

先进激光雷达探测技术研究进展

华灯鑫¹, 宋小全²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

(2. 中国海洋大学 海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100)

摘要: 激光雷达作为近年快速发展的新型光波主动式遥感技术, 由于具有高精度及高时空分辨率的遥测特性, 已经在大气及海洋环境探测等领域得到广泛的应用。主要介绍了激光雷达探测技术的基本原理, 重点分析大气环境监测激光雷达, 气象观测激光雷达及空间激光雷达的测量原理、关键技术及其应用前景, 介绍国内外相关激光雷达的系统特色及其最新进展。

关键词: 激光雷达; 大气环境, 气象参数, 遥感探测

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)增(激光探测)-0021-07

Advances in lidar remote sensing techniques

HUA Deng-xin¹, SONG Xiao-quan²

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

2. Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Lidar or laser radar, a modern active remote sensing technique of atmosphere, has been fast developed and widely applied in survey of the atmospheric and the marine environment because of its high accuracy and high time-space resolution of measurement. This paper firstly describes the basic measurement principle of the lidar and then discusses/analyzes the key technologies/methods, and application prospect of the several kind of existing lidar particularly, such as atmospheric environment monitor lidar, the meteorological observation lidar and space borne lidar. Finally, the newest lidar technology and its advances in the domestic and foreign are summarized.

Key words: Lidar; Atmospheric environment; Meteorological parameters; Remote sensing

0 引言

激光雷达^[1]作为一种主动遥感探测技术和工具已有近 50 年的历史, 目前广泛用于地球科学和气象学、物理学和天文学、生物学与生态保持、军事等领域。其中, 传统意义上的激光雷达主要用于陆地植被监测、激光大气传输、精细气象探测、全球气候预测、海洋环境监测等。随着激光器技术、精细分光技术、光电检测技术和计算机控制技术的飞速发展, 激光雷

达在遥感探测的高度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量精度等方面具有独到的优势。尤其在大气探测方面取得显著发展, 对各种参数的测量空间覆盖高度已经可以实现从地面到 120 km 的高度^[2], 其应用前景得到普遍的关注。相对于微波、电磁波雷达, 激光雷达采用的光波波长较短, 与大气中存在的分子和气溶胶及浮尘的相互作用所产生的散射效果复杂、散射形式多样, 适用于陆地、大气及海洋环境监测, 大气光学及物理特性、气象/气候参数的高时空分辨率

收稿日期: 2008-09-13

作者简介: 华灯鑫 (1964-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达大气遥测技术、光电检测技术研究。Email: xauthdx@163.com

的精细探测。激光雷达可以实现地基、车载、机载及星载探测,也是现代雷达探测技术从厘米波、毫米波向光波探测技术的延伸,实现了遥感探测技术向高时空分辨率、高精度领域的发展。

1 激光雷达探测技术

1.1 激光雷达探测原理

光波的物理量可由强度、波长(频率)、相位、偏振态及指向性等来表示。光与物质相互作用主要表现为吸收及散射现象,按作用机理可以分为气溶胶等颗粒物引起的米氏散射,大气分子及原子等引起的瑞利散射、拉曼散射、荧光及共振散射和吸收等现象。通过对各种散射机理及效果进行分析,可以探测物质的物理及化学信息。

大气探测激光雷达工作原理与微波雷达相似,其基本系统构成如图 1 所示。一般采用脉冲激光器作为发射源,向大气中发射一束具有高指向性、高能量的窄脉冲宽度的激光束,通过望远镜收集大气中物质产生的后向散射光,并对散射光进行光谱分析,剔除杂散光信号,经光电转换后获得电信号,由计算机进行数据采集、信号分析及数据反演即可得到所需大气参数或信息^[1]。

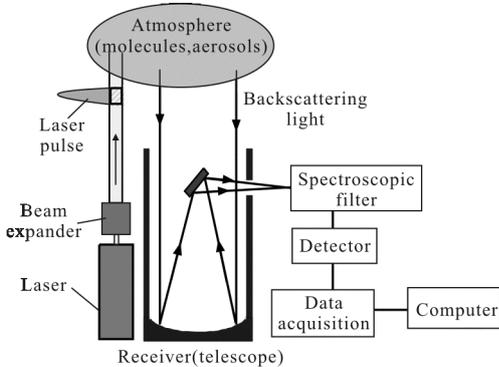


图 1 激光雷达系统基本构成

Fig.1 Schematic of the lidar system

1.2 激光波长及对眼安全特性

随着近年激光技术的快速发展,高效大功率脉冲激光器已经实现商品化生产,并广泛应用于激光雷达及各种光加工领域。因此,激光的安全性问题得到越来越多的关注。激光安全性一般用肉眼及皮肤对激光能量密度的最大允许曝光量(Maximum Permissible Exposure, MPE)来定义,而 MPE 值取决于激光波长,选用合适的激光波长对激光雷达的设计可以取得

