

文章编号: 0258-7025(2003)06-0515-03

# 啾啾光纤光栅引起的系统色散功率代价

李琳, 赵岭, 罗爱萍, 蔡海文, 陈高庭, 方祖捷  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 分析了啾啾光纤光栅对光脉冲信号的作用, 计算光脉冲经过一定距离传输并由啾啾光纤光栅进行色散补偿后的脉冲展宽情况, 同时分析啾啾光纤光栅群时延抖动对系统色散代价的影响。在系统色散功率代价一般要小于 1 dB 的条件限制下给出啾啾光纤光栅群时延抖动的幅度、周期与系统单信道速率这三个参量之间存在相互关系。

**关键词** 光纤通信技术; 啾啾光纤光栅; 功率代价; 群时延抖动

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

## Dispersion Power Penalty Induced by Chirped Fiber Grating

LI Lin, ZHAO Ling, LUO Ai-ping, CAI Hai-wen, CHEN Gao-ting, FANG Zu-jie  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In this paper, the effects of chirped fiber grating on optical pulse was analyzed, calculating the broadening of optical pulses after propagating through a certain fiber span and then compressed by a chirped fiber grating, considering the influence those ripples on increasing dispersion power penalty. According to the requirement that dispersion power penalty should be less than 1dB, the relationship between maximum amplitude, period of GVD ripples and system bit rate was investigated.

**Key words** fiber communication technique; chirped fiber grating; power penalty; group velocity delay ripple

由于高速光通信系统的速率不断提高, 系统对于累积色散的容纳量越来越小, 例如下一代 40 Gb/s 系统的色散容纳量为 60 ps 左右<sup>[1]</sup>, 因而色散补偿问题又成为研究的热点。为了更准确地控制色散补偿量大小, 以适应系统对于累积色散限制, 各种动态色散补偿器件纷纷出现。啾啾光纤光栅作为色散补偿元件, 应用于高速密集波分复用系统, 具有优于其他色散补偿方法的特点, 而且啾啾光纤光栅在应力和温度控制下, 容易实现动态调谐功能, 因而研究啾啾光纤光栅在色散补偿领域的应用具有重要意义。但是由于光栅结构设计上的不完善或者由于制作工艺上的误差, 啾啾光纤光栅的群时延谱不是理想的线性, 而存在一种周期性的抖动。这种光栅响应谱的抖动会造成码间串扰和码间能量重新分布, 影响系统的传输质量<sup>[2]</sup>。本文从啾啾光纤光栅对光脉冲的作用出发, 分析啾啾光纤光栅的群时延抖动对于高速光通信系统的影响。

## 1 啾啾光纤光栅的群时延抖动

啾啾光纤光栅的光栅周期沿轴向呈缓慢变化, 在不同位置反射不同的波长, 使得不同的波长都有一定的延时。但是多种因素造成啾啾光纤光栅的群时延曲线不是理想线性曲线, 而是线性曲面上面叠加振荡曲线。图 1 是啾啾光纤光栅的典型群时延图, 可以看到群时延曲线近似线性分布, 但是曲线上有许多振荡小峰, 又称为抖动。形成这种效应的原因较多, 如光纤光栅的制作误差以及光纤光栅自身的色散特性等等。这些抖动小峰在局部范围内, 可以近似采用正弦函数来描述<sup>[3,4]</sup>, 从而啾啾光纤光栅的群时延  $\tau$  可以表示为

$$\tau = \tau_0 + D_0 \cdot \lambda + \delta\tau \cdot \sin(2\pi N p) \quad (1)$$

相应色散数值为(单位 ps/nm)

$$D_g = \frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = D_0 + \frac{2\pi \cdot \delta\tau}{p} \cdot \cos(2\pi N p) \quad (2)$$

收稿日期: 2002-04-09; 收到修改稿日期: 2002-05-16

**作者简介:** 李琳(1975—), 女, 中国科学院上海光学精密机械研究所在读博士生。1998年毕业于武汉大学, 主要从事光纤光栅的研究, 包括用于色散补偿的啾啾光纤光栅、取样光栅等。E-mail: lilingkate@sina.com

