

文章编号: 1003-501X(2006)10-0043-06

探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达

刘玉丽^{1,2}, 张寅超¹, 苏嘉¹, 岳古明¹, 周军¹, 胡欢陵¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 提出了一种新的探测对流层低层大气温度的转动拉曼激光雷达方法, 通过测量 N_2 和 O_2 的后向散射的纯转动拉曼谱的强度, 计算它们的比值来确定大气温度的垂直分布, 并对其性能进行了数值模拟。转动拉曼激光雷达的光源是一个调 Q 的 Nd:YAG 激光器, 经扩束器后输出能量 200mJ; 采用双光栅单色仪提取所需要的氮气和氧气的转动拉曼谱; 接收机采用光电倍增管和双通道光子计数器, 量子效率是 10% (48000 个脉冲累加)。夜晚它对近地面 10.2km 高度内的探测信噪比在 10:1 以上, 白天它对近地面 3.6km 高度内的探测信噪比在 10:1 以上, 计算的温度与模拟用的温度真值曲线相差约 0.3K。

关键词: 拉曼激光雷达; 大气激光探测; 大气温度; 光栅单色仪

中图分类号: TN958, P412

文献标识码: A

Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air

LIU Yu-li^{1,2}, ZHANG Yin-chao¹, SU Jia¹, YUE Gu-ming¹, ZHOU Jun¹, HU Huan-ling¹

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Rotational Raman lidar technique was introduced to measure atmospheric temperature in the lower-air in this paper. A rotational Raman lidar detects the rotational-Raman backscattering signals of N_2 and O_2 in the atmosphere. By calculating ratio between two return signals, atmospheric temperature vertical profiles can be derived. the performance of this lidar was simulated. The transmitter of rotational Raman lidar is a Q-switched Nd:YAG laser with a output energy of 200mJ by a beam expander. We filter out the necessary portions of pure rotational Raman spectra of molecular nitrogen and oxygen with a double grating monochromator. The receiver employs double channel photo counter and photomultiplier tube with quantum efficiency of 10%. Signal simulations indicate that Signal-to-Noise Ratio (SNR) below 10.2km is more than 10:1(48000 pulse) during night-time and it below 3.6km is more than 10:1 during day-time. The calculated temperature profiles with this technique agreed with the introduced real temperature profiles within 0.3K.

Key words: Raman lidar; Atmospheric laser detection; Atmospheric temperature; Grating monochromators

引言

对流层温度是大气物理、天气分析与预报及大气环境研究中的一个重要气象参数。近几十年的气象探

收稿日期: 2005-10-18, 收到修改稿日期: 2006-02-20

作者简介: 刘玉丽(1979-), 女(汉族), 山东青州人, 硕士生, 目前主要从事激光雷达系统研究。E-mail: liuyuli13@sina.com

空资料分析表明, 对流层下层增温显著而对流层上层及平流层温度在降低^[1]。因此, 对对流层温度的有效检测已显得十分重要。瑞利散射激光雷达通常可以探测 30km 以上高度的大气温度, 该方法忽略了气溶胶粒子的影响^[2]。振动拉曼散射回波探测对流层中上部大气温度分布^[3], 而转动拉曼激光雷达(Rotational Raman Lidar, RRL)利用 N_2 和 O_2 分子的转动谱线强度与温度的关系可以测量低层大气的温度分布, 虽然它要求光谱分辨率要高, 但可以弥补瑞利激光雷达和振动 Raman 激光雷达探测高度上的不足^[4]。

Cooney 首先提出了根据双波长转动拉曼散射原理探测大气温度^[5]。因为转动拉曼后向散射截面很小, 它的信号比弹性信号弱 3~4 个数量级, 所以这种测温方法需要相当高的信噪比。为了防止弹性信号与拉曼信号混合, 在双波长通道上的滤光抑制比应高于 10^6 。到目前为止, 雷达研究者有两种提取转动 Raman 散射光谱激光雷达滤光方案, 第一种方案用干涉滤波片, 第二种方案用一个单光栅单色仪和一个原子共振吸收滤光片或者一个双光栅单色仪^[6]。1983 年, Arshinov 等人用一个双光栅单色仪来测量转动拉曼谱^[7]。1993 年, 法国的 Nedeljkovic 等人阐释了用窄带滤波片技术测量高的对流层和低的平流层温度的可能性^[8]。考虑到以下三个原因: 1) 对温度变化比较敏感, 2) 拉曼散射信号比较大, 3) 有效的抑制弹性信号, 一般选择以转动量子数 $J=6$ 和 $J=12$ 为中心的转动拉曼谱线^[6]。本论文假设采用 Nd:YAG 激光器的二倍频激光垂直入射大气, 并选用光纤导光和光栅分光相结合的办法提取转动 Raman 散射光谱的激光雷达滤波器方案, 探测转动量子数为 6 和 12 的转动拉曼散射谱线强度之比, 由此确定大气温度。

