

低云中短波红外表观辐射模型研究*

高永攀, 张建奇, 黄曦, 潘皓

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西西安 710071)

摘要:在对空红外系统的多光谱探测和红外仿真中,云的干扰不可忽略,所以,对云的辐射特性的研究至关重要。在不同的波段,云的辐射特性会有很大的差异,为了研究各个不同波段云的表现辐射特性,需要计算云的光谱辐射量。在典型观测模式下建立了低云的表现光谱辐射模型,研究了对云背景辐射有贡献的各个辐射分量的计算方法。基于传统的二流近似模型获取各个参数,引入云的光谱光学厚度的经验公式,进而获得了低云在中短波段的光谱辐射特性,有效地计算出了云背景在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中短波段内的表现光谱辐亮度数据,并且节省了计算时间。经过比较发现,该模型的计算结果与实际结果有较好的一致性,可以为云背景多光谱分析、探测及仿真提供背景数据。

关键词:云; 表现光谱辐亮度; 二流近似

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)05-0569-04

Infrared apparent radiation model in short and middle wave for low cloud*

GAO Yong-pan, ZHANG Jian-qi, HUANG Xi, PAN Hao

(School of Technical Physics, Xi'dian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The disturbance of clouds is an important factor in detection and simulation for sky, therefore, the study of cloud radiation is important. In different IR wavelengths, the properties of cloud can be much different, in order to study the apparent radiation of different wavelengths, the calculation of spectral radiation of cloud is required. An apparent radiation model for typical detection is presented in this article, and the calculations of radiation contribute to the cloud radiation is studied. The acquirement of parameters in the model is in the light of traditional two stream approximation, in additional, an experience formula of spectral optical depth is introduced, consequently, the infrared spectral radiation characteristics of low clouds in short and middle wave are gained, and apparent spectral radiation is calculated in middle and short wave, and the calculation time is saved. Result shows that actual measurements and data from the model are consistent, hence the model is applicable as the data source in the detection and simulation in the cloudy background.

Key words: Cloud; Apparent spectral radiance; The two stream approximation

收稿日期: 2004-12-27; 修订日期: 2005-01-21

* 基金项目: 西安电子科技大学青年科研工作站资助项目(03007)

作者简介: 高永攀(1979-), 男, 河南焦作人, 硕士, 主要研究方向为光电对抗应用。

0 引言

大气中的水分对红外辐射有吸收、散射作用,因此,对空红外系统容易受到雨、雪、雾、云等气象因素的影响。而云作为大气水分的主要聚集物,覆盖地球上空 50% 的区域^[1],它对对空红外系统产生的影响尤为突出,因此,研究云背景红外辐射特性,建立相应的红外辐射模型,对于提高红外系统的探测精度和抗干扰能力具有重要的意义。近年来,国内外对云的辐射进行了大量的研究^[2-6],其中二流近似模型是最为简洁的一种方法。然而,该模型没能充分体现云的光谱选择特性,故无法进行与云的光谱信息有关的相关分析。针对这一不足,本文通过在二流近似模型中引入光谱光学厚度经验公式,有效地解决了这一问题,不仅获得了云的光谱辐射特性(光谱反射率和光谱透射率),同时也大大节省了计算时间。在此基础上建立低云的表观辐射模型,包括太阳散射和透射,大气的辐射和路径辐射等。

1 云背景表观光谱辐射模型

1.1 模型的建立

本文的模型是针对最常见的观测模式而建立的,即观测者和云背景之间有一段距离,此时观测者所接收到的云背景表观辐亮度 $L(\lambda)$ 为:

$$L = L_s + L_p + L_g + L_c \quad (1)$$

下面分别介绍各分量:

(1) 由太阳贡献的辐射 L_s : 这部分辐射包括云对太阳的反射、透射以及太阳的直射。在 1~5 μm 波段内这部分辐射贡献量最大。在计算这部分辐射时,根据观测者、云和太阳三者相对位置关系可分为三种情况,如图 1 所示,图中的 1、2、3 分别代表不同的观测位置。

