

10 Gb/s 光通信传输系统中一阶 PMD 自适应补偿实验*

周光涛 张晓光 沈 昱 于 丽 郑 远 李朝阳 杨伯君
(北京邮电大学理学院,北京 100876)

摘 要 在 10 Gb/s 归零码(RZ)光通信传输链路中成功地搭建一阶 PMD 自适应补偿的实验系统,补偿量 29 ps,跟踪补偿时间在 1 s 以内,补偿效果明显.
关键词 高速光通信;偏振模色散(PMD);自适应补偿

中图分类号 TN929.11 O436.3 文献标识码 A

0 引言

偏振模色散是高速光通信系统发展的主要障碍之一,由它产生的影响越来越受到人们的关注. PMD 的存在,一方面会由于模式耦合引起附加偏振相关损耗,会降低信噪比;另一方面会引起脉冲展宽,阻碍码速率的增加. 近些年来,偏振模色散逐渐成为许多光通信器件产品的一项重要性能指标,针对偏振模色散的补偿问题,许多国内外学者和研究机构无论从理论还是实验上^[1~4]都做了大量的研究,本文描述了我们课题组在成功地实现手动跟踪 PMD 补偿的实验^[5]后,进行了进一步的探索,国内首次实现了在 10 Gb/s 归零码(RZ)光通信传输系统中 PMD 的自适应补偿实验,并取得了很好的效果.

1 实验系统结构分析

1.1 基本理论分析

由于实际单模光纤存在随机双折射,使得在单模光纤中两个相互正交的偏振模在两偏振主态方向传输速度不同,信号达到接收端时两正交模式之间产生差分群时延差(DGD),即所谓的偏振模色散(PMD).

在 Poincaré 球上偏振模色散可以用偏振模色散矢量 Ω 来表示,其中 $\hat{q} = \Omega/\Delta\tau$ 代表光纤的偏振主态的快轴在 Poincaré 球上的方向, $\Delta\tau = |\Omega|$ 代表两个偏振主态差分群时延. 如果我们用 Ω_f 表示光纤通信系统中光纤的偏振模色散矢量,用表 Ω_c 示补偿器的偏振模色散矢量,则系统总的偏振模色散矢量为

$$\Omega_{total} = \Omega_f + \Omega_c \tag{1}$$

系统总差分群时延^[2]

$$\Delta\tau_{total} = |\Omega_f + \Omega_c| = \sqrt{(\Delta\tau_f)^2 + (\Delta\tau_c)^2 + 2\Delta\tau_f\Delta\tau_c\cos(2\theta)} \tag{2}$$

式中 $\Delta\tau_f = |\Omega_f|$ 与 $\Delta\tau_c = |\Omega_c|$ 分别为光纤和补偿器产生的差分群时延 2θ 是被补偿光纤偏振主态与补偿器偏振主态在 Poincaré 球上快轴之间的夹角.

偏振模色散补偿器一般由偏振控制器以及可变时延器组成,如图 1 所示一阶后补偿的两种工作方式. 第一种方式如图 1(a)所示,首先通过调整偏振控制器使 $2\theta = 180^\circ$,使得 Ω_c 和 Ω_f 反方向,这时 $\Delta\tau_{total}$ 达到最小值,再通过调整可变时延器的 $\Delta\tau_c$ 直至 $\Delta\tau_{total} = 0$,这种情况不考虑入射光的偏振态 S_{in} . 第二种方式如图 1(b)所示,通过调整偏振控制器让 Ω_c 和 Ω_f 级联之后总的 PSP 方向和入射光的偏振态 S_{in} 一致,将会有两个补偿点,在这种情况下,必须满足 $|\Omega_c| \geq |\Omega_{c0}|$,这里 $|\Omega_{c0}| = |\Omega_f| \sin \psi$, ψ 为输入偏振主态与被补偿光纤的偏振主态的夹角. 在 ψ 角不明的情况下,应该使得 $|\Omega_c| \geq |\Omega_f|$,否则将如图 1(c)所示,仅仅改变偏振控制器,不能完全消除 PMD 效应的影响,这个时候使用第一种补偿方式,增加对时延线的调整.

