

临近空间高空气球光学散射特性研究

荆楠^{1,2} 李创¹ 周楠^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于应用光学中基本辐射理论,研究了临近空间高空气球的光散射特性。利用计算几何学的坐标转换以及网格划分建模思想,对高空气球球面进行网格面元划分。根据高空气球等透明类物体几何结构和物体光学特性,推导出透明类物体双向散射分布函数(BSDF)镜反射/折射、近镜反射/折射、漫反射/折射、理想漫反射/折射相结合的计算模型,最终得出高空气球散射背景辐射在地面产生辐射亮度的计算模型。利用MODTRAN软件在3~5 μm和8~14 μm波段仿真计算临近空间高空气球的背景辐射亮度,在0.24~2.4 μm波段仿真计算气球自身亮度。仿真结果表明:利用BSDF模型计算得到高空气球亮度为 $2.28 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$,计算结果误差为10.6%,精度相对双向反射分布函数(BRDF)模型提高2%。在分析高空气球等类透明体散射特性时,可参考此模型来进行计算。

关键词 大气光学;建模;双向散射分布函数;高空气球;临近空间

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0429001

Research on Optical Scattering Characteristics of High Altitude Balloon in Near Space

Jing Nan^{1,2} Li Chuang¹ Zhou Nan^{1,2}

¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract Optical scattering characteristics of high altitude balloon in near space are researched based on the fundamental radiation theory in applied optics. Facet of balloon in near space is created according to the general idea of coordination transformation and surface mesh-creation. A bidirectional scattering distribution function (BSDF) model is deduced by summing transparent object all scattering components, including specular reflective, near-specular reflective, diffuse reflective and random diffuse reflective components. A mathematical model of scattering characteristics of balloon in near space is built. An atmospheric modeling tool, MODTRAN, is used to model background radiance in the range of 3~5 μm and 8~14 μm and radiance of balloon in the range of 0.24~2.4 μm. The results show that the high altitude balloon radiance is $2.28 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, whose calculation error is 10.6% in use of BSDF model, and relative to bidirectional reflection distribution function (BRDF) model, the accuracy has an improvement of 2%. The modeling method of scattering characteristics of balloon in near space agrees with the modeling results, which proves the correctness of mathematical model.

Key words atmospheric optics; modeling; bidirectional scattering distribution function; high altitude balloon; near space

OCIS codes 290.1483; 290.5825; 290.5880

收稿日期: 2014-11-04; 收到修改稿日期: 2014-12-09

基金项目: 国家863计划(2013AA7031020A)

作者简介: 荆楠(1990—),男,硕士研究生,主要从事临近空间目标光学特性方面的研究。E-mail: jingnan@opt.cn

导师简介: 李创(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间相机结构设计和空间光学等方面的研究。

E-mail: lichuang@opt.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

近年来,各国对临近空间的认识逐渐深入,其战略价值逐渐得到重视,各国竞相发展临近空间飞行器。常见的临近空间飞行器有高空气球、平流层飞艇、高空长航时无人机等。高空气球气囊内部充满氦气等轻质气体,依靠空气浮力上升到临近空间,具有重量轻、低温性能好、价廉质优、安排实验灵活、试验周期短、易于回收、制作简单等优点^[1-2]。国内外已将高空气球应用于多个领域,包括天文观测、空间物理探测、气象探测、商业通信及军事侦察等,迫切需要研究高空气球光学特性,发展高空气球光学探测技术,对高空气球的运动轨迹进行监测,保障国家安全。

目前,国内外对于卫星等不透明物体的光学反射特性研究报道较多,一般将空间不透明物体看作是非朗伯体,利用双向反射分布函数(BRDF)来分析空间物体表面散射特性^[3-10]。这类目标为不透明体,计算其散射特性时不用考虑物体对入射光的折射现象。而对于表面具有半透明介质层的物体,也有一些学者对其半透明介质层的反射和折射现象进行了研究。夏新林等^[11]采用蒙特卡罗法分析半透明介质层散射现象对涂层表面双向反射特性的影响。Lee等^[12]利用薄膜光学反射关系,提出使用微面斜率法来分析计算具有半透明介质层粗糙表面的反射和折射,并分析了具有半透明介质层粗糙表面的薄膜光学散射特性。陈学等^[13]考虑粗糙表面的遮蔽效应,基于微面斜率法建立了光谱辐射概率模型,并采用蒙特卡罗法模拟光谱辐射能束在粗糙表面、半透明介质层之间的多次反射、折射以及吸收等现象。以前所有讨论,仅分析计算了入射光在卫星等不透明物体以及具有半透明介质层粗糙表面的散射特性,并未分析入射光在气球等透明物体内的反射以及折射情况。

