

一种激光多普勒测振相位解缠算法及FPGA实现

蒲玲, 王华闯, 赵彬

A phase unwrapping algorithm for laser Doppler vibration measurement and its FPGA implementation

引用本文:

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]. *激光技术*, 2023, 47(5): 691–699.

PU Ling, WANG Huachuang, ZHAO Bin. A phase unwrapping algorithm for laser Doppler vibration measurement and its FPGA implementation[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(5): 691–699.

您可能感兴趣的其他文章

1. 基于FPGA红外成像光谱数据处理系统研究

引用本文: 孙颖馨. 基于FPGA红外成像光谱数据处理系统研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 763–767.

2. 基于光学扫描全息测量相位物体的相位分布

引用本文: 魏亚运, 周昕, 王梦婷, 等. 基于光学扫描全息测量相位物体的相位分布[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 820–824.

3. 激光脉冲初始相位对电子辐射的影响

引用本文: 和一凡, 申雨婷, 王文霄, 等. 激光脉冲初始相位对电子辐射的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 103–107.

4. 一种波束扫描固态等离子体超表面的设计

引用本文: 李文煜, 章海锋, 刘婷, 等. 一种波束扫描固态等离子体超表面的设计[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 822–826.

5. 光纤中光脉冲的直线平移及幅度衰减振荡特性

引用本文: 伍璐璐, 钟先琼, 白乐, 等. 光纤中光脉冲的直线平移及幅度衰减振荡特性[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 706–709.

文章编号: 1001-3806(2023)05-0691-09

一种激光多普勒测振相位解缠算法及 FPGA 实现

蒲玲^{1,2,3}, 王华闯^{1,2*}, 赵彬^{1,2,4}

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

摘要: 为了解决周期性跳变引起的相位解调问题, 提出了一种基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的自动相位解缠算法。采用数据流水线结构, 通过状态机自动寻求跳变周期数, 由跳变周期数实现自动相位补偿, 并对提出的算法进行了理论分析和实验验证。结果表明, 在 FPGA 内设置跳变周期数计数位宽为 8 位, 能适用 256 次以下跳变情况; 当增加跳变周期数计数位宽, 可适应更多跳变次数的情况; 自动相位解缠算法几乎不占用存储资源; 能解决因振动调制范围增大引起的反正切相位跳变问题; 相位解调误差在 1% 以内, 满足高精度振动检测实时性需求。此自动相位解缠算法为激光多普勒测振测量时反正切相位计算结果存在周期性跳变问题提供了更为简洁的解决方案。

关键词: 激光技术; 相位解缠; 自动相位解缠; 相位跳变; 振动检测; 激光多普勒效应

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.05.018

A phase unwrapping algorithm for laser Doppler vibration measurement and its FPGA implementation

PU Ling^{1,2,3}, WANG Huachuang^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2,4}

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

Abstract: In order to solve the phase demodulation problem caused by cyclic jump, an automatic phase unwrapping algorithm based on field-programmable gate array (FPGA) was proposed. Using the data pipeline structure, the number of jump cycles was automatically found by the state machine, and the automatic phase compensation was realized by the number of jump cycles. The proposed algorithm was theoretically analyzed and verified by experiments. The results show that when the width of the counting bit of the jump cycle number is 8 bits, the FPGA can be applicable to the situation of less than 256 jumps. When the digital width of the jump cycle number increases, more jumps are applicable. The automatic phase unwrapping algorithm almost does not occupy storage resources, and can solve the arctangent phase jump problem caused by the increase of the vibration modulation range. The phase demodulation error is within 1%, which meets the real-time requirements of high-precision vibration detection. The automatic phase unwrapping algorithm provides a more concise solution to the problem of cyclic jump in the calculation results of arctangent phase in laser Doppler vibration measurement.

Key words: laser technique; phase unwrapping; automatic phase unwinding; phase jump; vibration detection; laser Doppler effect

引言

激光多普勒测振因其分辨率高、非接触等优势成为了当前测振的重要技术^[1-3]。激光多普勒测振主要

应用于微弱振动的测量, 在纳米级振动测量中拥有绝对的优势^[4-5]。反正切解调算法是当前解算多普勒相位的主要算法, 通过解算相位进而解析出目标振动信息(位移、速度、加速度、振幅、频率等)^[6-8]。在现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)内通过坐标旋转数字计算方法(coordinate rotation digital computer, CORDIC)解调目标振动产生的调制相位是目前普遍采用的技术方法^[9-11]。当振动目标振幅超过

作者简介: 蒲玲(1997-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光电信号检测与处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: wanghuachuang@163.com

收稿日期: 2022-08-22; 收到修改稿日期: 2022-10-11

激光波长 λ 的 $1/4$ 时,解调相位发生周期性跳变,使得测振范围受限。随着激光测振仪校准国际标准 ISO-11 1999 和 ISO-41 2011^[12] 的提出,为增大振动的测量范围,在反正切解算后,通过相位解缠获取正确相位值^[13-15]。

受传统相位解缠算法原理的限制,相位解缠算法在 FPGA 内实现需占用过多的逻辑资源且只能应用于跳变次数已知情形,本文作者提出一种基于 FPGA 的自动相位解缠算法。该算法采用流水线结构,通过状态机自动寻求跳变周期数,由跳变周期数实现自动相位补偿,与传统相位解缠算法相比,能够有效节省 FPGA 的内部资源,扩大振动测量的范围。

