

# 基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术研究进展

董磊<sup>1\*</sup>, 阮宇翔<sup>1,2</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 李宏壮<sup>1</sup>, 郭鹏<sup>1</sup>, 吴元昊<sup>1</sup>, 姜珊<sup>1</sup>,  
张淑芬<sup>1,2</sup>, 卫沛锋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电探测部, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于传统光学成像系统的质心定位原理的角度测量技术一般存在测量精度的上限, 约为像素的 1/100。因此, 要提高角度测量精度一般需要采用更长的镜头焦距和更大靶面的相机, 增加了体积、重量和功耗, 不利于设备的小型化, 也不利于在对体积、重量和功耗有限制的平台(例如卫星和飞机等)上应用。基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术, 利用光学干涉的方法将目标光的角度变化转换为干涉条纹相位变化。因相位变化的测量精度可通过成熟的插值方法实现 1/1000 周期的精度, 故干涉测量的角度精度相比传统光学方法大大提高。本文主要介绍基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术的基本原理、主要特点、研究进展和存在的难点, 希望通过该文引起广大同行的研究兴趣, 一起推动该技术的快速发展和工程应用。

**关键词** 遥感; 干涉测量; 星敏感器; 干涉条纹; 相位估计

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1811016

## Progress in High Accurate Angle Measurement Technology of Long-Distance Target Based on Computational Interferometry

Dong Lei<sup>1\*</sup>, Ruan Yuxiang<sup>1,2</sup>, Wang Jianli<sup>1</sup>, Wang Bin<sup>1</sup>, Li Hongzhuang<sup>1</sup>, Guo Peng<sup>1</sup>,  
Wu Yuanhao<sup>1</sup>, Jiang Shan<sup>1</sup>, Zhang Shufen<sup>1,2</sup>, Wei Peifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Photoelectric Detection Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The angle measurement technique based on the centroid positioning principle of the traditional optical imaging system generally has an upper limit of the measurement accuracy, it is about 1/100 of a pixel. Thus, in order to improve the angle measurement accuracy, cameras with the longer lens focal length and the larger detection array generally need to be adopted. But it increases the size, the weight, and the power consumption. It is not conducive to the miniaturization of equipment and the application on platforms with limited size, weight, and power consumption (such as satellites and aircrafts). The high accurate angle measurement technique for long distance target based on the computational interferometry converts the angle change of target light into the phase change of interference fringe by the optical interference method. Because the measurement accuracy of the phase change can be achieved as low as 1/1000 period by the mature interpolation method, the angle accuracy of interferometry is greatly improved compared with the traditional optical method. This paper mainly introduces the basic principle, the main

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-07-09; 录用日期: 2021-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(11703024)

通信作者: \*nodepression@126.com

characteristics, the research progress, and the existing difficulties of the high accurate angle measurement technique for long distance target based on the computational interferometry. It is hoped that the introduction of this paper will arouse the research interest of the majority of peers and promote the rapid development and the engineering application of this technique.

**Key words** remote sensing; interferometry; star tracker; interference fringe; phase estimation

**OCIS codes** 280.4788; 120.0280; 120.3180; 120.4120

## 1 引言

远距离目标的光电测角技术广泛应用于大型望远镜、激光通信和激光武器等应用场景的高精度指向和跟踪捕获系统,以及用于飞行平台姿态测量的星敏感器等角位移探测系统。现有光电测角系统一般采用亚像素质心定位技术实现高精度角度测量,然而其精度具有理论上限(一般认为是  $1/100$  像素<sup>[1]</sup>)。当视场为  $20^\circ$  且采用  $2K \times 2K$  的相机时,基于质心定位的测角精度上限约为  $0.35''$ , 想要进一步提高测角精度,就要适当减少视场。以测量飞行器姿态的星敏感器为例,美国洛克希德马丁公司的 AST-301 是目前已知姿态测量精度最高的星敏感器之一,其姿态测量精度约为  $0.18''$ ,但其视场仅为  $5^\circ$  且具有较大质量(约  $14.2 \text{ kg}$ )。小视场造成视场内可用低星等自然星的数目减少,为了保证星图识别准确率,需要采用更高星等探测,这要求更高的光学系统透过率和更灵敏的相机探测能力,从而增加了系统复杂度、成本以及功耗。大重量使该类型星敏只能应用于大载荷的飞行平台(例如体积较大的同步轨道卫星),难以应用于小载荷平台(例如低轨道的微小卫星)。由此可知,基于质心定位技术的传统星敏的测角精度与视场存在制约关系,大视场对应低精度,而高精度器件的视场较小且体积、重量和功耗将明显增加。

