

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.01.003

空间非合作目标在轨光学捕获方法研究

侯作勋,周海岸,袁 远

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要:针对空间非合作目标尺寸和运动特性差异大、现有基于单一特性的捕获方法适应性差的问题,设计了星图信息和运动特性相结合的非合作目标光学捕获方法。并结合硬件电路特性,提出了一种基于 DSP + FPGA 异构双核目标捕获嵌入式平台架构,解决了在轨应用难题。通过全物理仿真试验对实现的非合作目标嵌入式捕获系统的功能和性能进行了全面测试。结果表明,系统具备 $1024 \times 1024@20p$ 格式视频的实时处理能力。且对于不同运动速度、不同尺寸的非合作目标均能够准确捕获。采用蒙特卡罗方法随机生成了 1000 个初始视轴指向进行测试,基于电子星图模拟器和光学星图模拟器的目标捕获正确率均达到 99.8%。综合而言,该解决方案的计算精度高,鲁棒性好,适应性强,能够有效应用于执行高精度非合作目标在轨监测和清理等任务。

关键词:非合作目标;捕获;在轨

中图分类号:V443;TN91

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)01-0016-06

Method of on-orbit optical acquisition for non-cooperative space targets

HOU Zuoxun, ZHOU Haian, YUAN Yuan

(Beijing Institute of Space Mechanic & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Due to the differences of targets' size and movement are significant, it is difficult to acquiring the non-cooperative space target based on single characteristic. This paper proposed a high reliable method of non-cooperative space targets acquisition, which combined the characteristics of the star field and the target movement. The matching embedded-system for on-orbit application is designed by DSP + FPGA heterogeneous dual-core architecture. The full physical ground simulation results showed that the proposed system can real-time process the $1024 \times 1024@20p$ format video, and can successfully acquire the non-cooperative targets with different speeds and sizes. The accuracy of one thousand times random test with Monte-Carlo stochastic simulated director reaches 99.8%, which is verified by both electronic and optical simulators. Totally speaking, this method owned the advantages of high processing speed, robustness and adaptability, which can be applied to non-cooperative space surveillance and cleaning.

Key words: non-cooperative targets; acquisition; on-orbit

0 引言

空间非合作目标的捕获技术是指地面或者星载探测设备利用图像、雷达等主被动探测手段结合信号处理技术对于空间中的非自然天体进行辨识的方法。主要应用于太空垃圾清理、小行星监测等领域。

由于基于可见光图像的探测技术可直接获取追踪飞行器与目标的相对导航所需的姿态和运动参数等所有信息,并且具有成本低、精度高、轻巧等突出优点,因此引起了各国的广泛关注。以北京空间机电研究所、哈尔滨工业大学为代表的研究机构从相机系统设计、捕获方法、探测能力分析等

收稿日期:2022-06-09; 修回日期:2022-07-05

基金项目:国家重大专项基金(编号:2017ZX01013101-003)

引用格式:侯作勋,周海岸,袁远.空间非合作目标在轨光学捕获方法研究[J].空间电子技术,2023,20(1):16-21. HOU Z X, ZHOU H A, YUAN Y. Method of on-orbit optical acquisition for non-cooperative space targets[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(1):16-21.

领域进行了广泛的探索,并取得了一些进展^[1-8]。

但现有技术在开展空间目标捕获任务时,仍面临以下技术难题。第一,空间目标的图像尺寸变化范围较大,难以采用统一的方法进行目标质心定位;第二,空间目标与探测设备的相对运动速度变化范围较大,难以采用统一的方法进行目标捕获;第三,面向在轨实时应用,处理方案必须具备嵌入式平台实现能力。

本文通过提出一种新型空间非合作目标捕获方法同时解决了上述难题。核心是将星图特性与运动特性相结合以具备同时捕获跟踪多个不同尺寸、不同运动速度的目标的能力。并设计实现了算法相适应的嵌入式硬件平台,满足在轨实时处理

