

瑞利测风激光雷达系统性能改进与 中高层大气风场观测

唐磊¹ 蒋杉¹ 李梓霖² 郑俊² 赵若灿² 孙东松² 吴海滨³ 代轩¹ 鲁平¹

¹合肥师范学院电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601

²中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026

³安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601

摘要 开展了瑞利测风激光雷达系统性能改进和效率提升研究,改进接收系统光信号的耦合效率、传输效率和采集效率,使改进后的接收机光学效率比原接收机提高 1.874 倍,解决了系统在紫外波段光学效率低的问题。优化了校准参数,并将标准具表面反射率提高至 80%,使激光频率锁定精度满足系统探测精度的需要。增加 60 m 准静态零风速实时校准管道,消除多普勒零点偏移产生的测量误差,提高了系统探测精度。利用改进的瑞利测风激光雷达进行大气风场探测实验,与探空气球相比风速和风向最大相差 6.73 m/s 和 24.6°,平均相差 1.28 m/s 和 2.65°,获取了多区域高时空分辨率的风场数据,为研究中高层大气变化规律、认识空间环境的区域变化特征提供了必要的

关键词 遥感; 测风; 瑞利散射; 激光雷达; 风场观测

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0710004

Performance Improvement of Rayleigh Wind Lidar and Wind Field Observation in Middle and Upper Atmosphere

Tang Lei¹ Jiang Shan¹ Li Zimu² Zheng Jun²

Zhao Ruocan² Sun Dongsong² Wu Haibin³ Dai Xuan¹ Lu Ping¹

¹School of Electronic and Information Engineering, Hefei Normal University, Hefei, Anhui 230601, China

²School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³School of Physics and Material Sciences, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

Abstract The research on performance improvement and efficiency promotion for the Rayleigh Doppler wind lidar is carried out. The optical efficiency of the improved receiver is 1.874 times higher than that of the original receiver by improving coupling efficiency, transmission efficiency and collection efficiency of optical signal in the receiver system, and the problem of low optical efficiency in the ultraviolet band in the current system is solved. The locking accuracy of laser frequency can meet the need of system detection accuracy by means of optimizing calibration parameters and increasing the surface reflectivity of etalon to 80%. Measurement deviation of line of sight wind velocity, which is owing to the Doppler zero offset, is eliminated by using a 60 m quasi static zero wind velocity real-time calibration pipeline, which improves the measurement accuracy. The comparison between the results obtained by lidar and radiosonde shows good agreement. The maximum deviation of wind velocity and direction is 6.73 m/s and 24.6°, respectively, and the average deviation of wind velocity and direction is 1.28 m/s and 2.65°, respectively. The wind field data with high spatial-temporal resolution is obtained in many areas, providing

收稿日期: 2016-01-26; **收到修改稿日期:** 2016-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(41574180)、安徽省科技攻关项目(1604a0902152)、安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2016A581)

作者简介: 唐磊(1972-),男,博士,副教授,主要从事激光大气遥感信息控制与处理方面的研究。

E-mail: tanglei_66@163.com

necessary data support for studying the change discipline of the middle and upper atmosphere and understanding the regional change characteristic of space environment.

Key words remote sensing; wind measurement; Rayleigh scattering; lidar; wind field observation

OCIS codes 280.3340; 280.3640; 010.3640

1 引 言

中高层大气(20~100 km)风场的探测和研究是深入研究大气动力学、全球大气活动和空间环境预警的主要参数之一。大气风场分布的精确测量对理解天气现象的形成机理、发生、发展及移动演变规律和天气现象预测、预报的正确与否意义重大,还会影响各种航天器的再入过程,对航天器的回落点精度以及飞行器的安全等有很大影响,同时也是导弹等目标精确命中研究中必不可少的重要参数^[1-2]。

直接接收的多普勒测风激光雷达具有高时空分辨率、高精度、空间覆盖范围大的特点,是目前唯一能够进行全球范围风场探测的有效工具。从国外多普勒测风激光雷达的发展来看,解决中高层大气风场探测的最佳途径是基于法布里-珀罗(FP)标准具(FPI)的多普勒探测。美国国家航空航天局/Goddard 航天中心、美国 MAC 宇航公司分别建立的车载、地基观测系统,从技术角度证明了这种探测方案的可行性^[3-4]。法国 Chanin 等^[5]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,系统探测高度达到 25~60 km,首次实现了平流层大气水平风速的测量。欧洲气象组织在挪威建立了 ALOMAR 系统,主要任务是探测北极中高层大气参数^[6-7]。

中国科学技术大学的车载多普勒激光雷达系统^[8-10],有效风廓线探测高度为 8~40 km,时间分辨率为 30 min,垂直空间分辨率在 20 km 以下为 100 m、40 km 以下为 500 m,水平风速测量精度优于 6 m/s (40 km)。系统通过两根光纤分别将锁定信号与大气回波信号准直后导入 FP 标准具。信号光纤将大气回波信号导入光纤分束器后分成两路,分别进入 FP 标准具的两个信号通道。锁定光纤中的光也由光纤分束器分成两路,作为锁定信号和能量信号。系统中光纤分束器的透射率较低(60%左右),使得整个系统的光学效率降低。在 40 km 车载多普勒激光雷达的基础上,2013 年通过改变光机扫描机构,扩大望远镜接收口径,提高激光脉冲能量等技术手段,成功研制了 60 km 瑞利激光雷达大气风场探测实验系统^[11-12],实现了 60 km 高度大气风场观测,时间分辨率为 10~30 min,数据采集最小分辨时间为 2 min,垂直空间分辨率为 200~1000 m,探测精度分别为 1 m/s(15 km)、3 m/s(30 km)、10 m/s(60 km)。

