

文章编号 1004-924X(2024)21-3138-09

目标邻域恒星匹配的摆扫式融合定位

全胜^{1,2}, 姚凯男^{1*}, 徐志强¹, 陈宝刚¹, 王建立^{1,2}, 谷健³, 宋力夺¹, 王显军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;

3. 中国人民解放军 63768 部队, 陕西 西安 713800)

摘要: 地球同步轨道碎片白天探测系统中, 地基光学望远镜受温度及太阳位置变化的影响, 存在轴系定位误差较大且不稳定的问题。此外, 受视场较小的限制, 望远镜无法采用天文定位技术计算出目标的精确位置, 不利于空间碎片的高精度定位。针对上述问题, 提出了一种邻域恒星匹配的摆扫式融合定位技术。在空间碎片邻域内增加观测两颗定标恒星, 通过定标恒星的望远镜指向以及天文理论位置计算出该范围内的望远镜指向变化系数; 最后, 利用指向变化系数, 通过空间碎片与定标恒星的空位置匹配实现目标定位数据的修正。以 500 mm 口径同步轨道空间碎片全天时探测系统为平台, 该技术实现了全天区范围内若干恒星的高精度定位, 定位误差优于 4"; 对三颗北斗精密轨道目标开展了测角实验, 方位、俯仰定位总误差分别为 1.77" 和 1.63"。实验结果表明, 本文提出的定位技术能够有效修正望远镜定位误差, 满足全天时探测系统的定位精度需求。

关键词: 白天探测; 地球同步轨道; 空间碎片; 邻域恒星匹配; 高精度定位

中图分类号: V441.7; TN215 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243221.3138

Swinging-scan and fusion positioning for target neighborhood star matching

QUAN Sheng^{1,2}, YAO Kainan^{1*}, XU Zhiqiang¹, CHEN Baogang¹, WANG Jianli^{1,2},

GU Jian³, SONG Liduo¹, WANG Xianjun¹

(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;

3. 63768 Unit of PIA, Xi'an 713800, China)

* Corresponding author, E-mail: yaokainan001@126.com

Abstract: Ground-based optical telescopes used in daytime debris detection systems for Geostationary Earth Orbit (GEO) experience significant positioning errors due to thermal fluctuations and solar position variations. Furthermore, their limited field of view precludes the use of conventional astronomical positioning techniques for precise target localization. This study presents a novel swing-scan and fusion positioning methodology utilizing neighboring star matching to address these limitations. The proposed approach incor-

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2023-12-19.

基金项目: 吉林省科技发展计划重点研发项目 (No. 20210201020GX); 中国科学院关键核心技术攻关项目 (No. YZQT024); 吉林省科技发展计划技术创新引导项目 (No. 20230401097YY)

porates three key steps: first, observing two calibrated stars in proximity to the space debris; second, deriving telescope directional change coefficients by comparing telescope orientation with the stars' theoretical astronomical positions; and third, correcting target positioning errors through spatial position matching between the debris and calibrated stars. Implementation of this methodology on the 500 mm aperture GEO space debris all-day detection system, achieved high-precision positioning across the celestial sphere with positioning errors below 4". Validation experiments conducted on two Beidou precision orbit targets demonstrated total positioning errors of 1.77" and 1.63" for azimuth and elevation, respectively. These results confirm the effectiveness of the proposed positioning technology in error correction and its suitability for all-day detection system requirements.

Key words: daytime detection; space debris; neighborhood star matching; high precision positioning

1 引 言

地球同步轨道空间碎片指由于卫星解体或碰撞而驻留在地球同步轨道上的各类无功能人造物体。为了避免空间碎片与其他空间物体发生撞击,对空间活动造成威胁,需要通过空间碎片的跟踪定位与精密定轨,达到监测预警、碰撞规避的目的。地基光学望远镜在该领域的作用不可忽视,然而,受白天强光背景影响,暗弱目标信号会完全淹没在背景噪声中^[1],因此地基光学望远镜通常只在夜间观测空间碎片,白天时段存在较大的观测空窗期。这极大地限制了空间碎片的观测时长,不利于对空间碎片的探测与定位,所以开展白天空间碎片探测技术研究具有重要意义^[2]。2021年,中国科学院长春光机所突破地球同步轨道空间碎片白天探测关键技术,研制出500 mm口径全天时地基光学望远镜系统,国内地基光学同步轨道碎片探测系统开始走向全天时探测阶段。鉴于复杂的环境变化以及白天探测系统的应用特殊性,对空间碎片的快速高精度定位成为急需解决的难题。

