

文章编号: 0258-7025(2004)10-1231-04

光纤传输系统偏振模色散对输出信号偏振度的影响

周赢武^{1,2}, 郭凌伟¹, 黄 锐¹, 瞿荣辉¹, 方祖捷¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 福州大学电子系, 福建 福州 350002)

摘要 光纤通信系统的偏振模色散(PMD)是限制系统传输容量和距离的关键因素。系统输出信号的偏振度(DOP)反映了系统的偏振模色散。利用光纤通信系统的 Jones 矩阵模型,在理论上得到了系统的输出光脉冲 Stokes 矢量的表达式。在此基础上分析和计算了系统的输出脉冲的偏振度特性。结果表明,系统的输出信号的偏振度随入射脉冲偏振态的变化而变化,当入射脉冲偏振态与系统的主偏振态一致时,系统的输出信号的偏振度达到极大;同时,随着系统的偏振模色散幅度的增大而变小。系统的输出信号的偏振度还随着信号原始啁啾系数绝对值的增大而减小,但与啁啾系数的符号无关。

关键词 光通信;偏振模色散;偏振度;Jones 矩阵

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Effects of Degree of Polarization of the Output Pulse on Polarization Mode Dispersion in Optical Fiber Transmission Systems

ZHOU Ying-wu^{1,2}, GUO Ling-wei¹, HUANG Rui¹, QU Rong-hui¹, FANG Zu-jie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² Electronics Department of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract The polarization mode dispersion (PMD) of the optical fiber transmission system has been the main factor to limit the transmission capacity and distance of the system. The degree of polarization (DOP) of optical signals is related to the PMD of the system. The expression of the output pulse Stokes vector is derived based on Jones matrix model proposed by A. Orlandini. The basic properties of degree of polarization of optical pulse have been investigated. It is shown that the degree of polarization of optical signals changes with polarization state of the input, and reaches its maximum at the position of the principal state of polarization; it decreases with the increase of the PMD magnitude; And it decreases also with the increase of absolute value of the initial pulse chirp coefficient, but has no relation with the sign of chirping coefficient.

Key words optical communication; polarization mode dispersion; degree of polarization; Jones matrix

1 引 言

在高速光纤通信系统中,偏振模色散(PMD)是限制系统传输容量和距离的关键因素。近年来,如何测量和补偿系统的偏振模色散已成为研究的热点^[1~4]。由于偏振模色散是个统计随机量^[5,6],因此,对偏振模色散进行补偿需要有个自适应反馈控

制系统^[7,8]。文献[8]提出了一个通过监控系统的输出光脉冲的偏振度(DOP)的反馈控制方法。其实验结果表明通过反馈控制使输出光脉冲的偏振度最大,系统的误码率既可达到最小。该方法所需要反馈的量少,相对容易实现,因此,引起了研究者的广泛重视^[9]。

Jones 矩阵方法是研究光脉冲在系统中传输特

收稿日期:2003-07-07;收到修改稿日期:2003-11-05

作者简介:周赢武(1968—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,福州大学电子系讲师,主要从事光通信系统的偏振效应及光纤光栅的应用研究。E-mail: ywzhou1073@sina.com

性的常用理论方法。近年来,研究者相继提出了光纤传输系统的几种 Jones 矩阵模型^[10~12]。其中 A. Orlandini 等^[12]提出的模型简单明了,并且数值模拟的结果表明它能更准确地反映高速光通信系统的传输特性与偏振模色散的关系。本文借助这一模型,分析研究了高速光通信系统输出信号的偏振度与偏振模色散、入射脉冲的偏振态及脉冲的原始啁啾的关系。

2 输出光脉冲的 Stokes 矢量的表达式

在不考虑系统的偏振相关损耗时,它的传输矩阵可表示为

$$T(\omega) = \exp[-i\beta(\omega)L - \alpha(\omega)L]U(\omega) \quad (1)$$

式中, $\beta(\omega)$ 为平均传输常数, L 为光纤的长度, $\alpha(\omega)$ 为系统的损耗,在通常的传输带宽范围内,可以认为损耗与光频无关。 $U(\omega)$ 为光纤的 Jones 矩阵

$$U(\omega) = \begin{pmatrix} u_1(\omega) & u_2(\omega) \\ -u_2^*(\omega) & u_1^*(\omega) \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 $u_1(\omega), u_2(\omega)$ 为与频率 ω 有关的矩阵元。在 A. Orlandini 等^[12]提出的模型中,假设系统的偏振模色散矢量的幅度不随光频变化,只有矢量方向随光频的变化而变化。在这一假设下,考虑线偏振的入射光信号,偏振模色散矢量表示为

$$\vec{\Omega}(\omega) = [-\Delta\tau_0 \cos(p\omega), -\Delta\tau_0 \sin(p\omega), 0]^T \quad (3)$$

