

# 动态偏振模色散补偿的自适应算法及实现\*

沈 昱<sup>1</sup> 周亚萍<sup>1</sup> 周光涛<sup>1</sup> 郑 远<sup>1</sup> 张建忠<sup>1</sup> 陈 林<sup>1</sup> 张晓光<sup>1</sup>  
于 丽<sup>1</sup> 席丽霞<sup>1</sup> 杨伯君<sup>1</sup> 黄 山<sup>2</sup> 陈 硕<sup>2</sup> 赵华凤<sup>2</sup> 姚敏玉<sup>2</sup>

(1 北京邮电大学理学院,123 信箱,北京 100876)

(2 清华大学电子工程系,北京 100084)

**摘 要** 基于研制成功的两级偏振模色散自适应补偿系统,提出对光传输系统中偏振模色散(PMD)自动搜索跟踪的补偿算法,该算法解决了偏振模色散补偿多自由度搜索中易于陷入局部极大值的问题.实验证明应用该算法制成的偏振模色散自适应补偿器性能优越,所能达到的性能参数为:全局补偿搜索时间 78.77 ms,跟踪响应时间 15.75 ms.另外,为了将研制的动态 PMD 补偿器得以实用化,就 PMD 补偿系统中的核心——取样反馈控制模块的性能进行了剖析.

**关键词** 光纤通信;偏振模色散;动态补偿;取样反馈控制

**中图分类号** TN929.11 O436.3 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤中的偏振模色散是限制光通信系统性能的一个主要因素,如何解决这个问题是光通信领域的热门问题之一.

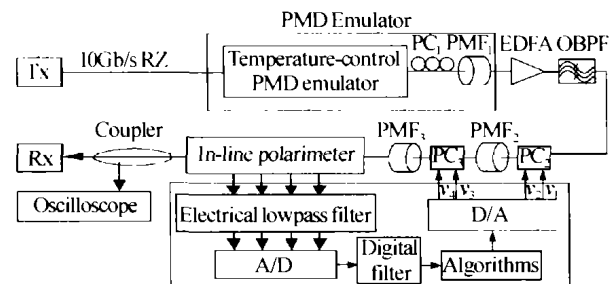
国内外已有不少关于 PMD 补偿的报道<sup>[1~4]</sup>,但大多数只给出实验系统框图和补偿结果,并没有提及补偿时间这一关键性能指标,对于补偿所用到的算法也谈之甚少.链路中 PMD 是随时随机动态变化的,曾有文章提到过自适应补偿应该包括搜索和跟踪两阶段算法<sup>[5]</sup>,但未涉及具体算法及实现.

本文报道了我们研制成功的能同时自动补偿一阶和二阶 PMD 的两级动态补偿系统(图 1).其中光链路中的 PMD 取样采用偏振度(DOP)检测.实验中我们首次将粒子群优化(Particle Swarm Optimization)应用于 PMD 自适应补偿与跟踪,解决了多自由度控制中陷入局部极值的难题.实验显示这种方式具有相当好的时效性(毫秒量级),只要提高硬件响应速度,动态实时跟踪补偿系统的实用化指日可待.

## 1 自适应 PMD 补偿实验系统

### 1.1 系统构成

如图 1 所示,PMD 补偿实验系统由四个模块构成:码源、模拟器(PMDE)、补偿器(PMDC)和性能监测模块.



Tx: Transmitter,  $PC_i (i = 1, 2, 3)$ :  $i$ th polarization controller,  $PMF_i (i = 1, 2, 3)$ :  $i$ th polarization maintaining fiber, EDFA: Erbium-doped fiber amplifier, OBPF: Optical band-pass filter, A/D: analog to digital converter, D/A: digital to analog converter, Rx: Receiver

图 1 PMD 补偿实验系统图

Fig. 1 Experiment setup for PMD compensation

码源为 10 Gb/s 的 RZ 码光信号.模拟器由温度效应偏振模色散模拟器(TC-PMDE)和  $PC_1$ 、 $PMF_1$  构成,其中 TC-PMDE 由多段保偏光纤随机级联而成,利用保偏光纤的温度敏感性,改变加热器电压,产生接近麦克斯韦分布的偏振模色散.TC-PMDE 的差分群时延(DGD)最小值 10 ps 左右,最大几率值 20 ps,最大值 40 ps.  $PMF_1$  产生 60 ps DGD.补偿器是可以补偿二阶 PMD 的两级 PMDC,由  $PC_2$ 、 $PMF_2$ 、 $PC_3$ 、 $PMF_3$  和取样反馈控制模块构成.  $PC_2$  和  $PC_3$  为电控光纤挤压型偏振控制器,  $PMF_2$  和  $PMF_3$  分别产生 20 ps 和 75 ps DGD.在线偏振仪检测链路中光信号偏振度(DOP).光信号经过偏振仪后分为两路,一路作为误码检测,另一路输入示波器以显示眼图变化.