目前,地基光学望远镜的定位方式主要分为轴系定位与天文定位两种。天文定位是一种利用恒星实现目标定位的方法,精度不受望远镜轴系误差的影响^[3],能够实现空间碎片的高精度定位。星图匹配是天文定位技术实施的关键步骤。Sun^[4]提出了一种多重迭代邻域恒星匹配算法,通过特征星修正望远镜指向误差引起的星图偏差。Liang等^[5]提出了一种基于星图归一化技术和Zernike矩阵的星图识别算法。王军等^[6]通过

三角形外接圆和内切圆半径乘积构建特征库,再通过哈希函数实现特征库的快速定位。刘德龙^[7]通过降维查表法优化了三角形星图匹配算法。宿德志等^[8]利用相似三角形作为匹配特征,实现了快速星图匹配。为了抑制杂散光,提高目标信噪比,更有效地实现白天探测,地基白天光学探测系统具有视场小、采集帧频高等特点^[9]。受小视场限制,在观测空间碎片过程中望远镜视场内难以保证足够数量的定标恒星,导致天文定位无法直接应用于白天探测系统中。

轴系定位指望远镜根据预报信息驱动伺服系统以持续跟踪目标,目标在视场中稳定后,记录轴系编码器的测角值以及目标在视场中的脱靶量,合成后即可得到目标相对观测站址的位置信息^[10]。一般情况下,望远镜轴系定位存在系统误差,通过望远镜指向误差模型,即在夜间观测天空中均匀分布的星,理论分析并建立误差表达式,实现望远镜指向误差的修正^[11]。Peng等提出了基于参数模型和核权重函数估计(KWFE)方法^[12]和K近邻(KNN)算法^[13],有效校正了指向误差中的非线性误差。翟术然等^[14]提出建立望远镜局部指向模型,即通过目标过境范围内的恒星建立指向误差修正模型,白天环境下指向误差在10"以内。Huang等^[15]采用Denavit-Harten (D-H)旋转矩阵方法建立模型,其中的非线性误差则采用半参数回归模型(Semi-Parametric Regression Model, SPRM)建模,显著提高了望远镜的指向精度。Huang^[16]提出利用蒙特卡洛法建立指向误差模型。通过建立指向误差模型可以提升望远镜的指向精度,但是不同于夜间,全天时观

测中具有不均匀的阳光辐照、环境温度变化大等更加复杂的影响因素,望远镜机架结构会发生变形,出现轴系定位误差不稳定的现象,不利于白天探测中空间碎片的跟踪捕获与精准定位。

为解决上述问题,考虑到望远镜在全天时探测环境中的指向误差要求,本文提出一种目标邻域恒星匹配的摆扫式融合定位技术。首先介绍了该定位技术的相关原理与算法流程;然后,基于中国科学院长春光机所研制的 500 mm 口径全天时地基光学望远镜开展实验,给出全天区范围内若干组恒星的定位误差分布情况;最后,给出对地球同步轨道带上两颗北斗精密轨道目标的定位精度结果。

2 原 理

2.1 邻域恒星匹配

图 1 为基于邻域恒星匹配的摆扫式融合定位技术示意图,它是一种适用于地球同步轨道空间碎片全天时光学探测系统的高精度测角技术。由于视场较小,全天时地基光学望远镜在观测地球同步轨道空间碎片时,不能保证视场内存在足够数量的定标恒星;同时,相机曝光时间长,恒星存在拖尾现象,从而导致望远镜无法同时探测空间碎片以及恒星。因此,望远镜系统无法使用传统天文定位技术实现对目标的高精度定位。受天文定位利用恒星解算目标精确位置的启发,本文通过摆扫望远镜的方式主动在空间碎片邻域内寻找

两颗定标恒星,利用空间碎片与定标恒星的位置关系来修正空间碎片的定位数据。该方法近似认为地基光学望远镜在小角度($<10^\circ$)范围内跟踪不同目标时产生的指向数据变化量,与各目标在空间中的理论位置差值存在一定的线性关系,因此,可以通过定标恒星与空间碎片之间的望远镜指向数据差值,以及定标恒星的天文理论位置,利用该比例关系计算出空间碎片的空间理论位置。

