

## 激光与光电子学进展

## 调频连续波光纤位移传感器快速信号处理方法

盛启明<sup>1</sup>, 郑刚<sup>2\*</sup>, 张雄星<sup>2</sup>, 韩园<sup>1</sup>, 郭媛<sup>2</sup>, 聂梦笛<sup>2</sup><sup>1</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对传统鉴相算法对拍频信号处理速度较慢的问题,提出一种基于数字信号处理(DSP)技术的调频连续波光纤位移传感器快速信号处理方法。以DSP技术为核心,通过直接内存访问(DMA)实现数据的快速传输,利用多固定点峰值预测鉴相算法对拍频信号进行快速解算并进行方向优化。实验结果表明:在600 mm的动态测量范围内,位移测量的标准差小于5 nm,线性拟合系数在0.99997以上,对被测目标的适应速度达到15 mm/s,该方法能够实现较高的测量精度和更快的动态测量速度。

**关键词** 测量; 位移测量; 多固定点峰值预测鉴相; 调频连续波; 测量速度

中图分类号 TH741; TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2112003

## Fast Signal Processing Method for Frequency-Modulated Continuous-Wave Interferometric Fiber-Optic Displacement Sensor

Sheng Qiming<sup>1</sup>, Zheng Gang<sup>2\*</sup>, Zhang Xiongxing<sup>2</sup>, Han Yuan<sup>1</sup>, Guo Yuan<sup>2</sup>, Nie Mengdi<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;<sup>2</sup>School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** In view of the problems that the slow processing speed of the traditional phase detection algorithm on the beat signal, a fast signal processing method of frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor based on digital signal processing (DSP) technology is proposed. With the DSP technology as the core, fast data transmission is realized through direct memory access (DMA), and the multi-fixed-point peak prediction phase detection algorithm is used to quickly solve the beat signal and optimize the direction. The experimental results show that in the dynamic measurement range of 600 mm, the standard deviation of displacement measurement is less than 5 nm, the linear fitting coefficient is above 0.99997, and the adaptive speed to the measured target reaches 15 mm/s. The proposed method can achieve higher measurement accuracy and faster dynamic measurement speed.

**Key words** measurement; displacement measurement; multi-fixed-point peak prediction phase discrimination; frequency-modulated continuous-wave; measuring speed

**OCIS codes** 120.5050; 120.3180; 120.2230; 120.3930

## 1 引言

调频连续波(FMCW)光纤位移传感器是一种非接触式干涉测量装置,能够实现高精度、高分辨

率的位移测量<sup>[1-4]</sup>。相比于传统的单频和双频激光干涉仪,FMCW光纤位移传感器具有结构紧凑小巧、光路简单、光源稳定等优点,而且可以通过空分复用来实现多路或多波长测量<sup>[5-6]</sup>,非常适合在光刻

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2020-12-20; 录用日期: 2020-12-27

通信作者: \*zhengg@xatu.edu.cn

机工件台检测和精密加工等领域中应用<sup>[7-8]</sup>。通过更换不同的光学测量结构, FMCW 光纤位移传感器还可以实现温度、振动、压力传感<sup>[9-12]</sup>, 结合光纤结构便于实现远程分布式高精度传感。

FMCW 光纤位移传感器是通过测量激光器发射的激光和照射到被测物体反射的激光产生的拍频信号相位差来计算位移, 因此需要系统对拍频信号进行快速有效的解调。目前, FMCW 拍频信号的相位解调算法主要有: 1) 极值法, 通过计算拍频信号波形的极值点位置来定位相位变化, 由于激光器调频非线性的影响会造成拍频信号的极值并不是等间距分布的, 因此还需要对激光器进行非线性校正<sup>[13]</sup>; 2) 过零点数字鉴相算法, 以过零点位置为参考来获得拍频信号的相邻峰值位置以鉴别信号周期, 消除了零位误差, 具有较高的鉴相精度, 但该算法仅适合处理相位缓慢变化的情况, 调制频率往往在 100 Hz 以内<sup>[11, 14]</sup>; 3) 寻峰鉴相算法, 该算法通过互相关滤波和黄金分割的思想来寻找理想的峰值, 降低了调频非线性对算法的影响, 调制频率可以达到 1 kHz<sup>[15]</sup>。

