

文章编号 2097-1842(2023)06-1433-09

干涉星敏感器测角精度影响因素的研究

阮宇翔^{1,2}, 董磊^{1*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高传统星敏感器的姿态测量精度, 可将干涉测角技术与传统星敏感器相结合, 即在传统星敏感器质心定位技术的基础上, 利用星像点的光强信息进一步进行细分, 从而突破了质心定位的精度限制, 形成具有大视场高精度的干涉星敏感器。本文对制约干涉星敏感器测角精度的因素进行深入研究, 重点研究干涉条纹的分割误差对测角精度的影响机理。通过研究分析, 得出以下结论: 光楔阵列不等分误差不是影响干涉星敏感器测角精度的主要因素; 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差小于1%时, 可保证单因素测角误差小于0.01"; 对于莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不正交误差, 条纹旋转角度应当小于0.1°, 可保证单因素测角误差小于0.01"。所以, 应在实际加工与装调过程中抑制上述两个主要误差, 从而使干涉星敏感器的实际测角精度接近高精度理论值。

关键词: 干涉星敏感器; 干涉测角技术; 干涉条纹; 相位估计; 测角精度

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0232

Influencing factors of angle measurement accuracy of an interferometer star tracker

RUAN Yu-xiang^{1,2}, DONG Lei^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: nodepression@126.com

Abstract: In order to improve the traditional attitude measurement accuracy of star sensors, interference angle measuring technology can be combined with a traditional star sensor. Based on the centroid positioning technology of traditional star sensors, the light intensity information of star image points is subdivided to break through the accuracy limitation of centroid positioning and obtain a highly precise interferometric star sensor with a large field of view. In this paper, the factors that restrict the angle measurement accuracy of interferometer sensors are deeply studied with particular interest given to the influence of interference fringe segmentation error on angle measurement accuracy. Through research and analysis, we conclude that the asymmetry error is not the main factor affecting the angle measurement accuracy of interferometric sensors.

收稿日期: 2022-11-14; 修订日期: 2022-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11703024)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11703024)

When the mismatch error between the Moire fringe period and the overall optical dimension of the optical wedge array is less than 1%, the single-factor angle measurement error is less than 0.01". For non-orthogonal error between Moire fringe orientation and an optical wedge's array arrangement direction, the accuracy error of single-factor angle measurement is sure to be less than 0.01" when the fringe rotation angle is less than 0.1°. Therefore, the above two main errors should be suppressed in the production and assembly so that the measurement accuracy of the interferometer sensor is closer to the high-precision theoretical value.

Key words: interferometer star tracker; interferometric angle measuring technique; interference fringe; phase estimation; angle measuring accuracy

1 引 言

星敏感器是一种高精度的姿态敏感测量仪器,在航天器姿态控制系统中起着重要作用,并且在导弹制导系统、激光指向传感器系统和深空激光通信系统等方面也得到了广泛的应用^[1-4]。

传统星敏感器的质心精度一般为 1/10~50 像元。为了提高精度,通常会采用更小的视场。然而,更小的视场会减少用于追踪的可靠星源数量,并且降低了所需的测量速率,视场减小还会降低星敏感器的动态性能。此外,在传统的星敏感器中采用了星点质心定位技术,星敏感器的姿态测量精度随质心定位精度的提高而提高,质心定位精度的提高同时也会提高星图识别成功率^[5-8]。提高星点提取精度的常用方法是采用离焦方式,即令恒星在星敏感器上的像点弥散在几个像元内,通过内插细分定位算法使星点提取精度达到亚像元甚至更高。高分辨率的焦平面阵列(FPA)可以提高传统星敏感器的质心精度。然而,当 FPA 的分辨率提高时,星敏感器的重量、体积和能量损耗也会增加。此外,更高分辨率的 FPA 更易于受到辐射的影响。因此,传统星敏感器的姿态测量精度与视场等因素存在制约关系,且质心定位精度存在理论上限。

传统星敏感器的上述缺陷,促使科研工作者一直在探索可规避以上问题的新型星敏感器。直到 2011 年, Hutchin R A 发表了一篇干涉星敏感器的专利,利用干涉测角的方法来提高星敏感器的精度^[9]。随后,美国的 Optical Physics 公司(OPC)对干涉星敏感器进行了性能测试。证明干涉星敏感器在 20°视场下,姿态测量精度能够达到 0.11",且重量只有 2 kg。该研究证实:与同视

