

中高层大气测风激光雷达数据采集系统

高 昕¹ 韩於利² 金 革¹

¹中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026

²中国科学技术大学中国科学院临近空间重点实验室, 安徽 合肥 230026

摘要 研制了应用于中高层大气(15~60 km)多普勒测风激光雷达(DWL)的双模式数据获取系统(DMDAQ)。该系统技术指标达到国际先进水平,不仅满足了中高层大气多普勒测风激光雷达线性动态探测范围大、时空分辨率高的技术要求,而且以其集成度高、可重构的特性满足当前车载DWL研制中小型化和更新升级的需要。为了验证该数据获取系统的性能,进行了风场观测对比实验。结果显示,车载DWL系统对风场观测的结果与气球探测结果在重叠区域(15~35 km)上基本一致。同时,对车载DWL系统的实时回波信号分析显示,在60 km探测高度上的风速测量精度为6 m/s。

关键词 遥感; 测风激光雷达; 双边缘技术; 数据获取; 大动态范围

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0113002

Data Acquisition System for Wind Lidar in the Upper Atmosphere

Gao Xin¹ Han Yuli² Jin Ge¹

¹State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

²Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Geospace Environment, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A double mode data acquisition (DMDAQ) system is developed for Doppler wind Lidar (DWL) in the upper atmosphere (15~60 km). The technical indicators of the system reach international advanced level. The DMDAQ system not only satisfies the requirements of upper atmospheric DWL with the properties of wide linear dynamic detection range and excellent spatial and temporal resolution, but also conveniently to update and incorporate in the miniaturization mobile DWL system due to its high integration and reconfigurable characteristics. In order to evaluate the performance of the DMDAQ system, the wind field observation contrast experiment is carried out. The result reveals that the Lidar observation agrees well with the radiosonde balloon in the height range of overlapping data (15~35 km). Besides, the accuracy of wind velocity is 6 m/s in the 60 km detection height according to the simultaneous DWL echo signal.

Key words remote sensing; wind Lidar; double-edge technique; data acquisition; large dynamic range

OCIS codes 010.3640; 120.1880; 280.3640

1 引 言

精确实时的全球三维风场分布对于研究大气动力学、提高数值天气预报的准确性和预警生化污染等方面具有重要意义。近年来,随着我国在航空航天领域的迅速发展,临近空间环境尤其是中高层大气风场分布在飞行器航道安全监测和武器发射条件校准等方面的应用显得尤为重要^[1-4]。国内,多家单位通过各种技

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(11375179)

作者简介: 高 昕(1987—),女,博士研究生,主要从事激光雷达电子学系统方面的研究。E-mail: gaoxin@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 金 革(1960—),男,博士,教授,主要从事物理电子学方面的研究。E-mail: goldjin@ustc.edu.cn(通信联系人)

术手段分别对不同高度的大气风场进行过相关研究。中国科学技术大学钠测温测风激光雷达系统对于中间层顶区域(80~105 km)大气风场进行探测^[5];中国科学院上海光学精密机械研究所、中国海洋大学等依托相干技术观测了近地面风场(3 km 以下)^[6-7];中国海洋大学组建的碘吸收技术直接测风雷达探测高度达 10 km^[8]。然而,20~60 km 的风场探测在国内始终是一片空白。大气分子提供了覆盖全球范围不同探测高度的理想散射源。目前,依赖于分子瑞利散射的多普勒测风激光雷达(DWL)在国际上被公认为是临近空间风场(20~80 km)探测最有利的工具。2013年,中国科学技术大学基于双边缘技术建立的车载瑞利 DWL,该激光器的重复频率为 50 Hz,单脉冲能量为 350 mJ,探测器量子效率为 20%,实现了对平流层至中间层底部的风场测量,探测高度达 60 km,水平风速误差约为 6 m/s。

