

doi: 10.3788/gzxb20164509.0912005

一种基于空间光程差调制的条纹位置测量方法

孙长胜^{1,2,3}, 朱永田^{1,2}, 胡中文^{1,2}, 徐腾^{1,2}, 梅蓉^{1,2,3}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 提出了一种基于空间光程差调制的条纹位置测量方法, 用于恒星干涉仪条纹搜寻和条纹追踪。来自基线两端的两光束合束时, 通过合束器在两光束之间引入一个倾角, 用以实现静态的空间光程差调制。使用成像透镜将静态光程差调制得到的白光干涉条纹成像到 CCD 探测器上。白光条纹位置的偏移与两光束之间的光程差大小相关, 使用获得的干涉条纹实时计算白光条纹位置, 测量出两束光之间的光程差, 用于延迟线的实时光程差补偿, 从而可以稳定干涉条纹。数值模拟和实验结果表明, 采用该方法获得的最大光程差测量误差为 $0.159 \mu\text{m}$, 小于数值模拟和实验所用宽带光的平均波长 $0.555 \mu\text{m}$, 测量精度满足条纹相干的要求。与时间调制方法相比, 该方法原理和算法简单, 且对于大气扰动更不敏感。

关键词: 光学技术与仪器, 恒星干涉仪, 干涉实验, 条纹跟踪方法, 干涉仪, 大气湍流, 光学相干, 光学望远镜, 干涉测量

中图分类号: TH751; P111.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0912005-5

Fringe Position Measurement Based on Spatial Optical Path Difference Modulation

SUN Chang-Sheng^{1,2,3}, ZHU Yong-Tian^{1,2}, HU Zhong-Wen^{1,2}, XU Teng^{1,2}, MEI Rong^{1,2,3}

(1 Chinese Academy of Sciences, National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China)

(2 Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China)

(3 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A fringe position measurement method is proposed based on the spatial optical path difference modulation, which is applicable to fringe searching and fringe tracking. When combining the two beams from the two ends of a baseline, a static optical path difference modulation is brought in by a beam combiner introducing tilt angle. An imaging lens is used to image the interferogram onto a CCD detector. The translation of the white-light fringe packet is related to the optical path difference between the two combined beams. The position of interference fringe can be computed with the acquired fringe and used to calculate the path difference. The evaluated optical path difference value is further used to cancel the path difference error by the delay line and to stabilize the fringe. The numerical simulation and experimental results indicate that the maximum experimental measurement error is $0.159 \mu\text{m}$, which is smaller than the average wavelength $0.555 \mu\text{m}$ of the broadband light used in the research, the proposed method can achieve the accuracy that meets the requirement of fringe coherencing. Compared with the previous temporal optical path difference modulation method, the proposed method is simple in principle and algorithm implementation, moreover insensitive to atmospheric turbulence.

Key words: Optical technology and instrument; Stellar interferometer; Interference experiment; Fringe trackingmethod; Interferometers; Atmospheric turbulence; Optical coherence; Optical telescopes;

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11273038)资助

第一作者(通讯作者): 孙长胜(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为天文光干涉技术。Email: cssun@niaot.ac.cn

导师: 朱永田(1964—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为天文光谱和高分辨成像技术、太阳系外行星探测技术。Email: ytzhu@niaot.ac.cn

收稿日期: 2016-03-11; 录用日期: 2016-05-17

<http://www.photon.ac.cn>

Interferometry

OCIS Codes: 120.3180; 350.1260; 000.3110; 120.4640;

0 引言

使用延迟线和合束器将两个独立望远镜连接起来之后,可形成一个恒星干涉仪。恒星干涉仪的分辨能力决定于有效基线长度 B 。多个望远镜组成的恒星干涉仪结合地球自转产生的 uv 覆盖,可以进行高分辨的天文成像^[1]。恒星干涉仪的使用已经成为天文观测中取得高分辨能力的重要途径。20世纪70年代以后,建造了多个恒星干涉仪,例如 Mark III^[2], 悉尼大学恒星干涉仪^[3](Sydney University Stellar Interferometer, SUSI), KECK Interferometer^[4], VLTI^[5]。然而大气湍流和机械振动导致参与合束的两束光之间存在一个随机的光程差(Optical Path Difference, OPD),造成白光条纹的快速随机运动,从而限制了积分时间(对于可见光波段约为 10 ms)。使用条纹追踪来稳定条纹可以延长积分时间。条纹追踪可分为条纹共相和条纹相干两种模式^[6]。条纹共相是指将光束之间的光程差抖动减小到远小于波长的长度;条纹相干是指将两光束之间的光程差抖动减小到波长以下长度。稳定干涉条纹是通过实时测量参与合束两光束间的光程差,并使用延迟线装置实时补偿实现的。两光束之间的光程差可以通过白光条纹的位置计算得到。

