

文章编号: 0253-2239(2006)12-1766-6

# 热红外对地遥感中的大气散射效应\*

江月松 李小路 赵一鸣 申春燕

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 从辐射传输方程出发, 严格地分析了以往工作中被忽略的大气层中悬浮微粒散射对热红外辐射能量传输的影响, 特别研究了对能量平衡的贡献和对传感器信噪比的影响, 对以遥感器高度和能见度作为参量的仿真计算结果说明, 与传统的不考虑大气中悬浮微粒的散射情况相比差 1~2 个数量级。这说明, 悬浮微粒的散射不仅对红外辐射有消光作用, 而且是研究热红外遥感系统中新的辐射通量出现的重要因素。

**关键词:** 热红外遥感; 悬浮粒子散射效应; 辐射传输理论; 对地遥感

中图分类号: O432 文献标识码: A

## Effects of Atmospheric Scattering on Thermal Infrared Remote Sensing of the Earth

Jiang Yuesong Li Xiaolu Zhao Yiming Shen Chunyan

(School of Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract:** The effects of scattering caused by atmospheric aerosol are become more and more important. So the effects are studied by using radiation transfer equation in detail. The influences on radiant flux transfer, especially the energy balance and total signal-to-noise ratio of remote sensor induced by atmospheric aerosol, which are ignored in the past studies, are rigorously analyzed. The simulation results for parameters of altitude of remote sensor and visibility show that the scattering of the thermal infrared radiation by atmospheric aerosol differ in 1~2 magnitude order of that with aerosol ignored. This is due to the fact that the scattering is not only component of the infrared radiation extinction, but also an important factor determining the emergence of new types radiant fluxes in the thermal infrared remote sensing of the earth.

**Key words:** thermal infrared remote sensing; effects of aerosol scattering; radiation transfer theory; remote sensing of the earth

## 1 引言

在热红外对地观测遥感中, 星载或机载传感器接收地表的热红外辐射信息, 并利用这种热红外信息来识别地物和反演地表参量以及温度、湿度和热惯量等。辐射传输方程<sup>[1~5]</sup>是进行遥感反演的重要依据。但在通常的遥感反演的研究中, 因大气层中微粒的体散射系数  $\alpha_s$  小于体吸收系数  $\alpha_a$ , 因而在实际问题研究和遥感应应用中通常只考虑大气层的发射与吸收, 而忽略了大气层中悬浮微粒对热红外辐射传输的散射作用。但随着高精度遥感测量技术以及

定量化遥感反演的发展, 这些在以往被忽略的因素也必须加以考虑。本文从辐射传输方程出发, 详细分析了气层中悬浮微粒散射对热红外辐射能量传输的影响, 主要是对能量平衡的贡献和对传感器信噪比的影响, 结果说明, 在高精度的热红外定量遥感反演中, 必需考虑大气层中微粒散射的效应, 特别是在微粒密度较大的情况下, 不能忽略这一因素。

## 2 辐射传输方程及其分析

在热红外对地遥感中, 在介质中的某处, 当波沿

\* 航天创新基金和航空基础科学基金(05F51073)资助课题。

作者简介: 江月松(1959~), 男, 江苏淮安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事成像理论与技术、激光与红外遥感技术的研究。E-mail: yuesongjiang@vip.sina.com

收稿日期: 2005-09-14; 收到修改稿日期: 2006-05-10

着方向  $(\theta, \varphi)$  穿过距离  $dz$  时, 光谱辐射亮度变化  $dL_\lambda$  的辐射传输方程可表示为<sup>[1~5]</sup>

$$dL_\lambda = -L_\lambda(\alpha_a + \alpha_s)dz + L_\lambda^* \alpha_a dz + \frac{1}{4\pi} \alpha_s dz \int_{4\pi} L'_\lambda P(\theta_s) d\Omega', \quad (1)$$

