

光纤通信系统中偏振模色散自适应补偿实验研究*

张晓光¹ 于 丽¹ 郑 远¹ 李朝阳¹ 周光涛¹ 沈 昱¹
杨伯君¹ 王宏祥² 王 岚² 纪越峰²

(1 北京邮电大学理学院 ,北京 100876)
(2 北京邮电大学电信工程学院 ,北京 100876)

摘 要 成功地研制了光纤通信系统偏振模色散的自适应补偿实验系统. 实验中采用特定频率分量功率取样作为反馈信号,采用一种名为 PSO(Particle Swarm Optimization)的优化方法作为反馈控制算法. 偏振模色散的补偿量达 30 ps ,自动跟踪补偿时间为 1 ~ 2 s ,实现了准实时自动跟踪补偿.
关键词 光纤通信 ;偏振模色散 ;自适应补偿

中图分类号 TN929. 11 O436. 3 文献标识码 A

0 引言

光纤通信传输信息容量主要受到损耗与色散两个因素的限制,单模光纤中的色散主要包括色度色散(CD)和偏振模色散(PMD). 随着各种色度色散补偿技术不断完善,在传输速率大于 10 Gb/s 的光纤通信系统中,偏振模色散补偿问题越来越受到人们的重视. 国外,已有多种偏振模色散自适应补偿实验系统研制成功^[1~4]. 由于实验条件限制,国内目前对 PMD 补偿的理论分析工作较多^[5~7],也有一些 PMD 手动补偿的工作^[8]. 本文报导我们研究成功的偏振模色散自适应补偿实验系统. 实验中采用特定频率分量功率取样,并采用了一种名为 PSO (Particle Swarm Optimization)的人工智能搜索算法作为反馈控制算法,实现了跟踪时间为 1 ~ 2 s ,PMD 补偿量达 30 ps 自动跟踪补偿.

1 偏振模色散补偿方案

1.1 偏振模色散补偿原理概述

偏振模色散是指光纤两个偏振主态(PSP)之间产生的差分群时延(DGD)^[9]. 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 $\dot{q} = \Omega / \Delta\tau$ 代表光纤偏振主态的快轴在 Poincaré 球上的方向, $\Delta\tau = |\Omega|$ 代表两个偏振主态差分群时延^[9]. 如果用 Ω_f 表示光纤通信系统中光纤的偏振模色散矢量,用 Ω_c 表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 Poincaré 球上光纤偏振主态快轴矢量与补偿器偏振主态快轴矢量之间的夹角.

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,目标是使 $\Delta\tau_{total} = 0$. 首先通过调整偏振控制器使 $\theta = 90^\circ$,使 $\Delta\tau_{total}$ 达到最小值,再通过调整可变时延器的 $\Delta\tau_c$ 直至 $\Delta\tau_{total} = 0$.

1.2 偏振模色散补偿方案选择

偏振模色散自适应补偿器由三部分组成(图 1),其中 PMD 补偿单元用来补偿光纤系统中的偏振模色散, PMD 监控信号提取单元用来提取和监控光纤系统中偏振模色散的变化并提供给逻辑控制单元,逻辑控制单元根据提取的 PMD 监控信号,通过逻辑算法和控制电路调整 PMD 补偿单元的补偿量,达到自适应补偿光纤系统中偏振模色散的目的.

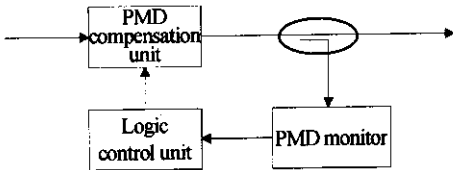


图 1 PMD 自适应补偿器的基本构成
Fig. 1 The basic structure of Adaptive PMD Compensator

一级 PMD 补偿器一般有两种结构(如图 2 所示). 一种由一个偏振控制器 PC(需要 2 个自由度控制)和一个固定群时延 DGD 延迟器组成,此种结构总共需要 2 个自由度控制. 另一种由一个偏振控制器 PC(2 个自由度)和一个可变群时延 DGD 延迟器(1 个自由度)组成,此种结构总共需要 3 个自由

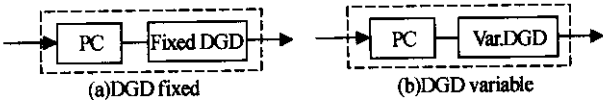


图 2 一级 PMD 补偿器的两种结构
Fig. 2 Two structure of First - order PMD compensators

*国家“863”计划(2001AA122041)和国家自然科学基金(60072042)资助项目
Tel 010-62282050 Email xgzhang@bupt.edu.cn
收稿日期 2003-08-16

度控制.

