

文章编号: 0258-7025(2004)11-1391-07

## 可补偿二阶偏振模色散的两级自适应 补偿器研究

张晓光, 于 丽, 郑 远, 沈 昱, 周光涛, 席丽霞, 陈 林, 张建忠, 苑铁成, 杨伯君

(北京邮电大学理学院物理部, 北京 100876)

**摘要** 研制了对于 10 Gbit/s 非归零码(NRZ)和归零码(RZ)光纤通信系统的二阶偏振模色散(PMD)自适应补偿实验系统。实验中运用光纤链路中的偏振度(DOP)作为反馈控制信号,采用粒子群优化算法(PSO)作为偏振模色散自适应补偿的搜索和跟踪控制算法,粒子群优化作为补偿搜索算法具有收敛速度快、抗噪声和避免陷入局部极值的优点;作为跟踪算法可以快速跟踪偏振模色散的随机变化。实验证明,该补偿系统可以同时补偿一阶和二阶偏振模色散。不论对于非归零码还是归零码,补偿后眼图恢复很好。补偿搜索时间为几百毫秒,跟踪系统对于链路中突发的偏振模色散变化的响应恢复时间小于 20 ms,实现了准实时的一阶和二阶偏振模色散自适应补偿与跟踪。

**关键词** 光通信;偏振模色散;自适应补偿;偏振度;粒子群优化算法

**中图分类号** TN 929.11;O 436.3 **文献标识码** A

### Experiment of Adaptive Polarization Mode Dispersion Compensation up to Second Order with a Two-Stage Compensator

ZHANG Xiao-guang, YU Li, ZHENG Yuan, SHEN Yu, ZHOU Guang-tao,  
XI Li-xia, CHEN Lin, ZHANG Jian-zhong, YUAN Tie-cheng, YANG Bo-jun

(Department of Physics, School of Science, Beijing University of  
Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** An adaptive polarization mode dispersion (PMD) compensation experiment for 10 Gbit/s nonreturn-to-zero (NRZ) and return-to-zero (RZ) optical fiber communication systems with a two-stage compensator is successfully realized, in which degree of polarization (DOP) feedback signal is used as PMD monitor. The algorithm so-called particle swarm optimization (PSO) is used in optimum searching and tracking process. It was proved that in the optimum searching process, the PSO algorithm has the characteristics of rapid convergence to the global optimum rather than being trapped in local sub-optima and robust to noise. In the tracking process, the algorithm can track the random changed PMD with fast speed. The compensator shows its ability to compensating the first- and second-order PMD at same time. After compensation the eye diagrams can be well recovered both for NRZ and RZ formats. The searching process is finished within several hundreds of milliseconds and the response time of recovering to optimum for a sudden PMD disturbance is less than 20 milliseconds. The quasi-real time adaptive PMD compensation is realized.

**Key words** optical communication; polarization mode dispersion; adaptive compensation; degree of polarization; particle swarm optimization algorithm

收稿日期:2003-08-12;收到修改稿日期:2003-12-01

基金项目:国家 863 计划(2001AA122041)和国家自然科学基金(60072042)资助项目。

作者简介:张晓光(1961—),男,上海市人,北京邮电大学教授,主要从事偏振模色散自动补偿、光孤子通信和光纤光栅的研究。E-mail: xgzhang@bupt.edu.cn

## 1 引 言

由于高速光纤网络的快速发展,偏振模色散(PMD)已经成为单信道传输速率提升( $>10$  Gbit/s)的主要障碍。近年来国际上已经有许多偏振模色散自动补偿的相关报道<sup>[1~13]</sup>。根据文献<sup>[14,15]</sup>,两级补偿器能够补偿二阶偏振模色散。本研究小组从实验上利用两级补偿器成功实现了对于一阶和二阶偏振模色散的自适应补偿。