结合图 1 和(1)式来说明各种辐射因素。如图 1 所示,  $dL_\lambda$  表示辐射在  $z$  方向上传输  $dz$  距离时所对应的体积  $dV$  中的总的光谱辐射亮度的变化量。设  $L_\lambda$  是  $dV$  入口处的光谱辐射亮度;  $dV$  出口处的辐射亮度为  $L_\lambda^0$ , 则  $dL_\lambda = L_\lambda^0 - L_\lambda$ 。  $L'_\lambda$  是沿着与  $z$  方向成一  $\theta_s$  角度的  $z'$  方向入射到  $dV$  入口处的侧向光谱辐射亮度;  $p(\theta_s)$  是  $dz$  对应的气体体积  $dV$  内悬浮微粒对侧向辐射的散射因子;  $L_\lambda^*$  表示大气层  $dV$  内黑体辐射的光谱辐射亮度。这样, (1)式右边的第一项中的  $\alpha_a$  就表示由于气体及悬浮粒子吸收引起的辐射亮度的减小;  $\alpha_s$  就表示因粒子散射所引起的辐射亮度的减小。总能量保持不变, 但沿  $(\theta, \phi)$  方向有亮度损失。  $\alpha_a$  和  $\alpha_s$  两者之和可以看作是体积  $dV$  中导致辐射亮度降低的消光系数  $\alpha_e$ 。

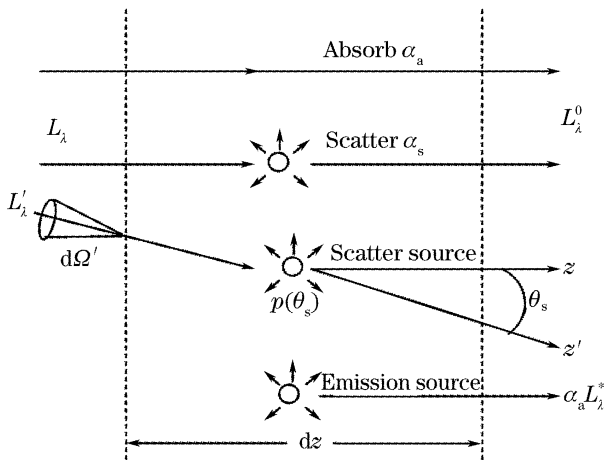


图 1 辐射传输方程中各种基本热辐射因素

Fig. 1 Various element contributions of radiations in radiation transfer equation

(1)式中的第二项对应于气层中温度  $T$  的热辐射, 因大气并不是黑体, 其辐射发射率为

$$d\epsilon = dM_\lambda / M_\lambda^*, \quad (2)$$

式中  $dM_\lambda$  是大气层的辐射出射度的变化量,  $M_\lambda^*$  是绝对黑体的辐射出射度,  $M_\lambda^*$  与黑体的辐射亮度  $L_\lambda^*$  有如下关系<sup>[6,7,11]</sup>:

$$L_\lambda^* = \frac{1}{\pi} M_\lambda^*, \quad (3)$$

根据辐射的基尔霍夫(Kirchhoff)定律有  $d\epsilon = da$ ,  $da$  为大气层  $dV$  中对辐射的吸收率。根据普朗克(Planck)定律,  $L_\lambda^*$  为

$$L_\lambda^* = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(k\lambda T)] - 1}, \quad (4)$$

易于证明<sup>[7]</sup>:

$$da = \alpha_a dz. \quad (5)$$

方程(1)式右端第二项前的“+”号表明, 大气层内的热辐射导致沿着  $z$  传播方向的辐射亮度的增加。

在热红外遥感中, 因通常  $\alpha_s \ll \alpha_a$ , 所以常规的处理方法是忽略散射对辐射衰减的作用。但实际上, 散射还会以其他的方式参与到能量平衡中, 而且这种参与是不能被忽略的。其主要原因是: 在由传感器瞬时视场立体角  $\Omega_r$  内的大气层体积中, 既有遥感目标发出的辐射, 也有其他一些辐射, 如背景表面的热辐射、云的热辐射以及遥感器(辐射计)瞬时视场立体角之外的大气中的辐射等, 由  $\Omega_r$  内的气体中的悬浮粒子向所有方向散射这些辐射, 包括向遥感器的接收口径方向, 这样就形成了二次辐射通量, 他们在散射后作用在遥感器接收口径面积  $A_r$  上。因此(1)式右边的第三项包含的因素多而复杂, 需做详细讨论。

