

综 述

多普勒测风激光雷达研究进展

周小林¹, 孙东松¹, 钟志庆¹, 王邦新¹, 夏海云², 董晶晶¹, 沈法华¹, 刘 东¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 简述了多普勒测风激光雷达测风的意义, 报道了多普勒测风激光雷达的发展动态。综合该领域的发展情况, 按探测方式的不同, 分相干技术和直接探测技术分别讨论了测风激光雷达的应用及其特点, 比较了各种系统的性能。

关键词: 测风激光雷达; 相干技术; 直接探测技术; 边缘技术; 条纹技术

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)03-0161-08

Development of Doppler Wind Lidar

ZHOU Xiao-lin¹, SUN Dong-song¹, ZHONG Zhi-qing¹, WANG Bang-xin¹,
XIA Hai-yun², DONG Jing-jing¹, SHEN Fa-hua¹, LIU Dong¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 School of Instrument Science and Photo-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The importance and development of Doppler wind lidar are reviewed. Based on the difference of detecting methods, Doppler wind lidars are mainly classified as coherent wind lidar and incoherent (direct detection) wind lidar. The characteristics, detecting capabilities of these wind lidars are compared.

Key words: wind lidar; coherent technique; incoherent technique; edge technique; fringe technique

1 引 言

风速是气候学研究的重要参数之一, 大气中风速的测量对研究全球气候变化, 提高数值天气预报的精度, 监测机场气流, 优化飞机、轮船航行路线十分重要, 局部地区风场特征在火箭发射、航天飞机的起飞和着陆以及军事等方面都具有重要的意义。世界气象组织 (WMO) 声称全球风场的主动观测是

最具意义和挑战性的气象观测之一^[1]。多普勒测风激光雷达以其高分辨率、高精度、大探测范围、能提供晴空条件下三维风场信息的能力, 引起了世界多个国家的关注和重视。美国、欧洲、日本都投入了大量的研究。多普勒测风激光雷达利用光的多普勒效应, 测量激光光束在大气中传输其回波信号的多普勒频移来反演空间风速分布。多普勒测风激光雷达的探测方式分两种: 相干 (外差) 探测和非相

收稿日期: 2006-09-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程基金资助项目 (CX0201)

E-mail: laokai134@126.com

干(直接)探测方式。相干探测技术测量的是回波信号和发射的激光信号之间的差频信号,而直接探测技术测量的是接收信号和发射的激光能量信号的相对能量变化。本文介绍了基于这两种技术的多普勒测风激光雷达的发展动态、特点及其应用。

2 相干多普勒测风激光雷达

1962年 Rabinowitz 等人最早利用连续光(CW)激光进行光混频(相干外差探测)测量^[2]。光混频技术的基本原理是:激光在大气中传输的回波信号与系统本征光信号通过光混频器产生差频频率信号,当本征光信号的频率等于发射激光的频率时,差频频率信号大小即等于回波信号的多普勒频移,通过测量差频信号可以计算风速大小。相干多普勒激光雷达就是利用光混频技术实现测风的。1964年 Yeh 和 Cummins 首次提出使用光混频技术测量激光散射信号的多普勒频移的可能性,并使用 He-Ne 激光观察到流水中粒子的散射光频移^[3]。随后出现了激光多普勒测速仪,1966年首次使用相干激光雷达测风^[4]。相干激光雷达主要工作在红外波段。

2.1 气体相干探测系统

由于气体激光器输出光束的方向性好、单色性强、输出功率大。因此,早期的相干激光雷达多数采用 CO₂ 激光器(主要是工作波长在 10 μm 左右的大气窗口)作为激光发射源。

2.1.1 连续 CO₂ 相干激光雷达

1970年, Hufferaker 建立了第一台探测自然气溶胶散射的连续 CO₂ 相干激光雷达系统,测得距离为 35 m 处的径向风速,同年该激光雷达用于机场跑道上空气漩涡的跟踪检测^[5-6]。于是,相干激光雷达的测风能力引起了人们的重视,并很快想到利用机载相干激光雷达来分析飞机飞行中机身周围的空飞流动情况。1971年,美国国家航空和宇宙航行局(NASA)用这种系统来测量飞机前 20 m 处小范围内的空气流动,实现了气流速度的实时监测。1976年, Brashears 和 Hallock 采用 VAD 扫描系统,测得的风速与风速仪所测得的结果偏差小于 1 m/s,探测的高度可以达到 500 m^[7]。此后 VAD 扫描系统便用于大多数地基测风激光雷达。

