

空间目标的可见光散射与红外辐射*

吴振森 窦玉红

(西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

摘要: 利用 Lowtran7 大气传输模型计算了 0.4~0.8 μm 可见光波段的太阳辐射、大气自身的热辐射以及天地背景辐射。利用粗糙面光散射理论与双向反射分布函数计算了空中目标表面太阳辐射、云层对阳光反射的散射。并利用传热学和背景辐射理论,根据能量守恒定律建立了空间目标表面温度的热平衡方程。以气球为例,计算了不同表面涂层材料的气球在不同地理位置、不同高度、不同时间、温度及辐射功率的变化。分析了空间目标红外辐射特性的一般规律和特征。

关键词: 物理光学; 空间目标; 可见光; 背景辐射; 热平衡方程

中图分类号: P427.1 文献标识码: A

1 引 言

随着科技的发展,特别是军用航天技术的发展,成百上千的航天器进入太空,在民用与军用中发挥重要作用。因此开展空间目标的光散射与辐射特性研究,对目标的探测、跟踪与识别等空间突防技术具有十分重要的应用价值。对空间目标环境的光散射特性研究包括不同时间、不同空间位置以及不同大气环境下,目标在空间环境中对阳光、天地背景辐射的空间散射强度分布和光谱分布。

目标与背景红外辐射特性的研究是美国国家导弹防御(NMD)系统中低轨道天基红外探测系统发现、跟踪和识别目标的重要依据。对于弹道中段(高度大于 100 km),由于大气稀薄,所有目标均以同样速度飞行,是实施各种突防手段的最佳时机,同时也是防御系统探测、识别和拦截目标的重点段域。因而研究空间目标的红外辐射特性,进而对空间目标进行识别是其中的关键技术之一。

研究空间目标的红外辐射特性主要是研究其表面温度及辐射功率的变化规律。由于空间目标是在稀薄大气空间中运行,外界环境的加热主要通过辐射传热的方式进行,这涉及到背景辐射的问题。同时考虑到不同空间目标之间的换热关系,这要求讨

论空间目标之间的热传递关系,国内外大量文献都对不同物体间的热交换关系^[1,2]和背景辐射^[3]问题做了细致的理论和实验研究,同时专门设计了高空气球的捕获、跟踪实验系统^[4,5]。这都为研究空间目标的红外辐射特性奠定了坚实的基础。

本文利用粗糙面、电磁散射和背景辐射理论,计算了空中目标的可见光谱散射。并将传热学和背景辐射理论应用到空间目标的红外辐射问题上,讨论了空间目标受到的背景辐射及其之间的相互传热关系。通过对结果的讨论,分析了空间目标红外辐射特性的一般规律和特征。

2 背景辐射

空中目标表面所接受的辐射主要来自于太阳直接辐射、地球大气辐射和地球反照。其中太阳的直接辐射和地球的反照以可见光为主,地球大气辐射以红外辐射为主。这些能量的大小又与目标和地球的相对位置、季节、地球表面状态和大气等因素有关。

地球反照与地面的性质、云层的分布状态有关,而且差别很大。低层厚云主要反射阳光辐射,冷却地表,其反射率高达 90%;而高空薄云,主要是传递太阳辐射,同时捕获地球的红外辐射,并把它反射给地球。在南北纬 20°以上,由于纬度增加,平均云层覆盖增加,以及在高纬度地区冰雪覆盖的表面有较高的反射率,所以平均反射率增加。在南北纬 30°之间,反射率较低。就大区域而言,地球的平均反射率取为 0.3,地球反射太阳的辐照度为 406 W/m²。

阳光进入大气系统后,一部分被反射与散射,一

* 国家自然科学基金(60081002)和目标与环境光学特征国防科技重点实验室基金资助课题。

E-mail: wuzhensen@yahoo.com.cn;

yhd_77@163.com

收稿日期:2002-09-18

部分被大气系统所吸收。被吸收的这部分能量,又部分地被大气以热辐射的形式发出。这部分的辐射能量主要集中在 $4\ \mu\text{m}$ 内(假设地球是一个均匀的热辐射平衡体,地球表面各处的红外辐射相等,则地球表面的辐照度 $E_{\text{earth}} = 237\ \text{W}/\text{m}^2$)。

以下我们对空中目标可见光谱散射的计算,白天主要考虑了太阳的直接辐射、云层对阳光的反射和大气自身向上的辐射,在傍晚和凌晨,主要考虑了阳光辐射。对于空中目标的红外辐射特性,主要计算了目标在内外热流作用下的表面温度及辐射功率。由于空中目标是在稀薄的大气中运行,因此外部加热主要以辐射的方式进行。白天空间目标表面所受到的热辐射主要来自太阳的直接照射、地球大气的长波辐射以及地球的反照等。夜晚,太阳的直接辐射和地球的反照影响消失。

