

引用格式: 郭放, 叶志龙, 杜伟峰, 等. 一种基于斐波那契网格的干涉星敏感器星库设计方法[J]. 飞控与探测, 2025, 8(5): 81-87.

Citation: GUO F, YE Z L, DU W F, et al. Design method of star catalog for interferometric star sensor based on Fibonacci grid points [J]. Flight Control & Detection, 2025, 8(5): 81-87.

一种基于斐波那契网格的干涉星敏感器星库设计方法

郭放^{1,2}, 叶志龙^{1,2}, 杜伟峰^{1,2*}, 郑循江^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所·上海·201109;

2. 上海市空间智能控制技术重点实验室·上海·201109)

摘要: 导航星表构建是星敏感器系统设计阶段的重要工作。干涉式星敏感器基于莫尔条纹的相位测量入射角, 只保留了部分干涉级次, 导致了像点能量低; 分光组件将一束星光分割成多个像点, 像点能量进一步减弱, 同时多个像点形成的像点组占据的像素空间变大, 导致相邻过近的星点无法分辨。为了建立适用于干涉式星敏感器的星表, 通过设定角距阈值进行星表初次筛选, 剔除暗星、变星以及角距太近的双星; 为了保证星表分布的均匀性, 采用斐波那契网格点作为球面基准点, 依托基准点进行星表二次筛选。最终得到的星表数量较少, 且均匀性较好, 可以满足干涉式星敏感器需求。

关键词: 导航星表; 干涉星敏感器; 斐波那契网格点; 均匀性

中图分类号: TN911.73; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-5974(2025)05-0081-07

DOI: 10.20249/j.cnki.2096-5974.2025.05.009

Design Method of Star Catalog for Interferometric Star Sensor Based on Fibonacci Grid Points

GUO Fang^{1,2}, YE Zhilong^{1,2}, DU Weifeng^{1,2}, ZHENG Xunjiang^{1,2}

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109;

2. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109)

Abstract: The construction of navigation star list is an important task in the design stage of star sensor system. Because the interferometric star sensor only retains part of the interference order, the energy of the image point is low. The spectral component divides a beam of starlight into multiple image points, the energy of the image points is further weakened, and the pixel space occupied by the image points formed by multiple image points becomes larger, resulting in the inability to distinguish the adjacent star points that are too close. In order to establish the star list suitable for interferometric star sensor, by setting the threshold of angular distance, the list is screened for the first time, and dark stars, variable stars and binary stars with too close angular distance are excluded. In order to ensure the uniformity of the catalog, Fibonacci grid points are used as spher-

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFA0706003, 2019YFA0706002)

作者简介: 郭放, 男, 硕士生。

*通信作者简介: 杜伟峰, 男, 硕士, 高级工程师。

ical reference points, and the secondary screening of the catalog is carried out based on the reference points. The result shows that the number of stars is small and the uniformity is good, which can meet the demand of interferometric star sensor.

Keywords: navigation star catalog; interferometric star sensor; Fibonacci grid points; uniformity

0 引言

导航星库是装载于星敏感器的存储器内,用于和观测星相匹配的恒星星表。它是星敏感器进行星图识别和姿态测量的基础,不仅为星图识别提供匹配模板,也为航天器姿态计算提供参考矢量。导航星库的规模和导航星在全天球的分布,是影响星图识别速度和识别成功率的关键因素。导航星库通常是从天文星表中获得,一般的天文星表都包含大量的恒星,不适合直接使用,需要通过导航星库制作方法优选导航星,实现导航星数量少和空间均匀分布。现有的导航星库制作方法主要有星等阈值过滤方法、星等加权方法、回归选取方法等^[1-3]。导航星库对于星图识别的成功率有重要的影响,导航星的数量和分布直接影响星敏感器的数据存储量、识别速度和可靠性以及姿态计算精度,因此构建合理的导航星表是星敏感器设计阶段的重要工作。