1 相位解缠算法及其局限性

目标振动对中频信号的相位产生的调制,通过正交混频及低通滤波后,由反正切计算出目标振动产生的相位 $\varphi(t)$ ^[16]:

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{u_Q(t)}{u_I(t)}\right) = \frac{4\pi}{\lambda}s(t) \quad (1)$$

式中, $u_Q(t)$ 为 Q 路滤波后低频信号; $u_I(t)$ 为 I 路滤波后低频信号; λ 为激光波长; $s(t)$ 为目标振动信号, t 表示时间。

在 FPGA 内计算反正切,有查找表法和 CORDIC 算法;由于查找表法占用资源多、精度低且速度慢^[17-18],通常采用 CORDIC 算法。采用 CORDIC 算法的向量模式计算反正切,通过象限转换^[19],相位角度范围可扩展到整个圆周,因此 $\varphi(t)$ 的取值范围为 $(-\pi, \pi)$ 。当目标振动幅度超过 $\lambda/4$ 时,相位以 2π 为周期发生跳变^[20-22],即:

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{u_Q(t)}{u_I(t)}\right) + 2n\pi = \frac{4\pi}{\lambda}s(t), (n \in \mathbf{Z}) \quad (2)$$

式中, n 为解调相位以 2π 为周期的跳变次数,取正整数; n 增加 1,目标振动的位移发生 $\lambda/2$ 的变化。

在 FPGA 内实现相位解缠,设 i 表示采样相位点,则需通过对相邻相位点相位差值 $\varphi(i) - \varphi(i-1)$ 与阈值 π 比较,实现相位补偿。

$$\varphi(i) = \begin{cases} \varphi(i) - 2\pi, & (\varphi(i) - \varphi(i-1)) > \pi \\ \varphi(i) + 2\pi, & (\varphi(i) - \varphi(i-1)) < -\pi \end{cases} \quad (3)$$

以 6 次相位跳变为例,其相位跳变补偿如图 1 所示。需要进行连续六轮次的相位补偿算法操作,每次补偿,跳变的相位值变化 $\pm 2\pi$ 。

该相位解缠算法在应用中存在以下局限性:(1) 如果存在相位跳变,则需事先知道相位跳周期数方能进行正确的相位补偿;(2) 需要对每一轮次补偿后的

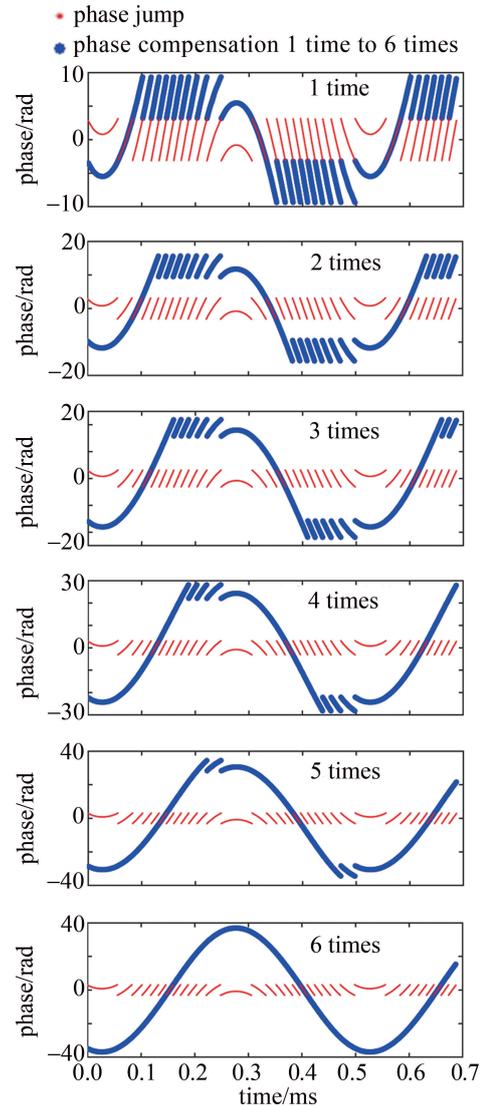


图 1 6 次跳变相位补偿图

Fig. 1 Phase compensation diagram of six jumps

数据进行缓存,以进行下一轮次相位补偿;(3) 在 FPGA 内实现结构复杂,随着跳变周期数增加,占用资源急剧增加,只适用于跳变周期数较少的情况。

2 自动相位解缠算法

为解决相位解缠算法的局限性,根据测振相位跳变规律,在 FPGA 内设计跳变周期数统计模块和相位解缠模块。其中跳变周期数统计模块实时统计跳变周期数,作为输入参量送到相位解缠模块;相位自动解缠模块依据跳变周期数和跳变位序 K ,对原始相位数据进行解缠,获得正确的相位信息。

