

文章编号: 0253-2239(2005)04-443-6

偏振度作为反馈信号进行偏振模色散补偿的研究*

陈 林¹ 张晓光² 周光涛² 郑 远² 沈 昱² 张 茹² 于 丽² 杨伯君²

(¹ 湖南大学计算机与通信学院, 长沙 410082)
(² 北京邮电大学理学院, 北京 100876)

摘要: 对 40 Gb/s 光纤通信中归零码和非归零码光脉冲的偏振度随二阶偏振模色散的变化规律进行了数值模拟, 结果表明由于二阶偏振模色散的影响, 偏振度的变化趋势呈现出震荡性, 二阶偏振模色散对归零码的偏振度要比非归零码的偏振度影响明显; 同时搭建了偏振模色散补偿系统, 对系统进行数值模拟和实验所得到的结果都表明, 以偏振度作为反馈信号, 采用粒子群优化算法作搜索算法能够有效地对归零码和非归零码系统的一阶及高阶偏振模色散进行自适应补偿。

关键词: 光纤通信技术; 偏振模色散; 偏振度; 偏振模色散补偿

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Study Polarization Mode Dispersion Compensation with Degree of Polarization as Feedback Signal

Chen Lin¹ Zhan Xiaoguang² Zhou Guangtao² Zheng Yuan² Shen Yu²
Zhang Ru² Yu Li² Yang Bojun²

(¹ The School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082)
(² School of Science, Beijing University of Post and Telecommunication, Beijing 100876)

Abstract: The degradation of signal degree of polarization with second order polarization mode dispersion in 40 Gb/s RZ and NRZ optical communication is analyzed by numerical simulation. The results show that the degradation of signal degree of polarization is vibrated by second order polarization mode dispersion. The effect of higher-order polarization mode dispersion on degree of polarization of NRZ and RZ code are also numerically analyzed, the results show that the effect of second polarization mode dispersion on degree of polarization of RZ code are more evident than that on NRZ code. A experiment system is set up to compensate the first and high order polarization mode dispersion effectively by degree of polarization as feedback signal and PSO as compensation arithmetic for RZ and NRZ code system.

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

1 引 言

偏振模色散(PMD)已成为限制高速光纤通信系统速率及传输距离的主要因素之一。近年来人们对偏振膜色散及其补偿进行了大量的研究,并提出了多种自适应偏振模色散补偿方案。决定自适应偏振模色散补偿系统性能的主要指标是快速响应,性价比高,这主要靠采用合适的反馈信号以及快速有效的算法来实现。作为偏振模色散补偿的反馈信号目前常用的反馈技术主要有两种,第一种是电功率法^[1,2],即检测某一特定的射频功率作为反馈信号,

但电功率法所使用的光电探测器与码速率有关,不利于系统的升级,而且高比特率的光电探测器价格高。第二种是检测光脉冲的偏振度(DOP)作为反馈信号,称为偏振度法^[3]。信号的偏振度与码速率无关,适用于不同码速率的系统,便于系统升级,系统代价也降低,因而在偏振模色散补偿中作为反馈信号无疑是很好的。

目前关于高阶偏振模色散对信号偏振度的影响只作了一些简单的研究^[4~6],更没有对不同的码型进行比较。本文用数值模拟的方法详细地研究了一

* 国家自然科学基金(60072042、60377026)和教育部博士基金(2000001301)资助课题。

作者简介: 陈 林(1968~),男,湖南大学教师,工学博士,高级工程师,主要研究方向为高速光纤通信系统及光电子器件研究。E-mail: lililiu@sina.com

收稿日期: 2003-12-05;收到修改稿日期: 2004-12-06

阶、二阶偏振模色散同时存在时对光信号偏振度的影响。同时搭建了偏振模色散补偿系统,利用偏振度作为反馈信号有效地对归零码和非归零码系统的一阶及高阶偏振模色散成功地进行了自适应补偿。

2 光信号的偏振度随着偏振模色散变化的规律

从频域上看,不考虑群速度色散和损耗时,一般光纤的琼斯矩阵可以表示为^[7]

$$\mathbf{M}(\omega) = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 \\ -u_2^* & u_1^* \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$ 。假设信号的频谱形状为

$$f(\omega), \text{ 并且满足归一化条件 } \int_{-\infty}^{+\infty} |f(\omega)|^2 d\omega = 1. \text{ 入射}$$

