

文章编号 1004-924X(2021)12-2902-13

空间目标天基双星立体天文定位

赵巨波^{1*}, 徐婷婷^{2,3}, 杨秀彬^{2,3}, 永 强²

- (1. 中国人民解放军 92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了提高天基光学传感器观测空间目标的定位精度, 基于天文定位原理, 提出了一种天基空间目标双星立体天文定位方法。首先, 根据光学载荷固有参数, 分析了空间目标在光学传感器上成像特性, 选择阈值质心法精确提取目标在二维像平面上位置。接着, 基于目标到观测传感器全链路坐标投影变换关系, 建立了地球惯性坐标系下目标的观测矢量模型。然后, 结合最小二乘法准则, 建立了双星立体天文几何定位模型, 完成空间目标从二维图像信息到三维空间信息的投影变换。最后, 搭建地面实验生成了含空间目标的星空图像, 并完成了定位算法验证和误差仿真分析。实验结果表明: 当定位模型中没有误差时, 定位精度可达 10^{-5} m; 当同时存在卫星位置误差、卫星姿态误差、卫星轨道误差、相机安装误差和图像处理误差时, 定位误差分布为均值为零, 标准差为 114.62 m 的高斯分布, 基本满足定位需求。本文的研究工作可为天基空间目标的高精度检测定位提供参考。

关键词: 天基探测; 质心提取; 天文定位; 坐标变换; 最小二乘法

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212912.2902

Stereo celestial positioning of space-based double satellites to space target

ZHAO Ju-bo^{1*}, XU Ting-ting^{2,3}, YANG Xiu-bin², YONG Qiang²

- (1. 92941 Troop, PLA, Huludao 125001, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: 811074631@qq.com

Abstract: Based on the principle of celestial positioning, a stereo positioning method with two observatory satellites was proposed to improve the accuracy of space based detection and positioning. First, according to the performance of the optical camera, the image characteristics of the space target on the optical sensor were analyzed, and the position of the target on the image plane was accurately extracted using the threshold centroid method. Next, based on the coordinate transformation matrix between the target and the observation sensor, the observation vector model was established via the inertial coordinate system. Then,

收稿日期: 2021-05-16; **修订日期:** 2021-06-01.

基金项目: 吉林省自然科学基金项目 (No. 20210101099JC); 2019 年度珠海市创新团队项目 (No. ZH0405190001PWC); 国家自然科学基金项目 (No. 62171430, No. 62101071, No. 62005275)

the stereo geometric positioning model of the two observation satellites was established based on the principle of least squares. This model realizes the position transformation of the space target from the two-dimensional image to the three-dimensional space. Finally, the experimental star image capturing the target was generated using ground experiment, and error simulations were performed to verify the positioning algorithm. Simulation results indicate that the positioning precision of the proposed approach can reach 10^{-5} m in the absence of errors. When five types of errors, satellite orbit and attitude, camera installation, and centroid extraction, were considered, the positioning error obeyed a normal distribution with a standard deviation of 114.62 m and a mean value of 0, thereby meeting the standard requirements. In this regard, this study provides a novel method for the space based high precision detection and positioning.

Key words: space-based detection; centroid extraction; celestial positioning; coordinate transformation; least-square method

1 引言

天基探测系统由于其不受地域限制和大气影响,可对空间目标如导弹、运载火箭等实现高精度、高时效探测^[1]。光学无源探测隐蔽性强、能耗低以及抗干扰性强,相比雷达等有源探测约束更少,作用距离更远^[2]。天基光学探测结合二者优点,体现出了无可比拟的优越性,是实现空间态势感知的重要技术手段^[3]。

天基光学探测对空间目标定位的本质为获取目标的角度信息,属于被动测角定位方法。为获取目标三维位置信息,则至少需要两个及以上观测光学载荷参与定位。研究人员通过将光学载荷放置在光电观测平台如框架式经纬仪上获取角度信息,从而计算目标的位置信息。如吴能伟^[4]提出了一种基于方向余弦的交会定位方法,通过构建不同测站的方向余弦,利用加权算法实时估计目标的空间三维坐标。王卫兵等人^[5]提出了一种基于双星双目跟踪方式的空间目标轨迹测量技术,通过将两个相机放置在不同卫星平台的二维转台上,建立了一种“双星双目跟踪系统”对“远距离目标进行测量”的模型。但二维转台的控制自由度较多并且有范围限制,在活动部件获取角度信息时容易引入更多误差源,控制难度较大。

天文定位是一种高精度的光学定位技术。天基空间目标天文定位是通过卫星搭载的光学载荷对空间目标在恒星跟踪模式下拍摄系列含有目标的星图,通过光学传感器像平面目标检测,获得目标相对观测卫星的观测矢量。再结合

位置坐标转换关系,获取观测目标的位置信息^[6]。天基光学探测系统的特殊性在于被探测目标处于深空背景,探测距离较远,目标信噪比较低,这对像平面上目标的检测提取造成困难。在这方面,研究人员针对星空背景下暗弱运动目标的检测和定位进行了大量的理论分析和仿真^[7-12]。同时,在定位精度分析方面也有谢恺^[13]、盛卫东^[14]等人建立了目标视线测量误差(LOS, Line of sight)模型,仿真分析了天基光学传感器网络定位的多误差源;杨虹等人^[2]利用小波分析理论提高双星光学观测系统的定位精度。

在上述研究的基础上,本文基于两个分别搭载于两颗相距一定距离的卫星上的光学载荷,通过天文定位方式,提出了一种天基双星天文定位算法。本文首先根据空间目标辐射特性和光学系统点扩散函数(PSF, point spread function),建立了空间目标在光学传感器上的成像模型;然后选择阈值质心法在像平面上提取空间目标像平面质心位置;通过物像共轭坐标投影变换关系,建立了地球惯性坐标系下的目标观测矢量模型;基于最小二乘准则,解算出空间目标三维位置信息。最后开展了地面实验获取含空间目标的星图,并开展了定位算法验证和误差仿真分析,误差分析结果验证了该定位算法的有效性。

2 空间目标像平面位置提取

2.1 目标在光学传感器上成像建模与分析

在天基探测中,光学传感器接收的目标光能

量主要来源于反射的太阳光。由光学系统收集的目标光能量 ϕ ^[15-16]可表示为:

$$\phi = S_D \tau E_{\text{pupil}}, \quad (1)$$

其中: S_D 为光学系统入瞳面积, τ 为光学系统透过率, E_{pupil} 为目标在光学系统入瞳处辐照度^[17-18]。

天基光学载荷除了拍摄目标还有恒星,为了便于描述,天文学上常用星等表示目标的亮度,星等计算公式如下:

$$m = 2.5 \lg(E_0/E_{\text{pupil}}), \quad (2)$$

其中, $E_0 = 2.068 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 为零等星的辐照度值,一般选太阳为参考星。星等的数值越大,目标的照度越小,反射的光能量越低,探测难度越大。为了衡量光学载荷这种探测能力,引入信噪比这一指标,通过等效电子法将信噪比定义如下^[19]:

