

УДК 621.315.2

Э. И. ЧЕРНЯКОВ, Г. Г. КАНАРИК, М. П. КУХТИН

**К РАСЧЕТУ ГРУППОВОЙ ЗАДЕРЖКИ И КОЭФФИЦИЕНТА
ДИСПЕРСИИ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОН**

При распространении сигнала в оптическом волокне каждая спектральная составляющая сигнала испытывает временную задержку. Групповая задержка и коэффициент дисперсии определяются параметрами среды и геометрической структурой волокон. Оба показателя характеризуют искажение сигнала в волокне.

Если не учитывать влияние материальной дисперсии, то групповая задержка и коэффициент дисперсии будут пропорциональны соответственно [1]:

$$\Pi_1 = B + V \frac{dB}{dV}; \quad (1)$$

$$\Pi_2 = V \frac{d^2(BV)}{dV^2}. \quad (2)$$

Для волокна с неограниченной оболочкой аналитические выражения для (1) и (2) могут быть найдены из характеристического уравне-

ения для HE-мод $V\sqrt{1-B}C_1 - \sqrt{B}C_2 = 0$ (3), где $C_1 = K_{m-1} \times \times (y) I_m(x)$; $C_2 = K_m(y) I_{m-1}(x)$; $y = V\sqrt{B}$; $x = V\sqrt{1-B}$. Дифференцируя (3) по V , получаем

$$\frac{dB}{dV} = \frac{A+C}{D + \frac{V}{2} \left(\frac{C}{1-B} - \frac{A}{B} \right)}. \quad (4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A &= Ba_1 I_{m-1}(x) - \sqrt{B(B-1)} a_2 I_m(x); \\ C &= (1-B) a_3 K_{m-1}(y) - \sqrt{B(B-1)} a_4 K_m(y); \\ D &= C_2/\sqrt{B} + C_1/\sqrt{1-B}. \end{aligned}$$

Соотношение (4) позволяет проанализировать влияние геометрии волокна на величину групповой задержки. Выражение для коэффициента дисперсии также может быть представлено в аналитической форме

$$V \frac{d^2(BV)}{dV^2} = V \left[2 \frac{dB}{dV} + V \frac{d^2B}{dV^2} \right], \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{d^2B}{dV^2} &= \frac{dB}{dV} \frac{1}{A+C} \left\{ \frac{dA}{dV} + \frac{dC}{dV} - \frac{dB}{dV} \left[\frac{dD}{dV} + \frac{1}{2} \left(\frac{C}{1-B} - \frac{A}{B} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{V}{2} \left(\frac{1}{1-B} \left(\frac{dC}{dV} - \frac{C}{1-B} \frac{dB}{dV} \right) - \frac{1}{B} \left(\frac{dA}{dV} - \frac{A}{B} \frac{dB}{dV} \right) \right) \right\}; \\ \frac{dA}{dV} &= \frac{1}{2} \left\{ (a_1 a_4 B - a_2 a_3 \sqrt{B(1-B)}) \left(\sqrt{1-B} - \frac{V}{2\sqrt{1-B}} \times \right. \right. \\ &\quad \times \left. \left. \frac{dB}{dV} \right) - [B I_{m-1}(x) (a_2 + b_3 - \sqrt{B(1-B)}) I_m(x) (a_1 + b_1)] \times \right. \\ &\quad \times \left[\sqrt{B} + \frac{V}{2\sqrt{B}} \frac{dB}{dV} \right] + 2 I_{m-1}(x) a_1 \frac{dB}{dV} - I_m(x) a_2 \frac{1-2B}{\sqrt{B(1-B)}} \frac{dB}{dV} \Big\}; \\ \frac{dC}{dV} &= \frac{1}{2} \left\{ [\sqrt{B(1-B)} a_1 a_4 - (1-B) a_2 a_3] \left(\sqrt{B} + \frac{V}{2\sqrt{B}} \frac{dB}{dV} \right) + \right. \\ &\quad + K_{m-1}(y) (1-B) (a_4 + b_4) + K_m(y) \sqrt{B(1-B)} (a_3 + b_3) \times \\ &\quad \times \left(\sqrt{1-B} - \frac{V}{2\sqrt{1-B}} \frac{dB}{dV} \right) - 2 K_{m-1}(y) a_3 \frac{dB}{dV} - K_m(y) b_4 \times \\ &\quad \times \left. \frac{1-2B}{\sqrt{B(1-B)}} \frac{dB}{dV} \right\}; \quad \frac{dD}{dV} = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{K_{m-1}(y)}{\sqrt{1-B}} a_3 + \frac{K_m(y)}{\sqrt{B}} b_4 \right] (1-B - \right. \\ &\quad \left. - \frac{V}{2\sqrt{1-B}} \frac{dB}{dV}) - \left(\frac{I_m(x)}{\sqrt{1-B}} a_2 + \frac{I_{m-1}(x)}{\sqrt{B}} a_1 \right) \left(\sqrt{B} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{V}{2\sqrt{B}} \frac{dB}{dV} \right) + \frac{C_1}{(1-B)^{3/2}} \frac{dB}{dV} - \frac{C_2}{B^{3/2}} \frac{dB}{dV} \right\}; \\ a_1 &= K_{m-1}(y) + K_{m+1}(y); \quad a_2 = K_m(y) + K_{m-2}(y); \\ a_3 &= I_{m-1}(x) + I_{m+1}(x); \quad a_4 = I_{m-2}(x) - I_m(x); \\ b_1 &= K_{m+1}(y) + K_{m-3}(y); \quad b_2 = K_m(y) + K_{m+2}(y); \\ b_3 &= I_{m-1}(x) - I_{m-3}(x); \quad b_4 = I_{m+2}(x) - I_m(x). \end{aligned}$$

