

基于单声光单级放大器的近距测风激光雷达

罗 浩, 李五一, 肖增利, 蒋丹丹, 李 智

(南京牧镭激光科技股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 针对风电行业近距离脉冲相干测风激光雷达低成本需求, 文中采用单声光单级放大混合双通方案, 通过偏振分离的方法, 有效抑制了单声光双通时不同调制频率的移频光干涉引起的脉冲包络调制问题。通过单级双程放大器方案, 得到重复频率 10 kHz, 脉宽 300 ns, 单脉冲能量 4.2 μJ 的 1550 nm 脉冲激光源。基于该光源的样机雷达与企标雷达在 50~200 m 距离范围内进行了 48 h 测风性能比对, 200 m 处两台雷达的风速数据拟合度 R^2 高于 0.99, 均值偏差和标准偏差小于 0.1 m/s, 验证了基于单声光单级放大器的低成本脉冲源测风雷达近距离探测的可行性。

关键词: 多普勒测风激光雷达; 相干探测; 载噪比; 光纤激光器; 双程放大

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240562

引用格式: LUO Hao, LI Wuyi, XIAO Zengli, et al. Close-range pulsed coherent Doppler wind lidar based on single AOM and single-stage fiber amplifier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(5): 20240562.

罗浩, 李五一, 肖增利, 等. 基于单声光单级放大器的近距测风激光雷达[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 20240562.

0 引 言

风能作为清洁环保的可再生能源, 是常规化石能源的有效补充。国内风电行业发展迅速, 并网装机容量不断增加。测风激光雷达以其高精度、高时空分辨率、无接触前置测风等优点在风资源勘测(地基式测风激光雷达)、风功率预测、风机前馈控制(机舱式测风激光雷达)等领域得到广泛应用^[1-2]。相比于连续测风激光雷达, 脉冲相干测风激光雷达兼具短距、中距、长距灵活探测能力。国外方面, 2007 年, 日本三菱公司报道了 1550 nm 全光纤脉冲式测风激光雷达系统, 单脉冲能量 4.5 μJ , 重复频率 50 kHz, 峰值功率 10 W, 望远镜口径 50 mm。该系统探测概率 80% 时, 理论可探测最大距离为 1 km^[3]。2009 年, 法国 LEOSPHERE 公司报道了 250 ns/50 μJ /15 kHz MOPA 结构的脉冲光源, 测风距离 400 m, 速度分辨率 1 m/s^[4]。国内方面, 2009 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所团队展示了重复频率 10 kHz, 单脉冲能量 5 μJ , 峰值功率 10 W 的 1550 nm 全光纤单频激光器, 用于近距离测风^[5]。2013 年, 中国电子科技集团公司第二十七研究

所潘静岩团队报道了一套全光纤脉冲相干测风激光雷达, 并已作为试验样机用于工程中。样机激光雷达与超声波风速仪进行了对比实验, 测风精度为 0.78 m/s^[6]。2014 年, 中国海洋大学团队报道了重复频率 10 kHz, 单脉冲能量 100 μJ 的 1550 nm 全光纤相干测风激光雷达, 风速测量精度 <0.3 m/s^[7]。

传统的近距离脉冲式测风激光雷达系统采用级联双声光方案, 以达到系统消光比要求^[3], 放大器采用两级放大方案, 以达到百米级探测距离要求^[3-5, 7]。但随着行业对近距离测风激光雷达提出更低成本的需求, 基于传统双声光两级放大器方案的测风激光雷达面临较大挑战。2013 年, 德国耶拿大学 BEIER F 小组报道了基于单声光的紧凑型 1550 nm 测风激光雷达脉冲光源^[8]。在此光源的基础上, 2015 年, 德国 OLDENBURG 小组报道了重复频率 10 kHz, 脉宽 200 ns, 单脉冲能量 15 μJ 的紧凑型 1550 nm 测风激光雷达系统, 测量距离 400 m, 测风精度 0.5 m/s^[9]。该系统中声光模块采用的是环形器和光纤光栅组成单声光双通方案, 节省了一个声光, 降低了成本。但光纤光栅和种子源中心波长需要严格匹配且需要对光栅

收稿日期: 2025-01-12; 修订日期: 2025-02-18

基金项目: 江苏省科技厅项目 (BE2022009)

作者简介: 罗浩, 男, 博士, 主要从事光纤激光器和激光相干检测方面的研究。

做温补,不利于工程化和批量化生产。该系统光源的一级放大器采用了双程放大方案,提高了斜率效率。但单声光双通模块和一级放大器是分离的,由于脉冲占空比和声光双通附加损耗,一级放大小信号输入受限制,一级放大输出功率不够高,因此整个系统仍需两级放大才能达到百米级探测距离。

