

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0108-04

紫外光大气辐射传输特性研究

张海良 贾红辉 张学鹜 王晓峰 常胜利

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 采用网格划分法对含多次散射项的紫外辐射传输方程的求解方法进行了研究。在空间上进行网格划分, 网格节点在空间的辐射强度用相应的权值离散到有限的方向 Ω 上, 根据给定的发射源参数以及初始条件和边界条件, 采用劈裂法进行高效率、高精度的求解。在每一时间步长内, 分别计算源项和传输项的贡献。通过 Laplace 变换分别求解偏微分方程的解析解来求出每一步的贡献, 然后求出下一时刻的值。将用网格划分法求解的结果与 Monte-Carlo 方法计算的结果进行对比: 用前者所花的时间要比通过后者的计算所花的时间短, 前者计算最大误差为 6.9%。

关键词 散射; 紫外光; 大气辐射; 劈裂法; 离散坐标

中图分类号 TN911.74 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0108

Research of the Ultraviolet Radiation Transfer in the Atmosphere

Zhang Hailiang Jia Honghui Zhang Xue'ao Wang Xiaofeng Chang Shengli

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The solution method of ultraviolet propagation function involved multiple scattering through grid generation is investigated. Through curring up many spatial grids in space, the radiant intensity in each spatial grid is discreted in a direction Ω using relative weight factor. According to a given emission source specification as well as the boundary condition and the initial condition, it can be resolved with high efficiency and precision through splitting method. The contributions of source-term and propagation term are calculated seperately in each period of time. By Laplace conversion, the analytical solution of partial differential equations are solred separately; the each step's contributions can be obtained; then the value of next moment can be solved. Compared the results with that using Monte-Carlo calculation method, it saves more time by using grid generation to solve the function of ultraviolet radiation propagation, and its largest computing error is 6.9%.

Key words scattering; ultraviolet; atmosphere radiation; splitting method; discrete ordinate

1 引 言

随着紫外光学技术的不断发展, 紫外光技术在国防和工业^[1]等相关领域得到了广泛应用, 如紫外通信、紫外成像、紫外侦察、紫外制导等。由于紫外光受到大气分子、气溶胶颗粒等粒子的散射与吸收作用, 在紫外光学系统和信号处理系统的参数设计时, 需针对紫外光的大气传输特性进行研究^[2,3]。

目前研究紫外光通信大气传输特性主要依靠大气传输软件, 如 LOWTRAN 和 MODTRAN^[4]。LOWTRAN 和 MODTRAN 是美国空军地球物理实验室 (AFGL) 开发的中 (MODTRAN)、低

(LOWTRAN)分辨率大气传输模拟软件, 波长范围从紫外到微波(即 $0.2 \sim \infty \mu\text{m}$), 但由于紫外波段有强方向性散射, 而 LOWTRAN 和 MODTRAN 采用的多次散射模型和散射相函数精确度不高, 计算的紫外波段辐射值有很大的偏差(在紫外波长 300 nm 附近相对偏差约 40%)^[5], 而且该软件采用平行均匀大气假设, 只能模拟视线条件的大气传输, 不能计算非视线情况下的紫外光传输问题。中国科学院大气物理研究所基于 Stamnes 的离散坐标方法 (DISORT), 建立了一个紫外光辐射传输模式, 由于它采用的是平行平面大气假设, 因此它是一种视

基金项目: 国家自然科学基金(60607013)资助课题。

作者简介: 张海良(1979—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事紫外光技术方面的研究。E-mail: hlzhang6@gmail.com

线紫外光大气传输模型^[6]。

为了计算复杂空间、非视线紫外光大气传输特性,将空间划分为网格,通过时空变数的离散和 Ω 方向的离散,将辐射传输方程离散坐标化,进行高效率、高精度的源迭代求解,求得的解是辐射强度在网

