

保偏光纤侧视光强相关峰锐度的定轴方法

翁晓泉, 冯迪, 黄怀波, 赵正琪

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 在保偏光纤偏振轴的定位和对准技术中, 侧视成像法为目前的主要方法。现有的侧视成像法对光强形貌特征具有较高要求, 为了提高它们的通用性, 提出了基于侧视光强相关峰锐度的定轴方法。该方法首先通过侧视光强曲线间的相关运算得到相关系数曲线, 进而利用相关系数曲线的峰值尖锐程度作为特征值。相比于传统侧视成像法, 该方法不受光强形貌特征的限制, 因此具有更强的通用性。为了提高该方法的精度, 对不同观测平面的定轴精度进行了比较, 从而确定了具有理想定轴精度的观测平面范围。在此基础上, 对该方法的实际精度进行了实验验证, 结果表明: 利用该方法可以获得优于 0.9° 的定轴精度。

关键词: 定轴; 保偏光纤方法; 侧视成像; 偏振轴; 互相关

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1122001

Alignment method based on peak's sharpness degree of correlation coefficient profile of side-view images for polarization maintaining fibers

Weng Xiaoquan, Feng Di, Huang Huaibo, Zhao Zhengqi

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The side-view-image methods are playing important roles in the location and alignment of birefringent axes of Polarization Maintaining (PM) fibers. However, due to be restricted by light-intensity distribution characteristics, almost all of the side-view-image methods were of low applicability. In order to improve the applicability of side-view-image methods, a new alignment algorithm based on the peak's sharpness degree of correlation coefficient profile was developed. Correlation coefficient profiles were acquired by calculating the correlation among light-intensity profiles, then the peak's sharpness degree of correlation coefficient profiles was denoted as characteristic value. Compared with traditional side-view-image methods, the novel method was not restricted by light-intensity characteristics, so it shows excellent applicability. To improve the precision of angle orientation, alignment accuracy was measured on different observation planes in a series of experiments and the observation position with high alignment precision was acquired. Finally, the alignment precision of these position was analyzed with the help of practical experiment. According to the experiment result, alignment accuracy better than 0.9° is achieved.

Key words: azimuthal alignment; polarization-maintaining fibers; side-view-image method; birefringent axes; cross correlation

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家重大科学仪器专项(2013YQ040877)

作者简介: 翁晓泉(1990-), 男, 硕士生, 主要从事保偏光纤定轴技术方面的研究。Email: wengxq0614@163.com

导师简介: 冯迪(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感及微结构光学方面的研究。Email: fengdi@buaa.edu.cn

0 引言

保偏光纤 (Polarization-Maintaining Fibers, PMF) 由于其稳定的偏振保持特性, 在长途高速通信与光纤传感等领域受到了广泛的应用^[1-3]。在实际应用中, 如保偏光纤耦合器的制造^[4], 保偏光纤偏振轴的精确定位是一项必不可少的关键技术。为此, 国内外的专家学者们提出了各种定轴方法。根据通光与观测方向, 目前定轴方法主要可分为两类: 纵向法与横向法。

纵向法是指沿光纤芯轴方向观测确定偏振轴的方法, 主要有消光比法^[5]、光弹效应法^[6]和白光干涉法^[7]等。尽管纵向法具有较高的定轴精度, 然而由于对装置具有较高要求及操作复杂等问题, 因此只在特殊场合。

横向法主要指侧视成像法, 该方法在垂直于芯轴方向的横截面上观测确定偏振轴^[8-11]。根据所选观测平面及光强分布曲线形貌特征的不同, 侧视成像法可分为 POL 法(Polarization Observation by the Lens-effect Tracing)、PAS 法(Profile Alignment System)、五点法等不同方法。侧视成像法由于装置简单、定轴精度较高等优点, 作为目前主要的定轴方法。

传统侧视成像法在一定程度上和范围上实现了保偏光纤定轴, 但仍存在一些问题。首先, 该方法对光强形貌特征均具有较高的要求, 如为了从光强曲线中获得特征值, POL 法、PAS 法、五点法分别要求光强形貌特征具有一个峰值、两个峰值、三个峰值。然而, 在实际工作中不同类型保偏光纤所产生的侧视光强形貌特征具有一定差别, 很多情况下无法获得定轴所需的光强形貌特征。其次, 传统侧视成像定轴法均要求提取光强曲线中的特征点。而在实际工作中由于各类噪声的影响, 特征点将变得不明显, 此时, 特征点的提取将变得比较困难。因此, 传统侧视成像定轴法受这些因素的限制, 通用性不高。

