

文章编号: 0258-7025(2003)01-0049-04

对邦加球测量偏振模色散算法的研究

夏月辉, 张霞, 黄永清, 陈雪, 任晓敏

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要 对基于邦加球的偏振模色散(PMD)测量方法进行了充分的研究,利用输出偏振态的随机性,提出了一种比较简单而实用的算法,利用这种算法,对11 km单模光纤和1.67 m长保偏光纤进行了测量,实验证明这种算法具有很好的实用价值。

关键词 物理光学;偏振模色散;偏振主态;群时延差;邦加球

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Study of the Arithmetic of Poincare Sphere Method to Measure Polarization Mode Dispersion

XIA Yue-hui, ZHANG Xia, HUANG Yong-qing, CHEN Xue, REN Xiao-min

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The method of Poincare Sphere to measure the polarization mode dispersion (PMD) has been studied in the paper. Based on the statistical character of the output states, a simple and practical arithmetic to calculate the differential group delay (DGD) with the output states of polarization was put forward. With this arithmetic, the PMD of a 11 km long single mode fiber and a 1.64 m long polarization maintain fiber have been calculated, and the feasibility of the arithmetic is confirmed.

Key words physical optics; polarization mode dispersion (PMD); principal state of polarization (PSP); differential group delay (DGD); Poincare Sphere

1 引言

近几年来,偏振模色散(PMD)成了限制高速长距离光纤通信系统的主要障碍,要研究偏振模色散对系统造成的影响,需要对偏振模色散的大小有一个定量的描述,要很好地补偿偏振模色散,更需要准确地知道偏振模色散的大小。此外,正确地评估已有的光纤通信系统偏振模色散的大小,以及对新铺设的光缆线路的工程验收,都需要对系统的偏振模色散进行准确的测量。因此,偏振模色散的测量成了当今通信领域一个重要的方向。

对此,为了规范偏振模色散的度量标准,国际电信联盟(ITU-T)在人们提出的各种偏振模色散测量

方法的基础上,对偏振模色散的测量提出了四种建议方法,它们是 Jones 矩阵法^[1,2]、频谱扫描法^[3,4]、邦加球法^[5,6]、干涉法^[7]。本文对邦加球法测量偏振模色散进行了研究,并提出了一种由输出偏振态计算偏振模色散群时延差的简单而实用的方法。

2 邦加球法基本原理

由偏振主态(PSP)模型可以知道,对于光波在光纤介质中的传输,存在一对正交的输入偏振主态和一对正交的输出偏振主态^[8],在较窄的频率范围内,偏振主态不随频率而变化。沿一输入偏振主态入射的光波,在入射端可以将其分解到两输入偏振

收稿日期:2001-09-17;收到修改稿日期:2002-07-01

基金项目:国家高技术 863 资助项目(编号:2001AA122041)。

作者简介:夏月辉(1969—),男,湖南省安化人。现在北京邮电大学光通信中心攻读博士学位,主要研究领域是偏振模色散及光纤光栅器件的研究。E-mail: yuehuixia@263.net

主态上,两分量经过光纤后,分别沿对应输出偏振主态输出,由于两输出偏振态的群时延不同,它们的差即为群时延差 $\Delta\tau$ (DGD),PSP 和 DGD 描述了一阶偏振模色散。

对光束在光纤中传输,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

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

其中 \hat{s} 代表输出的偏振态在邦加球上的 Stokes 矢量, Ω 代表偏振模色散矢量,其方向对应于 PSP 慢轴的方向。(1)式表明,偏振模色散矢量决定了输出偏振态 \hat{s} 随频率变化的规律:如果能确定每一个波长所对应的输出偏振态,那么通过数据处理可以求出偏振模色散矢量的大小,也就是群时延差 $\Delta\tau$ 的大小,从而可以得到 PMD 系数。

