

文章编号: 0253-2239(2004)11-1533-5

偏振模色散补偿中偏振度与差分群延时关系的 理论分析和实验*

王宏丽 于晋龙 王 剑 杨恩泽

(天津大学电子信息学院光纤通信实验室光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 偏振模色散是高速光纤通信系统的主要问题之一。在用偏振度作为反馈信号的动态偏振模色散补偿系统中, 偏振度与差分群延时的关系对于准确快速的动态偏振模色散补偿很重要。推导出了准单色光波情况下任意波形和高斯脉冲的偏振度的数学表达式, 理论分析了高斯脉冲情况下分光比、脉冲宽度和连续脉冲个数分别对偏振度与差分群延时关系的影响, 并用 10 Gbit/s 归零/不归零伪随机码序列进行了实验, 实验证明了理论推导和理论分析的正确性。实验还表明偏振度的大小与脉冲啁啾和光纤色散无关, 从而肯定了将实际光脉冲化简为准单色光波分析的可行性。

关键词: 光纤通信技术; 偏振模色散补偿; 偏振度; 差分群延时

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Theoretical Analysis and Experiment of Degree of Polarization-Differential Group Delay for Polarization Mode Dispersion Compensation

Wang Hongli Yu Jinlong Wang Jian Yang Enze

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science Ministry of Education, School of Electronic Information, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 26 September 2003; revised 6 January 2004)

Abstract: Polarization mode dispersion (PMD) causes severe signal impairments in high bit-rate optical transmission systems. It is important to know how does the degree of polarization (DOP) change with differential group delay (DGD) when DOP is feedback information for adaptive PMD compensation. The mathematical expression between DOP and DGD is derived for arbitrary waveshape and Gaussian pulse. Then the relationship of DOP-DGD with different power splitting ratio, width of pulse, and amount of pluses is theoretically analyzed. Experiments with 10 Gbit/s return-to-zero/non-return-to-zero (RZ/NRZ) pseudo random sequence are conducted and comparison between theoretical calculation and experimental results is made. The comparison showed that they matched closely. It is also verified that DOP was independent of chirp and fiber dispersion in experiment, which made the theoretical analysis of DOP-DGD easy.

Key words: optical fiber communication technology; polarization mode dispersion compensation; degree of polarization; differential group delay

1 引 言

偏振模色散(PMD)是高速光纤通信系统的主

要问题之一^[1~4]。目前已经提出了几种动态偏振模色散补偿的反馈信号的提取方案^[5], 其中应用最广泛的两种反馈信号是电功率和偏振度(DOP)。电功率方案需要高速电器件和光电二极管(PIN), 并且与线路码率有关。当比特率达到 40 Gbit/s 以上时, 系统对器件的速度和性能要求非常高, 不易实现。而偏振度方案没有这方面的限制, 因为用偏振

* 国家 973 计划“新一代通信光电子集成器件及光纤的重要结构工艺创新与基础研究”资助课题。

E-mail: w_xinbing@hotmail.com

收稿日期: 2003-09-26; 收到修改稿日期: 2004-01-06

度作为反馈控制信息的偏振模色散补偿系统的突出特点是偏振度与线路中光信号的码率无关,即码率透明。与电反馈信号相比,偏振度还与光信号啁啾的符号以及光纤色散无关,且偏振度的测量对光电检测器件的速度要求不高,可以采用低速光电探测器件实现。实验已经证明了偏振度随着差分群延时(DGD)和其它因素变化^[6~8],但是这方面一直缺少理论研究,而它们的关系对于准确快速的偏振模色散补偿很重要,因为通过明确的偏振度-差分群延时关系曲线可以准确计算出系统需要补偿量,就可以快速准确地调整相关器件。本文分析了偏振度-差分群延时关系,并且用 10 Gbit/s 归零/不归零(RZ/NRZ)伪随机码序列进行了实验,证明了实验与理论计算有良好的一致性。