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_d + N_r}}, \quad (3)$$

其中: N_b 、 N_d 和 N_r 分别为深空背景噪声、探测器暗电流和探测器读出噪声产生的光电子数, N_s 为

$$f(x, y) = A \cdot \exp \left\{ - \frac{[(x - x_0) \cos \theta + (y - y_0) \sin \theta]^2}{2\sigma_x^2} - \frac{[(x - x_0) \sin \theta - (y - y_0) \cos \theta]^2}{2\sigma_y^2} \right\}, \quad (5)$$

$$A = N_s, \quad (6)$$

其中: $f(x, y)$ 为图像灰度值, (x_0, y_0) 为目标中心坐标, θ 表示为条状目标像的旋转角度, A 为目标中心处光电子总数, σ_x 、 σ_y 分别为弥散斑水平和垂直扩散参数。当 $\sigma_x = \sigma_y = 0.671$ 时,有95%的光能量集中在 3×3 个像元上。恒星和空间目标的理想像和光能量分布如图1所示。

2.2 目标像平面上位置检测与提取

根据目标的成像特性可知,运动空间目标在长曝光时间下呈条状分布,而静态恒星为点状光斑分布。因此在形态上空间目标与恒星可以通过矩形度,即最小外接矩形的长宽比进行区分。下面对目标在像平面上位置检测与提取流程进行详细介绍。

首先对含目标的星图进行中值滤波^[21],目的是滤掉星图背景的离散噪声。接着为了尽可能保留目标的灰度分布信息,选择阈值分割的方法区分目标与背景,生成二值图像如下:

$$b(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) \leq T \\ 1 & f(x, y) > T \end{cases}, \quad (7)$$

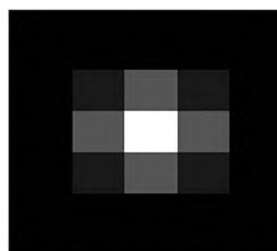
其中: $b(x, y)$ 为阈值分割后的二值化图像, T 表

探测器每个像元响应的目标辐射产生的光电子数,计算如下:

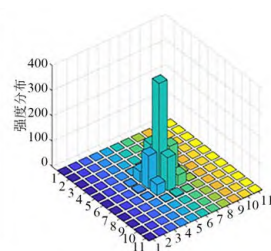
$$N_s = \frac{\phi t_0 \eta \epsilon}{(hc/\bar{\lambda})n}, \quad (4)$$

其中: t_0 为曝光时间, η 为探测器量子效率, ϵ 为像元填充因子, h 为普朗克常量, c 为真空中的光速, $\bar{\lambda}$ 为探测波段 λ 的均值, n 为目标成像在传感器上所占的像元个数。基于上述分析可以看出,当被测目标距离大小、光学系统以及探测器等参数保持不变时,为了提高目标探测信噪比,曝光时间应尽可能长。

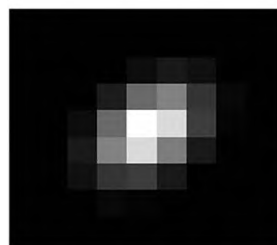
在一般情况下,对于恒星在光学传感器上成像,水平和垂直方向光能量扩散程度相同,经过光学系统后成像为扩散的弥散斑。但空间目标由于运动速度较快,在长曝光时间下呈现为滑过视场的短条纹轨迹,且中心位置光能量随机扩散在相邻像素上,由此引入角度相关的各向异性高斯扩散函数^[20],表示如下:



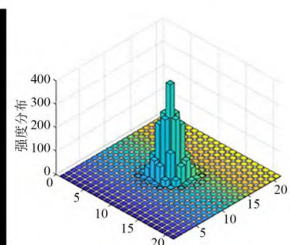
(a) 理想弥散斑像点
(a) Ideal star



(b) 三维光能量分布
(b) 3D plot of a star



(c) 理想目标条状像
(c) Ideal space target



(d) 三维光能量分布
(d) 3D plot of a space target

图1 恒星和空间目标的光学系统成像模型

Fig. 1 Imaging models of a star compared with a space target

示分割阈值,表示如下:

$$T = \mu_{\text{image}} + \zeta \sigma_{\text{image}}, \quad (8)$$

其中: μ_{image} 和 σ_{image} 分别表示含目标的星图像均值和方差。对于系数 ζ 的选择,Sun等人^[22]将 ζ 的取值范围设置为0.8—2,可以保证目标的检测率,本文取 $\zeta = 2$ 。

得到二值化图像 $b(x, y)$ 后,为了区分目标和恒星的形态,检测提取目标,需要对二值图像进行连通域分割处理,将目标和其他恒星分离^[23]。因此定义矩形度 R ,即目标/恒星像的最小外接矩形长宽比,以此为区分目标和恒星形态的标准^[24],如图2所示。得到仅含有目标的二值化图像为:

$$\hat{b}(x, y) = \begin{cases} 0 & \bar{b}(x, y) \leq R_t \\ 1 & \bar{b}(x, y) > R_t \end{cases}, \quad (9)$$

其中: R_t 为矩形度区分阈值, $\hat{b}(x, y)$ 为经过矩形度检测后仅含有目标区域的二值图像, $\bar{b}(x, y)$ 为经连通域分割处理后的二值图像。

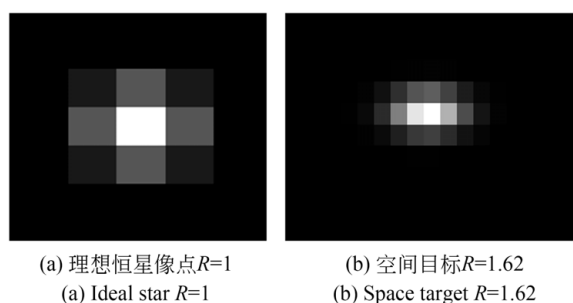


图2 恒星和空间目标的形态区分

Fig. 2 Morphological distinction between the star and the space target

目标在像平面上的位置确定精度直接影响后续目标在三维空间的位置解算精度^[25]。质心定位法由于其具有计算简单、定位精度可达亚像元级的优势,在工程上得到了广泛的应用。本文使用阈值质心定位方法得到目标的质心位置为 (x_f, y_f) ^[26]。