在图 1 中,  $L'_\lambda$  以围绕  $z'$  的立体角  $d\Omega'$  向  $dV$  辐射, 这个辐射受到大气层  $dV$  中悬浮微粒向所有方向的散射。被散射辐射中的一部分沿着  $z$  轴方向传播, 这部分由系数  $\alpha_s$  和因子  $p(\theta_s)$  确定,  $p(\theta_s)$  是散射角  $\theta_s$  的函数, 它描述了散射辐射的角分布函数, 并依据下式归一化<sup>[8~10]</sup>:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} p(\theta_s) d\Omega = 1, \quad (6)$$

其中以  $z$  方向的散射辐射使传感器接收到的辐射亮度在  $L_\lambda^0$  和  $L_\lambda$  之间增加了  $dL_\lambda$ 。为了得出单次反射的二次辐射通量的解析表达式, 必须按照(1)式和(4)式考虑实际物体的热辐射定律

$$L_\lambda(\lambda, T) = L_\lambda^*(\lambda, T)\epsilon(\lambda, T), \quad (7)$$

和二向性反射分布函数<sup>[3~5]</sup>

$$F_{BRD}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_\lambda(\Omega_r)}{dE(\Omega_i)}. \quad (8)$$

假设是机载对地观测热红外遥感情况, 遥感器位于地面之上的高度  $H$  处, 设云层高度为  $H_c$ ,  $H$  位于云层之下, 如图 2 所示。图 2 中的符号意义为:  $e$  表示被感知的地面,  $a$  表示由遥感器瞬时视场立体角  $\Omega_r$  所限定体积中的大气,  $s$  表示立体角  $\Omega_r$  之外的大气,  $c$  表示云层的下边界,  $r$  表示遥感接收器。图 2 中的  $\Phi_{er}$  和  $\Phi_{ar}$  分别是地表和大气的直接辐射通量, 而  $\Phi_{cer}$ 、 $\Phi_{ser}$ 、 $\Phi_{ear}$ 、 $\Phi_{sar}$  和  $\Phi_{car}$  分别是云→地、(立体

角  $\Omega_r$  之外的)气→地、地→气、(立体角  $\Omega_r$  之外的)气→(立体角  $\Omega_r$  之内的)气→气和云→气的二次辐射通量。

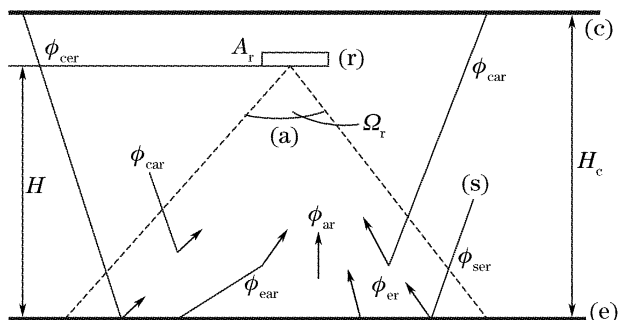


图 2 遥感器接收的各种辐射通量

Fig. 2 Various radiation flux received by sensor

按照通常做法,设大气是水平均一、各项同性的<sup>[3~5]</sup>,为了得出辐射通量  $\Phi_{er}$  的解析表达式,我们应用图 3。对于热红外波段而言,地表近似黑体,比辐射率接近于 1,当传感器视场的平面角小于  $40^\circ$  时,地表近似朗伯面<sup>[3]</sup>,在此假设下,地表(e)随机点热辐射光谱亮度的表达式为

$$(L_\lambda)_e = L_\lambda^*(\lambda, T_e)\epsilon_e(\lambda, T_e), \quad (9)$$

辐射通量  $\Phi_{er}$  只由遥感器瞬时视场立体角内的地表(e)部分(即由图 3 中  $A_e$  为直径所确定的圆面积)确定。在垂直于从  $A_e \rightarrow A_r$  路径的层  $dh$  中的衰减导致由  $A_e$  为直径的圆面积辐射发射的光谱亮度的降低,以  $dL_\lambda^{(1)}$  表示其减少量,它由辐射传输方程右边的第一项确定,即

$$dL_\lambda^{(1)} = -L_\lambda \alpha_e(\lambda, h) dh, \quad (10)$$

对(10)式积分可得此路径上亮度总的衰减量

$$\int_{(L_\lambda)_e}^{(L_\lambda)_{er}} dL_\lambda^{(1)} / L_\lambda = - \int_0^H \alpha_e(\lambda, h) dh, \quad (11)$$