跳变周期数统计,由图 2 可知,当不存在跳变时,CORDIC 相邻两个输出数据是“连续”变化的,当存在相位跳变时,相邻两点相位输出数据变化 2π ;即可通

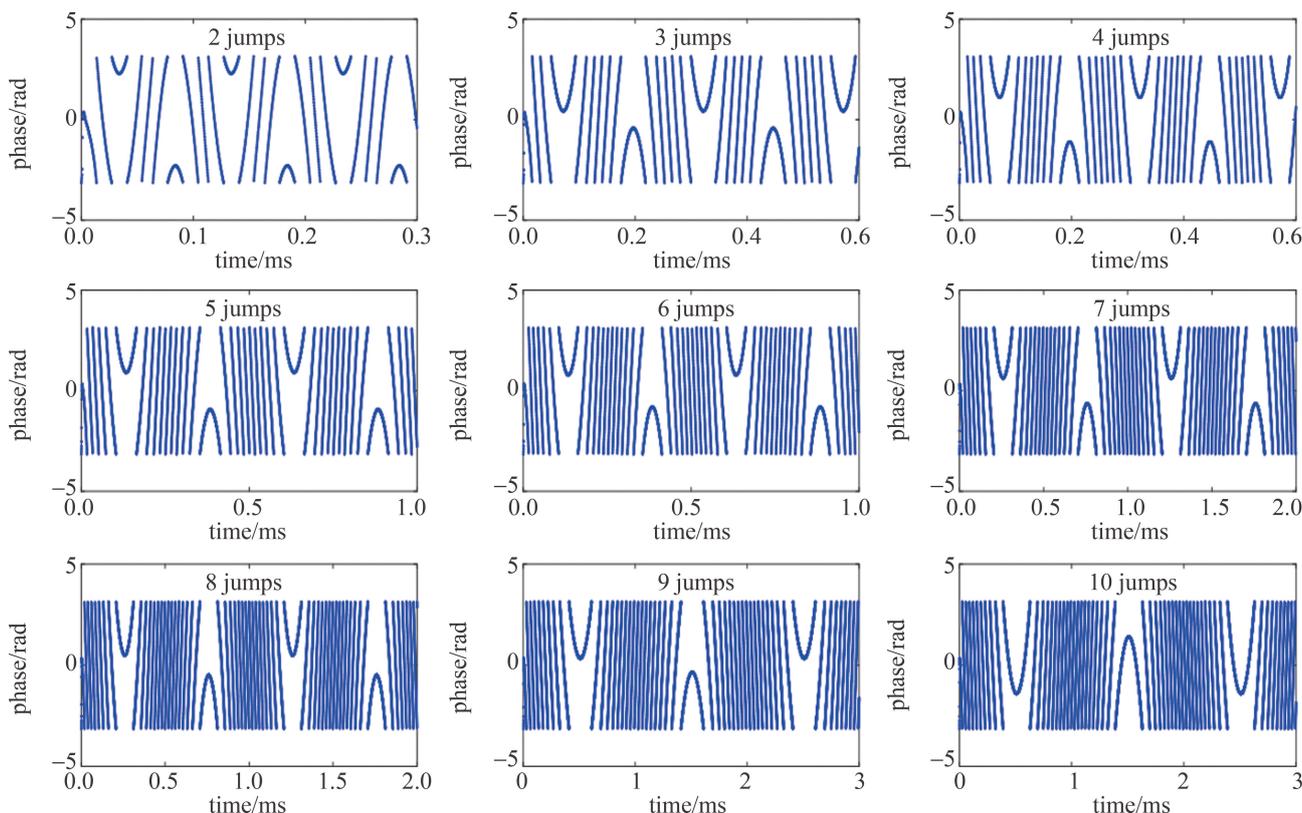


图 2 2~10 次相位跳变形式

Fig. 2 Form of two to ten phase jumps

过相邻两点相位差值 $|\varphi(i) - \varphi(i-1)|$ 与阈值 π 比较, 大于 π 时, 存在跳变。统计相位跳变数 N 时, 可通过 $\varphi(i) - \varphi(i-1)$ 与 π 比较。

$$N = \begin{cases} N + 1, & (\varphi(i) - \varphi(i-1)) > \pi \\ N, & (\text{else}) \end{cases} \quad (4)$$

相位跳变周期数 N_c 与检测到的相位跳变数 N 之间的关系如下式所示:

$$N_c = N/2 \quad (5)$$

相位跳变周期数确定流程如图 3 所示。FPGA 内相位跳变周期数统计模块设计如图 4 所示。

通过通用串行总线 (universal serial bus, USB) (Cypress USB Console 软件) 输出相位跳变周期数, 验证该检测相位跳变周期数算法的准确性, 当设置相位跳变周期数为 0~5 次时, 由该算法检测到的相位跳变周期数如图 5 所示。

相位解缠模块是在确定相位跳变周期数的基础上, 实现相位的自动补偿。在 FPGA 内使用偏移码对相位数据进行补偿处理。为了避免补偿后相位数据出现负值, 先对相位进行 $\varphi(i) + \pi$ 处理。补偿模块采用状态机设计。其中前两个状态, 状态 1: $\varphi(i) - \varphi(i-1) < -\pi$; 状态 2: $\varphi(i) - \varphi(i-1) > \pi$ 用于找到跳变位序为零

