

文章编号: 0258-7025(2005)05-0681-04

一种闭环控制的光纤光栅动态色散补偿仪

叶 青, 刘 峰, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 利用啁啾光纤光栅的应变调谐特性, 将色散补偿的啁啾光纤光栅斜贴于悬臂梁的侧面, 通过应力实现啁啾量调整而改变其色散补偿量的大小, 同时利用固定在同一悬臂梁的均匀布拉格光栅传感器, 实现了闭环自动控制色散补偿量, 研制出了一种新型的光纤光栅动态色散补偿仪。该色散补偿仪工作在 1550 nm 波段, 典型性能数据为: 色散动态补偿范围 $-1000 \sim -1680$ ps/nm, 插入损耗小于 1.5 dB, 动态调谐步进响应时间小于 50 ms, 基本上能满足 10 Gb/s 光纤通信系统中色散动态补偿的要求。

关键词 光纤光学; 啁啾光纤光栅; 动态色散补偿; 闭环控制

中图分类号 O436.3; TN253 **文献标识码** A

Close-Loop Controlled Fiber Grating Dynamic Dispersion Compensator

YE Qing, LIU Feng, QU Rong-hui, FANG Zu-jie

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

Abstract A new chirped fiber Bragg grating dynamic dispersion compensator at 1550 nm band is presented by using stain-tuning characteristics of the grating, and using a narrow band fiber Bragg grating fixed on the same bent beam as a sensor for close-loop control of the dispersion compensation amount. Its typical measured data are as follows. Dispersion compensation tunable range was measured to be $-1000 \sim -1680$ ps/nm; its insertion loss and dynamic response time were measured less than 1.5 dB and 50 ms, respectively.

Key words fiber optics; chirped fiber grating; dynamic dispersion compensation; close-loop control

1 引 言

不同波长的光在光纤内传输速度的差别, 即色散效应, 引起光信号脉冲在传输过程中展宽、畸变, 产生码间干扰, 使误码率增加^[1]。这是限制光纤传输容量和传输距离的基本因素之一。因此, 色散的补偿是光纤通信系统的重要支撑技术。人们已经对单模光纤的色散补偿提出了多种解决方案^[2~8], 其中啁啾光纤光栅与光纤兼容性好, 具有低的插入损耗, 偏振不敏感, 被认为是一种应用前景最好的方案。光通信系统网络要求具有灵活组网的能力, 因而相关光器件也必须具有动态可调、可配置的能力。光信号脉冲的色散展宽与路径密切相关, 光纤的色散随环境温度的改变而变化, 简单的静态色散补偿器件已不能适应系统的发展要求, 必须采用色散量动态可调的色散补偿器件

才能满足通信系统发展的需求。近年来, 啁啾光纤光栅对温度、应力的敏感性提供了动态可调的可能性。利用光纤光栅的温度调谐特性实现了啁啾光纤光栅啁啾率的动态调整^[9]。但是由于光纤光栅温度调谐的响应比较慢, 阻碍了动态控制速度的提高。利用光纤光栅的应变调谐特性实现动态调整的方案^[10]过于复杂, 因此本文提出一种闭环控制动态色散补偿的实施方案, 将色散补偿的啁啾光纤光栅固定在悬臂梁的侧面, 实现啁啾量调整; 同时在同一悬臂梁的上端面粘贴另一窄带光纤光栅, 作为悬臂梁弯曲的传感器, 实现色散补偿的闭环控制。获得了动态色散补偿量的调谐范围约为 $-1000 \sim -1680$ ps/nm, 插入损耗小于 1.5 dB, 动态调谐的步进响应时间小于 50 ms 的实验结果。

收稿日期: 2004-03-26; 收到修改稿日期: 2004-12-29

基金项目: 国家 973 计划(2001CCA04600)、中国科学院知识创新试点工程和上海市科委科技发展基金(02dj14001)资助项目。

作者简介: 叶 青(1977—), 男, 湖北鄂州人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事高速光通信系统中色散补偿及其器件的研究。E-mail: yeqing@mail.siom.ac.cn

2 啾啾光纤光栅动态色散补偿的闭环控制方案

啾啾光纤光栅具有可设计、制备的群时延光谱。在光纤通信系统中用于色散补偿时的典型接入方式如图1(a)所示。光信号脉冲的不同光谱分量光波在光纤光栅的不同位置被反射,具有不同的时延,因而可以使由于光纤色散展宽的脉冲被重新压缩,达到色散补偿的目的。图1(b)是采用紫外激光写入的啾啾光纤光栅典型的反射光谱。图2显示了色散补偿前后眼图测试的实际效果。可以看到接收信号经光纤光栅色散补偿后的信噪比有明显提高。