需求。

1 星图识别与运动特性相结合的空间非合作目标捕获方法

空间非合作目标捕获方法包括疑似目标定位和非合作目标捕获两项主要步骤,完整处理流程如图 1 所示。其中,疑似目标定位是利用目标和背景噪声的成像特性差异在背景中获取包括自然天体和非合作目标在内所有疑似目标的质心位置信息。非合作目标捕获是采用星图信息、运动特性等差异性特征结合模式识别方法剔除自然天体,最终获取感兴趣的非合作目标位置信息的处理过程。

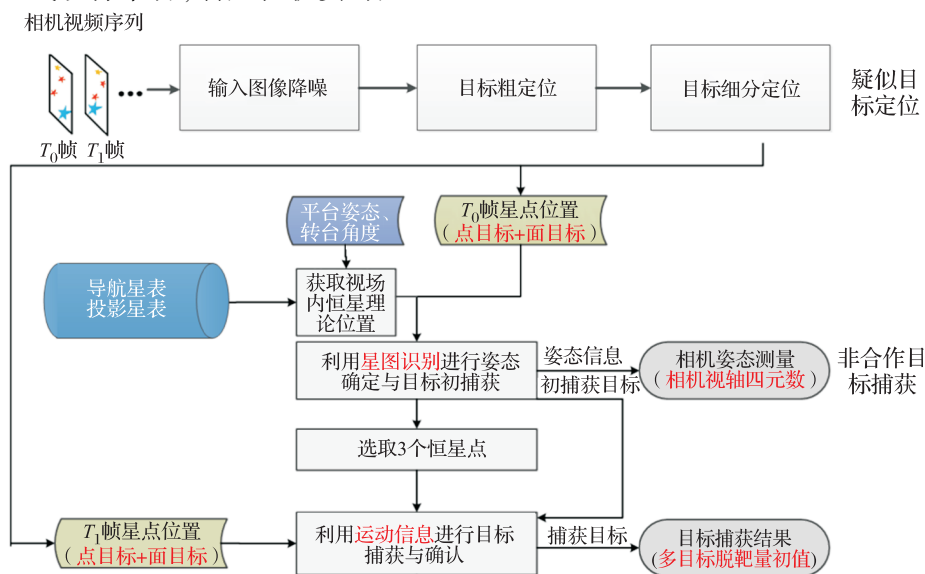


图 1 空间非合作目标捕获方法总处理流程

Fig. 1 Processing flow of on-orbit optical acquisition for non-cooperative space targets

1.1 疑似目标定位

1.1.1 目标粗定位

根据尺寸差异,自然天体和目标在光学探测相机中的成像效果分为两类:当自然天体或目标的视张角小于一个像元时,成像效果表现为符合高斯分布的弥散斑,一般简称为点目标;当视张角大于等于一个像元时,将呈现出目标几何形状的图形,一般称为面目标。

粗定位是在图像中寻找目标分别所在的粗略位置,包括目标与背景分割和多目标间分割两个

步骤。目标与背景分割的过程通过阈值分割法实现。可以设定图像的全局平均值加估计的噪声标准差作为分割阈值。

多目标间分割通过同步开展点目标和面目标检测实现。点目标检测包含非极大值抑制和高斯特征判定两个步骤。非极大值抑制是通过判定匹配块内累加和是否满足局部最大条件实现的。高斯特征判定通过检测匹配块内像素点亮度是否符合由中心向周围递减的分布规律实现,判定公式为:

$$\begin{cases} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} S(i,j) > 20 \times DN \\ S(i-1,j) + S(i+1,j) + S(i,j-1) + S(i,j+1) > 8 \times DN \\ S(i-1,j-1) + S(i+1,j-1) + S(i-1,j+1) + S(i+1,j+1) > 4 \times DN \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, (x, y) 处像素点亮度为 $S(x, y)$, DN 为预设阈值。

