

天基空间态势感知数据仿真研究进展

罗秀娟 郝伟

Advances in data simulation for space-based situational awareness

LUO Xiu-juan, HAO Wei

引用本文:

罗秀娟, 郝伟. 天基空间态势感知数据仿真研究进展[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 501–511. doi: 10.37188/CO.2023–0156

LUO Xiu-juan, HAO Wei. Advances in data simulation for space-based situational awareness[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 501–511. doi: 10.37188/CO.2023–0156

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间目标地基观测红外辐射特性研究

Infrared radiation characteristics of space target based on ground-based detector

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1424 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0032>

空间目标自适应光学图像椭圆部件检测

Detection of elliptical components in adaptive optical image of space target

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 454 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0208>

超表面透镜的像差分析和成像技术研究

Research progress of aberration analysis and imaging technology based on metalens

中国光学 (中英文). 2021, 14(4): 831 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0014>

基于天基定量实测数据的月球长波红外辐射特性研究

Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 525 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0202>

天基平台宽波段成像光学系统设计

Optical design of visual and infrared imaging system based on space-based platform

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1495 <https://doi.org/10.37188/CO.2019–0255>

基于光机热集成分析的大规模拼接焦面误差分配

Large-scale splicing focal plane error distribution based on optical-structural-thermal integration analysis

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1000 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0094>

文章编号 2097-1842(2024)03-0501-11

天基空间态势感知数据仿真研究进展

罗秀娟^{1,2*}, 郝伟^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119;
2. 中国科学院空间精密测量技术重点实验室, 西安 710119)

摘要:空间态势感知(Space Situational Awareness, SSA)数据仿真可以为空间监测设备及态势感知算法(包括空间目标检测、跟踪、识别和表征)的开发、测试和验证提供关键性数据支持,在空间态势感知能力建设发挥重要作用。本文以天基空间态势感知光学数据仿真为研究对象,给出了SSA数据仿真的研究目的和主要研究内容,详述了SSA光学成像仿真的典型研究方法过程。介绍了国内外相关工作的研究现状与工作进展,涵盖双目视觉传感器、激光雷达、红外传感器、可见光望远镜和恒星敏感器等不同光学传感系统的成像建模与仿真工作成果。分析了空间态势感知数据仿真研究的发展趋势,为未来SSA数据仿真研究思路与方法提供参考。

关键词:空间态势感知;建模;仿真;空间目标;成像

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2023-0156

Advances in data simulation for space-based situational awareness

LUO Xiu-juan^{1,2*}, HAO Wei^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: xj_luo@opt.ac.cn

Abstract: The data simulation for Space Situational Awareness (SSA) can provide critical data support for the development, testing, and validation of space surveillance equipment and situational awareness algorithms (including detection, tracking, recognition, and characterization of space object), playing a significant role in building SSA capabilities. Taking the optical data simulation for space-based situational awareness as the research subject, the purpose and main research content of SSA data simulation are presented, and the typical research methods and processes of SSA optical imaging simulation are set forth. The current research status and progress in domestic and foreign related research are introduced, covering the imaging modeling and simulation achievements of different optical sensing systems such as binocular vision sensors, LiDAR, infrared sensors, visible light telescopes, and star trackers. The development trend of SSA data simulation research is analyzed, providing reference for future research ideas and approaches of SSA data simulation.

Key words: space situational awareness; modeling; simulation; space object; imaging

收稿日期:2023-06-06; 修订日期:2023-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61925112)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61925112)

1 引言

空间态势感知是对所有空间事件、威胁、活动和太空系统状态进行感知, 包括对空间目标的探测、跟踪、识别、编目、表征、轨道预测、对空间事件的评估、核实以及对空间环境的监测预报等, 是了解和应对空间威胁/风险、维护空间资产安全和整个空间环境可持续性的重要手段。随着人类航天事业的迅猛发展以及太空优势竞争态势的日益激烈, 发射进入太空的卫星大量增多, 各国相继推出了数量可观的天基态势感知设备, 以发展新的 SSA 能力或改进现有能力。一方面, 由于航天任务实际操作的成本、效率、风险和安全等问题, 研究人员很难获得真实太空任务场景中的态势感知设备数据(例如空间目标光学图像等数据), 使空间监测系统设计参数和关键技术的验证成为一个棘手问题; 另一方面, 空间驻留物体(Resident Space Object, RSO)的数量不断增加, 且呈现出复杂化、多样化、小型化态势, 对其进行探测、识别和表征的需求变得越来越大, 进而使空间态势感知新算法的开发、测试和验证成为一项具有挑战性的任务。因此, 必须开展空间态势感知数据仿真研究工作, 依靠建模与仿真工具来发展 SSA、填补数据缺口, 解决因缺乏真实数据而产生的上述两大难题。国际上, 美国、英国、法国、加拿大、澳大利亚和芬兰等国家纷纷开展了天基 SSA 数据仿真相关研究工作, 涉及的数据采集传感器包括双目视觉传感器、激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)、红外传感器、可见光望远镜和恒星敏感器等^[1-18]。我国也在空间目标光学特性及成像仿真方面开展了较多研究工作^[19-35], 获得了一些保真度较高的 RSO 图像数据。

本文介绍了 SSA 数据仿真的研究目的和主要研究内容, 给出了 RSO 光学成像的典型仿真方法与过程, 阐述了国内外天基态势感知光学数据仿真工作的研究进展以及国内外研究间的差距, 分析总结了 SSA 数据仿真研究的发展趋势, 指出了我国全面深入开展 SSA 数据仿真研究工作的迫切性, 并给出了下一步工作建议。