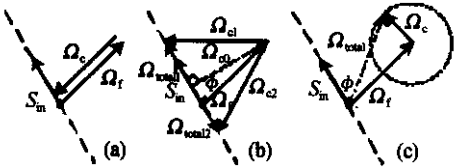


图 1 一阶后补偿的两种方式
Fig. 1 Two operating points of first-order post compensator

1.2 补偿器的方案选择

偏振模色散最显著的特点是具有随机特性,遵循 Maxwell 的统计分布, PMD 的补偿比较困难和复杂. 人们针对 PMD 的补偿提出了许多种方案,包括电补偿、光补偿以及光电结合补偿等等.

我们采用的自适应补偿器的模型如图 2 所示,包

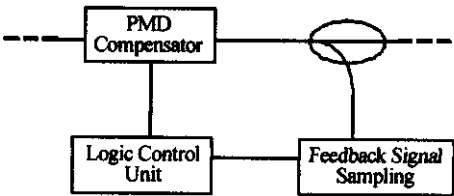


图 2 自适应补偿器模块图
Fig. 2 Adaptive compensation module

*国家“863”计划(2001AA122041)、国家自然科学基金(60072042)资助项目、国家博士点基金资助项目
Tel 010-62281513 Email zhou.gt@163.com
收稿日期 2004-06-06

括三个部分, 补偿单元、反馈单元和控制单元. 我们将整个模块直接串连于光通信链路中, 通过耦合器分路, 提取有用的反馈信号, 由逻辑控制单元分析处理, 进而控制 PMD 补偿器进行实时补偿链路中的 PMD.

从多种补偿方案中比较而言, 其中采用电控偏振控制器(PC)和保偏光纤(PMF)组成的补偿器从成本和稳定方面优于其他的补偿方式^[6]. 由于输入脉冲的偏振方向同保偏光纤的快轴和慢轴形成一定的夹角 θ , 正如前面理论分析的两种补偿方式, 通过调节偏振控制器改变 θ , 从而改变补偿光纤的输入光脉冲的偏振状态, 消除 PMD 的影响, 起到补偿作用.

我们选用固定的保偏光纤来进行补偿, 选择 $|\Omega_c| \geq |\Omega_l|$, 只对电控偏振控制器进行控制, 比控制可变时延线减少了一个自由度, 缩减了控制方式的复杂度.

1.3 信号采样反馈系统

自动反馈系统由光电探测器, 窄带滤波器, 电功率放大器和电功率计提供反馈信号, 通过电路采样反馈信号, 经过优化算法数据处理之后进行控制偏振控制器. 对于不同的补偿要求, 窄带滤波器的选取不同. 根据理论研究, 不同频率分量的电功率同 DGD 值满足^[3]

$$I \propto [1 - 4\gamma(1 - \gamma)\sin^2(\pi f \Delta\tau)] \quad (3)$$

式中, γ 是偏振分束器输出的垂直分量的比例, $1 - \gamma$ 为水平分量的比例, 当 $\gamma = 0.5$ 时, 两个偏振主态的能量相等, 即表征系统状况为最坏的情况, 此时 $1 - 4\gamma(1 - \gamma)\sin^2(\pi f \Delta\tau)$ 取最小值, 当 $f \Delta\tau = 1/2$, $I = 0$, $\Delta\tau$ 是群速度时延差, f 为滤波器中心频率. 如图 3 示, 当 $f = 10$ GHz 时, $\Delta\tau$ 在 0 ~ 50 ps 范围内, 由大到小变化明显.

对于重复频率为 10 GHz 的 RZ 光脉冲的电功率谱图而言, 脉冲宽度越窄, 频谱带宽越宽, 尽量压缩脉冲宽度, 才能有效提取有用的谱分量, 所以滤波器的选取要同补偿范围和脉冲的宽度密切相关.