基于以上研究,本文分析了计算高空气球背景辐射特性,基于几何计算的网格划分思想,对高空气球面的面元进行网格划分,并结合双向散射分布函数(BSDF)镜反射/折射、近镜反射/折射、漫反射/折射、理想漫反射/折射相结合的计算模型,推导出临近空间高空气球在地面产生辐射亮度的计算公式,分析了高空气球的可见性,为将来高空气球的光学探测奠定了理论基础。

2 高空气球背景辐射特性分析

根据几何光学辐射理论,背景辐射主要由太阳直接辐射、地球直接辐射、地球反射的太阳辐射、经过高空气球反射的地球辐射、高空气球反射的太阳辐射、既经地球反射又经高空气球反射的太阳辐射等辐射组成。高空气球所处高度以及自身大小决定背景辐射主要由太阳直接辐射1、地球直接辐射2和地球反射的太阳辐射3组成,如图1所示。

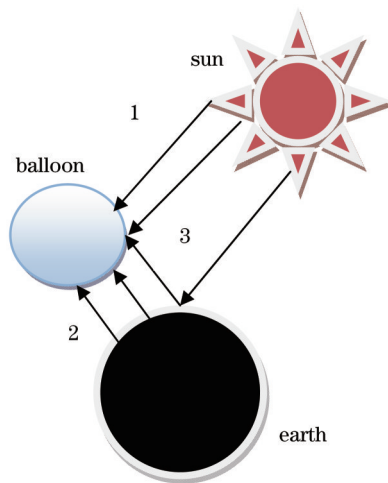


图1 临近空间高空气球背景辐射

Fig.1 Background radiation of high altitude balloon in near space

计算太阳与地球辐射时,将太阳和地球看作为黑体,光谱辐射照度根据黑体辐射理论计算得出。

2.1 太阳直接辐射产生的光谱照度

根据普朗克黑体辐射公式,太阳作为黑体的光谱辐出度为

$$M_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{c_1 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1}}{\lambda^5}, \quad (1)$$

在高空气球表面产生的光谱照度为

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = \frac{R_s^2 \cdot M_{\text{sun}}(\lambda)}{R_{s-e}^2}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长, T 为太阳的辐射温度, $T=5900\text{ K}$, c_1 是第一黑体辐射常数, $c_1 = 3.7148 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, c_2 是第二黑体辐射常数, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, R_s 是太阳平均半径, $R_s = 6.9599 \times 10^5 \text{ km}$, R_{s-e} 是平均日地距离, $R_{s-e} = 1.49597892 \times 10^8 \text{ km}$ 。

2.2 地球直接辐射产生的光谱照度

地球等效温度为293 K的黑体,光谱辐出度为

$$M_{\text{ear}}(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/293\lambda) - 1]}, \quad (3)$$

在高空气球表面产生的光谱照度为

$$E_{\text{ear}}(\lambda) = \frac{M_{\text{ear}}(\lambda) \cdot R_e^2}{(R_e + R_{b-e})^2}, \quad (4)$$

式中 R_e 为地球的半径, $R_e = 6400 \text{ km}$, R_{b-e} 为高空气球和地球之间的距离,即气球所处高度。

2.3 地球反射的太阳辐射产生的光谱照度

地球反射的太阳辐射在高空气球表面产生的光谱照度为

$$E_r(\lambda) = 0.3E_{\text{sun}}(\lambda). \quad (5)$$

地球作为均匀漫反射体,平均反射率0.3。背景辐射产生的光谱总照度为

$$E(\lambda) = E_{\text{sun}}(\lambda) + E_{\text{ear}}(\lambda) + E_r(\lambda). \quad (6)$$

3 高空气球面元网络划分

计算高空气球散射特性时,需要建立以下坐标系:以球心为原点的气球球体坐标系 $OX_bY_bZ_b$,地面坐标系 $OX_gY_gZ_g$,光照方向坐标系 $OX_1Y_1Z_1$,以及气流坐标系 $OX_aY_aZ_a$ 。

