

# 地基成像中的地气杂光建模与仿真

张金芳

(中国科学院软件研究所 综合信息系统技术国家级重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 为了研究地气杂散光对空间成像的影响, 考虑大气传输辐射、地面反射和相机消光特性建立了基于物理的数字仿真模型和仿真平台。针对太阳同步轨道星敏传感器应用, 仿真分析了成像传感器受地气杂散光干扰的时空分布特征, 该研究成果可用于指导成像系统设计。

**关键词:** 地气杂散光; 建模与仿真; 星敏传感器; POLDER BRDF; 大气辐射传输;

**中图分类号:** TP391.9

文献标识码: A

## 0 引言

成像遥感系统一般是通过成像系统记录的目标反射或辐射的光谱信息特征来识别目标并进行深入研究, 其中杂光的混入干扰了目标信息, 造成信噪比降低。其中的杂光来源于传输介质、成像系统本身以及视域外光源。本文重点研究地球作为一个反射太阳光的反射光源而造成的成像系统视域外杂光对成像的影响。

当前, 已有研究成果多集中于杂散光的抑制和防护罩设计<sup>[1,2,3,4]</sup>, 这些研究成果为成像系统的抗杂散光性能提供了基础参数。在空间成像仿真和杂光干扰研究方面, SENSOR<sup>[5]</sup>是一个考虑了地面场景、大气和相机性能的全面的仿真框架, 把系统分为光线追踪、辐射计算和成像系统等三部分, 实现了端到端的遥感影像成像仿真, 虽然未考虑杂光, 但提供了一个可参考的仿真框架; 张雷等<sup>[6]</sup>仿真分析了地面镜面反射太阳光对探测器的影响, 建立了数学模型, 由于没有考虑地面特性和大气传输特性, 误差较大; 廖瑛等<sup>[7]</sup>通过STK定性分析了研究太阳、月亮等作为杂散光进入空间相机视场的机会, 对其影响未作深入分析; 顾有林<sup>[8]</sup>等, 从影像处理的角度, 考虑大气辐射传输特性, 建立了基于COM的遥感影像生成仿真框架, 因为其输入为高分辨率遥感影像, 而非辐射强度, 故不适于杂散光的评价。

地气杂散光的强度受到诸如星下点海陆分布、地表或海面光学特征、镜头指向、大气状况, 而且这些参数均在或快或慢的运动变化着, 但对相机的一次成像过程中, 各项参数均可以视为静态, 因而首先建立静态杂散光仿真计算模型, 然后建立轨道仿真模型、大气动态仿真模型、地球表面变化仿真模型, 并最终集成为完整的空间杂散光仿真平台。静态杂散光仿真模型是

本文探讨的重点。

本文引入Polder全球BRDF数据库、ISCCP(国际卫星云气候计划)D2数据和大气辐射传输模型, 通过仿真得到地气光在传感器位置亮度, 并转化为对应的星等, 从杂散光的地理空间分布和全年强度分布角度进行了仿真试验研究, 试验结果可以作为判断遮光罩是否满足设计性能的参考依据。

## 1 地球表面光学模型

从空间相机的角度看, 地球表面的光学特性需要考虑地形形态<sup>[9]</sup>和表面物质与结构特性(地面湿度、颜色、粗糙度、植被和土壤性质等因素), 然而, 基于地形及表面参数建立全地球表面光学模型的难度在于地面参数的精确性、可获得性以及参数之间的内在联系。另一方面, Polder卫星从空间收集到的地面BRDF数据是多种影响因素的共同作用结果, 已经包含了地形的因素, 因而可以直接使用BRDF来描述地面的反射特性, 为了方便使用和插值的需要, 建立了相应的RPV参数化模型。

### 1.1 地球表面反射

POLDER是第一个可以获得全球偏振光观测的星载对地探测器, 可以对地气系统反射太阳辐射的方向和偏振度进行观测。单个轨道期间, 最多能够在16个不同的视角下观测同一目标, 把多次通过时的观测结果统一起来, 便可获得特定时间段内、地面各点的双向反射分布函数(BRDF)和双向偏振分布函数(BPDF)。