### 1.2 基于 DOP 的 PMD 取样以及 DOP 与误码率的关系

监测光链路中 PMD 并提取反馈信号的方法主要有两种:一种是提取接收信号电域频谱中特定频率分量的电功率信号<sup>[1,6]</sup>,主要缺点是提取频率与

\*国家 863 计划(2001AA122041)、国家自然科学基金(60072042)资助项目

Tel:010-62281490 Email:shenyu11@163.com

收稿日期:2003-09-16

传输速率有关,高频微波器件的使用将大大提高系统造价. 另一种是提取光链路中的 DOP 信号<sup>[2,3,5]</sup>. 利用偏振仪测量链路中光波的 Stokes 参量  $s_0, s_1, s_2, s_3$ , 并由下式计算 DOP

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

各 Stokes 参量都是光强信号,因此用 DOP 作为反馈信号与传输速率无关. 图2(a)为实验测得 10 Gb/s RZ 码 DOP 与 DGD 的关系,其中光矢量在

两个主态间的分光比  $\gamma = 0.5$ .

DOP 信号中的噪声主要源于光链路中的光噪声和数据采集卡 A/D 转换的电噪声. 这里采用了两种滤波技术:电低通滤波器和数字滤波技术. 滤波后, DOP 的测量精度得到明显改善. 图 2(a)、(b)、(c)中空心和实心黑点符号分别代表滤波前后的实验结果. 图 2(b)为信号频谱图,滤波后,中心频带以外的频率分量较滤波前有明显衰减. 图 2(c)为滤波前后链路的 DOP 状况.

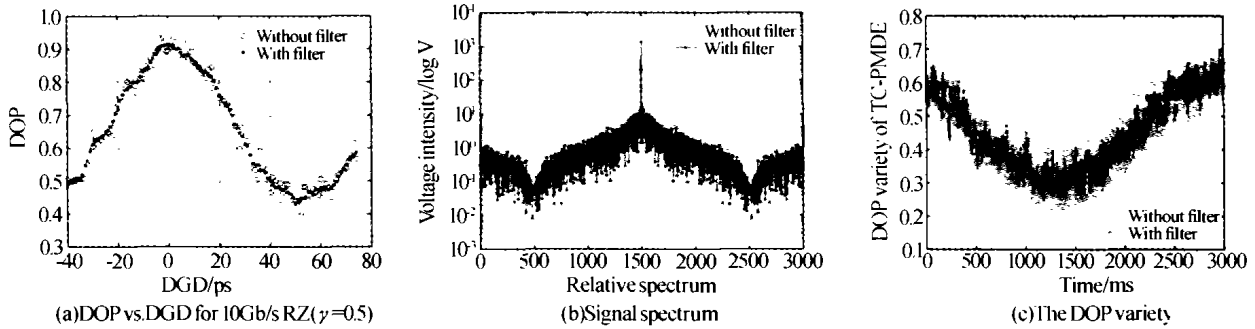


图2 滤波前后  
Fig. 2 With & without filters

误码率的测量要一段时间,而 DOP 是实时检测的,需确定两者关系为搜索补偿算法寻找合适的 DOP 阈值. 为此,记录 50 种不同 PMD 状态下的 DOP 值并测量其对应的误码率,如图 3 所示,10 Gb/s RZ 码 DOP 阈值是 0.84.