上述鉴相算法为保证鉴相精度均需要对拍频信号进行多次预处理, 例如非线性校正、过零段拟合、互相关滤波分割等, 即对每个拍频信号的采样点都要进行处理和校正, 因此算法的复杂度较高。位移测量需要对每一个激光器的调制周期进行一次相位鉴别, 而较慢的鉴相速度会导致调制频率不超过 1 kHz, 无法对快速运动的目标进行位移测量。针对这种问题, 本文以数字信号处理(DSP)技术为核心构建了一种快速信号处理方法, 通过直接内存访问(DMA)来实现处理器内存和外设之间的高效数据通信, 然后提出了多固定点峰值预测鉴相算法并进行方向优化, 简化了拍频信号处理过程以提高鉴相速度和鉴相阈值, 通过搭建实验平台对采用该方法的 FMCW 光纤位移传感器进行实验验证, 实现对快速运动目标的实时位移测量。

## 2 FMCW 光纤位移传感器的结构与测量原理

FMCW 光纤位移传感器的结构如图 1 所示, 主要由光学测量部分、调制采集部分、信号处理部分和计算机组成。

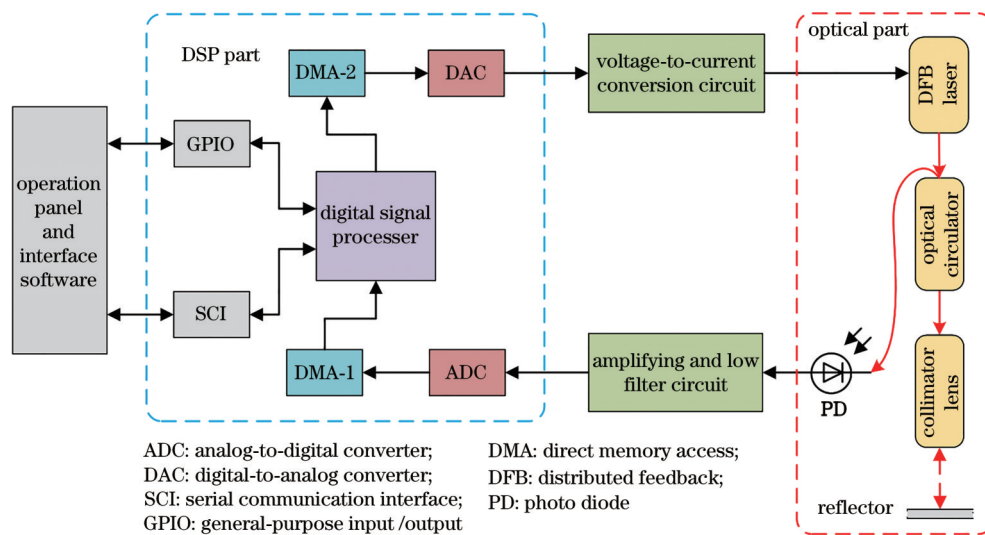


图 1 FMCW 光纤位移传感器示意图

Fig. 1 Schematic of FMCW fiber-optic displacement sensor

FMCW 光纤位移传感器的光学测量结构如图 2 所示, 使用日本 Fitel 公司生产的窄线宽 DFB 半导体激光器作为激光光源, 中心波长为 1550 nm。干涉仪采用法布里-珀罗结构, 由 DFB 激光器、环行器、准直器、光电探测器、参考目标和测量目标组成<sup>[16]</sup>。为了方便测量, 使用黄铜管将准直器和参考目标连接在一起, 制作成光纤探头。