DWL由激光发射机、接收望远镜、鉴频器和采集电子学四大部分组成。其中,采集电子学性能直接影响了激光雷达的探测高度和时空分辨率。一方面,考虑到散粒噪声极限,激光雷达的探测信噪比正比于接收到的回波信号光子数的平方根。大气密度随高度呈指数下降,而根据雷达方程可知,激光雷达的后向散射信号强度与探测距离二次方成反比。考虑探测区域为 15~60 km,则散射信号强度的变化范围超过 4 个数量级,通常的光电探测器很难线性响应这个极限。因此,DWL的探测高度要求采集电子学的线性动态范围具有 5~6 个数量级。另一方面,现在很多重要的大气动力学过程可以通过激光雷达进行观测。例如,发生在平流层顶(~50 km)的风切变,在波的传播、反射和滤波方面起着重要作用。而对于风切变的观测需要很高的时空分辨率,这对采集电子学提出了更高要求。此外,统计意义上,信号的多次累积可以消除背景噪声的随机起伏。因此,采集电子学时空分辨率的提高对于激光雷达信噪比的提高具有重要意义。目前国内已有的数据采集系统(DAQ)尚不具备上述探测能力,国际上也仅有德国 Licel 公司的 TR 设备基本满足要求。考虑到激光雷达小型化、集成化的发展趋势以及系统升级的实际需要,有必要研制具有自主知识产权的数据采集系统。

本文提出的双模式数据获取系统(DMDAQ)采用模拟和单光子计数相结合的光电探测技术,将两种探测技术同步累计得到的数据用最小二乘法加以拼合,成功解决了低层强信号非线性堆积和高层微弱信号的低信噪比问题,极大地提高了探测的线性动态范围。DMDAQ 研发的难点在于光子计数的高速高增益放大;模/数(A/D)转换带宽内模拟信号的严格线性放大;特别是双模式数据拼合区的探测上,一方面要求模拟探测极大地抑制噪声,提高对弱信号的分辨能力,另一方面要求单光子探测具有高计数率并能够避免大信号造成的饱和效应。另外,DMDAQ 以具有快速、复杂数据处理能力和可重构性等特点的现场可编程门阵列(FPGA)作为数控核心,使 DMDAQ 可被开发成专注于激光雷达领域具有可重构性的高指标数据采集系统,能够用于 Licel 不能胜任的系统中,例如高重复频率(几百千赫兹)的微脉冲激光雷达(Licel 最大响应重复频率为 11 kHz)以及需要数字信号处理的相干探测中。DMDAQ 已被成功应用于中高层多普勒风速测量,在对比实验中,观测结果与 Licel 一致性好,证明了其可靠性。

2 多普勒测风系统

DWL 通过差分测量出射激光和大气回波之间的频率差来反演风速。鉴频器采用三通道法布里-珀罗(F-P)标准具。激光发射频率被锁定在两个边缘通道交点处,当存在径向风速时,后向散射信号会附加一个多普勒频移,引起双边缘通道其中一个接收到的信号强度增加,另一个接收到的信号强度减小,如图 1 阴影部分所示。多普勒频移根据这两个通道接收到的信号比值反演得到。另外,锁定通道用来监测发射激光频率,使标准具主动跟踪发射激光频率^[3]。

径向风速 V_r 可表达为

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \Delta\nu = \frac{\lambda}{2} (\nu - \nu_L) = \frac{\lambda}{2} [R^{-1}(\nu) - T_L^{-1}(\nu_L)], \quad (1)$$

式中频率响应函数 $R(\nu)$ 和锁定通道对发射激光的透过率 $T_L(\nu_L)$ 分别为

$$R(\nu) = T_1(\nu)/T_2(\nu) = I_1(\nu)/I_2(\nu), \quad (2)$$

$$T_L(\nu_L) = I_{Ls}/I_{Le}, \quad (3)$$

式中 $T_1(\nu)$ 和 $T_2(\nu)$ 为双边缘通道透过率, $I_1(\nu)$ 和 $I_2(\nu)$ 是透过两个边缘通道的信号强度, I_{1c} 和 I_{1s} 分别是出射参考光和其透过锁定通道的能量。DWL 接收机光路和数据采集系统如图 2 所示。风速反演依赖于 $I_1(\nu)/I_2(\nu)$, 因此, DMDAQ 必须保证严格线性, 这样双通道测量值 $I'_1(\nu)$ 、 $I'_2(\nu)$ 的不一致性就不会影响风速反演, 即

$$\frac{I'_1(\nu)}{I'_2(\nu)} = \frac{a_1 \cdot I_1(\nu)}{a_2 \cdot I_2(\nu)} \propto \frac{I_1(\nu)}{I_2(\nu)}, \quad (4)$$

