

文章编号: 0253-2239(2007)05-0755-5

大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达*

刘 君 华 灯 鑫 李 言

(西安理工大学精密仪器工程系, 西安 710048)

摘要: 设计了一个转动拉曼激光雷达系统,对大气边界层温度进行全天候高精度测量。系统选用波长 355 nm 的紫外激光作光源,采用高光谱分辨力光栅,将雷达接收到的散射信号以及太阳背景光从空间上分离,配合边缘反射镜,反射转动拉曼信号,去除大部分米氏-瑞利散射和太阳背景光噪声信号,并用两个窄带干涉滤光片,分离中心波长为 353.9 nm 和 353.1 nm 转动拉曼散射信号,同时对噪声信号进行 2 次高精度剔除,以保证白天测量的需要。对系统进行了分析及数值计算,结果表明在激光脉冲能量 300 mJ,望远镜有效口径 25 cm,测量时间 10 min 的条件下,可以在白天太阳背景光辐射度为 $3 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 的边界层内测量高度 2.5 km 以下的大气温度分布,并在大气散射比低于 2.5 的条件下,温度测量精度可达到 1 K。

关键词: 大气光学; 转动拉曼激光雷达; 温度分布; 大气边界层; 全天候测量

中图分类号: P412.2 文献标识码: A

Rotational Raman Lidar for Daytime-Temperature Profiling of the Atmospheric Boundary Layer

Liu Jun Hua Dengxin Li Yan

(Department of Precision Instrument, Xian University of Technology, Xian 710048)

Abstract: A high-accuracy rotational Raman lidar system has been designed for daytime temperature profiling of atmospheric boundary layer. An ultraviolet laser with wavelength at 355 nm is selected as light source. A high-resolution grating is employed to separate scattering signals that the lidar receives and solar background signals according to wavelength spatially, and an edge mirror is then used to reflect the rotational Raman signal and block the majority of interference signals including solar background and Mie-scattering and Rayleigh-scattering signals. Two signal, whose central wavelengths are located at 353.9 nm and 353.1 nm, respectively, are filtered by two narrowband interference filters. The two filters also block the leakage of interference signal accurately, which ensures the requirement of daytime measurement. The lidar system is simulated by using a numerical calculation, and the result shows that the system is capable of measuring temperature profile of atmospheric boundary layer in daytime with a temperature errors of less than 1 K up to a height of 2.5 km under conditions of laser energy of 300 mJ, 25 cm diameter telescope, observation time of 10 min, solar radiance of $3 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ and atmospheric backscattering ratio less than 2.5.

Key words: atmospheric optics; rotational Raman lidar; temperature profile; boundary layer; daytime measurement

1 引 言

研究大气边界层内的状态变化,对研究太阳辐射、地球动力学上的热量转递,解释地球温暖化现象,提高气象预报准确度,特别是对城市气象变化等研究有很重要的意义^[1]。边界层内的温度由于受到地

表的辐射冷却、冷暖前线等影响,时常产生逆温层,并且变化相当复杂。另外,影响大气降水及气溶胶分布的相对水蒸气的测量也需要同时了解大气温度分布,大气温度的测量,对研究气溶胶特性、相对水蒸气分布等有很重要的作用。

* 国家自然科学基金(40675015)资助课题。

作者简介: 刘 君(1962-),女,河南人,西安理工大学副教授,主要从事激光雷达大气遥感探测技术以及光电检测技术方面的研究。E-mail: junliu87@xaut.edu.cn

