

考虑杂散光影响的天基光学观测图像仿真算法

王玉朋¹, 牛照东^{1*}, 王东亚², 黄剑², 李朋远², 孙权¹

¹国防科技大学自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073;

²北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 针对天基光学观测过程中存在杂散光干扰成像的问题, 提出一种受杂散光影响的天基光学观测图像的仿真算法。首先通过分析天基光学观测图像的成像原理来设计天基光学观测图像的仿真流程, 并给出各流程的计算方法。接着分析地气光干扰成像的原理, 建立地气光成像仿真的数学模型, 采用微元法实现地气光的成像仿真。最后阐述月光干扰成像的原理, 建立月光成像仿真的数学模型, 采用扩展截取法实现月光的成像仿真。仿真结果表明, 采用所提算法仿真图像, 图像的逼真度较高, 而且较真实地实现杂散光的成像仿真, 并且通过相关文献证明所提算法的正确性与合理性。

关键词 散射; 杂散光; 成像方法; 仿真流程; 微元法; 扩展截取法

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0229001

Simulation Algorithm for Space-Based Optical Observation Images Considering Influence of Stray Light

Wang Yupeng¹, Niu Zhaodong^{1*}, Wang Dongya², Huang Jian², Li Pengyuan², Sun Quan¹

¹National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract Aiming at the problem that stray light interferes with imaging in the process of space-based optical observation, a simulation algorithm of space-based optical observation images affected by stray light is proposed. First, by analyzing the imaging principle of the space-based optical observation image, the simulation process of the space-based optical observation image is designed and the calculation method corresponding to each process is provided. Next, the principle of ground-air-light interference imaging is examined, a mathematical model of ground-air-light imaging simulation is established, and the microelement method is used to realize ground-air-light imaging simulation. Finally, the principle of moonlight interference imaging is described, the mathematical model of moonlight imaging simulation is established, and the moonlight imaging simulation is realized using the extended intercept method. The results obtained from the simulation show that the image fidelity is high when the proposed algorithm is used to simulate the image, and the imaging simulation of stray light is more realistically realized. The accuracy and rationality of the proposed algorithm are demonstrated through relevant documents.

Key words scattering; stray light; imaging method; simulation process; infinitesimal method; extended intercept method

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61605243)

通信作者: *niuzd@nudt.edu.cn

1 引言

近年来,人类探索太空的步伐不断加快,日益增多的空间活动在太空中产生了大量的空间碎片,这对后续的空间活动和在轨卫星造成了巨大威胁^[1]。如何有效观测和规避空间碎片,将成为后续开展太空活动的必要前提。

对比其他观测手段,天基可见光观测手段因具有作用距离远、不受大气影响和成本低廉等优点而成为观测空间碎片的重要手段之一^[2-4]。在天基可见光观测平台的研制过程中需要大量的实测数据进行验证与指导,但实测数据的获取代价较大且难以全方位获得,故天基可见光图像的成像仿真研究对天基观测平台的研制具有重要意义,这不仅可以节省研制费用,还可以补充真实图像中较少出现的异常状况,而且还能检验观测平台上相关算法的鲁棒性。在天基可见光观测平台的观测过程中,由于观测平台处于太空空间,传感器在接收以正常传播路径到达传感器表面上成像光线的同时,难免会受到杂散光的影响。杂散光对成像的影响主要表现为局部区域高亮或存在干扰条纹,这不仅降低了目标的信噪比,还会导致成像的清晰度下降,严重时观测目标会被淹没。天基可见光观测平台通常以微弱目标作为主要的观测对象,但杂散光对其信噪比的影响尤为严重。为了增强可见光观测平台上检测跟踪算法处理杂散光图像的鲁棒性以及提高仿真图像的逼真度,有必要对杂散光图像进行模拟。针对杂散光对天基可见光观测结果的影响,众多学者均开展了相关的研究,而且均获得了一定的研究成果。