文中采用单声光和单级放大器混合双通方案,利用双程放大高小信号增益和高斜率效率优点,单级放大得到了重复频率 10 kHz、脉宽 300 ns、单脉冲能量 4.2 μJ 、边模抑制比 (SMSR) 62 dB 的 1550 nm 脉冲激光源。同时采用基于偏振分束器和法拉第旋转镜双通方案,通过偏振分离方法抑制了脉冲包络调制现象。基于该光源的测风激光雷达系统与重复频率 30 kHz、脉宽 200 ns、单脉冲能量 6 μJ 的基准雷达进行了 48 h 性能比对,200 m 距离门处风速数据拟合度优于 0.99,均值偏差和均值偏差标准差小于 0.1 m/s。与传统双声光和两级放大器方案相比,该方案节省了一套保偏声光模块和保偏钕镱共掺双包层放大模块,降低了近距离脉冲测风激光雷达光源成本,促进测风激光雷达在风电领域的批量应用。

1 探测原理

相干测风激光雷达通过望远镜将单频激光发射至大气中,经过大气传输损耗后入射至探测区域。探测区域内气溶胶分子产生后向散射光由望远镜接收与本振光经过光学混频后在光电探测器处得到中频信号。假设系统噪声以散粒噪声为主,相干测风激光雷达方程^[10]如下:

$$CNR = \frac{\eta E_p \beta \lambda T^2 \pi D^2}{8 h B R^2} \quad (1)$$

式中: CNR 为载噪比; η 为光学系统效率因子; E_p 为激光单脉冲能量; β 为大气后向散射系数; λ 为出射激光中心波长; T 为大气透过率; D 为望远镜口径; h 为普朗克常数; B 为探测器电路带宽; R 为测量距离。由此可知,其他条件一定情况下,测风激光雷达系统载噪比 CNR 与激光器单脉冲能量成正比。

风速探测精度是相干测风激光雷达关键指标之一。测风激光雷达探测的大气信号是微弱随机信号,从噪声中提取多普勒频移信号的频率精度决定了视线风速精度。在低载噪比情况下,风速估计存在克拉

美罗下界 (CRLB),其公式为^[10]:

$$\sigma_v^2 \geq \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 \frac{2\delta_v^2}{N_p N_g} \left(\frac{1}{CNR} + \frac{1}{CNR^2} \right) \quad (2)$$

式中: σ_v 为速度标准差; λ 为激光器中心波长; δ_v 为信号频谱宽度; N_p 为脉冲累加个数; N_g 为距离门内采样点数; CNR 为载噪比。由此可知,测风精度受信号频谱宽度,脉冲累加次数,距离门内采样点数和载噪比影响。

文中提出用单级放大器替代传统的两级放大方案,从激光雷达方程和风速估计公式可知,需要将激光器单级放大单脉冲能量提升至两级放大同量级水平以保障 CNR ,同时也要兼顾脉冲累加次数以保障风速精度。

2 激光器设计

2.1 单声光双通方案优化

图 1(a) 为基于环形器和反射镜的单声光双通方案原理图。种子激光通过环形器将连续光传输至 80 MHz 声光调制器,移频斩波变成脉冲光,经光纤反射镜后,返回光再次通过 80 MHz 声光调制器。通过环形器和反射镜组合使得光两次通过声光调制器。但是该方案存在一个弊端,即采用声光双通方案后,由于声光调制器内部存在表面反射,除经过两次调制产生了 160 MHz 移频的信号光外,还存在经过一次调制产生 80 MHz 移频的杂散光,杂散光与信号光拍频会对脉冲波形产生干涉调制,如图 1(c) 黑色曲线所示。这种脉冲包络调制现象产生的影响有:一是不利于系统时间寻峰,导致测距误差;二是尖峰使得脉冲峰值功率变高,受激布里源散射 (SBS) 阈值变低,不利于脉冲能量放大,从而导致探测距离受限。

为了解决该问题,采用偏振分束器和法拉第旋转镜组成双通光路来抑制脉冲包络调制现象,如图 1(b) 所示。偏振分束器和法拉第旋转镜均为商业器件。偏振分束器 3 端口至 2 端口的偏振消光比数值为 23.7 dB,器件插损值为 0.5 dB。法拉第旋转镜偏振消光比数值为 23.8 dB,单次旋光角度为 45°,角度公差为 $\pm 1^\circ$,器件插损值为 0.3 dB。利用 80 MHz 移频光未通过法拉第旋转镜和 160 MHz 移频光一次通过法拉第旋转镜的特性,二者的偏振态正交,通过偏振分离方法使 80 MHz 移频光和 160 MHz 移频光走 PBS 不

