

文章编号: 0258-7025(2005)05-0668-05

# 偏振模色散和时延抖动对啾啾光纤光栅色散补偿特性的影响

刘 峰, 叶 青, 周赢武, 李 琳, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 对存在偏振模色散(PMD)和群时延(GD)抖动的非理想线性啾啾光纤光栅的色散补偿特性进行了研究。实验测量了啾啾光纤光栅的群时延谱和偏振模色散光谱,理论分析和实验测量表明,啾啾光纤光栅差分群时延(DGD)抖动与其时延抖动密切相关。通过数值模拟方法,计算了线性啾啾光纤光栅偏振模色散眼图代价与入射到啾啾光纤光栅色散补偿器的光信号的偏振方向的关系,计算结果表明在使用啾啾光纤光栅色散补偿器时应对其光信号的偏振方向进行调整,以获得最佳补偿效果。另外结合实验数据,模拟计算并讨论了非理想线性啾啾光纤光栅群时延抖动和偏振模色散引起的信号的展宽和脉冲形状的劣化。

**关键词** 光通信; 偏振模色散; 色散补偿; 啾啾光纤光栅

**中图分类号** O436.3; TN929.11 **文献标识码** A

## Influence of Polarization Mode Dispersion and Group Time Delay Ripple on Dispersion Compensation by Chirped Fiber Grating

LIU Feng, YE Qing, ZHOU Yin-wu, LI Lin, QU Rong-hui, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Influence of polarization mode dispersion (PMD) and group time delay ripple of the chirped fiber grating on dispersion compensation were investigated in this paper. It is shown experimentally that ripple of polarization-dependent differential group delay (DGD) has very similar variation behavior with the ripple of group delay (GD) in their spectra, though the former amplitude is about 40 times higher than the later. The minimum period of the ripples was measured to be 0.024 nm. A simplified theory is proposed to explain the similarity qualitatively. Simulations show that PMD and DGD ripples bring harmful influence to the dispersion compensation using the chirped fiber grating in high-speed optical transmission system. The relation between the incident polarization direction to the principal states of polarization (PSP) and the power penalty was calculated both by an approximate formula and numerical simulation. Simulations on eye patterns show that PMD of the linear chirped fiber Bragg grating (FBG) lowers the effectiveness of its dispersion compensation and worsens the performances of the communication in longer transmission length.

**Key words** optical communication; polarization mode dispersion; dispersion compensation; chirped fiber gratings

## 1 引 言

随着高速大容量光通信的发展,如何使通信速率和距离不断提高一直是科学工作者不断追求的目标。单信道容量的不断提升和密集波分复用(DWDM)技术的成熟,使光纤色散逐渐成为光通信系统升级的瓶颈。因此,近年来各种色散补偿技术和器件的发展,引起了国内外的广泛关注<sup>[1~3]</sup>。与

色散补偿光纤<sup>[2]</sup>、预啾啾<sup>[3]</sup>等方法相比,啾啾光纤光栅由于其具有色散补偿量大、插入损耗小、成本低廉、控制灵活等诸多优点,表现出了许多优于其他补偿方法的特性,被认为在下一代高速密集波分复用系统的色散补偿应用中具有非常良好的前景<sup>[4]</sup>。但是,由于光纤光栅在结构设计和制作工艺上可能存在的不完善性,会使其群时延(GD)光谱曲线上出

收稿日期: 2004-04-28; 收到修改稿日期: 2004-07-19

作者简介: 刘 峰(1978—),男,河北人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光通信及光纤器件方面的研究。E-mail: liufeng@siom.ac.cn

