

文章编号: 0258-7025(2003)12-1090-05

一种提高 40 Gb/s 非归零码系统中偏振度椭球对偏振模色散灵敏度的新方法

郑 远, 杨伯君, 张晓光

(北京邮电大学理学院物理部, 北京 100876)

摘要 提出了利用光带阻滤波器提高 40 Gb/s 非归零码系统中偏振度椭球对偏振模色散灵敏度的方法, 数值研究了不同滤波器带宽对偏振度椭球三个轴长度的影响。结果表明, 加滤波器后偏振度椭球对差分群时延和主态旋转率的敏感度明显提高, 考虑到滤波器引入的损耗, 提出了在最大差分群时延为 20 ps 时滤波器的带宽应限制在 10 GHz 以下。另外, 数值结果还表明在滤波器带宽为 10 GHz 时, 小于 40 ps² 的偏振相关色散不会对偏振度椭球三个轴的长度产生明显的影响。

关键词 光纤通信技术; 偏振模色散; 光带阻滤波器; 偏振度椭球

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

A Novel Method of Improving the Sensitivity of DOP Ellipsoid on the Polarization Mode Dispersion in 40 Gb/s NRZ Systems

ZHENG Yuan, YANG Bo-jun, ZHANG Xiao-guang

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

Abstract A novel method is proposed to improve the sensitivity of DOP (degree of polarization) ellipsoid on the polarization mode dispersion (PMD) in 40 Gb/s non-return-to-zero (NRZ) systems by using optical bandstop filters. The effects of filter's bandwidth on the three axes of DOP ellipsoid are investigated numerically. The results show that the sensitivity of DOP ellipsoid on differential group delay (DGD) and principal state of polarization (PSP) rotation rate is greatly improved by using a filter. Considering the loss induced by the filter, the bandwidth of the filter should be limited under 10 GHz when the maximum DGD is equal to 20 ps. Additionally, the results also show that the polarization dependent chromatic dispersion (PCD) which is smaller than 40 ps² has less effects on the three axes of DOP ellipsoid when the bandwidth of a filter is equal to 10 GHz.

Key words fiber communication technique; polarization mode dispersion; optical bandstop filter; DOP ellipsoid

1 引 言

随着光纤通信系统速率的提高, 光纤中的偏振模色散(PMD)对系统性能的影响越来越显著, 人们对 PMD 的特性、测量和补偿等方面进行了广泛的研究, 提出了许多补偿 PMD 的方法, PMD 的统计

特性要求补偿器能够自适应补偿, 因此需要一个能够实时反映 PMD 大小的反馈信号来控制补偿单元, 因此反馈信号的质量将直接影响到补偿器性能的好坏。目前 PMD 补偿系统中所使用的反馈信号可以是信号频谱中特定射频分量的强度^[1], 也可以是偏振度(DOP)^[2~5], 在以偏振度作为反馈信号的

收稿日期: 2002-07-22; 收到修改稿日期: 2002-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 60072042)、国家 863 计划(项目编号: 2001AA122041)、教育部博士点基金和北京邮电大学与世维通基金资助项目。

作者简介: 郑 远(1976—), 男, 北京邮电大学理学院物理部, 博士生, 硕士期间从事全光波长变换器和声光耦合器件的研究, 现从事高速光通信系统中偏振模色散的研究。E-mail: zhengyuan@263.net

系统中,由于偏振度随输入的偏振态变化^[6],这样会影响到实际 PMD 补偿系统中对 PMD 大小的正确估计,一种改进的方法是采用 3 维偏振度椭球^[3,4]作为反馈信号。然而无论是 DOP 还是偏振度椭球,在采用非归零(NRZ)码的系统中,它们对 PMD 的灵敏度很低^[6],这将影响到补偿系统的性能。本文在分析影响偏振度椭球对 PMD 灵敏度因素的基础上,提出了利用带阻滤波器来提高 NRZ 码系统中偏

