

# 基于波长调制的低双折射光纤拍长测试

徐宏杰 冯宇\*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 提出了一种基于波长调制的低双折射光纤拍长测试方法。测试方法采用波长调制的方式进行拍长测试,应用相位检测技术提高信号精度,采用相位补偿手段保证较高检测灵敏度。测试光路包括放大自发辐射(ASE)光源、法布里-珀罗可调谐滤波器、两个起偏器、待测光纤及相位补偿片。通过对线保偏光纤和普通单模光纤进行重复实验,对测试装置进行了实验验证。本方法结构简单,对器件性能要求不高;对光纤长度及结构无特殊要求,适用范围广;拍长测量范围达到20 m,测试误差小于1%。

**关键词** 光纤光学;拍长;波长调制;低双折射光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.030601

## Measurement of Beat-Length for Low-Birefringence Fibers Based on Wavelength Modulation

Xu Hongjie Feng Yu

*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

**Abstract** A measurement of beat-length in low-birefringence fibers based on wavelength modulation is shown. It measures the beat-length by wavelength modulation. Phase detection is chosen to reduce the error from environment influence. Phase compensation plate is used to ensure the testing system always sensitive to the change of phase. The optical path consists of an amplified spontaneous emission (ASE) light source, a fiber Fabry-Perot tunable filter, two linear polarizers, the measured fiber and a phase compensation plate. The testing system is set up and tested in reality. The system performs well in the repeated test. It is simple and has no strict demand on these equipments. There is no limitation on the configuration and the length of the testing fiber in the measurement. It is reliable for fibers whose beat-length is up to 20 m. The beat-length precision of the measurement is less than 1%.

**Key words** fiber optics; beat-length; wavelength modulation; low-birefringence fiber

**OCIS code** 060.2280; 060.2310; 260.1440

## 1 引言

低双折射光纤<sup>[1]</sup>是一种具有圆保偏性能的特殊光纤,在光纤电流传感领域有广泛应用。其双折射特性直接影响传感精度,是评价光纤性能的重要参数。低双折射光纤双折射系数很低,目前国外已经出现相位延迟为 $0.75^\circ/\text{m}$ 的成品光纤,同时其双折射特性对环境因素变化非常敏感。现有光纤双折射测试方法包括压力法<sup>[2]</sup>、磁光调制法<sup>[3]</sup>、白光干涉法<sup>[4]</sup>、剪断法<sup>[5]</sup>、波长扫描法<sup>[6]</sup>、光纤光栅法<sup>[7]</sup>等。以上方法均适用于高双折射光纤的拍长测试,测试拍长范围一般不超过10 mm,部分方案的精度达到了0.01 mm。以上方法在测量低双折射光纤拍长时,由于测试原理限制、测量精度随拍长变长而降低、实际操作难度大等因素而无法适用。在国外有少量拍长测试范围较大方法的报道,包括Sagnac法<sup>[8]</sup>、偏振往复脉冲法<sup>[9]</sup>等,其拍长测试范围达到10 m以上,但是上述方法仍然存在理论拍长测试范围有限,实现方法复杂,关键器件性能要求高等限制。

在波长扫描法的基础上提出了一种基于偏光干涉效应的双折射测试方法,能够满足低双折射光纤拍长

收稿日期: 2013-10-12;收到修改稿日期: 2013-11-06;网络出版日期: 2014-02-19

作者简介: 徐宏杰(1968—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事光电方面的研究。E-mail: bbhxuhongjie@262.com

\*通信联系人。E-mail: fengyu27545@126.com

测试的要求,测试拍长范围达到 20 m,精度达到 1%。

## 2 测试方案

根据光纤的双折射特性,可以将光纤等效为快轴、慢轴与光传播方向正交的双折射晶体。线偏振光在光纤中传播,可以分解为振动方向沿快轴、慢轴两正交方向的偏振模式  $HE_{11x}$ ,  $HE_{11y}$ , 当两偏振模传播一定距离后,受光纤双折射特性调制,两者之间产生相位差  $\delta$ , 通过检偏器时两正交偏振模的分量发生干涉,即偏光干涉效应。对输入光的波长进行调制,根据干涉光强的变化规律可以求出相位差  $\delta$ , 进而得到待测光纤拍长。

测试装置如图 1 所示。测试装置中采用调制解调仪对法布里-珀罗(F-P)可调谐滤波器加入正弦调制信号控制波长变化并解调信号。下文应用琼斯矩阵模型对测试原理进行分析。

