红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

激光雷达测风系统信号采集处理研究

李光福　南钢洋　潘冬阳　白雪　刘帅　孙志慧

Research on signal acquisition and processing of lidar wind measurement system

Li Guangfu, Nan Gangyang, Pan Dongyang, Bai Xue, Liu Shuai, Sun Zhihui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20210467

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

实时感知型激光雷达多通道数据采集系统设计

Design of multi-channel data acquisition system for real-time perception lidar

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200291-1-20200291-7　https://doi.org/10.3788/IRLA20200291

海洋激光雷达图像处理提取海水深度的方法

Extracting sea water depth by image processing of ocean lidar

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20211034-1-20211034-8　https://doi.org/10.3788/IRLA20211034

相干测风激光雷达微弱信号的频率估计

Frequency estimation of the weak signal of the Coherent Wind Lidar

红外与激光工程. 2018, 47(3): 306002-0306002(8)　https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0306002

含有突变信号的激光雷达能见度反演

Lidar visibility inversion with breakpoint signal

红外与激光工程. 2017, 46(3): 330001-0330001(7)　https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0330001

底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展（特邀）

Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20210032-1-20210032-10　https://doi.org/10.3788/IRLA20210032

移动机器人中激光雷达测距测角标定方法

LiDAR ranging angle measurement calibration method in mobile robot

红外与激光工程. 2019, 48(6): 630002-0630002(8)　https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0630002

激光雷达测风系统信号采集处理研究

李光福，南钢洋*，潘冬阳，白　雪，刘　帅，孙志慧

(齐鲁工业大学 (山东省科学院) 山东省科学院激光研究所，山东 济南 250103)

摘　要：为满足风场对风速测量的需求，研制了基于 FPGA 的激光雷达测风系统高速信号采集处理模块，负责对激光雷达回波信号采集、快速傅里叶变换 (FFT) 及频谱数据累加平均运算。将采集到的 1 024 点回波数据通过流模式、块浮点结构 FFT 运算，分别得到单次频谱数据和 1 024 次累加平均频谱数据，并利用数据传输模块可靠传输至上位机进行显示与分析。通过搭建工作波长为 1 550 nm 的连续相干激光雷达测风系统，对信号采集处理模块进行指标测试和累加平均滤波算法验证。测试结果表明：该采集处理模块能够在 100 MHz 时钟下对回波信号实时采集处理，频谱分辨率达到 97.66 kHz，将风速测量精度提升至 7.57 cm/s。

关键词：激光雷达；　高速信号采集与处理；　FPGA；　FFT

中图分类号：TN958.95　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3788/IRLA20210467

Research on signal acquisition and processing of lidar wind measurement system

Li Guangfu, Nan Gangyang*, Pan Dongyang, Bai Xue, Liu Shuai, Sun Zhihui

(Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, China)

Abstract: In order to meet the requirements of wind speed measurement in wind field, a high-speed signal acquisition and processing module of lidar wind measurement system based on FPGA has been developed, which was responsible for lidar echo signal acquisition, Fast Fourier Transform (FFT) and spectrum data accumulation and averaging operation. The collected 1 024 point echo data was calculated by flow mode and block floating-point structure FFT to obtain single spectrum data and 1 024 cumulative average spectrum data respectively, and the data transmission module was reliably transmitted to the host computer for display and analysis. By building a continuous coherent lidar wind measurement system with the working wavelength of 1 550 nm, the index of the signal acquisition and processing module was tested and the cumulative average filtering algorithm was verified. The experiment results show that the acquisition and processing module can meet the real-time acquisition and processing of echo signal under the 100 MHz clock, and the spectrum resolution reaches 97.66 kHz, and the accuracy of wind speed measurement is improved to 7.57 cm/s.

