

УДК 621.373.826 621.396

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ю. Н. Кульчин, В. Ф. Обух

В работе проведено исследование двух конструкций датчиков гидростатического давления, созданных на основе многомодовых оптических волокон. Описана схема обработки оптического сигнала. Исследована зависимость чувствительности датчиков от длины волоконного световода и диаметра защитного чехла.

В настоящее время волоконные световоды нашли широкое применение в телеметрических устройствах как для передачи данных, так и для создания датчиков физических величин [1-3]. Одними из наиболее чувствительных являются датчики интерференционного типа, которые могут быть построены с опорным и без опорного волокна. В последнем случае в качестве опорной волны используется одна из мод оптического волокна (ОВ). Такого рода датчики имеют более простую конструкцию и удобны на практике [1, 4].

В работе [4] приведены данные по изучению одноволоконного датчика. Однако в ОВ возбуждались и наблюдались на выходе предположительно две моды. Такое условие чрезвычайно трудно осуществить, так как рассеяние на неоднородностях многомодового ОВ приводит к перераспределению мощности, введенной в волоконный световод, по всему спектру мод.

В связи с этим в настоящей работе проведено исследование интерференционного датчика гидростатического давления, изготовленного на многомодовом волоконном световоде, в котором одновременно возбуждается широкий спектр мод, а также проведен анализ схемы обработки оптического сигнала.

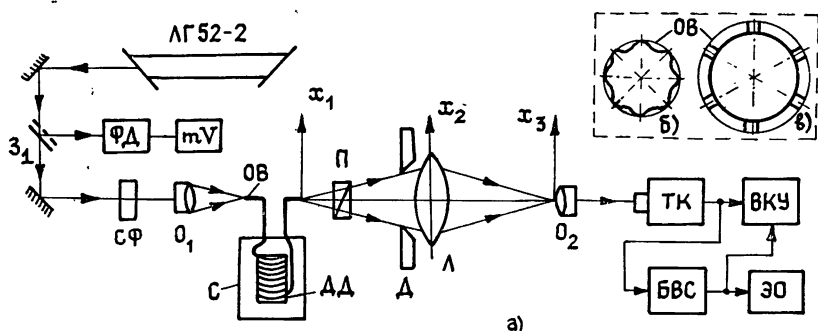


Рис. 1.

Принципиальная схема обработки сигнала и конструкции датчика приведены на рис. 1. На выходе из ОВ наблюдается интерференция когерентных световых волн, излучаемых каждой модой в отдельности. При размещении чувствительного элемента (ЧЭ) датчика в области меняющегося гидростатического давления каждая мода ОВ получит

дополнительный фазовый сдвиг, вызванный изменением длины волоконного световода и константы распространения мод $[\text{I}^{-4}]$:

$$\Delta\Phi_m = \beta_m \Delta L + L \Delta\beta_m, \quad (1)$$

где m — индекс моды, β_m — константа распространения моды $[\text{I}^1]$, L — длина волоконного световода.

Изменение фаз мод приводит к изменению картины интерференции. Так как в формировании интерференционной картины участвует большое число мод ОВ, то закон ее изменения от величины давления имеет сложный вид. В результате требуется проведение специальной обработки сигнала на выходе ОВ.

Для обработки была использована установка, схема которой приведена на рис. 1а. Излучение от He-Ne-лазера ЛГ52-2 ($\lambda = 0,63$ мкм) частично отводится полупрозрачным зеркалом (Z_1) на узел контроля, который состоит из фотодиода ($\Phi\text{Д}$) и милливольтметра (mV). Далее, после прохождения через корректирующий светофильтр ($C\Phi$) и микрообъектив (O_1), излучение вводится в оптическое волокно (ОВ), намотанное на датчик давления ($ДД$). Датчик располагается вблизи дна сосуда с водой (C), высоту столба жидкости в котором можно плавно изменять, тем самым меняя величину гидростатического давления на датчике. Выходящая из ОВ световая волна проходит через поляризатор (Π), который устраняет деполяризующее действие волоконного световода $[\text{I}^5]$, ирисовую диафрагму ($Д$) и собирается линзой ($Л$) в фокальной плоскости микрообъектива (O_2). Затем коллимированное излучение проецируется на мишень видикона телевизионной камеры ($ТК$), видеосигнал с которой поступает одновременно на видеоконтрольное устройство ($ВКУ$) и через блок выделения строки изображения ($ВВС$) на осциллограф (ЭО).

