

# 40 Gbit/s OTDM 系统中二阶偏振模色散 自适应补偿技术研究\*

张建忠 张晓光 于丽 席丽霞 沈昱 周光涛 张娜 吴斌 苑铁成  
(北京邮电大学理学院,北京 100876)

**摘要** 报导了一个 40 Gbit/s OTDM 系统中二阶偏振模色散(PMD)自适应补偿系统,此实验系统基于偏振度的反馈控制方法实现了二阶偏振模色散自动补偿. 在中心波长 1560.5 nm 处,补偿后的 DGD 和二阶 PMD 效应改善明显. 采用粒子群优化算法作为偏振模色散自适应补偿的搜索算法,补偿时间 30 ms 左右.

**关键词** 光纤通信;偏振模色散;自适应补偿;粒子群优化算法

**中图分类号** TN929.11 O436.3 **文献标识码** A

## 0 引言

在高速光纤通信系统中由于 PMD 引起的信号劣化成为单信道速率提升的主要障碍. 在码率是 40 Gbit/s 或者更高时,更为严重. 研究表明,单模光纤中的偏振模色散表现出一种统计随机规律<sup>[1]</sup>,无法像色度色散那样可以较容易地进行补偿. 尤其在早期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. 本文从实验

上利用二级补偿器成功实现了对于二阶偏振模色散的自适应补偿,采用基于接收信号的偏振度(Degree of Polarization, DOP)<sup>[2,3]</sup>反馈监测系统. 采用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO<sup>[4]</sup>)作为搜索算法. 该搜索算法自动补偿时间 30 ms 左右.

## 1 实验装置

实验装置如图 1. 10GHz 的光脉冲通过 SOA + EAM 的光纤环形激光器,10 Gbit/s 伪随机码经铌酸锂调制,复用产生 40 bit/s 的光信号. 在 4 × 10 G 复用器复用前后得到的 RZ 码信号眼图如图 2.

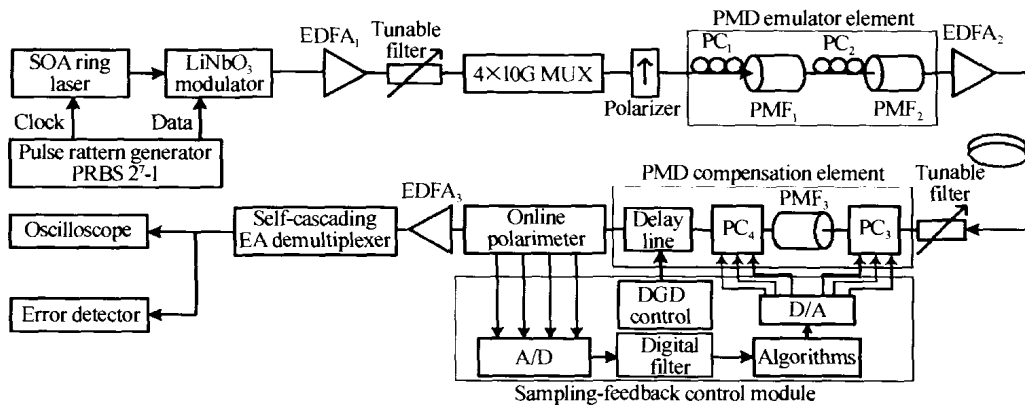


图 1 两级自适应偏振模色散补偿实验装置

Fig. 1 Experiment setup for adaptive two-stage PMD compensation

PC<sub>1</sub>、PMF<sub>1</sub>、PC<sub>2</sub>、PMF<sub>2</sub> 组成 PMD 模拟单元, PC<sub>1</sub>、PC<sub>2</sub> 是光纤型手动调节偏振控制器,保偏光纤 PMF<sub>1</sub> 和 PMF<sub>2</sub> 分别有 16 ps 和 14ps 的差分群时延(differential group delay, DGD). PMD 补偿模块分别由 PC<sub>3</sub>、PMF<sub>3</sub> 和 PC<sub>4</sub>、可变时延线(DDL - 650, OZ Optics Limited)组成两级补偿系统,可以补偿二阶 PMD<sup>[5,6]</sup>,其中 PMF<sub>3</sub> 的 DGD 是 15 ps,调整可变时

