

文章编号: 2096-1618(2018)02-0119-05

基于碘分子滤波器的星载高光谱测温 激光雷达瑞利散射信号仿真

余 骁¹, 邓小波^{1,2}, 丁继烈^{1,2}, 胡元川¹, 邓洋洋¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:利用碘分子滤波器对大气云或气溶胶米散射信号的强吸收特性, 滤除了大部分大气中的云或气溶胶米散射效应的影响, 从而利用大气分子瑞利散射信号测量气温。采用星载高光谱激光雷达方程, CALIPSO 卫星二级产品, 大气分子多普勒展宽效应和碘分子滤波器传输函数计算仿真星载高光谱测温激光雷达瑞利散射信号。结果表明仿真的星载高光谱测温激光雷达瑞利散射信号能准确去除大气中云或气溶胶的影响, 能够对大气温度进行高精度反演。

关键词:星载高光谱激光雷达; 回波信号仿真; 大气温度

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.003

0 引言

温度是重要的大气状态参数。虽然 Fiocco 等^[1]就通过瑞利激光雷达成功地测量了大气温度, 但是由于大气中存在云和气溶胶米散射的影响, 普通的瑞利激光雷达难以大气温度进行高精度的测量。

激光雷达技术经过几十年的发展, 现已发展多种方法去除云和气溶胶米散射的影响。最常用的主要还是利用高光谱分辨率激光雷达 (HSRL) 进行大气散射中米散射信号与瑞利散射信号进行分离。高光谱分辨率激光雷达主要利用光谱滤波器达到分离两种信号的目的, 其工作原理主要归因于分子质量轻的卡巴纳斯-布里渊 (瑞利) 散射光谱比米散射光谱更宽。Fiocco 利用 Fabry-Perot 干涉仪 (FPI) 尝试将瑞利散射信号和米散射信号分离^[1]。Shimizu 等^[2]提出将原子吸收滤波器用于 HSRL 测量大气物理参量。华灯鑫等^[3]利用 FPI 实现了 24 h 连续观测。She 等^[4]使用钡原子吸收滤波器作为光谱滤波器测量了大气温度。郭金家等^[5]实现了碘分子滤波器的地基 HSRL 对大气温度的测量与探空气球数据对比有较好的一致性。干涉滤波器通过调节光程差更轻易地调谐为任意设计频率, 而且由于其价格低廉、性能稳定能成为星载激光雷达系统的关键设备。但是, 干涉仪滤波器仅能抑制粒子回波信号到 $10^{-1} \sim 10^{-3}$, 而吸收滤波器则能抑制米散射

信号至少 $10^{-5[6-8]}$ 。由于吸收滤波器表现出高的米散射抑制、稳定的传输特性, 并且不需要复杂的设备或调试, 因此许多 HSRL 系统也使用原子/分子吸收滤波器。

如今卫星上安装激光雷达进行遥感探测的优越性已经得到世界各国专家的肯定。而星载高光谱测温激光雷达则比普通的探空气球测量大气温度廓线具有覆盖范围广、不受风影响的优势是下一代卫星发展的趋势。文中介绍了基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达瑞利信号的仿真, 分析了高光谱分辨率激光雷达的探测原理及激光与大气相互作用的机理, 并给出星载高光谱测温激光雷达瑞利信号仿真结果。

1 理论和方法

1.1 高光谱激光雷达系统及原理

高光谱激光雷达是利用大气分子的卡巴纳斯-布里渊 (瑞利) 散射的宽频特性, 大气粒子 (云和气溶胶) 的米散射的窄频特性和窄带光谱滤波器把分子从激光雷达回波信号中分离出来。当单色激光照射到大气上时, 由于大气分子和粒子的随机运动, 后向散射的光谱将会被多普勒增宽^[9]。因为大气分子的运动速度和大气粒子运动速度的不同, 二者多普勒频移所产生的多普勒增宽有显著差异。由于吸收滤波器表现出比干涉仪滤波高的米散射抑制, 因此选用碘分子滤波器最大程度滤除米散射信号以保证瑞利散射信号的精度。