基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术(简称干涉测角技术)利用干涉条纹相位体现入射波倾斜量(即目标角位置信息)的特点,基于面阵探测器靶面获得的一个周期条纹内四个部分的光强,通过成熟的四等分条纹相位估计算法获得条纹相位估值,再根据目标角位移与条纹相位变化的对应关系精确计算角位移量。通过合理的设计,可实现在  $20^\circ$  视场内覆盖几百个相位周期(例如 512 个周期),一个相位周期对应一个像素,并可通过插值获得优于  $1/1000$  周期的相位,即精度优于  $1/1000$  像素,这时测角精度约为  $0.14''$ 。基于干涉测角技术的星敏(简称干涉星敏)并不是通过采用长焦镜头和大靶面相机来提高测角精度的,故与

相同测角精度的传统星敏相比,干涉星敏的体积、重量和功耗均明显减小。

干涉测角技术的研究主要被 OPC 公司提出并开展在星敏传感器中的应用研究。目前,OPC 公司已完成干涉星敏的样机研制并开展其在实际应用场景中的性能测试。国内对该技术的研究尚处于起步阶段,还存在一些科学问题和工程难题需要攻关。希望通过本文的介绍,让大家都认识到该技术的优越性,让更多的专家、学者和研究人员投入到对该技术的研究中来,尽快攻克该技术的难点与瓶颈,将干涉测角技术应用到更多的高精度测角领域中,提高我国在高精度测角领域的技术能力和装备制造能力。

本文的结构如下:首先,介绍干涉测角技术的基本工作原理;然后,介绍干涉测角技术的两个主要特点——高测角精度和谱宽度受限的视场;接着,梳理干涉测角技术的国内外发展现状;随后,给出我们团队总结的干涉测角技术的研究难点——如何实现高精度测角以及获得较大的观测视场;最后,对全文进行总结。

## 2 基本原理

干涉测角系统的基本结构如图 1 所示。它的核心器件包括由两个光栅(G1 和 G2)组成的剪切干涉仪<sup>[2-4]</sup>和由四个不同楔角光楔组成的光楔阵列<sup>[5]</sup>。入射光经过光栅 G1 后产生多级衍射光,对系统有用的是  $\pm 1$  级衍射光。 $\pm 1$  级衍射光经过光栅 G2 后分别产生的  $-1$  级和  $+1$  级衍射光仍然彼此平行,且平行于入射光方向。以系统光轴为转轴,微量旋

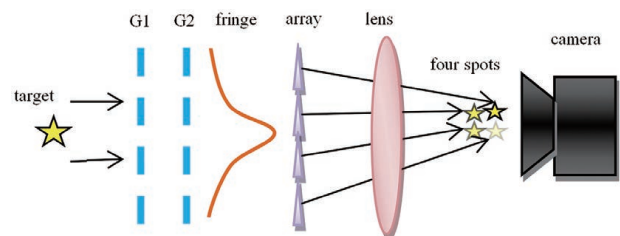


图 1 干涉测角系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of interferometric angle measurement system

转光栅 G2, 则可在光栅 G2 产生的上述 ±1 级衍射光之间引入少量倾斜, 从而产生一个周期的干涉条纹(干涉条纹分布如图 2 所示)。干涉条纹相位与入射光的角度存在精确对应关系, 只要获得干涉条纹的相位信息就可精确估计入射角。光楔阵列将干涉条纹的周期四等分。因四个光楔的楔角不同, 故干涉条纹四等分后的四个部分的光波传播方向不同。经过镜头会聚后, 这四个部分的光波分别聚焦在面阵探测器(例如 CCD 相机)靶面(四等分光强分布如图 3 所示)。利用成熟的四等分条纹相位估计算法<sup>[6]</sup>, 即可获得干涉条纹相位的精确估计。