文献[5]分析了观测平台在追踪及凝视的状态下,地气光对空间目标信噪比的影响。文献[6]针对在轨星敏感器可能会受到太阳光、月光和地气光等杂散光的影响,建立了星敏感器视场遇杂散光的数学模型。文献[7]结合在轨实验数据提出了观测器成像不受月光影响的最小离轴角的概念。文献[8]为了分析空间天文望远镜所处环境的地气光,以典型空间天文望远镜为例,基于辐射传输理论建立了地气光辐照度计算模型。文献[9]为了得到量化的遥感观测地气光环境数据,建立了简化的航天器地气光分布计算模型。

综上所述,已有文献大多只是建立了观测过程中是否受杂散光影响的判断模型,分析了地气光的辐照

度,但未考虑杂散光条件下的成像仿真。本文针对上述存在的问题,通过分析真实图像的成像过程并结合成像传感器的成像原理及其在杂散光条件下的成像特性,提出一种受杂散光影响的天基观测图像的仿真算法,该算法可以在杂散光的条件下实现成像仿真,能够较逼真地模拟天基观测平台的观测图像,所得结果对天基观测平台的研制具有较大意义。

2 仿真流程的设计

在天基可见光观测领域中,CCD传感器因具有抗强光干扰、成像质量好、灵敏度高和噪声低等优点而被广泛使用^[10],故本文在仿真设计的过程中以CCD传感器作为成像器件。

由于天基可见光观测平台处于太空空间,进入CCD传感器中的光线主要分为以正常传播路径到达传感器表面上的成像光线和杂散光线。成像光线是指观测目标经自身发射或反射且以正常传播路径到达传感器表面上的光线。天基可见光观测平台的观测目标主要考虑恒星与空间碎片,因恒星与空间碎片距离观测平台较远,则可以认为它们为点光源。杂散光是指除成像光线以外到达传感器表面上的非成像光线,以及以非正常传播路径到达传感器表面上的成像光线^[11]。对于可见光观测平台,杂散光主要考虑太阳光、地气光与月光。太阳光由于星等较低而对观测结果的影响巨大,通常认为其为强干扰光源,在任务规划中首先考虑避免其影响。实际观测过程中,对成像产生影响的杂散光主要为地气光和月光。地气光是指入射到地球大气中,受由地球大气的散射以及云层和地面的反射返回到宇宙空间的辐射光。因为地球距离观测平台较近且地球体积较大,所以不能将其看作点光源或平行光,应将其视为扩展曲面光源。月光是指由月球反射的太阳光,因其距离观测平台较远,当对仿真精度的要求较低时,可将月球看作点光源。当光线到达CCD传感器上时,CCD传感器中的感光单元阵列对光线进行光电转换处理,最终在成像平面上形成实际的观测图像。

通过分析上述成像原理,本文将成像仿真过程分为空间碎片、观测平台与日月天体运动特性建模、空间碎片与恒星光学特性建模、杂散光成像建模、多约束条件下的空间碎片可见性分析以及CCD传感器成像建模5个部分,成像仿真的整体流程如图1所示,其中FOV为视场。

