

高可靠1.5 μm 全光纤相干激光测风雷达实验研究

高龙 郑伟 安超 陶宇亮 杜国军

High reliability 1.5 μm all-fiber coherent laser windfinding radar system

GAO Long, ZHENG Wei, AN Chao, TAO Yuliang, DU Guojun

引用本文:

高龙, 郑伟, 安超, 等. 高可靠1.5 μm 全光纤相干激光测风雷达实验研究[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1109–1117. DOI: 10.5768/JAO202344.0507002

GAO Long, ZHENG Wei, AN Chao, et al. High reliability 1.5 μm all-fiber coherent laser windfinding radar system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(5): 1109–1117. DOI: 10.5768/JAO202344.0507002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0507002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2 μm 波段宽带可调谐全光纤激光器

Broadband tunable all fiber laser at 2 μm band

应用光学. 2018, 39(4): 569–573 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405003>

外腔半导体激光器在低高温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>

激光诱导荧光雷达探测系统仿真研究

Simulation of laser induced fluorescence lidar detecting system

应用光学. 2017, 38(1): 131–135 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0107003>

高信噪比多波长2 μm 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

激光雷达辅助驾驶道路参数计算方法研究

Research on road parameters calculation for auxiliary driving with LIDAR

应用光学. 2020, 41(1): 209–213 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-1109-09

高可靠 1.5 μm 全光纤相干激光测风 雷达实验研究

高 龙, 郑 伟, 安 超, 陶宇亮, 杜国军

(中国空间技术研究院 北京空间机电研究所, 北京 100194)

摘 要: 研制了全光纤相干激光测风雷达系统, 该激光雷达系统采用光纤激光器同步触发并发射人眼安全的 1.5 μm 激光信号, 通过全光纤环形链路设计、高像质收发镜头与光楔垂直向上可扫描空间圆锥 45° 范围, 采用双通道高可靠数据采集与处理模块实现对中低空三维矢量风场处理与反演。为满足激光雷达在户外高低温环境 (−25 $^{\circ}\text{C}$ ~ 40 $^{\circ}\text{C}$) 工作的适应性, 对激光雷达系统热源模块进行了系统模型仿真, 通过设计并研制热控模块和制冷模块, 实现高低温环境工作的可行性。通过激光雷达在室内实验与室外风场标定实验, 该激光雷达可测量最高风场高度 3 km, 风速精度优于 0.36 m/s, 风向精度优于 $\pm 5^{\circ}$ 。

关键词: 相干激光测风雷达; 人眼安全; 全光纤链路; 高低温环境仿真; 热源模块

中图分类号: TN256; TN249; TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0507002

High reliability 1.5 μm all-fiber coherent laser windfinding radar system

GAO Long, ZHENG Wei, AN Chao, TAO Yuliang, DU Guojun

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100194, China)

Abstract: An all-fiber coherent laser windfinding radar system was developed, which used a fiber laser to synchronously trigger and transmit the 1.5 μm laser signals that were safe for human eyes. Through the design of all-fiber circular link, high image quality transceiver lens and optical wedge could scan the space cone 45° range vertically, the dual-channel high-reliable double-pass data acquisition and module processing were adopted to achieve the processing and inversion of three-dimensional vector wind field at medium and low altitude. To meet the adaptability of laser radar working in outdoor high and low temperature environment (−25 $^{\circ}\text{C}$ ~ 40 $^{\circ}\text{C}$), the heat source module of laser radar system was simulated. Through the design and development of thermal control module and refrigeration module, the feasibility of working in high and low temperature environment was realized. Finally, the indoor experiment and outdoor wind field calibration experiment of laser radar were carried out. The laser radar can measure the highest wind field height of 3 km, the wind speed accuracy is better than 0.36 m/s, and the wind direction accuracy is better than $\pm 5^{\circ}$.

Key words: coherent laser windfinding radar; human-eye safety; all-fiber link; high-low temperature environment simulation; heat source module

引言

风、湿、温、压是数值气象模型的四大基础数据^[1-4], 目前最缺乏的是高精度的中低空风场数据。风场数据在数值气象预报、航空安全与飞机起降保障、风电效率提升与风场选址等领域具有

重要的价值^[5]。传统的风场测量手段在时空分辨率、测量范围、精度等方面都不能同时满足需求。基于激光雷达技术的测量手段主要有相干激光测风雷达、非相干激光测风雷达、混合探测体制的激光测风雷达、自协方差体制的激光测风雷

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-01-10

基金项目: 十三五航天预研基金

作者简介: 高龙 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光雷达大气探测、激光测风雷达、合成孔径激光成像雷达研究。

E-mail: gaolongc508@163.com

达、超导纳米线频率下转换的相干激光测风雷达等。其中,混合探测体制主要用于中高空风场测量,其系统体积大,不易部署,并且在中低空风场测量方面优势不明显。自协方差体制的激光测风雷达主要利用 355 nm、532 nm 波长^[6],采用 M-Z 干涉仪作为风场鉴频器,该方式不受气溶胶和大气分子浓度的限制,同时可降低对激光频率稳定度的要求,但这种探测方式的激光雷达系统复杂,技术成熟度低。另外,2019 年中科大完成的 1 550 nm 单光子频率上转换激光测风雷达^[7-8],可实现更高灵敏度的信号测量,其获取的风场时空分辨率较传统模式提高了 1 个数量级,具有较大的应用价值,以上技术手段都为中低空风场测量提供了不同的技术手段。另外,国内外市场上也出现了多种相干激光测风雷达产品,其中,国外产品主要以美国 windtracer、法国 Windcube、英国 ZephIR 等为主,国内主要以敏视达、南京牧镭、科工二院 23 所等单位的为主。以上产品的风场探测高度基本都在 3 km 以内,风速探测精度优于 1 m/s,但绝大多数产品都没有针对于高低温环境条件进行专门的研究设计,这就降低了产品的可靠性。