式中 a_1 和 a_2 为常量。

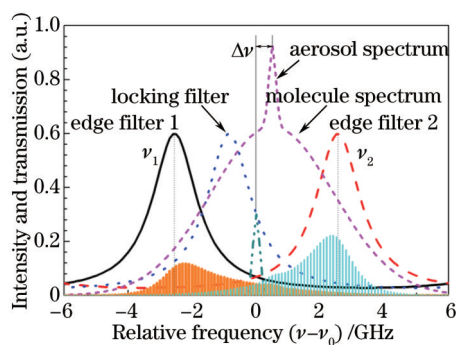


图 1 信号散射谱及三通道标准具透射率曲线

Fig.1 Spectrum of scattering signals and triple F-P etalon transmission curves

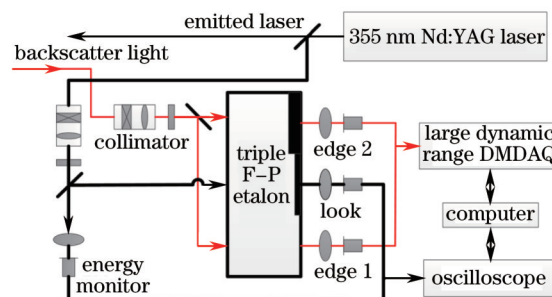


图 2 接收机结构示意图

Fig.2 Schematic of the receiver

3 DMDAQ 设计

3.1 双模式探测

模拟采样与单光子计数方式在同采集卡上并行实现, 避免了多器件测量下接地环路等因素的干扰, 提高了两部分拼合的可靠性和精度。该探测技术采用具有稳定倍增级链的光电倍增管(PMT, R7400U)实现的, 减弱了强光子计数率下的空间电荷效应, 因此具有更高的线性响应范围。DMDAQ 结构如图 3 所示, 主要模块有前端调理电路、模拟数字转换器(ADC)/数字模拟转换(DAC)、可重构处理单元(RPU)、同步控制和总线接口。

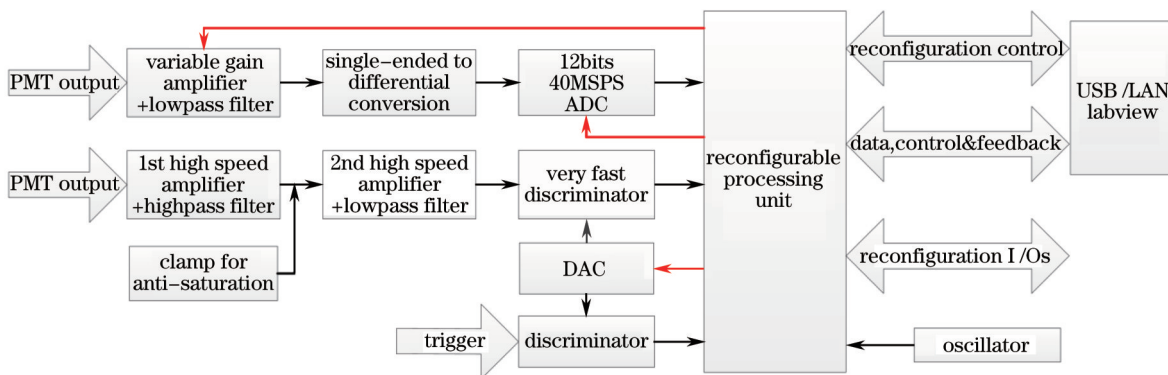


图 3 DMDAQ 设计图

Fig.3 Block diagram of DMDAQ

单光子计数前端电路针对微弱窄脉冲信号, 要求高速高增益放大、高灵敏度甄别, 且去除脉冲堆积影响。因此采用级联放大器在提高增益的同时保证高速信号不失真; 而比较器可甄别的最小脉宽为 1.3 ns, 能够分辨脉宽为 4 ns 的 PMT 脉冲信号。级联放大器构成的带通滤波电路带宽为 20~250 MHz, 交流耦合移除了直流和低频成分, 使基线固定, 20 MHz 以下的信号成分由模拟探测电路获取, 250 MHz 的最大计数率满足 PMT 响应要求。模拟探测要求在 A/D 转换的带宽内严格线性放大, 使强光下的模拟电流信号符合 ADC 输入限制, 并对板级噪声干扰进行抑制以保证对小信号转换的精度。0~20 MHz 的抗混叠滤波电路通过前端放大

器实现;可变增益放大增益可调范围为 44 dB,由主机远程控制。为保证时序一致性,模拟和单光子探测使用 40 MHz 全局时钟,ADC 流水线结构使模拟信号相对延迟 9 个时间间隔,该偏差在 RPU 中消除。

