光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023021601

基于 FPGA 的激光多普勒微振动检测及信号处理方法

蒲　玲[1,2,3,4]，王华闯[1,2,3*]，赵　彬[1,2,3,5]

（1. 光场调控科学技术全国重点实验室，成都 610209；2. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室，成都 610209；
3. 中国科学院光电技术研究所，成都 610209；4. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院，北京 100049；
5. 中国科学院大学 光电学院，北京 100049）

摘　要： 为实现微弱振动信号的实时、高精度解调，提出一种基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的激光多普勒微弱振动检测及信号处理方法。采用全光纤结构的光学系统，振动信号处理系统则以 FPGA 为核心设计。改进相位解缠模块，在增大振动测量范围的同时，使其能适用于简谐振动与复杂振动。通过模拟振动实验验证了改进后相位解缠模块，且当振幅在 80 μm 以内时，测量精度在 5‰以内。通过对压电陶瓷实际振动目标测振实验，其频率测量误差在 1 Hz 以内，振幅与频率的测量精度均在 1%以内。实验验证了该振动信号处理方案对于扩大振动测量范围与实现高精度目标振动解调的有效性。

关键词： 激光技术；激光多普勒测振；现场可编程逻辑门阵列；信号处理；相位解缠

中图分类号： TN247　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0478－08

Laser Doppler Microvibration Detection and Signal Processing Based on FPGA

PU Ling[1,2,3,4], WANG Huachuang[1,2,3], ZHAO Bin[1,2,3,5]

(1. National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chengdu 610209, CHN;
2. Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN; 3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
4. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 5. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In order to realize the real-time and high-precision demodulation of microvibration signal, a method of laser Doppler microvibration detection and signal processing based on FPGA is proposed. The optical system with all-fiber structure was adopted, and the vibration signal processing system was designed with FPGA as the core. The phase unwrapping module was improved to enlarge the measuring range of vibration and make it suitable for simple harmonic vibration and complex vibration. The improved phase unwrapping module was verified by simulated vibration experiments. When the amplitude was less than 80 μm, the measurement accuracy was less than 5‰. Through the vibration measurement experiment of the actual vibration target of piezoelectric ceramics, the frequency measurement error was less than 1 Hz, and the measurement accuracy of amplitude and frequency was less than 1%. The experimental results show that the vibration signal processing scheme is effective in expanding the vibration measurement range and realizing high-precision target vibration demodulation.

Key words: laser technique; laser doppler vibration measurement; field programmable logic gate array; signal processing; phase unwrapping

收稿日期：2023－02－16.

* **通信作者：**王华闯　**E-mail:** wanghuachuang@163.com

0　引言

随着高新技术的不断发展，机械加工、航空航天、生物医学等领域中对精密仪器和设备的微弱振动探测需求和探测分辨率不断增加。同时，一些高温结构、高速结构、过小表面以及腐蚀性表面使用接触测量无法实现。非接触测量中激光多普勒测振因其具有高精度、高效率等优点，成为了当前主要的振动测量方法[1-2]。其可实现目标表面的小振幅振动测量，在微弱振动测量中占据绝对优势[3]。探测器输出电信号的解调是还原目标振动信息的关键。目前对于激光多普勒振动信息的处理大多是通过信号采集卡或数字示波器采集探测器输出的电信号，而后在 PC 端进行后续的振动信息解调处理[4-10]。由于现场可编程门阵列(FPGA)具有高性能计算和可重复编程等优点，在数字信号处理领域有着广泛应用。为了保证振动测量的实时性与高精度测量，研究人员便将 FPGA 应用于振动信号处理中[11-13]，取得了一定的成果。但目前在基于 FPGA 的测振研究中，缺乏对振动测量范围的研究。由于国内外生产的商用激光多普勒测振仪价格昂贵，同时系统测振范围因 FPGA 资源有限而存在局限性。

基于以上问题，本文提出了一种基于 FPGA 的激光多普勒微弱振动检测及信号处理方法。该方法通过模拟数字转换器(ADC)后，在 FPGA 内设计正交解调模块、低通滤波模块、坐标旋转数字计算方法(CORDIC)模块、相位解缠模块、快速傅里叶变换(FFT)模块、内部随机存取存储器(RAM)模块、通用串行总线(USB)模块实现振动信息的还原。通过改进文献[14]中的相位解缠算法，增大振动的测量范围，使之能适用于简谐与复杂振动相位跳变的解缠。最后在 PC 端完成后续振动信号的处理及显示。通过 FPGA 实现振动信息处理，同时能实现实时振动信息显示，有效扩大振动的测量范围，且测振精度高。

1　测振信号处理系统设计

为满足激光多普勒对微弱振动的测量精度，保证测量的稳定性，采用全光纤结构的激光多普勒外差测振系统对振动信号进行采集，而后在 FPGA 内实现振动信息的解调和处理。激光多普勒振动检测技术方案如图 1 所示。

