

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

简水生 延凤平 李唐军 简伟 裴丽 宁提纲

(北方交通大学光波研究所, 北京 100044)

摘要 利用啁啾光纤光栅, 补偿了 4×10 Gb/s, 800 km G.652 光纤的色散. 由于在制作过程中, 对光栅的性能进行了优化设计, 光纤光栅的功率谱十分平坦, 波动小于 0.9 dB, 时延曲线纹波小于 30 ps, 在误码率为 10^{-10} 时, 传输部分的无误码功率代价分别为 1.36, 0.89, 1.67 和 1.32 dB.

关键词 10 Gb/s 光纤光栅 色散补偿 功率代价

1 色散补偿意义重大

随着全球信息业务量的迅猛增加, 人们对通信网络向高速大容量方向发展的要求越来越迫切. 然而, 作为通信网络骨干的光纤通信系统, 在发展时遇到了损耗、色散和非线性三大难题. EDFA 的出现, 使光纤损耗不再是影响光纤通信系统传输的主要因素, 目前光纤传输的主要限制是色散, 且色散已成为对已铺设光纤通信系统进行升级扩容的主要障碍. 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 $17 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$ 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, 从而限制光纤通信向更高速率的发展^[1].

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, 色散位移光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 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. 先后有零色散点分别在 1531 和 1510 nm 左右的 Truwave 光纤和 LEAF 光纤, 即 G.655A 光纤. 随着研究的深入, 于 2000 年又研究出了 Teralight 光纤和 PureGuide 光纤, 即零色散点在 1430 nm 左右的 G.655B 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 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 GHz 的 WDM 系统的传输毫无问题. 因此, 解决光纤色散补偿的问题, 不仅为全世界已铺设的上亿公里 G.652 光纤开通 10 Gbit/s 高速系统奠定技术基础, 而且为未来波长交换的全光网提供了强大的技术支持.

现已提出许多色散补偿方案, 一种方法是采用色散补偿光纤 (DCF) 进行色散管理来解决这一问题, 但是 DCF 售价甚高, 它的色散斜率不能与 G.652 光纤或 G.655 光纤完全匹配, 当

2001-11-27 收稿, 2002-02-07 收修改稿

* 国家“863”(批准号: 2001AA312090, 2001AA122042)和国家自然科学基金(批准号: 60077008)资助项目

某个波长的色散得到完全补偿时, 在其余波长处就会形成残余色散, 且总的残余色散随传输距离的增加而加大. 有时还需增加 EDFA 来补偿其插入损耗, 费用昂贵, 难以推广应用. 另一方法是用啁啾光纤光栅 (FBG) 来补偿 G.652 或 G.655 光纤的色散, 可以同时补偿色散和色散斜率. 由于啁啾光纤光栅与现有光纤系统兼容性好, 具有低的传输损耗和插入损耗, 光纤光栅的折射率调制可以根据需要来通过不同的曝光过程加以控制, 因此, 利用啁啾光纤光栅进行色散补偿被认为是一种应用前景很好的方案.

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. 本文利用啁啾光纤光栅进行色散补偿, 在功率代价很小的情况下, 实现了 4×10 GHz, 800 km G.652 光纤的传输, 超过了 ITU-T 建议的标准.

2 DCF 色散补偿所遇到的问题

我们做了分析和研究, 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 ps/nm·km 左右, 损耗 0.6 dB/km, 100 km 放大间隔需要十几公里的 DCF 来补偿, 另外还需加一放大器来补偿损耗, 成本非常高. 第 3, DCF 的色散斜率不能与 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 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, 则在 3 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 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 ps/nm, 甚至数千 ps/nm. 我们认为这是 ITU-T 建议只能传输 8×22 dB 距离的主要原因之一. 如果要传输更长的距离, 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.

G.652 光纤在 S, C 和 L 波段的色散斜率分别是: 0.09404 , 0.0922 和 0.0901 ps/nm²·km. G.655 光纤在这 3 个波段的斜率分别是: 0.0931 , 0.1055 和 0.1013 ps/nm²·km. 而 DCF 在这 3 个波段的斜率则分别是: -0.33457 , -0.3986 和 -0.3049 ps/nm²·km. 以 C 波段为例, 图 1 为 G.652 光纤、G.655 光纤和 DCF 的色散斜率. 以 80 km 一个中继段为准, 如果采取中心点色散得到完全补偿, 图 2 给出了 G.652 和 G.655 光纤在 C 波段的剩余色散.