3 天基双星天文定位模型

天基空间目标的天文定位实际上就是已知目标在二维平面上的位置信息和目标到传感器的全链路投影变换关系求解目标在三维空间信

息的投影问题^[27]。本文基于计算机视觉中的双目视觉定位方法,提出了一种天基双星天文定位方法。由双目视觉定位原理可知,两测站之间的距离即基线长度和目标距离是影响定位精度的主要原因^[28]。由于本文的被测目标是天基空间目标,属于远距离测量,若将两个光学载荷放置于同一颗观测卫星上,则会导致基线较短,严重影响定位精度。通过将两个光学载荷分别搭载于相距一定距离的观测卫星上,双星的观测矢量交叉,基于最小二乘法准则,从而解算空间目标位置。

3.1 空间目标观测矢量模型

因为在求解目标位置过程中,需要建立并明确多种坐标系以及它们之间的转换关系,因此本文规定基础坐标系为地球惯性坐标系,对应的求解过程均在惯性系下进行。双星定位原理如图3所示,定义 $r_{si}(i=1, 2)$ 为观测卫星在地球惯性坐标系下的位置矢量, (x_f^i, y_f^i) 为目标在像平面上的像素坐标。以单颗观测卫星为例,利用这些信息可以建立被测目标相对观测卫星坐标系的观测矢量为 $l_i(i=1, 2)$,在惯性系下表示为 $u_i(i=1, 2)$ 。

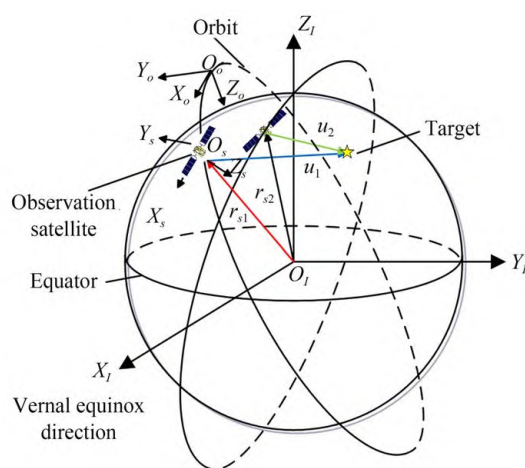


图3 天基双星天文定位示意图

Fig. 3 Schematic of two space-based satellites positioning on a space target

因此求解目标在地球惯性坐标系下位置的首要问题为观测卫星对空间目标成像全过程分析。既将2D图像上目标像素位置变换至3D空间中位置坐标的变换过程,如图4所示。需要求

解观测矢量 l_i 从相机坐标系转换至地球惯性坐标系下的 u_i 的变换矩阵 M_{f-i} 。

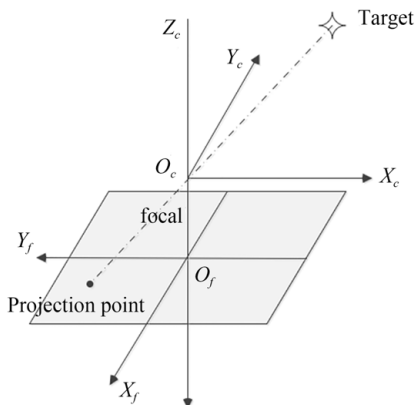


图 4 空间目标物像坐标关系示意图

Fig. 4 Transmission relationship between the target and the projection point

3.1.1 观测卫星位置矢量计算

在求解观测矢量时,需要获取观测卫星的位置信息,本文首先根据轨道运动学规律计算了观测卫星的位置矢量。考虑到低轨卫星绕地球运动时可近似看作只受地球的引力作用,若将地球等效为一个质点,则地球和卫星构成了一个简单的二体系统,根据牛顿第二定律,可知观测卫星的运动方程为:

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu \mathbf{r}}{r^3}, \quad (10)$$

其中, μ 为地球引力常数。从式(10)可以看出,需要 6 个积分常数才能求解该三元二阶微分方程,通常称这 6 个积分常数为轨道六根数。观测卫星的位置矢量 $\mathbf{r}_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ 可以由轨道六根数表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{si} &= a_i (\cos E_i - e_i) \cdot \mathbf{P}_i + a_i \sqrt{1-e_i^2} \sin E_i \cdot \mathbf{Q}_i \\ E_i &= M_i + e_i \sin E_i \\ M_i &= v_i t + M_{0i}, \quad v_i = \sqrt{\frac{\mu}{a_i^3}} \\ \tan \frac{f_i}{2} &= \sqrt{\frac{1+e_i}{1-e_i}} \tan \frac{E_i}{2} \\ \mathbf{P}_i &= \begin{bmatrix} \cos \omega_i \cos \Omega_i - \sin \omega_i \sin \Omega_i \cos i_i \\ \cos \omega_i \sin \Omega_i + \sin \omega_i \cos \Omega_i \cos i_i \\ \sin \omega_i \sin i_i \end{bmatrix} \\ \mathbf{Q}_i &= \begin{bmatrix} -\sin \omega_i \cos \Omega_i - \cos \omega_i \sin \Omega_i \cos i_i \\ -\sin \omega_i \sin \Omega_i + \cos \omega_i \cos \Omega_i \cos i_i \\ \cos \omega_i \sin i_i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:轨道六根数分别表示为: a 为轨道半长轴, i 为轨道倾角, e 为偏心率, ω 为近地点幅角, Ω 为升交点赤经, M 为平近点角; M_{0i} 为初始平近点角, E 为偏近点角, f 为真近点角,用来描述卫星在当前位置偏离近地点的角度^[29]; $\mathbf{P}, \mathbf{Q}$ 分别表示沿轨道半长轴和半短轴方向单位矢量在惯性坐标系下的矩阵表示,式中下角标 i 为卫星的编号。通过式(11)可以求解在任意 t 时刻的观测卫星在地球惯性坐标系下的位置。