## 2 实验装置

两级自适应偏振模色散补偿器的实验装置如图1所示。其中光发射器由波长1551.87 nm的分布反馈半导体激光器和电吸收调制器组成,用10 Gbit/s误码仪的数据信号驱动电吸收调制器产生10 Gbit/s非归零码(NRZ)。将此信号输入由误码仪的时钟信号调制的LiNbO<sub>3</sub>调制器后可以产生10 Gbit/s归零码(RZ)。由PC<sub>1</sub>,PMF<sub>1</sub>,PC<sub>2</sub>,PMF<sub>2</sub>组成偏振模色散模拟器,其中PC<sub>1</sub>和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20 ps和60 ps的差分群时延(DGD)。偏振模色散补偿器由PC<sub>3</sub>,PMF<sub>3</sub>,PC<sub>4</sub>,PMF<sub>4</sub>组成两级补偿系统,可以同时补偿一阶和二阶偏振模色散<sup>[14,15]</sup>。其中PC<sub>3</sub>和PC<sub>4</sub>是光纤挤压式电控偏振控制器,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控制其两个端口,总共4个端口(4

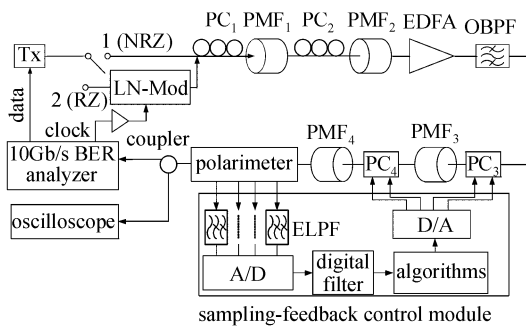


图1 两级自适应偏振模色散补偿器实验装置

Tx: 发射器; LN-Mod: LiNbO<sub>3</sub> 调制器; PC: 偏振控制器; PMF: 保偏光纤; EDFA: 掺铒光纤放大器; OBPF: 光滤波器; ELPF: 电低通滤波器; A/D: A/D 转换器; D/A: D/A 转换器

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

Tx: transmitter; LN-Mod: LiNbO<sub>3</sub> modulator; PC: polarization controller; PMF: polarization maintaining fiber; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; OBPF: optical band-pass filter; ELPF: electrical low-pass filter; A/D: analog to digital converter; D/A: digital to analog converter

个自由度)需要控制。保偏光纤 PMF<sub>3</sub> 和 PMF<sub>4</sub> 的差分群时延分别为 24 ps 和 55 ps。光滤波器(OBPF)的 3 dB 带宽为 0.8 nm,用来过滤掺铒光纤放大器(EDFA)产生的自发辐射噪声。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偏振模色散,并提供偏振度(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> 达到自动补偿偏振模色散的目的。偏振模色散的补偿效果由误码仪(ADVANTEST 公司 D3186/3286)和示波器(HP83480)监测。

## 3 偏振模色散监测方案以及偏振度与误码率的关系

偏振模色散自适应补偿器的关键技术之一是对待补偿光纤链路中的偏振模色散进行监测,以便为补偿器提供反馈信号。本实验采用了提取光纤链路中的偏振度信号的偏振模色散监测技术。利用偏振仪测量链路中光波的 Stokes 参量分别为  $s_0, s_1, s_2, s_3$ , 则光波的偏振度为

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

由于各 Stokes 参量都是光强信号,因此用偏振度作为反馈信号的最大优点是传输速率无关,由此制成的补偿器适应性强。图2是实验测量的10 Gbit/s NRZ 码以及 RZ 码偏振度与差分群时延之间的关系,其中光矢量在两个主态间的分光比  $\gamma = 0.5$ 。

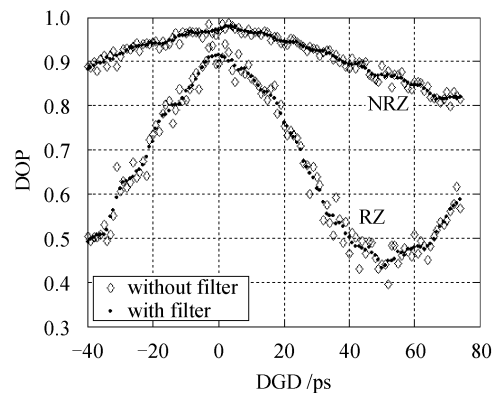


图2 采用和未采用滤波技术时,对于10 Gbit/s NRZ 码与 RZ 码偏振度对差分群时延的实验关系曲线

Fig. 2 Experimental results of DOP versus DGD for 10 Gbit/s NRZ and RZ format without and with filter technology ( $\gamma = 0.5$ )