Key words: lidar;　high-speed signal acquisition and processing;　FPGA;　FFT

收稿日期：2021-05-10;　**修订日期：**2021-06-20

基金项目：山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010418)；山东省重点研发计划项目 (2019GSF111058)

作者简介：李光福，男，硕士生，主要从事信号采集处理系统方面的研究工作。

通讯作者：南钢洋，男，副研究员，博士，主要从事激光雷达、图像处理、信号采集系统方面的研究工作。

0 引 言

近年来，激光雷达测风系统不断快速发展并被广泛应用于航空安全、大气科学、风力发电、气象预报等重要领域[1−2]。作为一种新型的风速测量仪器，激光雷达测风系统在实时风速测量领域具有一定的需求量，同时测风系统对回波信号数据量、传输速率要求也越来越高[3]。对回波信号进行高速采集与处理是激光雷达测风系统的重要环节。为利用多普勒频谱进行风速反演，同时提高测风系统的信噪比，需要对回波信号采取 FFT 运算，并对运算结果进行多次累加平均。目前，市面上对回波信号的 FFT 运算与频谱数据的累加平均一般采用 DSP 或者 ASIC(专用集成电路)，其中前者采用指令集进行数据运算，测风实时性稍有欠缺；而后者成本高，欠缺可维护性与可配置性[4−5]。中国电子科技集团李河均等人采用商业数据采集卡和 LABVIEW 软件设计了激光测风雷达信号处理系统，通过验证该信号处理系统能够实现 0.8 m/s 的速度测量精度[6]；如今市面上多数激光雷达测风系统风速精度为 0.1 m/s，例如北京波恩仪器仪表测控技术有限公司 BN-WDR、南京牧雷激光科技有限公司 Molas B300 产品等。

针对激光雷达测风系统在数据传输速度、处理精度以及实时性等方面需求，该研究在连续相干激光雷达测风原理基础上，利用光学器件以及自主设计的基于 FPGA 的高速信号采集处理模块、数据传输模块和上位机应用程序，搭建了一套完整的连续相干激光雷达测风系统。实现对激光雷达回波信号的实时采集处理与显示分析。文中将着重介绍基于 FPGA 的高速信号采集处理模块的原理及设计过程，该模块能够实现回波数据的实时运算，保证了激光雷达测风系统的实时性和准确性，具有较高的工程应用推广价值。

1 连续相干激光雷达系统设计

激光雷达测风系统原理如图 1 所示，由连续光纤激光器、光纤放大器、环形器、望远镜、可调光衰减器、保偏光纤耦合/分束器、平衡探测器、ADC 和 FPGA 组成的信号采集处理模块、上位机等组成。

利用连续光纤激光器产生波长为 1 550 nm 的连续激光，经保偏分束器分成两路：一路光通过可调光衰减器作为本振光在保偏光纤耦合/分束器实现相干处理；另一路探测光通过光纤放大器进行功率放大，进入到光纤环形器，经过同轴望远镜发射频率为 f_a 的光信号到大气中。该光信号通过大气中气溶胶颗粒散射后返回频率为 f_b 的回波光信号，该回波光信号被聚焦透镜接收耦合后通过光纤与本振光进行外差相干混频，得出多普勒频移 Δf，此时风速 v 与多普勒频移 Δf 关系为[7−8]：

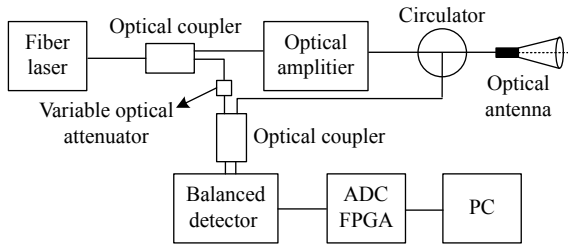

图 1 激光雷达测风系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of lidar wind measurement system

$$\Delta f = f_a - f_b = 2v/\lambda \tag{1}$$

式中：λ 为 1 550 nm。相干后的光信号在平衡探测器上转换为电信号，经过信号采集处理模块将模拟信号转换为数字信号，再通过 FPGA 进行 FFT 运算以及频谱数据累加平均，通过上位机软件反演出风速。为了得到多普勒频移 Δf，基于以上原理搭建一套激光雷达测风系统，主要器件参数标定如表 1 所示。

表 1 激光雷达测风系统主要器件参数标定

Tab.1 Parameter calibration of main components of lidar wind measurement system

Name	Parameters	Value
Fiber laser	Wavelength/nm	1 550
	Output power/mW	10
	Line width/kHz	3
Balanced detector	Responsivity/A·W^{-1}	0.95
	3 dB bandwidth/MHz	100
Telescope	Focus distance/m	50
ADC	Resolution/bit	14
	Sampling rate/MHz	100