图 2 旋转光栅产生的干涉条纹

Fig. 2 Interference fringes produced by rotating gratings



图 3 视场内三颗星在干涉星敏感器上的成像

Fig. 3 Imaging of three stars in the field of view on interferometric star sensor

### 3 主要特点

#### 3.1 高测角精度

干涉测角技术最主要的优点是具有高精度的角度测量精度。通过下面的公式<sup>[7]</sup>可以看出, 该技术的测角精度与成像镜头焦距、面阵探测器靶面尺寸以及像素大小无关。

$$\theta_{\text{angle}} = \frac{p}{2dM}, \quad (1)$$

式中:  $\theta_{\text{angle}}$  为基于干涉测角技术估计的入射角的测量精度;  $p$  为光栅周期;  $d$  为两光栅间距;  $M$  为利用插值技术可获取的一个周期条纹的相位细分数。通过(1)式可以看出, 干涉测角的测角精度(误差)与光栅周期成正比, 与光栅间距以及相位细分数成反比。为了获得更高的精度(更小的误差), 可采用更小的光栅周期, 更大的光栅间隔以及更多的相位细分数。将  $p=50 \mu\text{m}$ ,  $d=50 \text{ mm}$  和  $M=1024$  代入(1)式, 得出  $\theta_{\text{angle}}=0.1''$ 。上述参数选择并不十分严格, 一般可以达到。由此可知, 干涉测角技术可以在较小的空间尺度内实现较高的角度测量精度。

#### 3.2 谱宽度受限的视场

影响干涉测角技术的测角精度的最直接因素就是目标光的相干性。光程差与目标光相干长度之间关系如图 4 所示。随着入射角的增加, 两个参与干涉的剪切光束的光程差逐渐增大。当光程差大于目标光的相干长度时, 两束剪切光束无法干涉, 表明该技术失效。

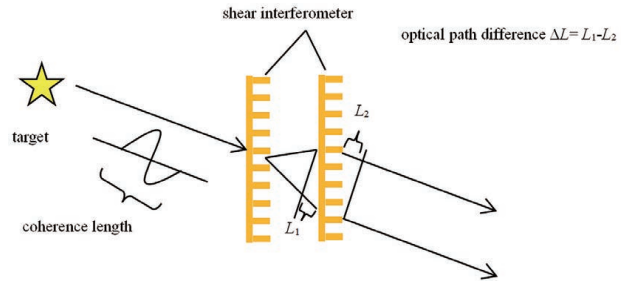


图 4 光程差与目标光相干长度之间关系

Fig. 4 Relationship between optical path difference and coherence length of target light

参与干涉的两个剪切光束之间的相位差与入射角之间的关系可表示为

$$\Delta\varphi \approx -4 \frac{\pi d}{p} \sin \theta_{\text{in}}, \quad (2)$$

式中:  $\Delta\varphi$  为相位差;  $\theta_{\text{in}}$  为入射角。

由于光程差  $\Delta L$  与相位差  $\Delta\varphi$  之间存在简单关系, 即

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi, \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为目标光中心波长。

将(2)式代入(3)式并取绝对值后可得光程差大小  $\Delta L_{\text{abs}}$  的表达式为

$$\Delta L_{\text{abs}} = \frac{2d\lambda}{p} \sin \theta_{\text{in}}. \quad (4)$$

光谱谱宽度与相干长度之间的简单近似关系可表示为

$$L_{\text{coh}} \approx \lambda^2 / \Delta\lambda, \quad (5)$$

式中:  $L_{\text{coh}}$  为目标光相干长度;  $\Delta\lambda$  为目标光的谱宽度。通过(5)式可以看出, 相干长度与谱宽度成反比, 故带宽越窄, 相干长度越长。