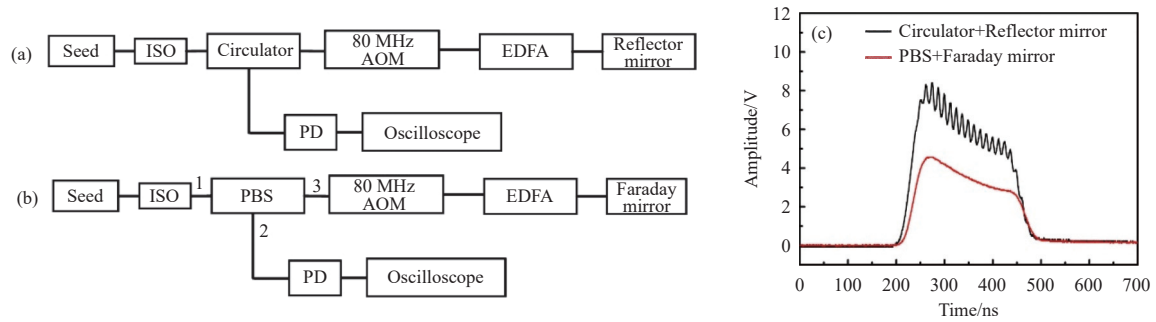


图 1 (a) 基于环形器和光纤反射镜单声光双通方案原理图; (b) 基于偏振分束器和法拉第旋转镜单声光双通方案原理图; (c) 不同单声光方案脉冲包络调制对比曲线

Fig.1 (a) Schematic diagram of double-pass AOM based on circulator and reflector mirror; (b) Schematic diagram of double-pass AOM based on PBS and Faraday mirror; (c) Output pulse shape between two different methods

同端, 避免二者干涉产生调制波形。图 1(c) 为两方案脉冲包络对比曲线, 由图可知, 采用偏振控制方案后, 脉冲包络调制现象得到有效抑制。

2.2 双程放大器性能优化

种子光经声光移频斩波后, 信号功率为 μW 级别, 需要进行放大才能达到雷达探测距离要求。放大器结构主要有两种: 一种是基于主振荡功率放大系统结

构 (MOPA) 的级联多级单程放大器; 另一种是多程脉冲放大器。与单程放大器相比, 双程放大结构具备更高的小信号放大增益和转换效率^[11-13]。

为了避免脉冲光受激布里渊散射 (SBS) 对大功率的影响, 先研究连续光输入模式下双程放大器效率。图 2(a) 为双程放大连续光输入时光路图, 单频种子光通过光隔离器, 光衰减器 (VOA), 1/99 分光器后,

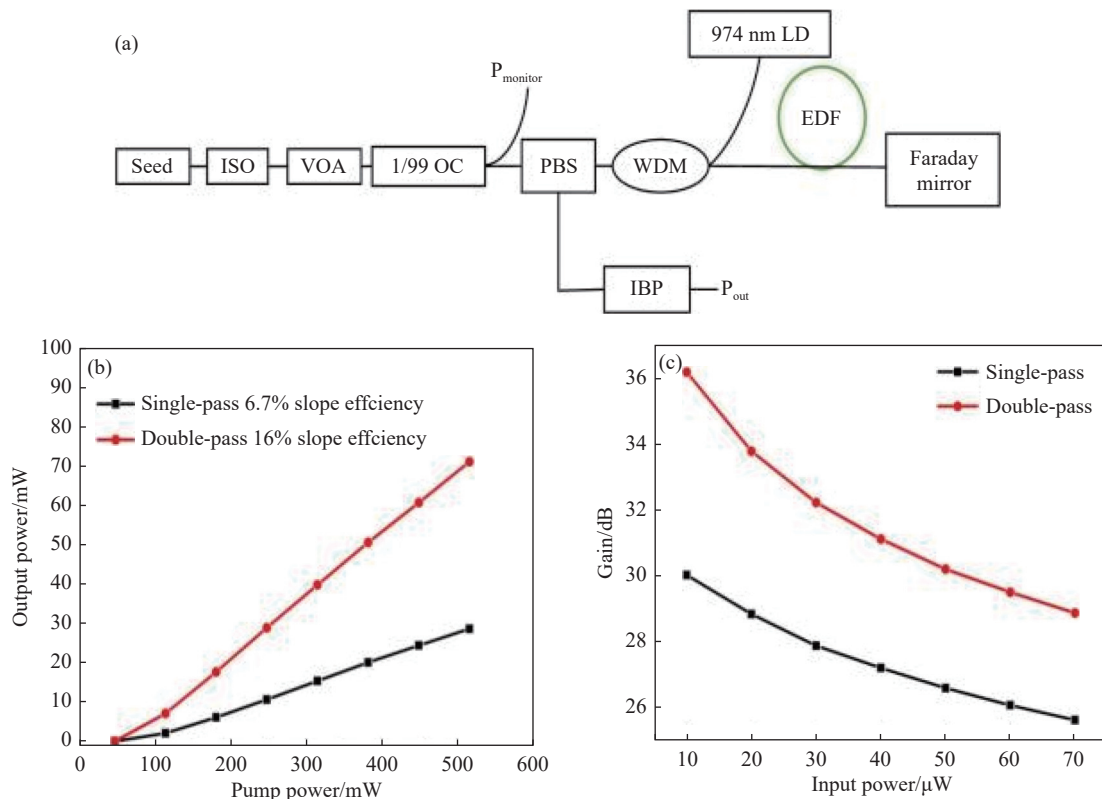


图 2 (a) 连续光模式下双程放大原理框图; (b) 单程放大和双程放大斜率效率对比曲线图; (c) 单程放大和双程放大小信号增益曲线对比图

Fig.2 (a) Experimental setup of double-pass fiber amplification in CW mode; (b) Comparison on laser slope efficiency between double-pass and single-pass amplification; (c) Comparison on laser small signal gain between double-pass and single-pass amplification