3.1.2 空间坐标转换关系建模

结合图 4 和图 5,可知单颗卫星成像过程要经过 4 次坐标变换,投影转换过程如图 5 所示。

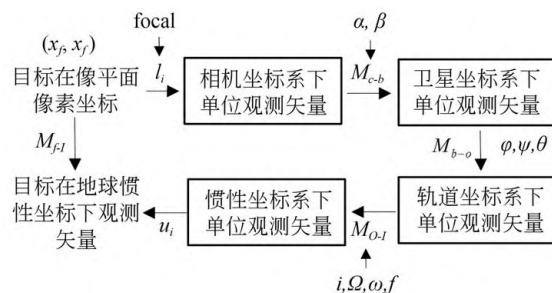


图 5 目标观测矢量转换示意图

Fig. 5 Schematic of the observation vector transmission process

惯性系下的观测矢量可表示如下:

$$\mathbf{u}_i = M_{f-i}^i \cdot \mathbf{l}_i = M_{O-I}^i \cdot M_{b-o}^i \cdot M_{c-b}^i \cdot \mathbf{l}_i, \quad (12)$$

其中:上下角标 $i=1, 2$ 均代表卫星编号, M_{c-b}^i 为从光学相机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 向卫星本体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ 转换的变换矩阵, M_{b-o}^i 为从卫星本体坐标系向卫星轨道坐标系 $O_o X_o Y_o Z_o$ 转换的变换矩阵, M_{O-I}^i 为从卫星轨道坐标系向地球惯性坐标系 $O_I X_I Y_I Z_I$ 转换的变换矩阵。式(12)的各项具体表达式和转换过程如下:

(1)当目标经过透镜成像,根据光线追迹原理,物像呈共轭关系。目标的像素坐标 (x_f^i, y_f^i) 在相机坐标系下表示为 $(-x_f^i, -y_f^i, focal^i)$,由此可以得到相机坐标下的目标观测矢量 $\mathbf{l}_i$:

$$\mathbf{l}_i = \frac{(-x_f^i, -y_f^i, focal^i)}{\sqrt{(-x_f^i)^2 + (-y_f^i)^2 + (focal^i)^2}}. \quad (13)$$

(2)当相机相对卫星本体坐标系安装方位角和高低角分别为 α^i, β^i 时,通过坐标旋转可以得到

相机坐标系到卫星坐标系的变换矩阵 M_{c-b}^i 为:

$$M_{c-b}^i = R_z(-\alpha^i) \cdot R_y\left(\beta^i - \frac{\pi}{2}\right). \quad (14)$$

(3) 当观测卫星相对卫星轨道坐标系的三轴姿态角分别为俯仰 θ^i 、横滚 φ^i 、偏航 ψ^i 时, 根据卫星姿态旋转, 可以得到卫星本体坐标系到卫星轨道坐标系的变换矩阵 M_{b-o}^i 为:

$$M_{b-o}^i = R_z(-\psi^i) \cdot R_y(-\theta^i) \cdot R_x(-\varphi^i). \quad (15)$$

(4) 当观测卫星的轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角以及真近点角分别为 i^i 、 Ω^i 、 ω^i 、 f^i 时, 根据坐标旋转调整, 可以得到卫星轨道坐标系到地球惯性坐标系的变换矩阵 M_{o-i}^i 为:

$$M_{o-i}^i = R_z(-\Omega^i) \cdot R_x(-i^i) \cdot R_z(-\omega^i - f^i) \cdot B, \quad (16)$$

其中: $R_x(\cdot)$ 、 $R_y(\cdot)$ 、 $R_z(\cdot)$ 分别为当前坐标系绕 x 轴、 y 轴、 z 轴的基本旋转矩阵, B 为坐标轴调整矩

$$u_i = R_z(-\Omega^i) \cdot R_x(-i^i) \cdot R_z(-\omega^i - f^i) \cdot B \cdot R_z(-\psi^i) \cdot R_y(-\theta^i) \cdot R_x(-\varphi^i) \cdot R_z(-\alpha^i) \cdot$$

$$R_y\left(\beta^i - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{(-x_f^i, -y_f^i, focal^i)}{\sqrt{(-x_f^i)^2 + (-y_f^i)^2 + (focal^i)^2}}. \quad (18)$$

3.2 双星天文定位模型

在地球惯性坐标系下获得目标相对观测卫星的观测矢量 u_i 后, 仅能计算出目标的方位角和高低角等角度信息。在仅有角度信息的定位体制下, 本文基于测向交叉定位原理和最小二乘法准则, 结合双星位置关系提出了一种双星天文定位方法, 如图 6 所示。通过两颗相距一定距离的观测卫星观测矢量交叉, 解算出空间目标的三维位置信息。根据观测矢量 u_i 和卫星的位置矢量 r_{si} ($i=1, 2$), 可以建立目标位置矢量模型如下:

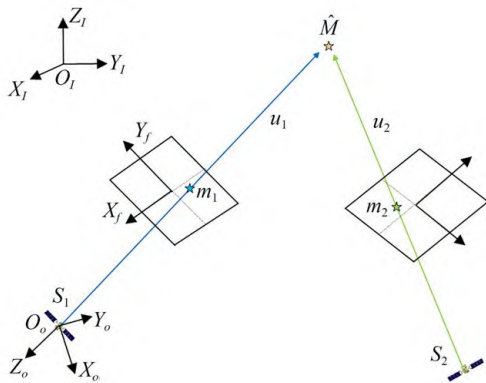


图 6 双矢量交会定位示意图

Fig. 6 Schematic of the two vectors intersection positioning

阵, 分别表示如下:

$$\begin{aligned} R_x(\cdot) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\cdot) & \sin(\cdot) \\ 0 & -\sin(\cdot) & \cos(\cdot) \end{bmatrix} \\ R_y(\cdot) &= \begin{bmatrix} \cos(\cdot) & 0 & -\sin(\cdot) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\cdot) & 0 & \cos(\cdot) \end{bmatrix} \\ R_z(\cdot) &= \begin{bmatrix} \cos(\cdot) & \sin(\cdot) & 0 \\ -\sin(\cdot) & \cos(\cdot) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

综合式(11), 结合式(13)到式(17), 根据上述分析, 可以得到惯性系下的目标观测矢量 u_i , 即式(12)也可以表示如下:

$$M = r_{si} + \|r_{si} - M\| \cdot u_i, \quad (19)$$

其中: $M(x_i, y_i, z_i)$ 表示为空间目标在地球惯性坐标系下的位置矢量, $\|r_{si} - M\|$ 表示观测卫星与空间目标的距离。当观测卫星个数为 2 个时, 将式(19)各项标量展开整理为如下矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -u_{1x}/u_{1z} \\ 0 & 1 & -u_{1y}/u_{1z} \\ 1 & 0 & -u_{2x}/u_{2z} \\ 0 & 1 & -u_{2y}/u_{2z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{s1} - u_{1x}z_{s1}/u_{1z} \\ y_{s1} - u_{1y}z_{s1}/u_{1z} \\ x_{s2} - u_{2x}z_{s2}/u_{2z} \\ y_{s2} - u_{2y}z_{s2}/u_{2z} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