本文研究的重点是基于传统的相干激光测风雷达技术,该技术具有以下优势:1) 风速测量精度与垂直分辨率高、抗近地面杂波干扰性强;2) 无微波电磁辐射,也不受电磁场及声场干扰;3) 体积小,重量轻,功耗低,易部署^[9]。针对常年高可靠观测需求,在激光雷达总体方案设计中充分考虑了风场数据的快速处理、系统热控方案设计和相关仿真,最后通过激光雷达实验进行了验证。

1 原理

中低空相干激光测风雷达系统分为激光雷达系统和计算机控制(包括风场数据反演系统)两个分系统组成,如图 1 所示。激光雷达先后通过指令 1 与指令 2 控制激光发射机与扫描镜头向大气当中发射激光,激光与大气中分布的颗粒物(气溶胶等)进行碰撞,产生包含有风速多普勒频移的回波信号,回波信号被激光雷达接收,并经由光电探测器进行光电信号转换和电子信号处理。最终,经由计算机与风场数据反演系统获取空间风场数据分布信息,并输出风场数据^[10]。

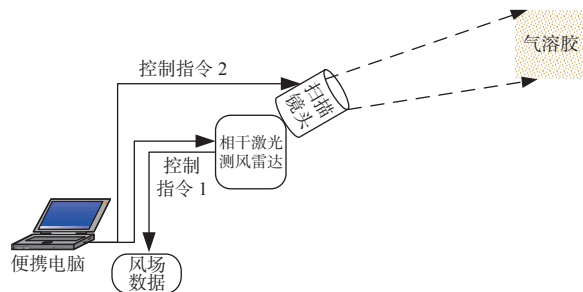


图 1 相干激光测风雷达系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of coherent laser windfinding radar system

2 指标仿真计算

信噪比是相干激光测风雷达指标体系中的核心指标^[11-12],其公式可表示为

$$f_{\text{SNR}}(t) = \frac{[K(R)]^2}{h\nu B \langle P_{\text{LOD}} \rangle} \times \left\langle \left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(q_1, p_1) \times E_T(q_1, R, t-R/c) E_{\text{BPLO}}(p_1, R) dq_1 dp_1 \right|^2 \right\rangle \quad (1)$$

式中: $f_{\text{SNR}}(t)$ 为激光回波中频信号信噪比; $K(R)$ 为大气消光系数; h 为普朗克常数; ν 为激光频率; B 为探测带宽; $\langle P_{\text{LOD}} \rangle$ 为本振光照射到探测器感光面上的平均功率; $V(q_1, p_1)$ 为大气目标上任意位置上的局部反射系数; $E_T(q_1, R, t-R/c)$ 为激光发射信号在距离 R 处的激光反射功率; $E_{\text{BPLO}}(p_1, R)$ 为激光雷达系统相对于探测器的互轭激光函数,该函数是空间位置 q 与 p 的函数。当激光雷达系统中的激光发射与激光接收光学匹配时^[13-15],且激光脉冲信号较短时,公式(1)可简化为

$$f_{\text{SNR}}(t) = \frac{\pi \eta_Q U_T \beta c \tau D^2 [K(R)]^2}{8 h \nu R^2 \left[1 + \left(\frac{D}{2\rho} \right)^2 + \left(\frac{\pi D^2}{4 \lambda R} \right)^2 \left(1 - \frac{R}{F} \right)^2 \right]} \quad (2)$$

式中: η_Q 为光电探测系统量子效率; U_T 为激光发射能量; β 为大气后向散射系数; c 为光速; τ 为激光脉宽; D 为光学镜头口径; R 为激光测风雷达激光作用距离; ρ 为大气横向相干长度; λ 为激光工作波长; F 为激光测风雷达光学系统焦距^[16-17]。

按照系统探测高度、风速精度与风向精度等指标,同时结合公式(2)与速度误差公式^[18],仿真了速度误差与高度、能量、重频等指标的关系,如图 2 所示。图 2(a) 为速度误差与海拔高度的关系,可看出,在重复频率、镜头口径等不变情况下,速

度误差随海拔高度的增加逐渐变大。图 2(b) 为速度误差与脉冲能量的关系,可看出,在激光重复频率、光学镜头口径、探测距离等不变情况下,速度误差随脉冲能量的增加逐渐变小。图 2(c) 表示光学镜头口径与脉冲能量的关系,由图 2(c) 可看出,在最远探测距离固定的情况下,激光雷达系统存在最优光学镜头口径窗口,在该窗口内,所需要的激光能量最低。图 2(d) 可看出在不同激光发射频率和探测距离下,风速测量精度均优于 0.5 m/s。当激光发射重复频率固定时,随着探测距离的变大,风速误差越大。当激光重复频率增加时,对于相同的探测距离,风速误差相应减小。当激光器的重复频率为 40 kHz 时,探测距离为 3 km 时,风速误差优于 0.2 m/s,总结系统指标参数如表 1 所示。