利用上述设定参数器件搭建的激光雷达测风系统，将望远镜聚焦距离固定在 50 m 左右，进行实际风速测量与实验数据分析，得出测风系统的性能指标。

2 高速信号采集处理设计

2.1 整体架构

根据激光雷达回波信号特点，研制了高速信号采集处理模块，同时设计数据传输模块将采集处理后的数据实时传输到上位机进行分析、处理及显示，其框图如图 2 所示。

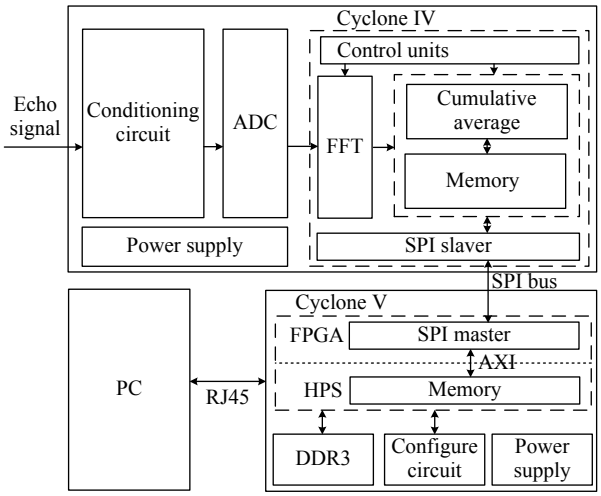

图 2 信号采集处理及数据传输模块框图

Fig.2 Block diagram of signal acquisition and processing and data transmission module

为了得到回波信号的有效频谱，信号采集处理模块采用“高速 ADC+FPGA”架构，其中高速 ADC 采用 ADI 公司 AD9268 芯片，其最大采样速率为 125MSPS，分辨率为 16 位。FPGA 采用 Intel 公司高性能、低功耗 Cyclone IV 系列芯片 EP4CE115 作为核心控制器，利用控制逻辑及相关运算实现对回波信号的实时采集、FFT 运算、累加平均及数据传输。

2.2 数据传输模块与上位机

数据传输模块通过 SPI 总线与信号采集处理模块进行通信，同时利用 TCP/IP 协议与上位机通信。该模块采用Intel 公司CycloneVSOC 系列芯片5CSEBA6U 作为核心控制器，该芯片包含 FPGA 部分与 HPS(Hard Processing System) 部分，其中 FPGA 部分实现 SPI 传输控制逻辑，实时读取信号采集处理模块的数据；HPS 部分拥有双核 Cortex-A9 处理器与相关外设接口，其运行频率高达 925 MHz，利用芯片内部高速 AXI(Advanced eXtensible Interface) 总线，与 FPGA 部分可实现最高 128 位宽数据通信。当 AXI 总线运行 200 MHz 时，数据位宽为 128 位，FPGA 和 HPS 的通信速率：128×200÷8=3 200 MB/s，大大提高了二者之间数据传输效率，解决了大数据量传输瓶颈。

此外，由于 Qt 框架支持跨平台 C++图形用户界面开发，具有良好的封装机制，可重用性好[9]，该研究基于此框架开发了一套回波信号频谱分析显示应用程序，并实时计算出风速参数。

3 FFT 原理与设计实现

3.1 基本原理

实际风速测量过程中，提取到有效的多普勒频谱信息对实现风速反演有着重要意义，目前 FFT 算法的实现有软件与硬件两种实现方式[10]。针对激光雷达回波信号实时性强的特点，软件方式实现存在运算速度慢、延时长等问题，对数据的处理欠缺实时性，因此研究硬件实现 FFT 对激光雷达测风系统有着重要意义。该研究使用了块浮点结构，将采集到的回波数据在 FPGA 上进行实时 FFT 流模式运算。