令(4)式与(5)式相等即可获得受谱宽度限制的视场角  $\theta_{\text{max}}$  的表达式为

$$\theta_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{p\lambda}{2d\Delta\lambda}\right). \quad (6)$$

由(6)式可知, 视场角一般随着谱宽度的增大而减小。参数  $\lambda$ 、 $p$  与  $d$  可分别选择以下数值:  $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$ ,  $p = 50 \mu\text{m}$ ,  $d = 50 \text{mm}$ 。当  $\Delta\lambda = 1 \text{nm}$  时,  $\theta_{\text{max}}$  约为  $15^\circ$  (全视场角约为  $30^\circ$ ), 此时视场较大, 但谱宽较窄, 适合对自发射(或反射)激光的目标源进行精确角度测量。当  $\Delta\lambda = 20 \text{nm}$  时,  $\theta_{\text{max}}$  约为  $0.76^\circ$  (全视场角约为  $1.5^\circ$ ), 此时视场较小, 适合对加滤光片的自然光目标源进行精确角度测量。当  $\Delta\lambda = 200 \text{nm}$  时,  $\theta_{\text{max}}$  约为  $0.076^\circ$  (全视场角约为  $0.15^\circ$ ), 此时视场很小, 说明对于宽带光源, 该技术只能对系统光轴附近小视场范围内的目标进行精确角度测量。

## 4 研究进展

### 4.1 国外研究进展

OPC 公司最早提出基于干涉测量技术的星敏传感器, 并开展样机研制与性能验证。

2008 年, OPC 在美国空军的资助下, 完成干涉测量星敏传感器技术的第一阶段的调研。他们证实该星敏传感器可实现  $20^\circ \times 20^\circ$  视场、 $2 \text{Hz}$  响应速度和  $0.11''$  的精度。该星敏传感器的结构图如图 5 所示<sup>[5]</sup>。在第二阶段, OPC 制作出样机并在仿真星场中测试性能。干涉测量星敏传感器的最核心单元为前端光学机构, 如图 6 所示<sup>[5]</sup>, 它决定了星敏传感器的精度性能。

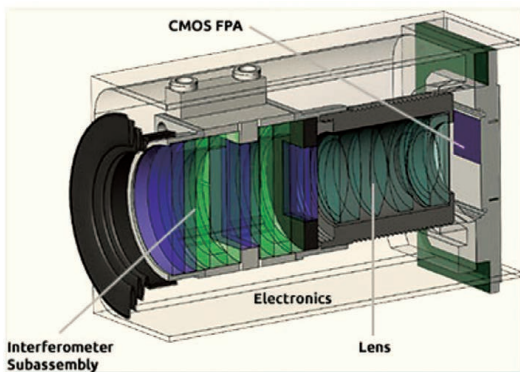


图 5 干涉测量星敏传感器结构图<sup>[5]</sup>

Fig. 5 Structure diagram of interferometry star tracker<sup>[5]</sup>

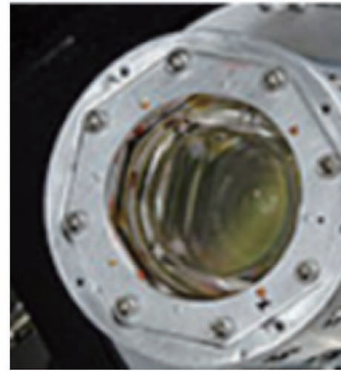


图 6 干涉测量星敏传感器的前端光学机构<sup>[5]</sup>

Fig. 6 Front-end optical structure of interferometry star tracker<sup>[5]</sup>

2008~2013 年, OPC 在美国海军资助下, 完成一个新颖的基于干涉测量技术的被动光学方法的开发, 以建造一个不依靠全球定位系统(GPS)的可自我保持精确位置估计的现代天空导航系统(CNS)。经过美国海军资助的第二阶段项目, OPC 制作出一个工作在近红外光谱区的微型干涉测量星敏传感器(MiST-IR)样机, 如图 7 所示<sup>[5]</sup>。MiST-IR 能非常准确地探测星体的角度偏离。该精度使 MiST-IR 可计算独立于 GPS 的天空定位, 也就是纬度和经度坐标。



