

## 多条转动拉曼谱线雷达测量对流层大气温度

苏嘉<sup>1,2</sup>, 张寅超<sup>3</sup>, 胡顺星<sup>1</sup>, 曹开法<sup>1</sup>, 赵培涛<sup>1</sup>, 汪少林<sup>1</sup>, 谢军<sup>1</sup>

1. 中国科学院安徽光机所国家“863”计划大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031
2. 中国科学院合肥智能研究所, 安徽合肥 230031
3. 北京理工大学光电工程系, 北京 100081

**摘要** 由于对流层大气中气溶胶的存在, 传统的利用大气中瑞利散射和振动拉曼散射测量大气温度的方法具有一定的局限性, 然而利用大气  $N_2$  和  $O_2$  分子的转动拉曼信号获得大气温度信息的方法不受对流层大气中气溶胶的影响。因此利用  $N_2$  和  $O_2$  分子纯转动拉曼散射激光雷达开展了测量对流层下部温度分布的实验研究。现有的转动拉曼雷达系统基本上是通过获取单一的转动拉曼谱线来反演大气温度, 这就导致了系统的信噪比低, 不能很好的反演温度。作者在双光栅单色仪的基础上提出了一种新的雷达信号分光系统。这种新的分光系统的每条通道所获得的信号并不是单独的转动拉曼谱线, 而是多条转动拉曼谱线之和, 这样就能提高整个系统的信噪比。在较小的激光能量和小口径望远镜的情况下, 利用这种方法, 雷达系统可以在几公里内获得较好的信噪比。最后实验得到了对流层 0.3 ~ 5 km 高度内的大气温度分布, 它与球载无线电探空仪比较, 二者一致性较好。

**关键词** 激光雷达; 温度测量; 双光栅单色仪; 对流层温度

**中图分类号**: TN958.98 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2008)08-1781-05

### 引言

目前主要的观测大气温度手段有火箭及高空气球探空、星载辐射计和激光雷达等。在我国, 火箭仍很有限; 卫星资料尚需地面定标, 并且其空间分辨率较低; 无线电探空仪的时空分辨率受风速和风向的影响; 而激光雷达则具有较高的空间分辨率, 且能够进行长期连续观测, 为卫星数据的定标提供了较好的资料<sup>[1]</sup>。激光雷达探测大气温度主要包括: 瑞利散射方法, 振动拉曼方法和转动拉曼方法。瑞利散射方法通常探测 30 km 以上的温度, 该方法认为大气透过率近似为 1, 不适用于低层大气温度测量。振动拉曼法由于低层大气气溶胶分布的剧烈变化会给大气透过率校正带来困难, 也不能很好的测量其温度。转动拉曼法测量低层大气温度时, 气溶胶和分子消光项除了影响回波信号的强度外, 对测量精度基本没有影响, 能够很好的测量低层大气温度<sup>[2-8]</sup>。在利用大气的转动拉曼测量对流层下层大气温度方面许多研究组织已经做出了很多贡献, 他们利用干涉滤光片<sup>[3,9]</sup>, 标准具<sup>[4,10]</sup>和双光栅单色仪去获得单条的拉曼转动谱线<sup>[5,11]</sup>。换句话说, 使用干涉滤光片, 标准具和双光栅单色仪在雷达系

统中进行分光只能获得单条的转动拉曼谱线, 这样就会导致系统的信噪比很低, 使本来就弱的转动拉曼信号更加难以探测。为了提高雷达系统的信噪比, 我们设计了能够接收多条转动拉曼谱线的雷达系统。这种方法是在双光栅单色仪的基础上进行改进的, 它的基本思想是减小分光系统中透镜的焦距, 从而使更多的转动拉曼谱线耦合到接收光纤中, 提高整个系统的信噪比。本文将介绍这种能够接收多条转动拉曼谱线的雷达系统。最后就其观测结果进行对比分析和讨论。

