

光纤偏振模色散的测量*

龚岩栋 关雅莉 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘 要 光纤中的偏振模色散是限制高速光纤通信系统传输容量的极限因素, 本文报道光纤偏振模色散的测量, 对国内外多种光纤进行了测量比较, 较长的单模非偏振保持光纤的多次测量值满足麦克斯韦概率分布, 同时发现国产的光纤质量有待改进, 最后分析了一些实验中观察到的现象并作了解释和讨论。

关键词 光纤, 色散, 偏振, 双折射。

1 引 言

近年来, 随着光纤通讯和色散补偿方案的迅速发展, 一些高速传输系统的传输速度已达到了几十 Gb/s 甚至几百 Gb/s 以上。而在 OFC '96 国际会议上, 报道了 400 Gb/s 的高速光时分复用(OTDM)系统, 其在传输 40 km 以后, 在没有补偿高阶色散的情况下, 脉宽由初始的 0.98 ps 展宽到 2.3 ps; 而在普通的一阶色散和高阶色散均被补偿以后, 脉宽仍展宽到 1.6 ps, 这说明在皮秒量级的高速系统中另一种色散——偏振模色散(PMD)的影响已不可忽略。如果不消除光纤中的偏振模色散, 不仅使人们在光纤中传输飞秒级光脉冲的愿望不能实现, 而且使目前传输皮秒量级的高速系统的传输容量受到很大的限制, 即使是 10 Gb/s 系统其传输距离也因偏振模色散存在而不能太远, 因此偏振模色散可能成为限制高速光纤通信系统容量和距离的最终因素^[1, 2]。目前偏振模色散已成为国际上光通信研究的热点, 而且国际电信 ITU-T 目前也正在致力于制定光纤中偏振模色散的有关标准。本文作者在国内实现了对光纤中的偏振模色散的测量, 它采用基于主偏振态模型的波长扫描法, 对国内外多种光纤进行了测量比较, 较长的单模非偏振保持光纤的多次测量值满足麦克斯韦概率分布; 同时发现国产的光纤的偏振模色散值偏大且不稳定, 质量有待改进。

2 偏振模色散测量的实现

在高速光纤通信系统引入之前, 偏振模色散的行为只有在高双折射光纤(偏振保持光纤)中才会遇到, 定义为光纤中快、慢轴上的传输群时延差。而在单模光纤中(如无特殊说明, 本文所说单模光纤均指单模非偏振保持光纤, 如普通 SMF, DSF 等), 实际上传输着两个相互

* 国家 863 高科技项目和国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 5 月 17 日; 收到修改稿日期: 1996 年 9 月 9 日

正交的线性偏振模式, 由于光纤的不圆度、边应力、光纤扭曲等造成单模光纤中这两个模式之间有轻微的传输群速度差, 从而形成(线性)偏振模色散。由于随机模耦合, 单模光纤中的偏振模色散呈现出复杂的行为。与偏振保持光纤相对应, 可以证明如果光源的相干时间大于偏振模时延差(光源频谱很窄), 则在光纤中就会存在这样两个特殊的偏振输入方向^[3], 在不考虑高阶偏振模色散时, 对应于这两个特殊方向的偏振输入光的输出偏振态也是相互正交偏振的, 而且信号在输出端并不改变形状, 这样两个特殊的方向称为主偏振态^[4, 5](PSP), 而在两主偏振态上传输的信号的群时延差即定义为偏振模的群时延差(DGD)。在偏振保持光纤中或是在单模光纤中的传输距离较短时, 光纤中的两个模式还未发生耦合, 所以其群时延差是一定值而且与距离成线性关系。而在单模光纤较长时, 由于随机偏振模耦合对温度、环境条件、光源波长的轻微波动都很敏感, 所以它会随时间而发生变化, 因此偏振模群时延差是一统计量, 分布满足麦克斯韦分布规律, 而且其均值与距离的平方根成正比, 这个分布可以是一组相同的单模光纤在同一波长处测量的结果; 也可以是在一根单模光纤中、同一波长处在不同的时间的测量结果; 或是在同一单模光纤中在不同的波长处的测量结果也可得到相同的分布。一根光纤的偏振模群时延差可以用 $\Delta\tau$ 来表示, 而且其平均值 $\langle\Delta\tau\rangle$ 满足:

$$\langle\Delta\tau\rangle^2 = \frac{1}{2} D^2 h^2 \left[\frac{2l}{h} - 1 + \exp\left[-\frac{2l}{h}\right] \right] \quad (1)$$