3.2 双模式数据合并

将单光子计数和模拟光电流两部分数据拼合才能够获得高线性动态范围。首先将原始数据进行预处理。两部分放大电路使模拟信号比单光子信号延时了 2 个时间间隔,因此要对数据进行时间轴校准。再将信噪比小于 1 的数据求平均后作为背景噪声分别从两种模式信号中减去。每个时间间隔的光子计数转换为以 MHz 计量的计数率 C_j (j 代表时间间隔的标号),并进行死时间修正得到修正计数率 C'_j ,模拟信号转换为以 mV 为单位的电压值 A_j 表示。数据拼合的核心思想是在两种探测技术共同有效区内进行最小二乘法拟合,得到转换系数,拼合信号在整个探测高度范围内连续,并与高度基本呈对数线性关系。拼合算法可表示为

$$\sum_{C'_j=C_{\min}}^{C_{\max}} [C'_j - (sA_j + o)]^2 = x_{\min}, \quad (5)$$

式中斜率 s 、偏移量 o 为转换系数, $sA_j + o$ 定义为虚拟计数率 \hat{C}_j 。拼合信号 C_j^{merge} 由虚拟和修正计数率组成

$$C_j^{\text{merge}} = \begin{cases} C'_j, & C'_j < C_{\max} \\ \hat{C}_j, & C'_j \geq C_{\max} \end{cases}. \quad (6)$$

当光子计数率低于 C_{\min} 时,ADC 无法分辨,拟合区域下限可由模拟信号的信噪比确定^[9]。当光子计数率高于 C_{\max} 时,光子计数呈现非线性,拟合区域上限可由滑窗法比较方差与均值线性关系的方法获得^[10]。有效区由夜间探测数据确定,并在探测过程中保持固定。中高层风速实验的有效区为 0.5~10 MHz。

3.3 可重构数据处理单元

DMDAQ 的可重构处理单元由现场可编程门阵列(FPGA)实现,满足大数据量和高速响应的要求,功能框图如图 4 所示,时序控制模块为其他模块提供全局时钟和复位信号。FPGA 的优势为:1) 低成本和高灵活性,通过重构来适应不同实验需求;2) 数据处理效率大大提升。双缓冲先入先出(FIFO)设计使主机可随时访问数据,且不影响信号采集连续性,从而可以监测实验过程。逻辑复制和基于时钟双边沿触发的乒乓技术等一系列并行处理算法使数据获取在双倍 ADC 采样率时钟下进行,无需其他相位差延迟时钟信号,提高了效率和准确性。FPGA 内部集成的锁相环(PLL)使得系统的时钟调整非常灵活,连续脉冲采集触发频率可以大大提高。

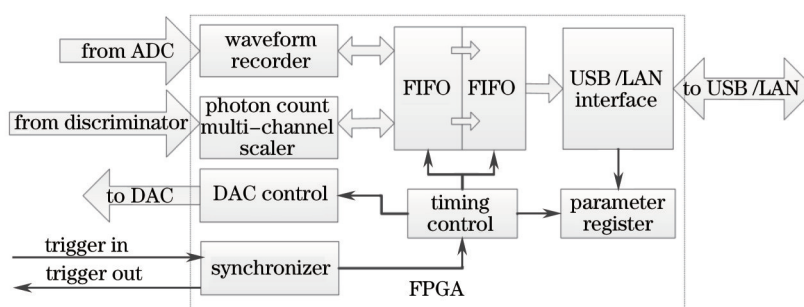


图 4 可重构处理单元功能框图
Fig.4 Functional block diagram of RPU

4 性能测试

4.1 ADC 有效位测试

实验要求模拟探测的虚拟计数率为 0.5 MHz~1 GHz,即探测范围达 3 个量级,则信噪比为 66 dB。根据噪声测试法计算 A/D 转换有效位(ENOB)。信号输入端接地,噪声数据统计分布如图 5 所示。求得均方差 $\sigma = 1.19$ bits,则根据 $X_{\text{ENOB}} = 12 - (\log_2 \sigma + 1)$ 得 $X_{\text{ENOB}} = 10.75$ bits,则信噪比为 66.48 dB,达到 66 dB 要求。

4.2 模拟采样线性

由第 2 节分析可知,风速计算依赖于两通道测量值之比,DMDAQ 系统要求具有严格线性。这里对模拟

采样进行了线性性能测试。信号源输出幅值 50 mV 到 2.1 V 的正弦信号,将不同增益条件下得到的数字幅值与理论值进行拟合,图 6 选取 3 种增益条件下数据,其曲线斜率符合 3 种增益的近似关系 $G_{Gain3}=2\times G_{Gain2}=4\times G_{Gain1}$ 。由图 6 可知,线性拟合相关系数(R-Square)均达 0.9999 以上,证明具有可靠的线性关系。

