

基于光场理论的场景仿真

马晓珊, 杨震, 李立钢, 倪伟, 李毓伦

(中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190)

摘要: 成像系统仿真对光学传感器的论证、设计和在轨性能预估具有重要意义。场景作为遥感的对象,其特性的表征和模拟对仿真结果有直接影响。场景特性难以全面表征,针对光学遥感及其应用最为关键的几何、光谱和辐射特性,提出一种基于光场理论的数字场景仿真方法。以包含空间坐标、方向、波长、强度的全光函数作为数字场景仿真的表征参数,建立了涵盖太阳直射、天空漫射和背景反射等因素的数字场景入射辐照度场模型,以及考虑方向反射特性的数字场景出射辐亮度场模型,并基于简单场景对模型进行分析和验证。该方法能够为成像系统仿真及新型载荷研制提供包含多种特性的数字场景模型。

关键词: 光学遥感; 场景仿真; 光场; 全光函数

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0818003

Scene simulation based on optical field theory

Ma Xiaoshan, Yang Zhen, Li Ligang, Ni Wei, Li Yulun

(Key Laboratory of Electronics and Information Technology for Space System, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The simulation of the imaging system is very important to the demonstration, design and performance forecast of the optical remote sensing detector. As the remote sensing object, characterization and modelling of the scene will affect the simulation results directly. Aiming at the crucial geometry, spectrum and radiance characters, a digital scene modelling method based on the optical field theory was proposed. Using the plenoptic function comprised of geometrical coordinates, direction, spectrum and intensity, irradiance field onto the scene surface was modelled including the direct solar radiance, skylight radiance and reflected background radiance. With directional reflectance character of the surface, radiance field leaving the scene surface was also modelled. A simple small 3D scene was created to validate these models. The proposed method will provide digital scene model with multiple characters for the imaging system simulation and the new-style detector development.

Key words: optical remote sensing; scene simulation; optical field; plenoptic function

收稿日期: 2018-03-11; 修订日期: 2018-04-15

基金项目: 中国科学院重点部署资助项目(KGFZD-125-15-014)

作者简介: 马晓珊(1978-),女,副研究员,博士,主要从事光学遥感成像模拟等方面的研究。Email: maxs@nssc.ac.cn

0 引言

光学成像系统是对地观测体系的重要组成部分,具有经费投入大、研制周期长的特点。利用计算机仿真技术,可以在成像系统研制阶段,根据任务目标对成像质量进行预估,从而对设计参数进行优化^[1-3];在成像系统运行阶段,根据运行状态调整相关参数,以获取最佳的图像品质^[4]。

场景仿真是光学遥感全链路仿真的重要组成部分。在遥感成像过程中,场景是遥感的对象,包含的信息无限丰富。宏观上场景可以由几何特性(如形状和大小等)、物理特性(如反射、散射、辐射和吸收性质等)等进行表征。这些特性之间又是有关联的,如场景的反射和散射性质与其成分有关,又与场景的表面粗糙度有关。场景特性难以全面表征。应用最广泛的方法是利用机载/星载图像反演地表反射率图像作为仿真输入^[5-6],这种做法仅考虑反射率的二维空间分布,具有很大的局限性。典型的高光谱遥感系统仿真工具包 SENSOR 通过 DEM 配合光谱数据库对场景进行表征^[7],在一定程度上丰富了场景特性。随着计算机图形图像技术的发展,通过三维几何模型构建场景的方法受到关注,典型的如 Vega Prime IR Scene 仿真模块、遥感成像仿真软件 DIRSIG^[8]、三维场景辐射传输模型 DART^[9]等,在三维模型的基础上不同程度地引入光谱和辐射特性,在支持系统设计、算法研究等方面发挥了重要作用。随着激光测量技术的进步,已能够针对大范围真实场景进行厘米级精度重建,配合地物光谱长期的测量数据与模型研究,对场景特性的认知和表征能力在逐步提高。

目前亟需开展满足光学遥感应用需求的数字场景建模与仿真方法研究,不仅要考虑场景的三维空间特性,也要考虑对定量遥感至关重要的光谱和辐射特性。文中提出一种基于光场的场景仿真实理论与方法,在场景三维模型的基础上,探讨辐射作用下场景特性的表征理论与方法。目前已经基于该方法构建了数字场景,并初步实现了从目标到传感器的全链路仿真。该项研究能够为光学遥感系统包括仿真、设计、研制、定标、验证、在轨测试、运行管理、性能衰变修正、图像校正在内的全生命周期提供理论与技术支持,同时对于目标特性研究和新型探测机理的

