

绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统

李仕春 王大龙 李启蒙 宋跃辉 刘丽娟 华灯鑫

Pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature

Li Shi-Chun Wang Da-Long Li Qi-Meng Song Yue-Hui Liu Li-Juan Hua Deng-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 143301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.143301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.143301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离子体放电活化生理盐水杀菌应用研究

Bacteria sterilization application by using plasma activated physiological saline

物理学报.2016, 65(12): 123301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.123301>

$\text{Ge}_x\text{Sb}_{20}\text{Se}_{80-x}$  玻璃的拉曼光谱和 X 射线光电子能谱

Raman scattering and X-ray photoelectron spectra of  $\text{Ge}_x\text{Sb}_{20}\text{Se}_{80-x}$  Glasses

物理学报.2015, 64(22): 223302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.223302>

纳米分辨相干反斯托克斯拉曼散射显微成像

Nanometer resolution coherent anti-Stokes Raman scattering microscopic imaging

物理学报.2015, 64(22): 223301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.223301>

分子环境变化对振动退相时间影响的实验研究

Experimental study on vibration dephasing time varying with molecular surroundings

物理学报.2015, 64(14): 143301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.143301>

相干瑞利散射海水水下温度测量技术的理论研究

Theoretical study on measuring underwater temperature based on coherent Rayleigh scattering

物理学报.2014, 63(8): 083302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.083302>

## 绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统\*

李仕春 王大龙 李启蒙 宋跃辉 刘丽娟 华灯鑫†

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2016年3月19日收到; 2016年5月4日收到修改稿)

纯转动拉曼激光雷达是探测大气温度廓线的重要手段之一, 其正常工作需要配置其他并行校正设备, 制约其在气象及环境监测领域中的实用化进程. 基于大气氮气分子的纯转动拉曼谱型对温度的依赖性, 提出并设计了绝对探测大气温度廓线的纯转动拉曼激光雷达系统. 系统采用波长 532 nm 且脉冲能量 300 mJ 的激光激励源和口径 250 mm 卡塞格林望远镜的接收器, 设计了衍射光栅和光纤 Bragg 光栅结合的多通道并行纯转动拉曼光谱分光系统; 仿真分析氮气和氧气分子的纯转动拉曼散射谱线间关系, 优化选择了 6 条氮气分子的纯转动拉曼谱线以直接反演大气温度, 设计了两级滤光器间转接光纤阵列的结构; 基于最小二乘原理推导了绝对探测大气温度的反演算法, 并结合标准大气模型, 分析了纯转动拉曼激光雷达绝对探测大气温度的探测性能. 结果表明, 所设计纯转动拉曼激光雷达系统可直接反演大气温度廓线, 在测量时间 17 min 内, 温度偏差小于 0.5 K 的探测高度达 2.0 km.

**关键词:** 转动拉曼光谱, 拉曼激光雷达, 大气温度, 绝对探测技术

**PACS:** 33.20.Fb, 42.68.Wt, 92.60.hv, 43.28.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.65.143301

## 1 引言

大气温度廓线在数值天气预报和雾霾生消过程中是非常重要的模型参数, 其高精度高时空分辨率的实时探测具有重要意义<sup>[1]</sup>. 与传统无线电探空仪比较, 激光雷达具有高时空分辨率的大气参数廓线探测能力, 近几十年来得到快速发展<sup>[2-5]</sup>, 其中, 大气温度激光雷达领域的研究主要集中于纯转动拉曼激光雷达<sup>[3,6]</sup>和瑞利高光谱分辨率激光雷达<sup>[7,8]</sup>. 瑞利高光谱分辨率激光雷达利用 Rayleigh 散射谱型与温度的依赖特性, 反演大气温度廓线, 由于 Rayleigh 散射虽然很强, 但其谱宽很窄, 通常只有数 GHz, 因此通常需要低于 1 GHz 的光谱分光器件, 研究主要集中于原子或分子蒸汽滤波器<sup>[7]</sup>和 F-P 标准具<sup>[8]</sup>, 系统的机械和光学稳定性要求很高, 限制了该类激光雷达的应用. 而纯转动拉曼激光雷达测量大气温度的原理是依据大气分子的纯转动拉曼散射谱线对温度依赖性, 虽然纯转动拉曼散射

通常比 Rayleigh 散射弱约 30 dB, 但纯转动拉曼散射谱宽近 10 nm, 激光器和分光系统的光谱精度要求较低, 故系统稳定性要求低, 近十几年来得到广泛关注 and 快速发展<sup>[3,6]</sup>.