激光器发射激光经 1∶9 光纤分束器，分成 10%本振光和 90%信号光。信号光经声光调制器后移频 40 MHz，而后由光纤环形器 1 端口入射至 2 端口，通过光纤准直器发射到自由空间，由目标振动对信号光产生相位调制 $\varphi(t)$。光学系统获取带有目标振动信息的回波散射光后，由光纤环形器 3 端口在 2×2 3 dB 耦合器处与参考光耦合，此时耦合器两端的输出光场可表示为：

$$E_1=\frac{1}{\sqrt{2}}A_a\exp\{i(\omega_0 t+2\pi f_{AOM}t+\varphi(t)+\phi_0)\}+\frac{1}{\sqrt{2}}A_b\exp\left\{i\left(\omega_0 t+\phi_0+\frac{\pi}{2}\right)\right\} \tag{1}$$

$$E_2=\frac{1}{\sqrt{2}}A_a\exp\left\{i\left(\omega_0 t+2\pi f_{AOM}t+\varphi(t)+\phi_0+\frac{\pi}{2}\right)\right\}+\frac{1}{\sqrt{2}}A_b\exp\{i(\omega_0 t+\phi_0)\} \tag{2}$$

式中，A_a 和 A_b 为信号光与本振光场的幅度，ω_0 表示激光频率，ϕ_0 表示激光初始相位。f_{AOM} 表示声光移频量。

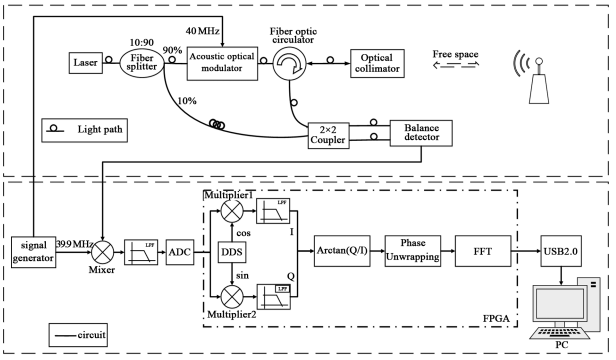


图 1　激光多普勒微弱振动测量系统框图

设光电转换系数为 β，则由光电流的平方律特性可知激光入射至平衡探测器后两端输出电流为：

$$i_1=\beta|E_1|^2=\beta\left\{A_aA_b\cos\left[2\pi f_{AOM}t+\varphi(t)-\frac{\pi}{2}\right]+\frac{1}{2}A_a^2+\frac{1}{2}A_b^2\right\} \tag{3}$$

$$i_2=\beta|E_2|^2=\beta\left\{A_aA_b\cos\left[2\pi f_{AOM}t+\varphi(t)+\frac{\pi}{2}\right]+\frac{1}{2}A_a^2+\frac{1}{2}A_b^2\right\} \tag{4}$$

平衡探测器输出 Δi 为：

$$\Delta i=i_2-i_1=2\beta A_aA_b\cos[2\pi f_{AOM}t+\varphi(t)] \tag{5}$$

为避免采样频率过大，占用 FPGA 资源过多，在 ADC 采样前将光学系统平衡探测器输出电信号

与信号发生器产生 39.9 MHz 信号混频，将低通滤波器输出的 100 kHz 的中频信号由 ADC(AD9238)接入振动信号处理平台完成振动信息的解调处理与显示。

因此 AD 采样信号 i_{AD} 为：

$$i_{AD}=2\beta A_a A_b \sin[2\pi f_M t+\varphi(t)] \tag{6}$$

式中，f_M 为 100 kHz 的中频信号。

微振动测量实时数字信号解调处理系统平台基于 Xilinx 公司 Spartan6 系列中 XC6SLX45-2CSG324 型号 FPGA 芯片搭建。在 FPGA 内通过直接数字频率合成(DDS)产生 100 kHz 的正交信号；由乘法器实现正交信号与 ADC 采样信号的混频；混频后信号通过低通滤波器得到 $I(t)$和 $Q(t)$两路基带信号：

$$I(t)=|\ [i_{AD}\times\cos(2\pi f_M t)]\times h_{LPF}\ |=\beta A_a A_b \sin[\varphi(t)] \tag{7}$$

$$Q(t)=|\ [i_{AD}\times\sin(2\pi f_M t)]\times h_{LPF}\ |=\beta A_a A_b \cos[\varphi(t)] \tag{8}$$

式中，h_{LPF} 为低通滤波器的传递函数。

直接将两路基带信号接入 CORDIC 模块计算目标振动产生的初始相位信息：

$$\varphi(t)=\arctan\left(\frac{I(t)}{Q(t)}\right)+N\times\pi=\frac{4\pi s(t)}{\lambda}\quad(N\in Z) \tag{9}$$