首先利用望远镜分别观测空间碎片及邻域内的两颗定标恒星,得到其望远镜指向数据。然后,通过定标恒星的天文理论位置、望远镜指向数据解算出该范围内的望远镜指向变化比例系数。最后,利用该系数,以及空间碎片与定标恒星的望远镜指向数据差值,对比计算出空间碎片的理论位置,实现对目标的精准定位。该方法所采用的理论模型如下:

$$\begin{cases} P'_{\text{star}} = P_{\text{star}} - (P_{\text{star_theo-startime}} - P_{\text{star_theo-GEOtime}}) \\ \alpha = \frac{(P_{\text{star1_theo-GEOtime}} - P_{\text{star2_theo-GEOtime}})}{(P'_{\text{star1}} - P'_{\text{star2}})} \\ P_{\text{GEO_theo}} = (P_{\text{GEO}} - P'_{\text{star1}}) \times \alpha + P_{\text{star1_theo-GEOtime}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $P_{\text{star_theo-GEOtime}}$, $P_{\text{star_theo-startime}}$ 分别代表两颗定标恒星在空间碎片观测时刻和自身观测时刻的天文理论位置,可由恒星理论星表得到,此处在进行天文理论位置计算时,具体的计算位置采用的是观测时刻的站心视位置; P_{star} 为定标恒星真实望远镜编码器数据, P'_{star} 为定标恒星在空间碎片观测时刻的望远镜编码器数据; α 为望远镜指向变化系数, P_{GEO} 为空间碎片真实望远镜编码器数据, $P_{\text{GEO_theo}}$ 为空间碎片理论位置。该理论模型旨在建立一个针对所观测目标的局部指向误差修正模型,在小角度范围内($<10^\circ$)可以认为满足线性模型。

2.1.1 定标恒星与目标的位置数据匹配

如何实现定标恒星与目标的空间位置匹配是摆扫式融合定位技术中的关键问题之一。由于望远镜视场较小,在同一视场范围内无法同时观测到方法中提到的 3 种目标(空间碎片及两颗定标恒星),因此,需要通过摆扫望远镜的方式分别观测空间碎片与恒星。此时,不同目标的望远镜指向数据存在时间偏差,有必要推算出空间碎片观测时刻定标恒星的望远镜指向数据,以达到匹配各个目标望远镜指向数据的目的。

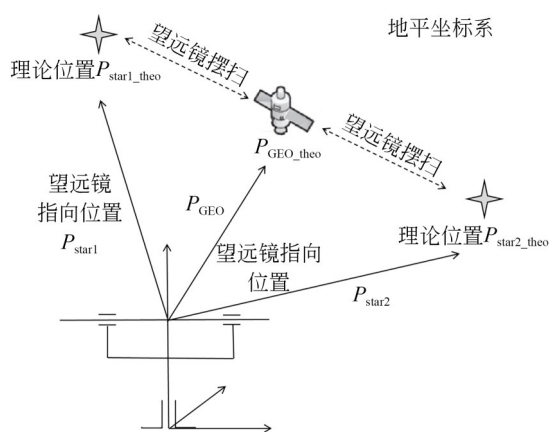


图 1 邻域恒星匹配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of neighborhood star matching algorithm

然而,观测时定标恒星只存在唯一的观测时刻,空间碎片也如此,无法实际获得不同目标在同一时刻的望远镜指向数据。为解决该问题,算法通过理论星表获取定标恒星在空间碎片观测时刻和恒星观测时刻两个不同时刻的天文理论位置 $P_{\text{star_theo-GEOtime}}$, $P_{\text{star_theo-startime}}$,并结合定标恒星观测时刻的真实望远镜编码器数据 P_{star} ,近似推算出空间碎片观测时刻定标恒星的望远镜编码器数据。若选择易于探测的亮目标作为定标恒星,会尽可能地缩短定标恒星的观测时长,则空间碎片观测结束后,观测定标恒星期间恒星位置的变化量远小于方法中提到的小角度($<10^\circ$)要求。此时,可以利用恒星天文理论位置的变化量来近似这段时间内望远镜的指向变化量,并将该变化量与定标恒星的真实望远镜编码器数据作差,即可近似推算定标恒星在空间碎片观测时刻的望远镜编码器数据 P'_{star} :

$$P'_{\text{star}} = P_{\text{star}} - (P_{\text{star_theo-startime}} - P_{\text{star_theo-GEOtime}}). \quad (2)$$

2.1.2 定标恒星选取规则

摆扫式融合定位技术中定标恒星的选择方式起着至关重要的作用。目前,恒星的亮度及恒星与空间碎片的相对位置关系,会在一定程度上影响最终的定位数据修正结果。为了达到定位精度,定标恒星需要满足以下条件:

(1) 适当星等的恒星

恒星星等是恒星亮度的一种体现,星等越低代表恒星亮度越高。考虑到望远镜探测能力以及上文中提到的恒星选择要求,选择4~8星等的恒星作为定标恒星,一方面因为4~8星等的恒星易于探测,在3~5 s甚至更短的时间内就能完成目标提取并获取位置数据,因此,利用该星等范围内的恒星作为定标恒星可以尽量减小望远镜指向位置匹配中时间偏差带来的影响;另一方面,亮于4星等的恒星虽然能够更快地完成提取,但是容易引起探测系统饱和,影响目标脱靶量提取,最终影响定位精度。所以,采用4~8星等的恒星作为摆扫式融合定位技术中的定标恒星是比较合理的。

