

海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法

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 410000;

²北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100000

摘要 为了提高海量空间碎片天基光学成像仿真的计算速度,提出了一种海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法。首先,阐述了天基光学观测图像的成像原理,设计了成像仿真流程,给出了各流程的计算方法,分析出了多约束条件下关于空间碎片可见性的计算是限制成像仿真速度的主要原因。接着,以提升计算速度为出发点,建立了各约束条件下对空间碎片可见性求解速度影响的评价指标。最后,根据建立的评价指标与实际观测任务的特点,提出了多约束条件下海量空间碎片的可见性快速求解策略。仿真实验结果表明,所提方法在保证仿真图像逼真度的同时,成像仿真速度明显优于传统成像仿真算法,对天基可见光观测平台的研制与效能评估具有重要意义。

关键词 空间光学; 成像方法; 仿真流程; 空间碎片; 可见性

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1611006

Fast Simulation Method for Space-Based Optical Observation Images of Massive Space Debris

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

¹National Key Laboratory of Science and Technology on ATR, School of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410000, Hunan, China;

²Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100000, China

Abstract A fast simulation method for obtaining space-based optical observation images of massive space debris is proposed to increase the computational efficiency of space-based optical imaging simulations of massive space debris. First, the imaging principle of the space-based optical observation images was explained. Then, an imaging simulation process was designed and a calculation method for each process was given. It is concluded that the calculation of the visibility of space debris under multiple constraints mainly limits the imaging simulation speed. Thus, an evaluation index of the influence of each constraint on the speed was established for solving the space debris visibility. Finally, based on the established evaluation indicators and the characteristics of actual observation tasks, a strategy for rapidly solving the visibility of massive space debris under multiple constraints was proposed. The simulation results show that the imaging simulation speed of the proposed method is significantly faster than the traditional imaging simulation algorithm while ensuring the fidelity of the simulation images, which is of great significance for developing and effectively evaluating the space-based visible-light observation platform.

Key words space optics; imaging method; simulation process; space debris; visibility

1 引言

空间碎片是空间中无有效功能的人造物体,主要为废弃的卫星、火箭残骸以及前两者爆炸或碰撞产生的微小碎片^[1]。随着人类空间活动的发展,空间碎片的数量日益增多,对后续的空间活动和在轨卫星产生

了巨大的安全威胁^[2-3]。截至2020年1月,地球轨道上已编目的尺寸大于10 cm的空间碎片达19952个^[4]。为了应对日益严重的空间碎片问题,各国纷纷发展空间碎片观测技术。对比其他探测手段,天基可见光观测因作用距离远、成本低廉、不受大气影响、全天候、全天候等优点,成为空间碎片观测的首选手段^[5-7]。在天

收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-08-30

基金项目: 青年科学基金项目(61605243)

通信作者: *niuzd@nudt.edu.cn; **yupeng_wang19@163.com

基空间碎片可见光观测平台的研制过程中,需要大量观测数据进行相关验证,但实测数据的获取难度较大。所以研究天基空间碎片可见光成像仿真技术具有重要意义,该技术在提供大量数据的同时,可以补充真实光学图像通常所不具备的异常情况信息,验证检测跟踪算法的性能。

由于天基可见光成像仿真技术的重要性,各国学者都进行了相关研究并产生了一定的研究成果。文献[8]针对背景星图模拟的需求,提出了一种导航星的选取方法。文献[9]针对小视场、高探测灵敏度的空间成像系统,提出了一种考虑条纹和饱和星背景的空间碎片光学图像仿真方法。文献[10]通过有限元分析和矢量坐标变换,利用双向反射分布函数建立了具有目标光学散射特性的数学模型。文献[11]为了测试星敏感器的高分辨率和动态性能,提出了一种考虑图像运动的星敏感器运动模糊建模方法。文献[12]针对空间目标可见性,提出了一种判断空间目标是否处于地影的新算法。文献[13]研究分析了星等到灰度转换的数学模型、星点灰度扩散模型,并分析了星图噪声来源。文献[14]借鉴雷达截面积提出了目标的光学截面积,利用目标光学截面积可以得到目标在成像平面上的亮度大小。文献[15]结合在轨试验数据,从探测器和碎片两方面分析了影响天基空间碎片光学探测的因素。

