

文章编号: 0258-7025(2009)04-0879-05

偏振相关损耗对偏振复用系统信道正交性的影响

王铁城^{1,2} 姚晓天¹ 万木森¹ 刘铁根¹

(¹天津大学精仪学院偏振研究中心,天津 300072; ²中国汽车技术研究中心汽车试验研究所灯光电器室,天津 300162)

摘要 在偏振复用系统中,利用两个正交的偏振光作为不同的信道在同一根光纤传输,从而达到使传输信息量加倍的目的。在信号接收端,需要将这两个信道重新分离,分离时除了偏振模式色散(PMD)之外,还会受到偏振相关损耗(PDL)的影响。根据 PDL 的原理,推导了偏振复用系统中两正交信道夹角与 PDL 的数值关系,计算了 PDL 大小对系统的影响。并依据理论模型构建了实验系统,对光纤一个主轴光强进行衰减,描绘出信道间串扰和 PDL 之间的实验曲线,验证了理论分析的有效性。实验表明,PDL 调至最小的时候,若要求串扰控制在 -10 dB 以内,差分群时延(DGD)应该压制在 10 ps 以内;当 DGD 增大到 140 ps 以后,被标记和没被标记的信道信号强度达到了 $1:1$,系统则完全无法工作,在接收端无法分离信道。本项研究对于保证偏振复用系统的稳定性具有一定的指导意义。

关键词 光纤光学;偏振相关损耗;光强衰减;偏振复用

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0879

Effect of the Polarization Dependent Loss on the Orthogonality of Channels in Polarization Division Multiplexing System

Wang Tiecheng^{1,2} Yao Xiaotian¹ Wan Musen¹ Liu Tiegeng¹

¹ Polarization Research Center, The College of Precision Instrument and Opto-Electric Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Auto Lighting and Electric Division, Automotive Testing and Research Institute, China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300162, China

Abstract In the polarization division multiplexing system, the communication capacity can be doubled, depending on the transmission of two orthogonal polarized beams as different channels in one optical fiber. These channels need to be separated in the receiver end. Besides the polarization mode dispersion (PMD), polarization dependent loss (PDL) also affects the stability of system. On basis of the principles of PDL, the numerical relationship between the included angles of two orthogonal signal channels and PDL is derived for polarization division multiplexing system, and the effects of PDL to the system are also analyzed. According to the theoretical model, the corresponding experimental structure is built to verify the theory through one axis attenuation in the optical fiber and the test curve description. The experiment shows that the crosstalk can be controlled below -10 dB when differential group delay (DGD) is less than 10 ps. Up to 140 ps, system cannot work any more with the same signal power of two channels. The research is useful to the stability of system.

Key words fiber optics; polarization dependent loss; light intensity attenuation; polarization division multiplexing

1 引言

二向色性是一种晶体内部产生的和输入光的偏

振态相关的现象。在光器件中,如波分复用器、环形器等器件,晶体的二向色性造成了两个正交的偏振

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2008-12-16

基金项目: 天津市应用基础研究计划基金(06YFJZJC00400)资助课题。

作者简介: 王铁城(1984—),男,硕士研究生,工程师,主要从事偏振控制和分析等方面的研究。

E-mail: wangtiecheng@tju.edu.cn

导师简介: 姚晓天(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光偏振控制和时间控制等方面的研究。

E-mail: syao@generalphotonics.com

分量会有不同的损耗[偏振相关损耗(PDL)]。对于利用相互正交的两信道是信号传输量加倍的偏振复用系统,这种对正交性的缺失会对系统稳定性造成很大的影响。

所有的无源器件中都会存在一定的偏振敏感性。光纤链路中光学器件越多,它们的偏振敏感性便会累积到必须予以考虑的程度。对于偏振复用系统,由于PDL的存在造成接收终端信道的分离模糊。因此,PDL也成了制约系统发展的至关重要的因素。

2 PDL对偏振复用系统产生的正交性缺失和串扰的理论推导

PDL是对光器件或者系统在所有的偏振状态下的最大传输差值的描述^[1,2],定义为光学设备在所有偏振状态下最大传输和最小传输的比值^[3,4],即为

$$\text{PDL} = 10\lg(P_{\max}/P_{\min}), \quad (1)$$

对于偏振复用系统,最重要的一点就是尽可能保证正交信道的正交性^[5],即在接收端是否依然垂直。以已进行过偏振模色散(PMD)补偿为前提^[6,7],即此时的偏振角(DOP)近似为1。

