

文章编号: 1001-4322(2005)10-1469-05

晴朗无云天空光谱辐射的近似计算模型*

苏 毅, 万 敏, 胡晓阳, 杨 锐, 冷 杰, 郑 捷

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 利用大气光学质量和大气气溶胶光学厚度的经验公式,由 HIRAN 数据库获得大气分子谱线参数,基于辐射传输方程,给出了晴朗无云天空光谱辐射的近似计算模型。根据该近似计算模型对晴朗无云天空光谱辐射亮度进行的计算结果表明:天空光谱辐射亮度曲线上存在明显的 O₂ 和 H₂O 吸收线;晴朗无云天空辐射的光谱分布偏蓝,天空亮度主要集中在短波段部分;太阳角小的天空光谱亮度出现“红移”现象;由于大气厚度变大,近地平的天空辐射亮度较大。

关键词: 天空辐射; 光谱亮度; 计算模型; 光学厚度

中图分类号: O43 **文献标识码:** A

晴朗无云天空辐射主要包括:经大气吸收和散射后的地球外太阳辐射,太阳光与大气粒子和分子相互作用导致的单次和多次散射。在很多科学研究和工程应用上,对天空光谱辐射亮度的研究都存在需求,如照明系统设计,太阳能设备设计以及飞行目标探测等。

Zibordi G 和 Voss K J 对天空辐射的光谱分布进行了计算和测量^[1],但是其给出的天空辐射计算模型受限于太阳天顶角小于 60° 的情况,也就是说,对晨昏条件下的天空辐射无法计算。MODTRAN 软件具有对大气透过率以及散射辐射的计算功能,但是该软件的计算优越性主要基于其内建的几种有限模型。如对气溶胶而言,其内建气溶胶模型的能见距离考虑 5 km 和 23 km 两种,这样对能见距离介于 5 km 和 23 km 之间的中间情形则无法采用其内建模型计算。当然,MODTRAN 也提供了用户自定义方式,但是这种方式要求用户对每一大气气溶胶层的每个波长点的消光因子、吸收因子和非对称因子等参数自行设置,而对于一般用户而言,这些参数是不易获得的。本文利用大气光学质量和大气气溶胶光学厚度的经验公式^[2,3],并由 HIRAN 数据库获得大气分子谱线参数,给出了更具普适意义的晴朗无云天空光谱辐射亮度的计算方法,令天空辐射的计算不再受限于 60° 太阳天顶角,同时可以方便地根据实验条件对计算参数进行经验性拟合和设置,获得更接近于实验条件的结果。另外,天空辐射计算模型可以方便地内嵌于其它实用软件之中,直接提供计算结果用于下一步的计算或仿真。文中根据该近似算法对某时刻晴朗无云天空光谱辐射亮度进行了计算,并与 MODTRAN 软件的计算结果进行了比较。

1 天空光谱辐射亮度近似算法

天空光谱辐射亮度算法基于辐射传输方程的近似解,将天空近似为平行平面,均匀,无云大气。在对 Zibordi G 和 Voss K J 给出的天空光谱辐射亮度计算模型进行修正后得到的天空光谱辐射亮度为

$$L(\lambda) = [E_{out}(\lambda) / \mu_s] [\tau_s(\lambda)] \cos \theta_s \exp[-\alpha_a(\lambda) m(\lambda)] \quad (1)$$

式中: $E_{out}(\lambda)$ 是计入日地距离修正后的地球外太阳辐照度; $\tau_s(\lambda)$ 和 $\alpha_a(\lambda)$ 分别为大气散射和吸收成分的总光学厚度; $[\tau_s(\lambda)]$ 为大气散射传输系数; λ 为波长; $m(\lambda)$ 为大气光学质量; θ_s 为太阳天顶角。

地球外太阳辐照度 $E_{out}(\lambda)$ 可由平均日地距离的地球外太阳辐照度 $E_0(\lambda)$ 算得^[1]

$$E_{out}(\lambda) = E_0(\lambda) \{ 1 + e \cos[2(D - 3)/365] \}^2 \quad (2)$$

式中: e 为地球轨道的偏心率; D 为儒略日(儒略日是以公元前 4713 年儒略历 1 月 1 日零时为起算日期的纪日法)。

大气光学质量 $m(\lambda)$ 的经验公式为^[2]

$$m(\lambda) = \frac{1.002432 \times \cos^2 \theta_s + 0.148386 \times \cos \theta_s + 0.0096467}{\cos^3 \theta_s + 0.149864 \times \cos^2 \theta_s + 0.0102963 \times \cos \theta_s + 0.000303978} \quad (3)$$

