

文章编号:1004-4213(2011)07-1106-6

# 星载可见光相机成像仿真建模研究

彭晓东<sup>1,2</sup>, 刘波<sup>2</sup>, 孟新<sup>2</sup>, 谢文明<sup>2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘 要:**针对星载可见光相机成像模拟在逼真度和灵活性方面的综合仿真应用需求,研究并提出了一种以三维场景为基础,以光线追踪技术为主要渲染核心,综合考虑卫星轨道和姿态、光照条件、物体光谱特性和周边环境、大气传输、遥感器成像性能等影响因素的全光路成像模拟技术的仿真模型.文中首先从完备性及可扩展性的角度尝试建立了成像仿真系统的综合模型框架,对整个成像链中的各个重要环节进行分层及模块化,并结合目前现有三维技术、光线追踪技术、传感器仿真技术的特点设计各模块之间的调用及接口关系,使其能在较好利用现有计算模型的同时能够对新的算法模型实现有效兼容.随后讨论了模型目前使用的镜头前辐亮度计算模块、光线路径计算模块和传感器效果仿真模块,并针对简单空间探测场景用 C++ 编程语言实现了系统框架和关键模型,生成模拟图像,结果证明该模型在深空光照及大气效果方面有较好的表现,具备较高的逼真度和良好的适应性、扩展性,能够有效支撑卫星光学成像系统的指标论证、算法评估以及效能预估等应用.

**关键词:**成像模拟; 辐亮度计算; 光线追踪

**中图分类号:** TP391.9; TP722.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114007.1106

## 0 引言

卫星光学成像设备是航天侦察探测体系的重要组成部分,具有经费投入大、研制周期长等特点.利用计算机仿真技术实现光学遥感图像仿真,既可以 对遥感卫星在各种应用条件下的目标侦察能力进行预测和评估,也可以为图像质量评估、图像处理算法验证、目标识别训练等许多领域提供试验数据.因此具有强烈的需求和应用背景<sup>[1-2]</sup>.

国外在此方面取得了大量成果,并形成了一些比较系统的仿真模型,实现从辐射传输过程到硬件成像阶段中多种物理效应的建模,比较典型的成像传感器模型有 DIRSIG<sup>[3]</sup>、IRMA<sup>[4]</sup>、NVTherm、TACOM<sup>[5]</sup>、IRISIM<sup>[6]</sup>等.但国际上航天技术属于高度保密技术,不但先进的设计、仿真方面的软件或模块很难购买,而且相关的详细技术情报也对我国封锁,只能从少量的会议和杂志上的泛泛介绍略见一斑.同时,国内也在积极开展成像系统建模的研究,如针对 CCD 成像单元的仿真测试系统、推扫型红外成像传感器的建模与仿真<sup>[9]</sup>等集中在部分物理效应的模拟系统(或基于航拍图像,时空受限;或基于国

外 VEGA 等成熟的商用成像模块<sup>[7]</sup>,使用扩展受限);以及遥感成像仿真软件 RSIS1.0<sup>[8]</sup>等综合的成像模型系统.但总体来说,在全光路综合成像模拟框架和仿真平台的研究方面,与国外研究尚有一定差距,仍处于起步阶段.

针对这些现状,本文研究并尝试建立了以三维场景为基础,光线追踪技术为主要渲染核心,综合考虑卫星轨道和姿态、光照条件、物体光谱特性和周边环境、大气传输、遥感器成像性能等影响因素的全光路成像模拟技术的仿真模型.该模型通过光线追踪方法将多种成像因素有效结合在一起,在保证尽量逼真的成像效果的同时又具有良好的灵活性.本文给出了综合模型框架、镜头前辐亮度计算模块、路径计算模块、传感器效果仿真模块以及成像模型的仿真结果.