图 7 微型干涉测量星敏传感器(MiST-IR)样机<sup>[5]</sup>

Fig. 7 Prototype of miniature interferometric star tracker (MiST-TR)<sup>[5]</sup>

2012~2013 年, OPC 在美国海军的资助下, 为立方卫星(Cubesat)设计和建造一个飞行准备的微型干涉测量星敏传感器单元(C-MiST)。C-MiST 是一个具有独立处理器的单机设备, 嵌入软件和空间即插即用(SPA)顺应接口。C-MiST 的部分设计参数如图 8 所示, C-MiST 样机如图 9 所示<sup>[5]</sup>。

### 4.2 国内研究进展

国内科研人员对干涉测角技术进行了跟踪研究。浙江大学的研究团队(杜娟、白剑、黄潇等)提出采用棋盘格光栅作为关键元件的二维干涉测量星敏

Parameter	Prototype Performance Target
Accuracy	0.0004° (SNR limit) 0.002° (Power Limited mode)
Max Slow Rate	5°/s
Update Rate	2 Hz
Size	5 x 5 x 10 cm
Mass	200 g + electronics
Power	2 W (@0.002° with respun boards)
Interface	SPA
Operating Temp	-30 to +55C (sensor)
Survival Temp	-30 to +55 C (sensor)
Radiation	300 kRad (sensor)
Lifetime	2 yrs

图 8 C-MiST 的部分设计参数<sup>[5]</sup>

Fig. 8 Part design parameters of the C-MiST<sup>[5]</sup>

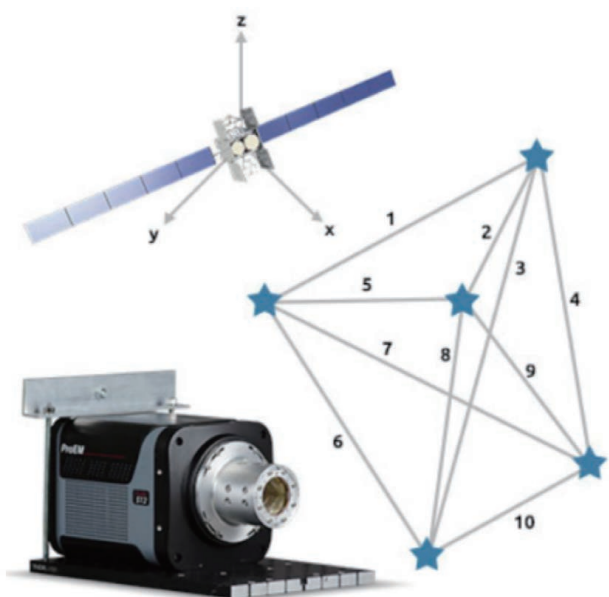


图 9 C-MiST 样机<sup>[5]</sup>

Fig. 9 Prototype of the C-MiST<sup>[5]</sup>

感器,给出其光学设计结构并开展测量精度分析。他们的设计方案和光学设计结构分别如图 10 和图 11 所示<sup>[7]</sup>。其设计的光学系统主要参数如下:视场为 20°,工作波长带宽为 450~850 nm,  $F$  数为 1.2, 焦距为 16 mm, 从第一个光栅到探测器靶面的总长度为 80.7 mm。他们通过实验证实了该二维干涉测量星敏感器的测角精度优于 0.2''。