格中心的值,从而可得非视线紫外光大气传输特性。

2 紫外辐射传输方程

辐射传输方程的一般形式为

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(r, \Omega, \nu, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I(r, \Omega, \nu, t) + K_a(\nu) I(r, \Omega, \nu, t) = S(r, \Omega, \nu, t) + \int_0^\infty d\nu' \int_0^{4\pi} d\Omega' \left[\frac{\nu'}{\nu} K_s(\nu' - \nu, \Omega' \cdot \Omega) I(r, \nu', \Omega', t) - K_s(\nu - \nu', \Omega \cdot \Omega') I(r, \Omega, \nu, t) \right], \quad (1)$$

(1)式是关于辐射强度 $I(r, \nu, \Omega, t)$ 的辐射传输方程,表示 t 时刻在某微元控制体内 Ω 方向微元立体角上辐射能量的守恒。其中 $I(r, \nu, \Omega, t)$ 为辐射强度, $K_a(\nu)$ 为吸收函数, $K_s(\nu' - \nu, \Omega' \cdot \Omega)$ 为散射函数, $S(r, \Omega, \nu, t)$ 为辐射源项, ν, ν' 为光频率, r 为空间位置。

对于基于汞灯紫外光源的大气传输,该辐射传输模型可以做以下几点假设:

1) 在所考虑的范围认为大气成分是均匀的、稳定的,忽略大气的宏观运动及光子迁移过程中气体的离解、电离等。

2) 不考虑介质的紫外辐射及对紫外线的受激过程。

3) 紫外光作单频近似,且不考虑变频散射。

对于具有吸收、散射特性的大气介质,在上述近似条件下,含时间变量的辐射传输方程为

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I(r, \Omega, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla I(r, \Omega, t) + k_a I(r, \Omega, t) = S(r, \Omega, t) + \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} k_s I(r, \Omega', t) P(\Omega', \Omega) d\Omega', \quad (2)$$

等式左边第一项表示在给定的方向 Ω 上辐射强度随时间的变化率;第二项表示空间网格外辐射强度对该微元立体角上的能量贡献;第三项表示该微元体内由于大气介质的吸收在立体角方向 Ω 引起的辐射强度的衰减;右边第一项表示辐射源;第二项表示由该微元 4π 立体角所有方向传输过来的散射到 Ω 方向上的辐射强度。 k_a 和 k_s 分别是大气介质的吸收系数和散射系数; $P(\Omega', \Omega)$ 是散射相函数; $d\Omega'$ 是立体角微元。

3 基于离散坐标的紫外辐射传输方程求解方法

将 4π 立体角离散成分立的 M 个方向,用编号 m 来代替离散的方向 Ω_m ,则对某微元控制体,在单位体积上,对于离散方向 Ω_m ,得到离散解析形式的改进显式形式的辐射传输方程为

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{j+1/2, k+1/2, l+1/2}(m)}{\partial t} + [(I_{j+1, k+1/2, l+1/2} - I_{j, k+1/2, l+1/2})\mu_m / \Delta x + (I_{j+1/2, k+1, l+1/2} - I_{j+1/2, k, l+1/2})\xi_m / \Delta y + (I_{j+1/2, k+1/2, l+1} - I_{j+1/2, k+1/2, l})\eta_m / \Delta z] + k_a I_{j+1/2, k+1/2, l+1/2}(m) = \frac{1}{4\pi} \sum_m k_s I_{j+1/2, k+1/2, l+1/2}(m') P_{m', m} \Delta \Omega + S_{j+1/2, k+1/2, l+1/2}^0(m), \quad (3)$$

式中 m 为离散方向 Ω 对应的序数, μ_m, ξ_m, η_m 是离散方向 Ω_m 的方向余弦, Δt 是时间微元, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 是微元控制体的边长, $I_{j+1/2, k+1/2, l+1/2}(m)$ 为第 (j, k, l) 空间网格中心点第 m 立体角方向的辐射强度, $I_{j+1, k+1/2, l+1/2}, I_{j+1/2, k+1, l+1/2}$ 等为第 (j, k, l) 空间网格界面中心点的辐射强度。