振度椭球对 PMD 灵敏度的方法。

2 理论分析

为了研究影响偏振度椭球对 PMD 灵敏度的因素,建立如图 1 所示的理论模型,其中激光二极管为光源,假设其输出为完全偏振光,偏振扰动器的作用是改变光源的输出偏振态,使其能够遍历整个邦加球^[4]。

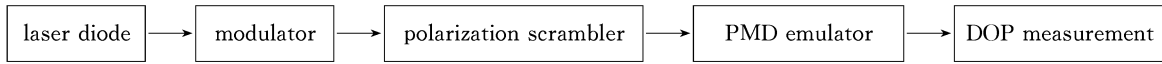


图 1 研究偏振度椭球的理论模型

Fig.1 Theoretical model for DOP ellipsoid

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]

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

其中, $|u_1|^2 + |u_2|^2 = 1$ 。

假设信号的频谱形状为 $f(\omega)$,并且满足归一化条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(\omega)|^2 d\omega = 1$ 。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 $[E_{ox} \ E_{oy}]^T = M(\omega)[a \ b]^T f(\omega)$,代入公式(1)后得到输出的场分量为

$$E_{ox} = (au_1 + bu_2)f(\omega) \quad (2a)$$

$$E_{oy} = (-au_2^* + bu_1^*)f(\omega) \quad (2b)$$

将输出场对应的 Stokes 参量^[8]在整个信号频谱范围内平均

$$\begin{aligned} \bar{s}_1 = & \int (|E_{ox}(\omega)|^2 - |E_{oy}(\omega)|^2) d\omega = \\ & \int [(|a|^2 - |b|^2)(|u_1|^2 - |u_2|^2) + \\ & 2ab^* u_1 u_2^* + 2a^* b u_1^* u_2] |f(\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_2 = & \int 2\text{Re}[E_{ox}(\omega)E_{oy}^*(\omega)] d\omega = \\ & \int [(|b|^2 - |a|^2)(u_1 u_2 + u_1^* u_2^*) + \\ & a^* b(u_1^* u_1^* - u_2^* u_2^*) + \\ & ab^*(u_1^2 - u_2^* u_2^*)] |f(\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \bar{s}_3 = & \int -2\text{Im}[E_{ox}(\omega)E_{oy}^*(\omega)] d\omega = \\ & \int [j(|b|^2 - |a|^2)(u_1 u_2 - u_1^* u_2^*) + \\ & ab^*(u_1^2 + u_2^* u_2^*) - \\ & a^* b(u_2^2 + u_1^* u_1^*)] |f(\omega)|^2 d\omega \end{aligned} \quad (3c)$$

则 $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3)$ 就是所得偏振度椭球上的坐标,由于输入偏振态与频率无关,因此(3a),(3b),(3c)式中的 a 和 b 并不影响椭球整体的形状, a 和 b 的变化只是引起 $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3)$ 在椭球上的位置变化,椭球的形状只由 u_1, u_2 及 $|f(\omega)|^2$ 的形状决定。

从物理意义上讲,由于偏振度椭球上每个点代表的是整个谱域上的 Stokes 矢量对频谱强度加权平均的结果,根据 PMD 的特性,频率间隔越大,不同频率分量 Stokes 矢量方向的差异就可能越明显,平均以后的值就越小,这样偏振度椭球对 PMD 的灵敏度就高。NRZ 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 Stokes 矢量决定,这样偏振度椭球对 PMD 变化不敏感。而对于归零(RZ)码而言,情况有所不同,RZ 码的频谱宽,而且频谱中心部分的强度也比 NRZ 码有所下降,所以当 PMD 发生变化时,离中心频谱较远分量的 Stokes 矢量对整体的平均效果有较大的影响,这样偏振度椭球对 PMD 变化的灵敏度就会提高。

从(3a),(3b),(3c)式看出, $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3)$ 的表达式可以分为两部分,一部分与光纤的传输矩阵和输入的偏振态有关,另一部分与信号的功率谱有关,改变这两者都可以改变偏振度椭球上的坐标值。在实际的 PMD 补偿系统中,采用改变第一部分来增加灵敏度的方法是不现实的,但是可以通过改变进入 DOP 测量设备的谱形状的办法来提高灵敏度,可以通过减小谱中间分量的强度来实现,最直接的实现方法是将中间部分的频谱进行适当的带阻滤波。

