

非相干测风激光雷达软件控制系统研究

林丰丰^{1,2} 尚建华^{1*} 毕德仓^{1,2*} 信丰鑫² 王子昊² 王溢扬² 赵越²

1. 东华大学信息与智能科学学院, 中国·上海 201620

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所空天激光技术与系统部, 中国·上海 201800

摘要: 本文基于 C++/Qt 应用程序框架, 设计并实现了一套集硬件协同控制、高速采集卡数据接收、数据反演与动态可视化于一体的综合软件平台, 用于解决非相干测风激光雷达系统软件控制问题。软件采用多线程架构, 有效实现了人机交互、硬件 I/O 与数据处理的解耦, 保障了系统稳定性。此外, 系统内嵌了基于最小二乘法的频率标定算法、DBS (Doppler Beam Swinging) 风廓线合成算法。外场试验结果表明该软件系统运行稳定, 能够实时反演 10km 高度内的风速与风向廓线, 并捕捉云层垂直结构及其短时空演变特征。在数据处理的性能效率上, 相较于传统基于 MATLAB 的离线处理方式, 本系统测风与测云数据的反演处理速率分别提升了约 3 倍与 9 倍。

关键词: 非相干探测; 测风激光雷达; Qt 框架; 多线程; 风廓线反演

Research on the software control system of non-coherent wind lidar

Lin Fengfeng^{1,2}, Shang Jianhua^{1*}, Bi Decang^{1,2*}, Xin Fengxin², Wang Zihao², Wang Yiyang², Zhao Yue²

1. College of Information and Intelligent Science, Donghua University, China Shanghai 201620

2. Aerospace Laser Technology and System Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China Shanghai 201800

Abstract: This paper designs and implements a comprehensive software platform based on the C++/Qt application framework, integrating hardware collaborative control, high-speed acquisition card data reception, data inversion, and dynamic visualization, to solve the software control problem of the non-coherent wind lidar system. The software adopts a multithreading architecture, which effectively achieves the decoupling of human-computer interaction, hardware input/output, and data processing, thereby ensuring system stability. In addition, the system embeds a frequency calibration algorithm based on the least squares method and a Doppler beam swinging wind profile synthesis algorithm. Field experiment results show that the software system operates stably, can retrieve wind speed and wind direction profiles within a 10-kilometer altitude in real time, and clearly captures the vertical structure of clouds and their short-term spatiotemporal evolution characteristics. Regarding the performance efficiency of data processing, compared with the traditional offline processing method based on MATLAB, the inversion processing rates of wind measurement and cloud measurement data of this system are improved by approximately 3 times and 9 times, respectively.

Keywords: Non-coherent detection; Wind lidar; Qt framework; Multithreading; Wind profile inversion

0 引言

非相干测风激光雷达是获取地表至低平流层风速廓线的关键工具, 在数值天气预报和航空气象保障中发挥着不可替代的作用^[1-4]。尽管激光雷达硬件技术发展迅速, 但软件系统相对滞后。目前, 非相干探测的数据处理主要依赖离线方法, 即先采集原始二进制数据, 随后使用 MATLAB 或 Python 等第三方工具进行处理^[5]。这种采集与处理分离的模式, 导致无法在现场实时获取风廓线或云层 RHI (距离高度显示) 图像。

为了克服跨平台兼容性差和实时处理能力不足的局面, 本文开发了一套基于 C++/Qt 框架的综合软件平台。

该系统集成了硬件协同控制、高速采集、实时反演与动态可视化功能。

1 数据反演原理与系统架构

1.1 系统硬件组成

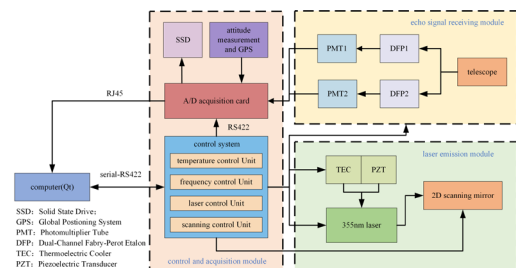


图1 非相干多普勒测风激光雷达系统硬件组成

如图 1 所示，硬件系统主要由三个模块组成：355nm 激光发射模块、以双通道法布里 - 珀罗标准具 (DFP) 为核心的回波信号接收模块，以及控制与采集模块。采集模块利用 FPGA 处理 PMT (光电倍增管) 电信号，并通过千兆网口使用 UDP 协议将双通道科学数据传输至上位机。

