

基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器的理论分析

张淑芬^{1,2}, 姜 珊¹, 董 磊¹, 王建立¹, 吴 娜¹, 李文昊^{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: 为克服传统星敏感器精度与视场、体积、质量等参数难以兼顾的问题, 本文研究了一种基于衍射光栅的高精度干涉星敏感器结构。利用角谱理论, 建立了星光入射角度与探测器上像点质心位置、像点能量之间的数学模型, 确定了干涉星敏感器利用像点质心位置和相对能量分别进行粗定位和精定位的方法及粗精定位结合获得星光入射角度的方法, 得出干涉星敏感器单星测量角分辨率和光栅周期、两块光栅之间的距离及像点光强信号电子学细分倍数有关的结论。通过计算机仿真模拟, 验证了干涉星敏感器精定位及粗精定位结合的可行性。在光栅周期为 50 μm , 两块光栅距离为 50 mm, 像点光强信号每变化一个周期采用 1024 倍电子学细分的情况下, 单星测量角分辨率达 0.1", 与传统星敏感器相比精度有显著提高。

关 键 词: 干涉星敏感器; 光栅; 衍射干涉; 高精度

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2021-0051

High accuracy interferometric star tracker based on diffraction grating

ZHANG Shu-fen^{1,2}, JIANG Shan¹, DONG Lei¹, WANG Jian-li¹, WU Na¹, LI Wen-hao^{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: leewenho@163.com

Abstract: In order to overcome the problems where traditional star trackers' directional accuracy, field of view, volume, weight and other factors are difficult to balance, we studied a highly accurate interferometric star tracker structure based on a diffraction grating. By using the angular spectrum theory, the mathematical models between the incident angle of starlight, the centroid position of spots, and the relative intensity of spots on the detector were established. Secondly, the methods that estimate a relative coarse position of the

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-03-26

基金项目: 科技部重点研发计划资助项目 (No. 2018YFF01011000); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61905244); 广东省重点领域研发计划项目 (No. 201913010144001); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (No. 2020SYHZ0033)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFF01011000); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 61905244); Research and Development Project in Key Areas of Guangdong Province (No. 201913010144001); Special Fund Project of High-Tech Industrialization for Science and Technology Cooperation Between Jilin Province and Chinese Academy of Sciences (No. 2020SYHZ0033)

target star from a centroid of the spots on the detector, and estimate a relative fine position of the target star from the relative intensity of the spots were determined. Therefore, the relative incident angle of star light was obtained by using successive estimates of the coarse and fine positions. Then, we drew a conclusion that the angle resolution for a single star is affected by the grating period, the distance between the two gratings and the electric subdivision of the intensity signal. Finally, a computer simulation was used to confirm the feasibility of this relative fine positioning technique and this combination technique of coarse positioning and fine positioning. The results show that this measure is practicable, and the angle resolution for a single star can reach 0.1 arc-seconds when the grating period is 50 μm , the distance between two gratings is 50 mm and the intensity signal of each period is subdivided by 1024 times. Compared with traditional star trackers, the accuracy is improved significantly.

Key words: interferometric star tracker; grating; diffraction and interference; high precision

1 引言

星敏感器以除太阳外的恒星为观测对象,利用星体在星敏感器上所成的像获得星体在星敏感器坐标系中的单位矢量,并通过计算星体在星敏感器坐标系中单位矢量相对于星体在天体坐标系中单位矢量的坐标变换矩阵,得到载体飞行姿态^[1-3]。其输出的姿态测量精度可以达到角秒级甚至亚角秒级,并且具有无时间累积误差、能够自主导航的优势,已经成为目前测量精度最高的姿态敏感器^[4-10],在地球遥感、地球测绘、洲际导弹和行星测绘等方面得到了广泛应用。随着航空航天事业的飞速发展以及应用场合的特殊化,高精度、大视场、轻小化已经成为星敏感器的发展趋势^[11]。

星敏感器测量精度包括单星测量精度和姿态测量精度。提高姿态测量精度是提高星敏感器测量精度的最终目的,提高单星测量精度是提高星敏感器姿态测量精度最本质的方法。星敏感器单星测量精度与星点质心提取精度、探测器像元阵列数及视场有关^[12-14]。提高星点质心提取精度常采用离焦的方式,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质心提取精度达到亚像元甚至更高^[15-16]。在像点内插细分定位算法中,多忽略像差的影响,利用高斯分布模型表示星像点能量分布^[17-18]。虽然已有研究表明该模型合理,但是光学像差会引起弥散斑分布的改变从而降低星点质心提取精度^[19],不适用于在甚高精度星敏感器上的应用。提高探测器像元阵列数,可以提高单星测量精度,但提升幅度有限,并且会带来额外花费。在探测器确定的情

况下,通过增大光学系统焦距的方法缩小星敏感器视场,可以提高单星测量精度。但是光学系统焦距的加大,会使星敏感器体积变大,不利于在微小卫星等航天器上的应用;另外,视场的缩小减少了视场内导航星数目,使星敏感器探测能力降低,不利于星图识别和星敏感器动态范围的提高。在焦距确定的情况下,增大光学系统相对孔径可以提高星敏感器探测到暗星的概率,从而提高星敏感器的探测能力^[20-23]。但是在焦距不变的情况下,光学系统相对孔径的增大不仅会增加星敏感器的体积和质量,还会增大光学系统像差,影响星点质心提取精度。此外,视场内探测到暗星的概率增加,会使星表尺寸变大,星图识别算法变得更加复杂,姿态更新速率降低。美国洛克希德马丁先进技术中心设计的 AST-301 是目前已知星敏感器中输出姿态测量精度最高的产品,两组 AST-301 配合使用时,姿态测量精度达到 0.18",但是星敏感器总质量达到了 14.2 kg,视场仅为 5°。由于视场较小,为保证星图识别的准确率,其极限探测星等为 8.5 等星,造成导航星数目庞大,姿态更新速率仅为 2 Hz。传统星敏感器的测量精度受视场、体积、质量和姿态更新速率等性能的制约。