式中  $(L_\lambda)_e$  是圆面积  $A_e$  的辐射所发出的光谱辐射亮度,而  $(L_\lambda)_{er}$  是传输到辐射计接收口径  $A_r$  的光谱辐射亮度,于是得出下面的关系式:

$$(L_\lambda)_{er} = (L_\lambda)_e \exp \left[ - \int_0^H \alpha_e(\lambda, h) dh \right] = (L_\lambda)_e \tau_{e0H}(\lambda), \quad (12)$$

式中  $\tau_{e0H}(\lambda)$  表示大气层  $h \in [0, H]$  中光谱亮度的透射系数。由朗伯圆盘  $A_r$  发出的光谱辐射亮度在垂直于该圆盘中心周上一点  $A_r$  处的辐射照度为<sup>[6]</sup>

$$(E_\lambda)_{er} = \pi (L_\lambda)_{er} \sin^2(\theta_r/2), \quad (13)$$

式中  $\theta_r$  是对应于  $\Omega_r$  的平面角,根据辐射通量的定义有

$$(\Phi_\lambda)_{er} = (E_\lambda)_{er} \tau_r(\lambda) A_r, \quad (14)$$

式中  $(\Phi_\lambda)_{er}$  是辐射通量  $\Phi_{er}$  的光谱密度,  $\tau_r(\lambda)$  是遥感器接收光学系统的光谱透射系数。依次将(9)式代入(12)式、(12)式代入(13)式以及(13)式代入(14)式,并在光谱  $[\lambda_1, \lambda_2]$  范围内积分得  $\Phi_{er}$  为

$$\Phi_{er} = A_r \pi \sin^2(\theta_r/2) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{e0H}(\lambda) \tau_r(\lambda) L_\lambda^*(\lambda, T_e) \epsilon_e(\lambda, T_e) d\lambda. \quad (15)$$

为了计算  $\Phi_{er}$ ,我们参考图 2 与图 3,  $\Phi_{er}$  是由无限大地平表面(e)发出的、被遥感器瞬时视场立体角区域内的大气散射到接收器(r)的辐射。

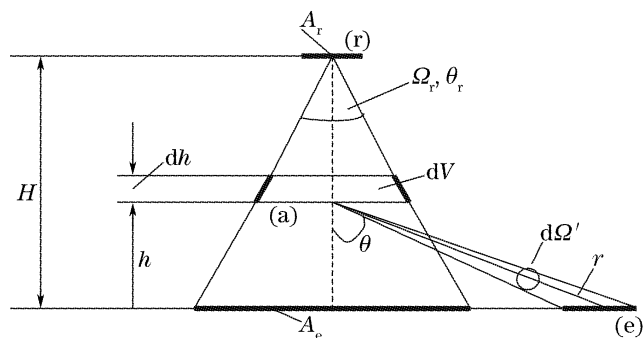


图 3 地表辐射元 de 对遥感器接收器视场角内的辐射

Fig. 3 Radiation of earth surface element in field of view of solid angle of sensor

对于地表的每一个辐射面积元  $de$ , 其对应于高度  $h$  处的立体角元为  $d\Omega' = \sin \theta d\theta d\phi$ , 则入射到散射体积  $dV$  内光谱辐射亮度为

$$(L_\lambda)_{ea} = (L_\lambda)_e \exp \left[ - \int_0^r \alpha_e(\lambda, r', \theta) dr' \right], \quad (16)$$