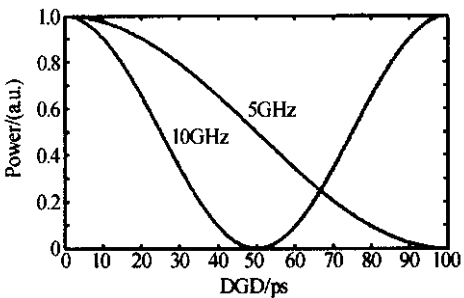


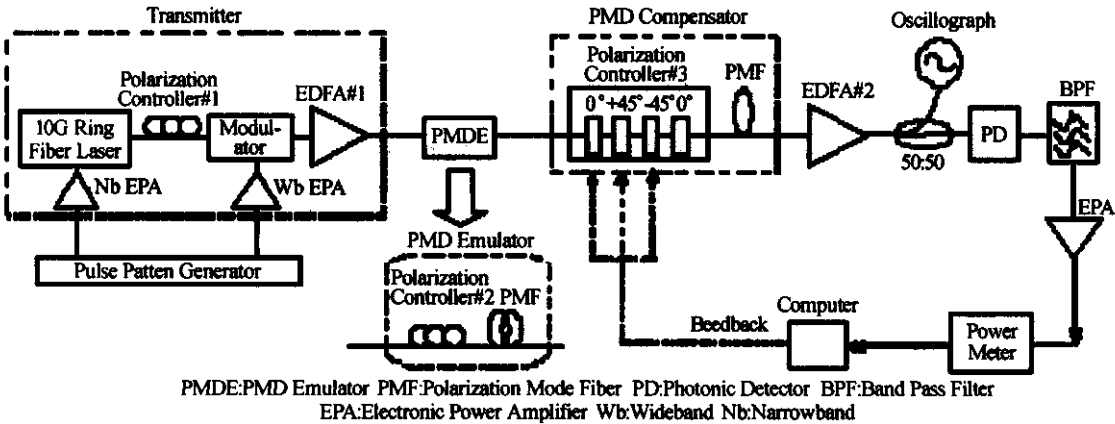
图 3 5 GHz 和 10 GHz 频率分量的功率同 DGD 的理论对应关系 ($\gamma = 0.5$)

Fig. 3 The theory relation of 5 GHz and 10 GHz power to DGD ($\gamma = 0.5$)

2 实验系统及结果

2.1 实验系统

整个实验系统如图 4 所示, 超短脉冲由半导体光放大(SOA)锁模光纤环形激光器^[7]产生, 具有较高的占空比, 由误码仪产生 $2^{23} - 1$ 的伪随机码, 通过铌酸锂调制器产生伪随机光信号, SOA 光纤环形激光器产生的信号光功率比较弱, 经过 EDFA 放大进入 PMD 模拟器, PMD 模拟器是由光纤型偏振控制器和固定 PMD 值的保偏光纤组成, 通过调节偏振控制器的角度, 改变入射光的偏振态, 通过用 SAGNAC 干涉法^[8]测量得到模拟器产生的最大 PMD 值 $\Delta\tau_1 = 29$ ps, 经过一段光纤传输后, 光信号进入 PMD 补偿模块, 经过 EDFA 放大后, 光脉冲接入到由电控偏振控制器和具有一定 PMD 值 $\Delta\tau_2 = 29$ ps 的保偏光纤组成的补偿器, 我们使用的康宁公司的型号为 PC-410 的电控偏振控制器, 响应速度快, 而且调整无需复位. 然后光脉冲经过耦合器 50:50 分路, 一路由示波器(Tek 11801C)监测, 作为输出, 另一路由高速光电探测器(带宽为 20 GHz)检测, 光电转化后电信号经过高 Q 值的 10 GHz 窄带滤波器提取有用的频率分量, 由功率计将电功率转化为相应的电压值, 数据采集卡将采样电信号电压值反馈进入微机系统中.