目前, 纯转动拉曼激光雷达的研究者大多集中于拉曼光谱分光系统的研究, 由于纯转动拉曼散射截面相对米-瑞利 (Mie-Rayleigh) 散射要小 3—4 个数量级, 故该类激光雷达需要对强烈的米-瑞利散射信号至少提供 70 dB 的抑制<sup>[9]</sup>, 从而有效提取出微弱的转动拉曼信号. 目前主要提出了四类转动拉曼光谱分光系统: 双衍射光栅<sup>[1,10]</sup>, 双干涉滤光片<sup>[3,11]</sup>, 衍射光栅结合原子蒸气滤波器<sup>[12]</sup>和全光纤拉曼光谱分光系统<sup>[13]</sup>. 但是, 这些纯转动拉曼激光雷达系统都采用两路温度敏感性相反的转动拉曼信号之比反演大气温度廓线, 需要利用无线电探空仪等并行设备的数据校正反演系数<sup>[10-12]</sup>. 为确保校正精度, 需要无线电探空仪等并行校正设备在转动拉曼激光雷达附近发射, 由于大气状态是随机

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61308106, 61275185) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2013JM5001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

变化的物理过程, 通常认为是不可再现的, 增加了激光雷达系统高精度校正的实现难度. 另外, 大气湍流、风等易使无线电探空仪偏离设定路径, 故其探测路径和时间与激光雷达的不一致性极易引入校正的系统误差, 降低拉曼激光雷达探测精度.

2001年英国剑桥大学的研究人员曾提出利用携有温度信息的转动拉曼谱型直接反演大气温度实现绝对探测的技术<sup>[14]</sup>, 并利用衍射光栅式光谱仪对转动拉曼信号进行光谱分离且采用CCD进行多路信号采集, 对大气温度进行绝对激光遥感探测, 但受限于分光系统和光电探测系统性能, 探测距离较短且效果并不理想. 基于课题组在全光纤转动拉曼光谱分光领域的研究成果<sup>[9,13]</sup>, 本文提出了衍射光栅和光纤Bragg光栅(FBG)级联构建两级并行转动拉曼光谱分光方案, 以并行提取多路纯转动拉曼信号, 基于最小二乘原理推导了利用6路纯转动拉曼信号直接反演大气温度的算法, 实现了大气温度的绝对探测技术. 系统中由于采用了多条光纤通道, 故需要较好的系统稳定性, 但是, 绝对探测大气温度技术, 可为大气温度的高精度激光遥感探测提供新的探测手段和校正方法, 具有重要的科学研究意义和社会价值.

## 2 绝对探测大气温度的方法

激光雷达是利用大气中悬浮气溶胶粒子或气体分子的物理特性遥感探测大气参数廓线的仪器. 发射到大气中的激光脉冲同大气中粒子或分子相互作用, 通过望远镜接收的回波信号中, 主要包括气溶胶粒子散射的米散射信号和气体分子的瑞利散射信号, 以及气体分子的纯转动拉曼散射信号和振转拉曼散射信号等. 当大气的温度为 $T$ 时, 反斯托克斯分支转动量子数 $J$  ( $J = 2, 3, \dots$ )的纯转动拉曼后向散射截面为<sup>[1,6]</sup>

$$\sigma(J, T) = \frac{112\pi^4 N_m g(J) hcB_0 [v_0 + \Delta\nu(J)]^4 \gamma^2}{15 (2I + 1)^2 kT} \times \frac{(J - 1)J}{2J - 1} \exp\left(-\frac{E(J)}{kT}\right), \quad (1)$$

式中,  $N_m$ 为相对体积浓度的分子数密度(如氮气为0.78, 氧气为0.21);  $I$ 为核自旋常数, 氮气 $I = 1$ , 氧气 $I = 0$ ;  $g(J)$ 是统计权重因子, 氮气时,  $g(\text{奇数}) = 6$ ,  $g(\text{偶数}) = 3$ , 氧气时,  $g(\text{奇数}) = 0$ ,  $g(\text{偶数}) = 1$ ;  $h$ 为普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34}$  J·s,  $c$ 为光速,  $2.9979 \times 10^8$  m/s;  $B_0$ 为振动基态的转动常量,

氮气为 $1.9895 \text{ cm}^{-1}$ , 氧气为 $1.437682 \text{ cm}^{-1}$ ;  $\nu_0$ 为入射光的频率,  $\Delta\nu(J)$ 为转动拉曼波数的频移量<sup>[1]</sup>;  $\gamma$ 为分子极化张量的各向异性常数, 氮气为 $0.509 \times 10^{-48} \text{ cm}^6$ , 氧气为 $1.27 \times 10^{-48} \text{ cm}^6$ ;  $k$ 为玻尔兹曼常数,  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K,  $E(J)$ 为分子的转动能量<sup>[1]</sup>.