(2) 合理的相对位置关系

两颗定标恒星与目标在主控显示星图中应该尽量位于一条直线上,且目标在两颗定标恒星

中间,即定标恒星1与目标的距离差值和定标恒星2与目标的距离差值尽量满足比例为0.8~1.2的关系(如定标恒星1与目标恒星方位差值为 5° ,俯仰差值为 2° ,定标恒星2则与目标恒星方位差值为 -5° ,俯仰差值为 -2° ,距离差值比例为1)。这是由于本文提出的定位方法相当于建立一个局部指向误差修正模型,该模型可以认为满足线性模型,然后通过方位、俯仰值的线性比例关系解算目标的精确位置,如果不满足位于一条直线上的条件,采用线性模型进行解算时会出现偏差,影响最终的定位精度。

2.2 定位技术流程

(1) 观测空间碎片。记录观测时刻的编码器数据 $P_{\text{GEO_az}}$, $P_{\text{GEO_el}}$,并记录视场脱靶量像素值 M_{IvaGEO} , M_{IveGEO} ,利用上述数据合成空间碎片的望远镜指向数据 P'_{GEO} :

$$P'_{\text{GEO_el}} = P_{\text{GEO_el}} + (C_{\text{oVel}} - M_{\text{IveGEO}}) \times \sigma_{\text{pixel}} / 3\,600, \quad (3)$$

$$P'_{\text{GEO_az}} = P_{\text{GEO_az}} + \frac{(C_{\text{oVaz}} - M_{\text{IvaGEO}}) \times \sigma_{\text{pixel}} / 3\,600}{\cos\left(P'_{\text{GEO_el}} \times \frac{\pi}{180}\right)}. \quad (4)$$

考虑到不同俯仰角下存在的方位值正割补偿问题,式中将望远镜指向数据的方位值和俯仰值分开表示,体现为下标 az 和 el,并涉及正割补偿的计算。 C_{oV} 为望远镜视场中心像素值, σ_{pixel} 为望远镜系统中相机元件的像元角分辨率。

(2) 在恒星星图中选取空间碎片邻域内的两颗恒星作为定标恒星,分别记为 star1 和 star2。观测并记录两次恒星观测时刻的编码器数据 $P_{\text{star_az}}$, $P_{\text{star_el}}$ 和视场脱靶量像素值 M_{Ivstar} , M_{Ivstar} ,结合式(2)推算出 star1 和 star2 在空间碎片观测时刻的望远镜指向数据 P'_{star} :

$$P'_{\text{star_el}} = [P_{\text{star_el}} - (P_{\text{star_el_theo-startime}} - P_{\text{star_el_theo-GEOtime}})] + (C_{\text{oVel}} - M_{\text{Ivstar}}) \times \sigma_{\text{pixel}} / 3\,600, \quad (5)$$

$$P'_{\text{star_az}} = [P_{\text{star_az}} - (P_{\text{star_az_theo-startime}} - P_{\text{star_az_theo-GEOtime}})] + \frac{(C_{\text{oVaz}} - M_{\text{Ivstar}}) \times \sigma_{\text{pixel}} / 3\,600}{\cos\left(P'_{\text{star_el}} \times \frac{\pi}{180}\right)}. \quad (6)$$

(3) 计算望远镜的指向变化系数 α 。该系数

表征该区域内望远镜指向变化量与空间物体天文理论位置变化量之间的比例关系,即:

$$\alpha_{az} = \frac{(P_{star1_az_theo-GEOtime} - P_{star2_az_theo-GEOtime})}{(P'_{star1_az} - P'_{star2_az})}, \quad (7)$$

$$\alpha_{el} = \frac{(P_{star1_el_theo-GEOtime} - P_{star2_el_theo-GEOtime})}{(P'_{star1_el} - P'_{star2_el})}. \quad (8)$$

(4)对比 star1 与空间碎片的位置数据,利用算法系数 α 计算空间碎片观测时刻碎片的理论位置 P_{GEO_theo} :

$$P_{GEO_az_theo} = (P'_{GEO_az} - P'_{star1_az}) \times \alpha_{az} + P_{star1_theo_az-GEOtime}, \quad (9)$$

$$P_{GEO_el_theo} = (P'_{GEO_el} - P'_{star1_el}) \times \alpha_{el} + P_{star1_theo_el-GEOtime}. \quad (10)$$

