

文章编号: 0253-2239(2005)01-15-6

## 40 Gb/s 光时分复用系统中两级偏振模色散 自适应补偿实验研究\*

周光涛<sup>1</sup> 张晓光<sup>1</sup> 席丽霞<sup>1</sup> 于 丽<sup>1</sup> 沈 昱<sup>1</sup> 张建忠<sup>1</sup> 张 娜<sup>1</sup>

吴 斌<sup>1</sup> 苑铁成<sup>1</sup> 张洪明<sup>2</sup> 徐 坤<sup>1</sup> 杨伯君<sup>1</sup> 林金桐<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)  
(<sup>2</sup> 清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 偏振模色散效应严重制约着长距离高速光纤通信的发展, 偏振模色散的自适应补偿成为光通信领域研究的焦点。利用两阶段偏振模色散补偿器, 采用 6 个自由度的粒子群优化算法 (PSO), 通过在线监测搜索光纤链路信号的偏振度极值作为反馈控制信息, 在 40 Gb/s 归零码高速光纤传输链路中成功实现了 ms 量级的偏振模色散自适应补偿。补偿前后采用庞加莱球法测量光纤链路中偏振模色散量, 测量结果表明在信号中心波长 1560.5 nm 处, 差分群时延补偿前后测量值分别为 21 ps 和 1.3 ps, 而二阶偏振模色散补偿前后测量值分别为 266 ps<sup>2</sup> 和 43.5 ps<sup>2</sup>。补偿后实验链路中的一阶和二阶的偏振模色散同时得到不同程度的补偿, 并且系统的总的功率代价在误码率为 10<sup>-9</sup> 时小于 1 dB。

**关键词:** 光纤通信技术; 偏振模色散; 偏振度; 自适应补偿

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## Two-Stage Adaptive Polarization Mode Dispersion Compensation Experiment in 40 Gb/s Optical Time Division Multiplexing System

Zhou Guangtao<sup>1</sup> Zhang Xiaoguang<sup>1</sup> Xi Lixia<sup>1</sup> Yu Li<sup>1</sup> Shen Yu<sup>1</sup> Zhang Jianzhong<sup>1</sup>

Zhang Na<sup>1</sup> Wu Bin<sup>1</sup> Yuan Tiecheng<sup>1</sup> Zhang Hongming<sup>2</sup> Xu Kun<sup>1</sup>

Yang Bojun<sup>1</sup> Lin Jintong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)  
(<sup>2</sup> Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** Polarization mode dispersion (PMD) has been the major limiting factor for long-haul high-speed optical fiber transmission and the PMD adaptive compensation is required urgently. An experiment of two-stage adaptive compensation for polarization mode dispersion in a 40 Gb/s RZ optical time-division multiplexed (OTDM) communication system is reported. The particle swarm optimization (PSO) algorithm with the six degrees of freedom (DOF) is adopted to maximize the degree of polarization (DOP) and realizes the adaptive PMD compensation. The compensation process is completed within several hundred milliseconds. The method of Poincaré sphere (PS) is applied to measure the PMD values in the experimental fiber link. The results show that the DGD decreases from 21 ps to 1.3 ps and the second PMD descends from 266 ps<sup>2</sup> to 43.5 ps<sup>2</sup> in central wavelength of 1560.5 nm. The first and second order PMD are compensated together in different degree and the whole system power penalty is less than 1 dB (@BER 10<sup>-9</sup>) after PMD adaptive compensation.

**Key words:** optical fiber communication technology; polarization mode dispersion compensation; degree of

\* 国家自然科学基金 (60072042)、国家 863 计划 (2001AA122041、2003AA103930) 资助课题。

作者简介: 周光涛 (1978~), 男, 北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室在读博士生, 主要从事高速光纤通信系统中偏振模色散补偿以及不同调制格式码型对系统性能影响的研究。E-mail: zhou.gt@163.com。

