

文章编号 : 0253-2239( 2002 )11-1350-04

# 一种测量偏振模色散的新方法<sup>\*</sup>

夏月辉 黄永清 张 霞 陈 雪 任晓敏

(北京邮电大学电信工程学院,北京 100876)

摘要: 提出利用检偏器和光谱仪同时测量单模光纤各个波长的输出偏振态,从而测量出偏振模色散群时延差,这种方法与传统方法相比,测量时间大为节省,降低了偏振模色散随时间变化而引起的测量误差,提高了测量精度。

关键词: 偏振模色散;偏振主态;群时延差;庞加莱球

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## 1 引 言

近几年来,偏振模色散成了限制高速长距离光纤通信系统的主要障碍,因此偏振模色散的测量和补偿成了研究的热点。对于偏振模色散测量,人们提出了多种方法,总结起来可以归纳为四种:琼斯(Jones)矩阵法<sup>[1,2]</sup>、频谱扫描法<sup>[3,4]</sup>、庞加莱球法<sup>[5,6]</sup>、干涉法<sup>[7]</sup>。对庞加莱球测量方法,需要测出某一偏振态的光波经过光纤传输后各波长的输出偏振态, Poole 等<sup>[5]</sup>用可调谐激光器和偏振计测量输出偏振态, Andresciani 等<sup>[6]</sup>用可调谐激光器、检偏器和功率计测量输出偏振态。这两种方法的特点是需要逐个测量各个波长的输出偏振态,因此测量的时间较长。而偏振模色散是一个随机量,它会随时间而变化,测量时间过长必然引起测量误差。

本文提出用宽光源、检偏器及光谱分析仪同时准确地快速地测量出各波长的输出偏振态,从而提高了测量精度,是对 ITU-T 建议中庞加莱球法测量偏振模色散(PMD)的一次良好的改进。

## 2 庞加莱球法测量偏振模色散的基本原理

### 2.1 基本原理

对于光波的每一偏振态,可用庞加莱球上的点一一对应表示<sup>[8]</sup>。如图 1 所示,考虑某一光波的偏振态,其方向角为  $\phi$  椭圆率为  $\chi = \pm \arctan(b/a)$  (右旋

取正,左旋取负),  $a$ 、 $b$  分别为椭圆偏振光在  $x$  和  $y$  方向偏振分量的振幅,则在庞加莱球上和其对应的点  $S$ ,其经度  $\alpha = 2\phi$  纬度  $\beta = 2\chi$ ,点  $S$  也可以用从球心到  $S$  的单位矢量  $s$  表示,它为代表此偏振态的斯托克斯(Stokes)矢量。庞加莱球赤道上的点代表了线偏振光,其中  $H$ 、 $P$ 、 $V$ 、 $Q$  分别代表偏振方向为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  的线偏振光,北极  $N$  和南极  $S$  分别代表右旋和左旋圆偏振光。

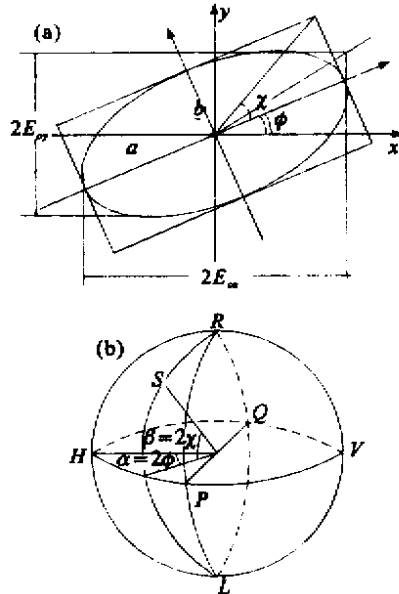


Fig.1 Correspond point of state of polarization on Poincare sphere. (a) A random state of polarization; (b) The correspond point on Poincare sphere