采用劈裂法^[3,8]进行高效率、高精度的求解。

在每一时间步长内,分别计算源项和传输项的贡献。通过 Laplace 变换分别求解一阶偏微分方程的解析解来求出每一步的贡献,然后求出下一时刻的值。使用劈裂法求解离散的辐射传输方程分以下几步:

1) 求解传输项的贡献,求得劈裂法中间值

$$I_{1/2}^{**} \left(\frac{\Delta t}{2}, m \right):$$

$$\begin{cases} \frac{1}{c} \frac{\partial I_{1/2}(\boldsymbol{\Omega})}{\partial t} + \oint_{\sum_j} I_j(\boldsymbol{\Omega}) \boldsymbol{\Omega} \cdot \hat{n} d\Sigma + k_a I_{1/2}(\boldsymbol{\Omega}) = 0 \\ I_{1/2} \Big|_{t=t^n} = I_{1/2}^*(\Delta t, m) \end{cases} \Rightarrow I_{1/2}^{**}\left(\frac{\Delta t}{2}, m\right), \quad (4)$$

2) 再次代入求解源项贡献, 得到中间值 $I_{1/2}^*(\Delta t, m)$

$$\begin{cases} \frac{1}{c} \frac{\partial I_{1/2}(m)}{\partial t} = S_{1/2}(m) \\ I_{1/2} \Big|_{t=t^n} = I_{1/2}^{**}\left(\frac{\Delta t}{2}, m\right), \Delta t = [t_0^n, t^{n+1}] \end{cases} \Rightarrow I_{1/2}^*(\Delta t, m), \quad (5)$$

3) 再次求解传输项的贡献, 得到节点下一时刻的辐射强度 $I_{1/2}^{*+1}(m)$

$$\begin{cases} \frac{1}{c} \frac{\partial I_{1/2}(\boldsymbol{\Omega})}{\partial t} + \oint_{\sum_j} I_j(\boldsymbol{\Omega}) \boldsymbol{\Omega} \cdot \hat{n} d\Sigma + k_a I_{1/2}(\boldsymbol{\Omega}) = 0 \\ I_{1/2} \Big|_{t=t^n} = I_{1/2}^*(\Delta t, m) \end{cases} \Rightarrow I_{1/2}^{*+1}(m), \quad (6)$$

4 模拟结果验证

应用大气辐射传输软件 ART2100 计算常见天气的大气基本参数, 条件为: 溶胶类型为城市消光, 气象视距为 5 km, 海拔 500 m。得到 266 nm 紫外光的大气传输参数, 见表 1, 经换算后得到模型计算所需的参数: $k_a = 1.242 \text{ km}^{-1}$, $k_s = 1.331 \text{ km}^{-1}$, $\omega = 0.2846 \text{ rad/s}$ 。

根据文献[9], 利用蒙特-卡罗 (Monte Carlo,

MC) 方法^[10~12]对上述模拟结果进行验证。三维空间尺度: $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$, 网格大小: $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 共有 1000 个网格。发射仰角 90° , 发射发散角 90° , 发射单脉冲能量 1 J, 接收仰角 90° , 接收视场角 90° 。蒙特-卡罗方法跟踪的光子数为 10^7 个, 计算每个网格中心点的紫外光能量。将离散坐标方法计算的结果与蒙特-卡罗方法计算进行对比, 见表 2。

表 1 ART2100 计算大气参数

Table 1 Atmosphere parameters calculated by ART2100

Wavelength λ / nm	Total transmission τ / km^{-1}	Mixed gas	Ozone	Molecular	Aerosol optical	Aerosol
		absorption coefficient k_{ga} / km^{-1}	absorption coefficient k_{oa} / km^{-1}	scattering coefficient k_{ms} / km^{-1}	extinction coefficient k_{ae} / km^{-1}	absorption coefficient k_{aa} / km^{-1}
266	0.0763	0.8058	0.4592	0.7435	0.2773	0.2196