针对传统侧视成像法所存在的问题, 文中提出了基于侧视光强相关峰锐度的定轴方法。与传统方法相比, 该方法适用于各类光强形貌特征, 具有更强的通用性。文中以熊猫型保偏光纤为研究对象, 利用仿真以及实验方法, 对该方法的可行性进行分析。在此基础之上, 为了研究定轴精度与观测平面的关系, 文中将利用实验系统对不同观测平面的定轴精度进

行分析比较, 最后对最佳观测平面处的定轴精度进行定量分析。

1 定轴算法

1.1 侧视成像定轴方法

侧视成像法的定轴原理如图 1 所示^[12]。当平行光从侧面垂直照射于裸光纤上时, 光纤所成的像经透镜放大, 被 CCD 采集。由于保偏光纤内部折射率的非圆对称性, 在光纤旋转过程中, 光纤图像的形貌特征也将发生变化。

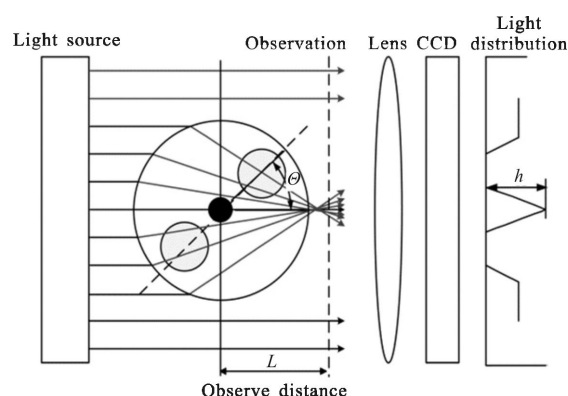


图 1 侧视成像系统原理图

Fig.1 Principle chart of side-view-image method

将光纤从初始方位角 θ_0 以角度间隔 $\Delta\theta$ 旋转一周, 提取每个角度下的特征值 $t_{\theta_0+n\Delta\theta}$, $0 \leq n \leq 2\pi/\Delta\theta$ 得到起始方位角为 θ_0 的特征曲线, 即:

$$T(\theta_0)=[t_{\theta_0}, t_{\theta_0+\Delta\theta}, \dots, t_{\theta_0+2\pi}] \quad (1)$$

利用的特征曲线对称性和周期性进行傅里叶展开, 便可得到起始方位角为 0° 的标准曲线:

$$T(0)=[t_{\Delta\theta}, \dots, t_{2\pi}] \quad (2)$$

随后, 通过标准曲线内部元素的平移变换, 得到任意起始方位角的特征曲线:

$$T(\theta)=[t_{\theta}, t_{\theta+\Delta\theta}, \dots, t_{\theta+2\pi}], 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3)$$

最后, 将测量曲线与任意起始方位角的特征曲线做相关运算:

$$C_0[T(\theta_0), T(\theta)]=[N \sum_{n=0}^N t_{\theta_0+n\Delta\theta} t_{\theta+n\Delta\theta} - \sum_{n=0}^N t_{\theta_0+n\Delta\theta} \sum_{n=0}^N t_{\theta+n\Delta\theta}] / \{ [N \sum_{n=0}^N t_{\theta_0+n\Delta\theta}^2 - (\sum_{n=0}^N t_{\theta_0+n\Delta\theta})^2] [N \sum_{n=0}^N t_{\theta+n\Delta\theta}^2 - (\sum_{n=0}^N t_{\theta+n\Delta\theta})^2] \}^{1/2} \quad (4)$$

式中: $N=2\pi/\Delta\theta$ 。

相关结果中极大值所对应的方位角即为待测方位角。

1.2 侧视光强相关峰锐度的定轴方法

将光纤从初始方位角 θ_0 开始,以固定角度间隔 $\Delta\theta$ 旋转一周,采集每个方位角的侧视光强曲线:

$$I(\theta_0+n\Delta\theta)=[i_{\theta_0+n\Delta\theta,1}, i_{\theta_0+n\Delta\theta,2}, \dots, i_{\theta_0+n\Delta\theta,M}] \quad (5)$$

式中: θ_0 为光纤的起始方位角; $0 \leq n \leq 2\pi/\Delta\theta$ 为光纤的旋转次数; M 为光强曲线的像素个数; $i_{\theta_0+n\Delta\theta,m}$, ($1 \leq m \leq M$) 为方位角为 $\theta_0+n\Delta\theta$ 的光强曲线中第 m 个像素的光强值。