论证与仿真验证也有很好的支撑作用。

1 光场理论

光场 (Light Field) 的概念最早由 Gershun 于 1936 年提出,用以描述光在三维空间中的辐射传输特性。1991 年,Adelson 和 Bergen 根据人眼对外部光线的视觉感知,提出用七维函数来表征空间分布的几何光线,称之为全光函数(Plenoptic Function)^[10]。全光函数 $P(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 所包含的七个变量中, $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z)$ 表示光线中任一点的三维坐标, (θ, φ) 表示光线的传输方向, λ 表示光线的波长, t 表示时间, P 表示光线强度。

传统成像系统只能反映强度和二维位置 (\mathbf{x}, \mathbf{y}) 之间的关系,损失了空间分布、光谱和时间信息。光谱成像仪在传统成像系统的基础上增加了光谱信息。光场相机则在保留二维位置的基础上增加了空间分布信息。通过对现有光学成像系统的分析,选择 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \theta, \varphi, \lambda)$ 六个变量作为场景仿真的基本物理量,涵盖了三维坐标、二维空间分布和一维波长,可以满足各类成像系统仿真对输入场景的要求。

基于上述六个变量,针对可见光-近红外波段,建立场景表面的入射和出射光场分布的数学表达式。对于入射光场,考虑某一波长在单位面积上的入射辐射分布,建立入射辐照度场 $E_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \lambda)$; 对于出射光场,考虑某一波长在单位面积、沿某一方向单位立体角内的出射辐射分布,建立出射辐亮度场 $L_{out}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \theta, \varphi, \lambda)$ 。

2 场景的入射辐照度场

针对可见光-近红外波段,到达场景的入射辐照度主要包括三部分:太阳直射、天空漫射和背景反射。 E_{dir} 是太阳辐射直接到达场景内某一目标表面产生的入射辐照度; E_{sky} 是由于大气散射产生的太阳漫射辐射(即天空光)到达目标表面产生的入射辐照度; E_{bkg} 则是由周围背景反射到达目标表面产生的入射辐照度。

$$E_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \lambda) = E_{dir}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \lambda) + E_{sky}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \lambda) + E_{bkg}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, z, \lambda) \quad (1)$$

2.1 太阳直射辐照度

太阳辐射直接到达目标的入射辐照度如图 1 所

示,可表示为^[11]:

$$E_{dir}(x, y, z, \lambda) = F(x, y, z, \theta_s, \varphi_s) \tau_d(x, y, z, \theta_s, \varphi_s, \lambda) \cdot E_s^0(\lambda) \cos \theta_s \quad (2)$$

图中表征位置的三维坐标采用全局坐标系,表征空间分布的天顶角和方位角采用以目标面片为中心的局部坐标系,定义为:面片的法向方向 \vec{n} 为天顶方向,按右手坐标系标注了 East 和 North 方向。上式中: (x, y, z) 表示目标在全局坐标系中的三维位置; (θ_s, φ_s) 表示太阳相对于目标的天顶角和方位角,天顶角是太阳位置与目标面片法向方向之间的夹角,方位角是太阳在目标面片上的投影与 East 方向的夹角(从 East 开始,按逆时针方向旋转,直至投影方向所成的角度); τ_d 表示太阳与目标之间的大气透过率; E_s^0 为大气层外的太阳辐照度; F 为遮挡系数,表征太阳与目标的连线路径上可能存在的遮挡物的影响, F 取值为 0,表示太阳对目标的直射辐射受到遮挡, F 取值为 1,则表示没有遮挡。

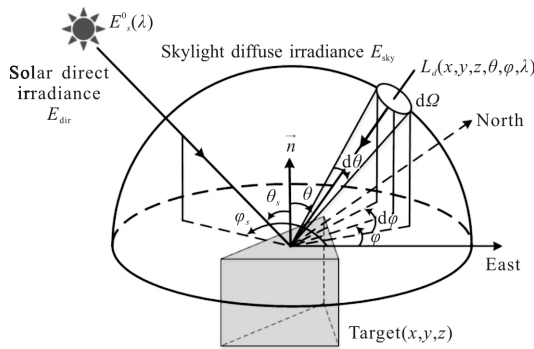


图 1 太阳直射和天空漫射辐照度示意图

Fig.1 Schematic diagram of direct solar irradiance and skylight diffuse irradiance

2.2 天空漫射辐照度

计算方法如图 1 所示。按照天顶角和方位角将目标之上的整个半球天空进行划分,已知来自某一方向 (θ, φ) 、到达目标 (x, y, z) 的天空漫射下行辐亮度为 L_d ,在其周围由 $d\theta$ 和 $d\varphi$ 构成了立体角 $d\Omega$:

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (3)$$

如果 $d\Omega$ 足够小,可认为 L_d 在该立体角内均匀分布,其在目标处产生的入射辐照度可表示为^[11]:

$$dE_{sky}(x, y, z, \lambda) = V(x, y, z, \theta, \varphi) L_d(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda) \cdot \cos \theta d\Omega \quad (4)$$