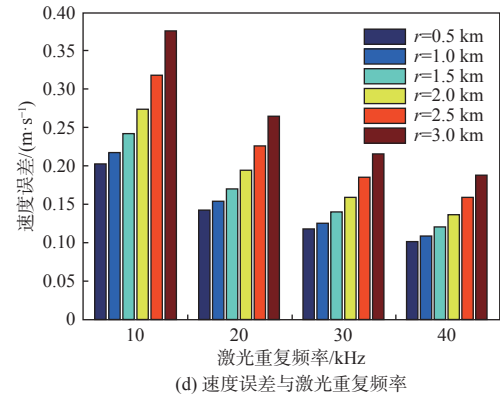
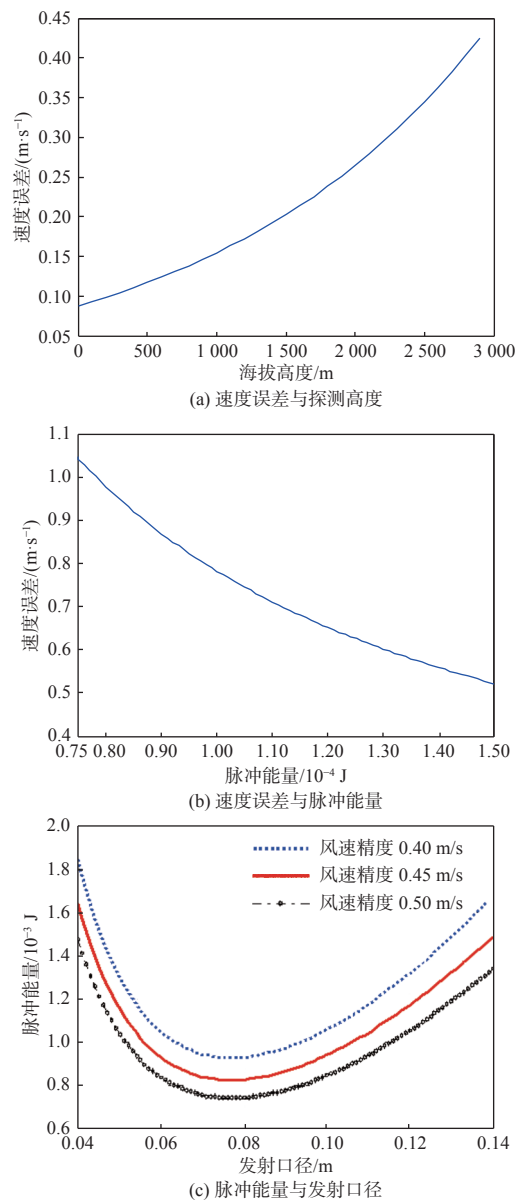


图 2 相干激光测风雷达速度误差仿真图
Fig. 2 Simulation diagram of velocity errors for coherent laser windfinding radar

表 1 相干激光测风雷达系统指标

参数	指标
探测高度/km	0~3
测风范围/(m·s ⁻¹)	±50
风速精度/(m·s ⁻¹)	≤1
风向精度/(°)	≤±10
距离分辨率/m	≤100
重量与功耗	40 kg/50 W
工作温度/℃	-25~40
激光波长/μm	1.5
能量/μJ	≥100
脉宽/ns	300
镜头口径/mm	80

3 系统组成及关键技术

3.1 总体系统组成

如图 3(a) 所示为相干激光测风雷达系统框图,其主要过程是:激光发射光源用于产生发射到大气中的单频脉冲激光和用于外差混频探测的本振连续激光。这两路激光来自同一连续单频主振荡激光光源,以确保符合外差探测条件。主振激光由分束器分出的用于产生脉冲光的部分(图 3(a) 中的①)首先经过声光频移器(acoustic optical modulator, AOM)移频,然后经种子注入放大后得到大脉冲能量出射激光。AOM 产生的脉冲激光相对于主振激光的频移用于在回波信号中判断风场多普勒频移的正负,进而反演风向。样机整机模型如图 3(b) 所示,主要包括激光发射、全光纤中继光学、光学镜头、光电探测、数据采集、热控模块等。