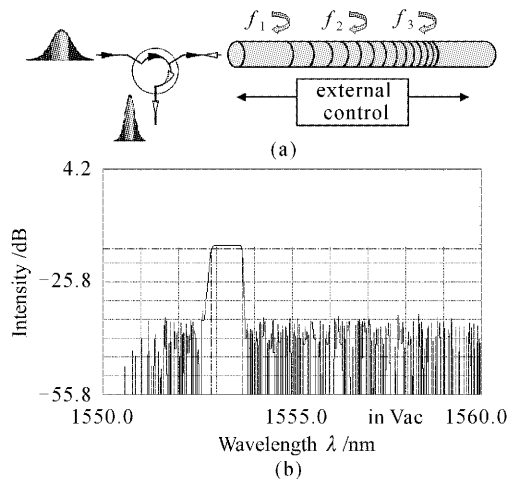


图1 (a) 啾啾光纤光栅色散补偿的接入方式;
(b) 典型的啾啾光纤光栅反射谱

Fig.1 (a) Access of the chirped fiber grating for dispersion compensation; (b) Typical reflection spectrum of chirped fiber grating

光纤色散的动态补偿,要求啾啾光纤光栅的啾啾系数具有动态可调的性能。利用悬臂梁的应变特性,可以很好地满足这一要求。当悬臂梁弯曲时,在其中心的两侧分别发生拉伸和压缩应变。其应变 ϵ 正比于离开悬臂梁中心面的距离 y : $\epsilon = y/R$ 。式中 R 为悬臂梁弯曲的曲率半径。将啾啾光纤光栅斜贴于悬臂梁弯曲方向的侧面,光栅的中心与悬臂

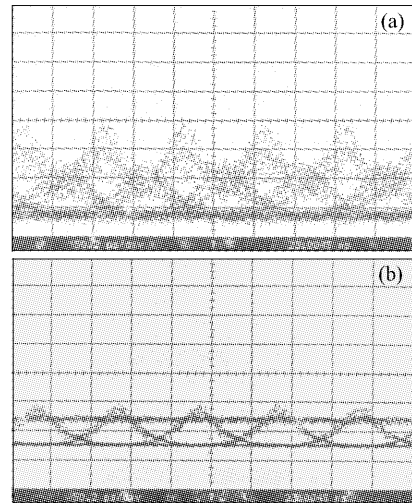


图2 10 Gb/s 信号经 80 km 光纤传输后的眼图
(a) 无补偿; (b) 有光纤光栅色散补偿

Fig.2 Eye pattern of the 10 Gb/s signal after 80 km transmission; (a) Without dispersion compensation; (b) With dispersion compensation

梁的中心面重合。这样啾啾光纤光栅的周期沿光纤轴向向近似线性变化,从而获得色散系数的调整。由于光栅中心位置与悬臂梁中心面重合,不发生形变,因此基本上可以维持其反射谱的中心波长不变。设光栅与悬臂梁轴向以 ϕ 角固定,光栅轴向位置 z 与 y 的关系为 $y = z \tan \phi$ 。因此光栅经受的应变正比于光栅的轴向位置。固定在悬臂梁侧面的光纤光栅周期的调谐量为

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = (1 - \gamma)\epsilon = (1 - \gamma)(L - z) \left(\frac{3au}{2L^3} \right), \quad (1)$$

式中 Λ 为光纤光栅的周期; γ 为光弹系数,对于石英光纤为0.22; L 为悬臂梁的长度; a 为悬臂梁的厚度; $u = \Delta y$ 为悬臂梁弯曲时自由端($z = L$)在 y 方向移动的距离。设无外力作用时啾啾光纤光栅的周期 Λ_0 为

$$\Lambda_0 = \Lambda(0)(1 + qz), \quad (2)$$

式中 $\Lambda_0(0)$ 为 $z = 0$ 处的周期, q 为啾啾系数。利用(1)式和(2)式,当悬臂梁弯曲时的啾啾光栅周期 Λ' 可以导出为

$$\Lambda' = \Lambda(L_1)[1 + q(z - L_1)][1 + (1 - \gamma)(3u/L^2)z(1 - z/L) \sin \phi \cos \phi] \approx \Lambda(L_1)\{1 + [q + (1 - \gamma)(3au/LL^2)(1 - L_1/L)](z - L_1)\}, \quad (3)$$

式中粘贴角度取为 $\sin \phi = a/l$, l 为光栅区的长度,以获得大的调谐量。设光栅中点位于 $z = L_1$ 。相应的色散为

$$D = \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{2n_{\text{eff}}}{c\lambda_0[q + (1 - \gamma)(3au/LL^2)(1 - L_1/L)]}, \quad (4)$$