导航星的选择方法众多,传统的方法有星等阈值法,即设定一个阈值,选取亮度高于该阈值的星作为导航星,该方法计算简单,但星库容易过大。还有星等加权方法和回归选取法等。Vedder^[4]指出提高导航星分布的均匀性可以在不降低星敏感器性能的同时减少导航星表的数据存储量,是提高导航星表性能的方法之一。Kim等^[5]提出了一种自组织导航星选择方法,以满足任意光轴指向视场内导航星数量大于一定值为前提,根据恒星亮度以及恒星间的相互位置关系,逐颗挑选导航星。该方法挑选的导航星分布比较均匀,但过程复杂且速度较慢。Prakash等^[6]提出了一种基于球面螺旋点构建导航星表的方法,利用球面螺旋点具有球面近似均匀分布的特性,以球面螺旋点作为导航星的期望位置,选取距离其最近的恒星作为导航星,使得导航星的分布非常均匀且筛选星速度较快。陈聪等^[7]为提高导航星的平均亮度,提出了距离-星等加权概念,综合考虑了恒星到基准点的距离和恒星自身的亮度两个指标,在确保导航星分布均匀的条件下使选取的导航星更

便于观测。崔祥祥等^[8]基于球面螺旋基准点的导航星筛选方法,通过增选部分关键恒星来达到减少星表空洞的目的,得到的星表均匀性较好,导航星数量少。选取每一个采样视场中亮度靠前的恒星作为导航星,构建的导航星表规模小,但是部分天区存在“空洞”,导致导航星在全天球分布不均匀。

干涉式星敏感器成像原理和角距计算原理与传统星敏感器有所不同,具有能量低、像点组占据空间大等特点,采用传统的星表设计方法不适用于干涉星敏感器的情况,本文对原始星表做初次筛选,剔除暗星、变星和不符合角距阈值的星,再基于球面基准点搜索可用星点,提升星表的均匀性。

1 干涉星敏感器特性

干涉式星敏感器与传统星敏感器不同,其通过干涉组件产生莫尔条纹,再通过分光组件计算莫尔条纹相位,达到突破精度上限的目的。

干涉式星敏感器的结构如图1所示,星光通过第1个光栅时会产生多级衍射光,产生的 ± 1 级衍射光通过第2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2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2个光栅放置在第1个光栅的泰伯距离处,从而产生莫尔条纹。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,从而实现目标光入射角的精确测量^[9]。

根据光栅的衍射理论,非0级衍射级次存在色散,影响像点质心定位,为了保证星点提取的准确性,只考虑 $+1/-1$ 衍射光和 $-1/+1$ 衍射光干涉形成的条纹。

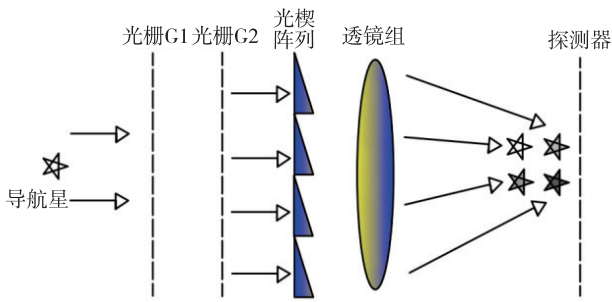


图 1 干涉星敏传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of interferometric star sensor

从原理来说, 干涉式星敏传感器在选取导航星时主要面临两个问题: 1) 光学系统只利用±1级衍射光产生莫尔条纹, 而其他级次的衍射光占据了星光的大部分能量, 经过两块光栅后星光能量大幅降低; 2) 为了计算莫尔条纹相位, 分光组件会将区域上的莫尔条纹分割为 4 个区域, 分别偏转形成 4 个像点, 4 个像点形成一个“像点组”, “像点组”占据的像素空间大于传统的星点。

