

全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统

邵江锋, 华灯鑫, 汪 丽, 王 骏, 闫 庆

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 紫外高光谱瑞利测温激光雷达是一种探测大气温度廓线的有效工具。目前, 紫外高光谱瑞利测温激光雷达通常采用 355 nm 波长的光, 然而白天太阳背景光辐射会影响雷达系统的信噪比(SNR), 进而制约温度探测的距离和精度。针对大气温度的全天时探测, 提出了基于法布里-珀罗标准具的 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统。由于到达地面的太阳背景光辐射不包含 266 nm 波长的光, 只需考虑臭氧对 266 nm 波长光吸收的影响, 进而实现全天时大气温度的探测。基于脉冲能量、望远镜直径、望远镜接收视场角、臭氧浓度以及太阳背景光强度等主要影响参数, 对 266 nm 和 355 nm 两个波长紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统的谱宽、透过率、回波信号 SNR 以及温度偏差参数进行数值仿真和对比分析。结果表明, 大气分子和气溶胶散射对 266 nm 波长光的影响远大于对 355 nm 波长光的影响。白天 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离为 4 km 左右, 比 355 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离远 2.9 km; 夜间 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统有效探测距离为 6 km。探测距离小于 5 km 时, 白天 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达的探测温度偏差比 355 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达的探测温度偏差小 10 K。266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达可实现全天时大气温度的探测。

关键词 大气光学; 激光雷达; 大气温度探测; 法布里-珀罗标准具; 紫外高光谱瑞利测温激光雷达

中图分类号 P427.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0601003

Full-Time Lidar System for Ultraviolet High Spectral Rayleigh Temperature Measurement

Shao Jiangfeng, Hua Dengxin, Wang Li, Wang Jun, Yan Qing

*Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract A ultraviolet high spectral lidar for Rayleigh temperature measurement is an effective tool for detecting the temperature profile. At present, the light with wavelength of 355 nm is used in the ultraviolet high spectral lidar for Rayleigh temperature measurement. However, the solar background radiation has a great influence on the signal-noise ratio (SNR), and the distance and the accuracy of temperature measurement are restricted. To realize the full-time measurement for atmospheric temperature, a 266 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement based on Fabry-Perot etalon is presented. Because there is no 266 nm light in the solar background radiation, the effect of ozone on the 266 nm light absorption is only needed to be considered, and then the full-time measurement for atmospheric temperature is realized. The spectral widths, transmission rates, SNR of echo signal and temperature errors of 266 nm and 355 nm ultraviolet high spectral lidar systems for Rayleigh temperature measurement are simulated and analyzed based on main parameters, such as pulse energy, diameter of telescope, receiving view field angle of telescope, concentration of ozone and solar background light intensity. Results show that the influence of atmospheric molecular and aerosol scattering on light at 266 nm is much larger than that of light at

收稿日期: 2016-12-19; **收到修改稿日期:** 2017-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(41627807, 61575159)、陕西省自然科学基金(2016JM6010)、陕西省教育厅科学研究计划专项(15JK1529)、中国博士后科学基金(2015M570846)

作者简介: 邵江锋(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: shaojiangfeng@126.com

导师简介: 华灯鑫(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn(通信联系人)

355 nm. In the daytime, the effective measurement distance of 266 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement is about 4 km, which is 2.9 km far than that of 355 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement. The effective measurement distance of 266 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement is about 6 km in the nighttime. When the measurement distance is smaller than 5 km, the temperature error of 266 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement is 10 K less than that of 355 nm ultraviolet high spectral lidar system for Rayleigh temperature measurement in the daytime. The 266 nm ultraviolet high spectral lidar for Rayleigh temperature measurement can be used to measure atmospheric temperature in the daytime and in the nighttime.

