

# 星载多波段红外光学系统的杂散辐射分析\*

杜胜华, 夏新林\*\*, 孙创

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:**引入反向蒙特卡罗法与双向蒙特卡罗法对红外光学系统的杂散辐射进行分析, 基于光谱辐射传递因子导出了焦平面辐射能流计算式. 以某星载多波段红外光学系统为例, 在检验计算可靠性的基础上, 模拟了各波段辐射能从地球背景和光机内壁面到焦平面的传播过程, 分析了壁面吸收率与温度的影响. 结果表明, 采用双向蒙特卡罗法可有效地模拟辐射能从地球向星载光学系统焦平面的传播过程, 采用反向蒙特卡罗法可容易地分析光机内部热辐射的影响; 光机内壁面吸收率对视场外杂散辐射的传播有很大影响, 温度高于 250 K 的光机内壁面热辐射成为主要的杂散光源.

**关键词:**杂散辐射; 蒙特卡罗法; 红外光学系统

**中图分类号:** O435; TK124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)04-0763-5

## 0 引言

杂散辐射, 也称为杂散光, 是影响各种空间光学系统分辨率的重要因素. 正确预测杂散光大小的程度, 并采取有效的抑制手段已成为研制各种高性能空间光学系统的重要环节<sup>[1-2]</sup>. 随着杂散光传播模型、基本数据与计算技术的不断提高与完善, 使得模拟计算的可靠性日益提高. 对杂散光问题的评估与抑制设计越来越重视模拟计算, 同时, 对计算准确度的要求不断提高. 国内外一些研究机构已开发了多种杂散光分析软件, 如 APART/PADE、GUERAP、ASAP、TRACE-PRO 等; 所采用的计算方法有近轴近似法、区域法、蒙特卡罗(MC)法与光线跟踪法, 其中, 蒙特卡罗法与光线跟踪法是最主要的分析方法<sup>[3-4]</sup>.

以往的空间光学系统杂散光分析与抑制主要考虑太阳光与地球反照光, 注重于模拟分析杂散光线在光机结构内的传播; 将光机系统入口面的杂散光按均匀或局部均匀、漫入射或平行入射处理. 随着红外与多光谱系统的迅速增加, 多光谱红外系统的杂散光问题日益突出, 其模拟分析与抑制原理都与可见光有较大差别, 光机内部结构热辐射是必须考虑的一个因素<sup>[5-9]</sup>.

自 1968 年 Howell 将其引入到热辐射传递计算领域以来, 在复杂系统与介质的光热辐射传播计算中得到了广泛应用和不断完善<sup>[10]</sup>. 在通常的蒙特

卡罗方法中, 模拟、跟踪抽样能束从发射源到接受面的传播过程, 是正向蒙特卡罗(FMC)法. 近年来, 一种从接受面到发射源的反向(后向)蒙特卡罗法(BMC)开始受到重视. BMC 法比 FMC 法更容易处理红外系统中的光热辐射传输问题<sup>[11]</sup>.

本文采用 BMC 法、正反向计算相结合的双向蒙特卡罗(BDMC)法, 对某星载多波段红外光学系统的视场内地球背景辐射、视场外杂散光、以及光机内部热辐射传播进行了直接模拟, 给出了各波段的红外背景辐通量与相应的杂散光量. 初步分析了光机内部表面的辐射特性、温度对杂散光的影响.

## 1 BDMC 与 BMC 的计算原理

星载红外光学系统的杂散光源包括光学系统外部环境红外辐射和光机内部热辐射两种红外杂散光源. 前者包括视场外地球红外辐射和反照太阳光中的红外波段辐射.

采用 FMC 或 BMC 法对光热辐射从地球背景与视场外杂光源到光机系统入口、直至焦平面的完整传播过程进行直接模拟, 所需计算量非常巨大, 难以实现. 如对于一个在 500 km 近地轨道上运行的卫星, 从地球发射的抽样能束到达对地观测光学系统入口的概率约为  $10^{-14}$ , 而杂散光从光学系统入口面到达焦平面的概率一般小于  $10^{-6}$ . 也就是说, 对杂散光进行直接模拟时, 至少需进行  $10^{20}$  模拟抽样数. 这样, 不仅计算量巨大, 而且抽样能束数远超过目前随机数发生器的退化周期. 本文提出对杂散光直接模拟的 BDMC 法. 对光机内部热辐射产生的红外杂散光传播, 则采用 BMC 法. FMC、BMC、BDMC 的基本原理如图 1.