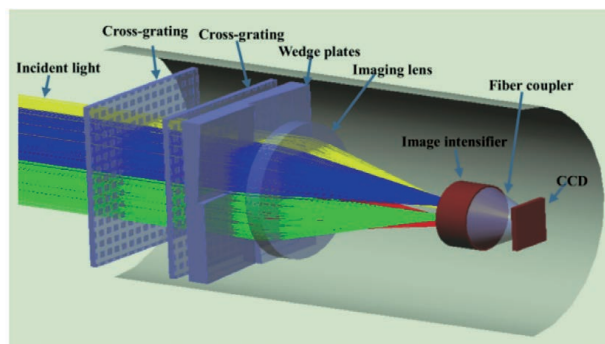


图 10 干涉测量星敏感器设计方案<sup>[7]</sup>

Fig. 10 Schematic of interferometric star tracker<sup>[7]</sup>

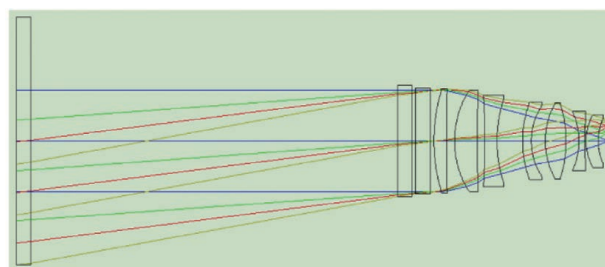


图 11 干涉测量星敏感器光学系统<sup>[7]</sup>

Fig. 11 Optical system of interferometric star tracker<sup>[7]</sup>

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所也开展了对干涉测角技术的研究。其研究团队(董磊、李文昊、姜珊、张淑芬等)首先基于 OPC 给出的基本结构(图 12<sup>[8]</sup>)分析干涉测角技术的工作原理。然

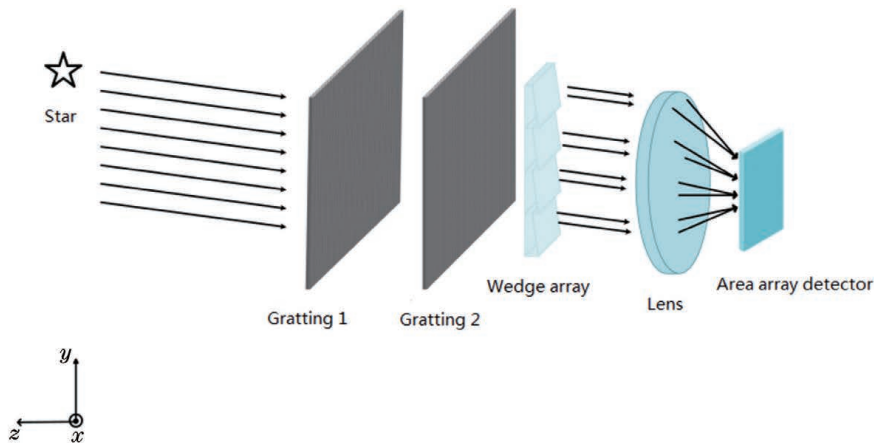


图 12 基于衍射光栅的星敏感器光学结构<sup>[8]</sup>

Fig. 12 Optical structure of the star tracker based on diffraction grating<sup>[8]</sup>

后,分析并推导基于条纹相位估计的高精度测角的解析表达式以及粗测角与精测角的融合方案。最后,通过实验验证高精度测角表达式的准确性,开展

对影响测角精度和视场大小的主要因素的研究并提出新的二维高精度测角方案<sup>[9]</sup>。高精度测角验证实验的装置与结果分别如图 13 与图 14 所示<sup>[8]</sup>。

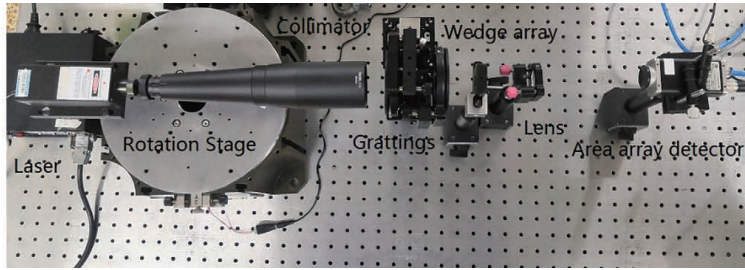


图 13 高精度测角验证实验装置<sup>[8]</sup>

Fig. 13 Experiment devices for high precision angle measurement verification<sup>[8]</sup>