通过数值仿真对比了上述两种结构的补偿器对一阶 PMD 补偿效果,如图 3. 数值仿真结果显示,①补偿后系统的 Q 代价大大降低,由 4 dB 下降到 1.4 dB 以下;②DGD 可变的补偿方式比 DGD 固定的补偿方式要好,但只要固定 DGD 值选择恰当,可变 DGD 补偿方式比起固定 DGD 补偿方式,补偿性能只有轻微改善,补偿控制的复杂度却增加了. 通过对补偿性能与复杂度的综合权衡考虑,实验中采用了 DGD 固定的补偿结构,控制自由度为 2 个.

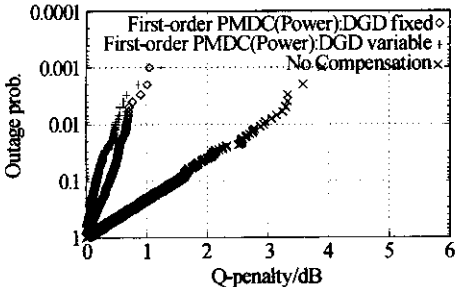


图 3 一级 PMD 补偿器中 DGD 固定与 DGD 可变补偿效果的对比

Fig. 3 The comparison of compensation effects using fixed DGD and variable DGD in first - order PMD compensator

1.3 偏振模色散补偿的取样与反馈算法

作为监控链路中偏振模色散的信号取样一般有两种方法,一种为偏振度(DOP)取样,一种为电域特定频率分量功率取样,具体方法是使用光探测器(PD)接收光功率信号并转换为电信号后,利用带通滤波器对其特定频率分量功率取样. 由于电域特定频率分量功率取样结构简单,经济上花费较少,我们采用了这种取样方法.

采用特定频率分量功率取样作为监控链路中 PMD 的简单原理如下^[3]. 假如链路输入偏振态在输入偏振主态 PSP 的两个偏振方向之间的分光比分别为 $\gamma:1-\gamma$,经传输后输出偏振主态之间的差分群时延 DGD 为 $\Delta\tau_{\text{total}}$,光电检测前两偏振方向的脉冲时域信号用 $\gamma F(t)$ 和 $(1-\gamma)F(t+\Delta\tau_{\text{total}})$ 表示,则

探测到的电功率谱密度为

$$P(f) \propto |\int [\gamma F(t) + (1-\gamma)F(t+\Delta\tau_{\text{total}})] \cdot \exp(i2\pi f) dt|^2 = K(f) |F(t)|^2 \exp(i2\pi f) dt|^2 \quad (3)$$

式中

$$K(f) = 1 - 4\gamma(1-\gamma)\sin^2(\pi f\Delta\tau_{\text{total}}) \quad (4)$$

图 4 分别是 5 GHz、2.5 GHz 频率分量的电功率值与链路中 DGD 的关系曲线.

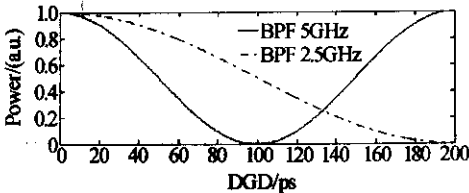


图 4 频率分量电功率与链路中 DGD 的关系($\gamma=0.5$)

Fig. 4 The relation of 2.5 GHz and 5 GHz power to DGD ($\gamma=0.5$)

对于 2.5 Gb/s 的通信系统,一个比特周期是 400 ps,如果 DGD 不超过此范围,则电功率值与 DGD 是单调递减关系. 我们利用反馈算法搜索电功率最大值的方法达到自动补偿 PMD 的目的. 但是从图 4 看出,2.5 GHz 曲线电功率随 DGD 变化缓慢,这样由于噪声的影响,电功率不能反映 DGD 的微小变化. 从图 4 看出,5 GHz 电功率曲线随 DGD 变化迅速,但单调区间为 0 ~ 100 ps. 在我们的实验中 DGD 的最大为 50 ~ 60 ps,因此采用 5 GHz 功率信号作为监控信号是可行的.