气球坐标系 $OX_bY_bZ_b$ 与光照方向坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 的变换关系可按照图2来完成,先绕 OZ 轴方向(即图中 OZ_b 方向)转过角 ψ ,然后绕此时的 OY 轴方向转过角 θ (即图中 OY' 方向),最后绕当时的 OX 轴方向(即图中 OX_1 方向)转过角 ϕ ,就可与光照方向坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 重合。按照坐标变换一般法则,得到坐标系 $OX_bY_bZ_b$ 到 $OX_1Y_1Z_1$ 的转换矩阵为

$$L_{b1} = L_x(\phi)L_y(\theta)L_z(\psi), \quad (7)$$

式中 $L_x(\phi)$ 、 $L_y(\theta)$ 、 $L_z(\psi)$ 分别为单轴转换矩阵。

推算得到气球坐标系到地面、气流坐标系的变换矩阵分别为

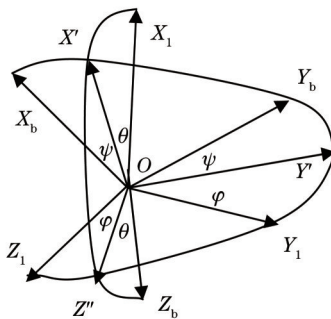


图2 坐标转换关系

Fig.2 Relationship of coordination transformation

$$L_{bg} = L_x(\phi_g)L_y(\theta_g)L_z(\psi_g), \quad (8)$$

$$L_{ba} = L_x(\phi_a)L_y(\theta_a)L_z(\psi_a). \quad (9)$$

气球坐标系到光照方向、地面、气流坐标系之间位置矢量变换公式为

$$R_b = L_{bl}R_l = L_{bg}R_g + R_{b-e} = L_{ba}R_a, \quad (10)$$

式中 ϕ_g 、 ϕ_a 、 θ_g 、 θ_a 、 ψ_g 、 ψ_a 分别为气球坐标系到地面、气流坐标系之间的旋转角度， R_b 、 R_c 、 R_g 、 R_a 分别为气球光照方向、地面及气流坐标系内的单位矢量， R_{b-e} 为气球球体坐标系原点在在地面坐标系中的位置矢量， L_{bl} 、 L_{bg} 、 L_{ba} 分别为气球坐标系到光照方向、地面、气流坐标系的转换矩阵。矩阵计算结果如下：

$$L_{bl} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \theta \sin \phi \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \theta \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \sin \theta \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \sin \theta \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

高空气球可以简化为球形，利用球面面元划分方法^[5]，将半径为 r 的气球球面划分成 $A \times B$ 个面元，如图 3 所示。

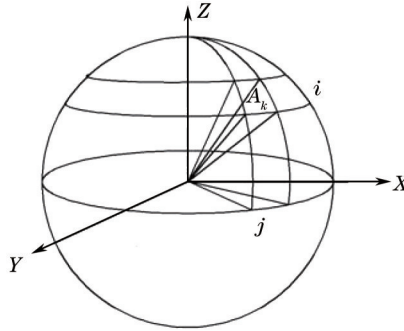


图3 气球球面面元结构

Fig.3 Sketch of balloon surface facet

第 k 个面元的面积为

$$A_k = \frac{\pi}{B} \left\{ \frac{\pi \cdot r^2}{A} \left[\sin\left(\frac{\pi}{B} \cdot j\right) + \sin\left(\frac{\pi}{B} \cdot (j-1)\right) \right] \right\}, \quad (12)$$

式中 $k = (i-1) \cdot B + j$, $i = 1, \dots, A$, $j = 1, \dots, B$ 。

球面网格面元相对气球球体坐标系的参考点坐标 (x_k, y_k, z_k) 为

$$\begin{cases} x_k = r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{B} \cdot j\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{A} \cdot i\right) \\ y_k = r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{B} \cdot j\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{A} \cdot i\right) \\ z_k = r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{B} \cdot j\right) \end{cases} \quad (13)$$

4 高空气球材料特性

通常，空间目标的表面材料不同，具有不同的表面反射特性。高空气球的蒙皮材料大多由聚乙烯组成，因此，其散射特性由聚乙烯材料表面特性决定。通过引入 BSDF，来描述半透明类或透明类物体表面的光学散射特性。

4.1 BRDF 与 BSDF 的定义

BRDF 的表达式为^[14]

$$f_i(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (14)$$

BRDF表示沿方向 (θ_r, φ_r) 的反射亮度 $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 与沿方向 (θ_i, φ_i) 入射到目标表面的辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比。不考虑方位角, BRDF可以简化为

$$f_r(\theta_i, \theta_r) = \rho(\theta_i) \cdot P_r(\theta_i, \theta_r), \quad (15)$$

式中 $\rho(\theta_i)$ 为反射系数, $P_r(\theta_i, \theta_r)$ 为相位函数, 并且在立体角 $d\Omega$ 内满足如下归一化定理:

$$\int P_r(\theta_i, \theta_r) d\Omega = 1. \quad (16)$$

BSDF的表达式为^[15]

$$\alpha_s(\theta_i, \theta_s) = \frac{d\Phi_s(\theta_i, \theta_s)}{\Phi_i(\theta_i) d\Omega_s}, \quad (17)$$

