

航天器起伏表面的红外辐射特性

杨帆, 宣益民, 韩玉阁

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用随机表面的计算机生成方法模拟了卫星表面起伏形貌; 考虑了空间环境的辐射热流, 采用蒙特卡罗法计算起伏表面面元间的辐射传递系数, 完成了起伏表面的温度分布计算; 考虑表面双向反射分布函数, 建立了起伏表面随方向变化的红外辐射强度计算模型, 并且以卫星常用的镀铝聚酰亚胺薄膜材料为例, 分析了空间目标起伏表面的红外辐射特性。计算结果表明: 随机起伏表面的红外辐射特性与理想平面的红外辐射特性差别明显; 表面温度分布和红外辐射分布与表面的起伏形貌特征相关性很强。其结果可以为空间目标红外探测技术的研究提供更加有效的支撑。

关键词: 空间目标; 红外特性; 表面光学; 随机表面; BRDF

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0504003

Infrared characteristics of spacecraft undulating surface

Yang Fan, Xuan Yimin, Han Yuge

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Numerical generation method of random surface was used to simulate the topography of satellite undulating surface. Considering the radiative flux of space environment, the surface temperature distribution was calculated through the energy equation, with the transfer coefficients determined by Monte-Carlo method. Undulating surface infrared characteristics were calculated and analyzed, through the model by the Torrance-Sparrow bidirectional reflectance distribution function, which is based on the common material and aluminized polyimide film. Simulation results show that infrared characteristic of the undulating surface is quite different from those of ideal plane surface. The surface temperature distribution and infrared characteristics are strong correlative with the surface topography, which provides the research of space infrared detection technology with more effective support.

Key words: space object; infrared characteristics; optics at surfaces; random surface; BRDF

收稿日期: 2015-09-10; 修订日期: 2015-10-17

基金项目: 总装预研项目

作者简介: 杨帆(1987-), 男, 博士生, 主要从事空间目标红外特性方面的研究。Email: yang.phd.nj@gmail.com

导师简介: 宣益民(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事动力工程及工程热物理学科的教学与研究。

Email: ymxuan@mail.njust.edu.cn

0 引言

随着世界各国航天事业的迅猛发展, 各国间的空间对抗日益激烈, 对空间目标的监测与打击能力成为国家急需发展的重要课题。红外技术作为一种有效的探测手段, 具有隐蔽性好、抗干扰能力强、灵敏度高等诸多优点, 并且能够实现全天候的空间态势观测, 近年来受到很多研究者的关注^[1-3]。而对空间目标红外辐射特性的分析, 则又是空间目标红外探测与识别技术研究的前提。目前, 虽然已有一些学者对此展开了相关工作^[2-3], 然而大部分的研究工作都是在假设卫星表面为理想平面的基础上进行的。事实上, 由于卫星通常用柔软轻便的多层隔热材料进行包裹, 其表面常常会形成起伏、褶皱的形貌特征^[4-5]。表面的起伏会引起表面各个位置接收热流的不均匀, 同时也会影响不同方向上观测到的红外辐射强度。在起伏表面的凹面处还会造成表面相互辐射传热, 增加表面红外辐射特性的计算难度。为了真实地反映卫星表面红外辐射特性, 起伏表面形貌模拟和红外辐射计算方法的研究具有十分重要的意义。

为了研究卫星起伏表面红外辐射特性, 首先要获取起伏表面的形态特征。由于卫星起伏表面的测量数据难以获得, 可以利用计算机模拟随机表面的生成方法, 同时考虑细小的褶皱和条纹状隆起两种卫星表面的纹理特征, 完成起伏表面的形态模拟。在计算卫星表面红外辐射的时候, 一方面采用能量方程计算表面的温度分布, 进而计算表面自身发射的红外辐射; 另一方面, 基于双向辐射反射函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 计算物体表面的反射红外辐射。通过对以上方法整合, 完成起伏表面红外辐射的计算模型, 以卫星星体表面为研究对象, 计算并分析卫星起伏表面的红外辐射特征。

