

文章编号: 0258-7025(2001)07-0625-04

# 利用均匀光纤光栅进行色散补偿的 数值分析和实验研究<sup>\*</sup>

李建新 夏月辉 陈 雪 黄永清 任晓敏

(北京邮电大学 66 # 北京 100876)

**提要** 介绍了利用均匀光纤光栅的透射色散特性进行色散补偿的机理,对其色散补偿效率作了数值模拟,并进行了利用均匀光纤光栅补偿色散的实验。通过与传统的啁啾光纤光栅色散补偿方案比较,得知利用均匀光纤光栅的透射色散特性进行色散补偿是一种行之有效的色散补偿方案。

**关键词** 光纤光栅,透射色散特性,色散补偿,可调谐

中图分类号 O 436.3 文献标识码 A

## Theoretical Analysis and Experimental Investigation of Dispersion Compensation in Transmission Using Uniform Fiber Bragg Gratings

LI Jian-xin XIA Yue-hui CHEN Xue HUANG Yong-qing REN Xiao-min

(Beijing University of Posts and Telecommunications 66 #, Beijing 100876)

**Abstract** The principle of dispersion compensation in transmission using uniform fiber Bragg gratings is introduced. Its compensation efficiency is analyzed numerically and the experimental results are reported. It is well know that dispersion compensation in transmission using uniform fiber gratings is a better and more effective compensation scheme comparing with traditional dispersion compensation using chirped fiber gratings.

**Key words** fiber grating, transmission dispersion properties, dispersion compensation, tunable device

光纤光栅作为一种新的无源光器件,近年来得到了广泛的应用,例如用作色散补偿器、滤波器、波分复用系统中的解复用器以及用于光纤激光器<sup>[1-3]</sup>。在色散补偿中,较为成熟的方法是利用啁啾光纤光栅。其机理是不同波长的光在光纤光栅的不同部位反射,从而经历不同的时延,达到色散补偿的目的<sup>[4]</sup>。其实,早在 1982 年,Lam 等就从理论上提出可以利用均匀光纤光栅反射带隙附近的强色散(色散系数约为普通光纤的  $10^5 \sim 10^6$  倍)在透射中(而非反射中)进行色散补偿<sup>[5]</sup>。但由于 F-P 腔效应所造成的反射带隙外振荡的影响,这种方法一直未受到人们的重视。最近,随着光纤光栅切趾技术的成熟,人们已经可以消除反射带隙外的几乎所有振荡,这使得利用均匀光纤光栅进行透射型色散补偿再次得到重视。国外利用均匀光纤光栅已经成功实

现了 10 Gbit/s 信号传输 72 km 后的色散补偿<sup>[6]</sup>。但在国内,这方面的研究还较少,而且仅仅局限于理论探讨<sup>[7,8]</sup>。本文报道了利用均匀光纤光栅的透射色散特性进行色散补偿的实验结果。在实验中,我们分别利用 11.1 km 和 22.2 km 光纤,将 114.5 ps 的光脉冲(相当于近 10 GHz 的信号)展宽至 191.2 ps 和 257.8 ps,又利用同一支均匀光纤光栅将其分别补偿压缩至 125.8 ps 和 147.2 ps。实验结果表明,这种色散补偿方法具有可调谐的特性。最后,通过将这种色散补偿方法与传统的啁啾光纤光栅色散补偿方法进行比较,得知利用均匀光纤光栅的透射色散特性进行色散补偿是一种行之有效的方案。

### 1 利用均匀光纤光栅的透射色散特性进行色散补偿的原理

在均匀光纤光栅中,利用耦合模理论,可得出透射光场满足的色散关系<sup>[9-11]</sup>

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(编号 69625101)资助项目。

收稿日期 2000-04-06;收到修改稿日期 2000-07-19

$$\omega = \frac{c}{\bar{n}} \left[ \frac{\pi}{d} \pm \sqrt{\left(k - \frac{\pi}{d}\right)^2 + \kappa^2} \right] \quad (1)$$

式中  $\omega$  为光纤光栅中传输的光场频率,  $c$  为光速,  $\bar{n}$  为平均折射率,  $d$  为光栅周期,  $k$  为介质中的波数,  $\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda_B}$  为耦合系数。

(1)式也可用图1表示,其中实线表示光纤光栅中正向传输的波,虚线表示无光栅结构的情况(即普通光纤  $\kappa = 0$ )。考虑到普通光纤的色散较光纤光栅色散小得多,故绘图时忽略了光纤本身的固有色散。两条曲线极值点间的距离

$$-\kappa \leq \delta \leq \kappa \quad (2)$$

被定义为反射带隙<sup>[9]</sup>,因为频率处于该范围内的光会由于强烈反射而不能在光纤光栅中稳定存在(传输)。数学上表现为  $\epsilon_{\pm}$  无稳定实数解。