* 收稿日期: 2005-01-18; 修订日期: 2005-09-14
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 苏毅 (1941—), 男, 研究员, 主要从事激光应用领域研究。

2 大气光学厚度

大气分子固定成分(氮,氧,二氧化碳和氩等)、臭氧、水蒸气和气溶胶将对太阳辐射起到吸收和散射的作用。大气成分的吸收和散射可通过光学厚度来确定。将大气成分分为大气分子和气溶胶两大类,大气光学厚度 $\tau(\lambda)$ 为

$$\tau(\lambda) = \tau_M(\lambda) + \tau_A(\lambda) \tag{4}$$

式中: $\tau_M(\lambda)$ 和 $\tau_A(\lambda)$ 分别为大气分子光学厚度和大气气溶胶光学厚度。气溶胶光学厚度的计算可参考我国各地大气气溶胶光学厚度的相关测量数据^[3-6]。李放等由北京地区 1993年和 1994年的气溶胶光学厚度谱拟合得到的气溶胶光学厚度为^[3]

$$\tau_A(\lambda) = (\lambda \times 10^9)^{-\alpha} \tag{5}$$

式中: α 和 β 分别为浊度因子和波长指数,分别与粒子的浓度和尺寸分布有关。按照能见度分类, α 和 β 的取值如表 1所示。

表 1 不同能见度分类下的 α 和 β ^[3]

Table 1 α and β vs various visibility^[3]

visibility distance/km	2	5	10	20	30
	217.485 0	83.305 5	50.559 2	30.500 0	22.084 5
	0.816 599	0.702 488	0.687 790	0.662 241	0.657 818

在计算漫散射时,将气溶胶光学厚度分为两部分,散射部分 $\tau_{As}(\lambda)$ 和吸收部分 $\tau_{Aa}(\lambda)$,有

$$\tau_A(\lambda) = \tau_{As}(\lambda) + \tau_{Aa}(\lambda) \tag{6}$$

气溶胶散射量与气溶胶总衰减量之比为气溶胶单次散射反照率 $\omega_A(\lambda)$,因此有

$$\tau_{As}(\lambda) = \omega_A(\lambda) \tau_A(\lambda) \tag{7}$$

$$\tau_{Aa}(\lambda) = [1 - \omega_A(\lambda)] \tau_A(\lambda) \tag{8}$$

由于 $\omega_A(\lambda)$ 与气溶胶粒子的光学特性密切相关,一般可假设在可见和近红外波段 $\omega_A(\lambda)$ 不随波长变化,而且 $\omega_A(\lambda)$ 的取值范围为 0.6至 1,通常认为城市或工业区气溶胶 $\omega_A = 0.6$,大陆气溶胶 $\omega_A = 0.9$,海洋气溶胶 $\omega_A = 1.0$ ^[11]。

大气分子光学厚度也可分为两部分,散射部分 $\tau_{Ms}(\lambda)$ 和吸收部分 $\tau_{Ma}(\lambda)$,有

$$\tau_M(\lambda) = \tau_{Ms}(\lambda) + \tau_{Ma}(\lambda) \tag{9}$$

HITRAN数据库包含了 37种最重要的大气分子及其同位素,在 $10^{-6} \sim 22\,656\text{ cm}^{-1}$ 波数范围共 999 363根谱线的线参数,这些线参数包括了波长、线强度和大气加宽半宽度等,大气分子吸收光学厚度 $\tau_{Ma}(\lambda)$ 用 HITRAN数据库的大气分子线参数计算得到^[7,8]。

大气分子散射光学厚度可由下式近似计算得到^[11,6]

$$\tau_{Ms}(\lambda) = \frac{p}{p_0} 0.0088 \times \lambda^{-4.15+0.2} \tag{10}$$

