中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展

刘东 姚清睿 张思诺 高佳欣 王南朝 吴疆 刘崇

Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using raman lidar

LIU Dong, YAO Qing-rui, ZHANG Si-nuo, GAO Jia-xin, WANG Nan-chao, WU Jiang, LIU Chong

引用本文:
刘东, 姚清睿, 张思诺, 高佳欣, 王南朝, 吴疆, 刘崇. 拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展[J]. 中国光学, 2023, 16(2): 243-257. doi: 10.37188/CO.2022-0145
LIU Dong, YAO Qing-rui, ZHANG Si-nuo, GAO Jia-xin, WANG Nan-chao, WU Jiang, LIU Chong. Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using raman lidar[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 243-257. doi: 10.37188/CO.2022-0145

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2022-0145

文章编号 2097-1842(2023)02-0243-15

拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展

刘 东[1,2,3*†], 姚清睿[1†], 张思诺[4], 高佳欣[1], 王南朝[1], 吴 疆[1], 刘 崇[1]
（1. 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室，浙江 杭州 310027；
2. 浙江大学 嘉兴研究院 智能光电创新中心，浙江 嘉兴 314000；
3. 浙江大学杭州国际科创中心，浙江 杭州 311200；
4. 浙江大学 信息与电子工程学院，浙江 杭州 310027）
†共同第一作者

摘要: 温度、湿度、压强是 3 个重要的大气参数。快速、准确地了解大气的温度、湿度和压强信息及其变化趋势，对天气、气候、人工影响天气等研究有重要意义。拉曼激光雷达通过分离拉曼散射信号反演得到各种大气环境相关参数，可实现对大气参数廓线信息的高精度探测，在大气温湿压探测中独具优势与潜力。本文介绍了拉曼激光雷达对大气温度、湿度和压强的探测原理与反演方法，着重介绍了拉曼激光雷达中滤光片、标准具、光栅等常用分光器件的优缺点及其进展，以及拉曼激光雷达中涉及到的探测技术。最后例举了利用拉曼激光雷达对气象参数测量的典型应用。

关 键 词: 拉曼激光雷达；温度测量；湿度测量；分光技术；光电探测器
中图分类号: P41 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2022-0145

Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using raman lidar

LIU Dong[1,2,3*†], YAO Qing-rui[1†], ZHANG Si-nuo[4], GAO Jia-xin[1],
WANG Nan-chao[1], WU Jiang[1], LIU Chong[1]
（1. *State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation*, *College of Optical Science and Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*;
2. *Intelligent Optoelectronic Innovation Center*, *Jiaxing Institute*, *Zhejiang University*, *Jiaxing* 314000, *China*;
3. *ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center*, *Hangzhou* 311200, *China*;
4. *College of Information Science and Electronic Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*）
† *These authors contributed equally to this work*
* *Corresponding author*, *E-mail*: *Liudongopt@zju.edu.cn*

Abstract: Atmospheric temperature, humidity and pressure are deemed important atmospheric parameters.

收稿日期: 2022-06-29; **修订日期:** 2022-07-19
基金项目: 浙江省自然科学基金杰出青年项目（No. LR19D050001）；国家重点研发计划（No. 2021YFC2202001）；中央高校基本科研业务费专项资金（No. 2021XZZX019）；现代光学仪器国家重点实验室创新项目（No. MOI2021ZD01）
Supported by Excellent Young Scientist Program of Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LR19D050001); National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2202001); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2021XZZX019); State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation Innovation Program (No. MOI2021ZD01)

Quickly and accurately understanding the temperature, humidity and pressure information of the atmosphere and their changing trends is of great significance to research on meteorology, climatology, and artificial weather research. Raman lidar can obtain various atmospheric environment-related parameters by separating Raman scattering signal inversion, which can achieve high accuracy detection of atmospheric parameter profile information. Raman lidar has unique advantages and potential in atmospheric temperature, humidity and pressure detection. With an introduction to the principle and inverse analysis algorithm of Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and pressure detection, this paper also highlights the advantages and disadvantages along with related advances of spectral devices such as filters, etalons and gratings commonly used in Raman lidar. The detection techniques involved in Raman lidar are also included. Finally, typical applications of meteorological parameter measurements by Raman lidar are shown.

Key words: raman lidar; temperature measurement; humidity measurement; spectroscopic technology; photoelectric detector

1 引 言

地球大气的温度决定着大气的热力过程，压力的分布和变化与大气运动和天气状况密切相关[1]，而大气中的水汽在地球水循环和能量循环中具有重要作用[2-3]。如今，全球范围内的大气温室效应、厄尔尼诺现象、拉尼娜现象等环境问题日益突出，严重影响到世界的发展和人类赖以生存的环境，快速准确地了解大气中温度、湿度、压强等情况，掌握其变化趋势和特征，对天气、气候、人工影响天气等气象研究有重要意义[4]。

目前大气参数探测方式主要可分为直接探测和遥感探测。直接探测可利用地基原位仪器，以及探空气球和火箭等携带原位仪器进行测量，但存在获取数据不连续、费用昂贵、探测次数受限等缺点[4]。遥感探测手段主要包括卫星和激光雷达等。经典卫星遥感往往采用被动式遥感，探测结构简单，但垂直分辨率较低，低层探测能力较弱；激光雷达探测属于主动式遥感，具有可连续测量、实时性好、空间分辨率高和探测灵敏度高等优点。大气激光雷达主要包含米散射激光雷达、瑞利散射激光雷达、高光谱分辨率激光雷达和拉曼激光雷达等。米散射激光雷达可以探测云底高度和气溶胶分布廓线[5]；瑞利散射激光雷达可以由测量出的大气密度廓线得到大气温度廓线，但不适用于低层探测[6]；高光谱分辨率激光雷达基于瑞利散射谱宽与温度的依赖关系进行测量，而由于瑞利散射谱宽较窄，对光谱鉴频技术以及系统的稳定性具有极高的要求[7-8]；拉曼激光雷达通过分离拉曼散射信号反演得到各种大气环境相关参数，可实现对大气各项参数的测量。特别是在测量低层大气温度时，拉曼激光雷达可以获得较高的探测精度，且对激光器和分光系统的性能要求相对不高[9]，近些年来得到了广泛关注和长足发展。

本文主要介绍了拉曼激光雷达进行大气温度、湿度和压强探测的基本原理、反演方法，重点阐述了拉曼激光雷达中分光系统的研究进展，以及拉曼激光雷达中的探测技术，并介绍了不同气象参数对探测器的选择需求。最后，例举了利用拉曼激光雷达对气象参数测量以及得到气象规律的典型应用。

2 基本原理

激光在大气中传播会与其中的各种粒子发生散射、吸收等相互作用，使激光回波信号能量或特性发生改变。大气散射的实质是其中的粒子在入射波的作用下振荡并辐射子波[10]，根据激励波长与被测粒子尺寸间的关系可以将散射分为米散射、瑞利散射和拉曼散射等[11]。

2.1 拉曼散射基本原理

拉曼散射的过程中光波与物质分子进行相互作用，使得分子发生转动能级、振动能级和电子能级间的跃迁，从而引起散射光的频率变化。散射光的频率变化量仅与散射分子本身的属性有关[12]。

拉曼散射的原理如图 1 所示, 过程如下: 分子吸收能量为hv_0的入射光子, 激发跃迁到某个受激虚能态; 处在虚能态的分子发射一个能量为hv的光子, 辐射跃迁到末态。设初始时分子处在基态E_0, 如果分子跃迁到激发态E_1, 光子在散射过程中将部分能量传递给分子, 光子以较小的频率$v_0-\Delta v$散射出去, 即得到拉曼散射的斯托克斯线(Stokes 线); 如果分子初态是激发态是E_1, 末态是E_0, 则光子在散射过程中获得部分能量, 光子以较大的频率$v_0+\Delta v$散射出去, 得到拉曼散射的反斯托克斯线 (Anti-Stokes 线)[13]。拉曼散射光的频谱是入射光频率和分子振动、转动固有频率综合作用的结果。由于气体分子的拉曼散射频移只与散射分子成分有关, 而大多数大气分子振动和转动拉曼频谱线频移可以提前标定, 故可以利用拉曼散射对大气成分进行探测分析。