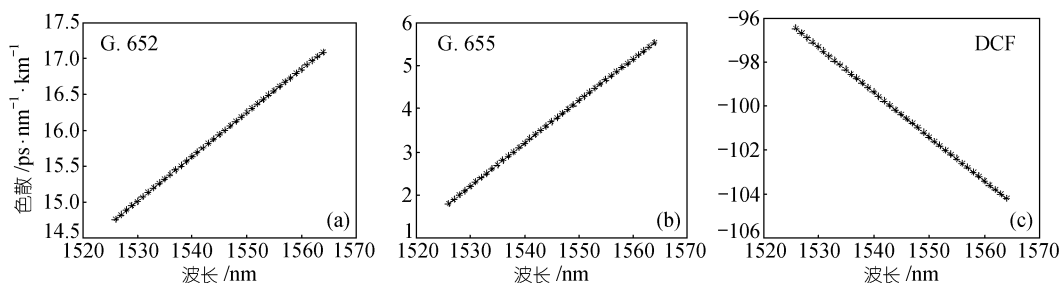


图 1 C 波段 3 种光纤的色散斜率

3 光纤光栅色散补偿传输系统

3.1 传输系统结构

我们利用所研制的光纤光栅实现了 4×10 GHz, 800 km G.652 光纤的色散补偿. 传输系统

结构如图 3 所示^[2-4].

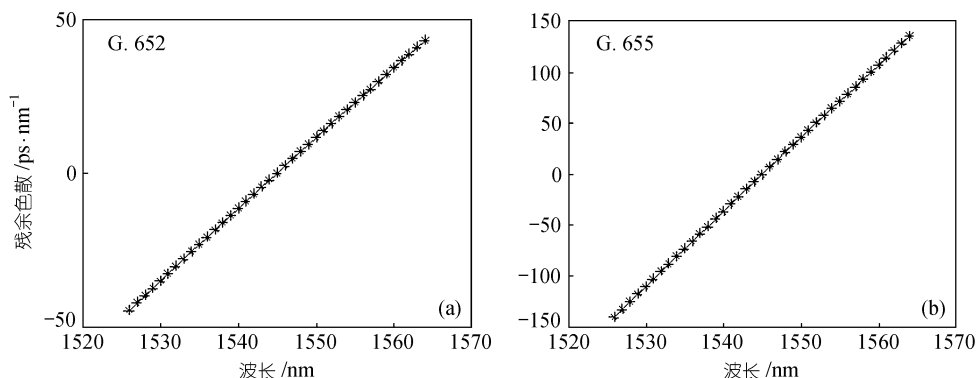


图 2 80 km 一个中继段 DCF 色散补偿在 C 波段的剩余色散

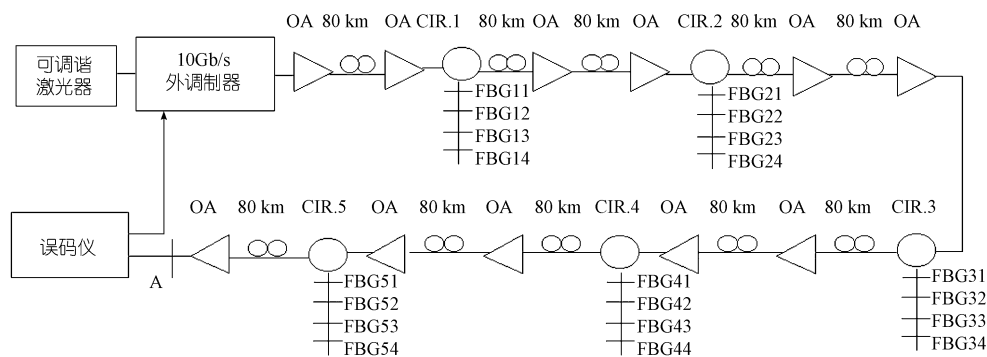


图 3 用 FBG 色散补偿的 4×10 Gb/s, 800 km 传输系统

OA 示光放大器, CIR 示环行器, FBG 示光纤光栅

可调谐激光器发出的光信号, 经过 10 Gb/s 的外调制器进行调制, 并采用 11 个光放大器进行光功率补偿, 光纤光栅实现信号传输过程中的色散补偿.

系统中, 用相位掩膜法制作光纤光栅, 通过对紫外光功率和扫描曝光过程的计算机控制, 各信道所用光纤光栅的特性基本一致. 在图 3 中 A 点测得四路光纤光栅的中心波长分别为 1547.709, 1549.338, 1550.936 和 1552.578 nm. 波长间隔基本为 1.6 nm, 且满足 ITU-T 波长标准.

单个光栅可以补偿约 160 km G.652 光纤的色散, 每个信道利用 5 个光纤光栅实现了 800 km 的色散补偿, 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. 800km 传输后经色散补偿的光源信号脉冲基本恢复.

3.2 光纤光栅的反射谱和时延曲线

我们所研制的光纤光栅解决了以下 4 方面的难题: (i) 光纤光栅的温度漂移, 光纤光栅温度系数为 $0.0005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 已经达到实用化的程度. (ii) 光纤光栅偏振模色散(PMD)的影响. (iii) 纹波系数小, 反射谱平坦, 用色散分析仪测得光栅的时延波动均小于 30 ps, 功率波动均小于 0.9 dB. (iv) 包层模附加损耗大的问题.