可见,已有文献较少涉及天基可见光观测图像的快速成像仿真方法,探测器视场较小,且仿真的空间碎片数量较少,一些仿真数目增加反映出来的相关特性难以展现。尤其是空间碎片对观测平台的可见性,研究时通常只是建立了各自约束条件的判断模型,较少考虑多约束条件下的海量空间目标的可见性快速求解策略。针对上述不足,本文提出一种海量空间碎片天基光学观测图像的快速仿真方法,探测器视场较大,立足于低轨空间碎片的实际数量,仿真了海量的空间碎片数目,分析了影响成像仿真速度的原因,建立了各约束条件对空间碎片可见性求解速度影响的评价指标,提出了多约束条件下海量空间碎片的可见性快速求解策略。所提方法在保证成像逼真度的同时,实现了对海量低轨空间碎片天基可见光观测图像的快速仿真,对天基空间碎片可见光观测平台的研制参考作用较大。

2 仿真流程设计

在天基可见光观测过程中,CCD器件因高成像质量、高灵敏度、抗强光、低噪声等优势,作为成像传感器被广泛应用^[16]。故所提方法以 CCD 器件为成像传感器。

对于天基空间碎片可见光观测,空间碎片与观测平台都处于太空空间,成像光源主要是太阳光、月光、星光及地球的漫反射光。因为空间碎片与恒星距离观测平台较远,可以认为其为点光源。当空间碎片所反

射的光与恒星背景的光到达 CCD 器件时,CCD 器件的感光单元阵列进行光电转换,在 CCD 器件的成像平面上形成实际的观测图像。

通过分析上述成像原理,把仿真成像过程分为空间碎片、观测平台与日月天体运动特性建模、空间碎片与背景恒星光学特性建模、空间碎片可见性分析及 CCD 器件成像建模 4 个部分,成像仿真整体流程如图 1 所示。

仿真流程启动后,首先进行空间碎片、观测平台与日月天体的运动特性建模,前两者主要根据各自的轨道根数计算位置与速度信息,后者采用喷气动力实验室(JPL)发布的 DE430 历表进行内插计算获得其位置信息。

接着,进行空间碎片与背景恒星光学特性建模。星等是天文学上对星体或目标明暗程度的一种表示方法。对于空间碎片光学特性建模,主要根据空间碎片、太阳与观测平台的相对位置关系、空间碎片的大小与材质,确定空间碎片星等,具体计算方式^[17]为

$$m = 1.4 - 2.5 \log \gamma - 5 \log D + 5 \log \rho - 2.5 \lg [\sin \sigma + (\pi - \sigma) \times \cos \sigma], \quad (1)$$

式中: γ 为碎片表面的漫反射系数; D 为空间碎片直径; ρ 为空间碎片到观测平台的斜距; σ 为太阳、空间碎片、观测平台的夹角。星表是记载恒星各种参数(如位置、运动、星等、光谱型等)的表册。背景恒星光学特性建模过程中,主要根据星表、观测平台视轴指向与观测平台的视场角确定成像恒星与恒星星等。

然后,进行空间碎片的可见性分析,主要是建立各约束条件对空间碎片可见性的判断模型,进行多约束条件下的空间碎片相对于观测平台的可见性判断。

最后,进行 CCD 器件成像建模,主要分为成像投影建模与成像噪声建模。成像投影建模主要完成投影位置的计算与投影效果的模拟,投影位置的计算过程主要是根据恒星、空间碎片和观测平台的相对位置及观测平台的视轴指向,进行相关坐标系的转换。CCD 器件成像过程中会产生弥散现象与拖尾现象^[18]。故投影效果的模拟中,主要根据投影点的星等进行星等与灰度值转换,进而使用点扩散函数在拖尾路径上进行弥散效果处理。成像噪声建模主要模拟 CCD 器件的成像噪声。对于科学级 CCD,主要考虑转移噪声、暗电流噪声、散粒噪声及输出噪声^[19-20]。至此完成海量低轨空间碎片天基光学成像仿真。

经过上文分析,空间碎片、观测平台与日月天体运动特性建模、空间碎片与背景恒星光学特性建模及 CCD 器件成像建模的计算方法已经比较成熟,限制成像仿真速度的主要原因是多约束条件下的空间碎片可见性分析,故本文将重点放在多约束条件下的空间碎片可见性分析方面,实现对海量低轨空间碎片天基大视场光学成像的快速仿真。