图1给出了大气中氮气和氧气分子的反斯托克斯分支纯转动拉曼散射截面与大气温度间的关系. 图中的实曲线表示温度 $T$ 为250 K时偶转动量子数纯转动拉曼散射截面的拟合曲线, 虚曲线是温度300 K时偶转动量子数纯转动拉曼散射截面的拟合曲线, 而点曲线是温度200 K时偶转动量子数纯转动拉曼散射截面的拟合曲线. 由图1可看出, 由于大气中氮气分子数密度大于氧气, 故氮气分子的纯拉曼散射截面大于氧气, 且氮气偶转动量子数的拉曼散射截面大于奇转动量子数.

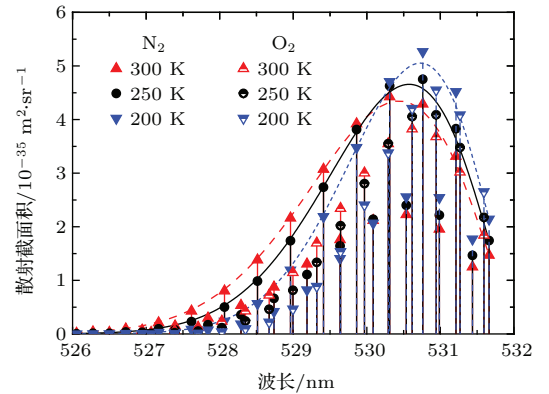


图1 (网刊彩色) 大气中氮气和氧气分子的纯转动拉曼散射截面

Fig. 1. (color online) Purely rotational Raman scattering cross section of nitrogen and oxygen molecular in atmosphere.

根据散射型激光雷达方程, 距离 $z$ 处偶转动量子数 $J$ 的拉曼激光雷达回波信号 $P_J(z, T)$ 为

$$P_J(z, T) = K_J \cdot P_0 \cdot \frac{c \cdot \tau}{2} \cdot \frac{A_r}{z^2} \cdot Y(z) \cdot N(z) \times \sigma(J, T) \cdot \exp\left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right], \quad (2)$$

式中,  $K_J$ 是与量子效率、光纤转换率、光电检测增益等有关的转动量子数 $J$ 的拉曼通道的系统常数,  $P_0$ 是激光脉冲的平均功率,  $\tau$ 是激光脉冲宽度,  $A_r$ 是望远镜的接收面积,  $Y(z)$ 是激励光束与接收视场的系统重叠因子,  $N(z)$ 是大气分子数密度,  $\alpha(z')$ 是距离 $z'$ 处的大气消光系数.

通常, 纯转动拉曼激光雷达采用具有相反温度灵敏度的高低转动量子数拉曼回波信号反演大气温度  $T$ , 例如, 图 1 中以  $J = 8$  的 530.3 nm 为中心的低转动量子数通道  $P_L(z, T)$  和以  $J = 16$  的 528.5 nm 为中心的高转动量子数通道  $P_H(z, T)$ . 由于不同转动拉曼波长引起的消光系数  $\alpha(z)$  差异很小, 且 (2) 式中的  $Y(z)$  和  $N(z)$  项可互相抵消, 因此, 高低量子数通道的转动拉曼激光雷达的信号比值只与  $T$  有关, 即  $R(T)$  可表示为

$$R(T) = \frac{P_H(z, T)}{P_L(z, T)} = \frac{\sum_J [K_J \text{Tr}_H(\lambda) \cdot \sigma(J, T)]}{\sum_J [K_J \text{Tr}_L(\lambda) \cdot \sigma(J, T)]}, \quad (3)$$

式中,  $\text{Tr}_H(J)$  和  $\text{Tr}_L(J)$  分别为高低量子数通道的透过率函数. 如果每条拉曼通道只提取一条转动氮气分子的转动拉曼散射谱线, 则 (3) 式可化简为

$$R(T) = \exp \left[ A + \frac{B}{T} \right], \quad (4)$$

式中,  $A$  和  $B$  分别是系统的校正常数. 但是由于在氮气分子转动拉曼谱线附近可能存在氧气分子的谱线, 而且有时每个转动拉曼通道中可提取多条氮气分子谱线. 为减少反演大气温度的误差, 通常在 (4) 式中增加高次项, 因此, 目前大多研究者采用如下的拟合公式

$$R(T) = \exp \left[ A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \right], \quad (5)$$

式中,  $A$ ,  $B$  和  $C$  都是系统校正常数, 通常由并行的无线探空仪等其他探测设备的温度廓线校正获得. 因此, 可认为目前大部分转动拉曼激光雷达系统采用相对探测大气温度技术, 通过并行校正设备间接反演大气温度廓线.