表 2 基于离散坐标方法的计算结果与蒙特-卡罗方法计算结果比较

Table 2 Result based on discrete ordinate method compared with Monte-Carlo method

Transmission distance r / m	100	500	800	1000
Energy E / J (discrete ordinate method)	2.84×10^{-7}	6.42×10^{-9}	1.21×10^{-9}	6.36×10^{-10}
Energy E / J (Monte-Carlo method)	2.93×10^{-7}	6.51×10^{-9}	1.30×10^{-9}	6.45×10^{-10}

从表 2 可以得出: 离散坐标方法模拟计算结果与蒙特-卡罗法计算的结果较为符合, 最小误差为 1.4%, 最大误差 6.9%。并且本文所采用的基于离散坐标方法求解紫外光辐射传输方程花费的时间约为 163 min, 而蒙特-卡罗方法跟踪计算 1000 个网格点所花费的时间约为 687 min。

5 结 论

提出并建立了基于辐射传输方程的紫外光含散

射影响的大气传输模型, 详细介绍了采用劈裂法的求解方法。计算的结果与成熟的蒙特-卡罗方法进行比较, 表明该方法的计算结果可靠, 并且在计算所花费的时间上只有蒙特-卡罗方法的 1/4, 从而为“紫外光通信”、“紫外侦察”、“紫外成像”等紫外技术应用提供含散射影响的大气传输算法。

参 考 文 献

- Gray A. Shaw, Melissa Nischan, Mrinal Iyengar *et al.*. NLOS UV communication for distributed sensor systems[C]. SPIE,

- 2000, **4126**: 83~97
- 2 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684
杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 680~684
- 3 Liang Bo, Zhu Hai, Chen Weibiao. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1166~1172
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1166~1172
- 4 Lan Tian, Ni Guoqiang. Simulation research on ultraviolet atmospheric transmission in UV communication[J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 419~423
蓝天, 倪国强. 紫外通信的大气传输特性模拟研究[J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(4): 419~423
- 5 Wu Beiyang, Li Wei, Chen Hongbin *et al.*. The Method of Atmospheric Translation [M]. Beijing: Weather Press, 1998. 107~120
吴北婴, 李卫, 陈洪滨等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998. 107~120
- 6 Wang Pucai, Wu Beiyang, Zhang Wenxing. Comparison of UV simulation and measurements of surface ultraviolet radiation[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1999, **23**(3): 359~364
王普才, 吴北婴, 章文星. 紫外辐射传输模式计算与实际测量的比较[J]. *大气科学*, 1999, **23**(3): 359~364
- 7 T. Ohwada. Higher order approximation methods for the Boltzmann equation. [J]. *J. Comput. Phys.*, 1998, **139**: 1~14
- 8 F. Filbet, G. Russo. High order numerical methods for the space non-homogeneous Boltzmann equation [J]. *J. Comput Phys.*, 2003, **176**: 457~480
- 9 Claire Lavigne, Antoine Roblin. Experimental and theoretical studies of the aureole about a point source that is due to atmospheric scattering in the middle ultraviolet[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(7): 1251~1262
- 10 Jia Honghui, Chang Shengli, Yang Jiankun *et al.*. Monte Carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in non-line-of-sight ultraviolet communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955~960
贾红辉, 常胜利, 杨建坤等. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 955~960
- 11 Jia Honghui, Chang Shengli, Lan Yong *et al.*. Non-line-of-sight light propagation model based on Monte Carlo method [J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 2007, **18**(6): 689~697
贾红辉, 常胜利, 兰勇等. 大气光通讯中基于蒙特卡罗方法非视线光传输模型[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(6): 689~697
- 12 Feng Tao, Chen Gang, Fang Zujie. Atmospheric propagation model in non-line-of-sight optical scattering communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1522~1526
冯涛, 陈刚, 方祖捷. 非视线光散射通信的大气传输模型[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1522~1526