对上式的结果简写为 $A \cdot M = b$, 可以看出, 对于式(20), 有方程的个数大于未知数的个数, 因此该式为超定方程, 无解析解。因此对 M 的求解可以转化为最优解的估计问题, 本文采用最小二乘法准则^[30]对目标在惯性系下的位置进行求解如下:

$$\hat{M} = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (21)$$

结合式(18)和式(21), 即可完成空间目标从光学传感器获取的二维图像信息 (x_{fi}, y_{fi}) 到三维空间信息 (x_i, y_i, z_i) 的投影转换过程。通过本文的分析可以看出, 影响定位精度的因素主要有两大部分: 一是目标的观测矢量误差, 这部分误差来源于目标图像位置确定误差和在矩阵变换的过程中, 卫星的姿态角误差以及相机安装角度误

差等;二是观测卫星的位置误差,包括卫星的轨道倾角、升交点赤经等误差。

3.3 定位误差分析

本文通过蒙特卡洛方法对定位误差的分布进行分析,蒙特卡洛方法基于大数定律,通过在真实数据上添加随机误差,通过大量的计算,使统计结果更加真实可信。本文主要考虑了测量卫星的位置误差、姿态误差、轨道误差、相机安装误差以及图像处理误差即像平面的位置提取误差这五项误差源。本文中的两颗观测卫星设置相同,因此误差符合相同的分布。首先将随机误差加到真实值上,然后通过双星天文定位法求解出目标的位置,将该值与真实目标位置进行比较,从而得到该定位算法的误差。通过蒙特卡洛法得到的定位误差模型如下:

$$(\Delta x_i(i), \Delta y_i(i), \Delta z_i(i)) = M(i) - M'(i)$$
$$i = 1, 2, \dots, n, \tag{22}$$

其中: $M(i)$ 是目标的真实位置, $M'(i)$ 是对各项输入添加随机误差后的定位结果。在得到 n 组定位误差后,以 x 轴方向的误差分布为例做统计分析如下:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i(i)|}{n}, \tag{23}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i(i) - \mu)^2}, \tag{24}$$

其中: μ 为误差分布的均值; σ 为误差分布的标准差,受输入误差的分布特性影响变化。

4 地面实验与误差仿真分析

本文针对天基空间目标的双星天文定位方法,主要从生成含目标的仿真星图、目标在像平面上的检测提取以及双星天文定位算法的实现三部分开展图像仿真实验,并对定位算法进行了精度分析,验证了本文算法的可行性。

4.1 地面实验与仿真分析

4.1.1 含空间目标的星图像获取

根据 2.1 节的目标成像特性分析,设置如表 1 所示的目标探测指标以及光学载荷参数。根据 PSF 原理,在对理想星点进行散焦处理时,根据光学系统能量分布,使星点光斑在探测器上所占的像元数为 3×3 。由式(3)和式(4)可计算得到

目标的探测信噪比约为 16.61。在空间目标探测中,当信噪比阈值为 4 时,可满足目标检测需求,因此表 1 设置的仿真参数是符合实际应用需求的。当在可见光波段探测 15 cm@200 km 的目标时,计算目标等效星等为 7.525 7。经计算,本文仿真使用的光学载荷可探测的极限星等为 8.07。

表 1 光学载荷参数及目标探测指标设置

Tab. 1 Parameters setting of payload and target detection indicators

Parameters	Value
Detection metrics/cm@200km	15
Detection wave band/ μm	0.4—0.7
Pixel size/ μm	6.5
Focal plane size/pixel	$4\,096 \times 4\,096$
Focal/mm	220
Aperture/mm	110
Dark current noise e [−] /pixel/s	3
Readout noise e [−]	1.3
Average quantum efficiency	0.6
Optical system transmittance	0.8
Exposure time/ms	2.3
Pixel filling factor	0.7

依托现有条件,以单星观测为基础,开展了地面实验用于获取天基观测卫星在轨拍摄的含目标的星图像。地面实验装置如图 7 所示,主要包括可见光相机、卫星成像仿真平台以及图像源靶标三部分。其中背景恒星为通过 Stellarium 软件,将光学系统可探测的极限星等设置为 8 获取。我们首先将可见光相机拍摄的背景恒星图像截取 $4\,096 \times 4\,096$ 像元大小部分,然后在背景恒星图像中添加等效星等为 7.525 7 亮度的条状目标,经过去噪处理,生成如图 8 所示含目标的星图像。

4.1.2 目标在像平面上的检测提取

在光学探测器曝光时间内,从图 8(b)可以看到空间目标和恒星在形态的明显区别,因此本文

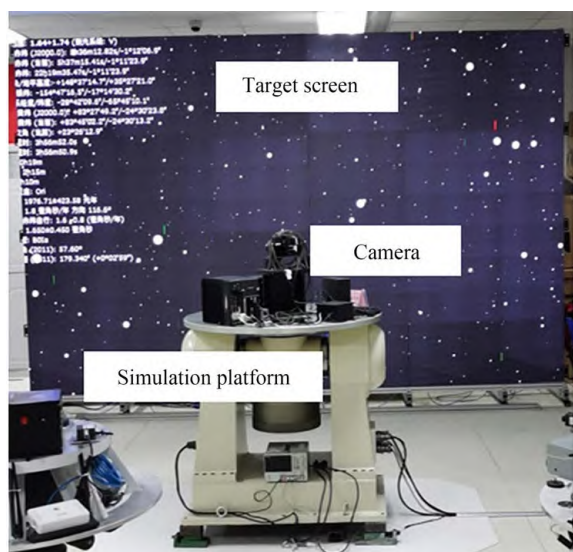
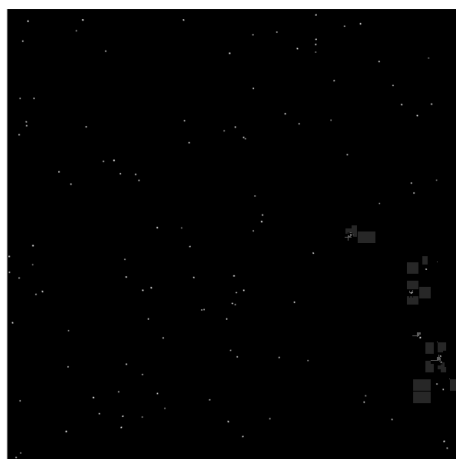