3 空中目标的可见光散射

任意波长的波照射到目标随机粗糙表面,都会在表面产生反射和散射。散射存在相干分量和非相干分量。严格的描述目标的光散射特性必须引入双向反射分布函数(BRDF)^[6],数学表达式为^[7]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s, E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)},$$

单位为 sr^{-1} ,其物理意义为沿 (θ_s, φ_s) 方向出射的辐射亮度 $dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到被测表面的辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比,式中 $\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s$ 分别为入射角、入射方位角、散射角和散射方位角。单位面积激光雷达散射截面 σ 与双向反射分布函数的关系为^[8]

$$\sigma = 4\pi f_r \cos \theta_i \cos \theta_s.$$

根据不同的表面粗糙特性,我们可以利用不同的散射理论,如基尔霍夫切平面近似法和微扰法^[9],求出散射截面,然后利用上式求出双向反射分布函数。或者借助实验的统计方法^[10,11],通过选取合适的统计模型,反演其参量,最后获得双向反射分布函数数值。双向反射分布函数与半球方向反射率的关系为^[8]

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; 2\pi) = \int_{2\pi} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\omega_r,$$

$d\omega_r$ 为辐射立体角。对于朗伯板,其双向反射分布函数及半球反射率均是常量,且有 $\rho = \pi f_r$ 。

研究空中目标表面对阳光的散射时,本文采用 Lowtran7 软件计算出入射到目标表面的阳光-大气系统的光强度或亮度,然后利用双向反射分布函数,

求出其散射亮度^[12]。在实际的计算中,空中目标的几何外形往往是比较复杂的,我们要先将目标进行几何建模,对表面进行网格划分;建立地表坐标系,目标坐标及本地面元坐标系,双站消隐,进而求出其散射截面^[13]。对于在空中不断运动的目标,还要考虑到其运动轨道及姿态,过程比较复杂。

我们以简单几何体为空中目标,计算了其在 $0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 波段对太阳辐射、云层对阳光反射的散射。设目标由一个长方体和一对侧翼组成,长方体的尺寸为 $2.0\ \text{m} \times 1.8\ \text{m} \times 3.0\ \text{m}$,侧翼为 $8\ \text{m} \times 2.6\ \text{m}$,主体材料为铝,其表面参量为:折射率 $(2.43 + i10.7)$,高度起伏均方根为 $0.2\ \mu\text{m}$,相关长度为 $5.89\ \mu\text{m}$;设侧翼的反射率为 0.003 。假设目标位于东经 120° ,北纬 25° , $1000\ \text{km}$ 高空,测量时间为 12 月 24 日,北京时间 12:00,此时,太阳天顶角为 48.42° ,方位角 180.2° 。设接收机在 $1200\ \text{km}$ 处,其相对于目标的天顶角为 45° ,方位角为 270° 。则目标表面对太阳辐射的散射亮度、大气向上的热辐射及云层对阳光的散射亮度如图 1 所示。其中云层对阳光的散射、反射是一个很复杂的过程。这里我们把云层简单地处理为朗伯面,其表面等效半球反射率为 0.8 。

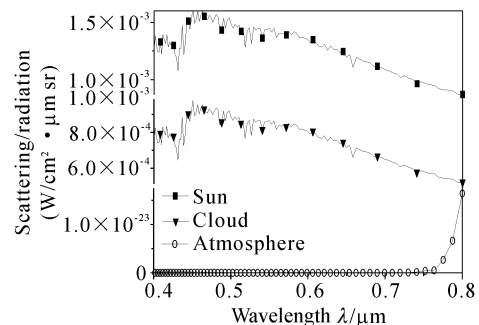


Fig. 1 Scattering or radiation of visible light in day

由这三条曲线可以看出,在可见光波段,目标对太阳直接辐射的散射是光散射的主要部分,云层对阳光的反射这一部分能量不可忽略,而大气自身的热辐射在可见光部分非常小,几乎为 0,这一部分可忽略不计。

当傍晚时,太阳在地平线以下,地表接收不到阳光的辐射,但在几百千米高空的目标却能接收到阳光的直接辐射。此时,照射到目标表面的除了太阳辐射以外,还有天地背景辐射。图 2 中曲线 1 计算的是傍晚 18:00,太阳天顶角为 99.8° ,方位角为 246.8° ,地基接收时目标对阳光的散射。此时,地球大气向上的背景辐射即地背景辐射曲线如图 2 曲线 3 所示,由图可以看出,地背景辐射非常小,与目标