式中，N 表示相位跳变次数，$s(t)$为目标振动位移，λ 表示激光波长。

由最大相位跳变次数统计模块统计目标振动产生的最大相位跳变次数，当检测到相位存在跳变后便进入相位解缠模块完成相位的连续输出，以扩大振动测量范围；将解缠后的相位由 FFT 模块计算振动的频率信息；通过 RAM 模块乒乓缓存目标振动相关信息，实现振动信息的连续输出[15]；而后通过 USB 管理模块，将振动相关信息传送至 PC 端，在 PC 端完成振动信息的后续处理及显示。PC 端上位机给定 FFT 时钟频率，实现 PC 上位机到 FPGA 通信。硬件平台搭建如图 2 所示。

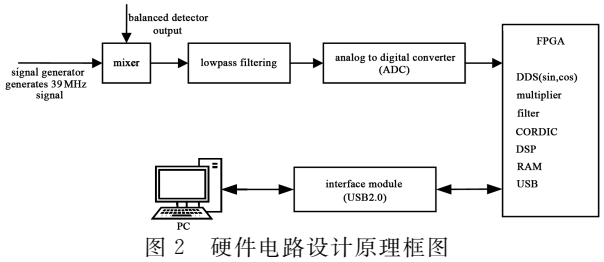


图 2 硬件电路设计原理框图

2 相位解缠模块改进与设计

在 FPGA 内使用 CORDIC IP 核计算反正切时，其值域范围可扩大为$(-\pi,\pi)$[16-17]，当目标振动较大时，反正切计算相位 $\varphi(i)$结果会以 2π 为周期发生跳变。相位跳变有 $\varphi(i)-\varphi(i-1)>\pi$ 和 $\varphi(i-1)-\varphi(i)>\pi$ 两种跳变形式。由于目标振动形式有简谐振动和复杂振动，复杂振动两种不同跳变形式存在跳变次数不同的情况，为使相位解缠算法能实现复杂振动的解缠，因此将文献[13]中相位解缠算法改进。在 FPGA 内设计最大跳变次数统计模块和相位解缠模块解决相位跳变问题。

在 FPGA 内使用偏移码对相位解缠，为避免解缠后相位出现负数，且复杂振动每种跳变形式的跳变次数不是固定值，因此以最大跳变次数 N_{max} 对相位进行预处理。最大跳变次数统计流程由跳变周期数统计模块改进而来，通过流水结构完成设计。通过将相邻两个相位值 $\varphi(i)$和 $\varphi(i-1)$赋值给变量 A 和 B 判断相邻两个相位点差值的绝对值$|\varphi(i)-\varphi(i-1)|$即$|A-B|$与 π 的关系统计相位跳变次数 N，当大于 π 时，相位跳变次数加一，小于 π 则不变。同时为了避免相位跳变次数统计不是在跳变位序为零时开始统计，增加变量 C，当 $C=1$ 时即开始统计后第二次统计结果作为相位跳变次数；当 $C\geqslant 3$ 时令 $C=3$，若此时 $A-B>\pi$ 则重新统计相位跳变次数，同时令 $C=0$。将统计的相位跳变次数赋值给 N_J，再由流水结构，确定最大相位跳变次数，将相邻

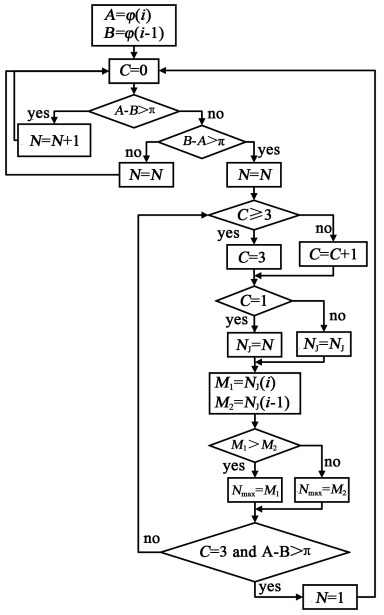


图 3 最大跳变次数设计流程

两个跳变次数赋值给变量 M_1 和 M_2，当 M_1 大时，将其赋值给最大相位跳变次数 N_{max}，反之将 M_2 赋值给 N_{max}。则改进后的设计流程如图 3 所示。

FPGA 最大相位跳变次数统计模块如图 4。

```
PROCESS(CLK)
BEGIN
IF RST='1' THEN
C<=0;
N<=0;
STATE<=S0;
ELSIF RISING_EDGE(CLK) THEN
      A<=CONV_INTEGER(DIN);
      B<=A;
CASE STATE IS
WHEN S0=>
      C<=0;
      IF A>B AND A-B>=25723 THEN
      N<=N+1;
      ELSIF A<B AND B-A>=25723 THEN
      STATE<=S1;
      N<=N;
      ELSE
      N<=N;
      END IF;
WHEN S1=>
      IF C>=3 THEN
      C<=3;
      ELSE
      C<=C+1;
      END IF;

      IF C=1 THEN
      N_J:=CONV_STD_LOGIC_VECTOR((N)/2,8);
      ELSE
      END IF;

      IF C=3 AND a>b and a-b>=25723 THEN
       STATE<=S0;
       N<=1;
      ELSE
       STATE<=S1;
      END IF;

WHEN OTHERS=>
END CASE;
END IF;
END PROCESS;
------------FIND MAX-----------------
process(clk)
begin
IF RISING_EDGE(CLK) THEN
      M1<=N_J;
      M2<=M1;
      IF M1>M2 THEN
         N_max<=M1;
      ELSE
         N_max<=M2;
      END IF;
END IF;
end process;
```

