

底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展 (特邀)

狄慧鸽, 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 激光雷达是一种主动遥感探测仪器, 具有大探测范围、高时空分辨率与高精度的特点, 在大气环境参数 (气溶胶、CO₂ 及臭氧等) 及气象参数 (温度、水汽、压力及风速风向等) 探测方面获得了广泛的应用。随着近些年民众对雾霾类大气现象及气候变化的广泛关注, 国家环境治理与气象预报部门以及行业企业等对大气观测技术的迫切需求, 大气探测激光雷达在国内得到了快速的发展, 并且取得了较好的研究成果。文中总结介绍了近些年国内大气探测激光雷达的研究进展与发展现状。根据探测对象的不同, 激光雷达有米散射激光雷达、拉曼探测激光雷达、高光谱分辨探测激光雷达和差分吸收探测激光雷达等, 文章较全面地介绍了目前比较常见的激光雷达在大气探测应用中的优缺点及其在不同探测对象中的应用, 最后对激光雷达面临的技术瓶颈进行了总结与探讨, 并对激光雷达的发展趋势进行了展望。

关键词: 激光雷达; 大气; 气溶胶; 气象参数

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210032

Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (*Invited*)

Di Huige, Hua Dengxin

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

Abstract: Lidar is an active remote sensing instrument, which has the characteristics of high precision and high spatial-temporal resolution. It has been widely used in the detection of atmospheric environmental parameters (aerosol, CO₂, ozone, etc.) and meteorological parameters (temperature, water vapor, pressure, wind speed and direction, etc.). In recent years, atmospheric phenomena such as haze and climate change have been widely concerned by the public, and the national environmental governance and meteorological forecasting departments have an urgent demand for atmospheric observation technology. Atmospheric Lidar has been developed rapidly in China, and has achieved good research achievements. The research progress and development status of Lidar for atmospheric detection in recent years were introduced and summarized in this paper. According to the different detection objects detected by Lidars, Lidars can be classified as Mie scattering Lidar, Raman Lidar, high-spectral-resolution Lidar, differential absorption Lidar and et al. The advantages and disadvantages of all kinds of atmospheric detection Lidars and their applications in different detection objects were comprehensively introduced in this paper. Finally, the bottlenecks of Lidar technology were summarized, and the development trend of Lidar was also prospected.

Key words: Lidar; atmosphere; aerosol; meteorological parameters

收稿日期: 2021-01-16; 修订日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41627807, 61875163)

0 引言

大气层是人类赖以生存和发展的基本环境条件, 大气环境的变化对人类的生产生活都会产生重要的影响, 其状态的实时精细探测与监测对研究大气科学与全球气候变化, 开展精细天气预报、极端气象预警预报、航空器的飞行保障等具有重要的意义及应用需求^[1-5]。大气探测技术也从点测量、被动遥感发展到主动遥感探测技术^[6-7]。激光雷达作为一种主动遥感仪器, 由于其高时空分辨率的特性近些年受到很多研究人员的关注。大气探测激光雷达利用激光与大气的相互作用来主动遥感测量大气参数, 在大气科学研究、环境监测、气象预报等领域发挥着越来越重要的作用。

我国的大气探测激光雷达自 20 世纪 60 年代发展开始, 至今已经有 60 多年的历史。激光雷达的探测机制从单波长单一参量探测到现在的多波长多参量探测, 探测对象涵盖大气气溶胶、云、污染气体、温室气体等, 并且还可以实现大气温度、水汽、风速及大气压力等气象参量的探测, 载体平台也从地基雷达发展到车载、舰载、机载及星载, 范围从靠近地面的对流层一直到高层 120 km 之间的空间都可以被探测到。近些年, 随着光电探测技术的发展、国家环境治理及气象预报部门等行业的迫切需求, 我国激光雷达业发展迅猛, 多普勒测风激光雷达和单波长的气溶胶探测激光雷达已经实现了产品化, 其他类型的激光雷达也在迅速发展。文中较为全面地介绍了近些年我国大气探测激光雷达发展现状及概况, 重点介绍了底层(对流层)大气气溶胶及温湿度探测激光雷达的国内研究进展情况。

1 大气探测激光雷达原理

激光雷达系统主要包括激光发射系统、回波接收系统和信息处理系统三部分, 如图 1 所示。激光发射系统的核心是激励光源, 通常选择能够发射短脉冲的单色高能激光器, 进入大气的激光脉冲与大气中的分子和悬浮粒子相互作用, 产生吸收和散射等效应, 作为光学接收天线的望远镜系统接收大气的后向散射信号, 然后送入信息处理系统进行处理, 通常主要由光谱分光器、光电探测器和计算机组成。

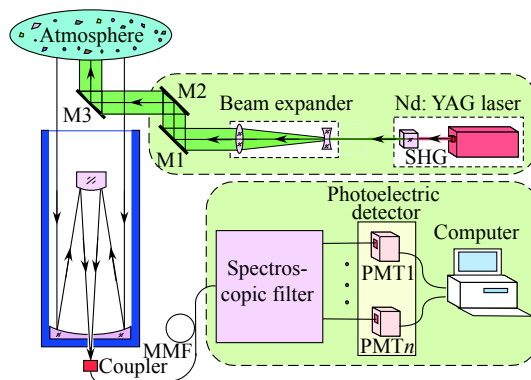


图 1 激光雷达系统结构图

Fig.1 Structure diagram of Lidar system

对于大气遥感的散射激光雷达, 地面接收器接收的不同距离 Z 至 $Z+\Delta Z$ 处的回波信号功率 $P(Z)$, 即激光雷达方程, 可表示为:

$$P(Z) = C \cdot P_0 \cdot \Delta Z \cdot \frac{A_T}{Z^2} \cdot O(Z) \beta(Z, \lambda) \cdot T_r^2(Z, \lambda) \quad (1)$$

