

基于干涉滤光片的拉曼激光雷达误差分析

张博文^{1,2}, 范广强¹, 张天舒¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 纯转动拉曼激光雷达具有准直性好、时空分辨率高等特点被广泛用于大气温度垂直廓线探测。本文基于干涉滤光片设计分光光路, 定量分析了滤光片中心波长和带宽造成的温度测量不确定度。使用比值法简化计算了滤光片对弹性散射信号抑制不足造成的泄露误差。通过不同带宽滤光片标定了系统参数, 并分析了系统参数对反演温度时拟合误差的影响。针对滤光片固定时的角度误差, 评估了其引入的随机误差。结果表明, 系统实际选择的滤光片中心波长和 0.5 nm/0.3 nm 带宽产生的误差小于 1.2 K, 抑制比大于 6 为宜, 使用低阶函数产生的拟合误差可以忽略, 滤光片固定角度误差应小于 0.5°。并基于纯转动拉曼激光雷达方程模拟仿真回波信号并反演温度廓线, 分析了温度测量的误差分布, 总误差小于 1.2 K。

关键词: 纯转动拉曼激光雷达; 干涉滤光片; 温度探测; 误差分析

中图分类号: P407.5; TN958.98 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.018

Error analysis of Raman Lidar based on interference filter

ZHANG Bo-wen^{1,2}, FAN Guang-qiang¹, ZHANG Tian-shu¹

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Pure rotational Raman Lidar is widely used for detecting vertical atmospheric temperature profiles due to its good collimation and high spatiotemporal resolution. In this paper, the uncertainty of temperature measurement caused by the central wavelength and bandwidth of the interference filter by designing a spectral path based on the interference filter. The ratio method is used to simplify the calculation of leakage errors caused by insufficient suppression of elastic scattering signals by filters. The system parameters are calibrated by means of different bandwidths, and the impact of system parameters on fitting errors during temperature inversion was analyzed. The random error introduced by the fixed angle error when inverting the temperature is analyzed. The results indicate that the error generated by the center wavelength of the filter and the bandwidth of 0.5 nm/0.3 nm actually selected by the system is less than 1.2 K, and a suppression ratio greater than 6 is appropriate. The fitting error generated by the use of lower order functions can be ignored, and the fixed angle error of the filter should be less than 0.5°. And based on the pure rotational Raman Lidar equation, the simulated echo signal is simulated and the temperature profile is inverted. The error distribution of temperature measurement is analyzed, and the total error is less than 1.2 K.

Keywords: pure rotational Raman Lidar; interference filter; temperature detection; error analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFC3700400); 国家自然科学基金项目 (No. 42005106) 资助。

作者简介: 张博文 (1994 -), 男, 博士, 主要从事激光雷达大气探测技术方面的研究。E-mail: zbv@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 范广强 (1982 -), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光雷达大气探测技术方面的研究。

E-mail: gqfan@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2024-03-26

1 引言

温度影响着大气层内的热力循环过程,与大气运动和气候变化密切相关^[1-4]。常用探测方法有无线探空仪、微波辐射计、激光雷达等方式,其中纯转动拉曼激光雷达因具有高测量精度、高时空分辨率、结构紧凑等优点被广泛应用。其利用大气中含量稳定的氮气、氧气分子对发射激光产生的纯转动拉曼散射效应,使用分光器件提取不同的拉曼散射谱线反演大气温度,但易受云与气溶胶干扰和分光系统误差的影响^[5-8]。

纯转动拉曼激光雷达的关键技术是在大气后向散射信号中准确提取微弱的拉曼后向散射信号,目前国内外采用的分光方法有双光栅、Fabry-Perot (F-P)标准具、干涉滤光片等。光栅具有周期性空间和光学结构衍射屏,不同波长的光在焦平面不同位置会形成有距离的波纹。闪耀角度和光学效率等参数对分光效果影响较大^[9-13]。F-P标准具使用两个高反射率的平行玻璃,充当梳型滤波器以分离拉曼散射信号。但纯转动拉曼谱线并非等距,反射率受限,且格昂贵、光谱范围窄、控制难度高^[14-16]。滤光片是一种按照需求改变入射光的光谱强度分布的光学元件,可以有针对性地选择光谱波长透射。干涉滤光片利用真空镀膜法在玻璃表面形成一定厚度的光学薄膜制成,通常由多层薄膜构成,利用干涉原理使特定光谱范围的光通过。因结构简单、性能稳定及高抑制比等特点被广泛使用^[17-19]。

本文使用 354.7 nm 波长作为发射激光,采用干涉滤光片和“Z”型光路抑制米散射信号、分离高低阶拉曼散射信号。首先,分析了干涉滤光片中心波长与带宽对温度测量不确定度的影响,在不同天气条件时,使用比值法简化计算抑制比不足造成的泄露误差。其次,在不同滤光片带宽下,低阶标定函数引入的误差可以忽略。固定滤光片后,若其角度发生偏转、倾斜,会带来随机误差。最后,模拟仿真了在不同大气环境下的测量总误差,为指导系统设计,减小各项误差源提供理论依据。

