

# 薄包层啾啾长周期光纤光栅的色散补偿

顾铮先<sup>1</sup> 蒋秀丽<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 上海理工大学光电功能薄膜实验室, 上海, 200093; <sup>2</sup> 上海电力学院数理系, 上海 200090)

**摘要** 为了提高啾啾长周期光纤光栅(LPFG)光纤通信的色散补偿能力,提出了利用薄包层啾啾 LPFG 进行色散补偿的方法。首先介绍了根据传输信号确定啾啾 LPFG 的啾啾系数、光栅长度等参数的方法。然后利用上述方法设计了对光纤中传输的中心波长为 1550 nm,带宽为 0.2 nm 的信号进行色散补偿的薄包层啾啾 LPFG。利用耦合模理论及传输矩阵法计算了约 1 m 长的此种啾啾 LPFG 的色散,结果表明可以补偿该光信号通过 46 km 光纤所产生的色散。进一步分析了切趾函数、啾啾系数、交叉耦合系数等参数对薄包层啾啾 LPFG 色散的影响。

**关键词** 光纤光学; 色散补偿; 薄包层啾啾长周期光纤光栅; 啾啾系数

**中图分类号** TP929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0879

## Dispersion Compensation of Thin-Clad Chirped Long-Period Fiber Grating

Gu Zhengtian<sup>1</sup> Jiang Xiuli<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Photo-Electric Functional Films, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China  
<sup>2</sup>Department of Math and Physics, Shanghai Institute of Electric Power, Shanghai 200090, China

**Abstract** To improve dispersion compensation capabilities of chirped long-period fiber grating (LPFG) for fiber communication, the method using thin-clad chirped LPFG is proposed. At first, we analyze how to determine parameters of chirped LPFG according to the transmission signal, such as chirp coefficient and grating length. Then, to compensate dispersion of a signal with bandwidth of 0.2 nm and center wavelength of 1550 nm, the thin-clad chirped LPFG with appropriate parameters is designed. Based on coupled-mode theory and transfer matrix, numerical results show that about 1 m of such thin-clad chirped LPFG can compensate 46 km fiber's dispersion. Further, the influence of apodizing function, chirp coefficient and cross-coupling coefficient on the dispersion of thin-clad chirped LPFG is also analyzed.

**Key words** fiber optics; dispersion compensation; thin-clad chirped long-period fiber grating; chirp coefficient

## 1 引 言

色散和损耗是光纤通信的主要影响因素。由于掺铒光纤放大器的应用基本解决了损耗问题,因此开始色散补偿研究成为光纤通信领域的热点。目前人们已提出多种色散补偿方案,如采用色散补偿光纤<sup>[1,2]</sup>、啾啾布喇格光纤光栅(Fiber Bragg grating, FBG)<sup>[3,4]</sup>等。其中色散补偿光纤与标准单模通信光纤有相反的色散系数,与通信光纤串连可实现色散补偿,但其色散系数低同时会引入较大的损耗。而在光纤中接入啾啾 FBG,不同频率的光在啾啾 FBG 的不同位置反射,从而具有不同的时延,可补

偿光纤的色散。但 FBG 是反射型器件,需要再加入其他器件如环形器才能实现光的前向传输,增加了系统复杂性,不利于封装且成本高。Stegall 等<sup>[5]</sup>提出了利用透射型的啾啾长周期光纤光栅(LPFG)进行色散补偿的方法<sup>[5]</sup>,相比使用啾啾 FBG,系统装置更简单。啾啾 LPFG 色散补偿的原理与啾啾 FBG 相似,不同波长的光在光栅不同位置耦合到包层模,包层模与芯模折射率不同,从而具有不同的时延。其色散正比于纤芯基模与包层模的有效折射率差。本文提出利用薄包层啾啾 LPFG,可提高包层模与芯模的折射率差,从而提高啾啾 LPFG 的色

收稿日期: 2008-09-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研项目(07ZZ87)和上海市重点学科建设项目(T0501)资助课题。