图 4 和 5 为信道 1 ($\lambda_c = 1547.709 \text{ nm}$) 的一组测试图形. 图 4 为 FBG11 的反射谱和时延曲线, 中心波长为 1547.786 nm, 3dB 带宽为 0.430 nm. 图 5 为图 3 所示 A 点测得的传输后 5 个光

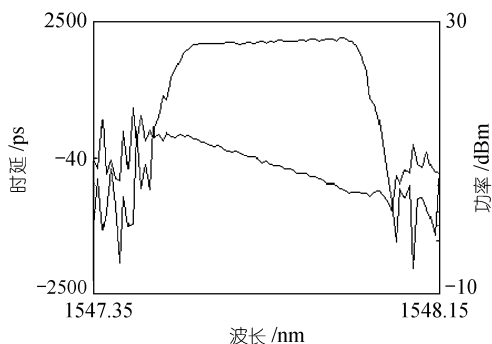
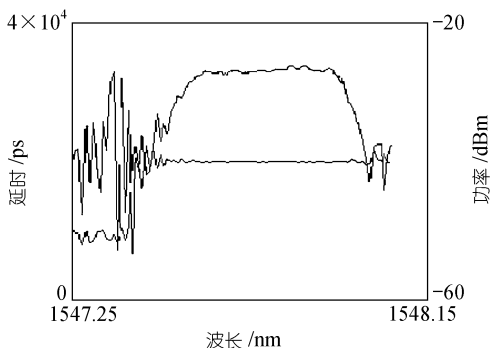


图4 FBG11 的反射谱和时延曲线

图5 800 km 传输后 FBG_{j1} ($j = 1 \sim 5$) 总的反射谱和时延曲线

栅总的反射谱和时延曲线, 中心波长为 1547.709 nm, 3 dB 带宽为 0.362 nm, 时延曲线已经配平.

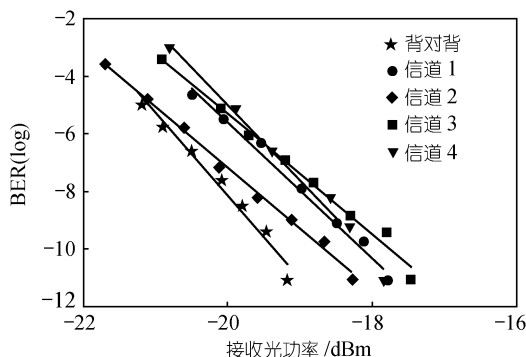
通过图 4 和 5 比较以及对其余 3 个信道的测试表明, 光栅串接起来后由于 5 个光栅的叠加效应, 光栅中心波长有微小偏移且带宽变窄, 光栅反射谱仍比较平坦, 且经过色散补偿后的时延曲线基本配平, 即色散得到了补偿.

3.3 误码率测试

采用图 3 所示的系统进行传输后, 测得 4×10 Gb/s, 800 km 普通单模光纤经光纤光栅进行色散补偿后的传输部分在误码率为 10^{-10} 时, 无误码功率代价分别为 1.36, 0.89, 1.67 和 1.32 dB. 图 6 所示为 4 路信号的误码率曲线.

4 结论

光纤通信以其巨大的通信容量和低廉的建设经费为人类信息社会提供了无限带宽的通信平台, 目前又正向着全光网发展, 如何解决光纤的色散补偿问题已经引起全世界的瞩目. 我们利用啁啾光纤 Bragg 光栅实现了 4×10 Gb/s, 800 km 的色散补偿, 且补偿效果良好. 这表明通过啁啾光纤光栅进行色散补偿方案的可行性. 可以预料, 啁啾光纤光栅将会在未来的光纤通信系统中发挥越来越重要的作用.

图6 4×10 Gb/s, 800 km 传输系统的误码率曲线

参 考 文 献

- 1 刘颂豪, 杜卫冲, 谭华耀, 等. 啁啾光纤光栅在光纤通信系统中的色散补偿. 光学学报, 2000, 20(1): 24 ~ 28
- 2 Durkin M K, Feced R, Ramirez C, et al. Advanced fibre Bragg gratings for high performance dispersion compensation in DWDM systems. In: Optical Fiber Communication Conference, 2000. Baltimore: Baltimore Convention Center. 2000, 1: 121 ~ 123
- 3 Rochette M, Cortes P Y, Rochelle S L, et al. Polarisation mode dispersion compensation of chirped Bragg gratings. In: Optical Fiber Communication Conference, 2000. Baltimore: Baltimore Convention Center, 2000. WM15-1 ~ WM15-3
- 4 Kasunic K J. Design equations for reflectivity of deep-etch distributed Bragg reflector gratings. J Lightwave Tech, 2000, 18(3): 425 ~ 429