收稿日期: 2004-02-13; 收到修改稿日期: 2004-05-28

polarization; adaptive compensation

## 1 引 言

随着原有光纤传输链路升级到10 Gb/s,由于环境因素的影响以及光纤本身的不完善性等,偏振相关效应成为高速长距离光纤传输的主要限制因素之一。由它引起的信号波形畸变,码间串扰增加,脉冲峰值功率下降,将导致误码率骤然增加,即使对于新型光纤,当链路码速率增加到40 Gb/s以上时,由于比特周期变得越来越窄,较小的偏振模色散(PMD)值都会对传输系统性能产生严重影响。许多文章提出了各种补偿偏振模色散方案<sup>[1~8]</sup>,并且报道了偏振模色散补偿实验的研究。

偏振模色散的自适应补偿系统主要包括反馈信号的提取和可自动控制的补偿单元。对于反馈信号的提取,研究比较多的为探测信号特殊频率分量的电功率反馈法<sup>[1~4]</sup>和光信号的偏振度(DOP)反馈法<sup>[5,7~9]</sup>。本文采用的是基于光信号单一输入偏振态的偏振度反馈法,相对于电功率法,偏振度反馈法的显著优点是从光本身的特性出发而不受光纤链路比特速率的限制,从而避免使用昂贵的高频微波器件。采用单一输入偏振态的偏振度值作为反馈信号,比采样偏振度椭圆法迅速,技术实现简单,更有利于实际链路实时跟踪补偿的实现。我们采用的补偿单元由电控偏振控制器加两阶段时延线所组成,相对于其他补偿方式,两阶段补偿器不但能够成功补偿一阶偏振模色散,而且能补偿高阶的偏振模色散<sup>[6,9]</sup>,具有很好的补偿性能。

## 2 实验原理

### 2.1 模拟器

偏振模色散模拟器采用简单的两阶模拟器,通过偏振控制器(PC)将两段时延线级联,不但可以改变差分群时延的大小,而且还引入高阶偏振模色散的影响,如图1所示。

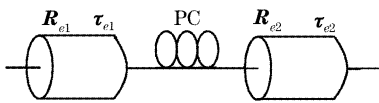


图1 偏振模色散模拟器

Fig.1 PMD emulator

两段时延线输出端的偏振模色散矢量用  $\tau_{c1}$  和  $\tau_{c2}$  表示,矢量的大小分别为  $|\tau_{c1}|$  和  $|\tau_{c2}|$ ,第一段时延线的 Muller 变换矩阵用  $R_{c1}$  表示,偏振控制器加第二段时延线的 Muller 变换矩阵一起用  $R_{c2}$  表示, $\theta$  为  $R_{c2}\tau_{c1}$  和  $\tau_{c2}$  矢量之间的夹角,那么通过该模拟器引入的差分群时延和二阶偏振模色散分别为

$$\tau_c = |\tau_c| p_c = R_{c2}\tau_{c1} + \tau_{c2} = \sqrt{|\tau_{c1}|^2 + |\tau_{c2}|^2 + 2|\tau_{c1}||\tau_{c2}|\cos\theta} p_c, \quad (1)$$

$$\tau_{c\omega} = |\tau_{c\omega}| p_{c\omega} + |\tau_c| p_{c\omega} = |\tau_c| p_{c\omega} = \tau_{c2} \times R_{c2}\tau_{c1} = |\tau_{c1}||\tau_{c2}|\sin\theta p_{c\omega}/|p_{c\omega}|, \quad (2)$$

从上式可以看出通过改变偏振控制器,从而可以改变偏振模色散的大小,一阶的偏振模色散  $|\tau_c|$  在  $||\tau_{c1}| - |\tau_{c2}||$  和  $||\tau_{c1}| + |\tau_{c2}||$  之间变化。 $|\tau_{c\omega}|$  表征  $|\tau_c|$  相对于频率  $\omega$  的变化率,即所谓的偏振相关色散项(PCD), $p_{c\omega}$  表征偏振相关主态(PSPs)相对于频率  $\omega$  的变化率。随着模拟器级联阶数的增加,其偏振模色散的统计特性越接近于实际光纤链路,但引入的高阶偏振模色散效应也越复杂。实验只是针对偏振模色散的一阶和二阶进行补偿研究,所以采用结构相对简单的两阶段模拟器。