通过以上步骤,采用摆扫式融合定位技术实现对空间碎片某个观测时刻的定位数据修正,如图 2 所示。为了输出空间碎片的序列定位数据,需要进一步修正空间碎片其他观测时段内记录的全部定位数据。由于地球同步轨道空间碎片

相对于地面观测设备几乎静止不动(在角分级范围内移动),在观测过程中其位置移动量同样远小于算法原理中提到的小角度($<10^\circ$)要求;同时,在一次空间碎片的观测时间范围内,望远镜周围环境不会大幅度变化,近似认为望远镜的轴系指向精度处于相对稳定状态。此时,通过空间碎片观测时刻的轴系定位数据与空间碎片观测过程中其他时刻轴系定位数据的偏差量,实现对全部定位数据的修正:

$$P_{GEO_theo}^n = (P_{GEO}^n - P_{GEO}) \times \alpha + P_{GEO_theo}, \quad (11)$$

其中 P^n 代表空间碎片观测过程中第 n 个时刻的位置数据。

综上所述,基于邻域恒星匹配的摆扫式融合定位技术利用望远镜指向数据的变化量而非绝对值。这样避免了轴系定位造成的指向误差,同时也突破传统天文定位需要同帧视场内存在大量恒星的限制,仅需要在空间碎片邻域内增加观测两颗定标恒星,就可以通过空间碎片与恒星的位置关系实现目标的高精度定位。

3 定位实验与结果

3.1 实验基础条件

本文依托中国科学院长春光机所研制的 500 mm 口径同步轨道空间碎片全天时探测系统开展实验,望远镜系统如图 3 所示。该望远镜白

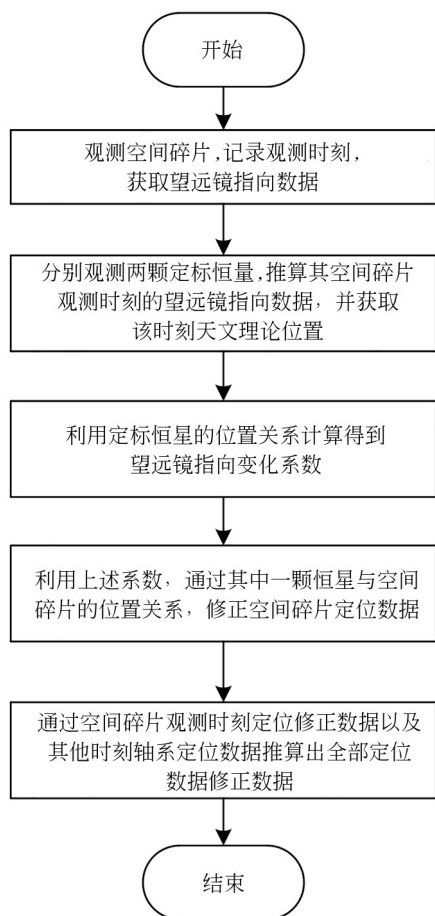


图 2 摆扫式融合定位流程

Fig. 2 Flow chart of swing-scan and fusion positioning



图 3 500 mm 口径同步轨道空间碎片全天时探测系统

Fig. 3 GEO space debris all-day detection system with 500 mm caliber

天的极限探测能力可达 15 Mv,可以实现地球同步轨道空间碎片的有效观测,同时可以在 3~5 s 甚至更短时间内完成 4~8 星等恒星的观测并获取位置数据。借助以上基础条件,采用摆扫式融合定位技术分别对若干恒星目标以及北斗通信卫星开展了定位精度测试。

3.2 恒星定位实验

为初步验证定位技术可行性,首先以恒星为目标开展定位精度测试实验。

3.2.1 实验条件

由于邻域恒星匹配的摆扫式融合定位技术主要应用于地球同步轨道空间碎片的高精度定位,受观测地区纬度的影响,白天环境下地球同步轨道带中可观测的大多数空间碎片目标仰角为 20°~60°。为验证该技术的可行性,将全天区内 20°~60°仰角的恒星按 10°的仰角变化步长分成若干组,并在全天时环境下进行观测。每组包括 3 颗 4~8 星等的恒星,将位于中间的恒星作为目标恒星,利用摆扫式融合定位技术修正每组中目标恒星的定位数据,并将修正后的数据与星表中天文理论位置进行对比,得出定位误差。观测实验条件如表 1 所示。

表 1 恒星定位实验条件	
Tab. 1 Experimental conditions for star positioning	
参 数	数值
望远镜视场/(°)	8×6
像元角分辨率/(″)	0.773 5
相机图像尺寸/pixel	640×512
恒星星表名称	Gaia_DR3
恒星星等/(Mv)	4~8
恒星方位范围/(°)	0~360
恒星俯仰范围/(°)	20~60
定标恒星与目标恒星方位距离差值/(°)	3~7
定标恒星与目标恒星俯仰距离差值/(°)	0.5~3
不同仰角范围内恒星组数	20