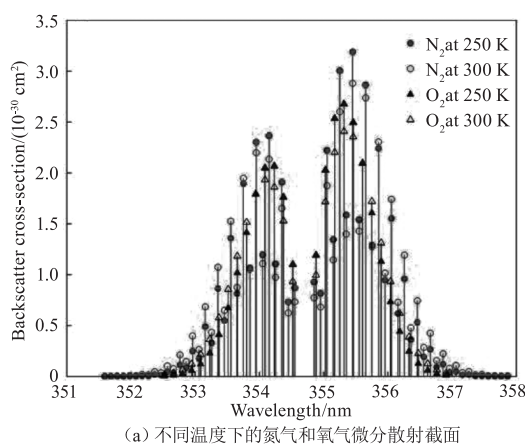
2 基本原理

氮气和氧气分子的纯转动拉曼散射谱线包络会随着温度而变化,因此可用于温度探测^[20]。用微分散射截面反映拉曼散射谱线的强度,如图 1(a)所示,激光器发射波长为 354.7 nm,氮气和氧气在不同温度下的纯转动拉曼散射谱线微分散射截面分布。受转动量子数影响,拉曼散射谱线并非等距间隔,呈现散射截面强弱交替变化。虽然位于发射波

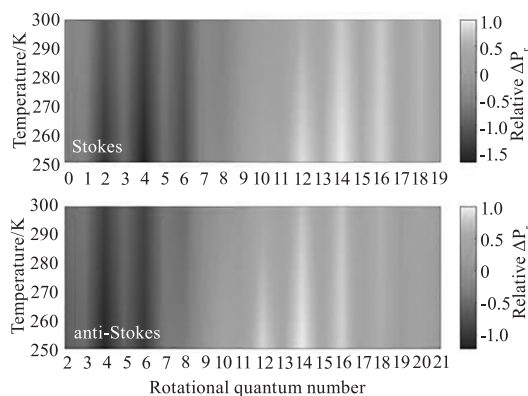
长右侧的斯托克斯谱线散射截面较大,但考虑到气溶胶荧光效应的影响,应首先考虑左侧的反斯托克斯谱线^[21]。纯转动拉曼散射回波功率定义为 P_r ,拉曼散射谱线的温度灵敏度 ΔP_r 可为^[20]:

$$\Delta P_r = \frac{P_r(T + \Delta T) - P_r(T)}{\Delta T} \quad (1)$$

其中, ΔT 为温度间隔,不同纯转动量子数的温度灵敏度如图 1(b)所示。靠近发射波长区域的谱线温度灵敏度与温度变化呈负相关,高阶谱线呈正相关。



(a) 不同温度下的氮气和氧气微分散射截面



(b) 不同温度下的斯托克斯和反斯托克斯谱线的温度灵敏度

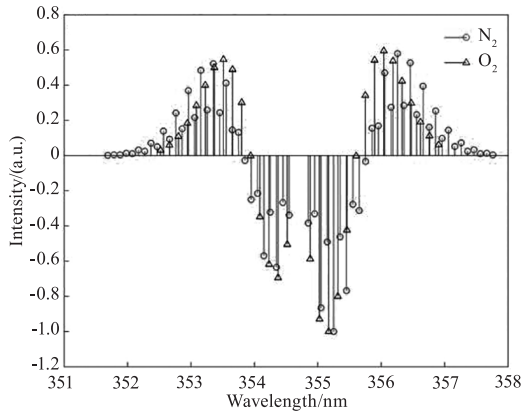
图1 拉曼散射谱线和温度灵敏度

Fig. 1 Raman scattering spectral lines and temperature sensitivity

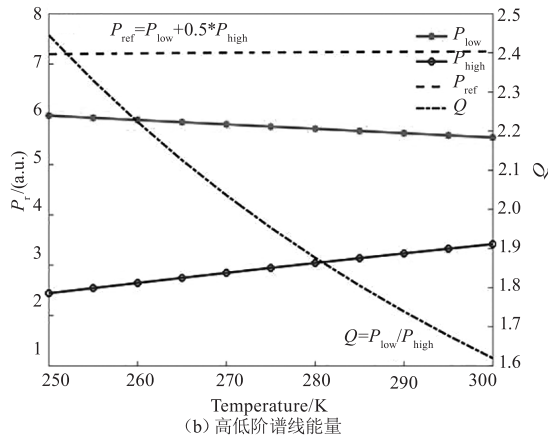
通过拉曼散射谱线强度对温度求导,可得到高低阶纯转动量子数的温度变化率,如图 2(a)所示。图 2(b)显示了参考信号 P_{ref} 因几乎不随温度变化,用来反演云和气溶胶;比值 Q 随着温度升高而逐渐降低,通过实测温度数据校准比值 Q ,可计算温度^[2]:

$$\begin{aligned} Q(z) &= \frac{P(J_{low}, z)}{P(J_{high}, z)} \approx \exp\left(a - \frac{b}{T(z)}\right) \Leftrightarrow T(z) \\ &= \frac{b}{a - \ln Q(z)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, a 和 b 为由无线探空仪等设备标定得到的系统常数。