延值到 15.5 ps. PC<sub>3</sub> 和 PC<sub>4</sub> 是光纤挤压式电控偏振控制器(PolarITETM II, General Photonics Co.),控制电压 0 ~ 10 V, 3 dB 带宽为 40 kHz. 实验中对于每个偏振控制器的四个端口控制其三个,总共 6 个端口(6 个自由度)需要控制. 光滤波器 OBPf 的 3 dB 带宽为 0.8 nm,用来过滤 EDFA 产生的 ASE 噪声. 模拟带宽 700 kHz 的高速在线偏振仪(polarimeter)用来监测光纤链路中的 PMD,并提供 DOP 反馈信号. 反馈及逻辑控制单元根据反馈信号通过逻辑运算控制 PC<sub>3</sub> 和 PC<sub>4</sub> 达到自动补偿 PMD 的目的. PMD 的补偿效果由误码仪(ADVANTEST 公司

\*国家“863”计划(2001AA122041)、国家自然科学基金(60072042)和国家博士点基金资助

Tel:010-62281490 Email:gzzhangjz@163.net

收稿日期:2004-02-23

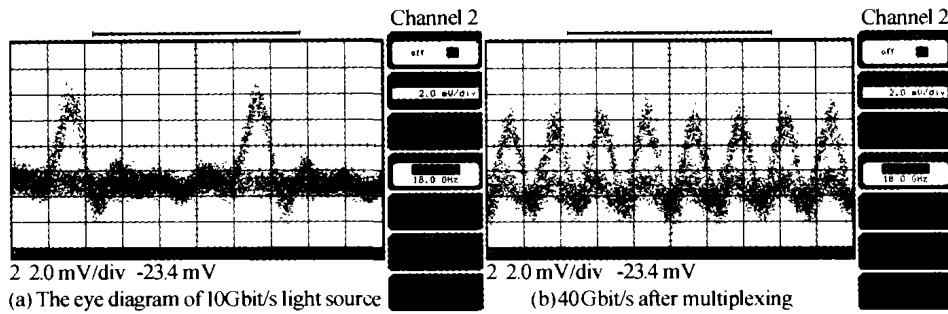


图2 40 Gbit/s RZ 码复用前后眼图

Fig. 2 The eye diagram of before and after multiplexed for 40Gbit/s system of RZ format

D3186/3286) 和示波器(HP83480) 监测。

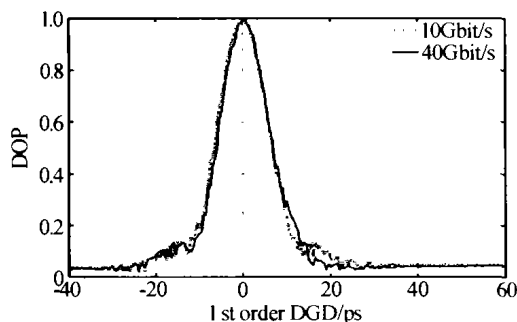
## 2 基于偏振度的偏振模色散的监测系统

PMD 的补偿技术大体分为三类<sup>[7]</sup>:电补偿、光电补偿和光补偿。电补偿由于受到电速率的制约,在高速系统中受到了限制。光电补偿要用到多个光电探测装置,其成本要明显提高。由于光补偿不受信号速率的限制,其应用优势比较明显,下面主要使用的是光补偿方案进行 PMD 补偿研究。