式中: V 表示目标沿 (θ, φ) 方向的可见性系数,取值为 0,表示在该方向有遮挡,取值为 1,表示在该方向无遮挡。

将来自半球天空的入射辐照度按照天顶角和方位角进行积分,得到目标之上的整个半球天空对目标产生的入射辐照度:

$$E_{sky}(x, y, z, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} V(x, y, z, \theta, \varphi) \cdot L_d(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (5)$$

2.3 背景反射辐照度

在计算目标的入射辐照度时,除了太阳直射辐射和天空漫射辐射,场景中的背景由于相对于目标的特殊位置关系,会将自身的入射辐射反射到目标,对目标产生背景反射辐射。

背景对目标的辐射贡献如图 2 所示。图中在分析和表征某个面片的入射和出射辐射时,位置坐标采用全局坐标系,表征空间分布的天顶角和方位角采用以该面片为中心的局部坐标系。研究背景对目标的辐射贡献,首先确定以背景面片为中心的局部坐标系,分析背景的入射辐射(同样包括到达背景的太阳直射辐射和天空漫射辐射),计算背景朝向目标方向的出射辐射。

经第 i 个背景反射朝向目标方向的辐亮度为:

$$L_{bo}^i(x_i, y_i, z_i, \theta_{bo}^i, \varphi_{bo}^i, \lambda) = \frac{\rho_i(\theta_s', \varphi_s', \theta_{bo}^i, \varphi_{bo}^i, \lambda)}{\pi}$$

$$F(x_i, y_i, z_i, \theta_s', \varphi_s') \tau_d(x_i, y_i, z_i, \theta_s', \varphi_s', \lambda) E_s^0(\lambda) \cos \theta_s' + \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{\rho_i(\theta', \varphi', \theta_{bo}^i, \varphi_{bo}^i, \lambda)}{\pi} V(x_i, y_i, z_i, \theta', \varphi') \cdot$$

$$L_d(x_i, y_i, z_i, \theta', \varphi', \lambda) \cos \theta' \sin \theta' d\theta' d\varphi' \quad (6)$$

式中:下标 i 表示第 i 个背景; (x_i, y_i, z_i) 表示背景的三维位置坐标; $(\theta_{bo}^i, \varphi_{bo}^i)$ 是背景与目标连线方向相对于背景的天顶和方位角; (θ_s', φ_s') 是太阳相对于背景的天顶和方位角; (θ', φ') 是某一方向的天空漫射下行辐亮度相对于背景的天顶和方位角; ρ_i 表示背景的双向反射因子(Bidirectional Reflectance Factor, BRF),是入射方向、出射方向和波长的函数,与双向反射分布函数(Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF)的关系为^[11]:

$$\rho(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}, \lambda) = \pi \rho_{BRDF}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{out}, \varphi_{out}, \lambda) \quad (7)$$