图 4　最大跳变次数统计模块

通过最大跳变次数进行预处理后的相位 $\varphi_a(i)$ 为：

$$\varphi_a(i)=\varphi(i)+N_{max}\times 2\pi \tag{10}$$

对相位解缠模块的改进主要针对状态三与状态四。状态三针对 $\varphi_a(i-1)-\varphi_a(i)>\pi$ 跳变形式进行解，当出现 $\varphi_a(i-1)-\varphi_a(i)>\pi$ 时变量 K 加一，存在跳变时上移周期数由 K 确定。当出现 $\varphi_a(i)-\varphi_a(i-1)>\pi$ 时，状态三补偿结束，进入状态四解缠。状态四解缠由状态三的跳变次数 K 确定，设置变量 R 用以统计需下移的周期数，变量 R 的初始值为状态转换时的 K 值加一，当出现 $\varphi_a(i)-\varphi_a(i-1)>\pi$ 时 R 减一，其补偿原理与状态三相似。以复杂振动最大跳变次数等于 2 时为例，其解缠原理如图 5 所示。

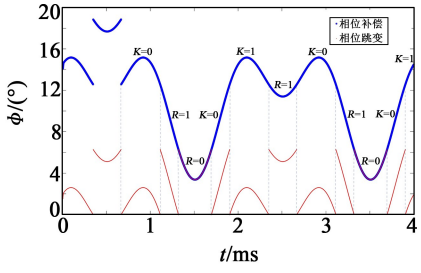


图 5　相位解缠原理图

因此状态三与状态四的解缠结果 $\varphi_s(i)$ 可表示为：

$$\varphi_s(i)=\begin{cases}K\times 2\pi+\varphi_a(i) & (s3)\\ R\times 2\pi-4\pi+\varphi_a(i) & (s4)\end{cases} \tag{11}$$

式中，R 与 K 功能相同。K 用以记录状态三的跳变位序，K_{max} 表示状态三的最大跳变次数，K 取值满足 $0\leqslant K\leqslant N_{max}$；$R$ 用以记录状态四的所处的跳变位置。由于 R 需为自然数，因此在状态三转为状态四时，令 R 为 $K+1$，R 取值满足 $0\leqslant R\leqslant K_{max}+1$。则状态转换示意图如图 6 所示。

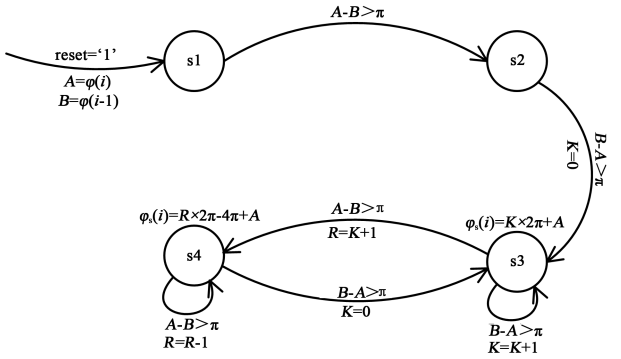


图 6　相位解缠算法状态转换示意图

FPGA 改进后的模块设计如图 7 所示。

```
PROCESS(CLK)
VARIABLE JUMP : STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
BEGIN
IF RST='1' THEN
C<=0;
NUM<=0;
STATE<=S0;
ELSIF RISING_EDGE(CLK) THEN
      A<=CONV_INTEGER(DIN);
      B<=A;
CASE STATE IS
WHEN S0=>
      C<=0;
      IF A>B AND A-B>=25723 THEN
         NUM<=NUM+1;
      ELSIF A<B AND B-A>=25723 THEN
         STATE<=S1;
         NUM<=NUM;
      ELSE
         NUM<=NUM;
      END IF;
WHEN S1=>
      IF C>=3 THEN
         C<=3;
      ELSE
         C<=C+1;
      END IF;

      IF C=1 THEN
         JUMP:=CONV_STD_LOGIC_VECTOR(NUM,8);
         JUMP_MAX<=JUMP;
      ELSE
      END IF;

      IF C=3 AND a>b and a-b>=25723 THEN
         STATE<=S0;
         N<=1;
      ELSE
         STATE<=S1;
      END IF;
WHEN OTHERS=>
END CASE;
END IF;
END PROCESS;
------------FIND MAX-----------------
process(CLK)
begin
IF RISING_EDGE(CLK) THEN
      MAX1<=JUMP_MAX;
      MAX2<=MAX1;

      IF MAX1>MAX2 THEN
         N_MAX<=MAX1;
      ELSE
         N_MAX<=MAX2;
      END IF;
END IF;
end process;
```