由于星敏感器精度与视场、体积、质量等性能难以兼顾,传统微型星敏感器的测量精度普遍较低,其精度等级较大型星敏感器相差近一个量级。典型的微型星敏感器主要有^[24-25]:莫斯科罗蒙诺索夫国立大学斯特恩伯格研究所设计的 STC-2 星敏感器、德国维尔茨堡大学设计的 Picostar 星敏感器、加拿大瑞尔森大学设计的 ST-16 星敏感器。STC-2 星敏感器是目前已知质量最轻的星敏感器,不计遮光罩仅重 65 g,视场

19.64°, 功耗仅为 250 mW, 但是其姿态测量精度只有 10"; Picostar 星敏感器质量仅有 70 g (不计遮光罩), 体积仅为 30 mm×38 mm×80 mm, 视场为 12.51°, 但是由于其图像传感器分辨率较低, 姿态测量精度仅为 36"; ST-16 星敏感器在轻小型星敏感器中姿态测量精度相对较高, x/y 轴姿态测量精度达到了 7", 视场 20.03°, 但是其姿态更新率仅为 2Hz。

为克服传统星敏感器的缺陷, 美国 Optical Physics 公司 (OPC) 率先开展了干涉星敏感器的研究, 在视场为 20°, 光学系统仅重 200 g 的情况下, 单星测量精度理论上可达 0.11"^[26], 从原理上打破了传统星敏感器精度与视场、体积、质量等性能间的相互制约。浙江大学的杜鹃等人在此基础上提出了一种基于二维光栅的双轴干涉星敏感器装置, 其单星测量角分辨率达 0.2"^[27-28]。该装置可以同时提高 x 、 y 方向星光入射角度的测量精度, 但是该装置由于用到双光栅衍射级次的 +1 级或 -1 级, 使得宽波段的星光在衍射方向会存在严重色散; 另外从 x 、 y 方向分别对入射光强细分, 使探测器上像点光强信号进一步减弱, 增加了探测难度, 其实用性有待提高。为深入研究基于光栅干涉测量原理的星敏感器, 打破西方国家对我国的技术封锁, 本文研究了一种基于一维衍射光栅的高精度干涉星敏感器结构, 对星光场在干涉星敏感器中的光学传输过程进行数学建模, 得到干涉星敏感器上像点质心位置、像点能量与星光入射角度之间的关系, 确定了利用星体在干涉星敏感器上像点的质心位置和相对能量分别进行粗定位和精定位的方法及粗精定位结合的方法, 通过公式推导得到了干涉星敏感器单星测量角分辨率的影响因素, 并通过模拟仿真验证了干涉星敏感器精定位和粗精定位结合的可行性。

2 基于光栅干涉测量的星敏感器基本原理

基于一维光栅的干涉星敏感器光学元件部分如图 1 所示, 主要由光学干涉部分、角度调制部分和光学成像部分等 3 部分组成。光学干涉部分使经过的星光发生干涉, 角度调制部分对入射星光产生不同方向的偏转, 光学成像部分将不同方向的光成像至探测器的不同位置。其中光学干涉

部分由两块周期相同、刻线方向间有一微小夹角 ε 且距离为 d 的光栅 G_1 、光栅 G_2 组成, 角度调制部分由 4 块光楔组成, 光学成像部分与传统星敏感器相似, 由成像透镜组组成。光学干涉部分和角度调制部分是干涉星敏感器精定位的关键, 也是与传统星敏感器的区别之处。

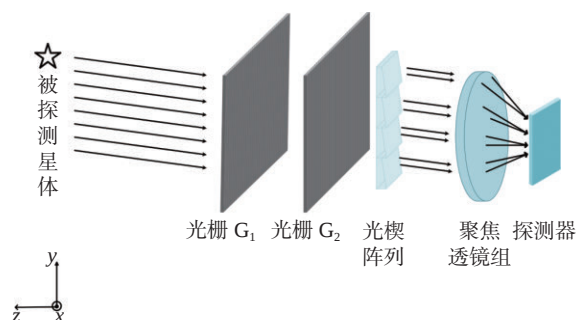


图 1 基于一维光栅的干涉星敏感器光学系统结构图
Fig. 1 Configuration of interferometric star tracker optical system based on 1-D grating

为方便分析星光场在干涉星敏感器中的传输过程, 得到探测器上像点与星光入射角度之间的准确关系, 建立了如图 2 所示的干涉星敏感器靶面坐标系 $x'O'y'$ 和干涉星敏感器坐标系 $O-xyz$ 。在 $x'O'y'$ 中, O' 为探测器的几何中心, x' 轴、 y' 轴分别与探测器阵列的行、列平行。在 $O-xyz$ 中, 以主点 O (沿光轴距离靶面坐标系为 F 的点, F 为星敏感器光学系统的焦距) 为坐标原点, 光轴指向为 z 轴正方向, 与探测器像元阵列行、列平行的坐标轴分别为 x 轴、 y 轴, 并且干涉星敏感器坐标系符合右手准则。 P 点代表星像点。