本实验采用归零(RZ)码序列脉冲作为信号源,而未采用非归零(NRZ)码,原因是考虑到 RZ 码频谱更宽. 图 5 显示 NRZ 码的频谱中,5 GHz 功率分量非常小(图 5(a)),而 RZ 码频谱的 5 GHz 功率分量还相当大(图 5(b)). 因此我们采用 RZ 码脉冲光源可以为采用 5 GHz 功率监控信号提供方便.

图 6 是采用的取样反馈控制系统的框图. 从光电检测提取电信号功率,经频率分量带通滤波器提取频率分量电功率,并转换成电压信号由数据采集卡采集输入计算机进行控制. 由于电压信号较小,

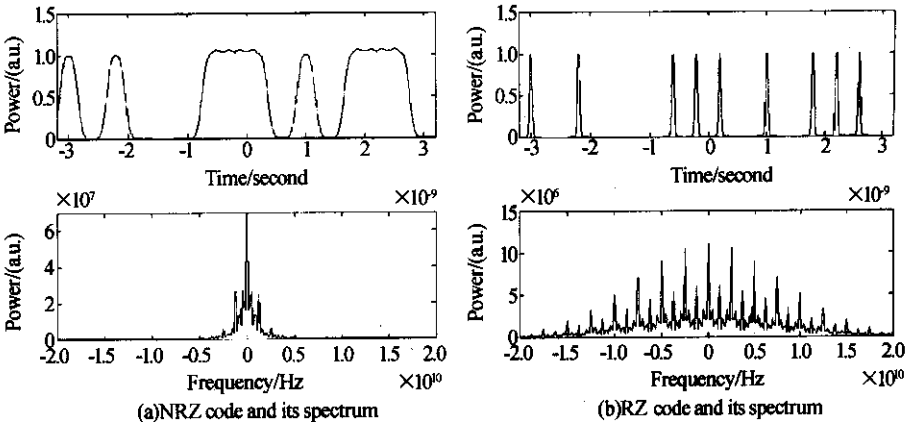


图 5 非归零码及归零码的码型与频谱图

Fig. 5 NRZ and RZ codes and their spectrums

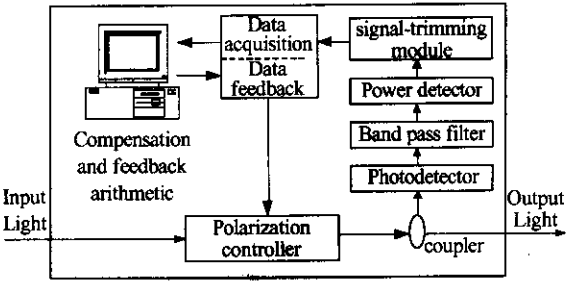


图 6 取样反馈控制系统

Fig. 6 Sampling and Feedback Controlling system

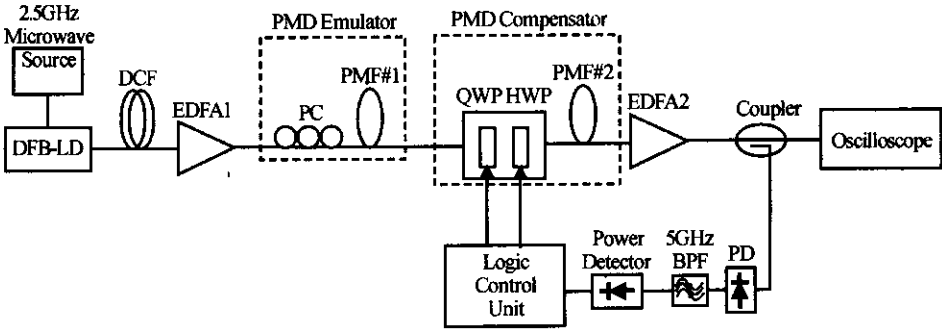
故使用信号调理模块对信号电压进行低噪声放大，随后输入数据采集卡。优点是抗噪声能力强。

在逻辑控制单元中采用了一种名为 PSO (Particle swarm optimization) 的人工智能搜索算法来控制反馈补偿系统,此算法的优点是:全局搜索能力强,不会陷入局部最大值;抗噪声能力强,适用于低信噪比的系统;功能实现简单,需调整参数少,收敛速度快。

