文章编号:1001-5078(2019)09-1100-08

·光电技术与系统 ·

# 面向监视侦查的光电探测场景仿真系统总体设计

# 于 鲲,丛明煜

(哈尔滨工业大学航天学院 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150006)

摘 要:现有仿真设计软件功能还难以满足空天地一体化光电探测系统总体设计的需求,迫切 需要开发一套光电探测场景仿真设计软件。通过对光电探测场景组成要素、探测链路与任务 模式的分析,规划了仿真系统结构、功能与关键技术,设计了面向对象的数据结构属性方法与 仿真计算流程,在 VS2010 + QT5.4 环境下开发了光电探测场景仿真系统的基础版本。给出了 美国 STSS 天基红外监视系统中段目标探测任务仿真实例计算结果和笔者团队的光电探测仿 真技术主要应用成果。

关键词:计算机仿真;光电探测;监视侦查;总体设计;成像仿真;面向对象 中图分类号:TN29 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2019.09.012

# Overall design of photodetection scene simulation system for surveillance and investigation

# YU Kun, CONG Ming-yu

(Research Center for Space Optical Engineering, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

**Abstract**: The function of the existing simulation software is not enough to support the overall design requirements of the integrated photodetection system of the world. There is an urgent need to develop a simulation design software for photodetection scenes. Through the analysis of the components of the photodetection scene, the detection link and the task model, the structure, function and key technologies of the simulation system are planned. The properties and methods of object – oriented data structure and software simulation calculation flow are designed. The photodetection scene simulation software version 1.0 is developed in VS2010 + QT5.4 environment. The calculation results of the mid-course target detection mission by the STSS space – based infrared monitoring system are given. The main application results of the photodetection simulation technology of the author team are introduced.

Keywords: computer simulation; photodetection; surveillance and investigation; over design; imaging simulation; object-oriented

# 1 引 言

应用于监视与侦查的光电探测系统定义为通过 对目标进行光电成像,并从图像中提取相关情报信 息的一种遥感成像系统<sup>[1]</sup>。该系统具有探测速度 快、测量精度高、信息容量大等优势,广泛应用于目标测量、对地遥感、导航制导等多种军事任务之中, 是 C4ISR 等现代化军事指挥系统的重要组成部 分<sup>[2]</sup>。计算机仿真设计软件是支撑现代工业工程

**作者简介:**于 鲲(1989 - ),男,博士研究生,主要从事空间光电探测场景仿真与空间视觉导航技术的研究。E-mail: yukun1107@qq. com

通讯作者:丛明煜(1964 - ),男,博士,教授,博士生导师,主要从事空间光电信息获取、测量与仿真技术的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn

收稿日期:2019-02-01;修订日期:2019-03-12

技术发展的重要基石,光电探测场景仿真设计软件 在光电探测系统的设计、试验、制造、分析、评估等阶 段均发挥着重要的作用<sup>[3]</sup>。

目前,面向监视侦查的光电探测系统主要包括: 卫星搭载平台的天基星座光电探测系统<sup>[4]</sup>,大气层 中飞行器(飞机、飞艇等)搭载平台的空基集群光电 探测系统<sup>[5]</sup>,地面监测站、水面舰船等组成的地基 网络光电探测系统<sup>[6]</sup>。光电探测系统正朝着多种 探测方式相互融合的空天地一体化探测网络方向发 展,系统结构与功能愈发复杂,迫切需要光电探测场 景仿真设计软件支撑系统的总体设计。

国外自20世纪70年代开始涉足光电探测场景 仿真领域以来,经历了四十余年的发展形成了一批 适用于不同探测系统的仿真软件,例如应用于空间 光电探测仿真的 SSGM 系统<sup>[7]</sup>和 STK/EOIR 模 块<sup>[8]</sup>,面向空中与地面光电探测场景仿真的 SE-WORKBENCH 系统<sup>[9]</sup>等。这些软件系统经过不断 的丰富与完善,已经成为行业内广泛认可的标准化 仿真分析工具。同时面向空天地融合发展的需求, 各厂商均在逐步构建各自的一体化光电探测场景仿 真平台。我国在光电探测场景仿真领域起步较晚, 主要研究工作集中于光电场景建模和基于国外成熟 软件的面向应用二次开发方面,取得了一定的应用 成果<sup>[10-11]</sup>,但还缺乏支撑空天地一体化光电探测系 统总体设计的仿真设计软件。 软件的总体设计是光电探测场景仿真系统研制 开发过程中的基础工作和首要任务,也是本文研究 工作的切入点。本文对光电探测系统的原理与组成 进行分析,采用面向对象的软件设计思想,对仿真系 统的组织结构与实现功能进行设计,对主要关键技 术进行介绍,并给出了主要数据结构与仿真流程的 详细设计方案。