事半功倍的效果。国际上较为常用的 MPE 值与激光波长的关系包括日本工业标准(JISC6802-1991)、美国国家标准研究院 ANSI 的 Z136 系列激光标准(ANSI Z136)、国际电工协会 IEC 60825 系列标准等。图 2 为根据日本工业标准得到 MPE 值与激光波长的关系。可以看出,在相同激光能量密度下,紫外及中红外波长的安全性能是可见波长的几千倍,因此这类波长常被称作对眼睛安全激光波长。

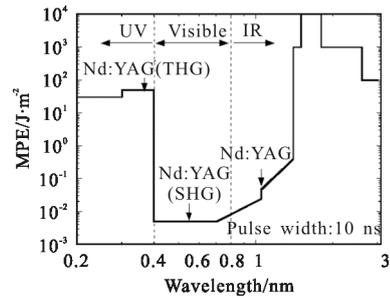


图 2 眼睛的最大允许曝光量与激光波长关系

Fig.2 Value of the MPE vs. laser wavelength

2 大气气溶胶的探测

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径约为 100 μm 以下的液体或固体微粒体系,地面扬尘、沙尘暴、林火烟灰、花粉、空气中的气态污染物等,都是对流层气溶胶的自然源。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。

2.1 米散射激光雷达

气溶胶探测的激光雷达主要是以单波长或多波长(如 Nd:YAG 激光器 1 064、532、355 nm)米散射激光雷达为主,技术比较成熟。欧美及日本等国已实现商品化,国内的中科院大气所、安徽光机所、上海光机所、中国海洋大学及西安理工大学等单位也先后开展该项技术的研发。

单波长米散射激光雷达可以用探测大气气溶胶的光学特性,主要有散射系数,消光系数,雷达比。而多波长激光雷达除了可以得到上述参数以外,还常用于反演气溶胶的粒谱分布及不同波长的气溶胶消光系数,为研究激光在大气中的传输特性,大气湍流等提供科学依据。图 3 为利用西安理工大学研发的小型米散射激光雷达,观察到西安上空气溶胶及卷云的 THI (Time-Height-Indications) 时空分布。该系统采用半导体泵浦的微脉冲激光器的 532 nm 波长,具有

对眼安全特性及三维扫描功能,可用于城市气溶胶及大气质量监测、大气能见度及边界层高度观测等。

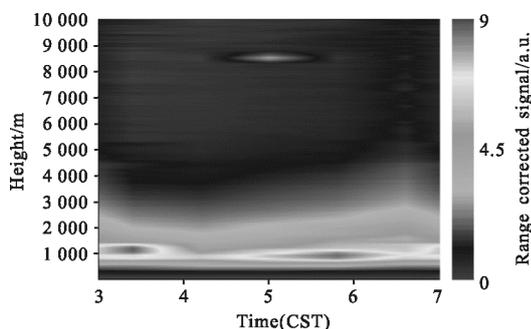


图3 西安上空气溶胶时空变化

Fig.3 Time-space distribution of aerosol over Xi'an

2.2 高光谱分辨率激光雷达

米散射激光雷达在反演气溶胶参数如消光系数时,必须对当时的大气状态等做一些假设,因而限制了其探测及数据反演精度,不利于大气的精准探测。高光谱分辨率激光雷达(HSRL)是在米散射激光雷达的基础上发展而来的一种高精度气溶胶探测技术,也是目前公认的与气溶胶拉曼探测激光雷达并列的两种可不需假定、直接探测气溶胶消光参数的技术之一。

HSRL的探测原理是利用大气分子引起的瑞利散射光谱宽度依存大气温度,其谱线宽度一般为GHz级,而气溶胶散射谱宽约等于激励激光谱宽,一般为100MHz级,通过使用单频率脉冲激光器,高光谱分辨率分光器,如干涉仪、原子吸收滤光器或分子吸收滤光器,从大气散射中分离米散射和瑞利散射光谱。在数据反演中借助于同时获得的瑞利散射信号,可以不需要假设大气粒子消光/散射参数,直接导出消光系数,从而实现高精度的气溶胶探测,提高了参量反演的准确性。