2 研究内容与方法

空间态势感知数据仿真的目的是为空间监测系统及 SSA 算法的开发、测试和验证提供逼真的数据, 使仿真系统在对空间目标检测、跟踪、识别和表征算法的开发验证, 探测器能力估计, SSA 系统关键技术验证, 设备性能分析, 任务性能评估等工作中, 发挥重要的数据支持、指导、预测和评估等作用。主要研究内容包括观测平台与传感器的指向模型与轨道模型, 传感器模型, 点扩散函数(Point Spread Function, PSF)和运动模糊模型, 恒星场和太空环境影响模型, 任务场景模型(实际 SSA、交会、变轨和抵近操作等)及场景中 RSO 的轨道运动、姿态控制、辐射测量和成像模型, 仿真结果处理分析与可视化等。

SSA 数据仿真在国际上没有统一的研究方法, 但对于关键性内容的研究仍有一些规律可循。天基空间监测系统的 RSO 数据采集器以灵敏度高、传输速度快、抗干扰能力强的光学传感器为主。建立这些传感器模型并生成任务场景中的高保真 RSO 图像是 SSA 数据仿真的一项关键性研究内容, 其数据仿真一般需要创建十几个模型。建模框架有流程化建模、模块化建模和概念空间建模(Conceptual Spaces Modeling)等。通常采用物理成像仿真研究方法, 建立从目标反射、辐射通过空间传输到光学系统入瞳处, 再经过光学镜头到达探测器, 最后经过电子学传输处理形成模拟或数字信号的全过程物理模型, 确保仿真计算中图像纹理与辐射能量的准确性与一致性。RSO 成像仿真模型包括目标的光学特性模型、目标的几何特性模型、背景环境特性模型、目标与成像平台的相对轨道运动及位置模型、空间目标光照模型、传感探测器的成像模型、模糊和噪声模型等。一般先考虑辐射能量在仿真场景中的传输过程和几何成像投影关系, 生成等效辐射亮度仿真图像, 再对噪声等成像影响因素进行处理。为保证仿真图像的数据真实性, 传感器建模须全面考虑成像系统的光学效应(PSF 包括像差、遮挡、支撑结构、散焦)、探测器效应(CCD 晕染、左/右偏置、固定模式噪声、图像持久性、散粒噪

声、读取噪声和量化噪声)以及环境效应(空间辐射袭击等),使之在空间和时间上的行为接近实际传感器^[1]。

下面给出 RSO 光学成像的典型仿真方法与过程:

(1) 构建高逼真度的目标模型。目标模型包括几何特性和光学特性模型。首先构建目标几何特性模型,用三维 CAD 模型进行多种物理场景几何形态的统一描述。在目标光学特性建模时,充分考虑材料特性,建立不同材质、不同形状以及不同运动状态下的目标反射、辐射光学模型。通常将材质属性的空间分布状态与几何模型绑定,光学属性和热力学属性通过物理原理模型描述,同时提供热力学计算工具和真实材质光学特性测量数据。进而建立表征目标三维几何以及各种行为动作的一体化模型,并设定目标表面的辐射特性与反射特性等光学特性参数。

(2) 确定成像时刻 RSO 和观测平台的位置。根据搭载传感器的卫星时空信息、目标模型及其轨道参数,结合光学系统视轴指向,计算成像时刻 RSO 和观测平台的位置。再利用太阳、RSO 和观测平台三者之间的相对位置关系,给出特定时刻星载传感器成像的空间覆盖范围与范围内目标的可见性,从而设定成像场景。

(3) 点扩散函数 (PSF) 建模。PSF 建模时要考虑衍射、像差、光学漫射和运动模糊等多种影响因素。通过成像系统的光学参数(光谱波段、光学系统焦距 f 、视场角 FOV、像差系数、成像分辨率、光强透过率等)计算光学 PSF;同时,采用自研或第三方的动力学仿真工具实现成像场景位姿运动状态仿真,并根据观测平台与空间目标的相对运动,建立运动模糊模型。基于光学 PSF 和运动模糊模型,解算出合成的 PSF。结合传感器参数(像元尺寸、量子效率、噪声特征等)建立光电载荷的初步成像计算模型。

(4) 确定成像场景中的背景恒星。依据星表计算成像视场内星空背景恒星的精确位置、星等和轨道等参数,支持实时光照、反射仿真计算。

(5) 模拟恒星和卫星条(streak)。在恒星跟踪模式(sidereal tracking mode)下,恒星作为点源出现,卫星作为细长条出现。在速率跟踪模式(rate tracking mode)下,情况则与之相反。当模拟恒星

和卫星条时,利用它们的第二赤道坐标(赤经,赤纬)及图像的世界坐标,将其转换为像素坐标。

(6) 点扩散函数卷积。利用模型化的点扩散函数通过卷积运算得到像素坐标对应的强度分布,即像素坐标与灰度值。对于卫星条,其点扩散函数的卷积与像元停延时间相关,运用 FFTW 快速傅立叶变换开源软件库,最终得到到达每一像元的原始光电子数。

(7) 添加噪声。在计算出每个像元处的原始光电子后,向其添加探测器噪声(光子散粒噪声、读出噪声和暗电流噪声)和空间辐射命中噪声等。光子散粒噪声按照泊松分布生成;暗电流和读出噪声可按照正态分布计算生成;空间辐射命中噪声则根据太空辐射参数确定,包括用户可选择的球形角分布、探测器厚度、电子沉积速率和高能粒子每秒命中探测器的次数。

(8) 生成恒星和 RSO 的数字化图像。光电探测器模型包括 CCD 和 CMOS 两种读出结构。CMOS 没有电荷转移效应,其像素信号可直接读出。对于 CCD 探测器,需模拟电荷转移效应,通过融合系统增益设置、饱和度极限等参数,计算生成最终的 RSO 整数或浮点型传感器图像数据。