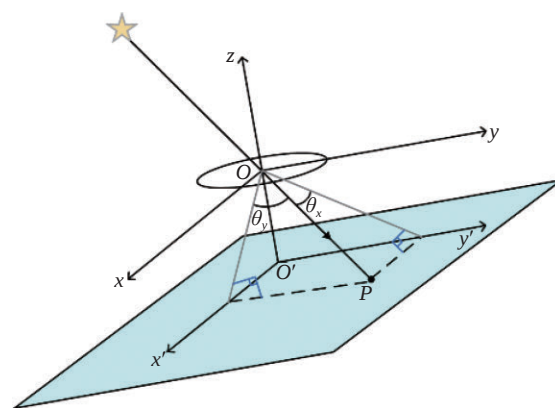


图 2 干涉星敏感器靶面坐标系 $x'O'y'$ 和干涉星敏感器坐标系 $O-xyz$ 间的关系

Fig. 2 Relationship of target plane coordinate system $x'O'y'$ and the coordinate system $O-xyz$ of the interferometric star tracker

图1中光栅 G_1 的刻线方向与 y 轴平行, 光栅 G_2 的刻线方向与 y 轴有一微小夹角 ε , 两块光栅周期均为 p , 并且两块光栅间距为 d 。光楔阵列在平行于 xOy 面的平面上沿 y 轴方向摆放, 光楔在 x 方向上的长度为 a , y 方向上的长度为 b 。

单颗星发出的平面光波场在任一选定的平行于 xOy 面的平面上可表示为

$$U_i(x, y) = Ae^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x\sin\theta_x + y\sin\theta_y)} \quad (1)$$

式中: A 为实数, 代表光波场振幅; λ 代表星光发出的任一平面波的波长; θ_x 和 θ_y 分别为平面光波与干涉星敏感器坐标系 x 轴、 y 轴夹角的余角。

应用角谱理论^[29], 当入射星光经过光栅 G_1 后发生衍射, 其衍射光场分布的空间频谱等于入射光场频谱与光栅 G_1 频谱的卷积, 即

$$F_1(f_x, f_y) = F_i(f_x, f_y) * G_1(f_x, f_y) \quad (2)$$

$$F_3(f_x, f_y) = F_2(f_x, f_y) * T(f_x, f_y) = Aab \sum_{n=1}^4 \delta\left(f_x + \frac{\delta_{xn}}{\lambda}, f_y + \frac{\delta_{yn}}{\lambda}\right) * \left\{ \sum_{m,m'} C_m C_{m'} \exp\left[j\varphi_m - j2\pi(n-1)b\left(f_y - \frac{\sin\theta_y}{\lambda} - \frac{m'\sin\varepsilon}{p}\right)\right] \right\} \left\{ \text{sinc}\left[a\left(f_x - \frac{\sin\theta_x}{\lambda} - \frac{m+m'\cos\varepsilon}{p}\right)\right] \text{sinc}\left[b\left(f_y - \frac{\sin\theta_y}{\lambda} - \frac{m'\sin\varepsilon}{p}\right)\right] \right\} \quad (5)$$

式中 $T(f_x, f_y)$ 为光楔阵列的频谱, 即光楔阵列透过率函数的傅立叶变换; n 代表光楔阵列中第 n 块光楔, $n=1, 2, 3, 4$; a 和 b 分别代表光楔在 x 轴方向上的长度和在 y 轴方向上的长度; m 和 m' 分别表示光栅 G_1 的 m 级衍射和光栅 G_2 的 m' 级衍射; C_m 和 $C_{m'}$ 分别表示光栅 G_1 的 m 级衍射系数和光栅 G_2 的 m' 级衍射系数; φ_m 代表经过光栅 G_1 衍射后的 m 级衍射光在入射至光栅 G_2 之前, 传播距

式中 $F_i(f_x, f_y)$ 为星光光场的频谱, 即平面光波场 $U_i(x, y)$ 的傅立叶变换, $G_1(f_x, f_y)$ 表示光栅 G_1 的频谱。

入射至光栅 G_2 之前, 由于光会在均匀介质或空气中传播一段距离 d , 虽然振幅不受影响, 但会引入与频率有关的相移。此时, 场分布的空间频谱为

$$F'_1(f_x, f_y) = F_1(f_x, f_y)H(f_x, f_y) \quad (3)$$

式中 $H(f_x, f_y)$ 表示传递函数。

在经过光栅 G_2 后, 各级衍射光发生干涉, 干涉光场分布的空间频谱变为

$$F_2(f_x, f_y) = F'_1(f_x, f_y) * G_2(f_x, f_y) \quad (4)$$

式中 $G_2(f_x, f_y)$ 表示光栅 G_2 的频谱。

经过光楔阵列后, 光场分布的空间频谱为

离 d 后引入的相移, 表示为

$$\varphi_m = 2\pi d \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \left(\frac{\sin\theta_x}{\lambda} + \frac{m}{p}\right)^2 - \left(\frac{\sin\theta_y}{\lambda}\right)^2} \quad (6)$$