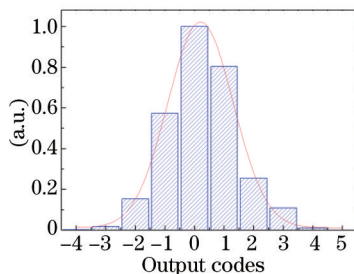


图 5 噪声分布

Fig.5 Distribution of noise

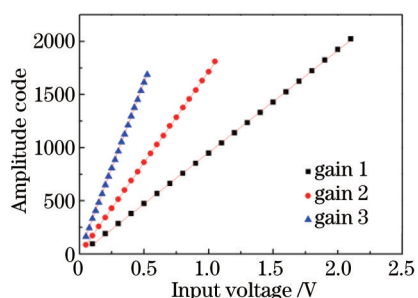


图 6 模拟采样的线性结果

Fig.6 Linear result of analog sampling

	A	B	C	D
1	equation	$y=a+b*x$		
2	adj.R-square	0.9999	0.99997	0.9995
3			value	standard error
4	gain 1	intercept	-8.70905	2.74632
5	gain 1	slope	961.3506	2.18716
6	gain 2	intercept	-0.19714	1.33513
7	gain 2	slope	1717.86234	2.12658
8	gain 3	intercept	3.64368	1.70545
9	gain 3	slope	3220.12632	5.30274

4.3 光子计数率测试

对 PMT 输出暗计数进行测试,暗计数比回波信号弱 2 个数量级。因此噪声主要来源是信号涨落引起的散粒噪声,暗计数可忽略,而多次累计平均是降低散粒噪声的方法,在现有时空分辨率条件下可满足信噪比要求。另外,以信号发生器(Tektronix AFG3252C)周期信号作为输入,测试 DMDAQ 最大光子计数率。实验证明,240 MHz(信号源输出最高频率)测试信号下 DMDAQ 能够获得正确的计数而不丢数,各时间间隔之间无死时间无重叠。

4.4 数据传输耗时

DMDAQ 在连续 120 s 累计后,将数据送入主机处理存档。时间利用效率和观测实时性要求数据传输耗时尽可能短。在传输最大数据量(16384 个时间间隔)下测得平均耗时 42 ms,占用相对时间 0.35%。该速率与 Licel 测试结果基本一致。

5 实验结果

进行了 DMDAQ 与 Licel 设备对比的风场观测实验,探测数据经 3.2 节所述算法修正后如图 7 所示,为 3000 发脉冲的平均结果。由图 7 可知,两套设备探测结果吻合的非常好,通过 Matlab 软件的 corrcoef 函数分析 DMDAQ 与 Licel 曲线的相似度,得到两通道的相关系数分别为 0.9977 和 0.9972,可见两设备的线性相似程度很高。图 7(a)、(b)的测试环境为 2013 年 7 月 8 日合肥(31°51'N, 117°16'E)夜间,30℃左右,多云有雾霾,探测高度仅有 35 km,且风速微小,因此两个通道信号差别不明显;而图 7(c)、(d)则是 2013 年 12 月 23 日青海德令哈(37°13'N, 97°14'E)凌晨,-10℃左右,晴朗少云,探测高度达 60 km,且径向风速大,所以两通道差别明显。

2013 年 12 月 23 日上午 6:54 于青海德令哈进行了 DWL 与气球探测的对比实验,如图 8 所示。结果显示两者在风速和风向上都很好的一致性,但是也有微弱的差别。引起这种微弱差别的原因主要有: 1) 气球探测一组数据要 2 h 左右,而激光雷达仅需要 2 min 或者半小时; 2) 气球在探测的过程中会飘到上百公里远的地方,因此会产生一定的差别。