FFT 是离散傅里叶变换 (以下简称 DFT) 的快速算法，长度为N的 DFT 单位圆上计算均匀分布的N个点 $W_N^{nk}=\mathrm{e}^{-j2\pi nk/N}$组成的时域离散序列 $x(n)$的傅里叶变换[11]：

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)W_N^{nk},\quad k=0,1,\cdots,N-1 \tag{2}$$

Cooley-Tukey(库利-图基)FFT 算法是变换长度N是r基幂的形式，即$N=r^x$，该算法称为基r算法。采用基-4 FFT 可以降低运算对 FPGA 资源的占用量，提高 FPGA 对回波数据运算的效率,提高频谱数据运算精度，其基本结构是每一级运算由$N/4$个蝶形运算构成，将序列$x(n)$分成 4 个$N/4$点的序列，原理如下：

$$x_1(n),\ x_2(n),\ x_3(n),\ x_4(n)\ \ n=0,1,\cdots,N/4-1 \tag{3}$$

令：

$$\begin{cases} A=x_1(n)=x(n) \\ B=x_2(n)=x(n+N/4) \\ C=x_3(n)=x(n+N/2) \\ D=x_4(n)=x(n+3N/4) \end{cases} \tag{4}$$

得：

$$x(n)=x_1(n)+x_2(n)+x_3(n)+x_4(n)=A+B+C+D \tag{5}$$

将$x(n)$代入 DFT 表达式中，则有：

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N/4-1}[AW_N^{nk}+BW_N^{(n+N/4)k}+CW_N^{(n+N/2)k}+DW_N^{(n+3N/4)k}]=\sum_{n=0}^{N/4-1}[A+BW_N^{Nk/4}+CW_N^{Nk/2}+DW_N^{3Nk/4}]W_N^{nk} \tag{6}$$

把$X(k)$按频率抽取，得：

$$\begin{cases} X(4k)=\sum_{n=0}^{N/4-1}[A+B+C+D]W_{N/4}^{nk} \\ X(4k+1)=\sum_{n=0}^{N/4-1}[A-jB-C+jD]W_N^{n}W_{N/4}^{nk} \\ X(4k+2)=\sum_{n=0}^{N/4-1}[A-B+C-D]W_N^{2n}W_{N/4}^{nk} \\ X(4k+3)=\sum_{n=0}^{N/4-1}[A+jB-C-jD]W_N^{3n}W_{N/4}^{nk} \end{cases} \tag{7}$$

3.2 设计实现与仿真验证

根据上述原理，该研究采用时序控制逻辑结合封装完成的 FFT IP 核，在 100 MHz 全局时钟下对 1 024 点回波数据进行 FFT 运算，仿真结果表明一帧 FFT 运算时间约为 100 μs，相比 DSP 等软件编程方式处理频谱数据拥有更好的实时性。此设计在提高数据测量精准度的同时也缩短了开发周期。对 FFT IP 核进行状态机控制逻辑编写得到的时序仿真如图 3 所示。

其中 sink_sop 与 sink_eop 表示输入一帧数据的开始与结束；sink_real 与 sink_imag 表示输入数据的实部与虚部；source_sop 与 source_eop 表示一帧 FFT 计算结果输出的开始与结束；source_real 与 source_imag 表示计算输出数据的实部与虚部；sink_ready 与 source_ready 表示 FFT 引擎可以接收数据与发送数据。sink_valid 信号拉高时表示输入端口数据有效，source_exp 表示 FFT 计算输出数据的指数。