白光条纹的位置可以通过分析干涉条纹或者色散之后各个不同波长的干涉条纹得到。两种方法都需要首先获得干涉条纹。获取干涉条纹的方法有时间调制方法和空间调制方法^[7]。时间调制方法是一种光程差调制方法,它采用压电转换器件^[8-9],对两束光之间的光程差进行扫描;空间调制方法是一种相位调制方法,采用消色散移相器件和偏振分束器,得到一个相位周期内四个等相移 $\pi/4$ 的测量。时间调制方法在光程差扫描过程中,大气湍流和机械振动引起的光程差变化会叠加到动态扫描引起的光程差变化中,造成所得到的干涉条纹出现压缩(或者拉伸)变形。文献[6]指出条纹的变形会导致测量误差。为了消除条纹变形的对测量的影响,需要设计更加复杂的数据处理算法^[10]。除此之外,时间调制方法需要一套系统来保证光程差调制精度,例如 VLTI FINITO 的激光测量系统^[10],这增加了系统的复杂性。Lawson 指出空间调制方法具有无法计算每个波长所得数据权重(例如信噪比)的缺点^[12]。空间调制方法需要与色散元件结合起来,测量多个波长位置处的光程差,再通过算法计算得到实际的光程差^[13]。

本文提出的空间光程差调制方法具有空间相位调制方法对大气湍流变化不敏感的优点。空间光程差调制方法通过在参与合束的两束光之间引入一个倾角,

可以得到静态的连续光程差调制以及静态干涉条纹,不需要动态光程差扫描。该空间光程差调制方法设计使用宽带光,而非准单色光。本文介绍基于空间光程差调制的条纹位置测量方法原理,并通过数值模拟和实验进行验证。

1 基于空间光程差调制的条纹位置测量方法原理

1.1 空间光程差调制方法的条纹强度分布分析

假设参与合束的两光束为光束 1 和光束 2, 分别来自长基线两端的两个望远镜。两光束任一频率的单色光成分在探测器表面的振幅分别为 $V_{\nu_1}(x)$ 和 $V_{\nu_2}(x)\exp(-i2\pi\nu \cdot x\tan\theta/c)$, 其中 θ 为光束 2 相对于光束 1 倾斜的角度, $\nu=c/\lambda$ 为任一单色光的频率, λ 为相应单色光的波长, c 为光速。则两光束合束之后在探测器表面的振幅 $V_{\nu}(x)$ 与光强 $I_{\nu}(x)$ 分别为

$$V_{\nu}(x)=V_{\nu_1}(x)+V_{\nu_2}(x)\exp(-i2\pi\nu \cdot x\tan\theta/c) \quad (1)$$

$$I_{\nu}(x)=C_1[1+C_2|\mu_{\nu}|\cos(\phi_{\nu}+2\pi\nu \cdot x\tan\theta/c)] \quad (2)$$

式(2)中,

$$C_1=\langle V_{\nu_1}(x)^2 \rangle+\langle V_{\nu_2}(x)^2 \rangle$$

$$C_2=\frac{\sqrt{\langle V_{\nu_1}(x)^2 \rangle \langle V_{\nu_2}(x)^2 \rangle}}{\langle V_{\nu_1}(x)^2 \rangle+\langle V_{\nu_2}(x)^2 \rangle}$$

μ_{ν} 为两束光的复相干度(或称为两束光的互相关系数), ϕ_{ν} 为 μ_{ν} 的辐角,且有

$$\mu_{\nu}=|\mu_{\nu}|e^{i\phi_{\nu}}=\Gamma(\mathbf{B})/\sqrt{I(\mathbf{r}_1)I(\mathbf{r}_2)}$$