## 1 系统框架

卫星光学成像是一个十分复杂的过程,影响图像质量的内外界因素众多,不仅包括光辐射与大气介质、背景、目标相互作用,最终到达传感器这一物理过程,而且包括光信号在传感器内部经过扫描、采

第一作者:彭晓东(1981-),男,副研究员,工学博士,主要研究方向为三维视景及仿真技术. Email:pxd@cssar.ac.cn

收稿日期:2010-09-18;修回日期:2010-12-20

样、光电转换、噪声、数字滤波等传递过程,还涉及卫星的轨道和姿态、运动及扫描方式、抖动等因素的影响。对于专业的全光路综合可见光成像模拟系统而言,需要能准确模拟光学成像的各个环节的同时并具备相当的灵活性,即可以快速的响应各种环境及设备的变化;还需要考虑光照、大气辐射传输、光线几何传播特性等辐射传输数学建模问题,以及包含遥感图像光谱和空间信息传递特性在内的传感器系统综合响应的数学建模问题,此外应考虑三维几何场景组织与优化,三维物体表面的光谱反射特性的建立及索引,综合模型框架中各种模型的灵活替换及重用等系统构建问题。

为便于模型模块的设计和分析理解,本文将整个成像仿真过程归纳为场景的组织与建立、辐亮度图像仿真和传感器效果仿真三个部分。成像仿真系统结构如图 1,主要分为场景组织与建立,辐亮度图像仿真,传感器效果仿真三部分。

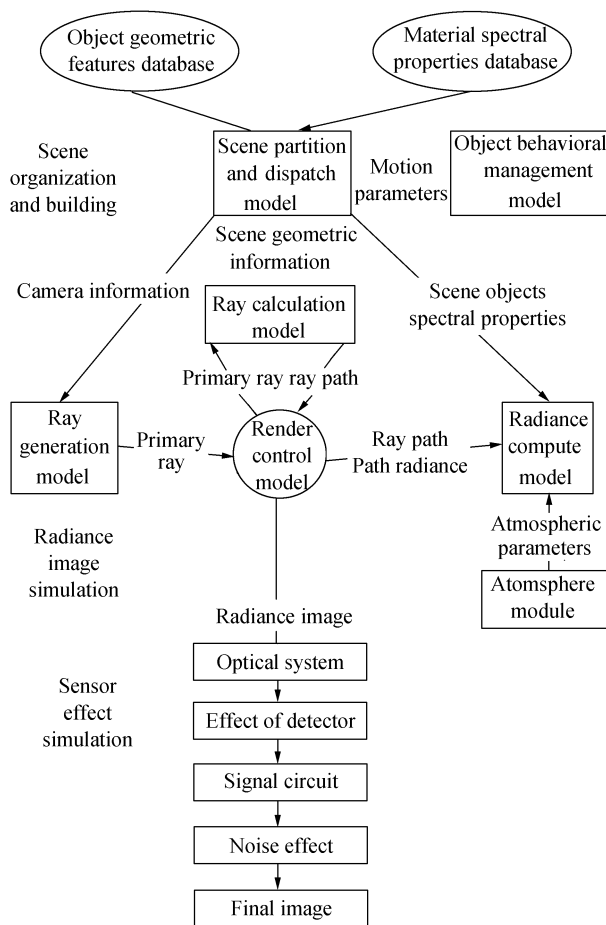


图 1 成像仿真系统结构图

Fig. 1 Image generation system structure

首先是场景的组织与建立:由于当前三维图形技术及硬件的飞速发展,可以逐渐摆脱以往基于航拍图片的场景数据源,转而建立一个由物体的真实几何信息和表面光谱特性组成的三维场景,通过该

场景能够更准确地模拟光线在复杂地物间的传播过程——反射、折射、散射等,更灵活地配置环境条件——太阳高度角、目标运动特性、卫星及相机位置与姿态、大气条件等。在这一过程中,主要包括场景划分调度模块、物体行为管理模块以及物体几何特征数据库和光谱特性数据库。场景划分调度模块主要负责将整个大三维场景按区域、细节划分为多个子场景,常见的划分方法有八叉树、KD 树(k-dimensional tree)等,经过划分的场景能够更有效地载入并能加速下一个阶段光线与物体的求交运算。此外,场景划分与调度模块还负责读取特征库,将物体的几何特征与表面光谱特征关联起来。物体行为管理模块计算卫星的轨道和姿态、目标的运动轨迹、地球及太阳系行星的运动自转等数据,以及相机的运动和各个事件的执行序列,以此驱动整个场景中各个物体的推进。