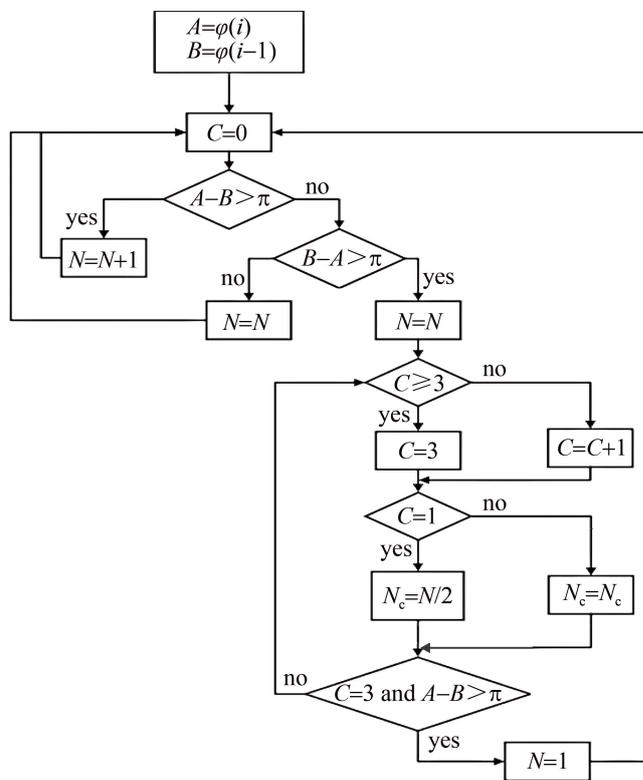


图 3 跳变周期数确定流程

Fig. 3 Flow chart for determining the number of jump cycles

```

23 PROCESS (CLK)
24 BEGIN
25 IF RST='1' THEN
26 C<=0;
27 N<=0;
28 STATE<=S0;
29 ELSIF RISING_EDGE(CLK) THEN
30 A<=CONV_INTEGER(DIN);
31 B<=A;
32 CASE STATE IS
33 WHEN S0=>
34 C<=0;
35 IF A>B AND A-B>=PI THEN
36 N<=N+1;
37 ELSIF A<B AND B-A>=PI THEN
38 STATE<=S1;
39 N<=N;
40 ELSE
41 N<=N;
42 END IF;
43 WHEN S1=>
44 IF C>=3 THEN
45 C<=3;
46 IF C>=3 THEN
47 C<=3;
48 ELSE
49 C<=C+1;
50 END IF;
51 IF C=1 THEN
52 NUM_OUT<=CONV_STD_LOGIC_VECTOR((N)/2,8);
53 ELSE
54 END IF;
55 IF C=3 AND A>B AND A-B>=PI THEN
56 STATE<=S0;
57 N<=1;
58 ELSE
59 STATE<=S1;
60 END IF;
61 WHEN OTHERS=>
62 END CASE;
63 END CASE;
64 END IF;
65 END PROCESS;

```

图4 FPGA跳变周期数模块

Fig. 4 Module of FPGA jump cycle number

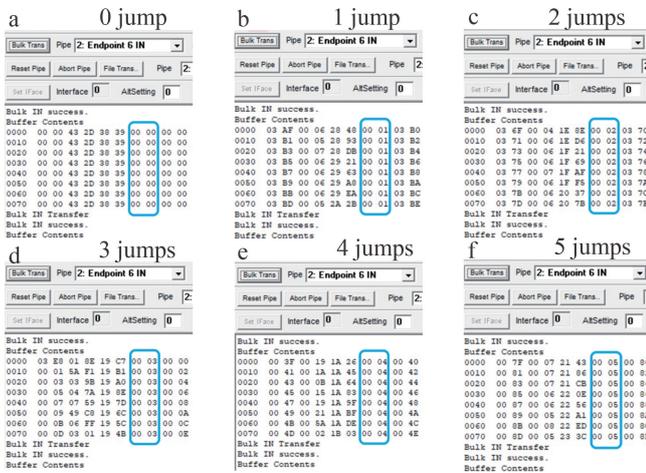


图5 相位跳变周期数检测

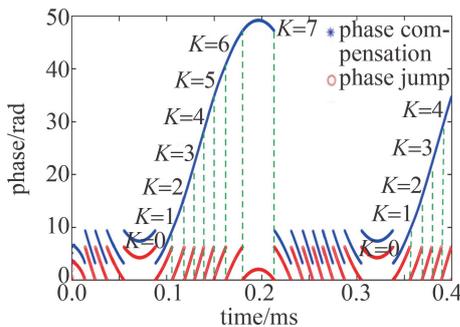
Fig. 5 Detection of phase jump cycle

的相位点,此后便进入补偿状态;在状态3时,相邻两相位值 $\varphi(i) - \varphi(i-1) < -\pi$,将 i 之后的相位值上移 2π ,变量 K 记录实时跳变位序,当存在多次跳变时,由跳变位序确定相位上移周期数,其相位补偿方程为:

$$\varphi_s(i) = 2K\pi + \varphi(i) \quad (6)$$

$$K \leq 2N_c - 1 \quad (7)$$

式中, $\varphi_s(i)$ 为补偿后的相位,以4次相位跳变为例,在状态3时其补偿方式示意图如图6所示。图中 $0 \sim 12\pi$ 为上移周期数。

图6 $\varphi(i) - \varphi(i-1) < -\pi$ 状态时补偿示意图Fig. 6 Schematic diagram of compensation when $\varphi(i) - \varphi(i-1) < -\pi$ state

当出现 $\varphi(i) - \varphi(i-1) > \pi$ 时,由状态3转换到状态4。在状态4时,相位补偿上移、下移的周期数,由跳变周期数 N_c 与跳变位序 K 共同确定。当跳变位序 $K < (2N_c - 2)$ 时,将 i 之后的相位值上移;当跳变位序 $K = (2N_c - 2)$ 时, i 之后的相位值不变;当跳变位序 $K > (2N_c - 2)$ 时, i 之后的相位值下移。其原理如图7所示。