现一种周期性抖动。如:紫外写入的光纤光栅的边缘,存在着与相邻的光纤之间的平均有效折射率差。所引起的菲涅耳反射虽然很小,但是引起了光纤光栅群时延谱的抖动。人们用“变迹”制作工艺来改善这一现象。另外,激光光束的不均匀性、相位掩膜版的不完善性,也是群时延抖动的一个重要来源。研究表明,这种时延抖动会对啾啾光纤光栅的色散补偿效果造成不利的影[5,6]。随着偏振模色散(PMD)研究的深入,光纤光栅的偏振模色散也引起了重视。虽然光纤光栅本身由于各种原因引入的双折射效应很小,但其具有很大的色散系数,因而线性啾啾光纤光栅中偏振模色散的影响不可忽略。偏振模色散对光栅色散补偿性能的影响也应当予以考虑[5,7]。由于光纤光栅群时延抖动会引起偏振模色散差分群时延(DGD)的抖动,引入高阶偏振模色散,因而对系统传输性能带来更大的影响。本文研究了线性啾啾光纤光栅应用于高速光通信系统中作为色散补偿器时,其偏振模色散及差分群时延抖动对其色散补偿效果的影响。

## 2 基本理论及实验结果分析

根据光纤光栅布拉格波长  $\lambda_B$  与折射率调制周期的关系  $\lambda_B = 2n\Lambda_0(1 + Cz)$  可知,线性啾啾光纤光栅在不同位置反射不同波长,因此它具有一个线性的群时延光谱,其斜率就是该啾啾光纤光栅的色散系数  $D$ 。式中  $C, \Lambda_0, z$  分别为线性啾啾光栅的啾啾系数,光栅初始位置处的光栅周期及等效反射点与光栅初始位置间的距离。理想的线性啾啾光纤光栅应该具有平顶的反射谱线和线性的群时延曲线,即色散系数  $D$  为一常数。实际情况下,由于光纤光栅二端面的法布里-珀罗(F-P)效应,以及由于光纤材料和光栅制备引入的缺陷,线性啾啾光纤光栅时延曲线会存在不同程度的抖动。虽然这种抖动可以通过适当变迹的方法加以抑制,但是不可能完全消除[8]。光栅群时延曲线上的抖动在调制信号带宽内往往表现出一种周期特性,文献中一般采用一个简单的正弦调制模型进行讨论,即

$$D = \bar{D} + b \sin \left[ \frac{2\pi}{p} (\lambda - \lambda_0) \right], \quad (1)$$

式中  $\bar{D} = \frac{2n}{c\Lambda_0}$  为理想线性啾啾光纤光栅的色散系数,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda_0$  为光栅起点对应的波长。  $b, p$  分别为描述群时延抖动强度和周期的参量。

在实际的线性啾啾光纤光栅中,由于原始光纤

的随机双折射,以及光纤光栅制备过程引入的非轴对称性,在啾啾光纤光栅中还存在着偏振模色散。与传输光纤中的偏振模色散不同,由于光纤光栅本身长度较短,受外界扰动影响较小,偏振模差分群时延与传输光纤相比可认为是固定的[5]。设  $\Delta n$  为线性啾啾光纤光栅两个主偏振态(PSP)间的折射率差。对于分别以两个主偏振态方向入射的同一波长的光波,将在不同的光栅位置上发生反射,因而获得不同的时延。而对于获得相同时延的光波  $\lambda_s$  和  $\lambda_t$ ,将有相应的波长差。其值可以导出为

$$\lambda_s - \lambda_t = 2\Lambda_0 \Delta n \approx \lambda \Delta n / n, \quad (2)$$

两个主偏振态方向光波的时延  $\tau_s$  和  $\tau_t$  可以分别表示为

$$\begin{aligned} \tau_s(\lambda_s) &= D(\lambda_s) \times \Delta \lambda = \\ &\left\{ D \left( 1 - \frac{\Delta n}{2n} \right) + b \sin \left[ \frac{2\pi}{p} (\lambda - \lambda_0) \right] \right\} \times \\ &\left[ \lambda \left( 1 - \frac{\Delta n}{2n} \right) - \lambda_0 \right], \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \tau_t(\lambda_t) &= D(\lambda_t) \times \Delta \lambda = \\ &\left\{ \bar{D} \left( 1 + \frac{\Delta n}{2n} \right) + b \sin \left[ \frac{2\pi}{p} (\lambda - \lambda_0) \right] \right\} \times \\ &\left[ \lambda \left( 1 + \frac{\Delta n}{2n} \right) - \lambda_0 \right], \end{aligned} \quad (3b)$$