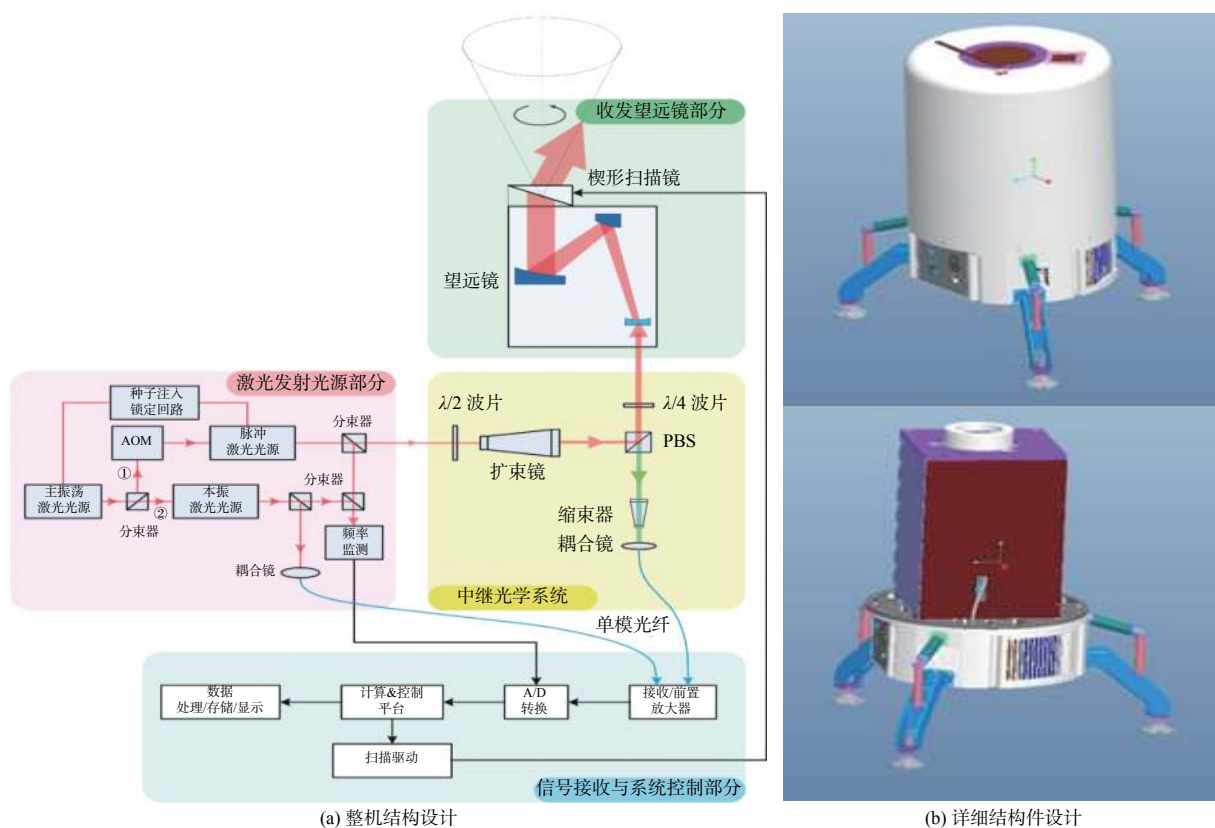


图 3 相干激光测风雷达整机模型

Fig. 3 Whole-machine model of coherent laser windfinding radar

3.2 光纤激光发射与触发同步技术

相干激光测风雷达系统激光源采用光纤种子激光器与光纤激光放大器组合的方式,实现单脉冲能量 100 μJ 发射,其中在光纤种子激光器中包含了对激光中心频率 80 MHz 的声光调制,该调制信号用于后续的风向提取。为抑制 100 μJ 激光信号产生的非线性效应以及带来的外差效率恶化,光纤放大器的输出光纤采用大模场光纤。为保证

在不同高度层的风场测量一致性,将种子激光器的外部 TTL(transistor-transistor logic)信号作为放大器脉冲激光输出的同步信号(如图 4(a)所示),该同步信号作为数据采集的同步信号,提高了系统测量的准确性。在激光雷达系统中,部分光学镜面反射的信号会产生额外的中频信号,该干扰信号在后续的数据处理中要注意剔除(如图 4(b)所示)。

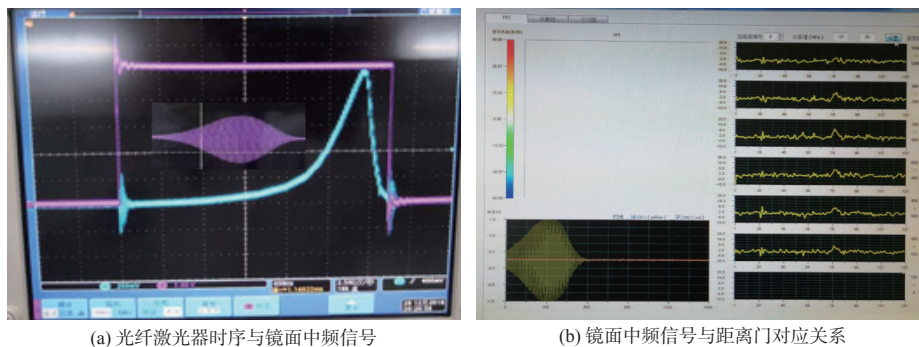


图 4 光纤激光器信号时序与镜面回波中频信号

Fig. 4 Time sequence diagram of fiber laser signals and intermediate frequency signals of back-scattered from mirror

3.3 光纤环形器与收发光学镜头技术

光纤环形器与收发光学镜头(如图 5(a)所示)