随后是辐亮度图像模拟,即模拟光线从光源出发,经过大气介质,在目标和背景间相互传播,最后到达传感器的辐亮度值。这一过程由三个关键模型组成:路径计算模型、辐亮度计算模型、大气模型。路径计算模型根据场景中物体的几何信息,计算光线在物体间反射、折射、散射的传播路径。辐亮度计算模型是最主要的数学计算表达式,它将到达传感器前的各种辐射量进行综合计算,输出有效的辐亮度图像。大气模型根据用户设定的大气参量、场景位置,计算并得到上下涌辐照度以及指定路径上的辐射衰减系数。考虑到系统结构的灵活性和扩展性,模块结构设计如图 1,采用插件式的结构,由一个核心模块——渲染控制模块来管理整个过程的仿真流程,流程中的每一个模块都可以有多种实现,渲染时可以根据用户的需要替换部分模块来完成特定的渲染任务。模块主要包括四类:路径计算,辐亮度计算,大气模块,射线生成模块。其中射线生成模块负责确定光线的初始位置及方向,由于目前路径计算模块中采样的光线追踪法是从镜头逆向追溯光线的传递路径,因此该模块需要从场景数据中取得相机的位置、视场方向、视场大小等参量,并依据一定的采样方式,得到一簇从相机发出的射线。这些射线经由控制模块传递给路径计算模块,路径计算模块以这些射线为出发方向,根据光线追踪法的规则,与三维场景中所有物体的表面求交,迭代计算直到得到全部的光线传播路径(终止条件由具体的光线追踪法确定);随后辐亮度计算模块根据这些路径信息、每个交点处物体表面的材质光谱发射率,路径经过介质的衰减系数,路径上的各种散射贡献等综合计算射线起点处的辐亮度,其间大气衰减,环境光亮度等参

量会调用大气模块计算. 最终将每条射线的辐亮度记录在虚拟胶片中形成辐亮度图像. 作为探测器的输入传递给后续模块.

最后的过程是传感器效果的仿真, 要模拟传感器具体的工作过程会十分复杂, 这与不同的传感器设计有着密切的关系, 作为图像效果的仿真一般会将传感器对图像有影响的特性总结成数学模型, 主要是采用调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 描述空间频率响应<sup>[10]</sup>, 并结合噪音图像、增益等参量计算最终仿真图像, 本系统将探测器效果的仿真分解为光学系统效应模块、探测器效应模块、信号电路效应模块和噪音效应模块.

在整个仿真过程中, 辐亮度计算模块、路径计算模块、探测器效果计算模式是系统核心算法, 影响着最终的仿真成像质量, 本文将在随后具体介绍各个模型算法流程.

## 2 主要模型

### 2.1 辐亮度计算模块

辐亮度计算模型主要计算的是太阳辐射源的光辐射能量, 经过大气介质, 在物体间反射、折射, 最后再经过大气到达探测器时的辐亮度. 在这中间首先要考虑大气对辐射的衰减作用和大气气溶胶所引起的散射光对当前光路的叠加作用; 然后是非透明物体表面对光线的反射与吸收, 目前对物体表面材质的光谱特性一般使用双路径反射函数 (Bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 来表达<sup>[11]</sup>, 其含义是指材质的反射系数除了与波长有关之外, 还与入射光角度和反射光角度都相关. 但用 BRDF 描述的材质与 Lambert 漫发射体相比, 在计算反射光线辐亮度时要复杂, 因此我们对重点观察目标的表面用 BRDF 来描述其光谱特性, 而对于周遭背景, 如植被, 山区, 沙漠等, 则采用 Lambert 漫反射体来描述. 不仅如此, 在光线追踪数量上, 经过目标表面反射的光线要在其表面法线一侧的整个半球内采样追溯源光线, 以追求最精细的全光照效果, 而对于背景, 在直接与太阳光源计算漫反射辐射量. 简化的目的旨在保证重点目标的成像质量的同时尽量减少运算量, 简化后的辐射计算公式<sup>[12]</sup>为

$$L(l, \theta_0, \phi_0, \lambda) = [\epsilon(\theta_0, \lambda) L_T(\lambda) + E_s'(\lambda) \tau_1(\lambda) \cdot \cos \sigma' \frac{r_{\text{BRDF}}(\lambda)}{\pi} + \int_{\phi_i=0}^{2\pi} \int_{\theta_i=0}^{\pi/2} L_d(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i \cdot \frac{r_{\text{BRDF}}(\lambda)}{\pi} \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i] \tau_2(l, \theta, \lambda) + L_a(l, \theta, \lambda) \quad (1)$$