光的偏振态与频率无关,在两个偏振主态上的归一化投影分量为 $[a \ b]^T$, a, b 是与频率无关的复数并且满足关系式 $|a|^2 + |b|^2 = 1$, T 表示转置,所以经过光纤传输后两个偏振方向上的场分量可表示为

$$[E_{ax} \ E_{oy}]^T = \mathbf{M}(\omega)[a \ b]^T f(\omega),$$

代入(1)式后可得到输出的场分量,并将输出场对应的斯托克斯参量^[8]在整个信号频谱范围内平均得到

$$s_1 = \int [|E_{ax}(\omega)|^2 - |E_{oy}(\omega)|^2] d\omega = \int \{ [|a|^2 - |b|^2] (|u_1|^2 - |u_2|^2) + 2ab^* u_1 u_2^* + 2a^* b u_1^* u_2 \} |f(\omega)|^2 d\omega, \quad (2)$$

$$s_2 = \int 2\text{Re}[E_{ax}(\omega)E_{oy}^*(\omega)] d\omega = \int [(|b|^2 - |a|^2) (u_1 u_2 + u_1^* u_2^*) + a^* b (u_1^* u_1^* - u_2^2) + ab^* (u_1^2 - u_2^* u_2^*)] |f(\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

$$s_3 = \int -2\text{Im}[E_{ax}(\omega)E_{oy}^*(\omega)] d\omega = \int j [(|b|^2 - |a|^2) (u_1 u_2 - u_1^* u_2^*) + ab^* (u_1^2 + u_2^* u_2^*) - a^* b (u_2^2 + u_1^* u_1^*)] |f(\omega)|^2 d\omega, \quad (4)$$

则矢量 (s_1, s_2, s_3) 的模就是偏振度,可以看出脉冲的偏振度就是其频谱上各个频率分量的偏振度对功率谱加权平均的结果。

由上述可知,信号的偏振度与输入信号的偏振态、偏振模色散以及信号的频谱有关。我们研究的是 40 Gb/s 的非归零码和归零码的系统,码长度为 $2^6 - 1$ 的伪随机码。

一阶偏振模色散对信号偏振度的影响已有文章进行了研究^[6],这里不再详述,在只有一阶偏振模色

散的情况下,随着偏振模色散增大,光信号的偏振度呈现单调下降趋势。

二阶偏振模色散分为两项,第一项是去偏振项,第二项为偏振相关色散(PCD)^[9],去偏振项是由于偏振主态随光频率的变化,由主态旋转速率(PSPrr)决定^[9]。利用文献[10]给出的琼斯矩阵模型,计算了主态旋转速率对归零码和非归零码的偏振度的影响,如图 1 所示,当主态旋转速率从 4 GHz^{-1} 增大至 40 GHz^{-1} ,非归零码的偏振度随着

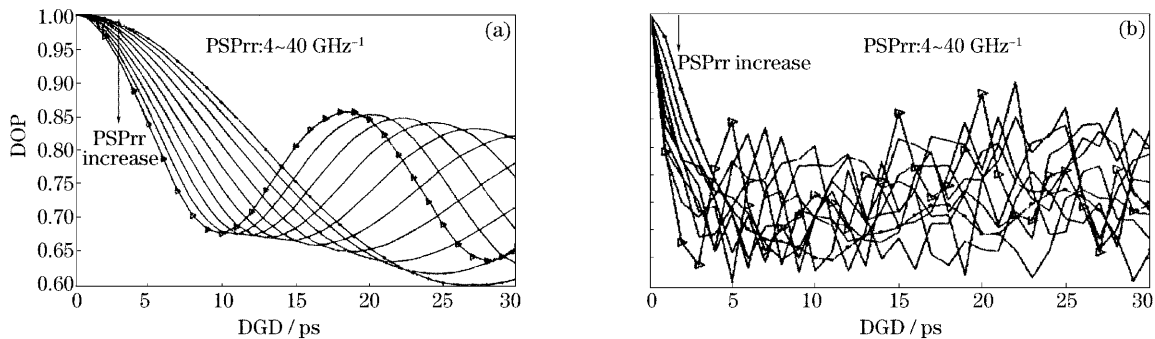


图 1 主态旋转速率增大,非归零码和归零码的偏振度随着差分群时延的变化情况。(a) 非归零码,(b) 归零码

Fig. 1 The DOP change with DGD considering PSPrr for (a) NRZ and (b) RZ

差分群时延(DGD)的变化如图 1(a)所示,归零码的偏振度随着差分群时延的变化如图 1(b)所示,可以看出,当差分群时延较小时,归零码和非归零码的偏振度都随着主态旋转速率的增大而减小,但当差分群时延较大时偏振度的变化就出现了振荡,非归零码的变化有一定的周期性,而归零码的变化就杂乱无章了。