其中 \mathbf{r}_1 与 \mathbf{r}_2 分别为两个望远镜在垂直于观测方向平面上的坐标,并有 $\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1=\mathbf{B}$ 。 $\Gamma(\mathbf{B})$ 为两光束的互相干函数,按照范西特泽尼克定律,为观测目标的亮度分布的傅里叶变换。

为了简单考虑,假设两束光强度分布相同,且同为常数,即 $\langle V_{\nu_1}(x)^2 \rangle=\langle V_{\nu_2}(x)^2 \rangle=I_0$, 则式(2)的光强表达式简化为

$$I_{\nu}(x)=2I_0[1+|\mu_{\nu}|\cos(\phi_{\nu}+2\pi\nu \cdot x\tan\theta/c)] \quad (3)$$

在所用光谱范围内, $|\mu_{\nu}|$ 用平均波长 λ_0 处的值 $|\mu_{\nu_0}|$ 来代替,并假设不存在纵向色散。对单色光干涉条纹强度分布在所需波段上积分,可以得到宽带光干涉条纹强度分布 $I(x)=\int I_{\nu}(x)d\nu$ 的表达式,即

$$I(\tau)=2I_0[1+g(\tau)|\mu_{\nu_0}|\cos(\phi_{\nu_0}+2\pi\nu_0\tau)] \quad (4)$$

式中, $\tau=(x\tan\theta+d_{OPD})/c$, d_{OPD} 为两光束之间由于大气湍流与机械振动导致的光程差, $g(\tau)$ 为平移后中心化的光谱 $G(\nu+\nu_0)$ 的傅里叶变换。

从白光干涉条纹强度分布式(4)可见,由于倾角 θ 在相位表达式中的出现, x 方向上不同位置处对应着不同的光程差值,意味着在 x 空间方向引入了静态的

光程差调制。空间光程差调制可以不经动态扫描而得到干涉条纹。相比于时间调制这种动态调制方法,静态调制方法对于条纹获取过程中的光程差变化更不敏感^[14]。同时从式(4)中还可以看到,如果两光束存在一个不为零的光程差 d_{OPD} ,白光条纹的位置相对于光程差 d_{OPD} 为 0 时将会有相应平移 Δ ,二者的对应关系为 $d_{\text{OPD}} = -\Delta \tan \theta$,如图 1。另外,由于白光干涉条纹的相干包络 $g(\tau)$ 为平移后中心化光谱 $G(\nu + \nu_0)$ 的傅里叶变换,条纹包络的宽度反比于光场的光谱宽度。宽带光将会形成一个窄的相干包络,窄的相干包络有利于计算白光条纹位置。干涉条纹的周期 Δ_p 决定于两光束之间的夹角 θ ,即 $\Delta_p = \lambda_0 / \tan \theta$ 。在实际的天文光干涉仪系统中,会使用主动偏摆镜^[15]来消除大气造成的星光倾斜抖动,这同时也保证所需倾角 θ 的稳定。最后,两束光干涉形成的干涉图需要成像透镜成像到探测器上,以适应探测器的尺寸。

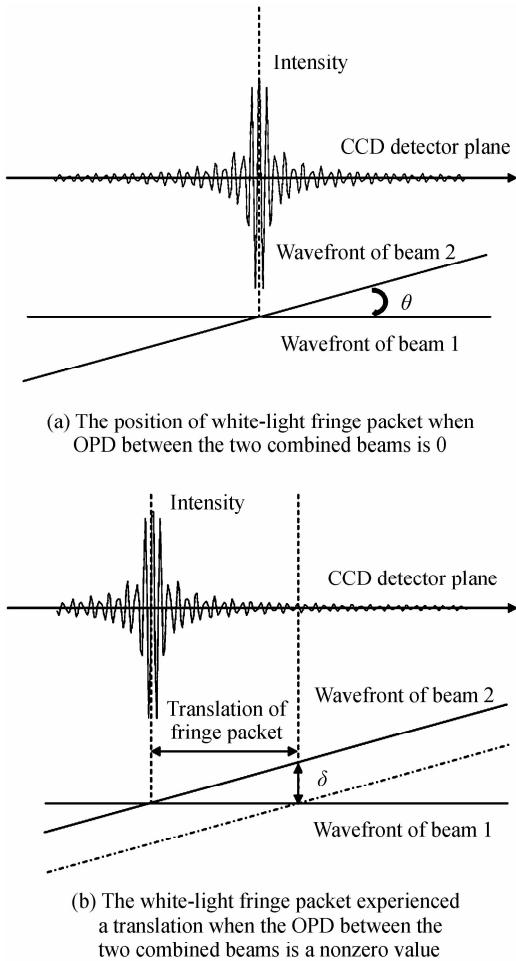


图 1 空间光程差调制的原理以及参与合束两光束之间的光程差与条纹位置的联系

Fig. 1 Principle of spatial optical path difference modulation and association of the OPD between two combined beams with the fringe packet position