面目标检测采用连通域分割方法实现。为了适应嵌入式平台运算, 对图像进行二值化后进行连通域分析, 同时为了降低将一个目标像点分裂为多个目标的概率, 通过膨胀等形态学图像处理算法完成临近连通区域的归并。

1.1.2 目标细分定位

细分定位能够实现疑似目标亚像素级质心定位。本文采用带阈值的质心法进行细分定位。其基本思想是将像素的灰度值作为权重计算二值化后图像的一阶矩。

$$F(x, y) = \begin{cases} S(x, y) - T, & S(x, y) \geq T \\ 0, & S(x, y) < T \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $F(x, y)$ 为阈值分割处理后的灰度值, T 为预设的阈值。则亚像素级质心可以通过式(3)计算:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in N(x,y)} F(i,j) \times i}{\sum_{(i,j) \in N(x,y)} F(i,j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{(i,j) \in N(x,y)} F(i,j) \times j}{\sum_{(i,j) \in N(x,y)} F(i,j)} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $N(x, y)$ 表示以 (x, y) 处像素点为中心的局部窗口, 对应的目标亚像素级质心位置为 (x_0, y_0) 。

仿真结果表明, 在高斯噪声标准差小于 10 时, 通过带阈值的质心法提取质心的误差小于 0.05 个像元。

1.2 非合作目标捕获

采用星图信息或运动特性差异实现自然天体和非合作目标区分是开展非合作目标捕获的有效手段。采用星图信息开展目标捕获其核心是利用恒星在天球坐标系下的坐标已知、星间角距近似不变的特性, 通过计算待探测恒星在图像中的理论位置, 寻找和定位非合作目标^[9-11]。而采用运动特性开展目标捕获的核心是利用相机与自然天体、非合作目标的相对运动速度不一致这一特性进行目标识别^[12-14]。

基于运动特性进行捕获时, 能够剔除掉行星的干扰, 减少误捕。但捕获周期相对较长, 而且当目标相对特性与恒星近似时, 无法进行目标捕获, 漏捕率高。而基于星图进行捕获仅需要一帧图片即可完成目标捕获, 速度快, 且当目标相对特性与恒

星近似时, 也可以进行目标的捕获, 但无法剔除掉行星等自然天体, 误捕率相对较高。

针对上述问题, 本文提出了同时利用星图信息和运动特性构建判据进行目标捕获的方法。

1.2.1 基于星图识别的非合作目标捕获

图 2 为利用星图信息进行目标捕获的总体流程图。输入信息包括外部输入的相机参考姿态信息和从图像中提取的星点信息。首先利用外部输入的相机姿态作为参考值从导航星表中索引相应天区一定视场范围内的恒星。其次, 分别计算索引出的恒星之间的星角距和图像提取出的星点间的星角距, 并进行三角形匹配^[15]。进而利用匹配三角形计算出相机在惯性坐标系下的姿态。进行目标捕获时, 将视场所在天区的恒星按照相机姿态重投影到像面, 得到理论成像位置。比较理论位置和图像中星点位置, 剔除掉恒星, 其它的星点即为疑似非合作目标。

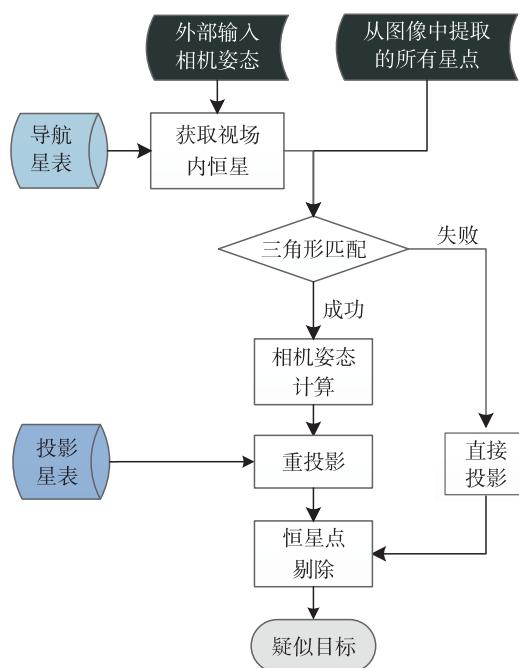


图 2 基于星图识别的目标捕获流程

Fig. 2 Processing flow of space targets acquisition based on star field recognition