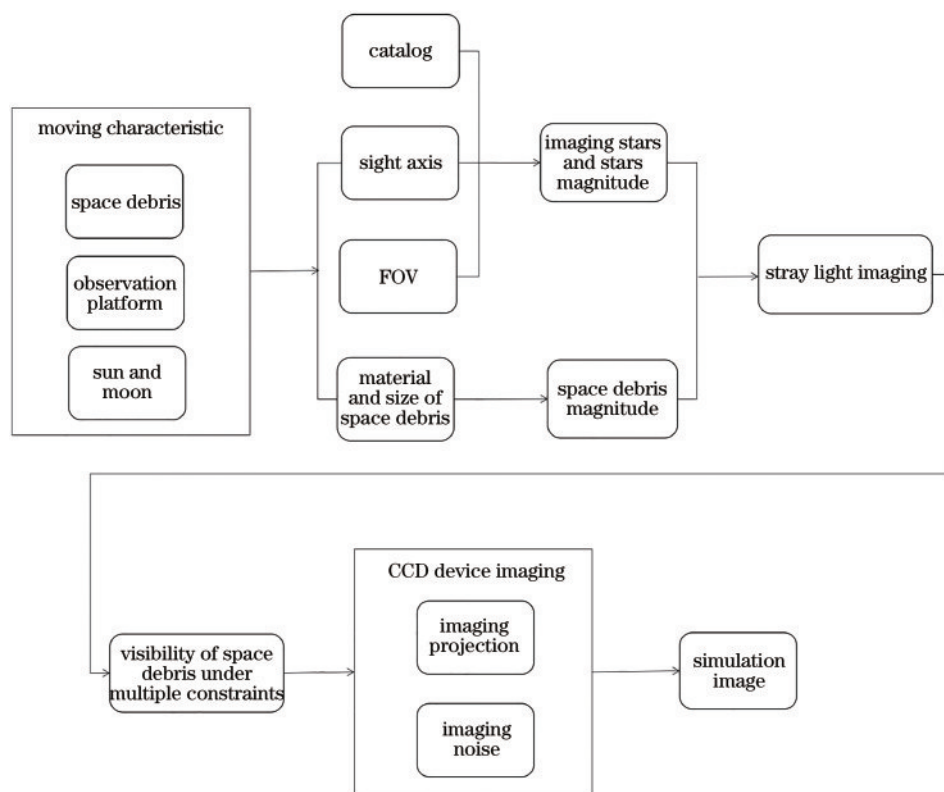


图 1 成像仿真的流程图

Fig. 1 Flowchart of imaging simulation

仿真流程开始后,首先对空间碎片、观测平台以及日月天体的运动特性进行建模。空间碎片和观测平台的运动特性主要通过解析其轨道根数来获得它们的速度与位置信息,日月天体的运动特性主要采用喷气动力实验室(JPL)发布的DE430型历表进行内插计算来获得其位置信息。

接着对空间碎片与恒星的光学特性进行建模。空间碎片的光学特性主要根据其大小、材质以及与观测平台之间的距离等条件来计算星等,恒星的光学特性主要根据星表、观测平台的视轴指向与视场角的大小来选择成像恒星与确定恒星的星等。

随之对杂散光成像进行建模,其主要根据地球、太阳、月球和观测平台的相对位置以及传感器的性能对杂散光成像进行仿真。

然后在多约束的条件下对空间碎片进行可见性分析。对于天基可见光观测,空间碎片的可见性分析主要考虑自然条件与设备性能两个影响因素。在各约束的条件下,建立基于空间碎片可见性的判断模型,使用该模型对多约束条件下空间碎片相对于观测平台的可见性进行判断。

最后对 CCD 传感器进行成像建模,其主要分为成像投影建模与成像噪声建模。成像投影建模主

要是完成恒星与空间碎片投影位置的计算与投影效果的模拟,投影位置的计算主要根据恒星、空间碎片和观测平台的相对位置以及观测平台的视轴指向对相关坐标系进行转换。CCD 传感器摄取的图像中会出现弥散现象与拖尾现象^[12],故投影效果的模拟主要根据恒星与观测目标的星等进行星等与灰度值的转换,进而使用二维高斯分布函数在拖尾路径上进行弥散效果的处理。成像噪声建模主要是模拟 CCD 传感器的成像噪声,科学级 CCD 主要考虑光子噪声、暗电流噪声以及读出噪声^[13]。

目前,对于空间碎片、观测平台与日月天体运动特性建模、空间碎片与恒星光学特性建模、多约束条件下的空间碎片可见性分析以及 CCD 传感器成像建模的研究比较完善且计算方法成熟可靠,故本文将研究重点放在杂散光成像建模方面。