\* 新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0335)、国家自然科学基金(50336010)和霍东英青年教师基金(81050)资助

\*\* Tel: 0451-86412148 Email: xiaxl@hit.edu.cn

收稿日期: 2006-10-20

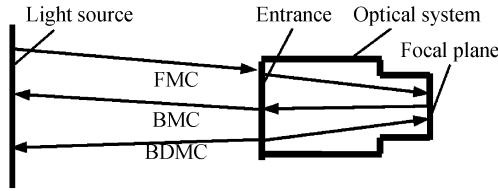


图1 计算光热辐射传播的MC法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MC method for calculating propagation of light and thermal radiation

设  $dA_f$  是焦平面上任一微元面,  $dA_i$  是视场内背景、视场外杂散光源或光机内任一红外辐射微元面;  $RT_{i,f}(\lambda, s)$  是  $dA_i$  对  $dA_f$  的光谱方向辐射传递因子,  $s, \lambda$  分别是传播方向与波长; 则  $dA_f$  接受到来自  $dA_i$  的波段能流为

$$\Phi_{dA_i \rightarrow dA_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \frac{dA_i}{\pi} \int_{\Omega_i} \epsilon_i(\lambda, s) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) |n_i \cdot s| RT_{i,f}(\lambda, s) d\Omega_i \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_i(\lambda, s)$  是  $dA_i$  的光谱方向发射率,  $[\lambda, \lambda + \Delta\lambda]$  为波段区间,  $E_b(T_i)$ 、 $F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda)$  分别是  $dA_i$  温度  $T_i$  下的黑体辐射力与黑体辐射的波段份额函数,  $n_i$  为  $dA_i$  表面的法向矢量,  $\Omega_i$  是由  $dA_i$  向  $dA_f$  传播的辐射能束的空间立体角.

由式(1)导出焦平面  $dA_f$ 、 $A_f$  接受到的波段辐射能流分别为

$$\Phi_{dA_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \frac{1}{\pi} \sum_i \int_{A_i} \int_{\Omega_i} \epsilon_i(\lambda, s) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) |n_i \cdot s| RT_{i,f}(\lambda, s) d\Omega_i dA_i \quad (2)$$

$$\Phi_{A_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \frac{1}{\pi} \sum_i \int_{A_i} \int_{A_j} \int_{\Omega_i} \epsilon_i(\lambda, s) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) |n_i \cdot s| RT_{i,f}(\lambda, s) d\Omega_i dA_i dA_j \quad (3)$$

对地球反照太阳光的红外波段, 将上述各式中的  $\epsilon_i(\lambda, s)$ 、 $T_i$  分别用地球的光谱反照率  $\rho_e(\lambda)$  与太阳辐射温度  $T_s$  代替. 求解获得  $RT_{i,f}(\lambda, s)$  后, 即可由式(1)~(3)计算出到达焦平面的背景辐射或杂散光辐射能流.

根据光辐射传播的可逆性原理, 辐射传递因子之间应满足下面倒易关系

$$\epsilon_i(\lambda, s) |n_i \cdot s| \cdot RT_{i,f}(\lambda, s) d\Omega_i dA_i = |n_f \cdot s| \cdot RT_{f,i}(\lambda, -s) d\Omega_f dA_f \quad (4)$$

式中,  $n_f$  为  $dA_f$  表面的法向矢量,  $RT_{f,i}(\lambda, -s)$  是  $dA_f$  对  $dA_i$  的光谱方向光谱辐射传递因子,  $\Omega_f$  是辐射能束由  $dA_f$  向  $dA_i$  传播的空间立体角. 这里, 焦平面  $dA_f$  的光谱方向发射率  $\epsilon_f(\lambda, -s) = 1.0$ .