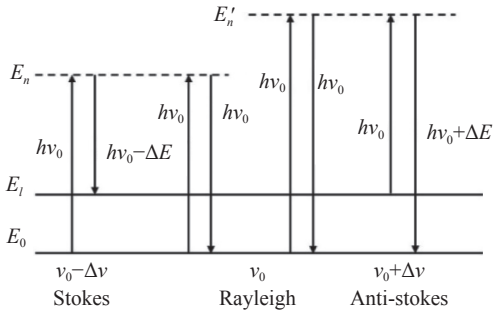


图 1　拉曼散射原子层面原理示意

Fig. 1　Schematic diagram of Raman scattering principle

2.2　探测温度: 转动拉曼散射法

大气转动拉曼谱线的强度与大气温度关系密切。随温度的升高, 高低量子数(远离/靠近激光发射波长)转动拉曼谱线的强度会分别增强和减弱, 故可以利用高低量子数拉曼散射信号来反演温度。设高低量子数转动拉曼散射信号的强度分别为$P_1(T,z)$、$P_2(T,z)$, 两者之比$H(T,z)$为[14]:

$$H(T,z)=\frac{P_1(T,z)}{P_2(T,z)}=\frac{n_1(J,z)}{n_2(J,z)}=e^{-\left[\frac{A}{T(z)}+B\right]}\quad,\quad(1)$$

可推出温度表达式为

$$T(z)=\frac{A}{-\ln\dfrac{n_1(J,z)}{n_2(J,z)}-B}\quad,\quad(2)$$

其中, $n_1(J,z)$和$n_2(J,z)$是高低量子数拉曼后向散射的光子数, A、B 是系统参数。

与其他测温激光雷达相比, 纯转动拉曼激光雷达可以工作在有可穿透云和气溶胶的天气状况下[15]。它的不足之处在于: 转动拉曼信号较弱导致信噪比低、探测高度受限, 一般只工作在对流层和低平流层[16]。

2.3　探测湿度: 振动拉曼散射法

探测低空大气水汽廓线的拉曼激光雷达通常使用两个通道, 分别用于探测大气中水汽分子的振动拉曼散射和氮气分子的振动拉曼散射[17]。激光雷达接收的水汽分子和氮气分子的拉曼散射回波信号分别可以表示为

$$S_{\mathrm{H}}(z)=\frac{k_{\mathrm{H}}}{z^2}\sigma_{\mathrm{H}}(\pi)N_{\mathrm{H}}(z)q(\lambda_0,z_0,z)q(\lambda_{\mathrm{H}},z_0,z)\quad,\quad(3)$$

$$S_{\mathrm{N}}(z)=\frac{k_{\mathrm{N}}}{z^2}\sigma_{\mathrm{N}}(\pi)N_{\mathrm{N}}(z)q(\lambda_0,z_0,z)q(\lambda_{\mathrm{N}},z_0,z)\quad,\quad(4)$$

其中λ_0, λ_{H}, λ_{N}分别为发射激光波长、水汽及氮气拉曼散射回波信号波长, k_{H}和k_{N}分别为水汽和氮气的系统常数, $\sigma_{\mathrm{H}}(\pi)$和$\sigma_{\mathrm{N}}(\pi)$分别为水汽和氮气分子的拉曼后向散射截面, $N_{\mathrm{H}}(z)$和$N_{\mathrm{N}}(z)$分别为高度 z 处的水汽和氮气的数密度, $q(\lambda_x,z_0,z)$是波长λ_x从高度z_0到高度 z 的大气透射率。

水汽混合比[17]是指水汽的质量除以给定体积中干燥空气的质量, 可以表示为

$$w(z)=\frac{N_{\mathrm{H}}(z)M_{\mathrm{H}}}{N_{\mathrm{dry}}(z)M_{\mathrm{dry}}}\quad,\quad(5)$$

其中, $N_{\mathrm{dry}}(z)$为高度 z 处的干空气的数密度, M_{H}和M_{dry}为水汽和干空气的分子量, 利用来自水汽分子和氮气分子的拉曼回波信号, 可以从激光雷达数据中确定水汽混合比为

$$w(z)=C_\omega\Delta_q^\omega(z_0,z)\frac{S_{\mathrm{H}}(z)}{S_{\mathrm{N}}(z)}\quad,\quad(6)$$

其中

$$C_\omega=\frac{k_{\mathrm{N}}}{k_{\mathrm{H}}}\frac{\sigma_{\mathrm{N}}(\pi)}{\sigma_{\mathrm{H}}(\pi)}\frac{M_{\mathrm{H}}}{M_{\mathrm{dry}}}\frac{N_{\mathrm{H}}(z)}{N_{\mathrm{dry}}(z)}\quad,\quad(7)$$

为水汽混合比测量的系统校准常数,

$$\Delta_q^\omega(z_0,z)=\frac{q(\lambda_{\mathrm{N}},z_0,z)}{q(\lambda_{\mathrm{H}},z_0,z)}\quad,\quad(8)$$

为水汽混合比计算的透射修正函数。

相对湿度的物理含义为同一温度下, 单位空气中实际水蒸汽密度和饱和水蒸汽密度之比[4], 可表示为

$$RH(z)=N'_{\mathrm{N}}(z)/S'_{\mathrm{H}}(z)\times 100\% \quad , \qquad (9)$$

其中$N'_{\mathrm{N}}(z)$是实际水蒸汽密度，$S'_{\mathrm{H}}(z)$是同温度下饱和水蒸汽密度。

与另一种水汽探测激光雷达——差分吸收激光雷达相比，拉曼激光雷达对发射激光的光谱纯度和接收器的频率稳定性没有过高要求，但同样受到拉曼散射较低散射截面的影响，信噪比较低，主要在夜间使用[18]。

2.4 探测气压：振转拉曼、大气静力学方程、湿空气状态方程

大气压力廓线可以通过得到的大气温度廓线和大气湿度廓线，根据大气压力与温度，湿度的相互关系反演得到。60 km 以下的大气空间，大气处于静力学平衡状态，符合大气状态的大气静力学方程和湿空气状态方程为

$$\frac{\partial p(z)}{\partial z}=-\rho(z)g \quad , \qquad (10)$$

$$p(z)=\rho(z)R_d[1+0.608q(z)]T(z) \quad , \qquad (11)$$

其中$p(z)$表示高度 z 处的大气压力；$\rho(z)$表示高度 z 处的湿空气的大气密度；R_d为干空气的比气体常数，其值为 287.05 J/(kg·K)$^{-1}$；g为重力常数。$T(z)$为大气温度；$q(z)$为比湿，即水汽与湿空气的质量比，$q(z)$与水汽混合比$w(z)$的关系可表示为

$$q(z)=\frac{w(z)}{1+w(z)} \quad . \qquad (12)$$

求解大气静力学方程和湿空气状态方程组合的微分方程可以得到

$$p(z)=\begin{cases} p(z_{ref})\exp\left[-\dfrac{1}{R_d}\displaystyle\int_{z_{ref}}^{z}\frac{g}{T(z')[1+0.608q(z')]}dz'\right], z\geqslant z_{ref} \\ p(z_{ref})\exp\left[-\dfrac{1}{R_d}\displaystyle\int_{z}^{z_{ref}}\frac{g}{T(z')[1+0.608q(z')]}dz'\right], z<z_{ref} \end{cases} \quad . \qquad (13)$$

综上，压强廓线$p(z)$可以根据温度廓线$T(z)$、比湿廓线$q(z)$以及参考高度大气压强$p(z_{ref})$来获取[1]。

3 拉曼激光雷达中的分光技术

拉曼激光雷达的结构一般包含发射系统、接收系统、分光系统与数据处理系统等几部分，如图 2 所示。分光系统利用分光元件实现对太阳背景光的滤除和对弹性散射信号的抑制，从而高效率地提取拉曼散射信号，其结构和功能直接影响着大气探测激光雷达的探测性能[19]。大气回波信号中，由于弹性散射截面相对转动拉曼散射要高 3~4 个数量级，为精细提取出微弱的转动拉曼信号，需对强烈的弹性散射信号进行较好抑制[14, 20, 21]，如 60~70 dB，这就要求分光系统具有极高的带外抑制能力。目前，国内外主要采用的拉曼激光雷达分光系统有干涉滤光片、Fabry-Perot 标准具和光栅等[22]。