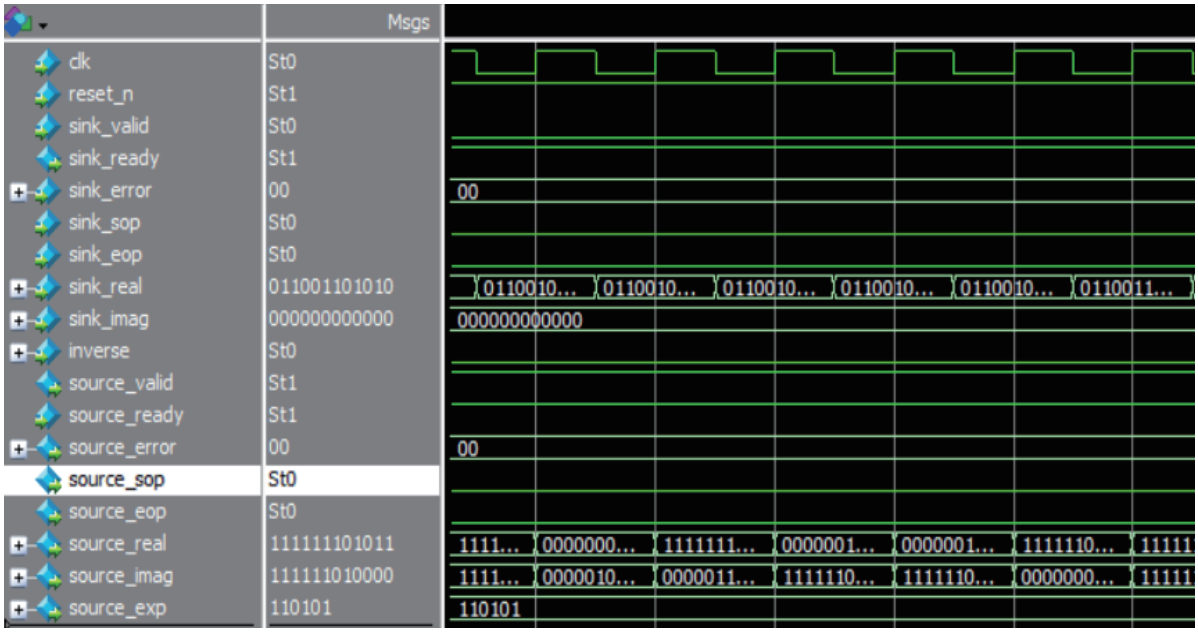

图 3 流模式、块浮点结构下的时序仿真图

Fig.3 Timing simulation diagram under stream mode and block floating-point structure

4 频谱数据累加平均算法设计实现

4.1 算法架构设计

激光雷达回波信号频谱复杂、背景噪声复杂，为提高系统测风的精准度，保证测风过程的实时性的同时有效降低背景噪声对测风精度的影响，需要在信号采集处理模块内，利用 10 kHz 的内部触发信号对回波信号进行 1 024 个点的采集处理。整个算法设计在状态机逻辑控制下完成，将 FFT 运算后的数据进行对应点累加，累加后数据移位至存储器中，最终累加平均结果通过 SPI 总线发送给数据传输模块，算法架构如图 4 所示。

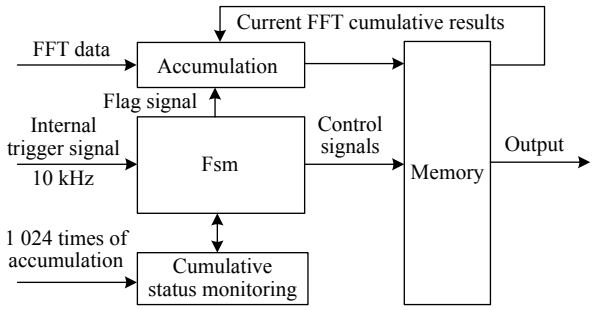

图 4 累加平均算法架构图

Fig.4 Architecture diagram of cumulative average algorithm

4.2 算法具体实现

FPGA 中 FFT 累加平均运算由并行累加存储单元、累加次数判断单元、存储器等模块以及相关标志信号协同工作完成。FFT 的计算结果输出标志作为状态机的驱动，标志信号确保每次 FFT 计算结果的对应点依次累加，保证了数据准确性，图 5 是 1 024 次累加状态转移图,其运行频率为 100 MHz。

