

文章编号: 0258-7025(2002)12-1080-05

光无源器件的偏振模色散测量

季杭峰¹, 黄德修¹, 张 晟¹, 屈红昌²

(¹ 华中科技大学光电子工程系, 湖北武汉 430074; ² 福州康顺光通讯有限公司, 福建福州 350014)

提要 光纤通信系统中的偏振模色散(PMD)测量已越来越重要。针对光无源器件的具体特点,以单级光隔离器和双级光隔离器为例,分析比较了几种 PMD 的测量方法,指出琼斯矩阵本征法(JME)是较适合的一种方法。

关键词 偏振模色散, 双折射, 测量, 光无源器件

中图分类号 O 436.3 文献标识码 A

PMD Measurement of Passive Optical Components

JI Hang-feng¹, HUANG De-xiu¹, ZHANG Sheng¹, QU Hong-chang²

¹Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074; ²Koncent Communication INC., Fuzhou, Fujian 350014

Abstract This paper analyzes and compares several PMD measurement methods based on the characteristics of passive optical components for both single-stage optical isolator and dual-stage optical isolator. It is shown that the Jones Matrix Eigenanalysis method is suitable.

Key words polarization mode dispersion, birefringence, measurement, passive optical components

1 引 言

随着光纤通信系统单信道传输速率向更快的方向发展(10 Gbit/s 或更高),偏振模色散(PMD)越来越成为其制约因素,因此对光纤通信系统的 PMD 测量也越来越重要。光纤通信系统的 PMD 主要来源于传输光纤、光放大器和一些应用晶体双折射效应做成的无源器件(如光隔离器,环形器,光开关,Interleaver 等)。由于以前系统的传输速率不是太高,所以只对光纤的 PMD 有较严格的要求,而对器件的 PMD 特性不太重视,因而以前的一些无源器件的 PMD 值很大。国内外对 PMD 测量的研究^[1-5]也主要集中在光纤上。但随着通信系统传输速率的提高,器件的 PMD 也已成为一个不可忽略的因素,器件生产商也开始重视无源器件的 PMD 特性,尽可能地降低器件的 PMD 值(如采取更换双折射晶体材料、改变结构设计、补偿等方法)。因此对低 PMD 值乃至超低 PMD 值的器件进行测量也

成为一个新的研究课题。本文在现有的对单模光纤 PMD 测量方法的基础上,根据光无源器件自身的一些特点,通过实验比较了两种测量方法,提出了适合于光无源器件的 PMD 测量法。

2 光无源器件 PMD 测量的特点

无论是器件还是光纤,产生 PMD 的主要因素是双折射和模式耦合。无源器件(如光隔离器)的双折射主要是由器件中所用的具有较大的双折射效应的晶体引起的。在光纤中,双折射又分本征双折射(光纤截面的不圆度)和非本征双折射(外界影响,如弯曲、扭绞等)。模式耦合是指在单模光纤中属于基模的两个本征模 HE_{11X} 和 HE_{11Y} 之间的光能量交换。与之相应的一个概念“耦合长度”是指两个模式的光能量交换到其一半时所传输的距离。这个长度一般在数米或更大,所以对长达数公里乃至数百公里的光纤,模式耦合非常明显。由于模式耦合具有

收稿日期: 2001-09-04; 收到修改稿日期: 2001-12-10

作者简介: 季杭峰(1978—),男,浙江浦江人,华中科技大学光电子系硕士研究生,主要从事光无源器件方面的研究。E-mail: jihangfeng@yofc.com

很大的随机性, 光纤的 PMD 是一个统计量, 其分布可以用麦克斯韦(Maxwell) 分布函数表示^[1], 如图 1 所示(图中 DGD 指的是微分群时延差, 它的大小即代表 PMD)。现有光纤的 PMD 的测量方法无不是建立在这个统计特性上的, 各种方法都要求做在波长范围、温度范围、时间跨度上的平均。因此, 需重复测得大量的分散数据, 当其符合麦克斯韦分布时, 才认为测量是准确的, 并把其平均值作为 PMD。与之相反, 由于光无源器件的尺寸长度远远小于耦合长度, 所以它属于弱模耦合。器件的 PMD 是一个确定值, 其标准偏差 σ 应为零。