3 杂散光成像建模

对于可见光观测平台,杂散光成像建模主要考虑地气光以及月光对成像的影响。

3.1 地气光成像建模

地气光对天基可见光成像的影响主要是观测平台的星下点为太阳照亮区域,亮背景经过地球大

气散射后进入观测平台视场会出现局部区域高亮或存在干涉条纹等现象。

定义 θ 为观测平台视轴 $r_{1,e}$ 与观测平台对大气层边界切线 $r_{2,e}$ 之间的夹角, 又称离轴角, 如图 2 所示。

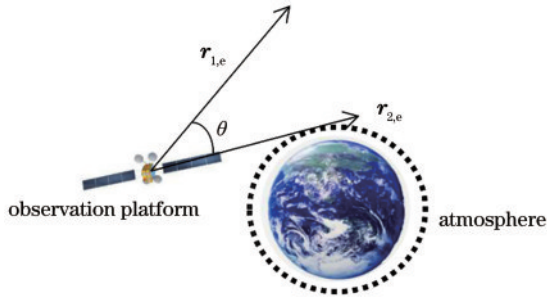


图 2 离轴角示意图

根据当前 CCD 传感器对地气光的抑制能力, 假定离轴角小于 22° , 认为地气光对成像造成了影响^[14]。当天基可见光成像受到地气光的影响时, 由于地球距离观测平台较近, 不能将地球简化成点光源或平行光, 应将其当作面光源, 所以有必要对地球表面进行网格划分, 划分情况如图 3 所示, 其中 $A(j, w)$ 为一个微小面元, j 为该面元中心的经度, w 为该面元中心的纬度。

将地球表面按经纬度划分成一个个微小面元

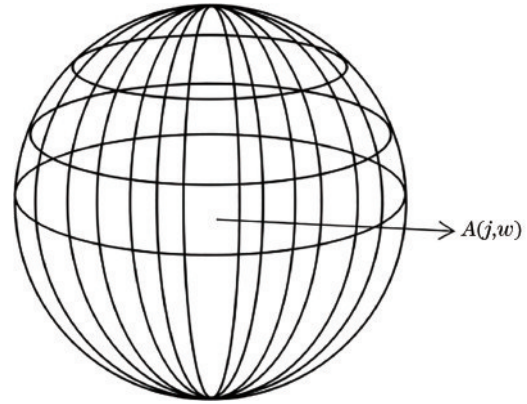


图 3 地球表面的网格划分

Fig. 3 Meshing of surface of earth

$A(j, w)$, 根据划分的细微程度来均衡计算量与计算精度, 此时面元可以看作点光源。

假定太阳到地球大气层表面的距离为 R_{se} , 则太阳对大气层表面的辐照度 E_{se} 为

$$E_{se} = \frac{I_s \times A_s}{4\pi \times R_{se}^2}, \quad (1)$$

式中: I_s 为太阳在可见光波段的辐射强度; A_s 为太阳的表面积。定义太阳到大气层面元的连线与面元法线之间的夹角为 α , 面元到观测平台的连线与面元法线之间的夹角为 β , 面元到观测平台的连线与观测平台视轴之间的夹角为 γ , 夹角定义如图 4 所示。

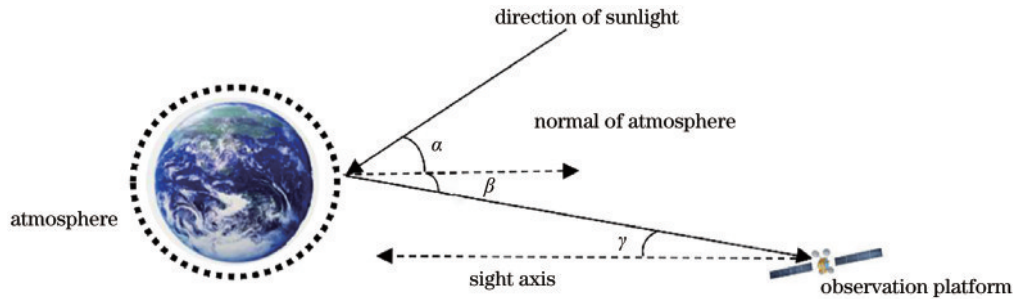


图 4 夹角定义示意图

Fig. 4 Schematic of angle definition

设地球大气层对可见光的反射率为 ρ , 此面元的面积为 A_e , 此面元到观测平台的距离为 R_{eo} , 则此面元对观测平台上传感器的辐射度 E_e 为

$$E_e = \frac{\rho \times E_{se} \times A_e \times \cos \alpha \times \cos \beta \times \cos \gamma}{\pi \times R_{eo}^2}. \quad (2)$$

根据辐照度与等效星等之间的关系, 定义 E_0 为 0 星等的目标在地球大气层外产生的辐照度, 则此面元的等效星等 M_e 为

$$M_e = \log_{2.512} \left(\frac{E_0}{E_e} \right). \quad (3)$$

将此面元中心的经纬度作为此面元的经纬度, 经过相关坐标系的变换便可求得其在成像面上的投影位置。

综上, 本文首先建立成像受地气光影响的判断模型以及面元等效星等的计算方法, 然后综合考虑真实图像的成像过程, 最后采用微元法对地气光成像进行仿真, 流程如图 5 所示, 具体步骤如下。