其中, $\Delta\tau_0$ 为系统的偏振模色散幅度, p 为系统偏振模色散矢量的方向对频率 ω 的变化率。将这一偏振模色散矢量对光频展开可得

$$\vec{\Omega}(\omega) = -\Delta\tau_0 [\cos(p\omega_0), \sin(p\omega_0), 0]^T + p\Delta\tau_0(\omega - \omega_0) [\sin(p\omega_0), -\cos(p\omega_0), 0]^T + \dots \quad (4)$$

上式第一项为一阶偏振模色散矢量。第二项与第一项垂直,就是二阶偏振模色散的消偏项,其幅值等于 p 与 $\Delta\tau_0$ 的积, p 越大二阶偏振模色散的消偏项就越大。由此,可解出 Jones 矩阵元为^[12]

$$u_1 = \frac{1}{a} \left[p \sin\left(\frac{p}{2}\omega\right) \sin\left(\frac{a}{2}\omega\right) + a \cos\left(\frac{p}{2}\omega\right) \cos\left(\frac{a}{2}\omega\right) + i\Delta\tau_0 \cos\left(\frac{p}{2}\omega\right) \cos\left(\frac{a}{2}\omega\right) \right] \quad (5a)$$

$$u_2 = \frac{1}{a} \left[p \cos\left(\frac{p}{2}\omega\right) \sin\left(\frac{a}{2}\omega\right) - a \sin\left(\frac{p}{2}\omega\right) \cos\left(\frac{a}{2}\omega\right) + i\Delta\tau_0 \sin\left(\frac{p}{2}\omega\right) \sin\left(\frac{a}{2}\omega\right) \right] \quad (5b)$$

式中 $a = \sqrt{\Delta\tau_0^2 + p^2}$ 。

根据这一模型可以研究输出光信号的偏振度特性。为此假设入射信号的 Jones 矢量为 $\vec{V}_{in} = [V_1, V_2 e^{i\phi}]^T$, 其中 V_1, V_2 为实数,且满足 $V_1^2 + V_2^2 = 1$ 。对应的输出脉冲的 Jones 矢量为 $\vec{V}_{out} = T(\omega) \vec{V}_{in}$ 。由于系统存在偏振模色散,使输入的偏振光脉冲变成部分偏振光输出,因此,要在 Stokes 空间描述输出光脉冲。考虑到输入信号有一定的光谱分布,因此要用信号的光谱强度函数 $f(\omega)$ 作为权重对 ω 积分,得到输出光信号平均 Stokes 矢量^[9]。设光谱强度函数 $f(\omega)$ 是 ω 的对称函数,并记 $R(\tau) = \int f(\omega) \exp(-i\omega\tau) d\omega$, 可导出输出信号平均 Stokes 矢量 $\langle S \rangle$ 的三个分量分别为

$$\bar{s}_1 = \{(V_1^2 - V_2^2) [\Delta\tau_0^2 R(p) + p^2 R_1 + apR_2] + 2V_1 V_2 \Delta\tau_0 [pR(p) - pR_1 - aR_2] \sin\phi\} \times a^{-2} \exp(-2aL) \quad (6a)$$

$$\bar{s}_2 = 2V_1 V_2 [R_1 + (p/a)R_2] \cos\phi \exp(-2aL) \quad (6b)$$

$$\bar{s}_3 = \{p\Delta\tau_0 (V_1^2 - V_2^2) [1 - R(a)] + 2V_1 V_2 [p^2 + \Delta\tau_0^2 R(a)] \sin\phi\} a^{-2} \exp(-2aL) \quad (6c)$$

$$\text{式中 } R_1 = \frac{1}{2} [R(a+p) + R(a-p)]$$

$$R_2 = \frac{1}{2} [-R(a+p) + R(a-p)]$$

由此可以计算输出光信号的偏振度

$$\text{DOP} = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} / s_0 \quad (7)$$