### 2.2 补偿器

实验设计的两阶段偏振模色散补偿器结构如图2所示,设每个补偿单元中的偏振控制器加时延线的 Muller 变换矩阵分别为  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$ , 它们的厄米共轭矩阵分别为  $R_{c1}^+$  和  $R_{c2}^+$ , 时延线用  $\tau_{c1}$  和  $\tau_{c2}$  来表示,矢量的大小为  $|\tau_{c1}|$  和  $|\tau_{c2}|$ , 那么链路中总的偏振模色散可以用下式表示

$$\tau_{total} = R_{c2}R_{c1}[\tau_c + R_{c1}^+(\tau_{c1} + R_{c2}\tau_{c2})], \quad (3)$$

$$\tau_{total\omega} = R_{c2}R_{c1}\{\tau_{c\omega} + [R_{c1}^+(\tau_{c1} + R_{c2}\tau_{c2})] \times \tau_c + R_{c1}^+[R_{c2}\tau_{c2} \times \tau_{c1}]\}, \quad (4)$$

设  $a = R_{c1}^+R_{c2}^+\tau_{c2}$ ,  $b = R_{c1}^+\tau_{c1}$ , 则有

$$|\tau_{total}| = |\tau_c + a + b|, \quad (5)$$

$$|\tau_{total\omega}| = |\tau_{c\omega} + (a + b) \times \tau_c + a \times b|, \quad (6)$$

满足  $a + b = -\tau_c$ , 可以补偿一阶偏振模色散,如果满足  $(a + b) \times \tau_c + a \times b = \tau_{c\omega}$  则可以补偿二阶偏振模色散。实验中,为了消除搜索空间的盲区,将每个偏振控制器由2个自由度增加为3个自由度控制,通过链路中反馈回来的信息来调整偏振控制器的状态,使链路中偏振模色散的影响降到最小。

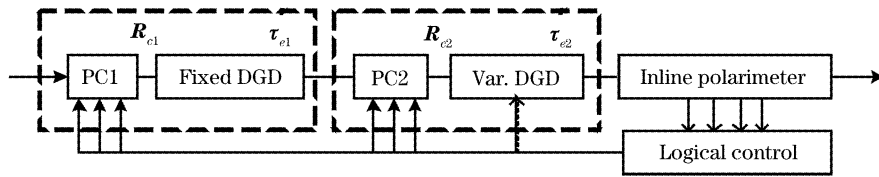


图 2 两阶段偏振模色散补偿器

Fig. 2 Two stage PMD compensator

### 2.3 反馈检测信号

通过偏振计测量输入光信号的斯托克斯矢量  $(S_0, S_1, S_2, S_3)$ ，利用下面的定义求出偏振度值  $(P)$ ：

$$P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / |S_0|. \quad (7)$$

光信号的偏振度可以用来表征链路中偏振模色散对光信号影响程度的大小<sup>[4,6]</sup>，由于偏振模色散的影响，破坏了光信号本身的偏振状态，使得光信号的偏振度值小于 1。基于信号偏振度值的监测，单一输入偏振态的偏振度值和采样偏振度椭圆都可以作为偏振模色散补偿反馈信号。单一输入偏振态的偏振度值法只是实时监测当前输入偏振态信号的偏振度值作为反馈信号，而采样偏振度椭圆的测量是通过在光路中增加扰偏器，通过改变光信号处于不同的输入偏振态下测量得到多组斯托克斯矢量，这些矢量在斯托克斯空间将绘制形成偏振度椭圆，可以通过分析偏振度椭圆形状所提供的信息作为偏振模色散补偿的反馈信号。相比而言，虽然偏振度椭圆能够更详细地表征偏振模色散效应对信号影响，技术实现复杂，反馈速度较慢，而监测当前输入偏振态的偏振度值更利于实际链路状况的监测和跟踪。当接收端检测到的偏振度值越大，光纤信号受到偏振模色散的影响越小，通过监测链路中信号当前偏