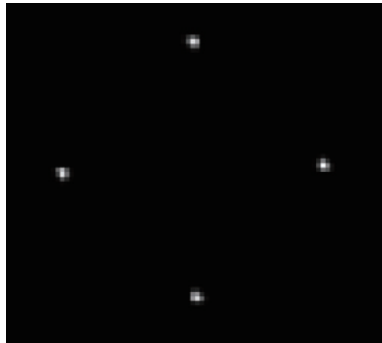


图 2 像点组示例

Fig. 2 Example of point group

1.1 低能量像点问题

干涉式星敏传感器需要通过两块光栅形成莫尔条纹, 两块光栅都只保留±1级衍射光, 导致能量大幅减弱, 下面分析能量减弱带来的星等变化。根据光栅的衍射效率理论, 光栅各级衍射光能量占比受光栅周期、槽深、入射光波长等因素的影响, 1级衍射光的能量占比最高能到 15.17%左右。经过两层光栅后, 能量仅剩 2.25%左右。

星等计算方式如式 (1) 所示

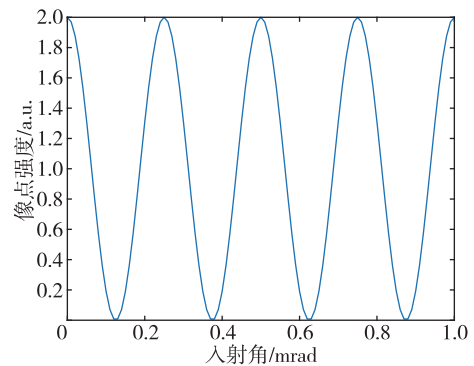
$$m_2 - m_1 = -2.5 \lg \frac{E_2}{E_1} \quad (1)$$

其中: m_1 为选取的基准星, E_1 为基准星光度; m_2 为待计算的星等, E_2 为该星光度。

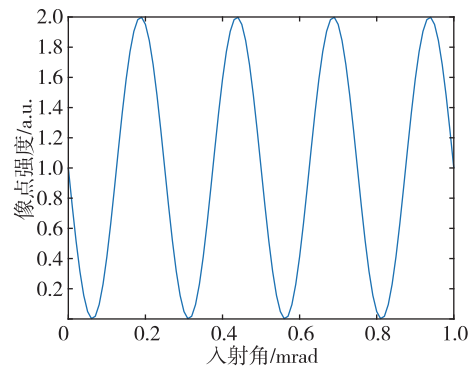
以基准星为 0 等星时, 当待计算星光能量仅剩 2.25%时, 星等升高大约 4 等, 对星点提取极为不利。并且, 干涉式星敏传感器的像点能量会进一步分割成 4 个像点, 其中 4 个像点的能量可由式 (2) 表示

$$I_n = I_a \left[1 + \cos \left(\varphi - \frac{(n-1)\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

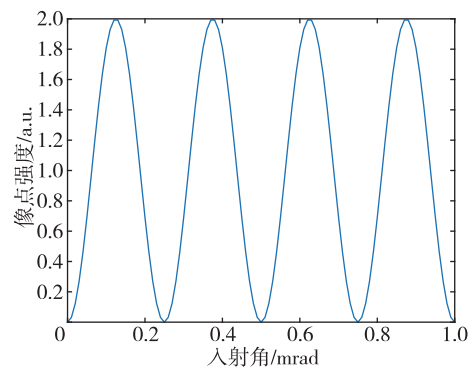
其中, I_n 为第 n 块光楔对应的像点能量, I_a 为背景光强, φ 为光场相位。由公式可知, 4 个像点能量之间有 $\pi/2$ 的相位差, 4 个像点光强和入射角之间存在余弦函数关系, 如图 3 所示。