第二项,偏振相关色散对偏振度的影响情况,如

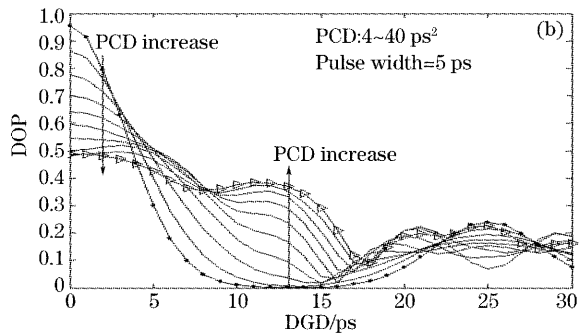
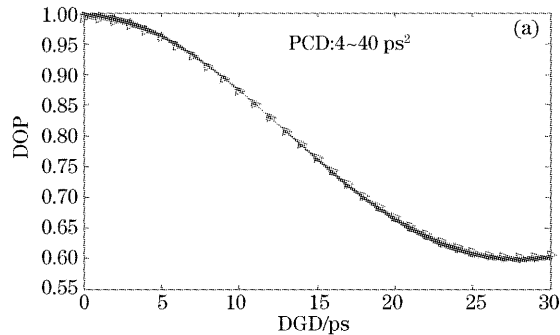


图 2 考虑偏振相关色散时偏振度随着差分群时延的变化。(a)非归零码,(b)归零码

Fig. 2 The DOP change with DGD considering PCD for (a) NRZ and (b) RZ polarization correlation dispersion

以上将二阶偏振模色散中的两项分开进行讨论,是为了更好地了解各分量的情况。但在实际光纤通信线路中,二阶偏振模色散的两项同时存在,因此又利用偏振模色散模拟器输出的琼斯矩阵对偏振度的影响进行了计算,模拟器输出 5000 个数据样本,平均偏振模色散为 15 ps,计算得到偏振度随差分群时延的变化情况如图 3 所示,图 3(a)为非归零

码偏振度与差分群时延的关系,图 3(b)为归零码的偏振度与差分群时延的关系,可以看出,对于归零码,同样的差分群时延所出现的偏振度值变化很大,而对于非归零码变化相对小些,这就说明二阶偏振模色散对归零码和非归零码的影响是不同的,对于归零码偏振度的变化范围更大。

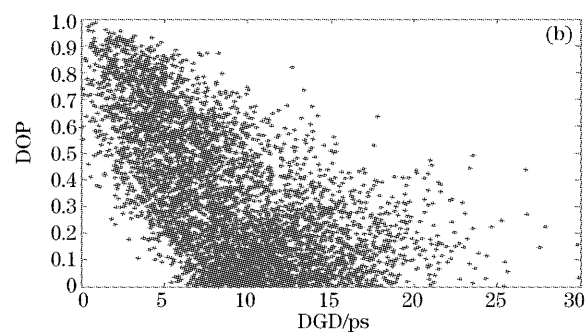
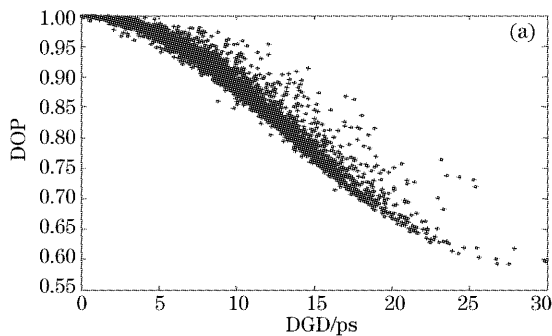


图 3 偏振模色散模拟器输出的偏振度值随差分群时延的变化情况。(a)非归零码,(b)归零码

Fig. 3 DOP change with DGD by PMD emulator. (a) NRZ, (b) RZ

从物理意义上讲,由于信号的偏振度代表的是整个谱域上的斯托克斯矢量对频谱强度加权平均的结果,根据偏振模色散的特性,频率间隔越大,不同频率分量斯托克斯矢量方向的差异就可能越明显,平均以后的值就越小,这样信号偏振度对偏振模色散的灵敏度就高。非归零码频谱范围相对较小,而且频谱中间部分的强度最大,因此平均以后的结果主要由频谱中心部分的斯托克斯矢量决定,这样偏

