

斜视角度下大气交叉辐射影响分析*

牛铮 朱重光 王长耀

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘要 大气交叉辐射影响是遥感数据中存在的大气影响的重要组成部分之一。多角度遥感是通过一定的观测角获取地面遥感数据,因而对斜视角度下大气交叉辐射影响的分析具有重要意义,这也是现有大气订正模型中较少涉及的部分。大气交叉辐射影响可以用点扩散函数表示,在频率域则可以用调制传递函数表示,因而通过对上述两个函数进行分析,可以掌握大气交叉辐射影响的特征,进而加以订正。通过分析发现,大气交叉辐射影响不仅与大气光学厚度、遥感图象分辨率等因子有关,而且与传感器观测角度有关,该文给出其解析表达式,并得出其变化规律。

关键词 多角度遥感, 大气交叉辐射影响, 点扩散函数, 调制传递函数

在对地光学遥感中,大气影响是妨碍遥感量化的关键因素之一,因而引起遥感学家的广泛重视。最近20年来,有很多研究者涉足这一领域,探讨大气对遥感图象的影响,并提出一系列的大气订正模型。这些工作均以辐射传输理论为基础,分别考虑大气中各种粒子,如大气分子和气溶胶,对辐射的影响,并假设大气粒子为平面平行分布,即表征大气粒子密度和吸收、散射特性的光学厚度仅随高度发生变化。由于辐射在大气下界与地表发生相互作用,因此遥感信号所受到的大气影响不仅与大气性质有关,而且与地表特性密切相关。在遥感图象大气影响的分析工作中,对地表特性的考虑主要划分为两种,即地表空间分布特性和地表方向反射特性。

早期的研究通常假设地表各点均一,且为朗伯反射,即地表反射率在空间和方向上是均匀分布的,不存在任何差别。这一假设可以在很大程度上简化大气影响分析理论和大气订正模型,并且在一定情况下,可以分析大气影响的主要趋势。但是当地表变化剧烈,且非朗伯特特性明显时,用这种假设得出的结果将存在较大的误差。70年代末以来,人们开始关注这一事实,并在两个方面取得了很大的进展。Tanre等人在不考虑地表变化的条件下,阐述了非朗伯反射地表情况下的大气影响理论^[1],并根据这一理论编制了5S软件系统,及其更新版本6S^[2]。利用这一系统,可以得到大气中辐射在任意方向上的分布。Kaufman及其合作者则在垂直观测假设下,推导了非均一地表条件下的大气影响

理论^[3],论述了传感器垂直观测时,来自背景的反射辐射的影响。并给出了订正这种影响的数学方法^[4]。

目前,对地表尤其是植被的BRDF特性的研究构成了光学遥感领域一个重要的发展方向——多角度遥感^[5]。在多角度遥感中,传感器以多个不同的角度观测地面,以获取地表的方向反射信息。随着多角度遥感走向实用化,迫切需要发展针对该成象条件下的大气影响理论和大气订正方法。以Tanre和Kaufman为代表的两种理论分别考虑了斜视均一地表和直视非均一地表两种情况,仅能部分地解决多角度遥感中存在的大气影响问题,而缺乏对斜视非均一地表条件下成象的大气影响进行订正的能力。该文即针对这一情况,对该条件下的大气影响,尤其是其核心问题——大气交叉辐射影响进行理论分析,并给出其订正方法。

1 大气交叉辐射影响

在对地多角度遥感过程中,传感器接收到的辐射亮度可以简要地分为3部分^[6]:

$$L(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) = L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) + L_0(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) + L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) \quad (1)$$

$\vec{\Omega}_0, \vec{\Omega}_s$ 分别表征太阳照射和传感器接收的方向, $L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 为经过大气衰减的来自被观测地物的辐射, $L_0(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 为被大气直接反射的程辐射, $L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 为来自背景地物的交叉辐射。

若不考虑大气中的漫射辐射,并设大气上界的太阳辐射通量为 I_0 ,大气总的光学厚度为 τ ,则

$$L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) = \mu_0 F_0 \rho_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) e^{-\tau_1(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_s})} \quad (2)$$

其中 μ_0, μ_s 分别为太阳和传感器方向天底角的余弦, $\rho_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 为所观测地物的二向反射分布函数。