1 工作原理

激光脉冲在大气中行进, 一方面被大气散射, 另一方面还被大气物质吸收, 而本系统所探测的信号正是表现为 N_2 和 O_2 对激光脉冲能量的散射。RRL 所接收到的大气中 N_2 和 O_2 高低量子数转动 Raman 后向散射回波信号的光子数分别表示为^[9]

$$N_x(z, t) = \frac{N_0 A T^2(\lambda_0, z) \Delta z \chi(\lambda) \eta(z) q(\lambda) n_{\text{air}}(z) I_x(t)}{z^2} \quad (1)$$

式中 下标 x 表示 N_2 和 O_2 转动拉曼谱的高量子数(H)或低量子数(L)。在这个方程中:

$$I_L(t) = 0.78 N_{LN_2}(t) + 0.21 N_{LO_2}(t) \quad (2)$$

$$I_H(t) = 0.78 N_{HN_2}(t) + 0.21 N_{HO_2}(t)$$

$$N_{LN_2}(t) = \sum_{j=3}^9 \left\{ F(j, t) \exp\left[\frac{-E(j+2)}{kt}\right] g(j) b(j) [vas(j)]^4 \gamma_{N_2}^2 S(vas(j), vas(6)) \right. \\ \left. + F(j, t) \exp\left[\frac{-E(j)}{kt}\right] g(j) b(j) [v(j)]^4 \gamma_{N_2}^2 S(v(j), v(6)) \right\} \quad (3)$$

$$N_{HN_2}(t) = \sum_{j=9}^{15} \left\{ F(j, t) \exp\left[\frac{-E(j+2)}{kt}\right] g(j) b(j) [vas(j)]^4 \gamma_{N_2}^2 S(vas(j), vas(12)) \right. \\ \left. + F(j, t) \exp\left[\frac{-E(j)}{kt}\right] g(j) b(j) [v(j)]^4 \gamma_{N_2}^2 S(v(j), v(12)) \right\} \quad (4)$$

$$N_{LO_2}(t) = \sum_{j=5}^{13} \left\{ F_{O_2}(j, t) \exp\left[\frac{-E_{O_2}(j+2)}{kt}\right] g_{O_2}(j) b(j) [vas_{O_2}(j)]^4 \gamma_{O_2}^2 S(vas_{O_2}(j), vas(6)) \right. \\ \left. + F_{O_2}(j, t) \exp\left[\frac{-E_{O_2}(j)}{kt}\right] g_{O_2}(j) b(j) [v_{O_2}(j)]^4 \gamma_{O_2}^2 S(v_{O_2}(j), v(6)) \right\} \quad (5)$$

$$N_{HO_2}(t) = \sum_{j=13}^{23} \left\{ F_{O_2}(j, t) \exp\left[\frac{-E_{O_2}(j+2)}{kt}\right] g_{O_2}(j) b(j) [vas_{O_2}(j)]^4 \gamma_{O_2}^2 S(vas_{O_2}(j), vas(12)) \right. \\ \left. + F_{O_2}(j, t) \exp\left[\frac{-E_{O_2}(j)}{kt}\right] g_{O_2}(j) b(j) [v_{O_2}(j)]^4 \gamma_{O_2}^2 S(v_{O_2}(j), v(12)) \right\} \quad (6)$$

式中 N_0 为发射一发 532nm 脉冲激光的光子数; j 为转动量子数; t 为温度; z 为探测层的高度; Δz 为空间分辨率; A 为接收望远镜的面积; $n_{\text{air}}(z)$ 是空气分子数密度, 乘 0.78 得到氮气分子数密度, 乘 0.21 得到氧气分子数密度; $T^2(\lambda_0, z)$ 为发射激光与后向散射光的大气透过率乘积, 在这里近似认为 $T_t(\lambda_0, z) = T_r(\lambda_r, z)$,

