

单模光纤中的二阶偏振模色散及其统计特性*

刘开贤^{1,2} 黄永清¹ 任晓敏¹

(1 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

(2 中国传媒大学理学院, 北京 100024)

摘要 用琼斯矩阵本征分析法和邦加球法, 分别测量了 22 km 和 75 km G. 652 单模光纤中的二阶偏振模色散, 并对其平行分量、垂直分量、PCD (Polarization dependent chromatic dispersion)、消偏振项、各个分量的统计特性及其影响进行了详细的分析, 得到了二阶偏振模色散随波长的分布情况及统计特性. 从统计结果可以得到, 与 PCD 项相比, 消偏振项在二阶偏振模色散中起主要作用. 该研究对二阶偏振模色散的补偿有一定的指导意义.

关键词 偏振模色散 (PMD); 二阶 PMD (SOPMD); 偏振主态 (PSP); 统计特性; 消偏振项; PCD

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

由于多种原因导致所有的单模光纤内部都存在双折射, 这种双折射效应将引起偏振模色散. 目前, 光通信继续向着高速度、大容量和超长距离传输方向发展, 但偏振模色散却是限制这种发展趋势的一个重要因素. 根据偏振理论可知, 单模光纤内部存在两个正交的具有不同传输速度的偏振态, 信号光经光纤传输后产生差分群时延 (DGD), DGD 在波长上的平均值称为一阶偏振模色散. 目前一阶偏振模色散的测量、统计特性和补偿已经得到了广泛而深入的研究^[1-5,13].

随着研究的深入, 一阶偏振模色散的测量与补偿技术逐渐成熟, SOPMD (Second-Order PMD) 对系统的影响将显现出来. SOPMD 将会引起脉冲信号的展宽和信号的畸变. 如果二阶效应较强, 则会引起系统误码率的增高, 限制系统的传输速度和容量^[6-8,14]. 因此, 对 SOPMD 统计特性的研究就显得非常重要. 目前国内对 SOPMD 还主要限于理论研究和数值模拟^[10], 本文以实验为基础讨论普通单模光纤中的 SOPMD 及其统计特性.

1 偏振模色散的 PSP 模型、偏振模色散矢量和二阶偏振模色散

1.1 偏振模色散的 PSP 模型

在光波频谱较窄、偏振相关损耗可以忽略时, 单模光纤内就存在一对正交的输入偏振主态 (PSP) 和一对正交的输出 PSP, 在小频率范围内 PSP 是不变的.

对任意偏振方向的人射光, 在入射端可以将其分解到两个输入 PSP 上, 两分量经光纤传输后, 分别沿对应的输出 PSP 输出; 由于两输出光的群时延不同, 产生的时延之差称为 DGD (或 $\Delta\tau$), $\Delta\tau$ 对波长的平均值即为 PMD, 这就是偏振模色散的 PSP 模型.

1.2 偏振模色散矢量

偏振模色散矢量可以公式表示为

$$\Omega = |\Omega| \nu = \Delta\tau \nu \quad (1)$$

Ω 为偏振模色散矢量, $\Delta\tau$ 为其大小, ν 是其单位方向矢量, ν 与 PSP 主态慢轴的方向相同. 在较大频率范围内, 它的大小和方向将随着频率的变化而变化. 光波经过存在 PMD 的介质传播后, 输出光的偏振态也将会发生变化; 若保持输入光的偏振态不变, 在一个较大的波长范围内连续改变输入光的波长, 输出光将在邦加球上画出一条不规则的曲线, 如图 1 中的点线所示, 箭头表示光波频率增加的方向.

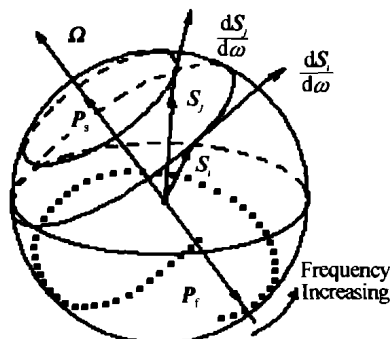


图 1 偏振主态、偏振模色散矢量、斯托克斯矢量及频率变化时输出光偏振态在邦加球上的表示

Fig. 1 PSP and first-order PMD vector and Stokes vector and the derivative of stokes vector are represented on the Poincare sphere, the dotted curve indicates the wavelength dependence of transmitted state of polarization (SOP)