1981年, Schwiesow 使用机载激光雷达跟踪海上龙卷风,测得了径向风速廓线分布,发现双漩涡结构比较常见^[8]。Vaughn 和 Jones 利用机载系统测量大气不同高度处气溶胶后向散射系数,积累了重要的实验数据^[9-10]。

连续 CO₂ 相干激光雷达系统较难获得空间距离上的信息,一般只探测几百米以内的范围。采用调频(FM)连续 CO₂ 激光系统能增加探测距离,主要用于移动硬目标的测量,在探测范围内的速度分辨率仍然较低^[11]。

2.1.2 脉冲 CO₂ 相干激光雷达

脉冲 CO₂ 激光器的出现,促进了相干激光雷达的发展,尤其是横向激励大气压(TEA)技术的使用和成熟,大大提高了相干激光雷达的测量范围与距离分辨率^[12-14]。早期干洁空气湍流探测的需要,也推动了脉冲 CO₂ 激光器的发展。

早期的相干激光雷达采用“主振荡器-放大器”(MOPA)技术以提高脉冲的输出能量,1970年, NASA/MSFC 在机载相干激光雷达系统中采用该技术研究干洁空气湍流、风切变等^[15]。采用 MOPA 技术的系统能提高测量范围,但效率比较低;而采用 TEA 技术能大大提高测量范围及速度、距离分辨率。1981年,美国国家海洋和大气局(NOAA/WPL)使用第一代 TEA/CO₂ 脉冲激光系统测风,可以探测到 10~20 km 范围内的风速^[16]。为了得到稳定的激光频率输出,NOAA/WPL 采用了混合 TEA 技术,之后便将这种地基系统广泛用于雷暴流量、风能、风切变、卷云的去极化等方面的研究;1983年到 1986年,他们又采用了 TEA/CO₂ 激光注入锁定技术,进行了大量的外场实验。80年代初期,机载脉冲 CO₂ 相干激光雷达能够得到雷暴周围的风场及地形特征^[17-18]。

为了能得到边界层大范围内气溶胶分布及风场分布情况, NASA/MSFC、NOAA/ETL 和喷气推进实验室(JPL)联合建立了当时最先进的 MACAWS 系统。单脉冲能量近 1 J,测量范围覆盖对流层及平流层底部(高度达 30 km),速度分辨率达 1 m/s。与其它遥感设备相比,MACAWS 系统在研究空气动力学过程及其特征方面的研究有无与伦比的优势^[19]。法国国家科学中心

CNRS/CNES/Meteo France 及德国 DLR 于 1990 年开始联合计划组建机载多普勒测风系统 WIND, 采用横向放电方式 (TE) CO₂ 激光器, 脉冲平均能量是 150 mJ、重复频率为 10 Hz。1999 年得到了整个对流层内中尺度三维矢量风场, 此次两国联合实验的目的是为发射星载测风系统做前期准备^[20]。

相当成熟的 CO₂ 激光技术, 提高了相干激光雷达的探测能力, 整个 80 年代及 90 年代初期, 无论地基系统, 还是机载系统, 都得到了广泛的应用。但 CO₂ 激光器庞大的体积, 笨重的质量, 需要较高的能量供应, 以及效率较低是其在星载应用的致命弱点^[4,21]。

2.2 固体相干探测系统

近二十年来, 相干激光雷达系统技术进一步成熟, 尤其是采用了固体激光器作为发射源。固体相干激光雷达提供了高分辨率风场的测量。80 年代末期出现的单频固体激光器 (波长主要在 1 μm 和 2 μm 左右) 已经可以用于相干激光雷达^[22]。2 μm 的激光工作物质主要是在各种氧化物晶体 (YAG, YVD, LuAG 等) 和氟化物晶体 (YLF, YLiF 等) 中掺杂 Tm、To; 1.5 μm 处主要有 Nd:YAG+OPO、OPO 泵浦 Yb:YAG 和掺 Er 玻璃; 1 μm 处的有 Nd:YAG。1.5 μm 工作物质相对稀少, 较少采用; 由于人眼安全方面的考虑, 较多地采用 2 μm 激光系统^[23-24]。近几年来, 在提高激光发射能量, 进一步减小系统体积, 提高效率, 增强探测器的稳定性及降低成本等方面取得了显著的进展。