### 1 纯转动拉曼测温雷达分光系统的新结构

图 1 是纯转动拉曼雷达的分光系统结构图, 该单色仪由两块光栅组成, 均工作于输入输出共焦面形式, 目的是要分别提取  $N_2$  和  $O_2$  分子转动拉曼的 Stokes 和 Anti-Stokes 谱中的高阶谱和低阶谱。激光雷达的回波光由输入光纤从第一光栅系统的焦平面送入,  $N_2$  分子的高阶、低阶 Stokes 和 Anti-Stokes 四组谱线分别被在其焦平面相应位置处的四根光纤所接收。在第二光栅系统的焦平面上, 这四组光谱分别有严格选定的位置输入, 使经第二光栅衍射后, 两组低阶转动拉曼谱会聚于输出光纤 1, 而两组高阶转动 Raman 谱会聚于输出

收稿日期: 2007-03-26, 修订日期: 2007-06-29

基金项目: 国家“863”计划激光技术领域和国家自然科学基金项目(49775258)资助

作者简介: 苏嘉, 1979年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士 e-mail: sujia0804@163.com

光纤 2, 从而达到高带外抑制和高光谱分辨的目的。

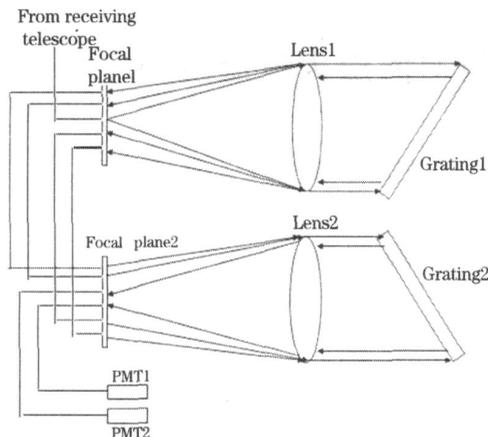


Fig 1 Optical arrangement of the new light-splitting system

这种结构和双光栅单色仪结构基本上是相同的, 可参考文献[5]。唯一不同的是它减小了双光栅单色仪中准直和聚文

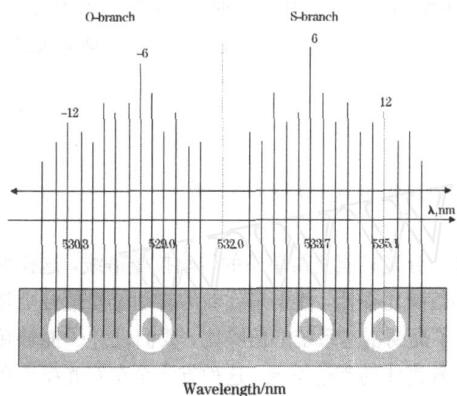


Fig 2 Received Raman lines in the focal plane1 of the double grating monochromator

焦透镜的焦距, 减小光栅的色散能力, 使更多的转动拉曼谱线耦合接收光纤中, 提高整个系统的信噪比。图 2 和图 3 分别表示光栅单色仪和新的分光系统中的光纤在第一块焦平面所接受的转动拉曼谱线, 我们可以看出图 3 中新的光学系统中的透镜焦距减小, 相当于把拉曼光谱进行压缩, 从而使相同的光纤中能接受更多拉曼谱线, 提高整个系统的信噪比。

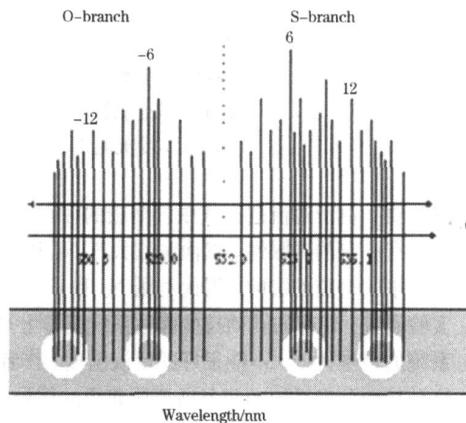


Fig 3 Received Raman lines in the focal plane1 of the new light-splitting system

## 2 新分光系统的纯转动拉曼雷达反演温度的灵敏度推导

虽然减小透镜的焦距, 可以耦合更多的转动拉曼谱线, 但是利用多条谱线是否能够反演温度, 或是反演温度的灵敏度和单条谱线反演温度的灵敏度是否一样, 我们只有通过下面理论公式推导才能知道。