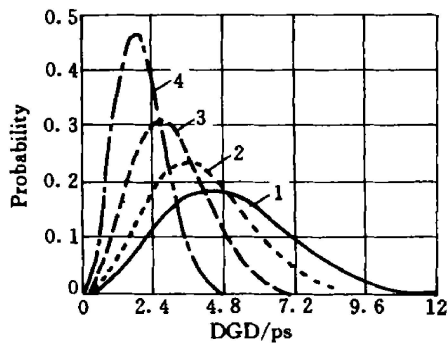


图 1 长度为 100 km 的光纤的 PMD 分布概率图

Fig. 1 Probability distribution of PMD in a 100-km fiber

1: fiber with PMD of 0.5 ps/sqrt (km); 2: fiber with PMD of 0.4 ps/sqrt (km); 3: fiber with PMD of 0.3 ps/sqrt (km); 4: fiber with PMD of 0.2 ps/sqrt (km)

光无源器件 PMD 测量有以下一些不同于光纤的特点: 1) 其 PMD 值一般都较小, 在 0~0.2 ps 之间。如典型的 PMD 补偿型的单级光隔离器和双级光隔离器都为 0.05 ps 以下, 典型的光环行器为 0.1 ps 以下。这就要求所用的测量方法能测量的最小 PMD 也很小; 2) 与铺设好的光纤不同, 光无源器件的输入端、输出端都在本地, 故不存在通讯方面的问题, 这是器件测量比光纤测量方便的一个地方; 3) 由于无源器件属于弱模耦合, 且其受环境影响很小(不易受振动、温度、电磁场等外界影响), 所以对其测量时不必做平均; 4) 无源器件都有一定的工作带宽, 某些使用宽带光源进行 PMD 测量的方法将不再有效。

下面就光无源器件的特点, 分析比较几种常用的 PMD 测量方法。

3 几种 PMD 测量方法的比较

3.1 基本概念

在具体讨论器件的 PMD 测量前, 先熟悉一下与偏振测量(包括 PMD, PDL 等特性)相关的几个概念。

3.1.1 偏振度(Degree of Polarization, DOP)

偏振度是表征光极化程度的一个参数, 它定义为光束中偏振光成分的比例, 可表示为

$$DOP = \frac{P_{\text{polarized}}}{P_{\text{polarized}} + P_{\text{unpolarized}}} \quad (1)$$

式中, $P_{\text{polarized}}$ 和 $P_{\text{unpolarized}}$ 分别代表偏振光和非偏振光的光功率。

一些光源的典型偏振度如表 1 所示。

表 1 一些光源的典型偏振度

Table 1 Typical DOP of some light sources

| | |
|----------------------|----------|
| Semiconductor lasers | 98% |
| EELED source | 5% ~ 50% |
| ASE source | 1% ~ 5% |

3.1.2 Stokes 参数, Poincare 球和 Muller 矩阵

Stokes 参数^[6]是表征光偏振状态的一个矢量, 包括了 s_0, s_1, s_2 和 s_3 四个分量。 s_0 指光波的总光强, s_1 反映了水平极化光与垂直极化光的大小关系, s_2 反映了 45° 极化光与 135° 极化光的大小关系, s_3 则反映了光振动的旋向式。它们的关系可用式 (2) ~ (6) 表示

$$s_0 = I(0^\circ) + I(90^\circ) \quad (2)$$

$$s_1 = I(0^\circ) - I(90^\circ) \quad (3)$$

$$s_2 = I(45^\circ) - I(135^\circ) \quad (4)$$

$$s_3 = I(R) - I(L) \quad (5)$$

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 \quad (6)$$

式中 $I(0^\circ), I(90^\circ), I(45^\circ), I(135^\circ), I(R)$ 和 $I(L)$ 分别表示与水平轴成 0°, 90°, 45°, 135° 和右旋、左旋极化光的光强。从式 (2) ~ (6) 还可看出 s_0, s_1, s_2 和 s_3 四个分量中只有 3 个是独立的。