振态的偏振度值来反馈控制补偿器的偏振控制器使得光信号的偏振度达到最大值，从而实现偏振模色散的自适应补偿。

### 3 实验系统

通过上节的分析，建立了如图 3 所示的 40 Gb/s 归零码偏振模色散自适应补偿实验系统。实验系统中重复频率为 10 GHz 的光脉冲通过基于半导体光放大器(SOA)加电吸收调制器(EAM)结构的锁模光纤环激光器<sup>[10]</sup>产生，脉冲宽度为 7 ps，中心波长为 1560.5 nm，由伪随机码发生器(ADVANTEST D3186)生成 10 Gb/s 的伪随机码信号，通过高速的铌酸锂调制器加载到光路中，利用光时分复用(OTDM)技术，经过  $4 \times 10$  Gb/s 的光信号复用器产生 40 Gb/s 的光信号。为了保证复用信号间的同偏振性，我们在复用器之后增加了起偏器，从而保证输入光信号的偏振态相同。两阶段偏振模色散模拟器中两段时延线的差分群时延大小分别为 16 ps 和 15 ps，通过改变中间偏振控制器(PC)的角度从而改变链路中偏振模色散的状况。接收端的在线偏振计监测当前链路信号的偏振度值，并通过逻辑控制单元反馈控制偏振模色散补偿器。二阶偏振模色散补偿

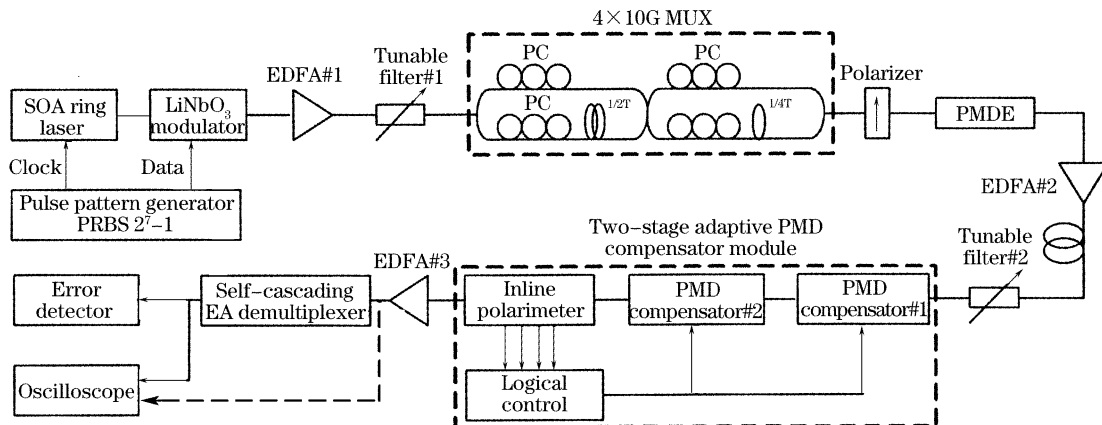


图 3 40 Gb/s 偏振模色散自适应补偿系统图。SOA：半导体放大器；PMDE：偏振模色散模拟器；EA：电吸收

Fig. 3 40 Gb/s PMD adaptive compensation system. SOA: semiconductor optical amplifier;

PMDE: PMD emulator; EA: electroabsorption

器由两个一阶补偿器级联构成,补偿器 1 由电控偏振控制器(General Photonic Co. 制)加一段 15 ps 的保偏光纤组成,补偿器 2 由电控偏振控制器(General Photonic Co. 制)加可变的偏振时延线组成。补偿后的信号经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大和自级联的电吸收解复用器<sup>[11]</sup>解复用后,提取单路 10 Gb/s 的信号并送示波器(HP 83480A)和误码仪检测(ADVANTEST D3286)。

#### 4 实验结果

通过在线的偏振计测量了 PSP 分光比  $\gamma=0.5$  时线路一阶差分群时延与偏振度值的关系曲线,如图 4 所示。从图中可见,对于相同脉宽的不同码速率的情况,偏振度值对应不同一阶平均差分群时延的测量曲线基本上一致,这充分说明偏振度值的测量值主要决定于脉冲调制格式和脉冲宽度。在光时分复用系统中,复用后的 40 Gb/s 信号的变化曲线同复用前 10 Gb/s 信号的测量曲线基本重合。由于光脉冲宽度为 7 ps 左右,所以平均差分群时延在 0~25 ps 的范围内,偏振度值变化迅速。