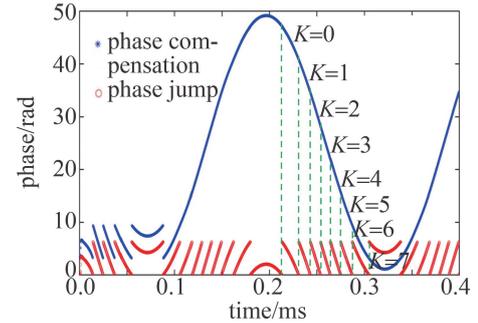
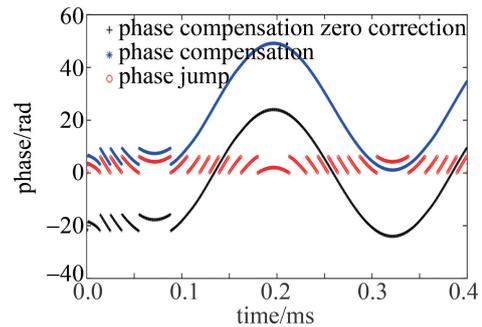
图7 $\varphi(i) - \varphi(i-1) > \pi$ 状态时补偿示意图Fig. 7 Schematic diagram of compensation when $\varphi(i) - \varphi(i-1) > \pi$ state

图8 相位补偿零点校正

Fig. 8 Zero correction for phase compensation

由此可得其相位补偿方程为:

$$\varphi_s(i) = (2N_c - 2 - K)2\pi + \varphi(i) \quad (8)$$

对补偿后的相位进行零点校正(如图8所示),校正后的相位 $\varphi_a(i)$ 为:

$$\varphi_a(i) = \varphi_s(i) - (2N_c - 1)\pi - 2^{W-1} \quad (9)$$

式中, W 代表相位数据位宽(16 bit)。

该相位解缠算法状态转化示意图如图9所示。图中 S_1, S_2, S_3, S_4 表示状态机的4个状态,reset为系统复位信号,reset=1表示系统复位。

FPGA内自动相位补偿模块设计如图10所示。该自动相位补偿算法的优势为:(1)由状态机自动寻求跳变周期数;(2)采用流水结构完成相位补偿,满足实时处理需求,无需数据缓存;(3)基于该相位补偿原理,当增加跳变周期数计数位宽,本算法在FPGA内能够适应更多次相位跳变情况,且几乎不会耗费更多资源。

出的相位存在跳变,由(2)式可知,当 n 增加 1 时,目标振动幅度发生 $\lambda/2$ 的变化。在实验时,设置目标振动信息如表 1 所示。

表 1 目标振动幅度与频率($N_c < 10$)

Table 1 Amplitude and frequency of target vibration($N_c < 10$)

N_c	maximum detectable amplitude/nm	vibration amplitude A_v /nm	vibration frequency f_v /kHz	amplitude $\varphi_a(i)/(^{\circ})$
1	1173.750	450	10	207.029
2	1956.250	1300	10	598.083
3	2738.750	2300	4	1058.147
4	3521.250	3000	4	1380.192
5	4303.750	3900	2	1794.249
6	5086.250	4600	2	2116.294

传统相位解缠算法在相位解缠时,需已知相位跳变周期数,在已知跳变周期数的情况下,实现相位解缠。设计传统算法解决跳变周期数为 6 次以内,按表 1 设计目标振动,其补偿结果如图 14 所示。

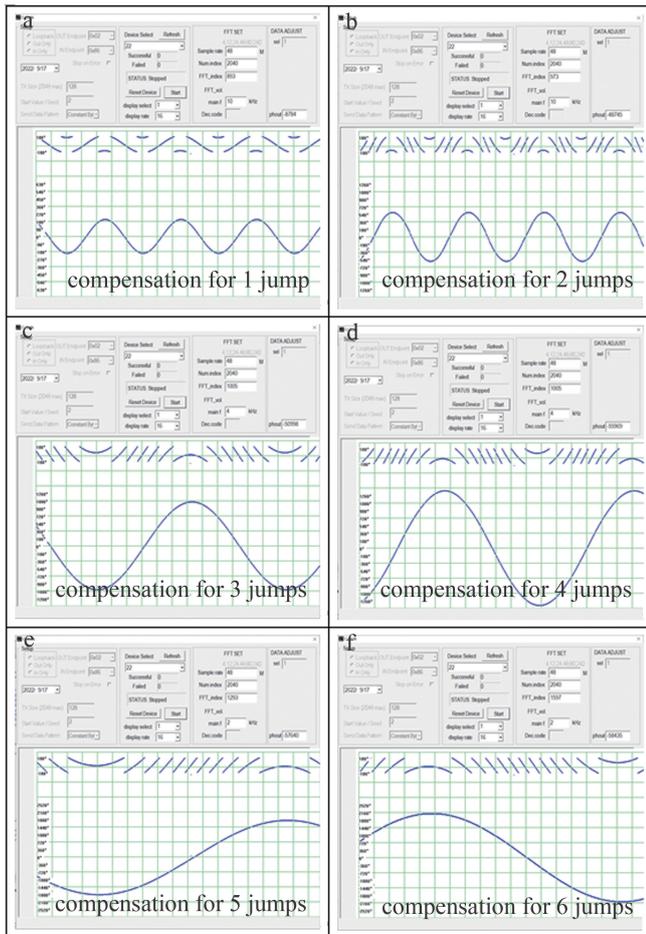


图 14 传统算法多次相位跳变补偿实验结果($N_c < 10$) (PC 端)