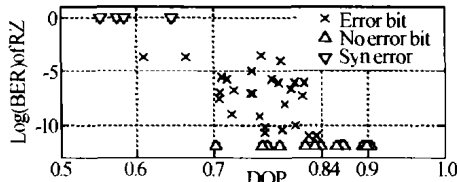


图3 10Gb/s RZ 码链路 DOP 与 BER 关系  
Fig. 3 DOP to BER for 10 Gb/s RZ

## 2 PMD 自适应补偿:最佳值搜索跟踪

### 2.1 补偿环境——光链路的 DOP 分布图

改变偏振控制器控制电压可改变链路的 DOP

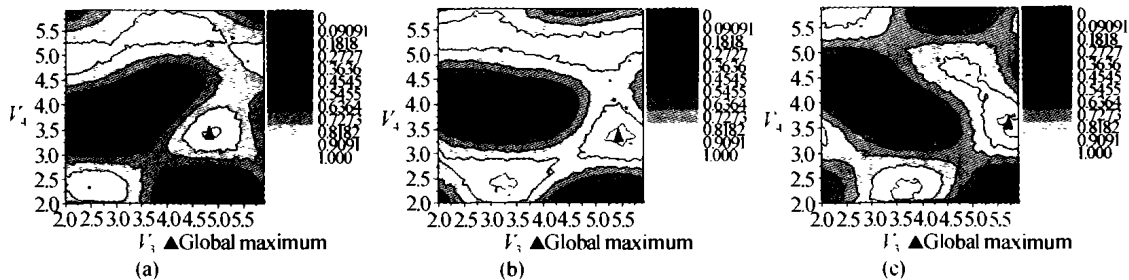


图4 最佳补偿点漂移示意图  
Fig. 4 The excursion of global maximum point

TC-PMDE 在相当程度上表现了真实系统的链路特性,可作为检验算法性能的有效环境.

### 2.2 PSO 搜索补偿算法与补偿效果

PMD 自适应补偿要求根据 DOP 反馈信号,通

过搜索运算,控制  $PC_2$  和  $PC_3$ ,找到 DOP 全局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

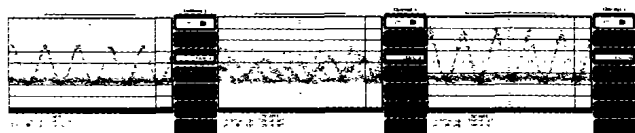
值. 记录偏振控制器每种电压组合对应的 DOP 值,可得到控制电压与链路 DOP 的关系,从而获知 PMD 补偿空间的 DOP 分布. 系统 DOP 函数  $y = f(V_1, V_2, V_3, V_4)$ ;  $V_1, V_2, V_3, V_4 \in [2, 6] V$  (我们使用的电控光纤挤压型偏振控制器每路控制电压 0 ~ 10 V,对应  $5\pi$  的相位改变,4 V 电压对应  $2\pi$  的相位改变,为一个电压控制周期). 为直观显示 DOP 分布状况,首先找到对应全局 DOP 最大值的电压组合 ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ),固定  $V_1, V_2$ ,然后使  $V_3, V_4$  遍历所有值,可得到 DOP 分布图. 图 4(a)、(b)、(c)为 TC-PMDE 设定不同温控电压时的 DOP 分布.

由图 4:补偿空间中存在多个局部极大值,所以搜索算法必须具有全局搜索能力;系统最佳补偿点会随着 TC-PMDE 的慢变化而漂移,这就需要灵敏的跟踪算法来补偿链路 PMD 的微小变化. 我们的

$100^4$  共 1 亿种电压组合. 对于更多自由度的控制, 补偿时间是无法忍受的.

优秀的搜索算法要求: 1) 快速收敛; 2) 避免陷入局部极大值; 3) 抗噪声. 基于梯度的搜索算法虽然收敛速度较快, 但存在致命弱点——容易陷入局部极大值且受噪声影响较大. 我们对各种搜索算法进行了分析研究, 最终发现由 Kennedy 和 Eberhart 提出的粒子群优化算法<sup>[7]</sup>对于静态、有噪声、连续变化的多维全局最值搜索问题非常有效. 我们研究小组首次将其应用于 PMD 自适应补偿, 并获得了非常好的 PMD 自适应补偿效果.

PSO 算法初始化一群随机粒子, 然后通过循环叠代找到最优解. PSO 算法分两种邻居结构——全局邻居结构和局部邻居结构. 全局邻居结构指每个粒子将剩余所有粒子作为自己的邻居, 在每一次叠代中, 粒子通过跟踪两个“极值”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. 这种算法收敛快, 但偶尔会陷入局部极大. 局部邻居结构中每个粒子只取剩余粒子中的一部分作为自己的邻居, 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. 在我们的实验中, 应用了 20 个粒子的 LPSO 算法. 图 5 为 10 Gb/s RZ 码的 PMD 补偿效果眼图.