在测量偏振度反馈信号时,克服噪声是必须的。噪声主要来源于光链路中的光噪声和数据采集卡 A/D 转换的电噪声等。实验采用两种滤波技术来克服噪声,首先将偏振仪输出的 4 路电压信号分别通过带宽为 228 kHz 的 Butterworth 低通滤波器后,由每路 500 kHz 的 A/D 转换器采样,将采样得到的数字信号经矩阵运算得到 Stokes 参量  $s_0, s_1, s_2, s_3$ , 进而得到偏振度值。然后采用图像平滑技术中的中值滤波技术,对 20 个一组的偏振度数据进行数字滤波。采用这些滤波技术后,偏振度的测量精度得到改善。图 2 中菱形符号代表未采取滤波技术的实验结果,黑点符号代表采用滤波技术后的实验结果。

误码仪对误码的测量需要一段时间,而偏振度的测量几乎是实时的。为了检验偏振模色散自适应补偿器的瞬态特性,实验通过如下方法建立了偏振度和误码率(BER)之间的关系。对于电控偏振控制器  $PC_3, PC_4$ , 随机给出 50 种不同的 4 路控制电压组合,使光纤链路处于 50 种不同的偏振模色散状态,测量相应的偏振度值,图 3 是测量结果。测量值分 3 种情况,一种极端的情况是信号无法同步,另一种极端的情况是无误码。实验发现存在一个偏振度阈值,高于这个阈值,则无误码。这个阈值可以作为补偿器搜索和跟踪算法的参考门限。由图 3 可知,对于 10 Gbit/s NRZ 码偏振度阈值是 0.89,对于 RZ 码是 0.84。

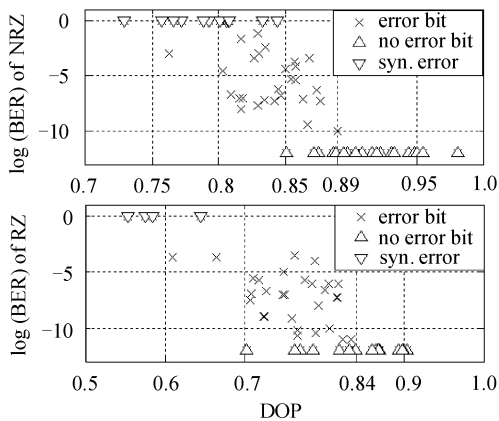


图 3 误码率与偏振度的关系  
Fig. 3 Relationship between BER and DOP

#### 4 粒子群优化搜索补偿算法与补偿效果

偏振模色散自适应补偿要求根据偏振度反馈信

号,通过搜索运算,控制电控偏振控制器  $PC_3$  和  $PC_4$ ,找到链路中偏振度达最大值的控制电压组合  $V_1, V_2, V_3, V_4$ 。如果没有任何优化算法,只是逐点寻找 4 路电压的各种组合,则运算量是巨大的。比如每路电压取 100 个值,则将有  $100^4$  共 1 亿种电压组合。对于更多的自由度控制,补偿时间是无法忍受的。

优秀的搜索算法要求:1) 快速搜索到全局最大值;2) 避免陷入局部极大值;3) 有抗噪声能力。一般基于梯度计算的搜索算法<sup>[5]</sup>虽然收敛速度较快,但不具备 2)和 3)的能力。由 Kennedy 和 Eberhart 提出的粒子群优化(PSO)算法<sup>[16]</sup>对于静态、有噪声、连续变化的多维全局最大值搜索问题非常有效。实验中将粒子群优化算法用于偏振模色散自适应补偿,获得了非常好的自动补偿效果。

偏振度对于 4 路电压组合的“地图”是 5 维的,无法直观显示。实验首先找到对应全局最大值的电压组合  $(V_1, V_2, V_3, V_4)$ , 然后固定此时的  $V_3, V_4$  值,并使  $V_1, V_2$  遍历所有值,可以得到“直观”的偏振度“地图”。图 4(a)和(b)分别是 10 Gbit/s NRZ 码和 RZ 码的偏振度等高线“地图”,其中色调越浅对应偏振度值越高。可以看出 0~4 V 是一个周期单