若输入光的偏振态保持不变, 则 S 对圆频率的变化率 $dS/d\omega$ 与一阶偏振模色散矢量的关系为^[9]

$$dS(\omega)/d\omega = \Omega \times S(\omega) \quad (2)$$

*国家“863”计划项目(2001AA122041)、国际合作亚洲传媒基金项目 and 深圳华为公司科技基金项目资助
Tel: 010-62284004 Email: lkx25@x263.net
收稿日期: 2003-11-20

这说明当输入光的偏振态固定而频率变化时,输出光的斯托克斯矢量将绕着 PMD 矢量转动^[9].

1.3 二阶偏振模色散

偏振主态模型指出,光波在较小频率范围内变化时,光纤内部存在一对偏振主态,与该频率范围对应的一阶偏振模色散矢量 Ω 近似是恒定的,大小和方向都近似保持不变;而实际上,如果光波频率在较大的范围内变化时,偏振主态的方向也将发生变化,又由于 Ω 是沿着偏振主态慢轴的方向,因此 Ω 的方向也是随着光波频率的变化而变化的;也就是说,对于偏振方向固定的人射光,当其频率发生变化时,出射光的偏振状态也将发生变化,这将导致二阶偏振模色散的消偏振作用,引起信号的畸变^[6,7]. 不仅 Ω 的方向要随光波的频率而变化,它的大小也将随着改变,这将导致二阶偏振模色散的 PCD,PCD 将会引起脉冲的展宽或压缩. 下面首先讨论二阶偏振模色散定义.

SOPMD 矢量的定义式为 $\Omega_\omega = d\Omega/d\omega$,因此把式(1)代入该定义式中,就可以得到

$$\Omega_\omega = \frac{d\Omega(\omega)}{d\omega} = \Delta\tau_\omega \nu + \Delta\tau\nu_\omega = \Omega_{\omega//} + \Omega_{\omega\perp} \quad (3)$$

式中的第一项 $\Delta\tau_\omega \nu$ 与一阶偏振模色散矢量方向相同,称为平行分量,用 $\Omega_{\omega//}$ 表示;第二项 $\Delta\tau\nu_\omega$ 与一阶偏振模色散矢量方向垂直,称为垂直分量,用 $\Omega_{\omega\perp}$ 表示. 平行分量 $\Omega_{\omega//}$ 将引起信号脉冲的压缩或脉冲的展宽,与传统的色度色散具有同样的作用,它是由偏振模色散矢量的大小随波长的改变引起的. 平行分量对系统的影响用 PCD 表示

$$\text{PCD} = -(\pi c/\lambda^2)\Delta\tau_\omega = -(\pi c/\lambda^2)\Omega_{\omega//} \quad (4)$$

式中 c 为真空中的光速, λ 表示波长, $\Omega_{\omega//}$ 为平行分量的大小;PCD 是对整个光纤链路来说的,单位是 ps/nm.

SOPMD 的垂直分量的大小为 $|\Omega_{\omega\perp}| = \Delta\tau|\nu_\omega|$,该分量是由偏振模色散矢量方向的改变引起的. 垂直分量对系统的影响可以用消偏振作用来表示

$$|\nu_\omega| = |\Omega_{\omega\perp}|/\Delta\tau_\omega \quad (5)$$

该项的主要作用是引起信号光的消偏振作用和信号的畸变^[6]. 由 $\Omega(\omega)$ 、 $\Omega_{\omega//}$ 和 $\Omega_{\omega\perp}$ 的三角关系,可得

$$|\Omega_\omega| = \sqrt{|\Omega_{\omega\perp}|^2 + |\Omega_{\omega//}|^2} \quad (6)$$

此即为总的 SOPMD 大小.

2 SOPMD 统计特性的测量原理

要得到 SOPMD 的统计特性,首先要得到偏振模色散矢量 Ω ,这就要求必须得到 Ω 的大小 $\Delta\tau$ 和方向矢量 ν . 得到一阶偏振模色散矢量 Ω 后,再利用式(3)得到 SOPMD 及其统计特性. 下面介绍偏

振模色散矢量的测量方法.