作者简介: 顾铮先(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜和光纤传感器等方面的研究。E-mail: zhengtiangu@163.com

散。首先阐述了啁啾 LPFG 的色散补偿原理;然后分析了光纤包层直径对包层模与芯模折射率差的影响;讨论了针对光纤中传输的信号,设计薄包层啁啾 LPFG 各参数的方法;最后数值分析了切趾函数、啁啾系数、交叉耦合系数等参数对薄包层啁啾 LPFG 色散性能的影响。

## 2 啁啾长周期光纤光栅色散补偿原理

光纤通信中的色散是指不同波长的光在光纤中传输时的群速度不同,从发射端到接收端所用时间不同,从而引起光信号展宽的现象。光信号在光纤中传播单位距离的时间称为群时延  $\tau$ ,单位波长间隔的光在光纤中传播单位距离所产生的群时延差定义为光纤的色散系数  $D$ ,根据定义有: $D = d\tau/d\lambda$ 。

光信号通过啁啾长周期光纤光栅也会产生色散现象。长周期光纤光栅,当满足相位条件,  $(n_{co} - n_{cl}^m)\Delta = \lambda$  时,将发生包层模与芯模的耦合,  $n_{co}$  为芯模的有效折射率,  $n_{cl}^m$  为  $m$  阶包层模的有效折射率,  $\Delta$  为折射率变化的周期。对于周期不均匀的啁啾长周期光纤光栅,不同波长的光在不同位置耦合到包层模。如图 1 所示,波长为  $\lambda$  的光在 A 处耦合到包层,经过  $dz$  的距离在 B 处,波长为  $\lambda + d\lambda$  的光耦合到包层,在此  $dz$  的距离中,  $\lambda$  在包层传播,而  $\lambda + d\lambda$  在芯层传播,由于芯模与包层模的折射率不同,导致  $\lambda$  与  $\lambda + d\lambda$  有不同的时延,其时延差  $dt = dz \times (n_{co} - n_{cl}^m)/c$ 。所引起的色散为

$$D_g = \frac{dt}{d\lambda} = \frac{dz \times (n_{co} - n_{cl}^m)/c}{d\lambda} = \frac{(n_{co} - n_{cl}^m)}{c \times (d\lambda/dz)} = \frac{(n_{co} - n_{cl}^m)}{c \times C_0}, \quad (1)$$

上式中  $c$  为光速。  $C_0 = d\lambda/dz$ , 称为啁啾系数,表示啁啾光纤光栅单位长度中耦合波长的变化量。

通常  $n_{co} > n_{cl}^m$ , 啁啾长周期光纤光栅啁啾系数为负时,其色散为负,与标准通信光纤的色散系数符号相反,故可以对光信号进行色散补偿。

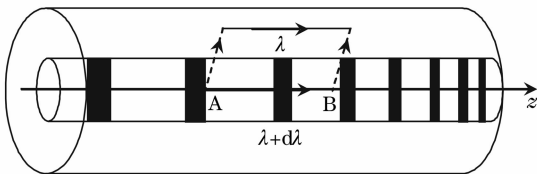


图 1 啁啾 LPFG 的模耦合示意图

Fig. 1 Diagram of mode coupling of chirped long-period fiber grating

## 3 传输矩阵法分析啁啾长周期光纤光栅的色散

光敏光纤置于光强空间变化的紫外光中曝光,可引起纤芯折射率的改变<sup>[6, 7]</sup>,光纤光栅纤芯折射率沿轴向的分布可表示为

$$n(z) = n_1 + \Delta n \left\{ 1 + v \cos \left[ \frac{2\pi z}{\Lambda(z)} + \phi(z) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$-\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}$$

式中  $n_1$  为曝光前纤芯的折射率,  $\Delta n$  为纤芯折射率的平均变化量,  $v$  为折射率变化的条纹可见度,  $L$  为光栅长度,  $\Lambda(z)$  为折射率变化的周期,  $\phi(z)$  为折射率变化的相位。