$L(l, \theta_0, \phi_0, \lambda)$  [w/m<sup>2</sup>sr μm] 是光谱辐亮度, 它是关于波长 λ、目标到探测器的距离 l、视角 θ<sub>0</sub> (观察方向

与目标表面法线的夹角)、方位角 φ<sub>0</sub> 的函数. 它适于描述对于成像光谱仪类型的多光谱通道的传感器系统. 对于一般带通响应的传感器系统 (黑白全色或多光谱系统), 只需对光谱段积分即可. 整个公式包含四个部分, 分别是物体自身散发的辐亮度 (与温度相关), 太阳直射光在观察方向上的反射辐亮度, 周围环境光在观察方向上的反射辐亮度, 大气散射造成的辐亮度加成. 辐亮度计算原理如图 2, 图中可以看到太阳发出的辐亮度  $E_s'(\lambda)$  和环境光辐亮度  $L_d(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  经过目标 1 的反射及大气衰减最终到达传感器:

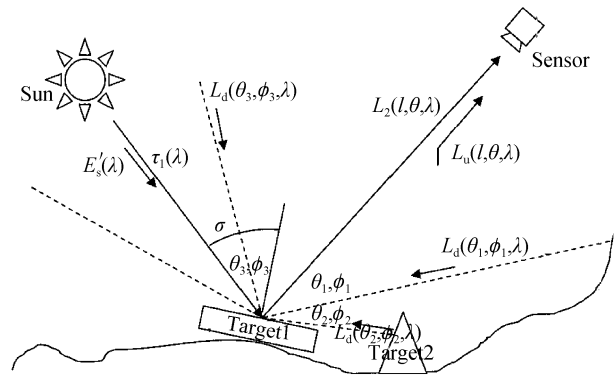


图 2 辐亮度计算原理

Fig. 2 Principle of radiance calculation

图 2 中  $\epsilon(\theta_0, \lambda) L_T(\lambda)$  是物体自身散发的辐亮度, 其中  $\epsilon(\theta_0, \lambda)$  是目标在观察方向上波长为 λ 的光谱辐射系数 (在同一温度下表面散发的辐射量与黑体散发的辐射量的比例).  $L_T(\lambda)$  [w/m<sup>2</sup>sr μm] 是黑体在温度 T 从目标发散出的光谱辐射量, 在可见光的光谱范围内该部分可以不考虑.

$E_s'(\lambda) \tau_1(\lambda) \cos \sigma' \frac{r_{\text{BRDF}}(\lambda)}{\pi}$  是太阳直射光在观察方向上的反射辐亮度, 其中  $E_s'(\lambda)$  [w/m<sup>2</sup> μm] 是在太阳入射光线垂面上的外大气层光谱辐照度.  $\tau_1(\lambda) = \tau_{1e}(\lambda) \tau_{1s}(\lambda)$  是波长为 λ 的光线沿着太阳到地球表面这条路径上的传输系数, 其中  $\tau_{1e}(\lambda)$  是吸收损耗系数,  $\tau_{1s}(\lambda)$  是散射损耗系数 (注意当物体在阴影中时  $\tau_1 = 0$ ).  $\sigma'$  是目标与太阳的连线与目标表面法线的夹角.  $r_{\text{BRDF}}(\lambda)$  是目标在 λ 波长下的光谱双向反射分布因子. 它的值等于在同样的入射光条件下, 当前物体在观察方向的光辐射量与标准的漫反射体在观察方向的光辐射量的比值, 是一个关于观察方向角 θ<sub>0</sub> 和入射方向角 (θ<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>) 的函数.