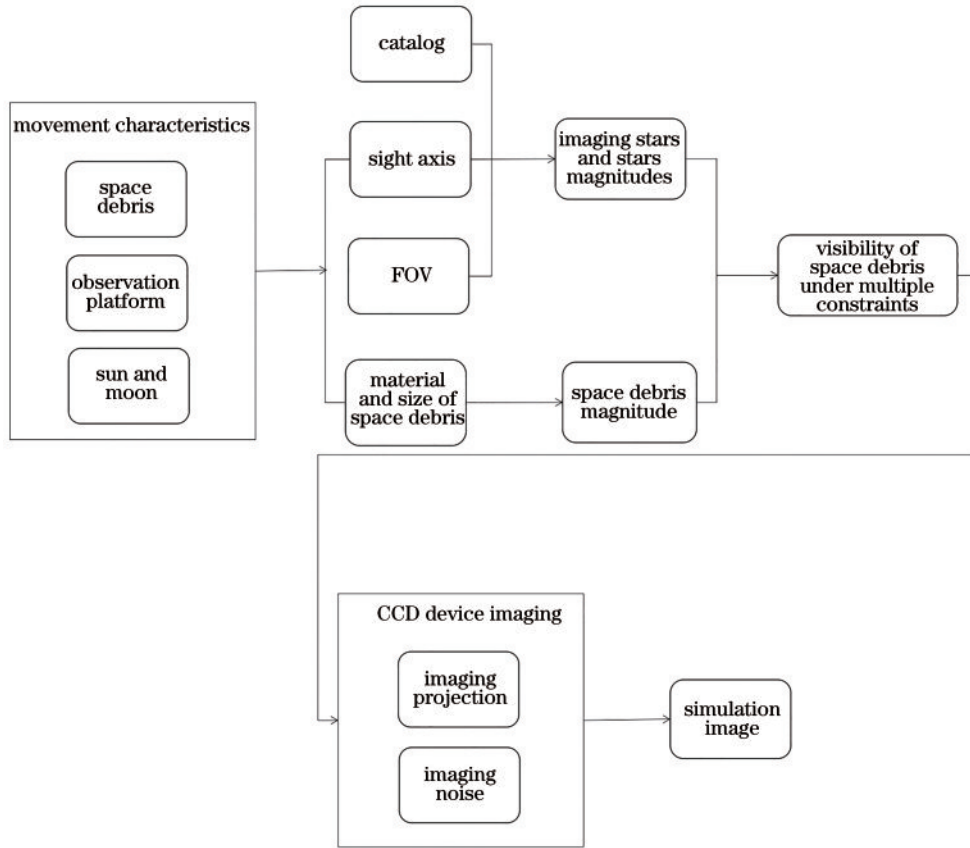


图 1 成像仿真流程

Fig. 1 Flow chart of imaging simulation

3 多约束条件下的空间碎片可见性分析

对于天基可见光观测,由于太空空间的特殊性,主要考虑自然条件与设备性能对空间碎片可见性的影响因素^[21]。自然条件的影响主要是地球对观测的遮挡、地球阴影对观测的影响及日月天体对观测的干扰,设备性能的影响主要是观测视场以及探测器所能成像的最高星等的影响。

3.1 遮挡约束

地球遮挡约束,即地球遮挡了天基可见光观测平台的观测视线。如图 2 所示, O 为地球质心, R_e 为地球半径, r_1 与 r_2 分别为观测平台与空间碎片在地球惯性

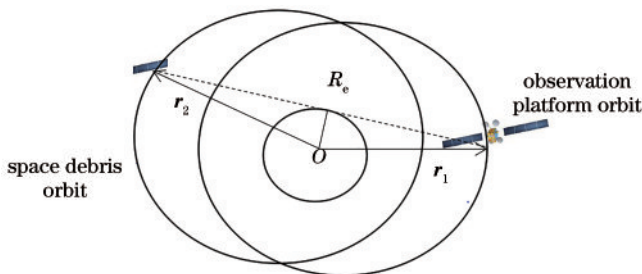


图 2 地球遮挡约束示意图

Fig. 2 Schematic of earth occlusion constraint

系中的位置矢量。故观测被地球遮挡的条件为

$$\sqrt{|r_1|^2 - R_e^2} + \sqrt{|r_2|^2 - R_e^2} \leq |r_2 - r_1| \quad (2)$$

3.2 地球阴影约束

地球阴影约束,即当空间碎片进入地球阴影后,太阳光被地球遮挡,对可见光观测平台无法进行有效观测。如图 3 所示, r 为空间碎片在地球惯性系下的位置矢量,所以目标恰好进入地影区域的临界角 $\partial_{\text{threshold}}$ 满足