光波在通过光纤介质后,其偏振态会发生变化,对于不同的波长,其偏振态的变化都不一样。由偏振主态模型可以知道,对于某一频率的光波,存在一偏振模色散矢量  $\Omega(\omega)$ ,当输入偏振态固定、光波频率发生微小的变化时,其输出偏振态会随波长而相应地变化,输出偏振态随波长的变化关系为<sup>[8]</sup>

<sup>\*</sup> 国家高科技 863(2001AA12204) 深圳华为公司科技基金资助课题。

E-mail: yuehuixia@263.net

收稿日期: 2001-09-07; 收到修改稿日期: 2002-01-24

$$\frac{ds(\omega)}{d\omega} = \Omega(\omega) \times s(\omega), \quad (1)$$

其中  $s(\omega)$  代表输出偏振态在庞加莱球上的斯托克斯矢量, 其方向对应于偏振主态(PSP)慢轴的方向, 大小代表偏振模色散群时延差  $\Delta\tau(\omega)$  的大小。(1) 式表明, 在较窄频率范围内的光波, 其输出偏振态随波长变化而绕偏振模色散矢量  $\Omega(\omega)$  旋转, 因而输出偏振态在一圆上移动, 如图 2 所示。

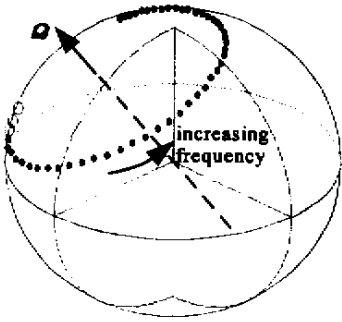


Fig.2 Output state of polarization rotate around the PSP

对某一宽波长范围内的输出偏振态, 由于  $\Omega(\omega)$  随波长而变化, 也就是输出偏振态对每一波长的旋转轴线和旋转速率不一样, 因此输出偏振态在庞加莱球上表现为在不规则的曲线上移动, 如图 3 所示。

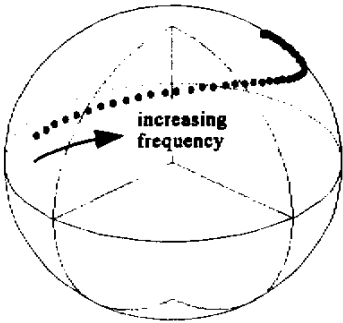


Fig.3 Output state of polarization of the wideband wavelength

如果知道了所有波长的输出偏振态, 利用庞加莱球上对应点的旋转情况, 由(1)式可以求出各波长的群时延差,

$$\Delta\tau = |\Delta\theta(\Delta\omega)|, \quad (2)$$

$\Delta\omega$  为相邻波长的频率间距,  $\Delta\theta$  为其相应的输出偏振态绕  $\Omega(\omega)$  旋转的夹角。

由于偏振模色散的随机性, 对所有波长的群时延差取平均, 可以作为光纤的偏振模色散群时延差的大小。

庞加莱球测量法就是基于以上原理, 让入射光的偏振态固定, 用偏振计测出通过光纤后每一波长的输出偏振态, 由(2)式可求出各波长的群时延差,

由于偏振模色散是一随机量, 对各波长的群时延差取平均, 得到整个光纤的偏振模色散群时延差  $\Delta\tau$  的大小, 从而可以得到偏振模色散系数。

### 2.2 测量装置

ITU-T 建议中庞加莱球法测量偏振模色散的测量装置如图 4 所示, 可调谐激光器出射的光波通过起偏器得到一固定偏振态的入射光, 其经过待测光纤传输后用偏振计测量出其偏振态。通过调谐激光器的波长, 可以测出各个波长所对应的输出偏振态, 利用庞加莱球上对应点的旋转情况, 由测量频率间距  $\Delta\omega$  及(2)式可计算得到各波长的群时延差, 对所有波长的群时延差取平均, 就得到光纤的偏振模色散群时延差, 从而计算出偏振模色散系数。

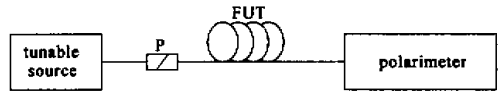


Fig.4 Poincaré sphere method to measure PMD.