(a) 氮气和氧气的拉曼谱线的温度变化率



(b) 高低阶谱线能量

图2 温度变化率和高低阶能量

Fig. 2 The rate of temperature change and the high- and low-level energy

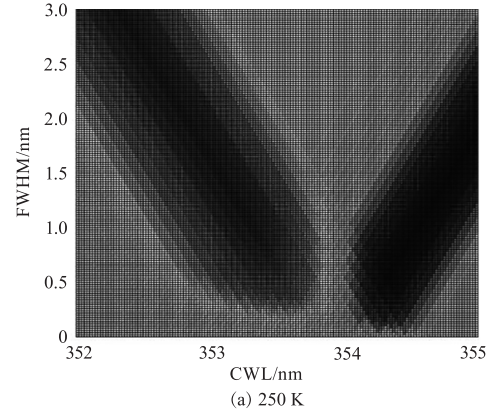
3 误差分析

3.1 温度测量不确定度

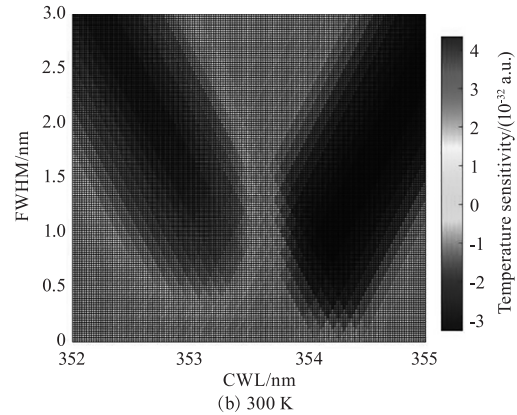
窄带干涉滤光片具有膜层牢固、透射率高、带宽窄和带外抑制比高等优点,在纯转动拉曼通道中可实现高抑制比。通过计算温度敏感度和温度测量不确定度,以匹配最佳中心波长(Center Wavelength, CWL)和带宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)。敏感度表示为:

$$\frac{\partial P_r}{\partial T} \approx \frac{P_r(T_1) - P_r(T_2)}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

表征纯转动拉曼散射信号透过滤光片后其强度随温度的变化率。图3表明温度越低敏感度越强,温度越高敏感度越弱。靠近发射波长的信号强度与温度呈负相关,远离发射波长的信号强度与温度呈正相关。中心波长和带宽的选择应满足以下要求:(1)高低阶滤光片中心波长位于不同相关性区域;(2)高低阶滤光片带宽不重叠;(3)低阶滤光片中心波长要尽可能远离发射波长,同时发射波长不在其带宽内;(4)高阶要尽可能靠近发射波长,同时避免与低阶带宽重叠;(5)低阶选择窄带宽,高阶选择宽带宽。



(a) 250 K



(b) 300 K

图3 不同温度下的温度敏感度

Fig. 3 Temperature sensitivity at different temperatures

根据统计误差可知,温度测量不确定度服从泊松分布,1-σ误差为^[22]:

$$\Delta T \approx \frac{\partial T}{\partial Q} \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{low}} + 2P_{b1}}{P_{\text{low}}^2} + \frac{P_{\text{high}} + 2P_{b2}}{P_{\text{high}}^2}} \quad (4)$$

其中, P_{low} 和 P_{high} 分别为去噪后的回波信号, P_{b1} 和 P_{b2} 分别为两通道的总噪声。

$$\frac{\partial T}{\partial Q} \approx \frac{T_1 - T_2}{Q(T_1) - Q(T_2)} \quad (5)$$

假设高低阶通道滤光片带宽分别为0.5 nm和0.3 nm,使用修正的高斯曲线来提取模拟中反斯托克斯分支的信号,滤光片透过率曲线表示为:

$$f(\lambda) = \exp\left[-\left(\frac{2 \times \sqrt{\ln 2} \times (\lambda - \text{CWL})}{\text{FWHM}}\right)^2\right] \quad (6)$$

该曲线包括了非常陡峭的边缘和理想透过率。为了模拟白天的系统性能,使用了每0.1 nm光谱的背景信号,该信号用与反斯托克斯分支中最强的纯转动拉曼谱线强度 P_J^{max} 的相关因子S进行了缩放。然后针对相应的滤波器带宽计算每个通道的背景信号:

$$P_b = S \cdot \frac{\text{FWHM}}{0.1} P_J^{\text{max}} \quad (7)$$

图4显示了相对温度测量不确定度,每个子图中心白点表征最小值为1K。从图4(a)~(c)与图4(b)~(d)对比可知,噪声对最优CWL有影响,并且不同强度的噪声使其改变量不同;由图4(c)、(d)可知,低阶通道最优CWL偏移较小,而高阶通道CWL偏移较大,说明高阶通道对温度更加敏感。图中“*”是本系统实际使用的滤光片CWL,分别为354.05 nm和353 nm,与实际系统设计时要考虑滤光片的加工和定制难度,考虑到低阶通道带外抑制要充分,并保证高阶通道的信号强度,此时的不确定度小于1.2 K。