Рассмотрим работу оптической части схемы, ограничившись одномерным случаем. Оси координат x_1, x_2, x_3 связаны с плоскостью выходного торца ОВ плоскостью линзы ($Л$) и плоскостью наблюдения (фокальная плоскость микрообъектива O_2). При возбуждении в оптическом волокне всего спектра направляемых волн световая волна на выходе из ОВ будет состоять из суперпозиции волновых полей, возбуждаемых отдельными модами. Обозначим $U_m(x_1)$ — амплитудно-фазовое распределение для поля волны, возбуждаемой в открытом пространстве модой индекса m . Тогда поле суммарной волны на выходе из ОВ будет описываться выражением

$$U(x_1) = \sum_m U_m(x_1). \quad (2)$$

Амплитудно-фазовое распределение волны в плоскости наблюдения (x_3), согласно $[\text{I}^6]$, с точностью до постоянных коэффициентов запишется:

$$U(x_3) = \exp\left(\frac{i\pi x_3^2}{\lambda d_2}\right) \iint_{x_1, x_2} U(x_1) \exp\left(\frac{i\pi x_1^2}{\lambda d_1}\right) \times \\ \times \exp\left[-\frac{i\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{F} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) x_2^2\right] \exp\left[-\frac{i2\pi}{\lambda} \left(\frac{x_1}{d_1} + \frac{x_3}{d_2}\right) x_2\right] dx_1 dx_2, \quad (3)$$

где i — мнимая единица, λ — длина волны излучения, d_1, d_2 — расстояния от плоскостей (x_1) и (x_3) до плоскости (x_2), F — фокусное расстояние линзы.

Если плоскость наблюдения выбрать на расстоянии $d_2 = Fd_1/(d_1 - F)$ от собирающей линзы, то в (3) можно исключить экспоненциальный член, зависящий от x_2^2 . Поскольку на практике выполняется условие $x_1 \ll d_1$, а входной зрачок фокусирующей линзы, ограничиваемый диафрагмой ($Д$), имеет малый размер, можно воспользоваться параксиаль-

ным приближением [6] и упростить (3). Тогда распределение интенсивности в плоскости наблюдения (x_3) будет описываться выражением

$$I(x_3) = |U(x_3)|^2 = \left| \frac{\sin [(2\pi/\lambda) (x_3/d_2) D_2]}{(2\pi/\lambda) (x_3/d_2)} * \sum_m U_m(x_3) \right|^2, \quad (4)$$

где $*$ — операция свертки, D_2 — размер входного зрачка собирающей линзы (L).