POLDER1(1996年发射, ADEOS-I卫星的载荷)和POLDER 2(2003年发射, ADEOS-II卫星的载荷)采用的非偏振波段分别为443 nm、490 nm、565 nm、763 nm、765 nm和910 nm, 偏

振波段为443 nm、670 nm 和865 nm (每个波长有3个偏振方向)。现在空间运行的是POLDER 3 (PARASOL探测器)将原来443 nm 的偏振通道改为490 nm; 将原来490 nm 波段的非偏振通道改为1020 nm 波段。

RPV是比较常用的BRDF的函数模型形式, 提供了使用上的方便性, 其公式形式为:

$$\rho_s(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v) = \rho_0 \frac{\cos^{k-1} \theta_s \cos^{k-1} \theta_v}{(\cos \theta_s + \cos \theta_v)^{1-k}} F(\xi)[1 + R(G)]$$

其中,  $\theta_s, \phi_s$  分别代表太阳的高度角和方位角,  $\theta_v, \phi_v$  分别代表观察高度角和方位角。  $\rho_0$  用于表征表面涂层反射强度的量,  $k$  用于表征表面的各向异性水平,  $G$  用于代表几何因子, 可以表示为:

$$G = [\tan^2 \theta_s + \tan^2 \theta_v - \tan \theta_s \tan \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)]^{1/2}$$

$F(\xi)$  是修正的Henyey-Greenstein函数, 定义为:

$$F(\xi) = \frac{1 - \Theta^2}{[1 + \Theta^2 - 2\Theta \cos(\pi - \xi)]^{1.5}}$$

其中, 相角  $\xi$  定义为:

$$\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\phi_s - \phi_v)$$

$\Theta$  称之为对称因子, 用于控制前向散射 ( $0 < \Theta \leq +1$ ) 和后向散射 ( $-1 < \Theta \leq 0$ ) 的相对量, 个  $R(G)$  是针对热点效应的修正函数, 定义为:

$$R(G) = \frac{1 - \rho_0}{1 + G}$$

但该模型因为计算太复杂, 在操作上不可行, 为此Engelson从中导出对应的线性形式 (Engelson模型):

$$\ln\left(\frac{\rho_s(\theta_s, \theta_v, \phi)}{1 + R(G)}\right) = \ln \rho_0 - \Theta \cos \xi +$$

$$(k-1) \ln(\cos \theta_s \cos \theta_v (\cos \theta_s + \cos \theta_v))$$

我们取Polder2数据的443 nm、565 nm、670 nm、865 nm 波段参与仿真试验。该数据集共包含24090个地面采样点的BRDF数据, 每个地面采样点上至少获取了25组数据。使用热点增强的RPV模型<sup>[10]</sup>参数参与大气传输计算。在应用中首先

从该数据中提取处每个采样地理点的RPV 四个波段的模型参数, 并保证二次方差在5%以内, 协方差大于0.9。

POLDER只提供了陆地的光学反射特性, 可以做到每月一组数据, 因而真实的BRDF参数更新周期也只能为一个月。另外由于局部天气变化形成的雨、雪事件对BRDF影像也比较大, 也需要建立相应的参数校正模型, 本文暂不考虑。

## 1.2 洋面反射

对于海洋通过风向与风力来建立洋面的反射参数, 采用如下公式<sup>[11]</sup>:

$$R(\mu', \mu, \varphi - \varphi') = \frac{1}{4\mu\mu'} R^{Fr}(\chi) P(\mu_n) S(\mu', \mu)$$

其中菲涅耳反射率为:

$$R^{Fr} = \frac{1}{2} \{r_{\parallel}^2 + r_{\perp}^2\},$$

$$r_{\parallel} = \frac{\sqrt{m^2 - \sin^2 \theta} - m^2 \cos \theta_i}{\sqrt{m^2 - \sin^2 \theta} + m^2 \cos \theta_i},$$

$$r_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta_i + \sqrt{m^2 - \sin^2 \theta}}$$