长周期光纤光栅会引起前向纤芯基模与同向包层模之间的耦合,根据耦合模理论,纤芯基模与第  $m$  阶包层模的耦合模方程为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dR}{dz} = i\sigma R(z) + ikS(z), \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\sigma S(z) + ikR(z), \quad (4)$$

式中:

$$R(z) = A_{co}(z) \exp[-i(\sigma_{11} + \sigma_{22})z/2] \times \exp[i(\delta z - \phi/2)],$$

$$S(z) = A_{cl}^m(z) \exp[-i(\sigma_{11} + \sigma_{22})z/2] \times \exp[i(-\delta z + \phi/2)],$$

$A_{co}$  与  $A_{cl}^m$  为纤芯基模与第  $m$  阶包层模的振幅。  $\delta$  为失谐量,

$$\delta = \frac{1}{2}(\beta_{co} - \beta_{cl}^m) - \frac{\pi}{\Lambda} = \frac{\pi}{\lambda}(n_{co} - n_{cl}^m) - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (5)$$

$\beta_{co}$  与  $\beta_{cl}^m$  分别为纤芯基模与第  $m$  阶包层模的传输常数。

$\sigma_{11}$  与  $\sigma_{22}$  分别为纤芯基模与第  $m$  阶包层模的自耦合系数:

$$\sigma_{11} = \frac{\omega n_1 \Delta n}{2} \iint_{\text{core}} e_1(x, y) \cdot e_1^*(x, y) dx dy,$$

$$\sigma_{22} = \frac{\omega n_1 \Delta n}{2} \iint_{\text{core}} e_2(x, y) \cdot e_2^*(x, y) dx dy,$$

$e_1(x, y)$  与  $e_2(x, y)$  分别为两模式的横向场分布函数<sup>[9]</sup>。

(3) 式、(4) 式中  $\sigma$  为总自耦合系数:

$$\sigma = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (6)$$

(3) 式、(4) 式中  $k$  为交叉耦合系数:

$$k = \frac{\omega n_1 \Delta n}{4} \iint_{\text{core}} e_1(x, y) \cdot e_2^*(x, y) dx dy. \quad (7)$$

非均匀的长周期光纤光栅,  $\sigma, k$  是位置  $z$  的函数, 耦合模方程(3)式、(4)式没有解析解。此时可采用传输矩阵法<sup>[8]</sup>, 将光栅分为  $M$  小段, 每一小段  $\Delta z$  内可近似认为是均匀光栅, 对第  $i$  段解耦合模方程

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cos(r\Delta z) + \frac{i\sigma}{r}\sin(r\Delta z) & \frac{ik}{r}\sin(r\Delta z) \\ \frac{ik}{r}\sin(r\Delta z) & \cos(r\Delta z) - \frac{i\sigma}{r}\sin(r\Delta z) \end{bmatrix} \quad [8]$$

称为从第  $i$  段到第  $i+1$  段的传输矩阵, 其中  $r = \sqrt{\sigma^2 + k^2}$ 。经过  $M$  段光栅后

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_i \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1 \cdot \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对啁啾长周期光纤光栅, (2)式中  $\Lambda(z)$  和  $\phi(z)$  都可以表征光栅的啁啾, 设  $\phi(z) = 0$ , 用  $\Lambda(z)$  表征光栅的啁啾。对于啁啾系数为  $C_0$  的线性啁啾长周期光纤光栅,  $\Lambda(z) = \Lambda_0$  时对应的耦合波长为  $\lambda_0$ ,  $\Lambda(z) = \Lambda$  对应的耦合波长为  $\lambda$ , 则

$$(n_{co} - n_{cl}^m)\Lambda = \lambda = \lambda_0 + C_0 z = \lambda_0 (1 + C_0 z/\lambda_0) = (n_{co} - n_{cl}^m)\Lambda_0 (1 + C_0 z/\lambda_0), \quad (10)$$