1.2.2 基于运动特性的非合作目标捕获

基于运动特性开展目标捕获时, 同样考虑恒星之间的角距保持不变, 而目标星与恒星或目标星之间形成的焦距是动态变化的。因此, 分别在基准帧图像和匹配帧图像中选取 3 个星点进行三角形匹配。若匹配成功, 则认为选取的星点为恒星点, 进而计算两帧间的旋转矩阵 R , 并重投影计算出第 1

帧中每个星点在匹配帧中的理论位置。如果某个星点对应的是一颗恒星或行星,那么能够在匹配帧中找到对应理论位置的星点。否则表明该星点运动特性与恒星不一致,为一个非合作目标。

1.2.3 星图识别与运动特性相结合的非合作目标捕获

如图 3 所示,该方法是将上述两种捕获算法相结合,首先利用星图信息和第 1 帧图像中的星点进行三角形匹配。匹配完成后,剔除掉所有的恒星而得到第 1 组疑似目标星。其次,从第 1 帧匹配的恒星像点中选取 3 颗距离视场中心最近的恒星像点作

为控制点,与第 2 帧图像中的星点进行基于运动特性的目标捕获。捕获完成后,剔除掉所有的恒星和行星而得到第 2 组疑似目标。进而,对两组疑似目标进行整合确认。其交集作为确定的目标捕获结果输出,而将交集外的像点作为疑似结果输出。

该方法首先进行星图匹配能够确保开展运动匹配时的控制点为一定恒星点,避免因初始星点选取不当导致目标误捕,并确保所有非恒星点均作为疑似点输出,避免漏捕;同时利用运动特性差异将恒星、行星等自然天体均有效剔除,进一步提升目标提取正确率。

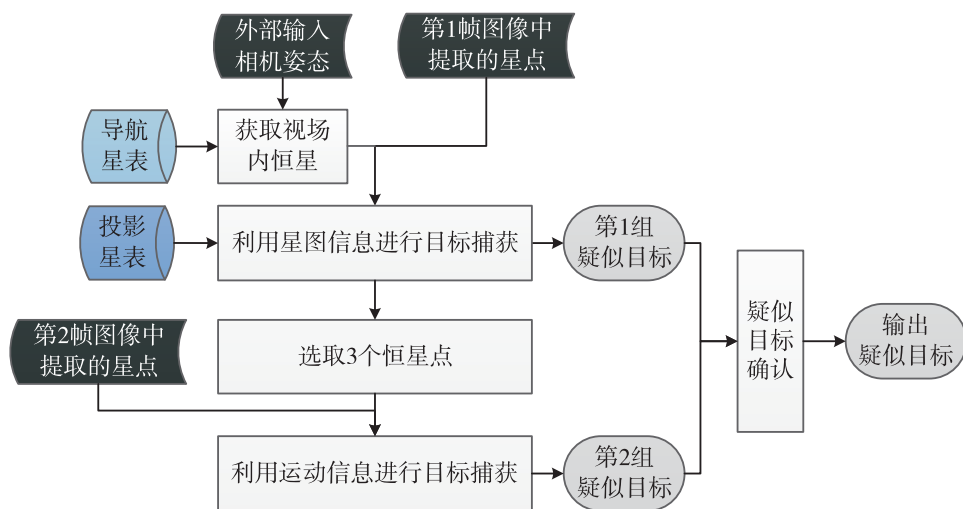


图 3 星图识别和运动特性相结合的目标捕获

Fig. 3 Processing flow of space targets acquisition based on star field recognition and target movement