Key words atmospheric optics; lidar; atmospheric temperature measurement; Fabry-Perot etalon; ultraviolet high spectral lidar for Rayleigh temperature measurement

OCIS codes 010.3640; 280.3640; 290.5870; 300.6540

1 引 言

大气温度是表征大气动力学和气候气象的关键参数之一,是海洋、大气和环境研究的重要基础^[1-2]。由于许多重要的气象现象发生在对流层中,温度分布和气溶胶光学特性的测量是十分重要的大气科学研究内容,特别是对城市气候的研究。当前,气象部门通常使用释放探空气球的方式测量大气,但这种方式不能获得连续的数据参数,而且由于气球受风的影响大,测量数据的定位性比较差^[3-8]。因此,需要提出一种准确定位和连续测量技术。激光雷达具有时空分辨率高的特点,因此可以用来连续测量大气温度廓线^[9]。

白天太阳背景光的影响对测温激光雷达技术提出了新的挑战。目前,白天测温激光雷达主要有拉曼测温激光雷达和紫外高光谱瑞利测温激光雷达^[10-11]。Arshinov等^[12]采用532 nm波长光研制出高精度拉曼测温激光雷达系统,白天对大气温度探测的有效距离能达到2.5 km。然而,拉曼散射信号的强度相对于大气分子的瑞利散射信号强度要小3~4个数量级。高光谱激光雷达可以精细分离出大气分子的瑞利散射信号,Hua等^[13-14]成功应用355 nm波长人眼安全高光谱激光雷达,分离出空气分子瑞利散射,白天有效探测距离可以达到1.5 km。上述激光雷达系统需要考虑太阳背景光的影响,尤其是晴天太阳光特别强时影响更大。266 nm波长光具有波长更短、瑞利谱宽更宽和易提取等优点,因此激光雷达系统灵敏度更大,信噪比(SNR)更高。在地面上观测太阳辐射的波段范围约为295~2500 nm,小于295 nm和大于2500 nm波长的太阳辐射因地球大气中臭氧(O₃)等吸收而无法到达地面。因此,266 nm波长光没有太阳背景光干扰,只需考虑O₃对其吸收的影响,便可实现全天时、高精度的温度探测。

本文提出了基于法布里-珀罗(F-P)标准具的266 nm紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统,分析了高光谱瑞利测温激光雷达的系统结构,利用全天时测量对流层大气温度的原理和方法,对355 nm高光谱瑞利测温激光雷达系统的SNR、系统灵敏度以及温度偏差等性能参数进行了数值仿真和结果对比分析。

2 探测方法及原理

激光传输到大气中与粒子发生相互作用,接收到的后向散射主要有米散射、瑞利散射和拉曼散射,这里主要考虑米散射和瑞利散射。

瑞利散射的半峰全宽 $\Delta\nu_T$ 为

$$\Delta\nu_T = [32KT \ln 2 / (\lambda_0^3 M)]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 K 为玻尔兹曼常数, T 为大气温度, λ_0 为激光发射波长, M 为平均分子质量。高光谱瑞利测温激光雷达滤波器频谱图以及米散射信号和瑞利散射信号频谱图如图1所示。

两个窄带滤波器用于采集后向散射信号,滤波器1和滤波器2位于瑞利谱同一侧且用于探测温度廓线,滤波器3用于抑制米散射信号。

根据激光雷达方程,激光雷达接收的米散射光子数 N_m 和瑞利散射光子数 N_r 分别为

$$N_m = \frac{E}{h\nu} \frac{S}{r^2} \Delta r \beta_m \exp\left\{-2 \int [\alpha(r') + \delta] dr'\right\}, \quad (2)$$

$$N_r = \frac{E}{h\nu} \frac{S}{r^2} \Delta r \beta_r \exp\left\{-2 \int [\alpha(r') + \delta] dr'\right\}, \quad (3)$$

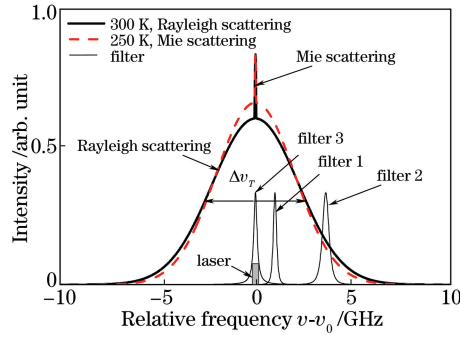


图 1 高光谱瑞利测温激光雷达滤波器频谱图以及米散射信号和瑞利散射信号频谱图

Fig. 1 Frequency spectral of high spectral lidar filter for Rayleigh temperature measurement and frequency spectra of Mie and Rayleigh scattering signals

