

# $4 \times 10\text{Gb/s}$ 400km 啁啾光纤光栅色散补偿研究<sup>\*</sup>

裴 丽 简水生 延凤平 宁提纲 简 伟 李唐军

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2001 年 12 月 12 日收到 2002 年 7 月 28 日收到修改稿)

介绍了利用光纤光栅成功实现了  $4 \times 10\text{Gb/s}$  400km G.652 光纤的色散补偿, 各信道传输部分在误码率为  $10^{-10}$  时, 无误码传输的功率代价均小于 2dB, 且最好的功率代价为负值.

关键词: 光纤光栅, 色散补偿, 功率代价

PACC: 4281D, 4281, 4230Q

## 1. 引 言

随着光器件和系统技术的不断发展, 以及人们对带宽技术的永无止境的追求, 光网络面临着不断的挑战. 光纤将承载更多波长、更高光功率、更高传输速率、更远距离. 随着传输速率的提高, 人们开始认识到解决光纤色散问题的重要性<sup>[1,2]</sup>.

对于普通的单模光纤 (G.652 光纤), 在最低损耗窗口  $1.55\mu\text{m}$  处约有  $17\text{ps/nm} \cdot \text{km}$  的色散, 这将对高速光脉冲产生严重的展宽和畸变, 形成码间干扰, 从而限制了光纤通信向更高速率的发展. 为了解决色散的影响, 人们开始研究新结构的光纤, 研制出了零色散点位移到  $1.55\mu\text{m}$  处的色散位移光纤, 但由于非线性效应, 这种光纤在  $1.55\mu\text{m}$  最低损耗窗口不能实现波分复用, 这样色散位移光纤就不具备先进性. 于是出现了兼顾色散和非线性两种要素的折衷方案. 先后出现了 G.655A 光纤, 包括零色散点在  $1510\text{nm}$  左右的 True wave 光纤和 LEAF 光纤. 以及 G.655B 光纤, 即零色散点在  $1430\text{nm}$  左右的 Teralight 光纤和 PureGuide 光纤. 目前, 世界上大量铺设 G.655A 光纤, 但 G.655A 光纤在长距离的高速通信系统中仍然需要进行色散补偿, 而且很难实现通道间距为  $50\text{GHz}$  的 WDM 系统. 而 G.652 光纤在

$1.55\mu\text{m}$  窗口处的大色散可以有效地抑制非线性, 实现通道间距为  $50\text{GHz}$  的 WDM 系统的传输毫无问题. 全世界已敷设 G.652 光纤 2 亿多公里, 要想在 G.652 光纤上开通高速系统, 色散补偿是最为重要的关键问题之一.

目前, 最常用的色散补偿方法之一就是利用色散补偿光纤 (DCF) 来进行补偿, 但是 DCF 不仅造价昂贵, 而且除 Lucent 公司最新推出的 C 波段和 L 波段特殊设计的 DCF 来对其生产的 G.652 光纤和 G.655 (True wave RS) 光纤可实现色散和色散斜率的同时补偿, 大多数 DCF 的色散斜率不能与 G.652 光纤或 G.655 光纤完全匹配, 当某个波长的色散得到完全补偿时, 在其余波长就会形成残余色散, 且总的残余色散随传输距离的增加而加大. 并且由于 DCF 引入的插入损耗, 还需改进 EDFA 的性能与结构, 增加成本.