#### 2 面向对象仿真系统总体设计

以天基星座光电探测系统为例,典型监视侦查 光电探测场景如图1所示。光电探测链路中的组成 要素可分为被测对象要素和探测系统要素两类,它 们共同构成了光电探测场景。被测对象要素包括探 测目标、探测背景和传输介质,探测系统要素包括探 测平台和光电载荷,要素的主要功能与典型实例如 表1所示。



图 1 天基星座光电探测场景 Fig. 1 Space-based constellation photodetection scene

Tab. 1 Thotodetection scene composition					
类别	名称	主要功能	典型实例	仿真数据结构	
被测对象	探测目标	目标有效辐射信号源	导弹、飞机、车辆、发射场	探测目标类 间接辐射源类 被测对象场景类	
	探测背景	目标外其他辐射信号源	深空恒星背景、大气临边背景、地物背景	探测背景类	
	传输介质	辐射信号传输介质	地球大气层	大气传输介质类	
探测系统	光电载荷	光电成像并进行信息处理	扫描相机、凝视相机	光电载荷类 信息处理类	
	探测平台	光电载荷的运动承载平台	卫星、飞机、飞艇、舰船、地面站、星座网络、飞行器集群	探测平台类 探测集群类	

表1 光电探测场景组成 Tab 1 Photodetection scene composition

光电探测场景仿真系统对光电探测场景与光电 探测链路进行仿真,仿真系统的总体设计工作采用 面向对象的软件设计思想<sup>[12]</sup>。通过对光电探测场 景组成要素的分析,抽象出仿真系统的数据结构类, 包括探测目标类、间接辐射源类、大气传输介质类、 探测背景类、被测对象场景类、光电载荷类、信息处 理类、探测平台类和探测集群类,类与场景要素的对 应关系详见表1所示。将光电探测链路的信号传输 过程设计为三个仿真执行流程,分别是:(1)模拟光 电探测场景辐射信号传输过程的成像视线辐射计算 流程;(2)模拟光电载荷成像过程的仿真图像计算 流程;(3)模拟光电探测系统监视侦查任务的探测 任务仿真流程。

仿真系统的主要功能包括:(1)能够对仿真场 景中的要素组成与属性参数进行想定设计,形成不 同的仿真探测任务组合的仿真场景建模功能;(2) 基于不同的仿真任务组合,开展光电探测数字仿真 试验计算,获得多维度仿真试验数据的仿真任务计 算功能;(3)基于仿真试验,支撑光电系统探测性能 和目标隐身能力评估与设计的仿真结果分析功能; (4)作为数字仿真源应用于半实物仿真试验联调联 试任务中的半实物仿真功能。

仿真系统涉及的主要关键技术包括:(1)包含 自发射、反射、透射等光学特性的目标辐射建模技 术<sup>[13-15]</sup>;(2)临边背景与地球背景辐射特性的测量 数据反演与建模仿真技术<sup>[16-17]</sup>;(3)基于光线跟 踪<sup>[18]</sup>或光栅渲染<sup>[19]</sup>方法的仿真成像渲染技术;(4) 针对目标检测、识别与导航的测量信息处理技术; (5)空天地一体化仿真运动场景建模技术。

## 3 仿真系统数据结构与流程设计

3.1 被测对象要素类设计

被测对象要素类包括探测目标类、间接辐射源 类、大气传输介质类、探测背景类和被测对象场景 类,它们的属性方法及相互关系如图2所示。



Fig. 2 The structure of the detected object classes

(1)探测目标类

探测目标类对光电探测任务中的重点探测目标 进行抽象,其主要属性包括位置、姿态、三维几何结 构和辐射特性分布。位置和姿态属性描述目标在仿 真空间中的运动状态,表示方式有解析函数模型或 离散数据模型。探测目标三维几何结构属性采用离 散化面元几何模型表示,每个面元的属性包括形状、 位置、方向等。辐射特性属性由自发射、反射、透射 三种属性叠加构成,依附于三维几何结构属性。