式中 E 为激光脉冲能量, S 为接收望远镜面积, h 为普朗克常量, ν 为激光频率, Δr 为距离分辨率, δ 为臭氧吸收系数, r 为探测距离, β_r 为米散射光的后向散射系数, β_m 为瑞利散射光的后向散射系数, $\alpha(r')$ 为大气消光系数。选取美国标准大气下臭氧浓度廓线, 266 nm 波长光需要考虑臭氧吸收, 355 nm 波长光不需要考虑臭氧吸收。

滤波器的米散射透过率 $f_{im}(\nu)$ 和瑞利散射透过率 $f_{ir}(\nu, T)$ 为大气温度与频率的函数, 可分别表示为

$$f_{im}(\nu) = \int h_m(\nu' - \nu) G_i(\nu') d\nu', \quad (4)$$

$$f_{ir}(\nu, T) = \int h_r(\nu' - \nu, T) G_i(\nu') d\nu', \quad (5)$$

式中 $G_i(\nu')$ ($i=1, 2$) 为滤波器传递函数, $h_m(\nu' - \nu)$ 为米散射谱函数, $h_r(\nu' - \nu, T)$ 为瑞利散射谱函数。

接收的光子经过滤波器后分为米散射分量 N_{im} 和瑞利散射分量 N_{ir} , 可分别表示为

$$N_{im} = k_i f_{im}(\nu) N_m, \quad (6)$$

$$N_{ir} = k_i f_{ir}(\nu, T) N_r, \quad (7)$$

式中 k_i 为效率因子, 包含光电效率等参数。

温度变化引起瑞利谱强度的相对变化, 探测这种相对变化的响应函数为

$$H_x = \frac{N_1 - N_2}{N_1} = \frac{S_r(k_1 f_{1m} - k_2 f_{2m}) + k_1 f_{1r} - k_2 f_{2r}}{k_1 (S_r f_{1m} + f_{1r})}, \quad (8)$$

式中 N_1 和 N_2 为两个瑞利通道接收的光子数, S_r 为米信号与瑞利信号散射比。将单位温度引起的测量值定义为温度灵敏度, 即

$$\Theta = \frac{1}{H_x} \frac{\partial H_x}{\partial T}. \quad (9)$$

散粒噪声是瑞利通道噪声的主要来源, 还包括残余的米散射信号和探测器暗电流。瑞利通道的 SNR 为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \frac{\sqrt{n} k_i f_{ir} N_r}{(k_i f_{ir} N_r + k_i f_{im} N_m + N_d + N_s)^{\frac{1}{2}}}, \quad (10)$$

式中 N 为噪声, N_d 为探测器暗电子计数, N_s 为太阳背景光噪声, n 为总的激光脉冲数量。研究 355 nm 波长光要考虑太阳背景光噪声的影响, 研究 266 nm 波长光则不需要考虑。

高光谱激光雷达测量大气温度的系统误差主要由温度测量灵敏度和 SNR 决定, 系统误差主要是由瑞利信号残余的米散射信号引起。在探测过程中这种系统误差会产生温度偏移量。由 SNR 引起的测量温度误差可表示为

$$\Delta T = \frac{1}{\Theta S/N}. \quad (11)$$

3 紫外高光谱瑞利测温激光雷达

紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统原理如图 2 所示。种子注入 Nd:YAG 激光器发射单纵模脉冲激光, 重复频率为 10 Hz, 频谱线宽为 90 MHz。望远镜视场角为 0.1 mrad, 分光镜 BS1 和 BS2 的透反比分别为 30/70 和 85/15, 光电倍增管 PMT 的量子效率为 0.2。激光经准直扩束后进入大气, 并与气溶胶颗粒和空气分子相互作用, 从而产生米散射信号和瑞利散射信号, 利用卡塞格林望远镜接收信号。接收的后向散射信号通过光纤耦合进入分光部分, 经准直透镜准直后被 BS1 分成两路。一路信号经过 F-P1 滤波器滤掉米散射信号, 剩余的瑞利散射信号由 PMT1 接收。另一路信号被 BS2 分成两路, 一路信号经过 F-P2 滤波器滤掉米散射信号, 剩余的瑞利散射信号由 PMT2 接收; 另一路信号经过 F-P3 滤波器后滤掉瑞利散射信号, 剩余的米散射信号由 PMT3 接收。接收的信号由信号采集系统采集, 通过对采集信号进行反演, 得到大气的温度廓线。266 nm 波长 F-P 标准具参数为: 滤波器 1、滤波器 2 和滤波器 3 的相对频率分别为 1.4, 4.5, 0; 半峰全宽(FWHM)分别为 300, 600, 200 MHz。355 nm 波长 F-P 标准具参数为: 滤波器 1、滤波器 2 和滤波器 3 的相对频率分别为 1.0, 3.5, 0; FWHM 分别为 300, 600, 200 MHz。