3.2.2 实验结果

图 4 给出了基于上述条件下各组内目标恒星的方位、俯仰值的偏差量分布情况,可以看出,方位偏差量 PV 值为 5.27″,俯仰偏差量 PV 值为 5.47″。方位值上,60~20°各仰角的定位误差 RMS 值分别为 1.28″,1.38″,1.24″,1.00″以及

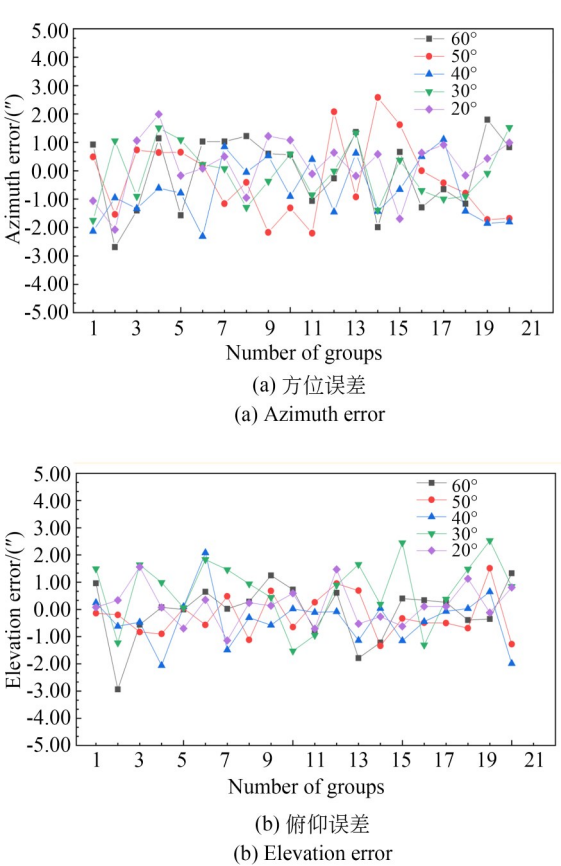
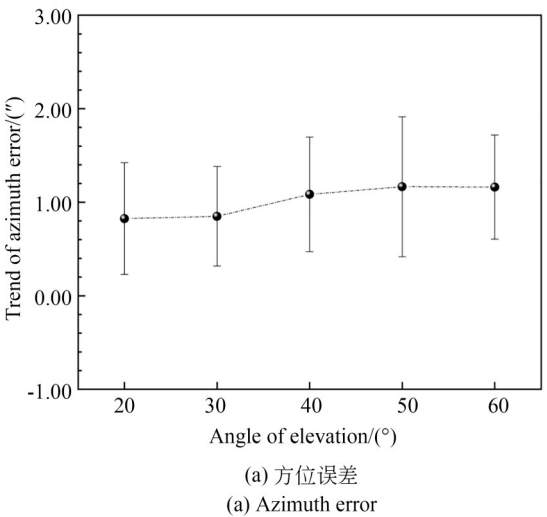


图 4 目标恒星定位误差分布
Fig. 4 Error distribution of target star positioning

1.00″,整体误差 RMS 值为 1.19″;俯仰值上,各仰角范围的定位误差 RMS 值分别为 1.01″,0.79″,0.98″,1.38″以及 0.72″,整体误差 RMS 值为 1.00″。

图 5 给出了定位误差的总体趋势,方位、俯仰



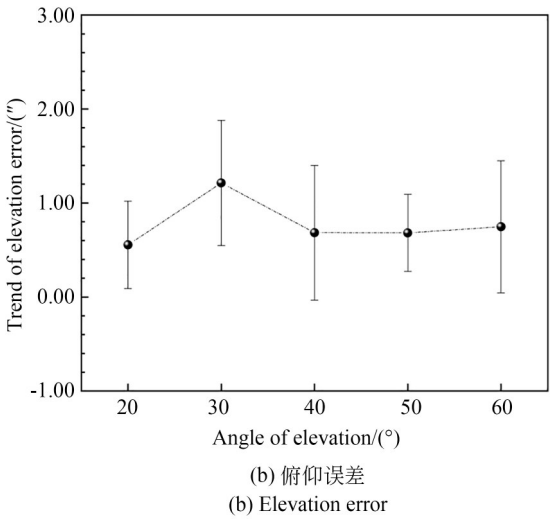


图5 目标恒星定位误差总体趋势

Fig. 5 Overall trend of target star positioning error

整体误差较小且均稳定在 3" 以内。以上数据表明, 摆扫式融合定位技术可以满足全天时探测系统的精度要求。

3.2.3 误差分析

实验中, 当定标恒星与目标恒星方位、俯仰差值超过表 1 中的条件值时, 定位误差可能超出 5 s, 不满足望远镜的定位误差需求。其原因为: 当不同目标位置差值过大时, 望远镜摆扫时间过长, 导致推算空间碎片观测时刻定标恒星的望远镜指向数据时误差较大; 当仰角差值过大时, 程序对于蒙气差的修正存在误差, 也会在一定程度上影响定位精度。采用的蒙气差模型如下:

$$\begin{cases} a = 24.67 - 2990.14/K - 5.31 \times \log_{10} K \\ b = 10^a \\ c = H \times b/100 \\ R_0 = 21.36 \times \frac{P}{K} - 1.66 \times \frac{c}{K} + 103029.27 \times \frac{c}{K \times K} \end{cases} \quad (12)$$

式中: K 为开尔文温度, H 为相对湿度, P 为大气压强。将式 (12) 代入式 (13) 得不同仰角 ϵ_{el} 下的蒙气差 R_{ef} 为:

$$R_{ef} = \frac{R_0 \times \cos \epsilon_{el}}{\sin \epsilon_{el} + 0.00175 \times \tan(1.52716 - \epsilon_{el})}. \quad (13)$$

此外, 每组中不同恒星脱靶量差值若超过 3 个像素, 结果也会超出误差要求。一般来说, 望远镜经过指向误差模型修正后, 在小角度 ($<10^\circ$) 内的指向误差比较稳定, 即观测不同恒星时视场脱靶量基本一致。若观测过程中 3 颗定标恒星中某个恒星的脱靶量与范围内其他恒星脱靶量的差值超出算法阈值, 认为该恒星理论位置的准确度较差, 即星表中用于引导望远镜指向的天文理论位置与其真实位置具有较大偏差。而本文提出的算法中需要用到其星表理论位置, 如果定标恒星的星表理论位置不准, 则会影响最终的定位精度。

3.3 精密轨道目标定位实验

基于上述恒星实验数据, 全天时探测系统于 2023 年 3 月针对处于地球同步轨道上的 3 颗北斗精密轨道目标开展了高精度测角实验, 最终结果如表 2 所示。此处定标恒星的选取条件与表 1 中

表 2 修正前后定位误差对比

Tab. 2 Comparison of positioning errors before and after correction (")

目 标	时 间	方位总误差		俯仰总误差	
		修正前	修正后	修正前	修正后
BeidouG5	2023 年 3 月 26 日 07:34	14.01	2.05	9.21	1.38
	2023 年 3 月 26 日 08:09	13.93	2.84	7.50	2.19
	2023 年 3 月 27 日 01:20	6.63	2.03	9.26	2.29
	2023 年 3 月 28 日 00:18	9.90	2.81	8.22	2.41
BeidouG6	2023 年 3 月 27 日 03:35	2.03	1.06	12.17	1.18
	2023 年 3 月 27 日 23:19	0.38	1.06	10.60	2.69
	2023 年 3 月 31 日 22:09	4.08	1.09	9.27	0.83
BeidouG7	2023 年 3 月 27 日 04:30	7.22	1.06	11.14	1.12
	2023 年 3 月 30 日 02:01	6.40	1.93	10.92	0.55
误差均值统计		7.18	1.77	9.81	1.63

条件相同,只是将进行定位数据修正的目标由恒星变为北斗精密轨道目标。数据表明,受阳光辐照不均匀、环境温度变化大等因素的影响,望远镜机架结构会发生变形,因此全天时地基光学望远镜采用轴系定位时,即修正前,存在定位误差较大且不稳定的问题;而利用摆扫式定位技术修正后,北斗精密轨道目标的方位、俯仰定位总误差分别从轴系定位的 $7.18''$ 、 $9.81''$ 降低为 $1.77''$ 和 $1.63''$,满足全天时地基光学望远镜系统的定位精度要求。

4 结 论

本文针对白天探测望远镜轴系误差较大且不稳定,以及由于视场较小导致望远镜无法

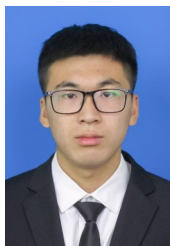
使用天文定位技术实现精确定位的问题,提出了一种适用于白天小视场望远镜的高精度空间碎片测角技术。依托中国科学院长春光机所研制的500 mm口径全天时探测系统,通过地球同步轨道空间碎片与其邻域内恒星的空间位置关系匹配,实现了 $4''$ 以内的定位精度。该方法有利于小视场地基光电望远镜对地球同步轨道空间碎片的跟踪与定位,对精密定轨具有重要意义。不过,该定位技术还有一定的局限性,即定标恒星的选择方式直接影响了定位精度结果,因此对于定标恒星的要求比较苛刻。未来通过选取更多的定标恒星以实现不同位置形式的匹配,可以降低对于定标恒星的特征要求,并进一步提高定位精度,更好地应用于小视场望远镜对空间碎片的精准定位。