1) 首先建立受地气光干扰的判断模型, 当观测平台的星下点为太阳照亮区域且离轴角小于 22° 时,



图 5 地气光成像的仿真过程

Fig. 5 Simulation process of earth-gas light imaging

认为天基可见光成像受到了地气光的影响。

2) 若天基可见光成像受到了地气光的影响,则根据仿真计算量与仿真精度的要求将地球表面按照经纬度划分成一个个微小面元,此时可以将其看作点光源。

3) 逐一计算每一面元到观测平台的连线与此面元法线之间的夹角 β ,面元到观测平台的连线与观测平台视轴之间的夹角 γ 。当 $0^\circ < \beta, \gamma < 90^\circ$ 时,认为此面元的地气光进入观测器视场中。

4) 根据面元中心的经纬度,经过相关坐标系的变换可以确定该面元在成像平面上的投影位置。

5) 根据(2)式和(3)式可以计算成像面元的等效星等,再将成像面元的星等转换成灰度值,使用二维高斯分布函数作为点扩展函数对灰度值进行弥散效果的处理,从而形成受地气光干扰的成像图像。

当具有并行计算的条件时,步骤3)~5)可以进行并行计算,从而达到快速计算的目的。

经过分析,本节完成了地气光成像模型的建立。文献[3]分析了不同探测模式下地气光辐射对空间目标成像特性的影响。文献[7]通过建立坐标系对不同季节下地气光辐射的变化情况进行分析。这些研究均涉及地气光辐射的建模,本文借鉴上述研究成果和思路并采用微元法实现了地气光的成像建模,上述研究成果为本地气光成像模型的建立提供了理论基础,确保了模型的正确性与合理性。

3.2 月光成像建模

对于天基可见光观测,月光主要通过增强太空背景的亮度来影响暗弱目标的观测,在成像上一般表现为以某一点为中心逐步向周围扩散的高亮区域。

定义 σ 为观测平台视轴 $r_{1,m}$ 与观测平台到月球质心的连线 $r_{2,m}$ 之间的夹角,又称月光角,如图 6 所示。

根据当前 CCD 传感器对月光的抑制能力,假定月光角小于 30° ,认为月光对成像造成了影响^[5]。当月球满月时,视星等约为 -12,其与地球近地点之

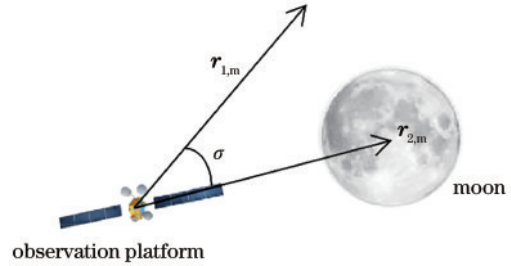


图 6 月光角示意图

Fig. 6 Schematic of moonlight angle

间的距离为 36.6×10^4 km,与地球远地点之间的距离为 40.6×10^4 km。对于绕地球运转的观测平台,可以将月球看作点光源。

综合上述,本文采用扩展截取法对月光成像进行仿真,流程如图 7 所示,具体步骤如下。

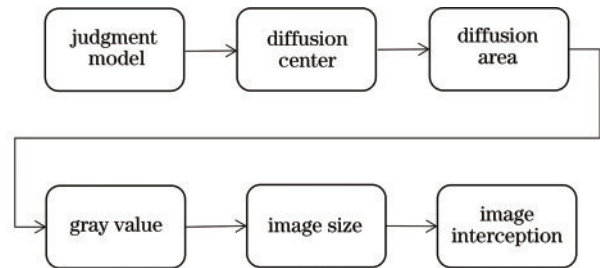


图 7 月光成像的仿真过程

Fig. 7 Simulation process of moonlight imaging

1) 首先建立受月光干扰的判断模型,当月光角小于 30° 时,认为天基可见光成像受到了月光的影响。

2) 若天基可见光成像受到了月光的影响,则扩展观测平台的视场角至 30° ,同倍数扩大成像图像的尺寸将月球纳入观测视场中。通过相关坐标系的简单变换,即可确定月球在成像图像中的投影位置,此投影位置便为月光成像的扩散中心。

