

典型滤波器对星载高光谱分辨率激光雷达 532 nm 通道回波信号的影响

余 晓^{1,2}, 闵 敏², 张兴赢², 孟晓阳², 邓小波¹

(1. 成都信息工程大学 电子工程学院, 四川 成都 610225;
2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要: 高光谱分辨率激光雷达(High Spectral Resolution Lidar, HSRL)系统利用窄带滤波器将激光雷达回波信号中的大气粒子(云或气溶胶)散射和分子散射成分分开,提升了云或气溶胶光学特性的反演质量。提出了一种基于 HSRL 探测原理的 HSRL 回波信号模拟方法,其原理是利用 CALIPSO 云/气溶胶消光系数产品和数值天气预报数据被用来仿真星载 HSRL 532 nm 回波信号。两种典型的窄带光谱滤波器:FPI(Fabry-Pérot Interferometer)和碘吸收滤波器,作为分子通道滤波器的性能通过仿真的星载 HSRL 回波信号进行分析。对三种典型:晴空、卷云、气溶胶(两层厚云)的 HSRL 回波廓线进行详细的敏感分析表明碘分子吸收滤波器的性能明显优于 FPI 滤波器,其中碘吸收滤波能保持可以忽略不计的相对偏差($<4.0 \times 10^{-3}\%$),这是由低光学厚度(<1.0)的粒子后向散射效应引起的。但是,如果 FPI 滤波器的粒子后向散射透过率能保持在 10^{-3} 水平以下,其仍不失为是一个好的选择。

关键词: 星载高光谱分辨率激光雷达; 仿真; 回波信号; 光谱滤波器

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1230008

Effect of typical filters on return signals of spaceborne HSRL channel at 532 nm

Yu Xiao^{1,2}, Min Min², Zhang Xingying², Meng Xiaoyang², Deng Xiaobo¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
2. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The future high spectral resolution lidar (HSRL) system employs a narrow spectral filter to separate the particulate (cloud/aerosol) and molecular scattering components in the lidar return signals, which improves the quality of the retrieved cloud/aerosol optical properties. A simulation method of HSRL return signal based on HSRL detection principle was presented. The principle was that the CALIPSO cloud/aerosol extinction coefficient product and numerical weather forecast data were used to simulate the spaceborne HSRL 532 nm return signal. The performance of two typical spectral filters, i.e., Fabry-Pérot interferometric (FPI) and iodine absorption filters, were analyzed using the simulated spaceborne HSRL return signals when they used as spaceborne HSRL molecular channel filter. The

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0504001, 2016YFB0500705); 国家自然科学基金(41475032, 41571348, 41601400, 41775028)

作者简介: 余晓(1992-), 男, 硕士生, 主要从事星载激光雷达方面的研究。Email: 274779518@qq.com

导师简介: 张兴赢(1978-), 男, 研究员, 博士, 主要从事卫星大气成分遥感及其应用方面的研究。Email: zxy@cma.gov.cn

sensitivity analysis of three typical HSRL echo profiles (clear sky, cirrus cloud, aerosol, two-layer thick cloud) shows that the performance of iodine absorption filter was obviously better than that of FPI filter. The iodine absorption filter can maintain negligible relative deviation ($<4.0 \times 10^{-3}\%$), which was caused by the backward scattering effect of particles with low optical thickness (<1.0). However, an FPI filter would still be a good choice for spaceborne HSRL systems if its particulate backscattering transmittance can be maintained below a level of 10^{-3} .

Key words: spaceborne HSRL; simulation; return signal; spectral filter

0 引言

云和气溶胶都被认为是生物圈、水循环圈和地球气候系统辐射收支的重要调节者^[1-3]。使用具有主动回波信号的星载激光雷达探测全球云和气溶胶具有许多优势,已有的星载激光雷达包括云-气溶胶激光雷达和红外探测者卫星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO) 和激光雷达空间技术试验 (Lidar In-space Technology Experiment, LITE)^[1-2]。作为 CALIPSO 系统先导试验星载激光雷达 LITE 是装载在航天飞机上的三波长 (355、532、1 064 nm) 激光雷达^[1],其能观测和研究全球云和气溶胶的气候效应。2006 年 4 月, CALIPSO 成功发射并持续观测超过 11 年^[2],它是由一个双波长偏振(正交偏振 532 nm 和 1 064 nm)激光雷达、红外成像辐射计和宽幅相机组成。与被动遥感仪器相比, CALIPSO 能更精确地测量云/气溶胶的特性和提供全球云/气溶胶的垂直廓线。它对薄卷云尤其敏感^[4-7]。一般来说,星载激光雷达通过计算经典的单次散射近似的激光雷达方程来探测云/气溶胶的消光系数或大气柱的光学厚度^[8]。单个激光雷达等式理论上是无法求得两个未知量的(云和气溶胶粒子的后向散射系数和消光系数)^[8-9];因此假设消光后向散射比(Extinction-to-backscattering ratio)或者说激光雷达比(Lidar Ratio, LR)被引入云/气溶胶消光系数廓线的反演^[9-10]。传统激光雷达的反演精度与给定的 LR 密切相关,而 LR 高度依赖于大气粒子(云/气溶胶)尺寸分布,分量,形状等。CALIPSO 运算算法假定了六种不同类型的气溶胶 LR 分类和消光算法,包括清洁大陆、清洁海洋、灰尘、污染大陆、污染灰尘和烟雾^[10]。

但是高光谱激光雷达技术通过引入附加的高光谱激光雷达方程克服了需要假设 LR 的局限。这个附加的方程理论上可以通过新的探测机制从(High Spectral Resolution Lidar, HSRL)的回波信号推断出来^[11],它利用窄带滤波器只接收分子的卡巴纳斯-布里渊(瑞利)散射。简言之,新的 HSRL(只有分子后向散射和消光系数)和原始的激光雷达方程能轻易且准确地反演真实的 LR 而不是依赖于假设 LR。严格来说, HSRL 系统一般利用干涉光谱滤波器^[11-13]或原子/分子吸收光谱滤波器^[14-15]来分离两种不同的散射回波信号。光谱滤波器的工作原理主要归因于由于分子质量轻的卡巴纳斯-布里渊散射光谱比米散射光谱更宽。因为这是由分子和粒子的速度分布(热运动)引起的多普勒效应引起的光谱展宽。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。干涉滤波器由于其价格低廉、性能稳定能成为星载激光雷达系统的关键设备^[11-13]。但是,干涉滤波器仅能抑制粒子回波信号因子到 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 之间,而吸收滤波器则能抑制米散射信号因子至少 10^{-5} ^[11-15]。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。