式中 $d\Phi_s(\theta_i, \theta_s)$ 为散射方向辐射通量, $\Phi_i(\theta_i)$ 为入射方向辐射通量, $d\Omega_s$ 为散射方向立体角。BSDF是表示物体的基本光学特性的一个物理量, 表示对于某一入射方向的光波, 在以入射表面为横截面的球体空间散射能量分布, 表示透明类物体表面散射以及体散射光学特性, 考虑材料的吸收、反射、折射等现象, 它由材料、表面粗糙度、辐射波长、介电常数等因素决定。

BSDF也可以表达为

$$\alpha_s(\theta_i, \theta_s) = \alpha_{\text{scat}}(\theta_i) \cdot P_s(\theta_i, \theta_s), \quad (18)$$

式中 $\alpha_{\text{scat}}(\theta_i)$ 为散射系数, $P_s(\theta_i, \theta_s)$ 为相位函数。

4.2 高空气球散射特性

分析高空气球散射特性时, 首先需要考虑气球对光的吸收率、透射率、反射率。将气球等效为镀膜的透明玻璃模型, 光在气球内的反射率、透射率、吸收率由相应的玻璃模型计算公式得出^[16-19]。

反射率为

$$\rho_s(\theta_i) = \frac{R(\theta_i) + R(\theta_i)[1 - 2 \cdot R(\theta_i)] \exp(-4 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}{1 - R^2(\theta_i) \cdot \exp(-4 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}, \quad (19)$$

透射率为

$$\tau_s(\theta_i) = \frac{[1 - R(\theta_i)]^2 \cdot \exp(-4 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}{1 - R^2(\theta_i) \cdot \exp(-4 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}, \quad (20)$$

吸收率为

$$\alpha_{\text{abs}}(\theta_i) = \frac{[1 - R(\theta_i)] \cdot \exp(-2 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}{1 - R(\theta_i) \cdot \exp(-2 \cdot \beta \cdot r / \cos \theta_i)}, \quad (21)$$

式中 $R(\theta_i)$ 为与入射光方向有关的菲涅耳光能反射系数, β 为聚乙烯薄膜吸收系数。

高空气球需满足如下能量守恒定律:

$$\rho_s(\theta_i) + \tau_s(\theta_i) + \alpha_{\text{abs}}(\theta_i) = 1. \quad (22)$$

光入射到聚乙烯材料表面上时, 会产生镜反射/折射、近镜反射/折射、漫反射/折射、理想漫反射/折射4种现象, 如图4所示。

由(16)式所示的相位函数的归一化定理推导出理想反射相位函数为

$$P_L(\theta_i, \theta_r) = \frac{1}{\pi} \cdot \cos \theta_r. \quad (23)$$

结合朗伯反射相位函数(23)式与归一化定理(16)式, 得到漫反射的相位函数为

$$P_D(\theta_i, \theta_r) = N(\theta_i) \cdot \frac{(\alpha \cdot \cos \theta_r)^{m-1}}{|\sin \theta_i + \sin \theta_r|^m + (\alpha \cdot \cos \theta_r)^m}, \quad (24)$$

式中 $N(\theta_i)$ 是与入射光方向相关的常数, α 为反射光半立体角, m 为合适指数。

由照明激光的高斯理想形式得镜反射相位函数为

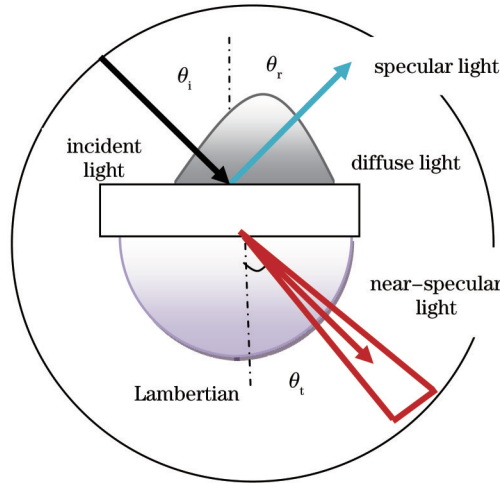


图4 光在气球中的散射模型

Fig.4 Scattering model of light in balloon

$$P_s(\theta_i, \theta_r) = N(\theta_i) \cdot \exp\left[-\frac{(\sin \theta_i + \sin \theta_r)^2}{a^2}\right]. \quad (25)$$