因为接收后向拉曼散射光的波长变化很小； $q(\lambda)$ 为光电倍增管的量子效率(近似认为一个常数)； $\chi(\lambda)$ 为接收系统的光学透过率(近似认为一个常数)； $\eta(z)$ 为几何因子， $\eta(z)=1$ ； s 双光栅单色仪的滤波函数； $F(j, t)$ 为转动配分函数； $E(j)$ 为转动能量； $b(j)=3(j+1)(j+2)/[2(2j+3)]$ (分子的简并度 $2j+1$ 和相应转动跃迁态的矩阵元的平方 $|H_j^j|^2$ 乘积)； $I_s(z, t)$ 为高低量子数的转动拉曼谱线的相对强度。

由(1)~(6)式得：

$$R(t(z)) = \frac{N_L(z, t)}{N_H(z, t)} \approx \exp\left[-\frac{\alpha}{t(z)} + \beta\right] \quad (7)$$

由(7)式得出温度^[10]：

$$T(Z) = \frac{\alpha}{\ln \frac{N_L(Z)}{N_H(Z)} - \beta} \quad (8)$$

由雷达测出任意高度上的两个信号的比值，有探空仪测出任意高度上的温度，此比率与温度满足一个指数关系式(8)，通过此式，可以拟合出参数 A 和 B ，这样(8)式就确定了。用雷达测出两个信号的比值，代入(8)式，由此可确定大气温度的垂直廓线(N_H 、 N_L 是对应高低量子数的后向散射的光子数)。上述各式中的相关常数见表 1。

表 1 上述各式中的相关常数值

Table 1. Values for B, D, $g_l(J)$, I and γ^2

Molecule	B/(cm ⁻¹)	D/(cm ⁻¹)	$g_l(J)$ (J even)	$g_l(J)$ (J odd)	I	$\gamma^2/(10^{-48}\text{cm}^6)$
N ₂	1.989500	5.48×10 ⁻⁶	6	3	1	0.509
O ₂	1.437682	4.85×10 ⁻⁶	0	1	0	1.27

2 转动拉曼雷达系统

测量近地面大气温度的转动拉曼雷达主要由激光发射、回波信号的光学接收、信号采集以及测量过程控制等部分组成。图 1 给出了该转动拉曼激光雷达的结构框图。

2.1 激光发射

发射部分由一台调 Q 的 Nd:YAG 激光器(法国 QUANTEL 公司 Brilliant b 产品)，二倍频晶体、激光扩束器和若干导向镜组成。从倍频晶体出来的光除了用于测量大气温度的 532nm 光外，还有基波 1064nm 的光。导向镜的反射面镀有介质膜，用于测量大气温度的激光经导向镜导入大气中。不需要的激光波长透过导向镜，被排除掉或用于时间延迟和脉冲发生器的触发信号。

2.2 光学接收

光学接收部分用来接收激光的后向散射弹性信号和转动拉曼信号，由接收望远镜、小孔光阑、光纤和双光栅单色仪等组成。大气后向散射回波信号由大口径(直径 500mm) 卡塞格林式望远镜接收，在其焦平面上，放置不同直径大小的小孔光阑(接收视场角 0.2~0.7mrad)，起限制视场角的作用。双光栅单色仪可以通过用于测量的激光波长，其他波长的背景光被截止。双光栅单色仪有焦板、透镜和光栅组成。光纤将信号导向第一光栅系统的焦平面，经透镜准直后，调整光路使雷达信号照亮光栅，在第一个光栅衍射后进入透镜的焦平面上，根据它的波长分散开，在焦平面相应位置处对应量子数为 12, 6, -6 和 -12 的谱线的四根