形象地表示 Stokes 参数的一种方法是用 Poincare 球来描述。Poincare 球的半径用 s_0 来表示, $\{s_1, s_2, s_3\}$ 则代表了 Poincare 球在直角坐标系下的三维坐标。根据这样的定义, 球面上的任一点代表了一特定光强 (s_0), 特定偏振态 ($\{s_{11}, s_{21}, s_{31}\}$) 的光。

设入射到被测器件上的光的 Stokes 参数为 $S_1 = \{s_{01}, s_{11}, s_{21}, s_{31}\}$, 输出光的 Stokes 参数为 $S_2 = \{s_{02}, s_{12}, s_{22}, s_{32}\}$, 则 S_1 和 S_2 之间可用一 4×4 的矩

阵 M 相联系, 即

$$S_1 = M \times S_2 \quad (7)$$

该矩阵 M 称为 Muller 矩阵, 它表征了被测器件的偏振特性。由它可以求出被测器件的 DGD。

3.1.3 Jones 矩阵

Jones 矩阵是一 2×2 矩阵, 也是另一种表征被测器件的偏振特性的工具, 它把输入光和输出光的 Jones 矢量联系起来。如果知道被测器件的 Jones 矩阵, 也可以求出被测器件的 DGD。为了得到被测器件的 Jones 矩阵(Jones 矩阵中有 4 个未知数, 但可以设其中一个为 1, 这样要求的未知数只有 3 个), 可以让三种不同偏振态的入射光入射到被测器件, 然后测出各自的输出光的偏振态, 这样就可以得到三个方程; 通过求解方程即可得到被测器件的 Jones 矩阵了。

一般取三种入射光的偏振态为与水平方向分别成 0° , 45° 和 90° 的线偏光, 在它们激励下的输出光的偏振态分别为 h , v , q , 令

$$K_1 = h_x/h_y \quad (8)$$

$$K_2 = v_x/v_y \quad (9)$$

$$K_3 = q_x/q_y \quad (10)$$

$$K_4 = (K_3 - K_2)/(K_1 - K_3) \quad (11)$$

其中 h_x , h_y , v_x , v_y , q_x 和 q_y 分别为 h , v , q 的 x 和 y 分量。

则被测器件的 Jones 矩阵 J 可表示为

$$J = \begin{vmatrix} K_1 K_4 & K_2 \\ K_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (12)$$

3.2 测量方法比较

PMD 测量可粗略地分为时域测量和频域测量两大类。时域测量中又分调制相移法、脉冲延时法和干涉法等。前两种方法在测量时需要知道主偏振轴的取向, 这就决定了其花费的测量时间很长; 其所测量的值是在一个波长处的瞬时值而非平均值。另外要求光源和测试环境非常稳定。所以尽管这两种方法在概念上极为简单, 但不常用。干涉法(INT)中 PMD 的定义是传输时间的均方差^[3,7], 它直接测量了出射光强的自相关函数。干涉法测量 PMD 速度快, 对环境影响不敏感, 所以很适合于野外测量。但由于它使用宽光源, 工作时波长扫描范围在数十纳米, 所以不适合于一些带宽窄的器件(如 WDM 器件)的测量, 而且它对光源的光谱形状敏感。另外干涉法也不能提供主偏振态信息。就测量范围和精度来说, 由于只测了 Stokes 参数中的一个量 s_1 , 所以

很难测出 0.05 ps 以下的 PMD 值。目前国外已有基于该法的测量系统(如 Exfo 的 Model IQ-5500 PMD 分析仪, GN Nettest 的 Model PMD440 测量系统), 可测的最小 PMD 为 0.05~0.1 ps。