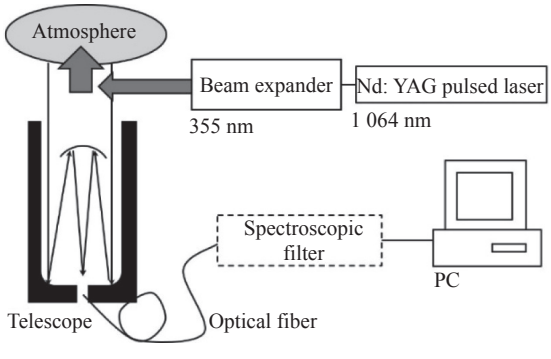


图 2 激光雷达结构示意系统

Fig. 2 Structure schematic of laser radar system

3.1 干涉滤光片

干涉滤光片利用干涉原理仅使特定光谱范围的光通过，通常由多层薄膜构成，多光束滤光片的干涉原理如图 3 所示。在拉曼激光雷达中，可以使用干涉滤光片滤除掉高强度激光，保证拉曼散射光谱的高透过率。

在温度探测领域，1993 年，法国凡尔赛大学

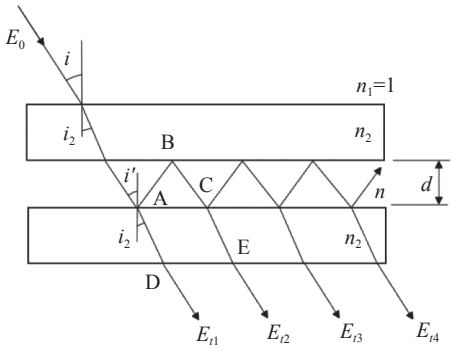


图 3 多光束干涉原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multiple-beam interference principle

的 Nedeljkovic 等人阐释了用窄带滤波片技术测量高对流层和低平流层温度的可能性, 并在转动拉曼激光雷达中使用了两个中心波长分别为 530.4 nm 和 529.1 nm、带宽均为 0.7 nm 的窄带干涉滤光片, 探测了从地面到 30 km 的温度廓线[23]。2000 年, 德国 GKSS 研究中心在设计的转动拉曼激光雷达中采用多腔干涉滤光片, 如图 4 所示, 将 4 组直径为 50 mm 的干涉滤光片, 以小的入射角按顺序进行安装, 其中带宽为 0.74 nm 和 10.1 nm 的 IF1a 和 IF1b 检测 532.25 nm 的弹性后向散射光, 其透过率为 0.83 和 0.75, 带宽为 0.55 nm 的 IF2a 和 IF2b 检测低量子数转动拉曼信号, 带宽为 1.2 nm 的 IF3 检测高量子数转动拉曼信号, 带宽为 9.0 nm 的 IF4 检测 607.63 nm 的N_2振动转动拉曼信号。该设计降低了系统误差, 在光谱分离过程中, 几乎不会发生信号功率损失, 能够在对流层以及平流层云中进行温度分析, 最高达到了 40 km, 有益于在极地开展平流层温度研究[24]。

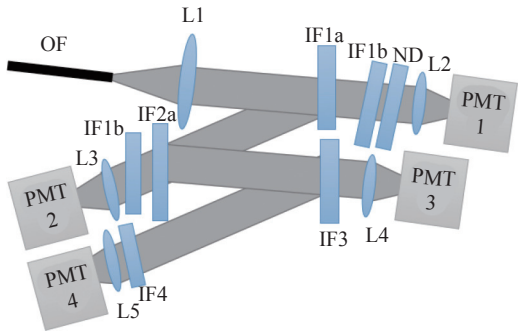


图 4　多色仪示意图。OF, 光纤; L1–L5, 透镜; IF1a–IF4, 干涉滤光片; ND, 中性密度衰减器; PMT1–PMT4, 分别用于检测弹性、低和高量子数转动拉曼和 N_2 振动转动拉曼信号的光电倍增管[24]

Fig. 4　Schematic diagram of polychromator. OF, optical fiber; L1–L5 ,lenses; IF1a–IF4,interference filters; ND, neutral density attenuator; PMT1–PMT4, photomultiplier tubes for detection of the elastic, low- and high-quantum-number rotational Raman and N_2 vibrational–rotational Raman signals, respectively[24]

2004 年, 日本京都大学遵循并改进了 GKSS 研究中心的设计, 并在转动拉曼激光雷达系统中使用了具有更高峰值透过率的窄带干涉滤光片: 一个拉曼通道中窄带干涉滤光片的峰值透过率由 0.38 提高到 0.72、其带宽为 0.65 nm; 另一个拉曼通道中窄带干涉滤光片的峰值透过率由 0.75 提高到 0.87、其带宽为 1.1 nm; 水蒸气拉曼通道使用了带宽为 1.2 nm 的窄带干涉滤光片; 对其他组件也进行了更新。该激光雷达在没有云的情况下测得的数据不确定度低于 1 K, 对于温度、水汽混合比和相对湿度的测量范围首次扩展到平流层上部, 能测量至 80 km[25]。

2013 年, 斯德哥尔摩大学设计了 Esrange 激光雷达并用于瑞典基律纳, 在接收端安装了 3 个牛顿望远镜用于收集后向散射光, 利用带宽为 0.13 nm、中心波长为 532.13 nm 的干涉滤光片, 对平行和垂直分支中的光进行分离, 从收集到的组合光中提取到转动拉曼信号。反射后的光传输到转动拉曼通道中, 利用带宽分别为 1.2 nm 和 0.5 nm 的干涉滤光片再次进行分光。两个转动拉曼通道的设计可以对弹性信号进行至少 10 个数量级的高抑制, 将获得的温度剖面中的系统误差降低到 0.51 K 以下[26]。2015 年, 德国霍恩海姆大学设计的转动拉曼激光雷达, 在午间探测到的温度不确定度低于 0.1 K, 空间分辨率提高到 109 m, 时间分辨率提高到 10 s, 首次达到了对测量数据的高时空分辨率和低的统计噪声的要求[27]。

在湿度探测领域, 2020 年, 日本京都大学使用二向色分束器和干涉滤光片分离波长的拉曼激光雷达, 成功监测大气边界层中水汽混合比剖面[28]。

国内在采用干涉滤光片对拉曼激光雷达系统进行分光方面也有很多研究。2015 年, 武汉大学设计了一个纯转动拉曼激光雷达, 设计了长度为 1.5 m 的 Z 形分离光路进行分光和滤波, 光路图如图 5 所示[29], 借助高性能干涉滤光片分离拉曼信号和弹性散射信号, 两个转动拉曼通道中的干涉滤光片的中心波长分别为 530.9 nm 和 528.9 nm, 带宽分别为 0.7 nm 和 1.1 nm。该拉曼激光雷达在武汉上空进行了 10~40 km 的高精度温度测量, 其与气象无线电探空仪相比, 在 30 km 以下的温度偏差小于 3.0 K。2018 年, 西安理工大学建立了地面紫外拉曼激光雷达系统测量西安的气象参数, 利用一组窄入射角的二向色镜和窄带干涉滤光片构建了一个高效的 5 通道分光系统, 5 组干涉滤光片的带宽分别为 1.0、1.0、5.0、0.6、1.1 nm, 峰值透过率分别为 70%、80%、65%、50%、50%, 用来减少背景辐射并阻断弹性信号。该拉曼激光雷达可以同时测量温度和相对湿度, 对整个平流

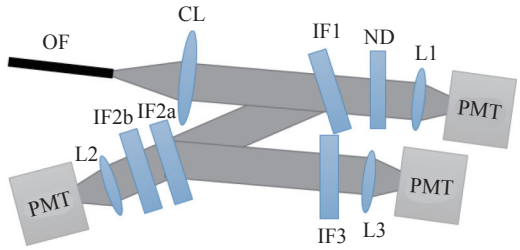


图 5 转动拉曼激光雷达分光和滤波光路。OF, 光纤; L, 透镜; IF1a–IF2, 干涉滤光片; ND, 中性密度衰减器; PMT, 光电倍增管[29]

Fig. 5 Splitting and filtering optical path of rotating Raman lidar. OF, optical fiber; L, Lens; IF1a-IF2, interference filter; Nd, neutral density attenuator; PMT photomultiplier[29]