模拟计算中, 一般直接采用光谱辐射传递因子  $RT_{i,f}(\lambda)$  的形式进行统计. 对漫发射表面,  $\epsilon_i(\lambda, s) = \epsilon_i(\lambda)$

$$RT_{i,f}(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int |n_i \cdot s| \cdot RT_{i,f}(\lambda, s) d\Omega_i \quad (5)$$

式(1)~(4)可改写为

$$\Phi_{dA_i \rightarrow dA_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \epsilon_i(\lambda) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) RT_{i,f}(\lambda) dA_i \quad (6)$$

$$\Phi_{dA_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \sum_i \int_{A_i} \epsilon_i(\lambda) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) RT_{i,f}(\lambda) dA_i \quad (7)$$

$$\Phi_{A_f}(\lambda, \Delta\lambda) = \sum_i \int_{A_i} \int_{A_j} \epsilon_i(\lambda) E_b(T_i) \cdot F_b(T_i, \lambda, \Delta\lambda) RT_{i,f}(\lambda) dA_i dA_j \quad (8)$$

$$\epsilon_i(\lambda) \cdot RT_{i,f}(\lambda) dA_i = RT_{f,i}(\lambda) dA_f \quad (9)$$

式中,  $\epsilon_i(\lambda)$  是  $dA_i$  的光谱半球发射率.

采用 FMC 法计算时, 根据辐射传播过程的概率模型进行辐射能束的随机抽样与正向跟踪模拟, 统计得出  $RT_{i,f}(\lambda)$ . 采用 BMC 法计算时, 对辐射能束传播的反方向进行跟踪模拟, 统计得出  $RT_{f,i}(\lambda)$ , 然后由式(9)求解获得  $RT_{i,f}(\lambda)$ .

对透明界面  $A_m$ , 若  $dA_i$  与  $dA_f$  之间任一辐射能束传播都经过  $A_m$ , 则  $RT_{i,f}(\lambda, s)$  可分解为

$$RT_{i,f}(\lambda, s) = RT_{i,m}(\lambda, s) \cdot RT_{m,f}(\lambda, s) \quad (10)$$

采用 BDMC 法计算时, 通过反向跟踪模拟, 统计得出  $RT_{i,m}(\lambda, s)$ ; 通过正向跟踪模拟, 统计得出  $RT_{m,f}(\lambda, s)$ ; 然后根据式(10)获得  $RT_{i,f}(\lambda, s)$ , 进一步根据式(5)求解得出  $RT_{i,f}(\lambda)$ .

采用 BDMC 法或 BMC 法进行模拟计算所涉及的概率模型及辐射能束的跟踪求解技术与 FMC 相同, 详见参考文献[2, 10, 12].

## 2 模拟计算的可靠性检验

引入归一化光谱辐射传递因子  $RT_{i,j}^*(\lambda) = \epsilon_i(\lambda) RT_{i,j}(\lambda) A_j$ , 对所计算的系统内任意两个面积单元  $A_i$ 、 $A_j$ , 满足倒易关系

$$RT_{i,j}^*(\lambda) = RT_{j,i}^*(\lambda) \quad (11)$$

式中,  $RT_{i,j}(\lambda)$  是  $A_i$  对  $A_j$  的光谱辐射传递因子,  $\epsilon_i(\lambda)$  是  $A_i$  光谱半球发射率.

计算得到的光谱辐射传递因子是否满足式(11), 反映了模拟计算的可靠性. 由于蒙特卡罗法的统计性, 模拟结果不会绝对满足式(11), 而存在一定的统计偏差, 但随着随机抽样数目的增多, 该偏差会逐渐减小.

以图2所示的红外光学系统内的辐射传递为

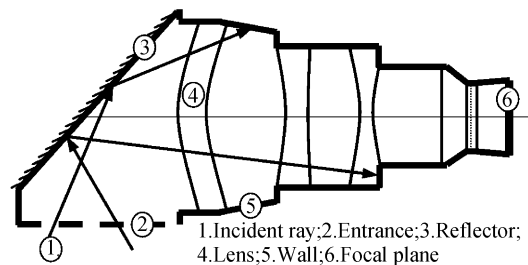


图2 多波段红外光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-spectral infrared optical system

例,进行验证计算.将光学系统内部划分成40个表面单元,其中,系统入口面、焦平面和反射镜面各1个、光学元件表面(透镜等)14个、漫灰体或黑体壁面23个.