图1 为高光谱激光雷达分子通道探测原理图。表1 是需要仿真的星载高光谱激光雷达的一些参数。

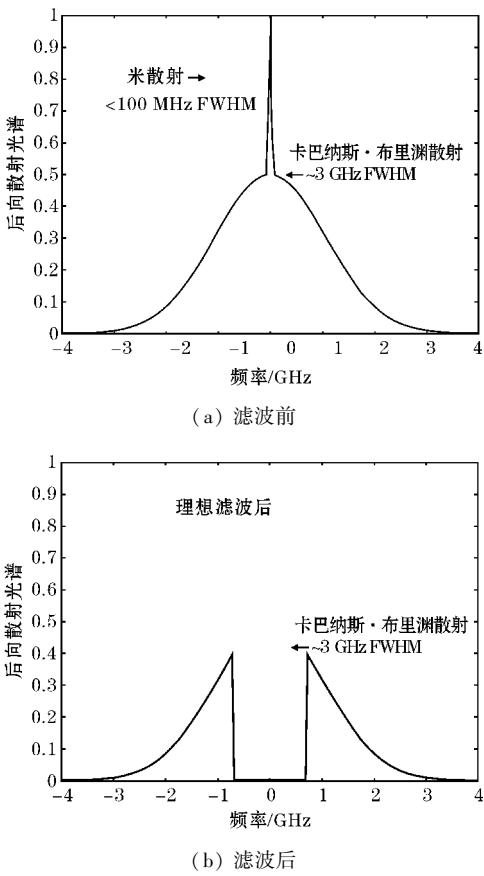


图1 高光谱瑞利回波信号原理图

表1 基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达系统参数

参数	参数值
脉冲能量/mJ	110
重复频率/Hz	20.16
脉宽/ns	20
轨道高度/km	705
星下点偏离度/degree	0.3
望远镜直径/m	1
视场角/mrad	1.3
检测器	PMT

1.2 激光雷达方程

图2 是参照 CALIPSO 卫星激光雷达系统^[10]设计的基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达系统示意。激光束发射到大气中并被大气分子和大气中所含的粒子散射。大气分子和粒子(云和气溶胶)的后向散射信号被激光雷达的接收望远镜所接收。经过一些光学系统的预处理后,后向散射信号经由偏振分光器(PBS)被正交分为两束偏振光(平行和垂直)。垂直

偏振光反射到光电倍增管1(PMT1)的信号,为垂直米散射信号。剩下的平行偏振光被分光器(BS)分为两束平行光,其中一束直接被反射到光电倍增管2(PMT2)的为平行米散射信号,另一束先经由碘分子滤波器再送入光电倍增管3(PMT3)的为平行瑞利散射信号。

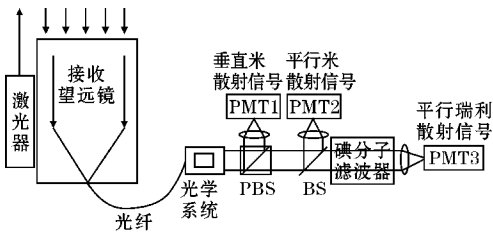


图2 基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达系统示意原理图

高光谱瑞利散射信号的激光雷达公式^[6]为

$$B^M(z) = [T_p \beta_p^{11}(z) + T_m \beta_m^{11}(z)] \exp(-2 \int_z^{z_{sat}} [\alpha_m(\xi) + \alpha_{O_3}(\xi) + \alpha_p(\xi)] d\xi) \quad (1)$$

其中, α_m, α_{O_3} 和 α_p 分别代表大气分子消光系数, 臭氧分子消光系数和大气粒子消光系数。 z 和 z_{sat} 分别是探测大气的不同高度和卫星所在轨道高度。 β_p^{11} 和 β_m^{11} 表示平行的大气粒子和分子的后向散射系数。分子的后向散射系数利用以下公式计算:

$$\beta_m = \alpha_m / \left(\frac{8\pi}{3} \right) = \frac{\pi^2 N}{N_0^2 \lambda^4} (n_0^2 - 1)^2 \frac{6 + 3\rho_n}{6 - 7\rho_n} \quad (2)$$

其中 $N = N_0 \frac{T_0 P(r)}{P_0 T(r)}$, N_0 为 $2.55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T_0 = 288 \text{ k}$, $P_0 = 1013.25 \text{ hPa}$ 。 ρ_n 是退极化(异性)因子, 折射指数在 xyz 3 个方向上的变化。这里 4 个波长处的退极化因子 ρ_n 分别为 0.029, 0.028, 0.027, 0.025。大气折射率 n_0 与波长的经验公式为

$$(n_0 - 1) \cdot 10^8 = 6432.8 + 2949810 / (146 - \lambda^{-2}) + 25540 / (41 - \lambda^{-2}) \quad (3)$$

