$$

где $k_{||} = |\vec{k}| \cos \theta$, θ - угол падения плоской волны на Z .

Выражение (5) описывает диаграмму направленности распределенного датчика. Она симметрична относительно оси волокна и в диапазоне углов $-\pi < \theta < \pi$ имеет два основных лепестка, соответствующих направлениям $\pm \theta_0$ (5). Ширина лепестка $\delta\theta \sim \frac{\lambda}{L}$. Пиковая чувствительность датчика $\frac{x_2 L}{2}$. Таким образом, по ширине лепестка и чувствительности распределенный датчик эквивалентен традиционной линейной акустической антенне, состоящей из N_1 дискретных датчиков, той же длины и чувствительностью отдельного элемента $\mu = \frac{x_1 L}{2N_1}$. Однако, в отличие от линейной антенны, датчик не имеет дополнительных лепестков диаграммы направленности, связанных с дискретностью расположения элементов (у антенны $\sim \frac{L}{\lambda N_1}$ таких лепестков). Поэтому, при прочих равных условиях, соотношение сигнал/шум у распределенного датчика в высокочастотной области выше, чем у линейной антенны.

В реальных условиях, характеристики датчика могут ухудшаться из-за внешних воздействий, приводящих к изгибам волокна и к другим отклонениям его геометрии от прямой линии. Анализ показывает, что такое влияние незначительно, лишь в случае малых отклонений отдельных участков волокна на угол $\delta\varphi \lesssim \frac{\lambda}{L}$. При больших

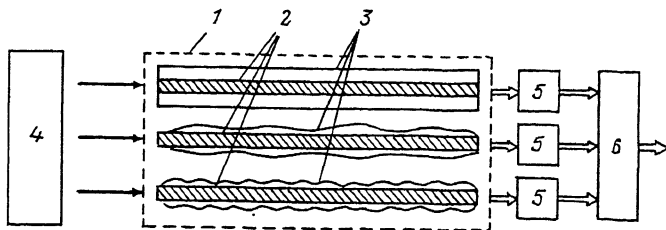


Рис. 3. Блок-схема акустической антенны. 1 – оптический кабель, 2 – оптические волокна с разным строением оболочки (3), 4 – лазер, 5 – фазовый детектор с спектроанализатор, 6 – процессор.

значениях этого параметра происходит уширение основного лепестка диаграммы направленности и пропорциональное этому снижению пиковой чувствительности. Таким образом, спектральный диапазон датчика ограничивается со стороны верхних частот.

Конкретные параметры датчика можно оценить, если сделать определенные предположения об устройстве распределенных волокон. На рис. 2 представлены наиболее реальные на наш взгляд способы создания распределения $\mathcal{X}(z)$ в оптическом волокне: путем нанесения на однородное волокно неоднородной по составу и толщине оболочки, обеспечивающей заданное распределение (рис. 2, а); путем неравномерного наматывания волокна на упругую основу (рис. 2, б); путем нанесения на волокно неоднородных защитных слоев, снижающих воздействие акустического поля на заданные участки волокна (рис. 2, в).

Из трех перечисленных способов наиболее предпочтителен для использования первый, поскольку он единственный может обеспечить распределение (2) с нулевой средней. Однако любой из них позволяет создавать неравномерность распределения $\mathcal{X}(z)$ с амплитудой не менее чем $\mathcal{A}\mathcal{E}_y \sim 10^{-2}$ рад/Па·м. Таким образом, пиковая чувствительность распределенного датчика может быть близка к чувствительности традиционного фазового ВОД той же длины.

На рис. 3 представлена блок-схема акустической антенны, которая может быть создана на основе распределенных волоконных датчиков. Оптический кабель 1 состоит из N волокон, каждый из которых имеет собственное распределение коэффициента чувствительности (2) с заданным параметром $\mathcal{V} = \mathcal{V}_i$ (i – номер световода). Таким образом, каждый световод в кабеле настроен на прием собственных плоских волновых компонент поля. В кабель 1 подается когерентный свет от источника 4. В блоке 5 регистрируется выходной сигнал $\Delta\varphi_i(t)$ в каждой из световодов и производится его спектральный временной анализ. Вычислительное устройство 6 по набору гармоник ω определяет в соответствии с (5) амплитуды плоских компонент поля A^{k_i} из N направлений. Существен-

но то, что в отличии от линейной антенны, где число независимых приемников N_A фиксировано и определяется ее спектральной полосой, число датчиков в антенне с распределенными волокнами может быть равно требуемому числу направлений N . Поэтому в задачах, где это число не велико $N < N_A$, конструкция распределенной антенны значительно проще, чем эквивалентной линейной, т.к. содержит соответственно меньшее число каналов, устройств детектирования и обработки сигналов. Важным эксплуатационным преимуществом распределенной антенны является возможность ее конструктивного выполнения в виде кабеля. Это делает удобным ее транспортировку, повышает оперативность развертывания.

Волокна с распределенными параметрами представляют собой новый, еще не опробованный на практике класс волоконных чувствительных элементов. Их применение в ВОД позволяет создавать селективные приемники и антенные комплексы для регистрации плоских, сферических акустических волн, а также волновых фронтов более сложных конфигураций.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] R o g e r s A.J. // Physics Reports (Review Section of Physics Letters). 1988. V. 169. N 2. P. 99-143.
- [2] R a s h l e i g h t S.C., T a y l o r H.F. // Electronics Letters. 1981. V. 17. N 3.
- [3] Л я м ш е в А.М., С м и р н о в Ю.Ю. // Акустический журнал. 1983. Т. 29. № 3. С. 289-308.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию
2 июня 1992 г.