

· 光电子学工程与应用 ·

## 基于大地坐标系的球面大气辐射传输模型

杨春平<sup>1</sup>, 马小莉<sup>1</sup>, 郭晶<sup>1</sup>, 敖明武<sup>1</sup>, 叶玉堂<sup>1</sup>, 曲兆俊<sup>2</sup>, 徐振亚<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 中国空空导弹研究院 河南 洛阳 471099)

**【摘要】**为了解决大地坐标系中的大气辐射传输计算问题,提出了TOG模型。首先,建立了球面大气模型,依据目标和观察者的大地坐标、观察日期和时间给出了观察天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角的计算方法。然后,提出了分层迭代算法计算球面大气中的物质吸收量。采用孤立层和累加法解算了球面大气的上行辐射亮度。利用TOG模型计算分析了两个红外波段内大气的辐射传输特性,并使用MODIS的测量结果对TOG模型进行了校验,结果表明相对差异小于5%。

**关键词** 大地坐标; 分层迭代算法; 模型校验; 辐射传输; 球面大气

**中图分类号** TN201; P4

**文献标志码** A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.03.024

## Atmospheric Radiative Transfer Model for Spherical Atmosphere in Geodetic Coordinate System

YANG Chun-ping<sup>1</sup>, MA Xiao-li<sup>1</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, AO Ming-wu<sup>1</sup>, YE Yu-tang<sup>1</sup>, QU Zhao-jun<sup>2</sup>, and XU Zhen-ya<sup>2</sup>

(1. School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. China Airborne Missile Academy Luoyang Henan 471099)

**Abstract** Base on the geodetic coordinate system, a model from a target to an observer (TOG) is proposed to calculate the properties of atmospheric radiative transfer. Firstly, a spherical atmosphere model is established, and the calculation methods for zenith and azimuth angles of both observer and solar are presented according to their geodetic coordinates, observation date and time. Secondly, a layered iterative algorithm is proposed to calculate absorber amount in spherical atmosphere, and the isolated layer and adding methods are employed to compute upward radiance in spherical atmosphere. Finally, the atmospheric radiation properties in two infrared bands are investigated by the TOG model. The TOG model is validated by moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) measurements with a relative difference less than 5%.

**Key words** geodetic coordinate; layered iterative algorithm; model validation; radiative transfer; spherical atmosphere

随着遥感技术和红外探测器件的飞速发展,开展红外光谱区内的大气辐射传输特性研究对于卫星遥感、目标探测、大气反演以及光通信等领域具有非常重要的意义<sup>[1-4]</sup>。因为红外辐射信号在大气中传输时,会受到大气分子、气溶胶和云的吸收与散射而产生衰减,同时大气介质对太阳辐射的散射以及自身辐射又构成了大气的背景辐射,影响目标与背景的红外对比度<sup>[5]</sup>。

众所周知,大地坐标系是遥感与探测领域中最方便使用的坐标系,并且已得到了广泛应用。但是,目前的大气辐射传输模型都无法解决大地坐标系中的辐射传输计算问题,如LOWTRAN/MODTRAN、

FASCODE、6S、ATCOR等<sup>[5-9]</sup>。以MODTRAN为例:

1) 目标经纬度和观察者经纬度仅能输入其一,观察者的最大高度为100 km,但星载探测器的高度远大于100 km; 2) 观察天顶角和相对方位角被作为输入参数,但通常这些角度参数无法直接获取,需要依据目标、观察者以及太阳的位置关系计算得到。此外还存在其他问题: 1) 使用平面平行大气模型假设,这是一种简化处理方法,显然与大气实际情况存在差异; 2) 当某种分子在某波数处的尾翼吸收很弱时,会直接忽略该处的尾翼吸收贡献,对最终结果带来误差; 3) 计算卷云条件下的大气辐射亮度时会出现周期性起伏的异常情况。综上所述的诸多问

收稿日期: 2014-10-31; 修回日期: 2015-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(11173008); 航空科学基金(20140180002)