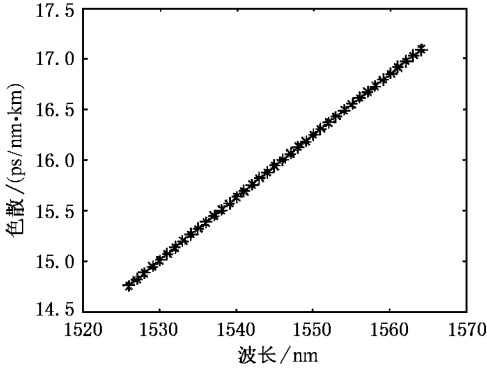
利用光纤光栅 (CFBG) 补偿 G.652 或 G.655 光纤的色散, 可以同时补偿色散和色散斜率, 是进行色散补偿应用前景非常好的一种方案, CFBG 与现有的光纤系统兼容性好、插入损耗小、价格低廉且易于进行大批量生产. 利用 CFBG 解决光纤色散补偿问题, 使人们在 G.652 光纤上成功开通速率  $10\text{Gb/s}$  以上的高速系统, 具有极大的经济价值和社会效益.

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金 (批准号 69877001 和 60077008) 及北方交通大学攀登基金资助的课题.

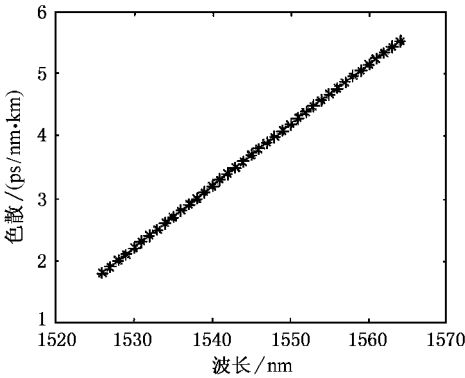
2. DCF 色散补偿所遇到的问题

本文做了深入的分析和研究,证明现有的 DCF 进行色散补偿存在如下缺陷:

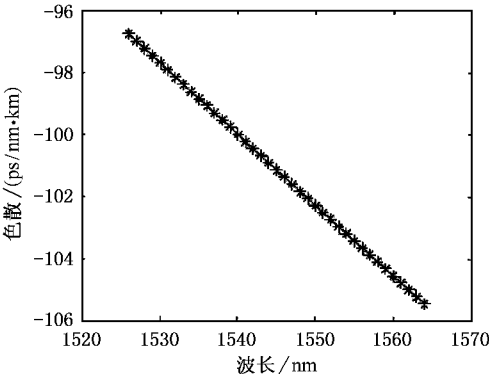
首先,目前的 DCF 造价昂贵;其次,实用化 DCF 的负色散在  $-100\text{ps/nm}\cdot\text{km}$  左右,损耗为  $0.6\text{dB/km}$ ,  $100\text{km}$  放大间隔需要十几公里的 DCF 来补偿,另外,



(a) G.652



(b) G.655



(c) DCF

图 1 C 波段光纤色散

由于 DCF 引入的插入损耗,还需改进 EDFA 的性能与结构,增加成本.再者,DCF 的色散斜率不易与 G.652 光纤或 G.655 光纤完全匹配,利用 DCF 来补偿光纤的色散,以  $80\text{km}$  一个中继段为准(分别采用光纤 G.652 和 G.655),如果采取中心点色散得到完全补偿,在三个波段的短波长与长波长均有很大的剩余色散,有的波长对两种光纤分别高达  $60$  和  $150\text{ps/nm}$ .如果要传输上千公里甚至数千公里的距离,则总的剩余色散可高达上千  $\text{ps/nm}$ ,甚至数千  $\text{ps/nm}$ .如果要传输更长距离,就必须研究几种不同斜率的 DCF 来补偿,这不仅使整个系统复杂化,而且价格将更为昂贵.

以下是我们的一些测试结果. G.652 光纤(Corning 公司 SMF-28)在 S 波段、C 波段、L 波段的色散斜率分别为  $0.09404, 0.0922, 0.0901\text{ps/nm}^2\cdot\text{km}$ ; G.655 光纤(LEAF 光纤)在这三个波段的色散斜率分别为  $0.0931, 0.1055, 0.1013\text{ps/nm}^2\cdot\text{km}$ . 而 DCF(Lucent 公司 TYPE DK-60)在这三个波段的色散斜率则分别为  $-0.33457, -0.3986, -0.3049\text{ps/nm}^2\cdot\text{km}$ . 以 C 波段为例,图 1 为 G.652 光纤、G.655 光纤和 DCF 的色散. 以  $80\text{km}$  一个中继段为准,如果采取中心点色散( $\lambda_{D=0} \approx 1545\text{nm}$ )得到完全补偿,图 2 给出 G.652 光纤和 G.655 光纤在 C 波段的剩余色散.