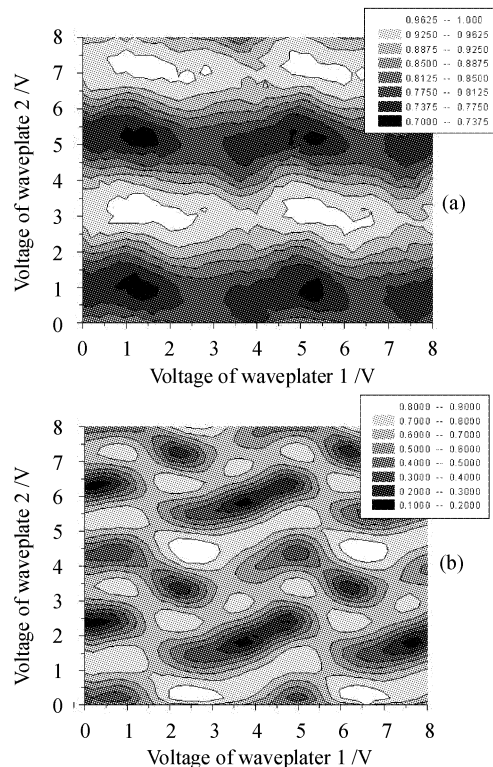


图 4 10 Gbit/s NRZ 码(a)和 RZ 码(b)的偏振度“地图”  
Fig. 4 DOP map for 10Gbit/s NRZ (a) and RZ (b)

元,对应偏振控制器  $0 \sim 2\pi$  的相位变化。对于 NRZ 码,在一个周期单元中只有一个极大值,即全局最大值;而对于 RZ 码来说,除了全局最大值以外,还有许多局部极大值。

PSO 算法初始化一群随机粒子(每个粒子代表多维电压空间的一个点),然后通过叠代找到最优解。PSO 算法分两种邻居结构——全局邻居结构(global neighborhood structure)和局部邻居结构(local neighborhood structure)。全局邻居结构指每个特定粒子将剩余所有粒子作为自己的邻居(图 5(a)),在每一次叠代中,粒子通过跟踪两个“极值”

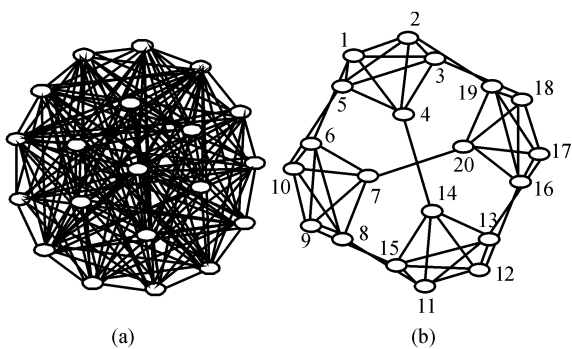


图 5 PSO 算法两种邻居结构的拓扑图

(a) 全局邻居;(b) 局部邻居

Fig. 5 One of two topologic structures for global neighborhood (a) and local neighborhood (b)

来更新自己,一个是粒子自己找到的最佳值,另一个是其余邻居粒子群找到的最佳值。对应算法称为 GPSO 算法。这种算法收敛速度快,但是相对容易陷入局部最佳。局部邻居结构指每个特定粒子只取剩余粒子中的一部分作为自己的邻居(图 5(b)),对应算法称为 LPSO 算法。在这种结构下,每个邻居组都有自己的最佳值,通过各邻居组之间的联系实时比较这些最佳值以获得整个粒子群中的最佳值,改进了全局邻居结构容易陷入局部最佳值的不合理结构,但较之 GPSO 算法,LPSO 算法收敛速度稍慢。在本实验中,应用了 20 个粒子的 LPSO 算法,每路控制电压的搜索范围为  $2 \sim 6$  V,结果显示补偿效果非常好。

图 6 是对 10 Gbit/s NRZ 码的偏振模色散补偿效果眼图,从没有补偿的眼图图 6(b)可以看到存在过冲现象,说明光纤链路中存在二阶偏振模色散<sup>[17,18]</sup>,但补偿后的眼图依然很好(图 6(c)),证明设计的两级补偿器能够同时自动补偿一阶和二阶偏振模色散。图 7(a)和(b)分别是补偿前后对整个光纤链路一阶和二阶偏振模色散的测量情况(采用 EXFO 公司 FPMD5600 测试仪),在激光器工作波长 1551.87nm 附近一阶和二阶偏振模色散同时补偿到最小。