类的方法包括位置解算、姿态解算、相交位置计 算与辐射强度计算。其中位置解算和姿态解算方法 获取目标对象的实时运动状态。相交位置计算方法 用于成像视线与目标几何结构相交判断。辐射强度 计算方法计算相交点处目标辐射信号强度。

(2)间接辐射源类

视场外照射到探测目标的辐射源用间接辐射源 类抽象。其主要属性包括位置、尺寸、辐射方向分布 和辐射强度分布,复杂辐射源模型中的辐射强度分 布还与时间、光谱及空间位置相关。常用的间接辐 射源派生实例包括点光源、平行光源等,光电探测场 景中的太阳辐射一般采用平行光源模拟。间接辐射 源类提供辐射光源计算方法,用于仿真照射目标区 域的辐射信号强度与方向。

(3)大气传输介质类

大气传输介质类仿真地球大气的传输介质效 应,通过类的透过率计算方法实现大气吸收作用的 仿真计算。类的属性中包含支撑透过率计算的大气 温度分布、气压分布、气体分子组份分布等大气模型 数据。

#### (4) 探测背景类

光电探测场景中的地球背景、临边大气背景和 深空恒星背景统一采用探测背景类仿真,通过辐射 强度计算方法提供背景辐射信号强度信息。类的属 性通常包含地球背景辐射分布数据、临边大气辐射 分布数据与恒星分布星表数据,大量数据通常采用 文件系统或数据库进行检索管理。

(5) 被测对象场景类

被测对象场景类对所有被测对象要素实例进行 封装,其属性包含探测目标实例容器、间接辐射源实 例容器、大气传输介质实例和探测背景实例。类的 辐射强度计算方法是探测链路仿真中成像视线辐射 计算流程的接口,方法输入成像视线的空间方向,输 出被测场景发射的辐射信号强度。

3.2 探测系统要素类设计

探测系统要素类包括光电载荷类、信息处理类、 探测平台类和探测集群类,它们的属性方法及相互 关系如图3所示。



图 5 抹侧系统安系矢组织印构

Fig. 3 The structure of the detection system classes

#### (1)光电载荷类

光电载荷类的属性与光电探测器组成结构对 应,包括视线指向、光学系统、焦面探测器和信号处 理电路<sup>[20]</sup>。视线指向属性仿真视场方向的变化状态,派生凝视与扫描等不同指向模型。几何成像模 型通过光学系统属性和焦面探测器属性仿真,光学 系统调制模型通过光学系统属性仿真,采样调制模 型通过焦面探测器属性仿真,信号传递模型、处理电 路调制模型和噪声模型通过信号处理电路属性 仿真。

类的方法包括视线指向解算方法、视线指向模 型调整方法和仿真图像计算方法。视线指向模型调 整方法应用于实时目标跟踪等类型任务中,实现对 视线指向属性模型参数的修正。仿真图像计算方法 对探测链路仿真中的仿真图像计算流程进行封装, 根据输入的光电载荷空间状态对被测对象场景进行 仿真成像计算,输出测量仿真图像。

(2)信息处理类

信息处理类仿真信息处理单元,根据不同的信息

处理需求通常派生为图像信息处理类和综合信息处理 类两个子类,如图3所示。其中图像信息处理子类对 应在轨图像信息处理阶段,典型实例如目标检测与目 标提取;综合信息处理子类对应组网多维信息综合处 理工作,典型实例如目标交汇测量和轨迹预报等。

(3) 探测平台类

卫星、飞行器、地面站等运动平台在仿真系统中 抽象为探测平台类,其属性包括位置、姿态、光电载 荷容器和图像信息处理实例。类的位置模型调整方 法和姿态模型调整方法用于实时目标跟踪类型任务 的仿真。类的成像探测计算方法对探测平台的光电 成像测量过程封装,方法以探测平台为单位对被测 场景进行仿真成像并实现在轨图像信息处理,输出 目标形态、目标强度等单平台光电探测处理结果。

(4) 探测集群类

多个探测平台实例构成的探测集群网络采用探 测集群类仿真,类的属性包括配置集群工作模式的 探测任务调度模型、存储探测平台实例的探测平台 容器、进行多维数据处理的综合信息处理实例和成 像仿真所需的被测对象场景索引。类的探测任务仿 真计算方法对整个探测链路仿真流程进行封装,方 法对光电探测任务的全过程进行仿真计算,输出仿 真测量图像和各级数据处理结果。