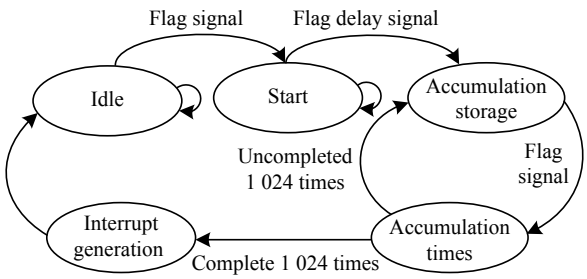

图 5 累加状态转移图

Fig.5 Cumulative state transition diagram

在空闲状态下，初始化并行累加存储单元与累加计数器；当检测到标志信号时，跳转到开始累加状态；等待延迟标志信号，将 FFT 算出的第一组数据写入存储器模块中，状态跳转到累加存储单元。状态机检测到第二次标志信号时，开启并行累加器使能，开始将第一组数据与第二组数据进行对应点累加存储，同时将新的累加结果写入存储器模块；在完成一次新数据累加存储后，跳转到累加判断状态，进行当前累加次数与 1 024 次进行比较，如果未到达则跳回累加存储状态继续累加存储；如果到达则跳转到累加完成状态，同时给出中断信号。控制逻辑将累加数据右移 10 位得到 1 024 次累加平均数据，通过 SPI 总线将该累加平均数据发送给数据传输模块。

4.3 算法优势

DSP 在 20 MHz 主频下完成一次 1 024 点采集任务结束后，DSP 在 0.2 ms 内 (采集 1 024 个数据的时间：1 024×10 ns≈0.01 ms) 将 1 024 个数据读入 DSP 存储器暂存[12]，等 1 024 次采集结束后，需要的时间约为 0.2 ms×1 024≈205 ms。将 DSP 主频设置为 100 MHz，完成 1 024 次采集需要 41 ms 左右，并且在 1 024 次采集任务完成之后 DSP 还需要进行对应点的累加平均工作，此过程又会消耗 DSP 大量存储空间与时间，将导致后续风速反演速度变慢，导致测风系统实时性变差。另外，当采集数据点数增加时、累加平均次数增多时，完成单次数据点采集时就花费 DSP 更多的时间与存储空间，数据读取的时间也会更长，这就会使测风系统实时性较差、并且也欠缺后期的可配置性。

相较于上述方案，该研究利用 FPGA 设计累加平均算法，当采样频率 f_S=100 MHz，FFT 长度 P=1 024 点，N=1 024 次时，根据以下公式[13]：

$$T=\frac{N\times P}{f_S} \tag{8}$$

得到累加平均数据的采样时间 T 约为 10 ms：两者数据对比表明，该研究所设计的硬件实现累加平均算法，能大幅度提高频谱数据运算速度，提高系统的时间分辨率与测风精度。

5 系统联调与数据分析

5.1 系统联调

为了对连续相干激光雷达测风系统的回波信号进行采集处理与显示，同时验证采集处理模块的性能指标，在实验室搭建激光雷达侧风系统实验平台。实验平台如图 6 所示，该平台有以下模块组成，其中①~⑧分别为连续激光器、光纤放大器、可调光衰减器、望远镜、平衡探测器、采集处理模块、数据传输模块和上位机。

①~⑤以及光纤组成了连续相干激光雷达部分，将设计的⑥~⑧接入到连续相干激光雷达部分，组成完整的激光雷达测风系统。相干后的光信号在⑤上转换为电信号，通过⑥进行实时采集、FFT 计算多普勒频移、并对频谱数据进行累加平均运算；将处理后的数据通过 SPI 总线传输到⑦上，最后通过网线传输到⑧实时监控频谱数据，并进行风速反演。

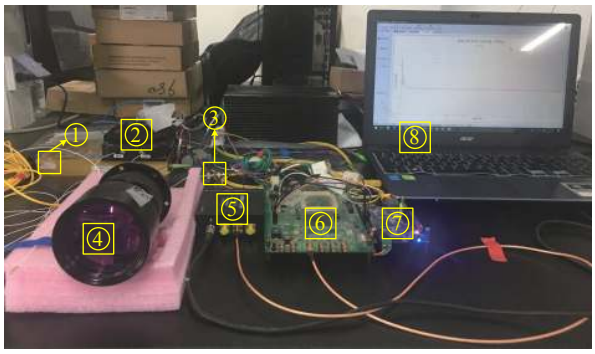

图 6 激光雷达测风系统

Fig.6 Lidar wind measurement system

5.2 系统指标分析

搭建的该套激光雷达测风系统能够实现的性能指标如表 2 所示。

表 2 测风系统性能指标

Tab.2 Performance indicators of wind measurement system

Parameter	Value
Detection range/m	10-100
Wind speed measurement range/m·s^{-1}	0-38
Spectral resolution/kHz	97.66
Wind speed measurement accuracy/cm·s^{-1}	7.57
Wind speed data refresh frequency/Hz	8

