

# 高光学效率相干多普勒激光雷达的测风性能分析与测试

周安然<sup>1</sup>, 韩於利<sup>1</sup>, 孙东松<sup>1</sup>, 韩飞<sup>1</sup>, 唐磊<sup>2</sup>, 蒋杉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230031;

2. 合肥师范学院 物理与材料工程学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 近期研发了一套高光学效率全光纤化相干激光雷达设备, 可用于风场的实时探测。该相干激光雷达工作于 1.55  $\mu\text{m}$  波段, 望远镜直径 50 mm, 时间分辨率和距离分辨率分别是 1 s 和 30 m。系统集成光纤结构的接收单元、可编程扫描模式的两轴扫描头及一个用于实时信号处理的多核数字信号处理器。对系统的测风性能进行了理论分析并同实验结果进行了对比, 验证了系统测量距离达到 5 km。之后, 通过将激光雷达与超声波风速仪数据进行对比验证系统的测量精度。经过数据分析水平风速相关系数达 0.980, 标准差为 0.235 m/s, 风向数据相关系数达 0.993, 标准差为 3.105°。表明该相干激光雷达具有优良的性能, 可以应用于大气边界层内的风场探测。

**关键词:** 相干激光雷达; 载噪比; 风场测量; 光学效率

中图分类号: TN958; TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1105006

## Analyzing and testing of performances of high optical efficiency CDL in wind sensing

Zhou Anran<sup>1</sup>, Han Yuli<sup>1</sup>, Sun Dongsong<sup>1</sup>, Han Fei<sup>1</sup>, Tang Lei<sup>2</sup>, Jiang Shan<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China;

2. School of Physics and Material Engineering, Hefei Normal University, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Recently a high optical efficiency all-fiber coherent Doppler lidar (CDL) system was developed to achieve real-time measurements of wind fields. The coherent lidar worked on 1.55  $\mu\text{m}$  band, the diameter of the telescope was 50 mm, the temporal and spatial resolution were 1 s and 30 m respectively. In addition, the system consisted of a fiber-based optical transceiver unit, a 2-axis scanner which can program scanning scheme, and a multicore digital signal processor (DSP) for real-time signal processing. Theoretical performances of the system in wind sensing were estimated and compared with experimental results, it verified that the measurement range was 5 km. In comparative experiment, the system and ultrasonic anemometer measured wind field simultaneously. Measured data were compared and analyzed, the result were listed as follow: correlation coefficient of wind speed was 0.980 and standard deviation was 0.235 m/s; correlation coefficient of wind direction was 0.993 and standard deviation was 3.105°. The results prove that the system has excellent performance, can be widely used for wind detection in atmospheric boundary layer.

**Key words:** coherent lidar; CNR; wind measurement; optical efficiency

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(41774193, 41574180)

作者简介: 周安然(1991-), 男, 博士生, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: anranzh@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光遥感方面的研究。Email: sds@ustc.edu.cn

## 0 引言

相干多普勒激光雷达(CDL)测风速是一种高时空分辨率、高精度的遥感风速测量方法,能在晴空条件下有效工作。精确的实时大气风场观测有助于提高航天航空安全性<sup>[1]</sup>、提高天气预报准确性<sup>[2]</sup>、优化机场起降密度<sup>[3]</sup>、提高风能发电效率<sup>[4]</sup>。因此脉冲相干多普勒激光雷达技术受到了国内外研究人员的重视。