1% 端用于监测放大器输入功率, 99% 端入射至 PBS。输入小信号光经过 974 nm 单模泵浦器和掺铒光纤 EDF(LIKKI Er80-8/125) 组成的前向放大器后, 经法拉第旋转镜反射再次通过放大器, 放大光经过 PBS 选择后通过 1550 nm 隔离带通滤波器 (IBP), 用以滤除 ASE 光。图 2(b) 为 40 μW 小信号输入光时, 双程放大和单程放大斜率效率对比曲线, 双程放大斜率效率 16%, 单程放大斜率效率 6.7%, 双程放大具备更高的斜率

效率。图 2(c) 为泵浦功率 382 mW 时, 不同小信号输入功率情况下双程放大和单程放大小信号增益曲线对比图。由图可知, 10 μW 输入时, 双程放大小信号增益达到 36 dB, 单程放大小信号增益 30 dB。双程放大具备更大的小信号增益。

连续放大输入模式下优化双程放大器斜率效率后, 将 80 MHz 声光调制器加入到 PBS 和双程放大光路中, 如图 3(a) 所示。脉冲重复频率设置为 10 kHz,

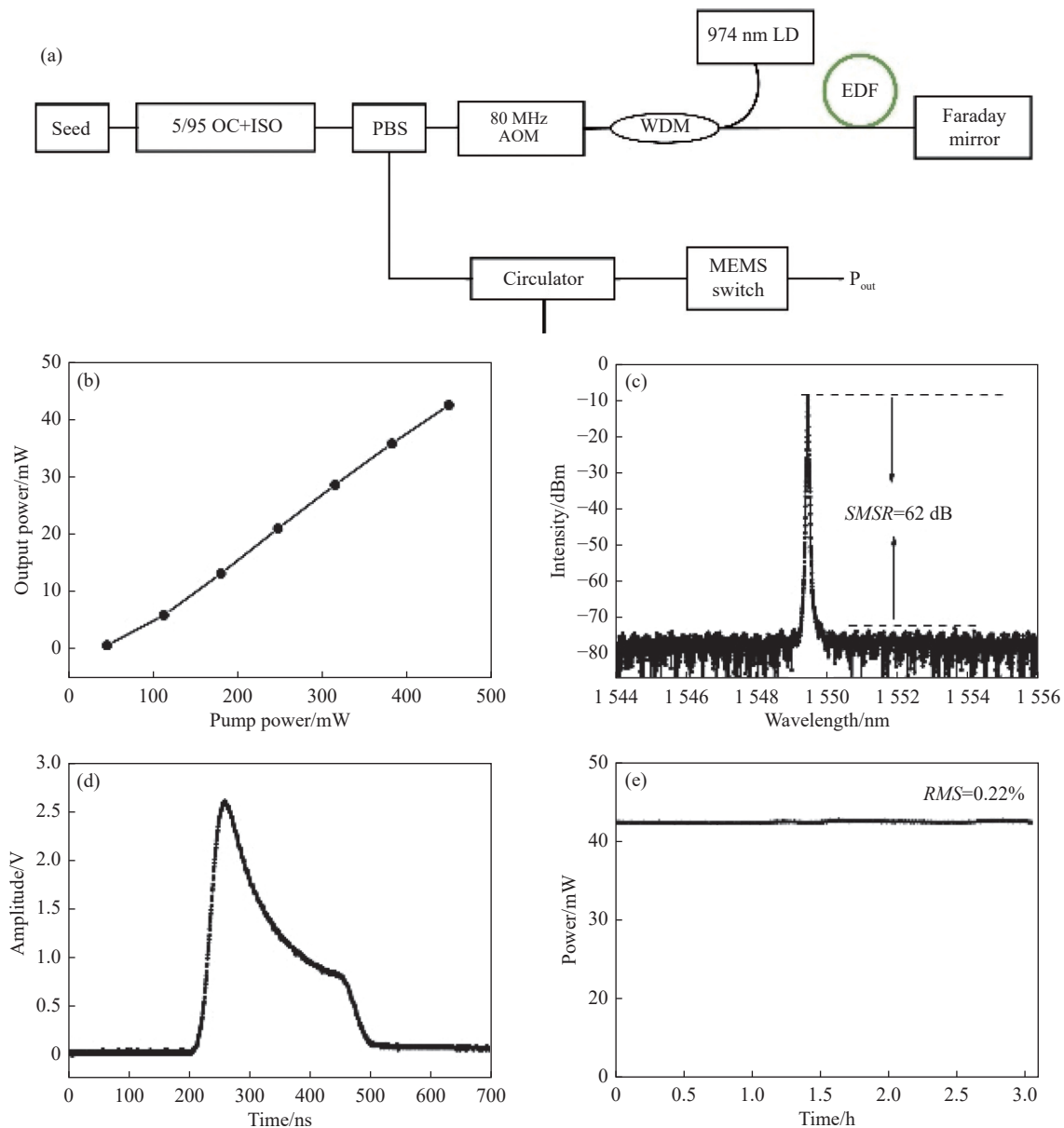


图 3 (a) 基于单声光和单级双程放大的测风雷达激光光源光路图; (b) 激光器输出斜率效率曲线; (c) 激光器边模抑制比曲线; (d) 激光器输出脉冲时域波形; (e) 3 h 平均功率稳定性曲线

Fig.3 (a) The schematic of pulse laser source for wind lidar based on single AOM and single-stage double pass method; (b) Slope efficiency of the pulsed laser source; (c) SMSR and (d) pulse waveform of the output laser; (e) The output average power stability curve for 3 hours

脉宽 300 ns(全宽)。该小信号脉冲经过双程放大后再次经过 80 MHz 声光调制器,此时声光当作时域开关不仅滤除了泄露脉冲信号,同时也滤除了脉冲间 ASE,提高了输出激光边模抑制比。为保障后级放大器的高质量放大,传统二级放大器之间会加入带通隔离滤波器 (IBP),其典型插损值为 0.7 dB。该方案中省去了二级放大器,通过声光时域开关作用抑制脉冲间 ASE,因此省去了 IBP,降低了链路附加插损,从而能提高整体输出效率。四通道保偏 MEMS 开关用作时分切换开关,用于测风激光雷达风速合成。