PMDE:PMD Emulator PMF:Polarization Mode Fiber PD:Photonic Detector BPF:Band Pass Filter
EPA:Electronic Power Amplifier Wb:Wideband Nb:Narrowband

图 4 PMD 自适应补偿实验系统图

Fig. 4 PMD adaptive compensation experiment system

特别指出的是,我们采用 PSO (Particle Swarm Optimization)优化搜索算法处理数据,以便寻找补偿结果最佳值,其优点在于全局最大值搜索能力强,且不易陷入局部极大值,数据经过分析处理后提供控制信号给电控偏振控制器,用来调整偏振控制器的 0° 和 45° 两个波片相位差,图 5(a)表示对 0° 和 45° 两个波片分别施加 $0 \sim 4$ V 的控制电压,并监测

10 GHz 电谱分量的功率值,遍历所有的电压组合反馈得到的电功率等高线图, x 轴和 y 轴分别对应加到 0° 和 45° 两个波片的电压. 根据 DGD 值同 10 G 频率分量的功率值对应关系,即实验系统反馈功率对应 DGD 的关系图 5(b)所示,当采样的功率值最大时,这时 DGD 值最小,即图 5(a)中采样最高点就是补偿最佳点,也就是在图中颜色最深的区域.

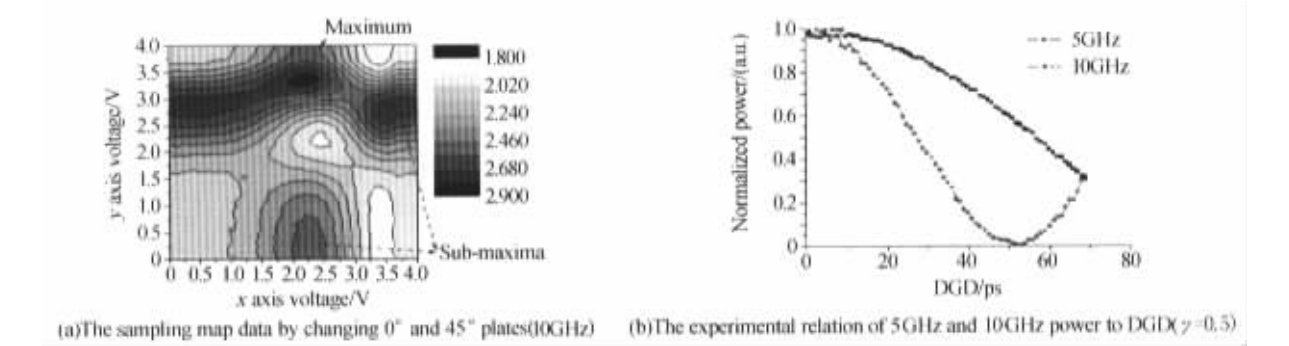


图 5 反馈系统采样数据图
Fig. 5 Feedback system sampling data

2.2 实验结果

为了增加了搜索极值的准确度,增加了 -45° 的波片,采用三个波片进行了搜索补偿实验,实验结果如图 6 所示. 图 6(a)为输入的信号眼图,示波器显示每格为 20 ps,脉冲周期为 100 ps,图 6(b)为 PMD

模拟器之后的信号眼图,双峰结构明显,PMD 效应影响严重,图 6(c)自适应补偿以后的眼图,对比初始脉冲眼图,可见补偿效果明显,而且通过优化算法控制,在 1 s 内均可以完成跟踪补偿,重复多次实验结果类似.