2.1 琼斯矩阵法测量偏振模色散矢量

琼斯给出了一种求未知的线性时不变系统传输矩阵 T 的实验方法^[12]. 为了得到系统的琼斯传输矩阵 T ,分别激发三个同频率的人射光场,使人射光处在三个不同的线偏振态: $\theta_1 = 0^\circ$ 、 $\theta_2 = 45^\circ$ 和 $\theta_3 = 90^\circ$,对应的输出斯托克斯矢量分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 . 由这三个斯托克斯矢量可以得到对应的琼斯矢量.

在高频和低频处分别计算 $T(\omega + \Delta\omega)$ 和 $T^{-1}(\omega)$,这样就可以得到被测系统的 DGD 或 $\Delta\tau$ ^[11]

$$\Delta\tau = |\arg(\rho_1/\rho_2)|/\Delta\omega \quad (7)$$

式中 ρ_1 和 ρ_2 是矩阵 $T(\omega + \Delta\omega)T^{-1}(\omega)$ 复数本征值, \arg 表示求复数的相角,即 $\arg(\eta e^{i\theta}) = \theta$.

下面求 Ω 的单位方向矢量 ν . 同一波长的光以两个不同的偏振态入射到待测光纤 (FUT),出射光用斯托克斯矢量 S_i 和 S_j 表示,改变入射光的波长,则两出射光将在邦加球上画出两段曲线,若波长间隔足够小的话,这两段曲线就可看作是两个圆上两段微小的圆弧,由这两段圆弧就可以得到对应的两个同轴圆环,如图 1 中的 S_i 和 S_j 所在的圆环所示. 两斯托克斯矢量对圆频率 ω 的变化率 $dS_i/d\omega$ 和 $dS_j/d\omega$ 分别沿着两圆的切线方向. 由关系式(2)可以看出, $dS_i/d\omega$ 和 $dS_j/d\omega$ 都与 $\Omega(\omega)$ 垂直. 利用矢量积关系式, $a \times (b \times c) = (a \cdot c)b - (a \cdot b)c$ 就可以得到偏振模色散矢量 $\Omega(\omega)$ 的单位方向矢量

$$\nu = \left(\frac{dS_i}{d\omega} \times \frac{dS_j}{d\omega} \right) / \left| \frac{dS_i}{d\omega} \times \frac{dS_j}{d\omega} \right| \quad (8)$$

式(8)表明,偏振模色散矢量的方向也是随频率变化的.

2.2 邦加球法测量偏振模色散矢量

邦加球法只需要两组数据就可以得到 Ω ,比琼斯矩阵法要简单一些. 光以两个不同的偏振态入射,偏振态之间的夹角为 θ ,如果以非常小的波长间隔改变入射光的波长,就可以得到两组出射光的斯托克斯矢量 S_i 和 S_j . 基于琼斯矩阵法中得到方向矢量 ν 相似的理论,就可以得到 $\Omega(\omega)$

$$\Omega(\omega) = \left(\frac{dS_i}{d\omega} \times \frac{dS_j}{d\omega} \right) / \left(\frac{dS_i}{d\omega} \cdot S_j \right) \quad (9)$$

利用上式,就可以得到完整的偏振模色散矢量,再利用式(3)就可得到 SOPMD 及其统计特性.

3 实验结果及分析讨论

3.1 实验装置及测量方法

实验框图如图 2 所示,光源为 1550 nm 的可调谐激光器,偏振控制器是为了得到圆偏振光,可旋转

起偏器可以得到不同偏振方向入纤偏振光, 偏振计用来测量待测光纤输出光的斯托克斯矢量.