根据参考文献[5-7, 12-14], 我们可以得到多条谱线的 R 值为:

$$R(T(z)) = \frac{\left( \begin{aligned} & I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \\ & + I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \end{aligned} \right) \times C_1}{\left( \begin{aligned} & I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \\ & + I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \end{aligned} \right) \times C_2} \quad (1)$$

我们也可以得到单条谱线的 R 值为:

$$R(T(z)) = \frac{\left( \begin{aligned} & I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \\ & + I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \end{aligned} \right) \times C_1}{\left( \begin{aligned} & I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \\ & + I_T \times T(R, 0) \times Av^{\frac{1}{2}} g_I(J) \frac{BN_0}{KT} (2J+1) \times \exp\left\{ -\frac{Bhc}{KT} J(J+1) \right\} |H_j^2|^2 \times (R, ) \times \frac{1}{R^2} \times T(R, j) \times \times \frac{A^1}{R^2} \end{aligned} \right) \times C_2} \quad (2)$$

由于我们的雷达系统中激光器的采用波长为 532 nm, 所以数值计算就采用前人得到的 532 nm 波长大气分子消光模式和气溶胶粒子消光系数模式, 见参考文献[15,16]。

因为纯转动拉曼谱线与其激发波长的间隔非常小, 所以我们近似认为纯转动拉曼谱线与 532 nm 大气模式相同, 另外我们还忽略了接收两路回波信号探测器的影响。

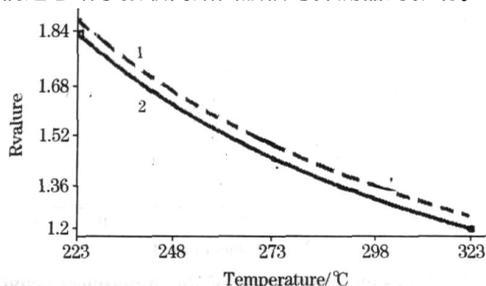


Fig 4 R value of multiple Raman lines and single Raman line with temperature

1: R value of multiple Raman lines;  
2: R value of single Raman line

把以上的参数式代入(1)和(2)式, 我们通过编程计算出随温度改变的多条谱线和单条谱线的 R 值如图 4 所示, 从上图中我们可以看出多条谱线反演温度的灵敏度和单条谱线反演温度的灵敏度是基本相同的, 也就是说, 我们利用测量多条谱线同样可以同样很好的反演大气温度。雷达探测极限的表达式为  $dos \times \frac{dT}{d(S_1/S_2)}$ , dos 是两个通道的转动拉曼信号比值的标准偏差,  $S_1$  和  $S_2$  是两个通道的转动拉曼信号, 从上式可以看出, 利用多条谱线测量大气温度雷达最小探测极限要小于利用单条谱线测量大气温度雷达最小探测极限。

### 3 转动拉曼激光雷达系统

转动拉曼激光雷达系统主要包括激光发射, 信号接受和数据采集以及控制三部分。整个系统如图 5 所示。ND YAG 固体激光器两倍频 532 nm 作为探测激光波长, 经导光单元垂直导向大气层, 单脉冲激光能量约为 80 mJ, 重复频率为 20 Hz, 光束发散角小于 0.3 mrad。信号接收望远镜为直径 300 mm 的卡塞格林型, 接受视场为 0.5 mrad, 激光发射和信号接收属于同轴系统, 雷达的盲区约为 300 m。信号接收系统是采用上述的分光系统来分离我们所需要的转动拉