$\int_{\phi_i=0}^{2\pi} \int_{\theta_i=0}^{\pi/2} L_d(\theta_i, \phi_i, \lambda) \cos \theta_i \frac{r_{\text{BRDF}}(\lambda)}{\pi} \sin \theta_i d\theta_i d\phi_i$  是周围环境光在观察方向上的反射辐亮度, 其中  $L_d(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  是从天顶角 θ<sub>i</sub> 和方位角 φ<sub>i</sub> 方向来的辐亮度, 如果光源来自天空, 在  $L_d$  可以表示为  $L_{de}(\theta_i,$

$\phi_i, \lambda) + L_{ds}(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  其中  $L_{de}$  来源于天空自身散发的辐亮度,  $L_{ds}$  来源于大气对阳光的散射产生的辐亮度. 如果光源来源于背景物体, 则可以表示为  $L_{be}(\theta_i, \phi_i, \lambda) + L_{bs}(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  其中  $L_{bs}(\theta_i, \phi_i, \lambda) \approx [E_s(\lambda) \tau_{1b}(\lambda) \cdot \cos(\sigma'_B)] r_{bd}(\lambda) / \pi$ ,  $\sigma'_B$  是背景物体的光入射角,  $r_{bd}(\lambda)$  是背景的漫反射系数,  $\tau_{1b}(\lambda)$  是衰减系数, 当背景在阴影中时该值为零;  $L_{be}(\theta_i, \phi_i, \lambda) \approx [L_{Tb}] L_{Tb}$  是由背景温度产生的副亮度. 如果光源来源于其他目标表面, 则  $L_d(\theta_i, \phi_i, \lambda)$  将与  $L(l, \theta_0, \phi_0, \lambda)$  采样一样的计算公式, 形成迭代.  $\theta_i, \phi_i$  是在目标表面法线方向的整个半球面上取的天顶角和方位角.

$\tau_2(l, \theta, \lambda)$  是目标到传感器的衰减系数, 他是距离  $l$ , 观察角  $\theta$ , 波长  $\lambda$  的函数, 同样它也可以分为散射系数和吸收系数.  $L_u(l, \theta, \lambda)$  是路径光谱辐亮度, 即沿着目标到探测器这条路径上的大气因阳光散射辐亮度和大气自身散发的辐亮度的和, 是大气造成的辐亮度加成.

公式中有部分参量需要调用大气模块计算, 在本系统采用 MODTRAN 模型, 其中  $E_s(\lambda)$  和  $\tau_1(\lambda)$  可以通过给 MODTRAN 设置大气参量、经纬度、日期、时间、光谱分辨率计算得到.  $\tau_2(l, \theta, \lambda)$  和  $L_u(l, \theta, \lambda)$  需要通过路径计算确定光线通过路径, 在 MODTRAN 设置算好的路径并计算得出.  $L_{de}$  和  $L_{ds}$  在 MODTRAN 中是一个关于天顶角  $\theta_i$  和方位角  $\phi_i$  的函数. 可以通过设定合适的角分辨率和光谱分辨率计算得到. 所有 MODTRAN 模型的计算值可以预先生成并生成数据库, 使用时可以对角和光谱进行插值. 注意如果预先计算的角分辨和光谱分辨率选择合适则可以不用插值.

$\epsilon(\theta_0, \lambda)$  和  $r_{BRDF}(\lambda)$  的值可以对材质的反射因子数据库中的值在  $\theta_i, \phi_i, \theta_0, \lambda$  四个维度上的插值获得. 对同一种材质类型, 可能拥有多种光谱的反射系数, 但这里假定它们的 BRDF 在角度上的分布是一致的. 此外, 对于大面积使用同一材质的表面, 则采样纹理辅助的方式, 通过纹理上不同点的像素值, 可以将单一的材质映射为反射系数略有不同的同类型材质, 再不增加多边形数量的情况下加强图像细节.