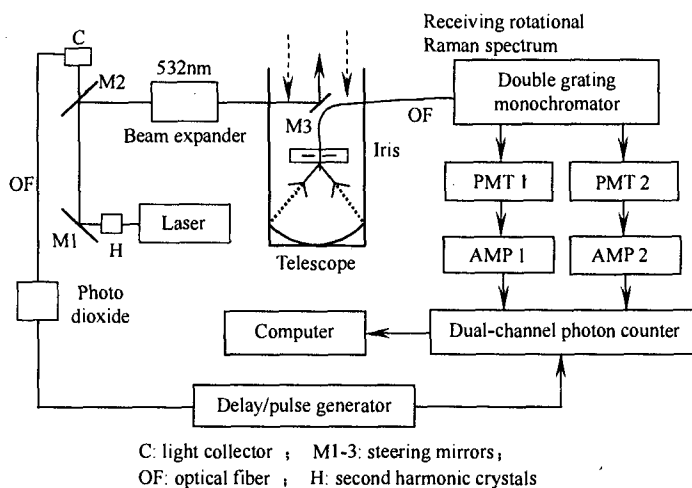


图 1 温度雷达原理图

Fig.1 Schematic diagram of temperature lidar system

传输光纤所接收。在第二个光栅系统的焦平面上，这四组光谱分别由严格选定的位置输入，使经第二个光栅衍射后，对应量子数为 6(-6)的转动 Raman 谱会聚于一条输出光纤，对应量子数为 12(-12)的转动 Raman 谱会聚于另一条输出光纤。而雷达采用 532nm 波段，由于白天很强的天空背景光，导致雷达在白天无法正常工作，这是采用 532nm 波段的最大缺点。但是在分离纯转动拉曼光谱前，可以采用法布里-珀罗干涉仪来滤除天空背景光(如图 2)，使标准具谱的间隔等于氮气分子转动拉曼谱之间的间隔，提前过滤出氮气分子的转动拉曼谱，这样使天空背景光减为原来的 1/16。

2.3 信号采集和测量过程控制

信号采集和控制部分由光电倍增管(PMT, Hamamatsu R7400U-20)、高压电源(C3830)、前置放大器(C6438)、双通道光子计数器(CS-1610)、时间延迟和脉冲发生器(DG535、光收集器(自制)、制冷器(C4877-02)以及工业控制计算机等组成。制冷器使光电倍增管工作于零下 20℃，使光电倍增管产生较少的热噪声。时间延迟和脉冲发生器用来控制光子计数器的采集起始与终止时间，使光子计数器的采集与激光出射同步。

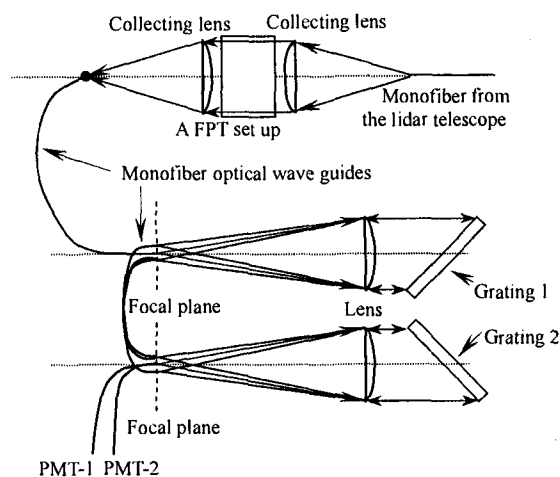


图 2 基于法布里-珀罗干涉仪的转动拉曼雷达光学装置图

Fig.2 Optical arrangement of the FPI-based pure rotational Raman lidar channel of the combined lidar facility

3 系统的模拟计算

根据雷达回波方程，对大气散射模型(前人大量工作的结果)和系统参数，进行 $J=6, J=12$ 光的后向散射信号、探测信噪比和温度的模拟计算。对于最终确定激光雷达的技术参数和总体结构，了解其探测的性能十分有益。由 (1)~(6)式可以计算到 $J=6$ 和 $J=12$ 光的后向散射接收的光电子数。

光子计数法中，信噪比定义^[11]：

$$SNR(z, t) = \frac{N_s(z, t)}{\sqrt{N_s(z, t) + 2(N_b + N_d)}} \sqrt{M} \quad (9)$$

它们可分别表示为^[6]

$$\begin{cases} N_b = \left(\frac{\eta\lambda}{hc}\right) P_b \pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \Delta\lambda A_s \chi \Delta t \\ N_d = CPS \cdot \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

式中 $N_s(z, t)$ 为接收到的回波光电子数， N_b 为背景光引起的计数， N_d 为光电倍增管的暗计数， M 为发射的激光脉冲数。 P_b 是天空背景辐射光亮度，对 532nm 的光，白天设为 $0.2W/m^2 \cdot sr \cdot nm$ ^[7]，夜晚可视为零； θ 是接收望远镜的接收视场(0.2mrad)； $\Delta\lambda$ 是双光栅单色仪的半宽度(0.46nm)；CPS 是探测器的暗计数($500s^{-1}$)； λ 是发射激光的波长(nm)； h 是 Plank 常数； $h=6.626276 \times 10^{-34}J \cdot s$ ； c 是光速(m/s)； $\Delta t=2\Delta z/c$ 是光子计数器的采集时间(s)；其余参量的意义前面已有叙述，这里不再重复。