将大能量激光信号发射到大气中,并对大气回波信号进行光学接收。光学镜头采用离轴两反式,

有效通光口径 80 mm, 采用干涉仪对光学镜头系统波前差进行测试, 图 5(b) 为波前图, 系统波前为 0.048λ 。光学镜头在实际工作中为竖直状态模式,

经仿真计算, 当受到自身重力影响或者外部垂直向下应力时, 其镜间距变形量为 375 nm, 对系统波像差影响可以忽略, 如图 5(c) 所示。

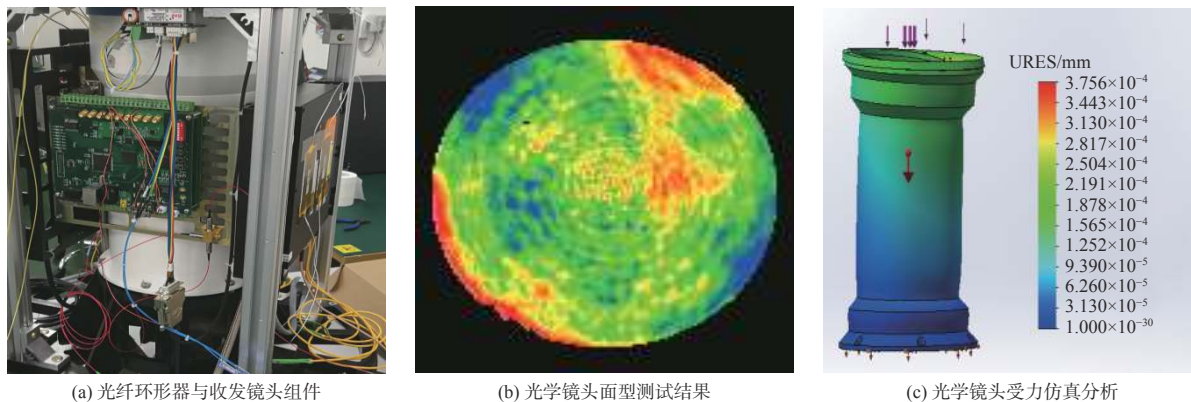


图 5 光纤环形器与收发镜头设计

Fig. 5 Design of fiber circulator and transceiver lens

3.4 微弱激光信号探测及在线数据采集处理与综合控制技术

微弱激光信号探测采用双平衡探测技术, 该技术手段具有灵敏度高、增益系数大等优点。探测器的饱和增益阈值低, 通常在 1 mW 以内, 因此, 在产品研制过程中, 要防止信号过强导致的器件损坏。

数据采集系统采用在线采集与处理电路模块, 对 3 km 以内的 40 个高度层的风场信号进行高速地实时采集与处理, 可实现 1 s 以内 1 000 次的回波中频信号的处理累积。其主要的模块组成图如图 6 所示, 主要由双通道模数转换器(ADC)、可编程逻辑门阵列(FPGA)、数字信号处理(DSP)、存储器和外部接口组成。

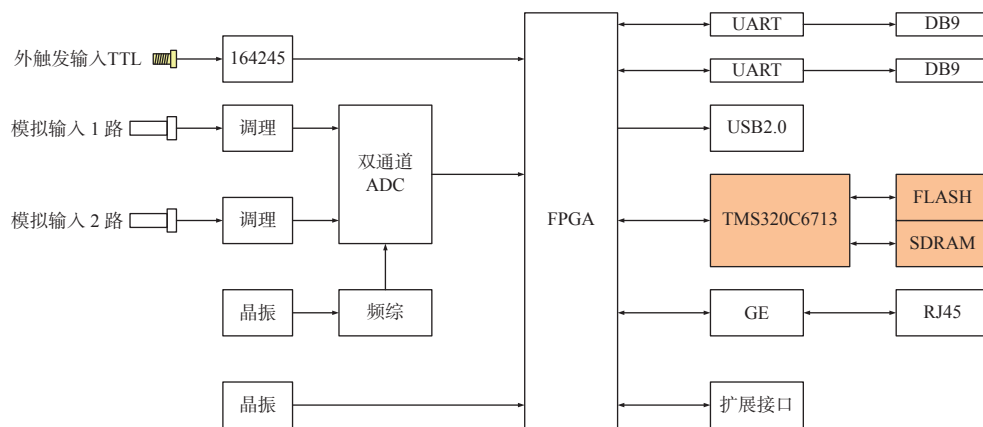


图 6 模块组成框图

Fig. 6 Block diagram of module composition

相干激光测风雷达控制电路板提供激光雷达所需激励信号和时序控制信号, 完成与远程 PC 机和外设的通信接口。电路板通过运放积分电路产生所需锯齿波形, 具备 DA 输出接口、TTL 信号输出接口、CAN 等资源。驱动电信号输出类型包括模拟触发信号与数字触发信号。模拟信号幅度 1 V, 半高宽 300 ns ~ 500 ns, 重频 20 kHz。数字触发信号为 TTL 驱动信号, 频率 20 kHz, 占空比 50%。

3.5 相干激光测风雷达系统热控仿真技术

考虑到相干激光测风雷达在户外高低温环境下 ($-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的工作要求, 根据热分析计算的需要对模型进行了适当的简化: 1) 忽略激光雷达内部微小结构件对导热、辐射的影响; 2) 将模型中的安装螺钉、小凸台等局部结构特征进行简化处理; 3) 对结构中的倒角、微槽等微小几何特征进行简化处理, 忽略其对传热的影响; 4) 创建一个激光雷

达直径 10 倍的平面,设置定温边界模拟地面辐射,如图 7(a)所示;5)在测风雷达外表面加载热负载模拟太阳辐射热流;6)采用实验关联式模拟外部对流换热;7)忽略 NB 自然对流的影响;8)将集热板、电源模块散热器冷板当做定温边界处理。最后,采用 TD 软件进行仿真建模,如图 7(b)与图 7(c)所示。