3 数值结果与讨论

为了验证上面的想法,我们建立一个速率为 40 Gb/s 的 NRZ 码数值模拟系统,见图 2。

与图 1 相比,图 2 中加入了带阻滤波器和功率测量,功率测量的主要目的是测量通过带阻滤波器后信号的功率。在数值模型中,保持(3a),(3b),(3c)式中 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 不变的条件下,改变 a 和 b 的大小和相位差来实现偏振扰动器的功能。PMD 模拟器的模型由文献[9]给出,这个模型能够准确地

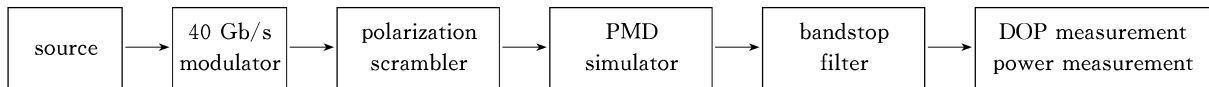


图 2 研究偏振度椭球的数值模型

Fig. 2 Numerical model for DOP ellipsoid

图 3 表示的是图 2 的模型在差分群时延 (DGD) 为 10 ps, 不考虑二阶偏振模色散, 并且不加带阻滤波器所得的偏振度椭球, 图中粗线表示的是椭球的三个半轴, 分别表示为 r_1, r_2, r_3 , 并且满足关系式 $r_1 > r_2 > r_3$ 。理论上讲, 偏振度椭球的三个轴的大小和方向都携带了有关偏振模色散的信息^[5], 首先在差分群时延 (DGD) 接近零的情况下, 无论二阶或更高阶的偏振模色散有多大, r_1, r_2, r_3 的长度应该相等, DGD 越小, 三者的差别越小。其次在 DGD 一定的情况下, 由于 r_1 表示的是沿着偏振主态 (PSP; Principal States of Polarization) 入射时的偏振度, 如果二阶以上的高阶偏振模色散可以忽略, 则 r_1 的长度应该为 1, 反之, r_1 的长度要小于 1, r_1 所指的方向就是偏振主态的方向。然而在实际的自适应补偿系统中, 主要是应用偏振度椭球轴长度方面的信息^[4], 例如一阶补偿的目的就是控制补偿器, 使得 r_1, r_2, r_3 的长度尽可能地接近; 对于两阶段的高阶补偿器^[10], 第一阶段的补偿目的就是使 r_1 的长度尽可能地接近 1。所以在下面的分析中, 只考虑加带阻滤波器后对 r_1, r_2, r_3 长度的影响。

在 Stokes 空间中, 偏振模色散矢量可表示为: $\vec{\Omega} = \Delta\tau \cdot \hat{q}$, 其中 $\Delta\tau$ 为 DGD, 而 \hat{q} 表示偏振模色散矢量的方向。二阶偏振模色散可以表示为: $\vec{\Omega}_\omega = \Delta\tau_\omega \cdot \hat{q} + \Delta\tau \cdot \hat{q}_\omega$, 其中 $\Delta\tau_\omega = d(\Delta\tau)/d\omega$, 表示偏振相关色散 (PCD); $\hat{q}_\omega = d\hat{q}/d\omega$, $|\hat{q}_\omega|$ 称为主态旋转率 (PSP rotation rate)。

首先在不考虑偏振相关色散的情况下, 分别观察加与不加带阻滤波器对椭球三个轴的影响。图 4

模拟一阶及二阶 PMD 的特性。光域上的带阻滤波器可以采用光纤光栅来实现, 但是为了简化模型, 采用的带阻滤波器的功率传输函数为 $T(\omega) = 1 - \exp(-\omega^2/\omega_0^2)$, 其 3 dB 带宽 $\Delta\omega_{3\text{dB}} = 1.665\omega_0$, 滤波器中心频率与信号光谱的中心对齐。DOP 测量时, 对每一组 (a, b) 值, 计算相应 Stokes 空间中的一个坐标 $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_3)$, 如果输入的偏振态能够遍历整个邦加球, 在 Stokes 空间中就得到一个偏振度椭球。