2 理论分析

实际的光信号有一定的线宽,存在啁啾和色散等问题。但偏振度与光信号啁啾和色散无关,这点可在实验中得到证明(见图 7 与图 9 及相关的说明)。所以为便于理论分析,将实际光信号化简为准单色光波分析仍不失准确性。对于横电场来说,准单色光波偏振态可以用与时间相关的 2×2 阶相干矩阵 J 表示^[9],

$$J = \langle \bar{E}_{x,y}(t) \times \bar{E}_{x,y}^+(t) \rangle = \begin{bmatrix} \langle \bar{E}_x \bar{E}_x^* \rangle & \langle \bar{E}_x \bar{E}_y^* \rangle \\ \langle \bar{E}_y \bar{E}_x^* \rangle & \langle \bar{E}_y \bar{E}_y^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix},$$

光的偏振度可以用斯托克斯参量(S_0, S_1, S_2, S_3)表示,四个斯托克斯参量又可以用相干矩阵中的元素表示,所以偏振度

$$n_{DOP} = \sqrt{1 - \frac{4I_x I_y}{(I_x + I_y)^2} (1 - |\mu_{xy}|^2)}, \quad (1)$$

其中 $\mu_{xy} = J_{xy} / \sqrt{J_{xx} J_{yy}}$ 。

先研究任意波形的偏振度-差分群延时关系。偏振模色散效应的影响因素有很多,例如温度、压力、扰动等。差分群延时是表征偏振模色散效应大小的重要参量,一般将差分群延时对波长或对时间的平均值称为偏振模色散^[10]。由于光纤偏振模色散的影响,在经过一定距离的传输之后,光在 x 和 y 方向上有一定的时间延迟 $\Delta\tau$ 就是差分群延时,二者意义相同,这样表示是为了数学表达的方便。假设光脉冲的波形函数为 $f(t)$,光在两个垂直方向上的强度分配比例为 γ 。传输过程中,光在 x 和 y 方向上的偏振分量可以表示为如图 1 所示。这里假设 $\gamma, \Delta\tau, \delta_x, \delta_y$ 均

与 t 无关,分析时忽略衰减的影响。

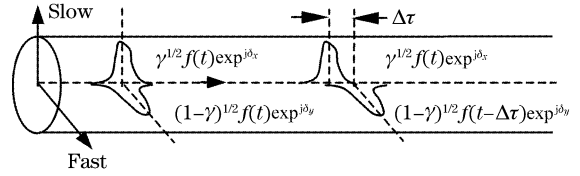


Fig. 1 Concept of PMD effect

光传输一段距离后,设

$$\tilde{E}_x = \sqrt{\gamma} f(t) \exp(j\delta_x),$$

$$\tilde{E}_y = \sqrt{1-\gamma} f(t-\Delta\tau) \exp(j\delta_y),$$

函数 $f(t-\Delta\tau)$ 与 $f(t)$ 的波形是相同的,因此它们的时间平均值相等,

$$I_x = J_{xx} = \langle \tilde{E}_x \tilde{E}_x^* \rangle = \langle |E_x|^2 \rangle = \gamma \langle [f(t)]^2 \rangle,$$

$$I_y = J_{yy} = \langle \tilde{E}_y \tilde{E}_y^* \rangle = \langle |E_y|^2 \rangle = (1-\gamma) \langle [f(t-\Delta\tau)]^2 \rangle = (1-\gamma) \langle [f(t)]^2 \rangle,$$

(1)式变为

$$n_{DOP} = \sqrt{1 - 4\gamma(1-\gamma)(1 - |\mu_{xy}|^2)},$$

$$|J_{xy}| = |\langle \tilde{E}_x \tilde{E}_y^* \rangle| = \langle \tilde{E}_x \tilde{E}_y^* \rangle = \sqrt{\gamma(1-\gamma)} \langle f(t) f(t-\Delta\tau) \rangle,$$