2.2.1 灯泵浦相干激光雷达

1987 年 Kane 报道了首台灯泵 Nd:YAG 相干激光雷达, 但未能测风^[25]。1989 年, 国际相干公司 (CTI) 经过改进, 首次使用灯泵 Nd:YAG 脉冲相干激光雷达实现了远距离测风, 发射脉冲能量为 5~8 mJ; 而发射波长在 2 μm 左右, 输出脉冲能量在 22 mJ 的灯泵系统的测量范围已超过了 20 km^[26-27]。

灯泵固体激光器主要是从 1990 年开始常规地用于风场的测量, 这种系统可用来获得风廓线、机身周围激发了的漩涡、机场风切变, 并用于军事等方面。灯泵 Nd:YAG 激光器技术成熟, 价格相对便宜, 1.06 μm 激光的大气后向散射系数又比 10.6 μm 的高很多, 被多数激光雷达系统采用。但由于

闪灯寿命有限、稳定性差、发热量大、能量耦合效率低、需要液态冷却系统, 不适合星载激光雷达, 而提高光束质量一直是个瓶颈问题, 因而逐渐被同期出现的二极管泵浦系统所代替。

2.2.2 二极管泵浦 (DPSSL 全固化) 相干激光雷达

二极管泵浦固体激光器是最近十几年来发展的热点。其主要特点是: 系统无需制冷, 泵浦能量耦合效率高, 稳定性强, 光束质量 (主要是 TEM₀₀ 模) 好, 寿命长, 结构紧凑。尤其是 2 μm 左右的二极管泵浦固体激光器是相干激光雷达的最佳匹配。为了提高对小尺度漩涡扰动测量的分辨率和分析精度, 促进了 2 μm 相干激光雷达的发展。

1992 年, CTI 首次建立了 2 μm 二极管泵浦的全固化相干激光雷达发射系统, 单频激光脉冲持续时间是 600 ns, 重复频率为 200 Hz^[28]; 1995 年, CTI 推出了第二代 2 μm 全固化相干激光雷达, 脉冲重复频率为 100 Hz, 单脉冲能量达 3.5 mJ。与第一代系统相比, 其具有更小的体积, 进行了各种条件下的实验。该系统安装在 C-130H 武装直升机进行从地面至机身的风速测量, 测得的风场数据用于机身上火力控制系统, 以提高导弹发射精度。CTI 推出的第三代 2 μm 全固化相干激光雷达已经在军事、商业、气候研究等方面取得了广泛的应用^[22]。

德国 DLR Falcon 的 2 μm 相干激光雷达对风场及大气湍流信息采取了特殊的数据处理方法, 视线方向的速度分辨率达几 cm/s, 角度扫描空间分辨率达几 mrad, 主要用于激发漩涡小尺度湍流分析和研究。Takayuki Yanagisawa, Kimio Asaka 等人报道了 1.5 μm 相干系统^[29]。对于 1.5 μm 系统, 其主要优点是肉眼可承受的光强要比 2 μm 处高 10 倍以上。但这种激光器技术不太成熟, 效率低, 未能广泛应用。

与 CO₂ 相干激光雷达相比, 短波长系统的激光回波信号容易受空气湍流的影响, 对接收系统内部光学镜片也有更高的要求, 但短波长激光的大气传输性能优于 CO₂ 激光, 因此短波长的相干激光雷达引起了世界范围内的关注。现阶段, 二极管泵浦激光器价格相对昂贵, 但是随着应用领域的扩大, 将逐渐取代其它激光器作为相干激光雷达的发射源。

2.3 星载相干探测系统

相干激光雷达以大气中的气溶胶为光散射介质,通过分析后向散射信号的多普勒频移获得多普勒速度信息,这种探测体制的速度测量精度较高,但是由于一般只能检测气溶胶散射信号的多普勒频移,在全球的大气风场观测应用中受到限制,因为全球大部分地区尤其是海洋上空的气溶胶密度很低,高空大气层的气溶胶密度也很低。