最早的相干多普勒雷达由 R. M. Huffaker 等人于 1970 年研制,系统采用 10.6 μm 连续 CO<sub>2</sub> 激光器作为光源,用于机场跑道上空飞机尾流的跟踪检测<sup>[5]</sup>。之后研制的使用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器的相干多普勒雷达,用于为商用航线提供晴空湍流的探测,并开始了机载相干多普勒激光雷达的应用。从 20 世纪 80 年代开始,相干多普勒激光雷达普遍采用了固体激光器作为发射源。1987 年, T. J. Kane 等首次报导了基于 Nd:YAG 激光器的 1.06 μm 相干激光雷达<sup>[6]</sup>。近年来随着大模场(LMA)光纤在掺铒光纤放大器(EDFA)中的应用,EDFA 输出的激光脉冲能量和峰值功率逐步提高<sup>[7]</sup>。使用 EDFA 作为光源的脉冲相干多普勒激光雷达有如下优点:(1)工作波长在 1.55 μm 波段激光的对人眼的最大允许曝光量是 2.1 μm 波段的 10 倍,高出 1.06 μm 波段 5 个数量级<sup>[8]</sup>;(2)商品化的光纤器件已发展成熟,可以直接使用成品降低成本;(3)运行稳定,使用周期长,维护方便。日本三菱电机有限公司较早开始研制全光纤脉冲相干激光雷达并于 2005 年研制出商用化的 LR-05FC 系列产品<sup>[9]</sup>。目前国内也有 1.55 μm 脉冲相干多普勒激光雷达的报道。2013 年中国电子科技集团公司第 27 研究所研制了全光纤相干测风雷达,并通过对比实验验证了风速的精度达到 0.78 m/s<sup>[10]</sup>。2014 年,中国科学院上海光学精密机械研究所报导了用于边界层风廓线探测的 1.54 μm 全光纤相干测风雷达<sup>[11]</sup>,中国海洋大学报导了其研制的用于风能研究的 1.55 μm 全光纤相干测风激光雷达<sup>[12]</sup>。

文中介绍了一种全光纤相干多普勒激光雷达系统。整套系统采用人眼安全的 1.55 μm 脉冲光作为光源;集成了二维扫描头,可以自定义扫描模式完成对特定区域的探测;集成雷达信号的接收与数据处理系统以实时显示探测结果。通过仿真系统参数及信

号模拟,分析了系统的测量距离,并进行了实验验证。之后在深圳市气象局进行了对比实验验证了测量的准确性。

## 1 系统原理与探测性能分析

### 1.1 系统原理

系统的原理图如图 1 所示。由种子光源产生的 1.55 μm 连续光经保偏光纤分束器分为两路:一路被声光调制器(AOM)调制为有着 80 MHz 频移,重复频率 10 kHz 的脉冲光;一路作为本振光进入 2×2 保偏光纤耦合器。调制后的脉冲光经 EDFA 放大,通过望远镜发射到大气中。发射激光与大气中气溶胶粒子等产生后向散射由同一望远镜接收,接收的回波信号和发射信号有着  $f_d$  的多普勒频移。探测的径向风速  $v_r$  可以由  $f_d = 2v_r/\lambda$  计算得出,其中,  $\lambda$  是激光中心波长。回波信号经过环形器进入 2×2 保偏光纤耦合器与本振光拍频,由平衡探测器转化为电信号并通过 500 MHz 采样频率的高速 A/D 采集卡进行模数转换。系统部分器件的主要参数见表 1。针对相干多普勒激光雷达进行风速反演时数据量大、计算

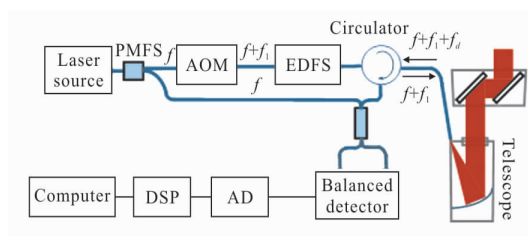


图 1 相干多普勒激光雷达系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the coherent Doppler lidar system

表 1 相干测风激光雷达的主要技术参数

Tab.1 Parameters in coherent wind lidar

Item	Parameter	Value
EDFA	Wavelength/nm	1 550
	Pulse energy/μJ	50
	Pulse width/ns	200
	Peak power/W	200
	Pulse repetition	10
Telescope	Effective aperture/mm	50
	3 dB bandwidth/MHz	200
Balanced detector	Quantum efficiency	0.8
	A/D converter	Sampling rate/MHz·s <sup>-1</sup>