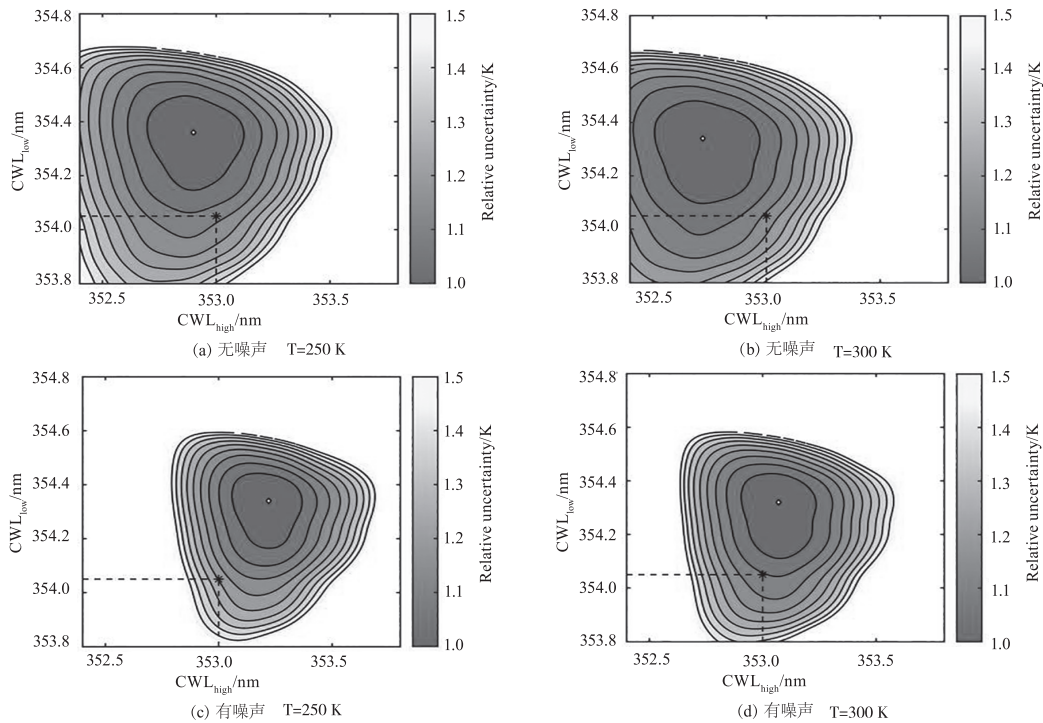


图4 不同温度下,滤光片中心波长与温度测量不确定度的关系

Fig. 4 The relationship between the CWL of the filter and the measurement uncertainty of temperature at different temperatures

$$Q = \frac{n_{N_2, O_2} \sigma_{N_2, O_2} (J_{low}) \tau + R \sigma_{Rayleigh} \times 10^{-OD1}}{n_{N_2, O_2} \sigma_{N_2, O_2} (J_{high}) \tau + R \sigma_{Rayleigh} \times 10^{-OD2}} \quad (8)$$

其中, n 为氮气或氧气分子数密度; σ 为高低阶微分散射截面; τ 为大气透过率; $\sigma_{Rayleigh}$ 为瑞利散射截面, $OD1$ 和 $OD2$ 分别为高低阶通道干涉滤光片的带外抑制比。在不同温度和大气条件下,泄露误差分布随高低阶通道抑制比的变化如图5所示。当 $R=1$ 时,代表较厚气溶胶或薄云天气;当 $R=20$ 时,代表厚云天气。由图可知,在相同大气、不同温度的条件下,不同滤光片抑制比对气溶胶的抑制表现出明显差异,而在云层较厚时,高温天气下测量结果误差变化较为剧烈。当大气条件恶劣时,提高带外抑制比可减少泄露

3.2 温度测量泄露误差

纯转动拉曼散射信号比瑞利散射信号弱3~4个数量级,当探测路径上存在云层或厚气溶胶时,米散射信号会叠加在瑞利散射信号上,导致回波信号掺杂杂散光。纯转动拉曼信号在频率上与瑞利-米散射信号非常接近,较强的弹性散射信号在干涉滤光片带外抑制比不足的情况下,存在泄露到拉曼散射通道的情况,从而产生泄露误差(Leakage Error)。

使用光学厚度(Optical Depth, OD)表征干涉滤光片对弹性散射信号的带外抑制比,后向散射比(R)表示模拟大气条件。使用比值法简化计算泄露误差为:

误差。一般情况,为了保证高阶回波信号质量,各通道 OD 值应大于6,泄露误差小于0.6 K。

3.3 温度测量拟合误差

由公式(2)可知,由于系统常数 a 和 b 是使用无线探空仪等设备标定而来,使用该公式反演温度会带来拟合误差。为提高温度反演精度,干涉滤光片存在一定带宽,系统提取的高低阶量子数拉曼散射谱线并非单独一根,每个通道都会提取多个相邻谱线,因此信号比值不再准确遵循玻尔兹曼分布。图6显示了标定公式在不同干涉滤光片带宽下提取的谱线反演温度的误差。当每个通道带宽不同时,拟合误差表现不同。图6(a)、(c)中,实线表示回波信号比值,虚线表示不同标定函数计算得到的拟合

比值; (b)、(d) 表示计算比值与拟合比值之间的差值, 理论上, 拟合曲线阶数越高, 拟合误差就越小, 但

算法复杂、计算量较大, 对数据处理芯片有更高要求, 公式(2)带来的拟合误差远小于 1 K。

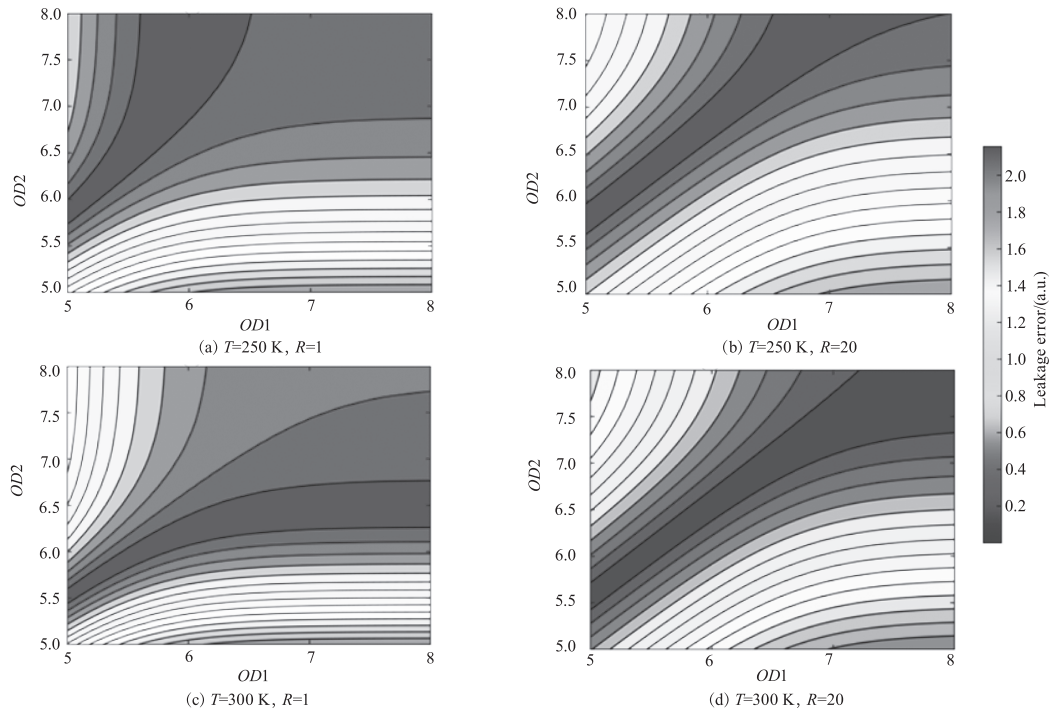


图 5 不同大气条件和温度下, 滤光片带外抑制比与泄露误差的关系

Fig. 5 The relationship between filter out of band suppression ratio and leakage error under different atmospheric conditions and temperatures