SPARCLE 是由美国 NASA/MSFC 中心负责的、为下一世纪地球轨道任务 EO-2 设计的遥测设备,原定计划 2002 年发射。系统采用 NASA/LaRC 研制的二极管泵浦 Tm, Ho:YLF 激光器,工作波长为 $2.051\ \mu\text{m}$,脉冲能量为 100 mJ,脉冲宽度为 180 ns,重复频率为 6 Hz。激光发射和接收共用一个口径为 25 cm 的望远镜,采用石英楔形玻璃扫描仪。相干激光雷达的技术难度大,应用环境苛刻,同时探测的高度和覆盖范围受到限制,因此虽然技术上具备上星的条件,但对最初设计计划再次进行评估后,美国最终还是取消了 SPARCLE 计划^[30]。

日本邮政省正在研究在国际空间站上搭建测风激光雷达系统-JEM/CDL 系统,系统采用 $2\ \mu\text{m}$ 的全固态激光器和相干检测方法,从 1998 年开始,计划在 2006 年结束。JEM 发射系统为波长 $2.06\ \mu\text{m}$ 的 Tm, Ho:YLF 激光器,采用激光控制注入锁定振荡,重复频率为 10 Hz,需要 2 到 5 级放大,可得到 2 J 单脉冲能量,满足系统要求。功率消耗 1250 W,能量效率 1.6%。接收系统采用两个固定的 40 cm 口径的望远镜,分别接收空间站轨迹方向的前向与后向返回光。现在有效载荷的质量 470 kg,电源功率 1.489 kW。但是整个空间站电源功率只有 5.4 kW,因此降低激光器功率消耗和散热显得尤为重要^[31]。

相干激光雷达发展早,经过近半个世纪的发展,地基相干系统已经相当成熟。其探测灵敏度可接近量子噪声极限,具有较高的信噪比;在近地层干洁空气中的探测能力(探测精度、分辨率等)是微波雷达及其它遥感探测系统无法比拟的,可作为近地层风速测量的标准工具,CTI 已经销售了商用的相干激光雷达。但是相干系统存在波前匹配问题,对发射激光的相干性要求高,对发射、接收光学系统质量要求严格,技术实现难度大,容易受空气湍

流的影响,一般只能用于边界层小风速 ($<10\ \text{m/s}$) 测量,这在一定程度上限制了其发展及应用范围。由于以上原因,至今尚未出现星载相干激光雷达。

3 非相干(直接探测)多普勒测风激光雷达

直接探测技术在硬目标检测上的应用有较长历史。1968 年,James 首次使用直接探测技术测量了喷气机喷管喷出的 μm 量级颗粒速度分布^[32]。1972 年, Benedetti-Michelangeli 等人用扫描干涉仪的办法建立了第一台直接探测激光雷达的实验室系统^[33]。目前国际上直接探测多普勒激光雷达发射系统一般采用灯泵固体激光器。直接探测技术主要有边缘技术和条纹(成像)技术,边缘技术是利用窄带鉴频器,如 FP(Fabry-Perot) 标准具、Mach-Zehnder 干涉仪、Michelson 干涉仪、光栅等,或利用各种原子、分子滤波器,如碘滤波器,钠、钾、银蒸汽滤波器等,将频率信号的变化转化为相对能量信号的变化来测定多普勒频移;条纹技术是利用干涉形成的条纹移动来测量频率的变化,主要采用 FP 标准具或 Fizeau 干涉仪产生环形条纹或线形条纹。

3.1 边缘技术

在边缘技术中,可以采用单边缘技术,也可以采用双边缘技术,基本原理是相同的,只是双边缘技术的探测性能要优于单边缘技术。现有的直接探测测风系统主要选择 FP 标准具或碘分子滤波器作为鉴频器。