由此可得由于偏振模色散引起的差分群时延为

$$\text{DGD} = \tau_t - \tau_s = \bar{D} \lambda \frac{\Delta n}{n} + b \lambda \frac{\Delta n}{n} \sin \left[ \frac{2\pi}{p} (\lambda - \lambda_0) \right], \quad (4)$$

(4) 式表明,虽然在实际情况下线性啾啾光纤光栅两偏振主态间的折射率差  $\Delta n$  很小,但由于线性啾啾光纤光栅本身色散系数很大,从而在高速系统中应用啾啾光纤光栅进行色散补偿时,偏振模色散的影响不可忽略。(4) 式的第二项是波长  $\lambda$  的函数,这部分体现了由于线性啾啾光纤光栅色散特性偏离线性

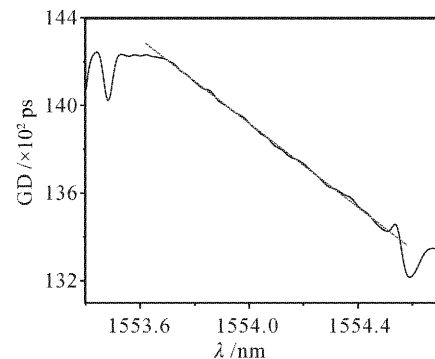


图 1 线性啾啾光纤光栅时延曲线  
Fig. 1 Group delay curve of linearly chirped fiber Bragg grating

而引入的高阶偏振模色散。特别应该提到的是,由于啁啾光纤光栅主偏振态相对稳定,所以不考虑高阶偏振模色散引起主偏振态旋转。

实验中对采用紫外辐照线性啁啾相位版制备的线性啁啾光纤光栅进行了测量。光栅的色散补偿带宽约为 1nm,中心波长为 1554.05 nm。图 1 为室温下,用 Agilent81910A 全参量测量仪测量得到的线性啁啾光纤光栅的时延曲线。可以看到,在基本线性变化的时延曲线上,存在着小的抖动。对该曲线进行线性拟合可以得到此线性啁啾光纤光栅时延与波长的关系:

$$GD=1.50378 \times 10^6 - 958.72738 \times \lambda / \text{ps}.$$

可得,平均色散系数  $D$  为 958.7 ps/nm。以拟合的方程为基线,可以得到时延抖动的谱,如图 2 中上面一条曲线所示。图 2 中下面一条曲线为采用同一仪器测量得到的该光纤光栅偏振模色散差分群时延的曲线。比较两条曲线可见,曲线上抖动的行为非常相似。测量得到的差分群时延抖动幅度(幅度约为 0.5 ps)远远小于时延抖动(幅度约为 20 ps),与理论结果相符合。这两种抖动的相似性,表明线性啁啾光纤光栅偏振模色散与其色散存在密切联系。将光栅的色散系数和偏振模色散平均差分群时延 1.4 ps 代入(4)式,可以计算得到该光纤光栅偏振主态的折射率差  $\Delta n$  为  $1.36 \times 10^{-6}$ 。另外,对光纤光栅差分群时延抖动曲线进行傅里叶变换,可以得到其频谱分布大致在低于  $43 \text{ nm}^{-1}$  范围内,相应的差分群时延抖动最小周期为 0.024 nm。