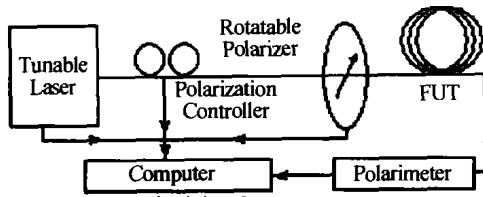


图2 实验框图

Fig. 2 Experimental arrangement

测量时, 把可旋转起偏器固定在不同的起偏角, 让可调谐激光器遍历整个要测的波长区间, 这样就可以得到对应于不同入射角的输出斯托克斯矢量

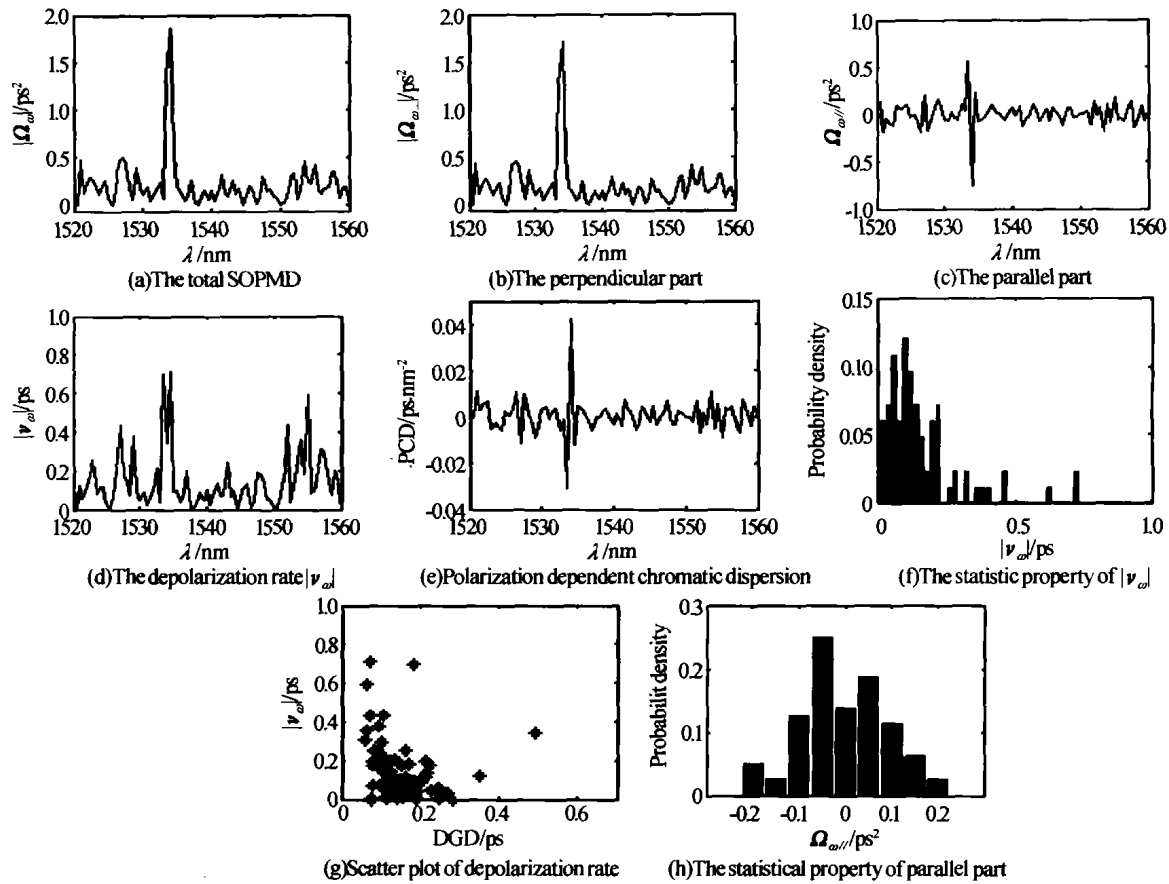


图3 用琼斯矩阵法对 22 km 单模光线的测量结果

Fig. 3 SOPMD measurement result of 22 km SMF

图3(a)是总的 SOPMD 随波长变化的关系曲线; 图3(b)为 SOPMD 的垂直分量的大小 $|\Omega_{\omega\perp}|$ 随波长变化的情况; 图3(d)给出了退极化率的大小 $|\nu_{\omega}|$ 随波长随机变化的关系曲线, 这说明 SOPMD 矢量 Ω_{ω} 具有偏离一阶偏振模色散矢量 Ω 的趋势; 从 $|\nu_{\omega}|$ 的统计图形(f)可以看出, $|\nu_{\omega}|$ 取较小值的几率较大, 随着 $|\nu_{\omega}|$ 取值的增大而迅速减小; 由 $|\nu_{\omega}|$ 对 DGD 的统计特性图(g)可以看出, $|\nu_{\omega}|$ 主要分布在 DGD 平均值附近, 较大的 $|\nu_{\omega}|$ 主要集中在较小的 DGD 附近.