式中:波长 λ 以 μm 为单位; p 为实际地面大气压; p_0 为标准大气压。

因此,大气总吸收光学厚度 $\tau_a(\lambda)$ 和总散射光学厚度 $\tau_s(\lambda)$ 分别为

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{Ma}(\lambda) + \tau_{Aa}(\lambda) \tag{11}$$

$$\tau_s(\lambda) = \tau_{Ms}(\lambda) + \tau_{As}(\lambda) \tag{12}$$

3 大气散射传输系数

漫散射引起的天空辐射角分布与太阳、观测点的天顶角和方位角有关。天空辐射的散射角 θ ,也称之为太阳角(观测方向和太阳方向的夹角),定义为^[9]

$$\theta = \arccos[\cos \theta_{sun} \cos \theta_{sun} + \sin \theta_{sun} \sin \theta_{sun} \cos(\phi - \phi_{sun})] \tag{13}$$

式中: θ_{sun} 和 ϕ_{sun} 分别为太阳的天顶角和方位角(从北算起); θ 和 ϕ 分别为观测点 P (某一天空元)的天顶角和方位角(从北算起),如图 1所示,其中 P 点为观测的天空点。

相位函数定义了由漫散射引起的天空辐射的角分布。分子散射(瑞利散射)相位函数 $P_M(\theta)$ 由各向同性散射的经典关系式给出

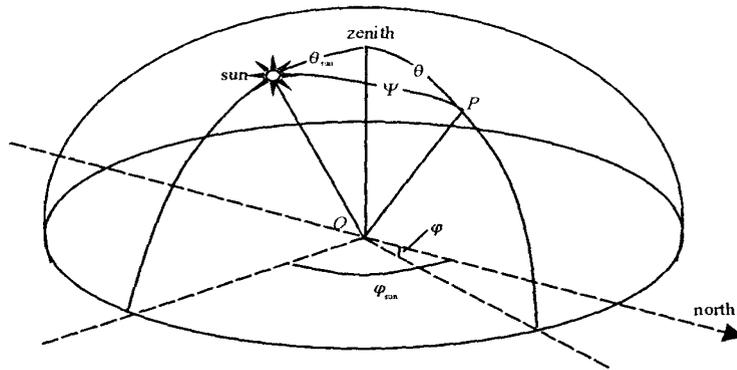


Fig 1 Sketch map of the sun and observation point

图 1 太阳和观测点的角度示意图

$$P_M(\lambda) = 0.75(1 + \cos^2 \theta) \tag{14}$$

气溶胶相位函数 $P_A(\lambda)$ 可用双项 Henyey-Greenstein (THG) 分析函数近似给出^[11]

$$P_A(\lambda) = (1 - g_1^2) a / (1 + g_1^2 - 2g_1 \cos \theta)^{1.5} + (1 - g_2^2) (1 - a) / (1 + g_2^2 + 2g_2 \cos \theta)^{1.5} \tag{15}$$

式中:非对称参数 a , g_1 和 g_2 (非对称因子) 与气溶胶尺寸分布以及波长有关。但是,气溶胶尺寸分布对相位函数的影响比波长的影响大,因此在可见和近红外波段可假定参数 a , g_1 和 g_2 与波长无关,非对称参数可近似取为: $a=0.962$, $g_1=0.713$, $g_2=0.759$ 。

大气的总相位函数为 $P(\lambda)$ 为^[11]

$$P(\lambda) = [M_s(\lambda) P_M(\lambda) + A_s(\lambda) P_A(\lambda)] / [M_s(\lambda) + A_s(\lambda)] \tag{16}$$

满足归一化条件

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi P(\lambda) \sin \theta d\theta = 1 \tag{17}$$