Представляет интерес проанализировать зависимости Π_1 и Π_2 от радиуса сердцевины, длины волны и разности показателей преломления $\Delta = n_1 - n_2$ для HE_{11} -волн. Это связано с тем, что по известной величине материальной дисперсии (конкретный тип волокна) можно подобрать такой диапазон частот, когда искажения сигнала в одномодовом волокне будут минимальными.

Одномодовый диапазон передачи определяется из диаграммы, представленной на рис. 1. Сплошными линиями нанесены зависимости показателя преломления от длины волны для сред, обозначенных цифрами 1—3 в работе [2]. Пунктирными линиями показаны зависимости радиуса сердцевины от тех же параметров (n_1 и λ), при котором ограничивается ($V \cong 2,405$) одномодовый режим в волокне. Разность показателей преломления фиксирована двумя зна-

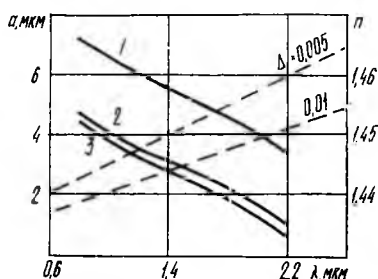


Рис. 1

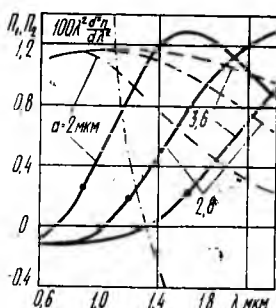


Рис. 2

чениями $\Delta = 0,005$ и $0,01$ для среды 1. Для других сред линии $a = f(\lambda)$ практически сливаются, поэтому они не показаны. Край одномодового режима определяется пересечением прямой $y = a$ с линией $a = f(\lambda)$ для $\Delta = \text{const}$. Слева от точки пересечения будет область многомодового режима, справа — одномодового. Например, для известных радиуса сердцевины $a = 3$ мкм и $\Delta = 0,005$ край одномодового режима определяется длиной волны $\lambda = 0,98$ мкм.

Получить оптические волокна с низким показателем преломления затруднительно, поэтому предпочтительным способом увеличения радиуса одномодового волокна является уменьшение разности показателей преломления сердцевины и оболочки.

На рис. 2 приведены зависимости Π_1 и Π_2 от длины волны для $\Delta = 0,01$ и различных значений радиуса сердцевины. Для сравнения вкладов, вносимых средой (материальная дисперсия) и линией передачи (волноводная дисперсия) штрихпунктирной линией нанесена кривая, определяющая вклад от материальной дисперсии [2]. Точками отмечен край одномодового режима.

У края одномодового режима групповая задержка максимальна, причем с увеличением радиуса сердцевины расширяется диапазон длин волн, в котором Π_1 имеет высокие значения. Такой характер изменения групповой задержки объясняется локализацией поля в сердцевине.

Коэффициент дисперсии — величина, которая характеризует скорость изменения групповой задержки. Из рис. 2, видно, что Π_2 в зависимости от λ имеет максимум, значение и положение которого определяются размерами радиуса сердцевины и разностью показателей преломления Δ . Анализ показывает, что параметрами линии передачи можно не только уменьшить коэффициент дисперсии, но и компенсировать вклад материальной дисперсии. Это возможно потому, что материальная и волноводная дисперсии принимают в определенном диапазоне длин волн противоположные по знаку значения. Причем нулевая дисперсия достигается как при малых значениях радиуса сердцевины, так и при больших. В случае малых радиусов она сдвигается в длинноволновую часть диапазона, а в волокнах с большими радиусами — в коротковолновую, что позволяет использовать одномодовые волокна в широкополосных системах связи с малыми значениями дисперсии.

Список литературы: 1. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М., 1980. 656 с. 2. Передача информации по одномодовым световодам с компенсированной дисперсией первого и второго порядков / А. С. Беланов, Е. М. Дианов, В. И. Кривенков, А. С. Курилов // Электросвязь. 1985. № 12. С. 24—28.

Поступила в редколлегию 12.08.87