3) 扩散中心确定后,将月球星等转换成灰度值,使用二维高斯分布函数作为点扩展函数对灰度值进行弥散效果的处理,从而确定月光向周围区域扩散的面积,最终形成月光仿真成像图像。

4) 由步骤1)~3)确定一个视场角为 30° 的月光成像图像 φ ,假设成像图像的大小为 $M \times N$,真实的视场角为 σ ,则真实月光成像图像的大小为 $m \times n$,

则 m 和 n 分别为

$$m = M \times \frac{\sigma}{30}, \quad (4)$$

$$n = N \times \frac{\sigma}{30}. \quad (5)$$

5) 确定真实成像图像的大小后, 以成像图像 φ 的中心为截取中心截取一个 $m \times n$ 大小的成像图像 ω , 则成像图像 ω 为受月光干扰的成像图像。

经过分析, 月球距离观测平台较远, 为此可以将其视为点光源。文献[4, 11]均涉及点光源的成像仿真建模, 本文基于点光源的成像仿真建模方法创造性地使用扩展截取法实现了月光的成像建模, 上述研究成果为本文月光成像模型的建立提供了理论基础, 确保了模型的正确性与合理性。

本节通过分析地气光成像与月光成像的产生机理, 分别建立了地气光成像与月光成像的数学模型, 并分别通过微元法与扩展截取法模拟了地气光与月光的干扰成像, 所得结果对杂散光的成像仿真具有重要意义。

4 仿真结果分析

第 3 节介绍了受杂散光影响的天基光学观测图像的仿真算法, 现假设某一观测平台于 2020 年 9 月 24 日 0 时 0 分 0 秒经过升交点, 仿真开始时间为 2020 年 9 月 23 日 18 时 56 分 0 秒, 帧间间隔为 3 s, 轨道高度为 6778.14 km, 轨道倾角为 97° , 升交点的赤经为 190° , 偏心率为 0, 姿态为对地定向, 采用自然交会的观测方式, 视轴指向为轨道面的负法向, 视场角为 9° , 图像大小为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 曝光时间为 0.4 s。星表采用 Tycho-2 星表, 其中包含恒星赤经、赤纬、赤经自行、赤纬自行及星等信息^[15]。采用 MATLAB 2017b 作为仿真计算平台, 选用 i9-10940X CPU, 运行内存为 32 G, 硬盘内存为 128 G。

仿真过程中不考虑杂散光干扰成像, 首帧仿真图像与真实图像的对比如图 8 和图 9 所示。

对比真实图像可以看到, 对于不同星等的恒星, 仿真图像表现出了扩散区域大小不同的特点, 而且明亮恒星的 Smear 拖尾现象自然明显, 而拖尾灰度值 h 只与积分时间 t_1 、读出时间 t_2 、成像图像总行数 m 以及当前列所有像元的灰度值总和 s 有关^[16], 具体表达式为

$$h = \frac{t_2 \cdot s}{m(t_1 + t_2)}. \quad (6)$$

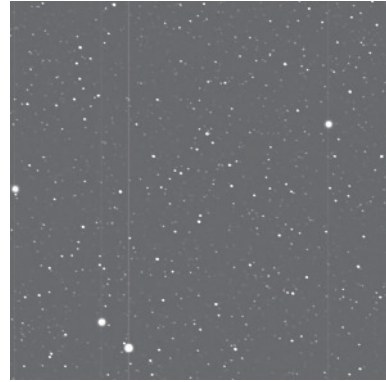


图 8 首帧图像的仿真图像

Fig. 8 Simulation image of 1st frame image



图 9 真实图像

Fig. 9 Real image

综上所述, 仿真图像较真实地模拟出了真实图像的特点。为了证明所提算法能够适应各种曝光时长, 进一步将曝光时间改为 1.5 s, 其他参数保持不变, 与图 9 同一帧的仿真图像如图 10 所示。

