

引用格式: YANG Wuhao, ZHANG Pu, YANG Xinfeng, et al. Performance Optimization and Experimental Research of Continuous Wave Coherent Wind Lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0401004

杨昊昊,张普,杨新锋,等.连续模式相干测风激光雷达性能优化分析及实验研究[J].光子学报,2021,50(4):0401004

连续模式相干测风激光雷达性能优化分析及 实验研究

杨昊昊^{1,2},张普¹,杨新锋³,陈启敏^{1,4},赵卫¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 松山湖材料实验室,广东 东莞 523008)

(4 陕西师范大学,西安 710119)

摘要:基于风场探测的需求,采用 1 550 nm 波长连续激光种子源搭建了一套全光纤结构多普勒相干测风雷达系统。从雷达方程出发,对连续激光相干雷达载噪比方程和不同雷达收发望远镜聚焦位置下风速合成权重进行了分析。针对测风雷达要求设计了 5~200 m 的变焦激光收发望远镜模块。扩束系统采用伽利略折射式结构,发射光束准直下扩束比为 23,光学质量接近衍射极限。标定测试通过对旋转电机圆盘转速测量完成。转盘转速范围为-3 000 r/min 到+3 000 r/min,转盘直径为 26 cm。在视向速度多普勒频移分别为正向和负向时,雷达系统速度测量结果与通过圆盘转速计算值的相关系数为 0.998 与 0.993,标准差为 0.151 m/s 和 0.229 m/s。使用该测风激光雷达开展室外大气风速探测实验,取得了良好效果。

关键词:多普勒激光雷达;连续激光;相干探测;载噪比;本振光功率

中图分类号:TN958

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215004.0401004

Performance Optimization and Experimental Research of Continuous Wave Coherent Wind Lidar

YANG Wuhao^{1,2}, ZHANG Pu¹, YANG Xinfeng³, CHEN Qimin^{1,4}, ZHAO Wei¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523008, China)

(4 Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Based on the requirement of wind velocity measurement, an all-fiber doppler coherent wind lidar system is built with continuous wave laser source at band 1 550 nm. It is analyzed theoretically for the Carrier-to-noise ratio function of the continuous wave coherent lidar and the weighing function of the wind velocity at different focusing distance on the basis of the lidar equation. A vari-focusing optical antenna with the focusing distance range from 5 m to 200 m is designed and fabricated according to the requirement of wind detection. The optical beam expanding module adopts the Galilean refractive structure with the beam expanding ratio as 23 and the optical quality is close to the diffraction limit. The calibration test is executed

基金项目:中国科学院西部青年学者项目(No.Y929471233)

第一作者:杨昊昊(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光雷达技术。Email: yangwuhao2017@opt.cn

导师(通讯作者):张普(1979—),男,副研究员,博士,主要研究方向为半导体激光技术及激光探测技术。Email: zhangpu@opt.ac.cn

收稿日期:2020-10-19;录用日期:2020-12-01

<http://www.photon.ac.cn>

by using a rotating motor disk. The rotation speed range of the disk is from $-3\ 000$ r/min to $+3\ 000$ r/min. The diameter of the disk is 26 cm. While the doppler frequency shift of the line of sight velocity is positive and negative, the correlation coefficients between the velocity measurement data of the lidar system and the theoretical calculation result are 0.998 and 0.993. At the same time the standard deviations of velocity are 0.151 m/s and 0.229 m/s, respectively. The wind lidar is then used to measure the atmospheric wind speed. It works correctly to apply the wind lidar to measure the atmospheric wind velocity.

Key words: Doppler lidar; Continuous wave laser; Coherent detection; Carrier-to-noise ratio; Local oscillator power

OCIS Codes: 010.3640; 280.1350; 280.3640

0 引言

近年来,大气风场探测研究已经广泛影响着工业与科研等相关领域,鉴于其经济价值及社会意义,目前已成为国内外的研究热点。与其他的风场探测方法相比,相干激光测风雷达以激光作为探测光源,具备更高的时空分辨率和风速测量灵敏度,是一种不易受探测环境影响,能在各类气象条件下工作的风场探测技术^[1],在风力发电指导、气候变化预测、民航起降安全、火箭卫星发射等领域有广泛的应用前景^[2-3]。