由上述分析可知,国内现有瑞利测风激光雷达系统存在光学效率低、结构设计有缺陷等问题。因此,在现有系统基础上通过提高系统光学效率、改进系统性能,可提高中高层多普勒测风激光雷达风场测量精度、运行稳定性及测量可靠性,使之能够进行长期的业务化运行。

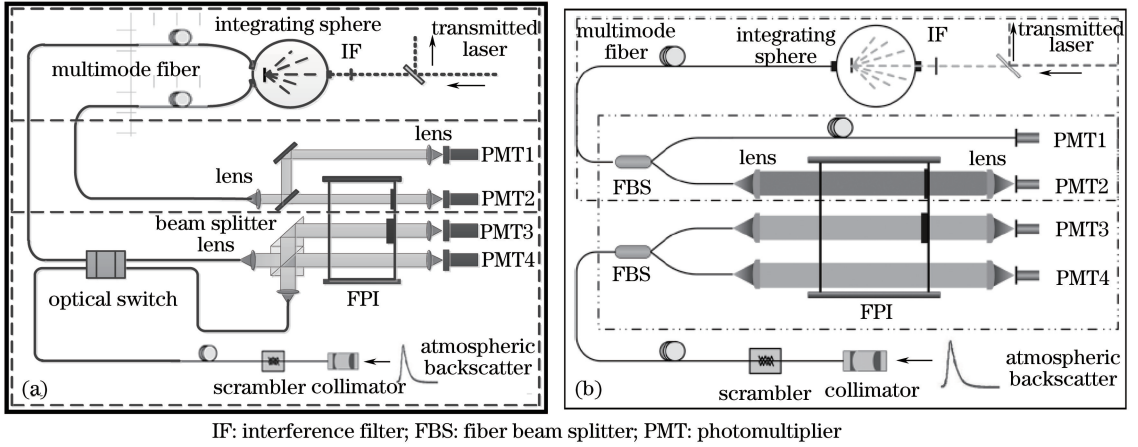
2 瑞利测风激光雷达系统性能改进

接收机是激光雷达的核心,其光学效率的改进对系统性能的提升意义重大。改进接收机的光学效率从而提升系统探测的信噪比,可减小系统测量误差,改进激光频率漂移锁定技术和增加零风速校准功能可进一步提升系统性能,提高系统探测精度。

2.1 基于非偏振棱镜分光的 FP 标准具多普勒鉴频装置

接收机系统结构的优化方案如图 1(a)所示,与现有系统[图 1(b)]相比,硬件上的改进主要包括:1) 非偏振分光-反射棱镜组代替信号通道的光纤分束器,解决光纤分束器耦合效率低、透射率低的问题;2) 多模光纤镀紫外透膜代替现有普通多模光纤,解决光纤端面透射率低、传输效率低的问题;3) 锁定通道改用分束片和反射镜代替光纤分束器,解决光纤分束器透射率低、效率低的问题;4) 增加零点校准功能,校准信号与回波信号共用一个棱镜组,利用光开关适时开通,简化系统的光路结构;5) 改用量子效率更高的光电探测器,量子效率由原系统的 20%增加到 25%,提高系统光信号的采集效率;6) 干涉滤光片主要用于抑制日间背景噪声,夜间探测改用带宽更宽、透射率更高的滤光片,带宽由 0.2 nm 增加到 1 nm,透射率由 40%增加到 50%。

将三块相同材料的非偏振直角棱镜的连接面抛光至较高平整度,使两个连接面的分子距离非常近,利用分子间作用力结合特殊粘合材料形成一个整体,光入射到连接面时,不会因为反射而损失;在棱镜的入射面



IF: interference filter; FBS: fiber beam splitter; PMT: photomultiplier

图 1 瑞利散射激光雷达接收机系统结构框图。(a) 改进后的接收机系统；(b) 现有接收机系统

Fig. 1 Schematic of Rayleigh scattering lidar receiver system. (a) Improved receiver system; (b) existing receiver system

和出射面镀紫外增透膜,增大透射率;起分光作用的两块棱镜之间镀 1:1 的半透半反膜;棱镜组与 FP 标准具的保护玻璃采用同样的技术手段粘合,使其与 FP 标准具自成一體,保证了边缘通道入射光束的平行度与稳定性,提高了 FP 标准具边缘通道表面光束的入射质量;经过上述处理的棱镜组在提高系统光学效率的同时,也极大地降低了系统的调光难度。

2.2 系统光学效率分析

假定设计的标准具参数使瑞利散射和米氏散射信号的速度灵敏度相等,在单光子计数模式、散粒噪声限下,激光雷达系统接收到的后向散射信号信噪比为

$$R_{SN} = [R_{SN1}^{-2} + R_{SN2}^{-2}]^{-1/2}, \tag{1}$$

$$R_{SNi} = N_i / (N_i + N_{b,i} + N_{d,i})^{1/2}, \tag{2}$$

$$N_i = a_i [N_M T_{M_i}(\nu_0 + \nu_d) + N_R T_{R_i}(\nu_0 + \nu_d, T_a)], \tag{3}$$