作者简介: 杨春平(1966-),男,副教授,主要从事激光技术应用与大气光学方面的研究。

题给大地坐标系中的目标遥感与探测、大气效应评估及大气辐射校正带来了很大的困难,建立适用于大地坐标系的大气辐射传输模型势在必行。然而,目前国内外未见有开展此工作的相关报道。

因此,本文提出了大地坐标系的大气辐射传输模型(简称TOG模型)。首先,建立了球面大气模型,依据目标和观察者的空间坐标、观察日期和时间给出了观察天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角的计算方法。然后,提出了分层迭代算法解决球面大气中的物质吸收量计算问题,并利用孤立层和累加法解算了球面大气的上行辐射亮度。使用TOG模型计算分析了两个红外波段内大气的辐射传输特性。最后,利用MODIS的测量结果对TOG模型进行了校验,结果表明TOG模型具有较高的计算精度。

## 1 角度参数计算模块

在TOG模型中,目标高度的范围是0~100 km,观察者高度的最大值增加至36 000 km,覆盖了地球观测卫星和同步卫星的运行高度。角度参数和辐射传输计算均是在空间直角坐标系中进行的。

首先,将大地坐标转换到空间直角坐标,有:

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $B$ 、 $L$ 、 $H$  是某点的纬度、经度和高度; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  是其对应的空间直角坐标; $N = a / (1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}$ ,  $e = (a^2 - b^2)^{1/2} / a$ ,  $a$ 、 $b$  分别是地球椭球的长半轴和短半轴。

然后,以地球球心为原点建立空间直角坐标系  $XYZ$ ,  $XOY$  位于赤道面上,目标点  $T$  和观察点  $S$  的大地坐标分别是  $(B_T, L_T, H_T)$  和  $(B_S, L_S, H_S)$ , 对应的空间直角坐标分别是  $(X_T, Y_T, Z_T)$  和  $(X_S, Y_S, Z_S)$ 。  $M$  点为视线路径  $TS$  与大气顶  $TOA$  的交点,  $M$  点处的观察天顶角为  $\theta$ 。再以  $M$  点为原点建立地平坐标系  $X'Y'Z'$ ,  $X'MY'$  为切平面,  $N$  代表正北方向,  $E$  代表正东方向。点  $S$  在  $X'MY'$  面内的投影点  $S'$  的空间直

角坐标为  $(X_{S'}, Y_{S'}, Z_{S'})$ , 观察方位角为  $\psi$ ,  $\psi'$  是辅助参数,用来确定辐射传输计算中的  $\psi$  值,如图1所示。

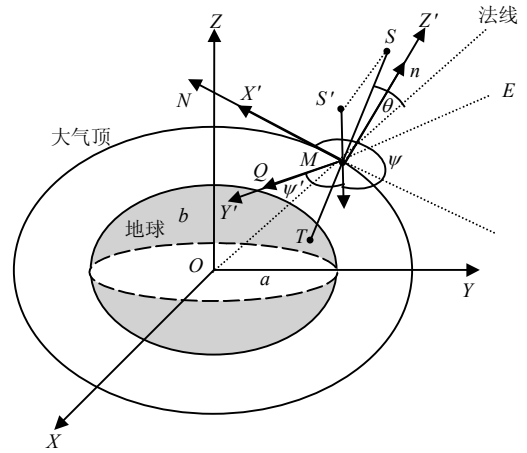


图1 角度参数计算方法的示意图

$TS$  的方向向量是  $(X_S - X_T, Y_S - Y_T, Z_S - Z_T)$ ,  $M$  点的空间直角坐标  $(X_M, Y_M, Z_M)$  同时满足空间直线  $ES$  和  $TOA$  椭球, 则有:

$$\begin{cases} X_M = X_T + (X_S - X_T)t \\ Y_M = Y_T + (Y_S - Y_T)t \\ Z_M = Z_T + (Z_S - Z_T)t \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{X_M^2 + Y_M^2}{(a+h)^2} + \frac{Z_M^2}{(b+h)^2} = 1 \quad (3)$$