式中 l 为光纤长度, h 为耦合长度, D 为单位长度光纤中的偏振模群时延差。当光纤的长度远小于耦合长度 h 时, 由上式可得:

$$\langle\Delta\tau\rangle \cong Dl \quad (2)$$

即当光纤的长度远小于耦合长度 h 时(偏振保持光纤或较短的单模光纤), 偏振模群时延差与光纤长度成正比, 它是一定值, 方差为零。

而当光纤的长度远大于耦合长度 h 时, 由(1)式可得:

$$\langle\Delta\tau\rangle \cong D \sqrt{hl} \quad (3)$$

即当光纤的长度远大于耦合长度 h 时(较长的单模光纤), 平均偏振模群时延差与光纤长度的平方根成线性关系, 但此时多次测量的 $\Delta\tau$ 值满足麦克斯韦概率分布:

$$P(\Delta\tau, z) = \frac{2\Delta\tau^2}{\sqrt{2\pi} q^3} \exp\left[-\left[\frac{\Delta\tau}{\sqrt{2} q}\right]^2\right] \quad (4)$$

并且平均值和方差满足:

$$\langle\Delta\tau\rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi}} q, \quad \sigma = \sqrt{\frac{3\pi - 8}{\pi}} q \quad (5)$$

即长单模光纤中的偏振模群时延差的方差趋近于均值的一半。可定义 $\Delta\tau/\sqrt{l}$ 为该长光纤中的偏振模色散, 且很清楚地看出其也满足麦克斯韦分布率, 而偏振模色散均值为 $\langle\Delta\tau\rangle/\sqrt{l}$, 量纲为 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 。

较好的单模光纤中的平均偏振模色散值一般在 1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ 以下, 用以往的测试方法是无法测量出结果的。本文所采用的测试系统是基于上述的主偏振态模型产生的, 称为波长扫描法。由于光源波长的变化会影响主偏振态的变化, 连续的不同波长的输入偏振光经光纤中的随机模耦合后产生连续的不同偏振态的输出光, 再经检偏器后在光谱分析仪上看到的衰耗谱应该是一条振荡谱线。可以证明此时可用谱线极值分析法来计算待测光纤的偏振模色散值^[6, 7]。

实验光路如图 1 所示。从宽带白光源出来的光通过掺铒光纤放大器(EDFA)后, 经过起偏器成为线偏振光, 再通过一段待测光纤, 光纤的输出光再通过检偏器, 其光强再用光谱分析仪作波长扫描谱测量。光谱平坦的光源、高消光比的起偏器以及具有较宽的扫描范围和较高分辨率(相当于频谱越窄、相干时间越长)的光谱分析仪是偏振模色散值精确测量的可靠保证。

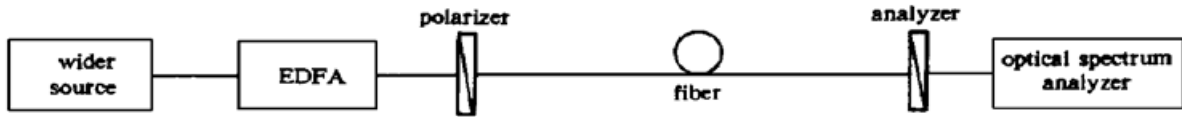


Fig. 1 Configuration of wavelength scanning methods

图 2 所示为所测试的一盘进口的色散位移光纤和一盘国产的偏振保持光纤的光谱分析仪输出的典型图形。其中光路中的起偏器、检偏器的方向可以是任意的。在光谱分析仪上输出多峰值的振荡谱线, 若在扫描波长间隔内曲线中极大值的数目为 n 个, 则 $N = n - 1$ 相当于