层多个大气参数进行研究[30]。

在性能上，干涉滤光片结构简单，系统稳定，在转动拉曼通道中能够对弹性后向散射光进行高度抑制，应用十分广泛。但干涉滤波片的多膜结构导致透过率较差，这在一定程度上限制了其发展。

3.2 Fabry-Perot 标准具

Fabry-Perot 标准具包含两块具有较高反射率的平行玻璃板，在拉曼激光雷达中，可以使用其作为梳状频率滤波器来分离N_2和O_2的拉曼光谱，当入射光的频率满足其共振条件时，其透射频谱会出现很高的峰值，具有很高的透射率，可以滤除光谱连续的天空背景光，显著提高纯转动拉曼激光雷达回波信号的信噪比[31]。图 6 是 Fabry-Perot 标准具简图。

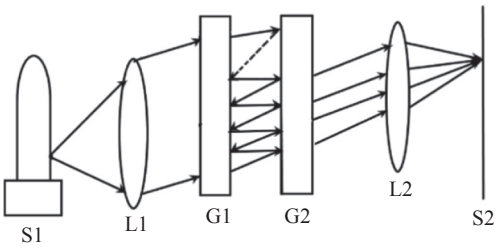


图 6 Fabry-Perot 标准具简图。S1, 光源; L1-L2, 透镜; G1-G2, 平行玻璃板; S2, 光屏

Fig. 6 Schematic diagram of Fabry-Perot interferometer. S1, light source; L1-L2, lens; G1-G2, parallel glass plate; S2, light screen

1971 年，霍华德大学 Butcher R J 等人使用 Fabry-Perot 标准具测定了氧和氮的纯转动拉曼光谱，得到了氧和氮转动常数的精确值[32]。1999 年，俄罗斯科学院利用 Fabry-Perot 标准具分离氮气的纯转动拉曼光谱，得出了激发辐射波长与 Fabry-Perot 标准具自由光谱区匹配的条件函数，利用此函数可以使两者完全匹配，有效抑制激发辐射线[33]。2005 年，该研究所将 Fabry-Perot 标准具应用于转动拉曼激光雷达中，有效滤除了拉曼光谱中连续的天空背景光，将回波信号的信噪比提高了十倍以上，实现了在可见光和近紫外光谱区于白天进行温度分析，并测得了整个对流层的日间温度剖面[31]。2016 年，法国凡尔赛大学设计了一款具有日光测量能力的新型转动拉曼激光雷达，利用 Fabry-Perot 标准具进行光学滤波，垂直分辨率为 1 km，连续测量了从地面到平流层中部的温度垂直分布，为使用拉曼空间激光雷达进行全球大气温度剖面观测提供了可能[34]。

Fabry-Perot 标准具可以与干涉滤光片组合使用探测温度。2018 年，武汉大学建立了一个纯转动拉曼激光雷达系统，分光系统采用 Fabry-Perot 标准具与干涉滤光片结合的方式，光学布局如图 7 所示，其中 FPI1 和 FPI2 的带宽约 30 pm，FPI1 在波长为 531.000 nm 处的峰值透过率约为 60%，FPI2 在波长为 528.770 nm 处的峰值透过率约为 50%。该拉曼激光雷达根据温度与两个纯转动拉曼线信号的比率之间的简单双参数函数关系，可以获得全天的温度曲线，夜间和白天测量高度分别达到 6.5 km 和 2.6 km，且不确定度小于 1 K[35]。

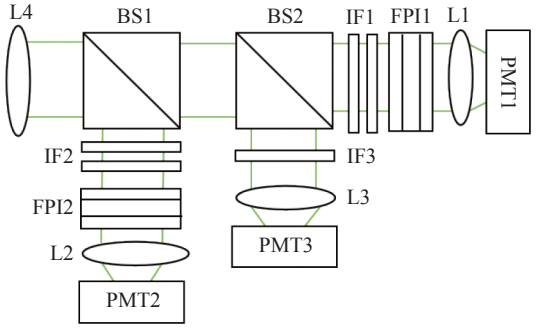


图 7 武汉大学用于测量大气温度和气溶胶光学特性的单线提取转动拉曼激光雷达的光学布局。BS, 分束器; L, 透镜; IF, 干涉滤光片; FPI, Fabry-Perot 标准具; PMT, 光电倍增管[35]

Fig. 7 Optical layout of single-line-extracted PRR lidar proposed by Wuhan University for measuring atmospheric temperature and aerosol optical properties. BS, beam splitter; L, lens; IF, interference filter; FPI, Fabry-Perot interferometer; PMT, photo-multiplier tube[35]

Fabry-Perot 标准具能有效地从分子氮等距纯转动拉曼线之间的间隔中滤除光谱上连续的天空背景光, 而信号仅发生少量的损失, 不会影响到拉曼光谱, 且对激光器波长的限制较少。但是由于氮分子的纯转动拉曼光谱的谱线并非完全等距, 使得 Fabry-Perot 标准具反射镜的最大容许反射率受到限制。另外, 其抑制天空背景噪声的能力有限, 无法充分地滤除大气中的气溶胶产生的米散射信号。

3.3　光　栅

光栅是具有周期性空间结构或光学性质的衍射屏, 利用多缝衍射和干涉原理对振幅和相位进行空间周期性调制。衍射光栅的光谱是在焦面上一条条细亮的条纹, 每一种波长各自形成一套条纹, 彼此错开一定距离, 借此达到分光的作用[36]。最基本的光栅方程为

$$d(\sin i+\sin\theta)=m\lambda \quad . \qquad (14)$$

光栅原理示意如图 8 所示。

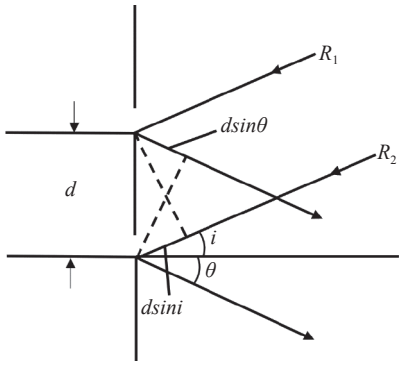


图 8　光栅结构原理示意图。i, θ分别是入射角和反射角, d 为光栅常数

Fig. 8　Schematic diagram of grating structure. i, θ are incident and reflection angles, respectively. d is the grating constant

光栅按光路可分为透射光栅和反射光栅; 而按工艺又可分为全息型和刻划型。由于反射光栅对光的利用率较高, 全息光栅衍射效率高并有较高的破坏阈值, 激光雷达系统中通常选用全息型反射光栅[37]。下面主要从双光栅、光纤布拉格光栅等介绍其在大气参数测量方面的研究成果。

3.3.1　双光栅

大气回波信号中一般需对弹性散射信号进行较好的抑制[14, 20-21], 才能精细提取出微弱的转动拉曼信号, 这就要求分光系统具有极高的带外抑制能力。单光栅可对瑞利、米散射信号产生优于 40 dB 的抑制比, 而采用双光栅一般可实现 70 dB~80 dB 的抑制比[38]。与单光栅结构相比, 双光栅结构一般具有更高的抑制比, 更能满足对强烈散射信号的带外抑制需求, 从而更好地将微弱的转动拉曼信号提取出来, 故在分光系统中一般选择双光栅结构。

1983 年, 俄罗斯科学院和保加利亚科学院使用双光栅单色仪来分离N_2和O_2的纯转动拉曼光谱并抑制气溶胶光散射线, 实验结果以及大气中空气温度的测量结果验证了用双光栅单色仪分光测量大气温度的可行性, 首次实现了使用N_2和O_2分子的纯转动拉曼光谱对大气温度的测量[38]。

1998 年, 德国莱比锡对流层研究所开展了利用纯转动拉曼信号测量大气温度廓线的实验, 并于 1999 年首次提出了一种精巧的双衍射光栅单色仪结构[39](图 9 所示), 利用两个相同的 600 线对每毫米、闪耀角为 53°的闪耀光栅的第五级衍射光进行分光。这与之前的测量结果相比可以获得更高的N_2和O_2的分离光谱纯度, 抑制比达到 70 dB。2001 年, 韩国原子能研究院的 Kim 等人也采用相同原理与类似双衍射光栅分光系统实现了大气温度廓线的测量[40]。