图 3(b) 为激光器整体输出斜率效率,由图可知泵浦功率 449 mW 时,平均输出功率 42.5 mW。图 3(c) 为输出激光边模抑制比,达到 62 dB,说明 80 MHz 声光调制器起到了时间开关作用,提高了脉冲对比度。图 3(d) 为输出脉冲时域波形,脉冲后沿无抖动。图 3(e) 为激光源输出平均功率 3 h 稳定性曲线,其 RMS 值为 0.22%。综上所述,该激光源能输出重复频率 10 kHz,平均功率 42.5 mW,单脉冲能量 4.25 μ J,脉宽 300 ns 的脉冲激光。与传统的双声光和两级放大激光源相比,本方案能节省一套保偏声光模块和保偏铟镓共掺双包层放大模块,节省成本 9000 元。

3 系统测试

基于上述光源搭建了 1550 nm 脉冲式测风激光雷达系统,如图 4(a) 所示。单频脉冲光源通过望远镜将激光入射到大气中,大气回光信号通过收发同轴望远镜接收,经过 MEMS 开关,环形器后,与本振光通过 50 : 50 耦合器光学混频传输至平衡探测器。雷达系统启动后,通过 400 MHz AD 芯片采集平衡探测器传递来的模拟外差信号,在现场可编程逻辑阵列芯片 (FPGA) 数字信号处理器中进行快速傅里叶变换 (FFT),得到不同距离门回波信号功率谱信息。累加去噪后,提取多普勒峰值,由多普勒频移公式得到径向风速。

样机雷达系统关键参数如表 1 所示。图 4(b) 为基于单声光和单级放大器的测风激光雷达原理样机,样机雷达系统采用单 80 MHz 声光双通方案,中频频率为 160 MHz。为了评估样机雷达系统噪声水平,以基于外腔结构的 RIO 种子激光器 (洛伦兹线宽 1.8 kHz) 为参考,将其输出光入射至样机雷达探测模块的 50 : 50

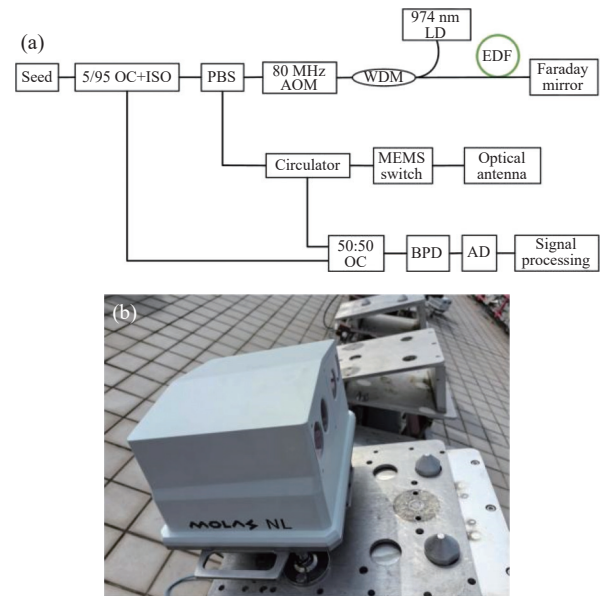


图 4 (a) 基于单声光单级放大测风激光雷达系统框图; (b) 测风激光雷达原理样机

Fig.4 (a) Schematic diagram of wind lidar based on single-stage fiber amplifier; (b) Picture of pulsed coherent wind lidar

