

激光主动探测空间目标的成像仿真

韩 意¹, 孙华燕², 李迎春², 唐黎明², 郭惠超¹

(1. 装备指挥技术学院研究生院, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院光电装备系, 北京 101416)

摘要: 成像仿真可为地基激光主动成像探测系统的优化设计提供参考, 为图像处理和空间目标识别算法开发奠定数据基础。介绍了国外成像仿真系统的功能和应用情况, 在具体分析激光主动探测空间目标成像仿真原理的基础上, 按照目标三维建模、目标散射特性分析、成像仿真及场景可视化四个方面, 提出了自己的激光主动探测空间目标的成像仿真思路和方法。

关键词: 成像仿真; 空间目标; 主动探测; 激光雷达

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

Imaging simulation of space object active detection system

HAN Yi¹, SUN Hua-yan², LI Ying-chun², TANG Li-ming², GUO Hui-chao¹

(1. Company of Postgraduate Management, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China;
2. Department of Photoelectric Equipment, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Image simulation is desired to provide reference for the design and optimization of ground based active detection system and to expand the amount of training data for image processing and object identification algorithms. The capabilities and applies of foreign simulation systems were introduced and the principle of simulation of active detection system was analyzed mainly in this paper. Our own idea and feasible method of simulation were put forward, and the content included space object 3D modeling, target reflection properties analyzing, imaging simulating and scene visual simulating.

Key words: imaging simulation; space object; active detection; lidar

1 引言

空间目标探测系统在空间攻防对抗中起着基础性和关键性的作用。地基激光主动成像探测系统具有测量和跟踪精度高、成像分辨率高等优点, 可用于空间目标精确定位、跟踪和特征识别。但是该系统是一项复杂的大型工程, 研发过程耗时费力。随着计算机图形学和三维可视化技术的飞速发展, 使得成像仿真技术成为解决这一问题的有效手段之一^[1]。利用成像仿真技术可以生成高可信度的空间目标激光主动成像结果, 从而预先进行成像探测性能分析、图像处理和空间目标识别算法开发, 有利于缩短研发周期, 提高试验和研制质量, 为地基激光主动探测系统的开发和优化设计提供参考和依据^[2-3]。但国外在公开报道的资料中只是介绍了激

光主动探测成像仿真的功能, 并未详细说明其仿真的依据、数学模型和实现算法。目前国内没有开展地基激光主动探测系统的成像仿真研究的公开报道。

本文介绍了国外成像仿真系统 SVST 和 TASAT 的功能和应用情况, 具体分析了激光主动探测空间目标成像仿真原理的基础上, 从目标三维建模、目标散射特性分析、成像仿真及场景可视化四个方面提出了本文的激光主动探测空间目标的成像仿真思路和方法。

2 国外成像仿真情况

国外比较重视成像仿真在空间目标地基激光主

作者简介: 韩 意(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail: hanyuxuan.han@163.com

收稿日期: 2009-05-08

动探测系统中的应用价值,开发的仿真系统已经直接应用到实际研究中。

美国波音公司开发的卫星可视化和信号工具 SVST(satellite visualization and signature tool),能够提供良好的用户操作界面和三维可视化仿真环境,仿真激光主动照明空间目标的成像结果,实现新型激光武器系统和探测系统体系结构的可视化,在较短时间内解决系统设计问题^[4]。

SVST 的主要功能有:建立各类型卫星的三维模型,建立场景中各模型的几何关系,生成实时、动态的仿真场景;使用三维浏览器查看地基探测系统视场中的目标卫星以及上行传输的三维高斯光束,直观地感知激光光照亮度、光束发散角大小以及目标卫星被激光照亮的部位;捕获三维场景画面,生成 AVI 动画;对图像和辐射度数据进行分析,输出若干种格式的仿真图像,供其他仿真和分析工具使用;使用地基激光照明、太阳光照或月光光照渲染卫星三维模型。

图1为SVST的一个仿真样例,显示了经SVST渲染处理后的高逼真度的卫星成像结果。图中左侧为仿真的地基激光主动成像图片,右侧是在太阳光照明下的卫星被动成像结果。波音公司通过成像仿真进一步验证了激光主动成像探测的技术优势,指出激光主动成像能够获得亮度更高、细节更清楚、质量更好的空间目标图像。目前,SVST已经应用到了