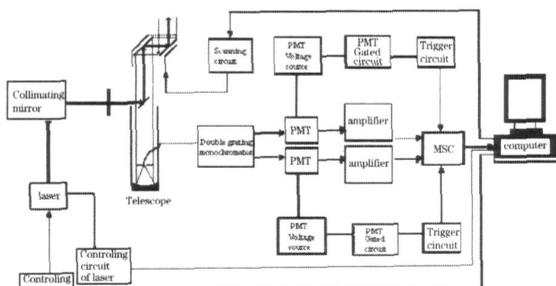


Fig 5 Schematic diagram of Raman Lidar

曼信号。前端探测器选用光电倍增管(PMT)9214B 及配套电源1 250 V 和 9813B 及配套电源 1 950 V(增益比 9 214 B 大), PMT 配置了相应的半导体制冷器(FACT50, 工作在 - 20 )。前置放大器选用的是 phillips 6954 及配置 15 V 低噪声电源、光子计数器 P7882。数据采集卡采用了多通道光子计数器(MCS)检测信号, 其双通道最大计数率为 100 MHz, 并具有累加, 平均, 甄别和存储功能。基于 Windows 界面的计算机软件可分别设置信号采样的分层厚度, 最大高度, 甄别电平和激光发射脉冲数, 实时显示回波信号随高度的分布信号。

### 4 探测原理及数据处理

转动拉曼雷达测量温度的方法是: 大气中  $N_2$  和  $O_2$  分子高低量子数的转动拉曼散射回波的波长与激发波长都比较近(距离不超过 3 nm), 所以可近似认为大气对转动拉曼谱线的消光和它们本身的散射截面都是相同的。因此我们可以推导出大气中  $N_2$  和  $O_2$  分子高低量子数的转动拉曼散射信号比就等于  $N_2$  和  $O_2$  分子高低量子数的转动拉曼谱线强度比, 这个比值满足一指数关系, 由此关系式可以反演出温度<sup>[17-19]</sup>:

$$\frac{n_{LL}(z)}{n_{JH}(z)} = \frac{I(J_L) \times (z, J_L) \times T(z, J_L) \times I \times K_L \times \frac{A^1}{2z^2}}{I(J_h) \times (z, J_H) \times T(z, J_H) \times h \times K_h \times \frac{A^1}{2z^2}}$$

$$\frac{I(J_L) \times I \times K_L}{I(J_h) \times h \times K_h} = \exp[A/t(z) + B] \quad (3)$$

$$t(z) = \frac{A}{\ln \left[ \frac{n_{LL}(z)}{n_{JH}(z)} \right] - B} \quad (4)$$

式中:  $n_{LL}(z)$ ,  $n_{JH}(z)$  分别代表大气中  $N_2$  和  $O_2$  分子低、高量子数的转动拉曼散射回波信号,  $t(z)$  是温度,  $z$  是高度,  $(z, J_L)$ ,  $(z, J_H)$  是转动 Raman 低、高量子数谱线后向散射截面,  $T(z, J_L)$ ,  $T(z, J_H)$  是转动 Raman 低、高量子数谱线大气消光系数,  $T(z, J_L)$ ,  $T(z, J_H)$ ,  $I$ ,  $h$  是光学系统接收转动 Raman 低、高量子数回波信号的透过率,  $K_L$ ,  $K_h$  是探测器对转动 Raman 低、高量子数回波信号的灵敏度,  $A^1$  是接收望远镜的面积,  $A$ ,  $B$  是由激光雷达测出两个拉曼信号的强度比和无线电探空仪测出的温度拟合出来雷达系数。

### 5 探测结果与讨论

转动拉曼测温激光雷达在合肥市西郊的夜晚进行观测, 测量累积激光脉冲数均为 20 000, 时间一般约为 17 min 左右, 数据采集的空间分辨率为 30 m。我们实验系统所采用的望远镜直径比较小和激光器的能量比较弱(相对于国外的系统)。我们的雷达所探测的回波信号距离只能达到 5 km。我们采用下面的方法来验证转动拉曼信号的可信度。选取了一个有低云的夜晚, 通过雷达试验系统同时测得了两组高、低量子数转动拉曼回波信号和一组 Rayleigh-Mie 散射回波信号