$$\sin \partial_{\text{threshold}} = \frac{R_e}{|r|} \quad (3)$$

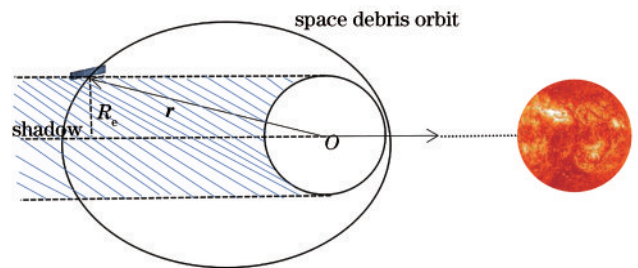


图 3 地影约束示意图

Fig. 3 Schematic of ground shadow constraint

3.3 日月干扰约束

日月干扰约束,即对于可见光观测平台,当太阳或者月球进入观测视场时,会对观测造成干扰,淹没观测

碎片。如图 4 所示, r_{axis} 为相机坐标系中的视轴指向单位矢量, $\Delta r_{sun/moon}$ 为相机坐标系中的太阳或者月球的单位位置矢量, θ 为 CCD 器件的视场角, 所以判断太阳或月球进入观测视场的条件为

$$r_{axis} \cdot \Delta r_{sun/moon} - \cos \theta \geq 0。 \quad (4)$$

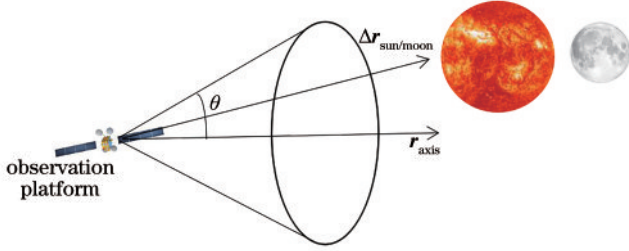


图 4 日月干扰约束示意图

Fig. 4 Schematic of sun-moon interference constraint

3.4 观测视场约束

观测视场约束, 即要求空间碎片要出现在观测平台的观测视场内。如图 5 所示, Δr 为空间碎片在相机坐标系下的单位位置矢量, 所以空间碎片进入观测视场的条件为

$$r_{axis} \cdot \Delta r - \cos \theta > 0。 \quad (5)$$

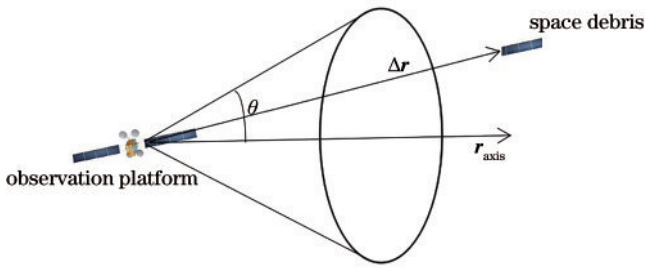


图 5 观测视场约束示意图

Fig. 5 Schematic of observing field of view constraint

3.5 探测星等约束

探测星等约束, 即由于 CCD 器件的探测星等有限, 空间碎片的星等要低于可见光观测平台搭载的 CCD 器件所能探测的最高星等, 空间碎片星等的计算方法已经阐述, 假设 CCD 器件所能探测的最高星等为 15 星等。

3.6 多约束条件下的可见性快速求解策略

已分析了各约束条件对空间碎片可见性的影响, 但对于不同类型的观测任务, 相同的约束条件对空间碎片可见性的约束效果不同。即便是同一观测任务, 不同的约束条件的计算量也不同。传统的可见性串行求解算法只是对不同约束条件的可见性结果的简单串行求解, 没有考虑多约束条件下不同的求解顺序对求解速度的影响。尤其当空间目标达到一定数量时, 计算量急剧膨胀, 不同的求解顺序会对求解速度产生较大影响, 故有必要进行多约束条件下的可见性快速求解策略的研究。

传统可见性串行求解算法的基本思想是, 令子约束为 $A_i, i=1, 2, 3, 4, 5$ 和可见性状态为 A , 分别表示 5 种子约束的满足状态与空间碎片的可见状态, 其中 $A = \prod_{i=1}^5 A_i$ 。状态值为 1 认为满足子约束或空间碎片可见, 状态值为 0 认为不满足子约束或空间碎片不可见。对空间碎片求解可见性时, 依次计算是否满足各个不同约束, 若其中一个约束不满足, 则空间碎片不可见, 若全部约束满足, 则认为空间碎片可见。

分析可见性串行求解算法时发现其没有考虑不同约束条件下的求解顺序对求解速率的影响, 同时缺乏可量化的指标对求解顺序选取的指导。通过分析不同约束条件对空间碎片可见性求解速率的影响方式, 认为不同约束条件对空间碎片可见性求解速率的影响主要分为两个方面, 一是计算量大小的差异, 二是约束条件对时间点筛选能力的差异, 即利用此约束条件对一系列时间点进行空间碎片可见性分析, 若此约束条件对应的空间碎片可见性时段较少, 认为此约束条件的时间点筛选能力较强, 利用其进行可见性判断, 可以大幅缩减后续约束条件下所需要判断的时间点长度。