式中 $s_0 = (V_1^2 + V_2^2) \exp(-2aL) = \exp(-2aL)$ 为输出光脉冲的强度。

根据式(6)和(7)可以计算分析输出光脉冲偏振度与偏振模色散、入射脉冲的偏振态及脉冲的原始啁啾的关系。在计算中设入射脉冲为高斯脉冲,脉冲线宽取为 10 GHz。

3 计算结果与分析

3.1 偏振度与输入光信号偏振态的关系

由式(6)和(7)可知,输出脉冲的偏振度是输入脉冲的偏振态 \vec{V}_{in} 的函数。考虑输入光信号为线偏振光,即取 $\phi = 0$, 并设输入信号的 Jones 矢量为: $V_1 = \cos\theta, V_2 = \sin\theta$ 。由上述公式,可以得到输出脉冲的偏振度与输入信号偏振方向 θ 的关系,如图 1 所示。随着 θ 从 0 到 π 之间变化,输出脉冲的偏振度周期性变化。这表明对于任一系统,总可以找到一个

入射偏振态,使输出脉冲的偏振度达到最大。利用式(2)~(4)可以证明,它就是 C. D. Poole 等提出的主偏振态^[13]。因此通过监测系统输出脉冲的偏振度,就可以找到系统的主偏振态。由此可见,在利用主偏振态补偿法补偿偏振模色散时,可以先监测输出脉冲的偏振度,确定系统的主偏振态,然后使入射脉冲以这一偏振态输入系统,从而达到偏振模色散的补偿。

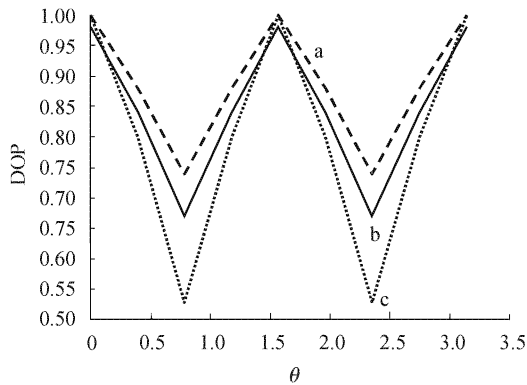


图 1 输出偏振度随输入光信号偏振方向 (θ) 的变化

Fig. 1 Relation between DOP and input polarization state

curve a: $\Delta\tau_0 = 11$ ps, $p = 0$ ps; curve b: $\Delta\tau_0 = 11$ ps, $p = 5.6$ ps; curve c: $\Delta\tau_0 = 16$ ps, $p = 0$ ps

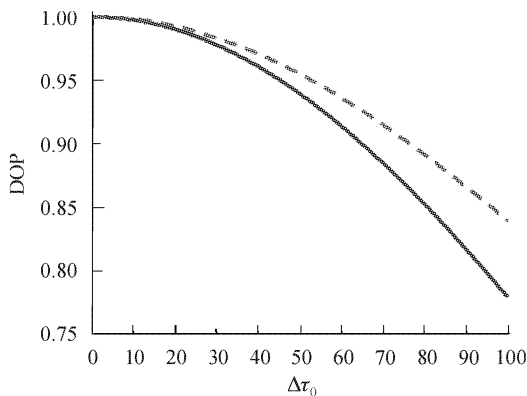


图 2 偏振度与偏振模色散幅度的关系曲线

Fig. 2 Relation between DOP and the magnitude of the PMD

3.2 偏振度与偏振模色散幅度的关系

由式(6)和(7)可知,输出光脉冲偏振度与 $\Delta\tau_0$ 有关。利用(6)和(7)式可以得到输出光脉冲偏振度与 $\Delta\tau_0$ 的关系曲线,如图 2 所示。图中虚线对应的入射偏振态为 $\vec{V}_{in} = [\sqrt{3}/2, 1/2]^T$, 即 $\theta = 30^\circ$ 。实线对应的入射偏振态为 $\vec{V}_{in} = [\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2]^T$, 即 $\theta = 45^\circ$ 。由图 2 可知系统输出光脉冲的偏振度随着偏振

模色散的幅度增大而显著减小。这表明当入射光脉冲的偏振态不变时,输出光脉冲的偏振度反映了系统偏振模色散的大小。

3.3 输入光信号光谱特性对输出光脉冲偏振度的影响

实际的光通信系统中输入光信号通常都是啁啾脉冲^[14],因此有必要研究脉冲的原始啁啾与输出光脉冲偏振度的关系。由式(6)和(7)可知当入射光脉冲具有原始啁啾时,其对应的输出光脉冲的偏振度将是不一样的。假设入射光脉冲为具有原始啁啾的高斯脉冲,其光谱强度函数为

$$f(\omega) = \frac{e^{-\omega^2/[1+c^2]\sigma^2}}{\sqrt{\pi(1+c^2)\sigma}} \quad (8)$$