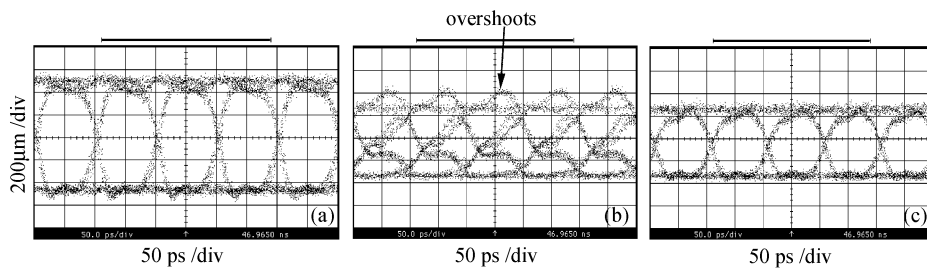


图 6 对于 10 Gbit/s NRZ 码偏振模色散自动补偿前后的眼图

(a) 背靠背;(b) 补偿前;(c) 补偿后

Fig. 6 Eye diagrams before and after automatic PMD compensation for 10 Gbit/s NRZ format  
(a) back-to-back; (b) before compensation; (c) after compensation

图 8 为对 10 Gbit/s RZ 码的偏振模色散补偿效果眼图,图 9 为补偿前后整个光纤链路中一阶和二阶偏振模色散的测量结果。结果表明,无论是 NRZ 码还是 RZ 码,设计的两级偏振模色散自适应补偿器都能很好地同时自动补偿一阶以及二阶偏振模色散,适应性很强。

为了测量自动补偿时间,实验中定义如下的时间单元——前一次 D/A 到下一次 D/A 的时间,在

这个时间单元中有下列事件发生:1) D/A 转换将控制电压写入电控偏振控制器;2) 等待偏振控制器达到稳态;3) 为数字滤波而进行的 20 次 A/D 转换;4) 计算机的运算,然后下一次 D/A 开始。在计算机中设置定时器,测量 420 个时间单元共用 380 ms,因此每个时间单元大约等价于 0.9 ms。

为了验证 LPSO 的搜索性能,设计了如下的实验。采用 20 个粒子,处理每个粒子的平均时间即为

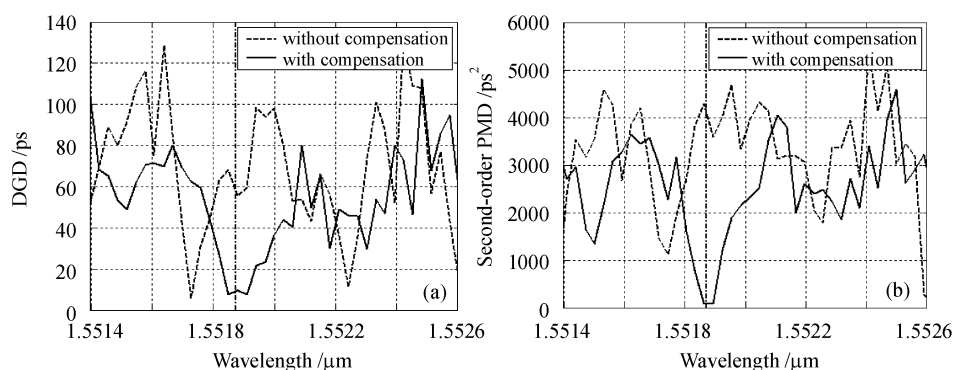


图 7 对 10 Gbit/s NRZ 码补偿前(虚线)后(实线)光纤链路中一阶(a)和二阶(b)偏振模色散的测量结果  
Fig. 7 First- (a) and second-order (b) PMD measurement results before (dashed lines) and after (solid lines) compensation for 10 Gbit/s NRZ format