1 理论模型

1.1 随机起伏表面的形态特征模拟

利用计算机模拟生成随机起伏表面, 应用较普遍的方法是: 基于一个高斯分布的随机矩阵, 通过指定自相关函数, 并利用快速傅里叶变换和自回归模型来模拟随机表面^[6]。随机起伏表面的生成方法具体步骤如下^[7-8]:

(1) 生成一个服从高斯分布的随机序列 $\eta(x, y)$, 并计算其傅里叶变换 $A(\omega_x, \omega_y)$;

(2) 采用指数型自相关函数 $R(\tau_x, \tau_y)$, 即:

$$R(\tau_x, \tau_y) = \sigma^2 \exp[-2.3 \sqrt{(\tau_x/\beta_x)^2 + (\tau_y/\beta_y)^2}] \quad (1)$$

式中: β_x, β_y 分别表示 x, y 方向上的自相关长度, σ 为表面高度均方根。根据自相关函数 $R(\tau_x, \tau_y)$, 通过傅里叶变换得到滤波器输出信号的功率谱密度 $G(\omega_x, \omega_y)$ 为:

$$G(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty R(\tau_x, \tau_y) \cos(\omega_x \tau_x + \omega_y \tau_y) d\tau_x d\tau_y \quad (2)$$

(3) 确定输入序列 $\eta(x, y)$ 的功率谱密度 $S(\omega_x, \omega_y)$, 由于输入序列服从高斯分布, 则其功率谱密度应为常数, 即 $S(\omega_x, \omega_y) = C$;

(4) 计算滤波器的传递函数 $H(\omega_x, \omega_y)$ 为:

$$H(\omega_x, \omega_y) = \sqrt{G(\omega_x, \omega_y)/C} \quad (3)$$

(5) 计算输入序列经过滤波器后的输出序列的傅里叶变换:

$$Z(\omega_x, \omega_y) = H(\omega_x, \omega_y) A(\omega_x, \omega_y) \quad (4)$$

(6) 对 $Z(\omega_x, \omega_y)$ 进行傅里叶逆变换得到表面的高度分布函数 $z(x, y)$;

通过以上方法可以生成一般的随机起伏表面。然而卫星表面形貌比较复杂, 常常是由两种起伏轮廓复合而成。一种是由于折叠、揉捏造成的褶皱, 这种褶皱表现为大量且很细小的形变; 另一种是由于包覆时用力不均匀产生的条纹状的隆起。因此, 在对卫星表面形态进行几何仿真时, 需要将这两种起伏轮廓融合。通过再次使用以上生成方法生成二级随机起伏表面。将不同相关长度和高度均方根的随机表面叠加合成, 从而得到接近真实的卫星表面材料随机起伏表面形貌。

1.2 温度计算模型

文中采用网络节点法, 通过求解热平衡方程来计算起伏表面的温度分布。由于卫星表面常采用低导热率的多层隔热材料, 因此材料朝内的一面可以近似为绝热条件。卫星在轨运行时, 表面所接收的环境热流主要包括太阳辐射热流 Q_{Sun} 、地球辐射热流 Q_{Earth} 和地球反射太阳辐射热流 Q_{Ref} , 同时, 卫星表面还会向太空环境发射自身热辐射 Q_e 。由于确定环境热流和自身辐射热流的方法已有存在^[2], 较多的表述在此不再赘述。

当考虑卫星表面的起伏特性时, 在表面的凹处

还会产生表面面元间的热辐射交换。采用蒙特卡罗法模拟辐射光束的发射、传输、吸收和反射,计算卫星表面面元之间的辐射换热系数,再通过辐射换热系数计算每个表面面元接收到的来自其他面元的辐射 $Q_{\text{Self},r}$:

$$Q_{\text{Self},r} = \sum_{j=1}^N F_{ji} \varepsilon k_B T_j^4 \Delta A \quad (5)$$