根据透镜组傅立叶变换的性质^[29], 透镜组后焦面($x'O'y'$ 平面)上的光场分布 $U_F(x', y')$ 正比于前方物体的频谱, 并使物体产生一个位相弯曲, 星光经过成像透镜组后, 在透镜组后焦面上的光场分布为:

$$U_F(x', y') = \frac{1}{j\lambda F} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda F}\left(1 - \frac{d_0}{F}\right)(x'^2 + y'^2)\right] F_3\left(\frac{x'}{\lambda F}, \frac{y'}{\lambda F}\right) = \frac{Aab}{j\lambda F} \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda F}\left(1 - \frac{d_0}{F}\right)(x'^2 + y'^2)\right] \times \sum_{n=1}^4 \left\{ \sum_{m,m'} \exp\left[j\varphi_m - j2\pi(n-1)b\left(f_y - \frac{\sin\theta_y}{\lambda} - \frac{m'\sin\varepsilon}{p}\right)\right] \right\} \left\{ \text{sinc}\left[a\left(\frac{x'}{\lambda F} - \frac{\sin\theta_x}{\lambda} - \frac{m+m'\cos\varepsilon}{p} + \frac{\delta_{xn}}{\lambda}\right)\right] \text{sinc}\left[b\left(\frac{y'}{\lambda F} - \frac{\sin\theta_y}{\lambda} - \frac{m'\sin\varepsilon}{p} + \frac{\delta_{yn}}{\lambda}\right)\right] \right\} \quad (7)$$

式中 F 表示透镜组焦距, d_0 表示光楔阵列到成像透镜组中第一块透镜的距离。

2.1 粗定位

由于光楔阵列由4块不同楔角的光楔组成,

所以同一方向的入射光经过光楔阵列后会偏转成

为4束不同方向的光。又因为不同方向的光经过成像透镜后会成像在后焦面的不同位置, 所以入射星光经过光楔阵列后会在干涉星敏感器上形成4个像点。为方便讨论, 假设光栅 G_1 和光栅 G_2 只有0级和 ± 1 级衍射, 即 $m=0, \pm 1$; $m'=0, \pm 1$ 。

由于非零级衍射级次存在色散,影响像点质心定位,故仅考虑 0 级,即 (0,0), (+1, -1) 和 (-1, +1) 级

衍射光干涉后的频谱,则经过第 n 块光楔偏转后的星光,在透镜组后焦面上像点的光强分布为

$$I_n(x', y') = |U_{F,n}(x', y')|^2 \approx \left(\frac{Aab}{\lambda F} \right)^2 \text{sinc}^2 \left[a \left(\frac{x'}{\lambda F} - \frac{\sin \theta_x}{\lambda} + \frac{\delta_{xn}}{\lambda} \right) \right] \text{sinc}^2 \left[b \left(\frac{y'}{\lambda F} - \frac{\sin \theta_y}{\lambda} + \frac{\delta_{yn}}{\lambda} \right) \right] \times \left\{ C_0^4 + 2(C_{+1}C_{-1})^2 + 4C_0C_{+1}C_{-1} \cos \left(\frac{\varphi_{+1} + \varphi_{-1}}{2} - \varphi_0 \right) \cos \left[\frac{\varphi_{+1} - \varphi_{-1}}{2} - 2\pi b \frac{\sin \varepsilon}{p} (n-1) \right] + 2(C_{+1}C_{-1})^2 \cos \left[\varphi_{+1} - \varphi_{-1} - 4\pi b \frac{\sin \varepsilon}{p} (n-1) \right] \right\}, \quad (8)$$

式中 $U_{F,n}(x', y')$ 表示星光经过第 n 块光楔偏转后在后焦面上的光场分布。

设面阵探测器第 (i, j) 像元的中心坐标为 (x'_{ij}, y'_{ij}) , 以像元尺寸 (pixel) 为单位, 则星光经过第 n 块光楔偏转后形成的像点在该像元内的能量为

$$U_{ij,n} = \int_{x'_{ij}-0.5}^{x'_{ij}+0.5} \int_{y'_{ij}-0.5}^{y'_{ij}+0.5} I_n(x', y') dx' dy' \quad (9)$$

采用灰度加权质心法, 得到星光经过第 n 块光楔偏转后在探测器上像点的质心坐标 (x'_n, y'_n) , 即

$$\begin{aligned} x'_n &= \frac{\sum_i \sum_j x'_{ij} U_{ij,n}}{\sum_i \sum_j U_{ij,n}}, \\ y'_n &= \frac{\sum_i \sum_j y'_{ij} U_{ij,n}}{\sum_i \sum_j U_{ij,n}}. \end{aligned} \quad (10)$$

由式 (8) 像点光强分布, 根据 $\sin c$ 函数的性质, 得出像点质心坐标 (x'_n, y'_n) 与光楔偏转角 $(\delta_{xn}, \delta_{yn})$ 的关系为

$$\begin{aligned} x'_n &= (\sin \theta_x - \delta_{xn}) F, \\ y'_n &= (\sin \theta_y - \delta_{yn}) F. \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出, 光楔引入的角度偏移在透镜后焦面上表现为星体像点位置的平移。所以在不设置光楔阵列的情况下, 目标星在干涉星敏感器上的像点坐标 (X_0, Y_0) 为

$$I'_n = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_n(x', y') dx' dy' = I_a \left\{ C_0^4 + 2(C_{+1}C_{-1})^2 + 4C_0C_{+1}C_{-1} \cos \left(\frac{\varphi_{+1} + \varphi_{-1}}{2} - \varphi_0 \right) \cos \left[\frac{\varphi_{+1} - \varphi_{-1}}{2} - 2\pi b \frac{\sin \varepsilon}{p} (n-1) \right] + 2(C_{+1}C_{-1})^2 \cos \left[\varphi_{+1} - \varphi_{-1} - 4\pi b \frac{\sin \varepsilon}{p} (n-1) \right] \right\}, \quad (15)$$

式中 $I_a = (Aab/\lambda F)^2$ 。

并且

$$\begin{aligned} X_0 &= F \sin \theta_x, \\ Y_0 &= F \sin \theta_y. \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 可以通过探测器上像点的质心坐标 (x'_n, y'_n) 与光楔偏转角 $(\delta_{xn}, \delta_{yn})$ 之间的关系, 得到不设置光楔阵列情况下目标星的像点坐标 (X_0, Y_0) , 从而获得星光入射角度, 进行粗定位。