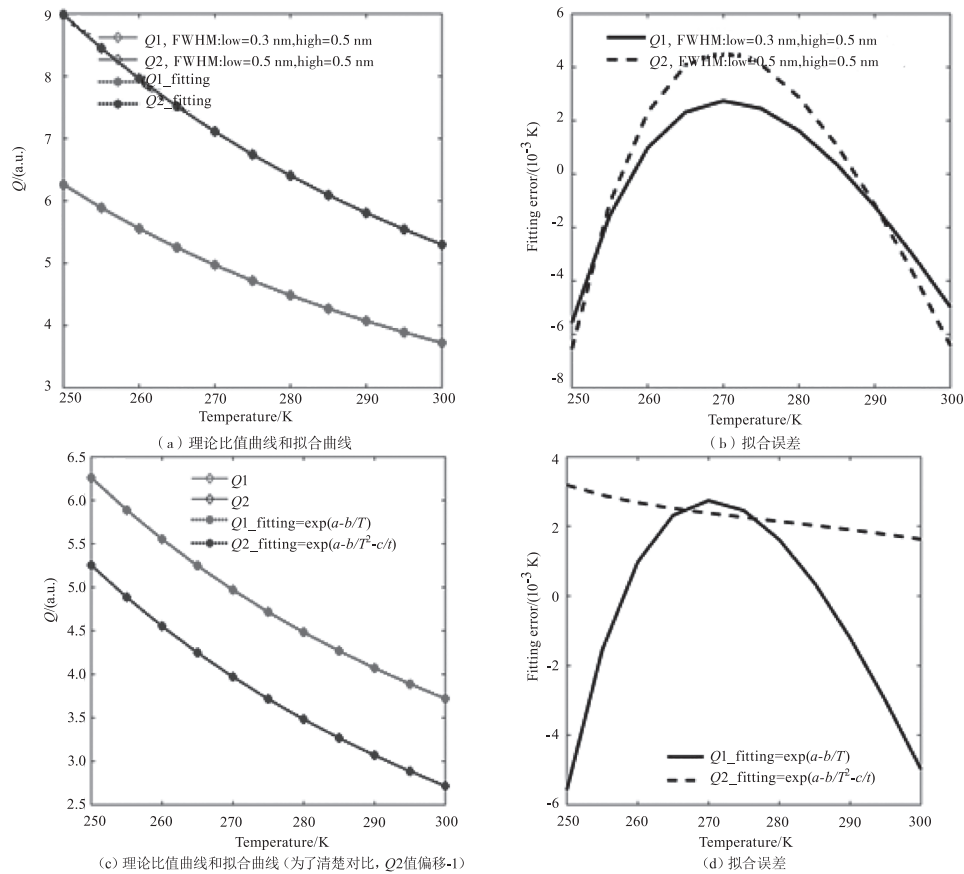


图 6 不同带宽和标定函数下的拟合误差

Fig. 6 Fitting error under different bandwidths and calibration functions

3.4 温度测量随机误差

对于纯转动拉曼激光雷达而言,系统结构重点在于后继光学的分光设计,如图7(a)所示,使用“Z”型光路实现对纯转动拉曼散射信号的分离和弹性散射信号的抑制,其中干涉滤光片可以偏转一定角度以选择不同的中心波长,合理使用多级滤光片可以充分抑制弹性散射光,其中532P nm/532S nm/354.7 nm和387 nm/407 nm分别是米散射和湿度通道,354.05 nm/353 nm是温度通道。

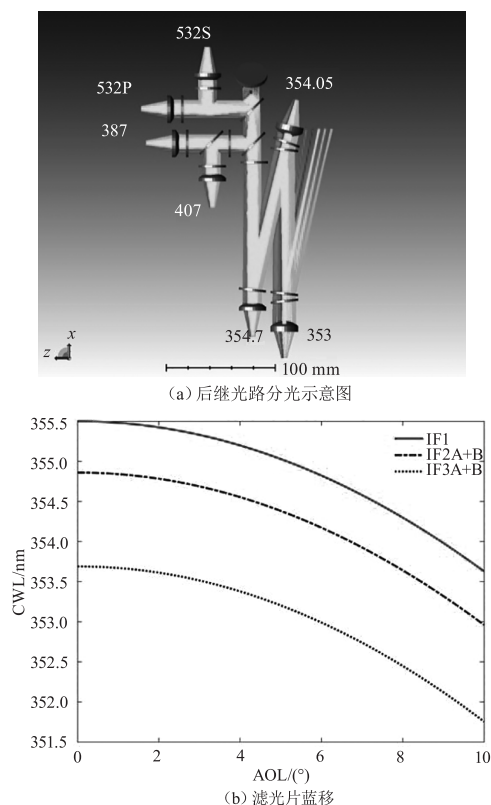


图7 后继光路与滤光片蓝移

Fig. 7 Subsequent optical path and filter blue shift

对于干涉滤光片而言,入射光角度(Angle of Incidence, AOI) ϕ 越小,带外抑制和峰值透过率就越高。CWL与 ϕ 之间的关系满足下式:

$$\lambda(\phi) = \lambda_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\phi)}{n^2}} \quad (9)$$

其中, λ_0 是垂直入射到滤光片表面的波长; n 是折射率。滤光片CWL与AOI的关系如图7(b)所示,通过改变入射角度,使得透射波长向短波漂移,同时高阶反射光被反射到光学垃圾桶中,避免光路回返,影响温度反演精度。两个温度通道的滤光片偏转角度分别为6.5°、6°,对应高低阶通道波长为354.05 nm、353 nm,散射通道滤光片偏转角度为6.5°,对应波长为354.7 nm。从图7(b)中可以看出,在滤光片安装

阶段,其角度的些许偏转会导致CWL改变,从而引入随机误差,结果如图8所示。对于低阶通道,角度偏转需要小于0.8°;对于高阶通道,角度偏转需要小于0.5°,随机误差小于1.2 K。