式中: F_{ji} 表示表面面元间的红外辐射传递系数, i 表示当前计算面元的编号, j 表示其他面元的编号; N 为面元总数; k_B 为斯忒藩·波耳兹曼常数; ΔA 为面元表面面积, m^2 ; ε 为表面的红外发射率。表面面元总的热平衡方程式可以表示为:

$$Q_{\text{Self},c} = Q_{\text{Self},r} + Q_{\text{Sun}} + Q_{\text{Earth}} + Q_{\text{Eref}} - Q_e = \rho C_p \Delta V \frac{dT_i}{dt} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{Self},c}$ 表示当前面元与相邻面元的热传导; dT_i 表示当前计算面元 i 的温度变化, K ; dt 为时间变化量, s ; ρ 为材料的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_p 为材料的定压比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ΔV 为面元的体积, m^3 。

1.3 红外辐射强度计算

从任意方向观测到的随机表面面元的红外辐射强度由两部分组成: 面元表面的自身辐射和面元表面的反射辐射, 即

$$dI(\theta, \phi) = dI_{\text{emit}}(\theta, \phi) + dI_{\text{ref}}(\theta, \phi) \quad (7)$$

式中: dI 表示表面面元的有效辐射强度; dI_{emit} 和 dI_{ref} 分别表示自身发射的辐射强度与反射的辐射强度; θ 和 ϕ 分别表示观测方向的辐射出射角和出射方位角。

微元表面自身发射的辐射强度可以利用普朗克函数积分得到, 即

$$dI_{\text{emit}}(\theta, \phi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, \theta, \phi) \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} dA d\lambda \quad (8)$$

式中: C_1 和 C_2 分别为第一辐射常量和第二辐射常量; $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi)$ 为表面材料随方向变化的光谱发射率; λ 表示波长。

物体表面的反射特性通过双向辐射反射函数描述, 其定义为反射辐射强度与入射辐照密度的比值^[9], 即

$$f_r(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i) = \frac{dI(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i)}{dE(\lambda, \theta_i, \phi_i)} \quad (9)$$

式中: θ_i 和 ϕ_i 分别为入射角和入射方位角。由于太阳辐射一般可以认为是平行光, 入射方向唯一, 则卫星表面面元反射太阳辐射的辐射强度为:

$$dI_S(\theta, \phi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_r(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i) \mu S_\lambda dA d\lambda \quad (10)$$

式中: μ 为太阳辐射在面元表面的入射角余弦; S_λ 为空间环境中太阳光谱直接辐照密度; λ_1 和 λ_2 分别表示红外波段的上下限, m 。

地球辐射和地球反射太阳辐射在卫星表面的投射方向均不唯一, 需要对入射方向进行积分。用半球方向反射率 ρ_{HDR} 表示从半球空间投射来的辐射能量向指定方向反射的比率, 用数学式表达为^[10]:

$$\rho_{\text{HDR}}(\lambda, \theta, \phi) = \int_{2\pi} f_r(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i \quad (11)$$

从而进一步得到地球辐射和地球反射太阳辐射在卫星表面微元产生的反射辐射强度:

$$dI_E(\theta, \phi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\text{HDR}}(\lambda, \theta, \phi) \cdot (\varphi_E E_\lambda + \varphi_{ES} \rho_E S_\lambda) dA d\lambda \quad (12)$$

式中: E_λ 为地球等效光谱辐照密度, 该量是将地球和大气层作为整体考虑的等效辐射密度; ρ_E 为地球表面对太阳辐射的平均反射率; φ_E 和 φ_{ES} 分别为地球辐射角系数和地球反照角系数。因此, 微元表面的反射辐射强度为:

$$dI_{\text{ref}}(\theta, \phi) = dI_E(\theta, \phi) + I_S(\theta, \phi) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [f_r(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i) \mu S_\lambda + \rho_{\text{HDR}}(\lambda, \theta, \phi) \cdot (\varphi_E E_\lambda + \varphi_{ES} \rho_E S_\lambda)] dA d\lambda \quad (13)$$