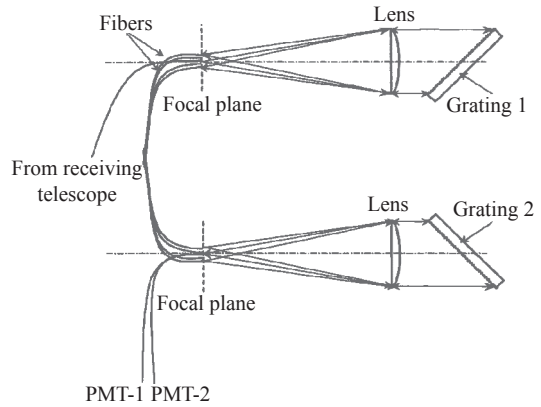


图 9　双衍射光栅单色仪结构。PMT 为光电倍增管[39]

Fig. 9　Double diffraction grating monochromator structure. PMT, photomultiplier tube[39]

2004 年, 瑞士联邦理工学院研制出振动-纯转动拉曼激光雷达[41]。该系统使用双光栅多色仪实现了纯转动拉曼光谱两个波长域的隔离和弹性散射光的抑制, 其利用两个相同的 600 线对每毫米、闪耀角为 53°的闪耀光栅的第五级衍射光达到分光目的。不同于之前工作主要限于温度的测

量，该系统可同时测量大气温度、湿度、气溶胶消光和后向散射系数。

利用光栅进行拉曼分光在国内也有很多相关研究。2007 年，中国科学院提出选用光纤导光和光栅分光相结合[42] 的方式分光，其用到两个相同的 600 线对每毫米、54°为闪耀角的闪耀光栅。该方法提供了至少 70 dB 的抑制率，且具有长期的稳定性[43]。

北京理工大学在 2011 年采用光纤耦合双光栅单色器作为滤光系统的纯转动拉曼激光雷达进行温度廓线探测。系统中的双光栅单色仪结构如图 10 所示，主要由两个采用光纤耦合的闪耀光栅组成，要求工作于 532 nm 波段并以利特罗条件入射。该激光雷达可以实现低空范围的大气温度廓线的较高精度测量，在 10 km 内误差小于 1.1 K[44]。

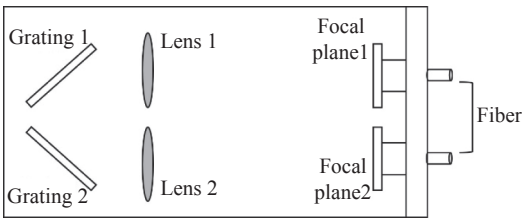


图 10 北京理工大学自主设计的双光栅单色仪示意图。左侧为两个发光光栅，在 532 nm 波段以利特罗条件入射[44]

Fig. 10 Schematic diagram of the double grating monochromator independently designed by the Beijing Institute of Technology. Two luminous gratings on the left working in the band of 532 nm under the Elitro incident condition[44]

2012 年，武汉大学开始利用纯转动拉曼激光雷达测量大气温度，2014 年，该团队所利用基于两个相同的 600 线对每毫米、53°为闪耀角的闪耀光栅设计的双光栅多色器来提取所需的拉曼信号，对海拔 5~30 km 的大气温度实现了较大跨度的测量[45]。

关于双光栅系统中的光栅参数，常选用 600 线对每毫米第五级闪耀、闪耀角度为 53°的闪耀光栅这一套经验参数。这是由于分光系统中需要提取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，需要考虑滤波函数对应 J=6(−6) 与 J=12(−12) 的谱线能否分开。每毫米 600 线对五级光谱闪耀时滤波函数刚好分开，更高级次存在信号强度弱，闪耀角度为复数等问题。此外，选择其他谱线数还要考虑光栅的滤波函数是否会交叉而无法成功滤波等情况。

3.3.2 光纤布拉格光栅

2010 年，西安理工大学等相继提出使用基于光纤布拉格光栅（FBG）全光纤分光系统的转动拉曼激光雷达系统[46-49]。后续又做了一系列相关研究：2013 年详细介绍了可见光波段 FBG 与光纤耦合器构建的全光纤分光系统[50]。该分光系统如图 11 所示，其中 FBG0x, FBG1x, FBG2x 分别是以 532.0 nm, 530.4 nm, 528.6 nm 为中心波长的采用侧向直接刻写法加工的布拉格光栅，其抑制比分别大于 25 dB, 30 dB, 30 dB；2016 年，设计了一阶闪耀光栅与光纤布拉格光栅组成的两级并行多通道拉曼分光系统[51]。该基于光纤布拉格光栅的二级分光系统的抑制效果可达到 62 dB，满足精细提取单条转动拉曼光谱的技术要求；同年，又提出了在可见光谱范围内以取样光纤布拉格光栅为核心的多级级联全光纤光路（如图 12 所示[52]），其中 FBGx 以 532.0 nm 为中心波长，FBGx, SFBG1x, SFBG2x 的抑制比分别大于 20 dB, 30 dB, 30 dB。该分光系统对大气回波信号中米瑞利散射信号进行至少 70 dB 的抑制，进一步提高了激光雷达回波信号的信噪比，并可实现白天探测。

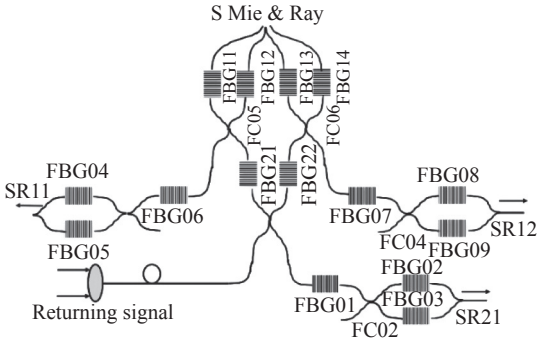


图 11 全光纤分光系统。FC01，光纤耦合器；FBG，布拉格光栅；信号输出 S_R12，S_R21 至光电检测器[50]

Fig. 11 All-fiber splitter system. FC01, fiber coupler; FBG, Bragg grating; signal output S_R12, S_R21 to photoelectric detector[50]

光纤布拉格光栅技术具有与光纤完全兼容、高光谱分辨率等优点，有更高的抑制比，适用于构建小型及稳定性高的光纤光栅分光系统[44, 53-55]。

光栅系统简单、使用方便、性能可靠，可长时间稳定工作，既不存在干涉滤波片的老化效应与分光的局限性，也不像 Fabry-Perot 标准具那样昂贵复杂，而且光谱应用范围广。此外，光栅分光系

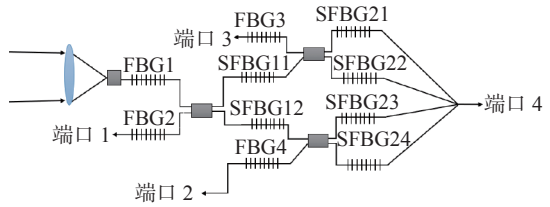


图 12　由 SFBG 和 FBG 多级级联构成的高抑制率全光纤拉曼光谱分光光路示意图[52]

Fig. 12　Schematic diagram of the Raman spectroscopic optical path of the all-fiber with a high suppression rate composed of SFBG and FBG cascades[52]

统也存在一定局限性。相比其它分光手段, 光栅分光系统的光学效率比较低, 使系统的探测距离受到影响。而且在不同观测区域的回波经望远镜接收后, 所得图像存在差别, 即有一个和观测区域有关的附属光谱传输函数。经光栅分光后不同区域的回波不能完全匹配。同时光栅的使用要配合狭缝, 可能影响系统的光学效率。

4　拉曼激光雷达中的探测技术

4.1　模拟探测和光子计数

拉曼激光雷达利用光电探测器将接收到的激光回波信号直接转换为随时间变化的光电流或光功率。常用的采集方法包括模拟探测和光子计数等。模拟探测是利用模数转换器将光电探测器输出的信号数字化, 并以大量的测量周期进行积累, 从而获得激光雷达的回波信号。模拟探测适合测量相对较强的光信号, 具有较大的线性测量范围[56]。但当光强小于10^{-11} W 时, 由于采样速率和采样系统电噪声的影响, 输出信号的灵敏度降低, 信噪比较差。