3.1.1 FP 标准具的边缘技术

1989 年, Chanin 等人利用双 FP 标准具建立了基于分子散射的双边缘技术测风系统,探测 25~60 km 的中层大气水平风速一维分量的分布^[34]。后来通过添加指向北边的望远镜,首次实现了中层大气水平风速的测量^[35]。Souprayen 等人改进了该激光雷达系统,建立了第二代 Rayleigh-Mie 多普勒激光雷达,探测的范围是整个平流层及对流层顶(约 8~50 km),对长期(1994 年到 1997 年)的风场测量数据进行了统计分析^[36-37]。NASA/Goddard 先后建立了单边缘技术和双边缘技术的测风激光雷达系统,从 1995 年开始论证和开展测风激光雷达的

研究, 作为 NASA Millennium Program 的项目之一和原来 Zephyr 多普勒激光雷达工程的延续转变为目前的车载直接探测激光雷达, 称为 GLOW (Goddard lidar observatory for winds)。该激光雷达于 2000 年 9 月在 North Glen, N.H. 进行了 50 h 的白天和夜间的径向风测量外场实验, 取得了满意的结果, 目的是为星载测量系统提供技术支持^[38-41]。Kobayashi 等人组建的双频单边缘激光雷达在 3 km 处的标准偏差为 ± 0.6 m/s^[42], 但没有更多的实验数据报道。2003 年, 中国科学院安徽光机所孙东松研究员组建的基于米散射的双边缘技术直接探测测风激光雷达系统, 设计的探测范围是低于 10 km 的对流层, 现已取得了三维风场数据^[43]。

3.1.2 碘蒸汽吸收的边缘技术

1994 年, Piironen 和 Eloranta 分析了用碘滤波器代替 FP 标准具后的激光雷达探测精度^[44]。1997 年, Friedman 采用碘滤波器作为单边缘滤波器, 首次报道同种类型激光雷达对平流层中风速测量的分布 (18~45 km)^[45]。1997 年, 国内刘智深教授组建了碘滤波器可移动非相干探测激光雷达系统, 并于 2000 年报道了低对流层风速分布^[46]。Chikao Nagasawa 等人报道了双波长碘滤波器非相干激光雷达, 测量范围从 8~25 km, 垂直分辨率为 500 m, 该雷达能有效测量低对流层至平流层的风速分布^[47]。

采用碘吸收的风场测量只适用于 532 nm 波段, 从人眼安全方面来考虑, 这种测风激光雷达体系应用范围受到了限制。

3.2 条纹技术

条纹技术是光通过干涉仪形成的干涉条纹位置的变化来确定多普勒频移, 它通过改变 FP 标准具的倾角可以产生环形条纹和条形条纹。如果采用环状条纹成像技术进行多普勒频率检测, 就要使条纹的形状和成像探测器 (IPD) 相匹配, 或采用将环形条纹转为线形条纹 (circle-to-line, CLIO) 的装置, 使环形条纹转为线形条纹, 再成像到线列 CCD 上检测。例如, 密西根大学及密西根宇航公司 (MAC) 建立了多台基于环形条纹和 CLIO 转换技术的测风激光雷达系统^[48-50]。

Fizeau 标准具产生的是线条纹, 可以直接通过

CCD 检测条纹重心位置的变化, 简化光路, 提高系统效率。欧洲航天局 (ESA) 已经论证了 Fizeau 标准具可用于测风激光雷达, 其启动的风神太空计划 (ADM-Aeolus), Mie 通道就采用了 Fizeau 标准具测量气溶胶散射信号^[51]。

McKay 和 McGill 等人对边缘技术和条纹技术进行了对比^[52-54]。一般认为, 条纹技术避免了分别考虑 Mie 散射和 Rayleigh 散射的影响, 在低对流层因其对 Rayleigh 散射不灵敏而具有一定的优势, 而基于 Rayleigh 散射的边缘技术在中高层风场探测中优势较为明显。ADM 星载测风激光雷达的 Rayleigh 通道就是采用基于 FP 标准具的双边缘技术探测分子散射信号^[51]。