式中 $i=1,2$ 为相应的探测通道, N_i 为探测通道 i 接收到的瑞利散射和米氏散射总信号光子数, $N_{b,i}$ 为探测通道 i 接收到的天空背景光子数, $N_{d,i}$ 为探测通道 i 对应探测器的暗计数, N_R 为探测通道 i 接收到的瑞利散射信号光子数, N_M 为探测通道 i 接收到的米氏散射信号光子数, T_{M_i} 为米氏散射信号经过标准具的透射率, T_{R_i} 为瑞利散射信号经过标准具的透射率, ν_0 为激光发射频率, ν_d 为后向散射信号的多普勒频率, a_i 为标准常数, T_a 为实际大气温度。径向速度测量误差为

$$\epsilon_v = (\theta_v R_{SN})^{-1}, \tag{4}$$

式中 θ_v 为 FP 标准具的速度灵敏度,对于设计相同的 FP 标准具,灵敏度函数是定值。

中高层大气米氏散射信号可忽略不计,主要为瑞利散射信号:

$$N_R = m \cdot k \frac{\eta E_L \lambda_L}{hc} \cdot \frac{A_0}{r^2} \cdot \Delta R \cdot \beta_R(\lambda_L, r) \cdot T^2(\lambda_L, r), \tag{5}$$

式中 m 为激光脉冲累积数, k 为系统常数, η 为探测器的量子效率, E_L 为发射激光脉冲能量, λ_L 为发射激光波长, β_R 为瑞利后向散射系数, A_0/r^2 为接收光学系统的接收立体角, r 为探测距离, A_0 为有效接收面积, $T^2(\lambda_L, r)$ 为大气透射率系数, ΔR 为辐射大气体积元的长度, h 为普朗克常数, c 为光速。

假设激光雷达其他探测条件均相同,探测高度由 50 km 提高到 60 km,50 km 和 60 km 高度处的大气后向散射系数按美国标准大气模式(1976)计算,时空分辨率不变,则由于高度和后向散射比变化所引起的信噪比下降为 $R_{SN60}/R_{SN50} = 45.33\%$ 。若保持系统测量误差不变,探测高度由 50 km 提升到 60 km,则 60 km 处的信噪比相对于 50 km 处需要提高 54.67%。

由于光纤耦合时核心模的有效模场直径随着波长的增加而增大,因此波长越长,相同条件下耦合效率越高。瑞利散射激光雷达工作在波长为 355 nm 的紫外波段,耦合效率相对较低,一般在 80% 左右。假设到达接收机之前的后向散射信号为 N_0 ,多模光纤在紫外波段端面透射率最高为 90%,光信号传输过程中要经过 4 个端面(透射率 $\eta_1=90\%$)、1:1 耦合分束器(耦合效率 $\eta_2=80\%$)、探测器(量子效率 $\eta_3=20\%$)和滤光片(透

射率 $\tau=40\%$)等,仅考虑系统改进部分光学界面上的光损失,忽略插入损耗、传输过程中的其他损耗等,则两个边缘通道探测器接收的信号 N_1 与 N_0 的关系为

$$N_1/N_0 = \eta_1^4 \eta_2 \eta_3 \tau = 4.199\% \quad (6)$$

棱镜镀膜后平均透射率为 99.5%,平均反射率为 99.5%,光纤端面镀膜后透射率平均可达 99%,光信号传输过程中经过 2 个透射率 $T_1=99\%$ 的光纤端面、2 个棱镜分界面和 1 个反射面(透射率 $T_2=99.5\%$),探测器量子效率 η_3 增加到 25%,滤光片透射率 τ 增加到 50%,仅考虑改进部分,忽略相同部分,则两个边缘通道探测器接收的信号 N_2 与 N_0 的关系为

$$N_2/N_0 = T_1^2 T_2^3 \eta_3 \tau = 12.068\% \quad (7)$$

$$(N_2 - N_1)/N_1 = 1.874, \quad (8)$$

由此可见,理想情况下,改进接收机部分器件光学性能可使接收机光学效率提高 1.874 倍,相同情况下信噪比可提高 69.529%(大于 54.67%)。实验结果如图 2 所示,系统改进前 60 km 高度处信噪比为 14.5,相应风速测量误差为 22.99 m/s;改进后 60 km 高度处信噪比为 30.8,相应风速测量误差为 10.82 m/s。目前,激光脉冲能量为 350 mJ,重复频率为 50 Hz,若保持重复频率不变,增加脉冲能量至 400 mJ,则信噪比增加 6.9%,可确保系统实现 60 km 高空大气风场探测误差 10 m/s 的指标。

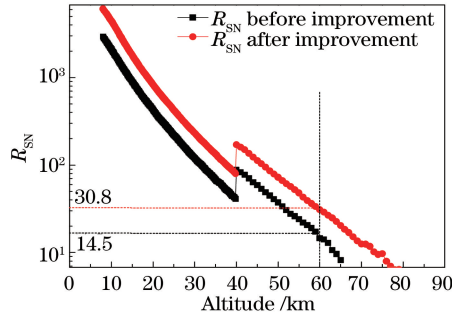


图 2 接收机系统光学效率改进前后信噪比实验对比

Fig. 2 Experimental comparison of R_{SN} before and after improvement on optical efficiency of receiver system

由上述分析可知,以提升系统自身光学效率为主,结合激光脉冲能量的适当增加,可以满足 60 km 高度大气风场探测的信噪比需要。使用非偏振分光棱镜和镀膜光纤等改进措施可以提高系统光学效率,解决现有系统紫外波段光学效率低的问题。