式中: C 为与探测器效率以及系统光路透射率等有关的系统常数; P_0 为激光脉冲发射功率; A_T 为望远镜的接收面积; $\Delta Z=c \cdot \tau/2$ 为探测路径长度, τ 为探测积分时间; $O(Z)$ 为几何重叠因子, 其表示发射激光束与接收望远镜视场的重合程度, 在不完全重合时, 其值小于 1, 当达到完全重合时, 其值为 1; $\beta(Z, \lambda)$ 为大气中某种被探测组分的后向散射系数 ($\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$), 表示高度 Z 处大气对激光的后向散射能力, 可表示为某大气组分的分子数密度 $N_m(Z)$ (m^{-3}) 与其微分后向散射截面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$) 的乘积, 或大气分子数密度 $N(Z)$ (m^{-3}) 与其等效微分后向散射截面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$) 的乘积, 即

$$\beta(Z, \lambda) = N_m(Z) \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_m(\lambda) = N(Z) \cdot \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)(\lambda) \quad (2)$$

从大气组分角度来看, 大气后向散射系数 $\beta(Z, \lambda)$ 包括大气分子后向散射系数 $\beta_m(Z, \lambda)$ 和气溶胶粒子 $\beta_a(Z, \lambda)$ 两部分, 即 $\beta(Z, \lambda) = \beta_m(Z, \lambda) + \beta_a(Z, \lambda)$; $T_r(Z, \lambda)$ 分别是大气分子大气总透射率, 其表达式分别为:

$$T_r(Z, \lambda) = \exp \left[- \int_0^Z \alpha(Z, \lambda) dZ \right] \quad (3)$$

式中: $\alpha(Z, \lambda)$ 为大气总消光系数, 通常由大气分子和气溶胶消光系数两部分组成, 即 $\alpha(Z, \lambda) = \alpha_m(Z, \lambda) + \alpha_a(Z, \lambda)$; 而透射率 $T_r(Z, \lambda)$ 的平方表明在激光雷达和探测距离 Z 之间激光能量来回两次受到大气分子和气溶胶粒子的衰减。

2 气溶胶/云探测激光雷达

气溶胶是指悬浮在大气中直径为 0.1~100 μm 之间的液体或固体微粒体系,气溶胶对气候变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环及人类健康有着重要影响,气溶胶的垂直或水平分布对于研究雾霾生消机理具有重要的作用。探测气溶胶的激光雷达根据探测机理的不同有米散射激光雷达、偏振探测激光雷达、拉曼/高光谱探测激光雷达。

2.1 米-偏振探测激光雷达

气溶胶粒径分布范围较宽,但是大多集中在 0.1~2 μm 之间,这个粒径大小与目前常用激光波长相当,当激光与球形气溶胶相互作用时,将发生米散射效应。探测米散射信号和大气瑞利散射信号的激光雷达称为米散射激光雷达,米散射激光雷达由于其结构简单、探测效率高,在大气气溶胶的探测中应用最为广泛,也是最早实现商品化的激光雷达。米散射激光雷达采用的波长通常为 355 nm、532 nm 及 1064 nm,国内多家单位都研发了单波长或双波长的米散射激光雷达系统,近些年也有科学家发展出 1550 nm 的激光雷达用于对云层的探测^[8-9]。当大气中的气溶胶或云层中存在非球形粒子时,用偏振技术来区分球形粒子和非球形粒子。偏振激光雷达是在米散射雷达的基础上,在接收系统中加入检偏棱镜,除了可以得到后向散射信号外还可以得到退偏比信息。人们利用偏振激光雷达可以用来区分沙尘和城市气溶胶,还可以用来区分云层中的冰云和水云。

米-偏振探测激光雷达目前已经被广泛应用在局部污染源监测、颗粒物传输观测及垂直方向上混合层高度的观测等方面。图 2 为西安理工大学的米散射激光雷达观测到的雾霾颗粒物垂直分布日变化过程^[10]。近些年,为了揭示雾霾传输和消散规律,国内研究人员利用车载的米散射激光雷达或米-偏振激光雷达对冬季雾霾的城市群区域气溶胶的垂直分布变化进行走航观测,图 3 为中国环境监测总站利用偏振-米散射激光雷达在京津冀地区进行的激光雷达走航观测结果^[11]。人们还采用星载、机载激光雷达或激光雷达观测网对大范围的气溶胶传输情况进行探测与研究。