由式 (8) 像点光强分布的相位项可以看出, 像点光强分布与星光入射角度有关, 因此星光入射角度变化过程中, 存在使某像点光强分布 $I_n(x', y')$ 为零的情况, 这会导致该像点质心坐标 (x'_n, y'_n) 无法被提取到。为有效获取像面上的星点坐标 (X_0, Y_0) , 对瞬时状态下提取到的像点质心坐标 (x'_n, y'_n) 进行加权运算, 即

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{\sum_n I'_n (x'_n + F \delta_{xn})}{\sum_n I'_n}, \\ Y_0 &= \frac{\sum_n I'_n (y'_n + F \delta_{yn})}{\sum_n I'_n}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中 I'_n 为星光经过第 n 块光楔偏转后在探测器上像点的能量 (光强), 即式 (8) 像点光强分布的积分

2.2 精定位

由于式(15)像点光强的相位项中包含了与星光入射角度有关的信息, 因此可以通过单个星体在探测器上所成4个像点的相对光强得到像点光强的相位信息, 进而获得星光入射角度 θ_x 。

根据式(6), 有

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_{+1} + \varphi_{-1}}{2} - \varphi_0 &\approx -\frac{\pi d}{p^2} \lambda, \\ \varphi_{+1} - \varphi_{-1} &\approx -4\frac{\pi d}{p} \sin \theta_x. \end{aligned} \quad (16)$$

记 $\varphi = \varphi_{+1} - \varphi_{-1}$ 。由式(16)可以看出, 像点光强中包含的 $\cos\left(\frac{\varphi_{+1} + \varphi_{-1}}{2} - \varphi_0\right)$ 项与波长有关, 会干扰 φ 的计算, 所以抑制光栅零级衍射, 即 $C_0=0$ 。

令光楔沿 y 轴的长度 $b = \frac{p}{8 \sin \varepsilon}$, 代入式(15)并整理, 得到4个像点的光强分别为

$$\begin{aligned} I'_1 &= I'_a (1 + \cos \varphi), \\ I'_2 &= I'_a \left[1 + \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \right], \\ I'_3 &= I'_a [1 + \cos (\varphi - \pi)], \\ I'_4 &= I'_a \left[1 + \cos \left(\varphi - \frac{3\pi}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $I'_a = 2(C_{+1}C_{-1})^2 I_a$, 由式中的相位项可以看出入射星光经过相邻光楔偏转后, 在探测器阵列上形成像点的光强之间具有 $\pi/2$ 相位差。所以

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \frac{I'_2 - I'_4}{I'_1 - I'_3} + 2\pi N = \varphi_p + \varphi_N, \\ (N &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $\varphi_p = \arctan \frac{I'_2 - I'_4}{I'_1 - I'_3}$, $\varphi_N = 2\pi N$ 。

通过星点提取各像点能量可以得到 φ_p , 作为干涉星敏感器的精定位信息。

2.3 粗精结合

将式(13)中第一个式子与式(16)中第二个式子联立, 可得

$$\varphi = -\frac{4\pi d}{pF} X_0. \quad (19)$$

由于质心提取坐标精度受视场、探测器像元数和焦距等参数限制, 因此将求取得的质心坐标 (X_0, Y_0) 代入式(19), 得到

$$N = \left[\left(-\frac{4\pi d}{pF} X_0 \right) / (2\pi) \right] = \left[-\frac{2d}{pF} X_0 \right]. \quad (20)$$

式(20)中的中括号表示对该括号内的数取整, 所以利用星光不经过光楔发生偏转时的像点坐标 (X_0, Y_0) 即可得到 φ_N 。

由以上分析可以看出, 单个星体在干涉星敏感器上形成4个像点, 通过星点提取得到各像点质心坐标及能量。对提取到的像点质心坐标进行加权运算, 得到在不设置光楔阵列情况下, 目标星体在星敏感器上的像点坐标 (X_0, Y_0) 。利用坐标 (X_0, Y_0) 进行粗定位, 利用4个像点的相对能量进行精定位, 并将粗定位与精定位结合, 获得星光入射角度 θ_x 。

在实际计算过程中, 通过传统的质心求取方法获得的质心坐标作为星光入射角度的粗定位, 其精度与视场、图像面阵大小相关。对于进一步进行细分的光强变化, 由于其呈周期性变化, 为保证角度测量的唯一性, 因此由质心提取计算的角度精度应不低于光强信号变化周期对应的角度。探测器上像点光强变化一个周期对应的角度为 $\Delta\theta_x$, 有 $\frac{4\pi d}{p} [\sin(\theta_x + \Delta\theta_x) - \sin \theta_x] = 2\pi$, 则

$$\Delta\theta_x = \frac{p}{2d}. \quad (21)$$

因此星点质心提取得到的 X_0 的精度 ΔX_0 应不低于 $\frac{Fp}{2d}$, 即 $\Delta X_0 \leq \frac{Fp}{2d}$ 。由于星点质心坐标 X_0 的计算精度与视场和探测器阵列数有关, 因此在系统设计时会根据视场和探测器阵列参数, 合理选择光栅周期 p 、两块光栅之间的距离 d 。