频域测量, 主要有波长扫描法(WS, 又称固定分析仪法)和琼斯矩阵本征值法(JME)。波长扫描法所用的设备与干涉法差不多(都用到宽带光源、起偏器、检偏器), 只是它用光谱仪(OSA)来分析从被测器件出射的偏振状态, 而后者用 M-Z 干涉仪或 Michelson 干涉仪。事实上, 这两种方法在原理上是一样的。对干涉法中检测到的图样进行傅里叶变换后, 就相当于波长扫描法中 OSA 的输出谱线了。同干涉法一样, 波长扫描法也只测了 s_1 , 其最小可测量值也在 0.05 ps 左右。Normand Cyr 利用可旋转的两个偏振器, 同时测出了 s_1 和 s_2 值, 再利用 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1$ (已归一化)的关系, 就得到了 Stokes 参数的 3 个分量了(s_3 的大小可知道, 但符号未知), 从而提高了测量精度^[8]。

琼斯矩阵本征值法^[9]测量 PMD 可以给出很多关于偏振的参数(如偏振度 DOP, Stokes 参数等), 但一直被认为是昂贵的、复杂的, 它对光源的要求高(能很好地调谐, 步长很小, 谱宽窄), 测量时间较长(从数分钟到数十分钟), 易受环境干扰, 测量时要知道输入、输出端的偏振态, 测量大的 PMD 时要有更小的波长间隔和更高的光分辨率^[11]。这些不足之处确实对光纤的 PMD 测量带来了不便和困难, 但是在应用于光无源器件时, 并不严重。

4 实验及结果

用琼斯矩阵本征值法(JME)和波长扫描法(WS)分别对单级光隔离器(PMD 未补偿)和双级光隔离器(PMD 已补偿)的 PMD 进行了测量。两种方法的实验图分别如图 2(a), (b) 所示。

图 3(a), (b) 分别是用 JME 法对单级光隔离器和双级光隔离器的测量结果; 图 4(a), (b) 是用 WS 法对单级光隔离器和双级光隔离器的测量结果。

由图 3(a) 可见, 该被测的单级光隔离器的 PMD 为 0.2007 ps, 这与理论计算值 0.198 ps 相吻合。另外在一个较大的波长范围内, PMD 是较恒定的(标准方差为 3.4 fs), 与波长无关。而在光纤测量中, 这条曲线有很大的起伏, 这也正是光纤测量需要取平均的原因。实验中每个波长处花费的时间为 2 s, 波长变化的步长为 1 nm, 则在 1530~1580 nm 的波

长范围中共有 61 个点, 总的测量时间为 122 s。若取波长范围为 1540~ 1550 nm, 步长为 1 nm(适合于带宽窄的无源器件), 或波长范围为 1525~ 1575 nm, 步长为 5 nm, 则所需时间可减为 22 s, 且其测量