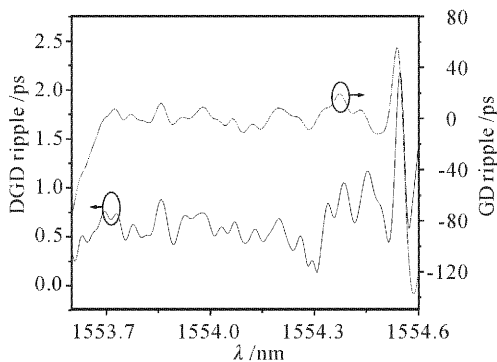


图 2 线性啁啾光纤光栅差分群时延与群时延抖动  
Fig. 2 Differential group delay and group delay ripple of linearly chirped fiber Bragg grating

### 3 数值模拟及讨论

鉴于非理想啁啾光纤光栅存在偏振模色散群时延和色散时延抖动的共同作用,有必要分析一下它在用作色散补偿器件时对传输性能的影响,为此进

行了数值模拟分析。计算中采用 64 bit 码速为 40 Gb/s 的随机高斯型非归零码作为信号,通过分布傅里叶方法解传输方程<sup>[9,10]</sup>,模拟其传输过程中的色散展宽,然后使信号通过线性啁啾光纤光栅时延模型进行补偿,通过系统眼图代价对补偿效果进行评估<sup>[11]</sup>。因为本文仅针对线性啁啾光纤光栅的色散补偿特性进行研究,所以忽略了传输过程中的放大器放大自发辐射(ASE)噪声,以及偏振模色散、光纤非线性的影响。这样做虽然与实际情况产生了一些误差,但可使线性啁啾光纤光栅时延抖动和偏振模色散对其补偿效果的影响从其他因素中分离出来,更加清楚。计算中光纤色散系数取 17 ps/(nm·km);线性啁啾光纤光栅的色散和群时延抖动参量按所测量的光纤光栅参量选取。

#### 3.1 信号偏振态对补偿效果的影响

由于线性啁啾光纤光栅偏振模色散的影响,将使信号展宽,C. D. Pool 等<sup>[11]</sup>给出了偏振模色散的功率代价

$$\text{penalty} \approx \frac{\Delta\tau^2(1-\gamma)\gamma}{2t_0^2}, \quad (5)$$

其中  $\Delta\tau$  为时延差,  $t_0$  为信号脉冲宽度,  $0 < \gamma < 1$  表明信号功率在光纤光栅两个偏振主态上的功率分配。图 3 中虚线和实线分别为根据(5)式计算及通过计算机模拟所得到的眼图代价随被补偿信号在两个偏振主态的功率分配的变化曲线,由图可以看出两种方法得到的结果相当接近。当信号能量在两偏振主态均匀分布时,偏振模色散引起眼图代价最大;当被补偿信号偏振方向与偏振主态重合时,一阶偏振模色散不会引起眼图代价,但由于啁啾光纤光栅时延抖动和高阶偏振模色散的影响,即使达到上述条件还是会引引起眼图代价的提高。

另外,虽然对于单个光纤光栅而言,由偏振模色散引起的眼图代价很小,但在传输链路中引入多个

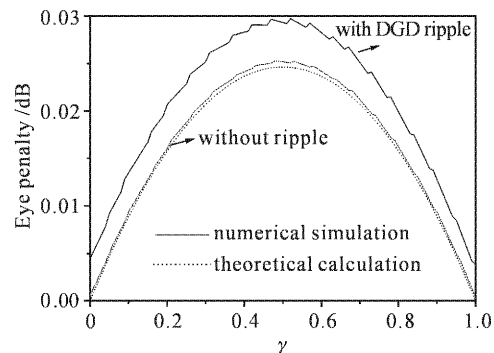


图 3 眼图代价随  $\gamma$  的变化曲线

Fig. 3 Eye diagram penalty due to PMD versus  $\gamma$

光纤光栅补偿器时,其累计的偏振模色散眼图代价将有可能超过 1dB。因此光纤光栅的偏振模色散问题在高速通信系统中应予以重视。估算在线路中插入 8 段线性啁啾光纤光栅对经 448 km 光纤色散传输的信号进行补偿时的偏振模色散积累最大约为 5.4 ps。图 4 给出了  $\gamma$  分别为 0.5 和 1 时,被补偿后的信号眼图。很明显,当  $\gamma$  为 0.5 时,信号由于啁啾光纤光栅的偏振模色散而展宽,眼图开始闭合;相反, $\gamma$  为 1 时,信号眼图张开得很好,这与图 2 的分析非常吻合。