1.2 原始信号预处理与鉴频响应计算

利用双边缘技术的鉴频原理，构建鉴频响应函数 $R(i)$ ，定义为两通道信号的归一化差值比：

$$R(i) = \frac{I_A(i) - I_B(i)}{I_A(i) + I_B(i)} \quad (1)$$

法布里 - 珀罗干涉仪 (FPI) 的频率灵敏度可表示为单位风速变化引起的鉴频响应函数的相对变化^[6]：

$$S_R = \frac{d[R(V)]}{R(V)dV} = \frac{2}{\lambda} \frac{d[R(v)]}{R(v)dv} \quad (2)$$

在风场探测中，系统采用 Doppler Beam Swinging 扫描技术，在固定的俯仰角 θ 下，向四个正交方向 (北、东、南、西) 依次发射激光脉冲。南北方向风速分量 $V_{NS}(z)$ 以及东西方向风速分量 $V_{EW}(z)$ 可表示为：

$$V_{NS}(z) = \frac{\bar{R}_N(z) - \bar{R}_S(z)}{2S(z)\cos(\varphi)} \quad (3)$$

$$V_{EW}(z) = \frac{\bar{R}_E(z) - \bar{R}_W(z)}{2S(z)\cos(\varphi)} \quad (4)$$

利用各方向的径向风速，可合成水平风速 $V_h(z)$ 和风向 $\Phi(z)$ ：

$$V_h(z) = \sqrt{V_{NS}(z)^2 + V_{EW}(z)^2} \quad (5)$$

$$\Phi(z) = \left\{ \text{atan2}[V_{EW}(z), V_{NS}(z)] - \frac{180}{\pi} + 360 \right\} \text{mod} 360 \quad (6)$$

2 系统控制软件设计

2.1 多线程架构

为防止高速数据吞吐期间出现界面卡顿，软件采用了多线程的生产者-消费者模型^[7]。如图 2 所示，该架构包含一个负责 UI 渲染和生命周期管理的主线程，以及两个工作子线程。

主控串口通信子线程负责下发控制指令并监听串口。内部将原始十六进制数据解析为工程数据并发送至主线程，由主线程分别将原始数据 (bin/txt 格式) 和解析数据 (CSV 格式) 进行持久化存储。

UDP 网络与数据处理子线程利用 QUdpSocket 接收采集卡数据，通过双缓冲机制有效防止丢包。该线程集成了核心算法：在定标模式下执行最小二乘法计算灵敏度；在

风廓线模式下依据 DBS 策略反演风速与风向。同时，负责将原始采集数据实时分片存储为 bin 文件。

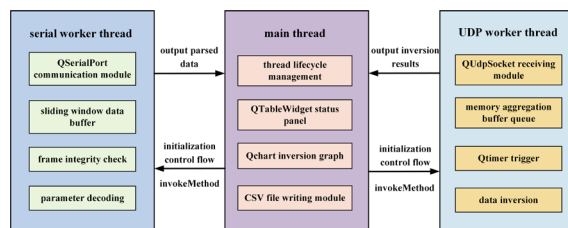


图2 线程设计架构

2.2 异步双缓冲机制

针对 UDP 科学数据，系统采用异步双缓冲机制。一级缓冲区快速接收底层网卡数据，后台通过滑动窗口提取完整的科学数据帧，并将其推入二级缓冲区。随后，利用定时器周期性地二级缓存数据批量存入磁盘并触发反演算法。该机制有效打破了传统串行 I/O 的阻塞瓶颈，保障了连续采样时的数据完整性与系统稳定性。

在反演算法中，系统首先将有效数据转换为电压信号，以计算频率响应的归一化 R 值。若为测云模式，系统提取云层回波特征并生成 RHI 图；若为风廓线模式，系统则缓存四个正交方位的 R 值，据此合成并显示水平风速与风向。