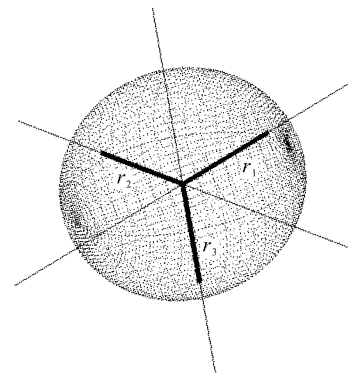


图 3 偏振度椭球

Fig. 3 DOP ellipsoid

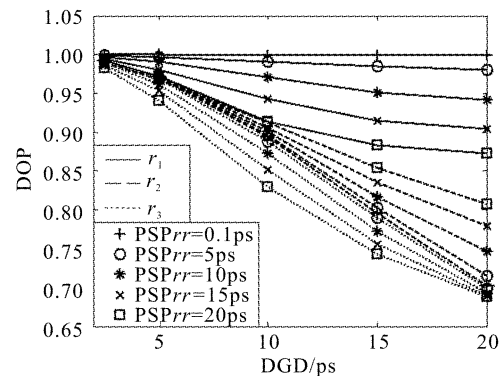


图 4 无带阻滤波器时偏振度椭球的轴随 DGD 和主态旋转率的变化关系

Fig. 4 Three axes of DOP ellipsoid vs DGD and PSP rotation rate without bandstop filter

表示的是不加带阻滤波器时偏振度椭球三个轴的长度随 DGD 及主态旋转率的关系, 其中的 PSPrr 表

示的是主态旋转率的大小, r_1, r_2, r_3 分别由图中的实线、虚线、点线表示。图 5 表示的是不同滤波器带宽

对偏振度三个轴的影响。图 6 表示的是由于带阻滤波器的引入造成的功率损耗与滤波器带宽的关系。

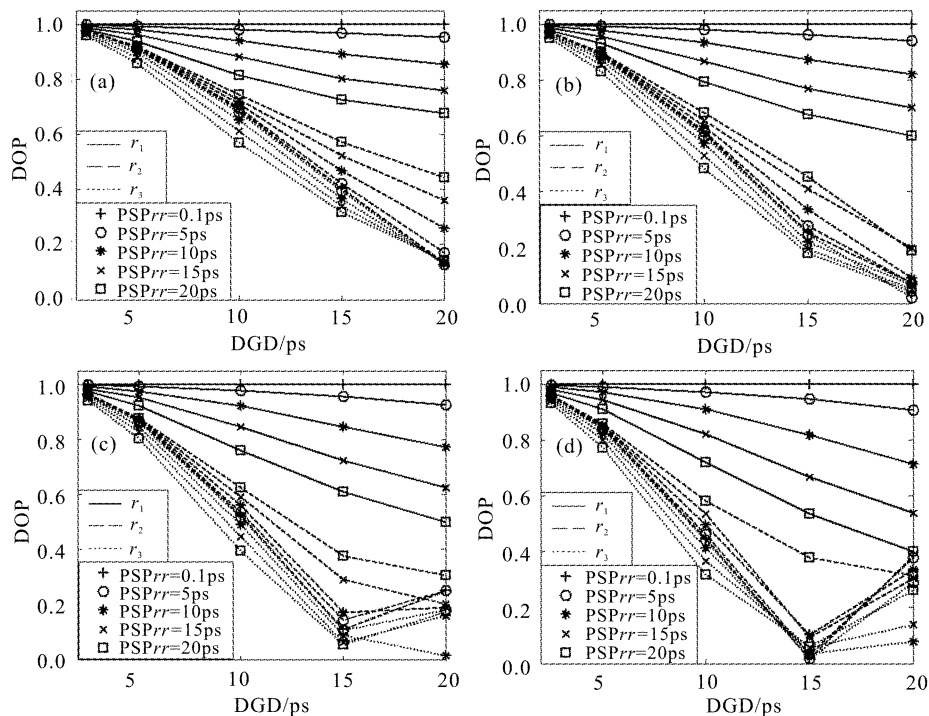


图 5 阻带宽度不同时偏振度椭圆的轴随 DGD 和主态旋转率的变化关系

Fig. 5 Three axes of DOP ellipsoid vary as a function of DGD and PSP rotation rate when the different width of stopband