值也都在 0.20 ps 左右。甚至可只取 2 个点来测量(JME 法最少需要测 2 个点), 这样测量时间就在数秒以内。

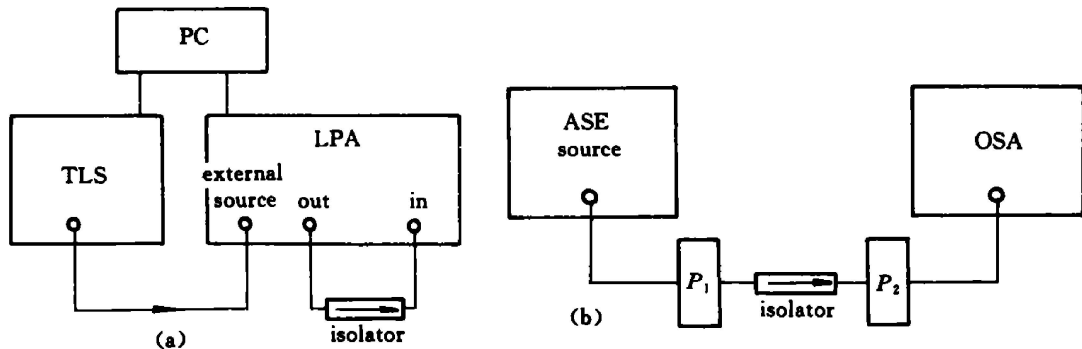


图 2 JME 法(a)和 WS 法(b)测量 PMD 实验框图

PC: 个人电脑; TLS: 可调谐激光源; LPA: 光偏振分析器; ASE: 放大自发辐射; P_1, P_2 : 偏振器; OSA: 光谱分析器

Fig. 2 Experimental diagram of measuring PMD using Jones Matrix Eigenanalysis method (a) and wavelength scanning method (b)

PC: personal computer; TLS: tunable laser source; LPA: light polarization analyzer; ASE: amplified spontaneous emission; P_1, P_2 : polarizer; OSA: optical spectrum analyzer

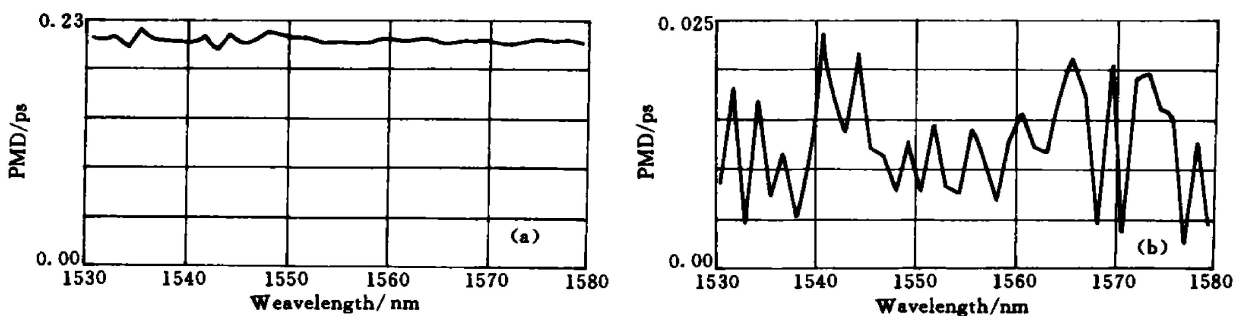


图 3 JME 法测单级(a)和双级(b)光隔离器的 PMD

Fig. 3 Measured PMD of a single-stage optical isolator (a) and dual-stage optical isolator (b) using Jones Matrix Eigenanalysis method

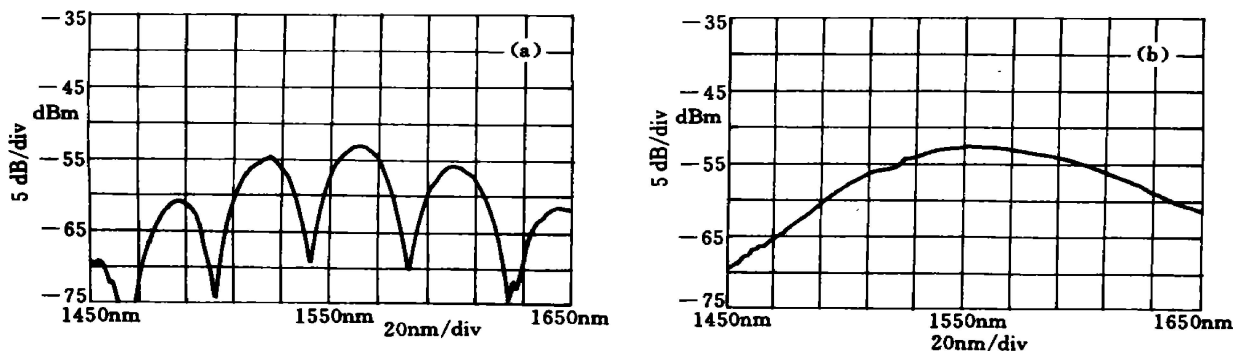


图 4 WS 法测单级(a)和双级(b)光隔离器的 PMD

Fig. 4 Measured WS of a single-stage optical isolator (a) and dual-stage optical isolator (b) using wavelength scanning method