将公式(13)代入公式(7), 则可以计算随机起伏表面任一微元在观测方向 $\Omega(\theta, \phi)$ 上的红外辐射强度。需要注意的是, 该方向矢量是在微元坐标系下的, 需要转换成系统坐标系下的方向矢量, 再对所有表面微元的辐射强度积分得到整个起伏表面的定向红外辐射强度。

1.4 BRDF 模型

目前已经提出的 BRDF 模型很多, 文中采用应用最广泛的 Torrance-Sparrow 模型(T-S 模型), 该模型假设物体表面由大量随机朝向的光滑微平面构成, 而这些微小的平面元则可以当做完美的反射表面, 其它常用的 BRDF 模型都与 T-S 模型。T-S BRDF 模型通用性强, 适用范围广, 其完整的表达式为^[11]:

$$f_r(\lambda, \theta, \phi, \theta_i, \phi_i) = \frac{k_d}{\pi} + \frac{k_s}{\pi \cos \theta \cos \theta_i} DFG \quad (14)$$

式中: k_d 为漫反射系数; k_s 为镜反射系数; D 、 F 、 G 为模型中最重要的三个描述项。 D 为微平面分布函数, 描述了微平面相对于表面面元平均朝向的斜率分布

情况,表达了物体表面的粗糙度。一般采用高斯分布的分布函数^[12]:

$$D = \frac{1}{m^2 \cos^4 \alpha} e^{-\frac{(\tan \alpha / m)^2}{2}} \quad (15)$$

式中: m 为高斯分布的标准差; α 为微平面法线方向与表面面元法线方向的夹角。

F 为用菲涅尔方程计算得到反射比,通过入射角和折射率计算得到。较常用的是 Schlick 提出的近似计算方法,如下^[13]:

$$F(\theta_i) = F(0) + [1 - F(0)][1 - \cos \theta_i]^5 \quad (16)$$

式中: $F(0)$ 为在辐射入射角 θ_i 为 0 时的菲涅尔反射比。由下式计算:

$$F(0) = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad (17)$$

式中: n 为表面材料的折射率。

G 为由于遮挡关系产生的衰减因子,由下式计算^[13]:

$$G = \min \left(1, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta}{\cos \gamma}, \frac{2 \cos \alpha \cos \theta_i}{\cos \gamma} \right) \quad (18)$$

式中: γ 为出射方向矢量与入射方向矢量夹角的一半。

2 计算参数

2.1 表面材料的选择

卫星表面覆盖的多层隔热材料是由低发射率的反射屏和低导热率的间隔层交替迭合而成。间隔层一般使用涤纶网、尼龙网或其他低导热材料。反射屏的选择决定了多层隔热材料的表面光学属性。在文中的模拟过程中,表面材料选用表面镀铝的聚酰亚胺薄膜,其耐热性高,最高工作温度可达 670 K。表 1 给出了该表面材料的基本参数。

表 1 镀铝聚酰亚胺薄膜的物性参数^[14]

Tab.1 Physical parameters of aluminizing polyimide film

Material parameters	Value	Unit
Thickness	0.000 1	m
Density	1 800	kg · m ⁻³
Heat capacity	1 300	J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
Conductivity	0.3	W · m ⁻¹ · K ⁻¹
Solar absorptivity	0.09	-
Infrared emissivity	0.03	-

2.2 BRDF 模型的参数

T-S BRDF 模型的输入参数主要包含漫反射系数 k_d 、镜反射系数 k_s 、粗糙度 m 和折射率 n ,通常情况下这几个参数与温度、波长和方向有关,文中假设这几个参数在红外波段不随温度、波长和方向变化。

根据表 2 所给出的输入参数值可以模拟出

表 2 BRDF 模型的输入参数^[15]