## 2.2 路径计算模块

本系统的路径计算模块通过光线追踪法实现. 由于从光源发出的无穷多条光线中, 只有少数光线经由场景中的景物表面之间的反射和透射后到达观察者的眼中. 为了减少无用计算, 标准光线追踪算法采用逆向追踪技术来完成整个绘制过程, 即光线追踪是光照物理过程的近似逆过程. 因此, 光线追踪法是从探测器的焦点出发, 通过采样平面(通常是视场面)上每一采样点向场景中发出一条射线, 若射线与

场景中的景物无交, 则光线将射出画面, 追踪结束. 否则, 光线在离视点最近的景物表面交点处的走向有两种可能:

1) 当前交点所在的景物表面为非透射反射面, 可计算其反射光线方向继续追踪(可多条).

2) 当前交点所在表面为规则透射面, 光线沿其规则透射方向和反射方向继续追踪.

显然, 这是一个递归追踪过程. 虽然光线在景物间的反射和折射可以无限制地进行下去, 但在实际计算时不可能做无休止的光线追踪, 因而需要给出光线追踪的终止条件. 一般说来, 光线追踪的终止条件有三种:

1) 光线射出场景范围, 即光线与场景中的景物没有交点.

2) 追踪光线对显示像素光亮度的贡献小于某一预先给定的阈值.

3) 当前追踪深度超过用户设定的最大追踪深度.

本系统的光线追踪过程基本为:

第一步: 设置镜头的空间位置, 根据镜头的视场范围和方向建立虚拟成像面及焦点, 在成像面上按预先设定的分辨率划分网格并确定为采样点, 然后从焦点出发, 向每个取样点发出射线来模拟逆向光线, 射线穿过采样面向物体空间延伸, 并与物体相交. 视线可能与多个物体相交, 存在多个相交点, 此时必须比较各点与视点之间的距离, 求得离视点最近的相交点即在视线方向上相对于视点的可见点, 保存路径.

第二步: 计算相交点与太阳的连线, 判断是否被其他物体遮挡, 保存路径.

第三步: 计算该点处的法向量, 通过检索三维场景数据, 判断该表面是目标还是背景, 并获得表面光谱特性.

第四步: 如果交点面是背景, 则将路径和参量交于辐亮度计算模块; 如果交点面是目标, 判断当前追踪深度是否超过上限, 是则终止计算, 否则在交点面的法线方向的上半球面上采样一簇射线(这里选择 100), 沿着这些射线继续进行追踪, 方法返回第一步进行迭代计算. 循环最终直到满足终止条件, 保存路径并传递给辐亮度计算模块.

光线追踪法的初始采样点一般会选取比最终图像的像素数高 4~9 倍, 以保证后续计算的有效性.

## 2.3 传感器效果仿真

如前文所述, 传感器的成像效果仿真与具体的硬件构成密切相关, 本系统的仿真主要针对成像仪器的普遍特性和标准指标来进行图像效果的模拟.

通常,传感器分为三个部分,即光学系统、探测器和信号处理电路.这三个部分都会带来几种典型的物理效应,同时考虑卫星的振动给传感器带来的影响,系统将传感器效果仿真分为四个模块:

1)光学系统效应模块.包括光学系统能量响应、 $\cos N\theta$  阴影效应、渐晕效应、离焦、孔径衍射、光学设计的残余几何象差六个部分,其中前三种效应会引起辐照度的变化,后三种效应可以抽象为相应的光学传递函数 (Modulation Transform Function, MTF).

2)探测器效应.包括探测器信号响应、非线性效应、非均匀性效应、探测器空间响应、相移和抖动、欠采样、灰度量化七个部分.非均匀性效应是探测单元的差异产生的固定图像噪音,前二种效应描述光电转换过程,可以根据传感器的响应曲线来计算出信号值.探测器空间响应、相移和抖动、欠采样都可以抽象为相应的 MTF.

3)信号电路效应.信号处理电路可以看作是可以用表达为 MTF 的低通、高通、增强电路等滤波器的组合.

4)噪音效应.系统噪音一般包括时空随机噪音,随机行噪音,固定行噪音.时空随机噪音和随机行噪音可看作服从高斯分布的白噪音,随着时间的变化而不断变化.固定行噪音的主要来源为探测器的非均匀性.