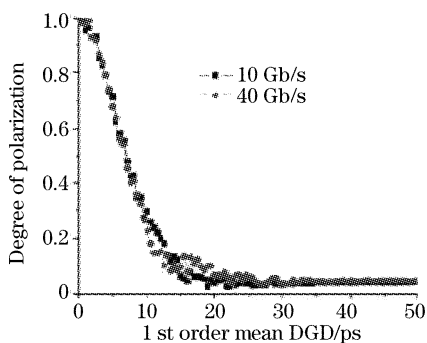


图 4 不同差分群时延和偏振度的对应曲线

Fig. 4 The experimental relation of DGD to DOP

在偏振模色散自动补偿系统中补偿算法的目的是根据链路中反馈回来的偏振度信息控制电控偏振控制器的 6 路电压,搜索偏振度的全局最大值,达到自动补偿偏振模色散的目的。这属于 6 维空间搜索最佳值的问题,其难点在于:1) 怎样快速收敛到最佳值;2) 避免陷入局部极值(维数越高局部极值越多);3) 如何抗噪声等。采用粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)<sup>[12~15]</sup>用于偏振模色散自适应补偿的研究中,并取得了很好的效果。

粒子群优化算法的基本原理可以形象地解释为一群鸟在一定的空间里去寻找食物中心,每只鸟通

过比较自己和邻居对食物分布的经验来指导自己的下一步的行动,通过多次寻找和比较后,整个鸟群将最终找到食物最丰富的位置。根据对“邻居”定义不同的拓扑结构,粒子群优化算法主要存在两种结构,即全局邻居的粒子群优化算法和局部邻居的人工智能算法,前者把除自己之外的所有同伴都作为邻居,而后者只把除自己之外的一部分同伴作为邻居,相当于在逻辑上对鸟群又进行分组。两种结构相比之下,全局邻居结构算法收敛较快,但是容易陷入局部极值,而局部邻居结构算法通过同多组的极值进行比较,虽然导致收敛速度稍慢,但是可以有效地避免陷入局部极值。实验中为了实现光纤链路中偏振模色散的最佳补偿,采用局部结构的人工智能算法根据偏振计反馈回来的偏振度值来控制电控偏振控制器进行最佳状态搜索。

首先将可变时延线调整到 16ps,然后通过逻辑控制单元模块对每个电控偏振控制器的 3 个端口进行控制,控制自由度为 6,由于粒子群优化算法具有搜索速度快、抗噪声且不易陷入局部极值的特点,整个偏振模色散补偿过程可在 ms 量级的时间内完成。图 5 所示为不同电压组合下对应偏振度值的二维分布图,该分布图是通过粒子群优化搜索算法搜索到偏振度的最大值后,对两阶段补偿器中的第一个偏振控制器的相邻两个端口在 2~7 V 电压范围内遍历施加各种电压组合得到。图 5 中颜色较浅的区域分布表明在自由度为 6 的整个搜索空间中存在许多极值点,而粒子群优化算法可以有效地避免陷入局部的极值。图 6 为示波器检测到的实验结果,可见补偿后的眼图张开度得到明显的改善。