图 3(b) 是用 JME 法测双级光隔离器, 测量值为 0.01248 ps(也与理论计算值 0.01 ps 很接近)。

这条曲线有较大的起伏, 但并不意味其 PMD 与波长有相关性(其 PMD 本来就很小, 轻微的外界干扰

就会反映在曲线的起伏上,标准方差也才 0.00560 ps)。当然为了测量准确,在这种情况下可重复测量几次或多取采样点(把波长变化步长变小,或波长扫描范围增大)。

图 4(a)是用 WS 法测量同一个单级光隔离器,其 PMD 为 0.208 ps。这里所用放大自发辐射(ASE)光源的波长扫描范围为 1450~1650 nm,模耦合系数取为 1(弱模式耦合决定了它取成 1,图 4(b)中也为 1)。

图 4(b)是用 WS 法测量同一个双级光隔离器,其显示的 PMD 测量值为 0.001 ps,已大大偏离了理论值。原因是 PMD 很小时,在光谱范围内极大值数太少(这里只有 1 个,最少要求有 2 个,一般要求 4~10 个)。按公式

$$\Delta\tau = \frac{K \cdot N_e \cdot \lambda_{\text{start}} \cdot \lambda_{\text{stop}}}{2(\lambda_{\text{stop}} - \lambda_{\text{start}})c} \quad (13)$$

式中 $\Delta\tau$ 为 DGD 值, K 为模耦合系数, N_e 为极大值数, λ_{start} 和 λ_{stop} 分别为扫描的起止波长, c 为光速。

取 $K = 1$, $N_e = 2$, $\lambda_{\text{start}} = 1450 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{stop}} = 1650 \text{ nm}$, 得相应的 $\Delta\tau$ 为 0.04 ps,也就是说在用 1450~1650 nm 波长范围的光源进行测量时,最小可测的 PMD 值为 0.04 ps。可见,用 WS 法已不能测量超低的 PMD 了。

5 结 论

光无源器件的 PMD 测量与光纤的测量存在一定的差异,其 PMD 是一确定值,与波长无关,不需要做平均。实验和分析表明,用琼斯矩阵本征值法

测量光无源器件的 PMD 具有精度高、速度快、对光源要求低、得到的偏振信息多等特点,特别是对超低 PMD 器件、窄带器件的测量更是起着不可替代的作用。

参 考 文 献

- 1 Xue Mengchi. Measurement of PMD in Single Mode Fibers [J]. *Modern Wire Transmission* (现代有线传输), 1998, (4): 27~ 33 (in Chinese)
- 2 Gong Yandong, Guan Yali, Jian Shuisheng. Measurement of polarization mode dispersion in fiber [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, 17(6): 731~ 736 (in Chinese)
- 3 Carig D. Poole, David L. Favin. Polarization mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, 12(6): 917~ 929
- 4 N. Gisin, J. P. Pellaux. Polarization mode dispersion: time versus frequency domains [J]. *Opt. Comm.*, 1992, 89: 316~ 323
- 5 B. L. Heffner. PMD measurement techniques—A consistent comparison [C]. OFC' 96 Technical Digest, Optical Society of America, Washington D. C., 1996. 292~ 293
- 6 Zhao Dazun, Zhang Huaiyu. Wave Optics [M]. Beijing: Yuhang Press, 1998. 313~ 315 (in Chinese)
- 7 Deng Zuyu. PMD in single mode fibers and their measurement methods [J]. *Modern Wire Transmission* (现代有线传输), 1998, (1): 5~ 8 (in Chinese)
- 8 Normand Cyr. Measurement of Ultralow PMD in Optical Fibers and Components [R]. Exfo Application Note, Vanier, QC, Canada, September 1999
- 9 B. L. Heffner. Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones Matrix Eigenanalysis [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1993, 5(7): 814~ 817