因此,传感器效果的综合方程为

$$Dn(x, y) = \{FT^{-1}[FT(S(L_0(x, y)))_{(u, v)} \cdot MTF_{sys}(u, v)]_{(x, y)} + \sigma_N(x, y)\}G \quad (2)$$

式中,  $L_0(x, y)$  是原始辐亮度图像,  $S(L_0(x, y))$  是经过光学系统的辐亮度变化、光电转换和灰度化的未退化图像,  $MTF_{sys}(u, v)$  是各环节 MTF 的乘积,  $\sigma_N(x, y)$  是噪音图像,  $G$  是信号增益系数.

### 3 仿真图像

因具体项目需求,本文初步采用空间场景为试验场景,选取观察目标为某同步轨道空间飞行器,模型约包含三百多万多边形及其表面光谱特性<sup>[13]</sup>,场景划分采用 KD 树,大气模型使用 MODTRAN,最终图像分辨率为  $1024 \times 1024$ ,初始光线数为  $2048 \times 2048$ ,首先建立一个在地球与卫星背后存在三个相互垂直的镜面的实验场景,以观察计算深度对成像效果的影响.如图 3,四幅图像从左到右、从上到下分别为计算深度是 1, 2, 3, 4 的成像模拟效果:

可以看出,计算深度越高,对光线反射的模拟程度越逼真,但计算复杂度也会成倍增加,实验结果表明,在空间场景中选择深度为 4 基本能够满足仿真

需求.

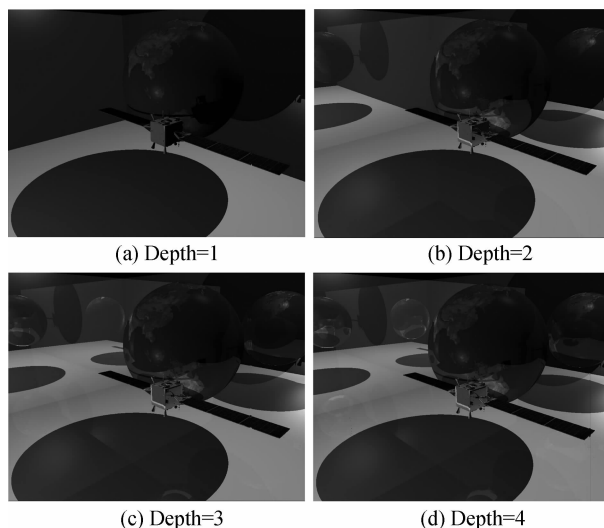


图 3 追踪深度实验图像

Fig. 3 Test images under different tracing depths

最后建立真实空间场景,地球背景假设为理想漫反射体,地球周围考虑大气效果对光线传输的影响,卫星表面的反射光线计算采用球面等面积采样,这里简化为用十二面体为基础将球面划分为 60 个等面积三角形,取三角形中心点与球心的连线为光线方向.生成的辐亮度图像如图 4(a),随后对图像进行快速傅里叶变换并乘以 MTF 函数,最后经过反变换并加噪音处理,生成的最终图像如图 4(b).

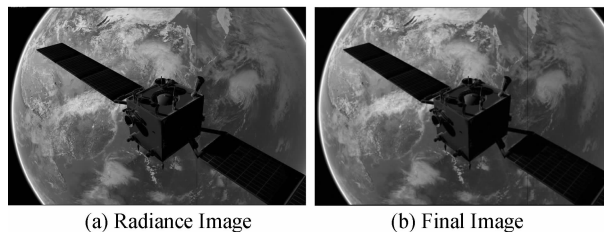


图 4 辐亮度图像及最终输出图像

Fig. 4 Radiance image and final image

图 4 中可以看到对大气效果的模拟,图 4(b) 由于增加了传感器对图像的影响因素,图像变得模糊并伴有噪音干扰.