根据 Van Cittert-Zernike 定理, 推出近镜反射相位函数为

$$P_{ns}(\theta_i, \theta_r) = N(\theta_i) \cdot \exp\left[-\frac{(\sin \theta_i + \sin \theta_r)^2}{(C \cdot \cos \theta_i)^2}\right] \cdot \cos \theta_r, \quad (26)$$

式中 C 为最优拟合数据常数。

高空气球的反射模型为

$$f(\theta_i, \theta_r) = \rho_s(\theta_i) \cdot P_s(\theta_i, \theta_r) + \rho_{ns}(\theta_i) \cdot P_{nsr}(\theta_i, \theta_r) + \rho_D(\theta_i) \cdot P_{Dr}(\theta_i, \theta_r) + \rho_L \cdot P_{Lr}(\theta_r), \quad (27)$$

式中 $f(\theta_i, \theta_r)$ 为双向反射分布函数, $\rho_s(\theta_i)$ 、 $\rho_{ns}(\theta_i)$ 、 $\rho_D(\theta_i)$ 、 ρ_L 和 $P_s(\theta_i, \theta_r)$ 、 $P_{nsr}(\theta_i, \theta_r)$ 、 $P_{Dr}(\theta_i, \theta_r)$ 、 $P_{Lr}(\theta_r)$ 分别为镜反射、近镜反射、漫反射、理想漫反射系数和相位函数。高空气球的透射模型为

$$\tau(\theta_i, \theta_t) = \tau_s(\theta_i) \cdot P_s(\theta_i, \theta_t) + \tau_{ns}(\theta_i) \cdot P_{nsr}(\theta_i, \theta_t) + \tau_D(\theta_i) \cdot P_{Dt}(\theta_i, \theta_t) + \tau_L \cdot P_{Lt}(\theta_t), \quad (28)$$

式中 $\tau(\theta_i, \theta_t)$ 为双向折射分布函数, 等号右边 4 项分别代表镜反射/折射、近镜反射/折射、漫反射/折射、理想漫反射/折射, $\tau_s(\theta_i)$ 、 $\tau_{ns}(\theta_i)$ 、 $\tau_D(\theta_i)$ 、 τ_L 和 $P_s(\theta_i, \theta_t)$ 、 $P_{nsr}(\theta_i, \theta_t)$ 、 $P_{Dt}(\theta_i, \theta_t)$ 、 $P_{Lt}(\theta_t)$ 分别为镜折射、近镜折射、漫折射、理想漫折射系数和相位函数。

高空气球的散射模型为

$$\alpha_s(\theta_i, \theta_s) = f(\theta_i, \theta_r) + \tau(\theta_i, \theta_t). \quad (29)$$

根据所建立球面的面元几何模型, 高空气球球面第 k 个面元的入射光通量由 (6) 式得

$$\Phi_i(\theta_i) = E(\lambda) \cdot A_k. \quad (30)$$

根据基本辐射理论, 面元 A_k 散射的光通量由 (30) 式可得

$$d\Phi_s(\theta_i, \theta_s) = \left\{ [f(\theta_i, \theta_r) + \tau(\theta_i, \theta_t)] \cdot E(\lambda) \cdot A_k \right\} d\Omega_s. \quad (31)$$

高空气球散射的光通量为

$$\Phi_s(\theta_i, \theta_s) = \int \left\{ [f(\theta_i, \theta_r) + \tau(\theta_i, \theta_t)] \cdot E(\lambda) \cdot A_k \right\} d\Omega_s. \quad (32)$$

探测器对高空气球探测时, 气球在探测器入瞳面产生的光谱辐亮度为

$$L_s = \frac{\int \left\{ [f(\theta_i, \theta_r) + \tau(\theta_i, \theta_t)] \cdot E(\lambda) \cdot A_k \right\} d\Omega_s}{A_d \cdot \Omega_d}, \quad (33)$$

式中 A_d 为探测器入瞳面面积, Ω_d 为气球对入瞳面所张的立体角。

5 高空气球散射亮度仿真

5.1 高空气球背景辐射亮度仿真

通常情况下使用 45° 背景辐射代替天背景辐射,使用 135° 背景辐射代替地背景辐射^[20]。利用 Modtran 软件在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段仿真计算敦煌第 243 天的背景辐射亮度,观测方位角为 180° 。不同观测天顶角的背景辐射亮度^[21]如图 5 所示,从图中可以看, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的背景辐射亮度随观测天顶角变化很小。但是, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的背景辐射亮度在观测天顶角 $20^\circ\sim 60^\circ$ 范围变化较小,在 $60^\circ\sim 80^\circ$ 范围变为 $20^\circ\sim 60^\circ$ 的两倍。总体来说,背景辐射亮度都随着观测天顶角的增大而增大。不同观测方位角的背景辐射亮度如图 6 所示,可以看出亮度曲线重合在一起,说明观测方位角对背景辐射亮度没有影响,事实上天空背景亮度不会随着观测方向的不同而变化。