式中,  $t$  是参数;  $h$  是大气顶高度。联立式(2)和式(3)可得  $t$  的解为:

$$t = [-B_1 + (B_1^2 - 4A_1C_1)^{1/2}] / 2A_1 \quad (4)$$

$$\begin{cases} A_1 = (b+h)^2 [(X_S - X_T)^2 + (Y_S - Y_T)^2 + (a+h)^2 (Z_S - Z_T)^2] \\ B_1 = (b+h)^2 [2X_T(X_S - X_T) + 2Y_T(Y_S - Y_T) + (a+h)^2 2Z_T(Z_S - Z_T)] \\ C_1 = (b+h)^2 (X_T^2 + Y_T^2) + (a+h)^2 Z_T^2 - (a+h)^2 (b+h)^2 \end{cases} \quad (5)$$

则  $M$  点的空间直角坐标可将  $t$  参数代入式(2)即可, 然后计算观察天顶角与方位角。  $M$  点处的观察天顶角  $\theta$  和方位角  $\psi$  分别为:

$$\theta = \frac{\overline{TS} \cdot \overline{OM}}{|\overline{TS}| \cdot |\overline{OM}|} = \arccos \frac{(X_S - X_T)X_M + (Y_S - Y_T)Y_M + (Z_S - Z_T)Z_M}{[(X_S - X_T)^2 + (Y_S - Y_T)^2 + (Z_S - Z_T)^2]^{1/2} (X_M^2 + Y_M^2 + Z_M^2)^{1/2}} \quad (6)$$

$$\psi = \frac{\overline{MN} \cdot \overline{S'M}}{|\overline{MN}| \cdot |\overline{S'M}|} = \arccos \frac{-X_M(X_M - X_{S'}) - Y_M(Y_M - Y_{S'}) + (Z_N - Z_M)(Z_M - Z_{S'})}{[X_M^2 + Y_M^2 + (Z_N - Z_M)^2]^{1/2} [(X_M - X_{S'})^2 + (Y_M - Y_{S'})^2 + (Z_M - Z_{S'})^2]^{1/2}} \quad (7)$$

在观察方位角判断中,需要引入辅助角度。 $MQ$

的方向向量为:

$$\overline{MQ} = \vec{n} \times \overline{MN} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ n_1 & n_2 & n_3 \\ -X_M & -Y_M & Z_N - Z_M \end{vmatrix} \quad (8)$$

令  $\begin{cases} A_2 = (Z_N - Z_M)n_2 + Y_M n_3 \\ B_2 = -X_M n_3 - (Z_N - Z_M)n_1 \\ C_2 = -Y_M n_1 + X_M n_2 \end{cases}$ , 则  $\overline{S'M}$  与  $\overline{MQ}$  ( $\overline{MY'}$ ) 之间的夹角  $\psi'$  为:

$$\psi' = \frac{\overline{S'M} \cdot \overline{MQ}}{|\overline{S'M}| \cdot |\overline{MQ}|} = \arccos \frac{(X_M - X_{S'})A_2 + (Y_M - Y_{S'})B_2 + (Z_M - Z_{S'})C_2}{[(X_M - X_{S'})^2 + (Y_M - Y_{S'})^2 + (Z_M - Z_{S'})^2]^{1/2} (A_2^2 + B_2^2 + C_2^2)^{1/2}} \quad (9)$$

辐射传输计算中的方位角以正北为起点, 向东为正, 取值范围  $0 \sim 360^\circ$ 。因此  $\overline{S'M}$  与  $\overline{MN}$  ( $\overline{MX'}$ ) 的夹角应为: 当  $\psi > 90^\circ$  或  $\psi < 90^\circ$  且  $\psi' < 90^\circ$  时,  $\psi = 360^\circ - \psi'$ ; 当  $\psi > 90^\circ$  或  $\psi < 90^\circ$  且  $\psi' > 90^\circ$  时,  $\psi = \psi'$ 。

最后, 计算太阳天顶角与方位角。通过观察日期和时间(年-月-日和时-分-秒), 太阳赤纬角为<sup>[9]</sup>:

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \alpha + 0.1149 \sin 2\alpha - 0.1712 \sin 3\alpha - 0.7580 \cos \alpha + 0.3656 \cos 2\alpha + 0.0201 \cos 3\alpha \quad (10)$$