激光测风雷达技术的研究始于二十世纪六、七十年代。1970年,美国航空航天局报道了基于连续波CO₂激光器的相干多普勒激光测风雷达系统在短距离的风速测量实验^[4],由于CO₂激光器存在功耗高、体积庞大、散热系统复杂等问题,限制了其作为光源的相干测风雷达的应用发展。二十一世纪以来,由于掺铒光纤器件及光纤技术的发展,全光纤结构的相干多普勒测风激光雷达得到了国内外的广泛关注。2006年,北海道大学FUJIYOSHI Y等报道了采用多普勒激光雷达进行大气边界层尘卷风气象的探测和追踪^[5]。2007年,三菱电机报道了一套实现多脉宽切换和光偏振自动控制的全光纤多普勒激光雷达系统,在非极端气象条件下的理论探测极限达到1 km,距离分辨率为150 m^[6]。2008年,法国航空航天中心报道了一款用于监测机场气旋变化的1.5 μm全光纤测风激光雷达^[7],并在之后多次对初代雷达产品进行改进和升级。此外,英国ZephIR公司、美国FiberTek公司、美国航天航空局、美国洛克希德马丁公司、丹麦科技大学、丹麦 Windar Photonics公司等都有相关技术及产品的报道。在国内,中国电子科技集团有限公司第二十七研究所于2010年报道了连续相干激光测风技术的研究成果,在用加湿器模拟风场条件下,实现了100 m距离内风速的初步测量^[8]。中国科学院上海光学精密机械研究所于2014年报道了一款用于大气边界层范围内风速探测的1.54 μm全光纤激光雷达系统^[9]。中国海洋大学于2016年报导了用于风能研究的1.55 μm全光纤脉冲相干测风激光雷达,并展示了三种二维扫描算法的风场反演结果^[10]。2019年,中国科学技术大学报道了采用1.55 μm波长全光纤相干激光风速仪,可以实现近距离80 m内风速测量,风速测量范围下限约为0.915 m/s,与脉冲相干测风设备对比后测试结果相关系数达到0.997^[11]。

目前,国内关于全光纤相干测风激光雷达的研究主要集中在脉冲模式的测风激光雷达,对于连续模式工作的测风激光雷达研究相对较少。连续相干激光雷达在近距离风速探测时不存在脉冲相干激光雷达的盲区问题,对中近距离的风场探测更具优势,在风力发电等领域具有重要的应用前景。本文分析了影响连续测风激光雷达性能的有关因素,设计研制了连续变焦镜头,使用波长为1 550 nm的连续激光作为种子源,基于相干探测技术原理,采用全光纤结构设计并搭建了一套速度测量系统,通过标定测试讨论了雷达系统的性能,并开展了室外100 m距离的风速测量。

1 系统工作原理

图1为全光纤连续相干激光雷达系统的原理图。全光纤相干激光雷达工作时,首先由激光器种子源输出1 550 nm连续激光,通过1×2保偏光纤分束器以能量比90/10分束为两部分。能量比占10%的部分激光作为相干处理的本地光输入到2×2保偏光纤耦合/分束器中;能量比占90%的部分激光通过声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)对其进行 f_{AOM} 为80 MHz的移频。经过移频后的连续激光在掺铒光纤放大器中放大后,通过同轴激光雷达的收发望远镜完成探测激光的发射和接收。望远镜系统接收的后向散射信号会携带与大气中气溶胶粒子运动速度相关的多普勒频移信号 f_D ,其与被测目标的探测光束视向方向速

度 V_{Los} 的关系为

$$f_D = 2V_{\text{Los}}/\lambda \quad (1)$$

式中, λ 为探测激光的中心波长, 即 1 550 nm。收集到的后向散射信号进入 2×2 保偏光纤耦合/分束与本振光进行相干处理, 由平衡探测器转换为电信号, 经过 A/D 采集卡和后续软件分析出多普勒频移信号及对应的速度。系统选用器件的主要参数如表 1 所示。

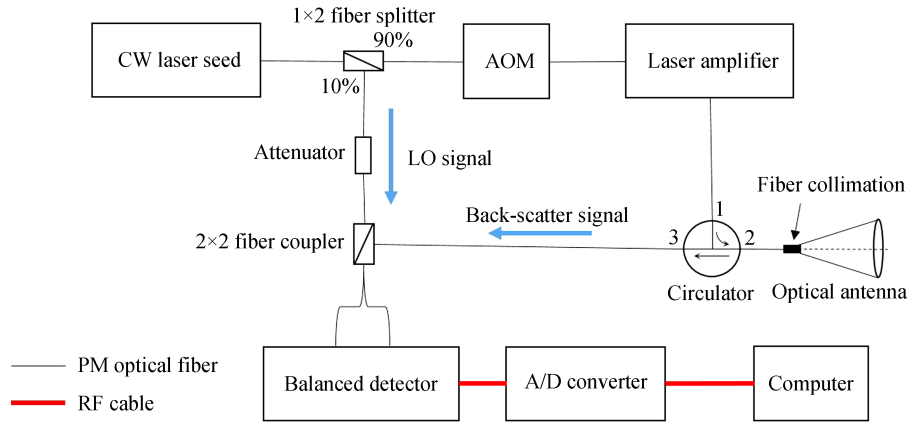


图 1 全光纤连续相干激光测风雷达系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the all-fiber CW coherent wind lidar system