从图 10 可以看到, 随着曝光时间的增加, 恒星相对于观测平台的移动距离变大, 在图像上表现为恒星拖尾变长。拖尾方向反映了恒星相对于观测平台的运动方向, 拖尾长度反映了恒星相对于观测

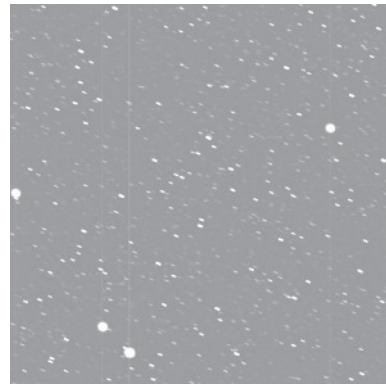


图 10 图 9 的仿真图像

Fig. 10 Simulation image of Fig. 9

平台的运动速度。同时,随着曝光时间的增加,背景天光在 CCD 传感器上产生的光子数增加,这会导致图像背景的灰度值增加。综上所述,仿真图像符合真实成像的特点。进一步考虑地气光干扰成像,仿真参数与图 7 相同,同一帧图像的仿真图像如图 11 所示。

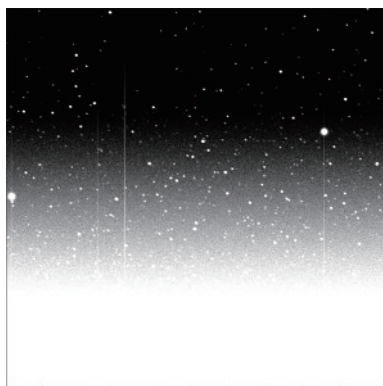


图 11 受地气光影响的仿真图像

Fig. 11 Simulation image affected by earth-gas light

对比图 7 和图 11 可知,受地气光影响的图像表现出局部区域高亮,恒星与空间目标在该区域的信噪比降低,这对检测跟踪算法的性能要求提升,而且影响区域逐渐从下边缘向上边缘扩散,过渡合理自然,符合真实地气光成像的规律。由于加入地气光来干扰成像,仿真图像整体方差与均值均发生变化,故图像上部显示效果较暗,但灰度值与原图大致相同。进一步考虑月光干扰成像,仿真参数与图 7 相同,同一帧图像的仿真图像如图 12 所示。

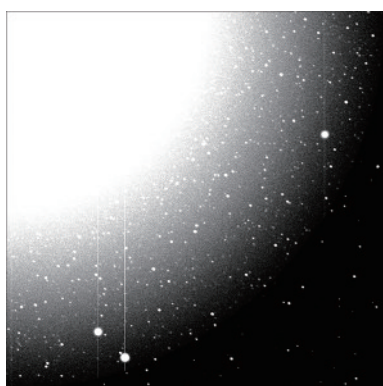


图 12 受月光影响的仿真图像

Fig. 12 Simulation image affected by moonlight

对比图 7 和图 12 可知,受月光影响的图像表现出局部区域高亮,恒星与空间目标的信噪比降低,一些微弱目标被淹没,这对检测跟踪算法的性能带来了新的挑战,而且扩散区域呈 1/4 圆状,影响程度

从圆心到边缘逐渐减小,灰度过渡合理自然,符合真实成像的特点。

上述验证了仿真图像的逼真度,进一步统计所提算法仿真 1000 个 TLE (Two Line Element) 目标的 60 frame 图像的耗费时间,得到所提算法的耗费时间为 87.9 s。

综上所述,所提算法的仿真速度较快,鲁棒性较强,较真实地模拟了杂散光对天基光学观测图像的干扰成像,仿真图像符合真实成像的特点,达到了预期仿真结果的目的。

5 结 论

通过分析真实图像的成像过程并结合杂散光成像的特点,提出了一种受杂散光影响的天基光学观测图像的仿真算法,所提算法将成像过程分为 5 个部分,能够较真实地模拟受杂散光影响的天基光学观测图像。在杂散光成像建模部分,本文分析了杂散光对干扰成像的基本原理,建立了杂散光成像仿真的数学模型,并分别通过微元法和扩展截取法实现了地气光和月光对观测图像的干扰成像。与真实图像相比,所提算法较真实地模拟了杂散光的干扰成像。