式中 c 为光速; n_{eff} 为光栅区光纤的有效折射率。因此,改变悬臂梁端点的位移 u ,可以对啾啾光纤光栅的啾啾系数进行线性调整,同时维持啾啾光纤光栅的中心波长基本不变。

为了获得对于悬臂梁弯曲的动态控制,必须监测其弯曲程度 u , 即位移的大小, 并以此提供作为动态色散补偿的闭环控制的信号。因此本文在同一悬臂梁的上表面, 固定另外一个窄线宽均匀光纤布拉格光栅(FBG₁)。随着悬臂梁的弯曲, 这一光纤光栅也将承受成比例的应变: $\epsilon = (a/2)/R$, 其中心波长也将随之移动。测量该光栅中心波长的移动就可以反映悬臂梁的形变, 因此可以直接作为色散补偿量的监控器件。这一闭环控制动态色散补偿技术的原理如图 3 所示。图中也列出了相应的传感解调系统。解调系统由一个发光二极管(LED)宽带光源、一个 3 dB 光纤耦合器、一个匹配均匀光纤光栅 FBG2 和两个光电二极管 PD1, PD2 构成。FBG2 反射谱位于 FBG1 峰值波长的调谐范围内。由于传感和解调用光纤光栅均为窄线宽滤波器, 当采用宽带发光二极管作为光源时, PD1 和 PD2 的光电流信号可以写为

$$i_1 = \eta_1 \int_{\Delta\lambda} g(\text{LED})R(\text{FBG1})[1 - R(\text{FBG2})]d\lambda, \quad (5)$$

$$i_2 = \eta_2 \int_{\Delta\lambda} g(\text{LED})d\lambda, \quad (6)$$

这里 $R(\text{FBG1})$ 和 $R(\text{FBG2})$ 分别表示 FBG1 和 FBG2 的反射率, $g(\text{LED})$ 为发光管的强度谱, η_1 和 η_2 为光电转换效率。分别经过两路放大比较电路, 数据采集后在计算机内进行处理, 可以得到输出信号

$$\frac{i_1}{i_2} \propto \int_{\Delta\lambda} R(\text{FBG1})[1 - R(\text{FBG2})]d\lambda, \quad (7)$$

该信号与事先标定、记录在微处理器(PC)的数据作差分, 给出驱动步进电机的信号, 使悬臂梁弯曲到所需要色散补偿的位置。

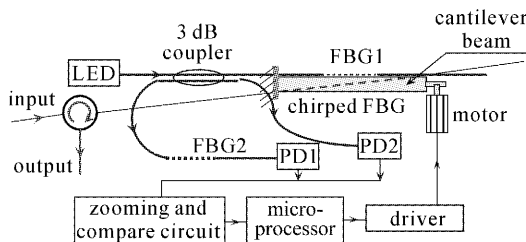


图 3 闭环控制动态色散补偿仪结构简图

Fig. 3 Schematic diagram of the close-loop controlled fiber grating dynamic dispersion compensator

3 实验结果

实验中, 采用一根长度为 10 cm, 中心波长为

1552.5 nm, 啁啾率为 $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 的布拉格光纤光栅(CFBG), 用环氧树脂胶斜贴于一根硬铝悬臂梁的侧面, 作为色散补偿的器件; 啁啾光纤光栅的中点与悬臂梁的中心面重合。悬臂梁的尺寸为 $20 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$; 其一端固定, 另一端与步进电机相连, 可以作上下位移。另一根均匀光纤布拉格光栅(FBG1)粘贴在同一悬臂梁的上表面上, 作为色散补偿量的监控器件; 其中心波长为 1548.84 nm。解调用均匀光纤光栅(FBG2)的中心波长为 1547.98 nm, 位于 FBG1 反射谱的应力调谐范围内。监控系统的光源采用 1550 nm 波段发光二极管。两个光接收器 PD1 和 PD2 的输出信号进入放大比较反馈电路中, 并由计算机采集数据, 进行比较处理。从而控制步进电机驱动器, 自动地调节悬臂梁的侧移距离, 以达到色散补偿量大小的闭环自动控制。

通过计算机控制步进电机驱动器, 得到一组啁啾光纤光栅的反射谱, 如图 4(a) 所示, 其响应的带宽和中心波长的变化如图 4(b) 所示。从实验数据来看, 啁啾光纤光栅的中心波长仍有约为 0.05 nm 的漂移。这一漂移在实际应用的容许范围内。