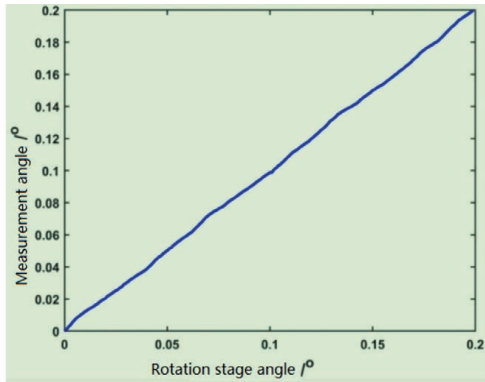


图 14 测量角度随转台角度的变化<sup>[8]</sup>

Fig. 14 Measurement angle changes with rotation stage angle<sup>[8]</sup>

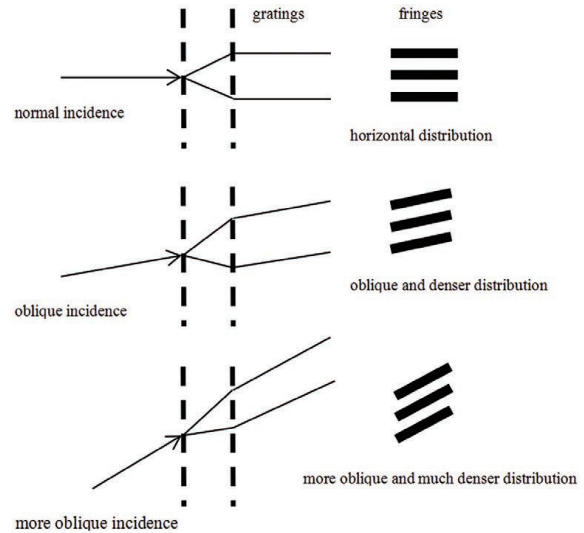


图 15 入射角与干涉条纹图样的关系

Fig. 15 Relationship between incident angle and fringe pattern

## 5 研究难点

### 5.1 如何实现高精度测角

通过理论分析和实验研究发现,高精度测角将受到多个因素的影响,主要包括:目标光入射角增大引入的干涉条纹取向和周期的变化,光楔阵列的四等分误差和光楔阵列整体尺寸与干涉条纹周期不匹配引入的角度估计误差,以及目标光波面起伏和光学系统像差引入的干涉条纹的弯曲等因素。

实验发现目标光入射角增大将引起干涉条纹取向和周期的变化(图 15)。入射角从正入射位置增大会引起水平取向的干涉条纹发生旋转倾斜。入射角越大,倾斜越明显,同时条纹变密。当入射角由正入射位置反向增大时,干涉条纹发生反向旋转倾斜,同时条纹变密。本文研究团队通过替换不同的光源和准直方式,排除上述因素的影响。目前,我们怀疑是第二个光栅相对第一个旋转引起该现象。即目标光倾斜入射时第一个光栅的±1 级衍射光在垂直第二个光栅栅线方向的角度投影随入射角的变化量失

对称(不相等),且该失对称性随入射角增大而增加,故引入随入射角增大而增加的相对倾斜项。另外,我们也怀疑上述现象是由光栅加工不完美导致。即光栅加工的不完美导致±1 级衍射光的衍射角大小不相等,且该差异随入射角的增大而加剧,从而引起水平方向的相对倾斜,产生竖直干涉条纹。

光楔阵列的四等分误差和光楔阵列整体尺寸与干涉条纹周期不匹配对测角精度的影响主要来源于四等分条纹相位估计算法。该算法要求干涉条纹的光强分布是正弦(或余弦)函数,只包含一个完整的条纹周期,以及将条纹周期四等分。当光楔阵列存在四等分误差以及光楔阵列方向不能正好包含一个条纹周期时,将出现条纹相位估计误差。