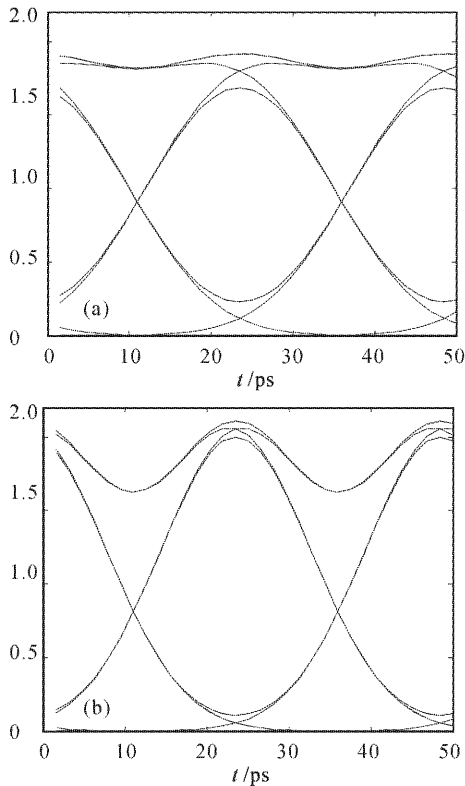


图 4 考虑偏振模色散时被补偿信号的眼图

Fig. 4 Eye diagram of signal after dispersion compensation by linearly chirped fiber Bragg grating with PMD

(a)  $\gamma=0.5$ , (b)  $\gamma=1$

M. Rochette 等<sup>[12]</sup>针对啁啾光纤光栅偏振模色散比较稳定的特点,提出了在啁啾光纤光栅色散补偿器后再引入偏振控制器和保偏光纤的方法,以补偿啁啾光纤光栅一阶偏振模色散引起的信号展宽。根据本节内容可以对这种方法进行简化,只需在啁啾光纤光栅前加入一个偏振控制器并使其与偏振主态对齐,即可达到相同的抑制效果。

### 3.2 差分群时延抖动对线性啁啾光纤光栅补偿的影响

啁啾光纤光栅中时延抖动往往不可避免,而时

延抖动又将引起啁啾光纤光栅差分群时延的抖动,时延抖动和差分群时延抖动的存在将影响啁啾光纤光栅的色散补偿效果。图 5 给出了在时延抖动和差分群时延抖动共同作用下,经啁啾光纤光栅色散补偿后的信号眼图。计算参量  $b=20$  ps,  $\Delta n=1.36 \times 10^{-6}$ ,  $p=0.1$  nm,  $\phi=0$ 。与图 4(a) 比较可以看出时延抖动和差分群时延抖动引起的眼图劣化与单纯偏振模色散引起的信号眼图代价明显不同,图 4(a) 表明线性啁啾光纤光栅的偏振模色散引起沿快轴和慢轴传播的信号间的时延,导致信号的展宽。而图 5 为被补偿信号波形的劣化,表现为眼图曲线明显散开。这是由于高阶偏振模色散使信号中不同频率分量的时延差不同和时延抖动引起的信号局部过补偿或欠补偿,共同作用导致的信号波形畸变所引起的。初步研究还表明差分群时延抖动而产生的信号眼图劣化与差分群时延抖动的周期及相位因子  $\phi$  等因素有关,这与群时延抖动对补偿信号的影响相似<sup>[13]</sup>。