则(2)式中  $\phi(z) = 0, \Lambda(z) = \Lambda_0 (1 + C_0 z/\lambda_0)$  可表示啁啾系数为  $C_0$  的线性啁啾长周期光纤光栅, 其总自耦合系数随位置变化的函数为

$$\sigma(z) = \frac{\pi}{\lambda} (n_{co} - n_{cl}^m) - \frac{\pi}{\Lambda_0 (1 + C_0 z/\lambda_0)}. \quad (11)$$

对线性啁啾长周期光纤光栅, 设归一化入射光强  $R_0 = R(-L/2) = 1, S_0 = S(-L/2) = 0$ , 经过  $M$  个传输矩阵相乘, 可得  $S_M$ , 即  $S(L/2)$ 。  $S(L/2)$  可表示为  $S(L/2) = S \exp(i\theta)$ ,  $S^2$  即为包层模的透射率, 时延为<sup>[8]</sup>

$$\tau = \frac{d\theta}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda}, \quad (12)$$

色散为

$$D = d\tau/d\lambda. \quad (13)$$

## 4 色散补偿用薄包层啁啾 LPFG 的设计与分析

### 4.1 光纤参数与光栅参数的设计

#### 4.1.1 包层半径对啁啾 LPFG 色散的影响

啁啾 LPFG 的色散越大, 色散补偿效率越高。由(1)式可知, 增大  $n_{co} - n_{cl}^m$  (芯模与包层模的有效折射率差)是提高啁啾 LPFG 色散的途径之一。标准光纤中包层模式序数  $m$  越大芯模与包层模的有效

(3)式、(4)式, 得

$$\begin{bmatrix} R_{i+1} \\ S_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix}, \quad (8)$$

折射率差  $n_{co} - n_{cl}^m$  越大; 当包层模序数一定时, 发现减小光纤包层半径可增大  $n_{co} - n_{cl}^m$ 。标准光纤纤芯半径  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.4681$ , 包层折射率  $n_2 = 1.4628$ 。图 2 给出了波长为 1550 nm 时, 不同包层半径下此种光纤芯模与第 57 阶包层模的有效折射率差。从图中可看出, 包层半径越小, 芯模与包层模的有效折射率差越大。当包层半径为  $62.5 \mu\text{m}$  时, 芯模与第 57 阶包层模的有效折射率差为 0.049, 包层半径减小至  $42.5 \mu\text{m}$  时, 芯模与第 57 阶包层模的有效折射率差为 0.105, 约为前者的两倍。减小啁啾 LPFG 的包层半径, 可有效提高啁啾 LPFG 的色散。下文中将分析, 利用包层半径为  $42.5 \mu\text{m}$  薄包层啁啾 LPFG 对光纤通信中特定信号进行色散补偿时, 光栅长度、啁啾系数等参数的设计方法。

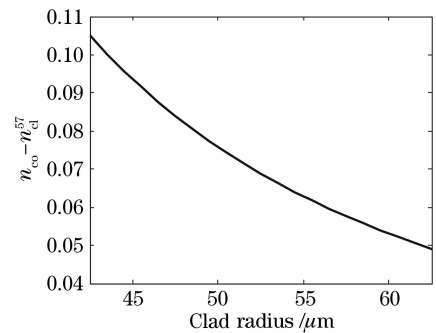


图 2 不同包层半径 1550 nm 波长的芯模与 57 阶包层模的有效折射率差

Fig. 2 Effective refractive-index difference between core mode and the 57th clad mode with different clad radius when the wavelength is 1550 nm

#### 4.1.2 光栅参数的设计

对在标准光纤中传输的中心波长为 1550 nm, 带宽为 0.2 nm 的光信号进行色散补偿, 由方程  $\lambda = (n_{co} - n_{cl}^m)\Lambda$  知, 波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时, 包层半径为  $42.5 \mu\text{m}$  的 LPFG, 芯模与 57 阶包层模耦合所对应的光栅周期应为  $14.8 \mu\text{m}$ 。