像点光强信号每变化一个周期采用 M 倍电子学细分, 则单星测量角分辨率 σ 可表示为

$$\sigma = \frac{\Delta\theta_x}{M} = \frac{p}{2dM}. \quad (22)$$

由式(22)可看出, 单星测量角分辨率与光栅周期 p 、两块光栅之间的距离 d 及像点信号的电子学细分倍数 M 有关。基于光栅的星敏感器在传统星敏感器求取质心的基础上, 利用星点的光强信息进一步进行细分, 因此突破了质心求取的精度限制, 在相同的视场和探测器阵列数下可以获得更高的角度测量精度。对于视场为 $20^\circ \times 20^\circ$, 焦距为40 mm、探测器像元阵列数为 1000×1000 , 光栅周期为50 μm , 两块光栅距离为50 mm的干涉星敏感器, 当电子学细分采用1024倍细分时, 经计算得到单星测量角分辨率为0.1"。

典型传统星敏感器的像点质心细分算法精度一般为 $1/10 \sim 1/50$ pixel。对于视场为 $20^\circ \times 20^\circ$ 、焦距为 40 mm、探测器像元阵列数为 1000×1000 的传统星敏感器,其单星测量角分辨率最高仅为 $1.44''$ 。对于视场、焦距、探测器像元阵列数与传统星敏感器相同的干涉星敏感器,当质心细分算法的精度为 1 pixel,光栅周期为 $50 \mu\text{m}$,两块光栅距离为 50 mm,并且电子学细分采用 1024 倍细分时,其单星测量角分辨率可达 $0.1''$,与传统星敏感器相比,虽然重量稍有增加,但是单星测量角分辨率提高了一个数量级。传统星敏感器若要达到与干涉星敏感器相同的单星测量角分辨率,则需要通过增大焦距的方法,将其视场至少缩小为原来视场的 $1/14.4$,与干涉星敏感器相比,传统星敏感器体积增加了 5 倍以上。

基于光栅的干涉星敏感器要求光栅 ± 1 级衍射效率最高,同时抑制 0 级及其他衍射级次,并且在工作波段内光栅及两块光栅间隔层材料的色散特性尽量小。因此在进行干涉星敏感器设计时,应根据探测需求,从系统整体性能出发,选择合适的光栅结构和光栅周期,抑制无贡献衍射级次,降低色散,以提高系统光能利用率、信噪比及测量精度。

3 计算机仿真

前面介绍了干涉星敏感器光学系统基本元件,并对星光在干涉星敏感器光学系统中的传输过程进行了数学建模,得到了粗精定位结合的基本原理。为验证精定位及粗精定位结合的可行性,本部分对视场内星光入射角 θ_x 变化引起的探测器阵列上像点光强的变化及 φ 与星光入射角 θ_x 之间的关系进行模拟仿真。

3.1 仿真参数

初始条件和基本参数为:(1)朗奇光栅偶数级次衍射为零,可以使零级衍射 C_0 得到抑制。因此采用朗奇相位光栅,并且光栅周期为 $50 \mu\text{m}$,两块光栅距离为 50 mm,两块光栅间的刻线夹角为 0.057° 。(2)楔形棱镜尺寸均为 $12.5 \text{ mm} \times 6.25 \text{ mm}$ 。(3)透镜组焦距为 40 mm。(4)模拟的光谱范围为 $550 \sim 630 \text{ nm}$,取样波长间隔为 10 nm。

3.2 仿真结果

视场内 3 颗恒星在干涉星敏感器上的成像情

况如图 3 所示。由图 3 可以看出,每一颗星在干涉星敏感器上均成像为 4 个像点,并且这 4 个像点组成一个方形区域。由于 4 块光楔在不同方向上的偏转角度相同,因此方形区域的中心即为恒星光经过光楔不发生偏转时在干涉星敏感器上所成像点的位置。由于 4 个像点之间的距离与焦距 F 和光楔偏转角度 $(\delta_{xm}, \delta_{ym})$ 有关,因此在进行干涉星敏感器设计时,为避免像点重叠影响星点提取,应合理设置透镜组焦距和光楔楔角。