场的其他传统星敏感器相比,干涉星敏感器的姿态测量精度提高了一个数量级,真正意义上实现了大视场高精度的星敏感器。2015 年,干涉星敏感器被成功应用于美国航空航天局(NASA)的项目当中,用来开发深空激光通信光束指向应用以及为航天器导航和轨道确定提供精确的姿态测量数据。基于干涉星敏感器这项专利,国内也开展了一系列研究。浙江大学的研究团队提出了一种双轴干涉星敏感器,相较于只能提升单轴姿态测量精度的干涉星敏感器,该双轴干涉星敏感器可以同时提高两轴方向姿态测量精度,其姿态测量精度理论上可以达到 0.2"^[10]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)的研究团队基于 Richard A.Hutchin 的专利给出的基本结构,分析了干涉星敏感器的工作原理并推导了干涉星敏感器的解析表达式^[11],并通过实验验证了干涉测角技术相对于传统质心定位技术的精确性。哈尔滨工业大学的研究团队将干涉星敏感器应用于天光背景较强的近地区域(大气层内),以对目标星探测性能进行研究,完成了干涉式全天时星敏感器的光学设计^[12]。

干涉星敏感器最明显的优势之一是具有极高的测角精度,虽然 OPC 研究团队从理论上证明干涉星敏感器的像素细分精度可达 1/1000 像元,比传统星敏感器理论值(约 1/100 像元)高约一个数量级,但是对实现该精度所付出的代价或关键技术却没有介绍。已有文献多是对工作原理或性能的理论分析,鲜有对制约其测角精度的因素和实际测角效果进行深入研究。长春光机所研究团队对常规加工和装调技术下干涉星敏感器的单星测角精度开展了初步研究。通过多次实验发现,在常规加工和装调技术下,干涉星敏感器的实际单星测角值存在较大误差,测量误差约 -8"~5"^[13]。

这说明存在若干影响干涉星敏感器单星测角精度的因素, 这些因素无法通过常规装调方法消除, 故需要重点分析干涉星敏感器单星测角精度的主要影响因素, 对敏感因素采用较为严格的限制措施, 从而使实际测角精度达到或接近干涉星敏感器的高精度理论值。

针对干涉星敏感器实际单星测角误差较大问题, 本研究团队认为需从核心原理出发寻找主要制约因素。把干涉星敏感器核心工作归结为目标光干涉条纹形成和条纹相位提取这两个环节, 由此提出制约干涉星敏感器单星测角精度的两个关键科学问题: (1)干涉条纹形状对测角精度的影响机理; (2)干涉条纹的不合理分割对测角精度的影响机理。本文将围绕第二个问题开展详细的分析论证。

本文将首先介绍干涉星敏感器的基本原理, 然后介绍干涉测角技术, 结合干涉星敏感器的基本结构, 对可能影响干涉条纹分割的因素逐一进行分析; 研究这些因素对测角精度的影响程度; 最后给出结论。

2 干涉星敏感器的基本原理

干涉星敏感器通过光学干涉系统提高姿态测量精度, 光学干涉系统主要包括由 2 个光栅组成的光栅对以及由 4 个不同楔角的光楔组成的光楔阵列。干涉星敏感器的基本结构如图 1 所示。探测到的星光通过第一个光栅时会产生多级衍射光, 产生的 ± 1 级衍射光通过第二个光栅时, 又将产生多级衍射光。干涉星敏感器主要利用两束衍射光形成莫尔条纹, 一束是利用光栅 1 衍射的 $+1$ 级光经过光栅 2 后再次衍射产生的 -1 级光(以下简称 $+1/-1$ 衍射光), 另一束是利用光栅 1 衍射的 -1 级光经过光栅 2 后再次衍射产生的 $+1$ 级光(以下简称 $-1/+1$ 衍射光)。光栅对产生的 $+1/-1$ 衍射光和 $-1/+1$ 衍射光相互平行并且都与光轴平行。第二个光栅以光轴为转轴, 旋转一个很小的角度, 这就在光栅对之间引入一个旋转角, 并且第二个光栅放置在第一个光栅的泰伯距离处, 从而可以产生莫尔条纹。莫尔条纹相位与入射光的角度存在一一对应关系, 而干涉星敏感器可以精确测量莫尔条纹相位, 从而实现对目标

光入射角的精确测量。莫尔条纹相位测量主要通过光楔阵列、成像光学系统和相机实现。光楔阵列将一个周期的干涉条纹平均分成了 4 个部分, 4 个部分的光波经过成像光学系统后, 最后在相机平面上形成 4 个独立可区分的光斑。再利用成熟的 ABCD 方法^[14-17], 即可实现对莫尔条纹相位的精确估计。