如图 6 所示。我们可以看出 Rayleigh-Mie 散射回波信号(已作了衰减)在有低云的地方(1.2~2.2 km)有很强烈的起伏,而拉曼信号却不随云有强烈变化,可见我们设计的双光栅单色仪系统能很好的抑制 Rayleigh-Mie 散射,也可以证明我们采集的信号是拉曼信号(国外也是用此方法证明)<sup>[5,20]</sup>。

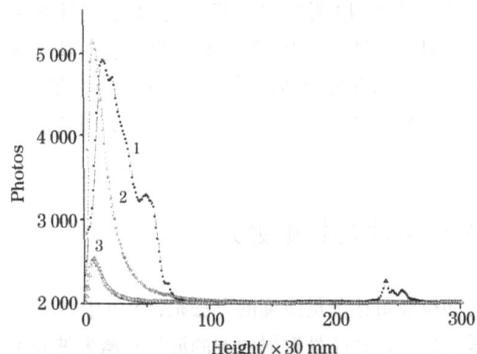


Fig 6 Lidar returns from the atmosphere with the combined Raman and Rayleigh-Mie scattering lidar

1: Rayleigh-Mie; 2: Raman 1; 3: Raman 2

图 7 给出了转动拉曼雷达测量的一组温度廓线,它与无线电探空仪的结果基本上表现了较好的一致性。可以看到这两组廓线基本上表现出较好的趋势。从上图可以看出 0.3~5 km 范围内两者的相对偏差小于 3%,它们之间最大的温度偏差为 3。我们还可以看出在 0.3 km 以下雷达盲区的温度起伏很大,在 4.5 km 以上由于信噪比的减小也导致了与探空气球测量的温度偏差变大。另外,球载无线电探空仪受风向和风速的影响,与激光雷达测量的存在着一定的差异,还有就是激光雷达测量温度廓线是一段时间内的平均温度,而球载无线电探空仪测量温度是垂直高度上不同时刻的温

度,这也可能造成两条温度曲线有所差异。总之通过它们的对比,可以表明拉曼雷达测量的结果基本上是合理的。

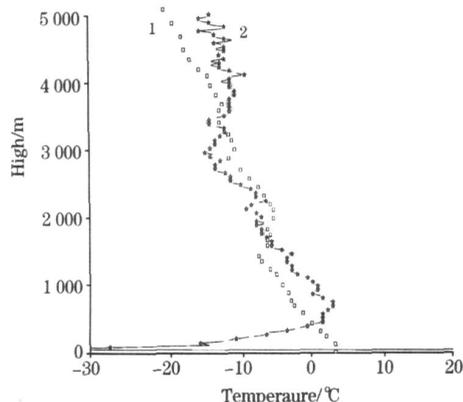


Fig 7 Temperature profiles of the atmosphere acquired with the lidar and a radiosonde

1: 21:32 2007 03 25; 2: 21:47 2007 03 25

## 6 结 论

在目前对流层背景大气条件下,该转动拉曼激光雷达能够用于探测对流层低层大气温度分布。在我们提出了一种新的雷达信号分光系统的基础上,在 0.3~5 km 范围内,该激光雷达获得的大气温度与无线电探空仪的结果比较一致。但是由于转动拉曼散射信号比较弱,又非常靠近 Rayleigh-Mie 散射信号,使该雷达的研制技术和成本难度变大,因而国内这方面工作报道很少,本文旨在尝试该方法的可行性及其结果的准确性。下一步可以从提高激光器的能量和望远镜的口径来加大该雷达的探测距离。