式中:下标 in 表示入射方向; out 表示出射方向。

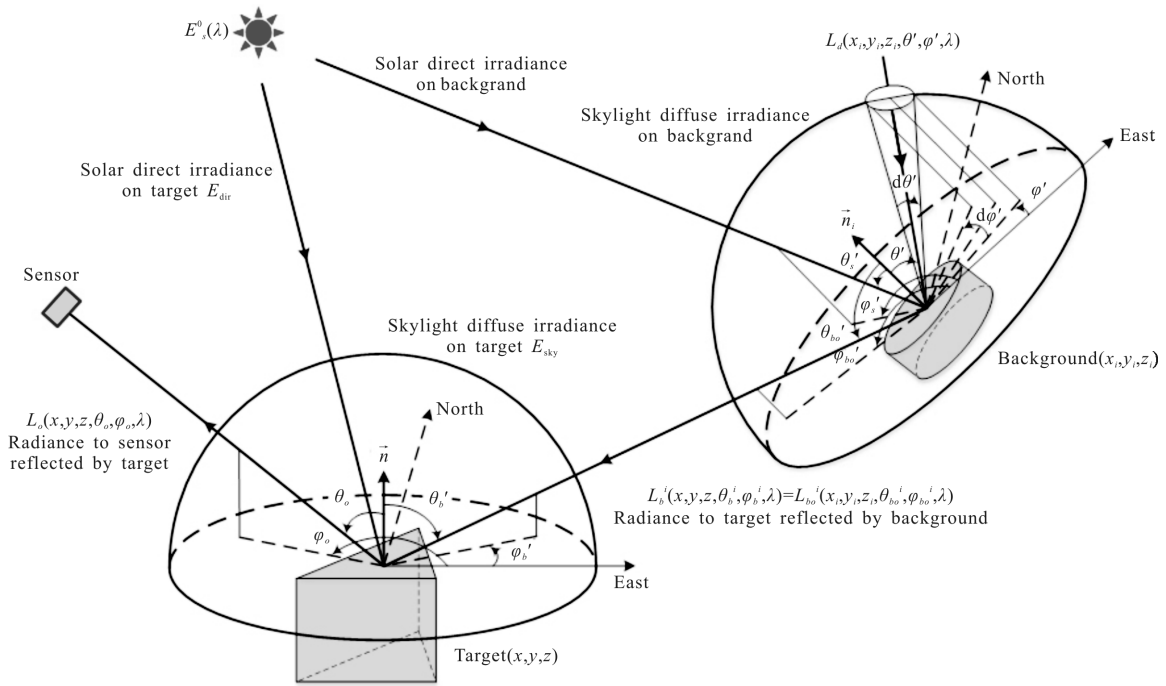


图 2 背景反射辐射和目标出射辐射示意图

Fig.2 Schematic diagram of radiance to target reflected by background and radiance to sensor reflected by target

背景朝向目标方向的出射辐亮度对于目标而言是入射辐射。在以目标为中心的局部坐标系中,来自第 i 个背景的入射辐亮度为:

$$L_b^i(x, y, z, \theta_b^i, \varphi_b^i, \lambda) = L_{b_o}^i(x_i, y_i, z_i, \theta_{b_o}^i, \varphi_{b_o}^i, \lambda) \quad (8)$$

式中: $(\theta_b^i, \varphi_b^i)$ 为背景与目标连线相对于目标的天顶角和方位角。该背景对目标的入射辐照度可以表示为:

$$E_{bi}(x, y, z, \lambda) = L_b^i(x, y, z, \theta_b^i, \varphi_b^i, \lambda) \cos \theta_b^i \Omega_i \quad (9)$$

式中: Ω_i 表示背景对目标所张的立体角。根据立体角的定义,当背景面积较小时,可得:

$$\Omega_i = \frac{S_i}{r_i^2} \quad (10)$$

式中: S_i 为背景的面积; r_i 为背景到目标的距离。则:

$$E_{bi}(x, y, z, \lambda) = \frac{L_b^i(x, y, z, \theta_b^i, \varphi_b^i, \lambda) \cos \theta_b^i}{r_i^2} S_i \quad (11)$$

统计所有对目标有辐射贡献的背景,将它们反射到达目标的辐射求和,获得目标的背景反射辐照度:

$$E_{bkg}(x, y, z, \lambda) = \sum_{i=1}^N \frac{L_b^i(x, y, z, \theta_b^i, \varphi_b^i, \lambda) \cos \theta_b^i}{r_i^2} S_i \quad (12)$$

式中: N 为背景的个数。

文中在计算背景反射辐射时,考虑背景的入射辐射包括太阳直射辐射和天空漫射辐射,可以预计,天空漫射辐射部分计算量非常大。从文献调研的情况来看,大多数工作都忽略了背景对目标的辐射贡献^[12-13],少数工作只考虑太阳直射光经背景反射到达目标的辐射分量,忽略了天空漫射光经背景反射到达目标的辐射分量^[14-15]。

3 场景的出射辐亮度场

已知目标的入射辐照度,结合目标的方向反射特性可以获得目标在任意方向上的出射辐亮度,如图 2 所示。由于到达目标的太阳直射辐照度和天空漫射辐照度已经在图 1 中明确标示,图 2 仅对这两项辐射做简化处理,重点对到达目标的背景辐射和目标的出射辐射进行说明。由图 2 可知,在以目标为中心的局部坐标系中,目标朝向传感器方向的出射辐亮度可表示为:

$$L_o(x, y, z, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{\rho(\theta_s, \varphi_s, \theta_o, \varphi_o, \lambda)}{\pi} F(x, y, z, \theta_s, \varphi_s) \cdot \tau_d(x, y, z, \theta_s, \varphi_s, \lambda) E_s^0(\lambda) \cos \theta_s + \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \frac{\rho(\theta, \varphi, \theta_o, \varphi_o, \lambda)}{\pi}$$

$$V(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda)L_d(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda)\cos\theta\sin\theta d\theta d\varphi + \sum_{i=1}^N \frac{\rho(\theta_b^i, \varphi_b^i, \theta_o, \varphi_o, \lambda)L_b^i(x, y, z, \theta_b^i, \varphi_b^i, \lambda)\cos\theta_i}{\pi r_i^2} S_i(13)$$

式中： ρ 为目标的 BRF； (θ_o, φ_o) 为出射辐射的天顶角和方位角。式中右侧各项分别为太阳直射辐射、天空漫射辐射和背景反射辐射经目标反射所产生的出射辐亮度。