(a) I_1



(b) I_2



(c) I_3

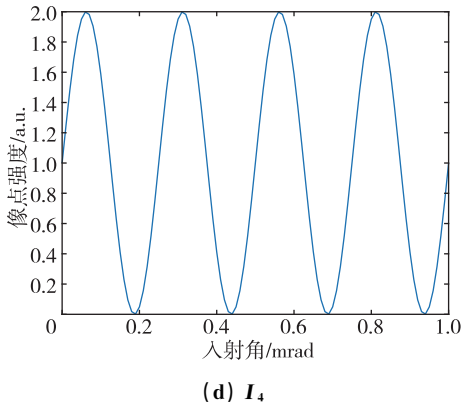


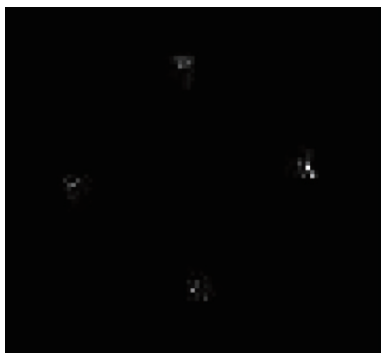
图 3 像点能量和入射角的关系

Fig. 3 The relationship between the energy of the image point and the Angle of incidence

在某些入射角度下，某些情况下会有一到两个像点的能量极其微弱甚至为 0，仿真情况如图 4 所示。



(a) 入射角 1°



(b) 入射角 1.1°

图 4 不同入射角下的像点能量

Fig. 4 Energy of image point at different incidence angles

干涉式星敏感器相位提取的原理如式 (3) 所示

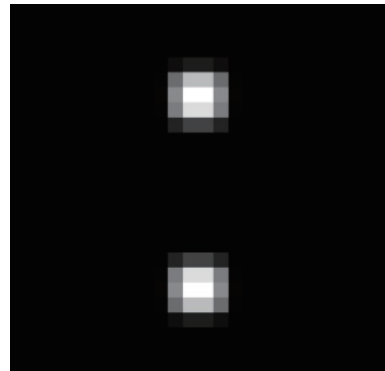
$$\varphi = \arctan \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} + 2\pi N \quad (3)$$

由式 (3) 可知，要想精确计算出光场相位，需要获得 4 个像点的能量。当提取到至少 3 个像点时，可根据像点之间相位差关系解算第 4 个像点的强度，虽然与实际值有一定偏差，但依然可以获得相对可靠的结果，所以需要至少提取到 3 个像点才能计算相位。某些角度下有 2 个像点都极为暗弱，只能提取到 2 个像点，无法根据像点组计算入射角，不利于星点提取，所以需要引入能量增强技术。

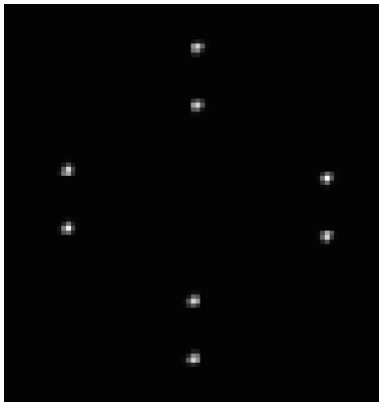
电子轰击技术是有效的探测器能量增强技术，该技术在 CMOS 探测器上早有应用，形成了 EBCMOS 探测器，EBCMOS 是一种真空固体混合型的微光成像传感器技术。其主要结构包括光阴极、真空腔体、背部减薄 CMOS 器件及读出电路。工作过程是：光子入射 GaAs 光阴极产生的光电子被阴极和 CMOS 阳极之间的真空高压电场加速，光电子获得能量后轰击背部减薄 CMOS 器件，产生倍增，由读出电路直接成像。该种探测器理论最高可以达到 300 倍的能量增益，可以弥补干涉式星敏感器的能量损失，更适合干涉式星敏感器的低能量星点^[10]。