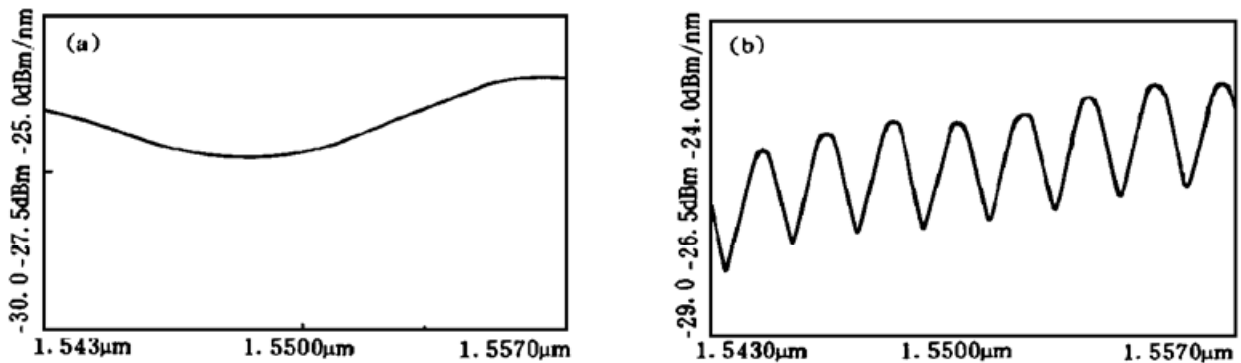


Fig. 2 Typical output figures on optical spectrum analyzer

(a) Figure of imported dispersion shifted fiber. (several kilometers); (b) Figure of polarization maintaining fiber. (several meters, made in China)

该波长间隔内的周期数(可以是非整数), 则待测光纤内的偏振模群时延差为^[6]:

$$\Delta\tau = N/\Delta f = N\lambda_1\lambda_2/c\Delta\lambda \quad (6)$$

其中 λ_1 、 λ_2 为光谱分析仪扫描波长范围的上下限波长, $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$, c 为光速。

用具有恒定偏振模色散值的三种偏振保持光纤进行了测量系统的校准, 用本实验系统测量得到的时延值推算出该光纤的拍长与厂家提供的同一波长处(1.31 μm)的拍长值相比较, 误差均在 5% 以内(误差与光纤长度测量准确性关系较大)。如表 1 所示, 证明本实验系统测试的结果是正确的。

Table 1. Measured results of polarization maintaining fibers

	length l (m)	DGD $\Delta\tau$ (ps)	PMD ps/km	measured beat L_B (mm)	original beat L_B (mm)	error (%)
imported PMF1#	6.00	13.20	2200.0	2.00	2.10	4.8
PMF2# (China)	3.65	4.57	1254.0	3.49	3.60	3.1
PMF3# (China)	4.05	5.55	1370.0	3.19	3.05	4.6

3 测试结果和讨论

表 2 为对国内外各种单模光纤的偏振模色散(表 2 中数据都指平均值)的测试结果。

Table 2. Measured PMD values of various single mode fibers

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
fiber type	imported SMF1#	imported SMF2#	imported SMF3#	imported DSF	DSF1# (China)	DSF2# (China)	DSF3# (China)	DSF4# (China)	SMF
length (km)	4.68	6.69	12.40	10.60	8.26	9.45	11.67	22.28	6.15
DGD $\Delta\tau$ (ps)	0.65	0.62	0.56	0.45	0.56	2.50	13.50	14.30	0.67
PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	0.30	0.24	0.16	0.14	0.19	0.81	4.0	3.0	0.27
deviation σ	0.13	0.12	0.07	0.06	0.08	0.36	2.1	1.3	0.13

从表 2 中的测试结果可以看出进口单模光纤的质量远好于国产的同类光纤,各种光纤的平均偏振模色散值均小于 $0.3 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$;国内某厂家生产的 DSF 光纤的偏振模色散有大有小,质量相差很大,DSF1# 和 DSF2# 光纤的偏振模色散较小,而 DSF3# 与 DSF4# 光纤的偏振模色散值可以与普通一阶色散值相比拟;9# 普通单模光纤的偏振模色散值也较小,但其是用进口预制棒在国内拉丝而成的。从以上数据可以看出,国产的光纤质量不稳定,厂家还没有将偏振模色散值列为光纤质量的一项指标来加以改进,所以生产具有稳定质量的较小偏振模色散值的光纤是国内光纤生产厂家为适应未来高速光通信系统发展所必须重点解决的问题。