收稿日期: 2006-07-20; 收到修改稿日期: 2006-12-21

利用激光雷达探测大气温度分布的主要方法有差分吸收法^[2], 高光谱分辨力瑞利散射法^[3~5]和转动拉曼散射法^[6,7]等。相对于前两种测温方法对激光器及分光器的高要求而言, 拉曼散射的谱宽相对较大, 对激光器的频率特性及分光器分辨力的要求相对较低, 是一种结构相对简单、成本较低、却很有潜力的激光雷达。Andreas Behrendt^[6]及 Yuri Arshinov^[7]等相继开发出高精度测温拉曼激光雷达系统。然而, 由于拉曼散射信号的强度相对于气溶胶引起的米氏散射及大气分子引起的瑞利散射要小3~4个数量级, 高精度的测量需要大的激光能量和望远镜接收系统。特别对存在高密度气溶胶的边界层内的白天测温, 需要设计一个既能高精度去除太阳背景光及干扰信号(米氏-瑞利散射信号), 同时又能保证足够测量信号信噪比的高精度、高效率的分光器。虽然目前利用纯转动拉曼激光雷达已能对较高对流层及夜间的大气温度进行较高精度的测量^[6,7], 但对白天边界层内的大气温度进行高精度测量一直是激光雷达遥感的技术难题。

本文设计了一个高效率的拉曼激光雷达系统, 实现对3 km以下存在高密度气溶胶的地表边界层内大气温度分布进行白天高精度测量。通过利用标准大气模型和实测的米氏散射系数高度分布模型进行数值仿真, 对设计的高分辨力分光系统的米氏和瑞利散射信号的去除率及温度测量精度进行预测评估计算, 证明设计的拉曼激光雷达系统可以实现白天高精度测温。

2 激光雷达系统构成

纯转动拉曼激光雷达的系统构成如图1所示, 为了在提高拉曼散射谱线强度的同时让系统工作在太阳背景光强度较弱的波段, 系统选用脉冲Nd:YAG激光器的三次谐波波长355 nm的激光作为光源, 单脉冲能量300 mJ, 经准直扩束后射入大气。大气的后向散射光由望远镜接收, 经由光纤、聚光镜L1照射到高光谱分辨力光栅上。利用光栅的衍射效应, 将雷达接收到的大气后向散射信号以及太阳光谱从空间上分离开, 配合边缘反射镜Me, 将接收到的大气后向散射光谱中的纯转动拉曼光谱的反斯托克斯谱线与米氏-瑞利散射光谱以及太阳光谱从空间分开, 再利用边缘反射镜让米氏-瑞利信号透过, 由光电倍增管PMT1接收, 这样, 就除去了大部分的米氏-瑞利散射信号和太阳背景光噪声。反射拉曼信号经透镜L3入射到窄带干涉滤光片IF1

上, 透过IF1的信号经L4聚焦后由光电倍增管PMT2接收, 此为通道1。由IF1反射的信号, 射向窄带干涉滤光片IF2, 透过IF2的信号经L5聚焦后由光电倍增管PMT3接收, 此为通道2。用这2个窄带滤光器, 分离了中心波长为353.9 nm和353.1 nm的转动拉曼散射信号, 同时对上述噪音信号进行2次高精度滤除, 以满足白天及高密度气溶胶空间的温度测量要求。

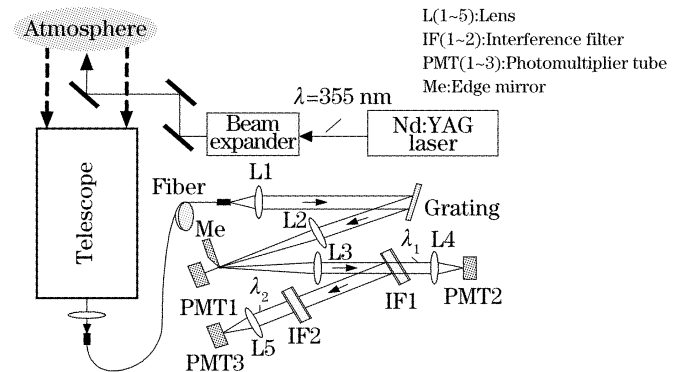


图1 转动拉曼散射激光雷达系统

Fig. 1 Diagram of rotational Raman lidar system

3 转动拉曼散射信号强度的温度依存特性

选择探测纯转动拉曼光谱的反斯托克斯支, 根据转动拉曼信号后向散射截面公式^[8], 可以计算出N₂分子在不同波长处的拉曼散射截面的变化以及温度系数如图2所示, 由于低层大气温度范围在200~300 K, 这里分别取温度T=200 K和T=300 K