针对上述分析的不同约束条件对空间碎片可见性求解速率的影响方式, 所提方法综合衡量两种影响方式, 提出了一种求解顺序选取的量化指标, 即速率贡献度 P 。

$$P_i = k_1 B_i + k_2 C_i, \quad (6)$$

式中: P_i 为各约束条件对可见性求解速率的贡献度; B_i 为各约束条件计算量的评价分值, 各约束条件根据计算量大小排序, 根据从小到大的顺序依次赋予 5, 4, 3, 2, 1; C_i 为各约束条件时间点筛选能力的评价分值, 根据从大到小的顺序依次赋予 5, 4, 3, 2, 1; k_1 与 k_2 分别为计算量的评价分值与时间点筛选能力的评价分值对速率贡献度 P 的占比, 二者的和为 1。

根据提出的求解顺序选取的量化指标, 即速率贡献度 P 对各约束条件对求解速度的影响进行衡量, 速率贡献度 P 值大的, 在串行求解顺序中优先求解, 速率贡献度 P 值小的, 在串行求解顺序中靠后求解。

依据速率贡献度 P , 针对多约束条件下海量空间碎片目标可见性求解问题, 提出如下快速求解策略:

- 1) 分析各约束条件的计算量大小, 根据从小到大的顺序依次赋予 5, 4, 3, 2, 1;
- 2) 计算各约束条件的时间点筛选能力, 根据从大到小的顺序依次赋予 5, 4, 3, 2, 1;
- 3) 根据不同类型任务与实际需要, 对 k_1 与 k_2 的值进行均衡选择;
- 4) 得出不同约束条件的速率贡献度, 根据从大到小的顺序依次串行求解, 得到空间碎片的可见性时段。

当具有并行计算条件时, 也可对各子约束条件的求解方式进行并行计算, 达到快速求解的目的。本节

通过讨论各约束条件对空间碎片可见性求解速度的影响方式,建立了衡量求解顺序的量化指标,提出了一种多约束条件下的关于海量空间碎片可见性的快速求解策略,该策略对空间碎片可见性的计算具有重要意义。

4 仿真结果分析

4.1 空间碎片可见性求解耗时分析

已阐述了所提海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法。现假设一观测平台于仿真零时经过升交点,仿真开始时间为 2021 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒,步长

为 3 s,轨道高度为 6778.14 km,轨道倾角为 97° ,升交点赤经为 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° ,像素点数目为 1024×1024 ,曝光时间为 0.4 s。TLE, 双行轨道根数,是目前世界上发布的编目最完善的空间目标轨道数据信息。故采用 1000 个 TLE 目标作为空间碎片目标,直径假设 1 m,反射率为 0.3。星表采用 Tycho-2 星表,其中包含恒星赤经、赤纬、赤经自行、赤纬自行及星等等信息^[22]。进行为期一天的仿真,各约束条件对空间碎片进行可见性判断所耗费的时间如表 1 所示。

表 1 仿真时间对比

Table 1 Comparison of simulation time

Parameter	Observation field of view	Earth occlusion	Earth shadow	Detecting magnitude	Sun and Moon interference
Time /s	11312.1	9940.9	10724.7	15050.1	14112.2

因为仿真耗费的时间反映仿真计算量,根据 3.6 节提出的求解顺序量化指标速率贡献度 P ,分别赋予子约束条件, $A_1 = 3, A_2 = 5, A_3 = 4, A_4 = 1, A_5 = 2$ 。

进一步统计该观测平台对 1000 个空间目标的总可见时长,结果如表 2 所示。

表 2 各约束条件下目标总可见时长

Table 2 Total visible time of the target under each constraint

Parameter	Observation field of view	Earth occlusion	Earth shadow	Detecting magnitude
Time /h	50.93	4998.82	15674.28	21301.48

观察表 2 可以发现,根据各约束条件的空间目标总可见时长,四个约束条件时间点筛选能力从强到弱依次为观测视场约束、地球遮挡约束、地球阴影约束及探测星等约束。

所提方法又进行了为期两年的仿真,开始时间为 2020 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒,步长为 1 h,统计这两年里观测平台的视轴指向与日月天体夹角的变化情况,结果如图 6 所示。粗曲线为视轴指向与太阳的夹角变

化仿真结果,细曲线为视轴指向与月球的夹角变化仿真结果,长直线为太阳或月亮进入观测视场的阈值。观察图 6 可以发现,在为期两年的仿真中,日月干扰约束条件对观测可见性的影响较小。