在测量中发现当接入的是偏振保持光纤而长度又长时测量结果不准确,作者认为这是由于使用的 Advantest 公司 Q8344A 光谱分析仪在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的扫描步距为 0.116 nm ,若想完全分辨出谱线起伏,则在此间隔内谱线周期数最大应不超过半个周期,所以偏振模群时延差的最大测量范围为:

$$\Delta\tau = \frac{0.5 \times 1549.942 \times 10^{-9} \times 1550.058 \times 10^{-9}}{3 \times 10^8 \times 0.116 \times 10^{-9}} \approx 34.5 \text{ ps} \quad (7)$$

在测量中还发现测量窗口范围越大,则群时延差的测量精确度越高。因此同样可计算出测试系统的群时延差的最小测量精确度,由于掺铒光纤放大器光谱最大的可用的平坦区间为 20 nm ,可分辨的最小周期数为 $1/2$ 个周期数,则群时延差的最小测量范围为:

$$\Delta\tau = \frac{0.5 \times 1540 \times 10^{-9} \times 1560 \times 10^{-9}}{3 \times 10^8 \times 20 \times 10^{-9}} \approx 0.2 \text{ ps} \quad (8)$$

也即系统的群时延差测量范围为 $0.2 \text{ ps} \leq \Delta\tau \leq 34.5 \text{ ps}$,因此若要测量偏振保持光纤,其长度要短,约小于 10 m 即可;而对偏振模色散较小的 DSF 光纤要加大长度才能提高准确性。

在测量中同时发现对偏振保持光纤和短长度非偏振保持光纤,偏振模色散不是统计值,而是固定的,且与长度成线性关系,在实验中表现为在光谱分析仪上输出的是扫描范围内的周期数目基本稳定的正余弦曲线;而对较长的非偏振保持光纤,其偏振模色散的多次测量值成麦克斯韦分布,平均值与长度的平方根成正比,在实验中表现为在光谱分析仪输出的扫描范围内的曲线极大值数目呈一定范围内的波动。图 3 是对进口的 DSF 光纤在三天内进行的 80 余次测量后根据其偏振模色散分布画出的直方图,可以看出图形与麦克斯韦分布规律很

吻合, 最大概率处为 $0.11 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$, 而平均值为 $0.13 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 。而图 4 为其中一整天内对该进口的 DSF 光纤进行测量的偏振模色散值变化情况。在上午 11 时左右观察到了偏振模色散值在超过一个小时的时间内未发生变化; 而在当天中午 1 点左右, 天气转阴开始刮风降温。从图 4 可以看出此时偏振模色散值发生剧烈变化。傍晚后天气转晴, 又引起偏振模色散值的波动。图形中时间的滞后可能是由于测量是在室内进行的缘故。这说明了外界温度变化对光纤的偏振模色散值确有影响, 并且温度变化越大、越快, 则偏振模色散值变化越剧烈, 并且这一波动不可逆转。