米散射激光雷达尽管结构简单,但是在反演气溶胶光学参数时需要大气状态进行假设,一是需要选

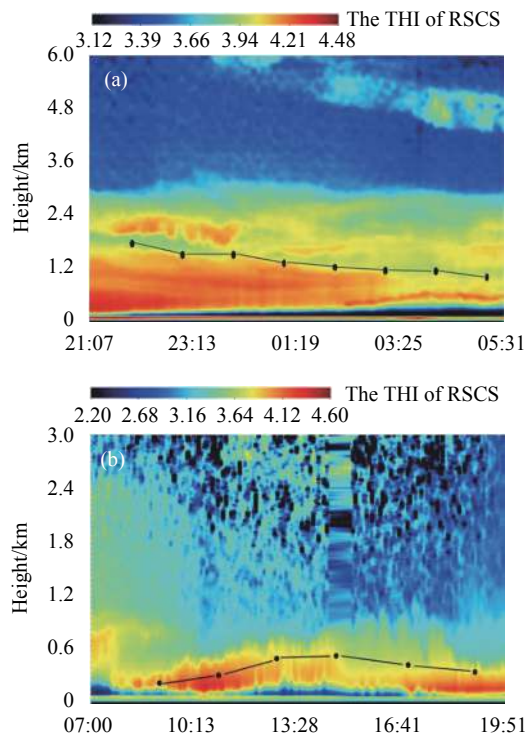


图 2 雾霾颗粒物垂直分布日变化

Fig.2 Diurnal variation of vertical distribution of haze particles

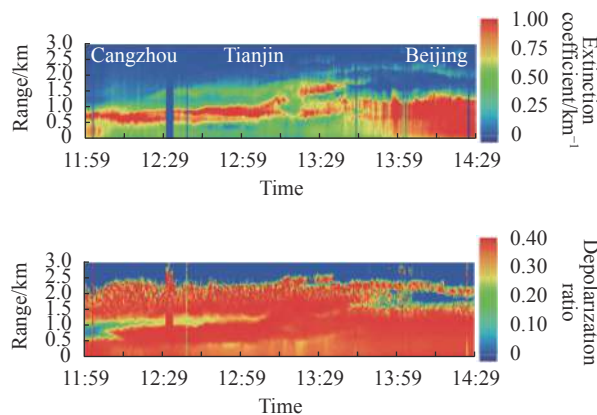


图 3 中国环境监测总站利用偏振-米散射激光雷达在京津冀地区进行的偏振-米散射激光雷达走航观测结果

Fig.3 Lidar navigation observation results of China Environmental Monitoring Station in Beijing, Tianjin and Hebei region using polarization meter- scattering Lidar

取边界点,二是需要假定雷达比,这就使得光学参数反演误差较大,由于参考点选取偏差和雷达比引入的光学参数反演误差可达到 30% 及以上。在米散射激光雷达中添加氮气的拉曼通道或瑞利高光谱分辨率通道,可以实现气溶胶消光系数的直接探测。拉曼探测激光雷达分光系统简单,容易实现,但是由于拉曼

散射截面较瑞利散射截面和米散射截面要小,因此拉曼激光雷达需要较大的激光器能量,近些年随着微弱光信号检测技术的进步,氮气探测的拉曼激光雷达也得到了广泛的应用,人们利用拉曼激光雷达获取高精度的光学消光系数和雷达比数据,探测高度可以达到 10 km 以上,消光系数的反演精度可以在 20% 以内。高光谱分辨激光雷达是通过使用单频率脉冲激光器、高光谱分辨率鉴频器来分离激光回波散射信号中的米散射和瑞利散射信号,进而对大气气溶胶进行高精度探测。相比于拉曼激光雷达,高光谱激光雷达系统更为复杂,需要稳频系统,但是可以获得较高的信噪比,浙江大学研发了高光谱气溶胶探测激光雷达,用于对大气进行连续观测。气溶胶探测高光谱激光雷达一般选用 532 nm,在此波段有现成的碘分子滤波器实现对米散射信号的高效抑制。我国首颗星载大气探测激光雷达中就采用了高光谱分辨探测模式,以实现气溶胶光学特性的高精度探测。

除了光学参数,人们也关注大气垂直方向上的微物理参数,单波长激光雷达可以探测得到大气气溶胶/云层的后向散射系数,多个波长的联合使用则可以获取多个不同波长的光学参数,并用于大气气溶胶微物理参量的反演。相较于单波长激光雷达的广泛应用,多波长激光雷达由于其结构复杂,国内仅有一些科研单位进行了研发及实验观测工作。西安理工大学、中科院安徽光机所、大气物理研究所、兰州大学、北方民族大学等单位研发了三波长(激光发射波长: 355 nm、532 nm 和 1064 nm)拉曼激光雷达实验系统,可以获取三个波长后向散射系数和两个波长的消光系数,利用这些参数实现了边界层上空气溶胶光学参数和微物理参数的反演^[12-14]。目前多波长激光雷达数据反演得到的微物理参数偏差基本上在 30%~50%^[15]。除了三波长激光雷达,双波长(激励波长: 355 nm 和 532 nm)激光雷达在大气探测中也得到广泛应用,利用双波长激光雷达计算得到的色比可以用于表征粒子尺度的大小变化特征^[16]。

2.2 其他探测体制的激光雷达

除了上述经典脉冲探测激光雷达,近年来以连续波光源作为发射端的光波雷达也受到广大研究人员的关注,主要有沙式激光雷达、CCD 探测激光雷达和 LED 激光雷达。沙式激光雷达与 CCD 探测雷达有很

多共同的地方,都是选用高功率连续波二极管激光器作为光源,采用图像传感器作为探测器,但是在系统的光路设计上两者之间有所区别。沙式雷达技术以沙式成像原理为基础,可以实现大气后向散射信号的距离分辨探测,距离分辨率随着高度的增加而迅速降低,目前沙式雷达国内主要是大连理工大学在研究,已经实现了大气气溶胶的连续观测^[17]。一般的 CCD 雷达也称侧向激光雷达,需要将激光器和 CCD 相机分两开一定距离放置,激光器发射出激光,利用大张角的 CCD 相机对激光光柱进行拍照,进而分析被探测区域的大气性质。图 4 展示了沙式激光雷达和 CCD 雷达的探测原理图。CCD 雷达的探测优点是可以实现无盲区探测,这对传统激光雷达来说是一个有益的补充。目前国内北京大学、安徽光学精密机械研究所及陆军炮兵防空兵学院等都利用 CCD 雷达对近地面的气溶胶进行了探测研究^[18-19]。连续波激光雷达接收到的光信号为大气的侧向散射光,在数据处理中需要利用地面观测的相函数去代替垂直方向各高度的相函数,这就相当于假定了气溶胶粒子谱的形状随高