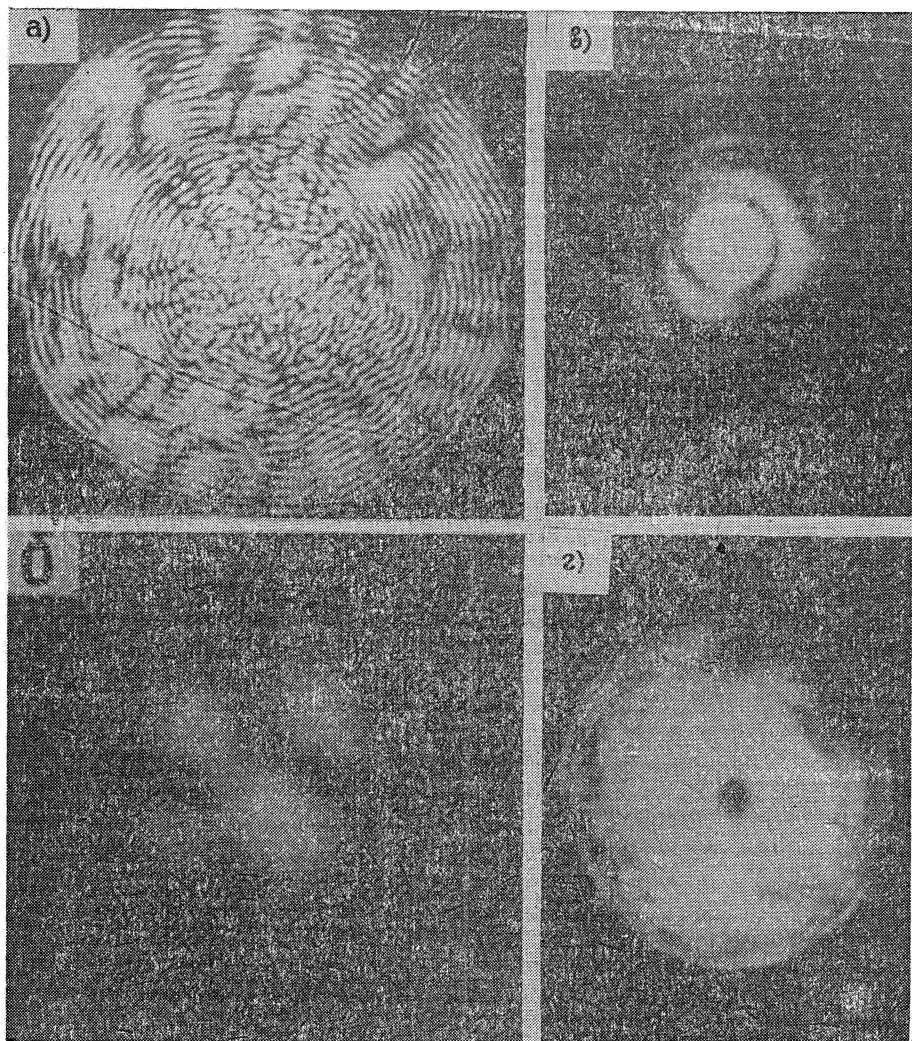


Рис. 2.

Как видно из (4), распределение интенсивности будет соответствовать распределению картины интерференции волн, излучаемых модами ОВ на выходе из волоконного световода, промодулированными полосами Юнга. Диафрагма (D), установленная непосредственно перед линзой (L), позволяет менять размер входного зрачка и, тем самым, производить фильтрацию вклада волн от различных мод ОВ в картину интерференции. На рис. 2а, б, в приведены фотографии, на которых показана зависимость вида картины интерференции от диаметра D_2 входного зрачка: $D_2=13,5; 2,8; 1,2$ мм при $d_1=16$ см и $F=5$ см. Сравнение полученных данных с результатами работ, в которых исследовалась интерференция конечного числа мод волокна [4, 7], подтверждает, что с уменьшением диаметра диафрагмы в формировании результирующей картины интерференции участвует ограниченное число

мод. Таким образом, уменьшая апертурный размер входного зрачка собирающей линзы, можно упростить интерференционную картину в плоскости наблюдения и, тем самым, обеспечить возможность обработки оптического сигнала. Для обработки сигнала с датчика давления выбиралась картина, фотография которой приведена на рис. 2в. Результаты эксперимента также показали, что существенное значение имеет выбор точки отсчета в интерференционной картине и положения плоскости наблюдения относительно линзы (Л). Как следует из (3), если плоскость x_3 смещена вдоль оси схемы на некоторое расстояние, отличное от $d_2 = Fd_1/(d_1 - F)$, то в выражении для поля $U(x_3)$ сохраняется фазовый множитель с квадратичной зависимостью от x_2 . В результате амплитуда световой волны будет иметь более сложный модуляционный член, который можно описать с помощью интегралов Френеля [8]. Распределение интенсивности волны $U(x_3)$ по плоскости (X_3) будет изменяться при смещении вдоль оси схемы, что может привести к неточности начального отсчета сигнала, а значит, к погрешности измерений. На рис. 2г представлена фотография, показывающая, как изменилось распределение интенсивности в плоскости (X_3) для сигнала, первоначально приведенного на рис. 2в, при смещении вдоль оси на расстояние в 7 мм. Как видно, смещение привело к появлению провала в центре наблюдаемой картины.

Дальнейшая обработка проводилась электронным способом. С этой целью интерференционная картина проецировалась на мишень видикона телевизионной камеры, электрический сигнал с которой поступал на видеоконтрольное устройство, что позволяло визуально контролировать настройку схемы, и на блок выделения строки изображения. Видеосигнал строки изображения исследовался на экране осциллографа. При этом изменение давления на ЧЭ датчика приводило к изменению интенсивности интерференционной картины в выделенной строке, а значит, к изменению амплитуды наблюдаемой осциллограммы.