尽管星载 HSRL 有许多优点,但星载 HSRL 方案仍处于规划阶段^[16]。中国第一个星载高光谱激光雷达(Spaceborne Aerosol and Carbon Detection Lidar, SACDL)正在研发中预计 2019 或 2020 年发射。SACDL 有三个 532 nm 通道(两个正交偏振通道和平行 HSRL 通道)和一个 1 064 nm 通道来探测云/气溶胶特性。但是,因为对仪器性能、稳定性和预算等的不确定,在星载 HSRL 上使用哪种光谱滤波器仍有争论。因此,文中的主要目标是对两种光谱滤波器在

星载 HSRL 回波信号尤其是粒子散射效应的质量进行评估和分析。由于还没有真实的星载 HSRL 观测数据,所以开发了一种评估这些效应的数值模拟技术来仿真回波信号。另外,作为预研项目,这种技术也是发展 SACDL 可行性算法和未来其他数据应用的关键。

1 理论和方法

1.1 HSRL 方程

因为卡巴纳斯-布里渊散射(宽)和米散射(窄)在光谱上的宽度不同,星载 HSRL 利用窄带光谱滤波器准确地把粒子散射成分和分子散射成分从回波信号中分离。HSRL 的探测原理如图 1(a)和图 1(b)所示。在激光接触到大气后,后向散射的激光由于大气分子和粒子随机运动将被多普勒展宽。由于不同的随机运动速度,多普勒展宽的大气分子光谱将会比粒子的宽很多。图 1(a)中黑实线的窄尖峰和翼区分别代表叠加的米散射光谱和分子后向散射光谱。图 1(b)展示了窄带光谱滤波器的效果,输出纯粹分子散射光谱而完全抑制掉粒子散射能量^[7]。注意图 1(b)的窄带光谱滤波器是理想状态下的。实际上它不可能完全抑制掉粒子散射回波信号的光谱。将在后面的章节里评估两种不同窄带光谱滤波器的在星载 HSRL 回波信号上的表现效果。

图 1(c)是星载偏振 HSRL 系统的原理图。接收到的混合了分子和粒子信息的后向散射信号由偏振分光镜(PBS)分为垂直和平行光束。垂直光束打到光路旁的第一个光电倍增管上探测垂直偏振信号。剩下的平行光束继续被分光镜(BS)分离为两束独立的平行光束,一部分被第二个光电倍增管接收探测平行偏振信号,另一部分先由 HSRL 滤波器滤波再由第三个光电倍增管接收探测分子散射信号。

图 1(c)中所示的垂直,平行和分子通道星载回波信号组成下列方程:

$$P_R^\perp(z) = \frac{C^\perp E_0}{z^2} [\beta_p^\perp(z) + \beta_m^\perp(z)] \exp(-2\tau) \quad (1)$$

$$P_R^\parallel(z) = \frac{C^\parallel E_0}{z^2} [\beta_p^\parallel(z) + \beta_m^\parallel(z)] \exp(-2\tau) \quad (2)$$

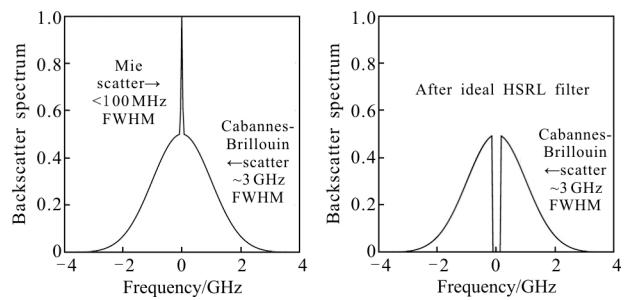
$$P_R^M(z) = \frac{C^M E_0}{z^2} \beta_m^\parallel(z) \exp(-2\tau) \quad (3)$$

式中: C^\perp , C^\parallel 和 C^M 分别代表垂直、平行和分子通道的激光雷达系统常数; P_R^\perp , P_R^\parallel 和 P_R^M 分别代表垂直、

平行和分子通道的回波信号; E_0 为 532 nm 的单脉冲能量; z 为星载激光雷达望远镜到散射体的距离; β_p^\perp 和 β_p^\parallel 为垂直和平行通道的大气粒子后向散射系数; β_m^\parallel 为平行大气分子后向散射系数; τ 为光学厚度。 τ 被表示为:

$$\tau = \int_z^\infty [\alpha_m(\xi) + \alpha_o^3(\xi) + \alpha_p(\xi)] d\xi \quad (4)$$

式中: α_m , α_o^3 和 α_p 分别代表分子、臭氧和粒子消光系数; ξ 为积分变量。

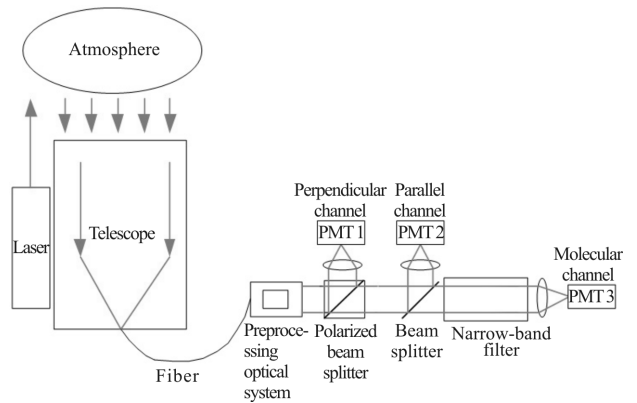


(a) 532 nm 的大气分子和粒子的光谱透过率

(b) 理想滤波下 532 nm 分子输出光谱

(a) Spectral transmission of the atmospheric molecules and particulates at 532 nm