进一步分析观测视轴与日月夹角的变化规律,发现视轴与月球的夹角变化周期与月球绕地球旋转的周期大致相同;视轴与太阳的夹角变化周期与地球绕太阳旋转的周期大致相同,且一年中夹角变化的规律比较明显,极小值出现在 6 月 25 日到 7 月 10 日之间,其他时间的可见性分析可以忽略太阳干扰的因素。

综合上述,五个约束条件按时间点筛选能力从强到弱依次为观测视场约束、地球遮挡约束、地球阴影约束、探测星等约束及日月干扰约束。根据 3.6 节提出的求解顺序量化指标速率贡献度 P ,分别赋予子约束条件 $B_1 = 5, B_2 = 4, B_3 = 3, B_4 = 2, B_5 = 1$ 。

考虑到各约束条件之间计算量差别较小,时间点筛选能力差别较大,本着各约束条件差异扩大化的原则, k_1 取 0.3, k_2 取 0.7。计算各约束条件速率贡献度 $P, P_1 = 4.4, P_2 = 4.3, P_3 = 3.3, P_4 = 1.7, P_5 = 1.4$ 。

已求解了各约束条件对空间碎片可见性求解速度的速率贡献度 P ,根据各约束条件对空间碎片可见性的速率贡献度 P 大小,改良传统可见性串行求解算法,形成如下求解顺序,求解流程如图 7 所示。

另选 1000 个 TLE 目标,对其进行为期一天的仿真,三种不同顺序的串行求解算法与所提方法计算目标可见性所耗费的时间对比如表 3 所示。

观察表 3 可以发现,相较传统串行求解算法,所提方法的求解速度有较大提升。进一步统计不同约束条件的可见性时段结果,如图 8 所示。F 代表对空间目标进行观测视场约束的可见性分析, H 代表对空间目标进行地球遮挡约束的可见性分析, I 代表对空间目标进行地球阴影约束的可见性分析, J 代表对空间目标进行

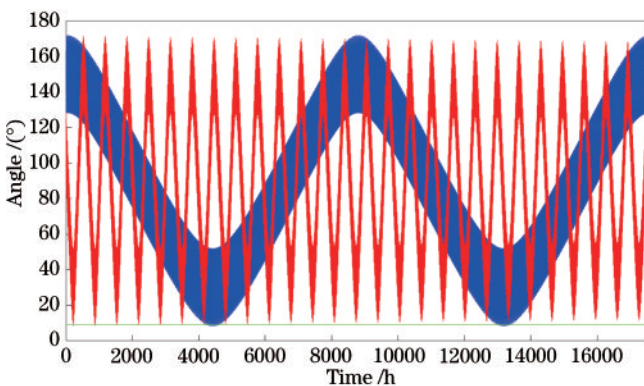


图 6 视轴与日月的夹角变化仿真结果

Fig. 6 Simulation result of the angle change between the sight axis and the sun and moon

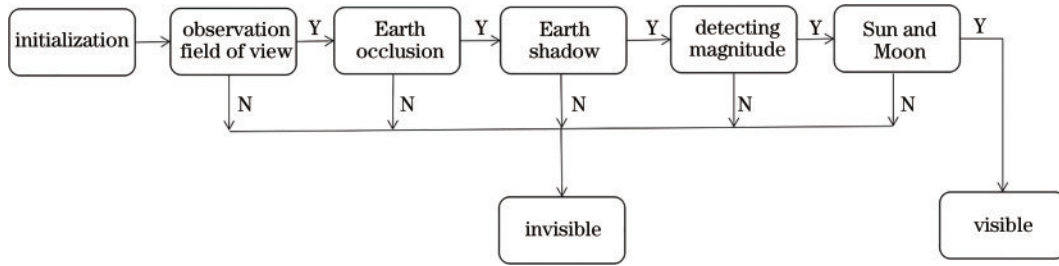


图 7 可见性求解流程图

Fig. 7 Flow chart of visibility solution

表 3 仿真时间对比

Table 3 Comparison of simulation time

Parameter	Serial solving algorithm 1	Serial solving algorithm 2	Serial solving algorithm 3	Proposed method
Time / s	21630.4	17345.8	22567.5	13328.7