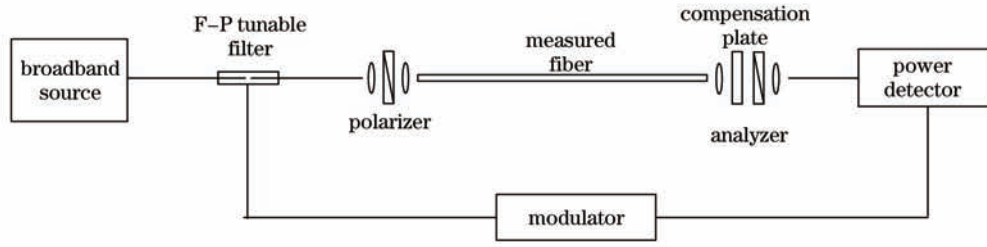


图 1 低双折射光纤拍长测试装置示意图

Fig.1 Principle diagram of beat-length measurement for low-birefringence fibers

设各器件均为理想器件,忽略器件损耗,宽谱光源发出的宽谱光波经滤波器成为窄线宽光波,其光场表示为

$$E_0 = E \exp[i(2\pi c/\lambda + \varphi)] \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $E$  为光场振幅,  $c$  为真空中光速,  $\lambda$  为波长,  $\varphi$  为光波的初始相位,  $\theta$  表征光的偏振态。待测光纤传输矩阵表示为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中

$$\delta = 2\pi LB/\lambda, \quad (3)$$

式中  $\delta$  为待测光纤线性双折射效应产生的相位差,  $L$  为待测光纤长度,  $B$  为光纤双折射系数, 待测光纤的拍长即为  $L_b = \lambda/B$ 。

起偏器与检偏器的传输矩阵相同

$$M_{\text{pin}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$M_{\text{pout}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  分别为起偏器、检偏器透光轴与待测光纤等效快轴的夹角。

当不加入相位补偿片时,光路输出光场为

$$E = M_{\text{pout}} \cdot M \cdot M_{\text{pin}} \cdot E_0. \quad (6)$$

设入射光为自然光,探测器接受的光强  $I$  为输出光场的共轭积

$$I = EE^* = I_0(K_1 + K_2 \cos \delta), \quad (7)$$

式中  $I_0 = |E(\cos \theta_1 + \sin \theta_1)|^2$  为通过起偏器的光强。  $K_1 = \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2$ ,  $K_2 = 2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2$  为起偏器与检偏器的性能和角度决定的参数。

由(3)式和(7)式可知,保持待测光纤长度  $L$ 、起偏器和检偏器角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  不变的情况下,改变入射光波长  $\lambda$ , 待测光纤双折射效应产生的相位差  $\delta$  随之变化,引起输出光强  $I$  的周期性变化,变化曲线为与波长相关的

余弦曲线(图2),据此可以测量待测光纤的拍长 $L_b$ 。

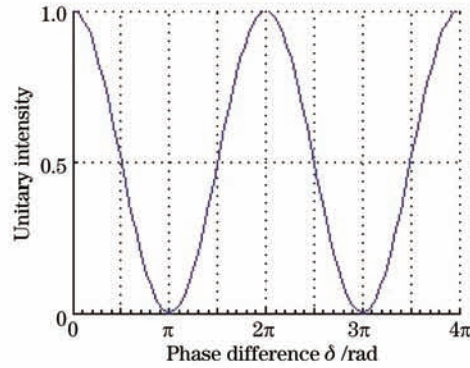


图2 输出光强与相位差 $\delta$ 关系曲线

Fig.2 Output light intensity versus phase difference

相位补偿片在测试装置中引入一定附加相位差 $\delta_m$ ,改变检测相位。根据待测光纤产生的相位差 $\delta$ 决定是否加入,相位补偿机制在后文第5节中详细分析。

### 3 精度分析

测试装置选用的F-P可调谐滤波器的带宽为0.5 nm,当入射光中心波长为1550 nm时,测试光相干长度 $\Delta = \lambda^2/\Delta\lambda = 48.05$  mm。当两正交偏振模发生干涉时,待测光纤产生的光程差不能超过相干长度,即满足 $\delta\lambda/2\pi < \Delta$ ,得到 $L < 3100L_b$ ,在实际实验过程中该条件容易实现。