3. 光纤光栅色散补偿传输系统

3.1. 传输系统结构

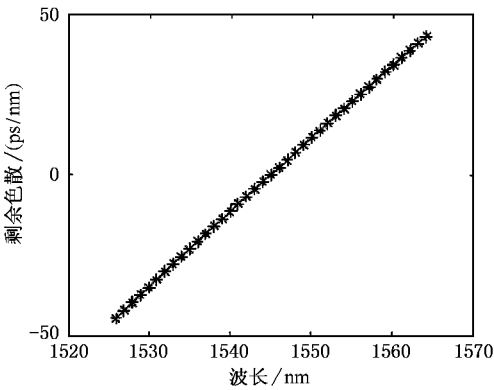
系统的传输光纤为 G.652 光纤,采用啁啾光纤光栅作为色散补偿器件,  $4 \times 10\text{Gb/s}$   $400\text{km}$  传输实验系统见图 3.

复用后的  $10\text{Gb/s}$  信号经过放大,然后经过 5 个  $80\text{km}$  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,光纤光栅同时也起到滤波器的作用,抑制了传输链路上 EDFA 自发辐射噪声(ASE)的累积. 经测试光纤光栅经过环行器后的平均插入损耗为  $3.5\text{dB}$  左右,传输系统中采用 6 个光放大器来进行光功率补偿.

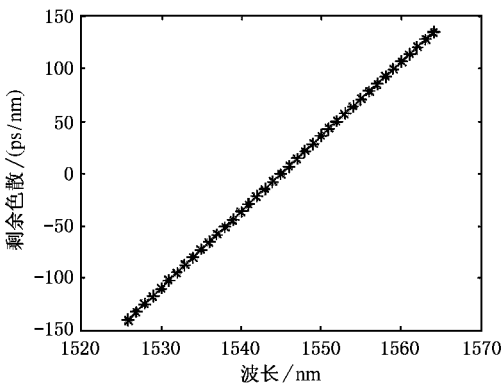
3.2. 测试结果

3.2.1. 光纤光栅色散补偿后的反射谱和时延曲线

我们用自己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<sup>[3]</sup>. 利用光纤光栅色散补偿器对  $400\text{km}$  光纤的色散进行补偿后,测得其时延曲线基本水平,即此时的色散基本上被完