$L_0(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 可以看作是当地表反照率为零时, 传感器接收到的辐射亮度。它只与大气状况有关, 而与地表反射特征无关。在大气模型已知的条件下, 利用现有的大气辐射传输计算软件, 可以精确求得程辐射的数值解。

对交叉辐射影响 $L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 的推导是根据辐射传输理论, 得到其解析表达式。为简化推导过程, 并考虑到 $L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 相对影响较小, 就采用了如下 3 个近似。首先, 忽略辐射传输过程中的多次散射效应, 即背景象元的反射辐射只经过一次散射就改变传输方向而被传感器接收; 其次, 只考虑大气中分子散射以及气溶胶散射和吸收对辐射的影响; 第三, 背景地物的反射辐射为朗伯辐射。定义 $\vec{r} = \vec{r}(x, y)$ 为背景地物 ($\vec{r}(0, 0)$ 表征被观测地物), $\rho_g(x, y)$ 为 \vec{r} 处背景地物反射率, 则大气下界背景地物在 $\vec{\Omega}$ 方向的反射辐射为:

$$L_g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \mu_0 F_0 \rho_g(x, y) e^{-\tau_1/\mu_0} \quad (3)$$

$L_g(\vec{r}, \vec{\Omega})$ 在大气处发生散射(图 1)而被位于 τ_2

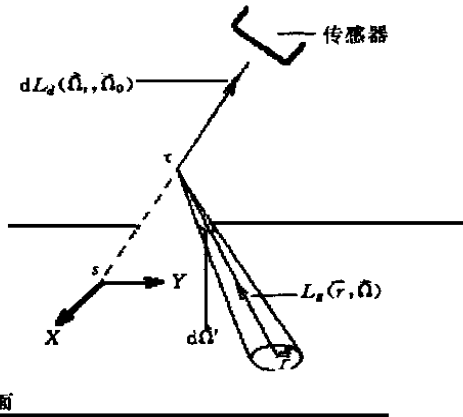


图 1 背景地物 \vec{r} 的反射辐射在 τ 处发生散射而被传感器接收示意图

Fig.1 Reflecting radiation from background \vec{r} is scattered at τ and received by the sensor

处(卫星遥感中 $\tau_2=0$)的传感器接收到的辐射亮度为:

$$dL_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) = L_g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}' e^{-(\tau_1-\tau)/\mu} \cdot \frac{\omega d\tau}{\mu} \cdot \frac{P(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega})}{4\pi} \cdot e^{-(\tau-\tau_2)/\mu_s} \quad (4)$$

其中 μ 为 $L_g(\vec{r}, \vec{\Omega})$ 传输方向天底角的余弦;

为归一化的散射相函数; $d\vec{\Omega}'$ 为散射点对地面 \vec{r} 处所张微分立体角; ω 为单次散射反照率, 即大气衰减(包括散射与吸收)过程中, 散射所占比例。方程(4)中, $L_g(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}' e^{-(\tau_1-\tau)/\mu}$ 表征发生散射时的入射辐射通量, $\frac{\omega d\tau}{\mu}$ 表征入射辐射发生散射的概率。考虑 $dx dy$ 为地表 \vec{r} 处的面积元, D 为从 \vec{r} 到散射点的距离, 有

$$d\vec{\Omega}' = dx dy / D^2 \quad (5)$$

又, 引入消光系数 $k(z)$, 存在

$$d\tau = k(z) dz \quad (6)$$

其中 $k(z) = \frac{\tau_1}{H_p} e^{-z/H_p}$, H_p 为大气标高。分别将方程(3)、(5)和(6)代入方程(4)中, 并对 dx 、 dy 和 dz 积分, 得:

$$L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) = \mu_0 F_0 \omega e^{-\tau_1/\mu_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_g(x, y) \cdot [1 - \delta(x, y)] \cdot \left[\int_0^{z_1} \frac{k(z)}{D^2} \cdot \frac{P(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega})}{4\pi} e^{-[(\tau_1-\tau)/\mu + (\tau-\tau_2)/\mu_s]} dz \right] dx dy \quad (7)$$

其中, $\delta(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| + |y| = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

方程(7)中, μ 、 D 以及与 $P(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega})$ 有关的散射角均为 x 、 y 和 z 的函数, 利用解析几何, 可以得到其表达式。 dz 的积分上限 z_1 为传感器的高度, 在卫星遥感中 $z_1 = \infty$ 。