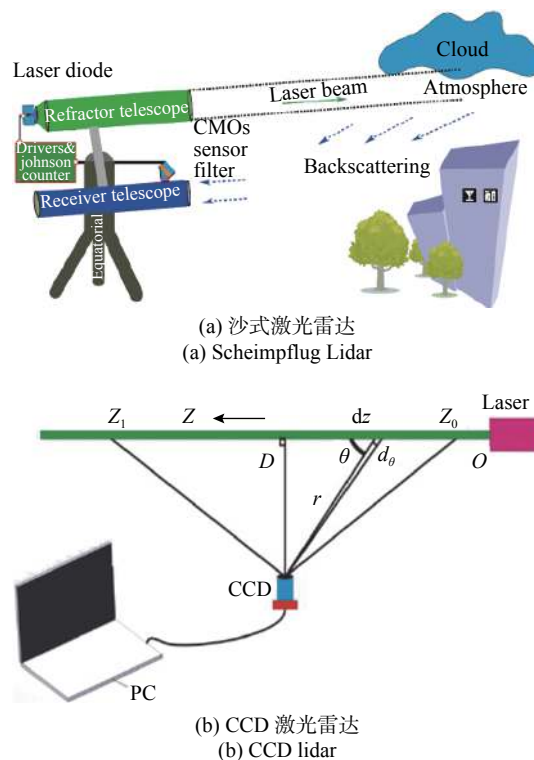


图 4 沙式激光雷达和 CCD 雷达探测原理图

Fig.4 Detection schematic diagram of Scheimpflug Lidar and CCD Lidar

度是不变的。这个假定使得反演出的光学参数也可能存在较大的偏差。

LED 雷达是选用 LED 作为探测光源进行大气探测的雷达系统^[20], LED 雷达的主要优点是波长丰富、可以克服激光雷达光源波长可选择性不足的问题,在进行气溶胶探测时选取多波长探测,容易实现气溶胶高分辨率的粒子谱分布探测。但是 LED 雷达的不足之处就是光源的发散角太大以及发射能量偏低,需要较为复杂的发射光源整形系统。目前国内的 LED 雷达研究还处于初级研发阶段。

3 气象参量 (温度、湿度、大气压力及风速风向) 探测激光雷达

大气温度、水汽 (湿度)、风场及大气压力是重要的大气气象参数,也是气象部门进行大气观测的基本参数。气象参数与大气中的气溶胶之间相互影响,对大气污染、气象现象、气候以及大气辐射、热力学、动力学的变化起着很重要的作用。开展大气水汽、温度的探测研究,对于提高天气预报的准确性,研究云的形成、降水、大气污染物的扩散机理有着重要的科学研究意义。目前对于大气气象参量探测的激光雷达技术主要有拉曼 (氮气、水汽) 激光雷达、高光谱分辨率激光雷达、差分吸收激光雷达和多普勒相干与非相干探测激光雷达。

拉曼散射是发生在入射光与各种分子之间的一种非弹性散射过程,利用激光与大气分子的拉曼散射作用可以实现底层大气温度、水汽及气溶胶的探测。随着激光技术和微弱光信号检测技术的发展,拉曼激光雷达探测大气参数的能力不断提高,在探测高度、时空分辨率和测量精度上都取得了飞速的发展,因此,拉曼激光雷达已成为大气温度、水汽和气溶胶精细探测的主要方法之一。由于拉曼散射光的强度与入射光波长的四次方成反比,拉曼激光雷达通常选择较短的激发波长,常用的激发波长为 355 nm 和 532 nm。图 5 展示了 355 nm 激光与大气相互作用时的拉曼散射波长。

目前,国内众多科研机构针对拉曼散射激光雷达也开展了大量的研究工作,西安理工大学、中国科学院大气物理研究所、安徽光学精密机械研究所、武汉大学、中国科学院 武汉 物理与数学研究所等单位在

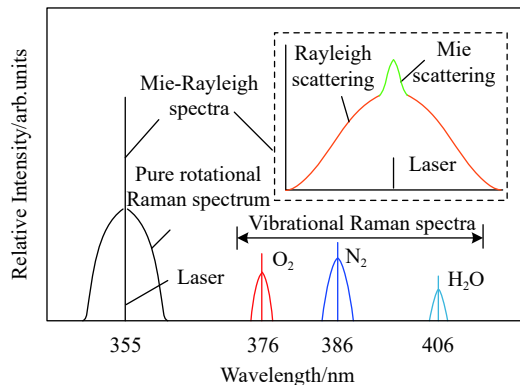


图 5 激励波长为 355 nm 时大气拉曼散射回波信号的光谱

Fig.5 Spectral distribution of atmospheric Raman scattering echo signal at 355 nm

大气温度和水汽探测方面取得了较好的研究成果,利用振动拉曼激光雷达探测技术可实现对流层内大气水汽的有效探测,利用转动拉曼激光雷达技术可获得高度 35 km 以下大气温度的高效探测^[11, 21-22]。目前,拉曼技术是获取对流层以下温度和水汽廓线的主要技术手段。为了获得对大气温度、气溶胶和相对湿度的实时同步探测研究并提高系统的探测性能,西安理工大学的振动-转动拉曼激光雷达系统是以高性能二向色镜和窄带干涉滤光片构成高效率拉曼分光系统,实现独立的 5 通道大气回波散射信号的高精细分光和高效率提取。图 6 为西安理工大学研制的拉曼激光雷达探测到的温度廓线、水汽廓线和相对湿度廓线,在 5 km 以下,温度的探测比对偏差 <1 K,统计误差 <0.5 K,相对湿度的比对偏差 <10%。

在温度探测方面除了利用拉曼信号测温之外,人们还利用高光谱激光雷达,通过利用高光谱分辨率滤波器,对大气分子瑞利散射的光谱宽度进行探测而实现温度测量。西安理工大学华灯鑫教授在日本期间成功研发了日本第一台高光谱分辨率测温激光雷达,并实现了对温度的全天时高精度探测。中国科技大学也有研究人员采用高光谱的方法来探测温度。但是由于高光谱测温激光雷达系统复杂,需要锁频技术、高光谱鉴频技术等,目前在国内测温方面研发与应用较少。