3 外场实验与性能分析

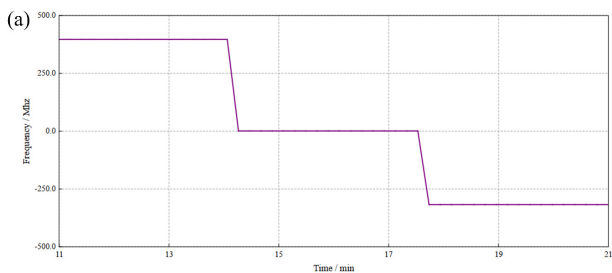
为验证系统的运行稳定性和实时处理能力，于 2025 年 10 月 27 日开展了外场观测实验。

3.1 频率与回波信号实时显示

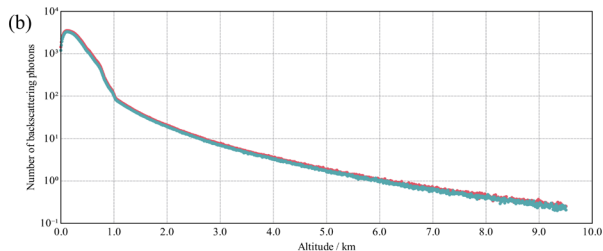
系统上电后依次执行扫描转镜复位、倍频晶体温控以及注入激光二极管驱动电流。随后开启主激光器，待运行稳定后启动扫频，并在达到锁频区间后切换至稳频模式，实现激光频率锁定，脉冲频率监测曲线如图 3(a) 所示。如图 3(b) 所示，两通道原始回波信号随探测高度的增加而逐渐衰减，在 8~9km 以上接近系统噪声水平。由于视向风速引起的多普勒频移会导致双边缘通道的透射率产生差异，因此利用两通道信号强度的不同，通过归一化差分计算即可反演大气的视向风速，为后续数据处理提供基础。

3.2 风场与云层反演结果

在风廓线模式下，系统稳定输出了 0-9.5km 高度内的风速和风向廓线。如图 4(a) 显示，在 0-2km 边界层内存在平滑的风切变，风速从近地面的约 20m/s 增至 30m/s；在 6-8.5km 中高空，风速出现显著的波动与跃增，局部极值达到约 60m/s。如图 4(b) 所示，整体主导风向稳定为南风。



(a) 脉冲频率监测曲线



(b) 原始回波信号

图3 实时数据显示

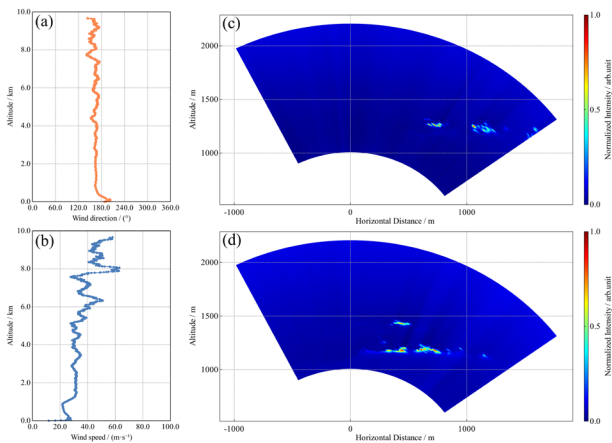


图4 反演结果 (a) 风速; (b) 风向; (c) 2025年10月27日14:46分云回波RHI扫描图; (d) 2025年10月27日14:54分云回波RHI扫描图

如图 4(c) 与图 4(d) 所示, 在测云模式下, RHI 扫描清晰反演了 1.1km 至 1.5km 之间的云层垂直剖面结构。连续动态观测有效捕捉了云团核心强回波区域在风场作用下的短时漂移与形变特征。

表1 Qt与MATLAB算法执行时间的性能比较 (单位: s)

组别	Qt		MATLAB	
	风反演	云反演	风反演	云反演
1	3.253	0.138	10.984	1.290
2	3.626	0.129	10.106	1.184
3	3.665	0.127	10.388	1.286
4	3.486	0.119	10.155	1.196
5	3.853	0.121	12.099	1.291
6	3.813	0.139	11.998	1.284

3.3 数据处理速率对比

为验证本文基于 C++/Qt 多线程架构开发的上位机软件在应对回波信号时的实时处理性能, 本节选取了 6 组不同数据量的实测科学数据, 分别在本文系统与传统离线处理软件 MATLAB 中进行处理速率对比测试。二者测云反演与测风反演两类核心功能的数据处理耗时对比结果如表 1 所示。