将初始方位角为 θ_0 的光强曲线 $I(\theta_0)$ 与所有光强曲线 $I(\theta_0+n\Delta\theta)$, $0 \leq n \leq 2\pi/\Delta\theta$ 做互相关,得到相关曲线:

$$C(\theta_0)=[c_{\theta_0}, c_{\theta_0+\Delta\theta}, \dots, c_{\theta_0+2\pi}] \quad (6)$$

式中: $c_{\theta_0+n\Delta\theta}$, $0 \leq n \leq 2\pi/\Delta\theta$ 表示光强曲线 $I(\theta_0)$ 与 $I(\theta_0+n\Delta\theta)$, $0 \leq n \leq 2\pi/\Delta\theta$ 的相关值。

将相关曲线 $C(\theta_0)$ 极大值处的峰值尖锐程度作为方位角 θ_0 下的特征值。以极大峰前后某范围内纵坐标的下降幅度之和作为峰值尖锐程度的评判标准,实验结果表明以 5° 的距离差所得出的特征值最能体现方位角的变化。则初始方位角 θ_0 下的特征值:

$$t(\theta_0)=|c_{\max}-c_{\max-5}|+|c_{\max}-c_{\max+5}| \quad (7)$$

根据光强曲线的采集顺序,依次将其它方位角的光强曲线与任意方位角的光强曲线 $I(\theta_0+\theta)$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 做互相关运算,计算出各个方位角下的特征值 $t(\theta_0+\theta)$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$,可以得到起始方位角为 θ_0 的特征值曲线:

$$T(\theta_0)=[t(\theta_0), t(\theta_0+\Delta\theta), \dots, t(\theta_0+2\pi)] \quad (8)$$

最后利用特征值曲线 $T(\theta_0)$ 的周期性、对称性以及形貌特征,对其内部元素进行平移变换,即可得到起始方位角为 0° 的标准曲线 $T(0)$ 。待测方位角特征值曲线 $T(\theta_0)$ 与 $T(0)$ 之间的相位差即为光纤初始方位角 θ_0 的值。

不同于传统侧视成像定轴法,文中方法直接对侧视光强曲线做相关,因此不需要提取任何特征点,故该方法不受光强形貌特征的限制。

2 实验系统

为了验证文中所提出的基于侧视光强相关峰锐度定轴方法的可行性,文中搭建了一套侧视定轴系统。为了对该方法的定轴精度做进一步的分析,文中

在原系统的基础上增加了一套端面成像系统,形成了如图 2 所示的实验系统。其中光源 1、透镜 1、CCD1 组成主光路,用于接收保偏光纤侧视光强图像。光源 2、透镜 2、CCD2 组成辅助光路,将测得的保偏光纤方位角作为基准值。由主光路接收光纤侧视光强图像,利用文中所提出的基于侧视光强相关峰锐度定轴方法计算得到光纤待测方位角,并与辅助光路测得的基准值做比较。该辅助光路中光纤端面在光源 2 照射下所成的像经透镜 2 显微放大,被 CCD2 接收并传送至计算机,经偏振轴检测技术处理,最后精确得到光纤的方位角值,误差仅为 0.1° [13]。

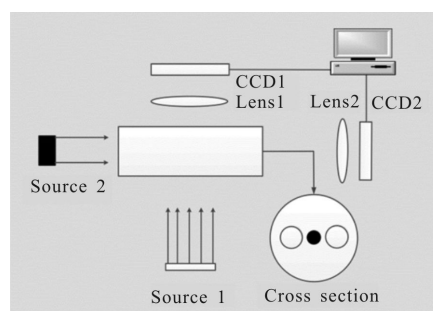


图 2 实验系统原理图

Fig.2 Principle chart of experiment system

3 实验验证

3.1 可行性分析

为了对基于侧视光强相关峰锐度定轴方法的可行性进行分析,文中首先利用光线追迹法仿真计算出了实验所用保偏光纤在焦平面位置处各方位角的光强曲线。仿真过程中保偏光纤从 0° 初始方位角开始,以 0.2° 间隔旋转了一圈。依据文中定轴方法得到起始方位角为 0° 的特征值曲线。

在仿真计算的基础之上,文中利用实验对该定轴方法的可行性做了进一步分析。实验过程中,首先将 CCD 的观测面调节到焦平面位置处,接着借助于图 2 中的辅助光路将保偏光纤调节到 0° 方位角位置,最后保偏光纤以 0.2° 间隔旋转一圈,采集得到每个方位角下的光强曲线。依据文中的方法得到起始方位角为 0° 的特征值曲线,结果如图 3 所示。图 3 中的实线表示实验所得的特征值曲线,虚线表示仿真所得的特征值曲线。