光子计数利用弱光照射下光子探测器输出电信号自然离散的特点, 采用脉冲甄别技术和数字计数技术将极其弱的信号识别并提取出, 从而获得激光雷达的回波信号[57]。光子计数适用于光信号较弱时, 输出信号为离散的光子脉冲的情况, 能够直接测量光子数, 并且利用鉴别器消除了电噪声和热噪声对测量的影响, 可实现10^{-11}~10^{-18} W 光束功率检测, 可获得较高信噪比。单光子计数相比模拟探测有一定的优势, 它的稳定性和信噪比较高, 受系统增益变化及其他不稳定因素影响较小, 且可输出数字信号, 适合与计算机接口连接进行数据处理[58]。

拉曼激光雷达回波信号的动态范围较大, 与距离的平方成反比, 近场信号采用模拟探测采集, 远场信号采用光子计数采集, 将两种采集方式相结合可以拼接成完整的测量结果。拼接区一般选在光子计数率为 2~10 MHz 的区间, 模拟信号和光子计数信号都具有较好的线性[59-60]。这样就可以获得非常大的测量动态范围, 提高激光雷达的探测性能。

4.2　常见光电探测器

光电探测器在拉曼激光雷达中将微弱光信号及快速脉冲弱光转换为电信号, 现常用的包括光电倍增管(Photon Multiplier Tube,PMT)和雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode,APD)。PMT 适用于探测紫外波段和可见光波段的信号, 常用的 PMT 包括滨松 H7260、R7600U-200、H6789、R-9880U 等。APD 适用于探测红外波段的信号, 常用的 APD 包括滨松 G14858-0020A、S14643 等, 在实际应用中, 根据激光雷达的工作波长可以选择具有合适光谱响应特性的光电探测器。

选择 PMT 和 APD 时, 需要考虑的特性参数主要包括量子效率、增益、暗电流。量子效率和增益越高, 暗电流越小, 光电探测器的性能越好。PMT 具有较高的增益和较低的噪声, 对于紫外和可见光具有很好的响应度, 且具有极高的时间分辨率和很小的暗电流, 但其体积庞大、量子效率低下、抗外部强磁干扰差、动态响应范围较小。与 PMT 相比, 工作在盖革模式下的 APD 量子效率高、功耗低、工作频谱范围大、体积小、工作电压较低、不易受外界电磁场干扰[61]、在低温环境下暗电流较低, 但它的增益远远低于 PMT, 且噪声较大, 且电路较复杂。表 1 列举了常用光电探测器的性能参数比较[62]。

表 1　PMT 和 APD 性能比较

Tab. 1　Performance comparison of PMT and APD

	PMT	APD
工作波段	适用于紫外到近红外波段, 响应光谱范围为200~900 nm	适用于红外波段, 响应光谱范围为400~1 650 nm
增益	10^4~10^7	10^2~10^3
量子效率	20%~25%	线性模式下可以达到80%, 而盖革模式下可以达到40%~50%.
脉冲上升时间	~1 ns	Si:0.1~2 ns Ge:0.5~0.8 ns InGaAs:0.1~0.5 ns
抗磁场性	弱	强

4.3 新型光电探测器

现如今传统光电探测器已经无法完全满足先进技术的应用需求，很多新型光电探测器已经问世，如微通道板光电倍增管（Micro-Channel Plate-Photon Multiplier Tube, MCP-PMT）[63]、硅光电倍增管（Silicon Photomultiplier, SiPM）[64]、真空雪崩光电二极管（Vacuum Avalanche Photon Diode, VA-PD）等[65]。MCP-PMT 将传统 PMT 中的倍增电极换成了微通道板，相对于 PMT 来说具有增益高、耐振动、抗冲击、抗磁能力强等突出特点。SiPM 中的每个单元由一个 APD 与一个电阻串联，它是由大量此类单元组成的一个大光敏面光电探测器，具有体积小、探测效率高、抗干扰能力强、工作电压低、集成度高等特点[66]。VAPD 是 PMT 和 APD 两种技术相结合的产物，具有低噪声、分辨率高、探测光谱范围宽、抗磁干扰能力强等特点[67]。图表 2 列举了 MCP-PMT 和 SiPM 的性能参数比较。

表 2 MCP-PMT 和 SiPM 性能比较

Tab. 2 Performance comparison of MCP-PMT and SiPM

	MCP-PMT	SiPM
工作波段	从真空紫外到近红外波段	4 000~1 100 nm
增益	10^5~10^6	10^5~10^6
量子效率	20%~25%	25%~70%
上升时间	200~800 ps	~1 ns
抗磁场性	良好	强

5 应 用

拉曼激光雷达探测气象参数克服了直接探测存在的获取数据不连续、探测次数受限等缺点，不仅可以实时获取温湿压等气象参数信息，还可以稳定地长时间、连续性测量，获取大量大气参数数据。利用探测数据分析当地大气参数的变化规律，从而进行气候分析，总结气象规律。

拉曼激光雷达已经用于很多实地测量的科研应用场景，得到的大气温湿度探测结果在气候特征分析等方面正得到广泛的应用。

在大气温度领域，美国的加州理工学院自 1993 年起在夏威夷莫纳罗亚天文台利用瑞利-拉曼激光雷达测量大气温度垂直剖面，利用 1994 年 1 月至 2007 年 6 月的温度数据，应用线性回归分析方法，成功识别了从对流层到中上层的准两年振荡（QBO）、厄尔尼诺南方振荡（ENSO）和太阳周期的特征。研究表明：QBO 在平流层和中间层占主导地位，ENSO 在对流层和平流层底部的冬季特征较强，冬季气温对 QBO、ENSO 和太阳周期的响应均最大。夏威夷莫纳罗亚天文台上方的中层大气处于亚热带/温带状态，通常与赤道地区的温度脱节，并与北半球的冬季/春季同步。量化和理解这些现象的相关过程是构建气候数值模型的重要一步，有助于理解和预测全球气候变化[68]。2014 年，武汉大学利用拉曼激光雷达系统，测量了武汉地区海拔 5~30 km 的大气温度，基于长期温度测量数据，研究了武汉地区有逆温层和无逆温层的夜间温度变化规律[45]，在无逆温层的夜间，5~17 km 高度温度逐时变率基本小于 1 K。在 17~23 km 的高度，逐时变率增长达 1.2~2.4 K。在有逆温层的夜晚，对流层中高层只有逆温层高度出现显著的变率。在逆温层以外的其他对流层高度，变率普遍小于 1K。统计结果表明，有逆温层时的气温变化幅度大于无逆温层时的气温变化幅度。2020 年 2 月，中国第 36 次南极科考队在南极中山站 (69.37°S, 76.37°E) 部署了第一台可以在白天和夜间测量对流层温度的南极纯转动拉曼激光雷达系统，验证了显著的温度变化仅发生在逆流层，可以以 1 h 的时间分辨率和 90 m 的高度分辨率进行全天候的温度测量，从而研究南极中山站的热结构和温度演变特征[69]。

在大气湿度领域，法国气候与环境科学实验室在 2012 年和 2013 年期间在梅诺卡岛部署了 14 周水汽-气溶胶激光雷达（WALI）系统，进行了一个地中海水文循环实验，测得了从地面至 7 km 范围内的精度约为 7% 的夜间水汽廓线以及低层的日间水汽廓线[70]，验证了西地中海盆地极端降水事件中利用星载仪器和数值天气模型分析大气湿度的能力。2013 年，位于留尼汪岛 (21°S, 55.5°E) 的 Maïdo 高空观测台的创新性拉曼激光雷达 Lidar1200 进行了两年的水汽监测，获得了对流层和平流层下层的水汽数据，在 22 km 范

围内与低温霜点湿度计的平均偏差小于 9%[71], 对热带和亚热带机制进行了研究。2019 年, 德国 Lisa Klanner 等人利用大功率拉曼激光雷达系统(380 mJ)对水汽进行探测, 将水汽探测范围扩大到 20 km, 实现了平流层水汽混合比的探测, 不确定性水平达到 1 至 2×10^{-6}[72]。在热带卷云中的冻干被认为会导致脱水, 从而导致低湿度。利用激光雷达探测这种大气湿度的不均匀性具有良好的时间分辨率。水汽是对流层平流层输送的优良示踪剂, 未来有希望用于研究一些对流层平流层输送的案例。