1.2 像点组占据空间过大问题

分光组件将干涉条纹分割为 4 个像点，形成像点组，由于计算莫尔条纹相位移动量需要得到 4 个像点的能量，所以在星点提取时需要进行星点关联，将 4 个星点按照已知的分光方向关联成一个像点组。但是由于像点组占据的像素范围将增大，使得一些在传统星敏感器单星点模式下可以分辨的 2 个星点变得难以分辨，如图 5 所示，当采取 1° 偏转角时，原本容易分辨的两个星点变得难以分辨。



(a) 传统易分辨星点



(b) 经过分光后难以分辨的星点

图5 像点组难以分辨现象

Fig. 5 Indistinguishable group of image points

为避免上述问题,应在保证能分开4个像点的前提下,尽可能缩小分光组件的偏转角,使像点组占据的像素范围较小。通常的星敏传感器星点大小在 5×5 像素范围内,为了确保4个像素点可以区分开,可取像素点平移距离大约为10个像素。则分光组件偏转角 η 应满足以下公式

$$f \tan \eta = 10 l_{\text{pixel}} \quad (5)$$

其中, l_{pixel} 为像素点宽度, f 为成像镜组焦距。

取常见的像素宽度为 $9 \mu\text{m}$,根据干涉式星敏传感器需求取焦距为 100 mm ,则可取光楔偏转角为 0.05° ,可保证在完全分开像点的前提下,像素范围尽可能小。

2 导航星筛选方法

由于电子轰击增益弥补了星点的低能量,可将筛选星的星等阈值降低一等,从 $0 \sim 7$ 等星中选取导航星。为了避免出现空洞现象,要尽量保证导航星的均匀分布,可在球面上选取近似均匀分布的 n 个点作为基准点,在基准点周围搜索导航星。在制作导航星库之前,需要进行初次筛选。

2.1 初次筛选

首先应对原始星表做初次筛选,剔除双星、暗星、角距太近的星。

1) 采用星等阈值过滤方法,根据干涉式星敏传感器光学系统的敏感能力,配合电子轰击技术的能量增益,设定星等阈值 $M_{\text{vth}} = 7$,将星等大于 M_{vth} 的恒星从原始星表中剔除。

2) 星敏传感器使用一个 $n \times n$ 像素大小的波门图像来探测星点,结合干涉式星敏传感器像点组大小,

为了保证两个“像点组”可以区分,当星敏传感器视场为 τ 度圆形视场,探测器像素大小为 $N_{\text{pix}} \times N_{\text{pix}}$ 时,可得像点角距阈值 D_{th} 为

$$D_{\text{th}} = \frac{[n + f \tan \eta] \tau}{N_{\text{pix}}} \quad (5)$$

若两颗恒星角距小于阈值,则干涉式星敏传感器难以按分光关系关联像点组,所以剔除其中较暗的一颗。

3) 原始星表中包含一部分变星,这些恒星并不是完全稳定的,部分恒星的星等变化范围较大,对星点提取不利。根据星等变化范围可将变星分为最稳定星、较稳定星(星等变化小于 0.06)、次稳定星(星等变化在 $0.06 \sim 0.6$ 之间)、不稳定星(星等变化大于 0.6)。为了确保恒星能被星敏传感器探测到,需要剔除基础星表中的不稳定恒星和次稳定星中星等大于 M_{vth} 的恒星。

2.2 二次筛选

经过初次筛选后已经基本剔除不利于星敏传感器的恒星,得到了初步的星库,但星库规模依然较大,需要在初次筛选后的星库进一步筛选,得到规模合适的导航星库。采取球面均匀分布点作为搜索导航星的基准点,保证导航星在全天球均匀分布,避免出现“空洞”现象。为了获取均匀的球面基准点,采用González提出的斐波那契网格获取在单位球面上均匀分布的点,当需要获取 N 个点时,第 n 个点的坐标可由如下公式组确定^[11]

$$\begin{aligned} x_n &= \sqrt{1 - z_n^2} \cos(2\pi n \rho) \\ y_n &= \sqrt{1 - z_n^2} \sin(2\pi n \rho) \\ z_n &= \frac{2n - 1}{N - 1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, ρ 为黄金分割比,即 $\frac{\sqrt{5} - 1}{2}$ 。