(b) Molecular channel output spectrum of the ideal filter at 532 nm



(c) 星载偏振高光谱激光雷达原理图

(c) Schematic of the spaceborne polarized high spectral resolution lidar system

图 1 星载 HSRL 光谱滤波器和系统示意图

Fig.1 Schematic illustration of the spaceborne HSRL spectral filter and system

为简化公式,引入衰减散射系数 $B = P_R z^2 / E_0 C$,它是规范化和距离订正后激光雷达回波信号。公式(1)~

(3)被简化为^[18]:

$$B^{\perp}(z)=[\beta_p^{\perp}(z)+\beta_m^{\perp}(z)]\exp(-2\tau) \quad (5)$$

$$B''(z)=[\beta_p''(z)+\beta_m''(z)]\exp(-2\tau) \quad (6)$$

$$B^M(z)=\beta_m''(z)\exp(-2\tau) \quad (7)$$

值得注意的是 β_m'' 和 β_m^{\perp} 能通过预先计算的数值天气预报数据的分子数密度求得。公式(5)-(7)的三个未知量能通过自身求出。

1.2 仿真方法

笔者的目标是用仿真的方法来评估两种不同光谱滤波器在星载 HSRL 信号上影响。CALIPSO 系统仅包括传统的 532 nm 和 1 064 nm 信号,而没有实际存在的 532 nm 星载 HSRL 高光谱(分子)信号实例。因此,改进实际的 CALIPSO 回波信号来仿真星载 HSRL532 nm 通道回波信号。结合公式(4)和(7)来仿真分子通道回波信号得到:

$$B^M(z)=\beta_m''(z)\times\exp(-2\int_z^{\infty}[\alpha_m(\xi)+\alpha_{O_3}(\xi)+\alpha_p(\xi)]d\xi) \quad (8)$$

其中分子(瑞利)消光截面能被求得^[19-20]:

$$\sigma_m=\frac{8\pi^3}{3N_0\lambda^4}(n_0-1)^2\frac{6+3\rho_h}{6-7\rho_h} \quad (9)$$

式中: n_0 和 N_0 分别代表标准大气的复折射指数和空气分子数密度; λ 为入射光波长(532 nm); ρ_h 为各向异性因子。从 NASA 的 GMAO (Global Modeling and Assimilation Office)提供的数据中获取实时的大气分子数密度 N_m ^[18],GMAO 获取大气分子数密度方法则是根据理想气体状态方程和数值预报的温湿压廓线计算获取。然后通过分子消光截面分别计算分子消光系数($\alpha_m=N_m\sigma_m$)和后向散射系数($\beta_m=\alpha_m/(8\pi/3)$)。由卡巴纳斯线计算的分子散射的退偏比($\delta_m=\beta_m^{\perp}/\beta_m''$)为 0.003 66^[21]。所以平行后向散射系数 β_m'' 为后向散射系数的固定比率(0.996 4)。因此 β_m'' 能通过分子瑞利消光截面(σ_m)被计算出来。也能获取 532 nm 在不同温度下的臭氧吸收截面 α_{O_3} 和 GMAO 的臭氧数密度廓线来计算臭氧消光系数 α_{O_3} 。

由于星载 HSRL 回波信号中不能完全屏蔽米散射,引入平行瑞利散射透过率 κ_m 和平行米散射或粒子散射透过率 κ_p 来界定光谱滤波器的性能。它们被定义为:

$$\kappa_m=\int s_m''(v)t_m(v)dv \quad (10)$$

$$\kappa_p=\int s_p''(v)t_m(v)dv \quad (11)$$

式中: s_m'' 和 s_p'' 分别为平行分子散射和平行粒子散射的光谱传输函数; t_m 为 HSRL 光谱滤波器的光谱传输函数。联合公式(10)和(11)后,公式(8)被重写为:

$$B^M(z)=[\kappa_p\beta_p''(z)+\kappa_m\beta_m''(z)]\times\exp(-2\int_z^{\infty}[\alpha_m(\xi)+\alpha_{O_3}(\xi)+\alpha_p(\xi)]d\xi) \quad (12)$$

由于现存的高光谱激光雷达方案中会前置一个带宽较宽的 FPI 用以滤除太阳背景噪声^[22],之后再送入分子通道的高光谱滤波器,公式(12)被重新表示为:

$$B^M(z)=[\kappa_{pre,p}\kappa_p\beta_p''(z)+\kappa_{pre,m}\kappa_m\beta_m''(z)]\times\exp(-2\int_z^{\infty}[\alpha_m(\xi)+\alpha_{O_3}(\xi)+\alpha_p(\xi)]d\xi) \quad (13)$$

式中: $\kappa_{pre,p}$ 和 $\kappa_{pre,m}$ 分别表示前置 FPI 滤波器对瑞利散射和米散射的透过率。在此选取间距为 0.886 mm,反射比为 0.91 的 FPI 滤波器作为前置滤波器滤除太阳背景辐射噪声^[11]。经过计算 $\kappa_{pre,p}$ 的值近似为 1, $\kappa_{pre,m}$ 的值近似为 0.97,所以对前置滤波器对大气粒子米散射几乎没抑制,对大气分子瑞利散射会产生一些抑制。图 2 为前置 FPI 滤波器滤除太阳背景噪声的原理图。

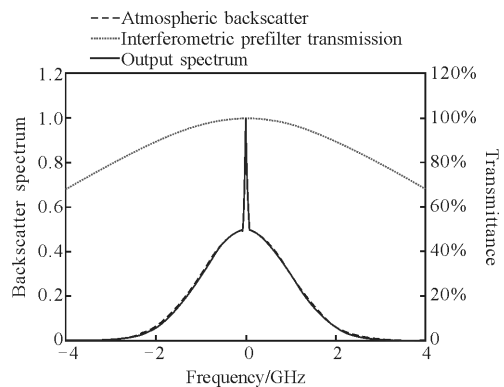


图 2 前置 FPI 滤波器滤除太阳背景噪声原理图

Fig.2 Schematic of spectral transmission of FPI pre-filter to filtering background noise