3.3 探测链路仿真流程设计

(1)成像视线辐射计算流程

成像视线辐射计算流程仿真被测场景的辐射信 号传输过程,通过被测对象场景类的辐射强度计算 方法接口进行调用,计算流程如图4所示。



图 4 成像视线辐射计算流程

Fig. 4 Line of sight radiation calculation process

计算过程首先通过调用相交位置计算方法判断

视线成像区域类型。若相交则进行目标出射辐射强度计算,然后仿真大气传输的衰减过程,得到探测目标区域的入瞳辐射信号强度。若不相交则直接计算探测背景区域的入瞳辐射信号强度。

(2) 仿真图像计算流程

仿真图像计算流程仿真光电载荷的辐射信号成像过程,通过光电载荷类的仿真图像计算方法接口进行调用,其中的像素着色渲染环节调用成像视线辐射计算流程实现,如图5所示。



图5 仿真图像计算流程

Fig. 5 Simulation image calculation process

计算过程首先对通过动力学解算确定几何成像 视场区域。然后根据光电载荷成像模型对像素成像 视线进行辐射计算渲染。最后,采用信号传递模型 实现灰度值转换,采用图像调制模型进行成像质量 仿真,采用噪声模型叠加光电探测噪声,最终输出仿 真测量图像。

(3)探测任务仿真流程

探测任务仿真流程对面向监视侦查的光电探测 任务全过程进行仿真,包含单平台独立成像测量过 程和探测集群网络综合探测过程。该流程通过探测 集群类的探测任务仿真计算方法接口进行调用,仿 真流程如图6所示。

仿真场景中的所有对象实例初始化后,通过推 进仿真时钟的运行进行仿真任务计算。首先对单平 台实例进行成像探测仿真计算,过程包括光电载荷 测量图像仿真和在轨数据处理。接着将多探测平台 处理结果汇总进行综合信息处理,获得更高级的组 网探测结果,并将各阶段仿真计算结果输出。最后 将探测结果作为反馈参数输入任务调度模型实现状 态修正。



图6 探测任务仿真流程

#### Fig. 6 Photodetection task simulation process

#### 4 仿真系统应用实例与成果

基于光电探测场景仿真系统的总体设计框架, 针对天基红外监视场景开展光电探测场景仿真系统 软件基础版本的研制工作。软件基于 VS2010 + QT5.4 平台开发,采用分布式系统结构,各节点间通 过 TCP 网络通信方式控制与交互,主要工作节点包 括主控节点、成像仿真计算节点、目标仿真计算节点 和背景仿真计算节点,如图 7 所示。



图 7 软件系统节点配置 Fig. 7 Software nodes configuration

主控节点进行软件系统总体控制,存储仿真场 景对象实例,实现软件交互操作、仿真场景配置、仿 真流程驱动、探测集群综合信息处理等大部分功能, 如图 8 所示。其中的仿真系统场景构建、位姿解算 模型与三维视景显示功能调用 STK 仿真软件中的 相应模块实现,调用方式采用更为高效的 STK – COM 形式。其他分布式节点对复杂计算步骤实现 独立高速处理,目标仿真计算节点用于目标辐射信 号强度计算,背景仿真计算节点用于背景辐射信号 强度与大气透过率计算,成像仿真计算节点用于光 电载荷成像仿真与图像信息处理计算。



图 8 主控节点软件界面 Fig. 8 Software interface of the master node

数据结构实现方面,软件系统的被测对象要素 类由探测目标类、探测背景类和大气传输介质类构 成。其中探测目标类的属性包括轨迹、姿态、目标几 何结构和红外辐射强度分布;探测背景类包含地球 大气背景红外辐射分布、临边大气背景红外辐射分 布和红外恒星星表数据。探测系统要素类包括扫描 相机类与凝视相机类、探测卫星类和探测星座类,分 别对应总体设计框架中的光电载荷类、探测平台类 和探测集群类。信息处理类包括用于目标检测与跟 踪测量的在轨图像信息处理类和用于组网目标交汇 定位与轨迹预报的地面综合信息处理类。

4.1 STSS 中段红外监视仿真计算实例

针对美国新一代 STSS 天基红外监视系统的中 段目标探测过程进行仿真计算,对软件系统的功 能进行验证。探测星座系统由均匀分布在四个轨 道面的 24 颗太阳同步轨道测量卫星构成,轨道高 度约为 1300 km<sup>[21]</sup>。每颗卫星上搭载一台长波红 外凝视相机用于中段目标探测与跟踪,相机参数 见表 2<sup>[22]</sup>。