(16)式中的指数项描述了斜路径  $r' \in [0, r]$  上的光谱透射程度。考虑到  $dr' = dh / \cos \theta$ , 并考虑到大气水平均匀性的假设,可以得到下面表达式:

$$(L_\lambda)_{ea} = (L_\lambda)_e \exp \left[ - \frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \alpha_e(\lambda, h') dh' \right] = (L_\lambda)_e [\tau_{eh}(\lambda)]^{1/\cos \theta}, \quad (17)$$

式中  $[\tau_{eh}(\lambda)]^{1/\cos \theta}$  是  $de \rightarrow dV$  的光谱透射系数,  $(L_\lambda)_{ea}$  由(9)式给出。

由地表面元  $de$  发出的辐射到体积元  $dV$  的附近的光谱辐射亮度  $(L_\lambda)_{ea}$ , 被  $dV$  中的悬浮粒子向所有可能的方向散射,其中一部分被散射传播到遥感器的接收口径  $A_r$ , 其光谱辐射亮度表征了在  $dV$  附近的散射辐射,它由方程(1)右边第三项确定,记为  $(dL_\lambda)^{(3)}$ :

$$(dL_\lambda)^{(3)} = \frac{1}{4\pi} \alpha_s(\lambda, h) dh (L_\lambda)_{ea} P(\lambda, \theta) \sin \theta d\theta d\phi, \quad (18)$$

式中对照(1)式和图 1 与图 3 有  $\theta_s = \theta$ 。考虑到沿着  $dV \rightarrow A_r$  路径上的衰减, 我们得到该辐射亮度在  $A_r$  附近衰减为

$$(dL_\lambda)_{\text{ear}} = (dL_\lambda)^{(3)} \exp \left[ - \int_h^H \alpha_e(\lambda, h') dh' \right] = (dL_\lambda)^{(3)} \tau_{ehH}(\lambda), \quad (19)$$

式中光谱透射系数  $\tau_{ehH}$  是对应于路径  $h' \in [0, H]$  和  $h' \in [0, h]$  的光谱透射系数的乘积, 因此有

$$(dL_\lambda)_{\text{ear}} = (dL_\lambda)^{(3)} \tau_{e0H}(\lambda) [\tau_{eh}(\lambda)]^{-1}, \quad (20)$$

则根据辐照度和辐射通量的定义, 接收口径  $A_r$  处的光谱辐照度和光谱辐射通量为

$$(dE_\lambda)_{\text{ear}} = \pi (dL_\lambda)_{\text{ear}} \sin^2(\theta_r/2), \quad (21)$$

$$(d\Phi_\lambda)_{\text{ear}} = \pi (dE_\lambda)_{\text{ear}} \tau_r(\lambda) A_r, \quad (22)$$

式中  $\tau_r(\lambda)$  为遥感器接收光学系统的透射系数。为了得出沿着地表面  $\rightarrow$  大气  $\rightarrow$  接收器传输的辐射通量的计算表达式, 我们依次(9)式  $\rightarrow$  (17)式  $\rightarrow$  (18)式  $\rightarrow$  (20)式  $\rightarrow$  (21)式  $\rightarrow$  (22)式, 逐步将前式代入后一式子, 并对  $\theta$  和  $h$  进行积分得

$$\Phi_{\text{ear}} = \frac{\pi A_r}{2} \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) \tau_{e0H}(\lambda) L_\lambda^*(\lambda, T_e) \epsilon_e(\lambda, T_e) d\lambda \int_0^{\pi/2} P(\lambda, \theta) \sin \theta d\theta \int_0^H [\tau_{eh}(\lambda)]^{1/\cos \theta - 1} \alpha_s(\lambda, h) dh, \quad (23)$$