图 7　相位解缠模块

3　实验测试及结果

3.1　模拟振动实验

3.1.1　简谐振动

为验证改进后相位解缠算法的有效性，由文献[13]中平台验证。模拟简谐振动如表 1 所示。

表 1　模拟简谐振动

序号	振幅/μm	振频/kHz
1	0.2	20
2	1	1
3	10	0.5
4	80	0.1

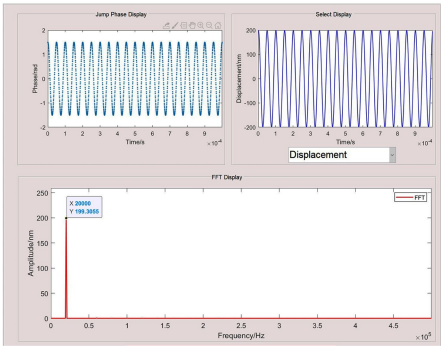
振动解调结果如图 8 所示。

由图 8 可知，使用模拟振动目标时，振动频率解调准确，振幅测量结果及误差如表 2 所示。

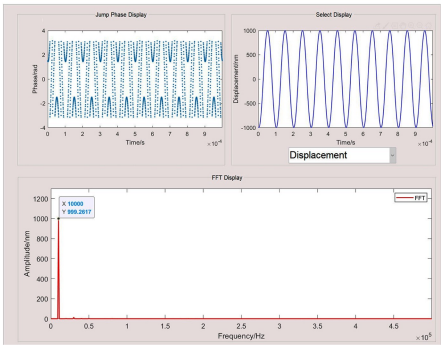
表 2　模拟简谐振动测量结果

序号	振幅/μm	测量幅度/nm	振幅测量相对误差
1	0.2	199.305 5	-3.473×10^{-3}
2	1	999.261 7	-7.383×10^{-4}
3	10	9 999.654 6	-3.454×10^{-5}
4	80	80 001.575 5	1.969×10^{-5}

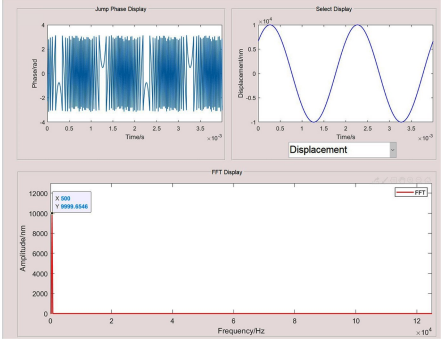
由图 8 和表 2 模拟简谐振动可知，当振幅增加，相位解缠模块可实现简谐振动相位的解缠；且振幅越大，振动解调结果精度越高；振幅在 80 μm 以内，最大测量误差为 1.6 nm，测量精度在 1%以内，在保证精度的同时能有效扩大振动的测量范围。



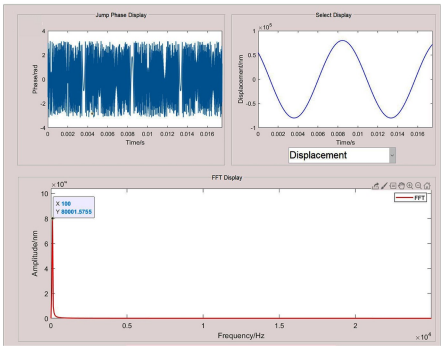
(a) 振幅 0.2 μm，频率 20 kHz



(b) 振幅 1 μm，频率 10 kHz



(c) 振幅 10 μm，频率 500 Hz



(d) 振幅 80 μm，频率 100 Hz

图 8 模拟简谐振动解调结果

3.1.2 复杂振动

为验证复杂振动的相位解调结果存在跳变时，相位解缠算法的有效性。设置目标振动形式如公式(12)所示。

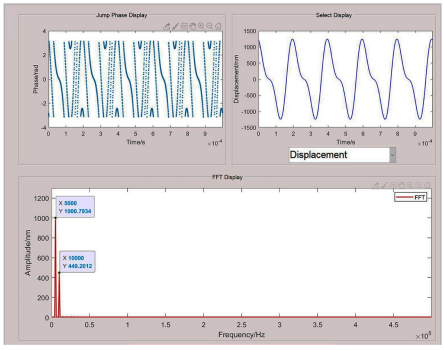
$$s(t)=A_1\sin(2\pi f_1 t+\phi_1)+A_2\sin(2\pi f_2 t+\phi_2) \tag{12}$$

当设置 $A_1=450$ nm，$A_2=1$ μm，$f_1=10$ kHz，$f_2=5$ kHz，$\phi_2=\pi/2$，$\phi_1=0$ 时，目标振动还原如图 9(a)所示。