3 研究进展

3.1 国外研究进展

最早在空间态势感知仿真领域开展相关研究工作的国家是美国,已取得了显著成果。美国首先在激光与光学成像仿真领域形成了商业化的仿真工具软件,例如,美国空军实验室 1992 年开发的动能武器高级跟踪时域分析仿真软件 TASAT (Time-domain Analysis Simulation for Advanced Tracking)^[2-3]、波音公司 2001 年为激光武器仿真开发的卫星可视化与识别标志工具 SVST(Satellite Visualization and Signature Tools)^[4]、AGI 公司 2010 年发布的卫星仿真工具包 STK 9.2.1 中的光电红外传感器模块 EOIR (Electro-optical Infrared Sensor)^[5]等。在 STK (Satellite Tool Kit) 中,由太空动力学实验室开发的 EOIR 模块覆盖了从紫外到红外的波段,能够设定导弹、卫星等目标材质和形状参数,仿真分析多种平台光电有效载荷的探测、跟踪与成像性能,已成为开

发空间态势感知数据仿真软件的常用工具。

为了模拟传感器对卫星和空间碎片的跟踪,提高科学家轨道知识的准确性以减轻轨道碰撞和由此产生的空间碎片,美国劳伦斯利莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)2008年着手开发空间态势感知试验台环境(Test-bed Environment for Space Situational Awareness, TESSA)模拟器,对卫星、空间碎片以及用于观测和跟踪的光学和雷达传感器进行仿真,包括使用卫星当前位置和速度预测卫星未来位置、根据传感器数据确定RSO轨道、发现新的轨道物体、预测近距离接近、确定碰撞概率、对各种传感器建模以及对碎片产生过程建模等^[6]。TESSA建模仿真与可视化总体架构如图1所示。其建模和仿真框架包括卫星拦截和碎片生成的流体动力学模型、轨道传播算法、雷达截面计算、光学亮度计算、雷达系统模型、光学系统模型、目标探测算法、定轨算法、仿真分析和可视化工具等^[7]。2011年,LLNL给出了TESSA中的光学传感器建模方法^[8],并详细描述了图像生成和图像处理过程,其中PSF建模直接采用了包括衍射、像差、大气模糊、光学漫射等各种效应的Sky-Maker代码^[9]。TESSA光学成像模拟器使人们能够将传感器设置在不同地面位置或太空轨道上进行实验,并根据调度约束、任务模式等评估其性能。TESSA的传感器模块模拟的是传感器的物理特性,不依赖于统计或经验模型。因此,用户只需在配置文件中设置一些物理参数,就可以准确地模拟几乎任何新型雷达或望远镜。

TESSA还被用于演示新的实验算法,包括检测轨道物体之间近距离接近的高性能模块、计算碰撞可能性的方法以及快速定位机动卫星的方法。通过TESSA成功激发了部署廉价小型卫星星座来追踪轨道碎片的相关研究工作。

美国鲍尔航空航天公司(Ball Aerospace)于2017年介绍了正在开发的、通过生成真实任务场景来支持SSA的高保真建模仿真工具PROXORTM。该工具可在实际SSA、交会和抵近操作场景中对一个或多个传感器和多个RSO的轨道运动、姿态控制、辐射测量和焦平面图像进行建模,用于支持空间任务体系星座架构研究、新能力(算法)开发、当前和未来能力的性能分析和任务性能预测。PROXORTM基于准确模拟RSO模型、观测

几何学、成像光学、传感探测器和环境条件的所有方面的能力,增强了任务场景模型和生成的任务图像数据的真实性。依据卫星表面实际材料特性的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF),进行精确辐射测量建模,并使用光线跟踪渲染目标卫星的二维视图和三维CAD模型。还开发了一个LiDAR模型,支持RSO上三维信息的重建^[1]。图2是基于数字化传感器数据生成单帧图像的PROXORTM功能框图。

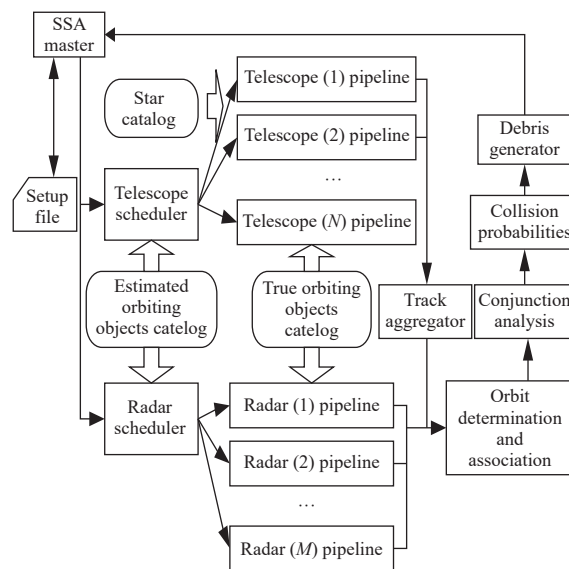


图 1 TESSA 架构

Fig. 1 TESSA architecture

2019年,Ball Aerospace在第35届太空研讨会上汇报了PROXORTM的研究进展^[10]。PROXORTM已经成熟,可以准确表示真实的卫星图像,用于表征和在短时间内准确估计任务性能。为了生成实时或准实时的场景,得到几分钟到几小时的场景任务数据,Ball Aerospace将大部分代码都驻留在GPU上,用C++编译语言取代Matlab脚本语言构建代码的目标区域,开发了新版天基高保真基于时间的仿真工具RT-PROXORTM,执行速度比PROXORTM提高了至少300倍,其快速模拟的重点是以高效的方式支持端对端(end-to-end)软件和硬件测试,允许运行数百个长时任务场景,为开发和测试提供逼真的数据,确保在开发工作早期开发出鲁棒的SSA算法。研究成果:2048×2048图像格式的场景对于多恒星内核的帧频为1-6帧/秒,对于固定恒星内核的帧频为3-7帧/秒,预期未来图像帧频应达到典型值4-30帧/秒。RT-