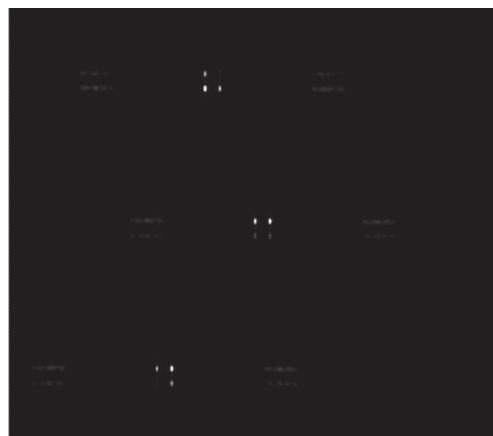
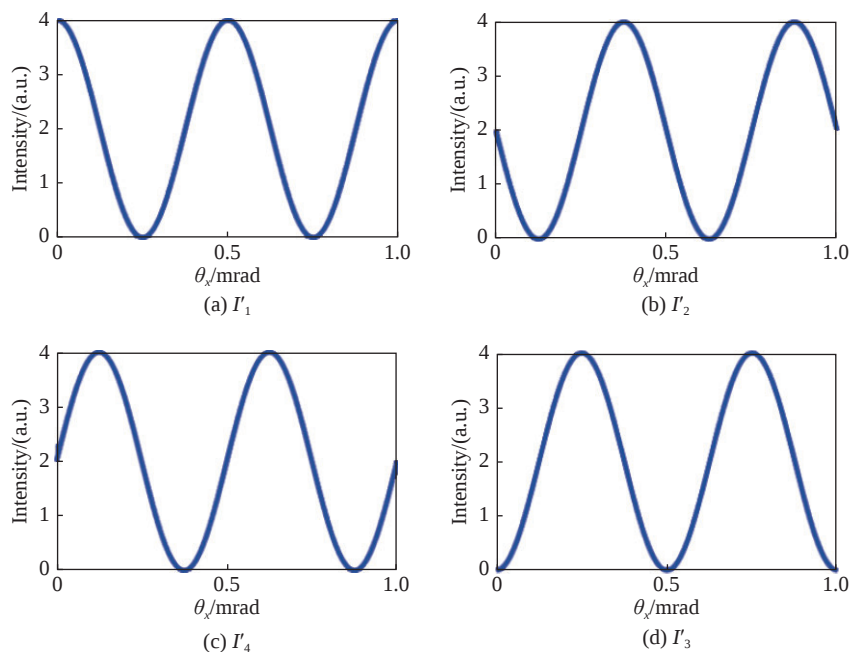
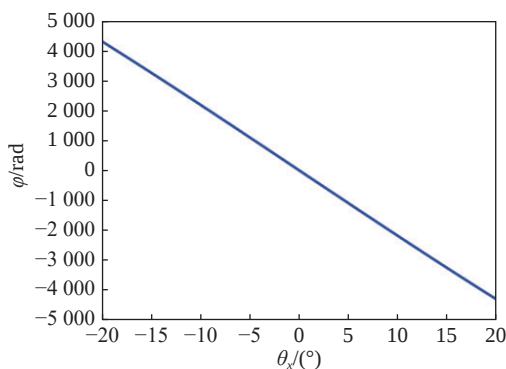
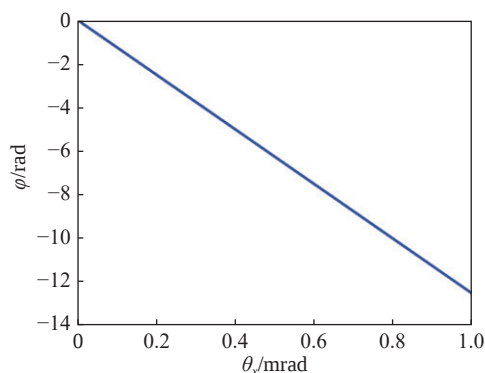


图 3 视场内 3 颗星在干涉星敏感器上的成像

Fig. 3 Star pattern generated for three stars within the field of view

为验证干涉星敏感器精定位的可行性,仿真模拟该视场内任一颗恒星,在干涉星敏感器上所成 4 个像点的光强随星光入射角 θ_x 的变化曲线,如图 4 所示。图 4 表明:4 个像点的光强均随星光入射角 θ_x 的变化呈正弦规律变化;在不同入射角度下,4 个像点的总能量不变。因此可以根据干涉星敏感器光学元件及特点,由光学传递函数推导像点光强的相位与星光入射角的关系,并由 4 个像点的相对光强得到 φ_P ,从而对载体进行精定位。

为验证干涉星敏感器粗精定位结合的可行性,模拟了在全视场 $2\omega=40^\circ (-20^\circ \leq \theta_x \leq 20^\circ)$ 情况下及在小角度入射 ($0 \leq \theta_x \leq 1 \text{ mrad}$) 下 φ 与星光入射角 θ_x 之间的关系曲线,分别如图 5 和图 6 所示。图 5 和图 6 均表明: φ 与星光入射角度 θ_x 之间存在线性关系。因此可以将粗定位与精定位相结合求得 φ ,从而通过 φ 与星光入射角度 θ_x 之间的关系获得 θ_x 。

图4 像点光强随星光入射角 θ_x 变化曲线Fig. 4 Intensity of four spots changing with the incident angle θ_x 图5 φ 随星光入射角 θ_x 的变化Fig. 5 φ changing with the incident angle θ_x 图6 小角度下 φ 随星光入射角 θ_x 的变化Fig. 6 φ changing with the small incident angle θ_x

在特定角度($\theta_x=0, 0.125, 0.250, 0.375, 0.5$ mrad)下, 该星体在探测器上像点的图案如图7所示。图7表明: 最亮像点的位置在4个像点中交替变

化; 在特定角度下只能看到3个星像点。这是因为像点光强随着星光入射角度变化而呈正弦规律变化, 并且在某些特定角度下, 第4个像点光强为零。

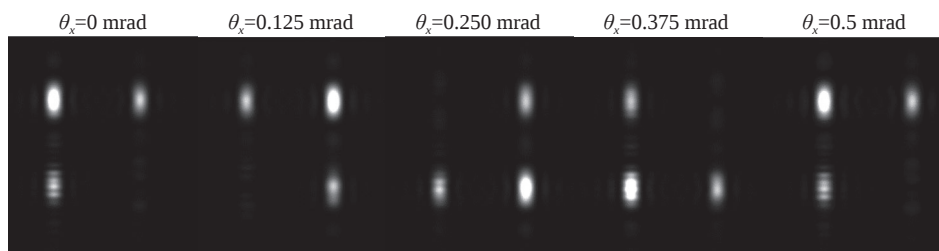


图7 单个星体在探测器上的星图

Fig. 7 Star pattern from one star on the detector

图4和图7均表明, 星光入射角度每变化 0.5 mrad, 像点的光强变化一个周期。因此像点光

强信号每变化一个周期采用1024倍电子学细分的情况下,计算得到单星测量角分辨率为0.1"。

4 结 论

测量精度的不断提高是星敏传感器发展的不变方向。单星测量精度是评价星敏传感器测量精度的基本指标,也是提高星敏传感器测量精度的最本质方法。本文提出的基于光栅的干涉星敏传感器,其单星测量角分辨率与光栅周期、两块光栅之间的

距离及像点信号电子学细分倍数有关。由于在传统星敏传感器求取质心的基础上,利用星点的光强信息进一步进行细分,因此突破了质心求取的精度限制,在相同的视场和探测器阵列数下可以获得更高的角度测量精度。仿真模拟得到的干涉星敏传感器单星测量角分辨率可达0.1",与传统星敏传感器相比,其单星测量角分辨率提高了一个数量级。本文的工作为深入开展基于衍射光栅的高精度干涉星敏研究及我国实现自主研发新一代高精度轻小型星敏传感器奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘鹏. CCD星敏传感器关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
LIU P. Research on key technologies of CCD star sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese).
- [2] 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: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese).
- [3] 赵阳. 新型反射式星敏传感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHAO Y. New type reflective optical system design for a star sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese).
- [4] XU B T, LV J H, ZHOU X L, *et al.*. Design and analysis of a star simulator suitable for confined space[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 504: 012088.
- [5] SARVI M N, ABBASI-MOGHADAM D, ABOLGHASEMI M, *et al.*. Design and implementation of a star-tracker for LEO satellite[J]. *Optik*, 2020, 208: 164343.
- [6] 吴卫. 高精度星敏传感器结构设计和分析[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2010.
WU W. Structural design and analysis of high accuracy star sensor[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese).
- [7] 李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
LI J, YANG B X, HU ZH H, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005. (in Chinese)
- [8] 柴毅. 基于多敏感器的卫星在轨高精度姿态确定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
CHAI Y. Research on high accuracy attitude determination methods for on-orbit satellite based on multiple sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese).
- [9] 梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏传感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-19.
LIANG B, ZHU H L, ZHANG T, *et al.*. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 16-19. (in Chinese)
- [10] 王红睿, 李会端, 方伟. 航天太阳敏感器的应用与发展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 481-489.
WANG H R, LI H D, FANG W. Application and development of space sun sensors[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 481-489. (in Chinese)
- [11] PHAM N V B, NGUYEN T N, NGO T D, *et al.*. A novel approach for pivot-based sensor fusion of small satellites[J]. *Physical Communication*, 2021, 45: 101261.
- [12] 王军. 高动态星敏传感器关键技术研究[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), 2019.
WANG J. Research on key technologies of highly dynamic star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese).
- [13] WANG X Y, ZHENG R, WU Y P, *et al.*. Study on the method of precision adjustment of star sensor[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2018, 1(4): 248-257.

- [14] 王军, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于区域滤波的模糊星图复原方法[J]. 中国光学, 2019, 12(2): 321-331.
WANG J, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Restoration method for blurred star images based on region filters[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 321-331. (in Chinese)
- [15] 王凡, 常军, 郝云彩, 等. 高精度星敏感器星像能量分布模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051203.
WANG F, CHANG J, HAO Y C, *et al.*. Mathematical model research of star image energy distribution of star tracker[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 051203. (in Chinese)
- [16] 伍雁雄. 高精度星敏感器若干关键技术研究[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), 2015.
WU Y X. Study on several key technologies for high-accuracy star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [17] 唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1502-1507.
TANG SH J, GUO X S, ZHOU ZH F, *et al.*. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1502-1507. (in Chinese)
- [18] 谭迪, 张新, 伍雁雄, 等. 光学像差对星点质心定位误差的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217004.
TAN D, ZHANG X, WU Y X, *et al.*. Analysis of effect of optical aberration on star centroid location error[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0217004. (in Chinese)
- [19] HANCOCK B R, STIRBL R C, CUNNINGHAM T J, *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4284: 43-53.
- [20] 孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 大相对孔径宽光谱星敏感器光学镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 0718005.
MENG X Y, WANG Y, ZHANG L, *et al.*. Lens design of star sensor with large relative aperture and wide spectral range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0718005. (in Chinese)
- [21] 薛庆生. 折反式大口径星敏感器光学设计及杂散光分析[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222001.
XUE Q SH. Optical design and stray light analysis for large aperture catadioptric star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222001. (in Chinese)
- [22] WANG Y, ZHANG L, MENG X Y, *et al.*. A large relative aperture and wide-spectrum star sensor optical lens design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10964: 109642T.
- [23] BAI Y, LI J L, ZHA R W, *et al.*. Catadioptric optical system design of 15-magnitude star sensor with large entrance pupil diameter[J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5501.
- [24] LEE S, SALEEM R, LEE S S. Micro star tracker with a curved vane for a short baffle length and sharp stray light attenuation[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(13): 4131-4142.
- [25] MURUGANANDAN V A, PARK J H, LEE S, *et al.*. Development of the arcsecond pico star tracker (APST)[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2017, 60(6): 355-365.
- [26] HUTCHIN R A. Interferometric tracking device: US, 8045178B2[P]. 2011-10-25.
- [27] DU J, BAI J, WANG L, *et al.*. Optical design and accuracy analysis of interferometric star tracker[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10815: 1081504.
- [28] 杜娟, 白剑, 黄潇, 等. 基于二维光栅的双轴干涉星敏感器装置: 中国, 207600470U[P]. 2018-07-10.
DU J, BAI J, HUANG X, *et al.*. Star sensor device is interfered to biax based on two -dimensional grating: CN, 207600470U[P]. 2018-07-10. (in Chinese)
- [29] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
LV N G. *Fourier Optics*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese).

作者简介:



张淑芬(1996—), 女, 山东滨州人, 硕士研究生, 2018年于鲁东大学获得学士学位, 主要从事星敏感器光学设计方面的研究。E-mail: zzsf1066@163.com



李文昊(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 2002年于陕西科技大学获学士学位, 2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺等方面的研究。E-mail: leewenho@163.com