HSRL技术是目前气溶胶的光学及物理特性参数精细激光探测的热门研究课题。美国的NASA,欧空局(ESA),日本的国立环境研究所以及国内外很多高校也在开展该技术的研究。图4、图5为美国Wisconsin大学的HSRL系统构成及探测结果,其激光为波长532nm,使用碘分子吸收滤光器分光^[3]。西安理工大学的研究小组成员,正在采用Fabry-Perot(FP)标准具分光,开展355nm波段上的HSRL的技术研发。

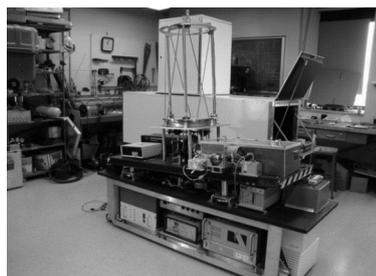


图4 美国 Wisconsin 大学高光谱分辨率激光雷达系统

Fig.4 High spectral resolution lidar of Wisconsin University

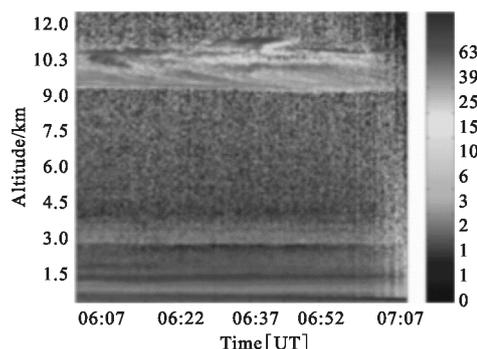


图5 卷云观测结果

Fig.5 Observation of Cirrus clouds by HSRL

近年来,气溶胶米散射激光雷达的发展也具备了更多的功能,如通过增加偏振检测器^[4]、多视场角光阑^[5]、多波长发射^[4-7]等手段,获取气溶胶、沙尘暴、云等的粒径等微物理信息,从而进一步应用于大气辐射、云物理及辐射、气候影响等。欧美等国为了应对日益增加的反恐需要,也加快了可探测生物气溶胶荧光的激光雷达,通过检测附着在气溶胶生物物质被激光激发出的荧光实现气溶胶生物成分的鉴别,从而对生物武器的袭击实现预警^[8-9]。此外,气溶胶激光雷达的载体平台也从最初的地基,发展为车载移动、机载飞行、星载全球观测等多种形式。

3 大气温湿度探测

激光雷达探测大气温湿度分布的主要方法有瑞利散射法密度法^[10],高光谱分辨率瑞利散射法^[11-12],转动拉曼散射法^[13]和差分吸收法^[14]等。瑞利散射法密度法主要利用激光雷达探测大气分子密度变化,利用大气方程反演温度,所以主要用于气溶胶影响较小的对流层顶部及平流层的大气温度探测。而底层对流层范围内的大气温度探测,由于受温度的遥感灵敏度较低及易受地表产生的高密度气溶胶和白天太阳背景

光的影响, 底层大气高精度测温技术的研究一直是国际上激光雷达研究的前沿课题。目前对流层内的大气温度探测主要是高光谱分辨率瑞利散射法和转动拉曼散射法。

激光雷达探测水汽的主要方法有振动拉曼散射激光雷达, 即利用水汽分子和氮气分子所产生的振动拉曼散射谱线的强度进行水汽密度探测。差分吸收激光雷达, 即通过发射 2 个激光波长, 其中一个波长与水汽分子的某一吸收谱线重叠, 利用 2 个波长的回波信号的强度差进行水汽密度探测。相对湿度需要利用温度, 所以温湿度是一对相关性很强的大气参数。

3.1 高光谱分辨率瑞利-拉曼散射激光雷达

高光谱分辨率瑞利散射激光雷达是一种利用大气中的原子和分子的瑞利散射机制而工作的激光雷达, 通过高光谱分辨率滤光器, 对大气分子瑞利散射的光谱宽度进行分析而实现温度测量。由于瑞利谱宽较窄, 在常温及 355 nm 激光波长激励下, 其宽度一般为 3 GHz, 要在如此窄带光谱内, 除去中心谱重叠的米散射信号, 用于分光的滤光器需要具有 MHz 的光谱分辨率。目前利用该技术探测大气温度的主要单位有美国 Colorado 大学^[11]及日本 EKO 公司^[12]。采用的高光谱分辨率分光器主要有 FP 干涉仪、原子吸收滤光器或分子吸收滤光器等。