2.3 激光频率漂移锁定的分析与优化

单脉冲回波信号频率与发射激光脉冲频率的频率差可用于风速测定,通常情况下,每个频率差是稳定的,但是在信号长时间累积过程中,激光频率会发生漂移,带来系统误差,因此,激光雷达测量精度不仅取决于边缘通道大气后向散射信号的鉴别精度,还依赖于激光发射频率的锁定精度。

假设锁定区域透射率曲线呈线性变化,单位长度变化产生的激光器相对频率漂移为

$$\Delta\nu = \frac{T_L(\nu) - T_L(0)}{T_L(0) \theta(\nu)}, \quad (9)$$

式中 T_L 为锁定通道透射率曲线, $\theta(\nu) = \frac{-1}{T_L(\nu)} \frac{dT_L(\nu)}{d\nu}$ 为锁定灵敏度,由此引起的风速探测误差可表示为

$$v = \frac{\lambda}{2} \frac{T_L(\Delta\nu) - T_L(0)}{T_L(0) \theta(\nu)}. \quad (10)$$

假定风速测量期间锁定通道探测器接收的信号足够强,由校准常数 a_c 的相对校准误差引起的透射率变化 $\delta T_L(\nu) = T_L(\nu) (\delta a_c / a_c)$,则相对速度误差可表示为

$$\delta v = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{-1}{k} \cdot \delta T_L(\nu) = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{-1}{k} \cdot T_L(\nu) \cdot \frac{\delta a_c}{a_c}, \quad (11)$$

式中 $k = dT_L(\nu) / d\nu$ 为透射率曲线斜率。由(11)式可知,若要减小激光发射频率漂移带来的风速探测误差,可以采取两种方法:一是增大透射率曲线的斜率,即锁定通道的光谱分辨率;二是提高校准精度,即校准常数 a_c 的测量精度。

首先,为了提高校准常数的测量精度,采用镀膜光纤以提高光束传输效率;利用分束片代替光纤分束器以提高光学透射率,减少光损失;使用积分球将激光脉冲在时域上进行展宽,中心频率不变,一方面保证足量而精确的信号采样,另一方面也保证到达FP标准具锁定通道信号光斑的均匀性,如图3所示。探测器响应特性也是影响校准精度的一个主要方面,信号通道和能量通道探测器响应一致性校准可以消除由于探测器响应效率不同产生的校准误差,补偿系数如图4所示。通过以上措施,经过严格的校准程序,多次校准统计平均,可得校准常数相对误差基本稳定在0.72%左右。其次,增大透射率曲线斜率。按照标准具现有设计参数(表1),可得锁定通道透射率函数斜率约为 $3.5 \times 10^{-4} \text{ MHz}^{-1}$,假设风速测量误差为1 m/s,则可计算出校准常数相对误差约为0.66%,小于实际相对校准误差0.72%,因此,为了达到风速测量精度要求,必须增大透射率函数的斜率。透射率函数与光束发散角 θ 、表面反射率 R 及自由光谱范围 R_{fs} 之间的关系为

$$F_L(\nu, R) = \int_0^{\theta_{\max}} \frac{T_0 d\theta}{1 + 4 \left(\frac{\sqrt{R}}{1-R} \right)^2 \sin^2 \left\{ \pi \left[\nu + \frac{R_{fs}(1-R)}{2\pi\sqrt{R}} \right] \cos \theta / R_{fs} \right\}^2} \quad (12)$$

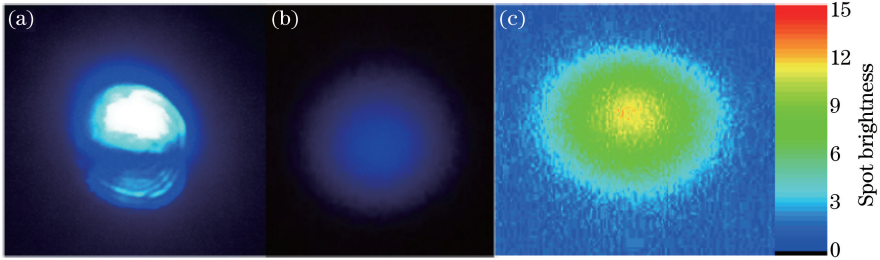


图3 激光脉冲光斑。(a) 未经过积分球;(b) 经过积分球;(c) 图3(b)光斑均匀性分析

Fig. 3 Laser pulse spot. (a) Before integrating sphere (IS); (b) after IS; (c) uniformity analysis of the spot in Fig. 3(b)

表1 典型的瑞利多普勒测风激光雷达(DWL) FPI参数

Table 1 Parameters of FPI for a typical Rayleigh Doppler wind lidar

Parameter	Value
Spacing	12.5 mm (12 GHz)
Full width at half maximum (FWHM)	1.7 GHz
Peak transmission	>60%
Reflectivity of plate at 355 nm	63.4%
Step of locking channel	25.15 nm
Locking channel separation	1.7 GHz
Step of filter channel 2	75.44 nm
Edge channel separation	5.1 GHz