大气粒子消光系数 α_p 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, 臭氧数密度和云/气溶胶消光系数。通过 15 点平均 CALIPSO 一级数据(0.333 km 分辨率)来匹配 CALIPSO 二级产品的分辨率。由之前计算的 光学厚度来计算双程透过率来消除激光雷达方程中消光部分的影响, 可以求得 532 nm 平行粒子后向散射系数 β_p'' 。图 3 详细展示了仿真 HSRL 532 nm 分子通道回波信号的流程图。

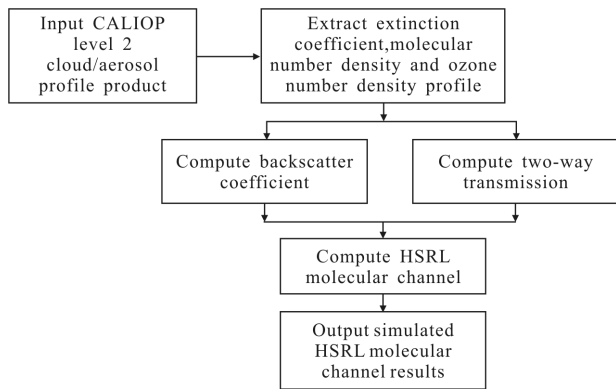


图 3 仿真星载 HSRL 532 nm 分子通道信号流程图

Fig.3 Simulation flow chart showing of molecular channel return signals of spaceborne HSRL 532 nm

2 结果

2.1 仿真的 HSRL 回波信号

基于公式(13)和图 3 的流程图, 使用 CALIPSO 于 2006 年 8 月 13 号 UTC 17:33:21 到 18:19:46 的二级数据来仿真 532 nm HSRL 分子通道回波信号。根据图 1(b), HSRL 系统的窄带光谱滤波器不能完全屏蔽掉米散射光谱也会屏蔽掉一部分分子散射光谱。因此假设理想 HSRL 光谱滤波器的平行米散射透过率和平行瑞利散射透过率分别为 0 和 0.6。

仿真得到的衰减后向散射系数转化为对应激光雷达系统的光子数, 在此基础上加上符合泊松分布的光子到达率、设定的太阳背景噪声及暗电流噪声, 最后得到的光子数再转化为衰减后向散射系数, 就得到了笔者的添加噪声的仿真结果^[23]。

图 4 描绘了平行、垂直和仿真 HSRL 分子通道在 CALIPSO 轨道上 5 km 分辨率的回波信号。在与平行通道回波信号和垂直通道回波信号相比时, 仿真的 HSRL 分子通道回波信号由于存在严重的云或气溶胶的消光效应减少了两个数量级。

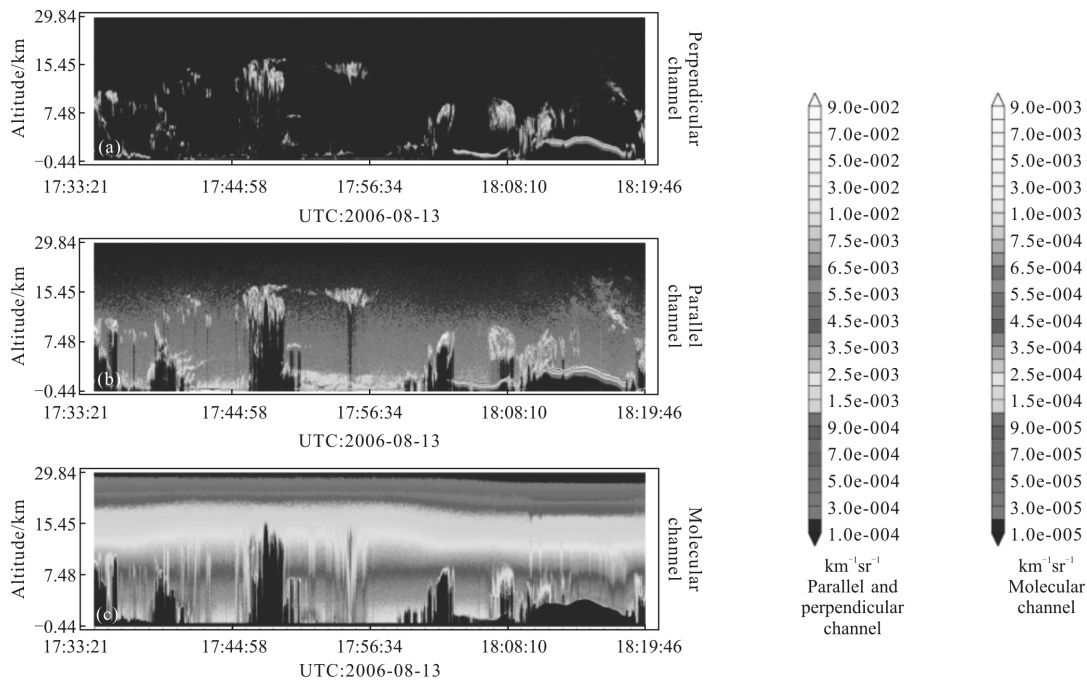


图 4 5 km 时间序列的 CALIPSO 平行通道, 垂直通道和仿真的高光谱分辨率激光雷达分子通道的时间序列

Fig.4 Time series of the 5 km CALIPSO parallel channel, perpendicular channel, and simulated high spectral resolution lidar molecular

2.2 大气粒子的误差分析

通过 HSRL 方程组合 HSRL 滤波器的传输函数特性,发现了影响 HSRL 分子通道信号质量的重要因素。由于计算光学厚度的独立性平行米散射和瑞利散射透过率对消光系数没有影响,但是平行米散射和瑞利散射透过率严重地影响了后向散射系数的模拟和测量。文中两种典型窄带滤波器:碘分子吸收滤波器^[14-15]和 FPI 滤波器^[11-13]。