从图 3 可以看出,尽管由于噪声的影响实验曲

线在 90°和 270°附近存在一些较低峰值,然而实验结果与仿真结果基本相吻合,两者均具有三个特性:

- (1) 该类特征曲线的变化呈周期性,周期为180°;
- (2) 该类曲线具有很好的对称性,关于 0°和 90°对称;
- (3) 该类特征值曲线在 0°处恰为一峰值。

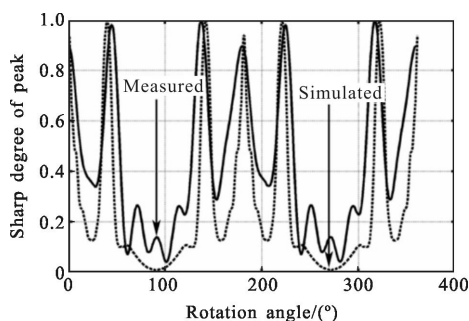


图 3 焦平面处实验与仿真特征值曲线的比较

Fig.3 Comparison of characteristic profile between experiment and simulation on focus-plane

如图 3 所示,相关曲线的峰值尖锐程度随着方位角的变化而变化,说明该特征蕴含了方位角信息。此外,利用该类特征值曲线的三个特性,可以精确得到起始方位角为 0°的标准曲线。因此文中所提出的基于侧视光强相关峰锐度的定轴方法是可行的。

3.2 定轴精度与观测平面关系

为了对文中定轴方法的实际精度进行实验验证,文中首先通过实验对不同观测平面的定轴精度进行分析比较。实验过程中,以 1 μm 的位移量将观测平面从焦平面前 20 μm,移动到焦平面后 60 μm。利用 CCD 采集不同观测平面上各方位角的光强曲线,其中光纤的旋转角度间隔 $\Delta\theta=0.2^\circ$,最后依据文中方法得到各观测平面的特征值曲线。

在光纤方位角的判定中,相关曲线峰值处的尖锐程度是决定精度的最终制约^[4]。故对特征值曲线做归一化自相关运算,以自相关曲线峰值处的尖锐程度作为定轴精度高低的判据,并以极大峰值前后各 5°的纵坐标下降幅度之和表征峰值尖锐程度。

利用上述方法得到焦平面前 20 μm 至焦平面后 60 μm 范围内,各观测平面的自相关峰尖锐程度,结果如图 4 所示。文中以自相关峰尖锐程度作为定轴精度高低的判据,故从图 4 中不难推断出,定轴精度与观测平面位置有关。其中,焦平面后 10~19 μm 范围内具有较理想的定轴精度。

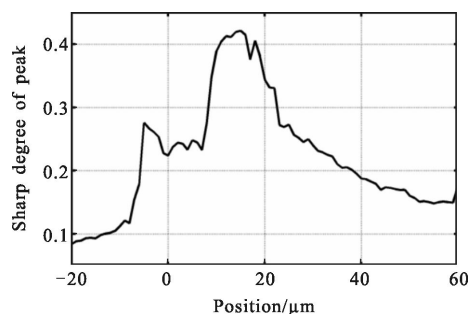


图 4 自相关峰尖锐程度随观测平面变化趋势

Fig.4 Relationship between peak's sharpness degree of self-correlation profiles and observe distance

3.3 实际定轴精度分析

根据图 4,设定 15 μm 为观测面,对文中方法的实际精度进行实验验证。实验共采集 2 组数据,每组数据重复测量 58 次。将文中方法所获得的光纤方位角与端面成像系统所测得的基准值相减,得到定轴误差。两组数据的误差分布如图 5、图 6 所示,从图