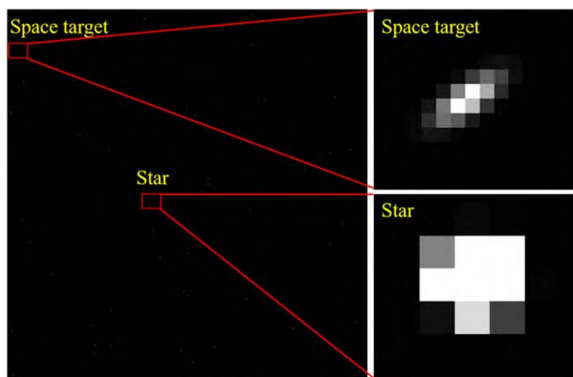
图 7 天基探测地面实验装置

Fig. 7 Ground experiment equipment of space-based detection



(a) 实验获取的背景恒星星图

(a) Experimental star image only contain stars



(b) 含空间目标的实验星图

(b) Experimental star image contain both stars and target

图 8 含空间目标的实验星图

Fig. 8 Space target in the experimental star image

利用该形态特征设计矩形度 R 来进行空间目标的检测。首先进行图像预处理滤掉大部分背景噪声,然后进行连通域处理,分离空间目标和恒星,如图 9 所示。预处理后的星图仅包含星点和目标,因此针对所有连通域进行矩形度分析,最大 R 值对应的连通域即为条状空间目标的成像,此时 $R=2.3915$,检测结果如图 10 所示。最后阈值质心对目标像进行定位结果如表 2 所示,可以看到对于载荷 1,在 x, y 方向上偏差均为 0.05 个像元;对于载荷 2,在 x 方向上的偏差为 0.05 个像元,在 y 方向上的偏差为 0.03 个像元,满足后续定位精度需求。

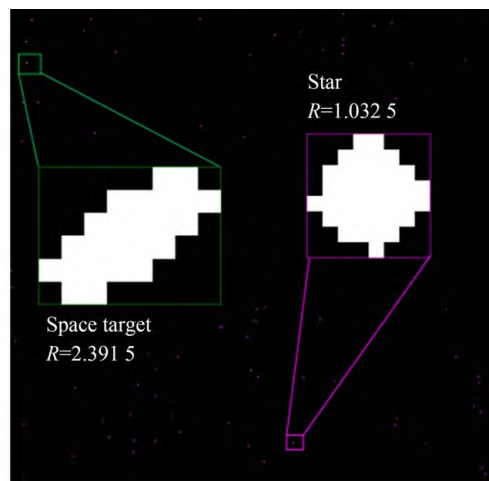


图 9 空间目标和恒星的矩形度区分

Fig. 9 Rectangularity distinction between space target and star

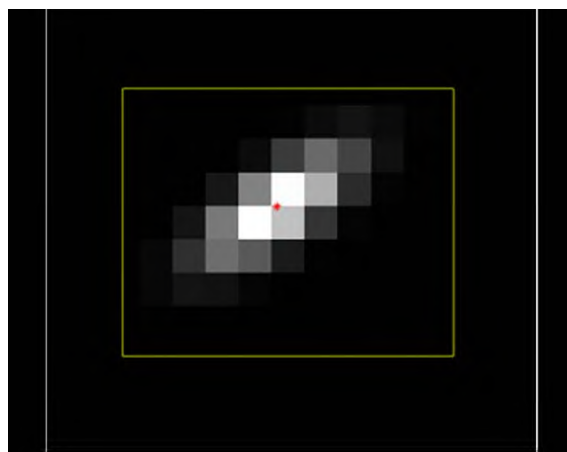


图 10 空间目标条状像检测与提取

Fig. 10 Detection and extraction for space target

表 2 目标像点在星图上的像素坐标位置

Tab. 2 Coordinates of the target on image plane

Number	Actual coordinates		Extracted coordinates	
	x/pixel	y/pixel	x/pixel	y/pixel
Payload1	-1 900.3	1 576.5	-1 900.25	1 576.45
Payload2	-1 596.9	1 578.5	-1 596.95	1 578.53

表 3 观测卫星、被测目标的轨道根数及姿态设置

Tab. 3 Orbital elements and attitude of two observation satellites and a target satellite

Parameters	Observation satellite 1	Observation satellite 2	Target
Semimajor axis/km	6 928.14	6 928.14	7000.14
Eccentricity	0	0	0
Inclination/(°)	97.552 1	97.552 1	97.7141
Right ascension of ascending node/(°)	203.282	203.282	163.536
Argument of perigee/(°)	0	0	0
True anomaly/(°)	0.108 26	8.108 26	0
Roll angle/rad	0	0	—
Pitch angle/rad	0.034 9	0.031 3	—
Yaw angle/rad	2.203 4	2.035 6	—
Elevation angle/(°)	90	90	—
Azimuth angle/(°)	0	0	—



图 11 观测卫星与被测目标轨道位置关系示意图

Fig. 11 Schematic of orbital position relationship between two observation satellites and a space target

根据表 3 中的轨道六根数可知,观测卫星在惯性系的位置分别为:

$$\begin{aligned} & [-6364.656798; \\ & -2736.796984; 12.977102] \text{ km}, \\ & [-6351.131107; \\ & -2593.037746; 968.695615] \text{ km}. \end{aligned}$$

由 4.1.2 小节得到的目标在像平面上的位置分别为:

$$\begin{aligned} & [-1900.3; -1576.5] \text{ pixel}, \\ & [-1596.9; 1578.5] \text{ pixel}. \end{aligned}$$

再结合式(18)和式(21),计算得到目标位

4.1.3 天基空间目标的双星天文定位

首先进行仿真观测任务的设置,观测卫星和被测目标均设置为太阳同步轨道,在观测时刻 15 Apr 2021 04:00:00.000(UTCG),观测卫星和被测目标的轨道根数及相关姿态设置如表 3 所示,表中仿真数据均由 STK 软件生成,位置关系如图 11 所示。

置为:

$$[-6514.480264077; 2561.898009707; 13.6196879564] \text{ km},$$

已知目标的实际位置为:

$$[-6514.480264; 2561.898010; 13.619696] \text{ km}$$

可以看出,在没有添加误差的情况下,本文提出的定位方法在 x 、 y 轴方向的定位误差分别可达到 10^{-5} m、 10^{-4} m 量级,在 z 方向的误差约 0.008 m,均可满足实际定位需求。由此验证了本文提出的天基双星天文定位方法是有效可行的。