通过PDL仿真器之后, α 设定为两个偏振主轴之间的相对损耗因子。输出光的表达式为

$$\begin{cases} E'_1 = \begin{bmatrix} \alpha A_1 \cos(\theta + \pi/2) \\ A_1 \sin(\theta + \pi/2) \end{bmatrix} \\ E'_2 = \begin{bmatrix} \alpha A_2 \cos \theta \\ A_2 \sin \theta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

忽略振幅 A_1, A_2 ,则有

$$\varphi = \arccos \frac{E'_1 \cdot E'_2}{|E'_1| |E'_2|} = \arccos \frac{1 - \alpha^2}{\sqrt{\alpha^4 + \alpha^2(\tan^2 \theta + \cot^2 \theta) + 1}}, \quad (3)$$

其中, φ 为两个正交信道之间的夹角。相对影响因子 α 变化,两个原本正交的信道之间的正交性也随之缺失。

如图1所示,在相对损耗因子 α 不断减小的过程,也是正交性不断恶化的过程。显然,当两正交信道与PDL仿真器的两个轴完全吻合时,只存在一个信道的衰减而不会对正交性有影响,此外一般都会经历PDL补偿的过程。

3 PDL引起的正交性缺失的相关实验构想

为验证理论的数值分析,搭建了相应的实验系

统。由PDL的原理和定义可以得知,PDL可以简化为两个正交的主轴,其中一个轴附加损耗,另一轴闲置,如图2所示。

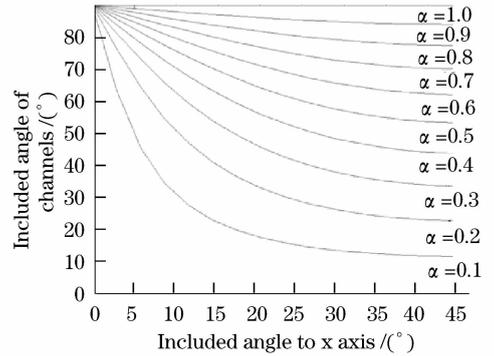


图1 随 α 变化的两通道的正交性

Fig. 1 Orthogonality of two channels with increase of α

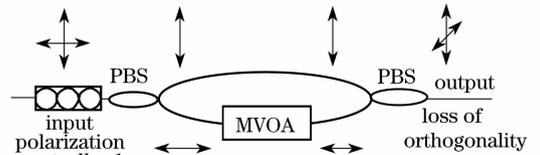


图2 PDL仿真器的实验框图

Fig. 2 PDL emulator experimental scheme

从实验结果可以证明,在成本得到有效控制的情况下,仍然能够进行相关的实验,对因PDL而产生串扰的效应进行研究。手动光衰减器(Manual variable optical attenuator MVOA)选用中国超光通信公司的F09-511-01,适用波长为1510~1590 nm,衰减精度为0.2 dB@10 dB,消光比高于24 dB,回波损耗大于60 dB,采用400 μm 的保偏光纤,可进行50 dB的衰减。

在偏振控制器1(Polarization controller1 PC1)处可以调节信道与偏振合束器(Polarization beam combiner PBC)的透光轴^[8]之一 x 轴所成角度 ϕ 。经过计算,由于PC2的存在,若在输出端同时对PBS两通道的光强进行对比,则无法用极值法求出角度。经计算,可以得知当 x 轴上的光强取最大值时,信道与 x 轴所成角度 ϕ 需满足

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_1 \sin \varphi}{A_1 \cos \varphi + A_2}\right), \quad (4)$$

其中, A_1 和 A_2 分别代表两信道的振幅强度, φ 为两信道之间的夹角。

两个正交的信道作为输入,初始化相对损耗之后,则可以从输出端观测到两信道的情况。通过计算用于标记信道信号的比例,则可以得出两个信道串扰的分贝值,同时也可以得出两个原本正交的信

道的正交性缺失。在处理两个偏振控制器协调工作的问题上,提出了简洁而实用的解决方案,通过直接使用串扰量与信道信号间的比值,得到正交性的角度缺失量。

如图 3 所示,在接收端的输入信号先经过偏振控制器,调整两信道的偏振态为线偏振光或者尽量接近线偏振光,最大程度上减小因信号光是椭圆偏振光而引起的串扰,以寻求单纯因为相对损耗因子之后两信道内的信号所形成的最小串扰。

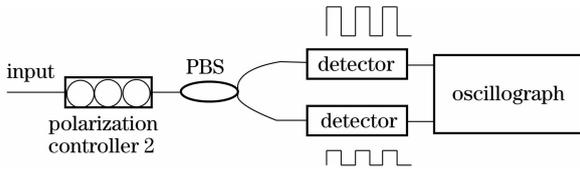


图 3 串扰探测的实验框图

Fig. 3 Crosstalk detection experimental scheme

在理想状态下,PDL 与两正交信道之间串扰的关系如图 4 所示。图 4(a)的纵坐标表示的是非目标信道与目标信道之间的光信号强度的比值,图 4(b)则是为了便于系统计算而转化为分贝值。

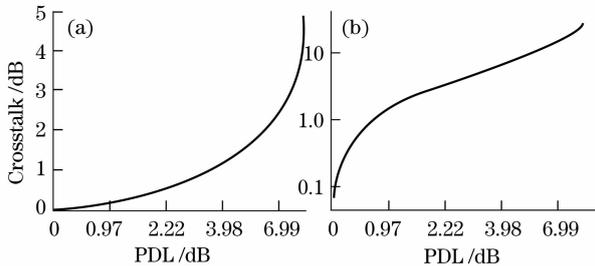


图 4 PDL 与串扰的关系曲线 ($\gamma=0.5$)

Fig. 4 Relationship between PDL and crosstalk ($\gamma=0.5$)

4 PDL 引起的正交性缺失的相关实验系统搭建与实验结果

由于 PBS 将成一定角度入射的线偏振光分成正交的两路通过保偏光纤传输。自行设计的差分群时延(Differential group delay, DGD)仿真器的主要结构则是利用保偏光纤链路中的可变延迟线来调节两臂的时延差,在两臂调平之后将此时可变光延迟线(Variable delay line, VDL)刻度标定起始点。通过调节手动 PC1 和 VDL,改变分光比与两臂光程差,可以测出 dop 的变化曲线和两信道的串扰。在完成实验的同时,成本得到控制。手动 PC 采用美国 General Photonics 公司的 PolarITETM,插入损耗小于 0.05 dB,回波损耗大于 65 dB,适用波长为 1260~1650 nm,消光比大于 40 dB。可变延迟线

选用 VDL-001-15-33-FC/APC-PP,保偏结构,消光比 22 dB,可调光程范围为 330 ps(10 cm),回波损耗大于 50 dB,消光比大于 18 dB,插入损耗为 1.15 dB(@0 ps),1.29 dB(@165 ps),1.61 dB(@330 ps)。由于 VDL 产生不同时延的时候所引入的损耗不同,因此在另外一臂,加入可调节损耗量的器件,对此效应进行平衡。

在进行串扰探测的时候,将如图 2 所示部分与图 3 终端链接。通过 PC2 进行解复用分束时的 PBS 的对轴,打开调制信道,在示波器上则可看出在一定 DGD 影响下的串扰情况。实验中选用的 PBS 均为上海瀚宇光纤通信技术有限公司的 PBS-55-P-222-LLL-1-1,消光比均大于 26 dB,适用波长为 1510~1590 nm,插入损耗小于 0.57 dB,回波损耗大于 60 dB。

在采集信号时,可按 1.078 的校正系数对两探测器的读数进行归一化处理。

在 DGD 仿真模块的搭建时,采用 PBS 和 PBC 组合的结构方式,遵循光纤中光信号传输的原理,将实际的光纤分离为相互正交的两路进行偏振分量的传输。选用 General Photonics 公司的 VariDelayTM I 型 VDL,为手动空间反射式结构,具有易控制、高精度等特点。由于构成系统的 PBS 和 PBC 在对接时光纤长度存在差别,加上所附加的 VDL 也附带尾纤,显然,两臂存在光程差,会存在一个预置的 DGD 初始量。因此在系统搭建时,最大的难点是要匹配 PMD 仿真器两臂的光程差,即将仿真器的 DGD 初始化。

经实验发现,装置中两臂长度相差较多,光程差约为 36.7 cm,已远远超出 VDL 的调节范围(实验选用 10 cm 光程可调),因此使用了型号及对轴方式相同的保偏光纤的补偿跳线对光程进行补偿。由于测量会产生一定的误差,因此仍需调节 VDL,根据测量结果不断通过 VDL 去调整两臂的长度,最终可以达到光程匹配。

具体调节方法可以借助于 DOP 与 DGD 具有的定量关系,但是这种方法的缺点就是在分光比为 1:1 的时候,DOP 会随着 DGD 的增大很快减小到 1%以下。而分光比差别较大时,DOP 作为反馈信号又对 DGD 的敏感度下降。因此在 DGD 未知而且可能会较大时,VDL 的重新标记的两臂平衡位置的调整会比较困难。故此选用了波长扫描法^[9]对两臂的光程差进行调整。在模块的终端使用 PBC 将两路合在一起,而在 PBC 的单模(SM)端因两路相

干光合成为一路而无法形成干涉。因此使用耦合器将可调谐激光器的光分成两路，一路采用普通的单模光纤，另一路则为仿真模块的其中一臂。可调谐激光器选用日本 Ando 电气公司的 AQ8460，波长范围是 1500~1580 nm，最小步长是 0.001 nm，进行波长连续扫描模式时，选取采样点为 2000。由于可调谐激光器的线宽很窄，可以满足发生干涉的条件。如果忽略两路光强的区别，则可以得到终端耦合器处的干涉光强为

$$I = \cos^2(2\pi\Delta L/\lambda)。(5)$$

由于采用可调谐激光器的波长扫描，因此干涉光强随 $1/\lambda$ 的变化成余弦形状变化，周期为 $1/(2\Delta L)$ ，由示波器可以得到波形，如图 5 所示。

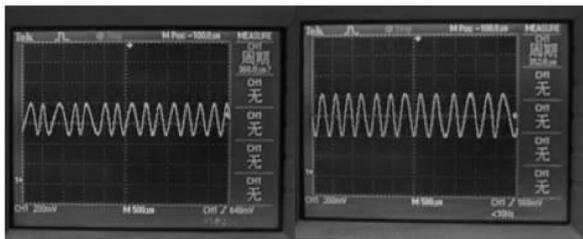


图 5 干涉图样

Fig. 5 Interference pattern

由于将两臂分别与同一段单模光纤作对比，形成周期一定的余弦形状的干涉图样，因此，若两组实验中形成的干涉周期近似相等，则此时可认为两待测光路的光程近似相等。同时，为验证仿真模块的 PDL 值，特设计了实验框图如图 6 所示。

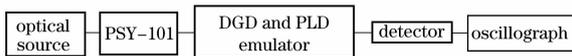


图 6 验证 PDL 残余的实验框图

图中光经过仿真器之后直接接到光探测器上，由示波器观测。选用扰偏频率为 500 Hz，锯齿波模式产生偏振态，通过调整两臂之间的损耗值来初始化仿真模块的 PDL。实验过程中，发现 PDL 现象总是存在，将可调光衰减器的衰减值调至约 1.3 dB 时，观测出现最小值，如图 7 所示。

从图 7 可以看出，探测器与示波器固有噪声产生峰-峰值为 60 mV(CH2 未接入光信号，最大值为 40 mV，最小值为 -20 mV)，电压信号最大值为 6.00 V，最小值为 5.56 V。由 PDL 定义可知，若去除固有噪声产生的电压波动带来的示数误差，则此时 PDL 最小值为 0.317 dB。在实验中，增大或者减小两臂之间的损耗值，均会造成信号端峰-峰值的增大，即 PDL 增大，如图 9 所示。与图 8 相比，PDL

明显增大。

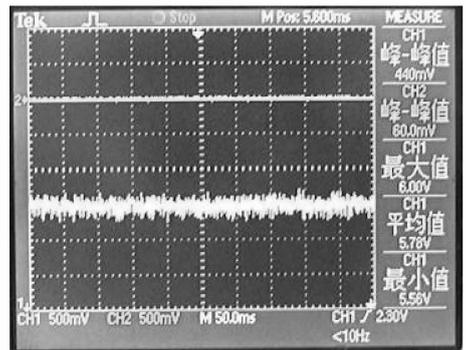


图 7 调整 PDL 至最小图样

Fig. 7 Pattern of the minimum PDL

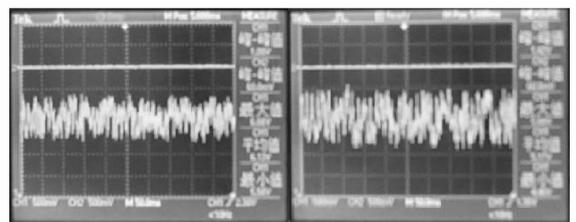


图 8 损耗值增大和减小示意图

Fig. 8 Pattern of increased and reduced loss

以 $\theta = \pi/4$ 为例进行实验验证。衰减幅度从 0~10 dB。

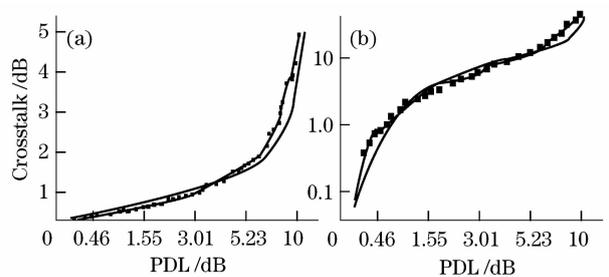


图 9 PDL 与串扰的实验曲线 ($\gamma=0.5$)

Fig. 9 Experimental verification of relationship between PDL and crosstalk ($\gamma=0.5$)

图 9(a) 中的纵坐标代表了非目标信道与目标信道光强之间的比值，(b) 中则转化成了 dB 值。横坐标中的衰减系数则为两信道可以通过的最大光强的比值，代表了 VOA 衰减臂与 VDL 臂的光强比。显然，VOA 臂衰减越大，造成落在该臂上的偏振分量衰减也越大，从而引起两信道夹角的变化。

图 9 纵轴所表示的串扰代表了两信道之间的比值，即串扰发生信道与目标信道上方波的峰-峰值之间的比值。可以看出，当 DGD 加到足够大，致使 DOP 很低时，串扰也很严重。不计入目标信道发生转换的情况，最大的串扰为 1:1，即为信号光被几乎完全消偏，成为准自然光。致使 PBS 在分离时发

生模糊,从而造成了严重的串扰。通过理论曲线与实验值的对比可以发现吻合较好,能够看出相应的变化趋势,从而验证了理论的正确性。存在误差的主要原因在于滤波器的非理想性和手动偏振控制器调整时的精确度受限,同时也会因为光信号强度较低,造成在观测时记录不便。误差控制方面由于器件中最低的消光比为 18 dB^[10],由此会引入 1.58% 左右的误差,加上其他器件中性能误差的累加,会对实验结果造成影响。PDL 调至最小的时候,若要求串扰控制在 -10 dB 以内,DGD 应该压制在 10 ps 以内;当 DGD 增大到 140 ps 以后,系统则完全无法工作,有无标记的信道信号达到 1:1。

5 结 论

以 PDL 的产生原因作为切入点,进行了理论分析和解析解的推导。实验验证时,对 VOA 端进行了 10 dB 以内的衰减。从实验结果可以看到,由于 PDL 的存在使得原本正交的两个信道不再正交,之间的夹角随损耗值的增大而减小,因此总会有分量投影在非对应信道上,最终引起了信道间的串扰。

参 考 文 献

- 1 Y. K. Na, D. Lee, H. Yoon, *et al.*. Limitation of PMD compensation due to polarization-dependent loss in high-speed optical transmission links[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):104~106
- 2 B. Huttner, C. Geiser, N. Gisin. Polarization-induced distortions in optical fiber networks with polarization-mode dispersion and polarization-dependent losses[J]. *Journal of Selected topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(2): 317~329
- 3 Ge Tingwu, Lu Dan, Xu Kun *et al.*. Theoretical analysis of polarization dependent loss induced by fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1024~1028
葛廷武,陆丹,徐坤等. 光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7):1024~1028
- 4 Wang Ruokun, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Polarization-dependent loss of long-period fiber grating fabricated by dual-side exposure method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1409~1413
王若昆,饶云江,朱涛等. 双面曝光长周期光纤光栅偏振相关损耗[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1409~1413
- 5 Tiecheng Wang, Shoufeng Lan, Junfeng Jiang *et al.*. A novel method of polarization state control for polarization division multiplexing system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 812~814
- 6 Wang Shaokang, Xi Lixia, Fang Guangqing *et al.*. Analysis on the adaptability of polarization mode dispersion adaptive compensation system on different modulation formats[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 201~204
王少康,席丽霞,方光青等. 偏振模色散自适应补偿系统对调制码型的适应性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 201~204
- 7 Xu Wei, Duan Gaoyan, Fang Guangqing *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 226~232
许玮,段高燕,方光青等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 226~232
- 8 Ma Xiaohui, Wan Chunming, Shi Quanlin *et al.*. Fiber-coupled high power laser diode by polarization multiplexing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1343~1346
马晓辉,万春明,史全林等. 基于偏振复用技术的激光二极管光纤耦合方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1343~1346
- 9 A. Galtarossa, L. Palmieri, M. Schiano *et al.*. Improving the accuracy of the wavelength-scanning technique for PMD measurements[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(2): 184~186
- 10 Liang Chen, Ou Chen, Saeed Hadjifaradji *et al.*. Polarization-mode dispersion measurement in a system with polarization-dependent loss or gain[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**: 206~208