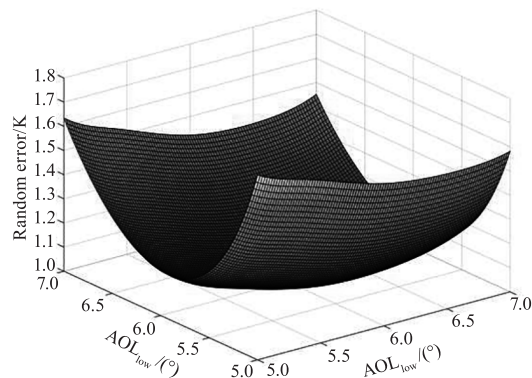


图8 滤光片偏转角度与随机误差

Fig. 8 Deflection angle of filter and random error

4 系统仿真分析

为了分析以上几种误差在系统测量时造成的影响,使用表1中的系统参数模拟仿真了夜间温度测量结果。计算中使用美国1976年标准大气模型提供的大气参数。假设在2 km处存在厚浓度气溶胶,5 km处存在云层,后向散射比和雷达比如图9(b)所示,(c)和(d)分别是仿真计算的微分散射截面和信噪比。有无云层对拉曼散射影响不大,但气溶胶和云的后向散射比较强,若滤光片抑制比不足会导致泄露误差,使用 $OD \geq 6$ 的滤光片,在云层处会出现微弱尖峰,并不影响信号质量;(e)表征由计算得到的回波信号比值通过标定函数反演拟合温度,与(a)中标准温度廓线比较得到温度误差如(f)所示,在仿真计算中考虑了以上各种误差因素,系统总测量误差在1.2 K以内。

表1 系统参数

Tab. 1 Parameters of system

Types	Values
Laser pulse energy/mJ	2
Repetitive frequency/Hz	2000
Diameter of telescope/mm	400
Optical efficiency	0.3
ODs of J_{low} and J_{high}	6
Quantum efficiency	0.7
Dark count/cps	200
Time resolution/min	10
Range resolution/m	7.5

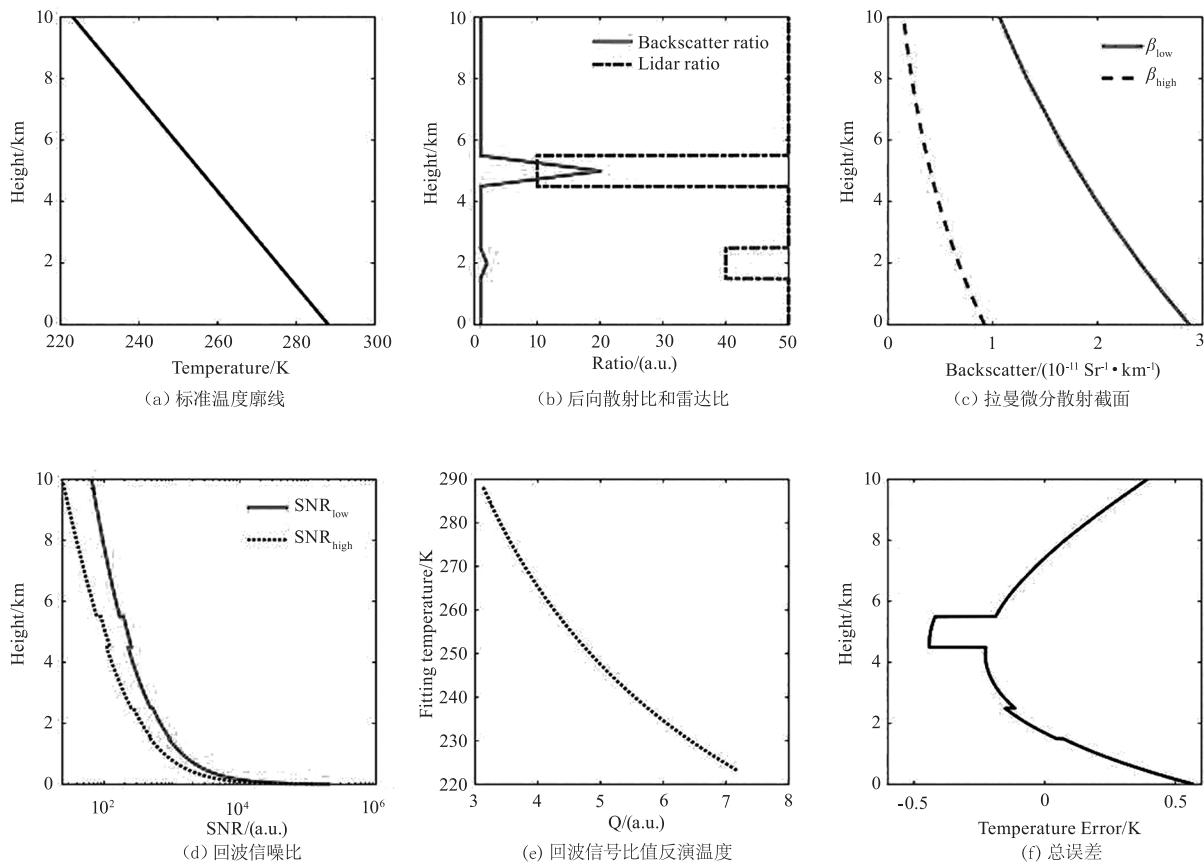


图9 信号仿真条件和结果分析

Fig. 9 Signal simulation conditions and result analysis

5 结论

本文分析了纯转动拉曼激光雷达在系统设计过程中需要考虑的关键因素和指标要求,干涉滤光片既能充分抑制弹性散射光,也有较高的分光效率,可根据不同的偏转角度,来过滤合适的纯转动拉曼谱线,进行温度反演,具有较高的灵活性。给出了滤光片关键参数如中心波长、带宽和抑制比的选择依据。其中,低阶滤光片带宽越小、高阶带宽越大、OD抑制比大于6有利于减小系统误差。