这里,  $m = n + ik$  为综合反射系数;  $\theta_i$  为入射角, 并且,  $\mu' = \cos \theta_i$ ;  $\chi$  为对法向量为  $\mu_n$  的微面的反射角。

坡度分布的概率密度函数为:

$$P(\mu_n) = \frac{1}{\pi \sigma^2 \mu^3} \exp\left(\frac{1 - \mu_n^2}{\sigma^2 \mu^2}\right)$$

其中,  $\sigma^2 = 0.00534\mu$ ,  $\mu$  为距离海平面10处的风速。

## 2 大气传输与杂散光定量仿真

大气传输模型是随着精确定量遥感需求发展起来的, 其目的是为了去除影像中大气的影晌, 从而增强地面信息量。通过大气传输辐射模型预先生成LUT (lookup table)<sup>[12]</sup>来逐像素校正, 而我们使用大气传输辐射模型的目的是用来仿真生成空间传感器位置的辐亮度 (RAS, radiance at sensor), 因而需要对模型的适用性进行分析。

常用的大气传输模型有: LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE、6S、SHARM, 有学者<sup>[13][14]</sup>从性能和准确性方面进行过比较研究。这里我们重点考虑其

仿真适用性, 兼顾效率和准确性。

由于LOWTRAN 局限于Lorentz 压力为主的线形, 只适用于30km 以下的高度, 而MODTRAN<sup>[15]</sup>同时考虑了Lorentz 压力加宽和Doppler 移动(与温度有关)加宽相结合的Voigt 线形, 可以在更高高度上使用。但是, 在高于60km 的高度上, 大部分分子不再处于局地热力平衡状态, 这意味着有些分子带的强度不再由环境温度确定。MODTRAN 没有对非局地热力平衡态的分子带进行合理的处理, 它的适用高度限于60km 以下。与FASCODE 精确计算每一层大气的光学厚度的做法不同, MODTRAN 采用适合于地球大气中中等温度变化的Curtis-Godson 近似, 通过一个等效均匀路径来代替多层路径的计算, 因而, MODTRAN 不可能达到FASCODE 的精度。

6S主要用在0.25-4.5um可见近红外波段的辐射传输计算, 可以对飞机观察进行模拟, 同时在整个计算过程中考虑了目标的高度、非朗伯面边界条件, 并采用了逐次散射法提高了计算的精确度。6S的光谱分辨率为2.5nm, 能够满足绝大多数的遥感辐射计算的要求, 不具备云扩展。

SHARM<sup>[16]</sup>是唯一使用C语言的编写的辐射传输代码, 其运行效率非常高, 可以一次计算处多个不同观察方向、观察高度角、不同波段的大气层顶(TOA)或层底的(BOA)的辐射亮度, 而且可用通过用户定义云函数来添加云的影响。因为它面向LUT的计算方式不适于相机成像仿真, 需要进行代码改造。

FASCODE是一个完全的逐线Beer-Lambert 算法, 它以最精细的光谱分辨率“精确”计算孤立的、重叠的分子谱线, 这样的光谱分辨率与任意版本的HITRAN 的分子成分跃迁资料相兼容。通过对每一层分子吸收, 散射效应(分子和气溶胶)及一些连续吸收的计算, FASCODE 提供了“精确”透过率计算的处理。并且FASCODE 考虑了非局地热力平衡状态的处理, 原则上它的应用高度不受限制。因此, FASCODE 通常用作评估遥感系统或参数化带模型的基准。因为它的积分计算量非常大, 实际传输计算中一般不用。

从以上的比较可知, 6S和SHARM在效率和使用范围上比较适合天基空间相机探测监视仿真, 为了以后对大气环境中云的影响的扩展, 我们采用改造SHARM的途径。

作为非成像光的杂散光, 可以通过杂散光形

成的传感器照度来定量评价。本文采用Mont-Carlo积分法来计算, 即对杂散光视场内的地面区域进行随机均匀采样, 计算其对应的传感器辐亮度并积分形成传感器杂散光亮度和照度, 公式如下:

$$R = \Omega \cdot \frac{1}{n} \sum L_i$$

其中 $\Omega$ 为杂散光立体角,  $L_i$ 为通过大气辐射传输模型仿真计算的地面采样点形成的传感器亮度,  $n$ 为采样点数, 增大该值可以提高精度。通过 $\varphi$ (光线与相机光轴的夹角)和 $\theta$ 来对光线进行随机采样, 为保证采样的均匀性, 要求:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\phi}{\pi} \arccos(\xi_1) \\ \theta = \pi \xi_2 \end{cases}$$