Tab.2 Input parameters of BRDF model

k_s	k_d	m	n
0.75	0.12	0.05	3.5

BRDF 结果,作为起伏表面红外辐射特性计算的前提。图 1 中所示的是入射角 45° 时 BRDF 随空间变化的分布。由于材料表面光滑,镜反射系数与漫反射系数的比例较大,BRDF 的计算结果随空间方向很不均匀,在镜反射方向周围的数值与其他方向的相比非常大。

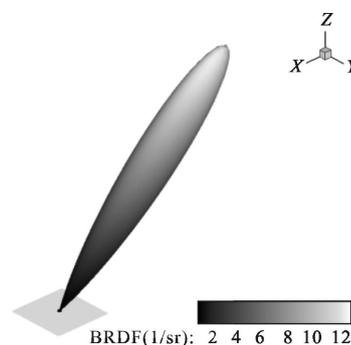


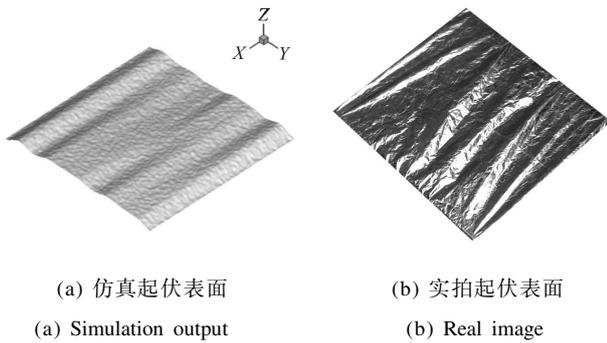
图 1 入射角为 45° 时的 BRDF 结果

Fig.1 BRDF of 45° incident angle

3 计算结果与分析

3.1 随机起伏表面几何生成结果

基于前文所提出的随机起伏表面生成方法,利用计算机仿真得到的结果如图 2(a)所示,而图 2(b)所示的是真实拍摄的隔热材料(镀铝聚酰亚胺薄膜)图像。通过比较可以看到,模拟的表面具有明显的随机隆起条纹,与真实包覆产生的弯曲隆起相似。同时,模拟表面上均匀分布着大量的细小褶皱,也与真实的隔热材料褶皱表面相似。



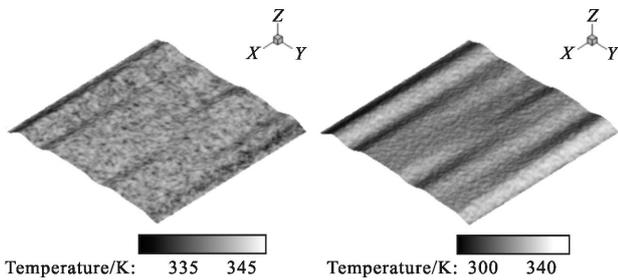
(a) 仿真起伏表面 (b) 实拍起伏表面
(a) Simulation output (b) Real image

图 2 起伏表面仿真结果与实际拍摄比较

Fig.2 Comparison of the simulated undulating surface with the real image

3.2 起伏表面温度分布

起伏表面温度分布的计算结果如图 3 所示。计算目标所在轨道高度为 500 km, 表面朝天, 即系统坐标系 Z 轴的负方向矢量过地心。表面初始温度为 273 K, 计算时间为 1 800 s。太阳入射方向通过表面系统坐标系下的太阳天顶角和方位角确定。天顶角指方向矢量与坐标系 Z 轴的夹角, 方位角指方向矢量在 XOY 平面上的投影与 X 轴的夹角。图 3(a)中, 太阳天顶角为 0°, 图 3(b)中太阳天顶角为 45°, 方位角为 90°。由图可知, 表面的温度分布与表面的起伏特征具有很强的相关性。由于起伏表面每个微元法线方向与太阳方向的夹角不一致, 所以不同微元上接收到的太阳辐射量也不同。另外, 图 3(b)的表面温差更大, 表面隆起条纹两侧的温度差别也更加明显。因此, 太阳入射方向对表面温度也具有较大的影响。