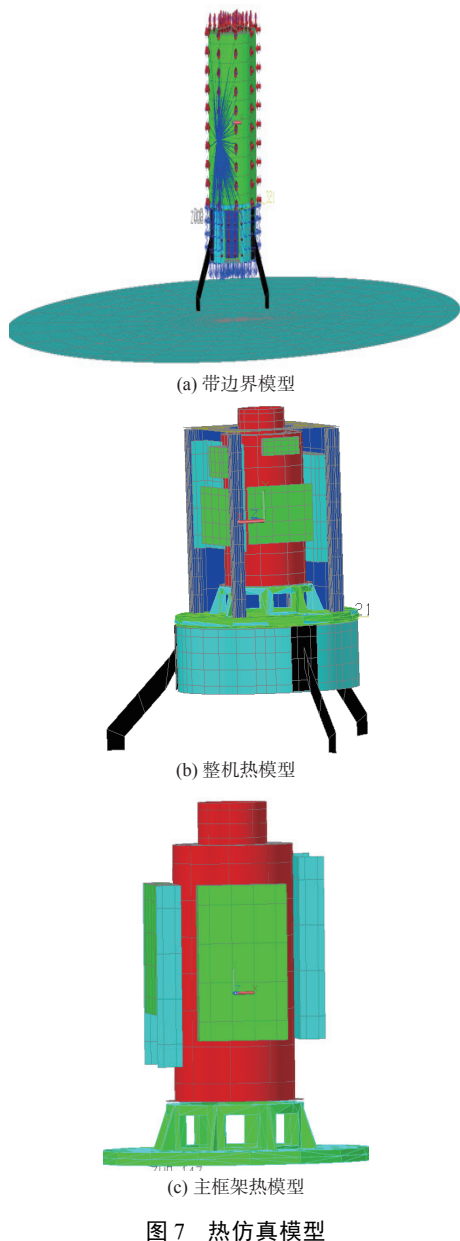


图 7 热仿真模型

3.5.1 激光雷达系统热仿真

热分析中选用的材料参数如表 2 所示,其中铝材料为激光雷达主要结构件材料,聚酯亚胺泡沫隔热材料为激光雷达外罩内的隔热材料,不锈钢为部分激光雷达底座及电源模块材料,白漆为外罩涂覆层材料,玻璃钢为外罩材料。

表 2 热仿真参数

Table 2 Parameters of thermal simulation

材料	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	导热系数 $\lambda/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	比热容 $C_p/(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$	太阳吸收率 α_s	发射率 ε
铝 2A12 T4	2 640	117.2	921	—	—
聚酯亚胺 泡沫隔热材料	35	0.023	1 470	—	—
不锈钢	7 700	29.3	481	—	—
白漆	—	—	—	0.13	0.89
玻璃钢	1 400	0.342	1 100	—	—

3.5.2 高温仿真工况

白天太阳直射条件,无风情况,环境温度 40 ℃,地面温度 60 ℃,地点模拟在广州的工况。这种条件属于极度高温天气的情况,我们使用隔热保温材料隔绝外界热流扰动影响,使用单相流体回路液冷系统对各个内热源进行散热,同时使用半导体制冷器对温度指标要求较高的光电探测模块进行制冷控温。仿真结果表明,图 8(a)为各热源模块在高温环境下工作时的温度分布云图,由云图可看出各个模块的工作温度范围在 41 ℃~46 ℃之间,满足各热源模块的正常工作温度范围;图 8(b)为激光雷达系统光学镜头的被动温度范围,其温度范围在 46 ℃~48 ℃之间,虽然表面温度分布不均匀,但都出于光学镜头的正常工作温度范围。

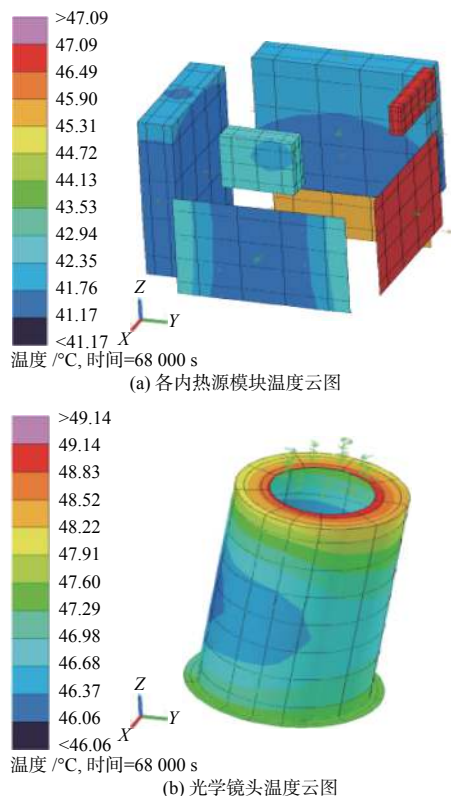


图 8 高温工况仿真结果

Fig. 8 Simulation results of high temperature conditions

3.5.3 低温仿真工况

夜晚无太阳照射条件, 风速 30 m/s, 环境温度 $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地面温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以上条件属于极严寒天气, 系统采用加热控温回路对工作温度要求较高的模块组件进行加热补偿, 同时结合保温措施, 进行热控。仿真结果表明: 在环境温度 $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天气, 激光雷达各组件均能满足温度指标要求。此时, 半导体制冷器热面连接的风扇散热器及电源模块的散热器均不工作。散热器与空气自然对流散热。种子激光器、电机+光楔、光电探测模块等设置加热负载, 仿真结果如图 9 所示。

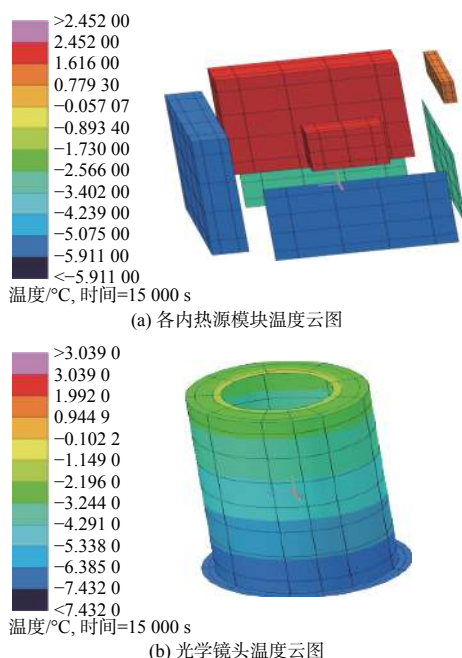


图 9 低温工况仿真结果

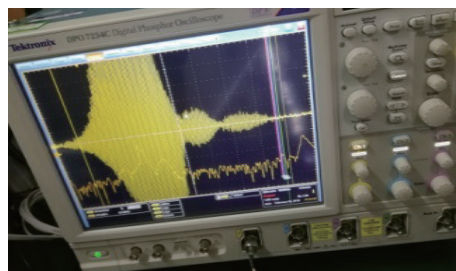
Fig. 9 Simulation results of low temperature conditions