其中 $\phi$ 为杂散光视场对相机与星下点矢量的最大张角,  $\xi_1, \xi_2$ 为两个(0, 1)区间的随机变量。

辐射传输计算使用POLDER 2003全年数据, 因为卫星故障, 数据未能覆盖全部陆地区域, 采用最邻近法来获得空白区的BRDF值; 海洋反射基于1.2中的方法; 大气气溶胶光学参数数据依据ISCCP D2 2003年数据。

### 3 相机消光模型

地气光作为杂散光不能直接射入成像面, 其最终的感光效果受到遮光罩、档光环等的控制。根据试验<sup>[17][18]</sup>结论, 规避角在一定范围以内, 随着角度的减小, 形成的CCD像面照度呈指数增长, 当大于该值时, 其形成的照度基本不变。因而其对应的消光比为:

$$Ext(\theta) = \begin{cases} 1 & , \theta \leq \theta_{fov} \\ e^{a(\cos\theta - \cos\theta_{fov})} & , \theta_{fov} < \theta < \theta_c < \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

其中,  $a$ 与遮光罩的性能相关,  $\theta_{fov}$ 为相机半视场角,  $\theta_c$ 为特征角, 与遮光罩和视场角相关。

### 4 空间环境仿真平台

空间环境模型旨在天体物理学理论, 基于真实的卫星轨道及天文学星表数据, 综合计算机图形学及天文学知识, 建立太阳系内的行星、卫星

的轨道预报模型和恒星的位置管理模型，通过该模型可以准确确定某时刻探测器、地球、太阳、恒星的空间相对几何位置。并采用一系列加速绘制技术，实时模拟出卫星的运动过程及其与星空的合成场景（图1）。本研究通过在已经建立的三维空间仿真平台上扩展杂散光应用仿真功能，即大气状态仿真、地面反射仿真和大气传输仿真。

### 5 仿真试验与结果分析

三维空间环境平台提供基本的空间几何和时间参数，大气仿真和地面反射仿真的结果作为大气辐射传输的输入（图2）。仿真试验中，大气仿真和地面反射仿真采用2003年真实数据；大气模型使用美国1956标准大气；遮光罩通过消光比来描述其抗杂散光能力。

通过实时的太阳同步轨道卫星仿真，仿真计算一年内各个月份，地气光作为杂散光而产生的对相机的影响特征，同时也可以确定空间相机遮光罩的设计指标是否满足需要。

仿真中使用的卫星为太阳同步轨道卫星，相

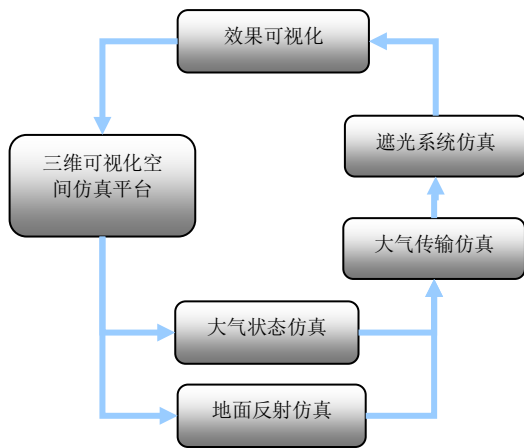


图2 仿真流程图  
Fig.2 simulation flow chart

机垂直于轨道平面且背对太阳，惯性定向。取与镜头垂直的平面作为其有效杂散光视场半平面（只有该平面立体角内的光线才有可能进入相机的入瞳），该视场角中的地球表面成为相机的面光源。

仿真由时间驱动，三维可视化空间仿真平台提供实时的空间几何关系参数，并通过大气仿真和地面反射仿真来产生对应的视场中特定光线的传输环境，再经过大气仿真来生成相机位置的杂