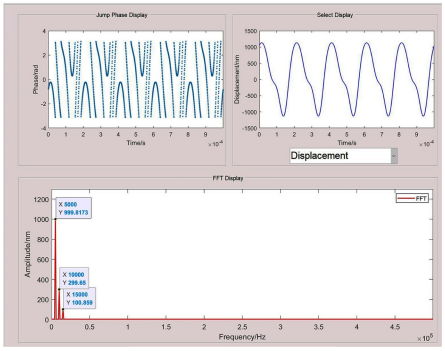
当设置目标振动形式如下公式(13)所示。

$$s(t)=A_1\sin(2\pi f_1 t+\phi_1)+A_2\sin(2\pi f_2 t+\phi_2)+A_3\sin(2\pi f_3 t+\phi_3) \tag{13}$$

设置 $A_1=300$ nm，$A_2=100$ nm，$A_3=1$ μm，$f_1=10$ kHz，$f_2=15$ kHz，$f_3=5$ kHz，$\phi_3=\pi/2$，$\phi_1=\phi_2=0$ 时，目标振动还原如图 9(b)所示。



(a) 振动形式 1



(b) 振动形式 2

图 9 模拟复杂振动还原

由图 9 可得，相位解缠模块能实现复杂振动的相位解缠，且振动频率解调准确，振幅解调精度在 1%以内。

3.2 实际振动实验

为验证测振信号处理系统对实际振动目标的振动还原情况，对实际振动目标进行了测量。测振系统主要有激光器(Pure Photonics PPCL550)、声光

移频器(SGTF40-1550-1P)、1∶9 光纤分束器、光纤环形器、2×2 3 dB 耦合器、准直系统、平衡探测器(THORLABS PDB460C-AC)、信号发生器(Tektronix AFG3102C)、ADC 模数转换器模块(AN9238)、FPGA(Xilinx FPGA 开发板，型号：AX545，Spartan6 系列 XC6SLX45-2CSG324)及压电陶瓷等器件组成。激光波长选择 1 550 nm。其中信号发生器为声光移频器提供 40 MHz 的驱动信号以及产生与平衡探测器输出电信号混频的 39.9 MHz 信号，同时信号发生器的外部参考输出为 FPGA 引入外部时钟信号。压电陶瓷作为振动目标，实验时通过 PC 端设置振幅和频率，其可设置的最大振动频率为 1 kHz，最大振幅为 3.5 μm。搭建的测振平台如图 10 所示。

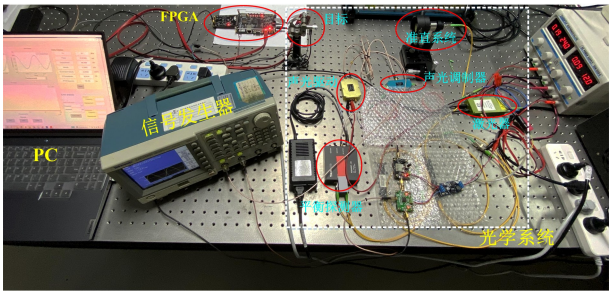
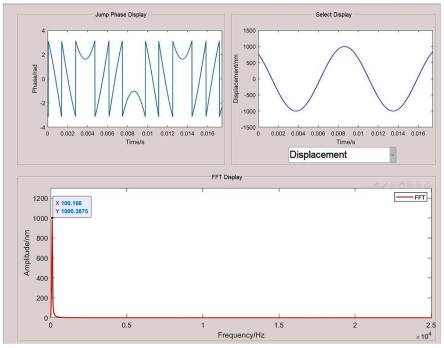
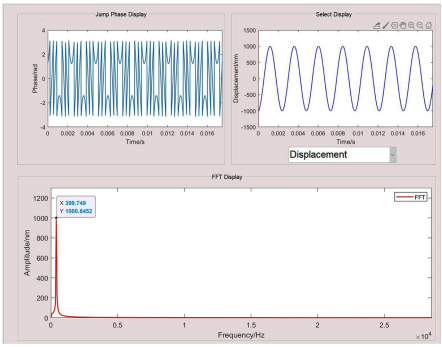


图 10　测振平台

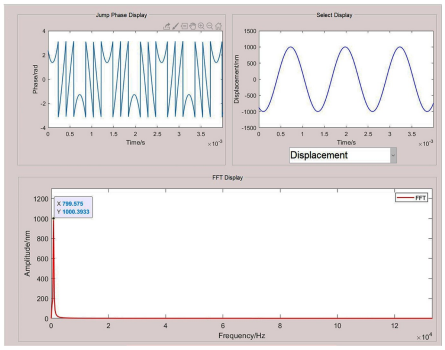
为避免环境对测振平台的测振结果干扰，在外界环境相对安静的情况下进行实验。为验证系统频