由于光的衍射，连续激光超过一定距离无法聚焦，测量距离经常在几十到数百米之间[14]，ADC 的数据采集速率为 100 MHz，根据奈奎斯特采样定理，超过 50 MHz 后的多普勒频谱数据将会失真，所以该系统最大测量风速约为 38 m/s；其中频谱分辨率由数据采样频率除以采样点数得到，即：100 MHz/1 024≈97.66 kHz，根据频谱分辨率得出系统的测量风速的精度为 7.57 cm/s，经过系统联调测试，风速数据刷新频率为 8 Hz。

5.3 频谱累加平均数据分析

为了验证累加平均算法对激光雷达回波信号背景噪声的滤波效果，利用采集处理模块分别实现对回波信号频谱单次测量与 1 024 次累加平均测量。图 7 为单次回波信号频谱，X 轴表示信号的频率，其分辨率为 0.1 MHz；Y 轴表示幅值谱，采用对数坐标，单位

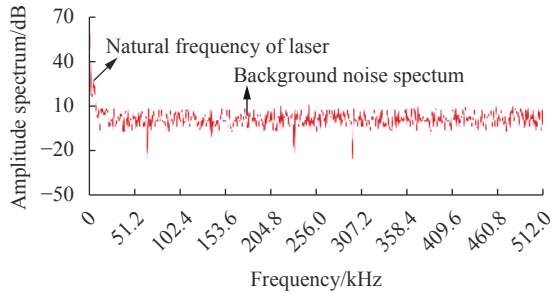

图 7 单次回波信号频谱

Fig.7 Frequency spectrum of single echo signal

为 dB。其背景噪声频谱幅度波动范围为−10~10 dB。

图 8 是经过 1 024 次累计平均之后的频谱图，由图可知，其背景噪声幅值谱波动范围为−1~1 dB。通过两图对比可知，激光雷达回波信号经过单次 FFT 变换时，其背景噪声频谱幅度波动大，通过 1 024 次累加平均后，可明显消除背景噪声的频谱干扰。图中第一个峰对应频率是连续激光器固有频率，第二个峰是有风时测得的频率偏移量，频率为 5 MHz，此时将 Δf=5 MHz，λ=1 550 nm代入公式 (1) 得出风速为 3.88 m/s。

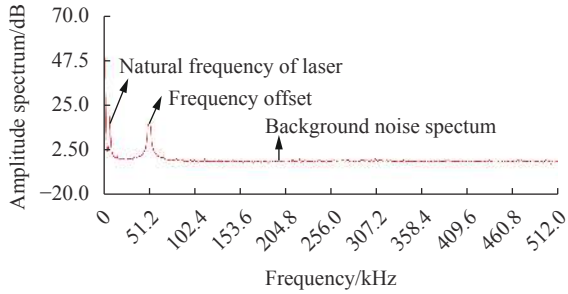

图 8 1 024 次累加平均回波信号频谱

Fig.8 Frequency spectrum of 1 024 cumulative average echo

5.4 模块资源分析

为了验证所设计的模块能否满足实时测风需求，需要考虑模块 FPGA 资源利用率的大小，资源利用率决定了 FPGA 并行处理激光雷达回波数据的效率。文中通过优化时序控制逻辑与算法整体架构，大幅减小了 FPGA 资源利用率，提高了回波数据运算的效率，表 3 展示了两模块 FPGA 的资源利用率，由表可知，设计的模块资源利用率小，并行运算回波数据效率高，满足实时测风需求，并在实际测风中得到了很好的验证。

表 3 FPGA 的资源利用率

Tab.3 Resource occupancy rate of FPGA

Device	FPGA resources	Used/Total	Rate
Cyclone IV	Logic elements	5 978/114 480	5%
	Memory bits	411 086/3 981 312	10%
Cyclone V	Multiplier elements	40/532	8%
	Logic utilization	3 671/41 910	9%
	Memory bits	19 200/5 662 720	<1%