式中,  $\alpha = 360t/365.2422$ ;  $t = n - 1 - n_0$ ,  $n$  是年积日,  $n_0$  可表示为:

$$n_0 = 78.801 + 0.2422(\text{year} - 1969) - \text{INT}[(\text{year} - 1969)/4] \quad (11)$$

式中, INT是整数函数。太阳时角  $\omega = (t_s - 12) \times 15$ ,  $t_s$  是UTC时间。则M点处的太阳高角  $\beta_M$  为:

$$\beta_M = \arcsin(\sin B_M \sin \delta + \cos B_M \cos \delta \cos \omega)$$

于是, M点处的太阳天顶角  $\theta_0 = \pi/2 - \beta_M$ , M点处的太阳方位角  $\psi_0$  为:

$$\psi_0 = \arccos \frac{\sin \alpha \sin B_M - \sin \delta}{\cos \alpha \cos B_M} \quad (12)$$

利用Snell定律沿视线路径逐层进行光线追迹, 即可得到各层大气边界上的观察天顶角与方位角、太阳天顶角与方位角<sup>[10-11]</sup>。

## 2 辐射传输计算模块

不同于MODTRAN等使用的平面平行大气模型, TOG模型使用了球面大气模型, 因此提出了分层迭代算法解决球面大气中的物质吸收量计算问题, 该算法对中低层大气和高层大气可分别提高约6%和3%的计算精度。分层迭代算法的过程为: 首先将大气进行分层, 得到每层大气的底部高度  $z_{\text{bot}}$  和顶部高度  $z_{\text{top}}$ , 再对每一层大气细分层, 层内可得到一系列新高度  $z_1, z_2, \dots, z_N$ , 新高度处的大气廓线可利用插值算法得到。然后, 设置微分步长  $ds$ , 从  $z_{\text{bot}}$  开始迭代, 每次迭代后得到微分高度增量

$dz_i = \cos \theta_{i-1} ds$  以及新高度  $z_i = z_{i-1} + dz_i$ ,  $i$  是序号,  $\theta$  是天顶角。每次迭代后比较  $z_i$  与  $z_{\text{top}}$ , 若  $z_i < z_{\text{top}}$ , 说明视线路径仍在本层大气内, 迭代过程继续进行; 若  $z_i \geq z_{\text{top}}$ , 迭代停止并统计迭代次数, 以完成该层内的物质吸收量计算。分层迭代算法的计算流程如图2所示。

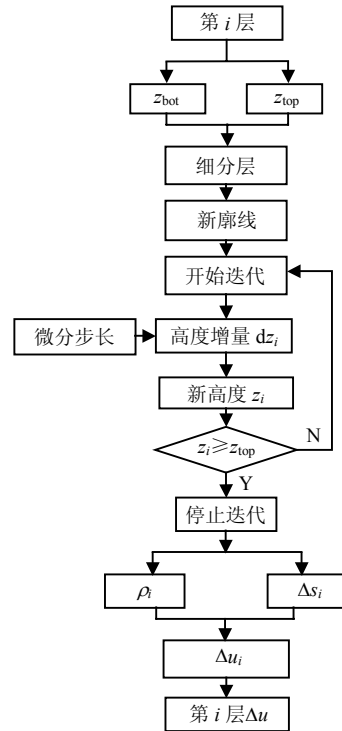


图2 分层迭代算法的计算流程

每层球面大气内的物质吸收量为:

$$\Delta u = \sum_{i=1}^{N-1} \rho_i \Delta s_i \quad (13)$$

$$\Delta s_i = 1/2 \left[ \left( 1 + \frac{r_{i-1}}{[(dn/dr)_{|i-1}]/n(z_{i-1})]} \sin^2 \theta_{i-1} \right)^{-1} + \left( 1 + \frac{r_i}{[(dn/dr)_{|i}]/n(z_i)} \sin^2 \theta_i \right)^{-1} \right] (r_{i-1} \cos \theta_{i-1} + r_i \cos \theta_i) \quad (14)$$