公式(13)给出的出射辐亮度场是位于目标表面的辐亮度分布,如果沿出射方向传输一定距离 d ,则要考虑大气的影响:

$$L_d(x_d, y_d, z_d, \theta_o, \varphi_o, \lambda) = L_o(x, y, z, \theta_o, \varphi_o, \lambda) \cdot \tau_u(x_d, y_d, z_d, \theta_o, \varphi_o, \lambda) + L_{pnh}(x_d, y_d, z_d, \theta_o, \varphi_o, \lambda) \quad (14)$$

式中： τ_u 表示在传输路径上的大气透过率； L_{pnh} 表示该路径上的大气程辐射。

4 仿真结果

4.1 仿真场景与计算条件

为对上述理论模型进行验证,设计由简单几何体组成的小场景:边长为 10 m 的正方形水平均匀地面上悬浮一个直径为 4 m 的球体,球体位于地面的中心轴线上,距地面的垂直距离为 10 m。三维模型采用 obj 格式,球体由 2 400 个三角面片组成,地面的面片个数为 20 000。光照条件设置为太阳位于球体正上方。

仿真中需要的大气和辐射参数包括 $\tau_d, E_s^0, L_s, \tau_u$ 和 L_{pnh} ,由辐射传输模型 MODTRAN 预先生成。表示场景中面片之间位置关系的遮挡系数 F 和可见性系数 V ,通过基于阴影图的可见性算法进行计算。

4.2 太阳直射辐照度场

图 3 是计算获得的场景表面太阳直射辐照度场分布图。图 3(a)~(c)分别是波长 450、550、650 nm 的仿真结果。由于太阳位于球体正上方,球体自身的阴影位于球体正下方;在球体的顶部和球体阴影之外的地形区域内,入射的太阳直射辐射最强;从球体顶端向下,由于组成球体的面片的法向量发生偏转,导致入射的太阳直射辐射逐渐减弱,当面向法向量与太阳入射方向垂直时,到达面片的太阳直射辐射为零;在可见光波段,从 450~650 nm,场景表面的太阳直射辐射逐渐增强。

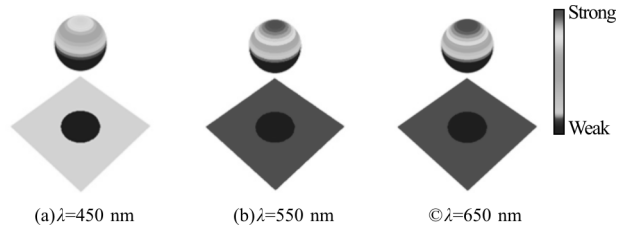


图 3 场景表面的太阳直射辐照度场

Fig.3 Direct solar irradiance field of scene surface

4.3 天空漫射辐照度场

在计算天空漫射辐射时,需要对目标之上的整个半球天空进行积分,常用的积分方法有矩形积分、梯形积分、高斯积分等。计算分析表明,采样密度对积分结果会产生很大影响。以天顶角和方位角对半球天空进行采样,天顶角的取值范围为 $[0, 90^\circ]$,方位角的取值范围为 $[0, 360^\circ)$,不同采样个数、不同积分方法计算求得的天天空漫射辐照度如表 1 所示。随着半球天空采样个数的增加,积分结果趋于稳定,当采样个数达到 180 时,三种积分方法的计算结果基本一致。三种方法中,矩形和梯形积分算法简单,所需的计算时间差别不大;高斯积分算法略复杂,但计算精度和效率更高,特别是当采样个数较多时,高斯积分所需的时间比另外两种方法低一个数量级。这是因为在保证相同计算精度的前提下,高斯积分需要的积分点数比矩形、梯形积分要少,因而计算效率更高。

表 1 不同采样个数、不同积分方法获得的天空漫射辐照度

Tab.1 Skylight irradiance calculated by different sampling numbers and integration methods

Sampling number	Rectangular integral / $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$	Trapezoidal integral / $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$	Gaussian integral / $\mu W \cdot cm^{-2} \cdot nm^{-1}$
1 620	37.497 269	37.574 682	37.208 134
720	37.479 188	37.562 047	37.208 134
180	37.379 049	37.462 364	37.208 134
48	39.865 697	39.955 93	39.792 033
24	38.210 192	38.302 766	38.758 473

图 4 为场景表面天空漫射辐射场分布图,分别给出了波长为 450、550、650 nm 的仿真结果。对半球

天空的漫射辐射进行积分时,天顶角采样间隔为 5° ,方位角采样间隔为 10° ,共对 360 个方向进行采样。计算结果与太阳直射辐射明显不同:由于天空光的漫射特性,它来自半球天空的各个方向,综合作用的结果是悬浮球体并未在地面上产生阴影,仅在地面中心处,入射辐照度略小于地面的其他面片,这是由于相对于地面其他面片,中心处面片之上半球天空受到的遮挡最多,导致该处受到的天空漫射辐射最小;在球体的下半部分,并未像太阳直射辐射那样整个为 0,而是有辐照度的强弱变化,这是因为该部分接收不到太阳直射辐射,但却能接收到天空漫射光的辐射贡献。此外,在可见光波段,从 450-650 nm,场景表面的天空漫射辐射逐渐减弱。