振度对偏振模色散变化不敏感。而对于归零码而言,情况有所不同,归零码的频谱宽,而且频谱中心部分的强度也比非归零码有所下降,所以当偏振模色散发生变化时,离中心频谱较远分量的斯托克斯矢量对整体的平均效果有较大的影响,这样偏振模色散变化对偏振度的影响就会增大。

综合以上所述,二阶偏振模色散对归零码的偏振度影响较大,特别是在差分群时延较大的情况下

出现较大的振荡现象,这就会使得在补偿大的偏振模色散时,由于出现许多次极大值,对于开发补偿的算法增加了难度,如果选择的算法不合适,会陷入局部极大值,而偏振模色散得不到补偿。同时,通过模拟,发现由于归零码的频谱较宽,会出现更多的偏振度次极大值,补偿算法在搜索过程中会耗时更长,这样会延长偏振模色散补偿搜索时间,因此如果在补偿归零码过程中,先对归零码进行滤波压缩频谱,补偿效果会好一些。

3 利用偏振度进行偏振模色散补偿研究

3.1 实验系统及补偿算法

在以上理论分析的基础上,搭建了如图4所示

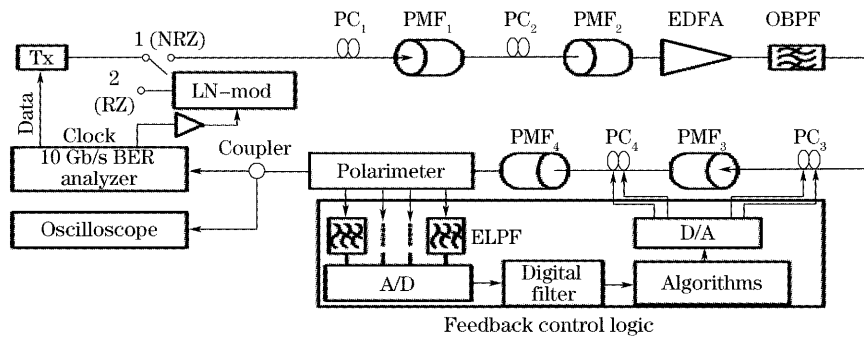


图4 利用偏振度作为反馈信号进行偏振模色散补偿的实验系统

Fig. 4 The polarization mode dispersion compensation experiment system with degree of polarization as feedback signal

由于二阶偏振模色散的影响,会使得补偿算法在调节补偿器的偏振控制器 PC_3, PC_4 搜索最大偏振度的过程中出现很多局部极大值,因此算法的选择很重要,通过实验和理论分析,发现粒子群算法(PSO算法)最适合于用作以偏振度作反馈信号的补偿算法。粒子群优化算法算法是一种直接的搜索算法^[9],最初是1995年提出的用于人工智能及神经网络领域^[9,10]。粒子群优化算法算法对静态、噪声、连续变化的多维全局最值搜索问题非常有效。粒子

的实验系统,该补偿实验系统包括四大部分:码源,能产生归零码和非归零码;偏振模色散模拟器,由保偏光纤(PMF_1, PMF_2)和偏振控制器(PC_1, PC_2)构成,这样的二段偏振模色散模拟器加上后面的补偿器能产生高阶偏振模色散;偏振模色散补偿器,由保偏光纤(PMF_3, PMF_4)和偏振控制器(PC_3, PC_4)构成;反馈控制单元,从偏振计中提取四路电压信号,经过A/D采样后变为数字信号,再经过变换后得到光信号的偏振度值。通过补偿算法调节补偿器的偏振控制器 PC_3, PC_4 的输入电压,使得偏振计中所检测到的偏振度达到最大,偏振模色散即可得到补偿。在系统最后的光接收端,可利用示波器观看补偿前后的眼图。

群优化算法算法又分为二种,一种是采用全部粒子作为邻居称为全局粒子群优化算法(GPSO),另一种是以其中部分粒子作为邻居,称为局部粒子群优化算法(LPSO),前者速度快,不过有时会陷入局部最优,后者速度慢一些,不过很难陷入局部最优。因此,实验选用局部粒子群优化算法作为补偿一阶或高阶偏振模色散的控制算法。