P: polarizer; FUT: fiber under test

## 3 新方法的基本理论

### 3.1 基本理论

某一偏振态的光波在另一偏振态上的分量的光强, 与这两态在庞加莱球上对应的斯托克斯矢量的夹角之半的余弦的平方成正比。如图 5 所示, 某光波偏振态为  $S_1$ , 光强为  $I_0$ ,  $S_2$  为另一偏振态, 这两偏振态在庞加莱球上斯托克斯矢量的夹角为  $\theta$ , 那么此光波在状态  $S_2$  上分量的光强为

$$I = I_0 \cos^2(\theta/2). \quad (3)$$

利用(3)式, 如果测出某偏振态的光波在偏振方向为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  及  $135^\circ$  线偏振态(即 H、P、V、Q 点)上的分量的光强, 便可以确定此光波的偏振态。设此光波在 H、P、V、Q 点线偏振态上分量的光强分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ , 显然光波的光强  $I_0 = I_1 + I_3 = I_2 + I_4$ 。由(4)式和(5)式可得出庞加莱球上代表此偏

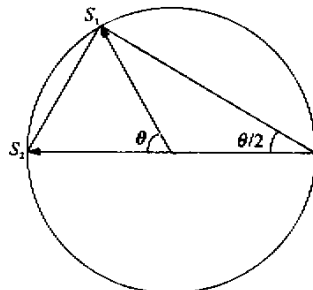


Fig.5 Relation of two Stokes vectors

振态的点的经度  $\alpha$  和纬度  $\beta$  的大小 :

$$x = I_1 - I_3, \quad y = I_2 - I_4, \quad (4)$$

$$\tan\alpha = y/x, \quad \cos\beta = \sqrt{x^2 + y^2}/I_0. \quad (5)$$

这里得出的纬度值  $\beta$  是其绝对值的大小,因此不能确定偏振态的左右旋,但通过一个  $\lambda/4$  波片可以确定其左右旋。

本测试方法就是利用以上原理,让待测光波经过一检偏器,检偏器光轴方向分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  时,用光谱仪测量其光谱,光谱仪测量的数据记录了各波长在  $H$ 、 $V$ 、 $P$  点上分量的光强,因而可同时确定频谱范围内各波长的偏振态。

知道了待测光纤输出各波长的偏振态,在庞加莱球上画出对应的斯托克斯点,利用(2)式,可以计算出光纤的各波长的偏振模色散群时延差的大小。

实际上,由于我们只测量待测光纤的群时延差,输出偏振态在庞加莱球上随波长连续变化,由(2)式计算群时延差时,和  $\beta$  值的符号没有关系,将庞加莱球下半球(左旋偏振态)的点画在上半球(右旋偏振态),将不会影响测量结果,因此我们在测量时不需确定输出偏振态的左右旋。

### 3.2 实验装置及测量方法

实验装置如图 6,掺铒光纤放大器的自发辐射谱通过一起偏器,得到一固定偏振态的宽光源,此偏振态的宽光源通过待测光纤后,经可旋转的检偏器 RP 后再输入光谱分析仪。首先使检偏器 RP 旋转到

$0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ,分别存储光谱分析仪上的数据  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ (光谱仪记录的是扫描范围内等间距波长的能量),由  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  数据计算出各波长的偏振态  $S(\lambda)$ ,在庞加莱球上画出对应的斯托克斯点(这里的输出偏振态没有区分左右旋,都画在上半球上),通过前述方法,利用(2)式可以求出各波长偏振模色散群时延差的大小,对它们取平均就得到光纤的偏振模色散大小。



Fig.6 Measurement setup. P: polarizer; FUT: fiber under test; RP: rotatable polarizer; OSA: optical spectrum analyzer