3.3 星载直接探测系统

1979 年, Vincent J. Abreu 提出在人造卫星上搭建直接探测测风激光雷达, 使用基于 FP 标准具的条纹技术, 并分析了影响风速测量精度的主要因素, 如激光脉冲带宽, 探测器分辨率等^[55]。过去二十年来, ESA 一直在论证和评估星载测风激光雷达的可行性及意义, 于 1999 年全面启动了全球第一台星载直接探测测风激光雷达计划 (ADM-Aeolus), 采用二极管泵浦三倍频 (355 nm) Nd-YAG 激光器, 发射和接收天线共用一个口径为 1.5 m 的 Cassegrain 式望远镜, 探测高度是 0~20 km, 在对流层的探测精度优于 2 m/s, 探测全球范围内的风场分布, 计划于 2008 年发射^[51]。2000 年, 美国又重新启动星载测风激光雷达计划, 由 NASA/NOAA 联合组织的全球对流层风场探测 (GTWS) 计划, 但是这次考虑了相干和非相干混合的探测方法, 其基本思路是采用相干探测技术实现低对流层和边界层风场的高精度探测, 采用非相干 FP 标准具双边缘技术进行高对流层和平流层的风场探测, 这其实是两个载荷合并为一体的结构, 以获得高精度和大覆盖范围的全球风场探测^[56]。

4 结 论

对于相干探测技术, 关键是光子衰减, 即每个光学模式 (在相干体积和相干时间内) 光子的探测数量。在低散射条件下, 要求激光能量尽可能集中在一个能量脉冲里; 但对于直接探测技术, 测量精度

只决定于总的散射信号或总的激光能量,不决定于单发激光脉冲能量。直接探测激光雷达主要是最近十几年发展起来的,直接探测技术是对激光在大气中传输的回波信号的强弱进行测量,因此本质上来讲是能量探测,对光学系统和激光性能的要求不如相干探测技术严格,技术上相对容易实现,不受衍射受限限制,因此可以采用多发脉冲累积的办法提高信噪比,同时减小激光散斑效应的影响。总之,非相干(直接接收)激光雷达是目前国际上在中高层大气风场测量中普遍采用的探测方式,基于 FP 标准具的直接探测方案是解决高对流层以上大气风场多普勒频率测量的最佳解决途径,可以同时分析气溶胶和分子散射信号,能实现全球范围的风场观测。目前国外已经开展或建立的直接探测测风激光雷达系统研制的机构主要包括:美国 NASA/Goddard 航天中心,美国 MAC, ESA, 日本的福井大学和东京都立大学等^[57]。但是,只有美国的两个研究机构和欧航局所属机构已经建立了车载或地基观测系统,进行了日常的观测实验,这些系统从技术角度证明了这种直接探测方案是大气风场探测有效和先进的技术方。目前,测风激光雷达的应用还处于初步阶段,且只有相干激光雷达有商业化产品出现,但价格昂贵。随着激光与光电子技术、光学加工技术及信号处理技术的发展,多普勒测风激光雷达也日新月异。就目前的发展趋势来看,2 μm 左右的全固化相干激光雷达及发射波长在紫外波段的非相干激光雷达将是未来十几年发展的重点。

参考文献:

- [1] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas [R]. WMO/TD, 1998.
- [2] Rabinowitz P, Jacobs S, Targ R, et al. Homodyne detection of phase modulated Light [J]. *Proc. IRE (Correspondence)*, 1962.
- [3] Yeh Y, Cummins H. Localized fluid flow measurements with a He-Ne laser spectrometer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 4: 176-178.
- [4] Milton R, Huffaker R M, Michael R, et al. Remote sensing velocities using coherent laser of atmospheric wind solid-state and CO₂ systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 81-204.
- [5] Huffaker R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1970a, 9: 1026-1039.
- [6] Huffaker R M, Jelalian A V, Thomson J A L. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proc. of the IEEE*, 1970b, 58: 322-326.
- [7] Brashears M R, Hallock J N. The measurement of wind shear and wake vortices by laser doppler velocimetry [C]. *7th Conf. on Aerospace and Aeronautical Meteorology*, Melbourne: American Meteorological Society, 1976: 175-184.
- [8] Schwiesow R L, Cupp R E, Sinclair P C, et al. Abbey, waterspout velocity measurements by airborne Doppler lidar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1981, 20: 341-348.
- [9] Vaughn J M, Brown D W, Davies P H, et al. Atmospheric backscatter at 10.6 μm: a compendium of measurements made outside the United Kingdom by the airborne LATAS coherent laser radar velocimeter [R]. RSRE Rpt. 87002, 1987.
- [10] Jones W D, Airborne and ground-based measurement of atmospheric aerosol backscatter at CO₂ wavelengths [R]. Tech. Dig., OSA 2nd Topical Meeting on Coherent Laser Radar: Technology and Applications, Aspen, CO, 1983, ThB5.
- [11] Madison J P. Development of coherent laser radar [J]. *IEEE*, 1994, 923-925.
- [12] Dyer P E, James D J, Ramsden S A. A High-brightness volume-excited TEA CO₂ laser using an unstable resonator configuration [J]. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1972, QE-8:555.
- [13] Cruickshank J M. Transversely excited atmosphere CO₂ laser radar with heterodyne detection [J]. *Appl. Opt.*, 1979, 8: 290-293.
- [14] Willetts D V, et al. An investigation into the origin of frequency sweeping in a hybrid TEA CO₂ laser [J]. *J Phys D: Appl. phys.*, 1982, 15: 51-67.