6 结 论

针对连续相干激光雷达测风系统需求，研制了基于 FPGA 的高速信号采集处理模块，利用该模块实现了对激光雷达回波信号进行流模式、块浮点型 1 024 点的实时 FFT 运算，实现了 1 024 次频谱数据累加平均；同时该累加平均数据通过 SPI 总线传输至数据传输模块，再经网络发送至上位机，并利用自主开发的 Qt 应用程序进行风速实时的显示与分析。

通过搭建连续相干激光雷达测风系统对该信号采集处理模块进行系统联调，测试结果表明：设计基于 FPGA 的高速信号实时采集处理模块能够得到有效的激光雷达回波信号多普勒频谱信息，该设计相比于 DSP 方案，将 1 024 次累加平均时间由 41 ms 以上降至 10 ms 左右，同时将风速测量精度提升至 7.57 cm/s，该系统能有效降低激光雷达回波信号背景噪声的频谱干扰，将回波信号的频谱分辨率提升至 97.66 kHz，同时利用 SOC 架构设计的数据传输模块克服了 FPGA 与 ARM 之间的数据通信瓶颈，该模块资源利用率低，并行运算数据效率高，满足实时测风需求，优化了风场对风速测量精度的要求，具有较高的工程应用价值。

参考文献：

[1] Luo Jie, Hou Zaihong, Jing Xu, et al. Advances in coherent laser wind measurement technology [J]. ***Chinese Journal of Quantum Electronics***, 2020, 37(2): 129-137. (in Chinese)

[2] Fan Qi, Zhu Keyun, Zheng Jiafeng, et al. Detection performance analysis of all-fiber coherent wind lidar under different weather types [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2017, 44(2): 326-335. (in Chinese)

[3] Liu Ruqing, Jiang Yan, Li Feng, et al. Design of multi-channel data acquisition system for real-time perception lidar [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2021, 50(5): 20200291. (in Chinese)

[4] Liu Binggang, Chang Jianhua, Xu Fan, et al. Design of lidar data acquisition system based on FPGA chip [J]. ***Electronics Optics & Control***, 2018, 25(12): 68-72. (in Chinese)

[5] Yang Weida, Xu Qiongqiong, Chen Zhongge. Realization of 1024 points fast fourier transform based on FPGA IPcore [J]. ***Metrology & Measurement Technique***, 2020, 47(8): 31-34. (in Chinese)

[6] Li Hejun, Zhang Pengfei, Pan Jingyan, et al. Study on signal processing system of coherent wind LIDAR [J]. ***Laser & Infrared***, 2013, 43(10): 1113-1116. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] Chu Yufei, Liu Dong, Wang Zhenzhu, et al. Basic principle and technical progress of Doppler wind lidar [J]. ***Chinese Journal of Quantum Electronics***, 2020, 37(5): 580-600. (in Chinese)

[9] Yang Yu, Yang Changlin, Hu Jianyu, et al. Design of GNSS IF signal acquisition system and receiver based on Linux [J]. ***Electronics Optics & Control***, 2015, 22(7): 75-78. (in Chinese)

[10] Shen Longlong, Li Junqi, Yu Shuiyou. Implementation of 1024 points FFT based on FPGA in real-time decoding of signal [J]. ***Electro-Optic Technology Application***, 2020, 35(3): 67-72, 77. (in Chinese)

[11] Yin Shimin, Liang Yongbo, Zhu Jianming, et al. Study on real-time spectrum recovery system on a FPGA chip for Fourier transform infrared imaging spectrometer [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(12): 3580-3586. (in Chinese)

[12] Xin Wenhui, Li Shichun, Hua Dengxin, et al. Design of a high-speed data acquisition system based on FPGA for laser radar [J]. ***Acta Photonica Sinica***, 2012, 41(8): 967-971. (in Chinese)

[13] 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. (in Chinese)

[14] Rodrigo Peter John, Pedersen Christian. Field performance of an all-semiconductor laser coherent Doppler lidar [J]. ***Optics Letters***, 2012, 37(12): 2277-2279.