偏振模色散自适应补偿要求根据在 PMD 补偿单元后检测链路中信号的偏振度作为控制反馈信号。Polarimeter 得到的四路电信号  $s_0, s_1, s_2, s_3$  经过数字滤波,降低由于 Polarimeter 电噪声,电传输环境噪声,数据采集卡电噪声引起的 DOP 值的波动性。由下式计算光波信号的 DOP。

$$DOP = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}}{s_0} \quad (1)$$

链路中无偏振模色散时,光信号为完全偏振光, DOP 为 1。随着 DGD 的增大, DOP 下降。由于各 Stokes 参量都是光强信号,所以采用 DOP 作为反馈信号的最大优点是传输信号速率无关,由此制成的补偿器适应性强。在不同码率的补偿系统中采用同一算法在不同信号速率的实验系统中得到了证实。图 3 分别采用 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s RZ 码两种传输速率, DOP(偏振度)和 DGD(差分群时延)之间的

图3 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s RZ 码 DOP(偏振度)和 DGD(差分群时延)的实验关系曲线,  $\gamma = 0.5$ Fig. 3 Measured DOP response curve for 10 Gbit/s and 40 Gbit/s RZ format  $\gamma = 0.5$ 

关系,光矢量在两个主态间的分光比  $\gamma = 0.5$ 。

图 3 是遍历时延线每隔 0.5 ps 搜索链路得到的 DOP 和 DGD 的关系曲线。从图上可以看到当在光纤链路中 DGD 为零时,由偏振检偏仪检测信号得到的 DOP 值接近 1。时延线的正负分量得到的 DOP 值基本是对称的分布,和理论相符合。

说明 DOP 和 DGD 的关系受到脉冲形状和脉冲宽度影响,光源脉冲宽度在 7 ps 左右,所以随着时延值的变化, DOP 值下降很快在 10 ps 左右 DOP 值降为 0.2。

## 3 粒子群优化 (PSO) 搜索补偿算法及补偿效果

### 3.1 PSO 算法的基本原理和特性

用 DOP 作为反馈信号的 PMD 补偿系统中,补偿的直接目的是调节偏振控制器等器件,让反馈信号的 DOP 值最大。所以要求算法能够在三维(一级补偿器)或更高维(两级以上补偿器)的搜索空间中找出链路中全局的最大值,尽量避免陷入局部极值。PSO 算法对静态、噪声、连续变化的多维全局最佳值搜索问题非常有效<sup>[8]</sup>。

PSO 算法涉及到描述多维空间中个体的社会行为,每个个体 (particle) 都可以看成所有搜索维数的空间交汇点。在每次循环中,个体根据目标来更新自己的位置,邻居个体之间相互分享最好位置的信息,如果任何一个个体的位置离目标位置足够近,或者说他们之间的距离小于规定的误差,就认为算法已经找到了最佳值。

PSO 算法定义每个个体都可能是多维空间搜索问题的一个解, D 维搜索空间中个体  $i$  的位置矢量可以表示为  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ , 个体  $i$  对自己以前的最好位置矢量  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  也有记忆, 个体  $i$  的速度矢量可以表示为  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。在每一次循环中,在该个体的邻近个体组(个体  $i$  与它周围一定数量的其他个体构成一个邻近个体组)中,与目标最近的个体位置矢量用  $P_g$  表示,把  $P_g$  矢量与当前个体的  $P_i$  矢量结合起来,对个体的速度矢量

进行调节,然后用这个速度矢量来计算个体新的位置矢量.在速度矢量的调节中,受自己以前最好位置矢量( $P_{id}$ )影响的部分被称作是个体认知部分,受邻近个体最好位置( $P_{gd}$ )影响的部分被称作群体学习部分.

### 3.2 PSO 算法的速度更新公式

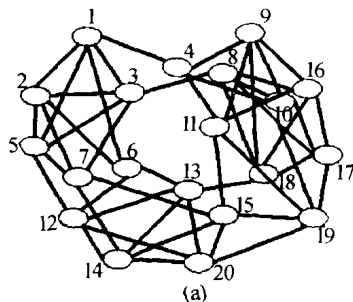
PSO 算法中,速度和位置更新的公式为

$$v_{id} = v_{id} + \varphi_1 * rand() * (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 * rand() * (p_{gd} - x_{id}) \quad (2)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (3)$$

其中,常数  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别称为个体认知速率和群体学习速率,决定了个体认知和群体学习对速度影响的比重.设定速度的最大值为  $V_{max}$ ,用以限制个体的速度不至于太大.