(a) 太阳天顶角为 0° (b) 太阳天顶角为 45°, 方位角为 90°
(a) Solar zenith angle is 0° (b) Solar zenith angle is 45°, azimuth angle is 90°

图 3 起伏表面温度分布

Fig.3 Undulating surface temperature distribution

3.3 起伏表面红外辐射密度分布

当表面温度分布确定之后, 便可以进一步得到

表面的红外辐射特性。图 4(a)、(b)所示的是太阳天顶角为 45°时, 不同红外波段内的表面有效辐射密度分布。图中所示的 3~5 μm 波段有效辐射密度最大值比 8~14 μm 波段的高, 而最小值比后者低。镀铝材料的表面发射率很小, 从而, 在 3~5 μm 波段内, 表面反射太阳辐射是有效辐射密度的主要影响因素。在 8~14 μm 波段内, 由于太阳辐射强度在红外波段随着波长增加而减小, 因此该波段内反射辐射量也较低。

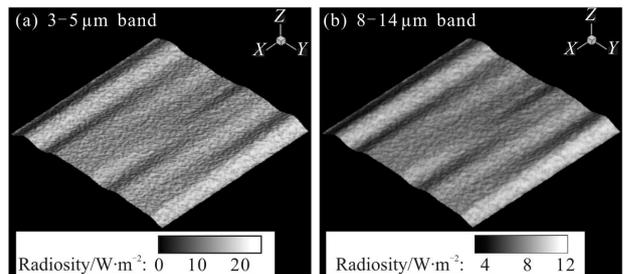


图 4 不考虑地球辐射时的起伏表面红外辐射密度分布, 太阳天顶角为 45°, 方位角为 90°

Fig.4 Undulating surface infrared radiosity distribution when solar zenith angle is 45° and solar azimuth angle is 90°, not considering the earth radiation

图 4 中所示的表面红外辐射特性计算结果未考虑对地球红外辐射的反射。若表面为卫星的对地面, 则可能会同时受到地球辐射和太阳辐射的影响, 此时一般为卫星即将进入或刚刚驶出地球阴影区的时候。图 5 所示的是同时接收到地球辐射和太阳辐射时的起伏表面在不同波段下的红外辐射密度分布。

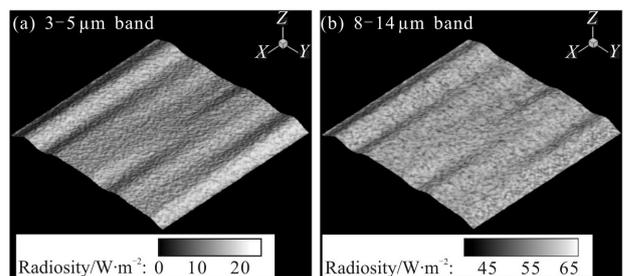


图 5 考虑地球辐射时的起伏表面红外辐射密度分布, 太阳天顶角为 45°, 方位角为 90°

Fig.5 Undulating surface infrared radiosity distribution when solar zenith angle is 45° and solar azimuth angle is 90°, considering the earth radiation

从图中可以看到, 由于增加了地球红外辐射在起伏表面上的反射, 8~14 μm 波段内的表面有效红外辐射密度大大增强, 如图 5(b)所示。并且, 因为地

球红外辐射的投射方向杂乱无序,该波段下的起伏表面红外辐射密度分布也发生了变化,表面条纹引起的遮挡特性不明了。而 3~5 μm 波段内的起伏表面红外辐射密度分布变化甚微,如图 5(a)所示。原因在于地球红外辐射主要集中于长波波段内。