式中, c 为啁啾系数,而 σ 为光信号的线宽。利用与上述类似的方法就可以计算输出光脉冲的偏振度与啁啾系数的变化曲线,如图 3 所示。由图可见,随着啁啾系数绝对值的增加,输出光脉冲的偏振度将减小。因此,在高速光通信系统中,应尽量减小入射光脉冲的原始啁啾。另一方面,光信号脉冲啁啾系数的符号不改变输出光脉冲的偏振度。

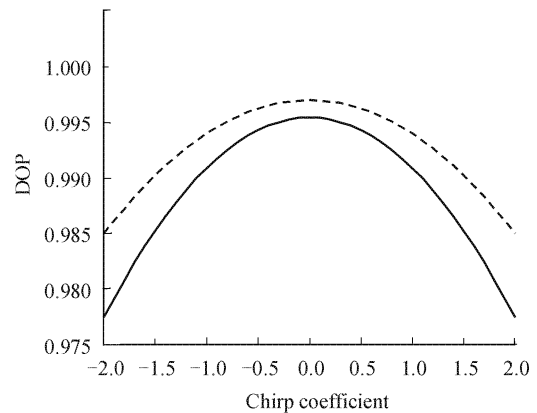


图 3 偏振度与入射脉冲原始啁啾系数的关系曲线

Fig. 3 Relation between DOP and incidence pulse initial chirp coefficient

dash line: $\Delta\tau_0 = 11$ ps, $p = 0$ ps;
solid line: $\Delta\tau_0 = 11$ ps, $p = 5.6$ ps

4 结 论

根据 A. Orlandini 等提出的模型,推出了光纤传输系统的输出光脉冲 Stokes 矢量的表达式。研究分析了偏振度随输入光信号偏振态的变化、随系统的偏振模色散的变化以及随信号脉冲的原始啁啾系数变化的关系。分析表明,输出光脉冲的偏振度随着入射偏振态的变化而变化,并存在一个对应于

主偏振态的偏振度极大;偏振度随系统偏振模色散幅度增大而减小;当脉冲原始啁啾系数的绝对值增大时,输出光脉冲的偏振度将减小,因此应尽可能入射光脉冲的原始啁啾,但是光信号脉冲啁啾系数的符号不改变输出光脉冲的偏振度。计算和分析的结果证明输出脉冲的偏振度可以用作为偏振模色散的监控信号,并可以用来确定系统的主偏振态。

参 考 文 献

- Xia Yuehui, Zhang Xia, Huang Yongqing *et al.*. Study of the arithmetic of Poincare sphere method to measure polarization mode dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):49~52
夏月辉,张霞,黄永清等. 对邦加球测量偏振模色散算法的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):49~52
- Ji Hangfeng, Huang Dexiu, Zhang Sheng *et al.*. PMD measurement of passive optical components [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12):1080~1084
季杭峰,黄德修,张晟等. 光无源器件的偏振模色散测量[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12):1080~1084
- Liu Xiumin, Li Chaoyang, Li Ronghua *et al.*. Polarization mode dispersion measurement using Sagnac interferometer and fixed analyzer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):455~458
刘秀敏,李朝阳,李荣华等. 用 Sagnac 干涉法和固定分析法测量光纤偏振模的色散[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):455~458
- 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]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):349~352
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
- Zheng Yuan, Li Chaoyang, Liu Xiumin *et al.*. Investigation on the statistical characteristics of polarization mode dispersion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):687~690
郑远,李朝阳,刘秀敏等. 偏振模色散统计特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):687~690
- 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*, 2003, **30**(1):45~48
郑远,刘玉敏,杨伯君等. 用琼斯传输矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):45~48
- T. Takahashi, T. Imai, M. Aiki. Automatic compensation technique for timewise fluctuating polarization mode dispersion in in-line amplifier systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(4):348~349
- Fabien Roy, Cristian Francia, Franck Bruyère *et al.*. A simple dynamic polarization mode dispersion compensator [C]. OFC, 1999, TuS4-1:275~278
- 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
- D. Penninckx, V. Morénas. Jones matrix of polarization mode dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(13):875~877
- H. Kogelnik, L. E. Nelson, J. P. Gordon *et al.*. Jones matrix for second-order polarization mode dispersion [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):19~21
- A. Orlandini, L. Vincetti. A simple and usefull model for Jones matrix to evaluate higher order polarization-mode dispersion effects [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(11):1176~1178
- C. D. Poole, R. E. Wagner. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- Zheng Yuan, Li Chaoyang, Liu Xiumin *et al.*. Impacts of polarization mode dispersion on the pulse width in linear systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):900~904
郑远,李朝阳,刘秀敏等. 偏振模色散对线性系统脉宽的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):900~904