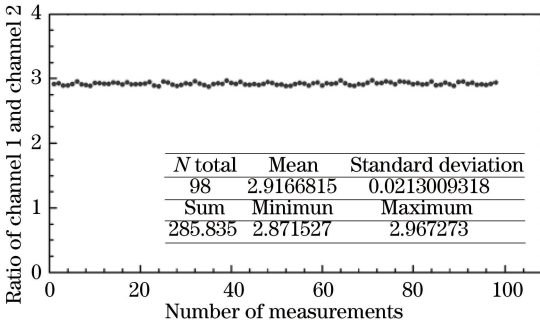


图4 探测器响应一致性校准补偿系数

Fig. 4 Calibration compensation coefficient for conformity of detector response

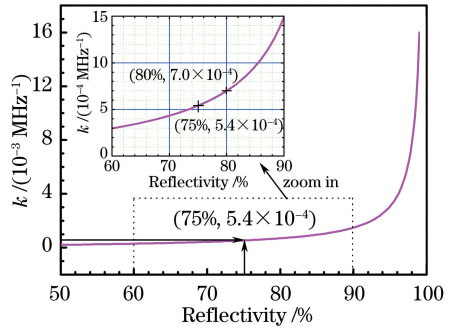


图5 FPI透射率曲线斜率与反射率的关系

Fig. 5 Slope of transmission function versus reflectivity of FPI

假设激光发射频率零点位于透射率曲线下降沿中点,由(12)式可知,透射率函数斜率的增加依赖于标准具表面反射率 R 的增加,二者关系如图5所示。由图可以看出,标准具表面反射率超过75%即可满足测量误差需求,综合考虑光学镀膜精度误差等影响因素,选择反射率80%可确保测量精度需要,如表2所示。

表 2 优化设计后的瑞利测风激光雷达 FPI 参数

Table 2 Parameters of optimized FPI for the Rayleigh wind lidar

Parameter	Value
Spacing	12.5 mm (12 GHz)
Peak transmission	>60%
Reflectivity of plate at 355 nm (locking filter excluded)	63.4%
FWHM of edge channel	1.7 GHz
Reflectivity of plate at 355 nm (locking filter)	80.0%
FWHM of locking channel	0.854 GHz
Step of locking channel	31.40 nm
Locking channel separation	2.1 GHz
Step of filter channel 2	75.44 nm
Edge channel separation	5.1 GHz

2.4 多普勒频率相对漂移(径向风速偏差)的分析与实时消除

两个边缘通道在无数多普勒频移的情况下对称分布于激光发射频率的两侧,锁定通道与边缘通道的相对位置固定不变,且测量中使用激光器和标准具闭环控制的频率锁定方法才能够准确测量大气后向散射信号的激光多普勒频移,进而准确测量大气回波信号多普勒频率。然而,实际测量中受到系统运行中平台的振动、平台内部空间空气流动和温度不均衡、激光发射频率瞬时抖动等因素的影响,很难保证 FPI 三个通道的相对位置不变,所以在每次径向测量后,都有可能形成多普勒频率相对漂移。

多普勒频率相对漂移会使径向风速产生整体漂移,形成对称性错位,影响水平风速反演。造成这种现象的原因在于每个径向风速均产生了直流偏差,且偏差不固定,随着每次径向测量发生变化,如图 6 所示。出现径向风速偏差时,利用探空气球可粗略地加以修正。图 6(a)、(b)是未经修正的径向风速及合成后的水平风速,径向风速出现了对称性错位,导致合成后的水平风速严重偏离实际风速走向。图 6(c)、(d)是利用探空气球修正后的径向风速和水平风速,在信噪比较强的地方出现了径向风速对称分布,雷达测量的水平风速与探空气球测量结果一致性良好。

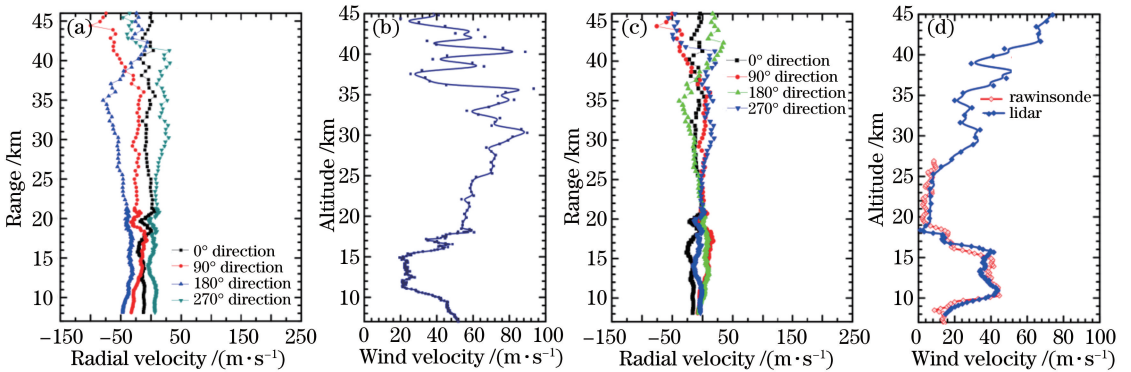


图 6 4 个对称方向连续测量的径向风速及合成水平风速

Fig. 6 Continuous measurement of radial wind velocity and synthesized horizontal wind velocity in four symmetric directions

采用无线电探空气球实时修正雷达数据是不能实现的,因此,需要一种瑞利激光雷达径向风速偏差的实时修正技术,克服激光多普勒相对频率漂移对系统测量精度的影响。

具体改进措施如下。1) 搭建 60 m 准密闭大气管道,采用标准压缩空气将管道内的气溶胶粒子冲洗干净,做好密闭措施,形成零风速的准静态大气分子环境,如图 7 所示。2) 激光器发射 355 nm 波长激光,分束出一小部分激光用于可调谐 FPI 与激光器之间的闭环控制及雷达在零风速大气分子环境下的多普勒频率漂移测量,大部分激光经扩束后射向大气。3) 用于雷达在零风速大气分子环境下测量的激光经过延时光纤(延时 3 个 bin 消除门控信号的影响)进入 60 m 管道系统,采集到的激光大气回波信号通过光纤耦合进入雷达系统的光学接收机中,探测系统的多普勒频率偏差。4) 雷达系统最小距离分辨率为 7.5 m,60 m 管道能