1.2 条纹位置测量系统参数的确定

空间光程差调制方法得到的干涉图为一个带有平行条纹的圆斑。在垂直于条纹的方向上,不同位置的条纹可见度不同,可见度包络决定于光场的光谱形状。在探测器上,一个条纹周期对应于两光束之间一个平均波长为 λ_0 的光程差,并且需要至少 4 个像素来取样。与此类似,探测器上 L_{DR}/λ_0 个条纹周期对应着整个光程差测量的动态范围为 L_{DR} ,总共需要至少 $4L_{\text{DR}}/\lambda_0$ 个像素来取样整个干涉条纹。这里所指的光程差测量动态范围是指,两光束之间光可以被有效测量的光程差的范围。以平均波长 $\lambda_0 = 1.6 \mu\text{m}$ 的 H 波段为例,100 个像素可以测量的动态范围 L_{DR} 为 $L_{\text{DR}} = 100/4 \cdot \lambda_0 = 40 \mu\text{m}$ 。垂直于干涉条纹方向上所使用的像素总长度将是 $L_{\text{pixels}} = 100\Delta_{\text{pixels}}$,其中 Δ_{pixels} 为探测器邻近像素之间的间距。对于空间光程差调制方法来说,有

$$L_{\text{DR}} = \tan \theta D_{\text{beam}} = \tan \theta N L_{\text{pixels}} \quad (5)$$

式中,1/N 为成像透镜的横向放大率, D_{beam} 为垂直于条纹方向上的光束宽度。从式(5)可以看出,基于空间光程差调制条纹位置测量方法的灵敏度为 $N \tan \theta$,其意义是条纹在探测器上平移单位距离所对应的两光束之间光程差变化。式(5)显示,灵敏度与夹角正切以及成像透镜横向放大率的倒数成正比,但是如果将之前对于系统所做的限制考虑在内,即一个条纹周期对应 4 个探测器像素,可以得到

$$L_{\text{DR}} = \frac{\lambda_0}{4\Delta_{\text{pixels}}} L_{\text{pixels}} = \frac{\lambda_0}{4} n_{\text{pixels}} \quad (6)$$

式中, n_{pixels} 为垂直于条纹方向上所用像素的个数。可以得到:光程差测量的动态范围与所用光场的平均波长 λ_0 以及所用像素个数 n_{pixels} 成正比。更长的波长以及使用更多的像素会产生更大的光程差测量动态范围。但是,使用更多的像素会降低条纹信号的信噪比。因此信噪比与测量动态范围是一对矛盾值,应该在保证信噪比的情况下,使用更多的像素数来增大测量动态范围。

1.3 数值模拟

采用数值计算软件对基于空间光程差调制的条纹位置测量方法进行模拟,以测试其光程差测量的有效性。模拟包含两个过程:1)取得基于空间光程差调制的宽带光干涉图;2)分析干涉图以及测量条纹位置并计算得到两光束之间的光程差。光源模拟采用了 440~670 nm 的白光 LED。

如图 2,数值模拟结果显示:在测量动态范围内,基于空间光程差调制的条纹位置测量方法没有系统误差,最大误差小于平均波长 0.555 μm 的 1/20。对于超过动态范围的光程差值,测量值将会明显偏离预期值。

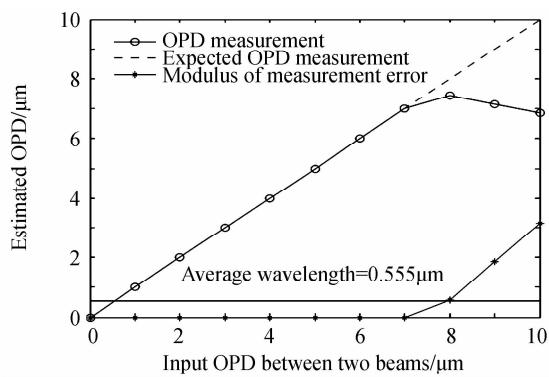


图 2 基于空间光程差调制的条纹位置测量方法的数值模拟结果

Fig. 2 Simulation result for fringe position measurement method based on spatial OPD modulation