半导体激光器发射经过锯齿波调制的激光, 其先入射至环行器的 1 端口, 从 2 端口出射至光纤准直器。准直器出射的激光一部分经参考目标(反射率为 20% 的平行平板)反射形成参考光, 另外一部分透过参考镜出射至待测目标并反射回去形成信号光, 参考光和信号光在环行器的 2 端口相干叠加产生拍频信号<sup>[4]</sup>, 每个锯齿波调制周期内产生的拍频信号可表示为

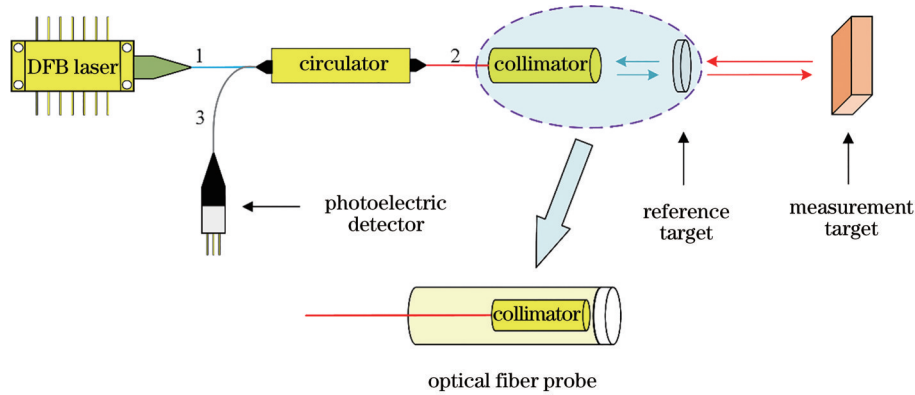


图 2 FMCW 光纤位移传感器的光学测量结构

Fig. 2 Optical measurement structure of FMCW optical-fiber displacement sensor

$$I(O_{OPD}, t) = I_0 \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi \Delta \nu \nu_m O_{OPD}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} O_{OPD} \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi \nu_b t + \phi_{b0})], \quad (1)$$

式中： $I_0$  和  $V$  分别表示拍频信号的平均光强和对比度； $\Delta \nu$  表示光学频率调制范围； $\nu_m$  表示调制信号的频率 ( $\nu_m = 1/T_m$ )，其中  $T_m$  为调制信号的周期； $O_{OPD}$  表示光程差； $t$  表示时间； $c$  表示光速； $\lambda_0$  表示激光器的中心波长； $\nu_b$  和  $\phi_{b0}$  分别表示拍频信号的频率和初相位。由于光程差  $O_{OPD} = 2nd$ ，故拍频信号的初相位  $\phi_{b0}$  可写为

$$\phi_{b0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} O_{OPD} = \frac{4\pi nd}{\lambda_0}, \quad (2)$$

式中： $n$  表示空气的折射率 ( $n \approx 1$ )； $d$  表示部分反射镜表面与待测物体表面之间的距离。测量拍频信号的初相位的变化  $\Delta \phi_{b0}$ ，就能够得到目标的相对位移  $\Delta d$ ，表达式为

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \Delta \phi_{b0}. \quad (3)$$

### 3 DMA 数据处理

根据 FMCW 激光干涉位移测量原理，整个信号的处理过程包含信号调制、信号采集和相位检测三个部分。锯齿波调制信号的产生和拍频信号的采集分别通过 DSP 芯片的数模转换器 (DAC) 和模数转换器 (ADC) 这两个外设来实现。通过 DMA 的方式来实现 DSP 芯片内存与 ADC/DAC 外设之间的数据传输，可以不依托处理器总线，节省处理器用于数据传输的开销，提高处理器的信号处理效率，使其专注于相位检测算法的执行。使用 DMA 来实现 DSP 内存与 DAC 外设之间的数据传输，产生锯齿波调制信号的过程如图 3(a) 所示，通过 DMA 通道 2 将 DAC 数据库中的调制波形数据连续