PSO 算法有两种邻居结构——全局邻居结构和局部邻居结构.在我们的算法中采用图 4 的局部邻居结构,每个粒子有 5 个邻居个体,搜索到全局极值的成功率达到 100%,因为在这种结果下,每一个邻近个体组都有自己的一个最佳,通过个体组与个体



particle	neighbors
1	2,3,4,5,6
2	1,3,5,6,7
3	1,2,5,7,8
4	1,6,9,10,11
5	1,2,3,7,12
6	1,2,4,12,13
7	2,3,5,14,15
8	3,10,16,17,18
9	4,10,11,16,18
10	4,8,9,17,19
11	4,9,15,16,19
12	5,6,13,14,20
13	6,12,14,18,20
14	7,12,13,15,20
15	7,11,14,19,20
16	8,9,11,17,18
17	8,10,16,18,19
18	8,9,13,16,17
19	10,11,15,17,20
20	12,13,14,15,19

(b)

图 4 局部邻居结构  
Fig. 4 Local neighborhood structure

组之间的联系使得这些最佳值能够实时比较,以获得整个个体中的最佳.

使用局部邻居的 PSO 算法流程图如图 5,其中 pbest 表示个体所得到的最佳目标函数值,pbestx 表示此时个体的位置矢量,lbest 表示个体邻近组内最佳的目标函数值,gbest 表示所有组的 lbest 进行比较,得到的最佳的值.算法得到的最佳值经 DA 转换发送到电控偏振控制器的 6 个口,得到系统得到最佳状态.

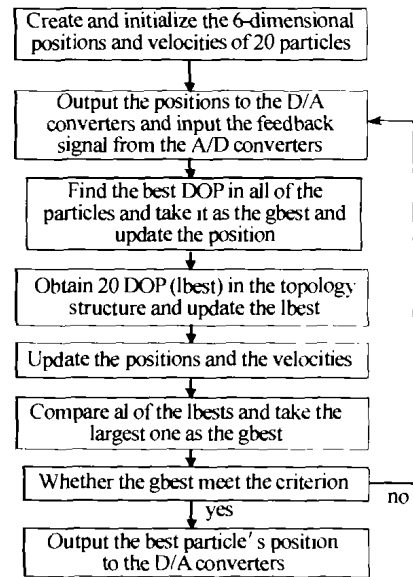


图 5 局部邻居结构的 PSO 算法流程  
Fig. 5 The schematic illustration of LPSO algorithm

在本实验中,应用图 4 所示的拓扑结构的 20 个粒子,每个粒子有 5 个局部邻居结构的 PSO 算法,每路控制电压搜索范围 0 ~ 10 V,结果显示补偿效果非常好,搜索时间达到 30 ms 左右.

## 4 实验结果与分析

在二级补偿器的实验系统中,DA 控制两个电控偏振控制器的 6 个口(6 个自由度)实现对二阶 PMD 的补偿,搜索时间 30 ms 左右.实验中 PMD 模拟器  $PMF_1$  和  $PMF_2$  分别为 16 ps 和 14 ps, PMD 补偿器  $PMF_3$  为 15 ps,可变时延线调整到 15.5 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 模拟单元的手动偏振控制器,将接收端信号眼图调节到较差的情况( $DOP = 0.3562$ ),如图 6 (a) 所示.然后,运行 PSO 算法程序,经过瞬时(经计时程序显示在 30 ms 左右)自适应搜索后,输出信号即达到稳定的状态. ( $DOP = 0.9845$ )

从图 6 可以看到,解复用出的 10 Gbit/s RZ 码眼图补偿效果明显.采用 EXFO 公司 FPMD5600 测试仪测量补偿前后链路中 PMD 对比效果如图 7.