目标光波面起伏和光学系统像差引入的干涉条纹弯曲对测角精度的影响也来源于四等分条纹相位估计算法。该算法只能估计直条纹的相位,条纹弯

曲将降低相位估计精度。因此,应通过光学设计采用像差较小的光机结构方案以及通过对算法的改进减少条纹弯曲对测角精度的影响。

## 5.2 获得较大的观测视场

前面介绍了理论上影响干涉测角技术视场的主要因素——目标相干性的初步估计结果。除了上述因素外,干涉测角技术的视场还受到以下主要因素的影响:前面提到的目标光入射角增大引入的干涉条纹取向和周期的变化,光学系统的像差对视场的影响,以及大气湍流对视场的影响等。

四等分条纹相位估计算法只适用于条纹仅发生平移并无结构变化这种情况。当目标光入射角增大引起干涉条纹取向和周期变化时,采用四等分条纹相位估计算法将出现测角误差。当角度测量精度因入射角增大下降到无法允许的程度时,该因素将制约干涉测角系统的视场。因此,需要分析干涉条纹取向和周期变化的具体影响因素并考虑解决方案。

光学系统普遍存在像差,主要像差包括球差、彗差、像散、色差等。大部分像差与视场相关,视场越大,像差越大。像差的出现将破坏干涉条纹的对称性,由直纹变得弯曲,这将影响测角精度。当角度测量精度因离轴像差下降到无法允许的程度时,该像差将约束干涉测角系统的视场。

大气湍流存在等晕区的概念。在同一等晕区内可认为目标光的波面起伏很小,目标光近似为平面。不同等晕区的目标光不相干,即不同等晕区的光所形成的干涉条纹模式一般不同,故将引起条纹弯曲,从而降低测角精度,进而也影响整个系统的视场。由于不同高度大气湍流的影响程度不同,故需要根据具体应用场景分析大气湍流对干涉测角系统视场的影响。

## 6 结 论

基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术利用全新的方式(基于干涉条纹相位估计方法)实现高精度角度测量,具有优于传统角度测量系统(基于光斑质心估计方法)的更高的测角精度,依赖目标光光谱宽度(时间相干性)的可变视场,以及小体积、低重量、低功耗等特点,使其在星敏感器、大口径望远镜的高精度指向以及远距离激光通信的光束跟瞄等应用领域发挥重要的作用。

目前来看,国外该技术在星敏感器领域的研究已较为深入,已完成样机研制并开展实际应用场景的性能验证。国内该技术的研究还处于原理验证阶

段,还有一些影响测角精度和视场大小等主要性能的因素需要深入的探索与研究,离样机研制和最终实测还有一定距离。希望通过这篇论文能引起广大科研人员的兴趣,使更多的有识之士加入对该技术的研究攻关中来,尽快提升该技术的成熟度,从而使角度测量领域尤其是远距离目标测角领域从中受益。

## 参 考 文 献

- [1] Wang X D. Study on wide-field-of-view and high-accuracy star sensor technologies [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 36.  
王晓东. 大视场高精度星敏感器技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 36.
- [2] Zhang L, Qi K Q, Xiang Y. Two-step algorithm for removing the rotationally asymmetric systemic errors on grating lateral shearing interferometer[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 14267-14277.
- [3] Ling T, Liu D, Yue X M, et al. Quadriwave lateral shearing interferometer based on a randomly encoded hybrid grating[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2245-2248.
- [4] Schreiber H, Dewa P G, Dunn M M, et al. Applications of a grating shearing interferometer at 157 nm[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1095-1106.
- [5] Hutchin R A. Interferometric tracking device: US8045178[P]. 2011-10-25.
- [6] Hardy J W, MacGovern A J. Shearing interferometry: a flexible technique for wavefront measurement[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 0816: 180-195.
- [7] Du J, Bai J, Wang L, et al. Optical design and accuracy analysis of interferometric star tracker[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10815: 1081504.
- [8] Zhang S F. Research on high accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021: 50-54.  
张淑芬. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021: 50-54.
- [9] Dong L, Wang J L, Li H W. A star sensor: CN109470236A[P]. 2019-03-15.  
董磊, 王建立, 李洪文. 一种星敏感器: CN109470236A[P]. 2019-03-15.