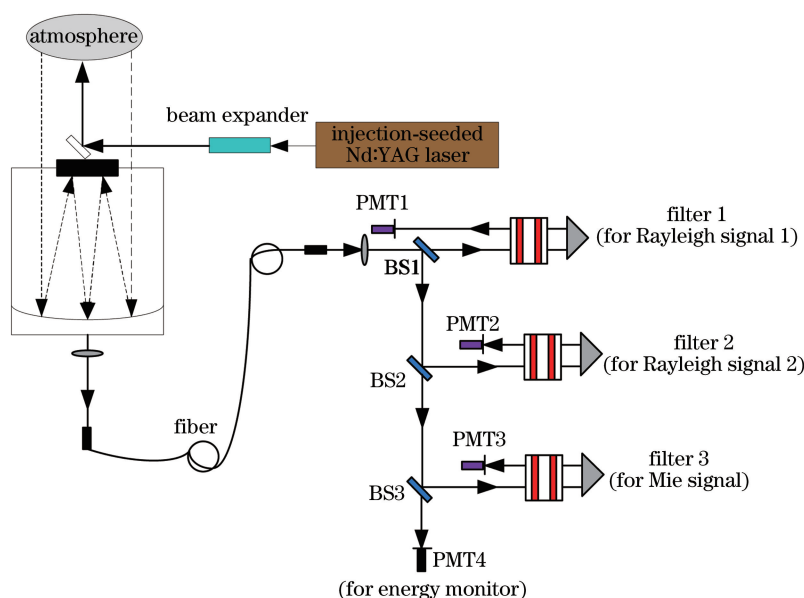


图 2 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统示意图

Fig. 2 Diagram of lidar system for ultraviolet high spectral Rayleigh temperature measurement

4 仿真结果与对比分析

图 3 为在同一温度下 266 nm 和 355 nm 波长的米散射信号和瑞利散射信号的谱宽。从图中可以看出, 米散射信号谱宽与激光入射波长无关, 只与激光发射线宽相关。瑞利散射信号谱宽与激光入射波长负相关, 波长越大, 谱宽越窄, 所以 266 nm 波长的瑞利散射信号谱宽于 355 nm 波长的瑞利散射信号谱, 且瑞利散射信号强度更强, 更易提取, 因此有利于提高米散射信号的抑制率和探测精度。

图 4 为 266 nm 和 355 nm 波长的大气透过率曲线。不考虑臭氧吸收的影响, 仅考虑大气分子和气溶胶散射对 266 nm 和 355 nm 波长光的大气透过率的影响。结果表明, 大气分子和气溶胶散射对 266 nm 波长光的大气透过率的影响远大于对 355 nm 波长大气透过率的影响, 355 nm 波长的大气透过率要高于 266 nm 波长光的大气透过率。355 nm 波长的光不易被臭氧吸收, 所以在考虑臭氧的吸收时, 355 nm 波长光的大气透过率保持不变。大气分子和气溶胶散射只对 266 nm 波长光的大气透过率产生很大程度的影响。从图 4 中可以看出, 与不考虑臭氧吸收的影响时相比, 266 nm 波长光的大气透过率显著降低。

在不同实验环境下, 高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温度 SNR 对应的有效探测距离廓线如图 5 所示。白天臭氧浓度比夜晚大^[15], 总脉冲数选取 1×10^4 个, 当激光脉冲能量为 150 mJ、望远镜直径 $D =$