类似的分析过程可得图 2 其余项的辐射通量

$$\Phi_{\text{ar}} = \pi A_r \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) L_\lambda^*[\lambda, T_a(h)] \tau_{e0H}(\lambda) d\lambda \int_0^H [\tau_{eh}(\lambda)]^{-1} \alpha_a(\lambda, h) dh, \quad (24)$$

$$\Phi_{\text{cer}} = 2\pi^2 A_r \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) L_\lambda^*(\lambda, T_c) \tau_{e0H}(\lambda) \epsilon_c(\lambda, T_c) d\lambda \int_0^{\pi/2} F_{\text{BRD}c}(\theta; 0; \lambda) \sin \theta \cos \theta [\tau_{eHc}(\lambda)]^{1/\cos \theta} d\theta, \quad (25)$$

$$\Phi_{\text{ser}} = 2\pi^2 A_r \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) L_\lambda^*[\lambda, T_s(h)] \tau_{e0H}(\lambda) d\lambda \int_0^{\pi/2} F_{\text{BRD}e}(\theta; 0; \lambda) \sin \theta d\theta \int_0^{H_c} [\tau_{eh}(\lambda)]^{1/\cos \theta} \alpha_a(\lambda, h) dh, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{sar}} = & \frac{A_r}{2} \pi \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) L_\lambda^*[\lambda, T_s(h)] \tau_{e0H}(\lambda) d\lambda \int_0^H [\tau_{ez}(\lambda)]^{-1} \alpha_s(\lambda, z) dz \times \\ & \left\{ \int_0^{\pi/2} P(\lambda, \pi - \theta) \tan \theta [\tau_{ez}(\lambda)]^{-1/\cos \theta} d\theta \int_0^{H_c} [\tau_{eh}(\lambda)]^{1/\cos \theta} \alpha_a(\lambda, h) dh + \right. \\ & \left. \int_0^{\pi/2} P(\lambda, \theta) \tan \theta [\tau_{ez}(\lambda)]^{1/\cos \theta} d\theta \int_0^z [\tau_{eh}(\lambda)]^{-1/\cos \theta} \alpha_a(\lambda, h) dh \right\}, \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{car}} = & \frac{A_r}{2} \pi \sin^2 \left( \frac{\theta_r}{2} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_r(\lambda) \tau_{e0H}(\lambda) L_\lambda^*(\lambda, T_c) \epsilon_c(\lambda, T_c) d\lambda \int_0^{\pi/2} P(\lambda, \pi - \theta) \sin \theta [\tau_{eHc}(\lambda)]^{1/\cos \theta} d\theta \times \\ & \int_0^H \alpha_s(\lambda, h) [\tau_{eh}(\lambda)]^{-(1/\cos \theta + 1)} dh, \quad (28) \end{aligned}$$

(15)式和(23)式~(28)式是考虑了大气中悬浮粒子的散射作用后的热红外对地遥感各种辐射通量的能量平衡的数学表达式, 用这些表达式可以从理论和实践中直接求解或反演热红外遥感的结果。

### 3 数值仿真例子与结论

为了对大气中悬浮粒子对热红外辐射的散射作用对遥感器接收系统信息的影响, 我们针对机载对地遥感情况, 以实际的数据作数值计算。对于航空

遥感, 设机载平台距地面高度  $H = 1$  km, 云层下表面距地面高度  $H_c = 2$  km。并按照美国大气标准(1976年), 设在地面至云层之间大气温度是<sup>[1,3,6]</sup>:  $T_a(h) = T_s(h) = 281$  K;  $T_e = 288$  K;  $T_c = 275$  K。  $(\alpha_a)_{\text{CO}_2} = 0.01$  km<sup>-1</sup>,  $(\alpha_a)_{\text{H}_2\text{O}} = 0.288$  km<sup>-1</sup>。设大气的气象能见度为  $S_M$ , 在  $0.3 \sim 14$   $\mu\text{m}$  波长范围内与能见度有关的衰减系数  $\alpha_p(S_M, \lambda)$  为<sup>[1]</sup>

$$\alpha_p(S_M, \lambda) = \frac{3.91}{S_M} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3}, \quad (29)$$