随着技术的不断发展和普及, 拉曼激光雷达未来将更多地应用于科研和实地场景, 利用获得的探空数据分析检验气候规律, 对天气、气候、人工影响天气等研究有重要意义。利用拉曼激光雷达对气象参数进行测量与气象分析将对大气气象学的发展起到积极的促进作用。

6　结束语

拉曼激光雷达利用激光与大气介质的相互作用, 从而产生携带气象信息的拉曼散射, 通过分离提取有用信号反演, 实现对温度和湿度的测量。分光系统是拉曼激光雷达的核心系统, 利用分光元件可以实现对太阳背景光的滤除和对弹性散射信号的抑制, 高效率地提取拉曼散射信号。目前国内外分光系统主要采用干涉滤光片、Fabry-Perot 标准具和光栅。干涉滤光片通常具有结构简单、系统稳定的特点, 但对入射光角度的要求较高; Fabry-Perot 标准具对激光器的波长限制较小, 能有效对纯转动拉曼散射谱线过滤, 但结构比较复杂; 光栅分光精度高, 分光线性比较好, 但光学效率比较低。

光电探测器是拉曼激光雷达的关键器件, 能够将拉曼激光雷达中的微弱光信号及快速脉冲弱光转换为电信号, 常用的探测器包括 PMT 和 APT。新型光探测器 MCP-PMT、SiPM、VAPD 等也开始崭露头角。

由于拉曼激光雷达对激光器和分光系统的性能要求相对不高, 在大气温湿度领域已经得到了广泛的应用, 随着各类技术的进步, 在未来会得到更多的关注和长久的发展。

参考文献:

[1] 狄慧鸽, 王建宇, 赵煊, 等. 转动/振动拉曼激光雷达探测大气压力廓线的方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1501001.
DI H G, WANG J Y, ZHAO X, *et al*.. Method for detecting atmospheric pressure profile using rotational and vibrational raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1501001. (in Chinese)

[2] 王衍明. 大气物理学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993.
WANG Y M. *Atmospheric Physics*[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 1993. (in Chinese)

[3] GOLDSMITH E J, BLAIR F H, BISSON S E, *et al*.. Turn-key Raman lidar for profiling atmospheric water vapor, clouds, and aerosols[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4979-4990.

[4] 唐杰. 大气温湿度探测拉曼激光雷达的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
TANG J. Research on raman lidar for atmospheric temperature and humidity profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012. (in Chinese)

[5] 王青梅, 张以谟. 气象激光雷达的发展现状[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 246-249.
WANG Q M, ZHANG Y M. Development of meteorological lidar[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 246-249. (in Chinese)

[6] 王刚, 王仕璠. 大气温度的激光雷达实测方法[J]. 激光杂志, 2004, 25(2): 52-54.
WANG G, WANG SH F. A measuring method of atmosphere temperature by lidar[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(2): 52-54. (in Chinese)

[7] HUA D X, UCHIDA M, KOBAYASHI T. 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.

[8] 华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 21-27.
HUA D X, SONG X Q. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008,

37(S3): 21-27. (in Chinese)

[9] 刘君, 华灯鑫, 李言. 大气边界层白天温度测量用转动拉曼激光雷达[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 755-759.
LIU J, HUA D X, LI Y. Rotational raman lidar for daytime-temperature profiling of the atmospheric boundary layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(5): 755-759. (in Chinese)

[10] 戴昌达. 遥感图像应用处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
DAI CH D. *Remote Sensing Image Application Processing and Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

[11] 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. 中国人才, 2008(18).
SONG X Q. Research progress of advanced lidar detection Technology[J]. *Chinese Talent*, 2008(18). (in Chinese)

[12] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
SONG ZH F. *Fundamentals of Applied Atmospheric Optics*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. (in Chinese)

[13] 朱自莹, 顾仁敖, 陆天虹. 拉曼光谱在化学中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
ZHU Z Y, GU R A, LU T H. *Application of Raman Spectroscopy in Chemistry*[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 1998. (in Chinese)

[14] 尚震, 谢晨波, 王邦新, 等. 纯转动拉曼激光雷达探测北京地区近地面大气温度[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 119-126.
SHANG ZH, XIE CH B, WANG B X, *et al*.. Pure rotational Raman lidar measurements of atmospheric temperature near ground in Beijing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 119-126. (in Chinese)

[15] 翁森. 纯转动拉曼单支谱激光雷达的研制及全天时大气温度和气溶胶参数测量[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
WENG M. Single-line-extracted pure rotational raman lidar to measure atmospheric temperature and aerosol profiles[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

[16] 田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(5): 321-341.
TIAN X M, LIU D, XU J W, *et al*.. Review of lidar technology for atmosphere monitoring[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(5): 321-341. (in Chinese)

[17] WHITEMAN D N, MELFI S H, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(16): 3068-3082.

[18] 邓迁. 拉曼激光雷达水汽探测自标定方法研究与全固态系统研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
DENG Q. Research on self-calibration method of Raman lidar water vapor detection and development of all-solid-state system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)

[19] 吴敏. 大气温度探测拉曼散射激光雷达的关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
WU M. Key technigue study on rotational raman lidar for atmospheric temperature profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)

[20] BALSIGER F, HARIS P A T, PHILBRICK C R. Lower tropospheric temperature measurement using a rotational Raman lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2832: 53-60.

[21] LI SH CH, HUA D X, HU L L, *et al*.. All-fiber spectroscope with second-order fiber bragg grating for rotational Raman lidar[J]. *Spectroscopy Letters*, 2014, 47(3): 244-252.

[22] 李启蒙, 李仕春, 秦宇丽, 等. 绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计及性能[J]. 物理学报, 2018, 67(1): 014207.
LI Q M, LI SH C, QIN Y L, *et al*.. Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014207. (in Chinese)

[23] NEDELJKOVIC D, HAUCHECORNE A, CHANIN M L. 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.

[24] 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.

[25] BEHRENDT A, NAKAMURA T, TSUDA T. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2930-2939.

[26] ACHTERT P, KHAPLANOV M, KHOSRAWI F, *et al*.. Pure rotational-Raman channels of the Esrange lidar for temperature and particle extinction measurements in the troposphere and lower stratosphere[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(1): 91-98.

[27] BEHRENDT A, WULFMEYER V, HAMMANN E, *et al*.. Profiles of second- to fourth-order moments of turbulent temperature fluctuations in the convective boundary layer: first measurements with rotational Raman lidar[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(10): 5485-5500.

[28] YABUKI M, KAWANO Y, TOTTORI Y, *et al*.. A Raman lidar with a deep ultraviolet laser for continuous water vapor profiling in the atmospheric boundary layer[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2020, 237: 03001.

[29] LI L Y, SONG SH L, LI F Q, *et al*.. High-precision measurements of lower atmospheric temperature based on pure rotational Raman lidar[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(4): 313-324.

[30] WANG Y F, FU Q, ZHAO M N, *et al*.. A UV multifunctional Raman lidar system for the observation and analysis of atmospheric temperature, humidity, aerosols and their conveying characteristics over Xi'an[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 205: 114-126.

[31] ARSHINOV Y, BOBROVNIKOV S, SERIKOV I, *et al*.. Daytime operation of a pure rotational Raman lidar by use of a Fabry-Perot interferometer[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(17): 3593-3603.

[32] BUTCHER R J, WILLETTS D V, JONES W J. On the use of a fabry-perot etalon for the determination of rotational constants of simple molecules-the pure rotational raman spectra of oxygen and nitrogen[J]. *Proceedings of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1971, 324(1557): 231-245.

[33] ARSHINOV Y, BOBROVNIKOV S. Use of a fabry–perot interferometer to isolate pure rotational Raman spectra of diatomic molecules[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4635-4638.

[34] HAUCHECORNE A, KECKHUT P, MARISCAL J F, *et al*.. An innovative rotational Raman lidar to measure the temperature profile from the surface to 30 km altitude[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 06008.

[35] WENG M, YI F, LIU F CH, *et al*.. Single-line-extracted pure rotational Raman lidar to measure atmospheric temperature and aerosol profiles[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27555-27571.