表 1 全光纤相干测风雷达器件主要参数

Table 1 Main parameters of the all-fiber coherent wind lidar

	Parameter	Value
Laser source	Wavelength	1 550 nm
	Output power	200 mW
	Line width	30 kHz
	AOM shifted frequency	80 MHz
	Relative intense noise (>5 MHz)	-150 dB
Balanced photo detector	Max responsivity at 1550nm	1 A/W
	3 dB bandwidth	150 MHz
	CMRR	35 dB
	Transimpedance gain	5.1×10^4 V/A
	Receiver transimpedance	100 Ω

1.1 雷达系统天线效率及载噪比分析

对于连续相干测风激光雷达系统, 雷达方程公式^[12]为

$$P_r = \eta_{\text{total}} \eta_a(R) P \beta \lambda \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{\pi D_{\text{tele}}^2}{4 \lambda F} \right) \right] \quad (2)$$

式中, η_{total} 表示系统除了天线效率以外的总效率, $\eta_a(R)$ 表示雷达系统天线效率, P 表示发射的连续激光功率, β 表示大气后向散射系数, λ 表示激光工作波长, D_{tele} 表示激光雷达望远镜发射/接收口径, F 表示雷达探测激光束的聚焦距离。

天线效率的计算参考了 Siegman 天线理论, 在探测目标位置处的天线效率由发射光与本振光的归一化功率积分得到^[13]。利用后向传播本振原理 (Back-Propagated Local Oscillator, BPLO) 计算方法得到的雷达系统天线效率 $\eta_a(R)$ 是关于探测距离 R 和光束截断比 D_0/D_{tele} 的函数^[14-15], 其中 D_0 为发射高斯光束的在望远镜位置处的 e^{-2} 直径, 在探测距离为几十米至几百米范围内, 当截断比 D_0/D_{tele} 取 0.823 时, BPLO 计算方法得到的天线效率 $\eta_a(R)$ 达到最大值, 见图 2。

相干激光雷达用载噪比 (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) 描述相干信号与噪声之比。载噪比公式为

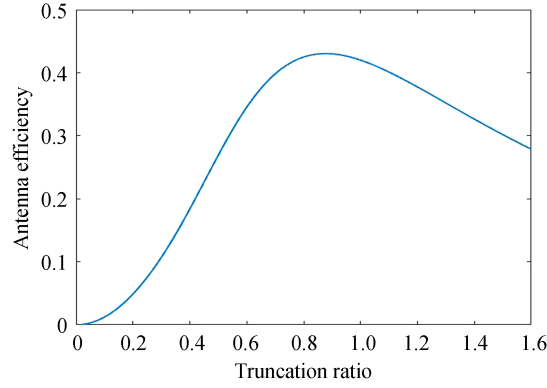


图2 天线效率随截断比变化曲线

Fig. 2 Curve of antenna efficiency versus truncation ratio

$$\text{CNR} = \frac{\langle i_c^2(t) \rangle}{\langle i_n^2(t) \rangle} \quad (3)$$

式中, $\langle i_c^2(t) \rangle$ 和 $\langle i_n^2(t) \rangle$ 分别表示信号的相干信号电流的平方平均值和噪声电流的平方平均值。对于连续相干激光雷达系统, 相干信号电流表示为

$$\langle i_c^2(t) \rangle = 2R_d^2 P_{LO} \eta_{\text{total}} \eta_a(R) P \beta \lambda \left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{\pi D_{\text{tele}}^2}{4\lambda F}\right) \right] \quad (4)$$

式中, R_d 表示探测响应度, P_{LO} 表示本振光功率, 其他符号含义与式(2)中相同。

雷达系统噪声的主要来源有三个, 分别是散粒噪声 $i_{\text{SN}}(t)$ 、热噪声 $i_T(t)$ 和相对强度噪声 $i_{\text{RIN}}(t)$, 噪声公式为

$$\begin{cases} i_{\text{SN}}^2(t) = 2eR_d P_{LO} B \\ i_T^2(t) = \frac{4kTB}{R_L} \\ i_{\text{RIN}}^2(t) = \text{RIN}(f) P_{LO}^2 B \end{cases} \quad (5)$$

式中, e 表示元电荷, k 表示波尔兹曼常数, T 表示探测器负载温度, R_L 表示探测器接收阻抗, $\text{RIN}(f)$ 表示相对强度噪声函数, B 表示接收机的噪声等效带宽。因此系统噪声电流为

$$i_n^2(t) = i_{\text{SN}}^2(t) + i_T^2(t) + i_{\text{RIN}}^2(t) = \left[2eR_d P_{LO} + \frac{4kT}{R_L} + \text{RIN}(f) P_{LO}^2 \right] B \quad (6)$$

因此对于连续激光雷达系统, 载噪比表示为

$$\text{CNR} = \frac{\langle i_c^2(t) \rangle}{\langle i_n^2(t) \rangle} = \frac{2R_d^2 P_{LO} \eta_{\text{total}} \eta_a(R) P \beta \lambda \left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{\pi D_{\text{tele}}^2}{4\lambda F}\right) \right]}{\left[2eR_d P_{LO} + \frac{4kT}{R_L} + \text{RIN}(f) P_{LO}^2 \right] B} \quad (7)$$