这两种滤波器的透过率,都能通过理论的计算而得出。其中,FPI 滤波器的透过率函数是艾里函数(Airy Function),其透过率谱线只与谐振腔的反射比和谐振腔宽度相关,与仪器温度无关^[20]。而碘分子吸收池的吸收谱线宽度,根据 Forkey 等人的研究,其透过率谱线则是与吸收池长度、温度和压力的函数^[25]。在这里选用长度为 254 mm,压力为 93.325 4 Pa 在不同温度下的吸收谱线作对比,见图 5(1 Torr=133.32 Pa)。

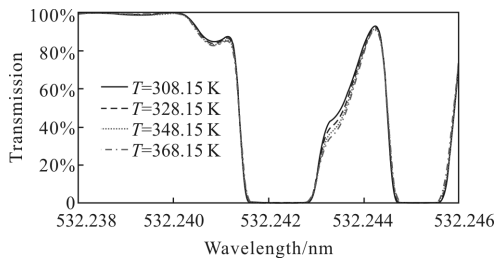


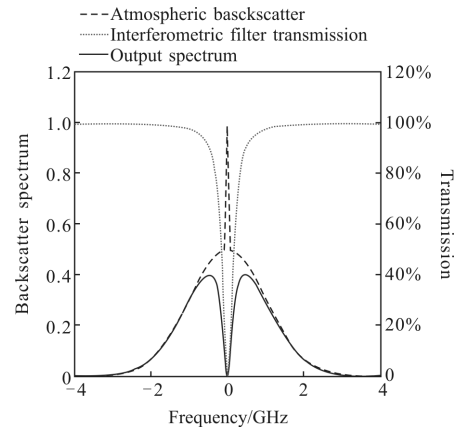
图 5 长为 254 mm,压力为 93.325 4 Pa(0.7 Torr)在不同温度下的碘分子吸收池吸收谱线

Fig.5 Absorption spectra iodine absorption cell at different temperature at a cell pressure of 93.325 4 Pa (0.7 Torr) at a length of 254 mm

从图 5 中,可以看出温度对碘分子吸收池吸收谱线的影响是存在的,其温度越低保留的瑞利散射信号就越多。所以未来的星载激光雷达仪器温度控制是非常关键且必不可少的。图 5 表示的两种典型滤波器在 532 nm 的相关输出谱是理想化的模型。

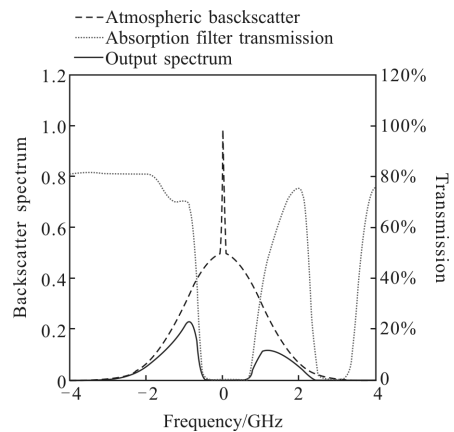
图 6(a)中,基于公式(10)计算的 FPI 滤波器的平行瑞利散射透过率近似为 0.734,而平行米散射透过率大

约为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ ^[13]。同理,碘分子滤波器的平行瑞利散射和米散射透过率分别大约是 0.279 和 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ^[26]。



(a) FPI 滤波器^[11,27]

(a) FPI filter^[11,27]



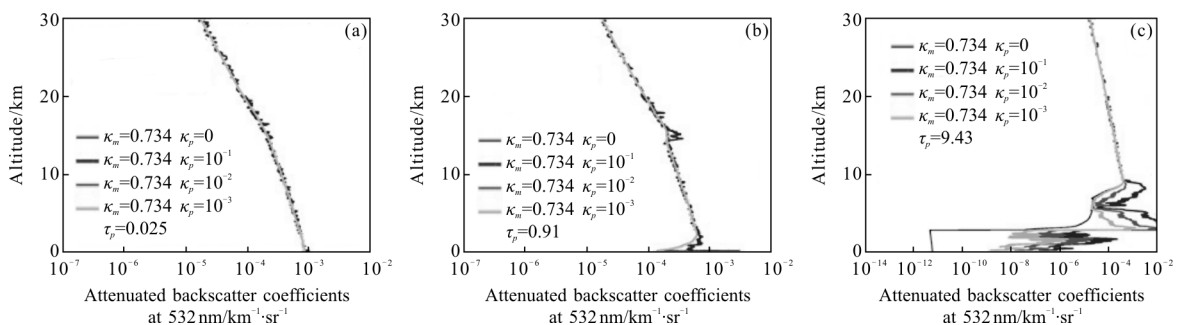
(b) 碘分子吸收滤波器^[28]

(b) Iodine absorption filter^[28]

图 6 两种典型星载 HSRL 532 nm 光谱滤波器的光谱透过率原理图

Fig.6 Schematic of the spectral transmission of the two typical spaceborne HSRL spectral filters at 532 nm

图 7 所示为从图 3 中选取晴空(UTC 17:56:57)见图(a)、(b),有卷云和气溶胶(UTC 17:53:40)见图(b)、



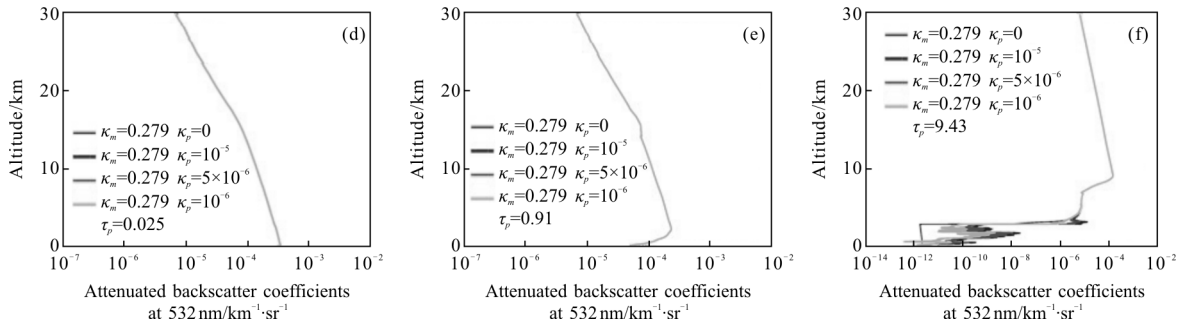


图 7 仿真的三种典型天气下晴空、卷云和气溶胶、两层厚云不同透过率参数的两种典型滤波器的 HSRL 分子通道回波信号廓线
 Fig.7 Simulated HSRL molecular channel return signal profiles of two typical spectral filters in three typical weather conditions, clear sky, cirrus cloud and aerosol, two-layer thick cloud with different transmittances parameters