SOPMD 的平行分量 $\Omega_{\omega//}$ 随波长的变化情况如图3(c)所示, 该平行分量有正有负, 这反映了一阶偏振模色散大小增减的变化情况; 图3(e)为

组, 利用琼斯矩阵本征分析法和邦加球法求出一阶偏振模色散矢量, 进而得到 SOPMD 及其统计特性. 实验过程中用两种方法分别对 22 km 和 75 km 的单模光纤进行了测量, 但由于篇幅所限, 文中只给出了琼斯矩阵法对 22 km 单模光纤和邦加球法对 75 km 单模光纤的测量结果, 并对两种测量结果中各量的统计特性进行了分析比较.

3.2 琼斯矩阵法测量的结果及统计特性分析

测量时选取 22 km 的 G. 652 普通单模光纤进行了测量, 测量的波长范围是 1520 nm 到 1560 nm, 光纤的平均 DGD 为 0.1527 ps, 测量结果如图3所示.

SOPMD 的平行分量所导致的与偏振有关的色散 PCD, PCD 与普通的色度色散具有相同的作用, 正的 PCD 导致脉冲展宽, 负的 PCD 导致脉冲压缩; 图3(h)给出了平行分量 $\Omega_{\omega//}$ 的概率分布密度, 从图中可以看出, $\Omega_{\omega//}$ 的值基本上是以过零点的竖直轴对称分布的; 由关系式(4)可知, PCD 与 $\Omega_{\omega//}$ 符号相反, 有着相似的统计特性, 只要把 $\Omega_{\omega//}$ 的概率密度分布以过零点的竖直轴为对称轴左右互换, 就可得到 PCD 的统计图形(略).

比较图3(a)、(b)和(c)可以得出, 从数值上来看, 垂直分量几乎占了 SOPMD 的全部, 从对系统性能的影响来讲, 垂直项主要是引起信号光脉冲的消偏振和畸变, 比平行分量引起色散的影响要大, 因此