表1给出了抽样数密度不同时,系统入口面 $A_1$ 与焦平面 $A_f$ 之间光谱辐射传递因子的BMC与FMC计算结果.表中 $\epsilon_w(\lambda)$ 是壁面的发射率,计算中取 $\epsilon_1(\lambda) = \epsilon_f(\lambda) = 1.0$ ,镜面与各光学元件的光谱辐射特性按相应的材料物性确定.由表1可看出,随着抽样数密度的增大,BMC与FMC的计算

表1 抽样数密度对光谱辐射传递因子计算结果的影响

抽样数密度		$\epsilon_w(\lambda) = 1.0$		$\epsilon_w(\lambda) = 0.85$	
$ND_i / \text{mm}^{-2}$	$ND_f / \text{pixel}^{-1}$	$RT_{1,f}^*(\lambda)$	$RT_{f,1}^*(\lambda)$	$RT_{1,f}^*(\lambda)$	$RT_{f,1}^*(\lambda)$
$1 \times 10^2$	1	2.260	2.382	2.660	2.470
$1 \times 10^4$	$1 \times 10^2$	2.382	2.357	2.438	2.413
$3 \times 10^4$	$2 \times 10^3$	2.369	2.356	2.441	2.455
$5 \times 10^4$	$4 \times 10^3$	2.355	2.355	2.448	2.449

表2 光谱辐射传递因子倒易性检验( $ND_i = 1 \times 10^4 / \text{mm}^2$ )

$(i, j)$	$\epsilon_w(\lambda) = 1.0$			$\epsilon_w(\lambda) = 0.85$		
	$RT_{i,j}^*(\lambda)$	$RT_{j,i}^*(\lambda)$	$\Delta_{i,j}$	$RT_{i,j}^*(\lambda)$	$RT_{j,i}^*(\lambda)$	$\Delta_{i,j}$
$i=8, j=40$	2.330	2.358	0.51%	2.442	2.430	0.25%
$i=12, j=40$	2.430	2.445	0.31%	2.505	2.500	0.1%
$i=13, j=40$	$1.600 \times 10^{-3}$	$1.673 \times 10^{-3}$	2.23%	$2.215 \times 10^{-3}$	$1.934 \times 10^{-3}$	2.43%
$i=31, j=40$	1.121	1.126	0.22%	1.338	1.342	0.15%
$i=39, j=40$	69.218	69.180	0.02%	77.496	77.166	0.02%

### 3 星载多波段红外光学系统的背景辐射和杂散辐射模拟分析

背景辐射是红外系统必然接受到的辐射,背景辐射在焦平面上形成的辐照度有时比目标形成的辐照度高好几个数量级,且其变化复杂.星载红外光学系统的杂散光背景为地球大气背景,包括地球红外辐射、地球对太阳光反射的红外波段.其中,地球对太阳光的反射是大气散射、地球表面和云层对太阳辐射反射的共同结果.本文按250K黑体考虑地球的红外辐射,地球表面对太阳光的反照率分别为

结果趋于一致.

如表1, $ND_i$ 为第*i*个表面单元的能束随机抽样数密度. $\alpha_i(\lambda)$ 、 $\epsilon_i(\lambda)$ 分别是系统内部壁面的光谱吸收率与光谱发射率, $\alpha_i(\lambda) = \epsilon_i(\lambda)$ .下角标f、w分别代表焦平面和光学系统壁面.抽样能束的数密度越大,光谱辐射传递因子计算结果的相对性符合程度越好,采用两种不同计算的结果越接近.当壁面的 $\alpha_i(\lambda)$ 减小时,光线在光学系统内部进行多次反射,辐射传递因子计算结果的波动增加.表2是光谱辐射传递因子的相对性检验结果,表中的相对性满足程度以误差 $\Delta_{i,j}$ 表示,其定义为: $\Delta_{i,j} = \frac{|RT_{i,j}(\lambda) - RT_{j,i}(\lambda)|}{RT_{i,j}(\lambda) + RT_{j,i}(\lambda)} \times 100\%$ .可以看出,本文计算的光谱辐射传递因子相对性误差小于2.5%.计算选取的能束数越大,计算误差将会越小,但计算时间会增加,以上计算误差已满足计算所需要的量级.

$\rho_e = 0.2$ (无云)、 $\rho_e = 0.6$ (有云)两种情况.在大气层外,太阳辐照度的光谱分布是确定的,按6000K的黑体辐射考虑,其光谱积分值为一常数,本文太阳常数 $E_s = 1351 \text{ W/m}^2$ 计算.