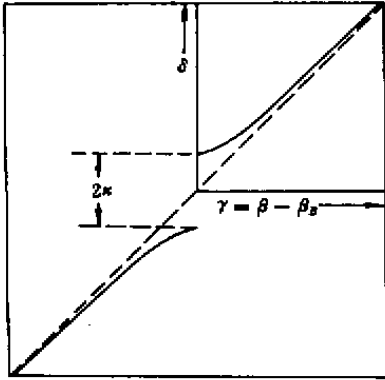


图1 光纤光栅在反射带隙附近的色散曲线

(图中  $\delta = n(\omega - \omega_B)/c$  是信道载频  $\omega$  同 Bragg 谐振频率  $\omega_B$  的偏移,  $\gamma = \beta - \beta_B$  是传输常数  $\beta$  同 Bragg 波数  $\beta_B$  的偏移)

Fig.1 Illustration of the dispersion relation (1) being close to the photonic band gap of a uniform grating

( $\delta = n(\omega - \omega_B)/c$  represents the deviation of the frequency from the Bragg frequency, while  $\gamma = \beta - \beta_B$  is the deviation of the wavenumber)

由以上分析可知,在均匀光纤光栅中存在一个  $\Delta\lambda$  (可称之为反射带宽),波长处于这一范围内的光会被强烈反射。光纤光栅的绝大多数应用也正基于这一性质。在处理离开反射带隙的光信号时,人们往往认为光纤光栅此时和普通光纤没有区别。当然,这对于波长远离反射带隙的信号是正确的;但当波长离开反射带隙很近(距离约和反射带宽同样数量级)时,光信号虽然会通过光纤光栅,但同时会经历一个极强的色散(色散系数约为普通光纤的  $10^5 \sim 10^6$  倍)<sup>[9]</sup>。这从(1)式和图1可以看出。设光纤光栅反射带隙外色散系数为  $\beta_2^g$ ,由(1)式知

$$\beta_2^g = \frac{d^2 k}{d\omega^2} = -\kappa^2 \frac{\bar{n}^2}{c^2} \frac{1}{\left(k - \frac{\pi}{d}\right)^3} \quad (3)$$

图2给出了在给定光纤光栅参数  $\kappa$  和  $d$  的情况下  $\beta_2^g$  同波数  $k$  的关系。可以看出,  $\beta_2^g$  在传输波长靠近反射带隙时很大。如果我们光脉冲传输的信道中放置一个参数合适的光纤光栅,使得信号波长  $\lambda$  位于此光纤光栅的反射带隙外附近且  $k_B < k$  (即  $\lambda > \lambda_B$ ) 则此时  $\beta_2^g$  为正,可用于补偿光纤传输过程中形成的负色散。显然,为使补偿效率在理论上达到最高,须有下式成立

$$\beta_2^f L_f = -\beta_2^g L_g \quad (4)$$

式中  $\beta_2^f$  由(3)式给出,  $L_g$  为光纤光栅长度,  $\beta_2^f$  为光纤信道的色散(一般为  $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ),  $L_f$  为色散补偿前光脉冲在光纤中的传输距离。

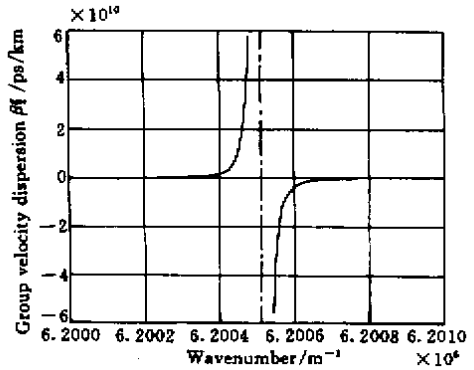


图2 光纤光栅中的群速度色散  $k_2^g$  (对应参数为  $\kappa = 300 \text{ m}^{-1}$ ,  $\bar{n} = 1.5$ ,  $\lambda_B = 1551 \text{ nm}$ )

Fig.2 Group velocity dispersion  $k_2^g$  in a fiber grating with  $\kappa = 300 \text{ m}^{-1}$ ,  $\bar{n} = 1.5$ ,  $\lambda_B = 1551 \text{ nm}$

## 2 实验过程和结果

实验系统如图3所示。实验中采用 HP 8647A 信号发生器(调制频率为  $250 \text{ kHz} \sim 1000 \text{ MHz}$ ),中心波长为  $1551.3 \text{ nm}$  的分布反馈布喇格(DFB)激光器, CT-84 型控温仪, MPS-603H  $35\text{V}/20\text{A}$  电源, HP 83480A 数字通信分析仪(作为示波器使用), AQ-6315B 光谱仪。光纤为普通的通信用 G.652 光纤。