2 偏振模色散自适应补偿实验

2.1 实验装置

采用的 PMD 自适应补偿实验系统装置如图 7。



DFB-LD distributed feedback laser diode; DCF dispersion compensation fiber; EDFA erbium doped fiber amplifier;
PC polarization controller; PMF polarization maintaining fiber; QWP quarter wave plate; HWP half wave plate;
PD photodetector; BPF band pass filter

图 7 偏振模色散自适应补偿实验系统

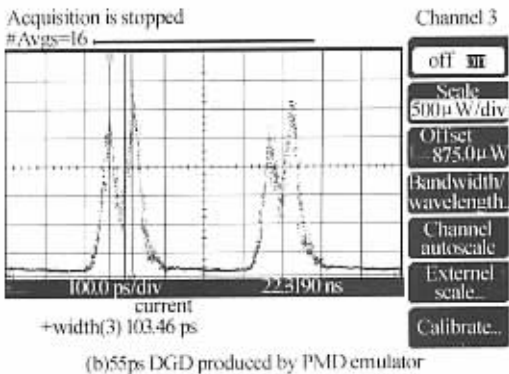
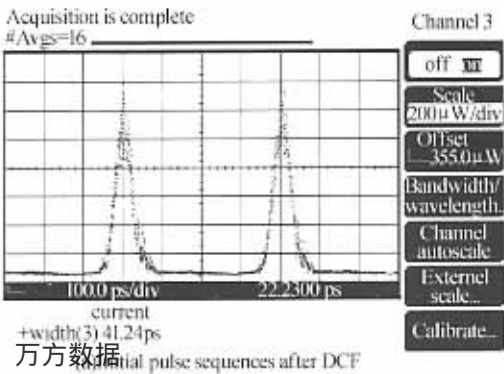
Fig. 7 Experiment setup

2.2 实验结果

实验中,用示波器监视系统 PMD 自适应补偿的全过程(图8(a)~(d))。经 DCF 压缩的脉宽为 41 ps 的初始光脉冲序列如图 8(a)。调整模拟器中

实验中,用 2.5 GHz 微波源调制 DFB 半导体激光器组成增益开关 DFB 激光器,输出 2.5 Gb/s RZ 序列脉冲,脉冲宽度 51 ps,经过色散参量 D 为负值的 DCF 光纤将脉冲压缩到 41 ps。经 EDFA 放大后将信号送入 PMD 模拟器。PMD 模拟器由光纤型偏振控制器和一段保偏光纤#1 构成,模拟器的 DGD 由 Sagnac 干涉仪法测量^[10]为 0~29ps。补偿器采用如图 2 所示的固定 DGD 方式,其中电控偏振控制器采用了 Corning 公司的 PC-410,该偏振控制器有 4 个电光晶片可以控制。我们用反馈信号控制其中 2 片,分别作为四分之一波片和二分之一波片。补偿器的固定 DGD 由另一保偏光纤#2 产生 25 ps 差分群时延。50:50 耦合器将信号一路分给采样示波器(HP83480A)观察链路中 PMD 补偿效果,另一路提供给取样与逻辑反馈控制系统。光探测器(带宽 15 GHz)接收到的信号经过 5 GHz 带通滤波器提取频率分量信号,经过微波探测器转换为电压信号送入逻辑控制单元。我们研制的逻辑控制单元以及反馈算法如 1.3 节所述,优点是抗噪声能力强,全局搜索能力强,补偿响应速度快。

的偏振控制器,使系统整个链路的 $DGD\Delta\tau_{total}$ 为 55 ps(图 5(b))。开启逻辑反馈控制单元,经过搜索控制,找到最佳点,完成 PMD 的自动补偿(图 8(d))。补偿后光脉冲信号脉宽为 44 ps。在最初的实验中,