## 参 考 文 献

- [1] WU Yong-hua, LI Tao, ZHOU Jun(吴永华,李陶,周军). Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学), 2002, 26(5): 706.
- [2] Balin I, Serikov I, Bobrovnikov S. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2004, 79(6): 778.
- [3] Nedeljkovic D, Hauchecome A, Chanin M L. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, 1993, 31: 92.
- [4] Arshinov Y, Bobrovnikova S T, Serikova Ia. Proceedings of SPIE, 2001, 4397: 456.
- [5] Ansmann A, Arshinov Y, Bobrovnikov S. in Fifth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Vladimir E. Zuev, Genadii G. Matvienko, Eds., Proceedings of SPIE, 1998, 3583: 492.
- [6] Arshinov U F, Bobrinov S M, Zuev V E. Appl. Opt, 1983, 22: 2984.
- [7] Balsiger F, Paul Haris A T, Philbrick C R. SPIE, 1996, 2832: 56.
- [8] Philbrick C R, Lysak D B. Proceedings of the Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations (BACIMO), 1999, 2886: 460.
- [9] Philbrick C R. Proceeding of Nineteenth International Laser Radar Conference, 1998, NASA/CP-1998-207671/PT1: 289.
- [10] Pablo Ristori, Martin Froidevau, Todor Dinoev, et al. Proc. of SPIE, 2005, 5984: 1.
- [11] Kim D, Spark, Cha H, et al. Appl. Phys B., 2006, 82: 1.
- [12] Arshinov Y, Bobrovnikov S, Serikov I. Appl. Opt., 2005, 44: 3593.
- [13] Dukhyeon Kim, Hyungki Cha. Optics Letters, 2005, 30(13): 1726.
- [14] Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Meas. Sci. Technol., 2001, 12: 33.
- [15] HONG Guang-lie, ZHANG Yin-chao, ZHAO Meng-ran(洪光烈,张寅超,周孟然). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱

- 分析), 2006, 26(7): 1249.
- [16] ZHAO Yue-feng, ZHANG Yin-chao, HONG Guang-lie(赵曰峰, 张寅超, 洪光烈). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(5): 794.
- [17] Whiteman D N. Appl. Opt., 2003, 42: 2571.
- [18] Penney C M, Lapp M. J. O. S., 1974, 64: 712.
- [19] Fouche. Appl. Phys. Lett., 1971, 18(12): 579.
- [20] Fenner. J. Opt. Soc. Am., 1973, 63(1): 73.

## Raman Lidar Measuring Tropospheric Temperature Profiles With Many Rotational Raman Lines

SU Jia<sup>1,2</sup>, ZHANG Yin-chao<sup>3</sup>, HU Shun-xing<sup>1</sup>, CAO Kai-fa<sup>1</sup>, ZHAO Pei-tao<sup>1</sup>, WANG Shao-lin<sup>1</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>

1. Key Lab of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
3. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Due to lower tropospheric aerosols, the Rayleigh and vibrational Raman methods can't measure lower tropospheric temperature profiles accurately. By using N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> molecular pure rotational Raman scattering signals, lower tropospheric temperature profiles can be gained without influence of lower tropospheric aerosols. So we decide to use a pure rotational Raman Lidar to get lower tropospheric temperature profiles. At present, because the most light-splitting systems of pure rotational Raman Lidar measure temperature by gaining a single rotational Raman line, the signal to noise ratio (SNR) of these Lidar systems are very low. So we design a new kind of Lidar light-splitting system which can sum different rotational Raman lines and it can improve SNR. And we can find the sensitivity of the temperature of the ratios of multi rotational Raman lines is as same as single rotational Raman line's through theoretical analysis. Moreover, we can obtain the temperature profiles with good SNR from this new the system with a normal laser and a small telescope up to several kilometers. At last, with the new light-splitting system, the lower tropospheric temperature profiles are measured from 0.3 km to 5 km altitude. They agree well with radiosonde observations, which demonstrate the results of our rotational Raman lidar are reasonable.

**Keywords** Lidar; Temperature-measuring; Double-grating monochromator; Tropospheric temperature

(Received Mar. 26, 2007; accepted Jun. 29, 2007)