В работе для создания датчиков давления использовались кварцевые оптические волокна со ступенчатым профилем распределения показателя преломления и защитным чехлом из полимерного материала, диаметр сердцевины и оболочки волокон 50 и 150 мкм. Диаметр защитного чехла у волокон типа I составлял 480 мкм, а у волокон типа II — 814 мкм. Чувствительный элемент датчика изготавливался таким образом, чтобы обеспечить преобладание вклада первого члена суммы (1) над вторым. С этой целью ОВ наматывалось на цилиндрические катушки с профилем сечения, показанным на рис. 1б, в. После нанесения световода на катушку датчик покрывался упругим резиновым покрытием и герметизировался. В результате под прикрытием находилась воздушная прослойка. При воздействии внешнего гидростатического давления волокно на катушке прогибается либо сжимается в промежутках между ребрами жесткости. В этом случае возникают большие аксиальные напряжения, приводящие к изменению длины ОВ, величина которого зависит от внешнего давления. Потери на излучение, вследствие деформации волокна, оказываются минимальными, так как радиус кривизны прогиба остается большим.

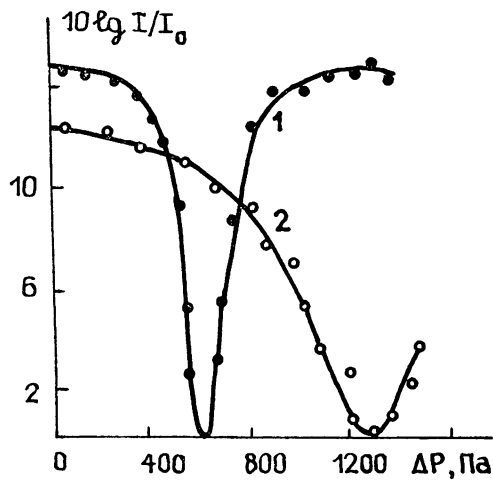


Рис. 3.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости величины изменения сигнала, снимаемого с выхода телевизионной камеры

($10 \lg I/I_0$, где I_0 — амплитуда минимального сигнала), от изменения давления на ЧЭ датчика (ΔP). В датчике использовалась катушка диаметром 31 мм с профилем сечения, приведенным на рис. 16. Намотка ОВ производилась сплошным слоем. Кривая 1 получена для ОВ типа I при длине волокна $L=2$ м. Кривая 2 приведена для ОВ типа II длиной $L=4,5$ м. Диаметр катушки и частота следования ребер жесткости выбирались таким образом, чтобы использовать упругие свойства ОВ на сжатие.

Диаграмма рис. 4 показывает зависимость изменения величины детектируемого сигнала от изменения гидростатического давления для датчика, выполненного на основе катушки с сечением рис. 1в. Диаметр катушки равен 65 мм. Кривые 1 и 2 получены для ОВ типа I с

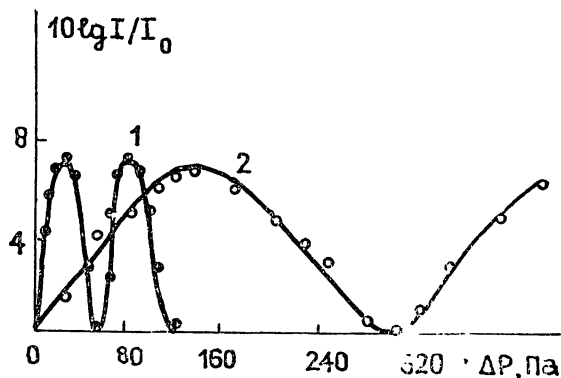


Рис. 4.

длинами $L=5,5$ и $2,7$ м. Такая конструкция датчика позволяла исследовать работу ОВ на растяжение.

Для количественного сравнения результатов определим чувствительность датчиков на единицу длины ОВ на ЧЭ по аналогии с работой [9]:

$$C = 10 \lg (I/I_0) / \Delta PL, \quad (5)$$

где ΔP — изменение давления на линейном участ-

ке экспериментальной зависимости, L — длина световода на чувствительном элементе.

Согласно соотношению (5) чувствительность датчиков, характерные зависимости для которых приведены на рис. 3, будет равна $C_1 = 3,2 \cdot 10^{-2}$ дБ·Па⁻¹·м⁻¹ и $C_2 = 4,2 \cdot 10^{-4}$ дБ·Па⁻¹·м⁻¹ (кривые 1 и 2 соответственно).

Чувствительность датчиков, изготовленных на основе катушки (рис. 1в), будет равна $C_3 = 5,5 \cdot 10^{-2}$ дБ·Па⁻¹·м⁻¹ и $C_4 = 2,3 \cdot 10^{-2}$ дБ·Па⁻¹·м⁻¹ соответственно для кривых 1 и 2 рис. 4.