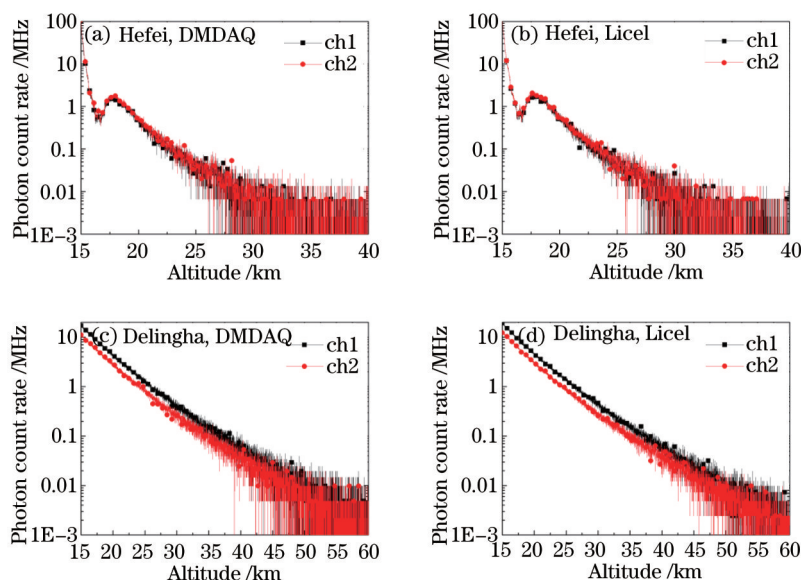


图 7 风场观测数据。

Fig.7 Observed data of wind field

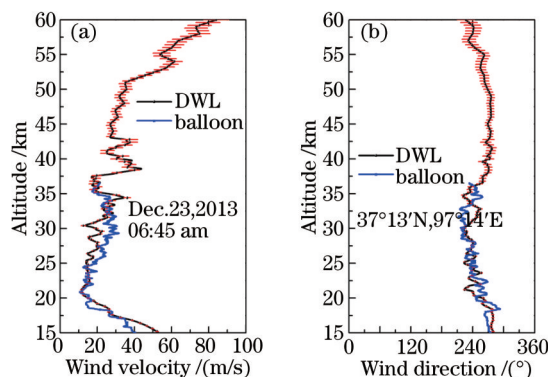


图 8 DWL 和气球测量风廓线对比实验。(a) 风速; (b) 风向

Fig.8 Wind speed and direction profiles measured by DWL and Balloon. (a) Wind velocity; (b) wind direction

6 结 论

为中层大气风速激光雷达实验设计了具有大动态范围的双模式数据获取系统。与国外商用仪器相比,在探测线性动态范围、时空分辨率、信号连续采集持续时间、数据传输时间指标上已达到先进水平,响应激光脉冲重复频率的最大值远高于商用仪器。电子学测试和风场观测证明了DMDAQ能够满足DWL中层大气风速观测的要求。同时,DMDAQ的灵活性在于可以重新配置FPGA内部逻辑,重组硬件资源,快速适应多领域激光雷达系统,节约了再开发或更换商用仪器的成本,为激光雷达研发中的升级和更新提供保障。

参 考 文 献

- 1 Zhang Caiyun, Weng Ningquan. Research on the characteristic of clear-day dynamic turbulence in troposphere based on wind profile radar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1213003.
张彩云,翁宁泉.基于风廓线雷达的晴空对流层动力湍流特征研究[J].中国激光,2013,40(12):1213003.
- 2 Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, et al.. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s128001.
闫宝东,宋小全,陈超,等.2011春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J].光学学报,2013,33(s1):s128001.
- 3 H Xia, X Dou, D Sun, et al.. Mid-altitude wind measurements with mobile Rayleigh Doppler lidar incorporating system-level optical frequency control method[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15286-15300.

- 4 Zhichao Bu, Siying Chen, Yinchao Zhang, *et al.*. Effect of laser pulse shape and duration on spectrum width of coherent LIDAR[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(s1): s12801.
- 5 T Li, X Fang, W Liu, *et al.*. Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5401-5411.
- 6 Weifeng Diao, Xin Zhang, Jiqiao Liu, *et al.*. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(7): 072801.
- 7 Li Zhigang, Liu Zhishen, Song Xiaoquan, *et al.*. Data correction algorithm of airborne doppler lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s228001.
李志刚, 刘智深, 宋小全, 等. 机载多普勒激光雷达数据校正算法[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s228001.
- 8 Z Wang, Z Liu, L Liu, *et al.*. Iodine-filter-based mobile Doppler lidar to make continuous and full-azimuth-scanned wind measurements: Data acquisition and analysis system, data retrieval methods, and error analysis[J]. Appl Opt, 2010, 49(36): 6960-6978.
- 9 Zhishen Liu, Zhigang Li, Bingyi Liu, *et al.*. Analysis of saturation signal correction of the troposphere lidar[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(11): 1051-1054.
- 10 F Gao, D Veberic, S Stanic, *et al.*. Performance improvement of long-range scanning Mie lidar for the retrieval of atmospheric extinction[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 122: 72-78.

栏目编辑: 苏 岑