由(7)式给出的控制信号一般不是悬臂梁应变的线性函数, 它们之间的函数关系必须对于不同的

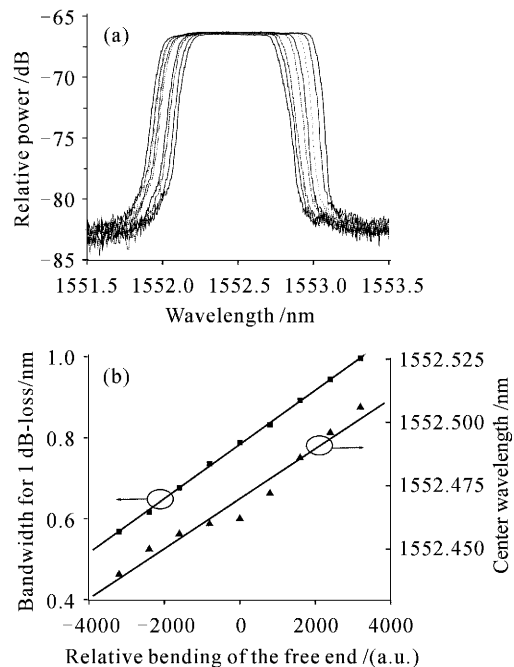


图 4 啁啾光纤光栅的调谐曲线。

(a) 反射谱; (b) 3 dB 带宽和中心波长随外加应力的变化
Fig. 4 Tuning curve of the chirped fiber grating.
(a) Reflection spectrum; (b) 3 dB band width and center wavelength with bending of the beam

光纤光栅、不同的封装条件,各自进行标定,并存储在计算机(或单片机)内。色散补偿仪的计算软件将在运行时随时调用。该计算软件还可以在仪器启动时,对悬臂梁某个设定的应变范围进行扫描,作为仪器的自检,以消除环境因素变化带来的系统误差。

用光纤光谱分析仪、光功率计等测试仪器,对建立的光纤光栅动态色散补偿仪进行了测量。测量得到的典型数据如下:色散补偿动态可调范围为 $-1000\sim-1680$ ps/nm;在闭环控制的情况下,以 60 ps/nm为步长的步进响应时间为 42 ms;插入损耗为 1.36 dB。

4 结 论

本文采用的闭环控制动态色散补偿方法具有如下优点:1) 传感光纤光栅和色散补偿啁啾光纤光栅粘贴在同一悬臂梁上,其效应由同一应变产生,数据直接可靠;2) 两种光纤光栅的制作和固定封装的工艺相同,简单易行;3) 采用光纤光栅传感控制,与通信系统的兼容性良好,成本低廉。

测试表明,色散补偿仪的工作波段、色散补偿量的大小、插入损耗、动态补偿量的范围和响应时间的测试,能满足 10 Gb/s光纤通信系统中色散动态补偿的要求。

致谢 感谢陈高庭研究员、蔡海文博士、李琳博士、陈刚博士、耿健新高工等在实验中给予的诸多帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- 1 Li Lin, Zhao Ling, Luo Aiping *et al.*. Dispersion power penalty induced by chirped fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 515~517
李琳,赵岭,罗爱平等. 啁啾光纤光栅引起的系统色散功率代价 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 515~517
- 2 N. Takeda, S. Ryu, S. Akiba. 2.5 Gbit/s, 8 channel, 1056 km densely spaced coherent WDM transmission experiment [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10): 907~908
- 3 Jae-Hoon Jung, Sang-Yung Shin, Chang-Hee Lee. Effects of pre-chirping on the repeaterless dispersion managed transmission system [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(9): 831~833
- 4 A. H. Gnauck, R. M. Jopson, P. P. Iannone *et al.*. Transmission of two wavelength-multiplexed 10 Gbit/s channels over 560 km of dispersive fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(9): 727~728
- 5 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 847~849
- 6 W. H. Loh, R. I. Laming, N. Robinson *et al.*. Dispersion compensation over distances in excess of 500 km for 10-Gb/s systems using chirped fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **8**(7): 944~946
- 7 Pei Li, Jian Shuisheng, Yan Fengping *et al.*. Research on the 4×10 Gb/s 400 km dispersion compensation by chirped optical fiber grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(3): 615~619
裴丽,简水生,延凤平等. 4×10 Gb/s 400 km 啁啾光纤光栅色散补偿研究 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(3): 615~619
- 8 Pei Li, Jian Shuisheng, Xie Zenghua *et al.*. Dispersion compensation optical fiber grating with low ripple coefficient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 336~339
裴丽,简水生,谢增华等. 低纹波系数色散补偿光纤光栅的研究 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 336~339
- 9 B. J. Egglton, A. Ahuja, P. S. Westbrook *et al.*. Integrated tunable fiber gratings for dispersion management in high-bit rate systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(10): 1418~1432
- 10 T. Imai, T. Komukai, M. Nakazawa. Dispersion tuning of a linearly chirped fiber Bragg grating without a center wavelength shift by applying a strain gradient [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 845~847