对(7)式求导可知,当起偏器、检偏器角度 $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ (或 $135^\circ$ )时,输出光强的对比度最高。分析发现,当起偏器角度 $\theta_1 = 45^\circ$ (或 $135^\circ$ )时,转动检偏器一周发生的光强变化与调制波长获得的光强变化存在一定的数值关系(图3),其光强变化的中值相等。

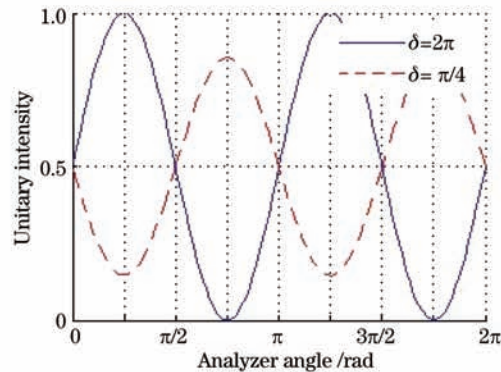


图3 起偏器角度变化时的光强曲线

Fig.3 Light intensity versus polarizer angle

根据以上数值关系,可以粗略确定测试中光纤双折射效应产生的相位差 $\delta$ ,为数据处理提供参考值。

应用偏光干涉效应测量不同拍长的光纤,其产生的相位差 $\delta$ 不同。线保偏光纤拍长较短,一般为毫米级,低双折射光纤拍长可达数十米甚至上百米。由(7)式可知,若波长调制范围为10 nm,待测光纤长度为2 m,对于拍长为1 mm的光纤,相位差变化达到81.6 rad,可以获得完整的波长变化周期曲线;而当光纤拍长达到100 m时,待测相位差变化仅为0.001 rad。为此,本测试方案中采用相位检测技术,可以分辨输出信号 $10^{-4}$  rad的相位变化,光纤拍长达到100 m时本测试方法仍然能保证一定的测试精度。

### 4 波长调制及光功率补偿

由上节分析可知,与保偏光纤的拍长测试不同,低双折射光纤的拍长测试中,实验产生的相位差变化很小,光电探测器接受的光强信号变化非常微小。因此,在低双折射光纤测量中,环境因素影响及光源光谱平坦度成为了重要的误差因素。本节中分别采取措施减小以上两项因素引起的误差。

环境因素如侧向压力、弯曲或者温度变化等会引起相位差  $\delta$  的变化,对线保偏光纤而言,环境因素引起的相位差变化远远小于光纤双折射效应的相位差变化,不会造成混淆。而低双折射光纤双折射效应与环境因素产生的相位差变化量级接近,不易直接分辨。对于实际情况而言,环境因素影响的变化频率一般低于 1 Hz,为消除环境影响,测量过程中对入射光波长进行调制,采用调制解调仪对 F-P 可调谐滤波器加入 1 kHz 正弦调制信号,可以有效滤除环境因素干扰,提高检测精度。

由(7)式可知,输出光强  $I$  直接受入射光强  $I_0$  的影响。宽谱光源的光谱平坦度直接影响检测光强,其与波长变化相关且变化较平缓,因此无法通过信号调制解调或滤波消除,需要针对测试光源光谱进行光功率补偿。

本课题采用的宽谱光源为放大自发辐射(ASE)光源,其时间稳定性好、输出功率较高、偏振度低。与常见的可调谐激光光源相比,其噪声水平低,在实验中稳定性优于激光光源;偏振度低,发出的光受到待测光纤之前光路双折射效应的影响极低。

在实验过程中可以认为 ASE 光源光功率不变,记录可调谐滤波器的输出光强作为光源的光强谱线,对测试结果进行归一化处理,即可达到光功率补偿的目的,无需再增设输入光功率监测光路。

## 5 相位补偿

对于拍长大于 0.5 m 的光纤,若采用本实验方案,波长调制范围为 40 nm,光纤长度为 2 m 以内,则无法获得完整的光强变化周期,且待测光纤偏光干涉效应产生的相位差  $\delta$  不固定。

当待测光纤产生的相位差  $\delta$  接近  $\pi$  的整数倍时,检测灵敏度迅速恶化,在测试光路中加入相位补偿器,移动相位检测点,保证检测灵敏度,理想相位补偿效果如图 4 所示。

相位补偿片的传输矩阵为

$$M_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_m) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $\delta_m = 2\pi\Delta n d/\lambda$  为相位补偿片两轴之间的相位差,  $\Delta n$  为其两轴的折射率差,  $d$  为相位补偿片厚度。