邦加球测量法就是基于以上原理,让发射光的偏振态固定,那么有微小频率间隔的各波长的光波通过光纤后其输出偏振态在邦加球上的对应的点,会绕偏振主态(PSP)右旋,如图 1。旋转速率决定于两偏振主态的群时延差 $\Delta\tau$ (DGD),即偏振模色散矢量的大小,群时延差越大,旋转越快。因此通过测量频率间距为 $\Delta\omega$ 的光波的输出偏振态在邦加球上旋转的角度 $\Delta\theta$,如图 2,可得到群时延差 $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta\omega} \right| \quad (2)$$

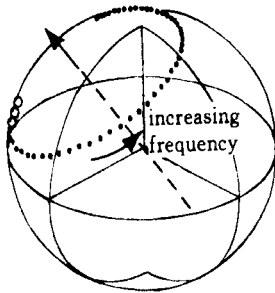


图 1 输出偏振态随波长而绕偏振模色散矢量旋转
Fig. 1 Output polarization states rotate around the PMD vector

3 邦加球测 PMD 算法的研究

在 ITU-T 建议中,群时延差 $\Delta\tau$ 就是用(2)式计算的。由图 2 可知,在计算相邻输出偏振态的旋转角度 $\Delta\theta$ 时,需要确定偏振模色散矢量的方向,因此计算比较麻烦。设输出偏振态 Stokes 矢量与偏振模色散矢量夹角为 α ,两相邻 Stokes 矢量的夹角为

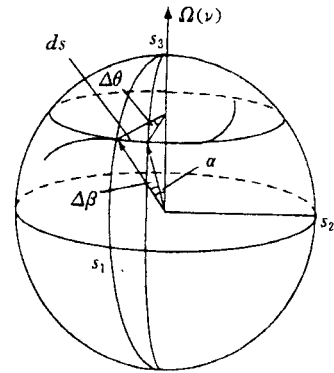


图 2 频率间距为 $\Delta\omega$ 的光波输出偏振态及偏振模色散矢量的夹角关系

Fig. 2 Relationship between the output polarization states nearby and the PMD vector

$\Delta\beta$,在波长间距很小时,有

$$\Delta\theta = \Delta\beta / \sin\alpha \quad (3)$$

因此,偏振模色散计算式(2)可以换成下式

$$\Delta\tau = \left| \frac{\Delta\beta}{\Delta\omega} \right| / \sin\alpha \quad (4)$$

3.1 对单模光纤的测量

在邦加球测量法中,需计算出某波长范围内每一频率的群时延差,再对其取平均,因此利用(4)式计算群时延差时,也需计算每一波长处偏振模色散矢量和相应输出偏振态的夹角 α 。由于在单模光纤中,偏振模色散矢量和输出偏振态是互不相关的随机量,它们的夹角 α 是一随机量,因此,在比较宽的波长范围内,可以计算出夹角 α 的统计分布,利用其分布求出 $1/\sin\alpha$ 的平均值 c ,用其代到(4)式的右边,就可以比较准确地计算出偏振模色散群时延差。

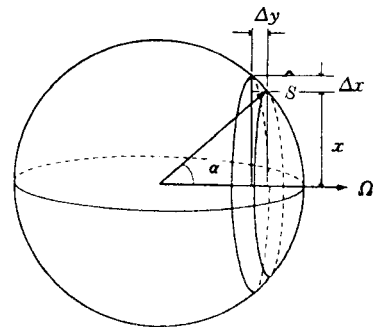


图 3 输出偏振态 \hat{s} 和偏振模色散矢量 Ω 的夹角关系
Fig. 3 Clamp of PMD vector Ω and output polarization state \hat{s} on the Poincaré Sphere