够接收 8 个 bin 信号。因受系统几何因子的影响,雷达系统激光发射和望远镜接收之间存在近 3 km 的无激光重叠区,即无自然界中大气回波信号,故系统最初采集到的 8 个 bin 信号是 60 m 管道内的大气回波信号,工作时序如图 8 所示。5) 利用 8 个 bin 的零风速大气环境信号反演系统的多普勒频率偏差,修正径向风速直流偏差,提高系统探测的稳定性和准确性。

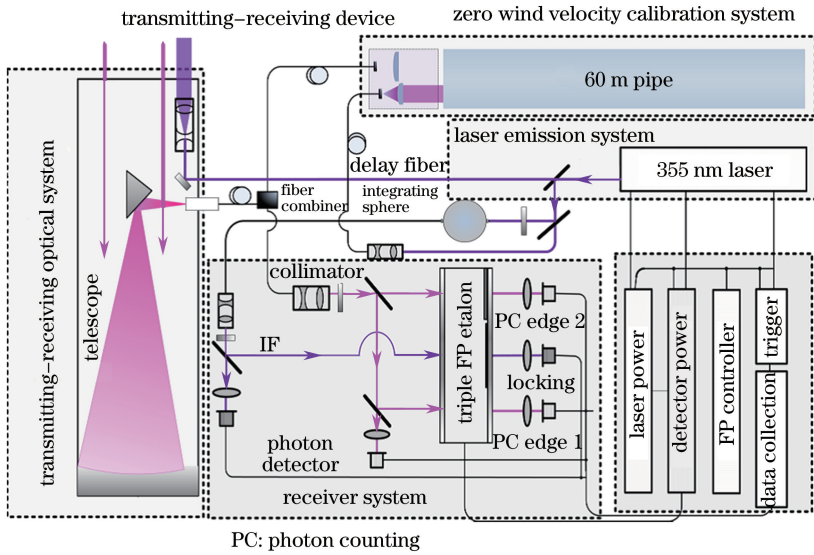


图 7 系统径向风速实时消除偏差示意图

Fig. 7 Schematic of real-time deviation elimination for radial wind velocity

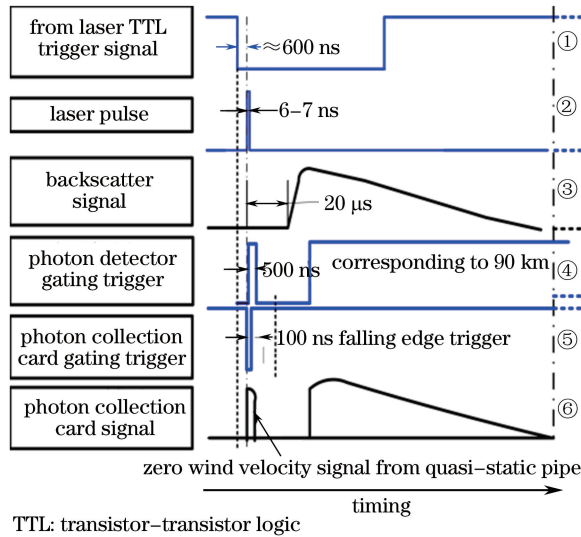


图 8 激光雷达零风速校准系统工作时序

Fig. 8 Sequence in time for zero wind velocity calibration system of wind lidar

改进后的系统在径向风速测量时可直接消除系统径向风速偏差,实时性好、精确度高。60 m 密闭管道是准静态大气分子环境,可在管道侧壁安装风机及风速计进行可控的非零风速校准。

3 中高层大气风场测量

利用改进的瑞利多普勒测风激光雷达系统进行中高层大气风场观测,得到局地大气风场系列观测数据,为更好地了解中高层大气变化规律、认识空间环境的区域变化特征,进行中高层大气科学研究等提供关键的数据支持。

3.1 对比实验

2015年10月—11月期间在甘肃酒泉卫星发射中心进行了中高层大气风场连续观测,低平流层激光雷达和60 km中高层激光雷达同时进行观测,并与探空气球数据进行对比,结果如图9所示。两台激光雷达时间分辨率为15 min,低平流层激光雷达探测高度为8~40 km,空间分辨率在25 km以下为200 m,25 km以上为1000 m;中高层激光雷达探测高度为15~60 km,空间分辨率在40 km以下为200 m,40 km以上为1000 m;探空气球探测范围为0~20 km,距离分辨率为200 m;激光雷达数据采集时间为2015年11月12日00:40和01:00,探空气球放飞时间为2015年11月12日19:15,上升速度为4 m/s,历时80 min。由图9可见,20 km以下两台激光雷达和探空气球结果一致性非常好,风速最大相差6.73 m/s,平均相差1.28 m/s,风向最大相差24.6°,平均相差2.65°;40 km以下两台激光雷达数据变化趋势吻合较好,但在40 km处出现较大偏差,主要是因为随着高度上升,低平流层激光雷达的信噪比减弱,误差相对较大。