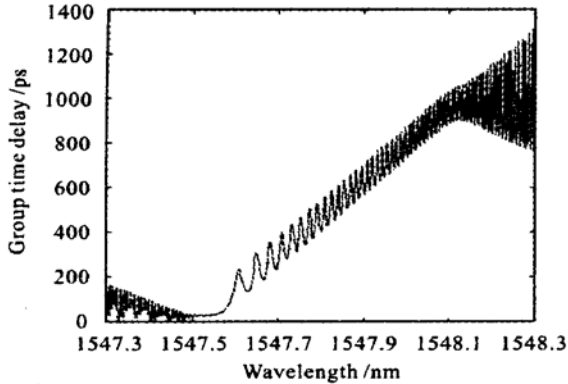


图 1 啁啾光纤光栅的群时延曲线

Fig. 1 Group velocity delay of a chirped fiber grating

其中  $\tau_0$  为初始群时延,  $D_0$  为一阶色散数值,  $\delta\tau$  为群时延抖动幅度,  $p$  为群时延抖动周期,  $2\pi/p$  为群时延抖动频率。

## 2 啁啾光纤光栅对于光脉冲的作用

非线性薛定谔方程描述了光脉冲在光纤介质中的传播演化过程。当光纤传输距离远小于非线性长度时, 只需考虑光纤的损耗和色散, 可以忽略非线性效应。不妨设光纤跨度为  $L_f$ , 色散数值为  $D_f$  (单位 ps/nm/km), 输入光脉冲为高斯型, 经过光纤介质传输后, 输出脉冲  $U(t)$  表示如下

$$U(t) = \frac{u_0}{\sqrt{\sigma}} \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2T_0^2 \cdot \sigma^2}\right] \quad (3)$$

$$\sigma = \left[1 + \left[\frac{\lambda^2 D_f L_f}{2\pi c \cdot T_0^2}\right]^2\right]^{1/2} \quad (4)$$

其中  $u_0$  为输入脉冲幅度,  $T_0$  为输入高斯脉冲的脉冲宽度,  $c$  为光速,  $\sigma$  定义为光脉冲的展宽因子, 即输出脉冲的脉宽与输入脉冲的脉宽之比。由于  $\sigma$  与光纤传输距离  $L_f$  有关, 显然传输距离越远, 高斯脉冲的展宽越严重。

在高速系统中, 啁啾光纤光栅是用来补偿长距离光纤传输系统产生的正色散。那么, 光脉冲在经历光纤系统和啁啾光纤光栅后, 其光脉冲的展宽因子可以写为

$$\sigma = \left[1 + \left[\frac{\lambda^2(D_f L_f + D_g)}{2\pi c \cdot T_0^2}\right]^2\right]^{1/2} \quad (5)$$

在理想情况下, 啁啾光纤光栅的群时延抖动为零,  $\delta\tau = 0$ 。此时, 当啁啾光纤光栅的负色散正好等于光纤系统产生的正色散, 即  $D_f L_f + D_0 = 0$ , 那么  $\sigma = 1$ , 光脉冲不存在展宽; 当啁啾光纤光栅的负色

散大于光纤系统产生的正色散, 即过补偿, 或者啁啾光纤光栅的负色散小于光纤系统产生的正色散, 即不够补偿, 都将使得光脉冲发生一定的展宽。

## 3 群时延抖动引起系统色散功率代价

在单模光纤传输系统中, 光纤色散导致光脉冲展宽, 产生码间干扰, 引起系统性能损伤, 需要增加接受光功率才能维持原有的误码率水平。一般定义色散所致的接受机灵敏度的劣化量称为色散功率代价<sup>[1]</sup>。在数学表达上, 色散功率代价是不存在色散时接受端输入功率比上存在色散时接受端输入功率<sup>[5]</sup>的分贝数值(dB), 即

$$\alpha_{\text{ISI}} = 10 \times \log(P_0/P_{\text{dc}}) \approx 5 \times \log \sigma \quad (6)$$