3.4 起伏表面红外辐射强度随方向的变化

为了反映出具有起伏表面的目标红外辐射特性随观测方向上的变化,图 6 给出了整个模拟表面的在不同观测方向上观测到红外辐射强度的变化。模拟表面的大小为 2m×2m,太阳方向依然与前面的计算相同,天顶角为 45°,方位角为 90°。观测天顶角分别取了 75°、45°和 15°三种情况,3~5 μm 波段和 8~14 μm 波段的计算结果分别如图 6(a)和 6(b)所示。

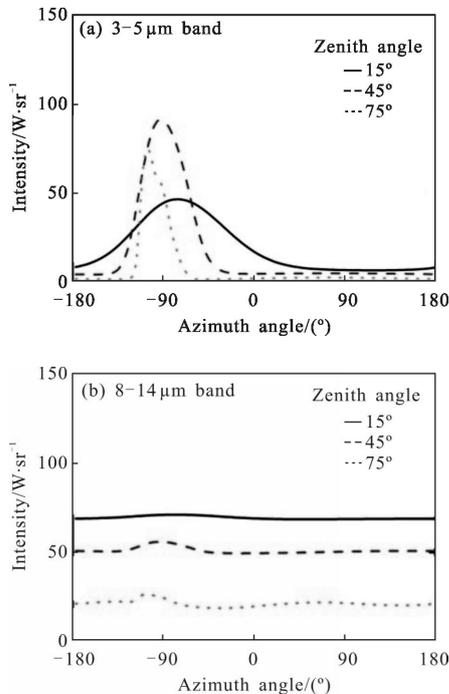


图 6 起伏表面红外辐射强度随观测方向的变化,太阳天顶角为 45°,方位角为 90°

Fig.6 Undulating surface infrared intensity variation as viewing direction when solar zenith angle is 45° and solar azimuth angle is 90°

图 6 中的每条曲线表示了观测天顶角不变时,目标红外辐射强度随观测方位角的变化。由图 6(a)可见,3~5 μm 波段内的方向辐射强度分布指向性很强。在太阳辐射反射方向(方位角为-90°)及附近具有很强的辐射强度,最高值接近 100 W/sr,而其他方向上的辐射强度十分微弱,最低值在 1 W/sr 左右。而

图 6(b)所示的 8~14 μm 波段内的方向辐射强度分布,在周向方向上分布则均匀得多。同时,辐射强度随着观测方向天顶角的增大而减小。

为了比较起伏表面与理想平面的红外辐射特性的差别,又计算了与图 6 相同条件下理想平面红外辐射强度随观测方向的变化,如图 7 所示。通过与图 6 对比可以看到,其红外辐射强度的空间分布特性既具有一部分相似性,又有明显的差异性。当观测天顶角为 45°时,红外辐射强度在太阳辐射反射方向具有很高的峰值,3~5 μm 波段的最大辐射强度超过 600 W/sr;而当观测天顶角为 15°和 75°时,辐射强度随观测方位角无变化。另外,3~5 μm 波段的辐射强度在峰值以外的观测方向上很低。

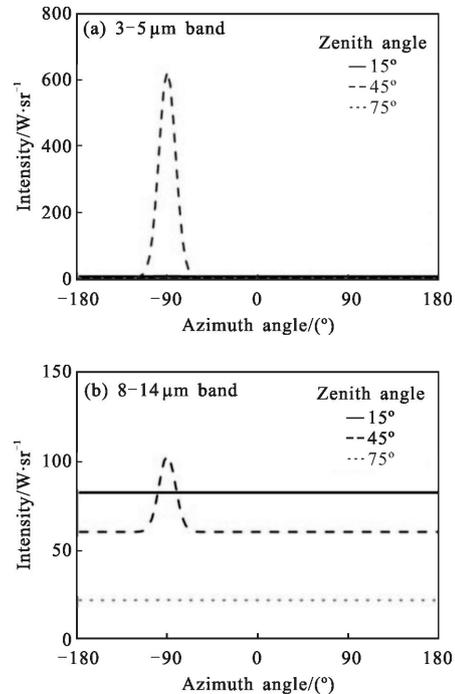


图 7 理想平面红外辐射强度随观测方向的变化,太阳天顶角为 45°,方位角为 90°

Fig.7 Ideal plane surface infrared intensity variation as viewing direction when solar zenith angle is 45° and solar azimuth angle is 90°