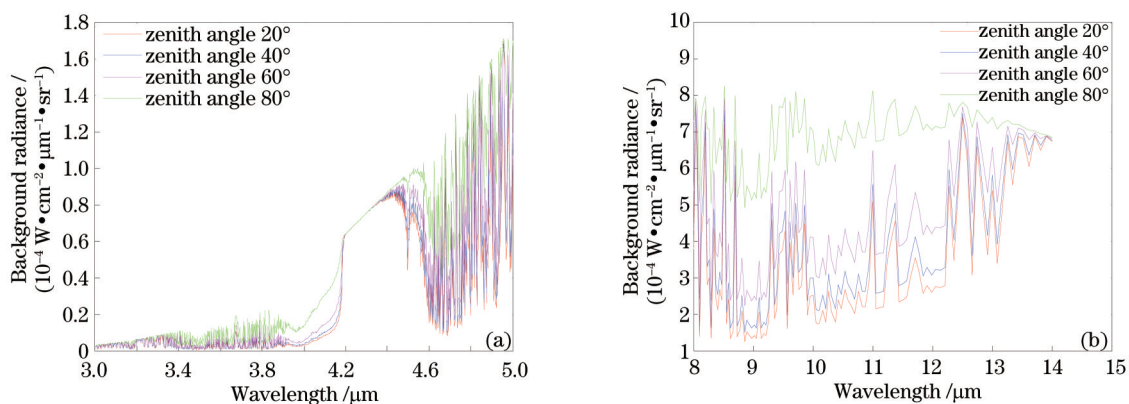


图 5 不同观测天顶角条件下的背景辐射亮度。(a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 14\ \mu\text{m}$

Fig.5 Background radiance of different zenith angles. (a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 14\ \mu\text{m}$

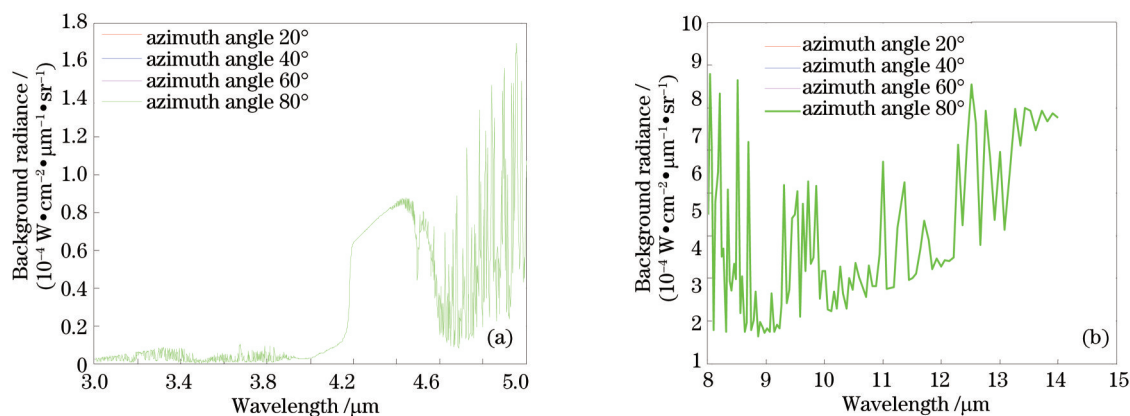


图 6 不同观测方位角条件下的背景辐射亮度。(a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 14\ \mu\text{m}$

Fig.6 Background radiance of different azimuth angles. (a) $3\sim 5\ \mu\text{m}$; (b) $8\sim 14\ \mu\text{m}$

5.2 高空气球辐射亮度仿真

为了确认此模型的正确性,将基于 BSDF 模型计算得到的亮度与基于 BRDF 模型得到的亮度进行比较,结果如图 7 和图 8 所示。气球参数条件:直径 $12\ \text{m}$,经度 95.45° ,纬度 40.28° ,高度 $20.1\ \text{km}$,方位角 76.5° ,仰角 15.4° ,斜距 $70\ \text{km}$ 。图 7 给出在相同观测方位角,不同观测天顶角情况下,BSDF 模型与 BRDF 模型计算结果比较,结果表明在不同天顶角情况下,高空气球亮度变化趋势一致。在较小的观测天顶角情况下,两个模型计算结果几乎相同,因此 BSDF 模型可以在较小的观测天顶角下计算高空气球亮度。随着天顶角的增大,BRDF 模型得到的亮度增长缓慢,几乎与观测天顶角无关,而 BSDF 模型得到高空气球亮度随着天顶角的增大而增大。理论上因为背景辐射亮度随着天顶角的增大而增大,而高空气球亮度随着背景辐射亮度的增大而增大,因此 BSDF 模型更接近真实情况。图 8 给出在相同观测天顶角,不同观测方位角情况下,BSDF 模型与 BRDF 模型计算结果比较,不同方位角条件下,BRDF 模型计算得到亮度差异较大,而 BSDF 模型计算得到