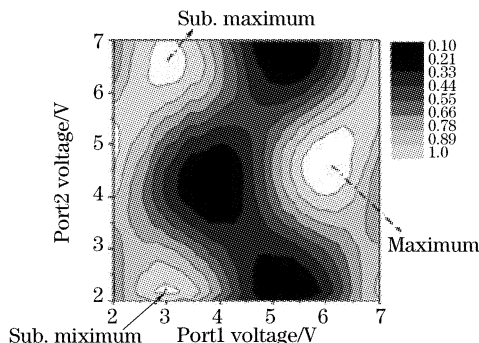


图 5 遍历两个端口电压所得的偏振度分布图

Fig. 5 The DOP map by changing two ports voltages

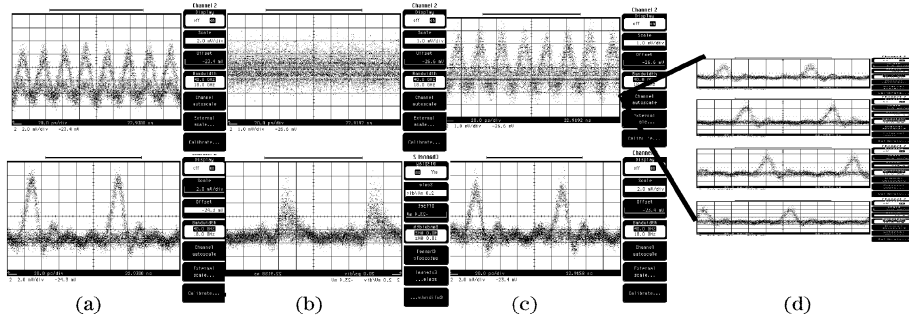


图 6 40 Gb/s OTDM 系统中偏振模色散补偿前后眼图。(a) 背对背复用前和复用后信号的眼图, (b) 补偿前信号眼图和解复用眼图(DOP: 0.38), (c) 补偿结束后的信号眼图以及各路解复用信号的对比( $p=0.998$ ), (d) 四路解复用信号的眼图  
Fig. 6 Before and after PMD compensation eye diagram in the 40 Gb/s OTDM system. (a) Back-to-back eye diagrams, (b) before PMD compensation, (c) after PMD compensation, (d) four channels demultiplex eye diagrams

### 5 补偿结果测量

在实验中,我们采用  $2^7-1$  长度的伪随机码序列对偏振模色散补偿系统进行了误码率(BER)的测量,任意提取一路 10 Gb/s 信号在不同接收功率下,每隔 10 s 中记录累计得到误码率,得到如图 7 所示的曲线。测量结果表明误码率为  $10^{-9}$  时的功率代价小于 1 dB。

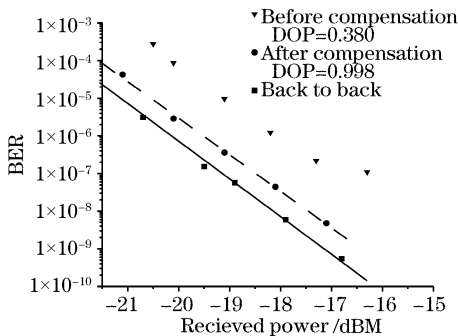


图 7 误码率对应不同功率曲线  
Fig. 7 BER vs received power

实验过程中,利用 EXFO 公司的偏振模色散分析仪(FPMD5600)对补偿前后的链路状态进行测量。在中心波长 1560.5 nm 附近 0.6 nm 范围内,以 0.03 nm 波长采样间距均匀选取 20 个波长测量点,并绘出其其在庞加莱球上的分布和在  $S_1-S_2, S_1-S_3, S_2-S_3$  二维平面上的投影。从图 8 中可以看出,在补偿前不同波长采样点分布非常分散,并且轨迹并不规则,偏振模色散的一阶和二阶效应均表现得很严重,补偿完成后,不同的波长采样点收敛到一起,有效削弱了偏振模色散的影响,但是波长采样点没有完全收敛到一点,仍残留有少许的一阶和二阶效应。这主要是由于实验设备硬件精度和人工智能算法搜索精度的限制,对于偏振度反馈值的检测和处理存在一

定的误差,同时高阶效应的存在也增加了极值搜索空间的复杂度并导致一定的误差。

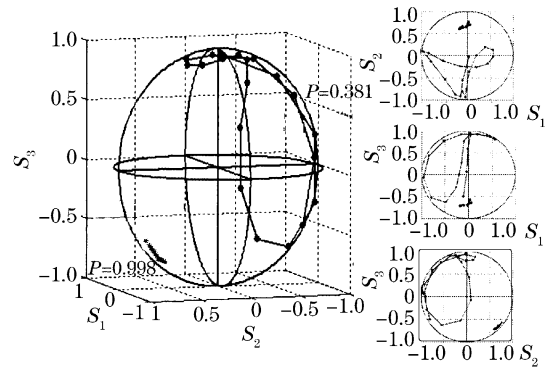


图 8 输出偏振态在庞加莱球上的分布  
Fig. 8 Output polarization states in Poincaré sphere  
从图 9 中可知,在中心波长 1560.5 nm 处差分群时延补偿前后测量值为 21 ps 和 1.3 ps,二阶偏振