光照度，根据相机遮光系统的PST来合成特定信噪比的仿真星图并可可视化。

通过整体杂散光的海陆分布对比可以明显看

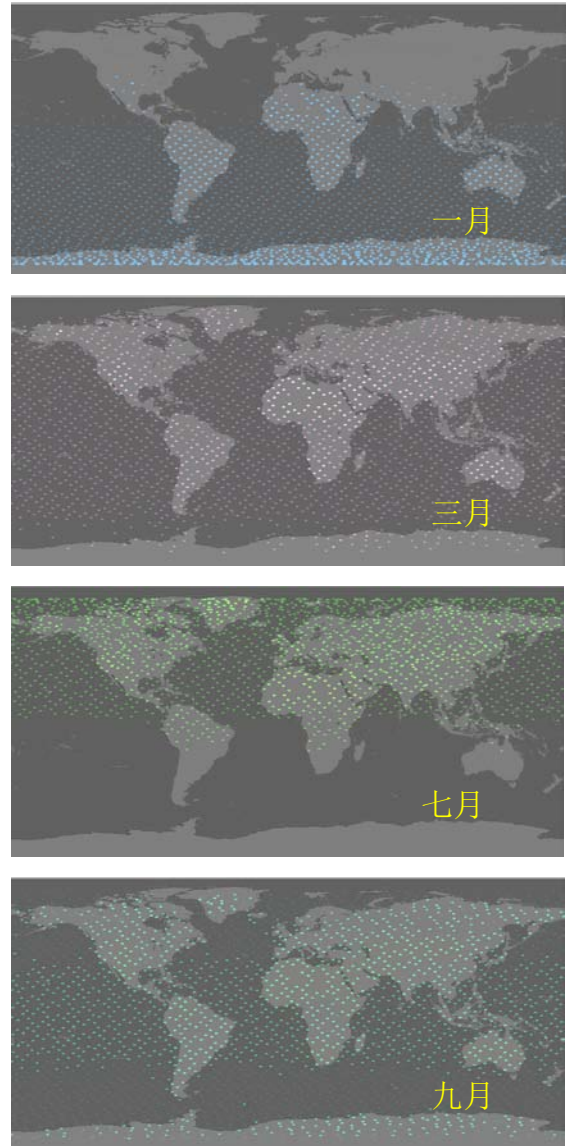


图3 空间传感器杂散光强度的星下点地理分布仿真结果  
Fig.3 simulation result of Space sensor stray light intensity distribution of sub-satellite point

出，杂散光的出现与其星下点的地理位置有密切联系，这与卫星的太阳同步轨道特征相一致。杂散光的照度分布受季节性影响，随太阳直射点的变化在南北半球间呈周期性变动（图3）。

利用星等计算公式：

$$m = -2.5 \log(E_{sum} / E_0)$$

其中，

$$E_0 = 2.65 \times 10^{-6} \text{lx}$$

将照度对应到星等上（图4）。

全年杂散光形成的像面照度大于8等星的概

率大于54.4%;大于6等星的概率大于90.3%。其中八月份的杂散光最弱,十月份杂散光最强。

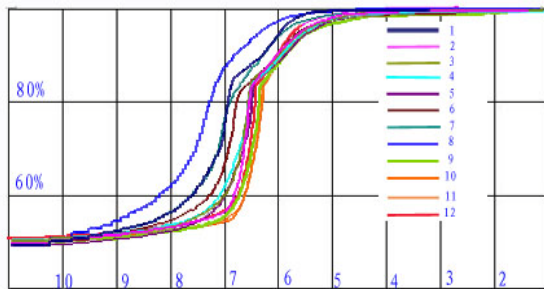


图4 2003年全年每月杂散光仿真强度概率累计曲线图(横轴为星等,纵轴为概率)

Fig. 4 cumulative relative frequency curves of stray light intensity for every month in 2003 (horizontal axis for star magnitude, Vertical Axis for frequency)