图 6 为华灯鑫等利用在日本 EKO 公司研发的高光谱分辨率瑞利-拉曼散射激光雷达系统对日本东京城区上空的温、湿度廓线进行白天观测, 首次实现对流层底层白天大气温, 湿度激光雷达高精度探测^[12, 15-16]。

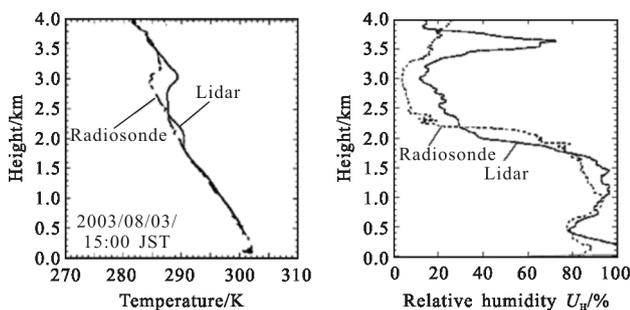


图 6 激光雷达探测白天东京上空大气温湿度廓线

Fig.6 Daytime temperature and humidity profiles over Tokyo by lidar

3.2 回转拉曼散射激光雷达

回转拉曼散射激光雷达是利用大气分子引起的非弹性散射(拉曼散射)的转动拉曼谱线的强度随温度变化的特性来探测大气温度廓线。相对与瑞利散射

信号, 拉曼散射信号强度要弱 4~5 个数量级, 主要关键技术是强背景噪音下的微弱信号提取技术。目前普遍采用高光谱分辨率光栅及窄带通滤波器分离 2 个具有反向温度灵敏度系数的回转拉曼波长, 结合光子计数技术来实现强背景噪音下的微弱信号提取。虽然该技术已经实现夜间低层对流层到平流层内 30 km 高度范围内的大气温度探测, 但白天高精度温度探测还需要进一步的研究。目前德国的 GKSS^[13], 日本的京都大学^[17]及国内的西安理工大学, 北京理工大学, 武汉大学及中科院安徽光机所等单位也正在开展从低层对流层到平流层内大气温度探测的研究。图 7 为华灯鑫等采用高分辨率光栅结合窄带滤光片分光, 采用模拟检测技术探测到大气边界层内昼夜大气温度廓线^[18]。

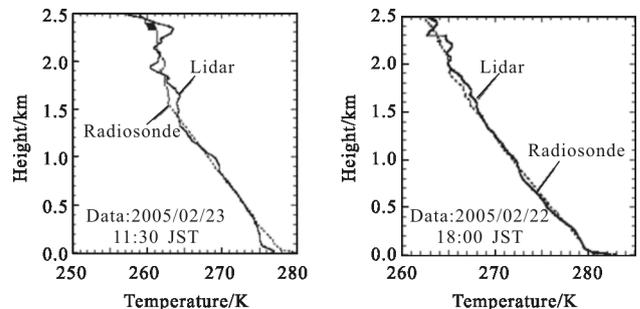


图 7 拉曼激光雷达探测昼夜大气温度廓线

Fig.7 Daytime and night atmospheric temperature profiles by Raman lidar

4 大气风廓线测量

测风激光雷达通过测量大气中自然出现的气溶胶颗粒或分子运动(风速引起)产生的具有多普勒频移的后向散射信号, 利用对回波信号频率进行鉴频或相干, 测量出后向散射信号的多普勒频移 Δv , 利用 Δv 与风速的关系就可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, 矢量合成即可得到风速、风向, 实现检测风速、探测紊流、实时测量风廓线风场等。

目前, 激光雷达探测风速风向的主要技术有相干激光雷达技术及非相干技术。相干激光雷达主要适用于气溶胶密度较大的对流层, 探测范围最大可达 10 km 左右, 精度可达 0.1 m/s。而非相干激光雷达主要利用气溶胶及大气分子测速, 属于能量检测, 其适用范围较广, 适合对流层到平流层的风廓线探测, 测