表 2 STSS 长波红外凝视相机参数

Tab. 2 Parameters of STSS long wave

infrared sta	are camera
--------------	------------

参数	取值
像元分辨率	400 × 400
像元尺寸/μm	30 × 30
探测谱段/μm	6. 0 ~ 13. 0
焦距/mm	450
<i>F</i> 数	2.0
积分时间/ms	15
工作温度/K	40

仿真中段目标的表面温度为 500 K,投影面积 为5 m<sup>2</sup>,目标的飞行高度在 80~200 km 之间。软件 仿真计算获得长波红外相机测量图像的目标轨迹叠 加情况如图 9 所示,探测过程中目标信噪比随飞行 高度的变化情况如图 10 所示,星座组网交汇测量的 目标位置测量误差数据如图 11 所示。



图9 仿真测量图像目标轨迹叠加图





图 10 日你信唻比随 C11 同度的受化 Fig. 10 Target SNR varies with flight altitude





4.2 主要应用成果

此外,笔者所在科研团队在光电探测场景仿真 技术集成应用方面开展了大量研究工作,形成的仿 真应用实例与关键技术成果都对光电探测场景仿真 系统的总体设计与研制工作提供了有效支撑。

(1)应用于空间目标导航相机注入式仿真测试 的电模拟成像仿真系统。系统对空间目标的几何结 构与 BRDF 反射特性建模,采用光线追迹方法实现 了深空背景空间目标可见光图像仿真,并研制出数 字模拟源。

(2)红外背景遥感图像处理与分析。对红外背 景测量图像数据进行定量化处理与评估。并以此为 基础对探测背景环境的红外辐射特性分布规律进行 统计分析,形成背景红外辐射特性数据库和图像快 速仿真方法。

(3)天基光电探测能力分析系统。对天基光电 探测场景进行建模,应用目标与背景辐射经验模型 对目标探测信噪比状态进行仿真。系统能够对大气 衰减效应、光学系统调制、探测器噪声等多种影响因 素进行建模,并实现目标的发现时间、探测概率、探 测距离等评价指标的计算与分析。

(4)空间目标视觉导航地面仿真系统。构建空间目标视觉导航场景地面半实物仿真系统,采用实物缩比模型进行单目和双目视觉导航试验。设计并 实现了双目相机非合作目标视觉导航算法和手眼相 机抓捕导航算法。

#### 5 结 论

现有光电探测场景仿真工具软件的研发水平还 难以对空天地一体化光电探测系统研制全过程实现 有效支撑,为此本文提出一种仿真系统总体设计思 路与方法。采用面向对象的软件设计思想,分析光 电探测场景与光电探测链路,整合场景中的探测集 群、探测平台、光电载荷及被测目标背景模型。通过 理解与抽象构建空天地一体化光电探测场景仿真软 件的基本架构,对系统的数据结构、计算流程和实现 功能进行详细设计。采用分布式架构实现了目标红 外成像测量与定位预报的仿真计算分析功能,基于 VS2010 + QT5.4 平台研制出光电探测场景仿真软 件的基础版本。本文形成的总体设计方案与仿真系 统软件成果在下一步工作中还需不断进行完善,希 望对我国光电探测系统仿真设计软件的发展提供一 定的参考与借鉴。

## 参考文献:

- LEVIS A H, WAGENHALS L W. C4ISR architectures: I. Developing a process for C4ISR architecture design [J]. Systems Engineering, 2000, 3(4):225 - 247.
- [3] WANG Xia, WANG Hao, XU Chao, et al. Overview on development of infrared scene simulation[J]. Infrared Technology, 2015, 37(7):537-543. (in Chinese)
  王霞,汪昊, 徐超, 等. 红外场景仿真技术发展综述
  [J]. 红外技术, 2015, 37(7):537-543.
- [4] SLATTERY J E, COOLEY P R. Space-based infrared satellite system(SBIRS) requirements management[C]//Aerospace Conference, 1998.
- [5] YANG Hong, ZHANG Yasheng, DING Wenzhe. Detectability of airship infrared detection system to hypersonic vehicle[J]. Chinese Optics, 2016,9(5):596-605. (in Chinese)
  杨虹,张雅声,丁文哲. 飞艇红外探测系统探测高超声 速目标性能研究[J]. 中国光学, 2016,9(5):596-605.
- [6] WANG Jianli. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-based E-O system [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015,34(6):489-499. (in Chinese)
  王建立.空间目标地基光电探测与识别技术的发展 [J].飞行器测控学报,2015,34(6):489-499.
- [7] Wilcoxen B A, Heckathorn H M. Synthetic scene generation model (SSGM R7.0) [J]//Proceeding of SPIE, 1996,2742:300 316.
- [8] ZHOU Haijun,LI Zhi,LI Xuejun. Study of infrared radiation characteristics of midcourse ballistic targets based on STK/EOIR[J]. Infrared, 2017, 38(2):21 - 25,48. (in Chinese) 周海俊,李智,李学军. 基于 STK/EOIR 的弹道中段目 标红外辐射特性研究[J]. 红外,2017,38(2):21 - 25,48.
- [9] LE G A, CATHALA T, LATGER J. New impressive capabilities of SE-workbench for EO/IR real-time rendering of animated scenarios including flares [J]. SPIE Security +