如果能够获取多条氮气分子的转动拉曼谱线信号, 可构建转动拉曼光谱包络线, 进而直接反演获得大气温度, 该算法不需要配置任何装置进行校准, 因此可称为大气温度的绝对探测技术. 由于 (2) 式中只有  $\sigma(J, T)$  项与温度  $T$  有关, 因此, 如果假设转动拉曼光谱分光系统可分别提取偶转动量子数的转动拉曼谱线, 且拉曼通道的系统常数  $K_J$  通过实验标定并归一化, 则 (2) 式可化简为

$$P_J(z, T) = F(z) \cdot \sigma(J, T), \quad (6)$$

式中  $F(z)$  为转动拉曼激光雷达的系统因子.

由于在相同高度  $z$  处, 各条通道应该具有相同的系统因子  $F(z)$ , 则基于最小二乘原理可构建匹配误差函数

$$Q(z, T) = \sum_{J=2}^m [P'_J(z, T) - F(z) \cdot \sigma(J, T)]^2, \quad (7)$$

式中,  $P'_J(z, T)$  表示偶转动量子数  $J$  通道的测得信号,  $m$  是最高转动拉曼通道的量子数. 通过匹配理想的转动拉曼信号与测得的拉曼信号, 使任意高度  $z$  处的匹配误差函数  $Q(z, T)$  最小化, 从而获得最佳的系统因子  $F(z)$  和大气温度值  $T$ , 当高度  $z$  变化时, 即可直接反演得到大气温度廓线  $T(z)$ , 而  $F(z)$  可反映出匹配算法的稳定性. 因此, 在不需要并行校正装置的情况下, 通过多路转动拉曼信号可绝对探测大气温度廓线.

### 3 纯转动拉曼激光雷达系统

目前纯转动拉曼测温激光雷达, 为确保提取转动拉曼信号的光谱纯净度, 通常采用两级滤光器件, 以实现大气回波中弹性散射信号的 70 dB 以上的抑制. 因此, 构建如图 2 所示的纯转动拉曼激光雷达系统, 它采用 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 作为转动拉曼激光雷达的工作波长, 包括发射系统、接收系统、光谱分光系统、光电探测系统和信息处理系统. 激光脉冲经扩束镜准直扩束后传输到大气中, 并与大气中气溶胶粒子或分子相互作用. 望远镜则接收来自激光脉冲与大气中气溶胶粒子或分子相互作用的后向散射回波信号, 并通过多模光纤传输至光谱分光系统, 提取出多路纯转动拉曼谱线信号, 进而被线阵列的光电探测器分别接收, 最后经信息处理系统进行处理, 反演计算得到大气温度信息值. 所设计的纯转动拉曼绝对测温激光雷达系统的主要性能参数如表 1 所列.

由于大气中既存在氮气分子, 也存在氧气分子, 由图 1 可知, 在发射激光脉冲激励下, 氧气分子也能产生纯转动拉曼信号, 由 (1) 式可知, 虽然氧气分子的转动拉曼谱线也携带大气温度信息, 但是在 (7) 式的匹配误差函数中, 如果偶转动量子数  $J$  通道的测得信号  $P'_J(z, T)$  中存在氧气谱线信号, 则会给绝对探测大气温度算法带来系统误差. 因此, 图 2 中的转动拉曼分光系统, 必须能够精确提取氮气分子的单条偶转动量子数的拉曼谱线信号, 这是实现大气温度绝对测量的关键技术.