提高啁啾 LPFG 色散的另外一个途径是减小

啾啾系数  $C_0$  [参见(1)式], 线性啾啾光纤光栅  $C_0 = d\lambda/dz = L/\Delta\lambda$ , 若需对  $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$  的带宽进行色散补偿, 需要  $C_0 \times \Delta\lambda \leq L$ , 啾啾系数越小, 意味着所需的光栅长度越长, 不利于光栅的制作与封装。同时将芯模耦合到包层模, 需要耦合强度  $kL$  为  $\pi/2$  的奇数倍。综合上述原因, 啾啾 LPFG 设计中, 选择光栅长度  $L = 94 \text{ cm}$ ,  $C_0 = -2.5 \times 10^{-3} \text{ nm/cm}$ , 光栅的平均折变率  $\Delta n = 1 \times 10^{-4}$ , 耦合强度  $kL = 4.5\pi$ 。

#### 4.1.3 数值仿真

根据上述确定的光纤与光栅参数, 利用传输矩阵法对薄包层啾啾 LPFG 的色散进行数值分析, 第 57 阶包层模通过薄包层啾啾 LPFG 的传输谱、时延、色散分别如图 3 实线所示。图中可见反射谱存在振荡, 时延线性度差, 色散曲线不平坦。采用折射率切趾, 可在一定程度上消除上述问题, 即(2)式中,

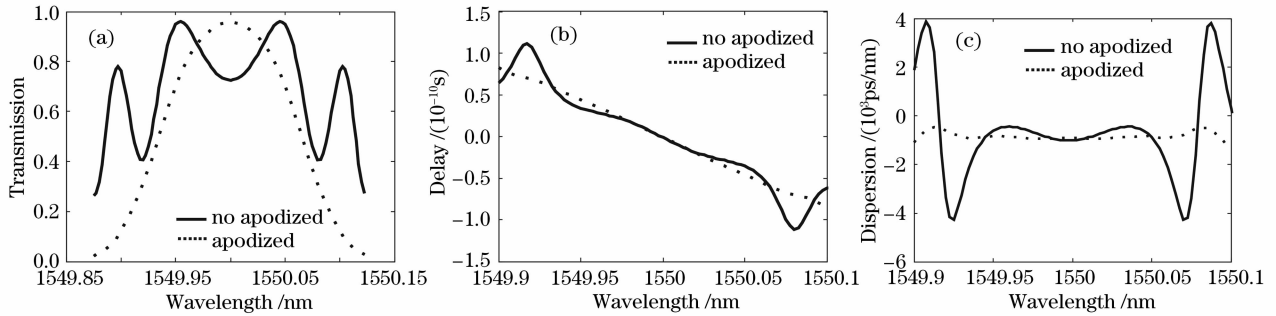


图 3 57th 阶包层模 (a) 传输谱; (b) 时延; (c) 色散

Fig. 3 Spectrum (a); delay (b); dispersion (c) of 57th clad mode

## 4.2 参数对薄包层啾啾 LPFG 色散补偿性能影响的分析

### 4.2.1 啾啾系数对薄包层啾啾 LPFG 色散的影响

在相同光栅长度下, 图 4 分别表示了不同啾啾系数对薄包层啾啾 LPFG 传输谱、时延色散的影响。图 4(a) 表明啾啾系数越大, 传输谱带宽越宽, 色散补偿的带宽相应越大。由于啾啾系数为  $-1 \times 10^{-3} \text{ nm/cm}$  时带宽较窄, 色散补偿的带宽不足