大气散射传输系数 $[f_s(\lambda)]$ 为^[11]

$$[f_s(\lambda)] = \frac{[1 - \alpha(\lambda)] R(\lambda, \mu) + 2\alpha(\lambda) R(\lambda, \mu_s)}{4 + (3 - P_1) [1 - \alpha(\lambda)] f_s(\lambda)} - \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{-\mu_s(\lambda)}{\cos \theta}\right) + \exp\left(\frac{-\mu_s(\lambda)}{\cos \theta_s}\right) \right] + [P(\lambda) - (3 + P_1) \cos \theta \cos \theta_s] f_s(\lambda) \tag{18}$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 为地球表面光谱反照率 (可将地球表面假设为朗伯面)。 $f_s(\lambda)$ 项代表单次散射传输

$$f_s(\lambda) = \frac{1}{4} \frac{\exp\left[\frac{-\mu_s(\lambda)}{\cos \theta}\right] - \exp\left[\frac{-\mu_s(\lambda)}{\cos \theta_s}\right]}{\cos \theta - \cos \theta_s} \quad (\mu_s = \mu_s(\lambda)) \tag{19}$$

P_1 是相位函数进行勒让德多项式展开的第一项

$$P_1 = \frac{3}{2} \int_0^\pi P(\lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta \tag{20}$$

$R(\lambda, \mu)$ (其中 $\mu = \cos \theta$ 或 $\cos \theta_s$) 为辅助函数

$$R(\lambda, \mu) = 1 + 1.5 \cos \theta + (1 - 1.5 \cos \theta) \exp[-\mu_s(\lambda) / \cos \theta] \tag{21}$$

4 计算示例

以 HITRAN 数据库中的中纬度夏季大气模式为例,能见距离 5 km,基于前文所述的晴朗无云天空光谱辐射亮度的近似计算模型,计算得到北纬 32°东经 105°夏日上午 9 时 (太阳高角 34°,观测高角 45°,观测方位角 240°,太阳角 96°) 的天空光谱辐射亮度,如图 2(a)所示,利用 MODTRAN 软件计算得到同样条件下的天空光谱辐射亮度,如图 2(b)所示。由图 2 所示的结果将文中的近似计算模型与 MODTRAN 软件的计算结果进行了比较,无论从计算结果的量级还是变化趋势上,两种方法的计算结果都非常接近。主要的区别在于,本文近似计算模型由于不需要太高的光谱分辨率而对数据进行了平滑处理。

我们对不同太阳高角、不同观测方位和观测高角的天空光谱辐射亮度也作了计算,获得了不同条件下的天

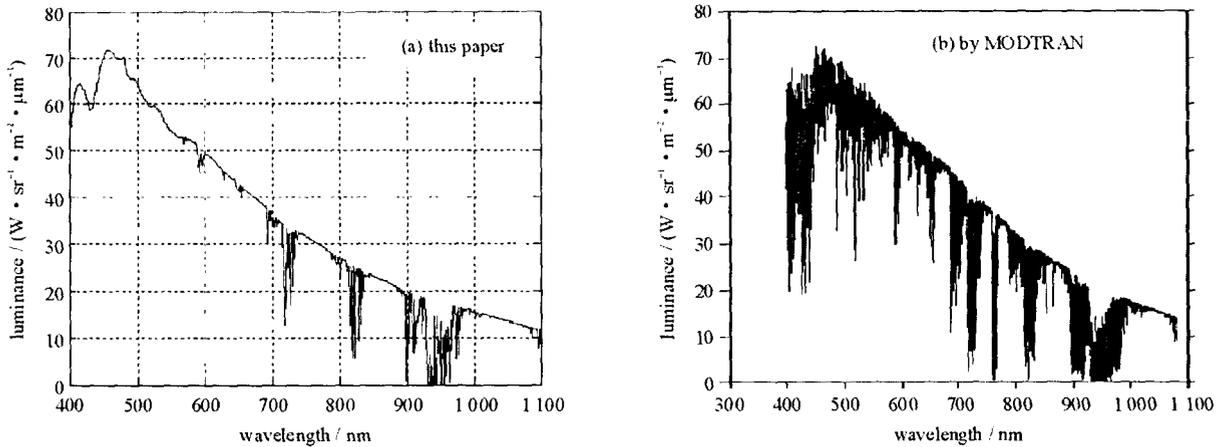


Fig 2 Clear sky spectral luminance

图 2 晴朗天空光谱辐射亮度

空光谱辐射亮度的分布特征。

5 结 论

基于晴朗无云天空光谱辐射亮度的近似计算模型,进行了不同条件下的天空光谱辐射亮度的计算,获得分布特征如下:

晴朗无云天空辐射的光谱分布偏蓝,天空亮度主要集中在短波段部分,光谱辐射亮度约在波长 480 nm 左右达到峰值,然后随着波长的增加,光谱辐射亮度呈下降趋势。在天空光谱辐射亮度曲线上,可以看到明显的波长 950 nm 左右的 H_2O 吸收线,波长 830 nm 左右的 H_2O 吸收线和波长 730 nm 左右的 O_2 和 H_2O 吸收线,其中波长 950 nm 左右的 H_2O 吸收线比较深。

太阳角小的天空受太阳直接辐射的影响较大,天空光谱亮度出现“红移”现象,同时由于太阳直射分量的增大而导致了太阳角小的天空总辐射量的大大增加,因此,通常情况下天空亮度随太阳角的增大而减小。但是在接近地平面时由于大气厚度加大,散射阳光的大气分子数和气溶胶粒子数也随之增多,因而接近地平的天空辐射亮度较大。

参考文献:

- [1] Zibordi G, Voss K J. Geometrical and spectral distribution of sky radiation: comparison between simulations and field measurements[J]. *Ran ote Sense Environment*, 1989, 27: 343—358.
- [2] 王喜世,朱永豪. 用光谱辐射计测量大气光学厚度的研究[J]. 量子电子学报, 1998, 15(3): 326—331. (Wang X S, Zhu Y H. The study on measuring the atmospheric optical depth using a spectroradiometer. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(3): 326—331)
- [3] 李放,吕达仁. 北京地区气溶胶光学厚度中长期变化特征[J]. 大气科学, 1996, 20(4): 385—394. (Li F, L Ü D R. The mid-long term features of atmospheric aerosol optical depths over Beijing area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, 20(4): 385—394)
- [4] 李刚,季国良. 中国西北地区大气气溶胶散射光学厚度分析[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 283—290. (Li G, Ji G L. Analyses on aerosol scattering optical depth in the arid region of north west China. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(3): 283—290)
- [5] 李正强,赵凤生. 利用静止气象卫星数据确定大气气溶胶光学厚度[J]. 量子电子学报, 2001, 18(4): 381—384. (Li Z Q, Zhao F S. Retrieval atmospheric aerosol optical thickness from geostationary meteorological satellite data. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(4): 381—384)
- [6] 毛节泰,李成才,张军华. MODIS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比[J]. 应用气象学报, 2002, 13(s0): 127—135. (Mao J T, Li C C, Zhang J H. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun photometer observations. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(s0): 127—135)
- [7] 张华,石广玉. 一种快速高效的逐线积分大气吸收计算方法[J]. 大气科学, 2000, 24(1): 111—121. (Zhang H, Shi G Y. A fast and efficient Line-by-line calculation method for atmospheric absorption. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(1): 111—121)
- [8] 刘林华,谈和平,余其铮. 气体污染物的红外辐射特性[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(3): 251—255. (Liu L H, Tan H P, Yu Q Z. Infrared radiative properties of gas pollutants. *Journal of Combustion Science and Technology*, 1999, 5(3): 251—255)
- [9] 张绍纲. 天然光的空间分布——各种参考天空的亮度分布[J]. 照明工程学报, 1998, 4(8): 63—79. (Zhang S G. Spatial distribution of natural light - luminance distribution of various reference sky. *Journal of Illumination Engineering*, 1998, 4(8): 63—79)

Approximate computation model of clear sky spectral luminance

SU Yi, WAN Min, HU Xiao-yang, YANG Rui, LENG Jie, ZHENG Jie

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1001, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on radiative transfer equation, using the experiential formulae of air mass and atmospheric aerosol optical depth and atmospheric molecule parameters obtained by HITRAN database, an approximate algorithm for clear sky spectral luminance was given, which could be used generally. Clear sky spectral luminance was computed by the approximate algorithm model. Computation results indicate that there are distinct absorption lines of O_2 and H_2O on the curve of clear sky spectral luminance. The luminance of clear sky radiation is higher at shortwave band, while the spectrum for small sun angle shifts to longer waveband. The sky radiation luminance adjacent to horizon is higher.

Key words: Sky radiation; Spectral luminance; Computation model; Optical depth