4 激光雷达实验

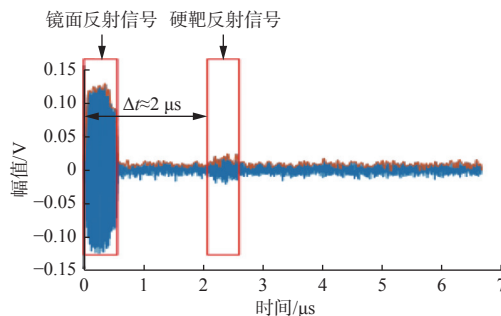
4.1 室内硬靶目标实验

如图 10 所示为相干激光测风雷达进行的室内硬靶目标试验, 图 10(a) 为采集到的目标拍频信号, 其中最左侧的信号为激光雷达系统内部基准信号, 中间为水平方向的镜面反射回波信号所对应的中频信号, 而最右侧为硬靶目标散射的中频信号, 通过该试验验证了激光雷达系统链路的正确性。图 10(b) 为通过激光雷达自身的采集系统对散射目标信号进行的采集, 由该图可得出, 具有脉宽包络信号的是激光雷达系统 NB 的镜面反射信号所产生的中频信号, 而右侧幅度较小的信号为硬靶目标信号, 按照间隔时间差为 $2\text{ }\mu\text{s}$ 计算, 硬靶目标离激光雷达的距离为 150 m, 与实际距离符

合。在实际的风场测量中, 激光雷达输出的风场数据包括: 水平风速(向)、径向风速、风廓线、风羽图、风速(向)误差等。



(a) 不同目标的散射信号



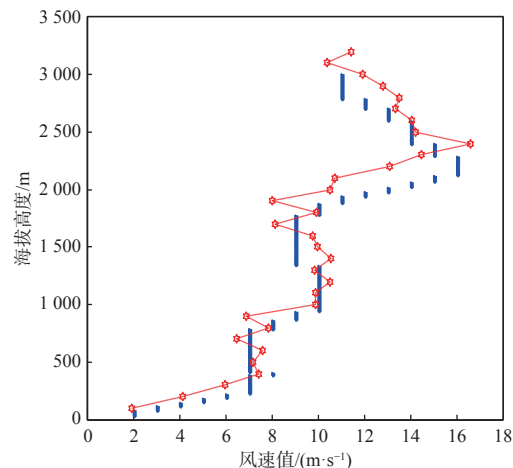
(b) 硬靶目标信号采集

图 10 室内硬靶目标试验

Fig. 10 Experiments of indoor hard targets

4.2 户外标定实验

如图 11 所示为激光雷达在大气探测试验基地的风速(风向)测量结果与探空气球的比对结果, 实验时间为 2022 年 8 月份, 期间的最高温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地面实际温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于激光雷达的垂直分辨率为 100 m, 而探空气球垂直分辨率为 $6\text{ m}\sim 8\text{ m}$, 因此由探空气球获取的大气风场数据比激光雷达数据要多。图 11 所示为 $0\sim 3\text{ km}$ 范围内的对比结果, 数据处理结果显示激光雷达的风速测量精度优于 0.7 m/s (见图 11(a)), 风向测量精度优于 $\pm 5^{\circ}$ (见图 11(b)), 满足探测指标需求。