对阳光的散射比起来,几乎为 0。在地基接收时,天背景是作为背景噪声进入探测器的。比较图 2 中曲线 1 和 2,可以看出,目标对阳光的散射要大于天背景辐射,因此这时可以观测到目标。

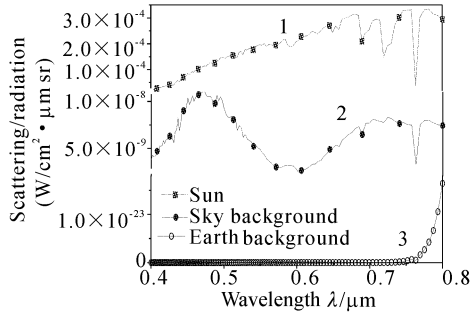


Fig. 2 Scattering or radiation of visible light in dusk

4 空间目标的热平衡方程

研究空间目标的红外辐射,平衡温度是一个很重要的物理量。假设空间目标内没有热源,则其外表面上任一位置在任一时刻的能量平衡方程可以写为^[3]

$$cm \frac{dT(t)}{dt} = \alpha_1 E_{\text{sun}} \varphi_1 A + \alpha_2 E_{\text{earth}} \varphi_2 A + \alpha_3 E_{\text{sun}} \rho \varphi_3 A + P - \epsilon \sigma T^4(t) A, \quad (1)$$

式中 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为空间目标对太阳直接辐射、地球大气长波辐射和地球反射辐射的吸收率; φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为太阳直接照射角系数、地球大气长波辐射角系数和地球反射角系数^[2]; ϵ 为空间目标的发射率, ρ 为地球平均反射率; A 、 c 、 m 分别为空间目标的外表面积、比热容和质量; E_{sun} 、 E_{earth} 分别为太阳辐射常量和地球大气长波辐射辐照度; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常量; P 为空间目标内部热源、目标不同组分之间的热传导以及气体对流等因素的总的影, 这些因素在实际的工程求解中是千变万化的, 在这里我们不予考虑。

以上方程是空间目标从温度不平衡过渡到平衡时的热平衡方程。为了进一步研究目标表面温度随时间的变化率, 可将(1)式写为

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{cm} [\alpha_1 E_{\text{sun}} \varphi_1 A + \alpha_2 E_{\text{earth}} \varphi_2 A + \alpha_3 E_{\text{sun}} \rho \varphi_3 A + P - \epsilon \sigma T^4(t) A], \quad (2)$$

实际的空间目标表面并非均匀, 求解其平衡温度时, 一般采用热网络方法。即把目标表面划分成若干块, 或分别考虑热源和目标, 列出方程联立求解。由(2)式, 对各能量项, 可列出平衡方程^[1]

$$0 = \alpha_{1i} E_{\text{sun}} \varphi_{1i} A_i + \alpha_{2i} E_{\text{earth}} \varphi_{2i} A_i + \alpha_{3i} E_{\text{sun}} \rho \varphi_{3i} A_i - \epsilon_i \sigma T_i^4(t) A_i - c_i m_i \frac{dT_i(t)}{dt} + \sum_{i \neq j}^N \{ \alpha_{ij} [T_j(t) - T_i(t)] A_i + \epsilon_{ij} \sigma [T_j^4(t) - T_i^4(t)] A_i + P_{ij} \} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

式中, N 为划分单元数目, $T_i(t)$ 为第 i 部分在时间 t 的温度, α_{ij} 为两节点间的传热系数, ϵ_{ij} 为两节点间辐射换热的发射率, P_{ij} 为两节点间的其它方式的换热。式中, 前四项描述每一节点与周围介质的热交换, 最后一项描述第 i 节点与其它节点的热交换。

目标表面总的红外辐射通量由两部分组成, 一部分是目标自身红外辐射通量, 另一部分是目标反射红外辐射通量。通过运用热网络法及差分法求得目标温度以后, 目标自身辐射通量可以利用普朗克公式, 通过对红外波段范围积分得到

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon(\lambda, T) c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} d\lambda,$$

式中, λ_1 、 λ_2 为红外波段范围的下限和上限, T 为单元表面温度, $\epsilon(\lambda, T)$ 为表面单色发射率, c_1 为第一辐射常量, 等于 $3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$, c_2 为第二辐射常量, 等于 $1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