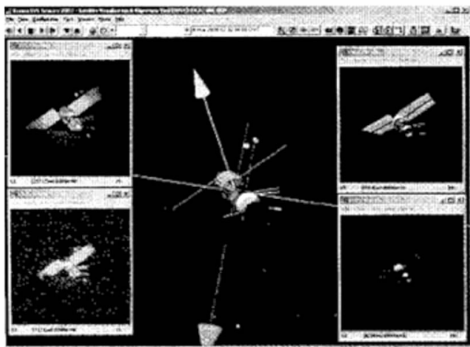


图1 SVST 成像仿真样例

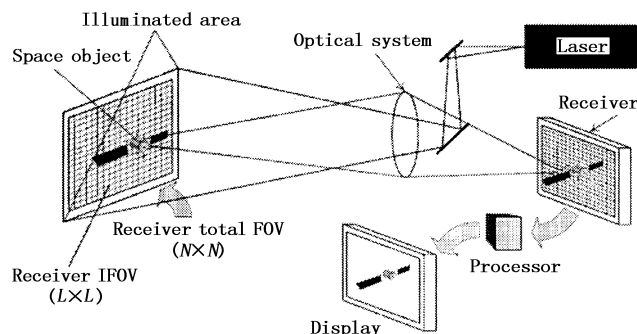


图2 主动探测系统成像几何关系

波音公司武器系统概念和设计仿真的实际研究中(如天基激光雷达等),辅助制定打击敌方卫星/导弹的作战方案。

美国空军研究实验室开发了高级跟踪时域分析仿真系统 TASAT(time-domain analysis simulation for advanced tracking),目的是高精度地仿真地基光电探测系统和动能武器系统对卫星、导弹等目标进行被动/主动式光电跟踪过程和成像过程,评估系统性能,优化系统设计^[5]。TASAT 能够仿真精确的卫星运行轨道、大气及光学系统模糊效果、传感器噪声、自适应光学的大气效应等,具有轨道/轨迹动态分析、图像渲染与生成、点扩散函数分析、图像处理算法研究、视轴干扰与控制等功能。经多次试验和外场测试,验证了 TASAT 的正确性。AFRL 也在不断扩展 TASAT 的功能,修正仿真理论模型,最终提高仿真精度。Logicon Technology Solutions 公司和波音公司利用 TASAT 详细研究了不同轨道高度卫星在被动成像和主动照明成像条件下的偏振特征参数,发现主动照明下目标的偏振特性更加明显,由此提出了在地基平台利用偏振特征对目标卫星进行识别的方法。

3 成像仿真原理

激光主动探测系统成像的几何关系如图2所示,探测系统发射激光主动照明目标,像探测器接收目标的后向散射光成像,经处理后由显示器显示^[6]。理想情况下,像探测器阵列在视轴方向上距离 R 处的总视场 FOV 及瞬时视场 IFOV 由像探测器尺寸、像元数目和尺寸决定。设像探测器尺寸为 $A \times A$,像元数目为 $M \times M$,像元尺寸为 $a \times a$,光学系统焦距为 f ,在像探测器上成像的、与 FOV 相对应的距离 R 处物空间矩形区域大小为 $N \times N$,与 IFOV 相对应的物空间矩形区域大小为 $L \times L$,则有:

$$N/R = A/f, L/R = a/f \quad (1)$$

对于噪声限定的成像系统,系统信噪比定义如下:

$$\text{SNR} = \frac{I_{\text{target}}}{\text{NEI}} \cdot \text{MTF}(F) \quad (2)$$

式中, I_{target} 为入射到像探测器上的激光照度; NEI 为探测器等效噪声辐照度; $\text{MTF}(F)$ 为成像系统在空间频率 F 处的传递函数。

设 P_i 为激光器发射功率, A_i 为目标的激光雷达散射截面, τ_s 为发射光学系统透过率, τ_r 为接收光学系统透过率, σ 为大气衰减因子, θ 为激光发散角, R 为成像系统至目标处的距离, 则像探测器上接收到的激光功率密度为:

$$P_{\text{target}} = \frac{P_i A_i \tau_s \tau_r e^{-2\sigma R}}{\pi^2 \theta^2 R^4} \quad (3)$$