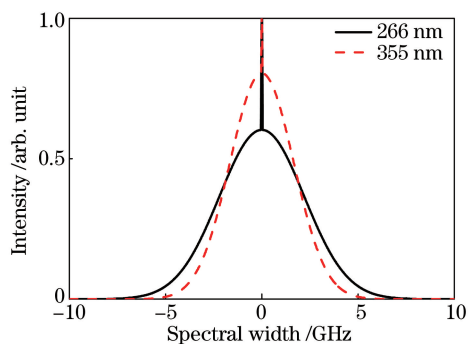


图 3 米散射信号和瑞利散射信号的谱宽

Fig. 3 Spectral widths of Mie scattering signal and Rayleigh scattering signal

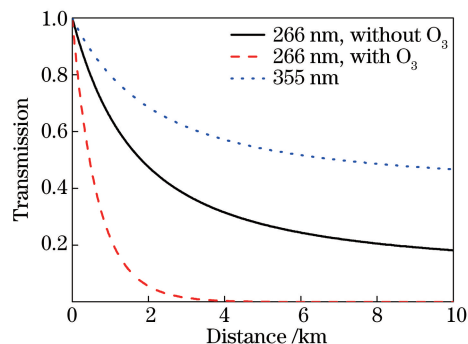


图 4 大气透过率曲线

Fig. 4 Atmospheric transmittance curves

250 mm时,白天和夜晚时 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 3.7 km 和 6 km (SNR 为 100);白天和夜晚太阳背景光分别为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 和 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 1.5 km 和 7 km (SNR 为 100)。结果表明,臭氧浓度影响 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离,太阳背景光的强弱影响 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离;白天 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离远 2.2 km;白天太阳背景光对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统几乎没有影响。综合考虑,采用 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可实现全天时大气温度的探测。

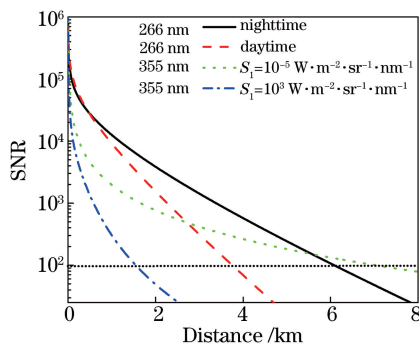


图 5 不同实验环境下系统的 SNR

Fig. 5 SNR of system under different experimental conditions

在不同气溶胶浓度下,高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温度 SNR 对应的有效探测距离廓线如图 6 所示。在白天,当分别选取较低和较高的气溶胶浓度时,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探

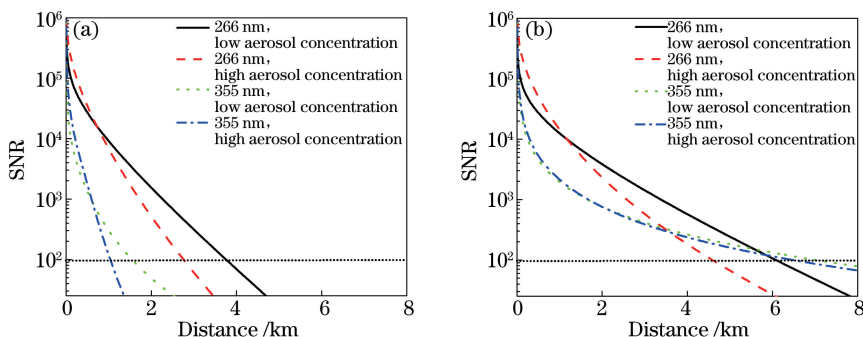


图 6 不同气溶胶浓度下系统的 SNR。(a)白天;(b)晚上

Fig. 6 SNR of system under different aerosol concentrations. (a) Daytime; (b) nighttime

测距离分别为 3.7 km 和 2.7 km (SNR 为 100); 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 1.5 km 和 1 km (SNR 为 100)。在夜晚, 当分别选取较低和较高的气溶胶浓度时, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 6 km 和 4.6 km (SNR 为 100); 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 7 km 和 6.4 km (SNR 为 100)。结果表明, 气溶胶散射对 266 nm 和 355 nm 波长的光都有影响, 相同浓度气溶胶情况下, 气溶胶散射对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统有效探测距离的影响大于对 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统有效探测距离的影响, 但是在白天 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统有效探测距离比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统有效探测距离远。综合考虑, 采用 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可实现全天时大气温度的探测。