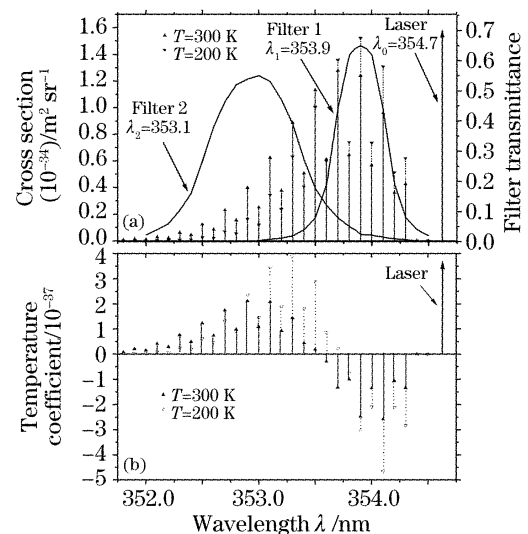


图2 转动拉曼散射谱线强度及滤光片的透射特性(a), 谱线的温度系数(b)

Fig. 2 Intensity of rotational Raman scattering spectra and transmission of filters (a), temperature coefficient of rotational Raman scattering spectra (b)

计算。由图可见,在 353.9 nm 光谱处,拉曼信号随温度的负变化率最大,在 353.1 nm 光谱处,拉曼信号随温度的正变化率为最大。因而取转动拉曼光谱为 $\lambda_1=353.9$ nm 和 $\lambda_2=353.1$ nm,相应的转动量子数分别为 $J=6$ 和 $J=14$,波长 λ_1 和 λ_2 也分别定为两个窄带滤光片 IF1 和 IF2 的中心波长。

由于大气纯转动拉曼谱线的低量子数和高量子数谱线的强度会随温度的升高而分别减少和增强,选用上述 2 个中心波长的拉曼信号,并对 2 个测量信号进行差分处理,系统的温度测量敏感度成为 2 个通道温度敏感度的和,从而改善了系统的整体测温敏感度特性。

可以通过计算通道 1 和通道 2 接收的拉曼散射信号强度比,反演出大气温度分布。设通道 1 与通道 2 的散射信号(P_1, P_2)强度比 $H(T, R)$ 为

$$H(T, R) = \frac{P_1(T, R)}{P_2(T, R)} = A \exp\left[-\frac{B}{T(R)}\right], \quad (1)$$

式中 R 为探测高度, A, B 为系统常数,可以通过无线电探空仪对雷达系统标定得到。大气温度数值可以由(1)式导出

$$T(R) = -\frac{B}{\ln[H(R)/A]}. \quad (2)$$

4 空间米氏-瑞利散射信号的分离

利用高光谱分辨力光栅对系统接收到的大气散射信号进行分光,光栅的谱分辨力为 6 pm,衍射光聚焦长度为 300 mm,取 1 级衍射级次。由光栅方程计算得,经聚光镜后波长为 λ_1 和 λ_2 的衍射光与波长为 $\lambda_0=354.67$ nm 的衍射光的空间直线距离分别为 0.66 mm 和 1.37 mm。可见,利用光栅衍射,可以将拉曼波长 λ_1 和 λ_2 的散射信号和米氏-瑞利散射信号从空间上和光谱上分离开来,并同时也将日光光谱分开。

散射信号光谱可简化为高斯模型,先取光斑直径 $d_0=0.30$ mm,温度 $T=300$ K,经光栅分光后,转动量子数分别为 6 和 14 的转动拉曼散射信号强度与米氏-瑞利散射信号强度沿 x 轴的分布如图 3 所示。