(a) 风速标定结果

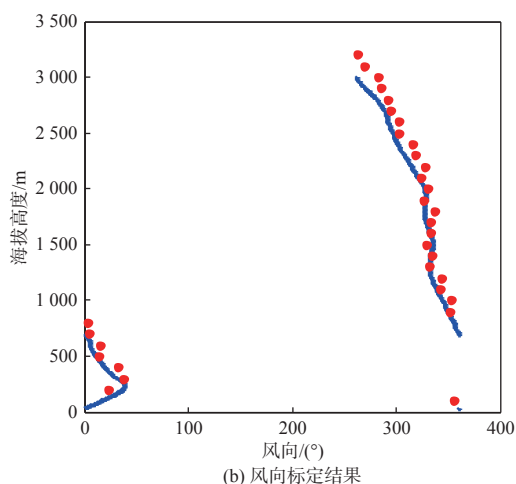


图11 标定实验结果

Fig. 11 Results of calibration experiments

5 结论

本文完成了 $1.5\ \mu\text{m}$ 高可靠中低空相干激光测风雷达研制, 该系统采用全光纤激光收发链路, 具有系统集成度高、小型化、重量轻等优点; 采用高可靠双通数据采集与处理模块, 实现了激光回波信号高速高可靠的数据采集与处理, 实现 $3\ \text{km}$ 内 40 个高度层风速数据的秒级时间间隔的获取; 研制了用于风场廓线数据显示的风场产品反演软件, 具有可视化程度高、易于判读和多领域应用等特点。创新点主要有: 1) 针对于激光源模块无外部触发的固有缺陷, 从激光雷达系统综合控制电路板引出同步触发信号, 该信号作为风场探测及风场廓线高度反演的同步基准参考信号, 提高了测量的准确性和重复性; 2) 采用双通道数据采集与在线快速傅里叶(FFT)频谱变换、谱矩分析等, 实现风场数据的快速可靠处理; 3) 针对户外高低温应用环境特点, 根据激光雷达各个系统组成的热源模块, 进行了热控方案一体化设计, 通过加热控温回路与单相流体回路液冷系统综合实现高低温温度环境的适应性, 研制完成的热控与制冷模块可以满足高低温环境 ($-25\ ^\circ\text{C} \sim 40\ ^\circ\text{C}$) 使用要求。最后, 通过户外实际的风场标定结果表明, 该激光雷达可实现探测高度 $3\ \text{km}$, 风速精度 $0.36\ \text{m/s}$, 风向精度优于 $\pm 5^\circ$, 综合验证了激光雷达系统在户外使用的可靠性。

参考文献:

[1] 王青梅, 郭利乐. 激光雷达在机场低空风切变探测中的

应用[J]. *激光与红外*, 2012, 42(12): 1324-1328.

WANG Qingmei, GUO Lile. Development of lidar in detection of low altitude wind shear[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(12): 1324-1328.

[2] ASAKA K, YANAGISAWA T, HIRANO Y. $1.5\text{-}\mu\text{m}$ eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement[C]//SPIE Proceedings, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring. Sendai, Japan: SPIE, 2001: 321-328.

[3] 林元琦, 赵毅强, 叶茂, 等. 集成化多线列激光雷达模拟前端微组件设计[J]. *光电工程*, 2021, 48(8): 34-46.

LIN Yuanqi, ZHAO Yiqiang, YE Mao, et al. Design of an integrated multi-line LiDAR analog front-end micromodule[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(8): 34-46.

[4] 白莎莎, 张海洋, 许世东, 等. 基于机载激光雷达点云的雪道坡度提取算法[J]. *应用光学*, 2021, 42(3): 481-487. BAI Shasha, ZHANG Haiyang, XU Shidong, et al. Slope extraction algorithm of ski tracks based on airborne LIDAR point cloud[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(3): 481-487.

[5] 李雨佳, 周晓青, 李国元, 等. 星载单光子激光雷达浅水测深技术研究进展和展望[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(10): 107-116.

LI Yujia, ZHOU Xiaoqing, LI Guoyuan, et al. Progress and prospect of space-borne photon-counting lidar shallow water bathymetry technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(10): 107-116.

[6] XIA H Y, SHANGGUAN M J, WANG C, et al. Micro-pulse upconversion Doppler lidar for wind and visibility detection in the atmospheric boundary layer[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5218-5221.

[7] TUCKER S C, WEIMER C, ADKINS M, et al. Optical Autocovariance Wind Lidar (OAWL): aircraft test-flight history and current plans[C]//SPIE Proceedings, lidar remote sensing for environmental Monitoring XV. San Diego, California: SPIE, 2015: 1-7.

[8] LOMBARD L, VALLA M, PLANCHAT C, et al. Eye-safe coherent detection wind lidar based on a beam-combined pulsed laser source[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1030-1033.

[9] RODRIGO P J, IVERSEN T F Q, HU Qi, et al. Diode laser lidar wind velocity sensor using a liquid-crystal retarder for non-mechanical beam-steering[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26674-26679.

[10] IGOR S. Techniques of wind vector estimation from data

- measured with a scanning coherent Doppler lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20: 276-291.
- [11] HERBST J, VRANCKEN P. Design of a monolithic Michelson interferometer for fringe imaging in a near-field, UV, direct-detection Doppler wind lidar[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6910-6929.
- [12] 彭程, 赵长明, 张海洋, 等. 激光测风雷达的双平衡式相干探测技术仿真研究[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(6): 55-63.
- PENG Cheng, ZHAO Changming, ZHANG Haiyang, et al. Simulation study of dual-balanced coherent detection lidar[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(6): 55-63.
- [13] 崔世程, 雷文平. 光机热集成分析在空间激光发射机的应用[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(2): 100-107.
- CUI Shicheng, LEI Wenping. Integrated optical-structural-thermal analysis on space laser transmitter[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(2): 100-107.
- [14] 施海亮, 李志伟, 罗海燕, 等. 多普勒非对称空间外差干涉仪调制度分析[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(5): 57-65.
- SHI Hailiang, LI Zhiwei, LUO Haiyan, et al. The modulation efficiency analysis of Doppler asymmetric spatial heterodyne spectrometer[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(5): 57-65.
- [15] YANG X, LINDBERG R, LARSSON J, et al. 1.57 μm fiber source for atmospheric CO_2 continuous-wave differential absorption lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10304-10310.
- [16] SHI X J, SUN J F, JANG P, et al. All-fiber coherent laser image lidar based on phase correction[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26432-26445.
- [17] 李志刚, 孙泽中, 赵增亮, 等. 机载光纤多普勒测风激光雷达风场反演及实验验证[J]. *应用光学*, 2016, 37(5): 765-771.
- LI Zhigang, SUN Zezhong, ZHAO Zengliang, et al. Wind retrieval of airborne fiber Doppler wind lidar and experimental verification[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 765-771.
- [18] DONG L, ZHOU Y D, CHEN W B, et al. Phase function effects on the retrieval of oceanic high-spectral-resolution lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 654-668.