显然有(9)式可以看出，接收到某一高度上大气后向散射光电子数越多，天空背景辐射光越低，探测器的暗计数越小，该高度上回波信号的信噪比就越高。同时增加发射激光脉冲数也可以提高转动拉曼雷达的探测回波信号的信噪比。

数值模拟计算采用的 532nm 激光波长大气分子的 Rayleigh 消光模式和气溶胶粒子的消光模式分别由 (11)和(12)式表示^[12]：

$$\begin{cases} \beta_m(\lambda, Z) = 1.54 \times 10^{-3} \left(\frac{532}{\lambda}\right)^4 \exp\left(-\frac{Z}{7}\right) \\ \alpha_m(\lambda, Z) = \frac{8\pi}{3} \beta_m(\lambda, Z) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \beta_a(\lambda, Z) = \left\{ 2.47 \times 10^{-3} \exp\left(-\frac{Z}{7}\right) + 5.13 \times 10^{-6} \exp\left[-\frac{(Z-20)^2}{6^2}\right] \right\} \frac{532}{\lambda} \\ \alpha_a(\lambda, Z) = \beta_a(\lambda, Z) \times 50 \end{cases} \quad (12)$$

脉冲能量 200mJ, 探测器的量子效率 10%, 望远镜直径 500mm, 夜晚接收光学效率 12.4%, 白天为 10%, 测量的激光脉冲数 48000, 空间分辨率 120m, 空气密度的高度分布和温度的高度分布利用的是 1976 年美国标准大气模式。

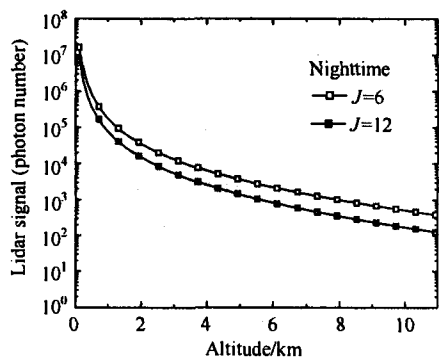


图3 计算得到的回波信号(48000 脉冲累加)

Fig.3 Calculated signal in photoelectrons detected per 40min (48000 pulse) based on the system parameters

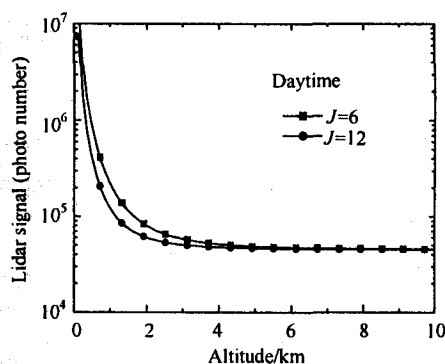


图4 同图3, 除白天以外

Fig.4 The same as in Fig.3, except for the daytime

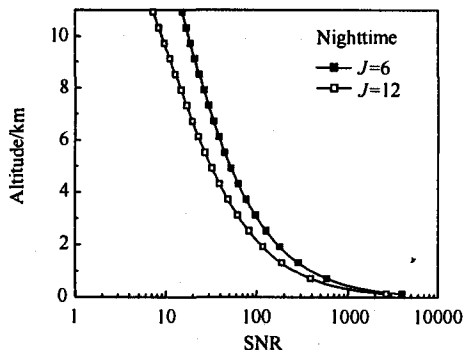


图5 计算得到的信噪比(夜晚)

Fig.5 Calculated signal-to-noise ratio (SNR) for the system parameters given and the model atmosphere and 40 minutes fired period during nighttime

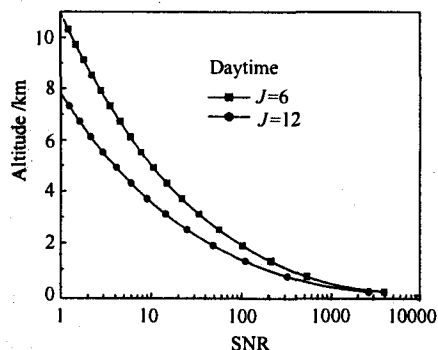


图6 同图5, 除白天以外

Fig.6 The same as in Fig.5, except for the daytime

以 40 分钟时间(48000)个采样周期(激光脉冲重复频率 20Hz)接收的光电子数累加作为 1 组回波信号, 计算的夜晚结果如图 3, 白天如图 4。同样以 40 分钟连续采样模拟系统接收回波的夜晚信噪比如图 5 所示, 白天如图 6。数值计算表明, 夜晚高度在 10.2km 时, J=12 信噪比大约是 10:1; 白天高度在 3.6km 时, J=12 信噪比大约是 10:1, 说明夜晚在 10.2km、白天在 3.6km 高度以下的探测是可行的。模拟计算出夜晚高度在 11km 以内信号的动态范围在 5 个数量级。经过信号的压缩, 相当于乘以几何因子, 把近距离的 1km 内强回波信号压下来。