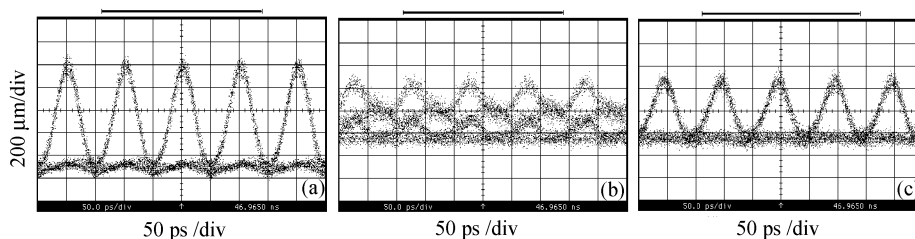


图 8 对于 10 Gbit/s RZ 码偏振模色散自动补偿前后的眼图

(a) 背靠背; (b) 补偿前; (c) 补偿后

Fig. 8 Eye diagrams before and after automatic PMD compensation for 10 Gbit/s RZ format  
(a) back-to-back; (b) before compensation; (c) after compensation

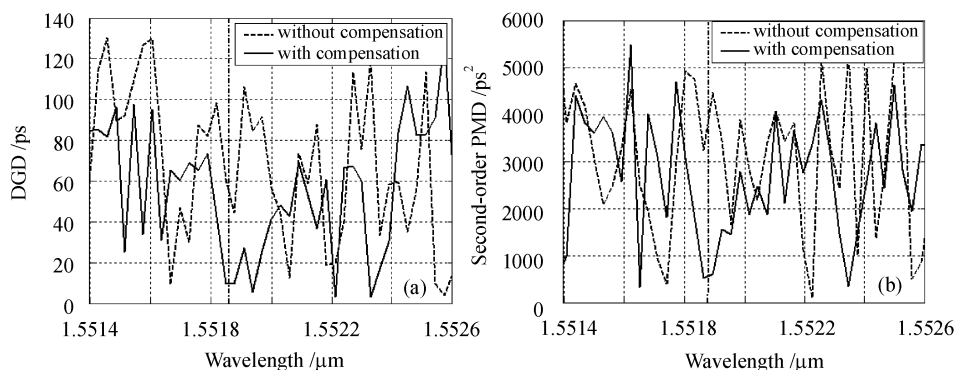


图 9 对 10 Gbit/s RZ 码补偿前(虚线)后(实线)光纤链路中一阶(a)和二阶(b)偏振模色散的测量结果  
Fig. 9 First (a) and second-order (b) PMD measurement results before (dashed lines) and after (solid lines) compensation for 10 Gbit/s RZ format

以上定义的一个时间单元(处理每个粒子都包括了上述 1)~4)的事件)。每处理完 20 个粒子为一个循环,平均需要 20 个时间单元(小于 20 ms)。总循环设为 50 次。对 NRZ 码,表示偏振模色散补偿程度的偏振度门限选取为 0.985,对 RZ 码选取为 0.9,全部高于无误码的参考门限。随机调整  $PC_1$  和  $PC_2$  设置 50 个不同初始状态分别进行 50 次循环搜索。图 10 显示了对 10 Gbit/s NRZ 码和 RZ 码

头 10 次循环最佳偏振度的情况。对 NRZ 码 4 次循环就能使偏振度超过 0.95(小于 80 ms),而对 RZ 码 10 个循环偏振度超过 0.84(小于 200 ms),这是由于 RZ 码有许多局部极大值的缘故。图 11 显示了达到预先所选取的偏振度门限所用循环次数的统计情况。表明对于 NRZ 码,完成搜索所需时间比 RZ 码要长。原因分析如下:NRZ 码偏振度“地图”中局部极大值很少,因此最初几个循环收敛很快,以

后趋近最优值的速度放慢是由于图 2 中显示对于 NRZ 码偏振度对差分群时延的变化较慢。而 RZ 码由于存在较多局部极大值,最初几个循环收敛速度较慢,一旦找到了最优值所在区域,由于偏振度对差分群时延变化较快,趋近最优值的收敛速度大大加快。