量大、实时性要求高等问题,采用板载多核数字信号处理器(DSP)进行并行计算,并将计算结果传入工控机用于用户交互以及数据的显示和储存。

### 1.2 系统测风性能分析

相干雷达对风速的探测距离和探测精度取决于接收信号的载噪比(CNR),每个距离门的载噪比可由该距离门的功率谱计算得出。系统的载噪比公式为<sup>[13]</sup>:

$$CNR(R) = \frac{\eta_{total} \eta_a(R)}{F_h} \frac{ET^2}{h\nu B} \frac{c\beta}{8} \frac{\pi D_{tele}^2}{R^2} \quad (1)$$

式中: $R$  为目标平面距离激光雷达的距离; $\eta_{total}$  为系统天线效率以外总的效率; $\eta_a(R)$  为系统的天线效率; $E$  为发射的激光脉冲能量; $T$  为大气的单程消光系数; $c$  为光在真空中的速度; $\beta$  为气溶胶的后向散射系数; $D_{tele}$  为望远镜的有效口径; $F_h$  为额外噪声; $h$  为普朗克常数; $\nu$  为发射激光的中心频率, $B$  为接收机带宽。

系统的总效率由系统各部分光学效率及探测器量子效率计算得出:

$$\eta_{total} = \eta_{1_2} \eta_{2_3} \eta_r^2 \eta_f \eta_{tele} \eta_{coupler} \eta_f \eta_{coupling} \eta_q \quad (2)$$

式中: $\eta_{1_2}$  为光纤环形器 1 端到 2 端的效率; $\eta_{2_3}$  为光纤环形器 2 端到 3 端的效率; $\eta_r$  为反射镜效率; $\eta_f$  为透射镜效率; $\eta_{tele}$  为望远镜效率; $\eta_{coupler}$  为 2×2 保偏光纤耦合器效率; $\eta_f$  为光纤效率; $\eta_{coupling}$  为望远镜到光纤的耦合效率; $\eta_q$  为探测器量子效率。系统的总效率为 0.239,其中光学部分的效率为 0.298,探测器量子效率为 0.8。该雷达的系统总效率高于日本三菱公司研制的同类激光雷达的 0.155<sup>[14]</sup>,说明达到了较高的光学效率。

系统天线效率  $\eta_a(R)$  取决于距离和截断比  $D_e/D_{tele}$ ,  $D_e$  为高斯光束的  $e^{-2}$  直径。当截断比取 0.823 时,天线效率在远场达到最大值<sup>[15]</sup>。望远镜有效口径固定为 50 mm 的情况下对于不同的脉冲能量,载噪比同探测距离的关系如图 2 所示。

由图 2 可知,载噪比在 0.7 km 前由于天线效率的影响变化较为平缓,随后随着距离增加明显下降。在 5 km 处,50  $\mu$ J 脉冲能量对应的载噪比为 -33.9 dB,70  $\mu$ J 对应的载噪比为 -32.5 dB。

为了能评估系统所能达到的探测距离,需要分析不同的载噪比下系统的风速误差和探测概率,这里采用蒙特卡洛模拟的方法进行估计。在这种方法

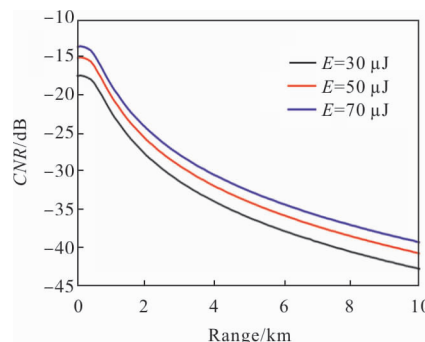
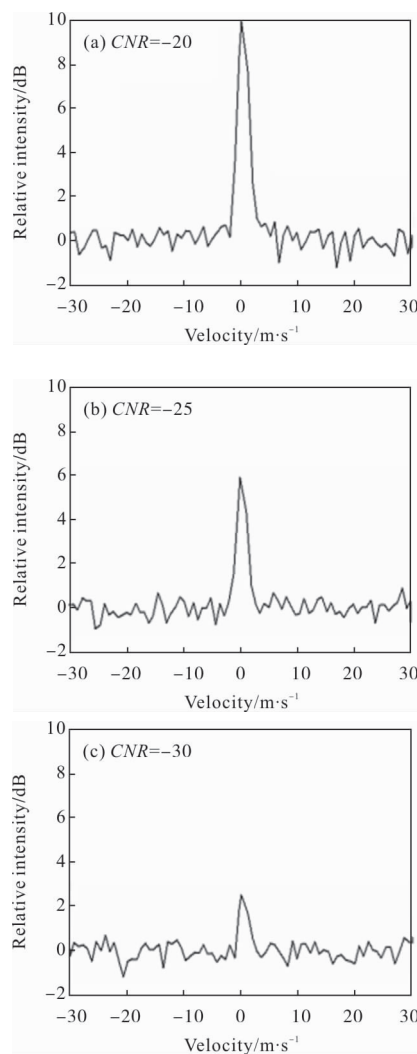