### 3.3 测量结果

我们对 11 km 的单模光纤(SMF)进行了测量,为检验此方法的正确性,我们用频谱扫描法测量了其偏振模色散,结果吻合得很好。

对 11 km 单模光纤在 1535 nm ~ 1555 nm 范围内进行测量,所得光谱仪文件 I1.txt、I2.txt、I3.txt 的部分数据如表 1,这里  $\Delta\lambda = 0.05$  nm,通过计算,在庞加莱球上画出各波长的输出偏振态,图 7(a)中画出了间隔为 1 nm 的波长的输出偏振态,群时延差随波长的变化如图 7(b)所示,在这个波长范围内取平均得到群时延差为 0.2231 ps。

Table 1. Parts of data recorded by the OSA

I1.txt		I2.txt		I3.txt	
1535.000,	$6.464 \times 10^{-3}$	1535.000,	$3.697 \times 10^{-3}$	1535.000,	$2.796 \times 10^{-3}$
1535.050,	$6.325 \times 10^{-3}$	1535.050,	$3.610 \times 10^{-3}$	1535.050,	$2.705 \times 10^{-3}$
1535.100,	$6.186 \times 10^{-3}$	1535.100,	$3.524 \times 10^{-3}$	1535.100,	$2.613 \times 10^{-3}$
1535.150,	$6.038 \times 10^{-3}$	1535.150,	$3.463 \times 10^{-3}$	1535.150,	$2.533 \times 10^{-3}$
1535.200,	$5.891 \times 10^{-3}$	1535.200,	$3.402 \times 10^{-3}$	1535.200,	$2.452 \times 10^{-3}$
1535.250,	$5.750 \times 10^{-3}$	1535.250,	$3.329 \times 10^{-3}$	1535.250,	$2.372 \times 10^{-3}$
1535.300,	$5.610 \times 10^{-3}$	1535.300,	$3.257 \times 10^{-3}$	1535.300,	$2.292 \times 10^{-3}$
1535.350,	$5.467 \times 10^{-3}$	1535.350,	$3.212 \times 10^{-3}$	1535.350,	$2.228 \times 10^{-3}$
1535.400,	$5.323 \times 10^{-3}$	1535.400,	$3.167 \times 10^{-3}$	1535.400,	$2.164 \times 10^{-3}$
1535.450,	$5.196 \times 10^{-3}$	1535.450,	$3.096 \times 10^{-3}$	1535.450,	$2.102 \times 10^{-3}$
1535.500,	$5.070 \times 10^{-3}$	1535.500,	$3.025 \times 10^{-3}$	1535.500,	$2.040 \times 10^{-3}$
1535.550,	$4.950 \times 10^{-3}$	1535.550,	$2.998 \times 10^{-3}$	1535.550,	$1.981 \times 10^{-3}$
1535.600,	$4.830 \times 10^{-3}$	1535.600,	$2.971 \times 10^{-3}$	1535.600,	$1.923 \times 10^{-3}$
1535.650,	$4.706 \times 10^{-3}$	1535.650,	$2.907 \times 10^{-3}$	1535.650,	$1.883 \times 10^{-3}$
1535.700,	$4.582 \times 10^{-3}$	1535.700,	$2.842 \times 10^{-3}$	1535.700,	$1.843 \times 10^{-3}$
1535.750,	$4.481 \times 10^{-3}$	1535.750,	$2.812 \times 10^{-3}$	1535.750,	$1.785 \times 10^{-3}$
1535.800,	$4.379 \times 10^{-3}$	1535.800,	$2.781 \times 10^{-3}$	1535.800,	$1.728 \times 10^{-3}$
1535.850,	$4.276 \times 10^{-3}$	1535.850,	$2.719 \times 10^{-3}$	1535.850,	$1.678 \times 10^{-3}$
1535.900,	$4.174 \times 10^{-3}$	1535.900,	$2.656 \times 10^{-3}$	1535.900,	$1.629 \times 10^{-3}$
1535.950,	$4.055 \times 10^{-3}$	1535.950,	$2.617 \times 10^{-3}$	1535.950,	$1.594 \times 10^{-3}$
1536.000,	$3.936 \times 10^{-3}$	1536.000,	$2.577 \times 10^{-3}$	1536.000,	$1.559 \times 10^{-3}$