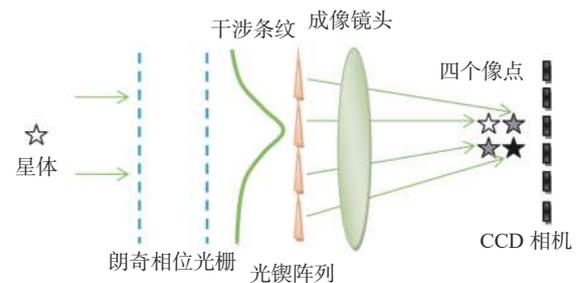


图 1 干涉星敏感器系统的基本结构

Fig. 1 The basic structure of the interferometer start tackler system

3 干涉测角技术的测角精度及其条纹分割误差

干涉测角技术的莫尔条纹相位与目标光入射角之间存在近似线性关系^[18]。通过对干涉星敏感器系统所形成的干涉条纹相位进行精确估计, 并经过简单计算, 即可获得目标光入射角的精确估计。下面将介绍干涉测角技术实现精确的角度测量的具体方法。入射目标光经过光栅对将在光楔阵列表面形成莫尔条纹(理想的条纹是正弦函数形状), 调节光栅对的相对轴向转角, 使其在光楔阵列范围内产生一个周期的条纹结构。光楔阵列对一个条纹周期的 4 个不同区域进行分割并引入不同方向的偏转, 再经过光学成像系统在探测器靶面上形成 4 个独立可区分的光斑(如图 2 所示^[19])。这 4 个光斑的光强值对应一个周期条纹在 4 个等分区间内的积分值。图 2 中, 每一幅图里由箭头标记的光斑有最大的强度, 即为最亮的光斑。由图 2 可知, 在某些特定的角度下只能看到 3 个光斑, 这是因为光斑强度随目标光入射角呈正弦规律变化, 在某些特定角度下某个光斑的光强值为零。最亮光斑的位置在 4 个点之间旋转变换, 实际上最亮光斑的旋转方向取决于目标光与干涉星敏感器之间的相对运动, 沿同一个方向相对运动

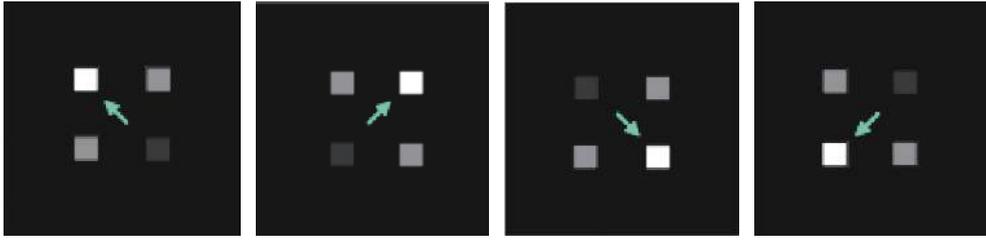


图 2 单颗星在探测器平面上的光斑强度分布

Fig. 2 The spot intensity distribution of a single star on the plane of the detector

将产生顺时针旋转,而沿相反方向的相对运动将产生逆时针旋转。

下面将结合相关数学公式给出计算干涉星敏传感器测角精度的数学模型。根据 ABCD 表达式,由 4 个光斑的光强值得出莫尔条纹的相位值,如式(1)所示:

$$\tan \varphi = \frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_4}, \quad (1)$$

式(1)中, φ 表示莫尔条纹的相位, I_1, I_2, I_3, I_4 分别表示 4 个光斑的光强值(即分别代表 A 值、B 值、C 值、D 值)。图 2 中第一幅图指针所示为 I_1 , I_1 右边是 I_2 , I_1 下边是 I_3 , I_3 右边是 I_4 。后面的图则给出了光斑亮度周期性变化的分布结果。最后,根据目标光入射角与条纹相位之间的对应关系精确计算目标光的入射角:

$$\sin \theta = -\frac{\varphi p}{4\pi d}, \quad (2)$$

式(2)中, θ 表示入射角, p 表示光栅周期, d 表示光栅对之间的间距。干涉星敏传感器系统的测角精度 ε 可以表示为:

$$\varepsilon = \frac{p}{2dM}, \quad (3)$$

式(3)中, M 表示通过插值技术可获取的一个周期条纹的相位细分数。由式(3)可以看出,光栅周期 p 越大,干涉探测系统的测角精度 ε 越低;光栅对之间的间距 d 和相位细分数 M 越大,干涉探测系统的测角精度 ε 越高。