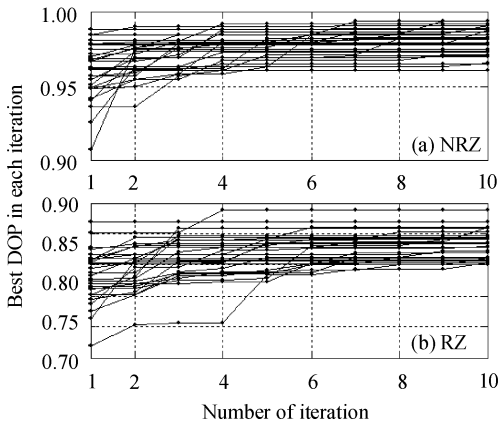


图 10 10 个循环中最佳偏振度的收敛情况  
Fig. 10 Best DOP versus iteration number

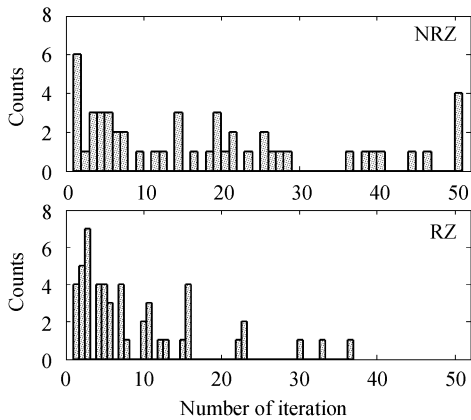


图 11 达到偏振度门限所用循环次数的分布情况  
Fig. 11 Distribution of the iteration numbers

### 5 跟踪补偿算法与跟踪效果

对于实际的光纤通信系统,由于早晚温度变化、地壳运动或者汽车火车经过所产生的振动,光纤链路中的偏振模色散将随时随地变化。因此作为自适应补偿器,只用搜索算法一次性地找到最佳补偿点是远远不够的,称不上自适应补偿。当链路中最佳补偿点变化以后,需要启动跟踪算法实时跟踪补偿偏振模色散的微小变化,才能称得上是“自适应”。要尽量避免再次重新全局搜索,因为全局搜索会造成链路中偏振模色散瞬间劣化。

文献[10]提出用在原偏振度最佳值附近抖动跟

踪的方法进行跟踪补偿,但是经过实验发现,在高噪声系统中效果不好,在多自由度控制系统中运算量大,难于达到实时跟踪。然而我们从中也得到启示:由于 PSO 优化算法的抗噪声能力和多维空间的搜索能力都很强,将其应用于原最佳值附近的局部空间,进行跟踪搜索补偿,取得了相当好的效果。

实验中,当全局搜索最佳偏振度完成以后,随即启动跟踪程序,监测链路中的偏振度值。当偏振度大于约为原最佳值的 98% 时,程序无动作,当偏振度小于此门限值时,程序执行局部空间的 LPSO 搜索,并根据偏振度偏离门限值的大小,调整搜索空间范围。跟踪门限对 NRZ 码选取为 0.96,对 RZ 码选取为 0.87。实验中,极其缓慢均匀地扳动偏振模色散模拟器中手动偏振控制器 PC<sub>2</sub> 的一个波片,得到较好的跟踪效果,眼图没有大的改变,链路中的偏振度在所选取的门限值附近振荡,始终大于无误码阈值。当迅速扳动一下波片,使链路中偏振模色散产生一个突发扰动,跟踪程序可以使偏振度迅速恢复到无误码阈值以上,如图 12 所示。对于 NRZ 码响应恢复时间大约 20 个时间单元(小于 20 ms),对于 RZ 码响应恢复约为 16 个时间单元(小于 16 ms)。

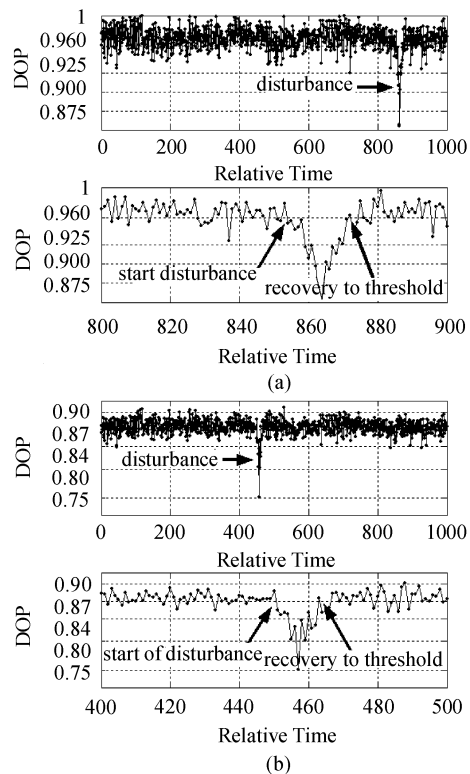


图 12 跟踪算法对于 10 Gbit/s NRZ 码(a)和 RZ 码(b)的跟踪表现  
Fig. 12 Performance of the tracking algorithm for 10 Gbit/s NRZ (a) and RZ format (b)