2 实验结果

实验装置示意如图 3, 实验参数与模拟参数一致。与 1.2 节中假设的 H 波段(基于现有大多数恒星干涉仪工作波段的考虑)不同, 由于实验光源与 H 波段探测器的限制, 验证实验中采用了 440~670 nm 的宽带 LED. LED 与其后放置的 25 μm 直径小孔一同作为模拟星光光源。使用激光器来辅助装调后续光学元件。验证实验中不涉及条纹对比度的测量, 所以采用分振幅的方法来产生两束光, 而不是分波前的方法。采用 Newport 线性电机平移台和角隅棱镜结合来控制两光束之间光程差。两束光经过对称的光路, 以保证相干性。两光束使用平板分束器合束后, 成像透镜将干涉条纹成像到探测器上。所用探测器为 Imperx1/3 英寸面阵 CCD 探测器。值得注意的是, 探测器表面并不位于成像透镜的焦面上, 所以基于空间光程差调制的条纹位置测量方法并不是一种透镜焦面测量方法。通过调节两光束之间夹角, 使得条纹间距约等于 4 个像素。条纹周期与 $4\Delta_{\text{pixels}}$ 不严格相等的偏差可以在实验装置完成后, 通过校准光程差测量灵敏度的过程进行消除。在开始测量之前, 需要记录每一个光束单独入射探测器时的光强分布, 以用于数据处理, 来消除条纹背景分布的不均匀。

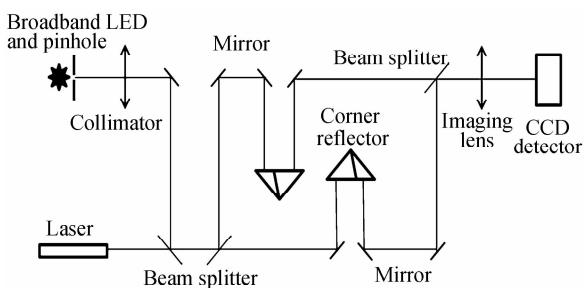


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

通过成像透镜叠加使用特定柱面镜的方法, 可以将光束截面从圆斑压缩为线焦点, 从而在相同信噪比的情况下增大光束截面尺寸, 进而根据式(6)可以提高光程差测量的动态范围。但是鉴于这并不是本文研究的重点(即本文提出光程差测量方法的有效性), 而且会增加装调的复杂性, 所以仅采用了成像透镜将干涉条纹成像到探测器上。

实验数据处理首先需要消除干涉条纹背景分布的不均匀。其次是提取干涉条纹的相干包络。最后提取白光条纹所在位置的相干包络片段, 使用所提取到的相干包络的质心作为白光条纹的位置, 并使用之前校准所得的光程差测量灵敏度来计算两光束之间光程差的测量值。

实验测量结果如图 4。根据式(6), 由于实验光源选择了可见光宽波段 LED, 光程差测量的动态范围有了相应的减小。在动态范围 $|d_{\text{OPD}}| \leq 7 \mu\text{m}$ 之内, 最大误差的模 $|\overline{d_{\text{OPD}}} - d_{\text{OPD}}|_{\text{max}}$ 为 0.159 μm , 小于平均波长 0.555 μm , 其中 $\overline{d_{\text{OPD}}}$ 为测量得到的光程差值。小于平均波长的误差水平说明该测量方法满足恒星干涉仪条纹相干的精度要求。条纹相干是指将光束之间的光程差维持在小于平均波长的状态。推测误差来源于未被校正的纵向色散以及实验室环境的杂散光。当光程差的模值超过 7 μm , 测量得到的光程差值将会很快偏离光程差的预期值。