当然前面给出的干涉测角技术的原理公式是在理想情况下推导出来的结果。实验过程中测量角度与转台角度间存在偏差,即为测量误差,转台在不同角度下的测量误差如图 3 所示。由图 3 可以看出,受实际加工和装调误差的影响,干涉星敏传感器本身就存在一些影响测角精度的因素,需要对这些因素进行定量分析,从而便于对影响较大

的因素采取措施进行抑制,使干涉星敏传感器的实际测角精度接近理论精度。在引言中提到主要有两个关键问题制约干涉星敏传感器的测角精度,本文主要分析第二个关键问题,即干涉条纹的分割误差对测角精度的影响机理。下面我们将针对该问题进行深入的分析。

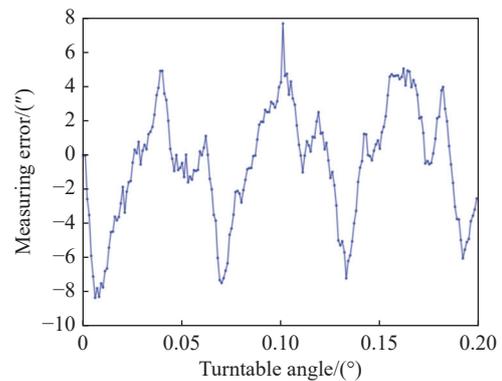


图 3 实验测量误差随转台角度的变化

Fig. 3 Experimental measurement error varying with turntable angle

干涉测角技术采用 ABCD 方法估计条纹相位,为了避免引入误差,需要对两个光栅所形成的一个周期的莫尔条纹在垂直条纹方向进行严格的四等分。然而,实际上莫尔条纹的周期和取向均会与光楔阵列的整体通光尺寸和排列方向存在差异性,另外由于存在加工和装调误差,4 个光楔也存在不等分的情况,上述因素会造成一个周期的干涉条纹出现分割误差,从而降低条纹相位估计精度。综上所述,干涉条纹的分割误差可分成以下 3 种情况:(1) 光楔阵列不等分;(2) 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配;(3) 莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不垂直。下面我们将对这 3 种情况以及解决方案进行详细的介绍。

3.1 光楔阵列不等分

每个光楔都存在加工误差,尺寸不会完全相等。也就是说 4 个光楔在垂直条纹取向方向的宽

度不相等, 如此一来在相机靶面上获得的 4 个光强值与条纹四等分情况将存在差异, 代入式(1)后得到的相位值也将存在差异, 从而影响干涉测角技术的测角精度。对于该误差对条纹相位估计的影响可采用以下方法进行研究。

假设覆盖在光楔阵列前表面的干涉条纹是单色平面波产生的理想正弦条纹, 并且满足以下两个条件: (1) 条纹取向严格垂直于光楔阵列的排布方向; (2) 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸相等。这时光楔阵列不等分问题可利用正弦函数一个周期内所包围面积的不等分来描述。

如图 4 所示, 将一个周期正弦函数分成 4 个区间。每个区间内正弦函数曲线下所包围的面积值即为 ABCD 方法中 4 个数值(A 值、B 值、C 值或 D 值)之一, 然后将上述 4 个数值代入 ABCD 方法对应的计算公式, 可获得 4 个区间不等分对条纹相位的影响情况, 再代入条纹相位与测角精度的关系式即可得到对测角精度的影响。在上述的分析中可选择不等分区间宽度与四等分宽度相对偏差的上限, 例如 1%, 5%, 10% 等, 再令前 3 个不等分区间宽度等于四等分区间宽度再加上一个随机变量(上限在前面给出), 最后一个不等分区间宽度等于一个干涉条纹的周期减去前三个区间宽度之和。