式中,  $\Delta u$  是物质吸收量;  $\rho$  是分子密度;  $\Delta z_i$  是  $z_{i+1}$

和  $z_i$  之间的高度差;  $r$  是路径上一点到地球中心的距离;  $n$  是大气折射率函数。

TOG模型中的大气分子参数数据库是基于最新的HITRAN2008光谱数据库建立的<sup>[10]</sup>, 气溶胶和云参数数据库、太阳光谱辐照度数据库是基于文献[16-19]的研究成果建立的, 光谱分辨率均为  $1 \text{ cm}^{-1}$ 。综合考虑计算精度和计算速度需求, TOG模型使用了带模式算法计算大气透过率, 包括了  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{HNO}_3$  等12种大气分子的贡献。对于每一种大气分子, 吸收透过率可表示为<sup>[8-9]</sup>:

$$t_{\text{abs}} = (1 - \langle W_{\text{sl}} \rangle / \Delta \nu)^{\langle n \rangle} \exp[-\sum_l (C)_l (\Delta u)_l] \quad (15)$$

式中,  $\langle W_{\text{sl}} \rangle$  是Voigt等效宽度;  $\Delta \nu$  是光谱间隔,  $\langle n \rangle$  的路径平均有效线数,  $\langle n \rangle = \Delta \nu \langle 1/d \rangle$ ;  $l$  是大气层数;  $C$  是尾翼吸收系数, 表示某一光谱间隔前后  $\pm 25 \text{ cm}^{-1}$  内的谱线贡献, 将Lorentz线型在此光谱间隔内进行积分即可, TOG对12种大气分子的尾翼贡献都进行了逐波数计算, 未做任何忽略。最后, 大气的总透过率为:

$$t_{\text{tot}} = \prod_{i=1}^{12} t_{\text{abs}}(k) t_{\text{sca}} t_{\text{cont1}} t_{\text{cont2}} t_a t_c \quad (16)$$

式中,  $t_{\text{sca}}$  是分子的散射透过率;  $t_{\text{cont1}}$  和  $t_{\text{cont2}}$  分别是水汽和氮气的连续吸收透过率;  $t_a$  和  $t_c$  分别是气溶胶和云的透过率。

星载探测器接收的是大气顶部的上行辐射亮度 ( $\tau = 0$ ), 则基于输运理论可针对球面大气建立如下形式的辐射传输方程<sup>[13]</sup>:

$$I(m) = I_b(\tau^*, \mu(m), \psi) e^{-(\tau^* - \tau)} + \int_{\tau}^{\tau^*} J(\tau', \mu(m), \psi) e^{-(\tau' - \tau)} d\tau' \quad (17)$$

式中,  $m$  是层数序号;  $\tau^*$  是层内光学厚度;  $I_b$  是从该层下边界的上行辐射亮度;  $J$  是包含了单次散射、多次散射和热辐射的辐射源函数项, 有:

$$J(\tau', \mu(m), \psi) = \frac{\omega_0(\tau')}{4\pi} \pi F_0 e^{-\tau'/\mu_0(m)} P + \frac{\omega_0(\tau')}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 I(\tau', \mu'(m), \psi') P d\mu' d\psi' + [1 - \omega_0(\tau')] B[T(\tau')] \quad (18)$$

式中,  $\omega_0$  是单次散射反照率;  $\pi F_0$  大气顶处的太阳光谱辐照度;  $P$  是散射相函数;  $B$  是Planck函数;  $T$  是大气温度。利用孤立层 ( $I_b = 0$ ) 和累加法可得到由各层球面大气贡献的上行辐射亮度为:

$$I_{\text{tot}} = \sum_{m=1}^l [I(m) \prod_{j=m+1}^l t_{\text{tot}}(j)] + \frac{(1 - r_s)}{\pi} B(T_g) \prod_{j=1}^l t_{\text{tot}}(j) \quad (19)$$