## 6 结 论

运用基于偏振度的反馈控制信号在线监测光纤链路中的偏振模色散,运用硬件滤波器和中值滤波技术克服了偏振度测量中的噪声;将 PSO 优化算法应用于偏振模色散自适应补偿的搜索和跟踪,成功完成了 10Gbit/s NRZ 码和 RZ 码光通信系统两级偏振模色散自适应补偿实验系统。通过在补偿前后进行眼图测量和偏振模色散的测量,证明该补偿系统可以同时自适应补偿一阶和二阶偏振模色散。基于目前的硬件,补偿系统的补偿搜索时间为几百毫秒,跟踪时对于突发的偏振模色散变化响应恢复时间小于 20 ms,实现了准实时一阶和二阶偏振模色散自适应补偿与跟踪。

### 参 考 文 献

- 1 T. Takahashi, T. Imai, M. Aiki. Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarisation mode dispersion in in-line amplifier systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(4): 348~349
- 2 F. Heismann, D. A. Fishman, D. L. Wilson. Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a 10 Gb/s transmission system [C]. *Proc. ECOC'98*, WdC11, 1998. 529~530
- 3 H. Ooi, Y. Akiyama, G. Ishikawa. Automatic polarization-mode dispersion compensation in 40-Gbit/s transmission [C]. *Proc. OFC/IOOC'99*, WE5-1, 1999. 86~88
- 4 H. Y. Pua, K. Peddanarappagari, B. Y. Zhu *et al.*. An adaptive first-order polarization-mode dispersion compensation system aided by polarization scrambling: theory and demonstration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **18**(6):832~841
- 5 R. Noé, D. Sandel, M. Yoshida-Dierolf *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
- 6 H. Rosenfeldt, R. Ulrich, U. Feiste *et al.*. First order PMD-compensation in a 10 Gbit/s NRZ field experiment using a polarimetric feedback-signal [C]. *Proc. ECOC'99*, WeC32, 1999
- 7 C. Francia, F. Bruyère, J.-P. Thiery *et al.*. Simple dynamic polarisation mode dispersion compensator [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5):414~415
- 8 H. Rosenfeldt, Ch. Knothe, R. Ulrich *et al.*. Automatic PMD compensation at 40 Gbit/s and 80 Gbit/s using a 3-dimensional DOP evaluation for feedback [C]. *OFC'2001*, PD27, 2001
- 9 N. Kikuchi. Analysis of signal degree of polarization degradation used control signal for optical polarization mode dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4):480~486
- 10 J. C. Rasmussen, A. Isomura, G. Ishikawa. Automatic compensation of polarization-mode dispersion for 40Gb/s transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12):2101~2109
- 11 Liu Xiumin, Li Chaoyang, Li Ronghua *et al.*. Polarization mode dispersion measurement using Sagnac interferometer and fixed analyzer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):455~458  
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[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):455~458
- 12 Zhang Xiaoguang, Yu Li, Zheng Yuan *et al.*. An experiment of adaptive polarization mode dispersion compensation for optical communication systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1474~1477  
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[J]. *光子学报*, 2003, **32**(12):1474~1477
- 13 Xiaoguang Zhang, Li Yu, Guangtao Zhou *et al.*. Adaptive PMD compensation in 10 Gbit/s RZ optical communication system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8):447~450
- 14 J. Patscher, R. Eckhardt. Component for second-order compensation of polarization-mode dispersion [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(13):1157~1159
- 15 S. Kim. Schemes for complete compensation for polarization mode dispersion up to second order [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(8):577~579
- 16 J. Kennedy, R. Eberhart. Particle swarm optimization [C]. *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ USA*, 1995. 1942~1948
- 17 C. Francia, F. Bruyère, D. Penninckx *et al.*. PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(12):1739~1741
- 18 Wang Lan, Zhao Wenyu, Wang Hongxiang *et al.*. Higher-order PMD effects on high bit-rate transmission systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):941~945  
王 岚,赵文玉,王宏祥等.高速传输系统中高阶 PMD 的影响[J]. *光子学报*, 2002, **31**(8):941~945