由图 3 可见,将边缘反射镜的遮光位置设在 0.43 mm 处,就可以使米氏-瑞利散射信号以及大部分太阳背景光透过,而将拉曼散射信号反射向窄带滤光片。由于边缘反射镜的锐边切在离 λ_0 光斑中心 0.43 mm 处, λ_0 光的衍射现象已不明显,即使有部分 λ_0 衍射光反射回来,能量已很弱,设计上将准

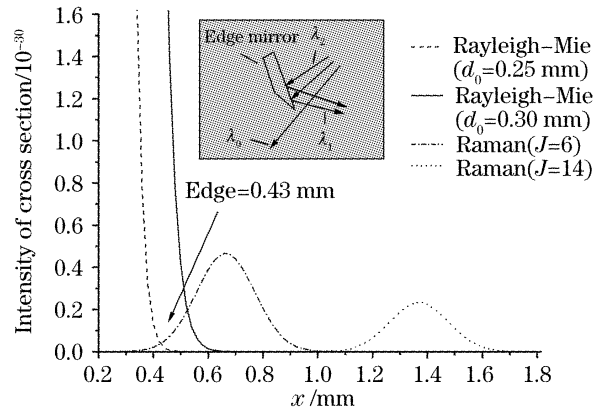


图 3 成像到边缘反射镜上的 2 个拉曼散射信号强度空间分布

Fig. 3 Intensity distribution of the two rotational Raman scattering spectra ($J=6, 14$) imaged on the edge mirror 直透镜 L_3 的焦点位置与 λ_1 的光斑中心重合,结合光阑及滤光片 IF1,可以再次剔除对非焦平面上衍射杂光的影响,衍射现象的影响基本可忽略不计。

根据图 3 所示的光谱位置,将边缘反射镜的遮光位置设在 0.43 mm 处,对各散射信号从边缘反射镜的遮光位置开始沿 x 轴进行积分,取 $J=6$ 得到进入通道 1 的拉曼散射截面强度为 1.199×10^{-34} ,取 $J=14$ 得到进入通道 2 的拉曼散射截面强度为 0.62×10^{-34} ,进入各通道内的剩余米氏散射截面强度和瑞利散射截面强度分别为 0.3×10^{-34} 和 1.128×10^{-34} 。改变光斑直径 $d_0=0.25$ mm,米氏-瑞利散射信号的光谱分布也示于图 3,积分后,得到进入各通道内剩余的瑞利散射截面强度为 1.166×10^{-35} ,信号强度又降低了一个数量级。

由以上分析可见,利用光栅分光,并借助边缘反射镜,对米氏-瑞利散射信号的抑制率可以达到 4 个数量级,并且同时能将日光光谱分离并抑制。相对于窄带干涉滤光片分光,这种分光方法光谱分辨力要高得多,更有益于滤除米氏-瑞利散射信号及太阳背景光,同时实现了对拉曼信号的高效率获得。

散射信号经分光后,再分别通过窄带干涉滤光片 IF1 和 IF2,又使米氏-瑞利散射信号被抑制 3 个数量级。至此,整个光路系统对米氏-瑞利散射信号的抑制率达到 7 个数量级以上。

5 系统中各散射信号的强度

假设在白天波长 λ_0 附近太阳背景光的辐射度为 3×10^8 W/($m^2 \cdot sr \cdot nm$),根据图 1 及表 1 的系统参量,可以估算出在波长 λ_1 和 λ_2 光谱线附近,系统探测到的太阳背景光强度为 3.7×10^{-11} W。按

照大气米氏散射信号模型及表 1 的系统参量,并考虑到分光系统对米氏-瑞利散射信号有 7 个数量级的滤除率,通过激光雷达方程可计算出进入雷达系统的各散射信号及太阳背景光的强度随探测高度分布,其结果如图 4 所示。