由载噪比式(7), 在雷达系统器件参数和工作距离确定以后, 本振光功率成为影响雷达系统载噪比的主要参数。在信号相干检测中, 本振光功率对外差信号有放大作用; 同时, 由式(5), 噪声项中散粒噪声和相对强度噪声也会由于本振光功率的增加而放大。在进行拍频时, 通过可调衰减器对进入 2×2 保偏光纤耦合/分束的本振光信号进行适当衰减, 以提高平衡探测器差模 RF 信号质量。模拟本振光能量对载噪比影响关系如图3所示。计算结果表明本系统最佳本振光功率在 $510 \mu\text{W}$ 附近。

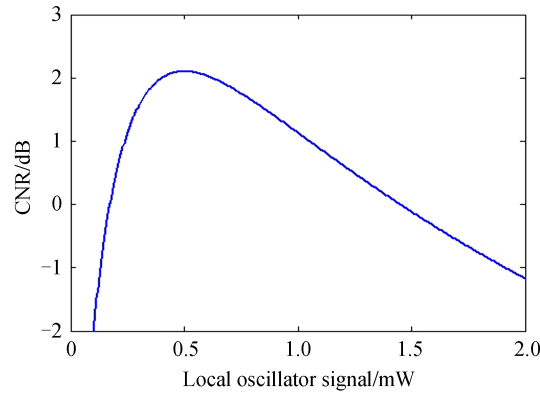


图3 系统载噪比随本振光功率变化曲线

Fig. 3 Curve of CNR versus local oscillator signal power

1.2 视向风速探测权重分析

连续激光雷达在空间风速测量中,各个位置处的风速情况都会对视向风速的合成产生影响。由于望远镜发射的光束为高斯光束,不同位置风速的权重函数通常用洛伦兹函数来描述^[11,16-17],表示为

$$W(R) = \frac{\kappa}{R^2 + \left(1 - \frac{R}{F}\right)^2 \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

式中, $W(R)$ 表示距离雷达系统探测距离 R 处位置风速所占权重, κ 为归一化常量, ω_0 表示高斯光束束腰半径。 $\pi\omega_0^2/\lambda$ 即为发射光束的瑞利长度。通过式(8),当探测激光束聚焦距离为40 m、80 m、120 m、160 m时,以探测距离 R 为变量得到的风速权重 $W(R)$ 结果如图4所示。对于连续激光测风雷达系统,以权重函数从峰值处下降3 dB的距离范围为雷达系统的探测距离。在视向风速合成时探测距离范围内的风速信号权重高,对风速合成的贡献最大。通过图4可知,随着聚焦距离的变大,该工作状态下的雷达系统探测长度也变大,会导致视向速度合成时存在多个速度分量,相应的距离分辨率会降低。相比于脉冲激光测风雷达通过脉冲时间门作为鉴别距离的方式,连续相干雷达系统更适合在中近距离下工作,不存在探测盲区。

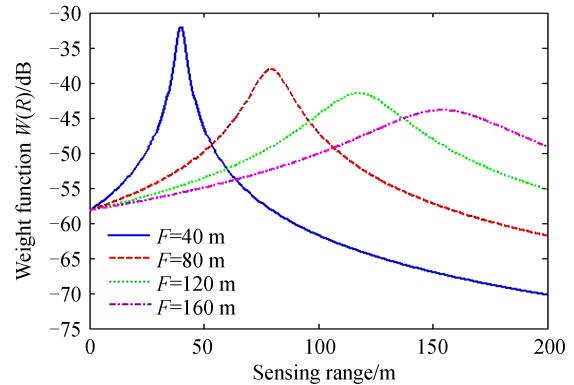


图4 不同聚焦距离下权重函数随探测距离变化曲线

Fig. 4 Curve of weight function versus sensing range at different focusing distance

2 实验测试及讨论

2.1 变焦光学收发望远镜系统设计

研制的测风激光雷达光学收发望远镜采用折射式伽利略型结构,通过正负透镜配合以矫正望远镜系统像差。系统输入光束口径2.2 mm,输出光束口径50 mm,扩束比为23,镜头采用石英玻璃加工制备。通过调节透镜间距可以控制出射激光在不同距离处实现光束聚焦。图5给出了望远镜系统在准直下各视场的发散角,系统在准直后在各视场发散角小于 $2.4'$ 。图6中系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线接近衍射极限,像质优良。镜头波前误差小于 $\lambda/20$ 。图7给出了望远镜系统在不同光束聚焦距离下的点列图,可以看出,聚焦距离在100 m时,光斑直径小于0.7 mm;聚焦距离在200 m时,光斑直径小于1 mm。