(e), 两层厚云(18:03:06)见图(c)、(f)三种典型的天气情况的两种滤波器(FPI 和碘分子滤波)作为代表在不同透过率参数下进行分析。

图 7 表示仿真的 HSRL532 nm 分子通道回波信号廓线,图 7(a)~(c)为 FPI 滤波器的,图 7(d)~(f)为碘分子滤波器的。两种典型光谱滤波器的瑞利散射透过率的值使用前面提到的积分值。对两种典型滤波器的三种不同的米散射透过率进行敏感性分析。在图 7(a)~(c)中,能看出 HSRL 回波信号通过 FPI 滤波器的大气粒子谱引入的误差,尤其是在大气特征层次(云或气溶胶)具有更强的消光的时候更为明显。相比于 FPI 滤波器,碘分子滤波器引入的误差

在消光较小的时候可以忽略。只有大气特征层次具有相对较大的粒子消光,如透光厚云层,会在分子通道回波信号中引入相当多的误差(图 7(f))。

图 8 为 HSRL 回波信号的偏差廓线,该偏差主要是由光谱滤波器的米散射透过率造成的影响。偏差为两种典型光谱滤波器的 HSRL 回波信号减去理想光谱滤波器的 HSRL 回波信号。从图 8 中,可以看出碘分子滤波器(图(d)~(f))的测量误差远远小于 FPI(图(a)~(c))的测量误差,三种典型的天气情况同图 7 所示,但是第三种天气条件(两层厚云)下,如图 8(c)和(f)所示。图 9 则表示 HSRL 回波信号的相对偏差(Relative Bias, RB)廓线,其相对偏差是由

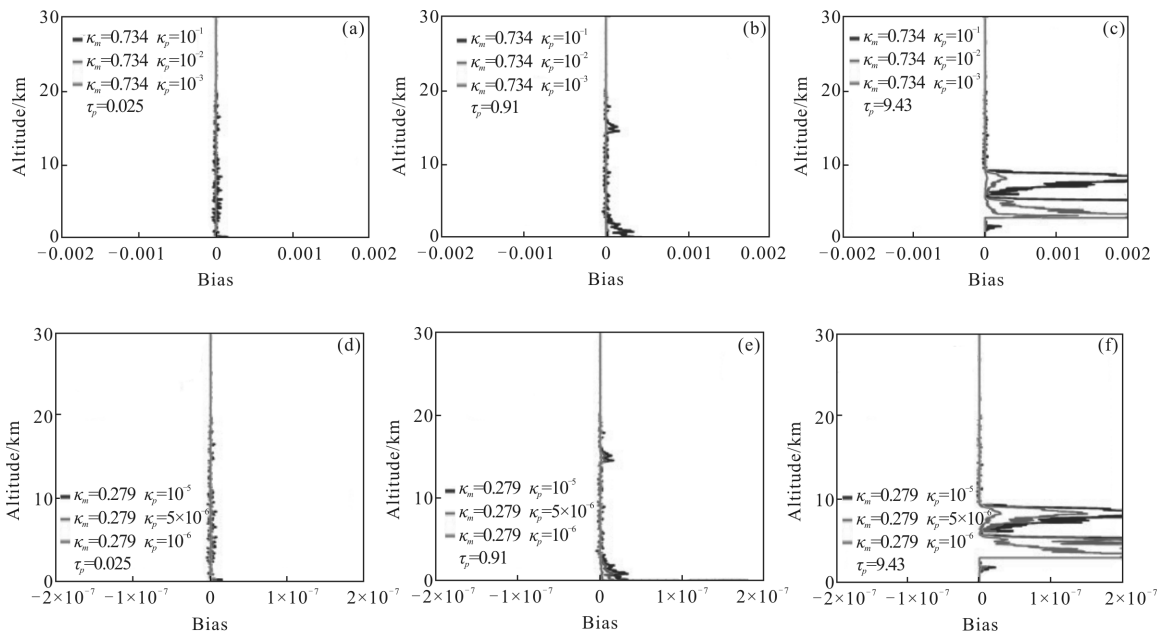


图 8 三种典型天气条件下晴空、卷云和气溶胶、两层厚云两类滤波器的 HSRL 532 nm 分子通道回波信号偏差廓线
 Fig.8 Bias profile of the two filters on three typical weather conditions (clear sky, cirrus cloud and aerosol, two thick clouds)

光谱滤波器的米散射及瑞利散射透过率引起的。相对偏差表示为：

$$RB = \frac{[(\kappa_{pre,m}\kappa_m\beta_m'' + \kappa_{pre,p}\kappa_p\beta_p'' \exp(-2\tau)) - [\kappa_{pre,m}\kappa_m\beta_m'' \exp(-2\tau)]}{\kappa_{pre,m}\kappa_m\beta_m''} \times 100\% = \frac{\kappa_{pre,p}\kappa_p\beta_p''}{\kappa_{pre,m}\kappa_m\beta_m''} \times 100\% \quad (14)$$

用前面提到的瑞利和米散射透过率值仿真的 FPI 滤波器(见图 9(a)-(c))的 HSRL 系统具有较大的偏差。正如图 9(a)和(d)所示,在碘分子滤波器引入的相对偏差比 FPI 滤波器小大约三个数量级,整层