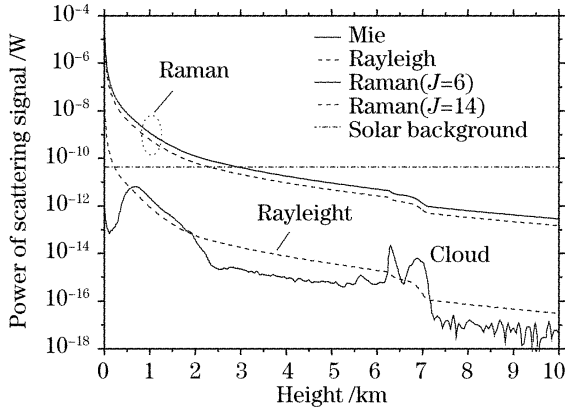


图 4 经分光器滤光后的大气回波信号强度分布
Fig. 4 Intensity distributions of lidar returning signals after passing through the spectroscopic filter

表 1 转动拉曼雷达系统参量

Table 1 Parameters of rotational Raman lidar system

Nd:YAG wavelength /nm	354.7
Pulse energy /mJ	300
Pulse repetition rate /Hz	20
Telescope diameter /mm	250
Field of view /mrad	0.1
Grating grooves /mm ⁻¹	2400
Filter	1, 2
Central wavelength /nm	353.9, 353.1
Bandwidth /nm	0.5, 1.0
Peak transmissivity /%	60, 70

由图 4 可见,经光栅分光、边缘反射镜遮挡以及窄带干涉滤光片的滤光,对米氏-瑞利散射信号的滤除率达到 7 个数量级,有效地保证了测温所需的系统信噪比,并且探测的拉曼信号在 2.5 km 高度以下要比太阳背景光强,因而可以实现白天低空大气温度探测。

6 温度分布及其探测误差

以近地面某点温度值为参考点,通过利用标准大气模型和实际测得的气溶胶米氏散射系数的高度分布,对大气温度测量进行系统仿真计算。仿真计算结果如图 5 所示。图 5(a)表示大气温度高度分布,虚线为大气标准模型温度分布,实线为按米氏散射模型计算的该雷达系统测量的温度分布。图 5(b)为米氏与瑞利后向散射比。从图中可见,在大气边界层处,散

射比小于 2.5 时,温度测量的准确度可以到达小于 1 K,而在 6~7 km 高度处,由于云的米氏散射信号较强,导致温度测量值偏差较大。

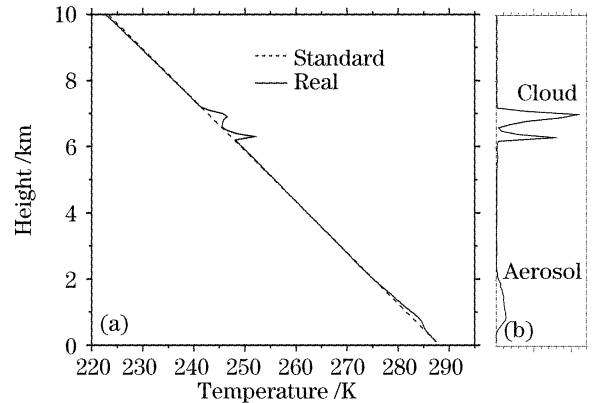


图 5 仿真得到的温度与大气温度模型的高度分布(a)及大气后向散射比(b)

Fig. 5 Temperature profiles versus height obtained by simulation and standard model (a), and the backscatter ratio (b)