光栅折射率变化  $\Delta n$  是  $z$  的函数, 称为切趾函数。常用的切趾函数有高斯函数、升余弦函数等<sup>[10, 11]</sup>。图 3 虚线表示采用高斯切趾函数  $\Delta n(z) = \Delta n_0 \exp(-16z^2/L^2)$  后第 57 阶包层模通过啾啾 LPFG 的传输谱、时延、色散曲线。图 3(a) 中实线与虚线对比, 经过高斯切趾传输谱的振荡消失, 曲线变得光滑。图 3(b) 中实线与虚线对比, 经过高斯切趾后的时延线性度较好, 图 3(c) 中实线与虚线对比可发现, 经过高斯切趾后色散在  $0.2 \text{ nm}$  带宽中较为平坦。图 3(c) 虚线所示, 经过切趾后在以  $1550 \text{ nm}$  为中心的  $0.2 \text{ nm}$  带宽中色散曲线较平坦, 色散大小约为  $-920 \text{ ps/nm}$ 。通过  $1 \text{ km}$  标准通信光纤, 在  $1550 \text{ nm}$  波长附近信号的色散为  $+20 \text{ ps/nm}$ , 表明通过所设计的长为  $94 \text{ cm}$  的啾啾 LPFG 可以补偿  $46 \text{ km}$  标准通信光纤所产生的色散。

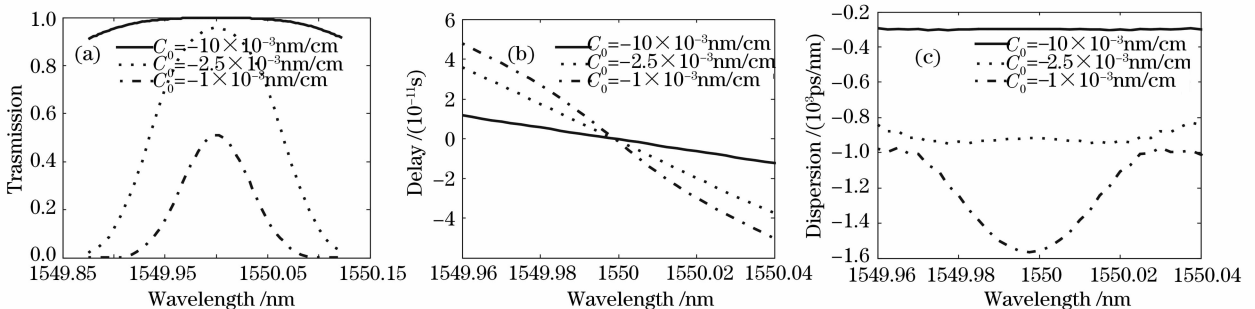


图 4 不同啾啾系数的 (a) 传输谱; (b) 时延; (c) 色散

Fig. 4 Transmission spectrum (a); delay (b); dispersion (c) with different chirp coefficients

散曲线不平坦。总之,相同的光栅长度,啁啾系数越小,色散补偿的带宽越小,色散绝对值越大。

#### 4.2.2 交叉耦合系数对薄包层啁啾 LPFG 色散的影响

在光纤光栅的长度相同,啁啾系数相同的情况下,改变平均折变率  $\Delta n_0$ ,可改变交叉耦合系数  $k$ 。同时为了将芯模全部耦合到包层模,耦合强度  $kL$  应为  $\pi/2$  的奇数倍,选择交叉耦合系数分别为  $12.5\pi/L$ 、 $7.5\pi/L$ 、 $4.5\pi/L$ ,数值分析交叉耦合系数对薄包层啁啾 LPFG 包层模传输谱、时延、色散的影响,如图 5 所示。图 5(a)为不同的交叉耦合系数薄包层啁啾 LPFG 包层模的传输谱,可知交叉耦合系

数越小,传输谱带宽略有减小。图 5(b)为交叉耦合系数不同时薄包层啁啾 LPFG 的时延,可知交叉耦合系数越大,时延的斜率越小。图 5(c)表示交叉耦合系数不同时薄包层啁啾 LPFG 的色散,当交叉耦合系数为  $12.5\pi/L$ 、 $7.5\pi/L$ 、 $4.5\pi/L$  时,中心波长处对应的色散值分别为  $-620$  ps/nm、 $-690$  ps/nm、 $-920$  ps/nm,交叉耦合系数越小,色散略增大。可见光栅的交叉耦合系数对啁啾 LPFG 的色散影响不明显。故在薄包层啁啾 LPFG 的实际设计中,在能够满足所要求的补偿带宽与耦合强度的条件下,可选取较小的光栅折变率。