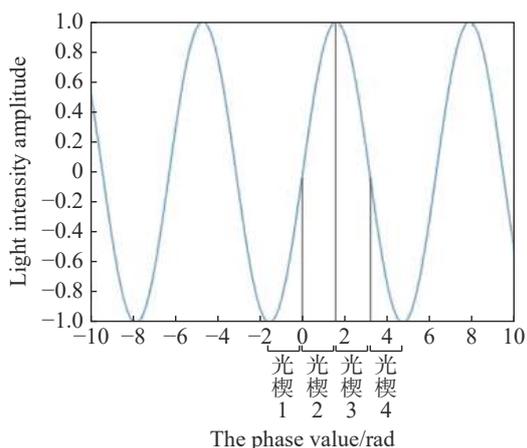


图 4 一个周期正弦函数的区间分割

Fig. 4 Interval segmentation of the sine function in one period

3.2 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配

实际莫尔条纹周期由两个光栅沿光轴方向的相对旋转产生, 而光楔阵列整体通光尺寸取决于加工和装调工艺, 一旦装好, 光楔阵列的尺寸就是

定值, 这时只能通过调节莫尔条纹周期使其与光楔阵列尺寸相等。然而, 对准过程必然存在误差。对于该误差对条纹相位估计的影响可采用以下方法进行研究。

假设覆盖在光楔阵列前表面的干涉条纹是单色平面波产生的理想正弦条纹, 并且满足以下两个条件: (1) 条纹取向严格垂直于光楔阵列的排布方向; (2) 光楔阵列四等分。这时莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配问题可用正弦函数一个周期内所包围面积的不完全分割(欠分割)或过量分割(过分割)来描述。

图 5 为不同分割方式对应的整体分割宽度, 即光楔阵列的整体通光尺寸。将分割宽度四等分, 每个等分区间内正弦函数曲线下所包围的面积值即为 ABCD 方法中 4 个数值(A 值、B 值、C 值或 D 值)之一, 然后将上述 4 个数值代入 ABCD 方法对应的计算公式, 可分别获得正分割、欠分割和过分割对应的条纹相位估计值。由此得出欠分割和过分割对条纹相位的影响情况。再代入条纹相位与测角精度的关系式即可获得对测角精度的影响。在上述分析中可选择不同分割宽度与正分割的相对偏离量, 例如 1%, 5%, 10% 等。

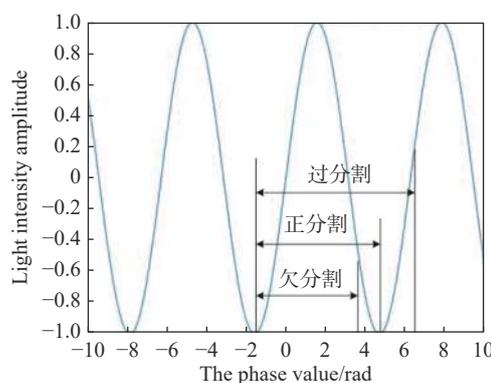


图 5 一个周期正弦函数的分割方式

Fig. 5 The segmentation type of the sine function in one period

3.3 莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不正交

本方案假设水平取向的条纹周期等于光楔阵列整体通光尺寸且光楔阵列将一个条纹周期四等分。水平取向的正弦条纹在一个周期内的光强分布, 如图 6 所示。将条纹旋转一定角度可获得倾斜条纹结构, 如图 7 所示。水平条纹和倾斜条纹在不同位置竖直切面内的光强分布如图 8 所示。由图 8 可知, 倾斜条纹的中心竖直切面内条纹周

期比水平条纹偏大, 这将引起条纹相位估计误差。另外, 倾斜条纹不同位置处的竖直切面内的条纹相位也不同, 利用 ABCD 方法获得的整体条纹相位可认为是不同切面内相位的平均效果, 也将引入相位估计误差。

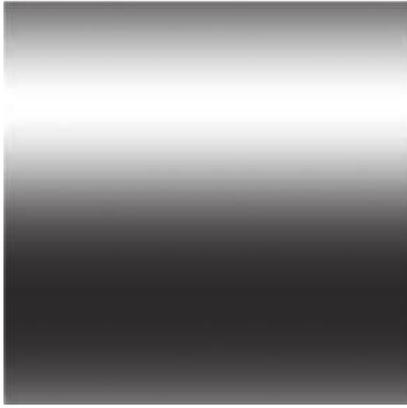


图 6 水平条纹的光强分布

Fig. 6 The light intensity distribution of the horizontal fringe

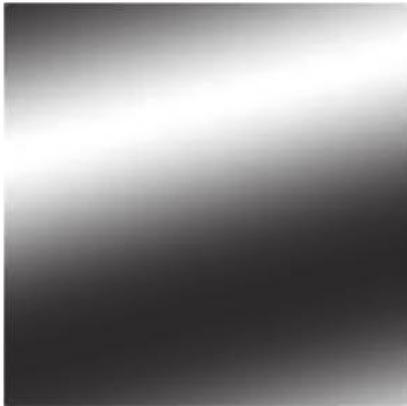


图 7 倾斜条纹的光强分布

Fig. 7 The light intensity distribution of the oblique fringe

基于水平条纹的中心竖直切面中的函数结构 (如图 8(彩图见期刊电子版)中红线所示), 计算函数曲线在光楔阵列每个四等分区间内的面积值 (即 A 值、 B 值、 C 值或 D 值), 利用 ABCD 方法计算该函数曲线的相位。因条纹取向水平, 故任意竖直切面内条纹相位均相等, 即该函数曲线的相位代表了水平条纹的相位。