实验期间激光雷达风场廓线探测结果还与MERRA分析结果及探空气球测量结果进行了对比,结果如图10所示。由图可见,风向廓线与MERRA分析结果十分吻合,变化趋势完全一致,风向最大相差26.4°,二者与探空气球在20 km高度处均有较大分歧;风速廓线与MERRA廓线变化趋势一致,但拐点比MERRA廓线低5 km,风速与探空气球结果一致性较好。

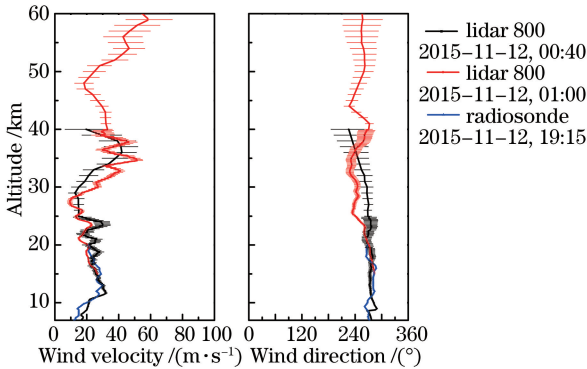


图9 60 km 瑞利多普勒激光雷达、低平流层激光雷达和探空气球对比实验

Fig. 9 Profiles of horizontal wind velocity and direction measured by the 60 km Rayleigh Doppler lidar compared with data from lower stratosphere lidar and radiosonde

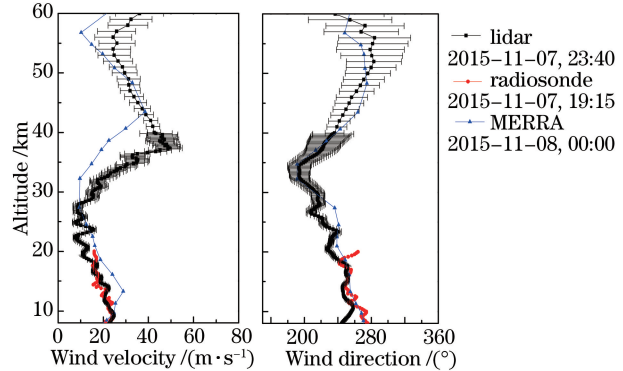


图10 瑞利多普勒测风激光雷达探测风速风向廓线与探空气球和MERRA的对比

Fig. 10 Profiles of horizontal wind velocity and direction measured by the Rayleigh Doppler lidar compared with data from radiosonde and MERRA

3.2 连续风场观测

2014年11月—12月在山西太原卫星发射中心连续测量风场一个多月,在天气条件允许的情况下每天从夜晚至早晨6:00进行测量,有效风速和风向分布如图11所示。由图可见,在25 km左右存在明显的弱风区,20 km以下、35 km以上风速相对较大,基本在50 m/s左右,25 km以下风向为西风,25 km以上为南风且风向波动相对较大。

2015年10月6日—2015年11月15日60 km瑞利测风激光雷达连续风场观测结果如图12所示(晴天夜间观测,时间分辨率为15 min)。由图可见,由于脉冲累积时间相对较短,天气晴好条件下信噪比较高时可以达到60 km高度探测;由风速、风向分布还可看出10月8日—10月18日在25 km高度附近存在明显弱风区,18日以后风速逐渐增强,11月30日—12月4日期间再次出现弱风区且高度下降至20 km左右,12月4日以后高度逐渐上升且速度增大;风向也有相应的较明显的变化,10月8日—10月18日25 km高度处由西北风逐渐转为东北风,11月30日—12月4日期间也存在较明显的波动,此后逐渐趋于稳定。图12为中高层雷达在12月1日—12月11日的连续风场分布,从这段时间的连续分布可以看出,20~35 km之间风速和风向均有持续的比较明显的波动,同时可以观测到20 km以下的风场变化。

由对比实验及探测结果分析可知,改进后的瑞利测风激光雷达可以实现中高层大气风场的探测,具备长期野外风场观测能力,提供稳定、可靠的实验基地应用于高空大气风场数据测定;满足临近空间科学研究对

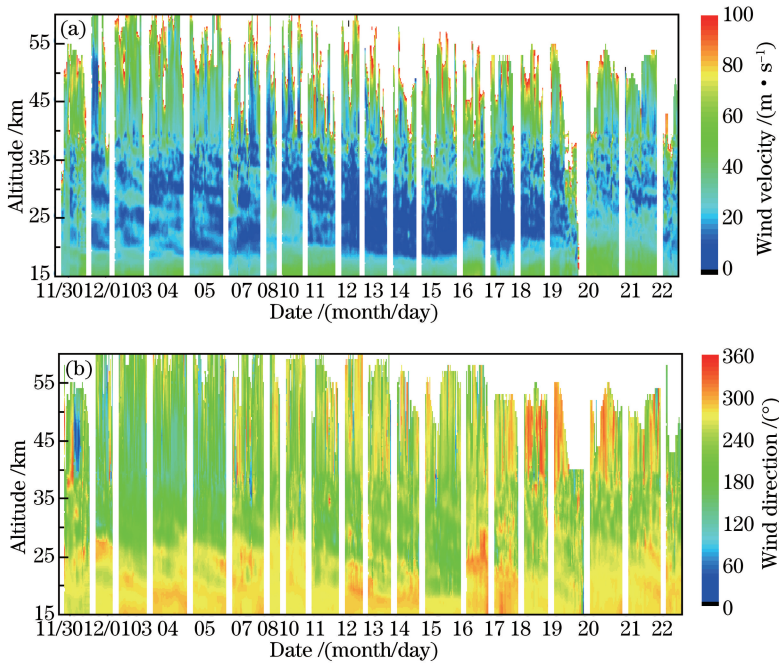


图 11 60 km 瑞利测风激光雷达水平风场连续观测结果

Fig. 11 Continuous horizontal wind field observed by the 60 km Rayleigh Doppler lidar