考虑由一段光纤和啁啾光纤光栅组成的传输系统, 在忽略啁啾光纤光栅群时延抖动的影响时, 色散引入的功率代价为

$$\alpha_{\text{ISI}}^{\text{ideal}} = 2.5 \times \log\left[1 + \left[\frac{\lambda^2(D_f L_f + D_0)}{2\pi c \cdot T_0^2}\right]^2\right] \quad (7)$$

特别是啁啾光纤光栅正好补偿光纤的累积色散时,  $\alpha_{\text{ISI}}^{\text{ideal}} = 1$ , 光脉冲没有展宽。但实际上啁啾光纤光栅群时延抖动不能完全消除, 那么即使在正好补偿条件下, 光脉冲仍然存在一定的宽度, 由此引入的色散功率代价可以表示为

$$\alpha_{\text{ISI}}^{\text{ripple}} = 2.5 \times \log\left[1 + \left[\frac{\lambda^2 \cdot \delta\tau \cdot \cos(2\pi\lambda/p)}{p \cdot c \cdot T_0^2}\right]^2\right] \quad (8)$$

脉冲展宽使得相邻两个比特位出现交叠, 降低信号的信噪比。在系统接受机灵敏度可允许波动的范围内, 系统色散功率代价至多为 1 dB。为了显示信号比特率对于色散功率代价的影响, 将理想矩形脉冲和高斯脉冲由面积等效法联系起来, 即  $T_0(2\pi)^{1/2} = B$ , 就可以得到啁啾光纤光栅的群时延抖动幅度极大值  $\delta\tau_{\text{max}}$  必须满足的限制条件

$$\delta\tau_{\text{max}} = \frac{0.122 \cdot c \cdot p}{\lambda^2 \cdot B^2} \quad (9)$$

(9) 式表明, 在色散功率代价小于 1 dB 的条件限制下,  $\delta\tau_{\text{max}}$  与  $p$  及光信号速率  $B$  有关。图 2 给出在  $B$  等于 2.5 Gb/s, 10 Gb/s 和 40 Gb/s 时, 群时延抖动幅度极大值随群时延抖动周期的变化。从图中比较可知, 光信号速率越低, 即使群时延抖动周期较小, 对于群时延抖动幅度的限制也比较宽, 这也是在低速系统中群时延抖动对于光纤光栅色散补偿效应的影响可以忽略的原因; 当光速率达到高速传输时, 群

时延抖动幅度的限制随着群时延抖动周期的减小而减小,同时 40 Gb/s 系统中群时延抖动幅度的限制约为 10 Gb/s 系统中的 16 倍,这也是在高速系统中群时延抖动不能再忽视的原因。

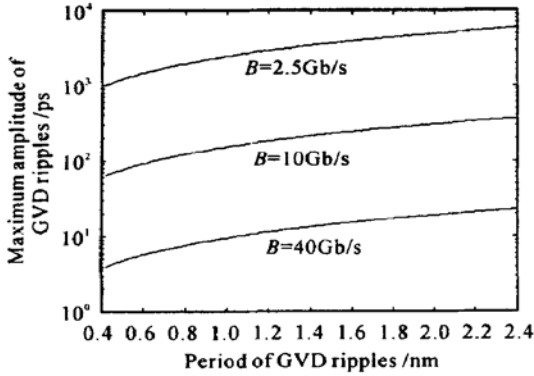


图 2 群时延抖动幅度极大值随群时延抖动周期的变化  
Fig. 2 Variation of maximum amplitudes of GVD ripples according to the period of it

然而在实际应用中还要考虑光源光谱的影响。上述讨论都是基于光脉冲宽度和光谱宽度符合傅里叶变换极限的关系,所以没有考虑光谱分布。但在实际光谱宽度大于傅里叶变换极限下的光谱宽度时,就必须考虑光源光谱分布对于接受机灵敏度的影响。由于啁啾光纤光栅的群时延抖动周期较小,抖动小峰分布密集,对于系统影响将是一个平均作用,因而有必要考虑光脉冲光谱分布。

不妨假设光信号脉冲光谱具有高斯分布,接受端探测到的光强为

$$P(t) = \int_{\lambda-\Delta}^{\lambda+\Delta} \frac{\exp[-(\lambda-\lambda_0)^2/2\Delta^2]}{\Delta\sqrt{2\pi}} |U(\lambda,t)|^2 d\lambda \tag{10}$$