由卡巴纳斯线计算的分子散射的退偏比 $\delta_m = \beta_m^\perp / \beta_m^{11} = 0.00366^{[11]}$ 结合分子的后向散射系数可以计算出平行大气分子散射系数 β_m^{11} 。HSRL 滤波器的参数相关的瑞利散射的滤波器光谱透过率 T_m 和米散射的滤波器光谱透过率 T_p , 能被表示为

$$T_m = \int R_m(\nu) t_m(\nu) d\nu \quad (4)$$

$$T_p = \int R_p(\nu) t_m(\nu) d\nu \quad (5)$$

其中, R_m 和 R_p 分别是分子后向散射和大气粒子后向散射光谱函数。 t_m 是星载高光谱滤波器的传输函数。对应的米散射的滤波器光谱透过率可以由碘分子滤波器定标得出, 而瑞利散射的滤波器光谱透过率 T_m 则由大气分子的多普勒展宽和碘分子滤波器传输函数

共同决定。大气分子的多普勒展宽则与大气分子所在层次的气温决定的,多普勒展宽能被表示为气温相关的函数,在频谱上表示为

$$R_i(v-v_0)=\frac{1}{\Delta v_i\sqrt{\pi}}\exp[-\frac{(v-v_0)^2}{\Delta v_i^2}] \tag{6}$$

$$\Delta v_i=(\frac{32k\ln(2)T}{\lambda^2M_i})^{1/2} \tag{7}$$

其中 v 是频率, v_0 是激光频率。下标 $i=m,p$ 分别表示大气分子和大气粒子参数符号。 Δv 是多普勒展宽的半高全宽, T 为气温, k 为玻尔兹曼常数, λ 为激光波长, M 为大气分子或大气粒子平均质量。而碘分子滤波器是属于星载仪器的一部分,其传输函数不受大气温度的变化影响只受卫星平台温度的影响,所以碘分子滤波器传输函数不随大气温度变化而变化。根据碘分子滤波器传输函数^[12-13]的结合算出的大气分子多普勒展宽频谱通过公式(4)计算出瑞利散射的滤波器光谱透过率 T_m 。米散射的滤波器光谱透过率 T_p , 则由于碘分子滤波器对大气米散射信号的抑制在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ^[14], 所以在这里假设其为 10^{-5} 。图 3 为举例说明不同气温的大气分子多普勒展宽。

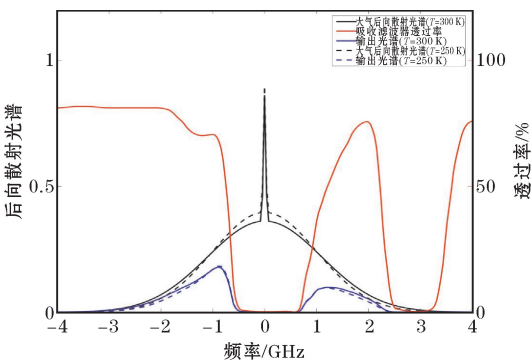


图 3 不同气温下 ($T=250\text{ k}$ 或 300 k) 的多普勒展宽和通过碘分子滤波器后的输出光谱

2 仿真流程图

大气粒子消光系数能从 CALIPSO 二级产品 (CAL_LID_L2_05 kmAPro-Standard-V4-10 和 CAL_LID_L2_05 kmCPro_Standard-V4-10) 中的云/气溶胶廓线中获取。这些文件中包括 5 km 分辨率的 GMAO 的分子数密度, 臭氧数密度, 云/气溶胶消光系数和温度廓线。首先利用获得的 CALIPSO 相关数据结合公式(2)~(7)能计算出平行大气分子后向散射系数, 大气分子消光系数, 臭氧分子消光系数及不同温度下的瑞利散射信号光谱透过率等参数, 再结合公式(1)的高光谱瑞利散射信号激光雷达方程得出包含温度信息的高光谱瑞利散射信号。高光谱瑞利散射信号能根据标定高度的大

气温度作为参考, 反演出不同高度下大气温度廓线。

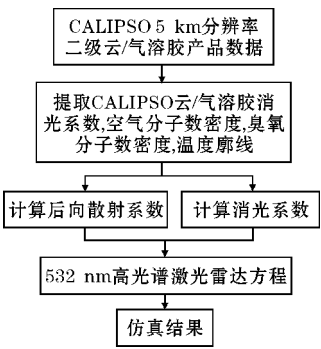
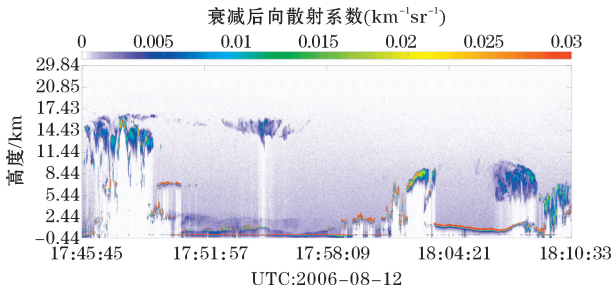