垂直分量在 SOPMD 中起主要作用。

3.3 邦加球法测量的结果及统计特性分析

此次测量选取了长为 75 km 的 G. 652 普通单

模光纤,测量的波长范围是 1520 ~ 1560 nm,光纤的平均 DGD 为 0.367ps,测量结果如图 4 所示。

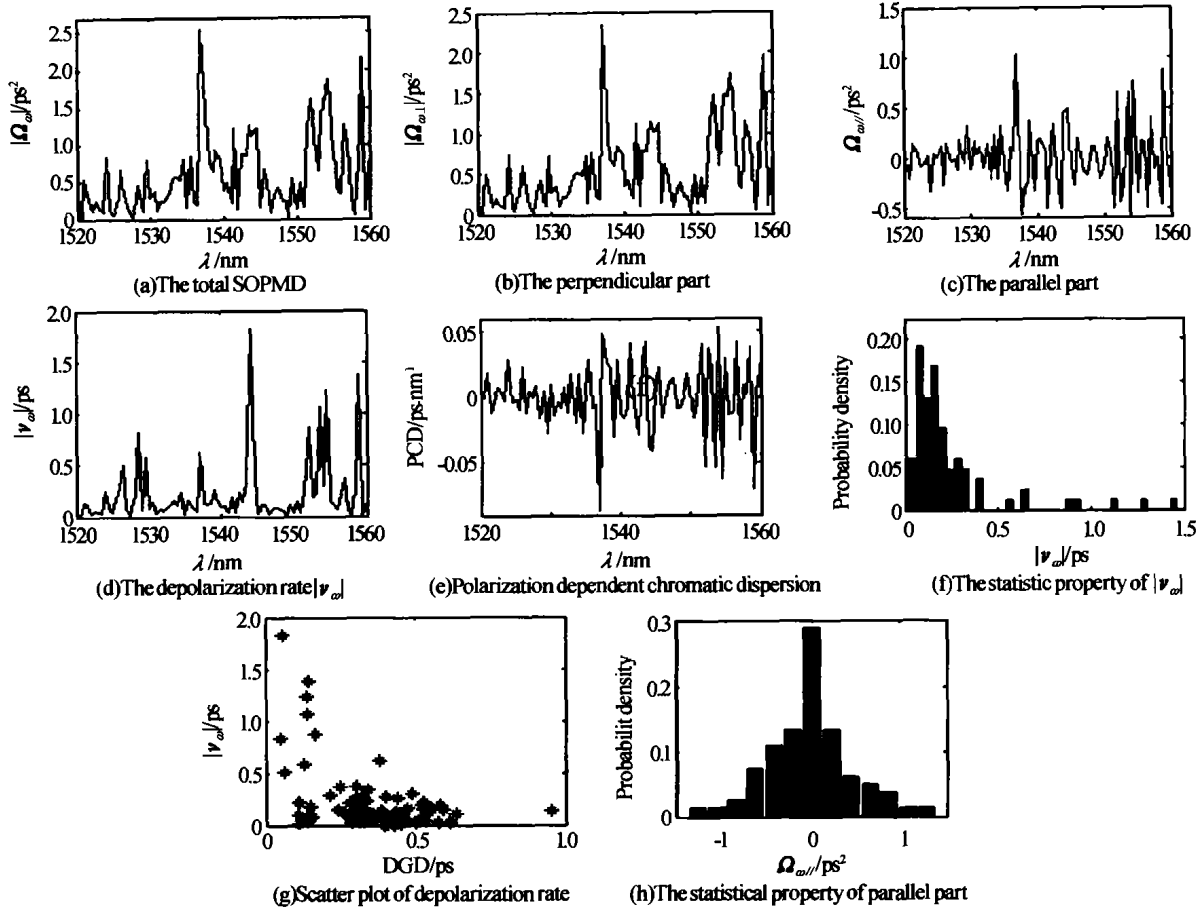


图 4 用邦加球法对 75 km 单模光线的测量结果
Fig. 4 SOPMD measurement result of 75 km SMF

图 4 中的各个分图依次分别表示:(a)为总的 SOPMD 随波长变化的关系曲线、(b)为 SOPMD 的垂直分量的大小 $\Omega_{\omega\perp}$ 随波长的分布情况、SOPMD 的平行分量 $\Omega_{\omega\parallel}$ 随波长的变化情况如图(c)所示、(d)给出了退极化率的大小 $|\nu_{\omega}|$ 随波长随机变化的关系曲线、(e)为 SOPMD 的平行分量所导致的与偏振有关的色散 PCD、 $|\nu_{\omega}|$ 的统计图形为(f)、(g)为 $|\nu_{\omega}|$ 对 DGD 的统计特性、(h)给出了平行分量 $\Omega_{\omega\parallel}$ 的概率分布密度。

通过比较图 4 和图 3 可以看出,两图中对应的各物理量在数值上是有明显差别的,这是由于被测光纤长度不同导致的,但是分别比较图 3 和图 4 中的(f)、(g)和(h),可以看出对应各量有相同的统计特性,即 $|\nu_{\omega}|$ 取较小值的几率较大,随着 $|\nu_{\omega}|$ 取值的增大而迅速减小;大部分的 $|\nu_{\omega}|$ 分布在 DGD 平均值附近,较大的 $|\nu_{\omega}|$ 主要集中在较小的 DGD 附近; $\Omega_{\omega\parallel}$ 和 PCD 的值基本上是以过零点的竖直轴对称分布的。

4 结论

本文用两种方法,琼斯矩阵本征分析法和邦加

球法分别对 22 km 和 75 km 的 G. 652 普通单模光纤进行了测量,并对总的 SOPMD、平行分量、垂直分量、消偏振项和 PCD 进行了分析,得到了它们的统计特性;总 SOPMD 的分布是随波长变化的,SOPMD 的平行分量 $\Omega_{\omega\parallel}$ 也是随波长变化的,该分量有正有负,它对色散的影响用 PCD 表示;垂直分量从量值上几乎接近总的 SOPMD,从统计的角度看,垂直项在 SOPMD 中起主要作用;从 $|\nu_{\omega}|$ 随波长变化的关系可以看出,SOPMD 矢量 Ω_{ω} 具有偏离一阶偏振模色散矢量 Ω 的趋势,并且 $|\nu_{\omega}|$ 的取值较小而且比较集中。总之,对不同长度光纤的测量结果虽然在数值上有所区别,却有着相同的统计规律,通过前面的分析与讨论,对 SOPMD 有了一个较为全面的了解,对 SOPMD 补偿研究有一定的指导意义。