图 2 载噪比随距离变化

Fig.2 CNR as a function of range

中按照不同的载噪比由电脑随机生成仿真的回波信号,然后按照系统相同的处理方法反演风速。模拟载噪比的范围为 -45~-25 dB,风速设置为 0 m/s,回波信号谱宽设置为 2.2 MHz,每次模拟的非相干累积次数为 10 000 次,对应系统 1 s 的累积时间。部分载噪比下的模拟信号频谱如图 3 所示。



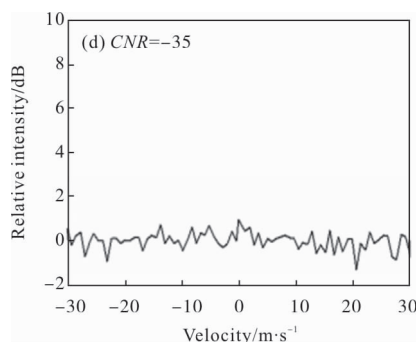


图 3 模拟信号的归一化频谱

Fig.3 Normalized spectrums of simulation signals

可见随着载噪比降低,模拟信号产生的峰值也逐渐降低,信号更容易被噪声淹没,风速估计的误差也逐渐增大。由于模拟中对风速设置为 0 m/s,计算所得风速的标准差即为风速估计误差的标准差。每次模拟风速计算结果分布在 $\pm 0.5$  m/s 范围内即认为是正确的估计,其占总模拟次数的比率即为该载噪比对应的探测概率。对不同载噪比的模拟信号各进行 10 000 次模拟,统计结果见图 4。

随着载噪比下降,探测概率从 1 开始降低,风速标准差也从 0 开始增加。载噪比在 -31 dB 以上时,探测概率为 1;在 -32 dB,风速标准差为 0.54 m/s,探测概率为 0.99;在 -34 dB,风速标准差为 4.7 m/s,探测概率为 0.93。将系统的探测距离定义为探测概率满足 0.9 所能达到的最大距离,结合图 2 与图 4,系统使用 50  $\mu$ J 脉冲能量探测距离达到 5.1 km。

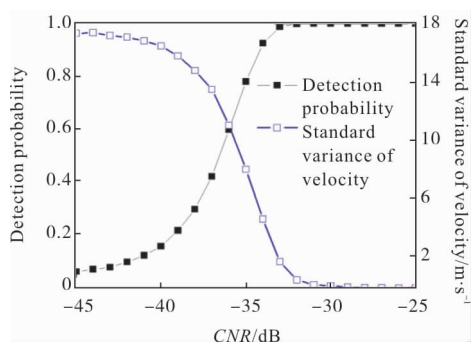


图 4 风速标准差与探测概率和载噪比关系

Fig.4 Standard variance of velocity and detection probability as a function of CNR

## 2 实验结果分析

### 2.1 径向风速测量

为了验证系统的探测性能,在 2018 年 12 月 3 日

于深圳进行了径向风速探测。测量时固定扫描头仰角为  $5^\circ$ ,系统时间分辨率和空间分辨率分别为 1 s, 30 m,激光器单脉冲能量 50  $\mu$ J。累积时间为 1 s 的回波信号在部分距离上的归一化频谱见图 5。