耦合器,入射至平衡探测器的平均功率与样机雷达本振功率一致。之后通过样机雷达采集和信号处理模块对噪声进行采集和信号处理,结果如图 5 红色曲线所示。图 5 黑色曲线为样机雷达系统噪声,由图可知,样机雷达系统噪底无异常峰,且噪声水平与 RIO 种子激光器直接入射噪声水平接近。

表 1 样机雷达系统关键参数表

Tab.1 Key parameters of test wind lidar system

Item	Parameters	Value
Laser	Wavelength/nm	1549.5
	Linewidth/kHz	<500
	Repetition frequency/kHz	10
	Pulse width/ns	300
	Pulse energy/ μ J	4.25
AOM	Shifted frequency/MHz	80
Optical antenna	Diameter/mm	40
BPD	Bandwidth/MHz	200
AD	Sampling rate/MHz	400

为了测试样机雷达测风性能,将样机雷达与企标雷达进行性能比对。企标机舱雷达与标准风速杯进行过比对,经 DTU 认证,二者的拟合度优于 0.99,测风精度为 0.1 m/s。企标机舱雷达激光源基于传统的

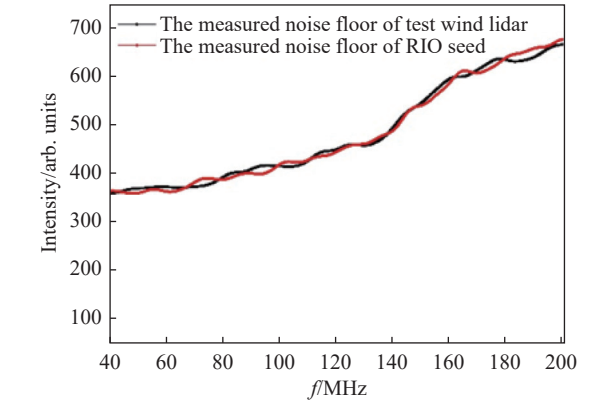


图 5 样机雷达和 RIO 种子激光器噪声

Fig.5 The measured noise floor of test wind lidar and RIO seed laser

两级放大方案,声光模块采用双 80 MHz 声光级联方案,中频为 160 MHz,关键参数如表 2 所示。

表 2 企标雷达系统关键参数表

Tab.2 Key parameters of calibrated wind lidar system		
Item	Parameters	Value
Laser	Wavelength/nm	1550.2
	Linewidth/kHz	<500
	Repetition frequency/kHz	30
	Pulse width/ns	200
	Pulse energy/ μ J	6
AOM	Shifted frequency/MHz	80
Optical antenna	Diameter/mm	40
BPD	Bandwidth/MHz	200
AD	Sampling rate/MHz	400

2024-08-24,将研制的测风激光雷达原理样机,安装于公司生产大楼四楼户外平台(32.16 N, 119.02 E)。样机雷达激光器重复频率为 10 kHz,企标雷达激光器重复频率为 30 kHz,如果设置同样的累加次数,则样机雷达积分时间为企标雷达的三倍。一方面这会造成 10 min 平均风速测量中统计数据点的下降,影响测风精度,另一方面积分时间加长会影响湍流和风切变等精细测风测量。因此,将样机雷达累加次数设置为企标雷达的三分之一。调整样机雷达姿态,使之与企标雷达一致。同时使样机雷达和企标雷达时间同步,同步精度控制在秒级别。测试期间,天气状况良好,无雨雾天气。统计了 48 h 的 10 min 平均径向风速,数据有效率筛选值选定为 90%。经过数据筛选后,最

终选取 288 个数据对比点进行性能比对。

图 6 为 100、60、200 m 三个距离门处样机雷达与企标雷达风速数据相关性分析结果,表 3 为性能指标统计结果。由数据可知,三个距离门处风速数据拟合度 R^2 均高于 0.99,表明样机雷达和企标雷达的风速数据具有较高的相关性。其中风速均值偏差和标准差均小于 0.1 m/s,具有较高的风速测量精度。