则

$$|\mu_{xy}| = \frac{|J_{xy}|}{\sqrt{I_x I_y}} = \frac{\langle f(t) f(t-\Delta\tau) \rangle}{\langle [f(t)]^2 \rangle}, \quad (2)$$

由此可见,任意波形的偏振度-差分群延时关系曲线与 γ 和 $f(t)$ 有关。

对高斯脉冲的研究具有实际意义,先设光脉冲波形函数 $f(t)$ 为单个高斯脉冲, T_0 为脉冲半峰半宽(在光强度峰值的 $1/e$ 处), T_{FWHM} 为脉冲半峰全宽(在光强度峰值的 $1/2$ 处),

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right), \quad T_0 = \frac{T_{FWHM}}{1.665},$$

为了波形的对称性,移动坐标系,使 $t' = t - \Delta\tau/2$, 则有

$$\langle f(t) f(t-\Delta\tau) \rangle = \langle f(t' + \Delta\tau/2) f(t' - \Delta\tau/2) \rangle = \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{4T_0^2}\right) \langle [f(t)]^2 \rangle,$$

则

$$|\mu_{xy}| = \exp\left[-\Delta\tau^2 / (4T_0^2)\right].$$

由此可见,单个高斯脉冲的偏振度-差分群延时关系曲线与 γ 和 T_0 有关。下面对其逐一分析。使用 10 GHz 光源,因此理论分析也针对 10 GHz 光信号,此时信号的一个周期 $t_0 = 100$ ps。

1) T_0 一定($T_0 = 30$ ps)时,分光比 γ 对偏振度-差分群延时曲线的影响

当 $\gamma = 0.5$ 时, $4\gamma(1-\gamma) = 1$, $n_{\text{DOP}} = |\mu_{xy}|$, 曲线最陡。当 $\gamma \neq 0.5$ 时, $4\gamma(1-\gamma) < 1$, γ 值越趋向两端(0 或 1), 偏振度曲线的变化越平缓。如图 2 所示, $\gamma = 0.5$ 的曲线最陡, $\gamma = 0.3$ 和 $\gamma = 0.7$ 的曲线相同, 同理 $\gamma = 0.1$ 和 $\gamma = 0.9$ 的曲线相同, 且后者比前者平缓, $\gamma = 0$ 或 $\gamma = 1$ 的曲线最平缓。

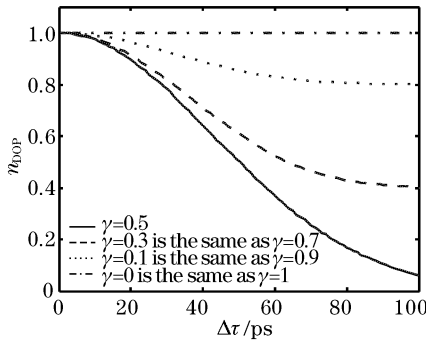


Fig. 2 Theoretical relationship of DOP-DGD with different γ

2) γ 一定($\gamma = 0.5$)时, 脉冲半峰半宽 T_0 对偏振度-差分群延时曲线的影响

T_0 越宽, 偏振度曲线的变化越平缓。如图 3 所示, $T_0 = 40$ ps 的曲线比 $T_0 = 30$ ps 的曲线平缓。

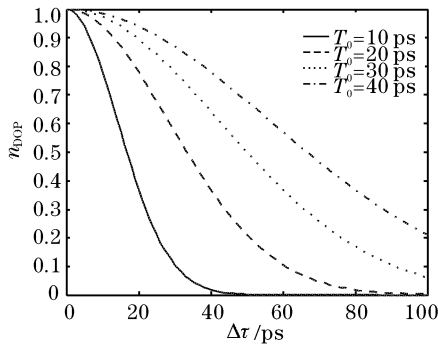


Fig. 3 Theoretical relationship of DOP-DGD with different T_0

信号是一系列脉冲的有无组合, 因此有必要研究多个脉冲(连“1”)的情况。 n 个连续脉冲可以表示为

$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right) + \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2T_0^2}\right] + \dots + \exp\left[-\frac{(t-nt_0)^2}{2T_0^2}\right],$$