Fig. 14 Experimental results of multiple phase jump compensation of traditional algorithm ($N_c < 10$) (PC)

采用本自动相位解缠算法,其解缠结果如图 15 所示。

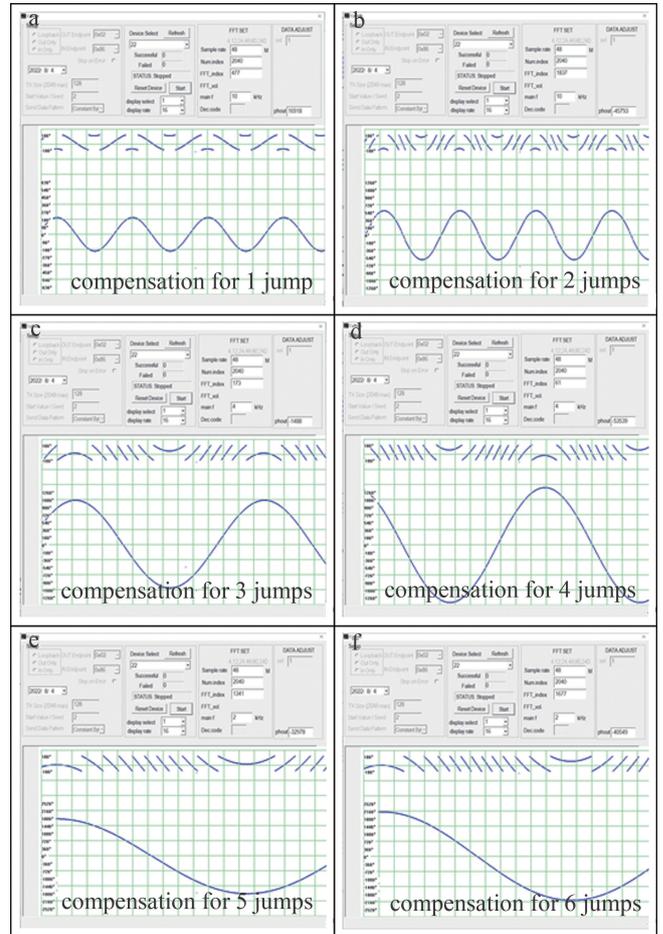


图 15 自动解缠算法多次相位跳变补偿实验结果($N_c < 10$) (PC 端)

Fig. 15 Experimental results of multiple phase jump compensation for automatic unwinding algorithm ($N_c < 10$) (PC)

经相位解缠后的解调相位值及其测量误差,如表 2 所示。

由表 2 可知,自动相位解缠算法与传统算法在相位解调精度上基本一致。但传统算法需已知相位跳变周期数,并由跳变周期数选择不同的解缠模块。多轮次的相位补偿,使得其实现繁琐复杂。传统算法与自动相位解缠算法的实现如图 16 所示。

由图 16 可知,传统相位解缠需根据跳变周期数调用相应的解缠模块,其实现结构复杂,跳变周期数过多或者未知的情况下不再适用。而自动相位解缠算法能自动获取跳变次数,实现相位的自动解缠,结构简洁,且能适应跳变次数较多的情形。

由于传统算法在相位解缠时,随着跳变周期数的增加,在相位补偿后数据位数增加,需设置不同存储器用以数据存储。其中自动解缠算法与传统算法解决 6 次以内的跳变时,片内存储资源 Block RAM 中 RAMB16BWERs

表 2 解调相位值及其误差 ($N_e < 10$)
Table 2 Demodulation phase and its error ($N_e < 10$)

N_e	phase unwinding algorithm	true value of phase amplitude/($^\circ$)	the measured value $\varphi_a(i)/(^\circ)$	absolute error of phase measurement/($^\circ$)	relative error of phase measurement
1	this algorithm	207.029	207.029	4.267×10^{-5}	2.061×10^{-7}
	traditional algorithm		206.943	-0.086	4.135×10^{-4}
2	this algorithm	598.083	598.342	0.259	4.326×10^{-4}
	traditional algorithm		598.356	0.273	4.564×10^{-4}
3	this algorithm	1058.147	1058.146	-0.001	-8.710×10^{-7}
	traditional algorithm		1058.098	-0.049	-4.622×10^{-5}
4	this algorithm	1380.192	1379.834	-0.358	-2.591×10^{-4}
	traditional algorithm		1379.722	-0.469	-3.404×10^{-4}
5	this algorithm	1794.249	1794.249	-4.477×10^{-4}	-2.495×10^{-7}
	traditional algorithm		1794.152	-0.097	-5.415×10^{-5}
6	this algorithm	2116.294	2116.127	-0.167	-7.898×10^{-5}
	traditional algorithm		2116.231	-0.063	-2.966×10^{-5}