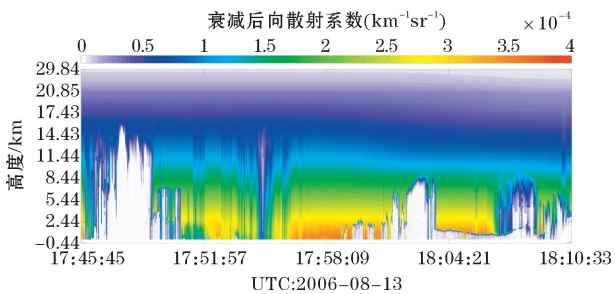
图 4 仿真流程图

3 仿真结果

使用 CALIPSO2006 年 8 月 13 号 UTC 17:45:45 到 18:10:33 的二级数据来仿真 532 nm 星载高光谱测温激光雷达瑞利散射回波信号。为了使仿真结果更加真实, 加入了泊松噪声模型和高斯白噪声模型来仿真高光谱测温激光雷达瑞利散射回波信号^[15-16]。



(a) CALIPSO 实测的平行后向散射信号



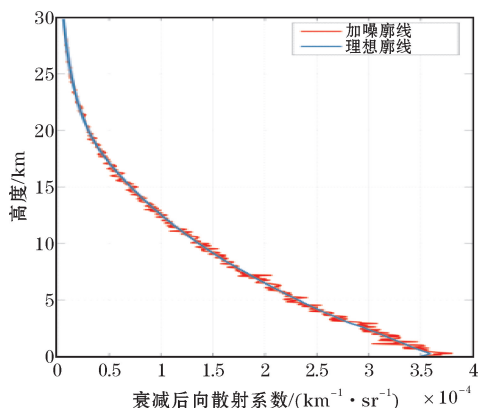
(b) 仿真的星载瑞利散射信号

图 5 基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达时空变化图

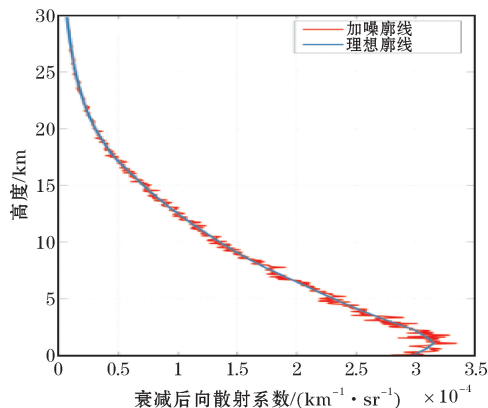
图 5 展示了在 CALIPSO 轨道上 5 km 分辨率的实测平行后向散射回波信号和仿真高光谱测温激光雷达瑞利回波信号。在与平行后向散射回波信号相比, 由于存在厚云或气溶胶层的消光效应使仿真的高光谱测温激光雷达瑞利回波信号减少了 2 个数量级。图 6 是从图 5 时空变化图中选出的典型的 3 种激光雷达廓线

类型,其光学厚度经过测算分别为0.025,0.91和9.43。发现图6(b)由于存在近地面气溶胶层的存在,在近地面气溶胶层时信号有了较严重衰减。而图6(c)由于具有两层厚云的存在,所以回波信号严重衰减。

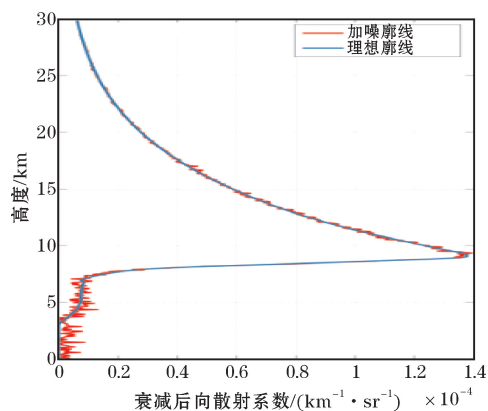
从图5和图6的结果看,大气粒子的信号被抑制,瑞利散射信号则被完全保留。但是由于厚云的消光作用的存在,利用星载高光谱测温激光雷达测量温度会测量不准确,这需要以后发展对云层不敏感的激光波段来探测大气温度。这足以表明,仿真的星载高光谱测温激光雷达瑞利散射信号能为后期的气温廓线反演提供有用信息。