在测试装置中加入相位补偿片,快轴与待测光纤等效快轴重合,与检偏器透光轴夹角为  $45^\circ$ ,探测器处的光强变为

$$I = I_0[K_1 + K_2 \cos(\delta + \delta_m)]. \quad (9)$$

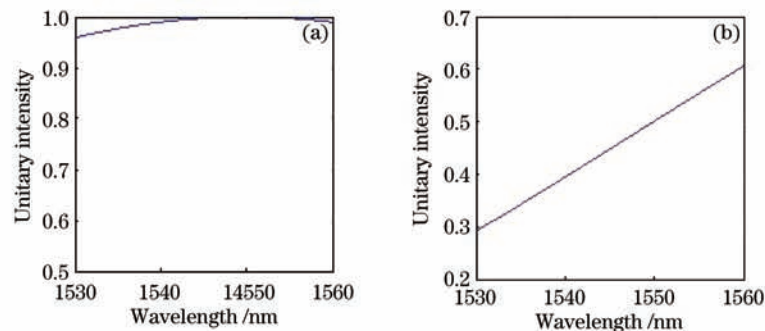


图 4 相位补偿影响测试灵敏度(光纤长度 5 m,拍长 1 m)。(a)无相位补偿,光强变化 4.2%;(b)相位补偿  $\pi/2$ ,光强变化 28.0%

Fig.4 Phase compensate affects testing sensitivity (fiber length of 5 m, beat-length of 1 m). (a) No phase compensate, intensity changes 4.2%; (b) phase compensate of  $\pi/2$ , intensity changes 28.0%

相位补偿片产生的附加相位差也会随波长的变化产生附加相位差变化,当待测光纤拍长小于 20 m 时,其与待测光纤产生的相位差变化相比数量级相同或更小,可以在数据处理中进行补偿计算,不会对测试结果造成影响。

## 6 实验结果及分析

实验中采用谱宽为 40 nm 的 ASE 光源;可调谐 F-P 滤波器带宽为 0.5 nm,调节范围为 1520~1620 nm;波长调制频率为 1 kHz;起偏器、检偏器消光比为 30 dB。

低双折射光纤拍长测试缺乏评判标准,首先采用线保偏光纤检测测试方案的精度。

对线保偏光纤进行双折射测试, 光纤长度为 561.2 mm, 得到的光强-波长曲线如图 5 所示。

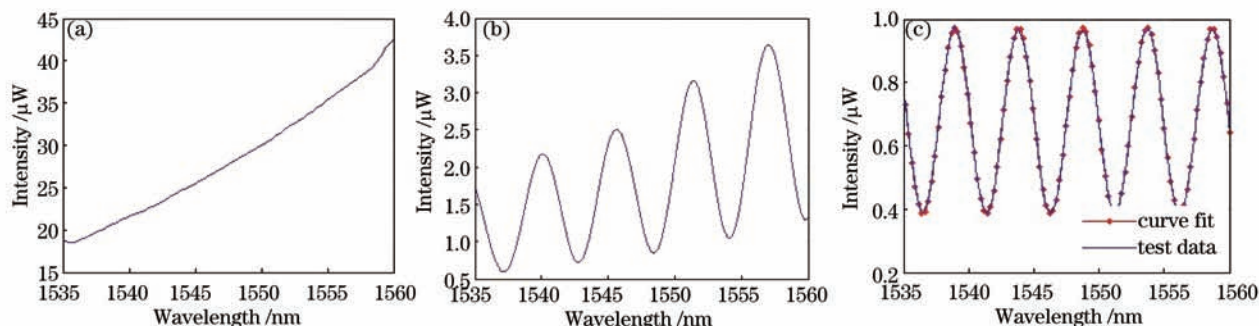


图 5 线保偏光纤拍长测试实验数据。(a) ASE 光源光谱; (b) 测试原始数据; (c) 归一化及曲线拟合

Fig.5 Testing data of polarization maintaining fiber's beat-length. (a) Spectrum of ASE source; (b) origin test data; (c) unitary and curve fit

由图 5 可以看出, 对于保偏光纤, 光源功率谱变化与测量数据的变化易于分辨, 可以直接获得数据变化周期, 计算拍长。归一化处理后进行曲线拟合, 得到的拍长为 1.78 mm, 重复测试得到的结果误差为  $\pm 0.01$  mm, 厂家提供的拍长参数为 1.80 mm ( $\pm 0.02$  mm), 考虑到测量环境及测量方法不同等因素, 实验结果与厂家参数是高度一致的。