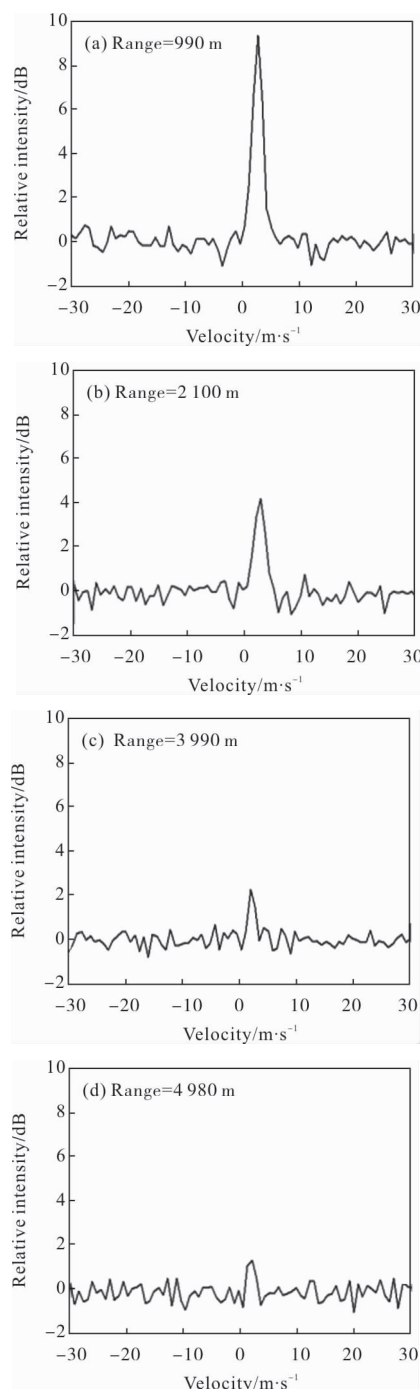


图 5 回波信号的归一化频谱

Fig.5 Normalized spectrums of backscattering signals

可以看出图 5 中的实测信号频谱和图 3 的模拟结果较为一致。在距离 990 m 处载噪比为 -20.7 dB,



对应的探测概率为 1。在距离 4 980 m 处载噪比为 -33.9 dB,对应的探测概率为 0.93。在 5 km 之后信号逐渐被噪声淹没,回波信号对应的峰值变得难以分辨。为了正确计算 5 km 以上的微弱信号的载噪比,将连续测量 10 min 的信号功率谱数据进行累加平均处理,得到的载噪比随着探测距离变化的廓线同公式(1)中使用 50 μJ 脉冲能量的计算结果,对比见图 6。可见实测结果同系统仿真在距离 0.6 km 以上较为一致,而在近距离的实际天线效率不同于理论计算采用的远场天线效率,造成一定误差。

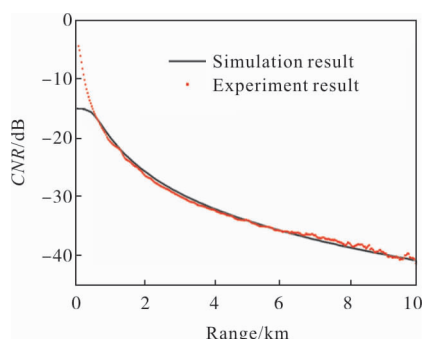


图 6 载噪比测量结果与系统仿真对比

Fig.6 Measurement result and simulation result of CNR

## 2.2 对比实验

系统使用正弦波拟合的方法计算大气的风速和风向。激光雷达以 15°天顶角作为圆锥半角进行锥形扫描。每扫过一定的方位角,激光雷达采集一次这个方向上不同高度的径向风速数据。每个径向的风速同水平风速,垂直风速,风向的关系为:

$$V_r(\theta_i) = V_z \sin \varphi + U \cos \varphi \sin(\theta_i - \theta_v + \pi/2) \quad (3)$$