在水汽的探测方面,由于振动拉曼信号极其微弱,在全天时探测中受到限制,研究人员还尝试利用差分吸收的方法来探测水汽。不同于拉曼激光雷达,差分吸收激光雷达的回波信号是由米散射和瑞利散

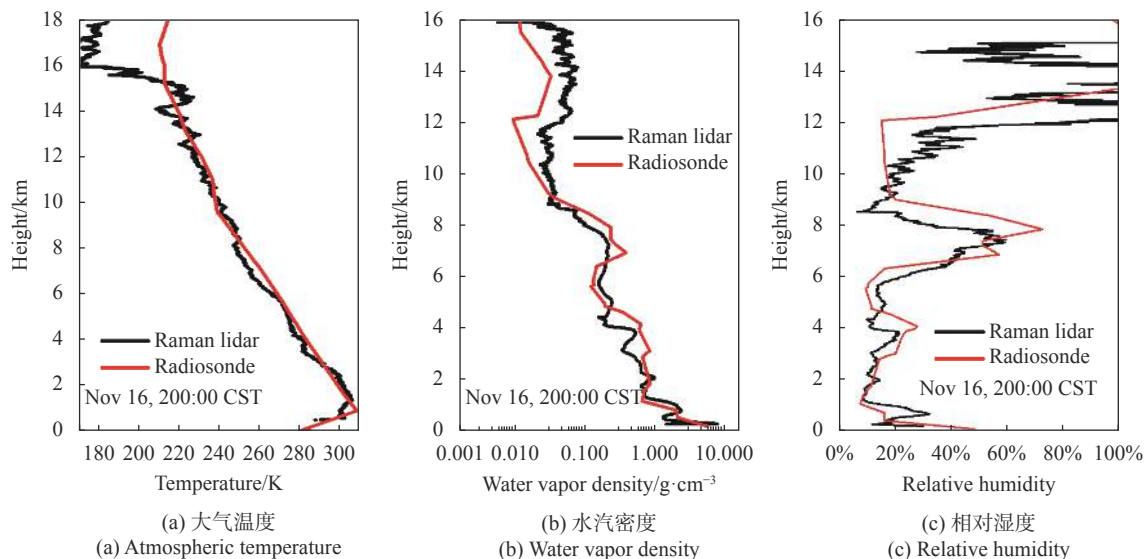


图 6 2013 年 11 月 16 日 20:00 CST 大气参量的反演廓线

Fig.6 Retrieval profiles of atmospheric parameters at 20:00 CST on November 16, 2013

射组成, 比拉曼散射信号强两三个数量级, 使得它在白天也可能达到较好的探测性能。中国科学院上海技术物理研究所、安徽光学精密机械研究所与中国科学院上海光学精密机械研究所以及北京理工大学对差分吸收激光雷达进行了研究, 对差分吸收激光雷达探测水汽廓线的可行性进行了实验研究, 中国科学院上海技术物理研究所研发了 935 nm 的差分吸收激光雷达, 实现了白天水汽廓线 2 km 范围的探测^[23]。

大气风场探测在国际上始于 1966 年, 自 21 世纪以来, 国内对测风激光雷达技术的研究也蓬勃发展起来。测风技术主要基于多普勒原理, 通过测量大气中的由风速引起的气溶胶颗粒或分子运动产生的后向散射信号的多普勒频移, 利用该频移与风速的关系反演得到径向风速数值, 通过扫描激光光束得到不同方向上径向速度, 矢量合成后可得到大气中的风速、风向。多普勒测风技术分为相干外差探测和非相干探测。相干外差探测是测量激光雷达回波信号与本振光信号通过相干鉴频得到两者之间的差频信号, 在气溶胶较多的对流层具有很好的探测效果; 非相干探测技术测量是利用光学滤波器鉴频获得接收回波信号和激光发射信号的相对能量变化, 通过接收不同望远镜指向的径向风速来反演风速风向, 可用于米散射与瑞利散射进行探测, 因而具有范围广, 并且算法相对简单的特点。我国中国科学院上海光学精密机械研究所、中国海洋大学、中国科学技术大学、北京理工

大学及安徽光学精密机械研究所等多家单位都研发了测风激光雷达, 目前已经市场上有商品化的产品, 在各种气象要素的探测中相干多普勒测风激光雷达技术发展较为成熟^[2, 24]。

除了温度、水汽及风场, 大气层的压力廓线也是大气科学领域重点关注的内容, 也是人们最早尝试获得的气象信息之一, 它们直接影响着天气预报以及气候模式的准确性, 同时压力的变化也会影响到激光遥感探测的精度与灵敏度。在激光雷达的压力探测方面, 主要的方法有瑞利信号探测法^[25]、差分吸收探测法^[26-27]及高光谱探测方法^[28], 近些年国内外学者对其进行了一定的研究。瑞利信号探测压力的方法主要是针对 30 km 以上的干洁大气, 在平流层以下区域, 特别是对流层区域, 由于受到强烈粒子散射的影响, 瑞利激光雷达不能探测大气分子密度, 也无法得到大气的压力数据^[29]。目前对于底层大气压力探测的主要方法有差分吸收法和拉曼探测法。中国科学院上海技术物理研究所王建宇院士团队研发了波长为 765 nm 的差分吸收激光雷达探测底层大气压力; 西安理工大学与上中国科学院上海技术物理研究所合作探讨了利用温度廓线获取大气压力的方法研究, 取得了较好的实验结果^[30], 实现了地表到 30 km 范围空间的大气压力探测与反演, 在 12 km 以下比对误差小于 6 hPa^[31]。