式中, 第一项代表大气程辐射; 第二项代表地表发射;  $r_s$  是地表反照率;  $T_g$  是地表温度。

### 3 计算结果与分析

TOG模型提供了6种典型大气模式, 包括中纬度夏季/冬季、亚北极夏季/冬季、美国76标准大气和热带。另外, 也可使用自定义的大气廓线。研究中选取了遥感与探测领域中两个重要的红外波段 (2 000~3 000和3 000~4 000  $\text{cm}^{-1}$ , 以下简称波段1和波段2)。利用TOG模型计算分析了UTC时间从0~24时两个红外波段内积分亮度的变化情况, 如图3所示。计算条件为中纬度夏季大气模式, 乡村气溶胶VIS=5 km, 2014-06-30, 目标和观察者的大地坐标分别为(40°N, 110°E, 1)和(50°N, 120°E, 300)。

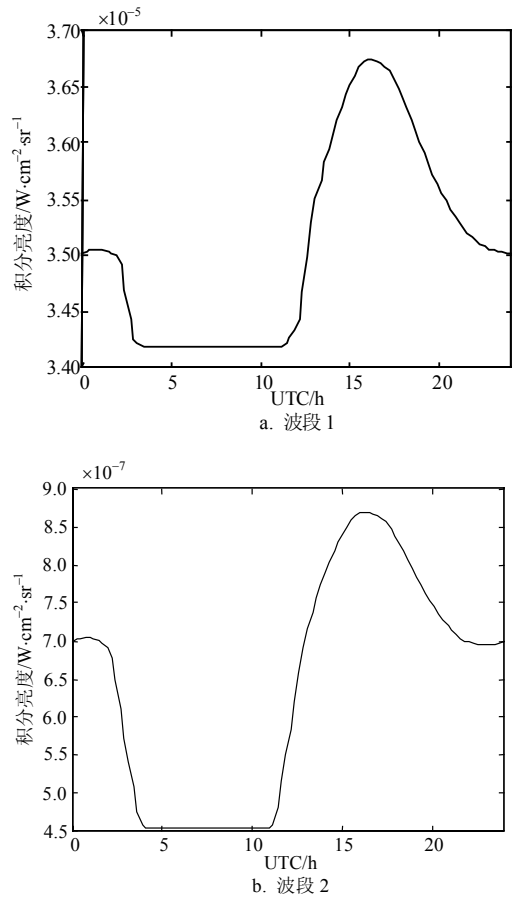


图3 UTC变化对积分亮度的影响

从图3可以看出, 当UTC时间从0~4时, 两个红外波段内的积分亮度都会先缓慢增大再逐渐减小, 因为散射辐射亮度占总辐射亮度的权重有着相同的变化趋势。当UTC时间从4~11时, 积分亮度减小至

最小值并且保持不变, 这是由于此时段内的太阳辐射无法照射到视线路径上(视线路径处于地球的阴影面里), 故散射辐射亮度为零, 大气总辐射亮度仅由热辐射亮度贡献。在两个红外波段内积分亮度的最小值分别为 $3.42 \times 10^{-5}$ 和 $4.54 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。当UTC时间继续增加时, 太阳辐射再次照射到视线路径上, 散射辐射亮度重新开始其贡献, 造成积分亮度的逐渐增加。当UTC=16时积分亮度达到最大值, 在两个红外波段内积分亮度的最大值分别为 $3.68 \times 10^{-5}$ 和 $8.68 \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。此后, 积分亮度随UTC时间增

加而逐渐减小, 积分亮度随UTC时间在0~24内形成了一个变化周期。在两个红外波段内积分亮度最小值和最大值的相对差异分别为7.60%和91.19%。因此, 波段2对UTC时间变化非常敏感, 利用该波段进行目标探测时需要特别注意UTC时间的影响。

利用TOG模型计算分析了波段2内不同云种类条件下大气积分亮度, 如表1所示。计算条件为美国76标准大气, 乡村气溶胶 VIS=23 km, 观察日期和时间为2014-07-19, 15:00:00, 目标和观察者的大地坐标分别为(42°N, 53°E, 0)和(40°N, 50°E, 400)。