- [15] Menzies R T, Hardesty R M. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields [J]. *Proc. of the IEEE*, 1989, **77**(3): 449-462.
- [16] Post M J, Richter R A, Hardesty R M, et al. NOAA's pulsed, coherent IR Doppler lidar characteristic sand data [C]. *Proc. of SPIE*. 1981, **300**: 60-65.
- [17] Emmitt G D. Convective storm downdraft outflows detected by NASA/MSFC's 10.6 micron pulsed Doppler lidar system [R]. Marshall Space Flight Center, AL. NASA CR-3898, 1985, 46.
- [18] Bilbro I W, Fichtl G, Fitzjarrald D, et al. Airborne Doppler lidar wind field measurements [J]. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1984, **65**: 348-359.
- [19] Rothermel Jeffry, Olivier L D, et al. Remote sensing of multi-level wind fields with high-energy airborne scanning coherent Doppler lidar [J]. *Optics Express*, 1998, **2**(2): 40-50.
- [20] Werner C H, Flamant P H, Reitebuch O, et al. Wind infrared Doppler lidar instrument [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(1): 115-125.
- [21] Kohei M, Toshikazu I, Shoken I, et al. Spaceborne coherent Doppler lidar [J]. *Journal of the Communications Research Laboratory*, 2002, **49**(2): 47-53.
- [22] Huffaker R M, Reveley P A. Solid-state coherent laser radar wind field measurement systems [J]. *Pure Appl. Opt.*, 1998, **7**: 863-87.
- [23] Yu J, Singha U N, Barnesa J C, et al. A high energy 2 μm , laser for multiple lidar applications [C]. *Proc. of SPIE*, 2001, **4153**: 70-77.
- [24] Della Valle G, Galzerano G, Toncelli A, et al. Novel solid-state lasers for Lidar applications at 2 μm [C]. *Proc. of SPIE*. 2005, 5958: 1H-1-1H-8.
- [25] Kane T J, Kozlovsky W J, Byer R L, et al. Coherent laser radar at 1.06 μm using Nd:YAG lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**: 239-241.
- [26] Kavaya M J, Henderson S W, Magee J R, et al. Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent lidar system [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**: 776-778.
- [27] Henderson S W, Hale C P, Magee J R, et al. Eye safe coherent laser radar system at 2.1 μm using Tm, Ho:YAG lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**: 773-775.
- [28] Huffaker R M, Reveley P A. Solid-state coherent laser radar wind field measurement systems [J]. *Pure Appl. Opt.* 1998, **7**: 863-873.
- [29] Yanagisawa T, Asaka K, Hirano Y. 10.9-mJ single-frequency diode-pumped Q-switched Er, Yb:glass laser for a coherent Doppler lidar [C]. *Proc. of SPIE*. 2001, **4153**: 86-92.
- [30] Kavaya M J, Emmitt G D. The space readiness coherent lidar experiment (SPARCLE) space shuttle mission [C]. *Proc. of SPIE*. 1998, **3380**: 2-11.
- [31] Itabe T, Mizutani K, Ishizu M, et al. ISS/JEM - borne coherent Doppler lidar program to measure the wind from space [C]. *Proc. of SPIE*. 2001, **4153**: 412-419.
- [32] James R N, Babcock W R, Seifert H S. A laser-doppler technique for the measurement of particle velocity [J]. *AIAA Journal*, 1968, **6**: 160-162.
- [33] Michelangeli G B, Congeduti F, Fiocco G. Measurement of aerosol motion and wind velocity in the lower troposphere by Doppler optical radar [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29**: 906-910.
- [34] Chanin M L, Garnier A, Hauchecome A, et al. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 1989, **16**: 1273-1276.
- [35] Garnier A, Chanin M L. Description of a Doppler Rayleigh lidar for measuring winds in the middle atmosphere [J]. *Appl. Phys.* 1992 B, **55**: 35-40.
- [36] 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.*, **38**: 2410-2421.
- [37] Souprayen C, Garnier A, Hertzog A. Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements II. Mie scattering effect, theory, and calibration [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**: 2422-2431.