PROXOR™以可见光成像为主,但也可以在选定的短波、中波和长波红外下渲染。该仿真工具具有长任务周期内以良好的保真度快速生成准实

时/实时图像的能力,可作为更大的端对端任务级分析工具的组成部分,在评估和预测任务性能方面发挥宝贵作用。

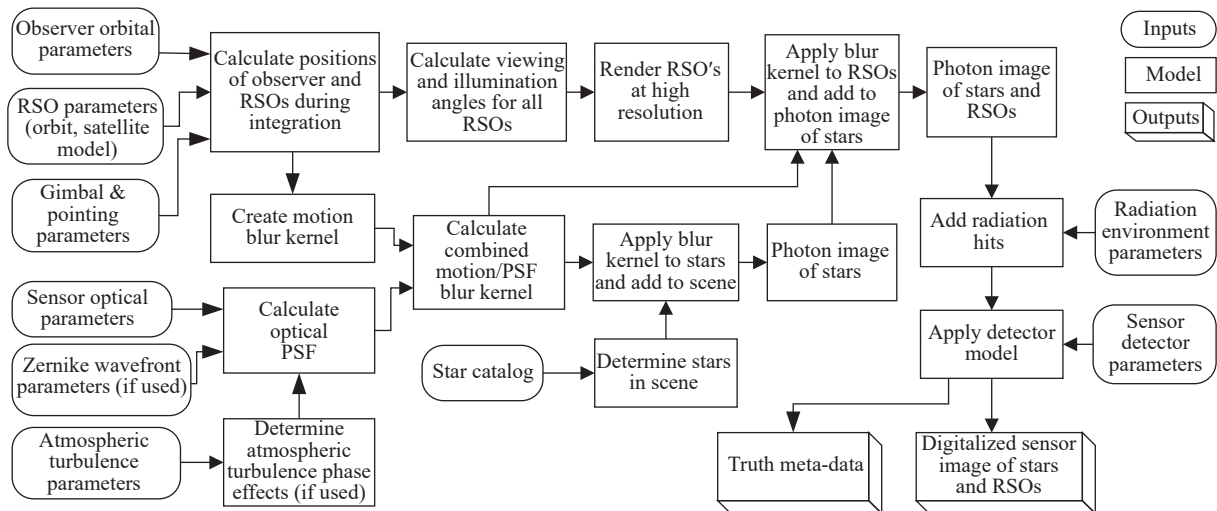


图 2 基于数字化传感器数据生成单帧图像的 PROXOR™功能框图

Fig. 2 PROXOR™ block diagram showing the production of a single image frame of digitized sensor data

为了实现 SSA 卫星表征的自动化,美国 NASA-SGT 和 L3 Applied Defense Solutions 公司与其它两个大学合作,使用有监督分类、无监督聚类和有监督神经网络的机器学习方法对卫星数据进行建模。其中,监督模型被用于确定卫星稳定性,无监督技术通过地理空间定位、异常行为和机动的检测,使人们可以对卫星特征深入了解。使用递归神经网络(RNN)的深度学习预测卫星随时间的顺序机动^[11]。

自 2011 年以来,法国空客防务与航天公司(Airbus Defence and Space)一直致力于开发一款精确灵活的图像仿真软件 SurRender。SurRender 可以为太空场景渲染出具有高度代表性的逼真图像。该软件使用光线追踪来模拟由行星、卫星、小行星、恒星和航天器组成的场景视图,根据用户定义的 PSF,考虑照明条件和成像相机的特性,可以在大型虚拟文件中访问纹理,也可以使用程序生成纹理。SurRender 针对不同目标使用不同的 BRDF 模型,可以模拟不同类型传感器(可见光、LiDAR 等)生成的空间物体图像^[12],用于太空探索任务中航天器基于视觉的导航算法的开发和验证等。2021 年,空客公布的软件 SurRender v7 版本,其太空图像模拟器功能已非常强大。文献 [13] 利用该软件模拟了一个处于交会阶段的

复杂航天器,并将仿真图像与相应的真实图像进行对比,结果验证了 SurRender 软件对航天器的几何和相对辐射测量的准确性及其高逼真度 RSO 图像仿真能力。

加拿大麦哲伦宇航公司(Magellan Aerospace)和约克大学(York University)对商业级恒星敏感器拍摄的 RSO 图像进行建模和仿真模拟,用于验证训练分析和机器学习算法,并证明了使用低分辨率在轨图像进行 RSO 检测的可行性^[14]。2021 年,约克大学开发了天基光学图像仿真器 SBOIS,基于传播和射线跟踪模型及 GPU,生成了 RSO 的红外图像,用于识别、跟踪、表征和人工智能算法等应用。SBOIS 仿真器生成的恒星和 RSO 的精度(与真实图像相比)与 AGI 公司的 STK-EOIR 大致相同,并且利用并行处理方法在计算速度上提高了一个数量级^[15]。随后一年,又提出了光曲线反演建模方法,用来估计 RSO 的形状、姿态和光学特性^[16]。

英国邓迪大学(The University of Dundee)2019 年为欧空局开发了行星和小行星自然场景生成实用软件包 PANGU(Planet and Asteroid Natural Scene Generation Utility),可实现星载视觉和 LiDAR 制导传感器的逼真模拟,帮助测试和验证自主航天器任务的抵近和着陆。它使用自定义的基于 GPU