处于位置 1 时,观测者所接收的辐射包括透射、反射和太阳的直射,此时有:

$$L_g = 1/\pi \{ [\tau_c(\lambda, \mu_0, \tau_1) \tau_a(\lambda, d) F_0 \cos \theta + r_c(\lambda, \mu_0, \tau_2) \times \tau_a(\lambda, d) F_0 \cos \theta] \omega + (1-\omega) F_0' \cos \Theta \} \quad (2)$$

式中 ω 为视场因子,即云占整个视场的比例; F_0'

$\cos \Theta$ 为观测者接收到的太阳直射, Θ 为观测角和太阳入射角的夹角。

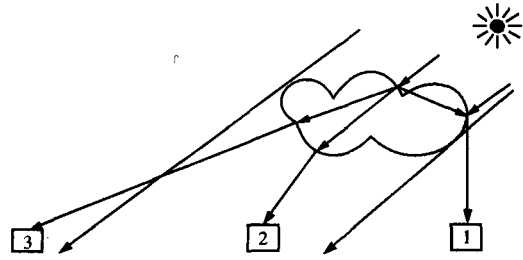


图 1 光线传播示意图

Fig.1 Sketch map of ray transfer

处于位置 2 时,观测者只能接收太阳的透射部分:

$$L_s = \tau_c(\lambda, \mu_0, \tau) \tau_a(\lambda, d) F_0 \mu_0 / \pi \quad (3)$$

式中 $\tau_c(\lambda, \mu_0, \tau)$ 为云透过率; μ_0 为太阳天顶角的余弦; τ 为光学厚度; $\tau_a(\lambda, d)$ 为大气透过率; d 为云底到观测者的距离; $F_0 \mu_0$ 为云顶的太阳辐照度。

处于位置 3 时,观测者接收到的辐射包括透射和太阳的直射。此时有:

$$L_s = 1/\pi [\omega \tau_c(\lambda, \mu_0, \tau_1) \tau_a(\lambda, d) F_0 \cos \theta + (1-\omega) F_0' \cos \Theta] \quad (4)$$

(2) 大气路径辐射 L_p : 主要是沿某观测路径上大气自身热辐射和大气对太阳的散射之和,包括观测者到云之间的路径辐射 L_{p1} (包括云对它的反射) 和云后的路径辐射 L_{p2} , 以及不经过云直达观测者的路径辐射 L_{p3} 。

$$L_p = \omega (L_{p1} + L_{p2}) + (1-\omega) L_{p3} \quad (5)$$

(3) 云对地面背景辐射的反射量 L_g 和云背景自身的辐射 L_c : 由维恩定理^[7]可知,地面和云背景由于自身温度较低在 1~5 μm 波段内辐射量较小。本文将地面背景当成灰体处理,其辐射包括自身辐射和对太阳的反射;对于云背景自身的辐射,在 1~4 μm 波长范围内本文将作为非黑体辐射处理;在 4~5 μm 内当成黑体处理。

1.2 模型中各种参数的获得

以上模型中用到的大气的路径辐射、太阳的辐射以及大气透过率的计算都是通过 MOTRAN 获得的。对于低云的光谱反射率与透过率的计算是本文的重

点,首先按 Stephens 的做法采用 Coakley 和 Chylek^[4] 的二流近似求解出云的反射率和透射率与光学厚度的关系,其次引入了光学厚度与波长的经验关系,从而建立起云的反射率和透射率与入射波长的关系,该方法没有采用传统积分法来计算云光谱光学厚度,大大节省了计算时间。

具体的计算过程见参考文献[4]和[8],得到云的反射率、透射率和吸收率为:

$$r_c(\mu) = \frac{(u^2 - 1)\exp(\tau_{\text{eff}}) - \exp(-\tau_{\text{eff}})}{V} \quad (6)$$

$$\tau_c(\mu) = \frac{4u}{V} \quad (7)$$

$$\alpha(\mu) = 1 - r_c(\mu) - \tau_c(\mu) \quad (8)$$

式中 α 为云的吸收率; $r_c(\mu)$ 为云的反射率; $\tau_c(\mu)$ 为云的透射率; μ 为入射光天顶角的余弦; u 、 V 和 τ_{eff} 定义为:

$$u^2 = \frac{(1 - \omega_0) + 2\beta(\mu_0)\omega_0}{1 - \omega_0} \quad (9)$$

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{(1 - \omega_0)u\tau_N}{\mu_0} \quad (10)$$

$$V = (u+1)^2 \exp(\tau_{\text{eff}}) - (u-1)^2 \exp(-\tau_{\text{eff}}) \quad (11)$$