4.2 误差仿真与分析

本次误差仿真实验取蒙特卡洛仿真次数为 10 000 次,对这 10 000 次误差结果进行统计,以 x 轴方向上的定位误差为例,误差分布近似服从零均值的高斯分布,如图 13 所示,误差分布的标准差分析结果如表 4 所示。可以看到,当定位模型中存在角度误差时(如卫星姿态角度误差),定位精度要低于仅存在位置误差。同时存在表 5 中的五种类型误差时,定位误差分布标准差为

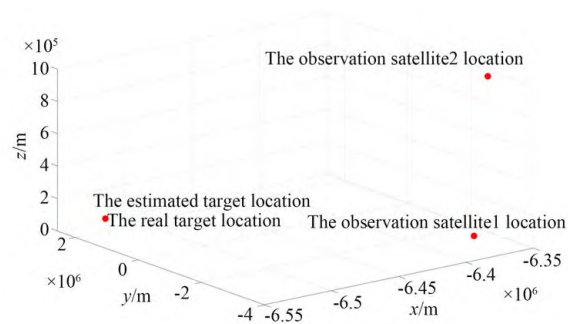


图 12 天基空间目标双星天文定位结果示意图
Fig. 12 Positioning result of the proposed method

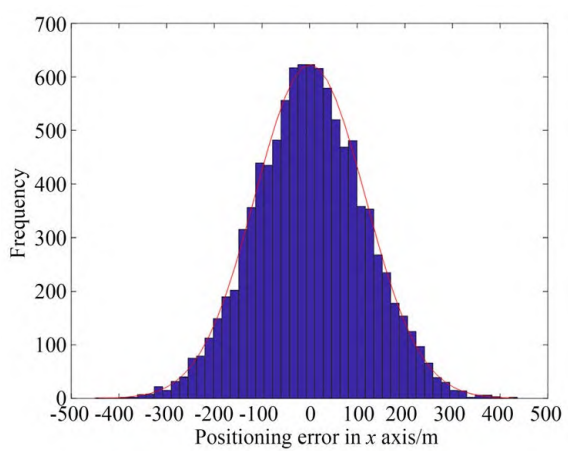


图 13 存在 5 种误差时的 x 轴方向定位误差分布
Fig. 13 Distribution of the x -axis-error taking five kinds of errors in consideration

114.62 m,证明了该方法具有一定可行性。

4.3 真实目标定位试验

为了检验本文所提的天基双星定位方法对

表 4 定位误差的仿真计算结果表

Tab. 4 Location error result of Monte Carlo error simulation

Error type	Location error (Standard deviation)
Only location error	10.08 m
Only attitude error	71.62 m
Only orbit error	62.04 m
Only installation error	62.12 m
Only coordinates error	21.7 m
With above five errors	114.62 m

真实的运动目标检测定位能力,我们针对在轨运行卫星 Iridium82 在地面使用了两个地基望远镜进行交会定位成像试验。在试验中,两个相距 20 km 的大口径(1.2 m)地基望远镜模拟两个观测卫星,以恒星跟踪模式拍摄,通过将望远镜安装在以地球自转速度运动的转台上来抵消地球自转带来的恒星像移影响。两台望远镜在同一时刻实拍的含运动目标 Iridium82 卫星的星图如图 14 所示。

因为进行地面外场试验会受大气湍流,天气以及试验环境等因素影响,但同时地面试验不用考虑卫星的姿态和轨道误差,在上述误差综合约束条件下,地面外场试验的定位误差为 148.25 m(室内仿真试验定位误差为 114.62 m),因此可以证明本文所提方法的有效性。

表 5 蒙特卡洛误差仿真参数设置表

Tab. 5 Parameters of Monte Carlo error simulation

Error type	Parameters	Distribution type	Value
Location error	Location/m	Normal(mean 0)	Standard deviation 10
	Roll angle/(°)		
Attitude error	Pitch angle/(°)	Normal(mean 0)	Standard deviation 0.001
	Yaw angle/(°)		
	Inclination/(°)		
Orbit error	Right ascension of ascending node/(°)	Normal(mean 0)	Standard deviation 0.001
	Argument of perigee/(°)		
Installation error	Elevation angle/(°)	Normal(mean 0)	Standard deviation 0.001
	Azimuth angle/(°)		
Coordinates error	x axis /pixel	Uniform	0.33
	y axis /pixel	Uniform	0.33

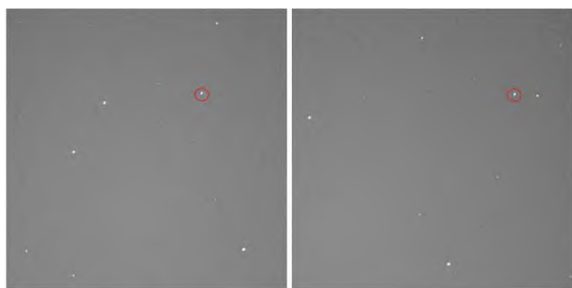


图 14 实拍星图图像

Fig. 14 Star map images

5 结 论

本文从获取高精度空间目标的三维位置信息出发,提出了一种天基空间目标双星天文定位方法。通过建立的空间目标在光学传感器上的

成像模型,表明在长曝光时间下,空间目标的条状像与恒星的点状光斑在形态上有明显的区别;在空间目标的像平面检测与提取方面从形态学角度提出了矩形度检测方法,利用阈值质心法进行了精确定位;从单星出发,建立空间目标观测矢量模型,结合最小二乘准则,建立了空间目标天文定位模型。最后开展了地面实验获取含空间目标的星图像,基于此开展了定位算法的仿真。仿真结果证明:当定位模型中没有误差时,定位精度可达 10^{-5} m;当同时存在卫星位置误差、卫星姿态误差、卫星轨道误差、相机安装误差和图像处理误差时,定位误差分布为零均值,标准差为 114.62 m 的高斯分布,最后进行了地面外场试验,证明了本文方法的有效性。基本满足了空间目标高精度测角的要求。

参考文献:

- [1] 盛卫东,龙云利,周一宇. 天基光学传感器网络目标定位精度分析[J]. 光学学报, 2011, 31(02): 255-261.
SHENG W D, LONG Y L, ZHOU Y Y. Analysis of Target Location Accuracy in Space-Based Optical-Sensor Network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 255-261. (in Chinese)
- [2] 杨虹,张占月,丁文哲,等. 双星光学观测体系的目标定位误差分析[J]. 中国光学, 2016, 9(4): 452-462.
YANG H, ZHANG ZH Y, DING W ZH, *et al.* Position error analysis of double satellites optical observation system[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 452-462. (in Chinese)
- [3] 张辉,田宏,林玲,等. 空间目标天基天文定位误差分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1345-1351.
ZHANG H, TIAN H, LIN L, *et al.* Error analysis of spaced-based celestial positioning for space object [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1345-1351. (in Chinese)
- [4] 吴能伟. 基于方向余弦的交会方法[J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 87-90.
WU N W. Intersection method based on the direction cosine [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(1): 87-90. (in Chinese)
- [5] 王卫兵,王挺峰,郭劲. 基于双星双目跟踪方式的空间目标定轨技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 204-211.
WANG W B, WANG T F, GUO J. Research on orbit determination technology for space target based on method of tracking with double satellites and double cameras[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 204-211. (in Chinese)
- [6] 刘美莹,王虎,汶德胜,等. 空间目标天文定位方法及观测分析[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 1112005.
LIU M Y, WANG H, WEN D SH, *et al.* Celestial positioning method and observation analysis for space object[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1112005. (in Chinese)
- [7] 陈张雷,李崇辉,郑勇,等. 天文定位中几何精度衰减因子最小值分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 879-888.
CHEN ZH L, LI CH H, ZHENG Y, *et al.* The minimum analysis of geometric dilution of precision in celestial positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 879-888. (in Chinese)
- [8] XI J B, WEN D S, ERSOY O K, *et al.* Space debris detection in optical image sequences [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7929-7940.
- [9] 王宁,汪玲,徐根,等. 一种基于OPTICS聚类的仅测角导航目标检测算法[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(1): 47-54.
WANG N, WANG L, XU G, *et al.* A space target detection method based on OPTICS clustering

- for angles-only relative navigation [J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(1): 47-54. (in Chinese)
- [10] LIU D, WANG X, XU Z, *et al.* Space target extraction and detection for wide-field surveillance [J]. *Astronomy and Computing*, 2020, 32: 100408.
- [11] LUO Q Q, GAO Z S, XIE C Z. Improved GM-PHD filter based on threshold separation clusterer for space-based starry-sky background weak point target tracking [J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 103: 102766.
- [12] YE T, ZHOU F. Autonomous space target recognition and tracking approach using star sensors based on a Kalman filter [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11): 3455-3469.
- [13] 谢恺, 韩裕生, 薛模根, 等. 低轨红外预警星座无源定位精度分析[J]. 信号处理, 2008, 24(3): 343-348.
- XIE K, HAN Y SH, XUE M G, *et al.* Analysis of passive location accuracy in LEO infrared early warning constellation [J]. *Signal Processing*, 2008, 24(3): 343-348. (in Chinese)
- [14] 盛卫东, 徐洋, 周一宇, 等. 天基光学传感器的视线测量误差分析[J]. 宇航学报, 2011, 32(1): 129-135.
- SHENG W D, XU Y, ZHOU Y Y, *et al.* Analysis of LOS measurement error for space-based optical sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(1): 129-135. (in Chinese)
- [15] LV P Y, SUN S L, LIN C Q, *et al.* Space moving target detection and tracking method in complex background [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 107-118.
- [16] 张颖, 牛燕雄, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 109-114.
- ZHANG Y, NIU Y X, YANG L, *et al.* Analysis and study on detection capability of satellite photo-electric imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 109-114. (in Chinese)
- [17] 蓝朝桢. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- LAN CH ZH. *Modeling and Detecting Capability Analysis of Space-based Space Object Optical Observation System* [D]. Zhengzhou: the PLA Information Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [18] 孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2079-2084.
- MENG Q Y, ZHANG W, LONG F N. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2079-2084. (in Chinese)
- [19] 彭华峰, 陈鲸, 张彬. 天基光电望远镜极限星等探测能力研究[J]. 光电工程, 2007, 34(8): 1-5.
- PENG H F, CHEN J, ZHANG B. Limited magnitude detectivity of space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8): 1-5. (in Chinese)
- [20] LI M Y, YAN C X, HU C H, *et al.* Space target detection in complicated situations for wide-field surveillance [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 123658-123670.
- [21] 邹永宁, 姚功杰. 自适应窗口形状的中值滤波 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3028-3039.
- ZOU Y N, YAO G J. Median filtering algorithm for adaptive window shape [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 3028-3039. (in Chinese)
- [22] SUN R Y, ZHAN J W, ZHAO C Y, *et al.* Algorithms and applications for detecting faint space debris in GEO [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 110: 9-17.
- [23] 王寒涛, 赵保军, 唐林波. 星空背景下的运动点目标轨迹提取[J]. 光学技术, 2009, 35(6): 810-814, 818.
- WANG H T, ZHAO B J, TANG L B. Trajectory extraction algorithm of moving point targets in star background [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(6): 810-814, 818. (in Chinese)
- [24] LIU D, WANG X D, LI Y H, *et al.* Space target detection in optical image sequences for wide-field surveillance [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(20): 7846-7867.
- [25] STONE R C. A comparison of digital centering algorithms [J]. *The Astronomical Journal*, 1989, 97: 1227.
- [26] 钱锋, 杨名字, 张晓沛. 基于序列图像提高光斑质心定位精度[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2880-2888.
- QIAN F, YANG M Y, ZHANG X P. Improvement of localization accuracy of spot centroid based on sequential images [J]. *Opt. Precision Eng.*,

- 2016, 24(11): 2880-2888. (in Chinese)
- [27] 王习文. 光电经纬仪跟踪飞机的 3D 计算机视觉研究[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), 2010.
- WANG X W. *Study of 3D Computer Vision for Photoelectric Theodolite Tracking Aircraft* [D]. Changchun: the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [28] 王向军, 卞越新, 刘峰, 等. 远距离三维坐标测量中双目视觉系统结构参数的优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2902-2908.
- WANG X J, BIAN Y X, LIU F, *et al.* Optimization of structural parameters of binocular vision system in remote 3-D coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2902-2908. (in Chinese)
- [29] 李强. 单星对卫星目标的被动定轨与跟踪关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- LI Q. *Research on Key Technologies of Single Satellite to Satellite Target Passive Orbit Determination and Tracking* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [30] 高扬, 赵金宇, 刘俊池, 等. 中高轨道目标的地基光电监视[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2584-2590.
- GAO Y, ZHAO J Y, LIU J CH, *et al.* Ground-based photoelectric surveillance for mid-high orbit target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2584-2590. (in Chinese)

作者简介:



赵巨波(1970—),女,辽宁鞍山人,博士,2006年于国防科技大学获得博士学位,现为92941部队正高级工程师,主要从事测控总体工作。E-mail: 811074631@qq.com