2 目标捕获嵌入式平台架构

以目标捕获算法为依据,设计了如图 4 所示的总体结构。硬件系统在总体上由一片 FPGA(现场可编程门阵)和一片 DSP(数字信号处理器)组成。其中,DSP 型号为德州仪器公司的 C6701,FPGA 型号为赛灵思公司的 2V3000。FPGA 和 DSP 之间通过中断请求加双端口 RAM 方式实现双向数据交互。原理样机的实测功耗为 12 瓦。

针对 FPGA 适合开展全流水线并行运算的特点,由 FPGA 执行包括图像降噪和质心提取在内的图像处理任务,包括点目标和面目标的粗定位和细分定位。

考虑到 DSP 具备开展复杂数值运算和逻辑控制能力,由 DSP 完成目标捕获运算、测角信息计算等模式识别处理任务。具体的,通过将 3 种捕获算法细分,共设计实现了三角形匹配、姿态计算、投影、星点剔除、疑似目标确认和测角信息计算等功

能模块。

遥控遥测数据处理由 FPGA 和 DSP 共同完成,其中 FPGA 负责遥控遥测数据的收发,主要实现同综合信息处理器的通信。数据的解析和响应由 DSP 中的遥控遥测解析与响应模块执行。

考虑到系统的空间应用环境,在 FPGA 中设计一个 DSP 硬件看门狗模块;并设计了“三选二”处理机制,确保存储于 FLASH 中的 DSP 程序有效抵御单粒子效应的影响。

“三选二”处理机制通过如下方式实现。在 DSP 程序 FLASH(闪烁存储器)中预先存储 3 份相同的程序;启动时,将 3 份程序均读出,并对 3 份程序相同位置的数据进行逐比特(二进制数据)比较,将出现概率最大的数值作为比较后的输出数据进行加载;同时,将比较后的输出数据回写至 FLASH 中进行程序更新。这样可以有效避免因单比特翻转导致程序运行出错。

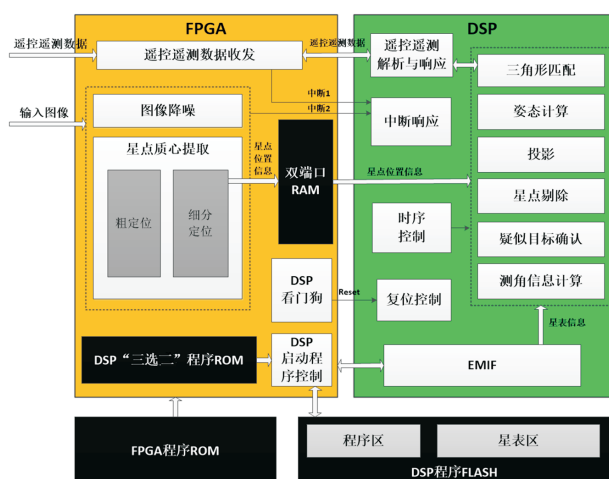


图 4 目标捕获嵌入式平台架构

Fig. 4 Processing structure of space targets acquisition based on embedded system

3 试验验证结果

3.1 基于电子星图模拟器的半物理仿真验证

图 5 为基于电子星图模拟器进行仿真验证的系统构成。其中,电子星图模拟器和地检设备分别输出模拟星图视频和测控数据给目标捕获处理器;由目标捕获处理器执行捕获算法,输出目标测角信息给地检。通过数据比对,判定捕获目标数量和位置的准确性。