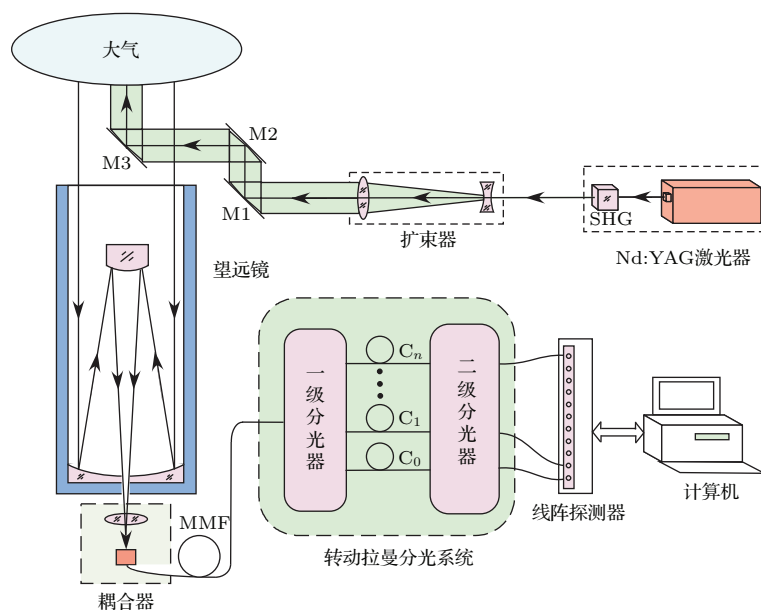


图2 (网刊彩色) 绝对探测大气温度的转动拉曼激光雷达系统

Fig. 2. (color online) Layout of pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature.

表1 纯转动拉曼激光雷达性能参数

Table 1. Specifications of the pure rotational Raman lidar.

指标项目	参数
激光波长/nm	532.0
激光脉冲能量/mJ	300
脉冲频率/Hz	20
光斑直径/mm	9
脉冲宽度/ns	8
望远镜直径/mm	250
多模光纤芯径/ $\mu\text{m}$	50
数值孔径	0.20
透镜焦距/mm	220
空间分辨率/m	3.75 (25 ns)
滑动平均点数/bin	12
累积时间/min	17

氮气分子偶转动量子数的拉曼谱线的相邻谱线分布情况如图3所示, 图中黑色实点表示氮气分子偶转动量子数的拉曼谱线波长, 例如, 转动量子数2的拉曼波长为531.66 nm; 上三角形表示比相应拉曼谱线波长更长谱线的波长差(即右邻波长差), 而下三角形箭头表示比相应拉曼谱线波长更短谱线的波长差(即左邻波长差), 三角形旁边的数字和字母表示相邻谱线属性, 例如, 转动量子数4谱线的上三角形和5O, 表示该谱线的右边相邻谱

线是转动量子数5的氧气分子谱线, 而下三角形和5N, 表示该谱线的左边相邻谱线是转动量子数5的氮气分子谱线; 图中还标示了波长差为 $\pm 0.09$  nm的两条水平直线, 其可称为谱线禁带, 当两相邻谱线中有一条位于禁带中, 则表示存在某条谱线不能与要提取的氮气分子偶转动量子数拉曼谱线明显区分, 因此, 不适宜选择作为绝对探测大气温度的反演谱线. 由图3不难看出, 如果设定谱线禁带为0.09 nm, 则绝对探测大气温度的氮气分子谱线的转动量子数 $J$ 应该选择6, 10, 12, 16, 20, 22, 其对应的波长分别为530.76, 529.86, 529.41, 528.51, 527.62和527.17 nm.

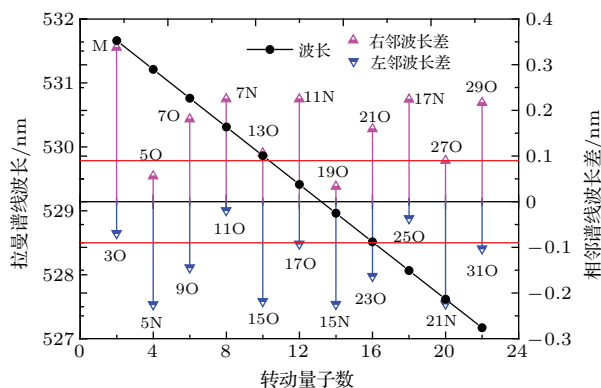


图3 (网刊彩色) 氮气分子偶转动量子数谱线与相邻谱线间关系

Fig. 3. (color online) Relationship between even rotational quantum number spectral lines of nitrogen molecule and adjacencies.

因此, 可设计图2中转动拉曼分光系统如图4所示, 主要由光纤阵列、凸透镜L1、闪耀光栅G1和7组FBG组成, 其中闪耀光栅G1作为一级分光器, FBG作为二级分光器. 激光雷达回波信号由多模光纤MMF导入, 纤芯端面位于凸透镜L1的焦点处, 经凸透镜L1光束准直, 照射在闪耀光栅上, 闪耀光栅衍射返回的光信号, 经凸透镜会聚, 将按照波长排列在焦平面上; 而不同波长的光信号耦合进入焦平面处的光纤阵列, 例如, 通道1(Ch1)的信号经光纤耦合器1(FC1)传输至FBG1, 满足Bragg谐振的光信号将由FBG1反射, 再次经FC1输出至线阵探测器. 因此, 所设计的转动拉曼分光系统可提取7个通道的光谱信号, 其中包括6个通道的纯转动拉曼信号和米-瑞利弹性散射信号.