(a) Back-to-back (b) Before compensation (c) After compensation  
图 5 RZ 码补偿前后眼图

Fig. 5 The eye diagrams before and after automatic PMD compensation for RZ

为测量补偿时间, 定义如下时间单元——前一次 D/A 到下一次 D/A 的时间, 其中有下列事件发生: 1) D/A 转换将控制电压写入电控偏振控制器; 2) 等待反馈系统稳定; 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. 实验测得时间单元约为 0.7877 ms.

为验证 LPSO 的搜索性能, 我们设计了如下的实验: 随机调整  $PC_1$  设置不同初始状态分别进行 50 次搜索, 每次搜索叠代 50 次, 记录每次叠代的最大 DOP 值, 如图 6(a) 所示. 叠代 5 次后, 链路 DOP 已经达到 0.89, 高于 DOP 无误码阈值 0.84.

以 0.89 为搜索程序的终止条件, 运行 50 次搜索程序, 统计每次跳出时的叠代次数, 其分布状况如

图 6(b) 所示. 叠代次数均在 5 次以内, 证明 LPSO 具有很强的多维空间搜索能力和很好的收敛性并据此估算搜索补偿时间. 每次叠代中有 20 个粒子运动, 每个粒子运动占用一个时间单元. 所以, LPSO 搜索总耗时约为  $5 \times 20 \times 0.7877 = 78.77$  ms.

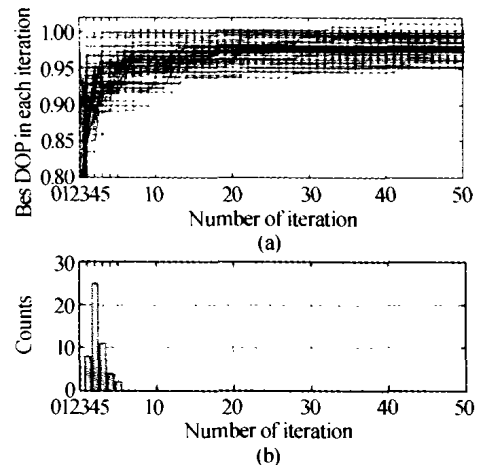


图 6 (a) LPSO 收敛情况, (b) LPSO 叠代次数统计

Fig. 6 (a) Constringency of LPSO, (b) Statistics of LPSO

### 2.3 跟踪算法

对于实际的光纤通信系统, 光纤链路中的 PMD 将随时随机变化. 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. 能够有跟踪算法实时补偿 PMD 的微小变化, 才称得上是“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 PMD 瞬间劣化.

通常使用的抖动跟踪算法和变尺度 (DFP) 法在多维空间和高噪声系统中效果都不是很好. 我们从 LPSO 的抗噪声能力和多维空间搜索特性中得到启示, 将其运用在局部空间, 并采用了自适应搜索空间技术, 成功实现了四自由度 PMD 补偿系统的跟踪. 实验中, 当全局搜索最佳 DOP 完成以后, 随即启动跟踪程序, 监测链路中的 DOP 值. 当 DOP 大于原最佳值的 98% 时, 程序无动作, 当 DOP 小于此门限值时, 程序执行局部空间的 LPSO 搜索, 并根据 DOP 偏离门限值的大小, 调整搜索空间范围. 跟踪门限设为最佳值的 86%, 当链路 DOP 低于该值时, 表明链路状况突变, 不能继续跟踪, 此时需重新进行全局搜索.

该跟踪算法的特点是:

- 1) 在高噪声系统中具有很强的识别能力.
- 2) 多维跟踪性能好.
- 3) 自适应跟踪范围选择, 将补偿对光链路的影响降至最低.