大气廓线的碘分子滤波器的相对偏差大约 0.01%。但当激光束穿过透光厚特征层次(云或气溶胶)时,由于大气粒子的影响,光谱滤波器的相对偏差急剧增加,如图 9(c)和(f)所示。

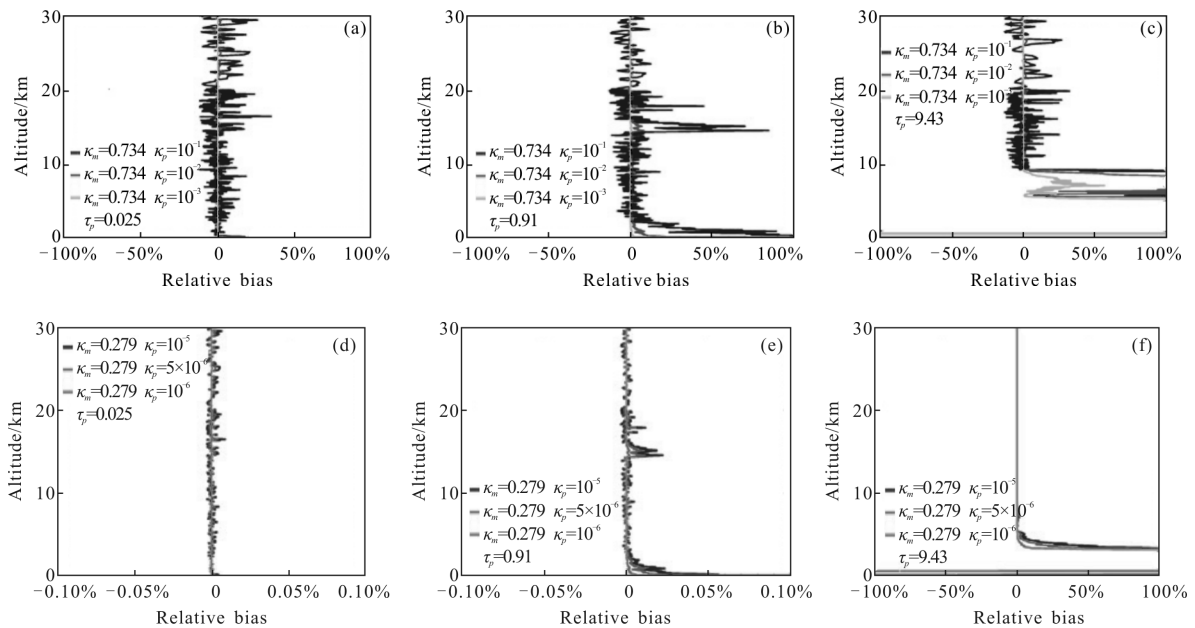


图 9 三种典型天气条件下晴空、卷云和气溶胶、两层厚云两类滤波器的 HSRL 532 nm 分子通道回波信号相对偏差廓线

Fig.9 Relative bias profile of the two filters on three typical weather conditions (clear sky, cirrus cloud and aerosol, two thick clouds)

表 1 列出了三种典型天气条件下两类滤波器的 HSRL 回波信号整层大气平均相对偏差。首先, HSRL 532 nm 分子通道回波信号的整层大气平均相对偏差对两种典型光谱滤波器在晴空条件下来说都极其微小,以至可以忽略不计。然而在大气粒子光学厚度为 0.91 的天气条件下(卷云和气溶胶),FPI 滤波器的相对偏差从 0.135%急剧增加到 13.5%。相反,由于碘分子滤波器相对较小的米散射透过率分子通道回波信号的相对偏差依旧可以忽略(最大值为 $3.56 \times 10^{-3}\%$)。从表 1、图 8(c)和(f)及图 9(c)和(f)来看,在第三个天气条件下(总的大气粒子光学厚度为 9.43,两层厚云),两种不同滤波器的相对偏差都急剧增加,其带来的误差主要来自于下面透光厚云的消光。需要注意的是衰减后向散射系数的测量准确性与平行米散射透过率成反比。对透光薄卷云(光学厚

度 < 1.0)和气溶胶层来说^[29],当米散射透过率为 10^{-1} 时,FPI 滤波器的 HSRL 回波信号的不确定性约为 13%。但是当米散射透过率达到 10^{-3} 时,相对偏差为 0.135%,认为是该相对误差对反演的影响可以忽略。

尽管碘分子滤波器有更小的瑞利散射透过率,但由于其极其小的米散射透过率减小了引入的大气粒子噪声。表 1 中透光薄层次造成的较低的相对偏差(< 0.004%)说明了碘分子滤波其在获取透光薄卷云或气溶胶特性时的优越性。但是 FPI 滤波器和碘分子滤波器的星载 HSRL 回波信号在透光厚云或气溶胶层时都不能用于反演,由于米散射效应造成的过大误差。总的来说,对星载 HSRL 系统来说,碘分子吸收滤波器展现了比 FPI 滤波器更好的性能。但是如果 FPI 滤波器的米散射透过率能保持在 10^{-3} 以下时,其测量误差可以接受。

表 1 两种典型窄带滤波器大气粒子散射透过率引入的相对偏差

Tab.1 Relative bias of atmospheric particulate scattering transmittance induced by two typical spectral filters

Filter name	Filter parameters	Total mean relative bias 1	Total mean relative bias 2	Total mean relative bias 3
FPI filter	$\kappa_m=0.734, \kappa_p=10^{-1}$	$9.34 \times 10^{-1}\%$	$1.35 \times 10^1\%$	$4.73 \times 10^7\%$
	$\kappa_m=0.734, \kappa_p=10^{-2}$	$9.34 \times 10^{-2}\%$	1.35%	$4.73 \times 10^6\%$
	$\kappa_m=0.734, \kappa_p=10^{-3}$	$9.34 \times 10^{-3}\%$	$1.35 \times 10^{-1}\%$	$4.73 \times 10^5\%$
Iodine absorption filter	$\kappa_m=0.279, \kappa_p=10^{-5}$	$2.45 \times 10^{-4}\%$	$3.56 \times 10^{-3}\%$	$1.24 \times 10^4\%$
	$\kappa_m=0.279, \kappa_p=10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-4}\%$	$1.78 \times 10^{-3}\%$	$6.22 \times 10^3\%$
	$\kappa_m=0.279, \kappa_p=10^{-6}$	$2.45 \times 10^{-5}\%$	$3.56 \times 10^{-4}\%$	$1.24 \times 10^3\%$