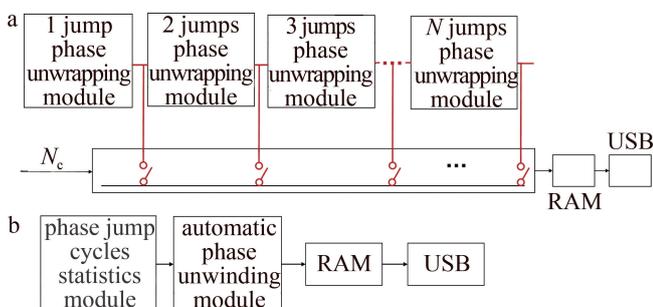


图 16 相位解缠算法实现
a—传统算法实现 b—自动解缠实现

Fig. 16 Implementation of phase unwinding algorithm

a—implementation of traditional algorithm b—implementation of automatic unwinding

的占用率相较于本相位解缠算法增加了 31%，当设计更多次相位跳变解缠模块时，由于资源有限，该解缠算法便难以实现。而自动相位解缠算法其资源使用情况不会因跳变周期数的增加而增大。

为验证当跳变周期数超过 10 次时，该自动解缠算法的有效性，设置跳变周期数及目标振动的振幅、频率如表 3 所示。

表 3 目标振动幅度与频率 ($N_e > 10$)
Table 3 Amplitude and frequency of target vibration ($N_e > 10$)

N_e	maximum detectable amplitude/nm	vibration amplitude A_v /nm	vibration frequency f_v /Hz	amplitude $\varphi_a(i)/(^\circ)$
10	8216.250	8000	500	3680.511
20	16041.250	15800	500	7269.010
30	23866.250	23500	500	10811.502
60	47341.250	47000	200	21623.003
90	70816.250	70500	100	32434.505
120	94291.250	94000	100	43246.006

当跳变周期数大于 10 次时，其补偿效果如图 17 所示。其解调相位值及测量误差如表 4 所示。

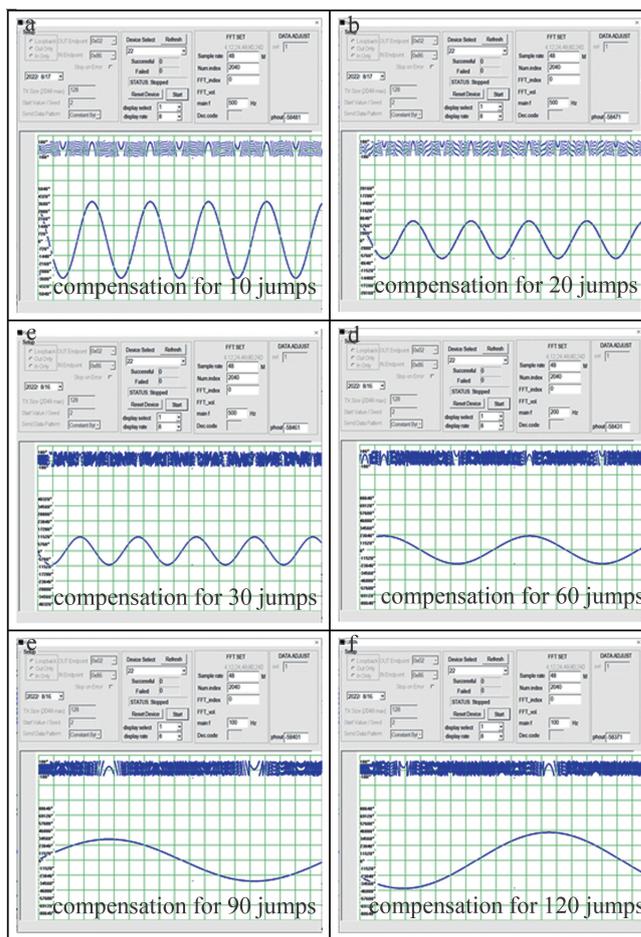


图 17 多次相位跳变补偿实验结果 ($N_e > 10$) (PC 端)

Fig. 17 Experimental results of multiple phase jumps compensation ($N_e > 10$) (PC)

由实验验证结果图 15 和图 17 可知，该自动相位解缠方法，能有效解决振幅增大导致的解调相位跳变问题，同时由表 2 和表 4 可知，解调后相位误差在 1% 以内。本实验中跳变周期数计数位宽为 8 bit，经实验

验证能够适用 256 次以下跳变情况。基于该补偿原理,增加跳变次数计数位宽,本解缠算法在 FPGA 内能够适应更多次相位跳变情况,且几乎不会耗费更多资

源,凸显了该解缠算法的优势。传统相位解缠算法与自动相位解缠算法在设计实现复杂度、资源占用、解决跳变周期数等方面的对比如表 5 所示。

表 4 解调相位值及其误差 ($N_c > 10$)

Table 4 Demodulation phase and its error ($N_c > 10$)

N_c	true value of phase amplitude/ $(^\circ)$	the measured value $\varphi_a(i)/(^\circ)$	absolute error of phase measurement/ $(^\circ)$	relative error of phase measurement
10	3680.511	3680.436	0.075	2.038×10^{-5}
20	7269.010	7268.945	0.065	8.942×10^{-6}
30	10811.502	10811.267	0.235	2.174×10^{-5}
60	21623.003	21623.061	-0.058	-2.174×10^{-6}
90	32434.505	32434.295	0.210	6.475×10^{-6}
120	43246.006	43245.753	0.253	5.850×10^{-6}