表3是某星载多波段红外光学系统的地球背景辐射通量模拟结果. $\Phi_m$ 、 $\Phi_f$ 分别为到达光学系统入口和焦平面的波段辐射通量. $\alpha_w(\lambda)$ 是系统内壁面的光谱吸收率,考虑了三种波段.

如表4,对于视场外的杂散辐射,当星载红外光学系统内壁面的反射率改变时,到达焦平面的能量也发生改变.这是由于壁面反射率越大,经过反射

表3 到达焦平面的视场内地球背景辐射通量

波段 ( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )/ $\mu\text{m}$	背景特性	$\Phi_m / \text{W}$	$\Phi_f / \text{W}$		
			$\alpha_w(\lambda) = 1.0$	$\alpha_w(\lambda) = 0.95$	$\alpha_w(\lambda) = 0.85$
2.62~2.78	$\rho_e = 0.2$	$1.427 \times 10^{-4}$	$2.354 \times 10^{-6}$	$2.354 \times 10^{-6}$	$2.354 \times 10^{-6}$
	$\rho_e = 0.6$	$4.283 \times 10^{-4}$	$7.062 \times 10^{-6}$	$7.063 \times 10^{-6}$	$7.063 \times 10^{-6}$
	地球红外辐射	$3.201 \times 10^{-8}$	$5.277 \times 10^{-10}$	$5.278 \times 10^{-10}$	$5.278 \times 10^{-10}$
2.78~2.86	$\rho_e = 0.2$	$6.119 \times 10^{-5}$	$1.009 \times 10^{-6}$	$1.009 \times 10^{-6}$	$1.009 \times 10^{-6}$
	$\rho_e = 0.6$	$1.836 \times 10^{-4}$	$3.027 \times 10^{-6}$	$3.027 \times 10^{-6}$	$3.027 \times 10^{-6}$
	地球红外辐射	$3.101 \times 10^{-8}$	$5.113 \times 10^{-10}$	$5.114 \times 10^{-10}$	$5.114 \times 10^{-10}$
4.22~4.38	$\rho_e = 0.2$	$2.667 \times 10^{-5}$	$4.397 \times 10^{-7}$	$4.398 \times 10^{-7}$	$4.398 \times 10^{-7}$
	$\rho_e = 0.6$	$8.001 \times 10^{-5}$	$1.319 \times 10^{-6}$	$1.319 \times 10^{-6}$	$1.319 \times 10^{-6}$
	地球红外辐射	$8.358 \times 10^{-6}$	$1.378 \times 10^{-7}$	$1.378 \times 10^{-7}$	$1.378 \times 10^{-7}$

表 4 到达焦平面视场外的地球杂散辐射通量

波段 ( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )/ $\mu\text{m}$	背景特性	$\Phi_{\text{in}}/\text{W}$	$\Phi_{\text{t}}/\text{W}$		
			$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 1.0$	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.95$	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.85$
2.62~2.78	$\rho_{\text{e}}=0.2$	$5.223 \times 10^{-2}$	$1.774 \times 10^{-7}$	$1.952 \times 10^{-7}$	$2.740 \times 10^{-7}$
	$\rho_{\text{e}}=0.6$	$1.567 \times 10^{-1}$	$5.323 \times 10^{-7}$	$5.855 \times 10^{-7}$	$8.219 \times 10^{-7}$
	地球红外辐射	$1.171 \times 10^{-5}$	$3.978 \times 10^{-11}$	$4.376 \times 10^{-11}$	$6.142 \times 10^{-11}$
2.78~2.86	$\rho_{\text{e}}=0.2$	$2.239 \times 10^{-2}$	$7.606 \times 10^{-8}$	$8.366 \times 10^{-8}$	$1.174 \times 10^{-7}$
	$\rho_{\text{e}}=0.6$	$6.716 \times 10^{-2}$	$2.282 \times 10^{-7}$	$2.510 \times 10^{-7}$	$3.523 \times 10^{-7}$
	地球红外辐射	$1.134 \times 10^{-5}$	$3.854 \times 10^{-11}$	$4.239 \times 10^{-11}$	$5.951 \times 10^{-11}$
4.22~4.38	$\rho_{\text{e}}=0.2$	$9.756 \times 10^{-3}$	$3.315 \times 10^{-8}$	$3.646 \times 10^{-8}$	$5.117 \times 10^{-8}$
	$\rho_{\text{e}}=0.6$	$2.927 \times 10^{-2}$	$9.944 \times 10^{-8}$	$1.094 \times 10^{-7}$	$1.535 \times 10^{-7}$
	地球红外辐射	$3.058 \times 10^{-3}$	$1.039 \times 10^{-8}$	$1.143 \times 10^{-8}$	$1.604 \times 10^{-8}$