用  $10 \text{ GHz}$  的信号发生器调制 DFB 激光器,使之产生  $100 \text{ ps}$  左右的窄脉冲,经过一段光纤传输后,脉冲展宽,再经过已设计好参数的均匀光纤光栅后,脉冲被补偿压缩。通过调节加在压电陶瓷(PZT)上的电压,可使固定在压电陶瓷上的光纤光栅中心波长发生移动,从而符合实验要求。在 A, B, C 三个测量点,可以分别测量光脉冲在未经光纤传输、经过光

纤传输和经过色散补偿后的脉冲形状和光谱。实验结果如下。

图4(a)(b)分别为从DFB激光器出来的脉冲形状和光谱图(即图3中A点的测量结果)。为

了更容易地观察到色散展宽,选择较宽光谱的光源。

经过11.1 km的光纤传输后,测量结果如图5所示(即在图3中B点的测量结果)。可以看出,由于光纤色散,脉冲展宽至191.2 ps。

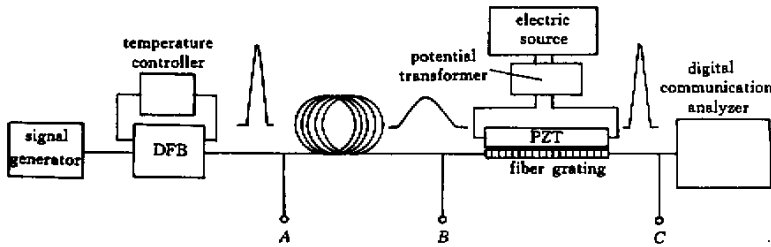


图3 利用均匀光纤光栅进行色散补偿的实验框图

Fig.3 Schematic of the experimental setup used in the dispersion compensation experiments discussed in the text

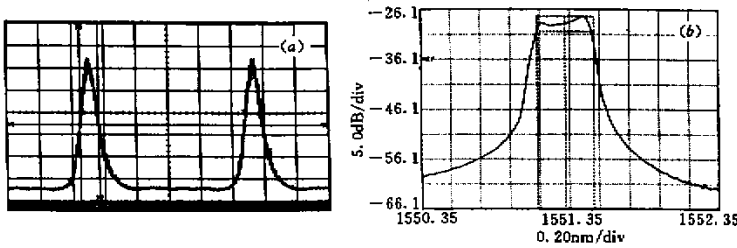


图4 从激光器输出的初始脉冲形状(a)和光谱(b)

Fig.4 Initial shape(a) and spectrum(b) of the pulse from the DFB laser

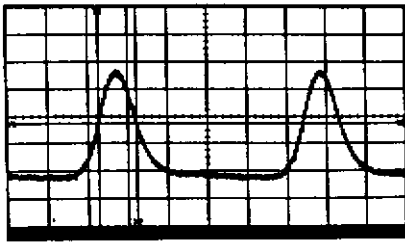


图5 经11.1 km 光纤传输后的脉冲形状

Fig.5 Shape of the pulse after 11.1 km transmission

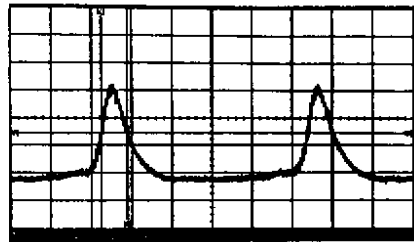


图6 经均匀光纤光栅色散补偿后的脉冲形状

Fig.6 Shape of the pulse after dispersion compensation by the uniform fiber grating

把展宽后的脉冲注入光纤光栅一端,在另一端用示波器观察经色散补偿后的情形,调节加在压电陶瓷上的电压使光纤光栅中心波长移动,直至示波

器上显示的脉冲最窄。此时脉冲形状如图6所示(即在图3中C点的测量结果)。光纤光栅达到最佳中心波长时的透射谱如图7所示。

从图6看出,利用光纤光栅已把展宽至191.2 ps的脉冲补偿压缩至125.8 ps。

利用这种补偿方法,还进行了22.2 km 光纤的传输色散补偿实验,结果如图8和图9所示。可以看出,脉冲被恢复至147.2 ps。

在这两个实验中用的都是同一支光纤光栅,在实验过程中通过调节加在压电陶瓷上的电压来改变光纤光栅的中心波长使之补偿效率最高。由此可以看出,这种色散补偿方法具有可调谐的特性。图10给出了通过改变光纤光栅的 Bragg 中心波长以改变

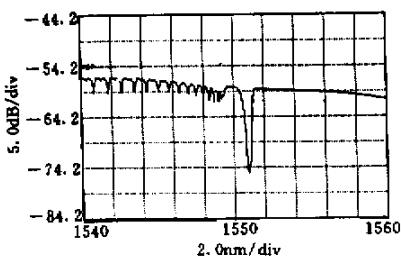


图7 达到最佳补偿效果时光纤光栅的透射谱

Fig.7 Transmission spectrum of the fiber grating at the point when the dispersion compensation is the best