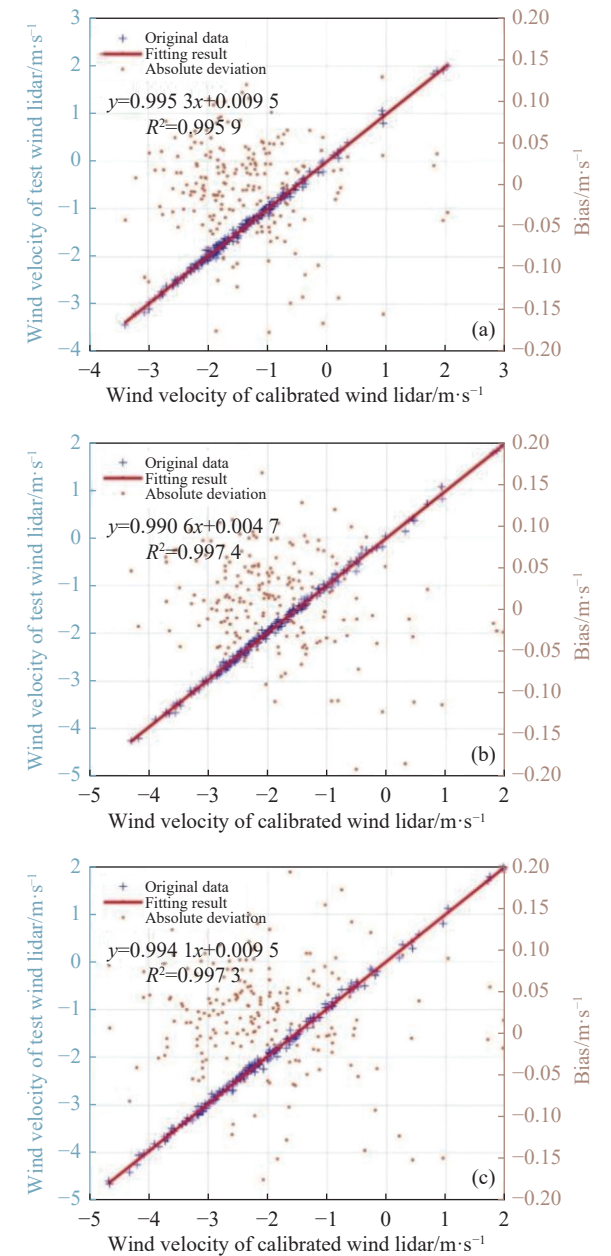


图 6 (a) 100 m、(b) 160 m、(c) 200 m 距离门处样机雷达与企标雷达相关性分析结果

Fig.6 Correlation plots between test wind lidar and calibrated wind lidar at (a) 100 m, (b) 160 m and (c) 200 m

表 3 100、160、200 m 距离门处风速均值偏差和均值
偏差标准差统计

Tab.3 Result of the average of the deviation and
standard deviation of wind velocity at 100, 160,
200 m

Distance/m	Average of the deviation/m·s ⁻¹	Standard deviation/m·s ⁻¹
100	-0.003	0.058 6
160	0.012 6	0.056 4
200	0.021 8	0.062 5

4 结 论

研制了基于单声光和单级双程放大脉冲激光源的测风激光雷达系统。通过偏振分束器和法拉第旋转镜组合方案,抑制了单声光双通过程中的包络调制现象。研究对比了双程放大和单程放大的斜率效率和小信号增益系数差异,在 40 μW 连续光输入时,实验表明双程放大斜率效率是单程放大的 2.38 倍,小信号增益在 40 μW 输入时高 3.92 dB。最后得到了重复频率 10 kHz,脉宽 300 ns,单脉冲能量 4.25 μJ,边模抑制比 62 dB 的单频脉冲激光源。基于该光源的样机雷达与企标雷达进行了 48 h 性能比对,200 m 处二者风速数据线性相关系数 R^2 高于 0.99,风速均值偏差和均值偏差标准差小于 0.1 m/s,结果表明基于单声光单级双程放大方案的测试雷达探测距离达到 200 m。

实验过程中发现双程放大器仍然工作在线性区,未来将考虑采用更大的泵浦激光源提高输出功率,同时采用方案抑制 SBS 以得到更大单脉冲能量,在保障测风精度的同时得到更远探测距离的测风激光雷达。

参考文献:

[1] 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. (in Chinese)

[2] PENA A, HASAGER C B, BADGER M , et al. Remote Sensing for Wind Energy[M]. Palaiseau: ONERA, 2015.

[3] 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.

[4] DOLFI-BOUTEYRE A, AUGERE B, VALLA M, et al. Aircraft wake vortex study and characterization with 1.5 μm fiber Doppler lidar [J]. *Aerospace Lab*, 2009(1): 1-13.

[5] LIU Yuan, LIU Jiqiao, CHEN Weibiao. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1857-1860. (in Chinese)

[6] 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)

[7] WU S, YIN J, LIU B , et al. Characterization of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar [C]//SPIE, 2014, 9262: 92620H.