$\beta(\mu_0)$ 为反向散射比,可表示为:

$$\beta(\mu_0) = \frac{\int_0^1 p(\mu_0, -\mu) d\mu}{\int_{-1}^1 p(\mu_0, \mu) d\mu} \quad (12)$$

式中 p 为相函数; μ 为散射角的余弦; τ_N 为光谱光学厚度^[9],其与波长和液体水容的经验公式为:

$$\tau_N = 1.5 \times 10^{-3} \pi c \frac{\bar{W}}{\lambda} \quad (13)$$

式中 \bar{W} 为路程水蒸气含量 g/m^2 ; c 为修正系数,如表 1 所示^[10]。

上式的计算只适用于光学厚度较小的情况,对于一般云的反射比和透射比的计算,可调整参数 ω_0 和 β ,即用累加法算出云的反射率与透射率,再与上式计算结果比较,调整 ω_0 和 β ,使用上式计算的结果

与累加法计算的结果一致。这里本文直接采用了 Stephen^[6]算出的 ω_0 和 β 值。

表 1 不同波长时修正因子
Tab.1 Coefficient c for correction

| λ / m | c |
|----------------------|------|
| 0.5 | 0.61 |
| 1.2 | 0.61 |
| 3.8 | 0.68 |
| 5.3 | 0.58 |
| 10.0 | 0.35 |
| 11.0 | 0.3 |
| 12.0 | 0.35 |

2 计算结果与分析

图 2 是计算数据和实测数据的比较结果,其中实线为计算仿真结果曲线,虚线为实测结果曲线。图 2(a)和图 2(b)的实测结果不同的是温度和视场因子的差异。计算仿真的具体参数设置和实测条件如下:

图(a)的仿真参数设置为:低云,时间 14:52,温度 25℃,湿度 53%,太阳天顶角 30°,探测器天顶角 60°,探测器与太阳方位角之差 180°,视场因子 0.5。

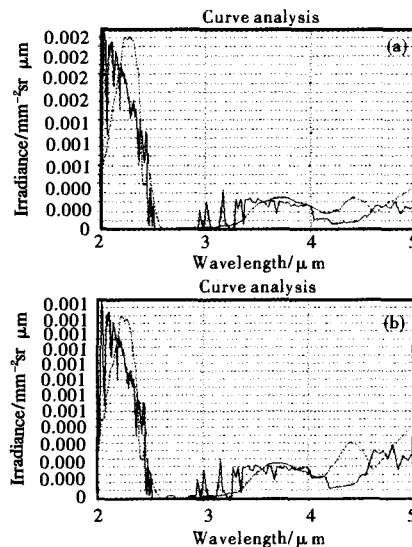


图 2 计算结果和实测结果比较

Fig.2 Comparison between results of computing and measuring

图(b)的仿真参数设置为:低云,时间 14:43,温度 27℃,湿度 53%,太阳天顶角 30°,探测器天顶角

60°, 探测器与太阳方位角之差 180°, 视场因子 0.9。

从仿真结果可以看出, 由于实测系统频率响应较低使得曲线变得十分平滑, 致使在具体的曲线细节上实测结果与计算仿真结果有较大的差距, 但是在曲线的整体轮廓和走势上与计算结果符合很好。另外, 在波长 4~5 μm 之间, 实测结果有一个较大的峰值和仿真计算结果有略微的错位, 这既可能是实际测量时的不确定性造成的, 也可能是由于探测器的漂移所产生的偏差, 还可能是由于该模型自身不足所引起。从两幅图的条件及结果可以看出, 当太阳天顶角固定时视场因子起着关键性的作用, 这与实际情况相吻合。视场因子较大时, 云在视场中所占比例较大, 对太阳光线的散射也较强, 因此探测器接收到的能量也较多, 表观辐亮度也较大; 反之, 表观辐亮度较小。