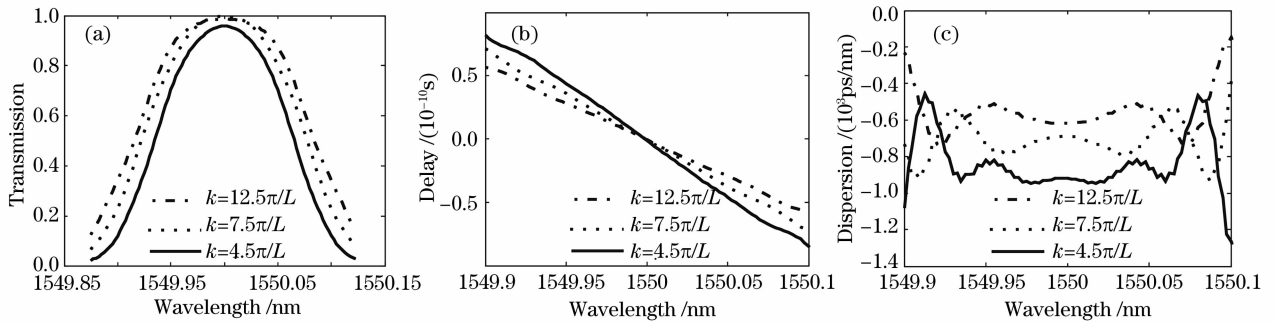


图 5 交叉耦合系数不同时的(a)传输谱;(b)时延;(c)色散

Fig. 5 Transmission spectrum (a); delay (b); dispersion (c) with different cross coupling coefficients

## 5 结 论

利用薄包层啁啾 LPFG,可提高芯模与包层模的有效折射率差,从而增大啁啾光纤光栅的色散。指出应根据需求确定薄包层啁啾 LPFG 参数,首先要根据所采用的通信波长及光纤参数确定包层模式序数及光栅周期,然后根据信号谱带宽度确定光栅的长度及啁啾系数,为了提高时延的线性度,增强色散的平坦性,还应选择恰当的切趾函数。若通信中心波长为  $1550$  nm,带宽  $0.2$  nm 的信号,根据所确定的啁啾长周期光纤光栅的参数,数值计算结果表明约  $1$  m 的该啁啾 LPFG 可以补偿  $46$  km 通信光纤产生的色散。利用传输矩阵法数值分析了切趾函数、啁啾系数、交叉耦合系数等参数对薄包层啁啾 LPFG 色散的影响。发现在光栅长度保持不变的情况下,色散与啁啾系数成反比,啁啾系数越小,色散越大,但色散补偿的带宽越小;光栅平均折变率越小,交叉耦合系数相应越小,色散略有增大。

## 参 考 文 献

1 A. M. Vengsarkar, W. A. Reed. Dispersion-compensating single-mode fibers; efficient designs for first and second order

compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 924~926  
 2 S. B. Alleston, P. Harper. 40 Gb/s single channel dispersion managed pulse propagation in standard fiber over 509 km[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(1): 57~59  
 3 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~849  
 4 S. Thibault, J. Lauzon, J. Cliche. Numerical analysis of the optimal length and profile of a linearly chirped fiber Bragg grating for dispersion compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 647~649  
 5 D. B. Stegall, T. Erdogan. Dispersion control with use of long-period fiber gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(2): 304~312  
 6 K. O. Kill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguide; application to reflecting filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649  
 7 K. O. Hill. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~1037  
 8 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294  
 9 D. Marcuse. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*[M]. New York: Academic, 1991  
 10 Huang Wen, Han Yishi, He Sailing. A study on the optimal apertization function for a fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(12): 1247~1251  
 黄雯,韩一石,何赛灵. 光纤光栅最佳切趾函数的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(12): 1247~1251  
 11 L. Poladian. Understanding profile-induced group-delay ripple in Bragg gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(12): 1920~1923