根据 2 个通道中各自接收的拉曼散射信号光子数以及通道中剩余米氏-瑞利信号光子数和太阳背景光的光子数,计算出系统总信噪比 R_{SN} 如图 6 所示。

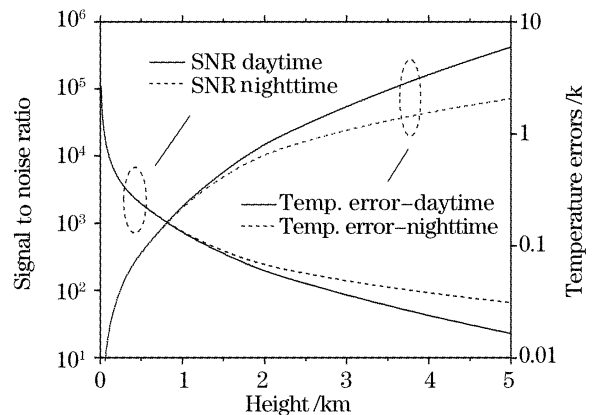


图 6 白天和夜晚的测量信噪比和温度误差的高度分布
Fig. 6 Profile of signal-to-noise ratio (SNR) and temperature errors versus height for daytime and nighttime measurement

气温探测的灵敏度为

$$\theta[T(R)] = \frac{1}{H(T,R)} \cdot \frac{dH(T,R)}{dT}, \quad (3)$$

则系统的温度探测误差为

$$e(R) = \frac{1}{R_{SN}(R) \cdot \theta[T(R)]}. \quad (4)$$

$R_{SN}(R)$ 为信噪比,所有的激光雷达回波信号均采用模拟方式的光电倍增管接收,光电倍增管的输出信号采用一个高增益低噪声的阻抗匹配电路后再送入计算机采集,这样既能保证测量所需的信号频率特性,又能保障较大的电压输出。取测量时间 10 min,

模拟探测的采样周期 300 ns,相应的高度分辨力为 45 m,得到温度误差随探测高度 R 的变化曲线如图 6 所示,图 6 中同时给出了白天和夜晚观测时的变化曲线。

7 结 论

本文设计的纯转动拉曼激光雷达系统,采用高光谱分辨力光栅将拉曼光谱与米氏-瑞利光谱以及太阳背景光从空间分开,借助边缘反射镜滤除大部分噪声信号,并利用 2 个窄带干涉滤光片分别提取 2 个波长的纯转动拉曼信号,改善了系统的分光效率,以实现较高的测量信号的信噪比。理论分析与计算结果表明,在激光能量 300 mJ,望远镜有效口径 25 cm,测量时间 10 min 的条件下,可以在白天太阳背景光辐射度为 $3 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 的边界层内测量高度 2.5 km 以下的大气温度分布,并在大气散射比低于 2.5 的情况下,测量精度可达到 1 K。证明了该系统完全可以实现高精度全天候大气边界层的温度测量。

参 考 文 献

1 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu zhishen. *Lidar for Environment Monitoring* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 135~140 (in Chinese)
阎吉祥,龚顺生,刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 135~140

2 Jens Bösenberg. Ground-based differential absorption lidar for water-vaper and temperature profiling; methodology[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 3845~3860
3 Dengxin Hua, Masaru Uchida, Takao Kobayashi. Ultraviolet high-spectral resolution Rayleigh-Mie lidar with a dual-pass Fabry-Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1063~1065
4 Dengxin Hua, Takao Kobayashi. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar by use of a multicavity Fabry-Perot filter for accurate temperature profiling of the troposphere[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30): 6474~6478
5 Wu Yonghua, Hu huanling, Hu shunxing *et al.*. Rayleigh-Raman scattering lidar for atmospheric temperature profiles measurements[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(7): 851~856 (in Chinese)
吴永华,胡欢陵,胡顺星等. 瑞利-拉曼散射激光雷达探测大气温度分布[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 851~856
6 Andreas Behrendt, Jens Reichardt. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1372~1378
7 Yuyi Arshinov, Sergey Bobrovnikov, Ilya Serikov *et al.*. Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry-Perot interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17): 3593~3603
8 Wu Yonghua, Li Tao, Zhou Jun *et al.*. Raman lidar for atmospheric temperature profiles of the middle and upper troposphere[J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(5): 702~708 (in Chinese)
吴永华,李陶,周军等. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J]. *大气科学*, 2002, **26**(5): 702~708
9 M. Penney, R. L. St. Peters, M. Lapp. Absolute rotational Raman cross sections for N_2 , O_2 , and CO_2 [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(5): 712~716