在不同激光脉冲能量下, 高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温度 SNR 对应的有效探测距离廓线如图 7 所示。根据实际脉冲激光器产生的激光能量, 可以得到 266 nm 和 355 nm 波长激光的能量最大值分别为 150 mJ 和 200 mJ。白天激光脉冲能量为 100, 120, 150 mJ 时, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 4.2, 4.3, 4.4 km (SNR 为 100); 当太阳背景光为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 激光脉冲能量为 150, 170, 200 mJ 时, 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 1.3, 1.4, 1.5 km (SNR 为 100)。在夜间, 激光脉冲能量为 100, 120, 150 mJ 时, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 6, 6.2, 6.3 km (SNR 为 100); 当太阳背景光为 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 激光脉冲能量为 150, 170, 200 mJ 时, 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 7, 7.2, 7.5 km (SNR 为 100)。结果表明, 激光脉冲能量和臭氧浓度的大小都会影响 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离, 激光脉冲能量的大小和太阳背景光的强弱都会影响 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离; 通过增大激光脉冲的能量, 可增加高光谱瑞利测温雷达系统的有效探测距离; 白天太阳背景光对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统几乎没有影响, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离远 2.9 km。综合考虑, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可实现全天时大气温度的探测。

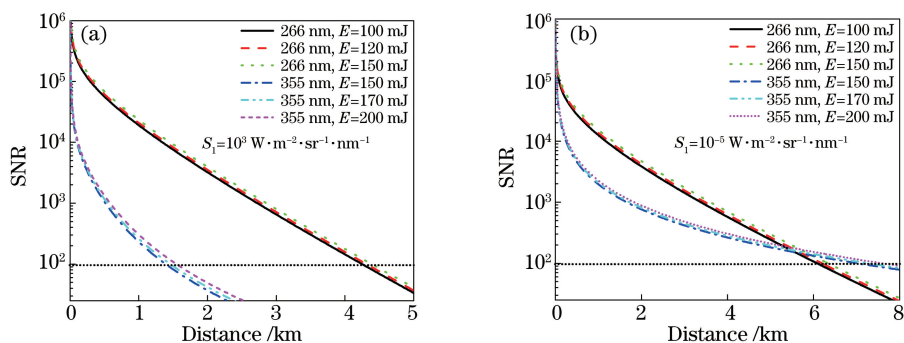


图 7 不同激光脉冲能量的系统 SNR。(a) 白天; (b) 晚上

Fig. 7 SNR of system with different pulse energies. (a) Daytime; (b) nighttime

在不同望远镜直径下, 高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温度 SNR 对应的有效探测距离廓线如图 8 所示。在白天, 望远镜直径为 250, 300, 400 mm 时, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 4.4, 4.5, 4.7 km (SNR 为 100); 太阳背景光为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 望远镜直径为 250, 300, 400 mm 时, 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 1.3, 1.5, 1.9 km (SNR 为 100)。在夜间, 望远镜直径为 250, 300, 400 mm 时, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 5.5, 5.7, 6 km (SNR 为 100); 太阳背景光为 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, 望远镜接收视场角为 250, 300, 400 mm 时, 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 6, 6.6, 7.7 km (SNR 为 100)。结果表明, 望远镜直径和臭氧浓度的大小会影响 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离, 望远镜直径的大小和太阳背景光的强弱会影响 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离; 通过增大接收望远镜直径, 可增加雷达系统的有效探测距离; 白天太阳背景光对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统几乎没有影响, 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离远约 2.8~3.1 km, 可以采用 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温

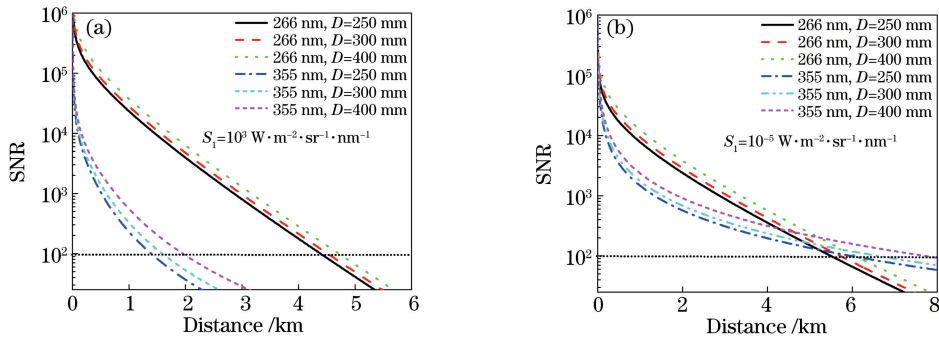


图 8 不同望远镜直径下系统的 SNR。(a)白天;(b)晚上

Fig. 8 SNR of system under different telescope diameters. (a) Daytime; (b) nighttime