研究方法与上述单个脉冲相同。通过计算可以得到, 连续脉冲的个数越多, $|\mu_{xy}|$ 的表达式越复杂, 但它们都有一个共同的因子 $\exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{4T_0^2}\right)$, 这个因子决定了

偏振度-差分群延时曲线的总体趋势。但是, 由于脉冲个数增多以及脉冲拖尾的互相交叠等原因, 导致当高斯脉冲的 T_0 、 γ 一定, 连续脉冲个数不同时, 它们的偏振度-差分群延时曲线有所差异。图 4 所示为当 $T_0 = 20$ ps, $\gamma = 0.5$, $t_0 = 100$ ps 时, 单个脉冲、两个、三个和四个连续脉冲的偏振度-差分群延时理论曲线的比较。由图 4 可以看出, 当 $t_0/2 < \Delta\tau < t_0$ 时, 连续脉冲的偏振度变大, 这是因为 x 和 y 方向上的脉冲的互相关程度变大了。如果有一无限长的连续脉冲, 当 $\Delta\tau = t_0/2$ 时, 其偏振度最小, 当 $\Delta\tau = t_0$ 时, 其 $n_{\text{DOP}} = 1$ 。实验中用的是 10 Gbit/s 伪随机码 M 序列。当 $\gamma = 0.5$ 时, 对于 M 序列, 在一个脉冲周期 $[0 \sim t_0]$ 上其偏振度-差分群延时曲线与两个连续脉冲的情况一致。在之后的脉冲周期倍数 (nt_0 , $n > 1$) 点, M 序列的偏振度值与 t_0 点的偏振度值一样, 并且波形呈现周期性变化。

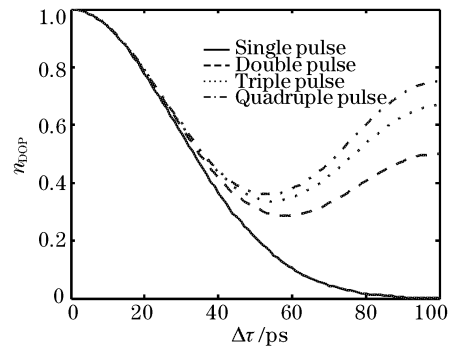


Fig. 4 Theoretical relationship of DOP-DGD with different amount of pulses

3 实 验

测量偏振度的装置由四部分组成, 如图 5 所示。光源提供 10 Gbit/s 归零/不归零伪随机码序列。偏振控制器调整分光比 γ 。差分延迟线改变差分群延时的大小, 差分群延时的变化范围为 $0 \sim 70$ ps, 每变化一次差分群延时测量一次偏振度值。通过高速在线偏振检测器可以计算出偏振度, 偏振检测器实时检测出四个电压, 这四个电压经过变换得到四个斯托克斯参量, 然后计算出偏振度。实验曲线与理论曲线的比较及分析如下。

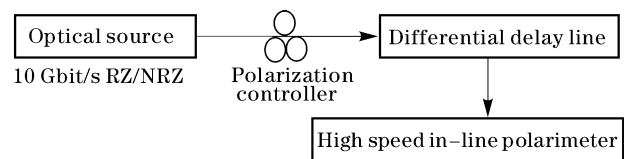


Fig. 5 Setup of measuring DOP

先使用 10 Gbit/s 归零伪随机码序列。首先对

偏振度与色散量之间的关系进行了实验。光源发出的原始脉冲 $T_{FWHM} = 16$ ps, 其波形如图 6 所示, 对于此脉冲改变差分群延时测量偏振度值。然后在图 5 所示的光源与偏振控制器之间加一段光纤, 光纤色散会使光源发出的原始脉冲展宽, 经光纤后脉冲展宽到了 $T_{FWHM} = 54$ ps, 再针对此脉冲改变差分群延时测量偏振度值。图 7 中包含原始脉冲和色散展宽后的脉冲的实验数据, 两条实验曲线很相似, 从而验证了偏振度与色散无关。