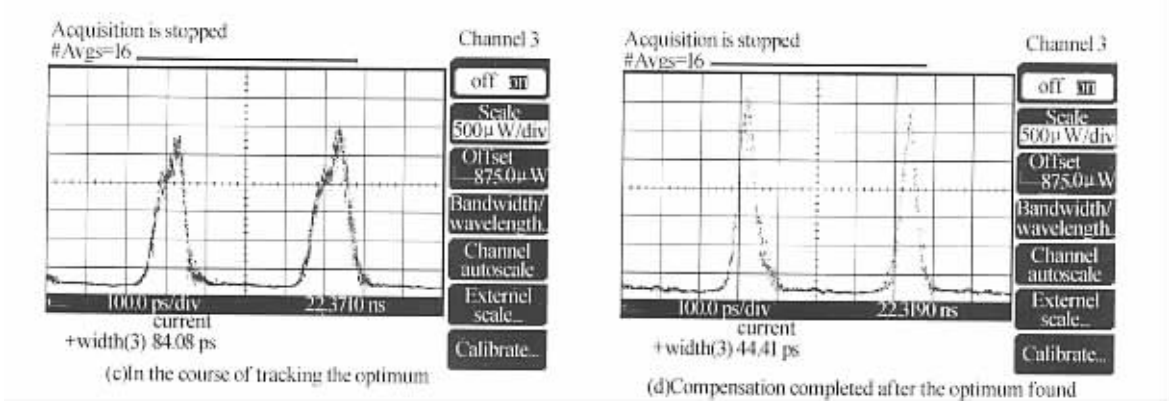


图 8 示波器监视到的自动跟踪补偿全过程

Fig. 8 The whole procedures of adaptive PMD compensation

整个自动跟踪补偿时间约为 8 ~ 10 s. 通过改进算法后,自动跟踪补偿时间减少为 1 ~ 2 s,几乎做到了准实时自动跟踪补偿. 图 8(c)为捕捉到的搜索进行过程中的情况. 实验中,一旦找到最佳点,系统就会一直稳定在如图8(d)的这种补偿最佳状态不变. 此时,随机改变模拟器的偏振控制器,系统会在 1 ~ 2 s 内返回图 8(d)的状态,做到自适应跟踪补偿.

3 结论

在国内首次利用 PSO 算法实现了偏振模色散自适应补偿的实验系统,补偿量达 30 ps,自动跟踪时间 1 ~ 2 s,做到了准实时跟踪补偿.

参考文献

1 Takahashi T, Imai T, 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. in Proc ECOC'98, WdC11, 1998. 529 ~ 530

3 Ooi H, Akiyama Y, Ishikawa G. Automatic polarization - mode dispersion compensation in 40 - Gbit/s transmission. in 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 Zheng Y, Yang B, Zhang X. Three - stage polarization mode dispersion compensator capable of compensating second - order polarization mode dispersion. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(10): 1412 ~ 1414

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 (2) : 43 ~ 46

Yang B J, Li C Y, Lu L. *Study on Optical Communications*, 2001 (2) : 43 ~ 46

7 毛兵成,李朝阳,赵荣华. 利用两段 PMF 的 PMD 补偿法. *半导体光电* 2001, **22**(6): 383 ~ 385

Mao B C, Li C Y, Zhao R H. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(6): 383 ~ 385

8 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

9 Poole C D, Favin D. Polarization-mode dispersion measurement based on transmission spectra through a polarizer. *J Lightwave Technol*, 1994, **12**(6): 917 ~ 929

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

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

An Experiment of Adaptive Polarization Mode Dispersion Compensation
for Optical Communication Systems

Zhang Xiaoguang¹ , Yu Li¹ , Zheng Yuan¹ , Li Chaoyang¹ , Zhou Guangtao¹ ,
Shen Yu¹ ,Yang Bojun¹ , Wang Hongxiang² , Wang Lan² , Ji Yuefeng²

1 School of Science ,Beijing University of Posts and Telecommunications ,Beijing 100876

2 School of Telecommunication Engineering ,Beijing University of Posts and Telecommunications ,Beijing 100876

Received date 2003-01-16

Abstract An experiment of adaptive polarization mode dispersion compensation for optical communication systems was successfully realized. In the experiment ,the power of specific frequency component was detected as PMD monitoring feedback signal. An artificial intelligence search algorithm ,called particle swarm optimization (PSO) , was adopted in the experiment. The compensated PMD value is up to 30 ps. Automatic tracking time is about 1 to 2 second. The quasi - real - time adaptive PMD compensation was realized.

Keywords Optical communications ;Polarization mode dispersion ;Adaptive compensation



Zhang Xiaoguang was born on June 8 ,1961 in Beijing ,China. He received the B. S. degree and M. S. degree in Physics from Peking University in Beijing ,China ,in 1985 and 1988. He is currently a professor in Physics at Department of Physics ,School of Science ,Beijing University of Posts and Telecommunications. His research interests include nonlinear optics ,optical electronics , and optical fiber communications.