度;在夜晚,要达到 6 km 有效探测距离,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统需采用直径为 250 mm 的望远镜,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统需采用直径为 400 mm 的望远镜。通过对比发现 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可以实现全天时大气温度的探测。

在不同望远镜接收视场角 θ 下,高光谱瑞利测温激光雷达系统探测大气温度 SNR 对应的有效探测距离廓线如图 9 所示。在白天,望远镜接收视场角为 0.1, 0.3, 0.5 mrad 时,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离皆为 4.7 km (SNR 为 100);太阳背景光为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,望远镜接收视场角为 0.1, 0.3, 0.5 mrad 时,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离分别为 1.4, 0.9, 0.7 km (SNR 为 100)。在夜间,望远镜接收视场角为 0.1, 0.3, 0.5 mrad 时,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离皆为 6.1 km (SNR 为 100);太阳背景光为 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,望远镜接收视场角为 0.1, 0.3, 0.5 mrad 时,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离皆为 7.7 km (SNR 为 100)。结果表明,在白天和夜间,望远镜接收视场角的大小对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离都没有影响,而臭氧浓度的大小对 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统有影响;白天 θ 的大小对 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离影响很大,而且有效探测距离随着 θ 的增大而减小,是因为增大望远镜接收视场角会增大太阳背景光对雷达系统的影响。在晚上,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统均不受望远镜接收视场角的影响,这是因为晚上太阳背景光强度非常弱。白天 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的最大有效探测距离要比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的最大有效探测距离远约 3.3~4 km。通过分析可知,利用 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可以实现全天时大气温度的探测。

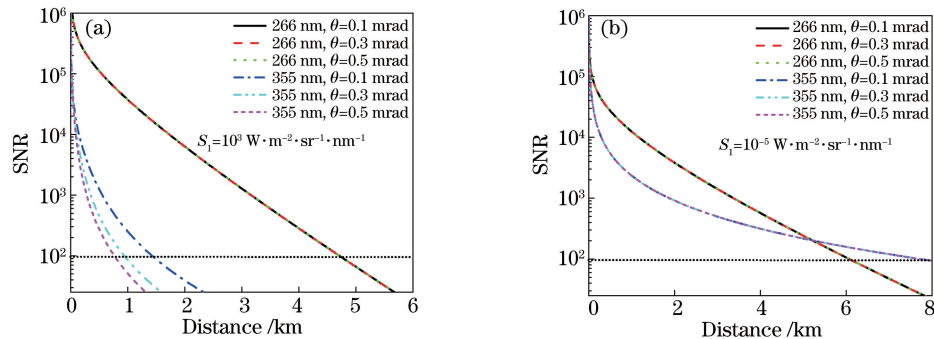


图 9 不同望远镜接收视场角下系统的 SNR。(a)白天;(b)晚上

Fig. 9 SNR of system under different angles of receiving view field of telescope. (a) Daytime; (b) nighttime

高光谱瑞利测温激光雷达系统探测温度偏差廓线如图 10 所示。在白天,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差在 5 km 以内小于 2 K,太阳背景光为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差在 5 km 以内小于 12 K。在夜间,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差在 10 km 以内小于 1.5 K,太阳背景光为 $10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 时,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差在 5 km 以内小于 1.3 K。结果表明,臭氧浓度对 266 nm 高光