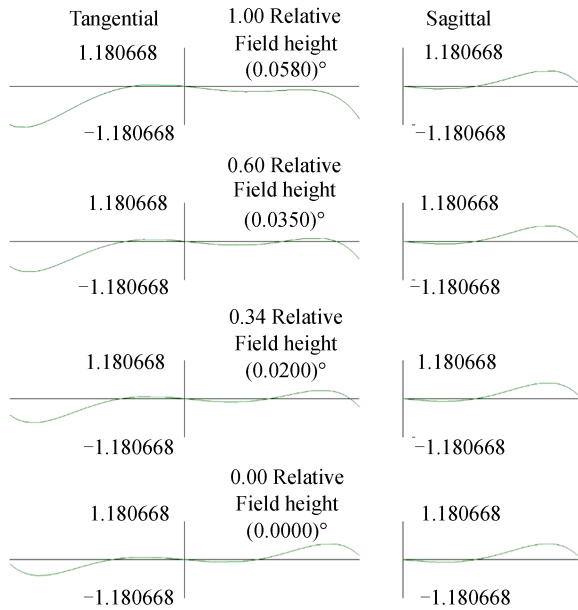


图5 望远镜系统准直后各视场发散角
Fig. 5 Divergence angle of the telescope after collimating at different field of view

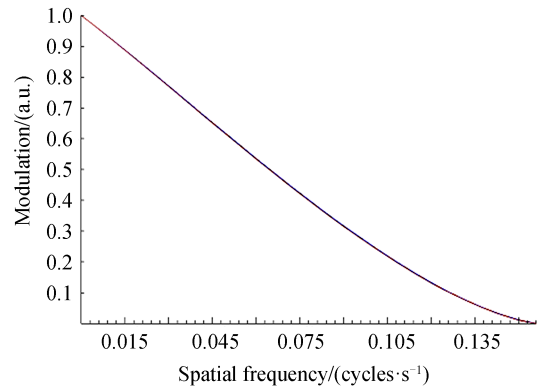


图6 望远镜系统MTF曲线图
Fig. 6 MTF diagram of the telescope in different field of view

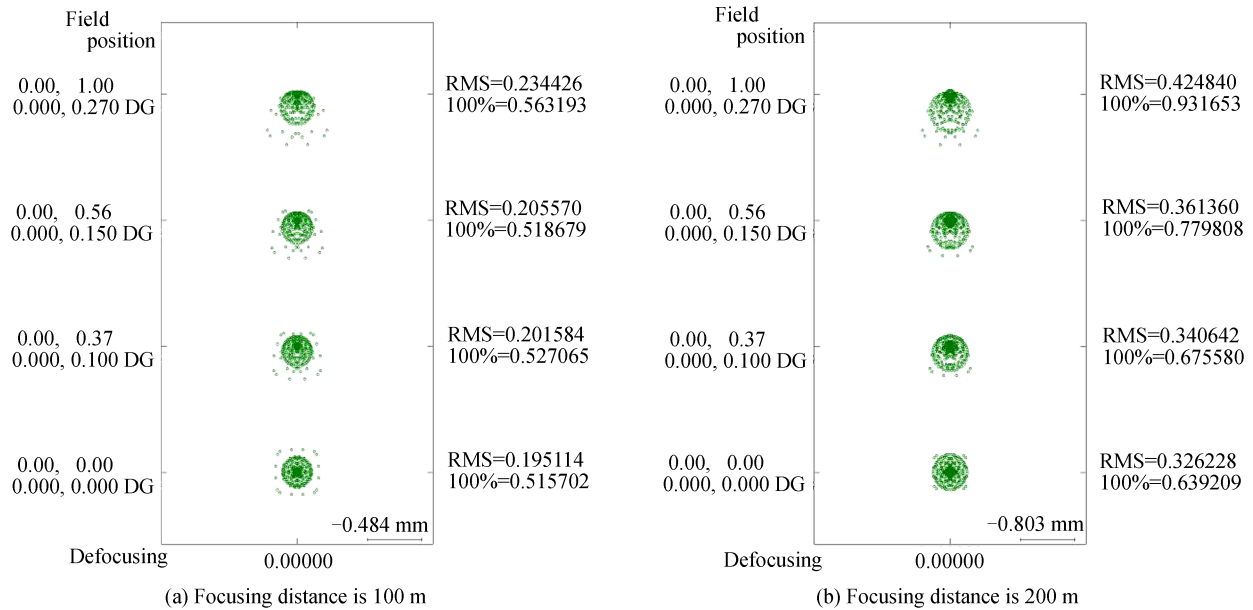


图7 系统聚焦距离为100 m,200 m时的点列图
Fig. 7 Spot diagrams of focusing distance at 100 m and 200 m