参考文献

- 1 Poole C D, Wagner R E. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibres. *Electron Lett*, 1986,22(19): 1029 ~ 1030
- 2 Heffner B L. Automated measurement of polarization mode dispersion using jones matrix eigenanalysis. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992,4(9): 1066 ~ 1069

- 3 刘秀敏, 张晓光, 林宁, 等. 用同步调制方法降低偏振模色散影响的理论研究. 光子学报, 2000, **29**(8): 722 ~ 725
Liu X M, Zhang X G, Lin N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(8): 722 ~ 725
- 4 王剑, 于晋龙, 刘剑飞, 等. 偏振模色散补偿中的偏振主态与分束器主轴的对准. 光子学报, 2003, **32**(9): 1098 ~ 1101
Wang J, Yu J L, Liu J F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1098 ~ 1101
- 5 陈伟成, 徐文成, 张书敏, 等. 双折射光纤中偏振模色散的抑制. 光子学报, 2001, **30**(7): 822 ~ 826
Cheng W C, Xu W C, Zhang S M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7): 822 ~ 826
- 6 Francica C, Bruyère F. PMD second-order effects on pulse propagation in single-mode optical fibers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, **10**(12): 1739 ~ 1741
- 7 Vassallo C. PMD pulse deformation. *Electron Lett*, 1995, **31**(18): 1597 ~ 1598
- 8 Foschini G J, Jopson R M, Nelson L E, et al. The statistics of PMD-induced chromatic fiber dispersion. *IEEE J Lightwave Technol*, 1999, **17**(9): 1560 ~ 1565
- 9 Poole C D, Bergano N S, Wagner R E, et al. Polarization dispersion and principal state in a 147 km undersea lightwave cable. *IEEE J Lightwave Technol*, 1988, **6**(7): 1185 ~ 1190
- 10 陈烈辉, 高锦岳. 用于高阶偏振模色散补偿的高效动态补偿器. 光子学报, 2003, **32**(6): 702 ~ 705
Cheng L H, Gao J Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 702 ~ 705
- 11 Heffner B L. Accurate, Automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones matrix eigenanalysis. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1993, **5**(7): 814 ~ 817
- 12 Jones R C. A new calculus for the treatment of optical systems. VI. Experimental determination of the matrix. *J Optical Soc Amer*, 1947, **37**: 110 ~ 112
- 13 夏月辉, 张霞, 刘开贤, 等. 利用线性啁啾光纤光栅补偿偏振模色散方案的研究. 电子学报, 2003, **31**(5): 759 ~ 761
Xia Y H, Zhang X, Liu K X, et al. *Acta Electronic Sinica*, 2003, **31**(5): 759 ~ 761
- 14 Jopson R M, Nelson L E, Kogelnik H. Measurement of second-order polarization-mode dispersion vectors in optical fibers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, **11**(9): 1153 ~ 1155

Second-order Polarization Mode Dispersion and Its Statistical Characteristics in Single Mode Fiber

Liu Kaixian^{1,2}, Huang Yongqing¹, Ren Xiaomin¹

¹ Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

² School of Sciences, Communication University of China, Beijing 100024

Received date: 2003-11-20

Abstract The second-order Polarization Mode Dispersion of 22 km and 75 km single mode fiber were measured with Jones matrix eigenanalysis method and Poincare Sphere Method. The parallel component, perpendicular component, depolarization effect, PCD, the statistical characteristics and effects of these components were analyzed thoroughly. The result is that the perpendicular component had a greater impact on pulse than that of the parallel component in mean. This will be a very helpful researching work for second-order PMD compensation.

Keywords Polarization mode dispersion (PMD); SOPMD (second-order PMD); Principle state of polarization; Statistical characteristics; Depolarization term; PCD



Liu Kaixian was born in 1969 in Hebei Province, China. He received M. S. degree of physics in Beijing Normal University in 1997. Now he is studying for Ph. D. in Beijing University of Post and Telecommunication. His current interests are on PMD measurement and compensation, routing and wavelength assignment of WDM system, automatic switched optical network.