图 6 展示了 Qt 与 MATLAB 在 6 组实测数据下的处理速率对比结果。由图 5(a) 的测风反演算法处理速率对比可知, 在风场多维矢量解算任务中, 本文 Qt 系统的处理速率稳定在 7.9MB/s 至 11.0MB/s 之间, MATLAB 的处理速率分布在 2.5MB/s 至 3.3MB/s 区间。本文基于 Qt 框架软件系统的测风数据处理能力相较于 MATLAB 提升了约 3 倍, 且在不同任务组的数据下均保持了良好的稳定性。由图 5(b) 的测云反演算法处理速率对比可以看出, 两者的性能差距进一步拉大。Qt 系统的测云数据处理速率达 236MB/s 至 252MB/s, MATLAB 的处理速率仅维持在 25MB/s 至 28MB/s。在测云模式下, 本文系统的处理效率较 MATLAB 提升约 9 倍。

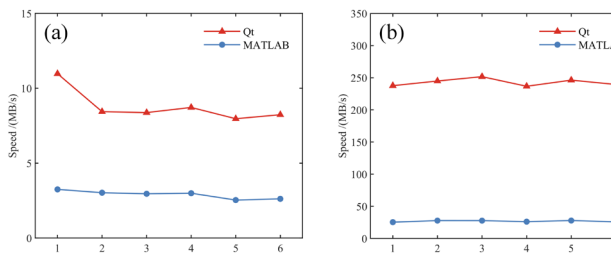


图5 Qt与MATLAB算法处理速率对比 (a) 测风反演算法; (b) 测云反演算法

4 结语

本文成功设计并实现了一套深度集成的非相干测风激光雷达上位机控制与数据处理系统。通过采用 C++/Qt 多线程架构和 UDP 双缓冲处理机制, 系统彻底消除了传统离线处理模式导致的滞后性, 实现了高精度风廓线和云层结构的实时反演与可视化。与传统 MATLAB 处理相比,

系统数据吞吐率实现了3倍至9倍的跃升。该平台的工程实现显著增强了雷达装备的自动化程度与实时监测效能,为大气物理研究提供了可靠的软硬件支撑平台。

参考文献:

[1] Hailang Du. Application Progress of Doppler Wind LiDAR in Aviation Meteorology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(24): 2400002.

[2] McGill M J, Skinner W R, Irgang T D. Validation of wind profiles measured with incoherent Doppler lidar [J]. Appl Opt, 1997, 36(9): 1928-1939.

[3] Li J W, Chen C, Han Y L, et al. Wind Profile Reconstruction Based on Convolutional Neural Network for Incoherent Doppler Wind LiDAR [J]. Remote Sensing, 2024, 16(8).

[4] GARNIER A, CHANIN M. DESCRIPTION OF A DOPPLER RAYLEIGH LIDAR FOR MEASURING WINDS IN THE MIDDLE ATMOSPHERE [J]. Applied Physics B-Photophysics and Laser Chemistry, 1992, 55(1): 35-40.

[5] Kaiqiang Wang, Zhe Li, Zhenchong Xing, et al.

Design of Underwater Spot Target Tracking Software Based on Qt and MATLAB Mixed Programming[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(09): 0922003.

[6] Xiaoying Liu., Hongwei Zhang, Qichao Wang, et al.. Inter-comparison study of wind measurement between the three-lidar-based virtual tower and four lidars using VAD techniques. Geo-Spatial Information Science, 27(3), 653-669.

[7] Qing Liu, Wen Zhu, Xiaomei Jin, et al. Real-Time Synchronous Acquisition and Processing of Signal in Coherent Doppler Wind Lidar Using FPGA [J]. Remote Sensing, 2023, 15(24).

作者简介: 林丰丰(2001.08-), 男, 汉族, 江西上饶, 东华大学, 硕士, 研究方向: 激光雷达软件设计研究。

* 通讯作者: 尚建华(1983.12-), 女, 蒙古族, 内蒙古包头, 东华大学, 博士, 副教授, 研究方向: 光电子技术和控制。

毕德仓(1981.08-), 男, 汉族, 山东菏泽, 中国科学院上海光学精密机械研究所, 博士, 研究员, 研究方向: 空间激光遥感技术研究, 聚焦大气/海洋激光探测领域。