式中:  $V_r(\theta_i)$  为测量所得径向风速;  $\theta_i$  为该径向方位角;  $\theta_v$  为风向;  $\varphi$  为径向仰角;  $V_z$  为垂直风速;  $U$  为水平风速。采用扫描过程中同一高度不同方向采集的径向风速数据根据公式(3)进行拟合就能得到这个高度的风速和风向。实际测量时,方位扫描头每过 24°扇形范围停止 1 s 测量径向风速,每个周期共测量 15 组径向风速。除去载噪比在 -34 dB 以下的点后,剩下至少 12 组径向风速时进行正弦波拟合。

为了验证系统的测量风速和风向的精度,于 2018 年 2 月 10 日到 15 日于深圳气象梯度塔将激光雷达同塔上的超声波风速仪进行对比实验。对比所用的超声波风速仪型号为 WMT700,测量风速的

精度为 0.1 m/s,风向精度为 1°,可以满足数据对比的精度需要。进行对比实验时,激光雷达设置在距离气象塔约 200 m 的开阔空地上,超声波风速仪设置在气象塔上距地面高度为 350 m,激光雷达选取距离门中心高度为 355 m 的数据,两者相对位置关系如图 7 所示。

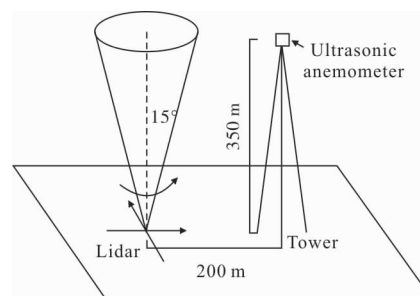


图 7 激光雷达与超声波风速仪相对位置示意图

Fig.7 Schematic of relative position of lidar and ultrasonic anemometer

由于超声波风速仪数据的时间分辨率约 6 s,激光雷达扫描一圈约 102 s,将超声波风速仪的数据按时间平均到时间分辨率同激光雷达对应后的风速风向对比见图 8。

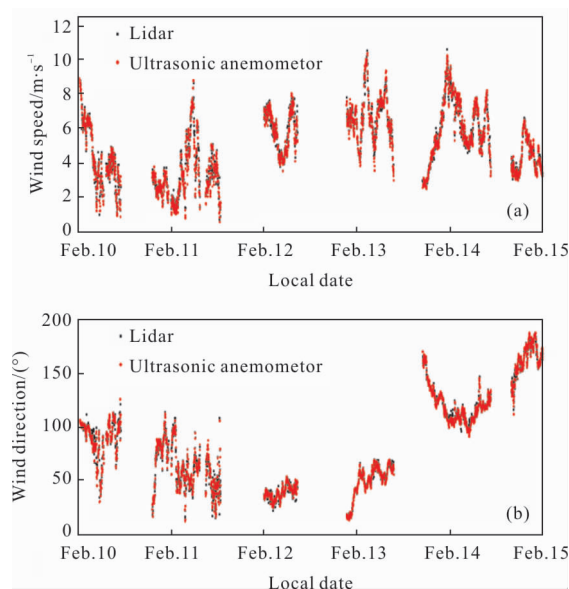


图 8 激光雷达与超声波风速仪测量的连续风速风向

Fig.8 Wind velocity and wind direction recorded by sonic anemometer and the lidar

对比实验从 2018 年 2 月 10 日,进行到 2018 年 2 月 15 日。由于激光雷达同超声波风速仪有一定距离,为了减少其他因素对对比结果的影响只选择风

速较为稳定的时段进行对比, 共计有 2 522 组对比点。水平风速对比的回归分析如图 9 所示。

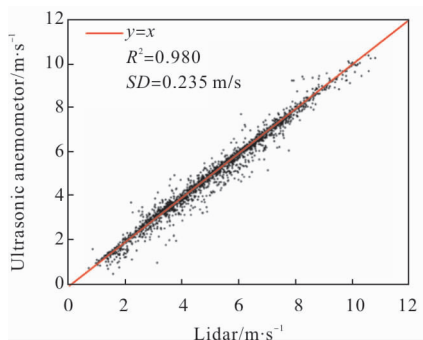


图 9 水平风速回归图

Fig.9 Regression plot of horizontal wind speed

图 9 中横坐标为激光雷达的水平风速, 纵坐标为超声波风速仪的水平风速。拟合后的斜率为 0.988, 相关系数  $R^2$  为 0.980。水平风速的标准差为 0.235 m/s, 满足风速误差小于 0.5 m/s 的设计指标。对风向的回归分析如图 10 所示。