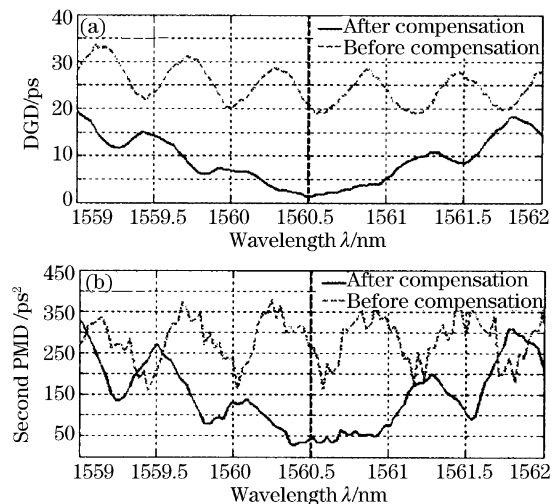


图 9 差分群时延(a)和二阶偏振模色散(b)的测量  
Fig. 9 DGD (a) and second PMD (b) measured values

模色散补偿前后测量值为 $266 \text{ ps}^2$ 和 $43.5 \text{ ps}^2$ ,对比差分群时延和二阶偏振模色散补偿前后的测量值,光纤链路中的一阶偏振模色散补偿效果明显,二阶偏振模色散效应得到很大的抑制。

## 6 结 论

本文利用两阶段偏振模色散补偿器和采用基于偏振度极值的,粒子群优化算法成功地在 $40 \text{ Gb/s}$  OTDM的光纤链路中实现了ms量级的偏振模色散自适应补偿实验,通过对实验链路状态的测量证明两阶段偏振模色散补偿器具有一阶和二阶偏振模色散的补偿能力,补偿后系统的总的功率代价在误码率为 $10^{-9}$ 时小于 $1 \text{ dB}$ 。

**致谢** 感谢 ADVANTEST 公司提供误码检测设备(D3186,D3286),感谢 EXFO 公司提供偏振模色散测试仪(FPMD5600)。

## 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[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 348~349
- 2 Heismann F, Fishman D A, Wilson D L. Automatic compensation of first-order polarization mode dispersion in a  $10 \text{ Gb/s}$  transmission system[C]. *Proc. ECOC '98, WdC11*, 1998. 529~530
- 3 Ooi H, Akiyama Y, Ishikawa G. Automatic polarization-mode dispersion compensation in  $40\text{-Gb/s}$  transmission [C]. *Proc. OFC/IOOC '99, WE5-1*, 1999. 21~23
- 4 Zhang X G, Yu L, Zhou G T *et al.*. Adaptive PMD compensation in  $10\text{-Gb/s}$  RZ optical communication system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8):447~450
- 5 Kikuchi N. Analysis of signal degree of polarization degradation used control signal for optical polarization mode dispersion compensation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**: 480~486
- 6 Sunnerud H, Xie Chongjin, Karlsson M *et al.*. A comparison between different PMD compensation techniques [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(3): 368~378
- 7 Francia C, Bruyere F, Thiery J P *et al.*. Simple dynamic polarization mode dispersion compensator[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(5): 414~415
- 8 Xu Kun, Dai Yitang, Mao Jin *et al.*. Study of dynamic PMD compensation system using signal DOP as the feedback control signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1024~1029 (in Chinese)  
徐 坤,戴一堂,毛 晋等. 基于光信号偏振度的偏振模色散补偿系统的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1024~1029
- 9 Zhang X G, Yu L, Zheng Y *et al.*. Two-stage adaptive PMD compensation in a  $10 \text{ Gb/s}$  optical communication system using particle swarm optimization algorithm[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1~6): 233~242
- 10 Zhang J, Yao M, Zhang H *et al.*.  $10\text{-GHz}$  actively mode-locked pulse generation employing a semiconductor optical amplifier and an electro-absorption modulator in a fiber ring [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **197**(4~6): 385~391
- 11 Hilliger E, Marembert V, Ferber S *et al.*. EAM with improved switching performance by self cascading[C]. *OFC 2003*, **1**: 268~269
- 12 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ. USA, 1995, **4**:1942~1948
- 13 Kennedy J, Mendes R. Population structure and particle swarm performance [C]. *Proc. 2002 Congress on Evolutionary Computation*, 2002, **2**:1671~1676
- 14 Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. *Proc. of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, **39**: 39~43
- 15 Zhang X G, Yu L, Zheng Y *et al.*. Adaptive PMD compensation using PSO algorithm[C]. *OFC 2004*, ThF1