表1 不同云种类对大气积分亮度的影响

云种类	无云	积云	高层云	层云	层积云	乱层云	标准卷云	薄卷云
积分亮度/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	$2.69 \times 10^{-8}$	$6.00 \times 10^{-8}$	$7.16 \times 10^{-8}$	$3.14 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^{-8}$	$2.91 \times 10^{-8}$	$1.58 \times 10^{-7}$	$8.52 \times 10^{-8}$

表1表明, 云对太阳的散射辐射和自身辐射会使积分亮度明显增大, 分别存在上述7种云时的积分亮度可达无云时的2.23、2.66、1.17、1.52、1.08、5.87和3.17倍。其中, 标准卷云和薄卷云对积分亮度的影响很大, 由于卷云是高云(冰云), 具有很强的散射能力, 且所处高度较高(一般在约10 km), 其散射和辐射则会比低云更少的被大气所衰减。低云(水云)对积分亮度的影响相对较小, 且所处高度一般位于3 km以下。因此, 在目标探测时, 需要根据实际情况选择合适的云种类进行大气背景辐射亮度预估, 从而增加探测成功率。

中分辨率成像光谱仪MODIS是地球大气遥感

探测的重要仪器, 本文选取了其5个红外光谱通道内的测量数据进行了模型校验, 分别是第20(3.660~3.840  $\mu\text{m}$ )、第21和22(3.929~3.989  $\mu\text{m}$ )、第23(4.020~4.080  $\mu\text{m}$ )、第24(4.433~4.498  $\mu\text{m}$ )和第25(4.482~4.549  $\mu\text{m}$ )通道。数据拍摄于中国境内, 纬度范围30°~50°N, 经度范围95°~125°E, 拍摄日期和时间为2014-08-14, 03:40:00, 像元1、2、3的地物类型分别为沙漠、海洋和植被。依据MODIS记录的大地坐标、地表温度及大气廓线等数据, 利用TOG模型计算了对应像元上的辐射亮度, 对比结果如表2所示。

表2 TOG模型计算值与MODIS测量值对比

MODIS通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	像元1/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$		像元2/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$		像元3/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$	
		计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值
20	3.750	$2.01 \times 10^{-7}$	$2.10 \times 10^{-7}$	$5.56 \times 10^{-8}$	$5.79 \times 10^{-8}$	$7.23 \times 10^{-8}$	$7.55 \times 10^{-8}$
21(22)	3.959	$2.57 \times 10^{-7}$	$2.67 \times 10^{-7}$	$8.61 \times 10^{-8}$	$8.90 \times 10^{-8}$	$1.13 \times 10^{-7}$	$1.17 \times 10^{-7}$
23	4.050	$2.48 \times 10^{-7}$	$2.58 \times 10^{-7}$	$8.87 \times 10^{-8}$	$9.19 \times 10^{-8}$	$1.19 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-7}$
24	4.465	$4.78 \times 10^{-8}$	$4.94 \times 10^{-8}$	$2.79 \times 10^{-8}$	$2.89 \times 10^{-8}$	$3.98 \times 10^{-8}$	$4.12 \times 10^{-8}$
25	4.515	$1.95 \times 10^{-7}$	$2.02 \times 10^{-7}$	$9.00 \times 10^{-8}$	$9.30 \times 10^{-8}$	$1.20 \times 10^{-7}$	$1.24 \times 10^{-7}$

表2表明, TOG模型计算值与MODIS测量值符合的很好, 相对差异小于5%, 校验结果表明TOG模型具有很高的计算精度。造成差异的主要原因包括: 1) 选取了地物的典型反照率数值, 可能与实际情况存在一些差异; 2) 实际测量中存在一定的噪声影响。

#### 4 结束语

本文提出的TOG模型较好地解决了大地坐标系中的大气辐射传输计算问题。不同于平面平行大气模型, TOG模型使用了球面大气模型, 使用分层迭

代算法能够明显提高球面大气中物质吸收量的计算精度, 且利用孤立层和累加法解算了球面大气中的上行辐射亮度。利用TOG模型计算分析了两个红外波段内大气的辐射传输特性, 其结论对卫星遥感与目标探测领域具有一定的参考价值。利用MODIS的测量结果对TOG模型的校验表明, TOG模型具有很高的计算精度。TOG模型的研制具有良好的应用前景, 可服务于卫星遥感、目标探测、大气反演以及光通信等领域中。