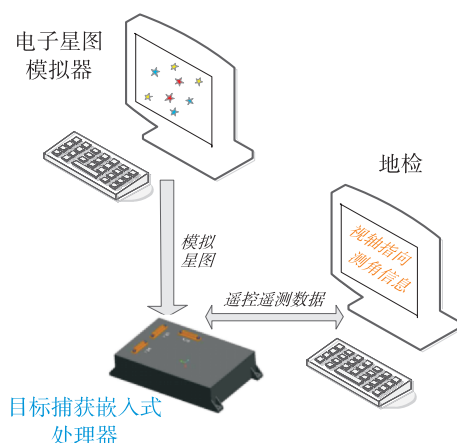


图 5 基于电子星图模拟器的验证系统

Fig. 5 Verification system based on electric star filed simulator

图 6 为一次测试时的输出界面。图中黑色背景部分即为仿真生成的模拟星图,图中白色点为模拟的恒星和目标像点。红色框为目标捕获单元计算得到的目标像点位置。如图所示,红框恰好框住了 1 颗像点,且经数据比对,该像点即为预先设定设置

的目标像点。

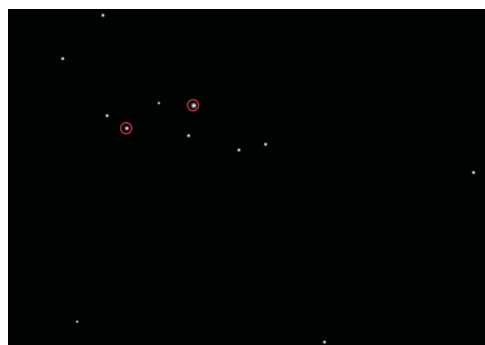


图 6 星图模拟器输出界面

Fig. 6 Simulation interface of electric star filed simulator

为了验证算法的可靠性,采用蒙特卡罗方法随机生成了 1000 个初始视轴指向,分别进行目标捕获试验。设定仿真图像的视场角为 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$,图像分辨率为 1024×1024 ,输出帧频 20 fps,包含不同尺寸点目标和面目标,并随机设定目标的运动速度为 $0 \sim 1^{\circ}/s$ 之间。经验证,目标捕获处理器具备视频实时处理能力,捕获正确率为 100%,点目标的脱靶量误差不超过 0.04 个像元,面目标的脱靶量误差不超过 1/4 目标尺寸。

3.2 基于光学星图模拟器的全物理仿真验证

光学星图模拟器由电子星图模拟器、微显示器和平行光管组成,如图 7 所示。模拟星图仍然由电子星图模拟器生成,输入微显示屏显示。微显示屏前端有一平行光管,用于模拟无穷远物体发光。可见光探测相机与平行光管光轴对齐实现成像,模拟相机在轨开展目标探测的场景。相机拍摄的星图送入目标捕获处理器进行处理。同样的,目标捕获处理器执行捕获算法,输出非合作目标测角信息给地检设备。通过数据比对,判定捕获目标数量和位置的准确性。为了保证仿真精度,微显示器分辨率优于探测相机分辨率,保证了仿真目标的视张角小于相机角分辨率,成像为符合高斯分布的弥散斑。图 8 为其中一次测试时光学星图模拟器输出结果。

同样采用蒙特卡罗方法随机生成了 1000 个初始视轴指向进行测试,结果表明,系统的捕获正确率达到 99.8%,脱靶量误差同利用电子星图模拟器试验时保持一致,优于 0.2 像元角分辨率。处理算法的可靠性得到验证。