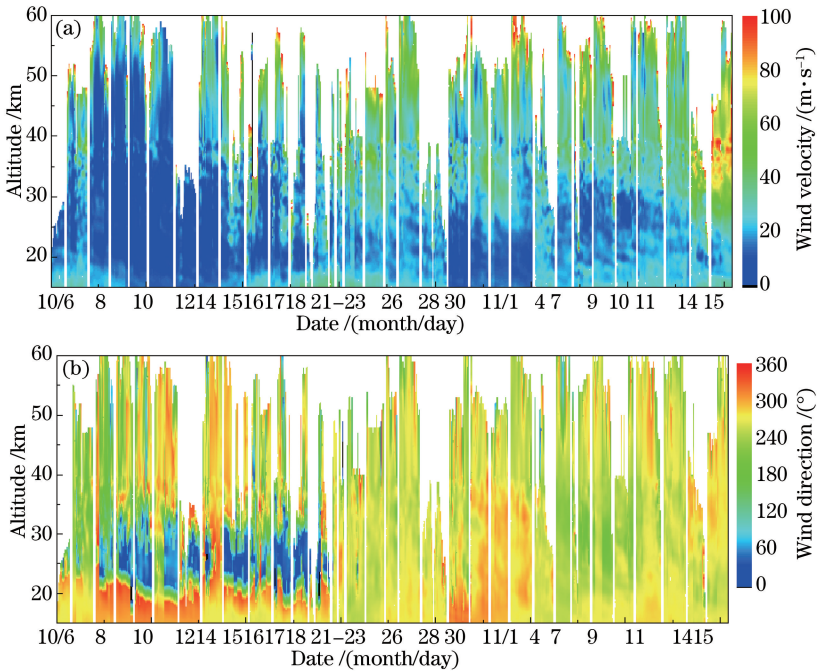


图 12 瑞利测风激光雷达中高层大气风场分布连续观测结果

Fig. 12 Horizontal wind field distribution in middle and upper atmosphere continuously observed by the Rayleigh Doppler lidar

中高层大气风场观测数据的迫切需要。

4 结 论

旨在改进瑞利测风激光雷达系统性能以提高中高层大气风场测量的精确度、稳定性和可靠性。通过提升接收机光学效率有效解决了现有系统紫外波段光学效率低的问题,提高了系统探测的信噪比。从理论上深入分析影响激光频率漂移锁定精度的机理,明确提出透射率曲线校准常数的校准误差和透射率曲线的光

谱分辨率是影响锁定精度的主要因素,并针对两个主要影响因素提出具体的改进措施。分析大气风场测量过程中产生零点偏移的原因,采用 60 m 准静态零风速管道实时取样修正两边通道接收的有多普勒频移的后向散射信号,消除由于零点偏移产生的测量误差,提高径向风速测量精度。利用改进的测风激光雷达系统进行中高层大气风场高时空分辨率探测实验研究,能够更好地了解局部空域大气变化规律、认识空间环境的区域变化特征,为中高层大气科学研究、全球大气活动、近地空间飞行和空间环境预警提供重要的数据支持。

参 考 文 献

- 1 Lü Daren, Chen Hongbin. Advances in middle atmosphere physics research[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 750-769.
吕达仁, 陈洪滨. 平流层和中间层大气研究的进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 750-769.
- 2 Jiang Guoying. The study of atmospheric waves and the distribution of temperature, wind in mesosphere and lower thermosphere[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2009: 48-59.
姜国英. 中高层大气波动及全球温度场、风场研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009: 48-59.
- 3 Korb C L, Gentry B M, Li S X, *et al.*. Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement[J]. Appl Opt, 1998, 37(15): 3097-3104.
- 4 Irgang T D, Hays P B, Skinner W R. Two-channel direct-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1145-1155.
- 5 Chanin M L, Garnier A, Hauchecorne A, *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. Geophys Res Lett, 1989, 16(11): 1273-1276.
- 6 von Zahn U, von Cossart G, Fiedler J, *et al.*. The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: Objectives, configuration, and performance[J]. Ann Geophysicae, 2000, 18(7): 815-833.
- 7 Hildebrand J, Baumgarten G, Fiedler J, *et al.*. Combined wind measurements by two different lidar instruments in the Arctic middle atmosphere[J]. Atmos Meas Tech Discuss, 2012, 5(10): 4123-4156.
- 8 Tang L, Shu Z F, Dong J H, *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler wind lidar based on double-edge technique[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(8): 726-731.
- 9 Xia H Y, Dou X K, Sun D S, *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.
- 10 Shen F H, Cha H, Dong J H, *et al.*. Design and performance simulation of a molecular Doppler wind lidar[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(7): 593-597.
- 11 Zhang F F, Dou X K, Shu Z F, *et al.*. Analysis on error of laser frequency locking for fiber optical receiver in direct detection wind lidar based on Fabry-Perot interferometer and improvements[J]. Opt Eng, 2014, 53(12): 124102.
- 12 Dou X K, Han Y L, Sun D S, *et al.*. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere[J]. Opt Express, 2014, 22(S5): A1203-A1221.