综上所述,所提算法考虑因素较全,仿真图像的逼真度较高,对于天基空间目标检测方法的研究以及天基光学探测平台的研制具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Long M L, Deng H R, Zhang H F, et al. Development of multiple pulse picosecond laser with 1 kHz repetition rate and its application in space debris laser ranging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0614001.
龙明亮, 邓华荣, 张海峰, 等. 1 kHz 重复频率多脉冲皮秒激光器研制及其空间碎片激光测距应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0614001.
- [2] Stokes G H, von Braun C, Sridharan R, et al. The space-based visible program[C]//Space 2000 Conference and Exposition, September 19-21, 2000, Long Beach, CA, USA. Mumbai: AAAI, 2000: 5334.
- [3] Sharma J, Stokes G H, von Braun C, et al. Toward operational space-based space surveillance[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 309-334.
- [4] Hu J J, Hu S M, Liu J, et al. Simulation analysis of space debris observation capability of multi-optoelectronic equipment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15):

1504002.
胡静静, 胡绍明, 刘静, 等. 一种多光电设备观测空间碎片能力仿真分析[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1504002.
- [5] Zhang L P, Xiao S Z, Hu M F, et al. Influence of earth-atmosphere radiation on the imaging of space object under tracking and gazing state[J/OL]. Chinese Space Science and Technology. (2021-04-06) [2021-06-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20210402.1845.004.html>.
张路平, 肖山竹, 胡谋法, 等. 追踪及凝视状态下地气光对空间目标成像影响[J/OL]. 中国空间科学技术. (2021-04-06)[2021-06-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1859.V.20210402.1845.004.html>.
- [6] Zhang H, Hao Y J. Simulation for view field of star sensor based on STK[J]. Computer Simulation, 2011, 28(7): 83-86, 94.
张辉, 郝永杰. 基于 STK 的卫星星敏感器视场仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(7): 83-86, 94.
- [7] Xing B D, Xin T, Zheng C W. Analysis and simulation of influence factors of space-based optical space debris detection[J]. Chinese Space Science and Technology, 2019, 39(3): 9-16.
邢必达, 忻恬, 郑昌文. 天基空间碎片光学探测影响因素分析及仿真[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(3): 9-16.
- [8] Lu L, Wang W, Meng Q Y, et al. Distribution of earth-atmosphere radiation on key component of space based telescope-sunlight baffle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091104.
陆琳, 王维, 孟庆宇, 等. 地气光在空间天文望远镜关键部位: 太阳挡板的分布[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091104.
- [9] Yuan Y K, Chen H Y, Wu H Y. In-orbit spacecraft's earth and atmosphere radiation environment analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 136-139.
原育凯, 陈宏宇, 吴会英. 在轨航天器地气光环境分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 136-139.
- [10] Heyes P S, Pool P J, Holtom R. Solid state sensors arrays: development and applications[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3019: 201.
- [11] Li K, Wang Y Y, Chang J L, et al. Stray light suppression of space off-axis reflective CCD camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032902.
李可, 王媛媛, 常君磊, 等. 空间离轴反射式 CCD 相机杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032902.
- [12] Powell K, Chana D, Fish D, et al. Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. Applied Optics, 1999, 38(8): 1343-1347.
- [13] Yang Q, Song R, Ma Y X, et al. Design and implement of space-based target imaging simulation system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111101.
杨琴, 宋锐, 马燕新, 等. 天基空间目标成像仿真系统设计及实现[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111101.
- [14] Zhou M J, Zhu Z C, Yang G Q, et al. GEO objects surveillance and tracking mode of space-based optical system[J]. Chinese Space Science and Technology, 2015, 35(3): 35-43, 49.
周美江, 朱振才, 杨根庆, 等. 天基光学同步带目标监视跟踪模式[J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(3): 35-43, 49.
- [15] Vityazev V V, Tsvetkov A S, Petrov S D, et al. Properties of the Tycho-2 catalogue from Gaia data release[J]. Astronomy Letters, 2017, 43(11): 730-750.
- [16] Duan Y. Research on LEO target detection for binding telescopes with large FOV[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
段宇. 大视场捆绑式望远镜低轨空间目标检测技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.