镜反射后空间分布各异的杂散光被壁面反射的几率越大。

#### 4 光机内部结构的红外热辐射

任何有电阻的材料,在温度高于绝对零度时会产生热噪声.内部热辐射是光学系统内辐射源(如温度较高的光学元件和其它表面)产生的红外辐射,经反射、折射或衍射到达焦平面的辐射能.以下计算中,光学系统内部和其它表面的温度选取 250 K, 150 K, 100 K, 表面吸收率分别为 1.0, 0.95, 0.85.

表 5 结果显示,在光学构件的温度提高 100 K

表 5 壁面不同反射率和温度时到达焦平面的内部热辐射通量

波段 ( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )/ $\mu\text{m}$	壁面吸收率	$\Phi_{\text{t}}/\text{W}$		
		$T=100\text{ K}$	$T=150\text{ K}$	$T=250\text{ K}$
2.62~2.78	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 1.00$	$4.1269 \times 10^{-22}$	$1.3607 \times 10^{-14}$	$1.7106 \times 10^{-8}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.95$	$3.8702 \times 10^{-22}$	$1.2761 \times 10^{-14}$	$1.6042 \times 10^{-8}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.85$	$3.3641 \times 10^{-22}$	$1.1092 \times 10^{-14}$	$1.3944 \times 10^{-8}$
2.78~2.86	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 1.00$	$1.4139 \times 10^{-21}$	$2.1285 \times 10^{-14}$	$1.6573 \times 10^{-8}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.95$	$1.3285 \times 10^{-21}$	$1.9960 \times 10^{-14}$	$1.5542 \times 10^{-8}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.85$	$1.1525 \times 10^{-21}$	$1.7350 \times 10^{-14}$	$1.3510 \times 10^{-8}$
4.22~4.38	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 1.00$	$9.3791 \times 10^{-15}$	$6.0882 \times 10^{-10}$	$4.4667 \times 10^{-6}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.95$	$8.7955 \times 10^{-15}$	$5.7093 \times 10^{-10}$	$4.1888 \times 10^{-6}$
	$\alpha_{\text{w}}(\lambda) = 0.85$	$7.6454 \times 10^{-15}$	$4.9628 \times 10^{-10}$	$3.6411 \times 10^{-6}$

#### 5 结论

本文采用 BDMC 与 BMC 法对某星载红外光学系统进行了数值模拟,分别获得了焦平面上的视场内背景辐射通量、视场外杂散光通量、以及系统内自身热辐射杂光通量,分析了系统内结构温度与辐射物性的影响.通过研究,初步得出:1)采用双向蒙特卡罗法可实现背景辐射和杂散辐射从地球(大表面)到星载红外光学系统焦平面(小表面)的传递过程模拟.利用反向蒙特卡罗法通过一次模拟即可计算出光机内部各壁面热辐射到达焦平面的杂散辐射通量.2)计算结果表明,光机内部结构的吸收率基本不影响视场内地球背景的辐射进入量;光机内部结构

时,红外光学系统内部的热辐射在焦平面上形成的杂散光通量提高了 6 个数量级.所以红外光学系统的光学元件温度对杂散辐射影响很大.外部环境入射的辐射中 90% 以上被壁面吸收,提高了壁面的温度,促使光学元件自身辐射的杂散光对焦平面信号形成很强的干扰.相对于红外光学系统内壁面温度,其内部壁面的反射率对红外光学系统的杂散光影响较小.但内壁面反射率的提高,增大了杂散光在光学系统内部的反射次数,增强了到达焦平面的杂散辐射通量.