(a) 5 GHz; (b) 10 GHz; (c) 15 GHz; (d) 20 GHz

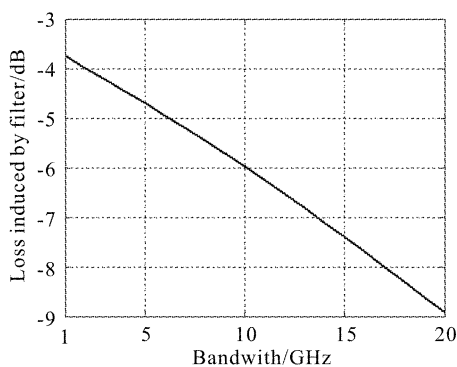


图 6 滤波器引入的损耗与带宽的关系

Fig. 6 Loss induced by filter vs bandwidth

考虑主态旋转率对偏振度椭圆三个轴的影响。从图 4 和图 5 可以看出, 未加带阻滤波器时或者滤波器的带宽比较小时, 如果主态旋转率很小, 椭圆的两个短轴 r_2 和 r_3 的长度几乎完全相同。随着主态旋转率的增加, 椭圆的最长轴 r_1 和最短轴 r_3 逐渐减小, 而 r_2 却逐渐增加。

从图 5 可以看出, 加上带阻滤波器后, r_1, r_2, r_3 对 DGD 和主态旋转率的灵敏度都有明显的提高,

对于 40 Gb/s 的 NRZ 码, 滤波器带宽为 5 GHz 并且 DGD 为 20 ps 时 r_3 可以降到 0.1, 而没有滤波器时 r_3 的值在 0.7 左右, 如果此时的主态旋转率为 20 ps, 则 r_1 由不加滤波器时的 0.87 下降到加滤波器时的 0.7。如果其他条件保持不变而把滤波器的带宽加大到 10 GHz, 则 r_3 可以接近于零, 而 r_1 在主态旋转率为 20 ps 时下降到 0.6。如果继续加大滤波器的带宽到 15 GHz 或 20 GHz, r_1 的变化规律保持不变, 而 r_3 在 DGD 不断增加的情况下先减小然后增加。 r_3 的这种随 DGD 的非单调变化会给 PMD 补偿器的反馈控制带来困难, 因此在实际补偿中应该避免这种情况的出现。

加滤波器虽然能提高偏振度椭圆三个轴对 PMD 的灵敏度, 然而它同时也引入了功率的损耗, 图 6 表示的是带阻滤波器的带宽与功率损耗的关系, 由于是 NRZ 码系统, 所以频谱上直流分量占很大的比重, 因此只要滤波器的带宽能够滤掉直流分量, 功率就会很大地衰减, 这也是图 6 中滤波器带宽很小时损耗并不趋近于零的原因。

从上面的分析可以看出, 提高灵敏度与减小功

率损耗是互相矛盾的,折中考虑,对 40 Gb/s 的 NRZ 码系统,如果最大 DGD 达到 20 ps,带阻滤波器的带宽应该选在 10 GHz 以下。这个结论是在没有考虑偏振相关色散的条件下得到的,下面的数值模拟中加上这个参数,看偏振相关色散的作用,只讨论滤波器 3 dB 带宽为 10 GHz 时情况。

图 7 分别表示 DGD 为 5 ps,10 ps 及 20 ps 并且只考虑偏振相关色散在 40 ps^2 以下的情况。从图 7(a),(b)来看,当 DGD 为 5 ps 和 10 ps 时,随着