随着空间科学和计算机科学的发展, 人们也更多的关注高层大气的气象参数, 相对于低空大气, 高

层大气的探测难度较高,对激光雷达系统有更多的要求。目前我国进行高层大气探测的研究单位主要有中国科学院武汉物理与数学研究所、中国科学院国家空间科学中心、武汉大学等单位。相对于底层大气探测,高层大气探测激光雷达需要激光器的能量更高、望远镜的接收口径更大。高层大气温度的探测主要为瑞利散射激光雷达、原子共振荧光测温激光雷达和铁波尔兹曼测温激光雷达,探测的范围 30~110 km。激光雷达测量高层大气矢量风场时采用瑞利散射信号的多普勒频移和金属层的原子共振荧光散射来进行风场测量,不同于底层的扫描式测量,通常采用固定方式同时测量大气风向的径向分量与纬向分量来合成矢量风。其中中国科学院大气物理研究所吕达仁院士牵头的基金委国家重大科研仪器设备研制专项“多波段多大气成分主被动综合探测系统(APSOS)”,联合国内 7 家科研院所研发的国际首套全(中性)大气层(从近地面至 110 km)多大气成分、多要素的大型地基探测系统,整体技术性能指标国际领先^[32]。

4 大气温室及污染气体探测激光雷达

CO₂ 是大气中重要的温室气体,其浓度的长期变化将引起一系列气候效应和环境效应,大气中还有 NO₂、SO₂、O₃、CH₄ 等痕量污染气体,这些气体的垂直分布及总浓度分布对大气环境产生重要影响。人们采用气体的特征吸收峰来对大气中的气体进行探测,在 2~12 μm 的红外波段都有非常典型的吸收谱带。目前主要采用差分吸收激光雷达对这些气体进行监测。差分吸收激光雷达是一种可以自定标的测量仪器,除了检测回波信号之外,反演所需要的双波长或多波长激光对 CO₂ 的吸收截面参数可以直接测量出来,不需要其他传感器对其进行标定。对于 CO₂ 的探测,国内主要是中国科学院上海光学精密机械研究所、武汉大学、中国海洋大学等开展了积分路径的差分吸收激光雷达探测 CO₂ 柱浓度的研究^[33-35]。其他污染物的探测,国内安徽光学精密机械研究所研究起步早,已经研发了 SO₂/NO_x 及 O₃ 等痕量气体探测差分吸收激光雷达。由中国科学院上海光学精密机械研究所陈卫标研究员团队主研的我国首颗星载大气环境探测激光雷达 ACDL 将于 2021 年择期发射,

该卫星搭载路径积分差分吸收激光雷达开展全球 CO₂ 柱线浓度测量。

5 激光雷达发展趋势与瓶颈

经过近几十年的发展,激光雷达技术在环境监测、气候研究、气象观测及军事领域等方面得到了广泛的应用。但是大气探测激光雷达在行业中的业务化程度还很低,在行业应用中还没有发挥出其独特优势。激光雷达需要在系统的稳定性、可靠性、全天候工作、数据质量及标定技术、探测距离等方面进一步提升。目前大多数的激光雷达应用尚属于试探性、研究性或演示性应用,距离纳入气象、环境监测和管理业务的规范使用还需要从技术层面来解决。

5.1 激光雷达的数据标定、校正及规范化研究

目前的激光雷达数据反演算法多样,不同的激光雷达系统选取反演方法也不尽相同,这就导致不同激光雷达最终给出的结果有较大的偏差。特别在气溶胶探测的激光雷达中没有标准参数进行比对与校正,因此数据标定、校正与规范是激光雷达在行业推广应用需要首先解决的问题。国家气象局相关人员在气溶胶激光雷达数据标定方面进行了一些努力,选用经过标定的高精度的高光谱激光雷达探测数据作为标准,对其他激光雷达进行校正,这也是一个办法。

激光雷达的数据反演方法也需要在现有的基础上进行改进。特别在目前应用程度最高的米散射激光雷达中,数据反演时都需要假定气溶胶的雷达比(消光/后向散射系数)为一个常数,雷达比与气溶胶粒子谱直接相关,气溶胶粒子谱随高度变化较大,因此假定雷达比为常数的做法会导致光学参数反演出现较大的误差。有科学家提出可以采取雷达比与粒子谱相迭代的方法来反演米散射光学参数,进而解决雷达比选取的问题。

5.2 激光雷达盲区

激光雷达通常为双轴系统或共轴不同心系统,这样的结构使得激光雷达有较大的探测盲区(0.1~1 km),当垂直观测时低层数据缺失,而地面到空间高度 1 km 之间的范围是人类生存的主要空间,也是环保部门主要关注的对象。激光雷达盲区的存在在很大程度上减小了其应用范围,不能满足应用部门的需求。盲区问题需要从两方面来解决,一是从硬件设计角度减小

盲区,比如增大视场角、采用共轴同心的设计;增大视场角会带来较为严重的杂散光问题,而共轴同心的雷达结构设计一般情况下适用于光纤输出的激光,应用受限。二是从后期的算法和仪器常数标定角度来求出系统的重叠因子,进而对盲区进行校正。后期校正算法会对底层数据带来一定的偏差,并且在不能对重叠因子为 0 的区域进行校正。因此,激光雷达的盲区问题需要从硬件和软件两方面共同努力才能够尽量减小系统盲区。

5.3 雾霾等恶劣天气下的探测

由于激光雷达选用激光为可见近红外波段,对大气的穿透能力比较差,当遇到雾、霾等低能见度天气时探测距离迅速降低,有时不能穿透雾霾层,大大影响到了激光雷达的推广应用。同时在雾霾天出现时,米散射激光雷达的数据反演也面临很大的挑战,无法找到有效的参考点进行光学参数的反演。选取对雾霾穿透性较强的波长作为激光发射光源是提高雾霾等恶劣天气下激光雷达探测距离的唯一手段。

5.4 全天时探测

全天时的大气参量探测依然是激光雷达行业的难点和关键点,由于太阳背景光的影响,导致在白天探测时激光雷达测量信号的信噪比急剧下降,目前大部分激光雷达只能在夜间工作,研发能适用于白天探测的激光雷达系统是目前大气探测的关键。要实现白天探测,关键技术在于激光波长和滤波器器件的选择。选取紫外日盲波段或近红外波段的激光可以很大程度上避开太阳光的影响。同时,选取超窄带滤波器,比如带宽在 pm 量级的原子滤波器,可以很大程度上抑制太阳背景光的影响。