雷达望远镜接收大气后向散射信号后通过光束耦合器件将信号光从望远镜输入到光纤中,保偏光纤纤芯直径 $11\ \mu\text{m}$,纤芯折射率为 1.448,数值孔径 NA 为 0.13。采用偶次非球面镜作为天线系统耦合透镜,耦合透镜有效焦距 $11.3228\ \text{mm}$,采用 ZEMAX 仿真软件计算了在该耦合透镜下光纤接收端面处包围能量的情况,如图 8 所示。在计算半径为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 内,偶次非球面镜的包围能量为 78%,包围能量曲线在 $5\ \mu\text{m}$ 附近有一段平坦区域,可以提高光纤与器件装配时的横向误差范围。

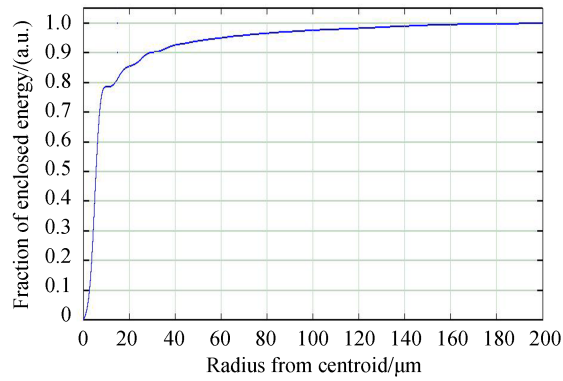


图8 偶次非球面耦合镜包围能量图

Fig. 8 Enclosed energy of the even-aspheric coupling lens

2.2 硬目标标定实验

基于设计的收发望远镜系统,搭建了测风雷达样机,如图9所示。为了验证测风激光雷达系统性能,通过对伺服电机旋转圆盘速度测试进行测风激光雷达系统标定。实验采用交流伺服电机带动转盘匀速旋转作为测速目标,电机动力为恒力矩输出,可以保证在设定转速内,均能输出稳定的要求转矩,使转速保持稳定。转速精度误差为0.5 r/min。转盘的半径为13 cm,测量的视向方向速度 V_{Los} 与转盘实际切向线速度 V 的夹角 φ 为 36° ,如图10所示。实验中设置转盘转速为范围从 -3000 r/min 至 $+3000$ r/min,转速步进为 100 r/min。转盘转速对应的切向线速度范围为 -40.82 m/s 至 $+40.82$ m/s。分别测试了多组速度数据,图11展示了部分电机转速下的多普勒信号测试结果。



图9 搭建的连续相干测风激光雷达系统

Fig. 9 Picture of CW coherent wind lidar

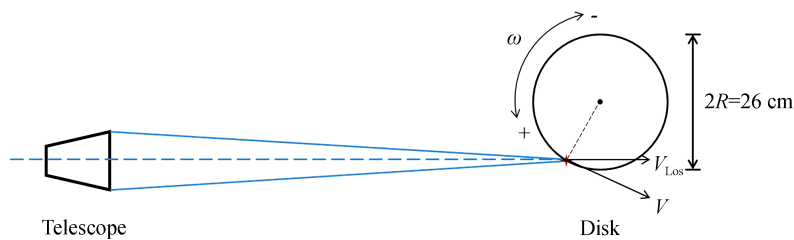


图10 系统标定测试示意图

Fig. 10 Schematic of the calibration experimental system

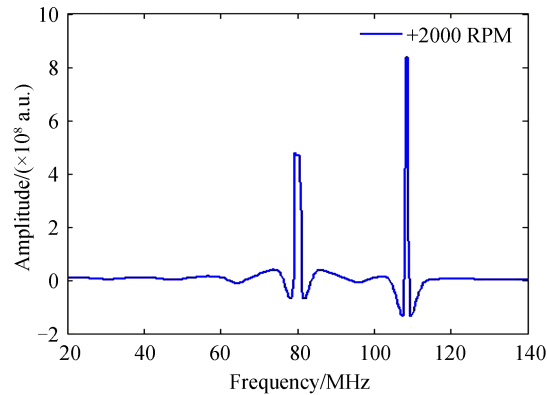


图 11 在电机转速为 2 000 r/min 时测风激光雷达实验测试结果
Fig. 11 Experimental results at the motor rotation speed of +2 000 r/min

图 12 展示了通过转盘转速计算的视向速度值与通过探测多普勒频移得到的视向速度之间的对比,多普勒频移的正负代表了探测目标运动的方向。对测试数据进行线性拟合以比较其相关性,正负多普勒频移下的速度测量结果都取绝对值计算,图中离散点为实验测试数据,直线为线性拟合结果。当多普勒频移为正时,雷达测量结果与转盘转速计算的视向速度的相关系数为 0.998,标准差为 0.151 m/s;当多普勒频移为负时,雷达测量结果与转盘转速计算的视向速度的相关系数为 0.993,标准差为 0.229 m/s。