主态旋转率的增加,PCD 对偏振度椭圆三个轴的影响并不明显。当 DGD 较大(40 Gb/s 系统 DGD 为 20 ps)时,PCD 对 r_1, r_3 的影响也不明显,但是不同 PCD 对应的 r_2 在主态旋转率较大时变化比较明显,最大变化的幅度接近 0.2,而且变化无显著的规律性,此时 r_2 很难用作补偿器的反馈信号。但是总的看来, 40 ps^2 的 PCD 对 40 Gb/s 系统的偏振度椭圆三个轴长度的影响不大,在忽略 PCD 时得到的结论在 PCD 小于 40 ps^2 时仍然成立。

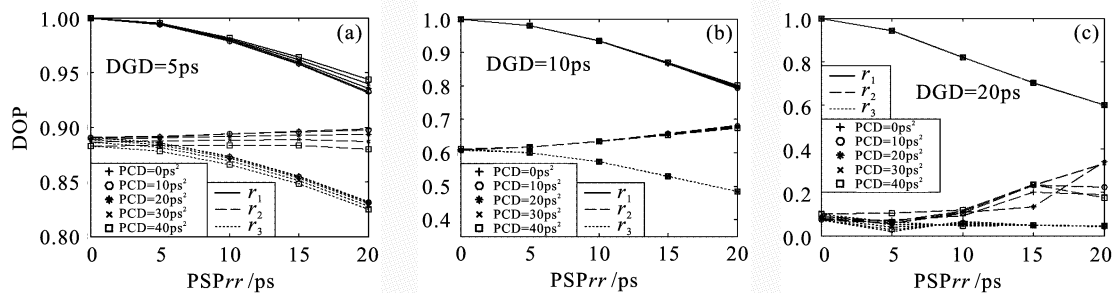


图 7 DGD 不同时偏振相关色散对三个轴的影响

Fig. 7 Effects on the three axes of PCD when different DGD

4 结 论

用数值方法模拟了滤波器带宽对偏振度椭圆三个轴长度的影响,结果表明,加上滤波器后偏振度椭圆对 DGD 和主态旋转率的敏感度都有明显提高,结合滤波器引入的损耗,提出了在最大 DGD 为 20 ps 时滤波器的带宽应限制在 10 GHz 以下。另外,数值模拟了滤波器带宽为 10 GHz 时 PCD 对偏振度椭圆三个轴的影响,结果发现 40 ps^2 以下的 PCD 值不会对三个轴的长度产生明显的影响。

参 考 文 献

- 1 R. Noe, 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**(10):1602~1616
- 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*, 1998, Vol. I :529~530
- 3 J. M. Fini, P. C. Chou, H. A. Haus. Estimation of polarization dispersion parameters for compensation with reduced feedback [C]. *OFC 2001*, paper WAA6-1
- 4 H. Rosenfeldt, C. Knothe, R. Ulrich *et al.*. Automatic PMD compensation at 40 Gb/s and 80 Gb/s using a 3-dimensional DOP evaluation for feedback [C]. *OFC 2001*, postdeadline paper PD27-1
- 5 P. M. Sylla, C. J. K. Richardson, M. VanLeeuwen *et al.*. DOP Ellipsoids for systems with frequency-dependent principal states [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1310~1312
- 6 N. Kikuchi, S. Sasaki. Polarization mode dispersion detection sensitivity of degree of polarization method for PMD compensation [C]. *Proc ECOC'99*, 1999, **2** (WeA1.3):8~9
- 7 C. D. Poole, R. E. Wagner. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 8 J. P. Gordon, H. Kogelnik. PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers [C]. in *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2000, **97**:4541~4550
- 9 Zheng Yuan, Liu Yumin, Yang Bojun *et al.*. Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by Jones transfer matrix method [J]. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 2003, **30**(1):45~48 (in Chinese)
- 10 Q. Yu, L.-S. Yan, Y. Xie *et al.*. Higher order polarization mode dispersion compensation using a fixed time delay followed by a variable time delay [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):863~865