的渲染器实时生成行星和小行星的逼真、高质量合成图像,其中包括可参数化的相机模型。PANGU 支持 SPICE 星历系统,方便提供太阳系和选定航天器的历史和未来星历表,包括标准朗伯漫反射模型以及 Hapke、Oren-Nayar、Blinn-Phong 和 Cook-Torrance BRDF 等模型。PANGU 的功能和模拟图像的真实性已经得到了广泛的验证^[17]。

芬兰阿尔托大学(Aalto University)和爱沙尼亚塔尔图大学(University of Tartu)2022 年开发了一种名为 SISPO(Space Imaging Simulator for Proximity Operations)的基于物理的成像模拟器环境。SISPO 可以仿真轨迹、光参数和相机的内在参数,主要目标是通过更好的模拟来表征成像仪器的性能,帮助任务规划和开发计算机视觉算法,从而支持小航天器空间任务设计^[18]。

澳大利亚悉尼大学(the University of Sydney)和新南威尔士大学(University of New South Wales)2023 年基于深度卷积神经网络(DCNN),设计了一种新的用于 RSO 检测的仿真增强基准构架(SAB-RSOD),开发了一个高保真度 RSO 模拟器,可生成各种 RSO 图像并自动对其进行注释。首次使用真实世界的 Swarm 恒星敏感器图像来训练 DCNN,并对高保真模拟器模拟的图像进行增强,证明了将强大的基于深度学习的目标检测算法应用于 RSO 检测任务的可行性,为 SSA 的目标检测提供了新的解决方案^[19]。

3.2 国内研究进展

我国目前暂未全面开展系统性的 SSA 数据仿真工作,但在空间目标光学成像这个 SSA 要素的仿真研究方面,已开展了较多研究工作,并取得一定成果。

空间目标光学特性模型作为空间目标成像仿真系统的基本功能模块,受到普遍关注。空间目标光学特性包括不同时间、不同空间位置下,目标在空间环境中对阳光、天地背景辐射的空间散射强度分布和光谱分布。国内对空间目标光学特性的研究包括目标的红外辐射特性、可见光散射特性、激光散射特性、紫外散射特性和偏振特性研究^[20-28]。通常综合考虑目标的背景辐射环境、表面材料属性、几何结构尺寸、运行轨道要素等,通过区域分解与面元划分对目标表面进行有限元分析和矢量坐标变换,利用双向反射率分布函数

建立目标光学散射特性的数学模型^[22]。对于空间目标红外动态辐射特性,还要根据能量守恒定律,利用目标在宇宙空间的热平衡方程建立空间目标自身红外辐射特性的数学模型^[24]。

国内空间目标成像仿真除了文献 [29] 介绍的早期在天基激光成像、可见光成像和主被动复合成像探测仿真方面的研究成果外,后续也有研究机构相继开展了一些研究工作^[30-36]。

为解决天基监测系统光学图像难以获取问题,北京航空航天大学^[30]、中国科学院上海技术物理研究所^[31]、哈尔滨工业大学^[32]等单位分别建立了天基可见光相机成像仿真系统。利用 STK、卫星 3D 模型和恒星目录生成的数据,在 OpenGL 或 Simulink 中渲染成像场景,生成了用于不同场合的图像。

为了给空间目标识别提供依据,北京航天控制中心等单位 2015 年针对复杂空间目标近距离可见光成像检测,利用基于 OpenGL 和 3ds 目标模型的像素法,研究了空间光学成像的基本过程。将像素法与 BRDF 相结合,初步解决了对复杂卫星的可见光散射特性和成像特性进行精确建模问题,为天基目标识别技术的研究提供了大量的图像实例^[33]。

哈尔滨工业大学张岩团队对空间目标导航相机的数字成像仿真方法进行了建模研究,通过 OptiX 引擎 CUDA 程序设计了数字成像仿真程序,并通过实验验证了成像质量与实时性^[34]。

北京空间机电研究所等单位 2022 年提出了一种 SSA 空间目标成像仿真系统,可以模拟不同太阳光照条件下,从不同的连续变化视角观察空间目标物体所获得的图像,为天基目标探测、识别和分析技术的研究和测试提供输入数据。该系统主要由透视运动建模、场景渲染和图像后处理等模块组成。基于四元数插值方法实现了运动生成模块。通过开源高性能三维图形工具包(OSG)实现三维模型数据库和三维模型可视化。场景渲染模块使用视觉持久性光线跟踪器(POV Ray)或 OSG 来实现光线追踪渲染^[35]。

中国科学院大学狄荣育研究了基于 PBRT 渲染器的空间伴飞目标多光谱成像仿真技术,提出基于探测器光谱响应的空间目标多光谱成像仿真方法,开发了空间伴飞目标成像仿真系统。将

仿真图像与真实空间伴飞任务中获取的光学相机实拍图像进行一致性定量评估,得到的辐射一致性为 95.78%、分辨率相似度为 97.54%、几何畸变相似度为 96.93%,验证了仿真结果的有效性及其准确性^[36]。

3.3 国内外研究差距

国内外在 SSA 数据仿真研究方面的差距较大,我国的重大不足是至今尚未开展像 PROXOR™和 RT-PROXOR™那样的系统性 SSA 数据仿真软件的开发工作,无法为空间态势感知提供全面的数据支持。单就空间目标光学成像研究而言,我国也还没有开发出类似国外 STK EOIR 那样被广泛认可的实用化仿真软件。而且,对于 RSO 成像,与国外相比,我国在以下几方面还存在较大差距。