(下转第311页)

- [8] NORIMATSU S, KATSUSHI I. Damping factor influence on linewidth requirements for optical psk coherent detection systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(7): 1226-1233.
- [9] DJORDJEVIC I B, STEFANOVIC M C, ILIC S S, et al. An example of a hybrid system: coherent optical system with costas loop in receiver-system for transmission in baseband[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(2): 177-183.
- [10] ZHANG B, MALOUIN C, SCHMIDT T J. Design of coherent receiver optical front end for unamplified applications[J]. *Optical Express*, 2012, 20(3): 3225-3234.
- [11] PAINCHAUD Y, POULIN M, MORIN M, et al. Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3659-3672.
- [12] JOHNSON J E. Implementation agreement for integrated dual polarization intradyne coherent receivers[EB/OL]. [2013-11-14]. [http://www.oiforum.com/public/documents/OIF\\_DPC\\_RX-01.2.pdf](http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_DPC_RX-01.2.pdf).
- [13] GARREIS R, ZEISS C. 90 Optical hybrid for coherent receivers[J]. *Proceeding of SPIE*, 1991, 1522: 210-219.
- [14] NORIMATSU S. PLL propagation delay-time influence on linewidth requirements of optical PSK homodyne detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, 9(10): 1367-1375.
- [15] FRANZ J H, JAIN V K. *Optical Communications: Components and Systems*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.

编辑 税红

-----  
(上接第305页)

## 参 考 文 献

- [1] CHO H K, CHUN J H, SEO D C, et al. Range estimation of passive infrared targets through the atmosphere[J]. *Opt Eng*(0091-3286), 2013, 52(4): 046402-1-8.
- [2] ROSS V, DION D, GERMAIN D S. Experimental validation of the MODTRAN 5.3 sea surface radiance model using MIRAMER campaign measurements[J]. *Appl Opt*(1559-128X), 2012, 51(13): 2264-2276.
- [3] 黄维国. 地球红外辐射对大气层外红外测温的影响[J]. *光电工程*, 2009, 36(5): 34-39.  
HUANG Wei-guo. Effect of earth infrared radiation on infrared temperature measurement for exoatmospheric objects[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(5): 34-39.
- [4] 田昌会, 杨百愚, 蔡明, 等. 大气背景对红外目标探测的影响[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 438-441.  
TIAN Chang-hui, YANG Bai-yu, CAI Ming, et al. Effect of atmospheric background on infrared target detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 438-441.
- [5] 吴健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005: 33-51.  
WU Jian, YANG Chun-ping, LIU Jian-bin. *Atmospheric optical transmission theory*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005: 33-51.
- [6] KNEIZYS F X, SHETTLE E P, ABREU L W, et al. Users guide to LOWTRAN 7[M]. Massachusetts: Hanscom AFB, 1988.
- [7] BERK A, ANDERSON G P, ACHARYA P K, et al. MODTRAN 5.2.0.0 user's manual[M]. Massachusetts: Hanscom AFB, 2008.
- [8] ROTHMAN L S, GORDON I E, BARBE A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. *J Q S R T*(0022-4073), 2009, 110(9-10): 533-572.
- [9] ANDERSON G P, CHETWYND J H. FASCOD3 preliminary version: FASCOD3P[M]. Massachusetts: Hanscom AFB, 1992.
- [10] BOURGES B. Improvement in solar declination computation[J]. *Sol Energy*(0038-092X), 1985, 35(4): 367-369.
- [11] VERMOTE E F, TANRE D, DEUZE J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 1997, 35(3): 675-686.
- [12] CIVICIOGLU P. Transforming geocentric Cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm[J]. *Comput Geosci*(0098-3004), 2012, 46: 229-247.
- [13] 杨春平. 天空背景光谱特性建模及仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 25-31.  
YANG Chun-ping. Modeling and simulating of spectral radiance property for sky background[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 25-31.

编辑 漆蓉