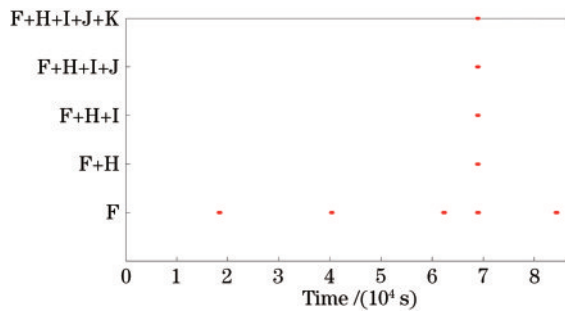


图 8 空间目标可见性时段

Fig. 8 Visibility period of space objects

探测星等约束的可见性分析, K 代表对空间目标进行日月干扰约束的可见性分析, + 代表对相应约束条件进行叠加判断。观察图 8 可以发现, 对于空间碎片可见性的计算, 所提方法首先进行了观测视场约束的判断, 过滤掉了大量时间点, 接着进行地球遮挡约束的判断, 进一步缩小了所需要计算的时间范围; 然后依据其余约束条件对空间碎片可见性的速率贡献度 P 大小的顺序进行后续目标可见性判断, 减少后续其他约束条件的计算量, 在保证算法鲁棒性的同时, 大大缩减了计算所需要的时间, 对空间目标可见性的判断具有重要意义。

4.2 仿真图像逼真度分析

上述结论验证了所提海量空间碎片的可见性快速求解策略的有效性, 空间目标可见后, 某帧仿真结果与实测图像对比如图 9、图 10 所示。

对比真实图像可以发现, 对于不同星等的恒星, 仿真图像体现出了扩散区域大小不同的特点。明亮恒星的 Smear 拖尾自然明显, 且与真实图像中明亮恒星的 Smear 拖尾对比, 符合恒星灰度值大小 h 只与积分时间 t_1 、读出时间 t_2 、成像图像总行数 m 及当前列所有像元的灰度值总和 s 有关的规律^[23], 具体关系式为

$$h = t_2 \cdot s / m / (t_1 + t_2) \quad (7)$$

综合上述, 仿真图像较真实地模拟出了真实图像

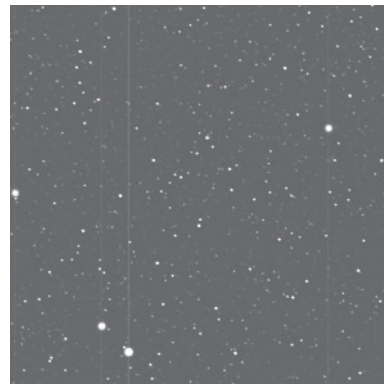


图 9 仿真图像

Fig. 9 Simulation image

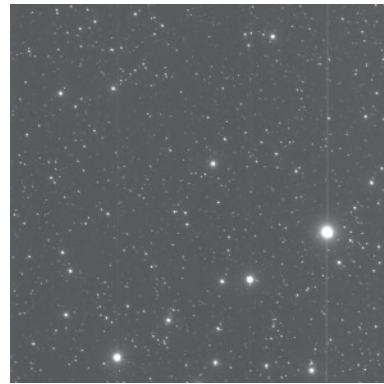


图 10 真实图像

Fig. 10 Real image

的特点。

4.3 整体仿真流程耗费时间分析

已验证了仿真图像的逼真度, 进一步统计所提海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法与不考虑多约束条件下的可见性快速求解策略的传统成像仿真方法仿真 3500 个 TLE 目标 60 帧图像所耗费的时间, 结果如表 4 所示。

观察表 4 可以看出, 所提方法耗费的时间大幅低于传统成像仿真方法。为了验证所提方法的观测时间

表 4 耗时时间对比

Table 4 Comparison of time-consuming

Parameter	Proposed method	Traditional method
Time /s	337.7	527.2

的鲁棒性,将仿真开始时间设为 2021 年 6 月 1 日 10 时 30 分 0 秒,其余参数保持不变,统计所提海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法与不考虑多约束条件下的可见性快速求解策略的传统成像仿真方法仿真 3500 个 TLE 目标 60 帧图像所耗费的时间,结果如表 5 所示。

表 5 改变仿真时间段的耗时时间对比

Table 5 Time-consuming comparison after changing simulation time period

Parameter	Proposed method	Traditional method
Time /s	348.2	530.1

观察表 5 可以看出,在不同时间段下,所提方法仍然具有较大优越性。进一步验证所提方法对仿真数目的鲁棒性,设置仿真目标数为 7000 个,其余参数保持不变,统计所提海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法与不考虑多约束条件下的可见性快速求解策略的传统成像仿真方法仿真 7000 个 TLE 目标 60 帧图像所耗费的时间,结果如表 6 所示。