式中  $\alpha_p(S_M, \lambda)$  的单位为  $\text{km}^{-1}$ ,  $S_M$  的单位为  $\text{km}$ ,  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ 。设热红外辐射波长范围取为  $\lambda_1 = 8 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 12 \mu\text{m}$ , 在此波段范围内, 各类地面的发射率在  $0.85 \sim 0.99$  之间, 大多数地物的发射率大于  $0.95^{[3,7]}$ , 我们取  $\epsilon_e = 0.96$ , 一般都把云体表面当作黑体表面<sup>[3]</sup>, 所以  $\epsilon_c = 1$ 。  $\tau_r(\lambda) = 1, \alpha(\lambda, h) = \alpha(\lambda)$ ,  $\alpha = \langle \alpha(\lambda) \rangle_{[8 \sim 12 \mu\text{m}]}$ ,  $F_{\text{BRDe}}(\theta, 0, \lambda) = (1 - \epsilon_e) / \pi^{[3]}$ , 应用文献[10]中的 M 型薄雾来得出  $P(\theta)$ 。并设  $\theta_r = 100, D_r = 10 \text{ mm} (A_r = \pi D_r^2 / 4)$ 。为了计算积分式

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}^* d\lambda = \frac{1}{\pi} \sigma T^4 \left[ z_{\lambda_2} \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right) - z_{\lambda_1} \left( \frac{\lambda}{\lambda_m} \right) \right], \quad (30)$$

式中  $\lambda_m = 2898 T, z_{\lambda}$  为

$$z_{\lambda} = \int_0^{\lambda} M_k^* d\lambda / (\sigma T^4), \quad (31)$$

应用文献[11]中表 3.2 中的函数  $z(x)$  的值。所计算的辐射通量与能见度的函数关系如图 4 和图 5 所示。图 4 是能见度  $S_M = 2 \text{ km}$  的情况, 因各种情况下的辐射通量数值差别较大, 在同一张图上难以分

辨出他们之间的差别和变化趋势, 故用 (a)、(b) 和 (c) 表示。图 5 是  $S_M$  为  $10 \text{ km}$  的情况, 基于与上述同样的理由, 分别以 (a)、(b) 表示。这些曲线的变化情况都可以从前面所述的相应的散射过程得到合理的解释。另外, 从图 4 和图 5 中可以看到, 遥感器所接收到的辐射通量随着遥感器高度的变化情况在数量上相差可达 3 个数量级, 随着能见度变化情况在数量上可达 2 个数量级, 而在传统的不考虑大气中悬浮粒子的散射情况下, 他们的数量差通常只差 1~2 个数量级。此外从图 5 中还可以看出, 由遥感器的视场瞬时立体角[即图 2 中的 (a) 区域]所决定的二次辐射通量的值随着  $S_M$  的减少而迅速增加, 与其余的辐射通量值相当, 这一结果说明。大气中的悬浮粒子对热红外辐射的散射对遥感器系统的能量平衡有重要的影响。根据计算结果粗略的估算, 大气中悬浮粒子对红外辐射散射的影响不小于 10%, 因此, 随着高精度热红外遥感的发展, 必须考虑大气中悬浮粒子的散射作用。

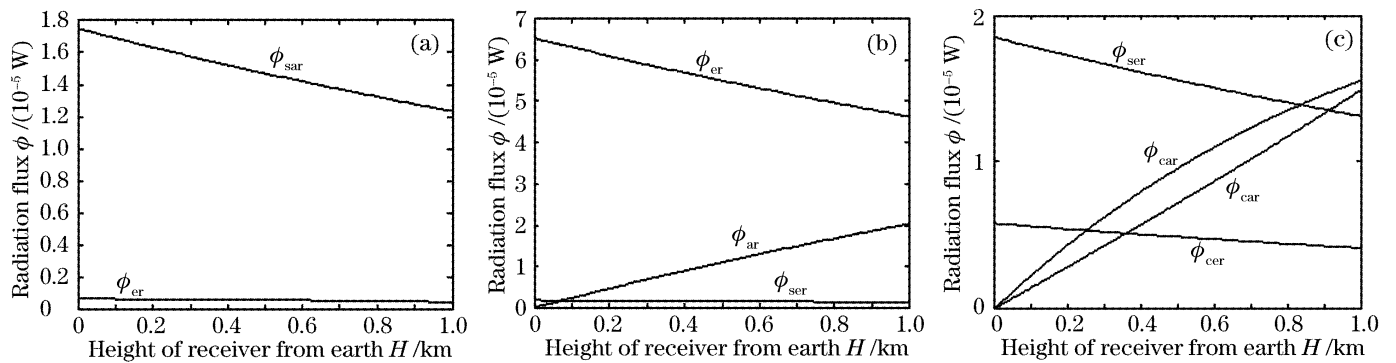


图 4 遥感器接收辐射通量随遥感器高度变化情况

Fig. 4 Radiation flux received by remote sensor versus height of sensor of atmosphere