为综合考虑 $L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 和 $L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 的影响, 略去方程(2)中反射率的方向表示, 并统一其下标(即将 $\rho_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 表示为 $\rho_g(0, 0)$), 进而得到

$$a(x, y) = \frac{L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) + L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)}{\mu_0 F_0 e^{-\tau_1(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_s})}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_g(x, y) p(x, y) dx dy \quad (8)$$

其中,

$$p(x, y) = \delta(x, y) + [1 - \delta(x, y)] \cdot \omega \cdot \left\{ \int_0^{z_1} \frac{k(z)}{D^2} \frac{P(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega})}{4\pi} \cdot e^{-[(\tau_1-\tau)(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_s}) - \tau_2/\mu_s]} dz \right\} \quad (9)$$

与地表状况无关, 被称之为大气点扩散函数。表征 $L_s(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 和 $L_d(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$ 综合影响的 $a(x, y)$ 可以根据遥感图象上的反射率和单独计算出的大气

程辐射求出,即参照方程(1)和(8), 得到

$$a(x, y) = \frac{L(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) - L_0(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)}{\mu_0 F_0 e^{-\tau_1(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_s})}}$$

$$= \left[\rho(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) - \frac{L_0(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)}{\mu_0 F_0} \right] / e^{-\tau_1(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_s})} \quad (10)$$

其中 $\rho(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) = L(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0) / (\mu_0 F_0)$ 即为含有大气影响的多角度遥感图象反射率。

2 大气点扩散函数(PSF)分析

大气点扩散函数描述了传感器所接收的辐射中, 被观测地物和背景地物的反射辐射的贡献, 是表征大气交叉辐射影响的重要因子。

计算大气点扩散函数时, 分别考虑分子散射影响, 以及气溶胶散射和吸收的影响, 得到分子点扩散函数和气溶胶点扩散函数, 然后相加, 得到总的大气点扩散函数。分子和气溶胶性质有很大的不同, 表 1 列出了方程(9)中所涉及的参量的取值。

表 1 分子和气溶胶各特征参量值(θ 为散射角)

Table 1 Molecule and aerosol characteristic parameters

	$\bar{\omega}$	H_p (km)	τ_1	τ_2 (假设为 大气上界)	$P(\vec{\Omega}_s, \vec{\Omega}_0)$
分子	1	8	τ_m	0	$\frac{3}{4} (1 + \cos^2\theta)$ (非偏振瑞利散射相函数)
气溶胶	0.9	1	τ_n	0	$(1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}$ (亨瑞-格林斯坦相函数, $g=0.75$)

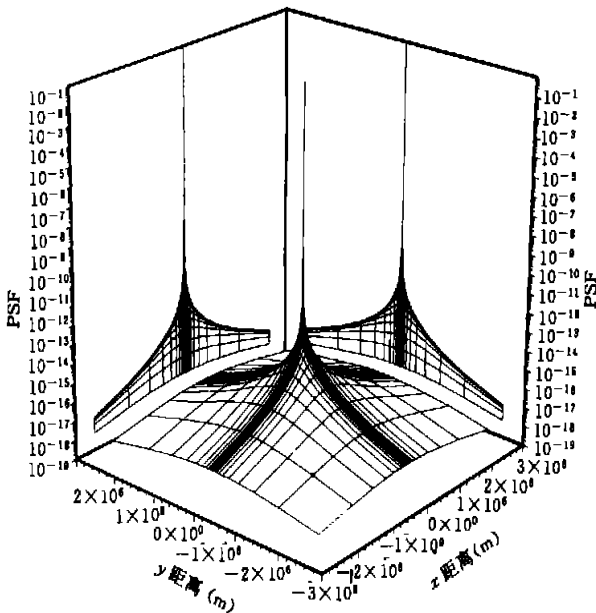


图 2 大气点扩散函数(PSF)三维示意图

图 2 绘出观测角为 0° 时的点扩散函数三维示意图。随着背景地物与被观测地物距离的增加, 其对传感器接收的辐射的贡献呈指数减小。

为了详细描述点扩散函数随气溶胶光学厚度、背景地物距离和观测角的变化规律, 绘制了图 3-5。

在图 3 中, 引入百分比 $\int_{|x|+|y|\neq 0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) \cdot dx dy$