粒子群优化算法中采用的速度和位置的更新表达式为

$$v_{id} = K[\omega * v_{id} + \varphi_1 * \text{rand}() * (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 * \text{rand}() * (p_{gd} - x_{id})], \quad X_{\min} < x_{id} < X_{\max}$$

$$v_{id} = K[\omega * 0 + \varphi_1 * \text{rand}() * (p_{id} - x_{id}) + \varphi_2 * \text{rand}() * (p_{gd} - x_{id})], \quad X = X_{\max}, X = X_{\min}$$

$$v_{id} = v_{\max}, v_{id} > v_{\max}, v_{id} = -v_{\max}, v_{id} < -v_{\max},$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}, \quad X_{\min} < x_{id} + v_{id} < X_{\max}, \quad (5)$$

$$x_{id} = X_{\max}, x_{id} + v_{id} \geq X_{\max} \quad (6)$$

$$x_{id} = X_{\min}, x_{id} + v_{id} \leq X_{\min}$$

其中 K 的计算表达式为

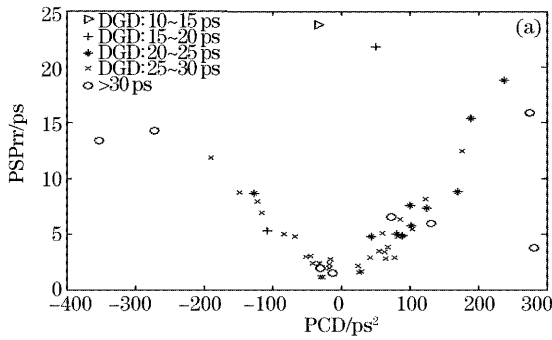
$$K = 2 \cdot \left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|^{-1},$$

$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, \varphi > 4$ 。权重因子 ω 所在搜索算法中以一定速率从大到小变化。 φ_1 和 φ_2 在数值模拟系统中取值分别为2.8和1.3。 $\text{rand}()$ 是随机数发生器,产生在(0,1)之间均匀分布的随机数。

3.2 偏振模色散补偿数值模拟结果

首先使用三段偏振模色散模拟器,对偏振模色散补偿进行数值模拟,模拟中采用码速率为40 Gb/s

的归零码和非归零码,码长度均为 2^6-1 的伪随机码,归零码脉冲宽度为8 ps,模拟器的三段固定时延参量为DGD1:8 ps,DGD2:11 ps,DGD3:13 ps.采用粒子群优化算法作为搜索算法,对图4的偏振模色散补偿系统进行模拟.对模拟器输出的1000个随机的样点进行补偿,得到了补偿后归零码的误码率.图5(a)为归零码补偿后误码率大于 10^{-12} 的样点分布.图中每一种符号表示一种状态(包括差分群时延,偏振相关色散及主态旋转率三个量),在这种状态下误码率超过 10^{-12} ,把这个状态称为误码样点.



为了比较对非归零码和归零码的补偿性能,同时计算了非归零码补偿后的误码样点分布图,如图5(b)所示,与归零码比较可知,对于同样的模拟器,非归零码补偿后误码样点要明显少于对归零码补偿后的误码样点,说明对于以偏振度作为反馈信号,补偿非归零码要比归零码容易.同时由图5(a)和图5(b)可知,1000个样点中补偿后误码率大于 10^{-12} 的样点明显减少.这说明采用粒子群优化算法作为补偿算法及偏振度作反馈信号对于归零码和非归零码进行补偿都是有效的.

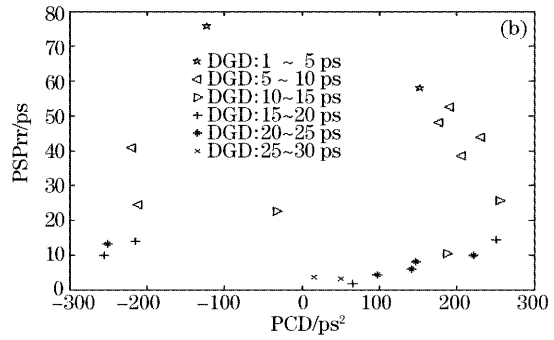


图5 对归零码(a)和非归零码(b)补偿后误码率大于 10^{-12} 样点分布

Fig.5 Dots distribution with BER> 10^{-12} after PMD compensating for RZ code (a) and NRZ code (b)

3.3 实验结果

利用偏振度作为反馈信号对10Gb/s系统中的一阶、二阶偏振模色散进行了补偿实验.图6为实验得到的10 Gb/s光信号的偏振度随着一阶偏振模色散的变化情况.为了去除噪声,采用了中值滤波.图6表明归零码的偏振度随差分群时延变化比非归零码快.