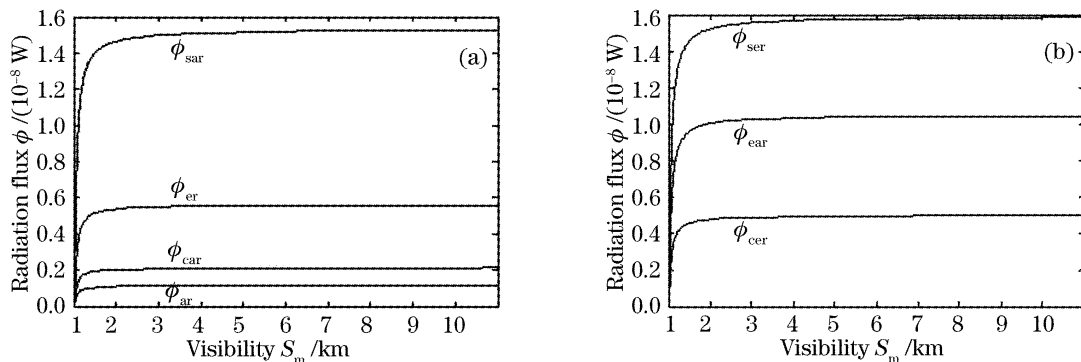


图 5 遥感器接收的辐射通量随大气能见度的变化情况

Fig. 5 Radiation flux versus visibility

参 考 文 献

1 C. Elachi. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* [M]. Wang Songgao, Hu Xiaoxin, Wang Weihe et al.

transl., Beijing: China Meteorological Press, 1995 (in Chinese)  
C. Elachi. 遥感的物理学和技术概论[M]. 王松皋, 胡筱欣, 王维和 等译. 北京: 气象出版社, 1995

- 2 Japanese Society of Remote Sensing Research ed.. *Refined Reading of Remote Sensing* [M]. Liu Yongwei, He Xuehong transl., Beijing: Survey Press, 1993 (in Chinese)  
遥感研究会编. 遥感精解[M].,刘勇卫,贺雪鸿译. 北京:测绘出版社, 1993
- 3 Li Xiaowen, Wang Junfa, Wang Jingdi *et al.*. *Multi-Angle and Thermal Infrared Remote Sensing of the Earth* [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)  
李小文,汪俊发,王锦地等. 多角度与热红外对地遥感[M]. 北京:科学出版社, 2001
- 4 Walter G. Egan. *Optical Remote Sensing-Science and Technology* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004
- 5 Li Xiaowen, Wang Jingdi. *Model of Optical Remote Sensing and Structure Parameterization for Vegetations* [M]. Beijing: Science Press, 1995 (in Chinese)  
李小文,王锦地. 植被光学遥感模型与植被结构参量化[M]. 北京:科学出版社, 1995
- 6 George J. Zissis. *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook* [M]. Vol. 1, Environmental Research Institute of Michigan, 1993
- 7 G. Asrar. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1989
- 8 A. Ishimaru. *Wave Propagation and Scattering in Random Media* [M]. California: Academic Press, Inc., 1978
- 9 Akira Ishimaru. *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1991
- 10 D. Deirmendjian. *Electromagnetic Scattering on Spherical Poly Dispersions* [M]. New York: Amer. Elsevier Publ. Comp., Inc., 1969
- 11 B. T. Krobrodoph, N. Sushit. *Infrared Thermal Imaging* [M]. 3rd Depart. of 3rd Academy of Astronautic Industry and No. 8358 Institute of China. Translated and Published by Tianjin, China, 1994 (in Chinese)  
B. T. 科洛勃罗多夫, N. 舒斯特. 红外热成像[M]. 航天工业总公司第三研究院三部、八三五八所联合翻译出版, 1994