图 3 中 α 是邦加球上偏振模色散矢量 Ω 和 Stokes 矢量 \hat{s} 的夹角,对于比较长的单模光纤,输出

偏振态和偏振模色散矢量都是相互独立的随机量,在比较宽的波长范围内考虑夹角 α 分布时,可以认为 Stokes 矢量 \hat{s} 相当于偏振模色散矢量 Ω 均匀分布于邦加球上,由于邦加球是单位球,令 $x = \sin\alpha$,求 $\sin\alpha$ 的分布时,也就是求 x 的分布,在几何上, $x = \sin\alpha$ 在 $(X, X + \Delta X)$ 内的分布概率可以用图 2 中环带的球面积 ΣA 表示

$$\text{Prob}\{X \leq x \leq X + \Delta x\} = f_x \Delta x = 2 \frac{\Sigma A}{4\pi} \quad (5)$$

f_x 为 x 的概率密度函数,环带面积 ΣA 的大小为

$$\Sigma A = \frac{2\pi \sin\alpha \Delta x}{\cos\alpha} = \frac{2\pi x \Delta x}{\sqrt{1-x^2}} \quad (6)$$

所以

$$f_x = \frac{\Sigma A}{2\pi \Delta x} = \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (7)$$

$$\left\langle \frac{1}{\sin\alpha} \right\rangle = \left\langle \frac{1}{x} \right\rangle = \int_0^1 f_x \frac{1}{x} dx = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (8)$$

因此在比较宽的带宽范围内,由(4)式求群时延差 $\Delta\tau$ 的均值可以表示为

$$\langle \Delta\tau \rangle = \left| \frac{\Delta\beta}{\Delta\omega} \right| \left\langle \frac{1}{\sin\theta} \right\rangle = 1.57 \left| \frac{\Delta\beta}{\Delta\omega} \right| \quad (9)$$

(9)式表明,由邦加球法测量单模光纤偏振模色散的

群时延差时,可以方便地用相邻输出偏振态 Stokes 矢量的夹角 $\Delta\beta$ 来计算。

3.2 对保偏光纤的测量

对于保偏光纤(PMF)偏振模色散的测量,(4)式中的 α 不再是一个随机量,而是一个确定量,因此,用邦加球法测量偏振模色散时,可以先由输出偏振态计算出这一 α ,然后再用(4)式计算偏振模色散群时延差。

4 实验

对邦加球法,我们已提出一种用检偏器和光谱仪同时测量输出偏振态的新方法^[9],用此法测量了一线偏振的宽光源经过 11 km 单模光纤以及经过一保偏光纤后,在某波长范围内的输出偏振态。

对 11 km 单模光纤的输出偏振态的测量,测量了 4 次,其输出偏振态如图 4。

对此单模光纤,用公式(2)计算得到群时延差分别为 0.2080 ps,0.2180 ps,0.2077 ps,0.2150 ps,如果用公式(8)则为 0.3267 ps,0.3424 ps,0.3263 ps,0.3377 ps,可见这种方法的重复性很好。

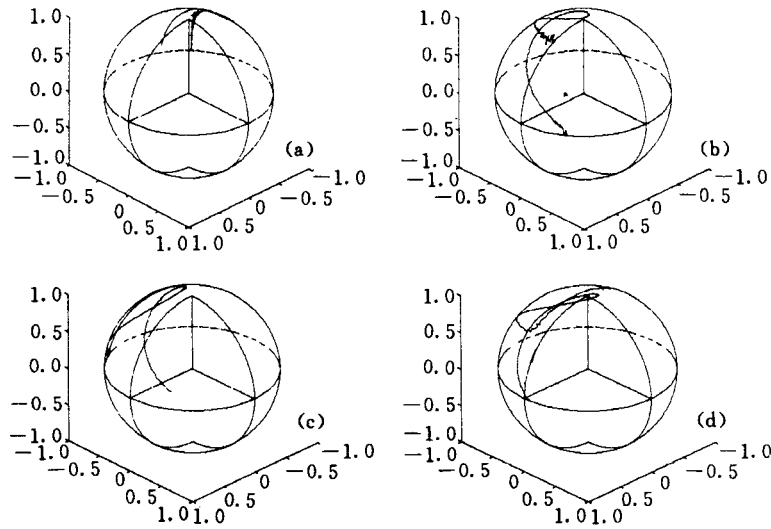


图 4 11 km 单模光纤的输出偏振态

(a) 第一次测量; (b) 第二次测量; (c) 第三次测量; (d) 第四次测量

Fig. 4 Output polarization states of 11 km long single mode fiber for different times