3 结束语

该模型的建立, 有效地提供了云背景在 1~5 μm 波段内表观光谱辐亮度数据源, 使得滤除云背景所引入的背景杂波成为可能, 有助于提高红外探测器的探测精度、红外制导武器的抗干扰能力。但本文中使用的视场因子是根据实测云图估计的, 不够准确, 如何准确计算视场因子还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Alexander Manolopoulos. Infrared Background and Target Measurement[R]. ADA163567. Naval Postgraduate School, 1985.
- [2] Thornburg R J, Devore J G, Thompson J. Review of The CLDSIM Cloud Radiation Simulation[R]. ADA306518. 1993.
- [3] GUO Xin-jun, JIN Wei-qi, WANG Zhi-yun, et al. An infrared apparent radiation model for clouds [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology (郭新军, 金伟其, 王志云, 等. 云层红外表观辐射模型的研究. 北京理工大学学报), 2003, 23(4): 414-418.
- [4] Coakley J, Chylek P. The two stream approximation in radiative transfer: including the angle of the incident radiation [J]. J Atmos Sci, 1975, 32: 409-418.
- [5] Liou K M, Wittman G D. Parameterization of radiative properties of Cloud [J]. J Atmos Sci, 1979, 36: 1261-1273.
- [6] Stephen G L, Ackerman S, Smith E A. A shortwave parameterization revise to improve cloud absorption [J]. J Atmos Sci, 1984, 41: 687-690.
- [7] LIU Jing-sheng. Infrared Physics [M]. Beijing: Weapon Industry Publishing Company (刘景生. 红外物理. 北京: 兵器工业出版社), 1992.
- [8] LIU Chang-sheng, YE Bo-ming. The effect of cloud distribution on the radiative heating and cooling rates [J]. ACTA Meteorologica Sinica (刘常盛, 叶伯明. 云层分布对辐射增热的和冷却的影响. 气象学报), 1991, 49(4): 483-493.
- [9] ZHANG Jing-xian, LI Yu-dan, JIN Wei-qi. Low light and infrared imaging technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社), 1995.
- [10] ZHANG Jun, JIANG Fei-hong, GONG Yan-jun, et al. Computer simulation for infrared spectra of pollution clouds with FTIS detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis (张骏, 江飞虹, 宫颜军, 等. 傅里叶变换红外光谱仪遥感污染云层红外光谱的计算仿真. 光谱学与光谱分析), 2001, 21(5): 617-619.
- [1] Alexander Manolopoulos. Infrared Background and Target Measurement [R]. ADA163567. Naval Postgraduate School, 1985.
- [5] Figueiredo J M L, Stanley C R, Boyd A R. Optical modulation in a resonant tunneling relaxation oscillator [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(9): 1197-1199.
- [6] JIANG Yao-ting, YANG Jie, ZHOU Xiao-song. Developing status quo of laser interference technique [J]. Infrared and Laser Engineering (蒋耀庭, 杨杰, 周晓松. 激光干涉技术及发展状况. 红外与激光工程), 2001, 30(5): 387-390.
- [7] YANG Guo-guang. Measurement Technology for Modern Optics [M]. Zhejiang: Publication of Zhejiang University (杨国光. 近代光学测试技术. 浙江: 浙江大学出版社), 1997.
- [8] QI Hong-xing, LIU Zeng-dong, JIANG Rong-xi. A Doppler modulation for conquer optical "submerge" noise [J]. Study on Properties of Target and Environment (齐洪兴, 刘增东, 江荣熙. 一种克服光学“淹没”噪声的多普勒调制法. 目标与环境特性研究), 2003, 4: 45-49.

(上接第 559 页)

and Laser Engineering (朱大勇. 远程多普勒激光雷达. 红外与激光工程), 1996, 25(1): 8-15.