### 2.4 搜索、跟踪两级动态算法在线监测性能分析

在实验全过程中, 以一个时间单元 0.7877 ms 为间隔, 记录 50 s 链路 DOP 变化 (图 7(a)). 0 至

23339 ms 秒为未启动搜索跟踪补偿程序时模拟器引起的链路 DOP 变化情况;在 23400 ms 时(图 7(a)①),启动 LPSO 搜索算法,78 ms 后,搜索到最佳值,链路 DOP 升至 0.98(图 7(b));随后启动跟踪程序,从 23479 ms 至 39732 ms(图 7(a)①到②之间),跟踪算法动态补偿链路 PMD 的微小变化,跟踪响应度为 15.75 ms(这里的跟踪响应度指局部 LPSO 单步跟踪中一次叠代 20 个粒子总耗时:20 × 0.7877 ≈ 15.75 ms),直至 39733 ms 时模拟器发生突变(图 7(a)②),跟踪程序不能局部补偿 PMD,此时需重新启动搜索程序;从 39733 ms 至 39811 ms 再次搜索,DOP 值回复至 0.97(图 7(c)),随后再次进入跟踪状态.

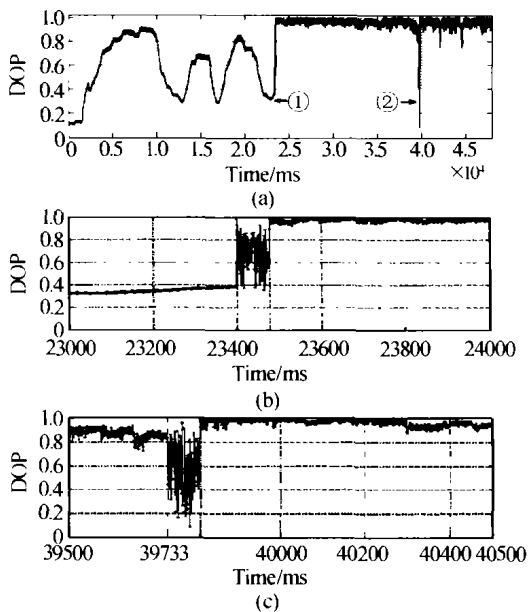


图 7 (a)50 s 内 DOP 的在线监测状况,(b)全局搜索前后 DOP 变化状况(图 7(a)①处放大),(c)PMD 突变时系统响应(图 7(a)②处放大)  
Fig.7 (a) DOP variety in the duration of 50 s, (b) Dop variation before and after searching procedure (zoom in Fig. 7(a)①), (c) System reaction while PMD bursting (zoom in Fig. 7(a)②)

### 3 补偿系统性能分析及实用化探索

在大量理论分析和数值模拟的基础上,我们搭建了如图 1 所示的 PMD 补偿系统. 该系统能够实现动态 PMD 补偿的关键在于两点,一是搜索跟踪算法本身的高效合理,二是取样反馈控制模块软硬件的优越性能.

2.2 节中定义的时间单元可表示为取样反馈接口程序耗时  $T_{interface}$  与单步核心算法耗时  $T_{arith}$  之和,详见图 8 和表 1. 在高速光通信链路中,1  $\mu$ s 的系统状况不佳都会导致大量数据信息的丢失,所以有必要分析时间单元中的每一部分,找到影响反馈补偿系统速度的“瓶颈”,并加以提速,以期优化自适应

反馈系统的性能,为实用化打下基础.

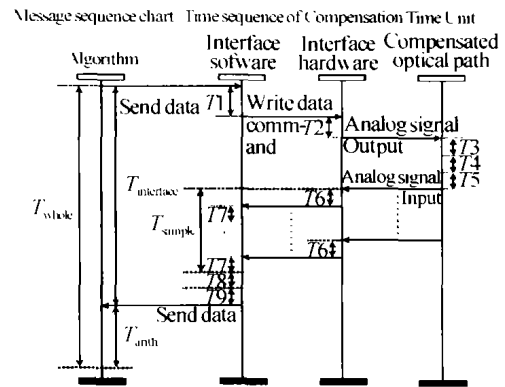


图 8 补偿时间单元的时序分析  
Fig.8 Analysis of one compensation time unit

表 1 补偿时间单元组成部分

| 符号              | 长度         | 含义及物理基础(相关软硬件)  |
|-----------------|------------|-----------------|
| $T_{whole}$     | 0.7877 ms  | 补偿时间单元          |
| $T_{interface}$ | 0.7800 ms  | 写数据至读取正确响应数据时间  |
| $T_{arith}$     | 0.0077 ms  | 单步核心算法运行时间      |
| T1              | 0.5500 ms  | 向外设物理地址写数据的总线操作 |
| T2              | $\mu$ s 量级 | D/A 转换所需时间      |
| T3              | $\mu$ s 量级 | 偏振控制器响应时间       |
| T4              | $\mu$ s 量级 | 光链路响应           |
| T5              | $\mu$ s 量级 | 偏振仪响应           |
| T6              | 0.0070 ms  | A/D 转换速率        |
| T7              | 0.0021 ms  | 数字信号总线传输时间      |
| $T_{sample}$    | 0.1820 ms  | 采样 20 组电压信号所用时间 |
| T8              | $\mu$ s 量级 | 从内存中读取数据时间      |
| T9              | 0.0290 ms  | 数字滤波时间          |