对于反射辐射部分, 包括目标表面对太阳红外波段辐射、地球长波辐射、地球反射太阳红外辐射以及其它单元表面红外辐射的反射。计算表达式为

$$E_{\text{st}}^{\text{ir}} = \rho_{\text{sun}}^{\text{ir}} \cdot E_{\text{sun}}^{\text{ir}} + \rho^{\text{ir}} \cdot E_{\text{e}}^{\text{ir}},$$

式中, $E_{\text{st}}^{\text{ir}}$ 为目标反射红外波段总的辐射能量, $\rho_{\text{sun}}^{\text{ir}}$ 为目标表面红外波段的太阳反射率, ρ^{ir} 为目标表面红外波段的反射率, $E_{\text{sun}}^{\text{ir}}$ 为目标表面接收的红外波段的太阳辐射能量, E_{e}^{ir} 为目标表面接收的红外波段的地球长波辐射能量。目标对地球反射的太阳红外波段辐射和其它单元表面红外辐射的反射可被忽略, 因为太阳红外波段的辐射占太阳总辐射的比例比较小(太阳辐射大部分在可见光范围内), 而经过两次反射后的太阳红外辐射就更小; 其它单元表面的红外辐射与地球长波辐射以及太阳红外辐射相比也非常小, 反射部分就更小。

5 计算结果及分析

假设一个气球,位于地球北纬 25° ,东经 120° ,直径为 3 m。地球半径为 6.37×10^6 m,太阳辐射常量为 1353 W/m^2 ,地球长波辐照度为 237 W/m^2 。测量时间为 1 月 30 日,北京时间 12:00,此时太阳天顶角为 42.78° 。同时假设气球不断转动,表面均匀受到阳光照射,表面温度相同。以下计算了不同表面涂层材料的气球,其表面平衡温度和辐射功率随高度的变化。图 3~图 6 中,曲线的序号代表着不同的涂层材料。其中曲线 1 为铝箔,曲线 2 为铝基涂料,曲线 3 为灰色 TiO_2 ,曲线 4 为白色 TiO_2 。

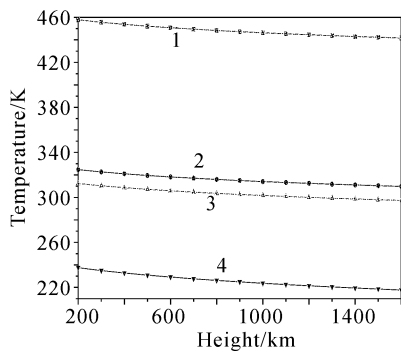


Fig. 3 Temperature varies with the height in day.
1: aluminum foil; 2: aluminum dope; 3: gray TiO_2 ; 4: white TiO_2

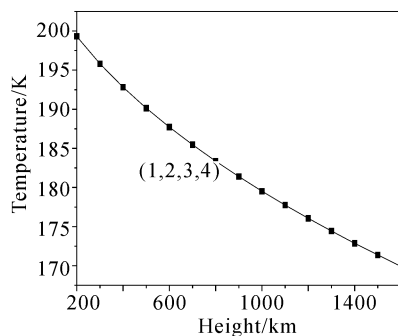


Fig. 4 Temperature varies with the height in night.
1: aluminum foil; 2: aluminum dope; 3: gray TiO_2 ; 4: white TiO_2

图 3 和图 4 分别计算了不同涂层材料下,白天和夜晚目标表面的平衡温度随高度的变化。图 5 和图 6 计算了不同涂层材料下,白天和夜晚目标表面的辐射功率随高度的变化。由图可以看出,随着目标高度的增加,目标表面平衡温度和辐射功率逐渐减小,这是由于对于球体这种几何形状的物体,其地球大气长波辐射角系数随高度的增加而减小。在白天,气球所受的背景辐射主要是太阳辐射、地球大气的长波辐射和地球的反射。夜晚,太阳辐射和地球

的反射通量为 0,而地球大气长波辐射在白天与晚上差别不大。由图 4 可以看出,在夜晚,目标表面平衡温度与涂层材料无关。图 6 说明在夜间不同涂层气球辐射功率受目标高度的影响程度不同,涂层发射率越小,影响越大。这是因为发射率越小,对地球长波辐射的反射率就越大,目标辐射受地球长波辐射的影响就越大,而到达目标的地球长波取决于高度,所以涂层发射率越小,受目标高度影响就越大。在 1200 km 处,各涂层气球的辐射功率恰好相等。