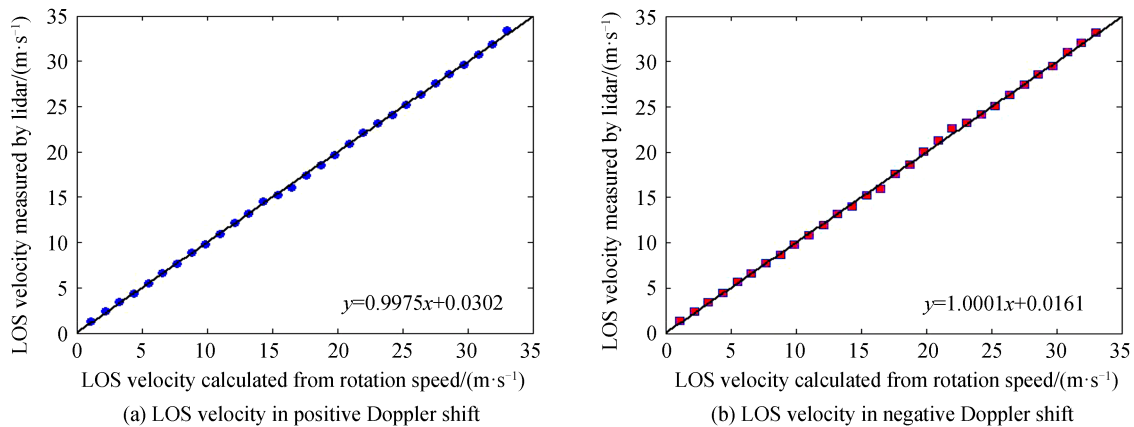


图 12 视向速度探测结果与理论计算结果对比
Fig. 12 LOS velocities measured by LIDAR system compared with theoretical calculation results

2.3 室外大气风速测试结果

大气风速测量实验于 2020 年 7 月 31 日下午在西安市西南进行,实验天气为阴天,将激光雷达系统设置于室外空旷区域。调整望远镜系统使探测光束聚焦于激光雷达前方 100 m 处,望远镜与水平面仰角约 10° ,分别对坐标方位角 79° 和 180° 方向进行视向风速测试。望远镜朝方位角 79° 方向进行风速探测时,拍频信号多普勒频移为正;望远镜朝方位角 180° 方向进行风速探测时,拍频信号多普勒频移为负。图 13 为坐标方位角 79° 方向风速测试时拍频信号多普勒频移部分结果。由于线性风切变和随机湍流以及径向和横向散射体天线模式的因素,在接收机端风速的多普勒谱分布会呈现高斯线型。由于室外风速测试中,风速不会保持恒定,风速及风向在测试时间内都会有一定波动及变化,因此相应的多普勒频移会发生变化,可以看出频谱的中心频率有明显差别。图 14 为在坐标方位角 79° 和 180° 两个方向上一段时间内的风速测试结果,图中风速取绝对值进行比较。视向风速测量结果最大值为 6.51 m/s,由于采用单路望远镜对风速进行探测,实际风速方向与望远镜视向存在一定夹角,实际风速会大于激光雷达视向风速探测结果。由于实验条件限制,目前尚无法开展室外大气风场对比测试实验。下一步将与其它单位合作,以已标定的测风仪器作为参照,进

行风场测试对比实验研究。

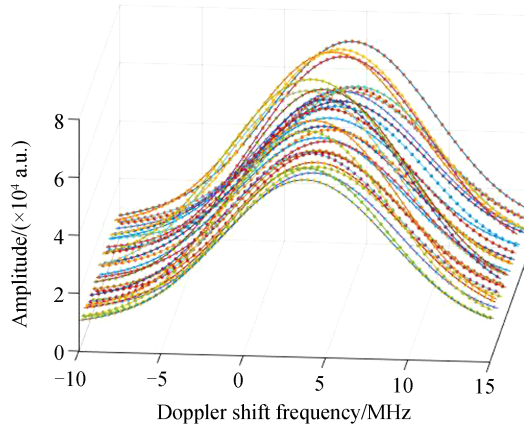


图 13 风速测试多普勒频移测量结果

Fig. 13 Experimental results of the Doppler shift frequency in wind velocity tmeasurement