由式(7)拟合出参数 α 、 β , 带入(8)式, 求出温度如图 7

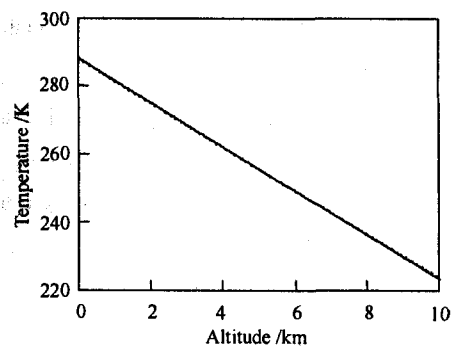


图7 计算得到的温度

Fig.7 Calculated temperature profiles(dashed line) and the introduced real temperature profiles(solid line)

所示。计算的温度与模拟用的温度真值阔线相差约 0.3K。计算结果证明了用于大气温度测量的转动拉曼雷达技术的可行性。数据的处理方法非常简单、直接,因此,这种测温的雷达技术是非常吸引人的。

4 结 论

本文通过转动拉曼激光雷达方程、大气模式和系统参数对转动拉曼激光雷达接收的 $J=6$ 和 $J=12$ 大气后向散射回波信号和信噪比进行了数值模拟计算,可以看出用于分光的双光栅单色仪能成功地提取所需要的转动拉曼谱。提出通过测量 N_2 和 O_2 的后向散射的纯转动拉曼谱的强度,计算它们的比值来确定大气温度的垂直分布的方法,并用此方法计算出了大气温度,计算的温度与模拟用的温度真值阔线相差约 0.3K。计算结果证明了用于大气温度测量的转动拉曼雷达技术的可行性。转动拉曼雷达是基于固体激光器,双光栅单色仪、光电倍增管和光子计数器,采用了光纤导光,使得系统可做得小型化、牢固、便于统调,发展这种高分辨激光测温系统,对气象和环境研究将起到积极作用。

参考文献:

- [1] 米季德,崔继良,曹鸿兴.北京高空温度的统计特征[J].气象学报,1999,57(2):236-241.
MI Ji-de, CUI Ji-liang, CAO Hong-xing. Temperature Statistics of Upper-Air in Beijing[J]. *Meteorologic Transaction*, 1999, 57(2): 236-241.
- [2] SHIBATA T, M. KOBUCHI, M. MAEDA. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with XeF lidar [J]. *Appl. Opt*, 1986, 25(6): 685-688.
- [3] COONEY J.A. Use of Raman scattering for remote sensing of atmospheric properties of meteorological significance[J]. *Opt. Eng*, 1983, 22(3): 292-301.
- [4] ARSHINOV Y. F, S. M. BOBROVNIKOV, V. E. ZUEV, et al. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar[J]. *Appl. Opt*, 1983, 22(19): 2984-2990.
- [5] COONEY J. Measurement of atmospheric temperature measurement using Raman backscatter[J]. *Appl. Opt*, 1971, 10(12): 2665-2669.
- [6] Dukhyeon KIM, Hyunki CHA. Pure rotational raman lidar for atmospheric temperature measurements[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, 39(5): 838-841.
- [7] ARSHINOV.Y. F, S. M. BOBROVNIKOV, V. E. ZUEV, et al. Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar [J]. *Appl. Opt*, 1983, 22(19): 2984-2990.
- [8] 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.
- [9] Dusan NEDELJKOVIC, Alain HAUCHECORNE, Marie-Lise CHANIN. Rotational raman lidar to measure the atmospheric temperature from the ground to 30 Km[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 90-101.
- [10] Balin I. SERIKOV, S. BOBROVNIKOV. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational-pure-rotational Raman lidar[J]. *Applied physics B: Lasers and Optics*, 2004, 79(6): 775-782.
- [11] SPINHIRNE J D. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, 1993, 31(1): 48-54.
- [12] Y. SASANO, T. KOBAYASHI. Feasibility study on space lidar for measuring global atmospheric environment [A]. No. 4 Final Report, F-82 [R]. Tokyo: Optoelectronic Industrg and Technology Development Association, 1995.