图 10 中横坐标为激光雷达的风向, 纵坐标为超声波风速仪的风向。拟合后的斜率为 0.997, 相关系数  $R^2$  为 0.993。风向的标准差为  $3.105^\circ$ 。

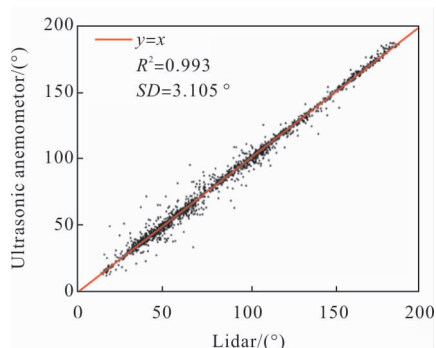


图 10 风向回归图

Fig.10 Regression plot of wind direction

### 3 结论

研制了一套高光学效率全光纤相干激光雷达系统。先对系统的参数进行了分析, 确定了系统天线效率以外的总效率为 0.239, 并以此计算了系统在不同距离上的载噪比。之后采用蒙特卡洛模拟的方法仿真了系统在不同载噪比下的探测概率, 判断系统在使用  $50 \mu\text{J}$  脉冲能量,  $10 \text{ kHz}$  重复频率,  $1 \text{ s}$  累积时间时, 理论探测距离达到  $5.1 \text{ km}$ 。

在径向风速测量中对比了测量所得信号的载噪

比和理论计算的载噪比, 二者的结果较为一致, 验证了系统效率参数仿真和信号模拟的准确性。之后通过与超声波风速仪进行连续 5 天的对比实验得到了水平风速和风向标准差分别为  $0.235 \text{ m/s}$ ,  $3.105^\circ$ , 证明了系统的测量的准确性。系统的时间分辨率和空间分辨率较高, 运行稳定可靠, 可以胜任边界层以内的风场探测。

### 参考文献:

- [1] Huffaker R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurements [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(5): 1026–1039.
- [2] Zhang Xiaowen, Zheng Yongguang, Wu Lei, et al. Review on application of wind profiler radar in weather monitoring and forecasting [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, 45(2): 285–297. (in Chinese)  
张小雯, 郑永光, 吴蕾, 等. 风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望 [J]. *天气预测*, 2017, 45(2): 285–297.
- [3] Kopp F, Rahm S, Smalikhov I. Characterization of aircraft wake vortices by  $2 \mu\text{m}$  pulsed Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21(2): 194–206.
- [4] Courtney M, Wanger R, Lindelow P. Testing and comparison of lidars for profile and turbulence measurements in wind energy [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 12–21.
- [5] Huffaker R M, Jelalian A V, Thomson J A L. Laser Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proc of the IEEE*, 1970, 58(3): 322–326.
- [6] Kane T J, Kozlovsky W J, Byer R L, et al. Coherent laser radar at  $1.06 \mu\text{m}$  using Nd:YAG lasers [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(4): 239–239.
- [7] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of The Optical Society Of America B—optical Physics*, 2010, 27(11): 63–92.
- [8] Cariou J P, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 213–223.
- [9] Ando T, Kameyama S, Hirano Y. All-fiber coherent Doppler LIDAR technologies at mitsubishi electric

- corporation [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 012011.
- [10] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (7): 1720–1724. (in Chinese)  
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1720–1724.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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. (in Chinese)  
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.
- [14] 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.
- [15] Jia Xiaodong, Sun Dongsong. Maximum likelihood discrete spectral peak estimation in coherent wind lidar and Monte Carlo simulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 0610131. (in Chinese)  
贾晓东, 孙东松. 相干激光雷达中最大似然离散谱峰值估计及 Monte Carlo 仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(6): 0610131.