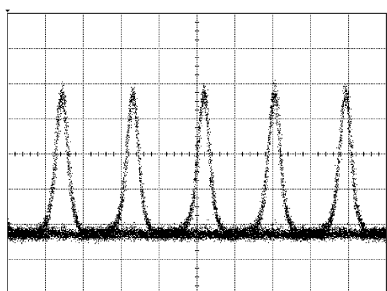


Fig. 6 Waveshape with $T_{FWHM} = 16$ ps

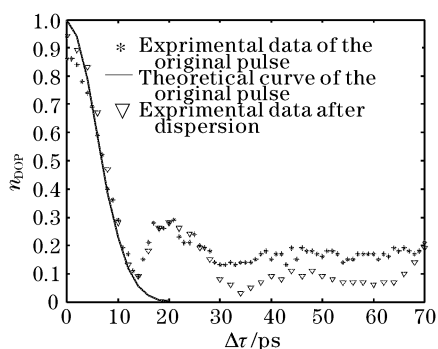


Fig. 7 Experimental data of the original pulse and the pulse after fiber dispersion and theoretical curve of the original pulse

与 $T_{FWHM} = 16$ ps 的脉冲相比较, 增加脉冲的实际宽度使 $T_{FWHM} = 53$ ps, 其眼图和实验结果如图 8、图 9 所示。图 8 的脉冲比图 7 的宽, 图 9 的实验曲线比图 7 的平缓, 验证了理论分析中 T_0 越大偏振度-差分群延时曲线越平缓的关系。

以上的 T_{FWHM} 均为示波器上的读数, 带有啁啾量。而理论分析是针对准单色光波情况的, 准单色光波是没有啁啾的, 所以在进行理论模拟时要利用高斯脉冲的变换极限值来进行分析, 而不是直接用示波器上看到的波形脉冲宽度。高斯脉冲的变换极限值为 $\Delta f T_{FWHM} = 0.441$, 其中, $\Delta f = (c/\lambda^2) \Delta\lambda$, c 为光速, $\lambda = 1553$ nm, $\Delta\lambda$ 为频谱宽度。用光谱仪测量脉冲实际宽度改变前后 ($T_{FWHM} = 16$ ps 和 53 ps) 的谱宽, $\Delta\lambda$ 分别为 0.365 nm 和 0.08 nm, 计算出去啁啾后的 T_0 分别为 5.8 ps 和 26 ps, 用这两个 T_0 值

进行理论模拟。由图 7、图 9 可见, 两条理论模拟曲线均与实验数据吻合较好, 证明了所推导出的高斯脉冲的偏振度数学表达式的正确性, 同时又验证了偏振度确实与啁啾无关。图 7 中实验数据在差分群延时较大的情况下与理论曲线有较大差异, 可能是由于实际脉冲在拖尾处波形不规则等其它因素引起, 此处仍有待研究。