对普通单模光纤进行双折射测试, 光纤长度为 2.97 m, 测试结果如图 6 所示。曲线拟合得到的拍长为 13.96 cm。

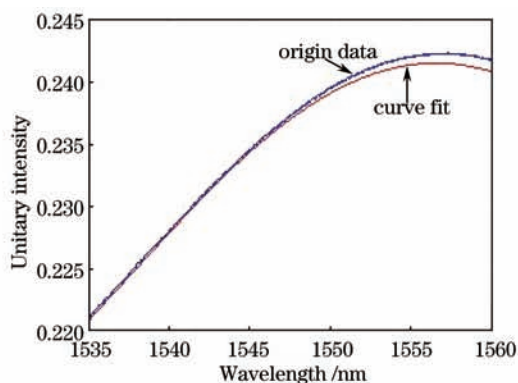


图 6 普通单模光纤拍长测试实验

Fig.6 Ordinary single-mode fiber beat-length testing experiment

实验中采用方程  $A + B \cos(Cx + D)$  进行曲线拟合, 其中参数  $C = 2\pi LB$ , 由此可以计算出测试光纤的拍长  $L_b = 2\pi\lambda\lambda/C$ 。其中测试光纤长度误差为 0.1 mm, 波长调制误差为 0.01 nm, 实际曲线拟合中参数  $C$  标准差不大于 30, 由此计算得到光纤拍长误差为  $\pm 0.3\%$ 。测试光纤的拍长越大, 参数就  $C$  越小, 但其标准差并不成比例减小, 当光纤拍长达到 20 m 时, 光纤拍长误差约为  $\pm 1.2\%$ , 仍能保证足够的检测精度。

## 7 结 论

提出了一种应用偏光干涉效应的光纤双折射测试方法, 可以进行低双折射光纤拍长的测试。当测试光纤拍长不大于 20 m 时, 可保证测量误差小于 1.2%。该测试方法对待测光纤长度及结构无要求, 适用性广; 对器件要求不高, 易于实现及操作; 理论拍长测试极限大于 100 m。如果对实验方案中的相位补偿机制进一步研究, 可以采用电路反馈控制相位补偿, 将检测相位精确控制为  $\pi/2$ , 实现闭环自动测量, 有能力对拍长达数百米的光纤双折射性能进行评价。

## 参考文献

- 1 Wang Jingfei, Liang Jingwei, Dong Qianmin. Study of sensing coil errors in in-line Sagnac interferometer current transducer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 102303.

- 王景飞, 梁京伟, 董前民. 反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 102303
- 2 L Peng, L Feng, X Zhang, *et al.*. Research on all fiber beat length measurement systems for polarization-maintaining fibers [C]. SPIE, 2011, 7997: 799723.
- 3 Zhang P G, Halliday D I. Measurement of the beatlength in high birefringent optical fiber by Way of magnic to optic modulation [J]. Journal of Lightwave Technology. 1994.12(4): 597-602.
- 4 Yuan Libo. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry [J]. Acta Optica Sinica. 2011, 31(9): 0900137. 苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900137.
- 5 Shi Zhidong, Bao Huanhuan, Liu Shu. Beat-length measurement of high-birefringence holey optical fiber by cutback method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 69-73. 石志东, 包欢欢, 柳 树. 背向切割法测量高双折射多孔光纤拍长[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 69-73.
- 6 Jiang Nuan, Li Zhiyong. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0706003. 姜 暖, 李智忠. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0706003.
- 7 Xia Li, Li Xuhui, Yin Yuzhe, *et al.*. Study for writing fiber Bragg grating into birefringent fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 1004-1007. 夏 历, 李栩辉, 殷玉喆, 等. 在保偏光纤上制作光纤光栅的应用研究[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 1004-1007.
- 8 B Ibarra Escamilla, E A Kuzin, F Gutiérrez Zainos, *et al.*. Measurements of beat length in short low-birefringence fibers [C]. SPIE, 2003, 4829: 89-93.
- 9 C S Brown, F T Stone. Birefringence Measurement of single-mode fibers using the polarization shuttle pulse technique [J]. J Light-wave Technol, 1986, 4(1): 30-32.