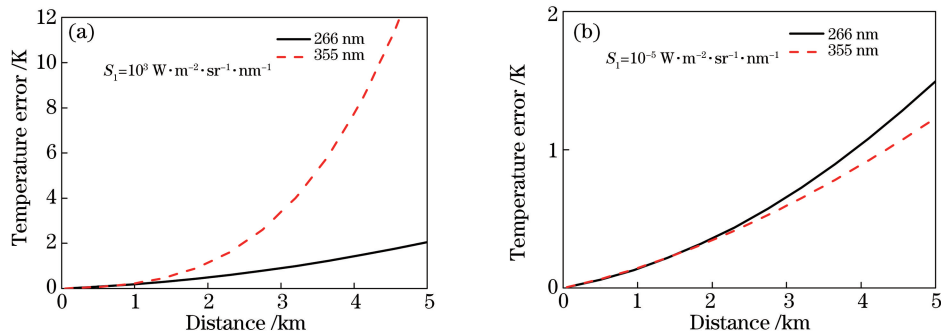


图 10 温度偏差廓线对比分析。(a)白天;(b)晚上

Fig. 10 Comparison of temperature error profiles. (a) Daytime; (b) nighttime

谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差有很大程度的影响,太阳背景光强度会严重影响 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差;白天 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差比 355 nm 系统要小很多。夜间,355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差与 266 nm 系统的相差不大,因此,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可以实现全天时大气温度的高精度探测。

5 结 论

提出了 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统,并对其进行数值仿真,将 266 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统与 355 nm 紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统进行对比分析。理论分析和对比结果表明,266 nm 波长瑞利散射信号谱宽于 355 nm 波长瑞利散射信号谱,更易提取。266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统只受臭氧浓度大小的影响,与太阳背景光无关。在白天,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离远大于 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离;在夜间,266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离也可以达到 6 km 左右,与 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的有效探测距离相差不大。白天 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差比 355 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统的探测温度偏差小很多,夜间相差不大。分析可得 266 nm 高光谱瑞利测温激光雷达系统可以实现全天时大气温度的探测。

参 考 文 献

- [1] Dai Yongjiang. Laser and infrared sounds principle[M]. Beijing: China National Defense Industry Press, 2012: 271-272.
戴永江. 激光与红外探测原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 271-272.
- [2] Qiu Jinhuan, Chen Hongbin. Atmospheric physics and atmospheric sounding[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 11-12.
邱金桓, 陈洪滨. 大气物理与大气探测学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 11-12.
- [3] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, *et al.* Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328004.
王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328004.
- [4] Liu Jintao, Chen Weibiao, Song Xiaoquan. Theory of Iodine filter based on high spectral resolution lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1548-1553.
刘金涛, 陈卫标, 宋小全. 基于碘分子滤波器的高光谱分辨率激光雷达原理[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1548-1553.
- [5] Mao Jiandong, Hua Dengxin, Hu Liaolin, *et al.* Design of spectroscopic filter of all-fiber rotational Raman lidar for temperature profiling[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 7-13.
毛建东, 华灯鑫, 胡辽林, 等. 全光纤拉曼测温激光雷达分光系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 7-13.
- [6] Hua D, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere[J]. Applied Optics, 2005, 44(7): 1305-1314.

- [7] Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter[J]. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11(1): 108-112.
- [8] 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.
- [9] Ansmann A, Arshinov Y, Bobrovnikov S, *et al.* Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar[C]. SPIE, 1999, 3583: 337058.
- [10] Kim D, Cha H, Lee J, *et al.* Pure rotational Raman lidar for atmospheric temperature measurements[J]. Journal-Korean Physical Society, 2001, 39(5): 838-841.
- [11] Hua D, Liu J, Uchida K, *et al.* Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotational Raman lidar[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(9A): 5849-5852.
- [12] Arshinov Y F, Bobrovnikov S M, Zuev V E, *et al.* Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. Applied Optics, 1983, 22(19): 2984-2990.
- [13] Hua D X, Masaru U, Takao K. Ultraviolet high-spectral-resolution Rayleigh-Mie lidar with a dual-pass Fabry-Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere[J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1063-1065.
- [14] Hua D X, Masaru U, Takao K. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar for daytime-temperature profiling of the troposphere[J]. Applied Optics, 2005, 44(7): 1315-1322.
- [15] Cao Kaifa, Huang Jian, Hu Shunxing. Boundary layer ozone differential-absorptionlidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 2912-2917.
曹开法, 黄 见, 胡顺星. 边界层臭氧差分吸收激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2912-2917.