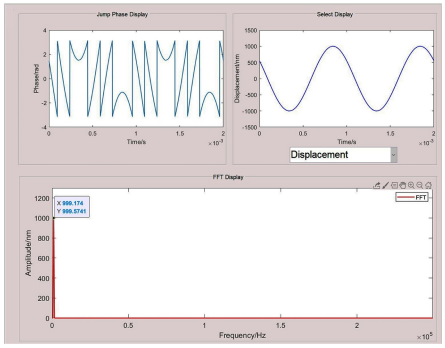
(a) 频率为 100 Hz



(b) 频率为 400 Hz



(c) 频率为 800 Hz



(d) 频率为 1 kHz

图 11　不同频率压电陶瓷振动测量

率测量准确性，将压电陶瓷振幅设置为 1 000 nm，设置不同的振动频率。实验测量结果如图 11 所示。

不同频率压电陶瓷振动测量的测量误差如表 3 所示。

表 3　不同频率压电陶瓷振动测量

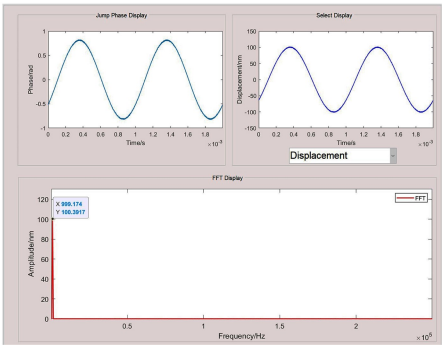
序号	输入频率/Hz	测量频率/Hz	偏差/Hz
1	100	100.166	0.166
2	400	399.749	0.251
3	800	799.575	0.425
4	1 000	999.174	0.826

由图 11 和表 3 可知，当在实际振动目标测量时，系统目标振动测量频率在 1 kHz 范围内，测量误差在 1 Hz 以内；1 000 nm 的幅度测量精度在 1%以内，测量误差在 1 nm 以内，满足微弱振动测量需求。

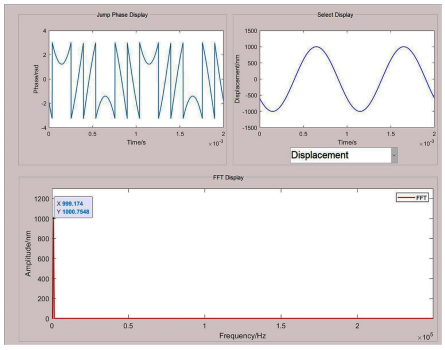
将压电陶瓷设置不同的振动幅度，验证系统幅度测量的准确性。将频率设置为 1 kHz，设置不同的振幅。为保证压电陶瓷的正常工作，系统实验时将幅度设置在 3 μm 以内。测量结果如图 12 所示。

不同振幅压电陶瓷振动测量的测量误差如表 4 所示。

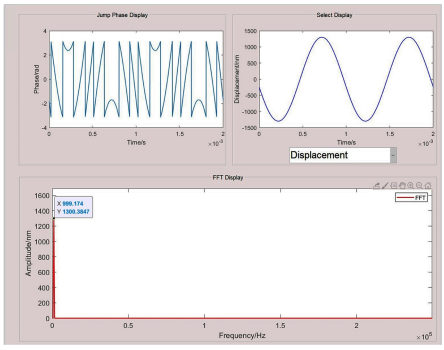
由表 4 可知，随着振幅逐渐地增加，振幅测量精



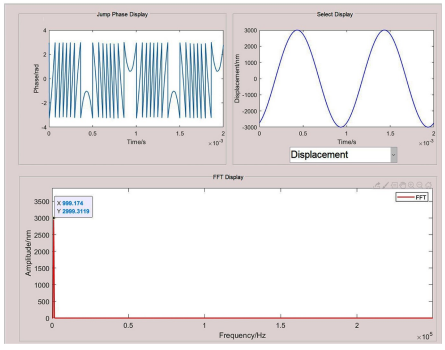
(a) 振幅为 0.1 μm



(b) 振幅为 1 μm



(c) 振幅为 1.3 μm



(d) 振幅为 3 μm

图 12 不同振幅压电陶瓷振动测量

表 4 不同振幅压电陶瓷振动测量

序号	输入振幅/μm	测量振幅/nm	相对误差
1	0.1	100.391 7	3.917×10^{-3}
2	1	1 000.754 8	7.548×10^{-4}
3	1.3	1 300.384 7	2.959×10^{-4}
4	3	2 999.311 9	-2.294×10^{-4}

度越高，精度在 1%以内，且振动幅度误差在 1 nm 以内。

4 结论

本文提出基于 FPGA 的激光多普勒微弱振动检测及信号处理方法。在 FPGA 内通过模块化设计实现振动信号解调及处理。通过模拟振动与实际振动目标测量实验，对振动信号处理系统的性能进行了实验验证。实验结果表明，测振系统能实现对振动目标振动信息的高精度还原，同时相位解缠模块能实现简谐与复杂振动的相位解缠，有效扩大振动的测量范围。经验证，系统对实际振动目标测量振幅与频率测量的精度均在 1%以内。因此，该方法对于使用 FPGA 处理并实现高精度还原目标的振动信息以及扩大振动测量范围具有重要意义。

参考文献：

[1] Nozato H, Kokuyama W, Shimoda T, et al. Calibration of laser Doppler vibrometer and laser interferometers in high-frequency regions using electro-optical modulator [J]. Precision Engineering, 2021, 70: 135-144.