参考文献:

- [1] 李祝莲,翟东升,汤儒峰,等. 基于532 nm波长的空间碎片白天激光测距研究与试验[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 276-283.
LI ZH L, ZHAI D SH, TANG R F, *et al.* Research and experiment on space debris daytime laser ranging based on 532 nm wavelength[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 276-283. (in Chinese)
- [2] 黄智国,王建立,王昊京,等. 红外K波段白天探测能力分析验证[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 176-182.
HUANG Z G, WANG J L, WANG H J, *et al.* Analysis and verification of infrared K band daytime detection ability[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 176-182. (in Chinese)
- [3] 张晓祥,赵金字,贾建禄,等. 卷帘快门sCMOS相机对空间碎片观测的影响研究[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1441-1449.
ZHANG X X, ZHAO J Y, JIA J L, *et al.* Study on the effect of rolling shutter sCMOS camera on space debris observation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1441-1449. (in Chinese)
- [4] SUN R Y, LU Y, ZHAO C Y. A method for correcting telescope pointing error in optical space debris surveys[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2016, 40(1): 66-78.
- [5] LIANG X B, MA W L, ZHOU J, *et al.* Star identification algorithm based on image normalization and zernike moments[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 29228-29237.
- [6] 王军,何昕,魏仲慧,等. 基于多特征匹配的快速星图识别[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1870-1879.
WANG J, HE X, WEI ZH H, *et al.* Fast star identification algorithm based on multi-feature matching[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1870-1879. (in Chinese)
- [7] 刘德龙,杨文波,柳鸣,等. 精密跟踪型望远镜适配的快速星图匹配[J]. 光学精密工程, 2022, 30(22): 2952-2961.
LIU D L, YANG W B, LIU M, *et al.* Rapid star pattern matching for precisely tracking telescopes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(22): 2952-2961. (in Chinese)
- [8] 宿德志,王玉良,吴世永,等. 基于相似三角形的星图识别[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2467-2473.
SU D ZH, WANG Y L, WU SH Y, *et al.* Star identification algorithm based on similar triangle principle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(11): 2467-2473. (in Chinese)
- [9] RODRIGUEZ-VILLAMIZAR J, SCHILDKNECHT T. Daylight measurement acquisition of defunct resident space objects combining active and passive electro-optical systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-17.

- [10] 黄龙. 大型望远镜指向精度及轴系技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
HUANG L. *Research on Pointing Accuracy and Shafting Technology of Large Telescope* [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [11] YING X K, LOU Z, LIU W, *et al.* Study on the pointing error model of terahertz telescopes with optically assisted pointing measurements [J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2022, 46(2): 105-120.
- [12] PENG C, HE D, WANG Y K, *et al.* Pointing-error correction of optical communication terminals on motion platforms using a parameter model and kernel weight function estimation [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(7): 1777-1784.
- [13] PENG C, HE D, HUANG Y M, *et al.* Pointing-error correction of optical communication terminals on motion platforms based on a K-nearest neighbor algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(6): 3220400.
- [14] 翟术然, 张忠萍, 张海峰, 等. 白天卫星激光测距望远镜指向误差修正方法研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(7): 781-785.
ZHAI SH R, ZHANG ZH P, ZHANG H F, *et al.* Research on telescope pointing error correction of SLR in the daytime [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 781-785. (in Chinese)
- [15] HUANG L, MA W L, HUANG J L. Modeling and calibration of pointing errors with alt-az telescope [J]. *New Astronomy*, 2016, 47: 105-110.
- [16] HUANG B, LI Z H, TIAN X Z, *et al.* Modeling and correction of pointing error of space-borne optical imager [J]. *Optik*, 2021, 247: 167998.

作者简介:



全胜(1998—),男,内蒙古自治区兴安盟人,硕士研究生,2021年于哈尔滨工业大学(威海)获得学士学位,主要从事全天时地基光学探测方面的研究。E-mail: quansheng1998@126.com

通讯作者:



姚凯男(1987—),男,辽宁大连人,博士,研究员,博士生导师,2010年于四川大学获得学士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间目标光电探测与成像技术的研究。E-mail: yaokainan001@126.com