对于倾斜条纹来说, 不同位置处竖直切面内条纹相位不同 (如图 8 中绿线和蓝星线所示), 故将光楔阵列四等分区间的第一个区间所对应的倾斜条纹所有竖直切面内函数曲线面积积和作为 A 值, 同样方法计算第二个区间作为 B 值, 然后再

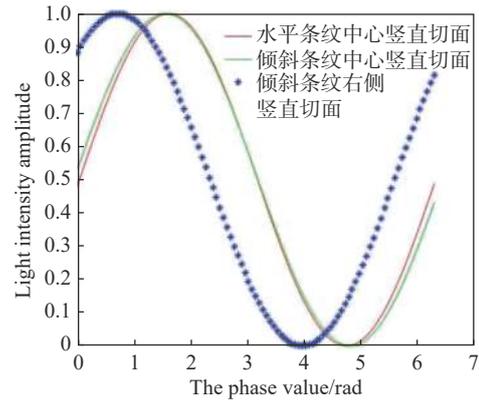


图 8 水平条纹和倾斜条纹在不同位置竖直切面内的光强分布

Fig. 8 The light intensity distributions of the horizontal and oblique fringes in the vertical section at different positions

获得 C 值和 D 值。利用 ABCD 方法计算倾斜条纹的相位。该相位与水平条纹相位的差值即为相位误差, 代入条纹相位与测角精度之间的关系式可获得其对测角精度的影响。研究不同条纹倾斜角对条纹相位估值的影响, 进而获得对测角精度的影响。

前面介绍了干涉条纹的分割误差可能出现的 3 种情况, 并给出研究方案, 下面将按照上述方案对以上 3 个影响因素进行研究分析。

4 条纹分割误差对干涉星敏感器精度影响的研究分析

为了便于分析, 取光栅周期 $p = 50 \mu\text{m}$, 光栅对之间的间距 $d = 5 \text{ cm}$, 相位细分度 $M = 1024$, 将以上数据代入式 (3) 中, 可以得到测角精度为 ε 为 $0.1''$ 。 $0.1''$ 就是期望达到的理想值。下面分别对光楔阵列不等分误差、莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差以及莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不垂直误差这 3 种情况开展研究分析, 给出这 3 个因素对干涉测角精度的定量影响结果。

4.1 光楔阵列不等分误差的影响分析

光楔阵列的加工公差一般为 1%, 较严格的加工公差可以达到 0.5%, 更为精细的加工公差可以达到 0.2%。因此, 在对光楔阵列不等分误差进行研究时, 选取了 0.1%~1% 的误差范围进行分析。图 9 给出了 0.1%~1% 的误差范围所产生的测角

误差。可以看到测角误差随光楔阵列不等分误差的增大而增大, 光楔阵列不等分误差为 1% 时, 测角误差达到最大值, 为 0.0045" 与理想值 0.1" 还相差两个数量级, 完全可以忽略不计。因此, 光楔阵列不等分误差显然不是影响干涉测角技术精度的因素。

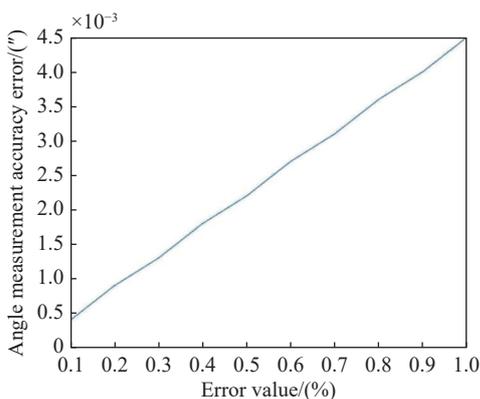


图 9 光楔阵列不等分误差

Fig. 9 Optical wedge array unequal division error

4.2 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差的影响分析

由第 2 部分的分析可知, 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差分为两种情况。图 10 是欠分割误差与过分割误差的结果, 实线表示的是欠分割误差的结果, 虚线表示的是过分割误差的结果。结合实际情况, 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差应当不超过 10%, 因此, 选取了 1% 到 10% 的误差范围进行分析。由图 10 可以看出, 不论是欠分割误差还是过分割误差, 测角误差都会随之增大而增大。此外, 过分割时测角误差增长的速度比欠分割时增长的速度更快, 也就是说过分割时, 测角误差累积得更快。第 4 节刚开始给出了干涉测角技术的主要模拟参数, 可算出综合测角精度的理论值为 0.1"。为了使实际综合测角精度接近上述理论值, 单因素引起的测角误差应小于理论值的 1/10, 因此莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配引起的测角误差应小于 0.01"。欠分割误差为 1% 时, 测角误差为 0.009"; 过分割误差为 1% 时, 测角误差为 0.009"。因此, 莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差小于 1% 可保证单因素测角误差小于 0.01"。这就对莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸的匹配情况提出较为严格的要求。

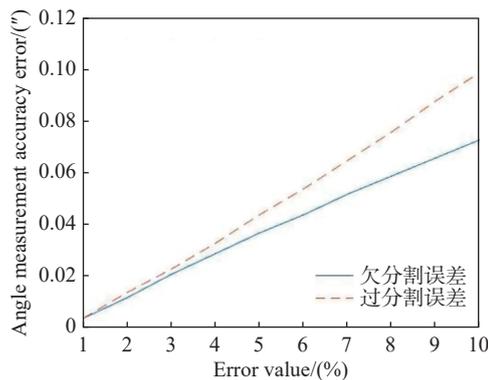


图 10 欠分割与过分割误差

Fig. 10 Under segmentation and over segmentation errors

4.3 莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不垂直误差的影响分析

图 11 是莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不垂直误差的研究分析结果。条纹旋转角度的范围为 1°~10°。从图 11 可以看出, 随着干涉条纹旋转角度增大, 测角精度的误差先增大后减小。当条纹旋转角度从 3°变化到 4°时, 测角误差有一个突变, 使测角误差陡然增大。测角误差最小为 0.066", 对应条纹旋转角度为 1°。但是仍大于可接受的测角误差 (0.01")。因此, 将条纹旋转角度进一步细分, 取 0.1°到 1°的范围进行分析, 如图 12 所示。当条纹旋转角度从 0.1°变化到 1°时, 测角精度的误差总体来说是逐渐增大的, 但是测角误差出现了 3 组相同的数据, 条纹旋转角度为 0.2°和 0.3°、0.4°和 0.5°以及 0.6°和 0.7°时, 测角误差完全相同。当条纹旋转角度为 0.1°时, 测角误差为 0.006", 符合理想误差

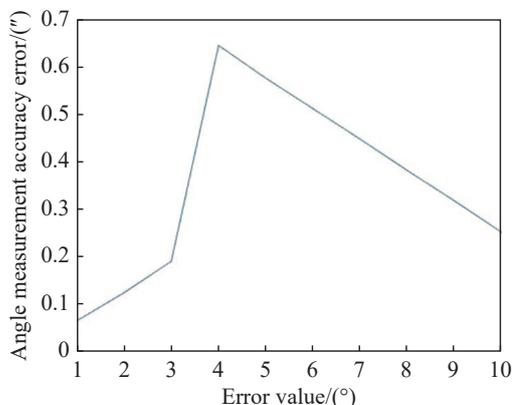


图 11 莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不垂直误差

Fig. 11 Nonorthogonal error between the orientation of the Moire fringe and the orientation of the optical wedge array

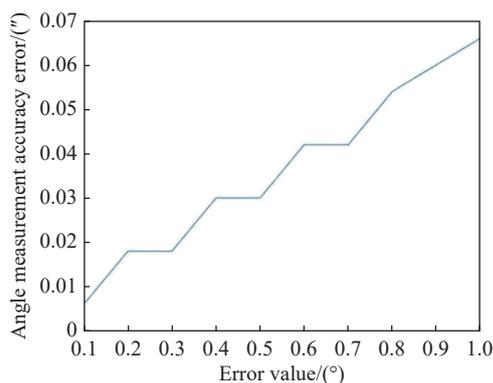


图12 莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不交误差(细分)

Fig. 12 Nonorthogonal error between the orientation of the Moire fringe and the orientation of the optical wedge array (subdivision)

值。因此,条纹旋转角度应当小于 0.1° ,此时通过人眼已经无法分辨如此小的角度,可以通过相机进行分辨。

参考文献:

- [1] 朱俊青,沙巍,方超,等.星敏镜头参数化建模辅助设计[J].中国光学,2021,14(3):615-624.
ZHU J Q, SHA W, FANG CH, et al.. Parametric modeling aided design for star sensor lens[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 615-624. (in Chinese)
- [2] 王维,陆琳,张天一,等. 10^{-9} 量级高灵敏度点源透射比测试设备研究[J].中国光学,2021,14(2):390-396.
WANG W, LU L, ZHANG T Y, et al.. A 10^{-9} order point source transmission test facility[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 390-396. (in Chinese)
- [3] 张健,王健飞,方新,等.航空遥感器平面反射镜系统装调方法[J].中国光学,2022,15(3):534-544.
ZHANG J, WANG J F, FANG X, et al.. Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 534-544. (in Chinese)
- [4] 孟庆宇,秦子长,任成明,等.光学系统降敏设计方法综述[J].中国光学,2022,15(5):863-877.
MENG Q Y, QIN Z CH, REN CH M, et al.. Review of optical systems' desensitization design methods[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 863-877. (in Chinese)
- [5] 孙瑾秋,周军,张臻,等.基于能量累加的空间目标星像质心定位[J].光学精密工程,2011,19(12):3043-3048.
SUN J Q, ZHOU J, ZHANG ZH, et al.. Centroid location for space targets based on energy accumulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 3043-3048. (in Chinese)
- [6] 杨君,张涛,宋靖雁,等.星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J].光学精密工程,2010,18(4):1002-1010.
YANG J, ZHANG T, SONG J Y, et al.. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 1002-1010. (in Chinese)
- [7] 许威.星点快速提取与高精度定位技术研究[D].杭州:浙江大学,2013.
XU W. Star fast extraction and high accuracy centroid estimation of star camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [8] 王晓东.大视场高精度星敏传感器技术研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2003.
WANG X D. Study on wide-field-of-view and high-accuracy star sensor technologies[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2003. (in Chinese)
- [9] HUTCHIN R A. Interferometric tracking device: US, 8045178[P]. 2011-10-25.

5 结 论

本文针对干涉星敏传感器存在的若干影响其单星测角精度的因素展开研究。首先,介绍了干涉星敏传感器的基本原理。然后,介绍了干涉测角技术,并将干涉条纹的分割误差问题分解为3种情况:(1)光楔阵列不等分误差;(2)莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差;(3)莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不交误差。最后,分别对上述3种影响干涉星敏传感器测角精度的因素展开分析,获得其对测角精度的定量影响结果。

研究结果证明:莫尔条纹周期与光楔阵列整体通光尺寸不匹配误差小于1%时,可保证单因素测角误差小于 $0.01''$;对于莫尔条纹取向与光楔阵列排布方向不交误差,条纹旋转角度应当小于 0.1° ,可保证单因素测角误差小于 $0.01''$ 。

- [10] DU J, BAI J, WANG L, *et al.*. Optical design and accuracy analysis of interferometric star tracker[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10815: 1081504.
- [11] 张淑芬, 姜珊, 董磊, 等. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器的理论分析[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1368-1377.
ZHANG SH F, JIANG SH, DONG L, *et al.*. High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1368-1377. (in Chinese)
- [12] 魏政. 面向近地应用的干涉式全天时星敏传感器恒星探测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
WEI ZH. Research on star detection technology of interferometric daytime star sensor for near-earth application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 张淑芬. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏传感器研究[D]. 长春: 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.
ZHANG SH F. *Research on high accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating*[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [14] NAKANO Y, MURATA K. Talbot interferometry for measuring the focal length of a lens[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(19): 3162-3166.
- [15] WYANT J C. Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(11): 2622-2626.
- [16] HARDY J W, MACGOVERN A J. Shearing interferometry: a flexible technique for wavefront measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 1987, 816: 180-195.
- [17] COLAVITA M M. Fringe visibility estimators for the palomar testbed interferometer[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1999, 111(755): 111-117.
- [18] GLINDEMANN A. *Principles of Stellar Interferometry*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 287-292.
- [19] 董磊, 阮宇翔, 王建立, 等. 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[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811016.
DONG L, RUAN Y X, WANG J L, *et al.*. Progress in high accurate angle measurement technology of long-distance target based on computational interferometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811016. (in Chinese)

作者简介:



阮宇翔(1997—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 2020年于安庆师范大学获得学士学位, 主要从事光学干涉成像与探测的研究。E-mail: 2937158315@qq.com



董磊(1982—), 男, 山东金乡人, 博士, 副研究员, 2004年、2007年于山东大学分别获得学士和硕士学位, 2019年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事光学干涉探测和成像新技术以及合成孔径成像方面的研究。E-mail: nodpression@126.com