Полученные результаты для C_1 и C_4 показывают, что чувствительность датчиков, оптическое волокно в которых работает в режиме аксиального сжатия, оказывается выше, несмотря на то, что длина ОВ в обоих случаях практически одинакова. По-видимому, этот результат обусловлен большей концентрацией давления по оси ОВ при его работе на сжатие из-за меньшего радиуса кривизны витков волокна.

Кроме того, сравнение C_1 и C_2 указывает на зависимость чувствительности датчиков от диаметра защитного чехла. Так, с уменьшением диаметра чехла в 1,7 раза чувствительность возрастает почти в 80 раз, что позволяет оптимизировать характеристики ЧЭ датчика выбором параметров оптического волокна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутусов М. М., Тарасюк Ю. Ф., Урванцева Н. Л. — Зарубежная радиоэлектроника, 1983, № 5, с. 38.
2. Балаев В. И., Мишин Е. В., Пятахин В. И. — Квантовая электроника, 1984, 11, № 1, с. 10.
3. Бусурин В. И., Семенов А. С., Удалов Н. П. — Квантовая электроника, 1985, 12, № 5, с. 901.
4. Lauton M. R., Viscago J. A. — Appl. Opt., 1970, 18, № 5, p. 666.
5. Быковский Ю. А., Кульчин Ю. Н., Смирнов В. Л. — Опт. и спектр., 1980, 48, № 1, с. 155.
6. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. — М.: Мир, 1970. — 364 с.
7. Капани Н. С. Волоконная оптика. — М.: Мир, 1969. — 464 с.

8 Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. — М.: Мир, 1971. — 495 с.

9. Ривлин Л. А., Семенов А. Т., Шелков Н. В. — Квантовая электроника, 1982, 9, № 9, с. 1836.

Дальневосточный политехнический институт

Поступила в редакцию
21 февраля 1985 г.

HYDROSTATIC PRESSURE MEASUREMENT WITH THE HELP OF MULTIMODE OPTICAL FIBRE

Yu. N. Kul'chin, V. F. Obukh

The investigation of two hydrostatic pressure designes manufactured on the basis of multimode optical fibres is carried out. The scheme of optical signal processing is described. The sensor sensivity as a function of the fibre length and protection cover diameter is studied.

Лукин Д. С., Цедилина Е. Е. Выход радиоволн из ионосферы каналов и определение коэффициента диффузии лучей по амплитудным записям сигналов ИСЗ.

В результате численного расчета трассы ИСЗ — приемник показано, что крупномасштабные флуктуации амплитуды сигнала корабля «Восток», полученные в августе 1962 г., связаны с выходом излучения из ионосферного канала при рассеянии его на неоднородностях. Путем сопоставления результатов теоретического расчета по выходу излучения из ионосферного канала при его многократном рассеянии на неоднородностях с экспериментальными записями амплитуды определен коэффициент диффузии лучей.

Успенский М. В., Валлинкоски М. К., Турунен Т. О возможности формирования двугорбого высотного профиля обратного аврорального рассеяния.

Показана возможность формирования высотных профилей видимости аврорального рассеяния с двумя разнесенными по высоте максимумами. Такая «двугорбость» профилей может наблюдаться на высоких частотах УКВ-диапазона, когда высотный градиент ионизации, характеризуемый градиентной длиной $L_N = N(\partial N/\partial z)^{-1}$, становится ниже некоторой пороговой величины. Дана количественная оценка такого градиента.

Волкомирская Л. Б., Горбунов С. А., Панфилов С. В., Резников А. Е. Волновые характеристики низкочастотных излучений, зарегистрированных на ИСЗ «Ореол-3».

По спектрам мощности компонент низкочастотных излучений найдены основные закономерности поведения векторов волновой нормали и функции распределения волн от частоты и от инвариантной широты L . Показано, что с увеличением параметра L увеличивается интервал частот, на котором справедливо плосковолновое приближение. Отмечается, что на частотах ниже гирочастоты протонов часто возникает второй максимум в функции распределения волн, который можно интерпретировать как отраженную волну.

Сорокин В. М. О роли ионосферы в распространении геомагнитных пульсаций.

Показано, что ионосферные токи, связанные с геомагнитными пульсациями, переносят из высоких в средние и низкие широты гиротропные волны в E -слое. Рассмотрена генерация этих волн магнитосферным источником. Найдена импульсная функция пульсаций на поверхности Земли.