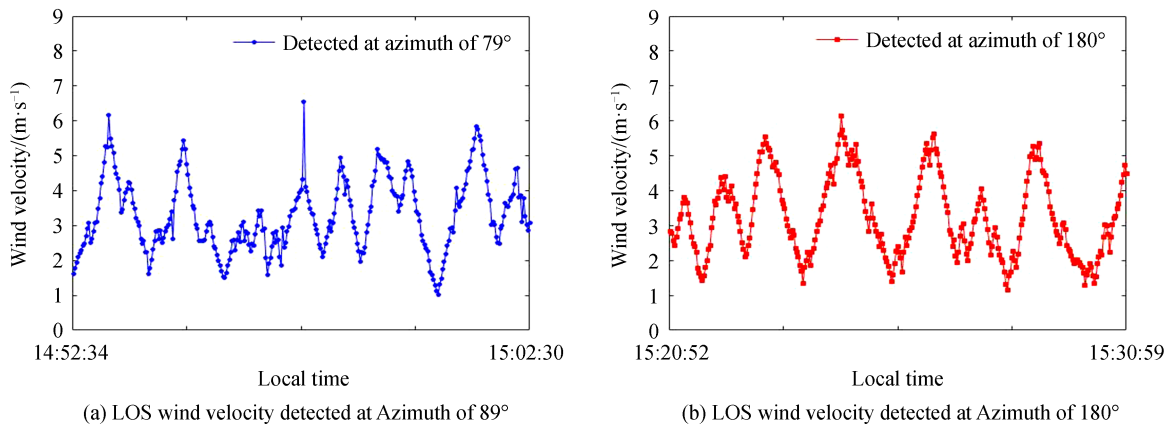


图 14 不同方位角下大气视向风速测试结果

Fig. 14 LOS wind velocity experimental results at different azimuth

3 结论

本文对影响测风激光雷达性能的关键因素进行了定量分析,为测风雷达设计提供了理论指导。基于风速探测需求,设计并搭建了一套 1 550 nm 波长连续相干测风雷达系统。为了保障系统的可靠性、减少装配的影响,系统采用全光纤结构设计。光学天线采用同轴折射型结构设计,准直后各视场发散角小于 2.4", 聚焦范围可以在 5~200 m 范围内调整。对不同转速的旋转电机圆盘进行转速测试完成雷达系统标定,当视向速度多普勒频移为正时,测量结果与通过圆盘转速计算值的相关系数为 0.998,标准差为 0.151 m/s;当视向速度多普勒频移为负时,测量结果与通过圆盘转速计算值的相关系数为 0.993,标准差为 0.229 m/s。最后使用该测风雷达系统进行室外大气风速测试,对 100 m 距离风速测试结果符合实际情况。后续将展开激光雷达风场反演系统的开发,以实现三维风场信息的探测,并以第三方标准测风仪器为参考,进行室外风速测试对比研究。

参考文献

- [1] XING Xiaoqing, LU Wei, ZHUANG Zibo. Coherent Doppler lidar signal processing based on maximum likelihood estimation[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2018, 36(2):9-13.
邢晓晴, 陆威, 庄子波. 基于最大似然估计的相干多普勒雷达信号处理[J]. 中国民航大学学报, 2018, 36(2):9-13.
- [2] ZHOU Yanzong, WANG Chong, LIU Yanping, et al. Research progress and application of coherent wind lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 9-26.
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2):9-26.
- [3] LIU Zhengliang, BARLOW J, CHAN Pakwai, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind lidars

- [J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 11212522.
- [4] HUFFAKER R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement[J]. Applied Optics, 1970, 9(5): 1026-1039.
- [5] FUJIYOSHI Y, YAMASHITA K, FUJIWARA C. Visualization of streaks, thermals and waves in the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Visualization, 2006, 9(4): 359-359.
- [6] KAMEYAMA S, ANDO T, ASAKA K, et al. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [7] DOLFI-BOUDEVRE A, AUGERE B, BESSON C, et al. 1.5 μm all fiber pulsed lidar for wake vortex monitoring[C]. Conference on Lasers & Electro-optics, IEEE, 2008.
- [8] LI Dongmei, ZHENG Yongchao, PAN Jingyan, et al. Index system of coherence Doppler wind lidar[J]. Optics and Technology, 2010, 36(6): 880-884.
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 880-884.
- [9] DIAO Weifeng, ZHANG Xin, LIU Jiqiao, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 71-74.
- [10] WU Songhua, LIU Bingyi, LIU Jintao, et al. Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar [J]. Optics Express, 2016, 24 (10): A762-A780.
- [11] JIANG Shan, SUN Dongsong, HAN Yuli, et al. Design and test of laser anemometer based on continuous wave coherence detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 1203008.
蒋杉, 孙东松, 韩於利, 等. 连续相干探测激光风速仪设计与测试[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 1203008
- [12] LINDELOW P. Fiber based coherent lidars for remote wind sensing[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2008.
- [13] SIEGMAN A E. The antenna properties of optical heterodyne receivers[J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(10): 1350-1356.
- [14] FUJII T, FUKUCHI T. Laser remote sensing[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2005: 472-523.
- [15] JIA Xiaodong, SUN Dongsong, SHU Zhifeng, et al. Optimal design of the telescope in coherent Lidar and detection performance analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3):0301001.
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3):0301001.
- [16] FREHLICH R, KAYAYA M. Coherent laser radar performance for general atmospheric refractive turbulence[J]. Applied Optics, 1991, 30(36): 5325-5352.
- [17] HU Qi. Semiconductor laser wind lidar for turbine control[D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2016.