设 $F_{\#}$ 为接收光学系统的 F 数, 则有:

$$I_{\text{target}} = P_{\text{target}} \cdot \frac{\pi}{4F_{\#}^2} \quad (4)$$

于是有:

$$\text{SNR} = \frac{P_i A_i \tau_s \tau_r e^{-2\sigma R}}{4\pi \theta^2 F_{\#}^2 R^4 \text{NEI}} \cdot \text{MTF}(F) \quad (5)$$

进行激光主动探测空间目标成像仿真时, 需要结合计算机图形学、科学可视化技术、三维建模技术、视景仿真技术等, 建立空间目标三维模型, 构建三维场景以模拟现实世界中的实际成像环境, 实时显示目标运行状态, 然后按照上式考虑激光器、光学系统、成像器件及大气等各环节的影响, 生成一定作用距离上具有真实信噪比和成像尺寸的传感器图像^[7]。

4 成像仿真方法

4.1 空间目标三维建模

目标三维建模有多种方法, 既可用 OpenGL, 也可用专业的建模软件。OpenGL 是最突出的三维编程工具, 是开发交互式二维和三维图形应用程序的最佳环境, 其成像机理与相机成像机理是一致的, 具有模型绘制、模型观察、颜色模式指定、光照应用、纹理映射、实时动画、交互技术等功能。但要构建一个复杂的三维物体, 使用基本的绘图语句工作量会非常大。3DS MAX 和 Creator 等专业三维建模软件能方便地建立各种复杂物体模型, 但在这些软件中无法进行程序控制, 不便于进行各种仿真实验。因此, 可以先用 OpenGL 建立简单的三维物体, 分析研究其散射特性, 再针对某一具体型号侦察卫星的图片和实际尺寸, 用专业软件建立其三维模型, 然后读入到 OpenGL 中进行交互控制, 通过对物体实施视

点/模型变换、投影变换及视口变换来确定目标的方位、姿态和成像模型参数。图 3 为不同角度的 lacrosse 卫星三维模型图。



图3 lacrosse 卫星三维模型图

4.2 目标激光散射特性分析

空间目标的激光散射特性与目标表面的几何特征和材质种类有关, 是影响主动成像系统探测和成像性能的重要因素^[8]。通常用目标的激光雷达散射截面 (LRCS) σ 来衡量目标的激光散射特性, 其表达式为:

$$\sigma = 4\pi \int_{\text{target}} \rho(x, y) dx dy = 4\pi \rho A_{\text{target}} \cos\theta \quad (6)$$

式中, $\rho(x, y)$ 为目标反射系数; A_{target} 为空间目标有效面积; θ 为激光入射角。目标对入射到它上面的激光散射能力, 与目标表面材料的种类、粗糙度以及目标的几何结构有关。在表面材料的反射特性研究中, 通常用双向反射分布函数 (BRDF) 来描述表面反射性能。

分析空间目标的激光散射特性, 首先要根据目标的几何信息建立由一系列面元组成的三维实体模型, 然后为不同表面指定相应的材质。目标的精确轨道参数和方位信息可以通过卫星仿真工具包 STK 等软件获得, 而目标的表面材质特性的建模和分析则比较困难。尽管各个卫星外形不同, 但卫星总体上可分为主体、太阳能帆板、天线等部分。需要通过内场实验研究每部分的表面结构和散射特性, 结合实验数据采用合适的 BRDF 模型, 建立各种材质的 BRDF 数据库。

4.3 成像仿真

成像仿真流程如图 4 所示, 首先根据初始参数生成初始激光高斯光束, 模拟大气衰减和大气湍流对光束传输的影响, 获得光束传输至目标处的光强分布。根据空间目标的几何信息及表面材质 BRDF 求得经目标反射后的光强分布。将结果进行归一化处理转化为 (0~255) 区间内的灰度值, 生成初始图像。根据成像系统的点扩散函数对初始图像进行卷积运算以及添加系统噪声, 模拟成像系统的 MTF 成像模糊效应及 SNR 和噪声的影响, 最终生成仿真图像。为有效兼顾仿真精度和计算速度, 参数需要进行合适的设置。