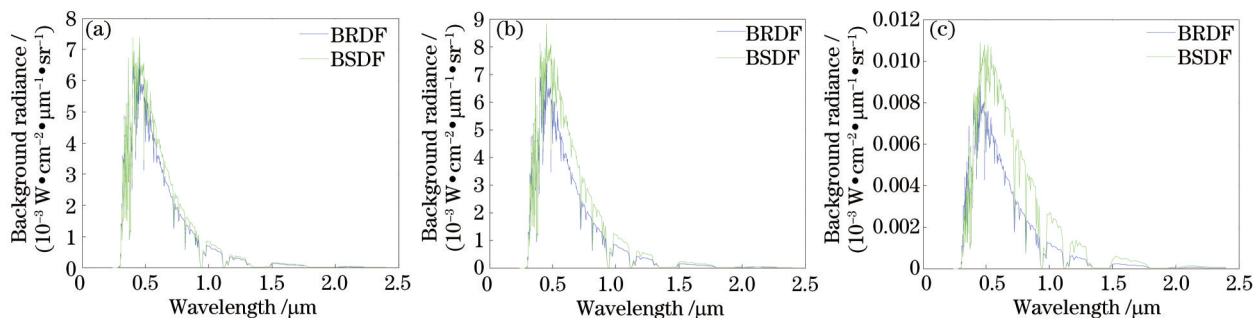


图7 观测方位角为 45° 的 BRDF 与 BSDF 模型计算结果比较。(a)观测天顶角 30° ;(b) 观测天顶角 60° ;(c) 观测天顶角 90°
Fig.7 Comparison of calculation results of BSDF and BRDF model at azimuth angle of 45° . (a) Zenith angle of 30° ; (b) zenith angle of 60° ; (c) zenith angle of 90°

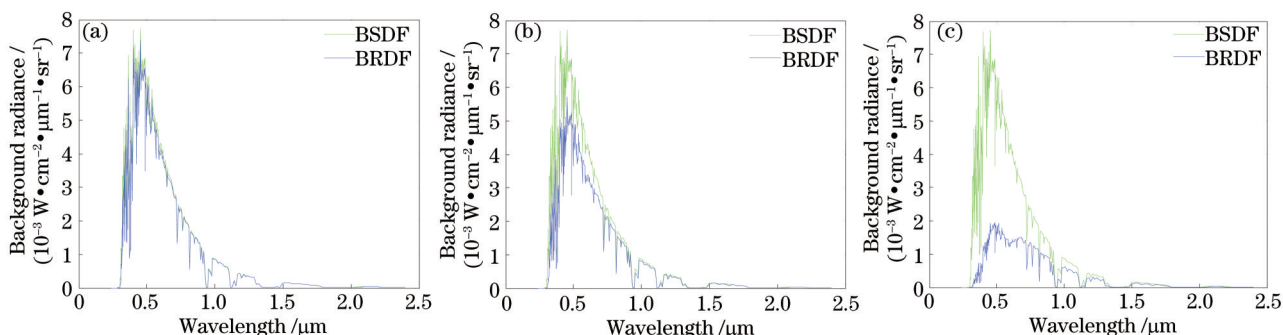


图8 观测天顶角为 45° 的 BRDF 与 BSDF 模型计算结果比较。(a)观测方位角 30° ;(b) 观测方位角 60° ;(c) 观测方位角 90°
Fig.8 Comparison of calculation results of BSDF and BRDF model at zenith angle of 45° . (a)Azimuth angle of 30° ;(b) azimuth angle of 60° ;(c) azimuth angle of 90°

亮度与方位角无关。理论上天空背景辐射亮度与方位角无关,在各向均匀背景辐射的情况下,对称的高空气球亮度也呈现均匀性,与方位角无关。因此 BSDF 模型更符合真实情况。BRDF 模型仿真结果得到的亮度为 $2.32 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, BSDF 模型仿真结果得到的亮度为 $2.28 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, 相对于实验测量结果, BRDF 模型的误差为 12.6%, 而 BSDF 模型的误差为 10.7%, 所以 BSDF 模型计算结果精度提高 2%。