$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy$ 表征均一地表条件下, 背景地物辐射在总接收辐射中所占的比例, 并绘出其随气溶胶光学厚度的变化规律。这一规律基本呈线性, 即随着气溶胶光学厚度的增大, 背景地物辐射所占的比例越大。当 $\tau_a = 0.6$ 时, 这一比例超过 50%。在极限情况下, 即当被观测地物反射率为 0, 背景地物反射率为 1 时, 传感器所接收的反射率超过 0.5 ($\tau_a = 0.6$ 时), 远远偏离真实地面情况 (反射率为 0)。

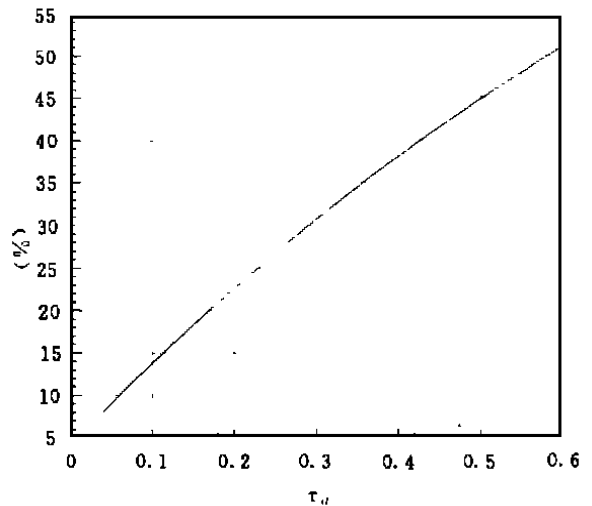


图 3 所接收辐射中, 背景辐射的成分比
 $\theta_s = 0, \tau_m = 0.02$

Fig.3 Percent of total background radiation

在图 4 中, 引入百分比 $\int_{|x|+|y|\neq 0}^r \int_{-r}^r p(x, y) dx dy$

$\int_{|x|+|y|\neq 0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy$ 表征在以 r 为半径的范围内的背景地物辐射在全部背景地物辐射中所占的百分比, 并绘出其随距离 r 变化的规律。这一比例从 0.1km 时的 20% 变化到 1km 时的 70%, 当 $r > 10$ km 时, 这一比例已经超过 90%, 在这种情况下, 对背景地物辐射影响的考虑可以限定

Fig.2 3-D atmospheric point spread function (PSF)

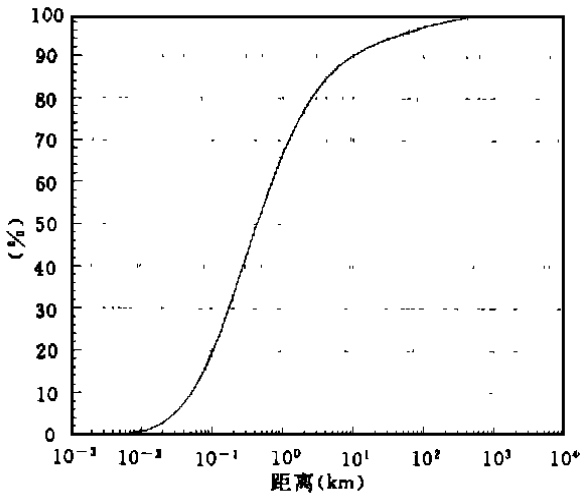


图4 一定距离范围内的背景辐射的百分比
 $\theta_s=0, \tau_a=0.2, \tau_m=0.02$

Fig.4 Percent of the background radiation within a definite distance in contrast to total back ground radiation

在10km 以内, 即忽略距被观测地物 10km 以外的背景地物的辐射影响。

在图5中, 引入比例 $\int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy$ 表征与传感器位于同一方向的背景地物与位于相对方向的背景地物辐射影响之比, 并绘出其随观测角度变化的规律。当正视时(即观测角为 0°), 点扩散函数是对称的, 上述比例等于1。在斜视状态下, 点扩散函数是不对称的, 通常位于相对方向的背景地物辐射影响较大,