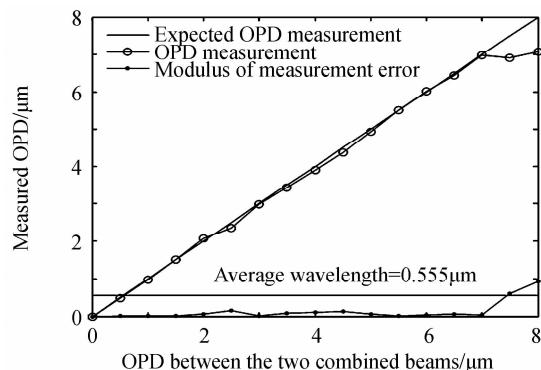


图 4 基于空间光程差调制的条纹位置测量方法的实验结果

Fig. 4 Experimental result for fringe position measurement method based on spatial OPD modulation

3 结论

本文介绍了基于空间光程差调制的条纹位置测量方法, 可用于恒星干涉仪的条纹搜寻和追踪。对该测量方法进行了数值模拟和实验验证。实验取得了 0.159 μm 的最大误差, 小于平均波长 0.555 μm , 测量精度满足恒星干涉仪条纹相干的要求。基于空间光程差调制的条纹位置测量方法是利用两束光之间的倾角产生连续的静态光程差调制, 不需要扫描的过程, 所以避免了

时间调制方法扫描过程中大气湍流和机械振动引起的光程差变化造成的不利影响。

由于旨在验证本文提出方法的有效性,所以仅进行了光束之间光程差的测量,并没有进行包含光程差补偿的闭环控制研究工作,这一部分将在以后的工作中进行。

参考文献

- [1] WANG Hai-tao, CAI Jia-hui, WEI Peng, et al. Imaging analysis of optical synthetic aperture system with the immediate/para-immediate u-v coverage[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2):260-265.
王海涛,蔡佳慧,魏鹏,等.即时/准即时u-v覆盖的光学综合孔径成像分析[J].光子学报,2010,**39**(2):260-265.
- [2] SHAO M, COLAVITA M M, HINES B E, et al. The Mark III stellar interferometer[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1988, **193**: 357-371.
- [3] ROBERTSON J G, IRELAND M J, TANGO W J, et al. Science and technology progress at the Sydney University Stellar Interferometer[C]. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2012: 84450N.
- [4] COLAVITA M M, WIZINOWICH P L, AKESON R L, et al. The Keck interferometer[J]. *Astronomical Society of the Pacific*, 2013, **125**(932): 1226.
- [5] GLINDEMANN A, ABUTER R, CARBOGNANI F, et al. The VLT interferometer: A unique instrument for high-resolution astronomy[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics, 2000: 2-12.
- [6] CORCIONE L, BONINO D, BUSHER D F, et al. Fringe tracker for the VLTI spectro-imager[C]. SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2008: 701345.
- [7] GLINDEMANN A. Instrumental techniques[M]. *Principles of Stellar Interferometry*. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 217-274.
- [8] MOREL S, TRAUB W A, BREGMAN J D, et al. Fringe-tracking experiments at the IOTA interferometer[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics, 2000: 506-513.
- [9] GAI M, CORCIONE L, DELATGE L, et al. The FINITO fringe sensor for VLTI[C]. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings. 2002, **58**: 329.
- [10] KERVELLA P, SéGRANSAN D, du FORESTO V C. Data reduction methods for single-mode optical interferometry-application to the VLTI two-telescopes beam combiner VINCI [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2004, **425**(3): 1161-1174.
- [11] LEVEQUE S A, WILHELM R, SALVADÉ Y, et al. Toward nanometer accuracy laser metrology for phase-referenced interferometry with the VLTI[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation*. International Society for Optics and Photonics, 2003: 983-994.
- [12] LAWSON P R. Phase and group delay estimation [C]. *Principles of Long Baseline Stellar Interferometry*. 2000: 113.
- [13] GAI M, MENARDI S, CESARE S, et al. The vlti fringe sensors: FINITO and prima FSU[C]. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2004: 528-539.
- [14] BLIND N, ABSIL O, LE BOUQUIN J B, et al. Optimized fringe sensors for the VLTI next generation instruments[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, **530**: A121.
- [15] LU Yi, FAN Wei-jun, KONG Ming. Measuring the tip-tilt angles of the active mirror in the stellar interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6):1111-1115.
陆艺,范伟军,孔明.恒星光干涉仪主动镜偏转角的检测[J].光子学报,2010,**39**(6):1111-1115.