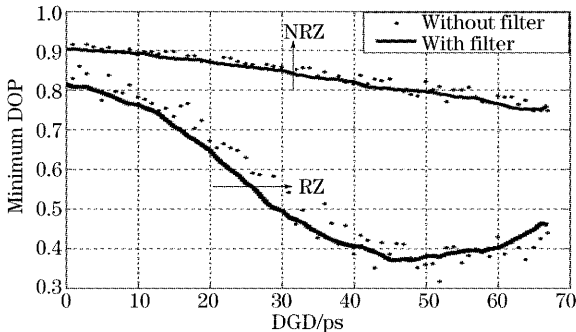


图6 一阶偏振模色散情况下偏振度随着差分群时延变化情况的实验结果

Fig.6 Measured DOP as function of DGD by experiment

由于实验中三段模拟器的损耗太大,采用二段模拟器,得到了对归零码和非归零码的补偿前后的眼图如图7所示,归零码脉宽为50 ps,模拟器所产

生总的差分群时延为80 ps.从补偿前后眼图对比来看,偏振度法作为反馈信号,选择粒子群优化算法算法可以有效地对归零码和非归零码的一阶及高阶偏振模色散进行补偿.

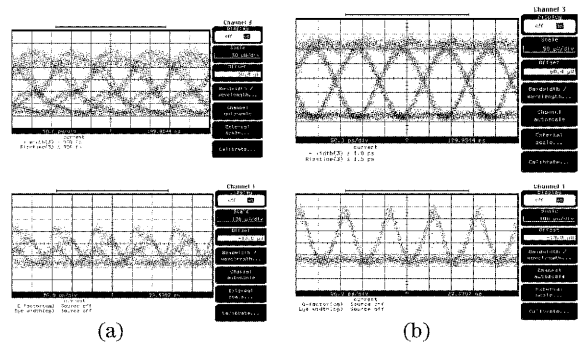


图7 对非归零码和归零码进行补偿的实验结果.

(a) 补偿前眼图,(b) 补偿后眼图

Fig.7 The results after PMD compensation for NRZ code and RZ code. (a) Eye diagram before compensation, (b) eye diagram after compensation

4 结 论

光信号的偏振度作为反馈信号对偏振模色散进行补偿的优点是实验系统价格便宜,与码速率无关,

便于系统的升级,但由于二阶偏振模色散的影响,光信号的偏振度随着差分群时延的变化并不呈单调下降的趋势,而归零码系统的偏振度比非归零码的偏振度变化更加复杂,体现在补偿过程中出现更多的局部极大值,使得补偿算法开发变得更加困难。基于对归零码和非归零码系统理论分析,采用粒子群优化算法成功地完成了利用偏振度作为反馈信号对 10 Gb/s 系统中一阶及高阶偏振模色散的补偿。

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 Liu Jianfei, Yu Jinlong, Wang Jian *et al.*. Study on automatic compensation of first order PMD in 10 Gbit/s optical fiber communication system [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(4): 349~352 (in Chinese)
刘剑飞,于晋龙,王 剑等. 10 Gbit/s 的光纤通信系统中一阶偏振模色散自动补偿技术的研究 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 349~352
- 3 L. S. Yan, Q. Yu, A. B. Sahin *et al.*. Simple bit-rate-independent PMD monitoring for WDM systems [C]. *Proc ECOC'01*, 2001, **3**: 206~207
- 4 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): 1204~1209 (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): 1204~1209
- 5 J. C. Rasmussen, I. Akihiko, I. George. Automatic compensation of polarization-mode dispersion for 40 Gb/s transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(12): 2101~2109
- 6 Nobuhiko Kikuchi. Analysis of signal degree of polarization degradation used as control signal for optical polarization mode dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 480~486
- 7 Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19): 1209~1210
- 8 Gordon J P, Kogelnik H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers [C]. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2000, **97**(9): 4541~4550
- 9 Nelson L E, Jopson R M, Kogelnik H *et al.*. Measurement of depolarization and scaling associated with second-order polarization mode dispersion in optical fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12): 1614~1616
- 10 Forestieri E, Vincetti L. Exact evaluation of the Jones Matrix of a fiber in the presence of polarization mode dispersion of any order [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(12): 1898~1909