- [38] Korb C L, Gentry B, Weng C Y. The edge technique-theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**: 4202-4212.
- [39] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**: 432-440.
- [40] Gentry B, Chen Huailin, Steven X L. Wind measurements with a 355 nm molecular doppler lidar [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**: 1231-1233.
- [41] Yoe J G, Rama Varma Raja M K, Hardesty R M, et al. GroundWinds 2000 field campaign: demonstration of new Doppler lidar technology and wind lidar data intercomparison [C]. *Proc. of SPIE*. 2003, **4893**: 327-336.
- [42] Kobayashi T, Mizoguchi Y, Matsumura T, et al. Development of a compact direct-detection Doppler lidar system for wind profiling [C]. *Proc. of SPIE*. 2001, **4153**: 329-337.
- [43] Sun D S, Zhong ZH Q, Zhou J, et al. Accuracy analysis of the Fabry-Perot etalon based Doppler wind lidar [J]. *Optical Review*, 2005, **12**(5): 409-414.
- [44] Piironen P, Eloranta E W. Demonstration of a high spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**: 234-236.
- [45] Freidman J S, Tepley C A, Cattleberg P A, et al. Middle-atmospheric Doppler lidar using an iodine-vaporedge filter [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 1648-1650.
- [46] Liu Z S, Wu D, Liu J T, et al. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with iodine filter [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(33): 7079-7086.
- [47] Nagasawa C, Shibata Y, Abo M, et al. Incoherent Doppler lidar using two wavelengths for wind measurement [C]. *Proc. of SPIE*. 2001, **4153**: 338-349.
- [48] Hays P B. Circle to line interferometer optical system [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**: 1482-1489.
- [49] Wu J, Wang J, Hays P B. Performance of a circle-to-line optical system for a Fabry-Perot interferometer: a laboratory study [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**: 7823-7828.
- [50] Wang J, Wu J, Hays P B. University of Michigan ground-based circle-to-line Fabry-Perot interferometer and its applications in mesosphere and lower thermosphere dynamics studies [C]. *Proc. of SPIE*. 1994, **2266**: 133-142.
- [51] Ingmann P. Status of the Doppler wind lidar profiling mission ADM-Aeolus [R]. ESA Report, 1999, SP-1233(4).
- [52] McKay J A. The edge filter and fringe imaging for laser Doppler wind speed measurement [C]. *Proc. of SPIE*. 1997, **3065**: 420-427.
- [53] McKay J A, Rees D. Space-based Doppler wind lidar: modeling of edge detection and fringe imaging Doppler analyzers [J]. *Adv. Space Res.*, 2000, **26**(6): 883-891.
- [54] McGill M J, Spinhirne J D. Comparison of two direct-detection Doppler lidar techniques [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(10): 2675-2686.
- [55] Abreu V J. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis [J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(17): 2992-2997.
- [56] Miller H G. Sigma Fall 2004 [EB/OL]. <http://www.mitretek.org/SigmaFall04.pdf>, 2004 fall.
- [57] Shibata Y, Nagasawa C. Incoherent Doppler lidar using 355 nm wavelength for wind measurement [C]. *Proc. of SPIE*. 2001, **4153**: 6156-622.

作者简介: 周小林 (1982-), 男, 硕士, 目前从事多普勒测风激光雷达及信号处理方面的研究。