(a) G.652



(b) G.655

图 2 C 波段 80km 中继段的中心点色散用 DCF 完全补偿( $\lambda_{D=0} \approx 1545\text{nm}$ )后的剩余色散

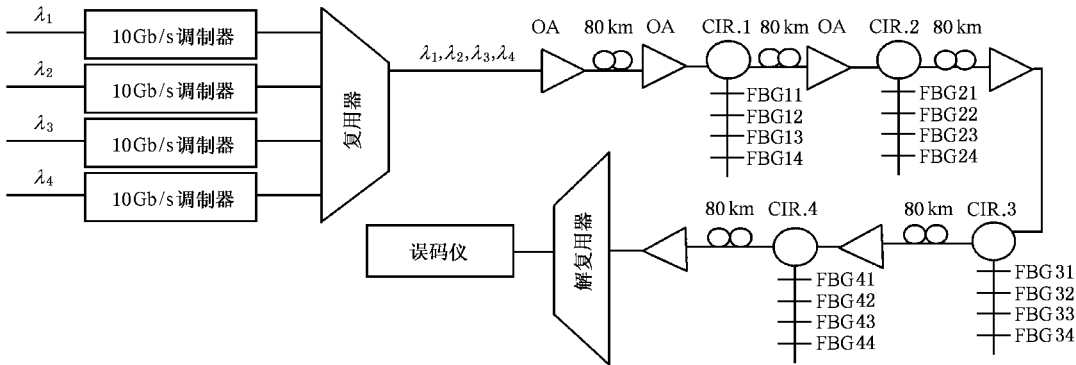


图 3  $4 \times 10\text{Gb/s}$  400km 色散补偿传输系统 OA 为光放大器,CIR 为光环行器,FBG 为光纤光栅

全补偿,如图 4 所示.四路光栅的中心波长分别为 1549.322,1550.842,1552.544 和 1554.136nm,波长间隔基本为 1.6nm(对应中心频率分别为 193.5,193.3,193.1 和 192.9THz,间隔为 200GHz,满足 ITU-T 规定),3dB 带宽分别为 0.350,0.348,0.353 和 0.331nm.

3.2.2.400km G.652 光纤传输并补偿后的眼图

10Gb/s 信号调制眼图如图 5 所示.10Gb/s 信号经 400km G.652 光纤传输并补偿后的眼图见图 6.由图 6 可见,脉冲宽度基本恢复到了传输前的宽度,同时眼图张开很好,说明信号的信噪比较好.

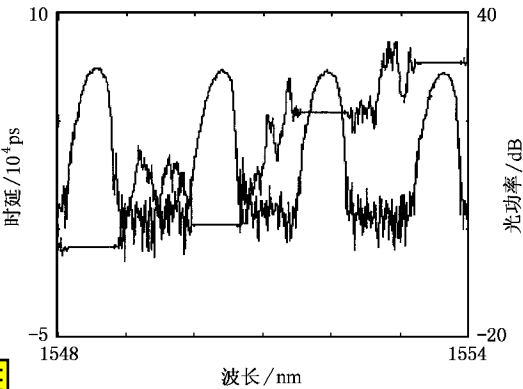


图 4 400km 传输后 FBG 总的反射谱和时延曲线

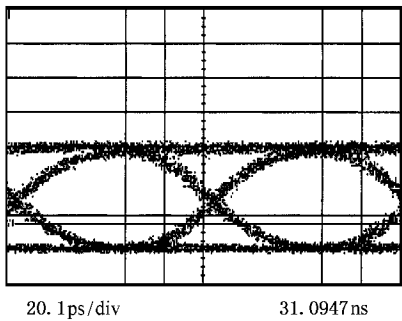
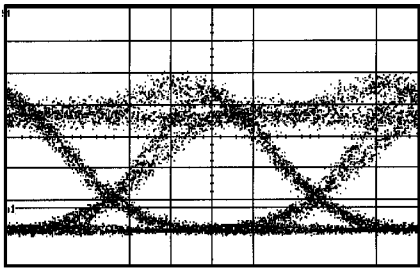
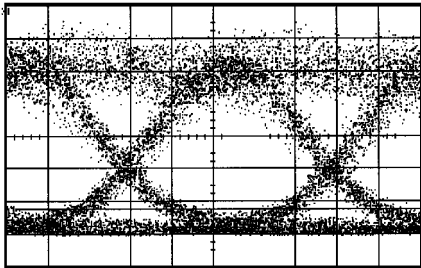