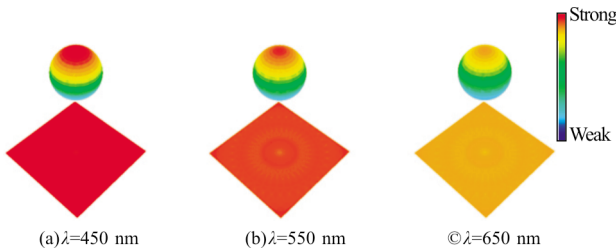


图 4 场景表面的天空漫射辐照度场
Fig.4 Skylight irradiance field of scene surface

4.4 背景反射辐照度场

计算背景反射辐射需要知道背景的方向反射分布特性。文中使用实测的草地 BRF 数据,在 550 nm 的立体分布如图 5 所示。图中横坐标为入射天顶角 θ_{in} ,纵坐标为出射天顶角 θ_{out} ,z 轴为对应方向上的 BRF 数值。

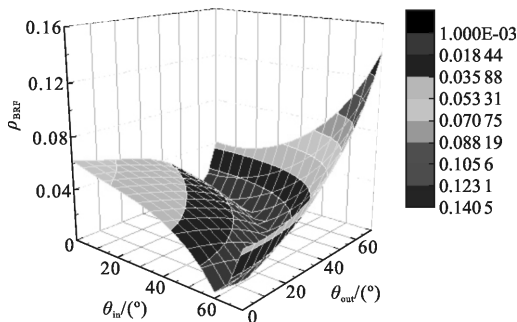


图 5 草地的 BRF 分布(λ=550 nm)
Fig.5 BRF distribution of grass(λ=550 nm)

以往的研究工作在考虑背景对目标的辐射贡献时,为减小计算复杂性,只考虑太阳直射光经背景反射到达目标的辐射分量,忽略了天空漫射光经背景

反射达到目标的辐射分量^[14-15]。这种简化对精度的影响程度尚不确定,需开展定量研究。按照公式(5)计算背景反射辐射产生的场景表面入射辐照度,如图 6 所示。针对该波长,图 6(a)是仅考虑背景的太阳直射辐射而计算获得的场景表面的背景反射辐照度分布,也即仅利用公式(5)右侧第一项生成 E_{bkg} 。图 6(b)则是考虑了太阳直射和天空漫射综合得到的背景反射辐照度分布。

图 6 的结果与图 4、图 5 完全不同,说明到达场景表面的背景反射辐射与到达场景表面的太阳直射和天空漫射辐射不同。背景反射辐射反映的是场景内部面片之间的相互辐射贡献,从图 6 可以看出:球体的上半部分,场景中的其他面片对其没有辐射贡献,因此接收到的背景反射辐射为 0;球体的下半部分会不同程度地受到来自地形的反射辐射,特别是球体底部,整个地形都对其可见,因此,从球体中部至底部接收到的背景反射辐射逐渐增强,在球体底部达到最大。

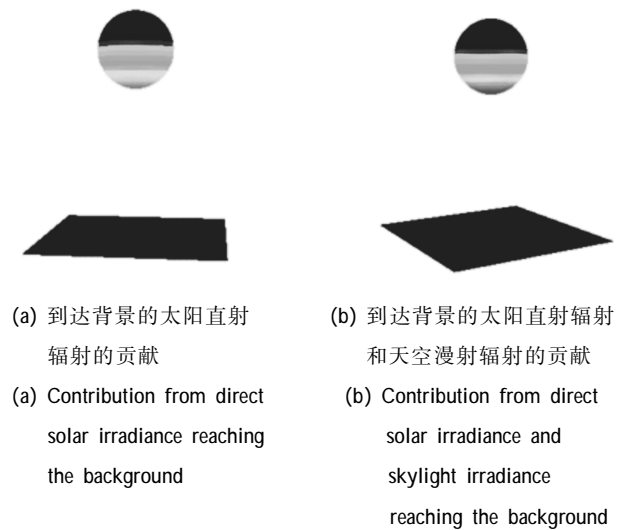
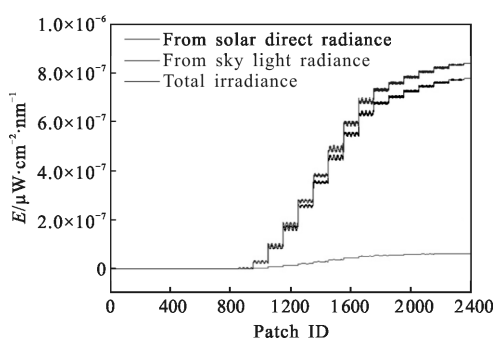