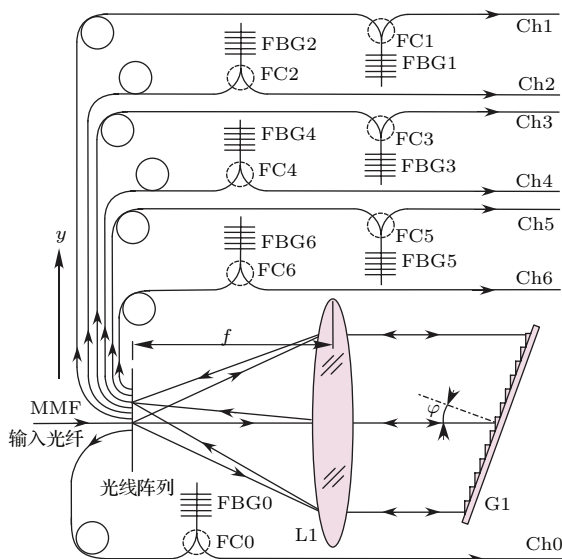


图4 两级纯转动拉曼分光系统结构图  
Fig. 4. Configuration of two-cascade pure rotation Raman spectroscopic filter.

闪耀光栅作为一级分光器件, 根据光信号波长的不同改变光信号衍射角度, 使得不同波长的拉曼信号聚焦在透镜焦平面的不同位置. 同时对米-瑞利弹性散射信号提供30—40 dB的抑制率<sup>[15]</sup>. 为了减少调整的自由度, 采用课题组成熟的可见光波段FBG作为二级分光器件, 它具有0.2—0.3 nm的光谱通带, 能够对米-瑞利弹性散射信号提供约35 dB的阻带抑制率<sup>[13]</sup>.

衍射闪耀光栅在衍射方向上衍射效率可以高达80%, 衍射波长 $\lambda$ 在焦平面上的线色散距离 $L_{dis}(\lambda)$ 可以写为

$$L_{dis}(\lambda) = f \frac{m}{d \cos(\theta)}, \quad (8)$$

式中,  $d$ 是光栅常量或光栅距离,  $m$ 是衍射级次(本文中 $m = 1$ ),  $\theta$ 是波长 $\lambda$ 对应的衍射角,  $f$ 是焦距. 从波长 $\lambda$ 的衍射会聚点到闪耀波长 $\lambda_b$ 会聚点的线距离 $L_d$ 可表示为

$$L_d = \int_{\lambda_b}^{\lambda} L_{dis}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_b}^{\lambda} f \frac{m}{d \cos \theta} d\lambda, \quad (9)$$

线距离 $L_d$ 越长, 焦平面上光谱空间分辨率就越大.

光纤阵列结构主要取决于氮气分子的转动拉曼谱分布, 入射光纤使用多模光纤(MMF), 其他通道则使用模场直径为 $(3.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$ 的单模光纤(SMF, 460-HP), 空间光耦合进单模光纤的效率已经被详细讨论和分析<sup>[16,17]</sup>. 通过改变入射角 $\phi$ , 可设计不同光纤阵列结构, 数值计算结果表明, 偶转动量子数从 $J = 2—22$ , 氮气分子的纯转动拉曼谱间隔变化缓慢, 从0.4505—0.4473 nm的范围内变化, 平均变化为0.4492 nm. 每条转动拉曼谱线的位置可以根据(9)式计算得到, 如图5所示. 图中, MMF被放置在凸透镜焦点的位置( $y = 0$ ); 为了更好地抑制激光雷达回波信号中的弹性散射信号, 将弹性散射信号与纯转动拉曼信号分别会聚于透镜焦点的两侧, 如图5中弹性散射信号的会聚点位于 $-188 \mu\text{m}$ 处; 转动量子数 $J = 6, 10, 12, 16, 20, 22$ 的纯转动拉曼信号将分别会聚在156, 407, 532, 782, 1031和1156  $\mu\text{m}$ 处.