[2] 张 驰，王 顺，关向雨，等. 激光多普勒测振技术应用的新进展[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(19)：85-91.
Zhang Chi, Wang Shun, Guan Xiangyu, et al. New progress in the application of laser Doppler vibration measurement technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(19): 85-91.

[3] 王凯旋，武俊峰，舒风风. 压电陶瓷频率响应及振动面幅值激光外差测量[J]. 压电与声光，2021，43(5)：680-683，704.
Wang Kaixuan, Wu Junfeng, Shu Fengfeng. Laser heterodyne measurement of frequency response and amplitude of vibrating surface of piezoelectric ceramics [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2021, 43(5): 680-683, 704.

[4] Posada-Roman J E, Jackson D A, Garcia-Souto J A. Variable configuration fiber optic laser Doppler vibrometer system[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(2): 97-106.

[5] 张 澍，李 玉，卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. 光学学报，2016，36(3)：111-116.
Zhang Shu, Li Yu, Lu Guangfeng. Research of laser Doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 111-116.

[6] 鹿彤彤，陆彦婷，杜福嘉，等. 瞳面干涉激光多普勒测振[J]. 光学学报，2022，42(15)：97-103.
Lu Tongtong, Lu Yanting, Du Fujia, et al. Laser Doppler vibrometry based on pupil-plane interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 97-103.

[7] Shang J H, He Y, Wang Q, et al. Development of a high-resolution all-fiber homodyne laser Doppler vibrometer[J].

Sensors，2020，20(20)：5801.

[8] 崔俊宁，李　伟，边星元，等. 面向大振幅、长周期振动校准的零差正交激光干涉测振方法[J]. 红外与激光工程，2021，50(6)：225-232.
Cui Junning，Li Wei，Bian Xingyuan，et al. Homodyne quadrature laser interferometry measurement method for large amplitude，long cycle vibration calibration[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(6)：225-232.

[9] Kim M G，Jo K，Kwon H S，et al. Fiber-optic laser Doppler vibrometer to dynamically measure MEMS actuator with in-plane motion[J]. J. of Microelectromechanical Systems，2009，18(6)：1365-1370.

[10] 纪新峰，李宏民，胡　丹，等. GaAs相关多普勒放大器的抗静电设计[J]. 兵器装备工程学报，2021，42(3)：253-257.
Ji Xinfeng，Li Hongmin，Hu Dan，et al. Anti-electrostic design for GaAs correlation Doppler amplifier[J]. J. Ordnance Equipment Engineering，2021，42(3)：253-257.

[11] 秦文强. 基于FPGA的激光多普勒测振的研究[D]. 长春：中国科学院大学，2018：35-62.
Qin Wenqiang. Study of laser Doppler vibration measurement based on FPGA[D]. Changchun：University of Chinese Academy of Sciences，2018：35-62.

[12] 晏春回. 激光相干测振信号处理技术研究[D]. 中国科学院大学，2019：87-110.
Yan Chunhui. Research on signal processing technology of laser coherent vibration measurement[D]. University of Chinese Academy of Sciences，2019：87-110.

[13] 陈鸿凯. 激光多普勒微振动信号处理技术研究及硬件实现[D]. 中国科学院大学，2020：47-58.
Chen Hongkai. Research on signal processing and hardware implementation of laser Doppler micro vibration[D]. University of Chinese Academy of Sciences，2020：47-58.

[14] 蒲　玲，王华闯，赵　彬. 一种激光多普勒测振相位解缠算法及FPGA实现[J/OL]. 激光技术：1-19[2023-02-02]. http://zz. xue1888. com/kcms/detail/51. 1125. TN. 20221026. 1804. 004. html.
Pu Ling，Wang Huachaung，Zhao Bin. A phase unwrapping algorithm for laser Doppler vibration measurement and its FPGA implementation[J/OL]. Laser Technology：1-19[2023-02-02]. http://zz. xue1888. com/kcms/detail/51. 1125. TN. 20221026. 1804. 004. html.

[15] 李炳奇. 基于FPGA的目标检测与跟踪[D]. 北京：北京邮电大学，2019：35-38.
Li Bingqi. Target detection and tracking based on FPGA[D]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications，2019：35-38.

[16] 蔡权利，高　博，龚　敏. 基于FPGA的CORDIC算法实现[J]. 电子器件，2018，41(5)：1242-1246，1256.
Cai Quanli，Gao Bo，Gong Min. Implementation of CORDIC algorithm based on FPGA[J]. J. of Electron Devices，2018，41(5)：1242-1246，1256.

[17] 黄　如，徐　磊. 一种基于FPGA的CORDIC算法的实现[J]. 电子测量技术，2018，41(5)：47-50.
Huang Ru，Xu Lei. Implementation of a CORDIC algorithm based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology，2018，41(5)：47-50.

作者简介：

蒲　玲(1997—)，女，四川省遂宁市人，硕士研究生，主要从事光电信号检测与处理方面的研究；

王华闯(1997—)，副研究员，主要从事传感器技术、主动探测技术研究。