光纤光栅透射色散系数的数值模拟结果。

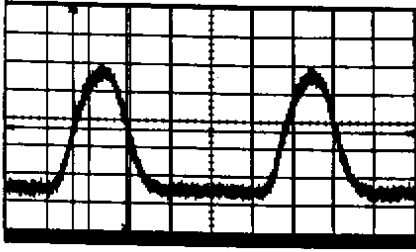


图 8 经 22.2 km 光纤传输后的脉冲形状

Fig.8 Shape of the pulse after 22.2 km transmission

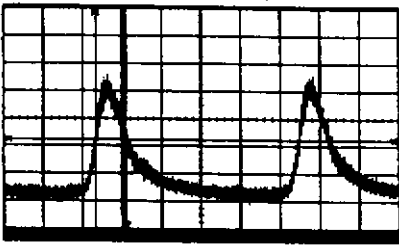


图 9 经均匀光纤光栅色散补偿后的脉冲形状

Fig.9 Shape of the pulse after dispersion compensation by the uniform fiber grating

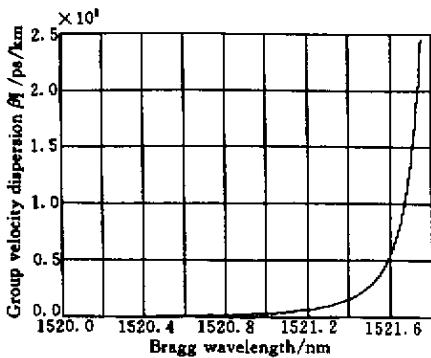


图 10 在同一信号波长  $\lambda = 1551.3 \text{ nm}$  下光纤光栅色散系数  $\beta_2$  同 Bragg 波长的关系

(对应参数为  $\kappa = 300 \text{ m}^{-1}$ ,  $\bar{n} = 1.5$ )

Fig. 10 Relationship between dispersion parameter  $\beta_2$  and Bragg wavelength with the same signal wavelength  $\lambda = 1551.3 \text{ nm}$

(corresponding parameters of the fiber grating are  $\kappa = 300 \text{ m}^{-1}$ ,  $\bar{n} = 1.5$ )

### 3 两种色散补偿方案的比较

均匀光纤光栅色散补偿较啁啾光纤光栅色散补偿具有以下优点：

1) 省去了环形器(或方向耦合器),从而使补偿系统成本低,结构简单,易于维护;2)降低了光纤光栅器件的制造难度。虽然对于用于色散补偿的光纤光栅来说,切趾要求较高,但较制造啁啾光纤光栅来说

难度还是容易得多;3)减小了补偿系统的损耗。利用啁啾光纤光栅进行色散补偿时,在反射和耦合过程中会有器件的插入损耗(约为 2~6 dB)。这在均匀光纤光栅色散补偿系统中可以避免;4)容易实现色散的调谐。在我们的实验系统中已经实现了色散的调谐补偿(用同一支光纤光栅补偿了经 11.1 km 和 22.2 km 传输的色散);5)可较容易地用于波分复用(WDM)系统中多信道色散的在线补偿。将几段参数适当的均匀光纤光栅级联起来,处于两段光纤光栅的反射带隙之间的信道可以得到色散补偿,而这两段光纤光栅对于其他信道的的影响可以忽略(这是由于其他信道已远离这两段光纤光栅的反射带隙)。

### 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**:1263~1274
- 2 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1391~1404
- 3 Ren Xiaomin, Zhang Lintao, Ye Peida. Experimental study on fiber-grating Bragg reflectors. *Selected Papers of BUPT*, 1992. 32~37
- 4 F. Ouellette. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10):847~849
- 5 D. K. W. Lam, B. K. Garside, K. O. Hill. Dispersion cancellation using optical-fiber filters. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6):291~293
- 6 B. J. Eggleton, T. Stephens, P. A. Krug *et al.*. Dispersion compensation using a fiber grating in transmission. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(17):1610~1611
- 7 He Jinlin, Wang Jinsong, Sun Xiaohan *et al.*. A novel dispersion compensator using Bragg Fiber Grating. *Journal of Southeast University* (东南大学学报), 1998, **28**(6):40~43 (in Chinese)
- 8 Liu Weiping, Du Ge, Liao Changjun *et al.*. Transmission-based fiber grating compensation for optical pulse dispersion broadening. *Semiconductor Optoelectronics* (半导体光电), 1999, **20**(4):258~261 (in Chinese)
- 9 C. Martijn de Sterke, N. G. Raphael Broderick, B. J. Eggleton *et al.*. Nonlinear optics in fiber gratings. *Journal of Fiber Technology*, 1996, **2**:253~268