图 6 背景反射产生的场景入射辐照度(λ=550 nm)
Fig.6 Incident irradiance of scene reflected by the background (λ=550 nm)

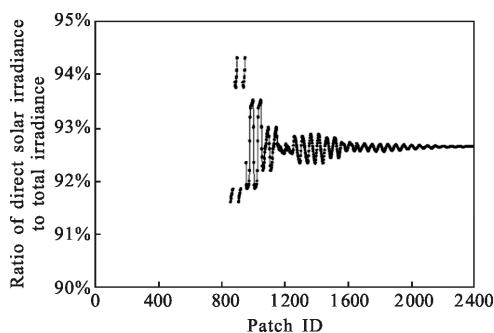
对比图 6(a)和(b),在考虑天空漫射辐射之后,场景表面的背景反射辐射增强了,反映出天空漫射对背景反射辐射的贡献。为量化这一影响,针对球体分析 E_{bkg} 的辐射组成,如图 7 所示。图 7 的横坐标为球体 2400 个面片的 ID,面片编号从球体顶端依次向下,顶端编号为 0,底部编号为 2399。图 7(a)给出了 E_{bkg} 及其各项辐射组成,图 7(b)是太阳直射辐

射在 E_{bkg} 中所占的百分比。图 7(a)中编号为 0~900 的面片没有受到背景反射辐射, 因此 E_{bkg} 数值为 0, 相应的, 在图 7(a)中, 这部分面片没有百分比数值。从图 7 可以看出: 背景反射辐射以背景反射的太阳直射辐射为主, 占总辐射的 91%~95%。天空漫射辐射引起的背景反射辐射在背景反射辐射中所占的比例最高为 9%。从计算复杂度来看, 计算天空光漫射带来的背景反射辐射(半球天空仅考虑六个采样方向), 其计算时间是仅考虑太阳直射辐射所需时间的 70 倍。综合计算精度和效率, 考虑天空漫射对提高背景反射辐射的精度有所贡献, 代价是计算量的大幅增加。



(a) 背景反射辐射组成

(a) Composition of irradiance reflected by the background



(b) 太阳直射辐射占背景反射辐射的百分比

(b) Percentage of direct solar irradiance in total irradiance reflected by the background

图 7 背景反射辐射分析($\lambda=550 \text{ nm}$)

Fig.7 Analysis of irradiance reflected by the background($\lambda=550 \text{ nm}$)

4.5 出射辐亮度场

根据图 7 给出的草地 BRDF 数据计算整个场景在不同方向的出射辐亮度场分布, 出射方向的天顶角和方位角组合分别为: $(0^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 120^\circ)$, $(60^\circ, 240^\circ)$, 计算结果如图 8 所示, 可以明显看出, 在各个方向的

出射辐亮度存在明显差别。长期观测的结果显示: 大多数自然地物都具有方向反射特性, 可以用 BRDF 表征。这种特性对于多角度遥感、遥感数据分析和信息提取等方面都具有重要意义, 同时有助于确定地表反照率, 后者对于地表能量平衡至关重要。BRDF 特性极为重要却不易测量, 受到照明角、观测角的限制, 受限于特定的地物类型和分布情况, 野外测量还需要对大气效应进行补偿^[16]。基于光场的场景仿真提供了场景的空间位置、空间分布和光谱信息, 可以模拟不同地物类型在不同方向上的反射特性, 在 BRDF 的虚拟测量和模型拟合方面独具优势。

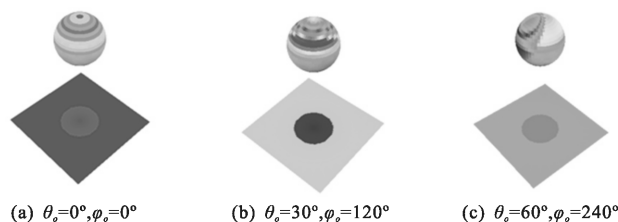


图 8 不同方向的出射辐亮度场($\lambda=550 \text{ nm}$)

Fig.8 Radiance field toward different directions leaving the scene surface($\lambda=550 \text{ nm}$)