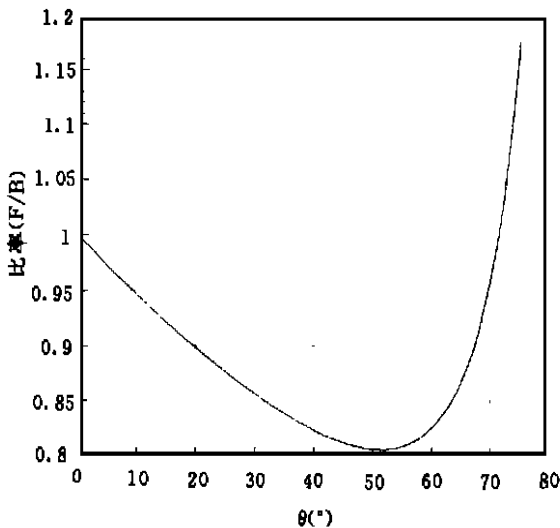


图5 斜视角度下, 点扩散函数不对称性

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Fig.5 The dissymetry of PSF in slant viewing angles

最大时(观测角约为 50°)可以相差 20%。根据图5, 可以较好地描述斜视角度下, 点扩散函数的不对称性及其变化的规律。

3 大气交叉辐射影响的订正

当遥感图象各点是在同一观测角度成象时, $p(x, y)$ 的函数形式在整幅图象上是一致的, 这时根据卷积定理, 即可得到无大气影响的地表反射率图象(参照方程(8))^[4]:

$$\rho_s(x, y) = F^{-1}\{F[a(x, y)]/F[p(x, y)]\} \quad (11)$$

符号 F 和 F^{-1} 分别为付里叶变换和付里叶逆变换符号。

在实际采用的多角度遥感系统中, 当遥感数据依赖于传感器在各角度之间转换而获取, 且视场角较小时, 上述订正理论可以直接应用, 如法国的 POLDER 数据^[7]。

在另一种情况下, 多角度遥感数据的获得依赖于大视场角成象, 如一些航空摄影数据, 图象各点观测角度是不同的, 造成以各点为中心的大气点扩散函数形式各异, 无法直接应用方程(11)对整幅图象进行运算。对此可以根据大气点扩散函数的影响范围, 将整幅图象划分成多个足够小的子区, 使子区内各点观测角度可以看成近似相等, 继而利用方程(11)分别对每个子区进行运算。鉴于将运算后的子区图象直接拼接会在边缘地区留有痕迹, 可以采取一种滑动平均的算法来消除这一影响。即根据子区大小确定一固定窗口, 对窗口内图象进行运算; 然后将窗口分别在 X 轴和 Y 轴上以一定步长移动, 每移动一次进行一次运算, 并且每个窗口内的图象与周围窗口图象有一定重叠; 最后将各窗口的运算结果进行拼接, 其中重叠区域以各次运算的平均值替代。

4 大气调制传递函数(MTF)分析

方程(11)中, $M(f_x, f_y) = F[p(x, y)]$ 被称为大气调制传递函数。它是点扩散函数在频率域中的表示形式, 从另一个侧面表征了大气交叉辐射影响, 并与大气交叉辐射影响的订正直接相关。

图6 绘出观测角度为 0° 时的归一化的调制传递函数 $M(f_x, f_y)/M(0, 0)$ 三维示意图。在低频区域, 调制传递函数较大; 相反, 在高频区域, 调制传递函数较小。比照方程(11)可知, 对大气交叉辐

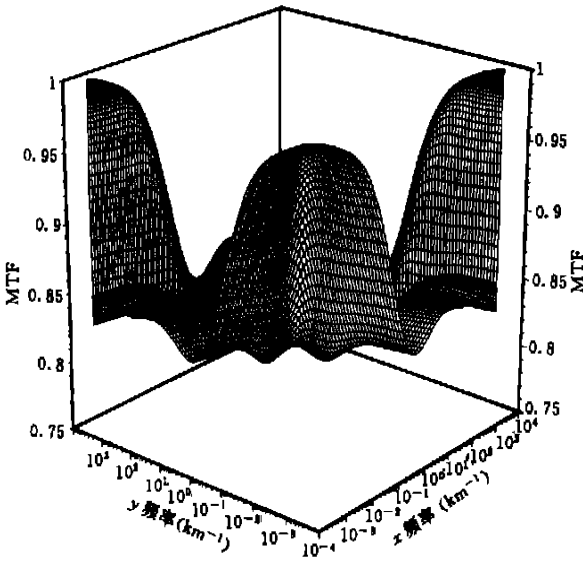


图 6 大气调制传递函数(MTF)三维示意图

$\theta_s=0, \tau_a=0.2, \tau_m=0.02$

Fig.6 3-D atmospheric modulation transfer function (MTF)

