

文章编号: 0258-7025(2006)04-0489-04

## 2.5 Gb/s 偏振模色散自动补偿对偏振模色散容限值的影响

李朝阳, 郑远, 杨伯君, 张晓光

(北京邮电大学理学院物理部 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 在我国现有的光纤通信骨干网中, 绝大部分速率为2.5 Gb/s。今后如在我国现有的2.5 Gb/s网络系统上进行密集波分复用(DWDM)升级, 亦需要考虑偏振模色散(PMD)对系统容量升级的影响。采用十段高双折射光纤级联而成的偏振模色散模拟器模拟实际光纤, 从信号中提取基带频率分量作为反馈信号, 对2.5 Gb/s系统进行了偏振模色散自动补偿实验, 并对反馈前后的系统进行了系统代价的测量和比较。实验结果表明, 偏振模色散自动补偿能较大幅度地提高系统的偏振模色散容限值。

**关键词** 光通信; 光信噪比代价; 偏振模色散补偿; 差分群时延

**中图分类号** TN 929.11

**文献标识码** A

### Effect of Automatic Polarization Mode Dispersion Compensation on Bit-Error-Rate in 2.5 Gb/s Transmission System

LI Chao-yang, ZHENG Yuan, YANG Bo-jun, ZHANG Xiao-guang

(Key Laboratory of Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Department of Physics, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** In order to further increase the optical fiber communication capacity, polarization mode dispersion (PMD) is one of obstacles that must be overcome in existing optical communication systems. In our country, most of bit-errors-rates (BERs) on the backbone optical networks are 2.5 Gb/s. In the future if the existing optical networks are required to upgrade to dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems, PMD effects must be considered. In this paper, the real fiber was emulated by using a PMD emulator (PMDE) concatenated by 10 pieces of polarization maintaining fiber (PMF), and frequency component was extracted from signal as the feedback signal to compensate the PMD, and the system penalty was measured with and without PMD compensation respectively. The experimental results show that the PMD compensator can increase the maximal tolerable PMD value in the system substantially.

**Key words** optical communication; optical signal-noise-rate penalty; polarization mode dispersion compensation; differential group delay

## 1 引言

偏振模色散(PMD)自动补偿技术已被许多大的研究机构和通信公司看作是大容量光纤通信系统和下一代光传送网需要解决的一项关键技术, 从而成为目前国际上光纤通信领域研究的热点。目前对10 Gb/s及10 Gb/s以上的系统的偏振模色散补偿

报道很多, 但对2.5 Gb/s系统自动补偿的报道很少。然而, 对2.5 Gb/s系统的偏振模色散补偿同样也是必要的。根据国际电信联盟(ITU-T)的规定, 系统偏振模色散的容限值(定义为长期差分群时延(DGD)平均值)应当小于比特周期的 $1/10^{[1]}$ , 所以对2.5 Gb/s系统(STM-16/OC-48)而言, 偏振模色散

收稿日期: 2005-08-18; 收到修改稿日期: 2005-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(60578043)和北京市教育委员会共建项目(XK100130437)资助课题。

作者简介: 李朝阳(1967—), 男, 湖南人, 北京邮电大学理学院讲师, 博士, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: facesunli@263.net

容限值为40 ps。考虑到早期生产和铺设的光纤光缆的偏振模色散系数典型值为  $2 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}^{[2]}$ , 那么2.5 Gb/s系统的最大传输距离只有400 km左右, 即使对城域网也有严重的限制作用。如果在我国的广域网上传输2500 km, 那么平均群时延差可达100 ps以上, 超过了1 bit周期的1/4, 而且, 在这种高偏振模色散光纤中, 瞬时差分群时延随时间而波动, 有时可达平均值的3倍以上, 几乎足以使眼图闭合。武汉邮电科学研究院曾对其中的光纤链路的偏振模色散进行过测试, 发现偏振模色散造成的损伤比预期的要高一倍左右。因此从实用角度看, 对2.5 Gb/s系统的偏振模色散影响的研究具有重要的意义。

## 2 实验原理

实验装置如图1所示, 2.5 Gb/s SDH 误码分析仪为日本 Anritsu 公司的 ME3620A 型, 发出的伪随机序列(PBRS)信号(码型为  $2^7-1$ ), 工作于波长1554 nm处, 模拟器插在发射机之后, 能产生60 ps的平均群时延差, 在接收端, 信号有两路, 其中一路带有自适应偏振模色散补偿器, 在经过适当衰减后, 接收机通过一开关检测到两路中的一路, 然后对其中的数据信号进行误码测量。取样示波器为美国泰克公司的 11801C 型, 取样带宽为50 GHz, 在信号经过光电变换后, 用来观看波形。

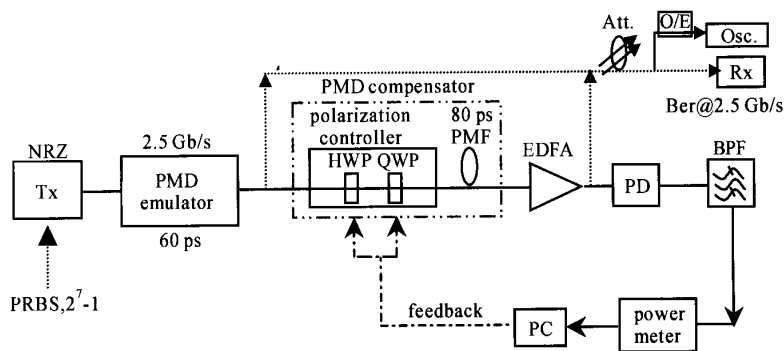


图1 实验装置图

PMF: 偏偏光纤; PD: 光探测器; BPF: 5 GHz 窄带滤波器; PC: 单片机; HWP: 1/2 波片; QWP: 1/4 波片;  
Tx: 误码分析仪发射机; Rx: 误码分析仪接收机; Att.: 光衰减器; O/E: 光探测器; Osc.: 取样示波器

Fig. 1 Experimental setup for the measurements of BER

PMF: polarization-maintaining fibers; PD: photon detector; BPF: bandpass filter; PC: personal computer;  
HWP: half waveplate; QWP: quadric waveplate; Tx: transmitter of BER analyzer; Rx: receiver of BER analyzer;  
Att.: optical attenuator; O/E: optical detector; Osc.: sampling oscilloscope

### 2.1 补偿器与补偿过程

偏振模色散补偿器包括一个偏振控制器和一段保偏光纤(PMF), 其差分群时延为80 ps, 为优化后的值。调节偏振控制器, 可将模拟器的偏振主态(PSPs)中的快轴耦合进补偿器偏振主态中的慢轴, 反之亦然。如果模拟器中的差分群时延为  $\Delta\tau_c$ , 补偿器(PMDC)中的为  $\Delta\tau_c$ , 模拟器(PMDE)和补偿器偏振主态的快轴的斯托克斯矢量夹角为  $\theta$ , 那么接收信号将受残余一阶偏振模色散的影响, 其差分群时延大小为<sup>[3]</sup>

$$\Delta\tau_{\text{total}} = \sqrt{(\Delta\tau_c)^2 + (\Delta\tau_c)^2 + 2\Delta\tau_c \tau_c \cos(2\theta)}. \quad (1)$$

假设整个传输线上(包括模拟器和补偿器)总的差分群时延为  $\Delta\tau_{\text{total}}$ , 两个正交偏振主态的功分比为  $\gamma$ , 则输出脉冲频谱  $|\tilde{f}_{\text{out}}|^2$  满足

$$|\tilde{f}_{\text{out}}|^2 \propto \left[ 1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2 \frac{\omega \Delta\tau_{\text{total}}}{2} \right]. \quad (2)$$

采用中心频率为5 GHz, 带宽为50 MHz的5阶切比雪夫窄带滤波器在接收信号中提取5 GHz基带频率成分作为频域控制信号。图1中的高速光探测器PD(带宽15 GHz)用来监视偏振模色散致脉冲失真情况, 数字电功率计(GX2C型)用来进行功率测量, 单片机用来进行A/D转换及采样, 采用最大值搜索法<sup>[4]</sup>作为反馈算法, 输出反馈信号控制步进电机, 以改变偏振控制器的  $\lambda/4, \lambda/2$  波片的旋转角度, 来使5 GHz附近功率谱密度最大化。从而部分地抵消了偏振模色散效应。补偿过程是全自动的。以上器件均为国产。

### 2.2 偏振模色散模拟器

在只考虑一阶偏振模色散时, 长光纤的瞬时差

分群时延是一个统计量,满足麦克斯韦分布

$$p(\tau) = \frac{32\tau^2}{\pi^2 \Delta\tau^3} \exp\left(-\frac{4\tau^2}{\pi\Delta\tau^2}\right), \quad (3)$$

其中  $p(\tau)$  代表瞬时差分群时延值  $\tau$  的概率密度函数(pdf),  $\Delta\tau$  代表差分群时延的平均值。

长光纤的偏振模色散可由多段保偏光纤用偏振控制器(PC)级联来模拟<sup>[5]</sup>,偏振控制器为一个  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  波片依次构成的圆盘链,在每个波片的结构中,一根光纤缠绕在有凹槽的薄圆盘上,并产生光纤弯曲,弯曲能产生双折射,当圆盘直径、光波长和缠绕圈数相匹配时,就能在两正交偏振光之间发生  $90^\circ$  或  $180^\circ$  的相移,旋转圆盘直接旋转了光纤的基准轴方向,利用  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$  圆盘链,可以将任意输入偏振光变成预定的任何输出偏振光。通过计算机控制偏振控制器波片的旋转,能使两保偏光纤 (1.3 ps/m) 之间的偏振主态方向在  $[0, 2\pi]$  间随机转动,且转动角  $\theta$  服从均匀分布。采用 10 段保偏光纤,每段保偏光纤的差分群时延值通过一种优化算法而得到。数值模拟得到的统计特性如图 2(a) 所示。由图可见,它和理论值吻合得较好。通常单模光纤的偏振模色散指其统计平均偏振模色散,可由下式得到

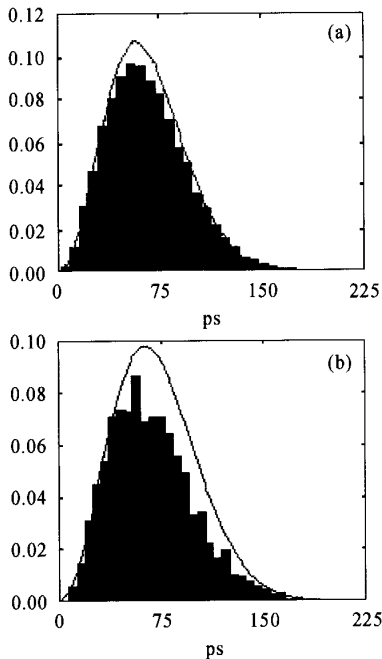


图 2 模拟器的差分群时延概率分布的测量结果(a)和数值模拟结果(b)

Fig.2 Probability density function of differential group delay (DGD) of PMDE from numerical simulations (a) and measurement result (b)

万方数据

$$\bar{\tau} = \int_0^\infty \tau f(\tau, x) d\tau, \quad (4)$$

其中  $f(\tau, x)$  为瞬时差分群时延值的概率密度函数。由图 2(a) 的分布曲线可得到该偏振模色散模拟器近似值为 60 ps。图 2(b) 显示了该偏振模色散模拟器采用偏分孤子法(PMS)<sup>[6]</sup>测差分群时延的测量结果,样本个数为 1000,测量精度为 0.3 ps。由图可见,差分群时延分布曲线基本上符合麦克斯韦统计分布。

### 2.3 差分群时延对系统代价的影响

一阶偏振模色散引起的系统代价  $P$  和脉冲展宽成正比,且可表示为<sup>[4]</sup>

$$P \propto \frac{\Delta\tau^2}{4T^2} [1 - (\mathbf{J} \cdot \mathbf{e}_p)^2], \quad (5)$$

其中  $P$  在此处指的是光信噪比(OSNR)代价,单位为 dB;光信噪比代价定义为在特定的误码率下,由于某种损伤而需要的额外的光信噪比。 $T$  为比特率; $\mathbf{J}$  为输入偏振态; $\mathbf{e}_p$  为偏振主态。实验中,每改变一次偏振控制器的状态,便测量一个偏振模色散模拟器的差分群时延值,同时对补偿和没补偿两个回路,分别记录相应的电功率值、误码率和光信噪比代价。测量光信噪比时,保持接收机前的误码率不变。

## 3 实验结果及讨论

图 3 为系统的光信噪比代价和一阶差分群时延的函数关系,误码率固定为  $\text{BER} = 10^{-9}$ 。由图 3 可见,在没有偏振模色散补偿时,光信噪比代价是近似随差分群时延的平方上升的,这和(5)式基本相符。当差分群时延超过 50 ps 时,光信噪比代价将超过 3 dB。而采用偏振模色散补偿器后,直到差分群时延为 120 ps 时,光信噪比代价还小于 3 dB,这说明采用偏振模色散补偿器能大大提高系统的偏振模色散容

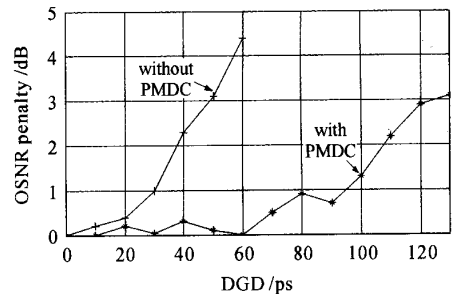


图 3 光信噪比代价和差分群时延的关系曲线  
Fig.3 Optical signal-to-noise ratio (OSNR) penalty versus DGD

限值。图3中光信噪比多次出现零或下降,是因为光信噪比代价除了和偏振模色散有关外,还和很多其他因素有关,如接收机中的散弹噪声和热噪声,光放大器的自发辐射噪声等,它们的随机特性都使光信噪比产生可能的起伏。此外,该实验是在一定误码率前提下测得的,而误码率表示系统长期统计平均结果,而实验是有限时间内测量得到的,这也不可避免地造成波动。必须指出,由于系统中的差分群时延较大,根据主态理论,主态带宽  $B_{\text{PSP}}$  与平均差分群时延  $E(\Delta\tau)$  成反比<sup>[7]</sup>,即

$$B_{\text{PSP}} = 0.8/E(\Delta\tau), \quad (6)$$

此时高阶偏振模色散已不可忽视<sup>[8~10]</sup>,如在图3中有补偿器的曲线中,在差分群时延较大时,光信噪比代价直线上升。这是因为补偿完一阶偏振模色散后,残留的高阶偏振模色散开始起作用。在补偿完一阶偏振模色散时,还需对高阶偏振模色散进行补偿,补偿后,偏振模色散容限值将进一步提高。但是,必须看到,这个实验进行的是一阶偏振模色散补偿,方案简单可行,成本低。如果进行高阶补偿,不仅系统复杂,设备造价也高得多,从而妨碍其实际应用。我们课题组报道过相关偏振模色散补偿的工作,但对偏振模色散容限值方面的分析从没有做过。目前正在进行实用化的偏振模色散补偿模块研究。

## 4 结 论

采用十段高双折射光纤级联而成的偏振模色散模拟器模拟实际光纤,从信号中提取基带频率分量作为反馈信号,对2.5 Gb/s系统进行了偏振模色散自动补偿实验,并对反馈前后的系统进行了系统代价的测量和比较。实验结果表明,偏振模色散自动补偿器能较大幅度地提高系统的偏振模色散容限值。

## 参 考 文 献

- 1 C. D. Poole, J. Nagel, R. E. Wagner. Polarization Effects in Lightwave Systems [M]. Optical Fiber Telecommunications, Volume III A, 1997, 203~207
- 2 M. O. van Deventer, C. D. Townsend, G. J. Foschini *et al.*. Improvement of polarization mode dispersion tolerance in high bitrate systems [C]. ECOC'93, 19th European Conference on Optical Communication, 1993. 473~476
- 3 F. Curti, B. Daino, G. D. Marchis *et al.*. Statistical treatment of the evolution of the principal states of polarization in single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, 8(8):1162~1166
- 4 F. Heismann. Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(4):690~699
- 5 C. D. Poole, R. W. Trach, A. R. Chraplyvy *et al.*. Fading in lightwave systems due to polarization-mode dispersion [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(1):68~70
- 6 Chaoyang Li, Yuan Zheng, Bojun Yang *et al.*. Polarization mode dispersion measurement and compensation [C]. APOC2001, *Asia-Pacific Optical Communications*, 2001, 4579:216~221
- 7 S. Betti, F. Curti, G. D. Marchis *et al.*. Evolution of the bandwidths of the principal states of polarization in singlemode fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16(7):467~469
- 8 Yumin Liu, Zhongyuan Yu, Yuan Zheng *et al.*. A novel tunable polarization mode dispersion compensator with strain chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 2(3):135~137
- 9 Zhang Lu, Xu Yuanzhong, Hu Qianggao *et al.*. Effect of chromatic dispersion on the feedback signal in polarization mode dispersion compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7):869~874  
张 璐,许远忠,胡强高等. 偏振模色散动态补偿中色度色散影响的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(7):869~874
- 10 Chen Lin, Xu Jiangrong, Yang Bojun *et al.*. A novel feed-forward adaptive polarization mode dispersion compensation method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(9):1225~1229  
陈 林,徐江荣,杨伯君等. 一种新的自适应偏振模色散补偿前馈方法[J]. *中国激光*, 2005, 32(9):1225~1229
- 11 Zhang Xiaoguang, Yu Li, Zheng Yuan *et al.*. Experiment of adaptive polarization mode dispersion compensation up to second order with a two-stage compensator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(11):1391~1397  
张晓光,于 丽,郑 远等. 可补偿二阶偏振模色散的两级自适应补偿器研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(11):1391~1397