速精度可到 1 m/s 以内。相干测风激光雷达主要的厂家有美国相干公司及日本三菱重工等单位。香港国际机场的测风激光雷达的购置与使用, 成为测风激光雷达的市场化应用典范。通过配合原有的多普勒微波雷达共同探测飞机起降前后的大气风场信息、湍流强度等信息, 提高了飞机起降的气象灾害预警与安全。

非相干激光雷达主要有采用 4 个不同方向设置的接收望远镜探测 4 个不同径向风速, 反演风速风向的法国 CNRS 的地基系统^[19]及美国 NASA 的车载系统^[20]。图 8 为美国 NASA 研发的车载测风激光雷达系统及其风廓线探测结果, 该系统可以探测平流层内的风速风向。图 9 为该研究小组正在研究的机载系统^[21], 其主

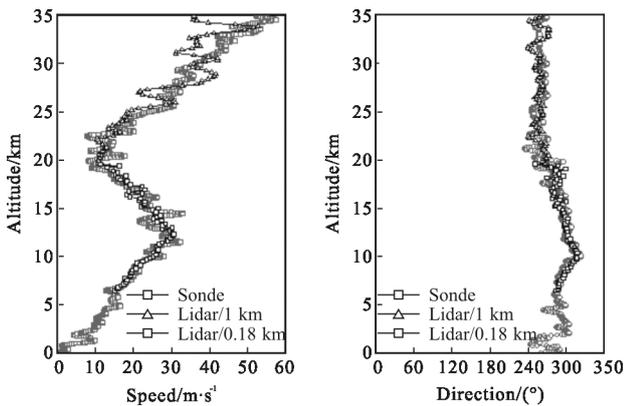


图 8 美国 NASA 研发的车载多普勒激光雷达系统

Fig. 8 Doppler wind lidar in a van developed by NASA, USA

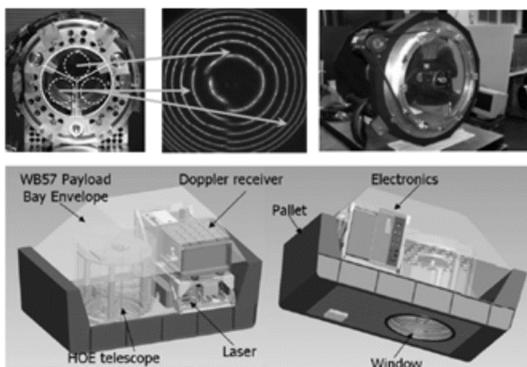


图 9 美国 NASA 在研的机载多普勒激光雷达系统

Fig. 9 Airborne Doppler wind lidar under development

要特点是采用光束扫描(右上角), 多通道 FP 鉴频及脉冲激光锁频(左上角), 系统结构紧凑, 便于车载、机载。我国的中国海洋大学^[22], 中科院安徽光机所^[23], 上海光机所^[24]等单位也在进行非相干、相干测风激光雷达的研制, 其中中国海洋大学研制的车载非相干测风激光雷达系统已经为 2008 年北京奥运会帆船比赛提供气象服务。

5 大气污染及生态环境探测技术

大气污染物主要指大气中存在的微量污染气体, 如 NO_x, SO₂, O₃, CO, CH₄ 等, 利用污染气体的吸收谱线特性而构成的差分吸收激光雷达可以有效地对这些微量污染物进行实时高精度探测及监测, 研发波长可调谐的脉冲激光器是差分吸收激光雷达的关键技术。近年随着 LD 泵浦固体激光技术及光参量振荡技术(OPO 技术)的发展, 波长 2~10 μm 的红外波段可调谐激光器技术得到很快的进步, 为激光雷达大气污染监测的应用提供了光源保障。

生态环境中存在的有机物质(植物及有机颗粒物), 一般都含有叶绿素及蛋白质等有机物质, 脉冲激光束照射这些物质时诱发荧光光谱, 有机物浓度含量(主要是叶绿素)与荧光光谱强度成线性关系, 荧光激光雷达主要是通过对特定波长的荧光光谱进行分光检测, 可以用于判断植物、水体藻类等的生长情况及监测水体有机污染物及气体中的花粉等有机颗粒物。