5.5 激光雷达的小型化

为了提高激光雷达的探测性能,通常需要选择高功率的激光能量和大口径望远镜,这就导致大气探测激光雷达存在体积大、移动不便的问题,这不利于激光雷达在各种复杂平台的部署。利用光子的极限探测技术(单光子探测技术)对激光回波进行探测,可以在不减少探测性能的基础上减小激光雷达系统的体积,将是激光雷达重要的发展趋势之一。中科院上海技物所及中国科学技术大学等单位都对激光雷达的单光子探测技术进行了研究,相信在未来其在大气探测的激光雷达中也将会发挥重要作用。另外发展具

有全球尺度内的高时空分辨率及高精度探测星载激光雷达技术,并将其与现有星载主被动遥感技术结合,在研究全球气候变化、灾害天气的精准预警预报以及国防安全等领域具有重要的研究意义与应用前景。

激光雷达是主动遥感技术从无线电波遥感向光波遥感的科技进步,为认识大气物理及气象参数、污染物的区域分布、空间分布和传输过程提供了新技术手段,但它不是万能的,是对现有遥感手段的补充,激光雷达的发展需要广大科研工作者进一步的创新与努力。

参考文献:

- [1] Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, et al. Effective lidar ratio of cirrus cloud measured by three-wavelength lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0810003. (in Chinese)
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测卷云有效激光雷达比[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0810003.
- [2] Chu Yufei, Liu Dong, Wang Zhenzhu, et al. Basic principle and technical progress of Doppler wind Lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(5): 580-600. (in Chinese)
储玉飞, 刘东, 王珍珠, 等. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展[J]. *量子电子学报*, 2020, 37(5): 580-600.
- [3] Yu Siqi, Liu Dong, Xu Jiwei, et al. Aerosol Multi-layer vertical distribution detected by lidar [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(6): 30-34. (in Chinese)
于思琪, 刘东, 徐继伟, 等. 大气气溶胶多层结构的激光雷达探测[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(6): 30-34.
- [4] Yang Yong, Cheng Xuewu, Yang Guotao, et al. Research progress of Lidar for upper atmosphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(5): 566-579. (in Chinese)
杨勇, 程学武, 杨国韬, 等. 高层大气探测激光雷达研究进展[J]. *量子电子学报*, 2020, 37(5): 566-579.
- [5] Hara Yukari, Nishizawa Tomoaki, Sugimoto Nobuo, et al. Retrieval of aerosol components using multi-wavelength Mie-Raman lidar and comparison with ground aerosol sampling [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 937.
- [6] Shen Fanhui, Wang Tijian, Zhuang Bingliang, et al. The first indirect radiative forcing of dust aerosol and its effect on regional climate in China [J]. *China Environmental Science*, 2011(7): 1057-1063. (in Chinese)
沈凡卉, 王体健, 庄炳亮, 等. 中国沙尘气溶胶的间接辐射强迫与气候效应[J]. *中国环境科学*, 2011(7): 1057-1063.
- [7] Kaskaoutis D G, Sinha P R, Vinoj V, et al. Aerosol properties