的吸收率对视场外杂散辐射的进入量有一定影响,内部结构由黑体面改变为吸收率为 0.85 的漫灰体面时,到达焦平面的视场外杂散辐射通量增加 2 倍.3)光机内部结构温度对内部热红外杂散辐射的影响很大;与光机壁温 100 K 的情况相比,150 K、250 K 时,内部热红外杂散辐射到达焦平面的辐射通量分别增大 7~8 个量级、15~16 个量级;温度相同条件下,与黑体面相比,结构壁面反射率为 0.85 时,内部热红外杂散辐射到达焦平面的辐射通量下降 10~20%.

#### 参考文献

- [1] MAYSTRE D. Latest developments in the theory and applications of stray light and scatter[C]. SPIE, 1996, 2775: 228-238.

- [2] XIA Xin-lin. Investigation on the stray radiation calculation and thermal analysis for space optical systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997: 1-11.  
夏新林. 空间光学系统的杂散辐射计算与热分析研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997: 1-11.
- [3] DAVIDSON J, HARVEY P, PETERSON G. Achieving the background limit on SOFIA: A stray- light issue[C]. *SPIE*, 2000, **4014**: 248-256.
- [4] SCHNEIDER E. Thermal design of retro-reflective stray light Fore-baffles for space-borne optical systems[C]. *SPIE*, 2001, **4198**: 82-95.
- [5] CHEN Rong-li, GENG Li-yin, MA Zhen, *et al.* Thermal analysis and design for high resolution space telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154-157.  
陈荣利, 耿利寅, 马臻, 等. 空间相机的热分析和热设计[J]. 光子学报, 2006, **35**(1): 154-157.
- [6] TAMMY H, LES K, DICK B, *et. al.* Multispectral thermal imager optical assembly performance and integration of the flight focal plane assembly[C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 359-368.
- [7] WANG Qian, ZHANG Jing-xu, GUO Jing. Suppression method on the stray radiation in infrared system[J]. *Infrared Technology*, 2002, **12**: 21-24.  
王骞, 张景旭, 郭劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法[J]. 红外技术, 2002, **12**: 21-24.
- [8] WANG Hu, MIAO Xing-hua, WEN De-sheng, *et al.* Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1822-1824.  
王虎, 苗兴华, 汶德胜. 宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1822-1824.
- [9] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, *et al.* Optical system for a dual-band space imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 50-54.  
杨新军, 王肇圻, 孙强, 等. 空间双波段成像光谱仪红外光学系统的设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(1): 50-54.
- [10] HOWELL J R. The monte carlo method in radiative heat transfer[J]. *ASME J Heat Transfer*, 1998, **120**(4): 547-560.
- [11] SHUAI Y, DONG S K, TAN H P. Simulation of the infrared radiation characteristics of high-temperature exhaust plume including particles using the backward monte carlo method[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, **95**(2): 231-240.
- [12] TAN He-ping, XIA Xin-lin, LIU Lin-hua, *et al.* Numerical calculation of infrared radiative transfer[M]. Harbin: Press of Harbin Institute of Technology, 2006:10.  
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006:10.

## Analysis on Stray Radiation of Multi-Spectral Infrared Remote Sensor

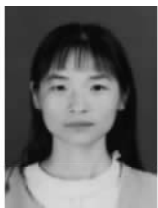
DU Sheng-hua, XIA Xin-lin, SUN Chuang

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Received date: 2006-10-20

**Abstract:** The backward Monte Carlo method and the bidirectional Monte Carlo method were introduced to analyze the stray radiation of an infrared remote sensor. The formulae of radiation flux reaching the focal plane have been derived on the basis of spectral radiative transfer factors. After verifying the calculation reliability, a spaceborne multi-spectral infrared optical system was taken as an example, and the radiative propagation from the earth background to the focal plane which from its internal structure were simulated numerically. The effects of wall absorptance and temperature on the stray radiation have been analyzed. The investigation indicates that the bidirectional Monte Carlo method is flexible for analyzing the radiation transfer from the earth to the focal plane and the backward Monte Carlo method can be easily used to analyze the effects of inner thermal radiation. The results also show the significant influence of wall absorptance on the propagation of stray radiation outside viewing field, and the thermal emission of internal structure will become the main stray radiation at its temperature higher than 250K.

**Key words:** Stray radiation; Monte Carlo method; Infrared optical system



**DU Sheng-hua** was born in 1978. She is a Ph. D. degree candidate of Harbin Institute of Technology. Her current researches primarily focus on stray light analysis and apparent radiation mechanism.