### 4 结论

本文从准确、高质量、灵活的设计角度出发,为星载相机的成像仿真系统提出了一个基于插件式的、高效的全光路综合仿真模型.从具有 BRDF 材质属性的三维几何场景的搭建与划分调度开始,通过利用光线追踪技术对场景中的多边形进行求交运算,并得出传输路径,随后根据辐亮度计算公式得出到达传感器之前的辐亮度图像,在进一步模拟传感器的光学系统、探测器系统、信号电路系统的空间响应及噪音特性,最终生成指定波段的仿真图像.目前

在空间场景中已得到较好的应用,但目前场景内容不够复杂,目标材质的 BRDF 特性数据还不完备,下一步需要在超大地表场景的组织与构建,辐亮度计算的优化与增强,传感器效应的进一步模拟方面继续开展更加深入的研究。

#### 参考文献

- [1] SCHOTT J S. Remote Sensing: The image chain approach [M]. New York: Oxford University Press, 1997: 12-16.
- [2] SHELL J R, SALVAGGIO C, SCHOTT J R. A novel BRDF measurement technique with spatial resolution-dependent spectral variance [C]. *Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2004, **7**: 4754 - 4757.
- [3] SANDERS J S. Utilization of DIRSIG in support of real-time infrared scene Generation[C]. *SPIE*, 2000, **4029**: 278-285.
- [4] SAVAGE J, COKER C, EDWARDS D, *et al.* Irma 5. 1 multisensor signature prediction model [C]. *SPIE*, 2005, **5811**: 199-211.
- [5] GERHART G R, GOETZ R, MEITZLER T J, *et al.* Validation status of the TARDEC visual model (TVM)[C]. *SPIE*, 1996, **2743**: 276-284.
- [6] GUISSIN R, LAVI E, PALATNIK A, *et al.* IRISIM: infrared imaging simulator[C]. *SPIE*, 2005, **5784**: 190-200.
- [7] ZHANG Jian. Application of IR scene generation technique based on Vega Prime in IR imaging guidance simulation[J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(2): 124-128.  
张健. 基于 VegaPrime 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, **27**(2): 124-128.
- [8] WANG Gang. Study on scientific visualization of earth remote sensing based on imagery simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2002, **14**(6): 756-760.
- 王刚. 基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化研究[J]. *系统仿真学报*, 2002, **14**(6): 756-760.
- [9] NING Dian-xia. Modeling and simulation of spaceborne pushbroom infrared imaging sensor [D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 3-5.  
宁殿艳. 星载推扫型红外传感器建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 3-5.
- [10] LI Dong. A research and apply for computer simulation systems of satellite remote sensing imaging[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006: 7-12.  
李栋. 卫星遥感成像计算机仿真系统的研究与应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2006: 7-12.
- [11] CAO Yun-hua, WU Zhen-sen, ZHANG Han-lu, *et al.* Research on visible light scattering of spatial targets based on spectral BRDF of target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **37**(11): 2264-2268.  
曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 基于粗糙样片光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2264-2268.
- [12] SCHOTT J S, RAQUENO R V, SALVAGGIO C. Incorporation of a time-dependent thermodynamic model and a radiation propagation model into IR 3D synthetic image generation [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(7): 1505-1516.
- [13] WU Zhen-sen, Dou Yu-hung. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 250-254.  
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 250-254.

## Research on Remote Sensing Image Generation Modeling in the Visible Regions

PENG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, LIU Bo<sup>2</sup>, MENG Xin<sup>2</sup>

(1 Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Xi'an 710068)

(2 Chinese Academy of Sciences, Center for Space Science and Applied Research, Beijing 100190)

**Abstract:** This paper addresses the research of fidelity and flexibility of remote sensing image generation modeling and simulation, and presented a synthetic image generation model which deals spectrally with multifold effects base on a three dimension digital geometric scene and ray-tracing render engine. At first this paper tried to set up the imaging simulation system from the completeness and expansibility angle by stratifying and modularizing each important factor of whole imaging chain. In order to effectively utilize existing calculation model and able to interoperate for the new algorithm model, the call and communication relations between each module is designed by combining existing 3d technology, light tracing technology, sensor simulation technology. And the radiance calculation module, the ray tracing calculation module and sensor effect simulation module were discussed. Then aimed at a space scene simulation application. The model framework, submodels and spectral image examples achieved by C++ programming language are presented which can be widely use in sensor prototyping, algorithm testing, efficiency assessment at satellite design phase.

**Key words:** Synthetic image generation; Radiance calculation; Ray tracing