其中  $\lambda_0$  为光信号的中心频率,  $\Delta$  为光信号光谱的宽度.将(3) 式代入化简得

$$P(t) = \int_{\lambda_0-\Delta}^{\lambda_0+\Delta} \frac{p_0 \cdot T_0^2 \exp[-(\lambda-\lambda_0)^2/2\Delta^2]}{\Delta\sqrt{2\pi} \cdot \sigma^2} \times \exp\left[-\frac{t^2}{T_0^2 \sigma^2}\right] \cdot d\lambda \tag{11}$$

其中  $p_0$  为输入光信号的功率。图 3 是计算机模拟结果,在速率为 2.5 Gb/s 的系统中,输入光脉冲的脉冲宽度设定为 0.4 ns,光谱宽度设定为 0.2 nm,当群时延抖动周期分别为 0.02 nm, 0.01 nm 和 0.005 nm 时,色散功率代价随着群时延抖动幅度极大值的增加而增大;同时色散功率代价也随着群时延抖动密集化而逐步变大。图 3 也给出了傅里叶变

换极限下色散功率代价的变化(空心标记),显然其数值要比考虑光谱分布的相应数值相对小些,由此可见啁啾光纤光栅的群时延抖动会增加色散功率代价,平滑群时延抖动或者减小群时延抖动密集度都可以减小因此而引入的色散功率代价。

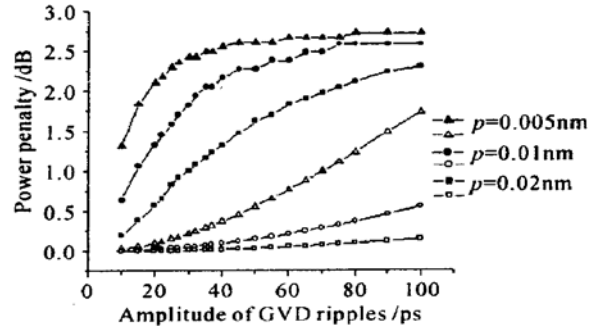


图 3 群时延抖动周期分别为 0.02 nm, 0.01 nm 和 0.005nm 时色散功率代价随群时延抖动幅度的变化  
Fig. 3 Variation of power penalty according to amplitude of GVD ripples, when setting period of GVD ripples for 0.02, 0.01 and 0.005 nm, respectively

### 4 结 论

在系统接受端灵敏度允许范围内,色散功率代价需要限制在 1 dB 以内,在这种限制条件下啁啾光纤光栅群时延抖动幅度极大值与周期在理论上需要受到相互制约。例如在 10 Gb/s 系统中群时延抖动幅度需小于抖动周期的 0.122 倍。当光脉冲的光谱宽度超出傅里叶变化极限时,就需要考虑光谱分布这一因素。此时,色散功率代价随群时延抖动幅度的变化趋势与不考虑光谱分布情况下的变化趋势相似,但是相应的色散功率代价数值明显增加。这说明啁啾光纤光栅的群时延抖动加剧光信号的劣化,影响了系统色散补偿效果。

### 参 考 文 献

- 1 Wei Leping. Optical Synchronous Digital Transport Networks [M]. 2nd edition, Beijing: People Telecommunication Publishing House, 1998 (in Chinese)
- 2 Valeria Gusmeroli, Danilo Scarano. Fiber Grating Dispersion Compensators [C]. OFC' 99, paper: FA4: 11~ 13
- 3 S. G. Evangelides, Jr., N. S. Bergano, C. R. Davidson. Intersymbol Interference Induced by Delay Ripple in Fiber Bragg Gratings [C]. OFC' 99, paper: FA2: 5~ 7
- 4 K. Ennsner, M. Ibsen, M. Durkin et al.. Influence of nonideal chirped fiber Grating characteristics on dispersion cancellation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10 (10): 1476~ 1478
- 5 Govind P. Agrawal, P. J. Anthony, T. M. Shen. Dispersion penalty for 1.3-μm lightwave systems with multimode semiconductor lasers [J]. J. Lightwave Technol., 1988, 6(5): 620~ 624