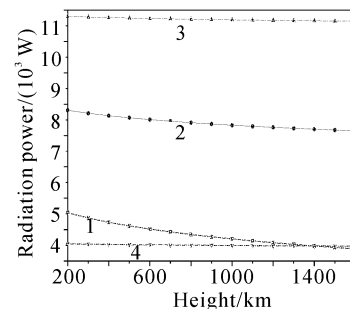


Fig. 5 Radiation power varies with the height in day.
1: aluminum foil; 2: aluminum dope; 3: gray TiO_2 ; 4: white TiO_2

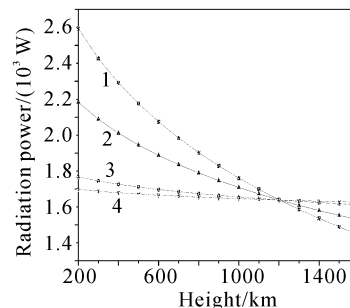


Fig. 6 Radiation power varies with the height in night.
1: aluminum foil; 2: aluminum dope; 3: gray TiO_2 ; 4: white TiO_2

结束语 本文利用电磁学和粗糙面散射理论,计算了空中目标的可见光谱散射。从计算结果可以看出,太阳直接辐射是可见光的主要来源,在地球的反射中,低层厚云对阳光的反射不可忽略,但大气自身的辐射在可见光波段非常小,可忽略不计。在傍晚(或凌晨),即太阳日出前或日落后不久,地基探测目标时,此时由目标反射、散射进入到探测器的可见光辐射大于背景噪声,这时可以探测得到目标的存在。同时,本文从传热学和背景辐射的基本理论出发,详细讨论了空间目标的热平衡方程。通过求解该方程,得出了不同表面涂层的空间目标在不同时间和

高度的红外辐射特性。计算结果表明,随着目标高度的增加,表面平衡温度和辐射功率逐渐减小,这主要是因为气球与地球间辐射换热角系数随高度的增加而减小的缘故。

参 考 文 献

- 1 Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat Transfer* (传热学). Beijing: Higher Education Press, 1998 (in Chinese)
- 2 Yang Xianrong. *Handbook of Angle Factor in Radiation* (辐射换热角系数手册). Beijing: National Defence Industry Press, 1982 (in Chinese)
- 3 Xu Gengxin, Yao Liangxing, Qin Weili. *Optical Characteristic of the Object and Environment* (目标与环境的光学特性). Beijing: Astronavigation Press, 1995 (in Chinese)
- 4 Schulthess L M, Baugh S. Attitude control and trajectory estimation for the high altitude balloon experiment. *Proc. SPIE*, 1994, **2221**(7):590~609
- 5 Schneeberger T J, Barker M K. The high-altitude balloon experimental tested for acquisition tracking, and pointing technologies. *Proc. SPIE*, 1993, **1950**(10):2~15
- 6 Nicodenus F E. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. PB-273439, 1971
- 7 Wu Zhensen, Han X E, Zhang X D *et al.*. Experimental study on bi-directional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surfaces. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(3):262~268 (in Chinese)
- 8 Yao Lianxin, Qiu W L, Wang F T. *Optical Characteristic of the Object and Environment* (目标与环境的光学特性). Beijing: Astronavigation Press, 1995 (in Chinese)
- 9 Flabby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Vol. II*. New York: Addison-Wesley, 1982
- 10 Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. Optimize parameter of BRDF model and calculation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):769~773 (in Chinese)
- 11 Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8):897~901 (in Chinese)
- 12 Wu Zhensen, Liu Anan. Scattering of solar and atmospheric background radiation from a target. *Int. J. IR and Mill. Waves*, 2002, **23**(6):907~917
- 13 Li Liangchao, Wu Zhensen, Xue Qianzhong. A fast algorithm for LRCS of a complex object with a rough surface. *J. Xidian University* (西安电子科技大学学报), 2000, **27**(5):577~580 (in Chinese)

Visible Light Scattering and Infrared Radiation of Spatial Object

Wu Zhensen Dou Yuhong

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 18 September 2002)

Abstract: Using atmospheric transmission model software Lowtran 7, the solar, atmospheric, sky and earth background radiation from 4 to 8 μm are calculated. According to the relationship between optical scattering theories on rough surface and bidirectional reflectance distribution function, the scattering of visible light from a spatial object is calculated. Based on the theories of heat transmission and background radiation, the surface thermal balance equation of spatical object is established according to the law of conservation of energy. Take balloon as an example, dependence of the temperature and radiation power on time, height and geographic location is calculated. The general law of infrared radiation characteristic of spatial object is obtained.

Key words: physical optics; spatial object; visible light; background radiation; thermal balance equation