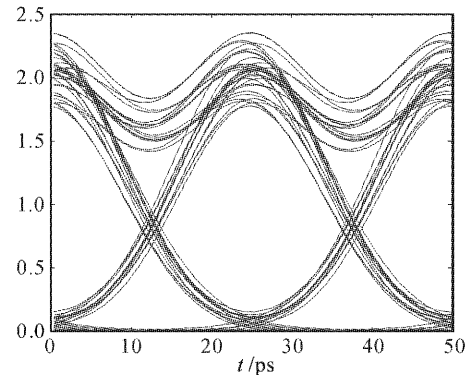


图 5 考虑差分群时延抖动时的被补偿信号眼图

Fig. 5 Eye diagram of signal after dispersion compensation by linearly chirped fiber Bragg grating with DGD ripple

## 4 结 论

对非理想线性啁啾光纤光栅理论和实验研究表明,由于偏振模色散和差分群时延抖动的存在使其在高速光通信系统的色散补偿性能受到一定影响。推导了非理想光纤光栅差分群时延抖动与时延抖动的关系,并测量了啁啾光纤光栅的时延曲线和偏振模色散,实验结果与理论推导比较符合。另外根据实验测量结果,分析了差分群时延抖动的最小周期大约在 0.02 nm 量级。通过理论计算和数值模拟的方法,计算了光纤光栅偏振模色散眼图代价与被补偿信号偏振方向的关系,并进行了相互印证,提出了啁啾光纤光栅偏振模色散控制的新设想。最后应用数值模拟方法,结合实验数据讨论了非理想线性啁

啾光纤光栅固有偏振模色散引起的信号的展宽和差分群时延抖动引起的脉冲形状劣化。

### 参 考 文 献

- 1 Li Tangjun, Wang Muguang, Shi Yulei *et al.*. PMD compensation of FBGs in a 40 Gb/s OTDM system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 518~520  
李唐军,王目光,石玉磊等. 对40 Gb/s OTDM系统中光纤光栅色散补偿器进行偏振模色散补偿的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 518~520
- 2 R. J. Nuyts, Y. K. Park, P. Gallion. Performance improvement of 10 Gb/s standard fiber transmission systems by using the SPM effect in the dispersion compensating fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10): 1406~1408
- 3 S. G. Park, A. H. Gnauck, J. M. Wiesenfeld *et al.*. High-speed WDM transmission using highly dispersed pulses[C]. *OFC '2000*, TuJ3
- 4 Ning Tigang, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Impact on dispersion compensated system using chirped fiber Bragg grating with delay ripple[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1064~1067  
宁提纲,刘艳,谭中伟等. 光纤光栅时延波动对传输系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1064~1067
- 5 E. Ciaramella, E. Riccardi, M. Schiano. System penalties due to polarisation mode dispersion of chirped gratings[C]. *ECOC '98*, Madrid, 1998. 515~516
- 6 S. Jamal, John C. Cartledge. Variation in the performance of multispan 10-Gb/s systems due to the group delay ripple of dispersion compensating fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(1): 28~35
- 7 I. Riant, J. Gourhant, P. Sansonetti. Polarization mode dispersion analysis in fibre chromatic dispersion compensators [C]. *Technol. Digest of OFC '99*, TuS2-1. 269~271
- 8 L. R. Chen. Influence of grating group delay ripple on the reduction of dispersion induced intensity noise in subcarrier multiplexed systems[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **187**: 125~128
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 2001
- 10 Oleg V. Sinkin, Ronald Holzlohner, John Zweck *et al.*. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 61~68
- 11 C. D. Pool, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy *et al.*. Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(1): 68~70
- 12 M. Rochette, S. LaRochelle, P. Y. Cortes *et al.*. Polarisation mode dispersion compensation of chirped Bragg gratings used as chromatic dispersion compensators[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 342~343
- 13 Lin Zhu, Minghua Chen, Yejin Zhang *et al.*. Impacts of cascaded filters with group delay ripples on 40-Gb/s WDM transmission system[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(11): 1518~1520