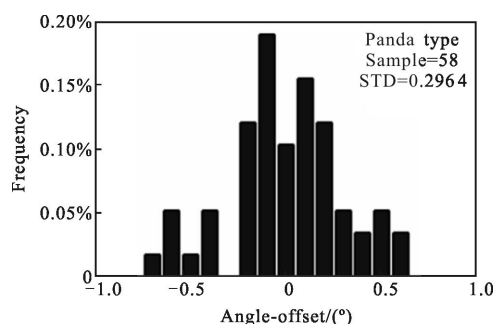


图 5 第 1 组数据的定轴误差分布图

Fig.5 Alignment inaccuracy distribution of data 1

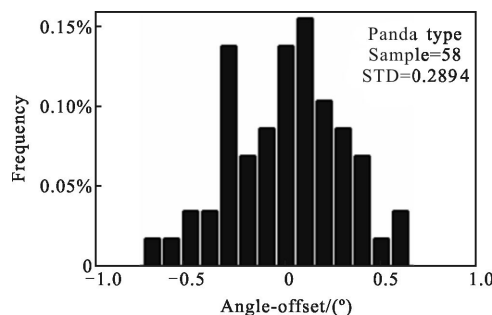


图 6 第 2 组数据的定轴误差分布图

Fig.6 Alignment inaccuracy distribution of data 2

中可以看出误差趋于正态分布,且由计算结果可知两组数据的标准差 σ 分别为 0.296 4、0.289 4。根据正态分布的 3σ 准则—约 99.73% 的数值分布在距离

平均数有 3 个标准差的范围内—可推断出两组数据的定轴误差分别为 0.8892° 、 0.8682° 。可知文中方法可以获得优于 0.9° 的实际定轴精度。

参考文献[10]表明:目前可行的定轴方法中,POL法与PAS法的实际定轴精度为 $1^\circ\sim 1.5^\circ$,五点法的实际定轴精度为 1° 左右。故与传统定轴方法相比,文中方法具有更高的定轴精度。原因在于,传统侧视成像法基于特征曲线提取特征点,而文中方法利用整条光强曲线相关计算得到结果,相比于单个特征点整条光强曲线对噪声具有更强抑制作用。

4 结 论

为了提高侧视成像法的通用性,文中在其基础之上提出了基于侧视光强相关峰锐度的定轴方法。不同于传统侧视成像法直接从光强曲线中提取特征值,该方法首先对光强曲线做相关运算,从而得到相关曲线,接着以相关曲线的峰值尖锐程度作为特征值。与传统侧视定轴方法相比,该方法对光强形貌特征没有任何要求,具有更强的通用性。

为了提高文中定轴方法的精度,通过实验对不同观测平面的定轴精度进行了比较,结果表明定轴精度与观测平面有关,从而确定了具有理想定轴精度的观测平面范围。最后通过实验对该范围内的观测平面上的实际精度进行了分析验证,结果表明通过该方法可达到优于 0.9° 的实际定轴精度。故相比于传统侧视定轴方法,文中方法具有更高的定轴精度。

参考文献:

- [1] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519–531. (in Chinese)
- [2] Wang Xiaoxiao, Qin Yi, Wang Ye, et al. Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2930–2936. (in Chinese)
- [3] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306–317. (in Chinese)
- [4] Zhang Wei, Wang Lefeng, Rong Weibin, et al. Coaxial adjustment in PMF alignments [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 125–131. (in Chinese)
- [5] Lang Xiaoping, Li Xiaoying. Research on polarization measurement method of single-mode PM fiber[J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2005, 20 (1): 25–27. (in Chinese)
- [6] Gao Hongyu, Chen Caihe, Cui Yuming, et al. Locating the position of the slow and fast birefringent axes by elasto-optic effect [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, 18(1): 184–187. (in Chinese)
- [7] Guo Zhenwu, Ye Wenting, Zhang Hongxia, et al. Analysis and measurement of alignment angle of PMF devices [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, 22(5): 645–648.
- [8] Zheng Wenxin. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 5(1): 125–134.
- [9] Kenichiroh Itoh. Method of fusion-splicing polarization maintaining optical fibers: US Patent, 5013345[P]. 1991–05–07.
- [10] Wang Jin'e, Lin Zhehui, Wu Yulie, et al. The auto-alignment technique of PM fiber of MRI[J]. *Applied Optics*, 2005, 26(5): 37–40. (in Chinese)
- [11] Huang Linsheng, Zhang Jun, Chen Zhe, et al. Simulation and experiment analysis of azimuth aligning technology for polarization maintaining fiber [J]. *Infrared And Laser Engineering*, 2010, 39(2): 279–284. (in Chinese)
- [12] Zheng Wenxin. Auto-aligning and splicing PM-fibers of different types with a passive methods [C]//Fiber Optic Gyros:20th Anniversary Conference, 1996, 2837: 356–376.
- [13] Liu Zhenhua, Feng Di, Yang Dewei, et al. Accurate detection technology for polarization axis of Panda polarization-maintaining fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3388–3393. (in Chinese)
- [14] Wang Dongyun, Liu Cheng, Shu Xiaowu, et al. Accurate alignment of PM fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31 (3): 345–348. (in Chinese)