(1) 成像的准实时/实时性

国内在成像实时性方面的研究较少,且仅在小像素序列图像上做了简单实验验证,有待于针对较大焦平面尺寸图像和复杂任务场景进行全面深入的验证与评估。美国鲍尔航空航天公司开发的 RT-PROXOR™天基高保真实时 SSA 仿真工具^[10]和加拿大约克大学研发的 SBOIS 天基光学图像仿真器^[15]等,都在实时性方面做了大量工作,对多种焦平面尺寸图像采用 GPU 体系结构和并行高性能计算处理等方法,以跨越数量级的级别提高了执行速度;同时,根据不同应用场景在帧频与可接受的保真度之间进行权衡,以满足不同应用的准实时/实时 SSA 的仿真要求。

(2) 算法鲁棒性的测试和验证能力

国内空间目标光学成像软件能得到短时序图像,但生成长时(几分钟到几小时)图像的能力欠缺,不能更好地支持 SSA 算法的开发、测试与验证。相比之下,鲍尔航空航天公司长时间致力于长时任务场景图像生成功能的开发,在其 SSA 仿真工具 RT-PROXOR™上形成了测试和验证算法鲁棒性的能力。

(3) 空间目标图像的逼真度

国内仿真的空间目标通常比较简单,航天器图像仅能看出简单的电池帆板、主体和天线结构,没有呈现更多复杂细节,逼真度和分辨率不高,不利于高性能算法的开发和验证。相较而言,法国 SurRender 软件能够针对不同目标使用不同

的 BRDF 模型,模拟出复杂目标的逼真图像,可更好地用于太空探索任务中航天器算法的开发和验证。

4 发展趋势

SSA 数据仿真研究的发展趋势与分析:

(1) 引入云计算确保 SSA 仿真数据的实时性

空间活动具有极高的实时性和机动性,使空间态势信息时刻都在发生变化,要求生成的 SSA 数据能够实时反映态势的变化。广义上讲,飞过太空的弹道导弹、高低轨工作卫星、废弃卫星、空间碎片以及近地空间的各类行星等都是空间态势感知的对象。复杂情况下有多个空间目标需要进行态势感知,要求传感器及时获取目标的详细特征数据和 RSO 的其他状态,这增加了数据的数量和种类,从而提出了更高的实时性要求。此外,随着空间态势的日益复杂化,对超大焦平面尺寸图像的需求也在不断增大,进一步加大了数据量,提高了对计算速度的要求。未来除了采用 GPU 和并行处理技术外,SSA 数据仿真系统需要采用云服务平台来存储数据和构建模型。云计算作为一种前沿的先进分布式处理方法,依靠灵活的存储、有效的过滤和快速的计算为 SSA 处理大数据,可大幅提高执行速度,使生成的数据能及时反映出空间态势的变化。

(2) 长时动态任务场景的建模和仿真

现有空间目标监测系统仍然存在覆盖范围不足、监测间隔长的问题。为了弥补这些不足,需要部署更多的天基 SSA 平台,并为其开发鲁棒算法,实现对卫星机动和碎片解体等威胁的快速反应。这些算法必须在数百个任务场景中进行广泛测试,包括长场景的建模和仿真。而且,针对复杂情况下的连续轨道预测、跟踪和监测能力的开发,其 SSA 算法的测试和验证也需要使用随时间推移的长时间逼真序列图像数据。可见,对长时动态任务场景进行建模和仿真,能为生成长时高保真序列图像奠定基础,支持 SSA 创新算法的开发、测试与性能验证。

(3) 多源数据融合传感器建模与仿真

天基空间监测系统的光学传感器基于不同的数据采集机制,主要由双目视觉传感器、激光雷

达、红外传感器和可见光望远镜组成。单一形式的传感器在实际 SSA 应用中都存在各自的局限性。因此,多源数据融合被开发用于多量程三维测量、目标识别、轨道跟踪和机动探测。多源数据融合可有效地融合单一形式传感器在准确性、及时性和可靠性方面的优势,不但可以避免数据冗余,还能扩展时间和空间覆盖范围,将是未来 SSA 的主流传感技术^[37]。对多源数据融合传感器进行建模与仿真,集成多个同源或异构传感器提供的局部数据,将能消除传感器之间可能的冗余和矛盾,实现对空间态势的全面和一致性评估,从而提高 SSA 预警系统的及时性、准确性和可信度。

(4) 用机器学习/深度学习方法建模

截至 2023 年 1 月,绕地球运行的被追踪卫星有 6718 颗^[38]。每颗卫星的轨道形状、大小和方向因卫星功能的不同而有所差异。由于卫星特性差异很大,分析人员很难同时监测所有卫星的行为变化。然而,机器学习的应用正在稳步提高卫星监测任务自动化的可行性^[11, 19, 39-44]。先前的研究证明了机器学习技术使用光度数据可进行卫星总线类型识别^[39]、稳定性预测^[40]、异常检测^[41]和 RSO 分类^[42-43]。通过监督学习,可实现卫星特征提取与表征^[44]。美国 NASA-SGT 等四个研究机构 2019 年研究了用机器学习对卫星行为建模的方法,并使用递归神经网络的深度学习实验揭示了卫星的可预测性。该项目为机器学习自动完成 SSA 卫星监测任务的可行性提供了初步证据^[11]。澳大利亚悉尼大学和新南威尔士大学 2023 年基于真实世界中的传感器参数,开发了一个仿真系统来模拟获取恒星和 RSO 的天基图像,他们将强大的基于深度学习的目标检测算法应用于 RSO 检测任务,证明了深度学习方法用于 SSA 目标检测的可行性^[19]。尽管机器学习/深度学习建模方法在 SSA 数据仿真中的应用仍处于起步阶段,但许多研究开始显示其潜力:将机器学习/深度学习方法用于 RSO 数据建模,有望实现空间目标检测、跟踪、识别、表征、异常行为和机动检测等功能的自动化。因此,用机器学习/深度学习方法建模,是 SSA 数据仿真的一个趋势性研究内容。