3 结 论

文中介绍了星载偏振 HSRL 分子通道 532 nm 的回波信号基于 HSRL 激光雷达方程、CALIPSO 二级产品和数值天气预报数据仿真的方法。为了使仿真结果更真实,加入了散粒噪声和高斯噪声。因为新加入的高光谱通道,星载 HSRL 不仅能检测云和气溶胶的垂直分布,也能真实反演云和气溶胶的光学特性。

在仿真回波信号的基础上,笔者对两种典型滤波器(FPI 和碘分子吸收滤波器)在星载 HSRL 系统上分子通道的滤波器性能进行了敏感性分析。选取三种典型天气条件下(晴空,卷云和气溶胶,两层厚云)偏差及相对偏差廓线分析了两种典型滤波器的不同平行瑞利和米散射透过率的影响。最后结果显示相对小的平行米散射透过率比平行瑞利散射透过率更重要,因为两种典型滤波器瑞利散射透过率的差异(即 0.734 和 0.279)比平行米散射透过率的差异(超过两个数量级)小得多。总体而言,碘分子吸收滤波器作为分子通道滤波器在测量准确性方面更加优势。因此碘分子吸收滤波器更适合被安装在星载 HSRL 系统中。但是由于 FPI 滤波器的稳定性和廉价性,只要保证 FPI 滤波器的大气粒子后向散射(米散

射)透过率稳定在 10^{-3} , 星载 HSRL 系统也能使用 FPI 滤波器作为其分子通道光谱滤波器。

参考文献:

- [1] Winker D M, Couch R H, McCormick M P. An overview of LITE: NASA's lidar in-space technology experiment [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 164-180.
- [2] Winker D M, Pelon J R, McCormick M P. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds [C]//International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing, Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics, 2003: 1211-1229.
- [3] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7):1697-1704. (in Chinese)
鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7): 1697-1704.
- [4] Winker D M, Hunt W H, McGill M J. Initial performance assessment of CALIOP [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(19): 228-262.
- [5] Min M, Wang P, Campbell J R, et al. Midlatitude cirrus cloud radiative forcing over China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D20): 898-907.
- [6] Pan H, Bu L, Kumar K R, et al. A new retrieval method for the ice water content of cirrus using data from the CloudSat and CALIPSO [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2017, 161(7): 134-142.
- [7] Shan Kunling, Liu Xinbo, Bu Lingbing, et al. Joint inversion method of cirrus physical properties using both Lidar and millimeter wave radar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2742-2746. (in Chinese)
单坤玲, 刘新波, 卜令兵, 等. 激光雷达和毫米波雷达的卷云微物理特性的联合反演方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2742-2746.
- [8] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 000652.
- [9] Ding Hongxing, Dai Liling, Sun Dongsong. Spatial distribution of aerosol in troposphere measured by lidar at slant range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 442-446. (in Chinese)
丁红星, 戴丽莉, 孙东松. 激光雷达斜程探测的对流层气溶胶空间分布[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 442-446.

- [10] Omar A H, Winker D M, Kittaka C, et al. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(10): 1994-2014.
- [11] Shipley S T, Tracy D H, Eloranta E W, et al. A high spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols, Part I: Instrumentation and theory[J]. *Applied Optics*, 1984, 22(23): 3716-3724.
- [12] Grund C J, Eloranta E W. University of wisconsin high spectral resolution lidar [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(30): 6-12.
- [13] Liu D, Hostetler C, Miller I, et al. System analysis of a tilted field-widened Michelson interferometer for high spectral resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1406.
- [14] 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]. *Applied Physics B*, 1992, 17(7): 541-543.
- [15] 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.
- [16] Silva A, Swap R, Maring H, et al. ACE 2011-2015 progress report and future outlook[D]. US: NASA, 2017.
- [17] Eloranta E W, Roesler F L, Sroga J T. High Spectral Resolution Lidar[M]. Berlin: Springer, 1983: 308-315.
- [18] Vaughan M A, Powell K A, Kuehn R E, et al. Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(10): 2034-2050.
- [19] Jursa A S. Handbook of geophysics and the space environment [D]. Germany: Research Gate, 1985.
- [20] Bodhaine B A, Wood N B, Dutton E G, et al. On Rayleigh optical depth calculations [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(11): 1854-1861.
- [21] Cairo F, Di D G, Adriani A, et al. Comparison of various linear depolarization parameters measured by lidar [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4425-4432.
- [22] Serdyuchenko A, Gorshchev V, Weber M, et al. New broadband high-resolution ozone absorption crosssections [J]. *Spectroscopy Europe*, 2011(6): confETE11S.
- [23] Liu Z, Voelger P, Sugimoto N. Simulations of the observation of clouds and aerosols with the experimental lidar in space Equipment system[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(18): 3120-3137.
- [24] Hernandez G. Analytical description of a Fabry -Perot photoelectric spectrometer [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(11): 1745-1748.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Cheng Z, Liu D, Yang Y, et al. Interferometric filters for spectral discrimination in high-spectral-resolution lidar: performance comparisons between Fabry-Perot interferometer and field-widened Michelson interferometer [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(32): 7838-7850.
- [28] Hair J W, Hostetler C A, Cook A L, et al. Airborne high spectral resolution lidar for profiling aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(36): 6734-6752.
- [29] Bu L, Pan H, Kumar K R, et al. LIDAR and millimeter-wave cloud RADAR (MWCR) techniques for joint observations of cirrus in Shouxian (32.56° N, 116.78° E), China [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, 148: 64-73.