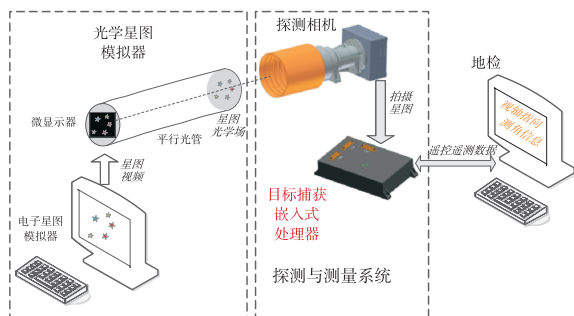


图7 基于光学星图模拟器的验证系统

Fig.7 Verification system based on optical star filed simulator

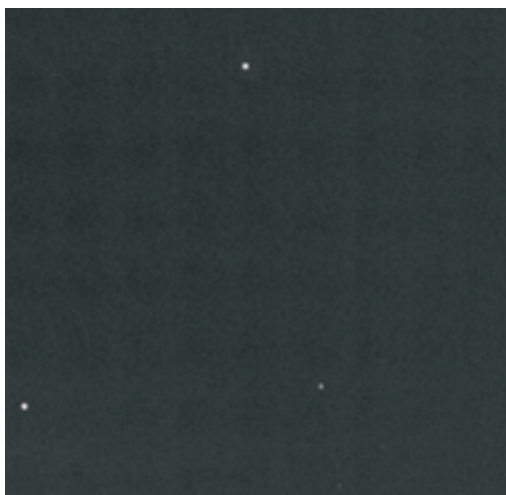


图8 可见光相机拍摄包含目标的星图

Fig.8 Photo of star field including space target

4 结论

基于可见光图像的空间非合作目标在轨捕获是开展在轨监测和碎片清理任务中亟待解决的关键技术。本文提出了一种星图信息和运动特性相结合的非合作目标捕获算法,有效解决了已有方法无法兼顾低漏补率和误捕率的难题。提出了基于DPS + FPGA的目标捕获单元嵌入式平台处理结构。并考虑到单粒子效应的影响,设计了适合该平台的DSP主程序“三选二”处理机制。对设计实现的目标捕获嵌入式处理器进行了基于电子和光学星图模拟器的多层次多方面试验验证。结果表明,所设

计的非合作目标在轨捕获方案适合通过嵌入式系统实现,且对于不同运动速度、不同尺寸、不同轨道的空间非合作目标均能够较好的完成捕获任务。

参考文献:

- [1] 金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [2] 孙鑫, 白加光, 王忠厚, 等. 一种用于空间目标捕获的宽视场可见光光学系统的设计[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1548-1551.
- [3] 卢栋, 张占月. 天基光学监视中的空间目标光度仿真[C]//中国兵工学会 2011 年光学与光电技术交流会论文集. 成都, 2011: 32-35.
- [4] 肖余之, 陈记争. 基于轨道机动的高轨目标自主感知技术[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 1-10.
- [5] 王兴龙, 蔡亚星, 陈士明, 等. 多源信息融合在空间态势感知领域的应用与发展[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1): 11-20.
- [6] 刘明, 侯作勋, 李馨. 一种用于遥感卫星中稳像相机设计和实现[J]. 空间电子技术, 2021, 18(5): 1-7.
- [7] 谭莹. 天基空间目标探测技术探讨[J]. 空间电子技术, 2006, 3(3): 5-9 + 35.
- [8] 乔鹏, 吕晓宁, 赵军锁, 等. 应用多星的空间目标跟踪定位算法[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 9-15.
- [9] 张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3074-3080.
- [10] 南诺, 曹东晶, 张宏伟, 等. 一种基于时空相关性的星图降噪算法[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(1): 88-97.
- [11] 苏瑞丰, 胡海鹰, 张科科, 等. 一种天基空间目标识别方法: CN103996027A[P]. 2017-04-12.
- [12] 崔文楠, 张涛, 王磊, 等. 基于轨迹编目模型的空间点目标天基探测方法: CN102116876A[P]. 2011-07-06.
- [13] 丛明煜, 何文家, 逮力红, 等. 复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1619-1625.
- [14] 李骏, 安玮, 周一宇. 基于天基光学监视的空间目标跟踪方法研究[J]. 空间科学学报, 2009, 29(3): 326-331.
- [15] 张广军. 航天器和导弹制导导航与控制: 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介: 侯作勋(1986—), 陕西西安人, 现就职于北京空间机电研究所, 副主任, 高级工程师, 博士。主要研究方向为新型传感器设计、嵌入式智能图像处理技术。E-mail: hzx_007xjtu@163.com