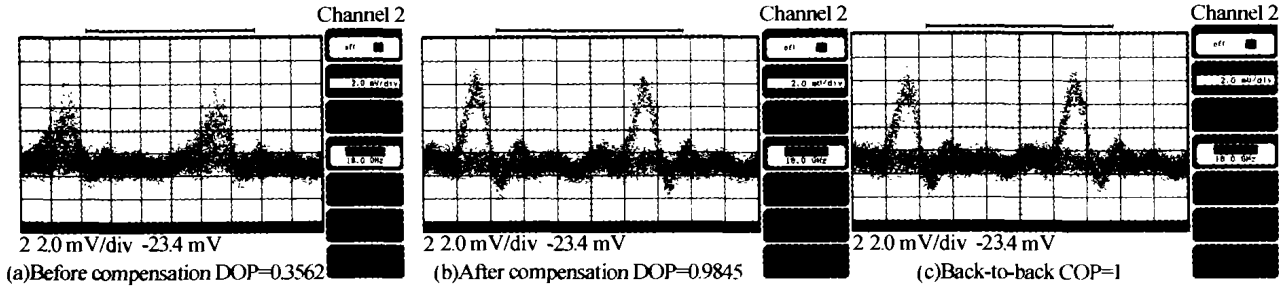


图 6 40 Gbit/s RZ 码解复用后偏振模色散补偿前后眼图

Fig. 6 The eye diagram of demultiplexed single before and after adaptive PMD compensation for 40 Gbit/s RZ format

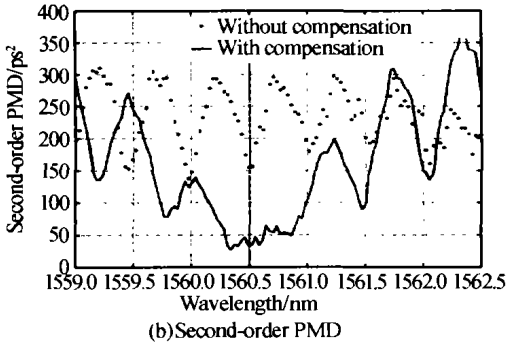
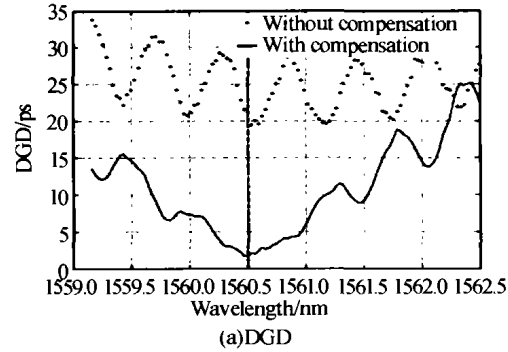


图 7 40 Gbit/s RZ 码补偿前后光纤链路中 DGD 和二阶 PMD 的测量结果

Fig. 7 DGD and second-order PMD measurement results before and after compensation for 40Gbit/s RZ format

从图 7 可以看出,二阶 PMD 补偿前后链路中的一阶 PMD (DGD) 和二阶 PMD 测量结果,证明设计的两级补偿器能够对光纤链路中的 PMD 实现补偿. 图 7(a) 和 (b) 是在激光器工作波长 (1560.5 nm) 对链路补偿前后 DGD 和二阶 PMD 同时补偿到最小 (采用 EXFO 公司 FPMD5600 测试仪). 这说明通过对光纤链路的 PMD 补偿基本可以消除传输线路中的 PMD 造成的影响.

进行误码率的测量时,在不同接收功率下,每隔 10 s 中记录累计得到误码率,得到图所示的曲线,在误码率为  $10^{-9}$  处为小于 1 dB 的代价.

图 8 表明补偿完成时 DOP 值接近 1,使系统的误码率得到了提高,接近背靠背的  $1 \times 10^{-9}$ ,达到了系统性能的要求.