虽然纯转动拉曼激光雷达测量得到的温度廓线是间接量,但可以通过无线探空仪等设备进行系统常数标校,在使用不同标定函数反演温度时,高阶函数计算复杂,考虑到实时性,使用低阶函数反演温度,拟合误差可忽略不计。在分光系统中,滤光片的俯仰、倾斜角度较为重要,固定后需要对其固定角度进行检验,为避免引入随机误差,偏离角度应小于 0.5° 。

最后模拟计仿真了系统测温性能,考虑了接收系统、大气环境对温度反演结果的影响,在天气情况较为恶劣时,云层和厚浓度气溶胶给系统测量带来挑战,仿真结果表明,泄露误差是雷达测量过程中影响反演结果的重要因素。

参考文献:

- [1] Goldsmith J, Blair F, Bisson S, et al. Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4979-90.
- [2] Weitkamp C. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere[M]. New York: Springer, 2005.
- [3] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 25-28. (in Chinese)
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 25-28.
- [4] Tang Jie. Research on Raman lidar for atmospheric temperature and humidity profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)
唐杰. 大气温湿度探测拉曼激光雷达的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [5] Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1972, 11(1): 108-112.
- [6] Arshinov Y, Bobrovnikov S, Zuev V, et al. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(19): 2984.

- [7] Behrendt A, Reichardt J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9):1372-1378.
- [8] Wang Qingmei, Zhang Yimo. Development of meteorological lidar [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3):246-249. (in Chinese)
王青梅, 张以谟. 气象激光雷达的发展现状[J]. *气象科技*, 2006, 34(3):246-249.
- [9] Ge Xianying, Chen Siying, Zhang Yinchao, et al. The echelle grating monochromator's design of pure rotational Raman lidar [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(2):567. (in Chinese)
葛宪莹, 陈思颖, 张寅超, 等. 纯转动拉曼激光雷达中阶梯光栅单色仪设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(2):567.
- [10] Li Shichun, Hua Dengxin, Hu Liaolin, et al. All-fiber spectroscopy with second-order fiber Bragg grating for rotational Raman lidar [J]. *Spectroscopy Letters*, 2014, 47(3):244-252.
- [11] Ansmann A, Arshinov Y, Bobrovnikov S M, et al. Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3583:491-497.
- [12] Chen Siying, Qiu Zongjia, Zhang Yinchao, et al. A pure rotational Raman lidar using double-grating monochromator for temperature profile detection [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(2):304-309.
- [13] Jia Jingyu, Yi Fan. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5-30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24):5330-5343.
- [14] Wang Shaolin, Su Jia, Zhao Peitao, et al. A pure rotational Raman-lidar based on three-stage Fabry-Perot etalons for monitoring atmospheric temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6):3941-3947. (in Chinese)
汪少林, 苏嘉, 赵培涛, 等. 基于三级 Fabry-Perot 标准具的纯转动拉曼测温激光雷达 [J]. *物理学报*, 2008, 57(6):3941-3947.
- [15] Arshinov Y, Bobrovnikov. Use of a Fabry-Perot interferometer to isolate pure rotational Raman spectra of diatomic molecules [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21):4635-4638.
- [16] Hauchecorne A, Keckhut P, Mariscal J F, et al. An innovative rotational Raman lidar to measure the temperature profile from the surface to 30 km altitude [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119:06008.
- [17] Behrendt A, Nakamura T, Tsuda T. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14):2930-2939.
- [18] Liu Yuli, Xie Chenbo, Shang Zhen, et al. Retrieval and analysis of atmospheric temperature using a rotational Raman lidar observation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6):1978. (in Chinese)
刘玉丽, 谢晨波, 尚震, 等. 基于纯转动拉曼谱线激光雷达的大气温度反演分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6):1978.
- [19] Wang Yufeng, Fu Qiang, Zhao Meina, et al. A UV multi-functional Raman lidar system for the observation and analysis of atmospheric temperature, humidity, aerosols and their conveying characteristics over Xi'an [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 205:114-126.
- [20] Spath F, Behrendt A, Brewer W A, et al. Simultaneous observations of surface layer profiles of humidity, temperature, and wind using scanning lidar instruments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2022, 5:127.
- [21] Behrendt A, Weitkamp C. Optimizing the spectral parameters of a lidar receiver for rotational Raman temperature measurements [J]. *Ratio*, 2000:113-116.
- [22] Hammann E, Behrendt A, Mounier FL, et al. Temperature profiling of the atmospheric boundary layer with rotational Raman lidar during the HD(CP)2 observational prototype experiment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(5):2867-2881.