1) 根据星敏传感器视场大小和单视场期望星颗数,确定球面螺旋基准点个数 N 。

2) 根据斐波那契网格坐标公式,求解球面基准点坐标。

3) 计算两个基准点之间距离,定义该距离的一半为 r ,分别以各面螺旋基准点为圆心,以 r 为半径找到相应区域内的恒星,其中距离圆心最近的恒星被选为导航星。重复上述过程。

3 仿真实验

为了验证以上算法的可行性,将会采用星表

均匀性分布和星敏感器光轴随机指向下探测到导航星的频率两个指标进行验证。常见原始星表的基本特性如表 1 所示。

表 1 常见原始星表的基本特性

Tab. 1 Basic properties of common star catalogs

星表名称	编者及出版年代	星表历元	总星数	星表精度 / (")	每平方度平均星密度
FK4Ext	Fricke 1991	J2000.0	3 117	0.04	0.075
FK6	Wielen 2000	J2000.0	4150	0.000 4	0.100
史密松 (SAO)	SAO Staff 1995	J2000.0	258 997	1.0	6.267
PPM (North)	Roeser 1988	J2000.0	181 731	0.27	4.398
PPM (South)	Bastian 1993	J2000.0	197 179	0.11	4.771
GSC2.2	STScI 2001	J2000.0	455 851 237	0.3	11 031.060
依巴谷 (Hipparcos)	ESA 1997	J2000.0	118 218	0.000 8	2.861
Tycho1	ESA1997	J2000.0	1 058 332	0.007	25.610
TRC	Hog 1998	J2000.0	990 182	0.040	23.961
Tycho2	Hog 2000	J2000.0	2 539 913	0.007	61.463

由于依巴谷 (Hipparcos) 星表星数较多且精度较高, 采用上海天文台发布的依巴谷星表作为原始星表。干涉式星敏感器视场采用 15° 方形视场。在导航星均匀分布的情况下, 如果期望单个视场内至少出现 8 颗星, 则期望的导航星数量至少为 4 200 颗。选取球面基准点数量 N 为 5 000, 选取导航星筛选星等阈值 $M_{\text{vth}}=7$, 根据星等阈值方法进行初次筛选, 得到星表, 恒星总数 15 398 个。再根据以上算法生成导航星表, 得到导航星 4 720 颗, 最终导航星表星等区间为 $(-1.1, 6.9)$, 亮度较高。进行 20 000 次随机光轴指向模拟测试, 统计不同视场下星敏感器可以观测到的导航星数量, 其概率统计结果如图 6 所示。

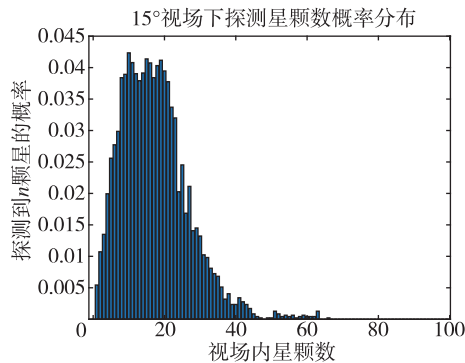


图 6 15° 视场内可探测到 N 颗星的概率

Fig. 6 The probability of detecting N stars in a 15° field of view

统计结果表明, 15° 视场下, 平均可探测到 16 颗星, 其中探测到 3 颗星以上的概率为 98.31%, 探测到 9 颗星以上的概率为 86.15%, 探测到 15 颗星以上的概率为 57.30%。

Vedder 提出的星表全局均匀性评价构建如下, 对于 N 个单位球面上的点, 将该 N 个点对应的直角坐标系下的单位向量排列为 $N \times 3$ 大小的矩阵 \mathbf{A} , 则矩阵 $\frac{1}{N}\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 具有 3 个非负实数特征值, 则均匀性指标 σ 如下

$$\sigma = \sum_{i=1}^3 \delta_i \ln(3\delta_i) \quad (7)$$

其中, δ_i 为矩阵 $\frac{1}{N}\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 的第 i 个特征值。