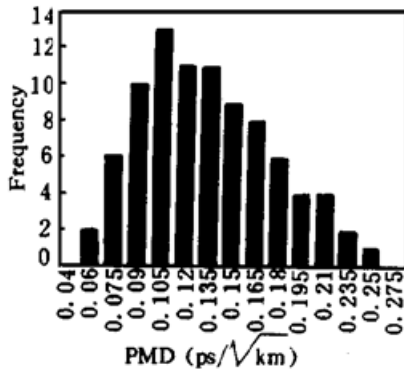


Fig. 3 Histogram of measured PMD values in imported DSF

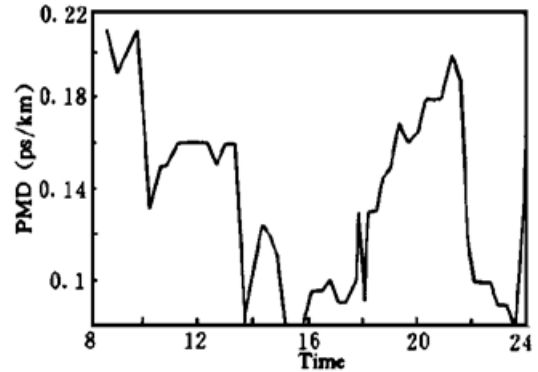


Fig. 4 Change of measured PMD values in imported DSF in a whole day

另外在测量中还发现波长扫描法中光谱分析仪上输出的谱线在一定温度范围内会随温度发生漂移, 即在环境温度改变时, 光谱分析仪上输出的谱线会沿着波长横坐标产生平移。上午温度升高时, 曲线向长波长方向移动; 下午温度降低时, 曲线向短波长方向移动, 并且曲线形状基本不变。作者分析有两个因素影响偏振模色散漂移: 首先, 温度改变时会引起光纤的热胀冷缩效应, 因此在光纤末端的偏振模和主偏振态间的群时延会发生变化, 它可以由波长漂移来补偿。其次双折射通过硅光纤内部应力与温度线性相关, 它也可以由波长漂移来补偿, 而且这是决定性因素, 理论上计算这个温度漂移率为 $1.3 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}^{[8]}$, 测量结果为 $1.1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 其中的结果偏差可能与测量温度不准有关。

基于偏振模色散对未来高速光通信系统的重要性, 作者建议在色散管理方案中应加入对偏振模色散的研究、管理。实际上已经提出了几种减小和消除光纤中偏振模色散的方案, 从制造光纤工艺角度出发, 可以尽力使光纤保持圆对称性、减少耦合长度, 来减小光纤本身的偏振模色散; 从系统传输角度出发, 可以采用主偏振态的传输法; 光无源器件应尽量采用各向同性的材料制作; 最近又发现光纤中可以利用非线性效应(如光克尔效应)和光孤子传输中两方向分量相互吸引的效应来部分补偿偏振模色散, 如果这一点能够实现, 加上光孤子的其它优点, 则光孤子传输系统将可能成为光纤通信未来的发展方向。

结 论 光纤中的偏振模色散是限制高速光纤通信系统传输容量的极限因素, 作者首次在国内实现了对光纤偏振模色散的测量; 对国内外多种光纤进行了测量比较, 较长的单模非偏振保持光纤的多次测量值满足麦克斯韦概率分布; 首次分析了使用该方法能够测量偏振模色散的范围; 从所测数据发现国产的光纤质量有待改进, 生产厂家在质量中应包括偏振模色散这项指标; 最后分析了波长扫描法中的测量谱线随温度漂移现象。鉴于偏振模色散对未来高速光通信系统的重要性, 建议在色散管理方案中应加入对偏振模色散的研究、管理、控制。

参 考 文 献

- [1] Takashi Ono, Shuntaro Yamazki, Haruhito Shimizu *et al.*, Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems. *J. Light. Tech.*, 1994, **12**(5) : 891~ 898
- [2] Brian L. Heffner, PMD measurement techniques —— a consistent comparison, Optical Fiber Conference '96 Technical Digest, New Orleans, American, 1996 : 292
- [3] A. Galtarossa, C. G. Someda, Polarization mode dispersion in long single-mode-fiber links: a review. *Fiber and Integrated Optics*, 1994, **13**(2) : 215~ 229
- [4] C. D. Pool, R. E. Wagner, Phenomenological approach to polarization dispersion in long-single-mode fibers. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(19) : 1029~ 1030
- [5] N. Gisin, J. P. Pellaux, Polarization mode dispersion: time versus frequency domains. *Opt. Commun.*, 1992, **89** : 316~ 323
- [6] Y. Namihira, J. Maeda, Comparison of various polarization mode dispersion measurement methods in optical fibers. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(25) : 2265~ 2266
- [7] Craig D. Poole, David L. Favin, Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer. *J. Light. Tech.*, 1994, **12**(6) : 917~ 929
- [8] Marc C. de Ligmie, Huub G. J. Nagel, M. Oskar van Deventer *et al.*, Large polarization mode dispersion in fiber optic cables. *J. Light. Tech.*, 1994, **12**(8) : 1325~ 1329

Measurement of Polarization Mode Dispersion in Fiber

Gong Yandong Guan Yali Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 17 May 1996; revised 9 September 1996)

Abstract Polarization mode dispersion in fibers seriously limits high-capacity optical fiber communication system. We measured many kinds of fibers and analyzed their results. The measured results of longer non-polarization maintaining fiber are fit to Maxwell distribution. And we find the quality of fibers made in China need to be modified. Some phenomena observed in experiments are interpreted and discussed.

Key words fiber, dispersion, polarization, birefringence.