

文章编号: 0258-7025(2003)04-0349-04

10 Gbit/s 的光纤通信系统中一阶偏振模色散自动补偿技术的研究

刘剑飞, 于晋龙, 王 剑, 胡 浩, 杨恩泽

刘仲恒

(天津大学电子信息学院光纤通信实验室, 天津 300072) (华为技术有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要 分析并通过实验验证了光纤通信系统中偏振模色散引起的脉冲展宽对接收信号频谱的影响, 在此基础上提出了一种偏振模色散的补偿技术。在 10 Gbit/s 的传输线路中实现了一阶偏振模色散(PMD)的自动补偿。

关键词 光电子学; 光纤通信; 信号功率谱; 偏振模色散; PMD 补偿

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Study on Automatic Compensation of First Order PMD in 10Gbit/s Optical Fiber Communication System

LIU Jian-fei¹, YU Jin-long¹, WANG Jian¹,
HU Hao¹, YANG En-ze¹, LIU Zhong-heng²

(¹Lab. of Fiber-optic Comm., School of Elec. and Info. Eng., Tianjin Univ., Tianjin 300072, China)
(²Huawei Technologies Com. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract The effect of polarization mode dispersion (PMD) on the spectrum of received signal is theoretically analyzed and proved by experiment. A method for automatic PMD compensation in 10Gbit/s fiber-optic communication system and its experimental result are presented. The results indicated that it is effective for first order PMD compensation.

Key words optoelectronics; optical fiber communication; power frequency spectrum; polarization mode dispersion (PMD); PMD compensation

1 引 言

单模光纤实际上支持两个相互正交的偏振模, 在理想的单模光纤中, 这两个偏振模的传播常数相等, 彼此简并, 没有偏振模色散现象。实际上, 一方面由于光纤本身不完善, 如芯径的椭圆度或残余内应力等, 另一方面在传输过程中, 光纤受到环境因素, 如压力、弯曲、扭绞和环境温度等影响, 都会造成光纤纤芯折射率的变化, 从而引起单模光纤偏振态的变化, 造成两个偏振模传播常数的差异, 形成偏振模色散(PMD)。在 10 Gbit/s 以上的光纤通信系统

中, 偏振模色散(PMD)的影响已不可忽略。它可以引起数字信号脉冲的展宽, 使接收系统的误码率上升^[1]。研究表明, 单模光纤中的偏振模色散表现一种统计随机规律^[2], 无法象波长色散那样可以较容易地进行补偿。尤其在几年前铺设的光纤往往具有较高的 PMD 值, 这就使得整个系统向高速率升级成为问题。因此, PMD 补偿技术成为光纤通信领域研究的热点问题。在 PMD 补偿技术中, 如何提取与 PMD 相关的反馈控制信号是实现 PMD 自动补偿的关键技术。目前, 基于接收信号的偏振度测量技术^[3]和基于在接收信号的电域频谱中提取某频

收稿日期: 2002-02-06; 收到修改稿日期: 2002-06-18

基金项目: 国家高技术 863 计划支持项目(编号: 8632001AA31222)和华为技术有限公司资助项目。

作者简介: 刘剑飞(1968. 11—), 男, 河北工业大学副教授, 天津大学博士研究生。目前从事光纤通信技术的研究。E-mail: jfliu@eyou.com, ezyang@tju.edu.cn

率分量的功率作为 PMD 相关信息^[4~6]是两种受到关注的方法。本文首先分析了 PMD 对接收信号功率谱的影响,给出了如何通过检测接收信号中某个频率分量功率来确定 PMD 引起的脉冲展宽大小的方法,研究了用此方法进行 PMD 的自动补偿的技术。并在 10 Gbit/s 的模拟传输线路中实现了对一阶 PMD 的自动补偿。

2 PMD 对接收信号功率谱的影响

由 PMD 引起的两偏振模的时延差可以用传输光纤两个偏振主态(PSP)^[7]的差分群时延(DGD)描述^[2],或写成 $\Delta\tau$,它对接收信号功率谱的影响可用功率谱的相对值 $P(\omega, \Delta\tau)$ 来表示^[8]。即

$$P(\omega, \Delta\tau) = \frac{|\tilde{f}(\omega)|^2}{4T_0} \left[1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2 \frac{\omega\Delta\tau}{2} \right] \quad (1)$$

式中, T_0 为码元周期, γ 为两偏振模的分光比, $|\tilde{f}(\omega)|$ 由传输脉冲的波形 $f(t)$ 确定。当脉冲为全占空比(NRZ)矩形脉冲时有

$$P(\omega, \Delta\tau) = \frac{T_0}{4} \left[\frac{\sin(\omega T_0/2)}{\omega T_0/2} \right]^2 \times \left[1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2 \frac{\omega\Delta\tau}{2} \right] \quad (2)$$

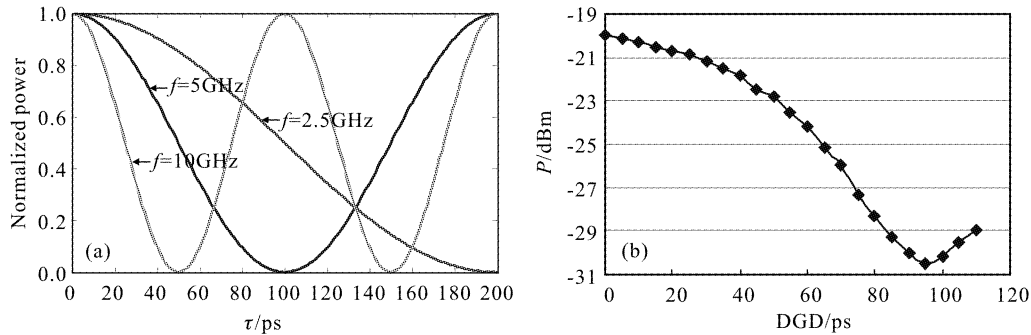


图 1 DGD 与接收信号频率分量功率的关系

(a) 计算结果; (b) 实验结果

Fig. 1 Relationship between DGD and power of a certain frequency

(a) theoretical results; (b) experiment result

将图 1(a)中 $f=5$ GHz 的曲线和图 1(b)给出的曲线比较,可以发现二者具有相同的变化规律。但应注意到,在 $DGD=100$ ps 处,功率值由下降又开始上升,曲线表现出非单调性。这是由于两个偏振模在相差一个周期后再次重合的结果。

图 1 表明,在一定的 DGD 范围内,接收信号中某一频率的功率随 DGD 的增大而减小。因此,为

(2) 式中的第一个平方项作为功率谱的因子随频率的升高而降低,表明高频分量的功率电平较低。而当 $\omega = 2\pi f$ 一定时,则 $P(\omega, \Delta\tau)$ 仅与时延差 $\Delta\tau$ 有关^[5,8],即

$$P_e(\Delta\tau) = 1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2 \frac{\omega\Delta\tau}{2}$$

或

$$P(\Delta\tau) = 1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2(\pi f \Delta\tau) \quad (3)$$

这一结论对于任意波形的脉冲信号,如高斯形或 sech 函数形等都有效,所不同的只是改变谱中的因子 $|f(\omega)|^2$ 。而不改变谱的相对变化项 $P(\omega, \Delta\tau)$ 。

图 1(a)为接收信号频谱中 $f=2.5$ GHz, 5 GHz, 10 GHz 的频率分量归一化功率值随 DGD ($\Delta\tau$) 变化的情况。图 1(b)为取 $f=5$ GHz 时的实验结果。实验中,光发射板输出速率为 10 Gbit/s 的非归零码(NRZ 码)。光信号的两个偏振态在空间上由偏振分束器分为两路,在其中一路接入光可变延时线用以改变两偏振态的 DGD。然后用偏振合波器将两路光信号合成在一起,由光电探测器变为电信号。最后用 5 GHz 的窄带滤波器得到所需的频率分量,由频谱仪(HP8563E)记录其功率大小。

进行 PMD 的自动补偿,可以选择接收信号频谱中的某一个频率分量的功率作为检测 DGD 变化的信号。选择的频率值需要根据被补偿线路的速率确定。因为不同的码速对应的功率谱不同。而且,对每一个频率,其功率值相对 DGD 都有一个单调范围。频率越低,单调范围越宽,即可以检测的 DGD 值越大。且由式(2)可知,低频分量的功率电平较

高,对于提取信号较容易。但是,并不是说选择的频率越低越好。图 1(a)还表明,频率越高,其功率值相对 DGD 的变化率越大,即监测的灵敏度也就越高。因此,作为监测信号的频率不易过高,也不易过低。对于 10 Gbit/s 的 NRZ 码传输系统,可以选择 5 GHz 的功率作为 PMD 监测信号。这时,PMD 检测范围可达 100 ps。

3 PMD 自动补偿系统的实现

由上面的理论分析与实验结果可知,通过提取接收信号中某频率分量功率值作为光纤线路 PMD 的检测信号,可以实现对传输线路的 PMD 进行自

动补偿。据此,我们对 10 Gbit/s 的传输线路进行了一阶 PMD 补偿的实验。

3.1 实验系统的组成及工作原理

实验系统的组成如图 2 所示。它主要由光发射机,PMD 模拟器,PMD 补偿器,光耦合器和信号眼图监测等部分组成。其中,光发射机发出的信号为 10 Gbit/s NRZ 码的伪随机信号。PMD 模拟器由光纤偏振控制器和保偏光纤构成,通过手工调节偏振控制器可使模拟器的输出光信号的 DGD 在 0~40 ps 之间变化,以模拟光纤中 PMD 的效应。3 dB 光耦合器将光信号分成两部分,分别用于经过补偿后信号眼图的监测和反馈控制回路。眼图监测使用的是 HP83480A 数字通信分析仪。

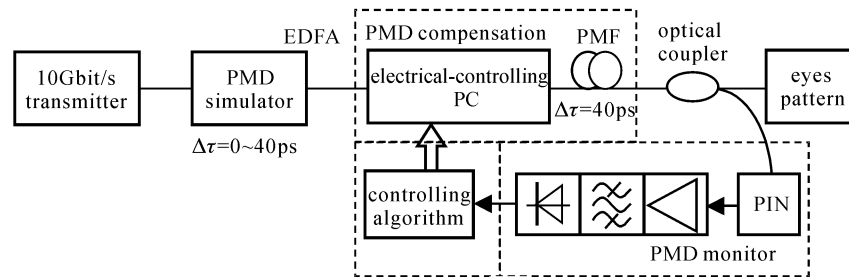


图 2 一阶 PMD 自动补偿系统的实验装置

Fig. 2 Setup of automatic compensation for 1st-order PMD

PMD 补偿器主要由三部分组成(图中虚线框内)。一是 PMD 补偿单元,由电控的偏振控制器(ECPC)和保偏光纤(PMF)构成。ECPC 使用的是 PC-412 型偏振控制器。通过改变所加的电压信号,可以将输入光信号变为任意偏振态的光信号输出。PMF 为“熊猫”型保偏光纤,根据长度不同可提供不同的偏振时延差。第二部分为 PMD 信号检测单元,由光电探测器(PIN),微波放大器,5 GHz 窄带滤波器和功率检波器组成。第三部分为补偿系统控制算法部分。由计算机及相应的控制算法实现。

实验系统的工作原理是这样的:光发射机发出 10 Gbit/s NRZ 码信号,经过 PMD 模拟器后变成具有 PMD 效应的光信号。这个信号再经过 PMD 补偿器,由光耦合器分为两路,一路由接收机接收,另一路用于 PMD 检测信号的提取与反馈控制,即提取接收信号中 5 GHz 的功率值作为反馈控制信号。在反馈控制回路中,PIN 完成光电变换功能,PIN 输出的电信号经放大、滤波后,由功率检波器进行检波,检波器输出的功率电平信号即反映了传输线路 DGD 的变化情况。通过对此信号进行采样,可以实时监测传输线路 DGD 的变化。同时,计算机输出

电压信号控制补偿器中的 ECPC,将来自传输线路的光信号的主偏振态 PSP 与补偿器的保偏光纤的主轴对应起来,使两个主态的总的传输时延趋于一致。即传输较快的 PSP 对应保偏光纤的慢轴,传输较慢的 PSP 对应保偏光纤的快轴。在补偿系统中,功率信号的采集与 ECPC 的控制电压的输出均由计算机实现。计算机实时检测 5 GHz 功率值的大小,根据此信号去改变 ECPC 的控制电压,使得到的 5 GHz 的功率值始终保持最大。从而实现一阶 PMD 的自动补偿。

3.2 实验结果与分析

实验中,PMD 模拟器与补偿器的 DGD 均选择为 40 ps。实验开始时,为了观察补偿效果,在未进行补偿之前通过调节 PMD 模拟器的偏振控制器,将接收端信号眼图调节到较差的情况,如图 3(a)所示。然后,运行控制算法程序,经过瞬时(<1 ms)自动调整后,输出信号即达到稳定的状态,如图 3(b)所示。由图可见,信号的眼图有了明显改善。其 Q 值由未补偿时的 6.77 变为 10.34,接近没有 PMD 时的 Q 值(12.14)。这说明通过 PMD 补偿器后,基本可以消除传输线路造成的 PMD 的影响。调节

PMD 模拟器使传输线路的 DGD 在 $40\sim 80$ ps 之间变化时,仍可得到稳定的信号输出, Q 值在 $9\sim 11$

间变化,这说明 PMD 补偿系统可以实现一阶 PMD 的动态补偿。

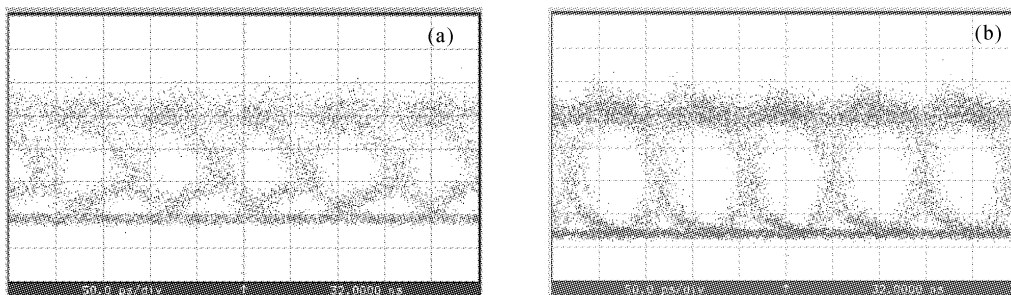


图 3 经过 PMD 补偿器前(a),后(b)的信号眼图

Fig. 3 Eyes pattern before (a) and after (b) PMD compensation

然而,从补偿后的眼图质量来看,信号仍不很理想。补偿后的 Q 值与没有 PMD 效应时的 Q 值还有差距。除了保偏光纤引入的损耗外,其主要原因是,实验系统中采用的光偏振延时器件(保偏光纤)为固定延时器件。固定延时量的大小只有在与传输线路的时延差完全相等时才能做到一阶 PMD 的完全补偿。在实际的光纤传输线路中,PMD 是一个随机变化量,显然,采用固定的保偏光纤无法实现一阶 PMD 的完全补偿。然而,在光纤的 PMD 受环境影响较小的情况下,如海底和深埋光缆,在测得光纤的 PMD 的平均值后,采用固定时延补偿对于提高通信容量仍有重要意义。解决上述问题的一个办法是采用光可变延时线作为 PMD 补偿器件。即将接收光信号的两个偏振态分开,其中一路接入光可变延时线,其延时量的大小可由计算机进行控制。这样,可以实现一阶 PMD 的完全补偿,但却增加了补偿系统及控制算法的复杂程度。

4 结束语

分析了 PMD 引起的脉冲展宽对接收信号功率谱的影响,得出了 PMD 引起的差分群时延 DGD 与功率谱的关系,并通过实验验证了其正确性。据此,提出了通过检测接收信号中某频率分量的功率对 PMD 进行自动补偿技术,设计了用于 10 Gbit/s 传输系统 PMD 补偿的 PMD 补偿器。实验结果证明,这种方法对消除 PMD 的影响是非常有效的。

参 考 文 献

- 1 Philippe Ciprut, B. Gisin, Nicolas Gisin *et al.*. Second-order polarization mode dispersion: impact on analog and digital transmissions [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(5):757~771
- 2 G. J. Foschini, C. D. Poole. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11):1439~1456
- 3 Nobuhiko Kikuchi, Sinya Sasaki. Polarization mode dispersion (PMD) detection sensitivity of degree of polarization method for PMD compensation [C]. Proc. European Conference on Optical Communications 1999 (ECOC'99), Nice France, vol. II (WeA 1.3), 8~9
- 4 T. Takahashi, T. Imai, M. Aiki. Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarization mode dispersion in in-line amplifier systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(4):348~349
- 5 Fred Heismann, Daniel A. Fishman, David L. Wilson. Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10 Gb/s transmission system [C], 1998, ECOC'98, 529~530
- 6 Reinhold Noe, David Sandel, M. Yoshida-Dieroeff *et al.*. Polarization mode dispersion compensation at 10, 20, and 40 Gb/s with various optical equalizers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9):1602~1616
- 7 C. D. Poole, R. E. Wagner. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 8 Liu Jianfei, Wang Jian, Yu Jinlong *et al.*. The effect of PMD-induced pulse broadening on sensitivity and frequency spectrum [C]. *SPIE*, 2001, **4581**:431~436