5 结论

场景仿真是光学遥感全链路仿真的基础。对于光学遥感及其应用, 场景的几何、空间、光谱和辐射特性最为重要。借鉴光场理论, 以包含三维坐标、空间分布、波长、强度的全光函数作为表征参数, 建立基于光场的数字场景仿真理论与方法。针对可见光-近红外波段分析能量来源, 分别建立了太阳直射和天空漫射产生的数字场景入射辐照度场模型; 针对背景对目标的辐射贡献, 通过对太阳直射/天空漫射-背景反射-目标反射-传感器这种辐射传输路径的详细分析, 建立了背景产生的场景入射辐照度场模型; 采用地表方向反射模型建立了数字场景出射辐照度场模型; 最后设计了水平地面上悬浮球体的简单场景, 对上述模型进行了定量计算与分析, 验证了模型的正确性。

文中的研究成果已经在中国科学院重点部署项目中获得应用, 构建了包含人造地物(如建筑物、操场等)和自然地物(如植被、沙土等)的陆地场景, 模型面片精度达到厘米级, 场景内面片数量达到了 500 万。基于文中提出的场景仿真方法, 获得了不同大气条

件和光照条件下场景的入射辐照度场和出射辐亮度场,为光学成像全链路仿真提供了高精度的数字场景输入。按照文中提出的方法,能够对包含场景和大气在内的整个空间区域,按照几何、空间、光谱、辐射特性进行全面组织、表征和模拟。在此基础上,只需添加传感器和平台模型,按照任务需求构建场景和大气条件,开展不同天候、光照、波段、目标/背景下的成像仿真。通过这种面向最终应用效果的仿真和评估,预估在轨性能,修改设计参数,优化设计指标。同时由于该方法提供了场景特性的多维表征,对于新机理成像系统的仿真和论证也能起到很好的支撑作用。

参考文献:

- [1] Gerace A D, Goodenough A A, Montanaro M, et al. The development of a DIRSIG simulation environment to support instrument trade studies for the SOLARIS sensor [C]//SPIE, 2015, 947214: 1-8.
- [2] Grau E, Gastellu-Etchegorry J P. Radiative transfer modeling in the Earth-Atmosphere system with DART model [J]. Remote Sens Environ, 2013, 139: 149-170.
- [3] Borner A. Simulation opto-electronic systems for remote sensing with SENSOR[C]//SPIE, 2003, 4881: 472-483.
- [4] Ambeau B L, Gerace A D, Montanaro M, et al. The characterization of a DIRSIG simulation environment to support the inter-calibration of spaceborne sensors[C]//SPIE, 2016, 99720M: 1-9.
- [5] Xiao Qing, Li Min. A study on the transformation of airborne remote sensing image to spaceborne remote sensing image [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences), 2007, 43(3): 234-240. (in Chinese)
肖青, 李敏. 机载光学图像至卫星光学图像转换方法研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 234-240.
- [6] Liu Xiao, Yi Weining, Qiao Yanli, et al. Satellite borne optical remote sensor imaging simulation based on low-altitude remote sensing system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 217-225. (in Chinese)
刘晓, 易维宁, 乔延利, 等. 基于低空遥感系统的星载光学传感器成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 217-225.
- [7] Borner A, Wiest L, Keller P, et al. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems[J]. ISPRS Photog Remote Sens, 2001, 55: 299-312.
- [8] Goodenough A A, Brown S D. DIRSIG 5: core design and implementation[C]//SPIE, 2012, 83900H: 1-9.
- [9] Gastellu-Etchegorry J P, Martin E, Gascon F. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget[J]. Int J Remote Sens, 2004, 25(1): 73-96.
- [10] Landy M, Movshon J A. Computational Models of Visual Processing[M]. Cambridge: MIT Press, 1991: 3-20.
- [11] Schott J R. Remote Sensing: the Image Chain Approach[M]. New York: Oxford University Press, 2007.
- [12] Wang Gang, Yu Bingxi. Study on scientific visualization of earth remote sensing based on imagery simulation [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14 (6): 756-760. (in Chinese)
王刚, 俞秉熙. 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.
- [13] Xiao Liang, Wu Huizhong, Liu Yang, et al. Modeling and simulation of digital scene image synthesis [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(1): 113-117. (in Chinese)
肖亮, 吴慧中, 刘扬, 等. 数字景象匹配图模拟生成的建模与仿真[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 113-117.
- [14] Schott J R, Kuo D, Brown S, et al. Prediction of observed image spectra using synthetic image generation models[C]//SPIE, 1997, 3118: 81-93.
- [15] Ma Xiaoshan, Meng Xin, Yang Zhen, et al. Analysis and modeling of atmosphere influence on space-based optical remote sensing imaging simulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 226-231. (in Chinese)
马晓珊, 孟新, 杨震, 等. 天基光学遥感成像仿真中大气影响分析与模拟[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 226-231.
- [16] Rengarajan R, Schott J R. Modeling of forest canopy BRDF using DIRSIG[C]//SPIE, 2016, 98401F: 1-14.