(a) 晴空



(b) 气溶胶



(c) 厚云

图6 3种典型天气下的仿真星载高光谱测温激光雷达瑞利散射廓线

3 结束语

讨论了采用 CALIPSO 卫星二级产品数据来仿真基于碘分子滤波器的星载高光谱测温激光雷达瑞利散射回波信号的仿真方法。首先分析了星载 HSRL 方程,获取其各个要素(大气分子后向散射系数,大气分子消光系数,不同温度下瑞利散射光谱等)的模拟计算方法,再从 CALIPSO 卫星二级产品数据中获取计算所需数据,最后仿真出星载高光谱测温激光雷达瑞利散射回波信号。结果显示仿真的瑞利散射回波信号明显去除了米散射(云/气溶胶散射)信号的影响,从而能利用其探测反演大气温度。但是,仿真的瑞利散射回波信号也有一些缺陷,例如在厚云或气溶胶情况下,由于其强烈的消光作用,瑞利散射回波信号衰减很严重,这造成大气温度反演的不准确。

参考文献:

- [1] Fiocco G, Benedettimichelangeli G, Maischberger K, et al. Measurement of Temperature and Aerosol to Molecule Ratio in the Troposphere by Optical Radar[J]. Nature, 1971, 229(3): 78-79.
- [2] Shimizu H, Lee S A, She C Y. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters [J]. Applied Optics, 1983, 22(9): 1373.
- [3] Hua D, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar for daytime-temperature profiling of the troposphere[J]. Applied Optics, 2005, 44(7): 1315-22.
- [4] She C Y, Alvarez li R J, Caldwell L M, et al. High-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar measurement of aerosol and atmospheric profiles[J]. Optics Letters, 1992, 17(7): 541.
- [5] 郭金家, 闫召爱, 吴松华, 等. 高光谱分辨率激光雷达测量低层大气温度[J]. 光电子·激光, 2008, 19(1): 66-69.
- [6] Liu D, Yang Y, Cheng Z, et al. Retrieval and analysis of a polarized high-spectral-resolution lidar for profiling aerosol optical properties[J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13084.
- [7] Liu Z, Matsui I, Sugimoto N. High-spectral-resolution lidar using an iodine absorption filter for atmospheric measurements[J]. Optical Engineering,

- 1999,38(10):1661–1670.
- [8] Hoffman D S, Repasky K S, Reagan J A, et al. Development of a high spectral resolution lidar based on confocal Fabry-Perot spectral filters [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25):6233–6244.
- [9] 刘金涛, 陈卫标, 刘智深. 高光谱分辨率激光雷达同时测量大气风和气溶胶光学性质的模拟研究[J]. *大气科学*, 2003, 27(1):115–122.
- [10] Winker D M. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [J]. *Proc Spie*, 2003, 4893(9):1211–1229.
- [11] Adriani A, Fierli F, Cairo F, et al. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21):4425–4432.
- [12] Cook A L, Hostetler C A, Harper D B, et al. Airborne High Spectral Resolution Lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36):6734–6752.
- [13] Forkey J N, Lempert W R, Miles R B. Corrected and calibrated I2 absorption model at frequency-doubled Nd: YAG laser wavelengths. [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(27):6729–6738.
- [14] Esselborn M, Wirth M, Fix A, et al. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(3):346–358.
- [15] Sugimoto N, Liu Z. Simulation study for cloud detection with space lidars by use of analog detection photomultiplier tubes [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(9):1750–1759.
- [16] Liu Z, Voelger P, Sugimoto N. Simulations of the observation of clouds and aerosols with the Experimental Lidar in Space Equipment system [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(18):3120–3137.

Simulation of Spaceborne High Spectral Resolution Lidar Rayleigh Return Signal based on Iodine Filter

YU Xiao¹, DENG Xiao-bo^{1,2}, DING Ji-lie^{1,2}, HU Yuan-chuan¹, DENG Yang-yang¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: High spectral resolution lidar (HSRL) can be used for measuring air temperature. By taking advantage of the high Mie scattering rejection of the iodine filters, HSRLs can retrieve atmospheric temperature with residual Rayleigh scattering. As described in this study, a novel simulation technique based on the HSRL detection principle has been developed to simulate spaceborne HSRL return signals at 532 nm by using cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation (CALIPSO) cloud/aerosol extinction coefficients product, Doppler broadening theory, Rayleigh scattering theory, and iodine filter's transmission characteristics. The result shows that the simulated spaceborne HSRL Rayleigh return signals totally block the Mie scattering return signal and improves the quality retrieval of atmospheric temperature.

Keywords: spaceborne HSRL; return signal simulation; atmospheric temperature