4 结论

文中利用随机表面生成方法模拟了卫星表面的随机起伏形貌特征。考虑了空间环境热流和表面单元间的辐射传递,通过能量方程计算了起伏表面的温度分布,同时,基于 Torrance-Sparrow BRDF 模型,

建立了起伏表面随方向变化的红外辐射强度计算模型,针对卫星常用的镀铝聚酰亚胺薄膜材料计算了起伏表面的温度分布、表面有效红外辐射密度分布以及红外辐射强度的半球空间分布。计算结果表明,随机起伏表面的红外辐射特性与理想平面的红外辐射特性差别明显。受到表面起伏形貌的影响,表面的温度和红外辐射密度分布很不均匀,表面朝向太阳的地方具有较高的温度和较大的红外辐射密度值。起伏表面的红外辐射强度随观测方向的变化特性也与理想平面的有差别。理想平面的红外辐射强度峰值范围很小,强度差值较大;起伏表面红外辐射强度的峰值方向与理想平面接近,但峰值的范围较大,强度差值也较小。

文中提出了完整的卫星起伏表面红外辐射特性计算模型与分析方法,模型生成的随机起伏表面形貌合理逼真,计算结果也能够反映出更加细致的表面温度特性和红外辐射特性,可以更加有效地为空间目标红外探测或隐身技术的研究提供支撑。

参考文献:

- [1] Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003. (in Chinese)
刘莹奇,刘祥意.空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J].*光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- [2] Han Yuge, Xuan Yimin. Infrared feature of the satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 34-37. (in Chinese)
韩玉阁,宣益民.卫星的红外辐射特征研究[J].*红外与激光工程*, 2005, 34(1): 34-37.
- [3] Wang Hongyuan, Zhang Wei. Infrared characteristics of on-orbit targets based on space-based optical observation [J]. *Optics Communications*, 2013, 290: 69-75.
- [4] Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta physica Sinica*, 2010, 59(3): 2097-2103.
袁艳,孙成明,张修宝.空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J].*物理学报*, 2010, 59(3): 2097-2103.
- [5] Yang Yufeng. Study on spectral scattering properties of target with irregular fold surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
杨玉峰.不规则褶皱表面目标的光谱散射特性研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [6] Patir N. A numerical procedure for random generation of rough surfaces[J]. *Wear*, 1978, 47(2): 263-277.
- [7] Patrikar R M. Modeling and simulation of surface roughness [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 228(1): 213-220.
- [8] Wu J J. Simulation of rough surfaces with FFT[J]. *Tribology International*, 2000, 33(1): 47-58.
- [9] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(7): 767-773.
- [10] Montes S R, Urena A C. An overview of BRDF models[R]. Spain: University of Granada, 2012.
- [11] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(9): 1105-1112.
- [12] Bradley B. A comparative study of the bidirectional reflectance distribution function of several surfaces as a mid-wave infrared diffuse reflectance standard [R]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2009.
- [13] Meister G, Wiemker R, Monno R, et al. Investigation on the Torrance-Sparrow specular BRDF model [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, IEEE, 1998, 4: 2095-2097.
- [14] Cunningham G R, Keller C W, Bell G A. Thermal performance of multilayer insulations interim report [R]. Ohio: Lewis Research Center, 1971.
- [15] Zhang Yi, Zheng Changwen, Wu Jiase. Research on modeling and simulation of satellites' surface optical reflection characteristics[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(9): 57-61. (in Chinese)
张翼,郑昌文,吴佳泽.卫星表面光学反射特性建模与仿真研究[J].*计算机仿真*, 2010, 27(9): 57-61.