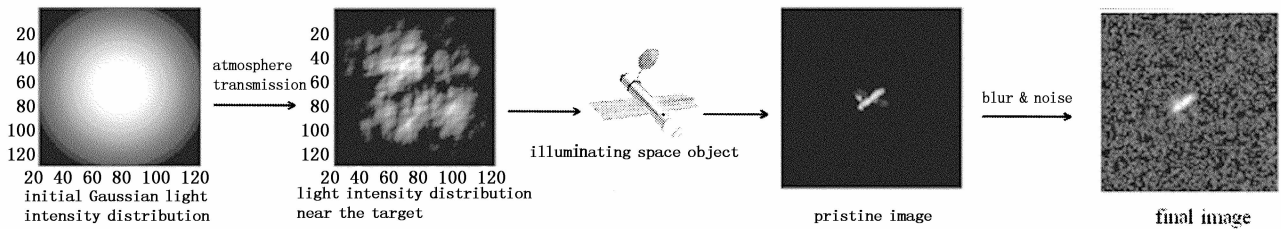


图4 成像仿真流程示意图

4.4 场景可视化

成像仿真的另一重要内容是空间场景三维可视化仿真,实时显示目标卫星的运行情况,输出某时刻卫星的方位、速度信息。当目标卫星过境时,地基主动探测系统发射脉冲激光照明目标,进行主动成像仿真。

国外卫星测控中心均有各自的卫星运行可视化仿真系统,具有三维显示、链路分析、通信分析等模块,功能强大。典型的是美国 AGI 公司开发的 STK。STK 可以快速地分析复杂的陆、海、空、天任务,能够以地球为视角中心,显示分析宏观域的态势场景,提供图表和文本形式的分析结果。可以利用 STK 的显示模块实现场景可视化,也可以利用 OpenGL 自主开发可视化软件。后者可扩展性强,能够实现所需的视觉效果,不足之处是编程实现的难度较大,建立三维场景中物体间的几何关系、高精度仿真在轨运行状况的过程比较复杂。

5 结语

随着复杂系统仿真应用需求的不断增加,数值仿真在描述成像系统建模过程和分析仿真结果方面能力不足,研究人员难以得到整体、形象、直观的仿真结果,无法及时判断与决策,甚至可能会忽略有用信息,而成像仿真则建立良好的可视化仿真环境,为用户提供交互式仿真工具,能较好地避免这些问题。本文就提供了一种激光主动探测空间目标的成像仿真初步思路与方法。

空间目标激光主动探测成像仿真具有重要的应用价值:能够实时显示典型空间目标的运行过程和激光主动照明成像结果,实现卫星轨道参数和相关数据的收集管理和分析,优化主动探测系统参数指标,有利于缩短激光主动探测系统研发周期,提高试

验和研制质量,节省资源和经费;为研究合作式、非合作式空间目标的跟踪、识别方法提供了多样性的素材和量化参数,使得图像处理算法稳定性和可靠性的测评更有说服力。因此,需要深入研究空间目标激光主动探测成像仿真实论模型和方法,进一步提高成像仿真的精度和可信度。

参考文献:

- [1] 杨平利,王建国,高有行. 虚拟仿真技术在高能激光系统研究中的应用研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(11):2686-2688.
- [2] 余德军,龚俊斌,等. 激光成像雷达成像仿真技术研究[J]. 红外与激光工程:增刊,2006,35:160-166.
- [3] 张宇,等. 直接探测激光雷达系统建模与仿真[J]. 红外与激光工程,2004,33(6):572-575.
- [4] Gregg A Crockett, Richard L Brunson. Visualization tool for advanced laser system development[C]//Proceedings of SPIE, Laser Weapons Technology,2002,4724:69-77.
- [5] Keith A Bush, et al. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: simulation predictions using the TASAT satellite model[C]//Proceedings of SPIE, Polarization Analysis, Measurement and Remote Sensing,2002,4481:46-57.
- [6] Robert J Grasso, et al. A model and simulation to predict 3D imaging LADAR sensor systems performance in real-world type environments[C]//Proceedings of SPIE, Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation,2006,6303:1-12.
- [7] Richard Espinola, et al. Modeling the target acquisition performance of active imaging systems[J]. Optical Express,2007,15(7):3816-3824.
- [8] Ove Steinvall, Tomas Carlsson. Three-dimensional laser radar modeling[C]//Proceedings of SPIE, Laser Radar Technology and Applications,2001,4377:23-34.