根据上表,D/A、A/D 转换占用了时间单元的 70.5% 和 17.4%,而核心算法只占不到 1%. 补偿器核心算法,无论是其全局搜索和抗噪声的优良表现,还是其搜索速度,都已经有了重大突破,为实用化打下了良好基础. 只要提高补偿系统软硬件接口速率,就能以数量级的速度提升 PMD 自适应补偿系统的性能. 假以时日,一款成熟的动态 PMD 补偿设备并不是梦想.

### 4 结论

我们成功研制了两级偏振模色散自适应补偿系统,其中光链路中的 PMD 取样采用 DOP 测量;反馈控制算法采用了基于 PSO 的搜索跟踪补偿算法,解决了多自由度控制系统中陷入局部极值的难题. 搜索算法和跟踪算法达到的性能参数为:搜索耗时 78.77 ms,跟踪响应度 15.75 ms. 搜索和跟踪结合的补偿机制能够动态补偿实际系统中 PMD 的缓变和突变,为动态 PMD 补偿系统的实用化打下了良好的基础.

#### 参考文献

1 Heismann F, Fishman DA, 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
- 2 Rosenfeldt H, Knothe C, Ulrich R, *et al.* Automatic PMD compensation at 40 Gb/s and 80 Gb/s using a 3-dimensional DOP evaluation for feedback. *OFC'2001*, 2001. PD27
- 3 Kikuchi N. Analysis of signal degree of polarization degradation used control signal for optical polarization mode dispersion compensation. *J Lightwave Technol*, 2001, **19** (4):480 ~ 486
- 4 王岚, 赵文玉, 等. 高速传输系统中高阶 PMD 的影响. *光子学报*, 2002, **31**(8):941 ~ 945  
Wang F, Zhao W Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31** (8):941 ~ 945
- 5 Rasmussen J C, Isomura A, Ishikawa G. Automatic compensation of polarization-mode dispersion for 40 Gb/s transmission systems. *J Lightwave Technol*, 2002, **20** (12): 2101 ~ 2109
- 6 张晓光, 于丽, 沈昱, 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, Shen Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1474 ~ 1478
- 7 Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002. 58 ~ 73

## An Adaptive Algorithm for Dynamic Polarization Mode Dispersion Compensation and Its Realization

Shen Yu<sup>1</sup>, Zhou Yaping<sup>1</sup>, Zhou Guangtao<sup>1</sup>, Zheng Yuan<sup>1</sup>, Zhang Jianzhong<sup>1</sup>, Chen Lin<sup>1</sup>, Zhang Xiaoguang<sup>1</sup>,  
Yu Li<sup>1</sup>, Xi Lixia<sup>1</sup>, Yang Bojun<sup>1</sup>, Huang Shan<sup>2</sup>, Chen Shuo<sup>2</sup>, Zhao Huafeng<sup>2</sup>, Yao Minyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, P. O. Box 123, Beijing 100876

<sup>2</sup> Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Received date: 2003-09-16

**Abstract** An adaptive algorithm for dynamical compensation of polarization mode dispersion (PMD) in optical transmission systems was proposed and realized in the experiment. It gives a good solution of global optimum searching in multi-degree of freedom PMD compensation avoiding to be trapped in sub-optima. The algorithm demonstrated itself a good characteristics and fast speed for global optimum searching and tracking in PMD compensation. The time used for global optimum searching is 78.77 ms and response tracking time is 15.75 ms. In addition, in order to apply it in real system, sampling and feedback control module, the core of the PMD compensation, is deeply analyzed.

**Keywords** Optical communication; Polarization mode dispersion; Dynamic compensation; Sampling and feedback control



**Shen Yu** was born on March 20th, 1979, in Jiaying, Zhejiang Province, China. He received Bachelor degree in telecommunication from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2001. 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 and Wireless LAN.