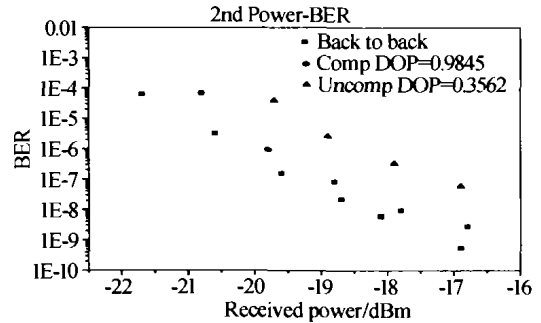


图 8 接收端光功率与误码率的关系散点图

Fig. 8 BER performance

## 5 结论

运用基于偏振度的反馈控制信号,将 PSO 算法应用于 PMD 自适应补偿,成功完成了 40 Gbit/s RZ 码光通信系统两级自适应补偿实验系统,补偿时间 30 ms 左右. 如果采用高性能的数据采集卡、DA 转换卡,可以大幅度减少系统补偿时间. 进一步提高系统性能.

**致谢** 感谢 ADVANTEST 公司提供误码检测设备 (D3186, D3286),感谢 EXFO 公司提供 PMD 检测设备 (FPMD5600).

## 参考文献

- 1 Foschini G J, Poole C D. Statistical theory of polarization dispersion in single mode fibers. *J Lightwave Technol*, 1991, 9 (11): 1439 ~ 1456
- 2 Nobuhiko Kikuchi, Sinya Sasaki. Polarization mode dispersion (PMD) detection sensitivity of degree of polarization method for PMD compensation. *Proc. European Conference on Optical Communications 1999 (ECOC'99)*, Nice France, Vol. II (WeA 1. 3), 8 ~ 9
- 3 张晓光,于丽,郑远,等. 光纤通信系统中偏振模色散自适应补偿实验研究. *光子学报*, 2003, 32 (12): 1474 ~ 1478  
Zhang X G, Yu L, Zheng Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32 (12): 1474 ~ 1478
- 4 Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization. *Proc. Of IEEE International conference on Neural Network*, Piscataway, N. J, USA, pp1942 ~ 1948, 1995

- 5 Patscher J, Eckhardt R. Component for second-order compensation of Polarization-mode dispersion. *Electron Lett*, 1997, **33**(13): 1157 ~ 1159
- 6 Kim S. Schemes for complete compensation for polarization mode dispersion up to second order. *Opt Lett*, 2002, **27**(8): 577 ~ 579
- 7 Bulow H. PMD mitigation techniques and their effectiveness in installed fiber. OFC2000, ThH1
- 8 Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle swarm optimizer in noisy and continuously changing environments. *Artificial Intelligence and Soft Computing*, IASTED/ACTA Press, 2001, 289 ~ 294

## The Experimental Research on Adaptive PMD Compensation up to Second-Order in 40 Gbit/s OTDM System

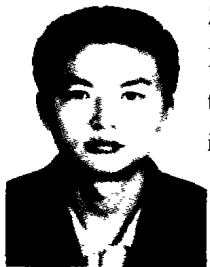
Zhang Jianzhong, Zhang Xiaoguang, Yu Li, Xi Lixia, Shen Yu, Zhou Guangtao,  
Zhang Na, Wu Bin, Yuan Tiecheng

Science School, Beijing University of Posts and Telecommunications, 100876

Received date: 2004-02-23

**Abstract** The experiments of the adaptive compensation up to Second-Order in 40 Gbit/s OTDM System based on degree of polarization (DOP) feedback control are reported. Around the operation wavelength 1560.5 nm of laser source, the DGD and the Second Order PMD decreased obviously after compensation. The effectiveness of the PMD compensator was confirmed by the comparison of eye diagrams, PMD measurement and BER analyses before and after compensation. The particle swarm optimization (PSO) was employed as control algorithm in the Adaptive PMD Compensation system. The compensation time was 30 ms.

**Keywords** Optical fiber communication; Polarization mode dispersion; Adaptive compensation; Degree of polarization



**Zhang Jianzhong** was born on April 11, 1976 in Tangshan, Hebei Province, China. He received Bachelor degree in Physics from Hebei University in Baoding, in 2000. He currently is working towards the Master degree in Beijing University of Posts and Telecommunications. His main research is focused on PMD compensation in optical communication system.