<sup>[1]</sup> YANG Yanjie. Research on development of military electro-optical detection equipment [J]. Infrared, 2017, 38 (9):8-13. (in Chinese)
杨彦杰. 军用光电探测装备发展研究[J]. 红外,2017, 38(9):8-13.

Defence, 2015, 9653: 965307.

- [10] ZHANG Jian, ZHANG Jianqi, SHAO Xiaopeng. Application of IR scene generation technique based on vega prime in IR imaging guidance simulation[J]. Infrared Technology,2005,(2):124-128.(in Chinese) 张健,张建奇,邵晓鹏. 基于 Vega Prime 的红外场景生 成技术在成像制导仿真系统中的应用[J]. 红外技术, 2005,(2):124-128.
- [11] HAN Yuge, CHENG Zhiduo, REN Dengfeng, et al. Thermal interactions and infrared simulation of armored vehicles and ground background[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1):20-25. (in Chinese) 韩玉阁, 成志铎, 任登凤, 等. 装甲车辆与地面背景的 热交互作用及红外仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):20-25.
- [12] Dennis A, Wixom B H, Tegarden D. Systems analysis and design: an object-oriented approach with UML[M]. Wiley Publishing, 2015.
- [13] LEFEBVRE S, ROBLIN A, VARET S, et al. A methodological approach for statistical evaluation of aircraft infrared signature[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010,95(5):484-493.
- [14] ZHENG Haijing, BAI Tingzhu, WANG Quanxi. Numerical simulation and experiment on infrared features of exhaust plume based on Monte Carlo method [J]. Acta Photonic Sinica, 2018, 47(8):168 182. (in Chinese)
  郑海晶, 白廷柱, 王全喜. 基于蒙特卡洛法的尾焰红外 辐射特性仿真与试验[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 168 182.
- [15] SCHLICK C. An inexpensive BRDF model for physicallybased rendering[J]. Computer Graphics Forum, 1994, 13 (3):233-246.
- [16] XUE Lian, ZHANG Li, LIU Jiaqi, et al. Infrared scene

simulation of space down-looking system based on remote sensing inversion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(7):44-48. (in Chinese)

薛莲,张力,刘佳琪,等.基于遥感反演的空间下视系 统红外场景仿真[J].红外与激光工程,2016,45(7): 44-48.

- [17] YANG P, LIOU K N, BI L, et al. On the radiative properties of ice clouds: light scattering, remote sensing, and radiation parameterization [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(1):32-63.
- [18] VEACH E, GUIBAS L J. Optimally combining sampling techniques for Monte Carlo rendering [C]//Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1995:419 - 428.
- [19] XU Xingxing, DING Lei. Spaceborne visible light camera imaging simulation system based on openGL[J]. Infrared, 2017,38(7):15-21. (in Chinese) 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.
- [20] ZHANG Fudi, ZHANG Jianqi, XU Yin. Quantization simulation and fidelity validation of infrared staring imaging sensors
   [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(4):596 601. (in Chinese)

张福娣,张建奇,徐茵. 红外凝视传感器定量仿真及模型验证[J]. 光子学报,2011,40(4):596-601.

- [21] WATSON J,ZONDERVAN K. The missile defense agency's space tracking and surveillance system [C]//Sensors,Systems, and Next-Generation Satellites XII. International Society for Optics and Photonics,2008.
- [22] KANG Tian. Analysis of STSS Demo infrared sensor[J]. Infrared Technology,2018,40(6):26-32. (in Chinese) 康甜. STSS Demo 红外传感器性能分析[J]. 红外技术, 2018,40(6):26-32.