(5) SSA 任务级分析功能开发

美国 2019 年用 SDA (Space Domain Aware-

ness) 即“天域感知”一词取代 SSA,认为太空是一个作战域。随着太空利用方式从发挥信息支援功能到作战疆域的根本性改变,交会、机动变轨、抵近和离轨操作等 SSA 任务成为空间对抗活动的基础,除了 RSO 表征任务外,发现威胁、防止碰撞、避免攻击和空间资产保护成为 SSA 系统的主要任务,有些任务则需要 SSA 星座才能及时、准确地完成。为此,鲍尔航空航天公司在开发 RT-PROXOR™时,已将任务级分析功能作为端对端软件仿真和高性能算法开发环境中的关键组件融入到设计理念中,用于评估和比较潜在的任务体系(例如用于 SSA 或导弹预警的 GEO 星座与 GEO/LEO 星座)架构,提高任务成功执行的概率。可见,随着 SSA 到 SDA 概念的转变,任务级分析功能俨然是 SSA 数据仿真的一个必备功能,将在评估和预测任务性能中发挥重要作用。

5 结束语

全球空间态势感知领域正在迅速发展。空间态势感知数据仿真可解决科研人员不易获取太空真实 SSA 数据问题,为空间监测系统研制和 SSA 新算法研究提供逼真的数据,助力空间态势感知核心能力建设。目前,我国与国外在空间态势感知数据仿真研究领域的差距较大。国外较早地开展了相关研究工作,已经开发出成熟的非实时 SSA 高保真建模仿真工具(如 PROXOR™),正在完善实时天基 SSA 高保真仿真与任务级分析工具。国内尚未全面开展 SSA 数据仿真研究,仅在空间目标光学成像仿真方面开展了较多研究工作,但在成像的实时性、图像的逼真度和算法鲁棒性的测试和验证方面与国外仍存在一定差距。鉴于 SSA 数据仿真对空间监测设备和 SSA 算法的开发、测试和验证工作的重要推进作用,及其在评估和预测任务性能方面的潜能,我国迫切需要全面深入开展 SSA 数据仿真研究,提高我国的空间态势感知能力。下一步,我国需要整合国内资源,加强研究机构间的合作与数据共享,避免重复性工作,积极开展 SSA 数据仿真系统性研究。同时,把握发展趋势和方向,引入云计算、机器学习/深度学习等先进方法,针对不同 RSO,融合多源传感器的数据,构建功能齐全、保真度高

的 SSA 数据仿真软件,赶超国际先进水平,进而 促进我国从 SSA 向 SDA 技术的快速发展。

参考文献:

- [1] HAGERTY S P, ELLIS JR H B. An innovative, high fidelity approach to space situational awareness (SSA) data simulation [C]. *33rd Space Symposium, Technical Track*, Space Foundation, 2017: 1-13.
- [2] RIKER J F, CROCKETT G A, BRUNSON R L. Time-domain analysis simulation for advanced tracking[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1697: 297-309.
- [3] BUSH K A, CROCKETT G A, BARNARD C C. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4481: 46-57.
- [4] CROCKETT G A, BRUNSON R L. Visualization tool for advanced laser system development[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4724: 69-77.
- [5] AGI: STK EOIR for SSA[EB/OL]. (2023-02-24). <https://www.agi.com/resources/documents/eoir>.
- [6] TESSA: tracking space debris[EB/OL]. (2023-09-22). <https://computing.llnl.gov/projects/tessa-tracking-space-debris>.
- [7] OLIVIER S S. A simulation and modeling framework for space situational awareness[C]. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2008.
- [8] NIKOLAEV S. Optical modeling in testbed environment for space situational awareness (TESSA)[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): D21-D26.
- [9] BERTIN E. SkyMaker: astronomical image simulations made easy[J]. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 2009, 80: 422-428.
- [10] HAGERTY S P, ANSARI K. An innovative, near-real-time approach to space situational awareness (SSA) data simulation[C]. *35th Space Symposium, Technical Track*, Space Foundation, 2019: 1-18.
- [11] MITAL R, CATES K, COUGHLIN J, et al.. A machine learning approach to modeling satellite behavior[C]. *2019 IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT)*, IEEE, 2019: 62-69.
- [12] BROCHARD R, LEBRETON J, ROBIN C, et al.. Scientific image rendering for space scenes with the SurRender software[C]. *69th International Astronautical Congress (IAC)*, International Astronautical Federation (IAF), 2018: 1-11.
- [13] LEBRETON J, BROCHARD R, BAUDRY M, et al.. Image simulation for space applications with the SurRender software[J]. *11th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems*, 2021: 1-16.
- [14] CLEMENS S, LEE R, HARRISON P, et al.. Feasibility of using commercial star trackers for on-orbit resident space object detection[C]. *Proceedings of the 19th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2018: 60-68.
- [15] CLARK R, FU Y CH, DAVE S, et al.. Simulation of RSO images for space situation awareness (SSA) using parallel processing[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 7868.
- [16] CLARK R, FU Y CH, DAVE S, et al.. Resident space object (RSO) attitude and optical property estimation from space-based light curves[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 70(11): 3271-3280.
- [17] MARTIN I M, DUNSTAN M N, GESTIDO M S. Planetary surface image generation for testing future space missions with PANGU[C]. *2nd RPI Space Imaging Workshop*, Sensing, Estimation, and Automation Laboratory, Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), 2019: 1-13.
- [18] PAJUSALU M, IAKUBIVSKYI I, SCHWARZKOPF G J, et al.. SISPO: space imaging simulator for proximity operations[J]. *PLoS One*, 2022, 17(3): e0263882.
- [19] CHEN Z, YANG Y, BETTENS A, et al.. A simulation-augmented benchmarking framework for automatic RSO streak detection in single-frame space images[J]. *Acta Astronautica*, 2023: 1-27.
- [20] 韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 758-766.
HAN Y, SUN H Y. Advances in space target optical scattering character research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766. (in Chinese).
- [21] 王阳. 空间群目标的红外辐射与散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
WANG Y. *Radiation and scattering characteristics of space group targets in infrared band*[D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese).