(a) the first time; (b) the second time; (c) the third time; (d) the fourth time

另外,为了检验改进后算法的正确性,我们用 EXFO 公司的偏振模色散测量仪 EXFO-IQ5500,对此单模光纤进行了测量,测量值分别为 0.27 ps, 0.33 ps, 0.32 ps, 0.34 ps。由此可见,用公式(9)对

偏振模色散进行计算时,可以得到比较好的结果。我们测量了 1.67 m 长的偏振模色散值为 3.6 ps 的保偏光纤的输出偏振态(如图 5)。

由图 5 可见保偏光纤的偏振模色散矢量不随波

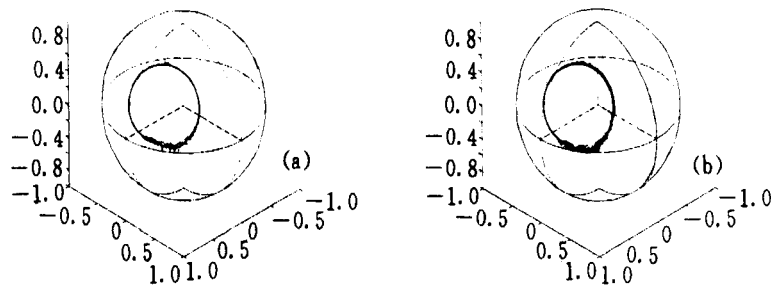


图 5 测量 PMF 的输出偏振态

(a) PMF 在 1545~1555 nm 输出偏振态; (b) PMF 在 1540~1560 nm 范围内输出偏振态

Fig. 5 Measured output states of polarization of PMF

(a) output states of polarization from 1545~1555 nm; (b) output states of polarization from 1540~1560 nm

长而变化。输出偏振态和偏振模色散矢量的夹角 α 是一个确定量,其大小为 31.8° 。用(9)式计算群时延差为 3.62 ps, 3.53 ps, 很接近此保偏光纤的实际值 3.6 ps。

致谢 感谢 EXFO 公司的孙学瑞先生为我们提供了 EXFO-IQ5500 偏振模色散测量仪。

参 考 文 献

- 1 B. L. Heffner. Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones Matrix eigenanalysis [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9):1066~1069
- 2 B. L. Heffner. Accurate, automated measurement of differential group delay dispersion and principal state variation using Jones Matrix eigenanalysis [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7):814~817
- 3 C. D. Poole, D. L. Favin. Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(6):917~929
- 4 C. D. Poole. Measurement of polarization-mode dispersion in single-mode fibers with random mode coupling [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(10):523~525
- 5 C. D. Poole, N. S. Bergano, R. E. Wagner. Polarization dispersion and principal states in a 147-km undersea lightwave cable [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1185~1190
- 6 D. Andresciani, F. Curti, F. Matera *et al.*. Measurement of the group-delay difference between the principal states of polarization on a low-birefringence terrestrial fiber cable [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10):844~846
- 7 K. Mochizuki, Y. Namihira, H. Waka Bayashi *et al.*. Polarisation mode dispersion measurements in single mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1981, **17**(4):153~154
- 8 C. D. Poole, R. E. Wagner. Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19):1029~1030
- 9 Xia Yuehui, Huang Yongqing, Zhang Xia *et al.*. A novel method to measure polarization mode dispersion [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **20**(11):1350~1353 (in Chinese)