6 结 论

对于临近空间高空气球的光散射研究,不能将气球看作是一般不透明物体,因此 BRDF 不能准确用于表达气球散射光学特性。在 BSDF 的基础上,提出了透明或者半透明类高空气球散射背景辐射在地面产生辐射亮度的计算模型,该模型考虑了镜反射/折射、近镜反射/折射、漫反射/折射、理想漫反射/折射 4 种情况,并利用该模型仿真计算高空气球在地面产生的辐射亮度,与 BRDF 模型进行比较,结果表明:利用 BSDF 模型计算得到高空气球亮度为 $2.28 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$, 计算结果相对实验测量结果误差为 10.6%, 精度相对 BRDF 模型提高 2%。基于 BSDF 的模型适合高空气球亮度计算,为将来临近空间高空气球光学探测理论建模提供了依据。

参 考 文 献

- 1 I S Smith. Advancement in NASA balloon research and development [J]. Advances in Space Research, 1996, 17(9): 37-44.
- 2 D A Fairbrother, D L Pierce. NASA balloon program status [C]. AIAA Balloon Systems Conference, 2009, 2800: 1-5.
- 3 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Dong Aotuo. Modeling and validation of photometric characteristics of space targets oriented to space-based observation[J]. Appl Opt, 2012, 51(32): 7810-7819.
- 4 Zou Xiren, Bai Lu, Wu Zhensen. Mirror reflectance spectrum modeling of smooth samples [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612008.
- 邹喜仁,白璐,吴振森.光滑样品镜反射率谱建模[J].光学学报, 2013, 33(6): 0612008.

- 5 Wang Liguo, Wu Zhensen, Wang Mingjun. Second-order statistics for wave reflected by a plane mirror with a finite aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1101002.
王利国, 吴振森, 王明军. 湍流大气中的有限孔径平面镜反射波的二阶统计特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1101002.
- 6 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measuring device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.
- 7 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Research on the spectral scattering of target based on three-dimensional reconstruction theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0929001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 基于三维重建理论的目标光谱散射特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0929001.
- 8 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0229001.
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0229001.
- 9 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on N th cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 593-598.
汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 593-598.
- 10 Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, *et al.*. An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(5): 710-715.
鲍文卓, 丛明煜, 张伟, 等. 基于面元网格化的空间目标光学特性计算方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(5): 710-715.
- 11 Xia Xinlin, Ren Depeng, Tan Heping. Effects of medium absorption and scattering on bi-directional reflection of semitransparent coatings [J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2005, 24(5): 361-365.
夏新林, 任德鹏, 谈和平. 介质吸收散射对半透明介质层表面双向反射特性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(5): 361-365.
- 12 H J Lee, B J Lee, Z M Zhang. Modeling the radiative properties of semitransparent wafers with rough surfaces and thin-film coatings [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, 93(1-3): 185-194.
- 13 Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Spectral scattering properties analysis of semitransparent medium layer with rough surface by microfacet slope method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1229001.
陈学, 孙创, 夏新林. 基于微面斜率法的粗糙表面半透明介质层光谱散射特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1229001.
- 14 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1250-1254.
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1250-1254.
- 15 Michael E Thomas, David W Blodgett, Daniel V Hahn. Analysis and representation of BSDF and BRDF measurements [C]. SPIE, 2003, 5192: 158-167.
- 16 Michael E Thomas, Donald D Duncan. BRDF and BSDF models for diffuse surface and bulk scatter from transparent windows [C]. SPIE, 2007, 6545: 654501.
- 17 Andrea M Brown, Daniel V Hahn, Michael E Thomas, *et al.*. Optical material characterization through BSDF measurement and analysis [C]. SPIE, 2010, 7792: 779211.
- 18 D D Duncan, D V Hahn, M E Thomas. Physics-based polarimetric BRDF models [C]. SPIE, 2003, 5192: 129-140.
- 19 M E Thomas, R I Joseph, W J Tropf, *et al.*. A general BRDF/BSDF model including out-of-plane dependence [C]. SPIE, 2010, 7792: 779201.
- 20 Zhensen Wu, Anan Liu. Scattering of solar and atmospheric background radiation from a target [J]. *International J IR and Mill Waves*, 2002, 23(6): 907-917.
- 21 Lu Bai, Zhensen Wu, Yunhua Cao, *et al.*. Spectral scattering characteristics of space target in near-UV to visible bands [J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 8515-8524.

栏目编辑: 史敏