## 6 结论

本文建立了基于物理的、系统的地气杂散光仿真模型和比较完善的空间成像传感器地气杂散光仿真平台,来仿真分析地气光对探测器的影响,并针对星敏传感器获得了初步的仿真结果。所建立的杂散光仿真平台可用于对空间成像系统进行辅助设计与验证。

### 参考文献:

- [1] 李婷,杨建峰等. R-C 系统的遮光罩设计与仿真[J]. 光子学报,2008. Vol. 37 No.2:332-335.
- [2] 卢卫,李展,张建荣等. 星敏传感器中遮光罩设计及结果模拟[J]. 光电工程,2001. Vol.28, No.3: 12-15.
- [3] 唐勇,卢欣,郝云彩. 星敏传感器杂光抑制分析[J]. 航天控制. 2004. Vol.22, No.3:58-61.
- [4] 岑兆丰,李晓彤,朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程. 2007. Vol.36 No.3:300-304.
- [5] Anko Borner, Lorenz Wiest. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remotesensing systems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2001. 55:299-312.
- [6] 张雷,安源,孙小伟等. 地面反射太阳光对 CCD 探测系统影响的研究[J]. 半导体光电. 2006. Vol.27 No.5:645-647.
- [7] 廖琪,刘光明,文援兰. 卫星星敏传感器视场建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报. 2006. Vol.18 No.2:38-40.
- [8] 顾有林,易维宁,乔延利. 基于 COM 的光学遥感成像模拟软件的设计与实现[J].系统仿真学报.2008. Vol.20 No.9:2319-2322.
- [9] Sandrine Pallotta,Xavier Briottet,Christophe. MieschSensor radiance physical model for rugged heterogeneous surfaces in the 3-14  $\mu\text{m}$  region[J]. OPTICS EXPRESS 2130 . 2006. Vol.14,No. 6: 2130- 2150.
- [10] F. Maignan, F.-M. Breon. Bidirectional reflectance of Earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot[J]. Remote Sensing of Environment . 2004. 90: 210-220.
- [11] Nakajima, T., and M. Tanaka, Effect of wind-generated waves on the transfer of solar radiation in the atmosphere-ocean system[J], Quant Spectrosc Radiat Transfer. 29, 1983:521-537.
- [12] 何立明等. AMTIS 大气订正算法—基于 MODTRAN4.1 与 BRDF 订正环[J]. 遥感学报. 2004. Vol.8, No.5:389-396.
- [13] 孙毅义,董浩,毕朝辉,李治平. 大气辐射传输模型比较研究[J]. 强激光与粒子束.Feb. 2004.Vol. 16, No. 2:149-153.
- [14] Codes comparison [EB/OL] . <http://rtcodes.ltdri.org/2008>.
- [15] Emmett J.,Ientilucci. Using MODTRAN Predicting Sensor-Reaching Radiance[Z]. Chester F. Carlson Center for Imaging Science Rochester Institute of Technology. 2007. 5.
- [16] Lyapustin, A. Radiative transfer code SHARM-3D for radiance simulations over a non-Lambertian nonhomogeneous surface[J]. intercomparison study. 2002.41: 5607-5615.
- [17] J. Biretta, D. Van Orsow, W. Sparks, M. Reinhart, and A. Vick. ACS Background Light vs. Bright Earth Limb Angle.Instrument Science Report ACS.2003.7.
- [18] Dick Shaw, Merle Reinhart, and Jennifer Wilson . Scattered Light from the Earth Limb Measured with the STIS CCD.Instrument Science Report STIS. 1998.6

## Modeling and Simulation of Earth Stray Light Effect on Space-based Imaging Sensor

Zhang Jinfang

(National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** To examine the earth stray-light effect in space imaging, a physical based numeric simulation model of stray-light was developed, taking into account the atmospheric radiative transfer, ground reflection, and camera extinction characteristic, and a simulation platform was build. A case of star-sensor on sun synchronization orbit satellite was studied through simulation in order to gain the characteristics of temporal-spatial distribution of the stray light. And that give instruction to the designing of a imaging system.

**Key words:** earth stray-light; modeling & simulation; star sensor; POLDER BRDF; atmospheric radiative transfer