表 6 改变目标数目的耗时时间对比

Table 6 Time-consuming comparison after changing number of objects

Parameter	Proposed method	Traditional method
Time /s	576.5	802.6

观察表 6 可以看出,随着仿真目标数目的增加,仿真耗时时间相应增加,所提方法耗费的时间依旧大幅低于传统算法。

综合上述,所提方法空间碎片可见性求解速度较快,仿真图像逼真度较高,整体仿真流程耗时时间较少,鲁棒性较强,达到了预期的仿真结果。

5 结 论

通过分析实测图像的成像过程,提出了一种海量空间碎片天基光学观测图像快速仿真方法。所提方法把仿真成像过程分为空间碎片、观测平台与日月天体运动特性建模、空间碎片与背景恒星光学特性建模、空间碎片可见性分析以及 CCD 器件成像建模 4 个部分,较为逼真地实现了对海量低轨空间碎片天基可见光图像的快速仿真。在空间碎片可见性分析方面,建立了各约束条件对空间碎片可见性求解速度影响的评价指标,改良传统串行求解算法,提出了一种多约束条件下的海量空间碎片可见性快速求解策略,对比传统串行求解算法,速度明显提升。综上所述,所提海量空间碎

片天基光学观测图像快速仿真方法的仿真速度较快,图像逼真度较高,考虑因素较全,对天基空间目标检测方法的研究和天基空间目标观测平台的研制具有重要意义。

所提方法对太空环境的考虑比较简单,今后工作需进一步考虑太空环境中影响成像的其他因素。通过分析实测图像发现,太空环境中的杂散光是影响成像的主要因素,其在图像上表现为区域高亮或者干扰条纹,对目标检测影响较大,有必要对其进行模拟。可以在现有基础上,进一步考虑杂散光干扰成像,作为下一步工作。

参 考 文 献

- [1] Schildknecht T. Optical surveys for space debris[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2007, 14(1): 41-111.
- [2] 姚金铭,李广平,张慧博,等.基于视惯融合的大型空间碎片质心位置辨识[J].*中国空间科学技术*, 2022, 42(1): 114-124.
Yao J M, Li G P, Zhang H B, et al. Mass-center location identification of large space debris based on binocular vision and inertial measurement units fusion[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(1): 114-124.
- [3] 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.
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.
- [4] 郑永超,赵思思,李同,等.激光空间碎片移除技术发展及展望[J].*空间碎片研究*, 2020, 20(4): 1-10.
Zheng Y C, Zhao S S, Li T, et al. Current status and development of laser active debris removal technology[J]. *Space Debris Research*, 2020, 20(4): 1-10.
- [5] Stokes G H, von Braun C, Sridharan R, et al. Space-based visible program[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2008, 11(2): 205-236.
- [6] 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.
- [7] 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.
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.
- [8] Kim H Y, Junkins J L. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: Thinning method [C]//*Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, March 9-16, 2002, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2002: 2275-2283.
- [9] Ouyang Y, Xu T X, Huang X B, et al. An approach to space-debris optical image simulation considering the

- streak and saturated star-background[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1060(1): 012069.
- [10] 孙成明, 袁艳, 吕群波. 天基空间目标光学散射特性建模与验证[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1129001.
Sun C M, Yuan Y, Lü Q B. Modeling and verification of space-based optical scattering characteristics of space objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1129001.
- [11] Li A J, Liu C S, Shen X F. An approach to star map simulation for star sensor considering the effect of image motion[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 108-111.
- [12] Mullins L D. Calculating satellite umbra/penumbra entry and exist positions and times[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1991, 39(4): 411-422.
- [13] 樊萌. 基于 Scilab/Xcos 的星敏感器星图识别仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
Fan M. Simulation research on star image recognition based on Scilab/Xcos[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [14] 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.
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.
- [15] 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.
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.
- [16] Heyes P S, Pool P J, Holtom R. Solid state sensors arrays: development and applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3019: 201.
- [17] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
Wu L D. Orbital and detection of artificial satellites and spatial fragments[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.
- [18] Powell K, Chana D, Fish D, et al. Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1343-1347.
- [19] Cohen M, David J P. Radiation effects on active pixel sensors[C]//1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, September 13-17, 1999, Fontevraud, France. New York: IEEE Press, 1999: 450-456.
- [20] Cohen M, David J P. Radiation-induced dark current in CMOS active pixel sensors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, 47(6): 2485-2491.
- [21] 綦磊, 孙立臣, 龚自正, 等. 空间微小碎片探测技术综述[J]. *空间碎片研究*, 2021, 21(2): 10-16.
Qi L, Sun L C, Gong Z Z, et al. Micro space debris detection technology and applications[J]. *Space Debris Research*, 2021, 21(2): 10-16.
- [22] 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.
- [23] 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.
Duan Y. Research on Leo target detection for binding telescopes with large FOV[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.