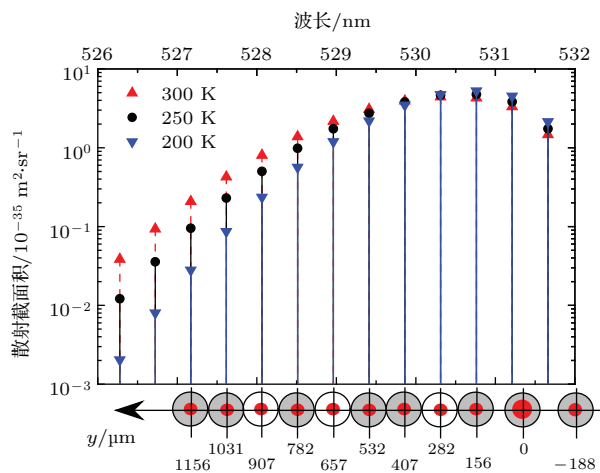


图5 (网刊彩色) 氮气分子偶转动量子数谱线和光纤阵列的关系  
Fig. 5. (color online) Relationship between the rotational Raman spectral lines with fiber array.

#### 4 遥感探测性能分析

为了验证所设计纯转动拉曼激光雷达绝对探测大气温度可行性, 采用美国标准大气模型, 仿真

分析了系统探测性能, 图 6 给出了其绝对探测大气温度性能仿真结果. 根据 6 条反斯托克斯分支的转动拉曼通道的谱型反演, 取测量时间约 17 min, 得到大气绝对温度值及相应系统因子随探测高度的变化曲线, 可看出系统因子随高度增加其变化趋势稳定, 故可认为模式匹配算法基本稳定; 随着探测距离增加, 激光雷达回波信号信噪比逐渐降低, 在 2.0 km 处直接反演温度偏差约为 0.5 K.

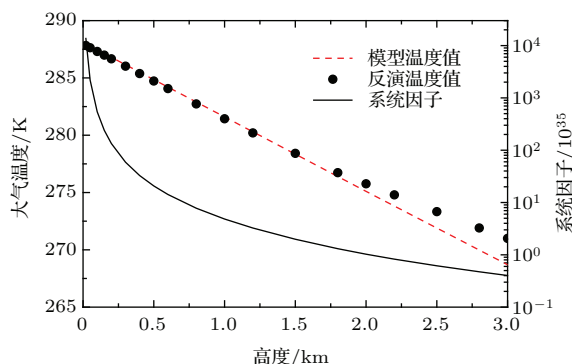


图 6 (网刊彩色) 纯转动拉曼激光雷达绝对探测大气温度的性能仿真

Fig. 6. (color online) Performance simulation of the pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature.

## 5 结 论

针对传统转动拉曼测温激光雷达在进行数据反演时, 需要配置并行校准装置标定反演算法中系统参数的缺陷, 本文提出并设计了免校正的绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统. 为了实现绝对探测大气温度, 基于大气氮气分子的纯转动拉曼散射效应, 考虑氧气分子纯转动拉曼谱线的影响, 优化选择了 6 条氮气分子的纯转动拉曼谱线, 设计了两级转动拉曼分光系统以及两级滤光器间转接光纤阵列的结构. 基于最小二乘原理, 提出了多条转动拉曼谱线直接反演大气温度的匹配误差函数, 数值仿真表明, 在累积探测时间 17 min 内, 可探测温度偏差小于 0.5 K 的 2.0 km 大气温度廓线, 验证了所设计拉曼分光系统和反演算法的可行

性. 因此, 绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统, 可为大气温度的高精度激光遥感探测提供新的探测手段和校正方法.