- and radiative forcing over Kanpur during severe aerosol loading conditions [J]. *Atm Env*, 2013, 79: 7-19.
- [8] Zhang Feifei, Xia Haiyun, Sun Dongsong. Speed detection of hard targets based on 1.55 μm coherent Lidar systems [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 602-606. (in Chinese)
张飞飞, 夏海云, 孙东松. 1.55 μm 相干激光雷达系统的硬目标速度探测[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 602-606.
- [9] Shangguan Mingjia, Xia Haiyun, Dou Xiankang, et al. Comprehensive wind correction for a Rayleigh Doppler Lidar from atmospheric temperature and pressure influences and Mie contamination [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(9): 1.
- [10] Yan Qing, Hua Dengxin, Wang Yufeng, et al. Observations of the boundary layer structure and aerosol properties over Xi'an using an eye-safe Mie scattering Lidar [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 122: 97-105.
- [11] Chai Wenxuan, Tang Guigang, Wang Shuai, et al. Analysis of an air pollution of dust process using mobile lidar over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Environmental Monitoring of China*, 2019, 35(3): 138-145. (in Chinese)
柴文轩, 唐桂刚, 王帅, 等. 京津冀地区一次浮尘过程的车载激光雷达走航观测[J]. *中国环境监测*, 2019, 35(3): 138-145.
- [12] Müller D, Wandinger U, Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: Theory [J]. *Appl Opt*, 1999, 38: 2346-2357.
- [13] Tao Zongming, Liu Dong, Wei Heli, et al. The estimation of cirrus cloud particulate shape using combined simulation and a three-wavelength lidar measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013(7): 1739-1743. (in Chinese)
陶宗明, 刘东, 魏合理, 等. 三波长激光雷达拟合卷云的粒子形状[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013(7): 1739-1743.
- [14] Zhao Hu, Hua Dengxin, Di Huige, et al. Development of all time multi-wavelength lidar system and analysis of its signal to noise ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0113001. (in Chinese)
赵虎, 华灯鑫, 狄慧鸽, 等. 全天时多波长激光雷达系统研制与信噪比分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113001.
- [15] Di Huige, Wang Qiyu, Hua Hangbo, et al. Aerosol microphysical particle parameter inversion and error analysis based on remote sensing data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 1753.
- [16] Pan Yubing, Lv Daren, Pan Weilin, et al. A case study of cirrus cloud over geermu city using two-wavelength polarization lidar [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2015, 20(5): 581-588. (in Chinese)
潘昱冰, 吕达仁, 潘蔚琳, 等. 地基双波长偏振激光雷达对格爾木地区卷云观测的个例研究[J]. *气候与环境研究*, 2015, 20(5): 581-588.
- [17] Mei Liang. Atmospheric Scheimpflug lidar technique and its progress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090004. (in Chinese)
梅亮. 沙氏大气激光雷达技术及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090004.
- [18] Bian Yuxuan, Zhao Chunsheng, Xu Wanyun, et al. A novel method to retrieve the nocturnal boundary layer structure based on CCD laser aerosol detection system measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211: 38-47.
- [19] Tao Z M, Wang Z Z, Yang S J, et al. Profiling the PM_{2.5} mass concentration vertical distribution in the boundary layer [J]. *Atmos Meas Techn*, 2016, 9(3): 1369-1376.
- [20] Zhong Wenting, Hua Dengxin, Liu Jun, et al. Optimal design and preliminary experiments on new type of led light source radar system for aerosol detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1028001. (in Chinese)
钟文婷, 华灯鑫, 刘君, 等. 新型LED光源气溶胶探测雷达系统优化设计与初步实验[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1028001.
- [21] Wang Hongwei, Hua Dengxin, Wang Yufeng, et al. Design and analysis of new spectroscopic system of Raman lidar for detection of atmospheric water vapor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 120701. (in Chinese)
王红伟, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 水汽探测拉曼激光雷达的新型光谱分光系统设计与分析[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 120701.
- [22] Liu Boming, Ma Yingying, Gong Wei. Application of multi-functional atmospheric detection lidar [J]. *Aerospace Shanghai*, 2020, 37(5): 135-144. (in Chinese)
刘博铭, 马盈盈, 龚威. 多功能大气探测激光雷达应用[J]. *上海航天(中英文)*, 2020, 37(5): 135-144.
- [23] Hong Guanglie, Li Jiatang, Wang Jianyu, et al. Advance of ground based differential absorption Lidar at 0.94 μm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1203009. (in Chinese)
洪光烈, 李嘉唐, 王建宇, 等. 0.94 μm 差分吸收激光雷达地基工作的进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 1203009.
- [24] Liu Feifei, Bi Decang, Liu Heng, et al. Principle prototype and experimental progress of wind lidar in near space [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810003. (in Chinese)
刘菲菲, 毕德仓, 刘恒, 等. 临近空间激光测风雷达原理样机和实验进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0810003.
- [25] Zheng Wengang, Li Honjun, Yang Guotao, et al. Lidar detection

- of the atmospheric density and temperature over Wuhan [J]. *Atmospheric Sciences*, 1999(4): 397-402. (in Chinese)
- 郑文钢, 李洪钧, 杨国韬, 等. 武汉上空大气密度温度的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 1999(4): 397-402.
- [26] Korb C L, Weng C Y. Differential absorption Lidar technique for measurement [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3759-3770.
- [27] Riris H, Rodriguez M, Allan G R, et al. Pulsed airborne Lidar measurements of atmospheric optical depth using the Oxygen A-band at 765 nm [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(25): 6369-6382.
- [28] Shimizu H, Lee S A, She C Y. High spectral resolution Lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(9): 1373-1381.
- [29] Bo Guangyu, Liu Bo, Zhong Zhiqing, et al. Rayleigh-Raman-Mie lidar for atmospheric temperature and aerosol profiles measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 19-25. (in Chinese)
- 伯广宇, 刘博, 钟志庆, 等. 探测大气温度和气溶胶的瑞利-拉曼-米氏散射激光雷达[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 19-25.
- [30] Di Huige, Wang Jianyu, Zhao Xuan, et al. Method for detecting atmospheric pressure profile using rotational and vibrational Raman lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1501001. (in Chinese)
- 狄慧鸽, 王建宇, 赵焯, 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.
- [31] Hong Guanglie, Wang Qin, Xiao Chunlei, et al. A laser transmitter of differential absorption Lidar for atmospheric pressure measurement [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(4): 451-458. (in Chinese)
- 洪光烈, 王钦, 肖春雷, 等. 探测大气压力的差分吸收激光雷达的一种光发射机[J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(4): 451-458.
- [32] Lv Daren, Pan Weilin, Wang Yinan. Atmospheric profiling synthetic observation system in Tibet [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35: 264-267.
- [33] Liu Hao, Shu Rong, Hong Gaunglie, et al. Measurement of atmospheric CO₂ by continuous wave differential absorption Lidar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104214. (in Chinese)
- 刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 等. 连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO₂[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104214.
- [34] Han Ke, Gong Wei, Ma Xin, et al. A ground-based differential absorption Lidar for atmospheric vertical CO₂ profiling [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 244206. (in Chinese)
- 韩軻, 龚威, 马昕, 等. 地基 CO₂ 廓线探测差分吸收激光雷达[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 244206.
- [35] Ma Ling, Liu Zhishen. Effect of surface reflectance on retrieval of spaceborne differential absorption carbon dioxide [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2018, 35(1): 74-78. (in Chinese)
- 马玲, 刘智深. 地表反射率对星载差分吸收二氧化碳反演的影响[J]. *量子电子学报*, 2018, 35(1): 74-78.



第一作者简介: 狄慧鸽 (1981-), 女, 教授, 博士生导师。主要从事对流层大气参数激光遥感技术与应用研究。研发了多波长拉曼激光雷达、偏振激光雷达及温湿探测激光雷达。主持国家及省部级项目 8 项, 发表 SCI 及 EI 收录论文 30 余篇, 获得国家发明专利 10 项。获陕西省科学技术奖 1 项, 中国光学工程学会奖 2 项。获得陕西省青年科技新星, 陕西省“高层次人才特殊支持计划—青年拔尖人才”及陕西省普通高校首批“青年杰出人才”等称号。Email: dihuige@xaut.edu.cn