注意,由于偏振模色散是一随机量,在图 7(b)

中,群时延差随波长的变化表现为随机的抖动,因为

群时延差值百分位后的数字对系统的影响可以忽略,因此群时延差可取为  $0.2 \text{ ps}$ ,因此偏振模色散系数为  $0.2/\sqrt{11} = 0.06 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。

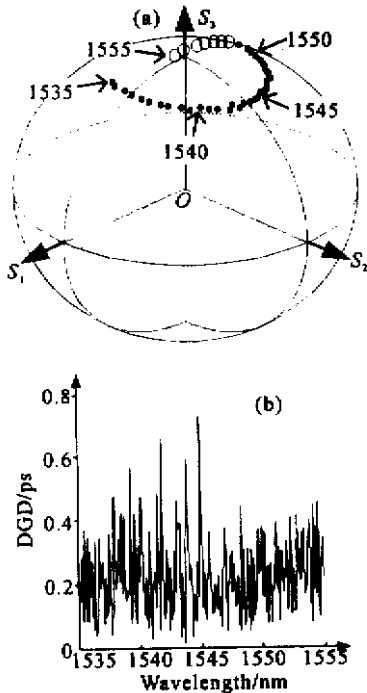


Fig. 7 The output SOP (a) and DGD (b) of the 11 km single-mode fiber vs wavelength

我们用波长扫描法对此光纤的偏振模色散进行了测量,得到偏振模色散值为  $0.2387 \text{ ps}$ ,取为  $0.2 \text{ ps}$ ,可见,这种新方法和波长扫描法吻合得很好。

从以上测量来看,此方法切实可行。

**结论** 本文利用宽光源、检偏器和光谱仪同时测量

了各个波长的输出偏振态,从而测量出偏振模色散大小,这种方法和传统庞加莱球法相比,大大地节省了测量时间,从而避免了偏振模色散随时间变化而引起的测量误差,提高了测量精度。

## 参考文献

- [1] Heffner B L. Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones Matrix eigenanalysis. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9):1066 ~ 1069
- [2] Heffner B L. Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones Matrix eigenanalysis. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7):814 ~ 817
- [3] Poole C D. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(6):917 ~ 929
- [4] Poole C D. Measurement of polarization-mode dispersion in single-mode fibers with random mode coupling. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(10):523 ~ 525
- [5] Poole C D, Bergano N S, Wagner R E *et al.*. Polarization dispersion and principal states in a 147-km undersea lightwave cable. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1185 ~ 1190
- [6] Andresciani D, Curti F, Atera F *et al.*. Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10):844 ~ 846
- [7] Mochizuki K, Namihira Y, Wakabayashi H *et al.*. Polarization mode dispersion measurements in single mode fibers. *Electron. Lett.*, 1981, **17**(4):153 ~ 154
- [8] Xia Yuehui, Huang Yongqing, Chen Xue *et al.*. Research on the variation of output polarization from single-mode fiber with wavelength. *Optical Fiber and Electric Cable (光纤与电缆及其应用技术)*, 2001, **4**(4):10 ~ 11 (in Chinese)

## A New Method to Measure Polarization Mode Dispersion

Xia Yuehui Huang Yongqing Zhang Xia Chen Xue Ren Xiaomin  
(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876)

(Received 7 September 2001; revised 24 January 2002)

**Abstract:** A new method is proposed to measure the output states of polarization of single mode fiber with a polarizer and an optical spectrum analyzer, the differential group delay (DGD) of polarization mode dispersion (PMD) can be acquired. Comparing with previous methods, this new method saves measure time, and decreases the error come from variation of PMD with time, so it can improve the precision of measuring.

**Key words:** polarization mode dispersion; principal state of polarization; differential group delay; Poincaré sphere