## 参考文献

- [1] Jia J, Yi F 2014 *Appl. Opt.* **53** 5330
- [2] Ren X Y, Tian Z S, Sun L J, Fu Y S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 164209 (in Chinese) [任秀云, 田兆硕, 孙兰君, 付石友 2014 物理学报 **63** 164209]
- [3] Li Y J, Song S L, Li F Q, Cheng X W, Chen Z W, Liu L M, Yang Y, Gong S S 2015 *Chin. J. Geophys.* **58** 2294 (in Chinese) [李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 程学武, 陈振威, 刘林美, 杨勇, 龚顺生 2015 地球物理学报 **58** 2294]
- [4] Tang L, Wang C R, Wu H B, Dong J H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 014213
- [5] Wang H X, Liu J G, Zhang T S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 084213
- [6] Radlach M, Behrendt A, Wulfmeyer V 2008 *Atmos. Chem. Phys.* **8** 159
- [7] Liu Z, Bi D, Song X, Xia J, Li R, Wang Z, She C 2009 *Opt. Lett.* **34** 2712
- [8] Hua D, Uchida M, Kobayashi T 2004 *Opt. Lett.* **29** 1063
- [9] Li S, Hua D, Hu L, Yan Q, Tian X 2014 *Spectrosc. Lett.* **47** 244
- [10] Su J, Patrick McCormick M, Wu Y, Lee Iii R B, Lei L, Liu Z, Leavor K R 2013 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **125** 45
- [11] Wang Y, Cao X, He T, Gao F, Hua D, Zhao M 2015 *Appl. Opt.* **54** 10079
- [12] Zeyn J, Lahmann W, Weitkamp C 1996 *Opt. Lett.* **21** 1301
- [13] Li S, Hua D, Wang Y, Gao F, Yan Q, Shi X 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat.* **153** 113
- [14] Norton E G, Povey I M, South A M, Jones R L 2001 *Proc. SPIE* **4153** 657
- [15] Arshinov Y, Bobrovnikov S, Serikov I, Ansmann A, Wandinger U, Althausen D, Mattis I, Muller D 2005 *Appl. Opt.* **44** 3593
- [16] Li S C, Hua D X, Song Y H, Tian X Y 2012 *Acta Photonica Sin.* **41** 1053 (in Chinese) [李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 田小雨 2012 光子学报 **41** 1053]
- [17] Li S C, Hua D X, Wang L, Song Y H 2013 *Optik* **124** 1450

# Pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature\*

Li Shi-Chun Wang Da-Long Li Qi-Meng Song Yue-Hui Liu Li-Juan Hua Deng-Xin<sup>†</sup>

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

( Received 19 March 2016; revised manuscript received 4 May 2016 )

## Abstract

A pure rotational Raman lidar has become one of valid methods of profiling atmospheric temperature. However, its proper operation generally needs a certain collocated device of atmospheric temperature to calibrate three retrieval coefficients. This fact seriously restricts the applications of pure rotational Raman lidar in the meteorology and environment fields. In order to execute the detection technique of atmospheric temperature without calibration, we present and design a pure rotational Raman lidar based on the dependence of atmosphere molecular rotational Raman spectral envelope on temperature. It is configured with a laser having a pulse energy of 300 mJ, a pulse repetition rate of 20 Hz, and a Cassegrain telescope with a clear aperture of 250 mm. A two-stage multi-channel pure rotational Raman spectroscopic filter is proposed to extract efficiently the rotational Raman spectral lines with more than 70 dB suppression to the elastic-scattering optical signals. It is configured with one blazed diffraction grating, one convex lens, one linear fiber array and seven groups of fiber Bragg gratings. The blazed diffraction grating and fiber Bragg grating are separately utilized as the primary and secondary spectroscope. The tailor-made fiber array, which is composed of ten single mode fibers of 460-HP type and one multi-mode fiber, is designed to transfer the spectral signals. One end face of multi-mode fiber lies in the focal point of telescope, and then it transfers the lidar echo signals to the pure rotational Raman spectroscopic filter. The other end face of multi-mode fiber lies in the focal point of convex lens. The ten single mode fibers are used to transfer the optical signals from the primary spectroscope to the secondary, and their end faces lie in the focal plane of convex lens. Six pure rotational Raman spectral lines of nitrogen molecule in the anti-Stokes branch are chosen under the condition of the 0.09-nm forbidden band, with the consideration of the relationship between the pure rotational Raman spectral lines of nitrogen and oxygen molecules. While the excited laser wavelength is 532 nm, their central wavelengths are 530.76, 529.86, 529.41, 528.51, 527.62, and 527.17 nm, respectively. Their corresponding positions of fiber end faces on fiber array are 156, 407, 532, 782, 1031, and 1156  $\mu\text{m}$ . Compared with these pure rotational Raman spectral lines, the elastic scattering signal lies on the other side of the focal point of convex lens, which improves the spectral purity of pure rotational Raman spectral lines. A retrieval algorithm of absolute detection technique is presented based on the least square principle. The performance of this lidar is simulated based on the U.S. standard atmospheric model. Simulation results show that this designed lidar can achieve the extraction of the pure rotational Raman spectral lines of nitrogen molecules, and that the atmospheric temperature profile obtained from absolute retrieval algorithm within a measurement time of 17 min can be up to 2.0 km with less than 0.5 K deviation. This pure rotational Raman lidar without calibration will provide a new detection method and retrieval scheme for atmospheric temperature profile.

**Keywords:** rotational Raman spectra, Raman lidar, atmospheric temperature, absolute detection technique

**PACS:** 33.20.Fb, 42.68.Wt, 92.60.hv, 43.28.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.65.143301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61308106, 61275185) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM5001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn