

文章编号: 0253-2239(2004)02-220-5

普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究*

裴 丽 简水生 延凤平 宁提纲 李唐军
(北京交通大学光波所, 北京 100044)

摘要: 通过系统分析光纤光栅的耦合模理论,探索、优化光纤光栅的制作过程,研制了满足 ITU-T 建议波长的优质光纤光栅。用双透镜和扫描移动平台结合相位掩膜板研制的光纤光栅分别成功实现了 4×10 Gb/s-400 km和 4×10 Gb/s-800 km普通单模光纤传输系统的色散补偿,功率代价均小于 2 dB,且最佳功率代价为负值。同时对 4×10 Gb/s-800 km普通单模光纤传输系统的偏振模色散实施长时间的监测,系统偏振模色散小于 10 ps,提出了发展 10 Gb/s 的光通信系统更符合目前我国国情的见解。

关键词: 长距离光纤通信; 光纤光栅; 色散补偿; 功率代价

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

The Dispersion Compensation of Optical Fiber Bragg Grating on the Long-Distance G. 652 Fiber Transmission System

Pei Li Jian Shuisheng Yan Fengping Ning Tigang Li Tangjun

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 6 September 2002; revised 10 March 2003)

Abstract: The coupled mode theory of fiber Bragg grating (FBG) is analyzed. The fabrication course of FBG is explored and optimized, and the good quality FBGs with the wavelengths that fit the ITU-T criterion are made. The 4×10 Gb/s-400 km and 4×10 Gb/s-800 km transmission systems on G. 652 fiber with dispersion compensation by FBGs are implemented. The FBGs are made by double lens and scanning stage with phase mask, respectively. The power penalty is less than 2 dB in each channel, and the best power penalty is negative. And the polarization mode dispersion (PMD) of 4×10 Gb/s-800 km transmission system is monitored for a long time. The result shows that in 10 Gb/s system, the PMD compensation is not needed. Developing the 10 Gb/s transmission system fits the situation of China.

Key words: long-distance optical fiber communication; optical fiber grating; dispersion compensation

1 引 言

光纤色散已成为光通信系统进行升级、扩容的主要障碍,如何解决这一问题是目前国际光通信领域的主要研究热点之一。人们最初研制了零色散点位移到 $1.55 \mu\text{m}$ 处的色散位移光纤,继而又研制了兼顾色

散和非线性两种要素的 G. 655 光纤,但由于非线性效应,这两种光纤在密集波分复用系统中的应用受到限制。可见,改变光纤的零色散点并不能从根本上解决色散问题。要开发已有光通信系统的潜力,在 G. 652 光纤上开通高速系统,关键问题是色散补偿。

现已提出许多色散补偿方案^[1~2],目前一般是采用色散补偿光纤(DCF)进行色散管理来解决这一问题,但现有色散补偿光纤进行色散补偿尚存在大损耗、低色散、容易产生非线性和色散斜率不匹配的缺陷。另一种方法是用光纤光栅来补偿 G. 652 光纤的色散^[3],光纤光栅与现有光纤系统兼容性好,具有

* 国家“八六三”高科技计划(2001AA312090)、国家自然科学基金(60077008)、北京交通大学攀登基金(PD206)资助课题。

E-mail: peilip@sina.com

收稿日期:2002-09-06; 收到修改稿日期:2003-03-10

较低的传输损耗和插入损耗,色散补偿量大,能够实现光纤色散和色散斜率的同时补偿,且价格低廉,易于大批量生产。利用啁啾光纤光栅进行色散补偿是应用前景很好的一种方案。

2 光纤光栅色散补偿的基本原理

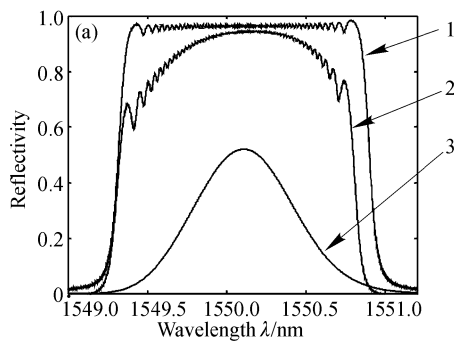
光纤光栅中,不同波长的入射光在光纤光栅的不同位置反射并具有不同的时延,光波经过光纤光栅后起到色散均衡的作用,从而实现色散补偿。可用耦合模方程建立其理论模型^[4~6]。

首先,假设所研究的光纤为单包层阶跃折射率光纤,根据色散关系计算出基模 LP₀₁ 模和包层模的有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$,以及它们在纤芯中的场分布。

其次,根据场分布,计算前向基模与后向基模以及前向基模与各后向包层模之间的耦合系数。

第三,根据前面得出的有效折射率及耦合系数,用数值解法求解各模式满足的耦合方程。光栅耦合方程表示为

$$\begin{cases} R'(z) + i\alpha_j(z)R(z) = i \sum_j k_{1j}^{\text{cl}}(z)S_j(z), \\ S'_j(z) - i\alpha_j(z)S_j(z) = -ik_{1j}^{\text{cl}}(z)R_j(z), \end{cases} \quad (1)$$



其中, κ_{kj}^{cl} , κ_{kj}^{co} 分别为第 k 和第 j 个模式间的横向与纵向耦合系数, $\alpha_j(z)$ 为前向基模与各后向模之间的相位失配, Λ 为光栅周期, $\phi(z)$ 为沿光纤轴向的缓变函数。取光栅长度为 L , 边界条件为

$$R\left(-\frac{L}{2}\right) = 1; \quad S_j\left(\frac{L}{2}\right) = 0, \quad (2)$$

本地反射系数为

$$f(z) = \frac{S(z)}{R(z)}, \quad (3)$$

求导整理得里卡蒂(Riccati)微分方程:

$$\begin{cases} f'(z) = -i\kappa_{1j}^{\text{cl}}(z)^2 - 2i\alpha_j(z)f(z) - i\kappa_{1j}^{\text{cl}}, \\ f(L/2) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

光栅响应 $R' = f(-L/2) \times f^*(-L/2)$, 由(4)式能进一步讨论光纤光栅的光谱特性和色散、时延特性。

选择光栅参量为: 中心波长 1550 nm, 长度 14 cm, 啁啾量 5×10^{-4} , 折射率调制的函数形式分别为高斯切趾、升余弦切趾和无切趾。由(4)式出发, 利用数值解法可计算得出光纤光栅的反射谱和时延曲线如图 1 所示。

进一步编程分析得到不同切趾情况的光栅特性, 如表 1 所示。

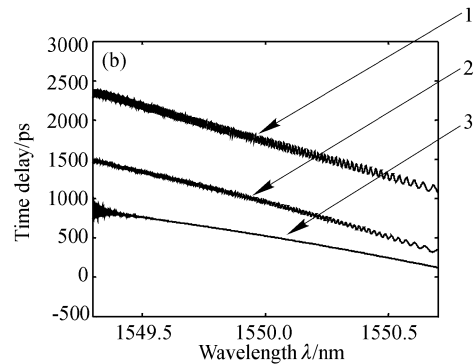


Fig. 1 The reflectivity and time delay of FBG. 1: non-apodization, 2: raise-cosine, 3: Gauss

Table 1 The characteristics of FBG under different apodized functions

	The maximum time delay ripple / ps	3 dB bandwidth / nm	Dispersion / (ps/nm)	Reflectivity
Non-apodization	~62	~1.582	~900	~98%
Raise-cosine	~42.3	~1.436	~852	~95%
Gauss	~5.1	~0.831	~601	~57%

可见, 由于光栅两端的法布里-珀罗效应, 导致反射谱的不平坦和时延曲线的波动, 采用折射率切趾的方法可抑制反射谱的边峰以及时延波动, 但光栅的带宽和补偿量减小, 反射率下降。切趾程度越大, 这几个参量的变化越大。

在高速、长距离光纤通信系统中, 需要使用多个光栅来进行色散补偿, 叠加的效果必然使这几个参

量的变化进一步累积, 对光纤通信非常不利, 因此制作光纤光栅时, 必须综合考虑时延纹波、色散量、带宽和反射率, 达到最佳组合。

我们探索和优化了光栅的制作过程, 图 2 是用改进扫描法制作的一个光纤光栅的反射谱和时延曲线, 光栅的中心波长为 1547.76 nm, 反射谱的最大功率波动仅为 0.2 dB, 时延曲线的最大纹波为 16 ps。

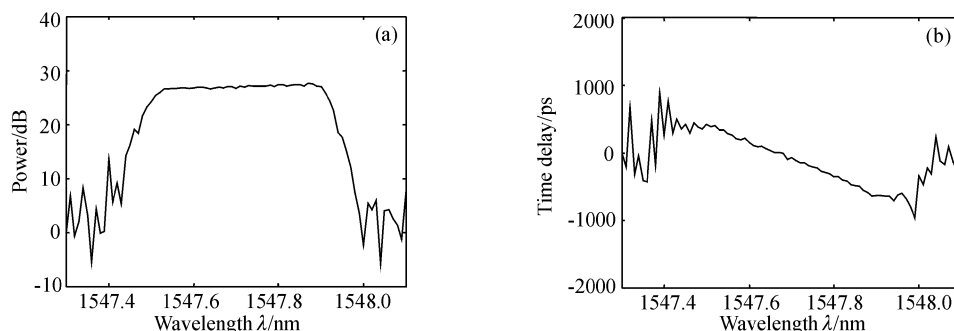


Fig. 2 The reflectivity (a) and time delay (b) of FBG

3 利用啁啾光纤光栅色散补偿实现 4×10 Gb/s 400 km 普通单模光纤上的传输系统

3.1 传输系统结构设计

如图 3 所示。复用后的 10 Gb/s 信号放大后, 经过 5 个 80 km 的光纤间距, 间距中分别加入 1 个光纤光栅对信号进行色散补偿, 传输系统中采用 6

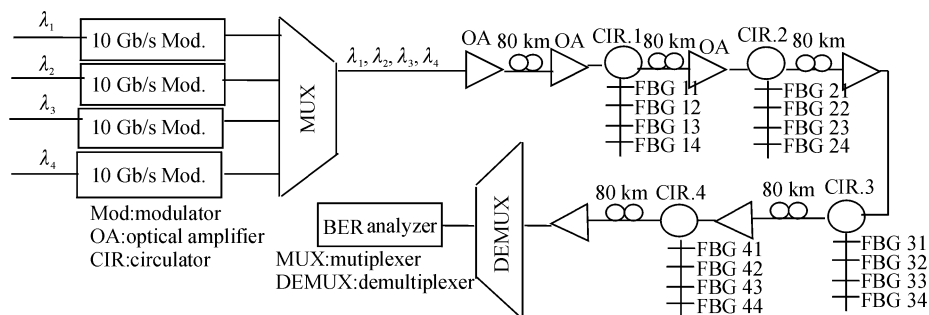


Fig. 3 Transmission system of 4×10 Gb/s 400 km dispersion compensation

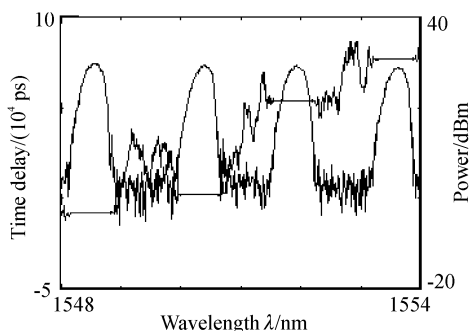


Fig. 4 The reflectivity and time delay of the whole FBGs after 400 km transmission

3.3 400 km G. 652 光纤传输并补偿后的眼图

10 Gb/s 信号经 400 km G. 652 光纤传输并补偿后的眼图见图 5。由图可见, 脉冲宽度基本恢复, 同时眼图张开很好, 说明信号的信噪比较好。

个光放大器来进行光功率补偿。

3.2 光纤光栅色散补偿后的反射谱和时延曲线

用自行研制的双透镜曝光平台, 采用相位掩膜法制作了性能优良的光纤光栅。利用光纤光栅对 400 km 光纤的色散进行补偿后, 测得其时延曲线基本水平, 即色散基本上被完全补偿。如图 4 所示。四路光栅的中心波长分别为: 1549.322 nm、1550.842 nm、1552.544 nm 和 1554.136 nm, 波长间隔基本为 1.6 nm, 满足 ITU-T 规定。

3.4 误码率测试

传输并补偿后的 10 Gb/s 信号, 经解复用后进入误码仪进行误码测量。在误码率 (BER) 为 10^{-10} 时, 各信道传输的无误码功率代价分别为 1.2 dB、1.98 dB、-0.9 dB 和 0.4 dB, 如图 6 所示。

信道 2 的功率代价略高是由于采用了两种不同的光栅封装材料, 这样当环境温度变化时, 光栅中心波长的温度漂移量不同所致, 换为一致的封装材料后重测该路的功率代价为 0.9 dB。信道 3 的光功率代价为负值, 即经过几百千米光纤传输后, 接收机的灵敏度比起背靠背来反而提高了。一种可能的原因是由于非线性引起的脉冲压缩, 使光脉冲能量更为集中, 更加有利于判决。在我们所采用的光纤光栅色散补偿系统中, 由于光纤光栅在对信号进行色散补偿的同时还能够起到滤波器的作用, 因此光纤光

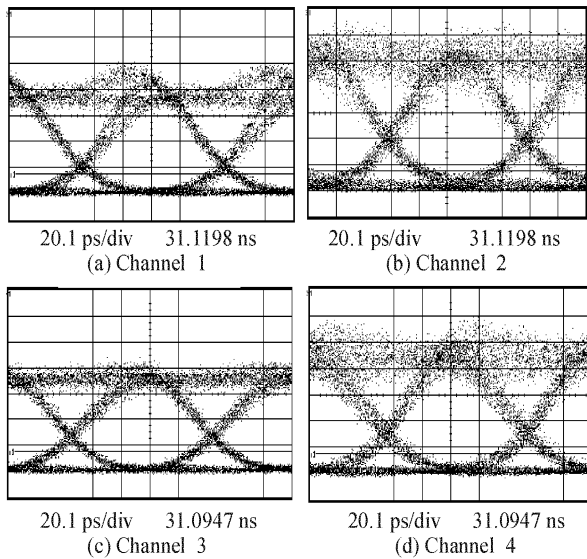


Fig. 5 The eye diagrams of 10 Gb/s signal after transmission and compensation in 400 km G. 652 fiber

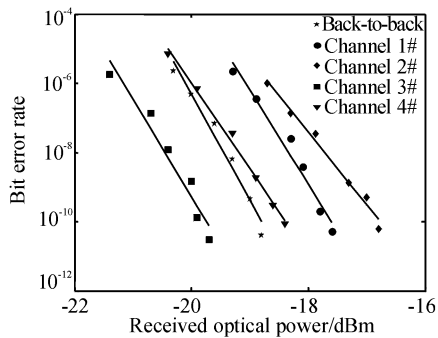


Fig. 6 The Bit error rate of 4×10 Gb/s, 400 km FBG dispersion compensation

栅置于放大器后使得放大器自发辐射噪声得到有效抑制,这是光纤光栅色散补偿系统中出现“负”功率代价的一个原因。

4 利用啁啾光纤光栅色散补偿实现 4×10 Gb/s 800 km 普通单模光纤上的传输系统

4.1 传输系统结构设计

可调谐激光器发出的光信号,经过 10 Gb/s 的信号调制,分别采用 11 个光放大器和 20 个光纤光栅来进行信号传输过程中的光功率和色散补偿,成功实现了 4×10 Gb/s-800 km 普通单模光纤的传输。系统中,用改进的扫描平台和相位掩膜制作各信道光纤光栅的特性基本一致。其中心波长分别为: 1547.709 nm, 1549.338 nm, 1550.936 nm 和 1552.578 nm。波长间隔基本为 1.6 nm,且满足

ITU-T 波长标准。单个光纤光栅可以补偿约 160 km G. 652 光纤的色散,每个信道采用 5 个光纤光栅。

4.2 误码率测试

测试表明,误码率为 10^{-10} 时,各信道无误码传输的功率代价分别为 1.36 dB、0.89 dB、1.67 dB 和 1.32 dB。如图 7 所示。可见,利用光纤光栅色散补偿,在功率代价很小的情况下,成功实现了 4×10 Gb/s, 800 km G. 652 光纤的传输,超过了 ITU-T 建议只能传输 8×22 dB 距离,增加传输距离则需要加入光电中继的标准,取得了突破性的进展。

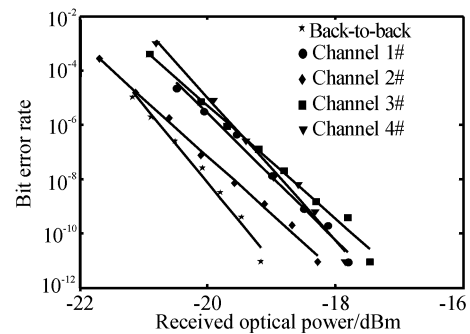


Fig. 7 The Bit error rate of 4×10 Gb/s, 800 km FBG dispersion compensation

5 10 Gb/s 光纤光栅色散补偿系统的偏振模色散

随着光通信系统的不断发展,色散补偿传输系统中偏振模色散(PMD)的影响越来越不容忽视,尤其对目前较为成熟的 10 Gb/s 传输系统而言,偏振模色散的影响值得关注。

ITU-T 建议琼斯矩阵本征值测量法和干涉仪法作为偏振模色散的基准测量方法。由于光纤光栅一般都比较短,它的偏振模色散测量要求有很高的精度,因此采用琼斯矩阵本征分析法测量偏振模色散是较佳的选择^[7]。图 8 为测量装置结构。可调谐激光器发出的光信号以一定的步长间隔经偏振调节器后进入光纤光栅,然后经偏振分析仪进行测试,测试数据经计算机处理后显示结果。

确定值模型又称为最坏情况设计模型,其出发点是根据线路所要求的比特率和传输距离,确定一个系统允许的偏振模色散最大值,线路中所有光纤段的偏振模色散值都不得超过这一最大值。在数字通信系统中,确定偏振模色散的标准规范值应以由偏振模色散群时延(DGD)差 $\Delta\tau$ 所引起的功率损失不超过 1 dB 为依据。当 $\Delta\tau$ 达到光脉冲 1 比特周期

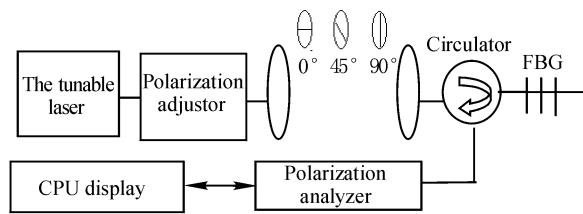


Fig. 8 The experimental unit for FBG's PMD measurement with Jones matrix eigenvalue analysis method

的0.3倍时,将引起1 dB的功率损失。同时由于随机模式耦合使瞬时值有可能达到平均值的3倍或更高,因此保留一定的安全系数是必要的。这就要求极限平均偏振模色散值必须小于1比特周期的十分之一(此时由偏振模色散造成的功率损失低于1 dB的概率为99.994%),即

$$D_{\max}^{\text{pm}} = 100 \cdot (B \cdot L^{1/2})^{-1} (\text{ps/km}), \quad (5)$$

其中, B 为系统比特率(Gbit/s), L 为距离(km)。

由(5)式可以计算出偏振模色散所引起的功率损失达到1 dB时,不同传输速率所允许的平均群时延差的最大容限,结果如图9所示。

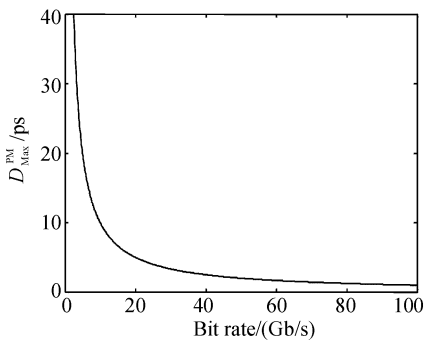


Fig. 9 The maximum tolerant DGD of different transmission rates. DGD: dispersion group delay

计算表明,在10 Gb/s传输系统中,偏振模色散所引起的功率损失达到1 dB时,各光纤段所允许的平均群时延差的最大容限为10 ps,而当传输速率提高到40 Gb/s时,这一容限值仅为2.5 ps。

对光纤光栅色散补偿实现G.652光纤上 4×10 Gb/s-800 km传输系统的偏振模色散进行了大量测试。结果表明,各个信道的偏振模色散都是在10 ps以下波动。可见,对10 Gb/s光纤光栅色散补偿的长距离传输系统,偏振模色散对系统的影响不大,无须进行偏振模色散补偿。而对40 Gb/s传输系统的偏振模色散影响则不容忽视,且器件价格昂贵。因此提出10 Gb/s的光通信系统较为适应目前我国国情。

结束语 光纤光栅色散补偿作为一种经济、有效的色散补偿方案,深入该领域的研究不仅对全世界已铺设的上亿公里G.652光纤开通高速系统具有重要意义,而且可为未来波长交换的全光网络提供强大的技术支持。可以预料,光纤光栅将在未来的光纤通信系统中发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Capmang J, Pastor D, Sales S *et al.*. Impact of FBG dispersion in WDM-SCM communication systems. 26th European Conference on Optical Communication (ECOC), September 3~7, 2000, Munich, Germany: 59~60
- 2 Li M J. Recent progress in fiber dispersion compensators. 27th European Conference on Optical Communication (ECOC), September 30~October 4, 2001, Amsterdam, The Netherlands: 486~489
- 3 Edir S G, Shan X. 40 Gb/s straight line RZ data transmission over 240 km of standard fiber. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(1):19~20
- 4 Erdogan T, Sipe I E. Tilted fiber phase gratings. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(2):296~313
- 5 Marcuse D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. New York: Academic Press, 1994
- 6 Erdogan T. Cladding mode resonances in short and long period fiber grating filters. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(8):1760~1773
- 7 Vassallo C. PMD Pulse deformation. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(18):1597~1598