[8] BEIER F, VRIES O D, SCHREIBER T , et al. Robust 1550-nm single-frequency all-fiber ns-pulsed fiber amplifier for wind-turbine predictive control by wind lidar[C]//SPIE, 2013, 8601: 86012S.

[9] HOFMEISTER P G, BOLLIG C, FAYED S , et al. A compact doppler wind lidar for controlling the operation of wind turbines[J]. *EARSeL eProceedings*, 2015, 14(1): 1.

[10] FUJII T, FUKUCHI T. Laser Remote Sensing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.

[11] MARCIANTE J R, ZUEGEL J D. High-gain, polarization-preserving, Yb-doped fiber amplifier for low-duty-cycle pulse amplification [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(26): 6798-6804.

[12] WU Bo, JANG Zehou, HUANG Biao, et al. Yb³⁺-doped fiber amplifier for low repeat frequency pulse [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 532-534. (in Chinese)

[13] ZHANG Wenping, LIU Fengnian, GUO Xin, et al. Research of modeling and simulation in dual-pass laser pulse amplification systems [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6): 838-842. (in Chinese)

Close-range pulsed coherent Doppler wind lidar based on single AOM and single-stage fiber amplifier

LUO Hao, LI Wuyi, XIAO Zengli, JIANG Dandan, LI Zhi

(Nanjing Movelaser Technology Co.Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract:

Objective Doppler wind lidar makes use of the principle of optical Doppler shift between signal and reference light to measure radial velocity at different distances. Compared with other traditional wind sensing methods, wind lidar has advantages of remote sensing, relatively higher temporal and spatial resolution, movability. Therefore, wind lidar is becoming a more and more important tool for precise wind measurement in wind energy industry including wind resource assessments, power performance measurement, wind turbine yaw control, individual pitch control, etc. However, the cost of the nacelle wind lidar for turbine control limits its mass application. Moreover, as wind turbines are being installed at an increasing rate today from onshore to offshore and complex mountainous terrain, the ground-based wind lidar for site and resource assessment is limited on data availability for power shortage in outdoor environment. Due to challenges in cost, volume, power consumption, the wind lidar needs improvement. Fiber laser is the main source of cost and power consumption for short-range wind lidar. Therefore, it is necessary to optimize the design of fiber laser to meet the requirement of wind energy industry for short-range wind laser.

Methods A pulsed coherent doppler short-range wind lidar system based on single-stage fiber amplifier is built in this paper. To solve the problem of pulse envelope modulation caused by the interference between light at different modulated frequencies in optical path of double-pass AOM, we design a double-pass AOM scheme based on the structure of PBS and Faraday mirror (Fig.1). Then, we adopt the single-stage double-pass fiber amplifier to replace the traditional two-stage fiber amplifier (Fig.2). The 80 MHz AOM and fiber amplifier are arranged in the same double-pass path so that it gets higher saturated output power compared with the separated scheme (Fig.3).

Results and Discussions The slope efficiency and small signal gain coefficient of the double-pass fiber amplifier in CW mode is 16.7% and 36 dB, respectively (Fig.2). The output power of the fiber laser source designed for short-range wind lidar is 42.5 mW at pump of 449 mW. The pulse repetition frequency is 10 kHz and the pulse width is 300 ns. Owing to the time switching role of the AOM, the SMSR of the output pulse reaches 62 dB (Fig.3). On August 24th, the test wind lidar system based on sing-stage fiber amplifier (10 kHz, 300 ns, 4.25 μ J) is compared with the calibrated wind lidar(30 kHz, 200 ns, 6 μ J) at Nan Jing (32.16N, 119.02E) at distances from 50 to 200 m. The fitting correlation coefficient of wind velocity is higher than 0.99 at 100, 160, 200 m. The average of the deviation is less than 0.03 m/s and the standard deviation is less than 0.07 m/s. The system measurement results show that the wind velocity data of test lidar and calibrated lidar have high correlation.

Conclusions A pulsed coherent wind lidar system with single-stage fiber amplifier is designed. The system is characterized by simple structure of single AOM and single fiber amplifier. The single pulse energy of the fiber laser is 4.25 μ J with pulse repetition of 10 kHz and pulse width of 300 ns. Owing to the polarization separation of different shifted frequencies light in odd and even times reflected by the faraday mirror, the output pulse envelope

is smooth. The wind measurement performance of the compact test wind lidar system is compared with the calibrated wind lidar at different distances from 50 to 200 m. At the distance of 200 m, the fitting correlation coefficient of wind velocity data is 0.9973. The average of the deviation is 0.0218 m/s and the standard deviation is 0.0625 m/s. In the future, we will improve the output pulse energy of the fiber laser source by increasing pump power and suppress SBS effect so that a medium-range wind lidar system can be realized.

Key words: Doppler wind lidar; coherent detection; carrier-to-noise ratio; fiber laser; double-pass amplification

Funding projects: Jiangsu Science and Technology Department Project (BE2022009)