射影响的订正实际上是一个高通滤波过程，订正的图象将拥有较丰富的高频信息。

图 7 绘制了 3 种气溶胶光学厚度下的归一化的调制传递函数。在低频区域，调制传递函数基本与气溶胶光学厚度无关；在高频区域，调制传递函数差别较大，光学厚度越大，调制传递函数越小。此外，从图 7 中还可以看出，调制传递函数在 0.15-15 (km^{-1}) 频率范围内变化最剧烈，说明这一频率范围的大气交叉辐射影响的变化最大。

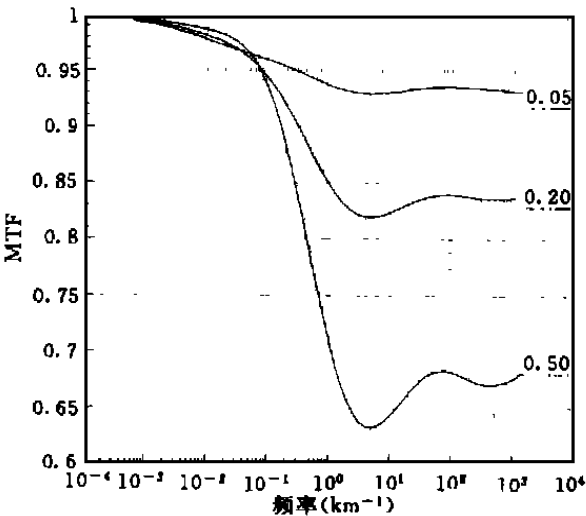


图 7 三种气溶胶光学厚度下的调制传递函数

$\theta_s=0, \tau_m=0.02$

Fig.7 MTF under three kinds of aerosol optical depth

递函数。其变化规律与图 7 类似，即观测角越大，调制传递函数在高频区域越小。这一规律说明，在较大观测角度下，大气交叉辐射影响较大。比较图 8 (a) 和(b)，还可看出，与观测角的总体影响相比，调制传递函数的三维不对称性并不明显。

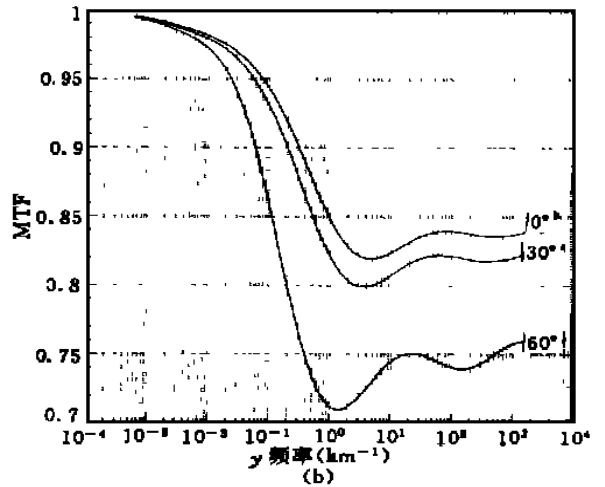
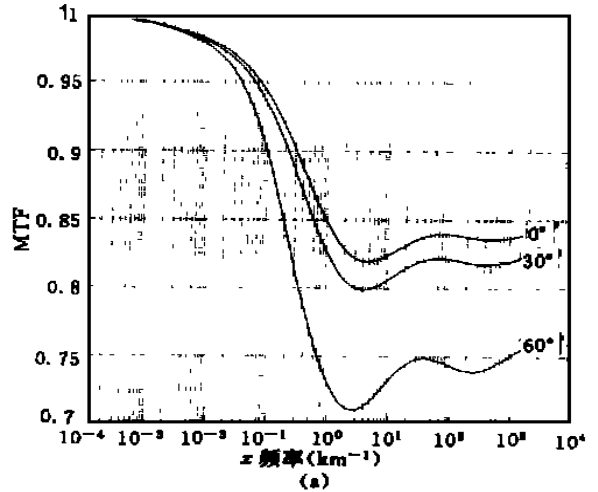


图 8 3 种观测角度下的调制传递函数

$\tau_a=0.2, \tau_m=0.02$

Fig.8 MTF in three scan angles

5 结 论

Kaufman 曾对目前的光学遥感数据的大气订正问题作过较详细的综述^[8]，一些研究者还利用各种订正模型对运行中的传感器所获取的图象，如 Landsat/TM 和 NOAA/AVHRR，进行了实际的订正^[9,10]。随着对地观测系统(EOS)计划的实施，各种多角度传感器即将投入运行，因而迫切需要针对多角度遥感数据的大气订正理论，而对斜视角度