6 星载激光雷达

将激光雷达安装于卫星上进行遥感探测的优越性已经得到世界各国专家的肯定, 美国 NASA、欧空局 ESA、日本 NASDA 等航天部门都在积极发展星载遥感设备。

原有正在运行的地球卫星观测系统没能提供的一种重要的参数就是气溶胶的剖面信息, 针对这一问题美国 NASA 于 1994 年 9 月成功地发射了载有激光雷达的航天飞机, 进行了空间激光雷达探测全球云和气溶胶的首次实验(Lidar In-space Technology Experiment, LITE), 取得了令人鼓舞的探测结果, 证明了空间激光雷达在测量大气气溶胶和云方面的潜力。此后, 美国于 2003 年 1 月发射了地学激光高度计系统(GLAS)、于 2006 年 4 月发射了气溶胶-

云激光雷达红外卫星观测系统 CALIPSO 等,用于提供云和气溶胶的垂直分布信息,云的水/冰相态,气溶胶粒径的定性分类等,图 10 为卫星观测系统

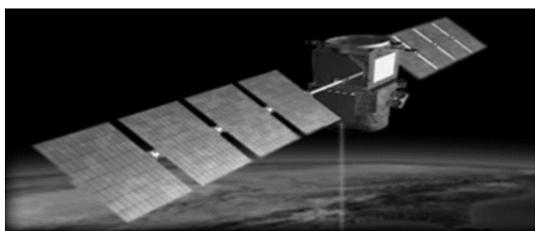


图 10 NASA 星载气溶胶(卷云)探测激光雷达(CALIPSO)
Fig.10 NASA space-borne cloud-aerosol lidar (CALIPSO)

CALIPSO 的示意图。为获得对流层的高精度风场数据、提高目前天气预报水平,欧洲近期将要发射星载测风激光雷达系统 ADM-Aeolus,获取全球范围的视线风速。可以预计在不远的将来,星载激光雷达与现有的微波雷达系统将构建一个全天候、高精度的全球气象及大气参数的探测平台。

未来星载激光雷达系统的准确度和精度可以通过利用更高输出功率的光源、更大口径的望远镜、高增益低噪音的光电检测技术等得到提高,而这些技术的改进将有望在未来几年内实现。美国 NASA 已经资助了几项研究用于研制大口径(直径 20~30 m)反射镜原型样机。而且,高功率、有效的激光器对很多不同类型的未来激光雷达系统而言都是关键技术,满足星载要求的 100~400 W 功率的激光雷达用激光器的可行性目前也在研究中。

国内激光和激光雷达技术在航天领域也得到了广泛的应用,随着 2007 年 10 月 24 日首颗月球探测卫星“嫦娥一号”的发射成功,我国也将自己的地面、机载激光系统装置开始投入太空应用。“嫦娥一号”的有效载荷之一,月球轨道激光高度计由中国科学院上海技术物理所负责总体研制、上海光学精密机械研究所承担其中激光发射器^[25]的研究,这成为我国第一套进入太空的固体激光应用系统,为我国开展激光雷达星载系统揭开了新的一页。

7 激光雷达的主要研究热点及其发展

激光雷达技术发展至今,已有近半个世纪的经历,随着现代激光技术,光电检测技术及半导体集成技术的飞速发展,激光雷达技术日趋成熟,已在大气

环境监测,气象观测及军事领域得到广泛的应用。目前地球大气环境恶化,如全球变暖,气候异常,大型自然灾害多发,全球性的高时空分辨率,高精度的大气环境监测,气象灾害的早期预警预测等技术的研究已经成为当前热门话题,也为激光雷达技术的应用及发展提供了机遇。

从早期不定期举行到近年来每两年一届的国际激光雷达会议已经经过了整整 40 年的历程,把激光雷达技术应用于揭示地球、了解大气、观测生物圈和海洋方面,成为国际上级别最高、影响范围最广的激光雷达领域国际会议,成为全世界激光遥感和激光雷达领域科技人员共同关注的焦点。

在近些年的 ILRC 会议上,大气物理要素如气溶胶光学性质、大气风场、温度与湿度等的方面的进展始终占相当比重。全球各区域的学者将各自的定点系统组成地面观测网络,如基本以拉曼激光雷达系统为主的欧洲激光雷达观测网 EARLINET,以全自动运行的米散射激光雷达为主的 MPLNET,东亚地区以沙尘暴观测为主的 AD-net,世界气象组织正在讨论建立的 GALION 等,均可对同一过程或事件进行不同时间和地点的综合观测,得到很多新的现象和结果。除此,针对同一对象不同应用目的的需要,激光雷达向多平台载体(地基、车载、机载、星载等)方面迅速发展,美国、欧洲以及我国等均发展了各自的星载激光雷达系统。