根据式 (7) 星表全局均匀性评价方法对得到的星表进行评价, 本算法得到的最终星表均匀性指标为 0.139 8, 均匀性指标较小, 说明星表均匀性较好, 且算法得到的星表数量较少, 对星敏感器的负担更小。

4 结论

导航星表是星敏感器软件系统的重要组成部分, 构建合理的导航星表是星敏感器设计阶段的重要工作, 本文分析了干涉式星敏感器的特性与相位提取的条件, 总结了干涉式星敏感器像点能量低、像点能量随入射角变化以及“像点组”占

据像素面积大的问题。提出了使用电子轰击技术来增益像点能量的方法,理论上最大可以达到300倍的能量增益,可以弥补干涉式星敏传感器能量暗弱的问题;在初次筛选中根据角距阈值剔除角距太小的双星,避免像点组交叉重叠。再选取球面基准点进行第二次筛选,最后得到的星表数量相对较少,均匀性好,星等区间较高。在 15° 视场下能较大概率探测到3颗星以上,能满足干涉式星敏传感器导航的需求。

参考文献(References)

- [1] 贾辉. 高精度星敏传感器星点提取与星图识别研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
JIA H. Study on star spot extraction and star map identification of high-precision star sensitivity[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese).
- [2] 周浩,刘光斌,刘朝山. 一种新的星敏传感器导航星表制备方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(32): 9777-9781.
ZHOU H, LIU G B, LIU C S. An approach to guide star catalogue construction for star sensor[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(32): 9777-9781(in Chinese).
- [3] 田宏,林玲,郝永杰,等. 星敏传感器导航星表建立[J]. 空间控制技术与应用, 2014, 36(3): 43-46.
TIAN H, LIN L, HAO Y J, et al. Establishment of navigation star list with star sensor [J]. Aerospace Control and Application, 2014, 36(3): 43-46 (in Chinese).
- [4] VEDDER J D. Star trackers, star catalogs, and attitude determination: probabilistic aspects of system design [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(3):498-504.
- [5] KIM H Y, JUNKINS J L. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: thinning method [C]//Proceedings, IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2002, 5: 5.
- [6] PRAKASH A, WU A, LIU J, et al. Performance based evaluation of star catalog generation methods [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey: AIAA, 2002.
- [7] 陈聪,王宏力,崔祥祥,等. 基于预测跟踪星表提高星敏传感器实时性的方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2190-2196.
CHEN C, WANG H L, CUI X X, et al. Method to improve the real-time performance of star sensors based on prediction-tracking star chart [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2190-2196 (in Chinese).
- [8] 崔祥祥,王宏力,陆敬辉,等. 适用于小视场星敏传感器的导航星表构建方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1249-1253.
CUI X X, WANG H L, LU J H, et al. Construction method of navigation star list for low-field star sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(4): 1249-1253 (in Chinese).
- [9] 张淑芬,姜珊,董磊,等. 基于衍射光栅的高精度干涉星敏传感器的理论分析[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1368-1377.
ZHANG S F, JIANG S, DONG L, et al. Theoretical analysis of high-precision interferometric star sensors based on diffraction gratings [J]. China Optics, 2021, 14(6): 1368-1377 (in Chinese).
- [10] 陈文娥,陈卫军,宋德,等. 电离效应对EBCMOS中电子倍增层增益的影响研究[J]. 半导体光电, 2024, 45(2): 222-227.
CHEN W E, CHEN W J, SONG D, et al. Study of the effect of ionization effect on the gain of electron doubling layer in EBCMOS [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 222-227 (in Chinese).
- [11] GONZÁLEZ Á. Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude-longitude lattices[J]. Mathematical Geosciences, 2010, 42: 49-64.