表 5 相位解缠算法对比

Table 5 Comparison of phase unwinding algorithms

	traditional phase unwinding algorithm	automatic phase unwinding algorithm
phase unwinding accuracy	within 1%	within 1%
number of phase jump cycles	need to be known	no need to know, automatic acquisition
degree of design complexity	complicated structure	simple structure
solve the number of jump cycles	fewer jumps	more jumps (determined by bit width of jumps count)
jump 6 times RAM RAMB16BWERs resource occupancy	62%	31%
the number of jump cycles increases the usage of RAM RAMB16BWERs resources	when the value is greater than 100%, unwinding cannot be achieved	keep 31% unchanged

4 结 论

针对激光多普勒相干测振中,目标振动幅度增大导致解调相位跳变的情况,提出了一种自动相位解缠算法,在 FPGA 内根据 CORDIC 输出数据,判断相邻数据信号的非连续性自动寻求跳变周期数,并依次对解调相位进行补偿,实现解调相位的连续输出。相对于传统解缠算法,本算法有效提高了目标振动幅度的测量范围和测量实时性,同时能有效节省 FPGA 资源。

参 考 文 献

- [1] SHANG J H, ZHAO Sh G, HE Y, *et al.* Experimental study on minimum resolvable velocity for heterodyne laser Doppler vibrometry[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 31-33.
- [2] JACKSON D A, GARCIA-SOUTO J A, POSADA-ROMAN J E. Calibration of laser Doppler vibrometer exploiting Bessel functions of the first kind[J]. Electronics Letters, 2015, 51(14): 1100-1102.
- [3] 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.
- [4] WANG K X, WU J F, SHU F F. Laser heterodyne measurement of frequency response and amplitude of vibrating surface of piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2021, 43(5): 680-

683 (in Chinese).

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.

- [5] HE G T, WANG X Zh, ZENG A J, *et al.* Real-time displacement measurement with large range and high accuracy using sinusoidal phase modulating laser diode interferometer[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(4): 211-214.
- [6] YANG M, GAI Ch G, WANG Y, *et al.* Review of acquisition and demodulation method of heterodyne interferometer signal [J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 20-24 (in Chinese).
杨明,蔡晨光,王颖,等. 外差式激光干涉信号的采集与解调方法综述[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 20-24.
- [7] CHEN H K. Research on signal processing and hardware implementation of laser Doppler micro vibration[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020: 7-36 (in Chinese).
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]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020: 7-36.
- [8] BAUER M, RITTER F, SIEGMUND G. High-precision laser vibrometers based on digital Doppler signal processing[J]. Proceedings of the SPIE, 2002, 4827: 50-61.
- [9] ZHANG J B, LIANG F, LIU N A. FPGA implement of a modified CORDIC algorithm [J]. Microelectronics & Computer, 2010, 27(11): 181-184 (in Chinese).
张建斌,梁芳,刘乃安. 一种改进型 CORDIC 算法的 FPGA 实现[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(11): 181-184.

- [10] LIU L G, ZENG Y A, GHANG D D. The design and optimization of arctangent calculate circuit based on FPGA[J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(17): 203-204 (in Chinese).
刘礼刚, 曾延安, 常大定. 基于FPGA的反正切函数的优化算法[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(17): 203-204.
- [11] LIU X H, XU L, LIU H Y, *et al.* Realization of arctangent function based on improved CORDIC algorithm in FPGA [J]. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(11): 103-107 (in Chinese).
刘小会, 许蕾, 刘海颖, 等. 基于CORDIC改进算法的反正切函数在FPGA中的实现[J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(11): 103-107.
- [12] MARTENS V, HANS J. Invited article: Expanded and improved traceability of vibration measurements by laser interferometry [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 121601.
- [13] WANG L W, ZHANG M, MAO X H, *et al.* The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6292: 62921E.
- [14] WANG G Q, XU T W, FANG L. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2093-2096.
- [15] LIANG Y R, DUAN H Z, YEH H C, *et al.* Fundamental limits on the digital phase measurement method based on cross-correlation analysis [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(9): 095110.
- [16] KOWARSCH R, TE R, RMEBR C. Laser-Doppler vibrometer microscope with variable heterodyne carrier [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1149(1): 12016.
- [17] GUTIERREZ R, VALLS J. Implementation on FPGA of a LUT-based atan (Y/X) operator suitable for synchronization algorithms [C]// 2007 International Conference on Field Programmable Logic and Applications. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2007: 472-475.
- [18] BAO Y P. One improved CORDIC algorithm of calculating 32 bit floating the arctangent functions with FPGA [J]. *Electronics and Packaging*, 2015, 15(3): 22-25 (in Chinese).
鲍宜鹏. 一种CORDIC算法优化及32位浮点反正切函数FPGA实现[J]. *电子与封装*, 2015, 15(3): 22-25.
- [19] LUO Y B, ZHANG H Sh, ZHANG B, *et al.* FPGA implementation of a CORDIC algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(9): 305-307 (in Chinese).
骆艳卜, 张会生, 张斌, 等. 一种CORDIC算法的FPGA实现[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(9): 305-307.
- [20] TRIBPLET J M, MEMBER S. A new phase unwrapping algorithm [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1977, 25(2): 170-177.
- [21] REN Y X, DANG A H, LIU L, *et al.* Heterodyne efficiency of a coherent free-space optical communication model through atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7246-7254.
- [22] CHOI H, PARK K, LA J. Novel phase measurement technique of the heterodyne laser interferometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(9): 93105.