- [22] 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 CH 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. (in Chinese).
- [23] 李文豪. 天基空间目标红外辐射特性分析与目标工作信息反演[D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
LI W H. *Analysis of space-based space target infrared characteristics and space target working condition inversion* [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese).
- [24] 汪洪源, 陈赞. 天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0504002.
WANG H Y, CHEN Y. Modeling and simulation of infrared dynamic characteristics of space-based space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0504002. (in Chinese).
- [25] 韩煜. 空间目标可见光特性的研究与仿真及其运动状态辨识[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
HAN Y. *Research and simulation on optical characteristics of space target and motion state identification* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese).
- [26] 李致廷, 刘长明, 王与焯, 等. 基于单光子探测的目标光学散射特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 20210825.
LI ZH T, LIU CH M, WANG Y Y, *et al.*. Research on optical scattering characteristics of targets based on single photon detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20210825. (in Chinese).
- [27] 牛继勇, 李范鸣. 空间目标红外偏振特性分析[J]. *红外技术*, 2015, 37(3): 200-203.
NIU J Y, LI F M. Analysis to infrared polarization characteristics of space targets[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 200-203. (in Chinese).
- [28] 王凯, 刘宏, 张修兴. 空间目标热控涂层材料偏振反射特性研究[J]. *光子学报*, 2020, 49(12): 1229003.
WANG K, LIU H, ZHANG X X. Study on polarized reflection characteristics of space object thermal control coatings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12): 1229003. (in Chinese).
- [29] 韩意, 孙华燕. 空间目标天基光学成像仿真研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3372-3378.
HAN Y, SUN H Y. Advances in space target space-based optical imaging simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3372-3378. (in Chinese).
- [30] ZHANG W, JIANG ZH G, ZHANG H P, *et al.*. Optical image simulation system for space surveillance[C]. *2013 Seventh International Conference on Image and Graphics*, IEEE, 2013: 721-726.
- [31] 许兴星, 丁雷. 基于 OpenGL 的星载可见光相机成像仿真系统[J]. *红外*, 2017, 38(7): 15-21.
XU X X, DING L. Spaceborne visible light camera imaging simulation system based on OpenGL[J]. *Infrared*, 2017, 38(7): 15-21. (in Chinese).
- [32] 卫金鸿. 天基测量相机成像建模与图像仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WEI J H. *Imaging modeling and image simulation of space-based measurement camera* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese).
- [33] HAN Y, LIN L, SUN H Y, *et al.*. Modeling the space-based optical imaging of complex space target based on the pixel method[J]. *Optik*, 2015, 126(15-16): 1474-1478.
- [34] ZHANG Y, LV L SH, YANG CH L, *et al.*. Research on digital imaging simulation method of space target navigation camera[C]. *2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, IEEE, 2021: 1643-1648.
- [35] WEN G J, XU Y, LIU CH H, *et al.*. A simulation system of space object images for space situation awareness[C]. *2022 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, IEEE, 2022: 1-6.
- [36] 狄荣育. 基于 PBRT 渲染器的空间伴飞目标多光谱成像仿真[D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2022.
DI R Y. *Simulation of multispectral imaging of space accompanying flight targets based on PBRT* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, CAS), 2022. (in Chinese).
- [37] WANG B CH, LI SH, MU J ZH, *et al.*. Research advancements in key technologies for space-based situational awareness[J]. *Space: Science & Technology*, 2022, 2022: 9802793.
- [38] UCS Satellite Database. Union of concerned scientists[EB/OL]. (2023-01-01). <https://www.ucsusa.org/resources/>

[satellite-database](#).

- [39] LANE B, POOLE M, CAMP M, *et al.*. Using machine learning for advanced anomaly detection and classification[C]. *17th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2016: 1151-1160.
- [40] DAO P, WEASENFORTH K, HOLLON J, *et al.*. Machine learning-based stability assessment and change detection for geosynchronous satellites[C]. *19th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Maui Economic Development Board, 2018: 940-953.
- [41] HUNDMAN K, CONSTANTINOU V, LAPORTE C, *et al.*. Detecting spacecraft anomalies using LSTMs and nonparametric dynamic thresholding[C]. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, ACM, 2018: 387-395.
- [42] JIA B, PHAM K D, BLASCH E, *et al.*. Space object classification using deep neural networks[C]. *2018 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 2018: 1-8.
- [43] LINARES R, FURFARO R, REDDY V. Space objects classification via light-curve measurements using deep convolutional neural networks[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2020, 67(3): 1063-1091.
- [44] KELECY T, HUSSEIN I I, MILLER K, *et al.*. Probabilistic analysis of light curves[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2019, 66(2): 142-161.

作者简介:



罗秀娟(1964—),女,江西南康人,研究员,硕士生导师,1986年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事激光成像与探测技术方面的研究。
E-mail: xj_luo@opt.ac.cn



郝伟(1979—),男,河北辛集人,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电精密测量系统、图像与信号处理、航天光学载荷总体技术等方面的研究。E-mail: haowei@opt.ac.cn