[36] 赵凯华, 钟锡华. 光学（上下）[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984.
ZHAO K H, ZHONG X H. *Optics (up, down)*[M]. Beijing: Peking University Press, 1984. (in Chinese)

[37] 秦胜光. 大气激光雷达光栅分光接收技术实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
QIN SH G. The grating receiver technology experiment research of atmosphere lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)

[38] 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.

[39] ANSMANN A, ARSHINOV Y, BOBROVNIKOV S M, *et al*.. Double-grating monochromator for a pure rotational Raman lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3583: 491-497.

[40] KIM D Y, CHA H K, LEE J M, *et al*.. Pure rotational Raman lidar for atmospheric temperature measurements[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, 39(5): 838-841.

[41] BALIN I, SERIKOV I, BOBROVNIKOV S, *et al*.. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational-pure-rotational Raman lidar[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(6): 775-782.

[42] 刘玉丽, 张寅超, 苏嘉, 等. 转动拉曼测温激光雷达的双光栅单色仪研究[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 188-193.
LIU Y L, ZHANG Y CH, SU J, *et al*.. Double grating monochromator for a atmospheric temperature measurement pure rotational raman-lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 188-193. (in Chinese)

[43] 刘玉丽, 张寅超, 苏嘉, 等. 探测低空大气温度分布的转动拉曼激光雷达[J]. 光电工程, 2006, 33(10): 43-48.
LIU Y L, ZHANG Y CH, SU J, *et al*.. Rotational Raman lidar for atmospheric temperature profiles measurements in the lower-air[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10): 43-48. (in Chinese)

[44] CHEN S Y, QIU Z J, ZHANG Y CH, *et al*.. A pure rotational Raman lidar using double-grating monochromator for temperature profile detection[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(2): 304-309.

[45] JIA J Y, YI F. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5-30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5330-5343.

[46] HAO W L, ZHEN SH L, CAO ZH G, *et al*.. A fiber Bragg grating interrogating dynamic strains sensor system based on interference of polarized mode[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(4): 507-512.

[47] HILL K O. Photosensitivity in optical fiber waveguides: from discovery to commercialization[J]. *IEEE Journal of*

Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1186-1189.

[48] LI SH CH, HUA D X, SONG Y H, *et al*.. Research on micro-lens coupling system of all-fiber Raman lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 8-13.

[49] 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.
MAO J D, HUA D X, HU L L, *et al*.. Design of spectroscopic filter of all-fiber rotational raman lidar for temperature profiling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 7-13. (in Chinese)

[50] 李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 全光纤转动拉曼激光雷达的光纤光栅分光技术研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 110-115.
LI SH CH, HUA D X, SONG Y H, *et al*.. Research on spectroscopic technique of fiber Bragg grating for all-fiber rotational Raman lidar[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 110-115. (in Chinese)

[51] 李仕春, 王大龙, 李启蒙, 等. 绝对探测大气温度的纯转动拉曼激光雷达系统?[J]. 物理学报, 2016, 65(14): 143301.
LI SH C, WANG D L, LI Q M, *et al*.. Pure rotational Raman lidar for absolute detection of atmospheric temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(14): 143301. (in Chinese)

[52] 巩鑫, 华灯鑫, 李仕春, 等. 基于取样光纤布拉格光栅的全光纤拉曼测温分光系统设计及优化[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 073601.
GONG X, HUA D X, LI SH CH, *et al*.. Design and optimization of all-fiber rotational Raman spectroscope for temperature measurement based on sampled fiber Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(7): 073601. (in Chinese)

[53] MI Q SH, ZHU H N, GAO X R, *et al*.. An apodized optimization methods for phase shift sampled fiber Bragg grating[J]. *Optik*, 2015, 126(4): 432-435.

[54] MA CH J, REN L R, QU E SH, *et al*.. Modeling and testing of static pressure within an optical fiber cable spool using distributed fiber Bragg gratings[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 4949-4953.

[55] WEN K H, YAN L SH, PAN W, *et al*.. Design of multi-channel optical code-division multiple-access encoders and decoders based on sampled fiber Bragg gratings[J]. *Optik*, 2011, 122(24): 2249-2251.

[56] 陈兆东. 多通道时间相关单光子计数技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
CHEN ZH D. Study on multi-channel time-correlated single photon counting technique[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

[57] 李维勇. 单光子计数系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
LI W Y. Research on single-photon-counter system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)

[58] BROWN R G W, JONES R, RARITY J G, *et al*.. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements. 2: Active quenching[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(12): 2383-2389.

[59] 付毅宾. 激光雷达信号获取关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
FU Y B. Research on key technologies of lidar signal acquisition[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

[60] 付毅宾, 王煜, 张天舒, 等. 模拟与光子计数融合的激光雷达信号采集系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0814001.
FU Y B, WANG Y, ZHANG T SH, *et al*.. Signal acquisition system with simultaneous analog and photon counting measurement for lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0814001. (in Chinese)

[61] 寇松峰. APD 光子计数成像技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
KOU S F. Research on photon counting image technology based on APD[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2010. (in Chinese)

[62] 郭乐慧, 陈萍, 李立立, 等. 光电倍增管关键技术研究进展[J]. 真空电子技术, 2020(4): 1-13,27.
GUO L H, CHEN P, LI L L, *et al*.. Research progress on key technologies of photomultiplier tubes[J]. *Vacuum Electronics*, 2020(4): 1-13,27. (in Chinese)

[63] ORLOV D A, GLAZENBORG R, ORTEGA R, *et al*.. UV/visible high-sensitivity MCP-PMT single-photon GHz counting detector for long-range lidar instrumentations[J]. *CEAS Space Journal*, 2019, 11(4): 405-411.

[64] AGISHEV R, COMERÓN A, BACH J, *et al*.. Lidar with SiPM: some capabilities and limitations in real environment[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 86-90.

[65] 缪家鼎. 测量单个光子的真空雪崩光电二极管[J]. 光的世界, 1994, 12(3): 14,19.
MIAO J D. Vacuum avalanche photodiode for measuring single photon[J]. *World of Light*, 1994, 12(3): 14,19. (in Chinese)

[66] GOLA A, ACERBI F, CAPASSO M, *et al*.. NUV-sensitive silicon photomultiplier technologies developed at fondazione bruno kessler[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 308.

[67] 张云鹏. 激光雷达控制与数据采集系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
ZHANG Y P. Design and implementation of control and data acquired systems for lidar systems[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese)

[68] LI T, LEBLANC T, MCDERMID I S. Interannual variations of middle atmospheric temperature as measured by the JPL lidar at Mauna Loa Observatory, Hawaii (19.5°N, 155.6°W)[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14109.

[69] LIU F CH, WANG R, YI F, *et al*.. Pure rotational Raman lidar for full-day troposphere temperature measurement at Zhongshan Station (69.37°S, 76.37°E), Antarctica[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10059-10076.

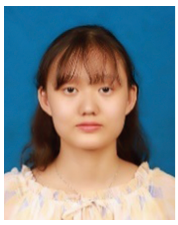
[70] TOTEMS J, CHAZETTE P, SHANG X X, *et al*.. Water vapor measurements by mobile Raman lidar over the Mediterranean Sea in the framework of HyMeX: application to multi-platform validation of moisture profiles[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2016, 119: 26006.

[71] VÉRÈMES H, PAYEN G, KECKHUT P, *et al*.. Validation of the water vapor profiles of the raman lidar at the maïdo observatory (Reunion Island) calibrated with global navigation satellite system integrated water vapor[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(11): 713.

[72] KLANNER L, HÖVELER K, KHORDAKOVA D, *et al*.. A powerful lidar system capable of 1 h measurements of water vapour in the troposphere and the lower stratosphere as well as the temperature in the upper stratosphere and mesosphere[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(1): 531-555.

作者简介：

刘　东(1982—), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 2005 年、2010 年在浙江大学分别获得学士、博士学位, 主要从事于环境激光雷达(大气、海洋及星载)、机器视觉与深度学习、光电干涉检测等研究。E-mail: Liudongopt@zju.edu.cn



姚清睿(2001—), 女, 安徽合肥人, 主要从事大气激光雷达领域研究。E-mail: 3190104988@zju. edu.cn