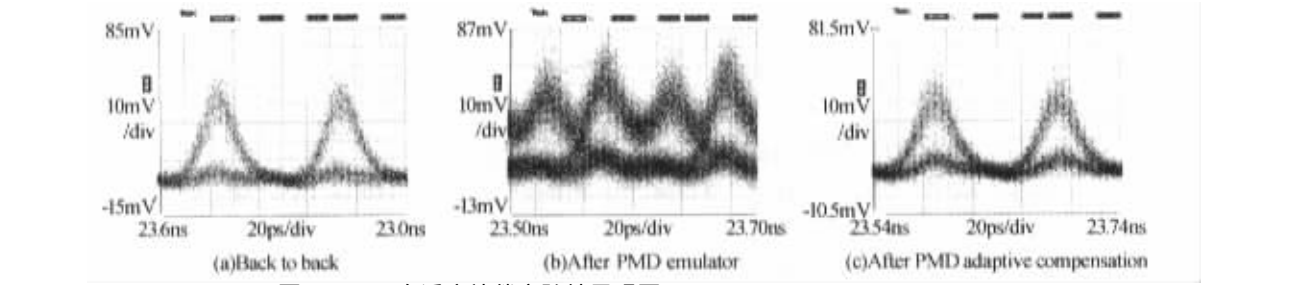


图 6 PMD 自适应补偿实验结果眼图
Fig. 6 The eye diagrams of PMD adaptive compensation experimental result

3 结论

我们搭建了 10 Gb/s 的 RZ 码 PMD 自适应补偿系统,并成功地进行了一阶 PMD 自适应补偿的实验,首次将 PSO 算法用于 PMD 自适应补偿的研究中,跟踪补偿时间小于 1 s,补偿效果明显.

感谢清华大学电子工程系姚敏玉老师为实验提供 10 Gb/s 超短脉冲源^[7]、ADVANTEST 公司提供码源发生器(D3186).

参考文献

1 Takahashi T , T Imai , Aiki M. Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarization mode dispersion in in-line amplifier systems. *Electron Lett* ,1994 , **30**(4) 348 ~ 349
2 Heismann F , Fishman D A , Wilson D L. Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10 Gb/s transmission system. *Proc ECOC' 98* , WdC11 ,

1998. 529 ~ 530
3 Ooi H , Akiyama Y , Ishikawa G. Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40 Gb/s transmission. *Proc OFC/IOOC'99* , WE5-1 , 1999. 21 ~ 23
4 Pua H Y , Peddanarappagari K , Zhu B Y *et al.* An adaptive first-order polarization-mode dispersion compensation system aided by polarization scrambling : theory and demonstration. *J Lightwave Technol* , 1999 , **18**(6) 832 ~ 841
5 刘秀敏 ,李朝阳 ,李荣华 ,等 . 偏振模色散补偿系统 . 半导体光电 2001 **22**(6) 386 ~ 389
Liu X M , Li C Y , Li R H , *et al.* *Semiconductor Optoelectronics* , 2001 **22**(6) 386 ~ 389
6 杨伯君 ,李朝阳 ,于丽 . 高速光通信系统中偏振模色散的补偿 . 光通信研究 2001 **104**(2) 43 ~ 46
Yang B J , Li C Y , Yu L. *Study on Optical Communications* , 2001 **104**(2) 43 ~ 46
7 Zhang J , Yao M , Zhang H , *et al.* 10 GHz actively mode-locked pulse generation employing a semiconductor optical

amplifier and an electro-absorption modulator in a fiber ring.
Optics Communications , 2001 ,**197**(4-6) 385 ~ 391

8 刘秀敏 ,李朝阳 ,李荣华 ,等 . 用 Sagnac 干涉法和固定分
析法测量光纤偏振模的色散 . 中国激光 ,2002 ,**29**(5) :
455 ~ 458

Liu X M , Li C Y , Li R H , et al. *Chinese Journal of Lasers* ,
2002 ,**29**(5) : 455 ~ 458

The First-order PMD Adaptive Compensation Experiment in 10 Gb/s Optical Communication System

Zhou Guangtao , Zhang Xiaoguang , Yu Li , Shen Yu , Zheng Yuan , Li Chaoyang , Yang Bojun
School of Science , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876
Received daet 2003-05-06

Abstract An experimental system to compensate first-order polarization mode dispersion (PMD) in 10 GHz RZ optical communication transmission system is reported. It only takes less than 1s to find and compensate 29 ps differential group delay (DGD) perfectly.

Keywords High speed optical communication ; Polarization mode dispersion (PMD) ; Adaptive compensation

Zhou Guangtao was born on March 10 ,1978 ,in Songyuan ,Jilin Province ,China. He received Bachelor degree in Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT) in 2001. Currently he is working towards the Master degree in the science school of BUPT. His main research focuses on the study of polarization mode dispersion compensation in high speed optical communication.