参考文献:

- [1] RAYMOND M. Measures. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications [M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992:205.
- [2] Dietrich J C, Espy P J, Nott G J, X. Chu, et al, Atmospheric temperature structure (0-120 km) at Rothera (Antarctica, 67_S, 68_W): Seasonal Variation, Geophysical Research Abstracts, 2005, 7:07611.
- [3] Razenkov et al. Improvement of the arctic high spectral resolution lidar [C]//22nd ILRC, ESA-561, S2P-6, 2004.
- [4] Stefanutti et al. A four-wavelength depolarization backscattering lidar for polar stratospheric cloud monitoring [J]. Appl Phys B, 1992, 55: 13-17.
- [5] Boichenko et al.. Four-wavelengths lidar sensing of atmospheric aerosol [J]. Atmos Opt, 1989, 2:66-72.
- [6] Flesia et al. Remote measurement of the aerosols size distribution by lidar [J]. J Aerosol Sci. 1989, 20:1213-1216.
- [7] G.S. Kent, G.M. Hansen. Multiwavelength lidar observations of the

- decay phase of the stratospheric aerosol layer produced by the eruption of Mount Pinatubo in June 1991 [J]. *Appl. Opt.* 1998, 37, 3861.
- [8] CH IR ISTESEN SD, MERROW C N, DESHA M S. UV fluorescence lidar detection of bio-aerosols [C]. *Proc SP IE*, 1994, 2222: 2282237
- [9] PRIMMERMAN C. A. Detection of Biological Agents. *LINCOLN Laboratory Journal*, 2000, 12, NUMBER 1, 18.
- [10] HAUCHECORNE A, CHANIN M L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km[J]. *Geophys Res Lett*, 1980, 7: 565-568.
- [11] HAIR J W, CALDWELL L M, KRUEGER D A, et al. High-spectral-resolution lidar with iodine- vapor filters: measurement of atmospheric-state and aerosol profiles[J]. *Appl Opt*, 2001, 40: 5280-5294.
- [12] HUA D, UCHIDA M, KOBAYASHI T. UV high- spectral resolution Rayleigh-Mie lidar with a dual-pass Fabry-Perot etalon for measuring atmospheric temperature profiles of the troposphere[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(10): 1063-1065.
- [13] BEHRENDT A, REICHARD J. 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.
- [14] BÖSENBERG J. Ground-based differential absorption lidar for water-vaper and temperature profiling: methodology[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(18): 3845-3860.
- [15] HUA D, KOBAYASHI T. UV Rayleigh-Mie lidar by multicavity Fabry-Perot Filter for accurate temperature profiling of the troposphere [J]. *Appl Opt*, 2005, 44(3): 6474-6478.
- [16] HUA D, KOBAYASHI T. UV Rayleigh-Mie Raman lidar for simultaneous measurement of atmospheric temperature and relative humidity profiles in the troposphere[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(3):1287-1291.
- [17] BEHRENDT A, NAKAMURA T. ONISHI M, et al. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient[J]. *Appl Opt*, 2002, 41(36): 7657-7666.
- [18] HUA D, LIU J, UCHIDA K, et al. Daytime temperature profiling of planetary boundary layer with ultraviolet rotational Raman lidar[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, 46(9A): 5849-5852.
- [19] SOUPRAYEN C, GARNIER A, HERTZOG A, et al. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(12): 2410-2421.
- [20] GENTRY B M, CHEN H, LI S X. Wind measurements with 355 nm molecular Doppler lidar[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(17) :1231-1233.
- [21] GENTRY et al. New technologies for direct detection Doppler lidar: Status of the TWiLiTE airborne molecular Doppler lidar project[C]// *Proc of 24th ILRC*, 2008, S02P-03, 239-243.
- [22] LIU Z, LIU B, WU S, et al. High spatial and temporal resolution mobile incoherent Doppler lidar for sea surface wind measurements [J], *OPTICS LETTERS*. 2008, 33(13), 1485-1487.
- [23] XIA H, SUN D, YANG Y, et al. Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation[J]. *Appl Opt*, 2007; 46 (29):7120-31.
- [24] 陈卫标, 周军, 刘继桥, 等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1), 57-60.
- [25] 施翔春, 陈卫标, 侯霞. 全固态激光技术在航天领域的应用[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2); 127-131.