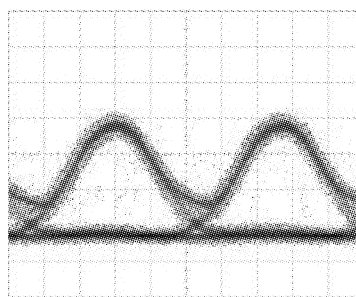


Fig. 8 Eye pattern with $T_{FWHM} = 52$ ps

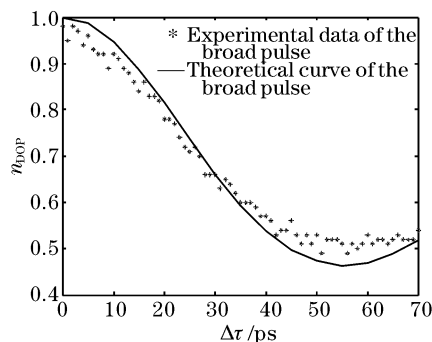


Fig. 9 Experimental data and theoretical curve of the broad pulses

在图 5 所示的实验框图中, 调整偏振控制器, 使分光比 γ 大约分别为 0.5、0.7 和 1。这三次测量改用 10 Gbit/s 不归零伪随机码序列, 差分群延时每改变 10 ps 测量一次偏振度值, 其偏振度-差分群延时实验数据和拟合曲线如图 10 所示。由图可见, γ 越大, 曲线越平缓, 验证了理论分析中 γ 越大偏振度-差分群延时曲线越平缓的关系。同时可以看到

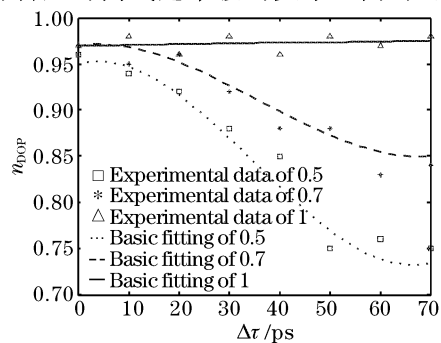


Fig. 10 Experimental data and basic fitting of NRZ with different γ

不归零码的曲线比归零码平缓得多,再次验证了脉宽越宽偏振度-差分群延时曲线越平缓的关系。

结论 推导出了准单色光波情况下任意波形和高斯脉冲的偏振度的数学表达式,理论分析了偏振度与差分群延时的关系。用 10 Gbit/s 归零/不归零伪随机码序列进行了实验。实验中,利用光纤色散改变脉宽,验证了偏振度与色散无关。改变脉冲的实际宽度,验证了理论分析中 T_0 越大偏振度曲线越平缓的结论。用去啾啾后的 T_0 进行理论模拟,两条模拟曲线都与实验数据比较吻合,从而证明了理论推导出的数学表达式的正确性,同时也验证了偏振度与啾啾无关。改变分光比 γ ,验证了理论分析中 γ 越大偏振度曲线越平缓的结论。

参 考 文 献

- 1 Liu Jianfei, Yu Jinlong, Wang Jian *et al.*. Study on effect of PMD-induced pulse broadening on sensitivity and frequency spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11): 188~192 (in Chinese)
- 2 Xia Yuehui, Huang Yongqing, Zhang Xia *et al.*. A new method to measure polarization mode dispersion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(11): 1350~1353 (in Chinese)
- 3 Zheng Yuan, Li Chao Yang, Liu Xiumin *et al.*. Investigation on the statistical characteristics of polarization mode dispersion. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(8): 687~690 (in Chinese)
- 4 Zheng Yuan, Liu Yumin, Yang Bojun *et al.*. Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by Jones transfer matrix method. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(1): 45~48 (in Chinese)
- 5 Penninchx D, Lanne S. Reducing PMD impairments. *OFC* 2001, TuP-1
- 6 Motaghian Nezam S M R, McGeehen J, Willner A. Measuring component DGD by using polarized ASE noise and monitoring the degree of polarization
- 7 Setala T, Shevchenko A, Kaivola M. Degree of polarization for optical near fields. *Phys. Rev.*, 2002, **E66**: 016615-1
- 8 Vannucci A, Bononi A, Orlandini A. A simple formula for the degree of polarization degraded by XPM and its experimental Validation. *OFC*, 2003, 498
- 9 Azzam R M A, Bashara N M. *Ellipsometry and Polarized Light*. Elsevier Science Publishers B. V., 1989. 60
- 10 Cai Ju, Xu Ming, Yang Xianglin. Analysis of statistical characteristics of first and second order polarization mode dispersion. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2): 170~175