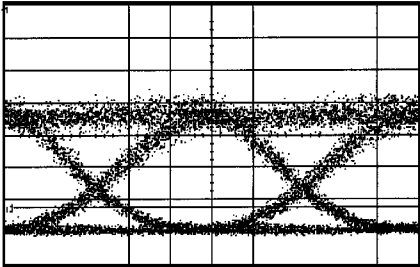
图 5 10Gb/s 信号调制眼图



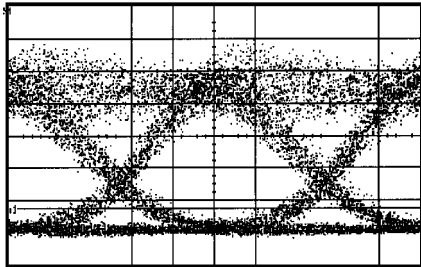
(a)信道 1 #



(b)信道 2 #



(c)信道 3 #



(d)信道 4 #

图 6 10Gb/s 信号经 400km G.652 光纤传输并补偿后的眼图

3.2.3. 误码率测试

传输并补偿后的 10Gb/s 信号,经解复用后进入误码仪的光接收机进行误码测量.在误码率为  $10^{-10}$  时,各信道传输的无误码功率代价分别为 1.2,1.98, -0.9 和 0.4dB,如图 7 所示.信道 2 的功率代价略高是由于我们在对光栅封装时,采用了两种不同的封装材料,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 0.9dB.信道 3 # 的光功率代价为负值,即经过几百公里光纤传输后,接收机的灵敏度比起背靠背来反而提高了.光纤光栅色散补偿系统中出现‘负’功率代价的一种可能原因是:光纤光栅在对信号色散补偿的同时还能够起到滤波器的作用,因此将其置于放大器后使自发辐射噪声得到有效抑制.

光纤.所以,如何解决 G.652 光纤的色散补偿问题是一个非常重要的问题.利用光纤光栅补偿高速率传输 G.652 光纤的色散是研究的热点<sup>[4]</sup>.它可能使已敷设的光缆得到新的应用,具有极大的经济效益和社会效益.

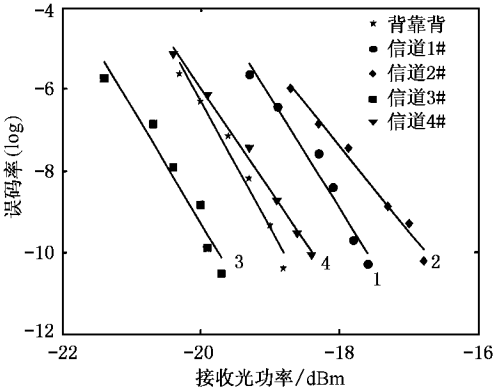


图 7  $4 \times 10\text{Gb/s}$ ,400kmFBG 色散补偿系统误码率测试

4. 结 论

由于国际互联网的迅速发展和各种通信容量的剧增,全世界都在加速高速光纤通信系统的建设.但目前全世界已经铺设的光纤 87% 以上都是 G.652

[1]

Zhou C H *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1046 (in Chinese) [周传宏等 2001 物理学报 **50** 1046]

[2]

Shu X W *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文等 2000 物理学报 **49** 1731]

[3]

Pei Li *et al* 2001 *J. Chin. Railway Soc.* **23** 58 (in Chinese) [裴丽等 2001 铁道学报 **23** 58]

[4]

Ramachandran S *et al* 2000 *European Conference on Optical Communication* Post-Paper

Research on the  $4 \times 10\text{Gb/s}$  400km

dispersion compensation by chirped optical fibre grating<sup>\*</sup>

Pei Li Jian Shui-Sheng Yan Feng-Ping Ning Ti-Gang Jian Wei Li Tang-Jun  
(*Institute of Light-Wave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China*)  
(Received 12 December 2001 ; revised manuscript received 28 July 2002)

Abstract

In this paper, we introduce the successful dispersion compensation of  $4 \times 10\text{Gb/s}$  400km G.652 fibre by chirped optical fibre Bragg grating. When BER is  $10^{-10}$ , the power penalty of transmission in each channel is less than 2dB, and the best result is negative.

**Keywords :** fibre grating, dispersion compensation, power penalty  
**PACC :** 4281D, 4281, 4230Q

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Programme of China, the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 69877001 and 60077008), and the Foundation of Northern Jiaotong University, China.