图 8 绘制了 3 种观测角度下的归一化的调制传

下大气交叉辐射影响的分析正是这一理论的核心之一。

对大气交叉辐射影响的订正实际上是恢复原始影像中被抑制的高频信息。当大气光学厚度较大时,大气交叉辐射影响将较大,通常不能忽略这一影响。遥感图象是对连续地表的间隔采样,采样密度越大,即图象的空间分辨率越大,图象中的高频信息越丰富,大气交叉辐射影响就越大。因此对高空分辨率的图象,尤其要对这一影响进行订正。当传感器以一定角度对地表成像时,大气交叉辐射影响将比垂直观测成像状态更大,而且当观测角度不一样时,影响也不一样,所以应该分别对各角度的图象进行订正。

该文在单次散射近似的简化条件下,给出了斜视角度下的大气交叉辐射影响的理论表达和趋势分析,今后将考虑从增加多次散射影响的角度着手,丰富这一理论。此外,引入一定的大气模型,并完整地考虑包括程辐射在内的总的大气影响,也将是未来工作的重点。随着多角度遥感的实用化,一些理论简化、使用方便的大气订正模型也是必不可少的。

参 考 文 献

- [1] Tanre, D. *et al.* · Atmospheric Modeling for Space Measurements of Ground Reflectances, including Bidirectional Properties. *Appl. Opt.*, 1979, **18**, 3587—3594.
- [2] Vermote, E. *et al.* · Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). *User Guide Version 0*. 1994.

- [3] Kaufman, Y. J. · Effect of the Earth's Atmosphere on the Contrast for Zenith Observations. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**, 3165.
- [4] Kaufman, Y. J. · Solution of the Equation of Radiative Transfer for Remote Sensing over Nonuniform Surface Reflectivity. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**, 4137—4147.
- [5] Goel, N. S. · Model of Vegetation Canopy Reflectance and Their Use in Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. *Remote Sens. Rev.*, 1988, **4**, 1—212.
- [6] Liang, S. · Strahler, A. H. · Retrieval of Surface BRDF from Multi-angle, Remotely Sensed Data. *Remote Sens. Environ.*, 1994, **50**, 18—30.
- [7] Deuze, J. L. *et al.* · Analysis of the POLDER (POLARization and Directionality of Earth's Reflectances) airborne Instrument Observations over Land Surfaces. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **45**, 137—154.
- [8] Kaufman, Y. J. · The Atmospheric Effect on Remote Sensing and its Correction. in *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), 1989, 336—428.
- [9] Conel, J. E. · Determination of Surface Reflectance and Estimates of Atmospheric Optical Depth and Single Scattering Albedo from Landsat Thematic Mapper data. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, **11**, 783—828.
- [10] 秦 益, 田国良. NOAA—AVHRR 图像大气影响校正方法研究及软件研制, 环境遥感 1994, **9**, 81—91.

作 者 简 介

牛 铮, 男, 1965 年 10 月生, 助研。1988 年获北京大学地球物理系天体物理专业学士学位, 1991 年获北京大学遥感与 GIS 研究所地图学与遥感专业硕士学位, 1996 年获中国科学院地理研究所自然地理专业博士学位。目前从事的研究主要集中在遥感成像机理、植被遥感监测等领域。迄今已发表论文 10 余篇。

Analysis of Atmospheric Cross Radiation in a Slant Viewing Angle

Niu Zheng Zhu Chongguang Wang Changyao

(Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101)

Abstract Cross radiation is an important part of atmospheric effect in remote sensing data. The analysis of its effect in a slant viewing angle is significant, especially to the multi-angle remote sensing which obtain surface data through several scan angles. This is also the domain rarely mentioned in the existing atmospheric correction models. Atmospheric cross radiation effect can be described by the point spread function (PSF), whereas by the modulation transfer function (MTF) in the frequency domain. We can specify and correct that effect by analysing those two functions. In our research, we discover that the cross radiation is related not only to the atmospheric optical depth and image resolution, but also to the scan angle. This paper provides its analytical expression and concludes some regularities.

Key words Multi-angle remote sensing, Atmospheric cross radiation effect, PSF, MTF