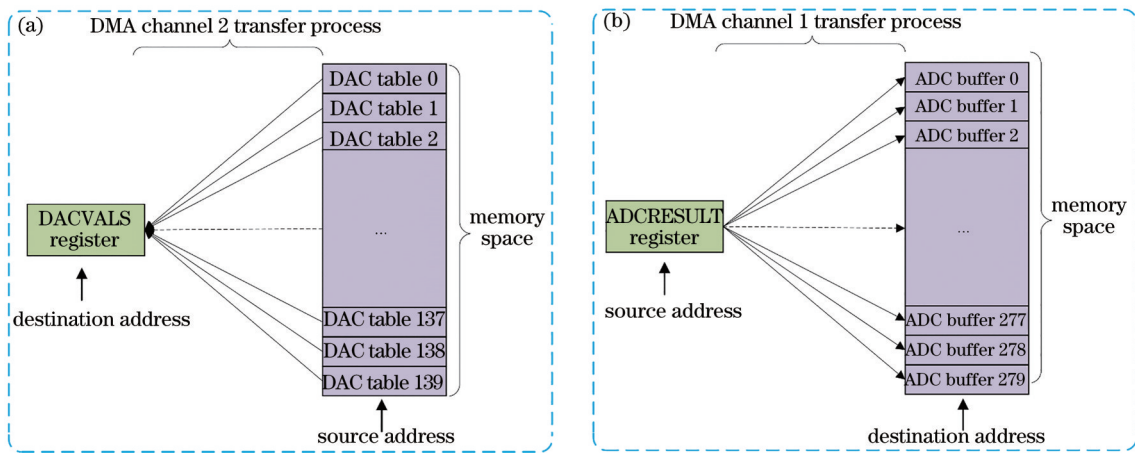


图 3 DMA 传输过程示意图。(a) 锯齿波调制信号输出；(b) 拍频信号采集

Fig. 3 Schematic of DMA transfer process. (a) Sawtooth wave modulation signal output; (b) beat frequency signal acquisition

搬运到 DACVALS 寄存器中,可以实现调制波形的输出。光学干涉产生的拍频信号经过 ADC 转换后存储在 ADCRESULT 寄存器中,DSP 通过 DMA 通道 1 将 ADCRESULT 寄存器中的数值连续搬运到数组 ADC 缓冲器中,实现干涉信号的采集,数据传输过程如图 3(b)所示。

DMA 的中断计算过程如图 4 所示,在  $t_1$  时刻完成第一个调制周期的信号传输后会产生一个中断信号,此时,通过乒乓交替处理的方法来计算第一个调制周期采集到拍频信号(ADC 缓冲器的前半部分)的初相位。在  $t_2$  时刻,当第二个中断信号到来时,对第二个调制周期采集的拍频信号(ADC 缓冲器的后半部分)进行解算,从而计算出两个相邻调制周期的拍频信号相位差。

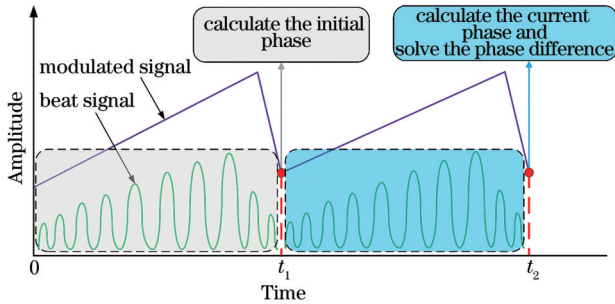


图 4 DMA 的中断计算过程

Fig. 4 DMA interrupt calculation process

#### 4 多固定点峰值预测鉴相算法

多固定点峰值预测鉴相算法是通过拍频信号极值点的位置和大小进行信号的峰值预测,并在采样信号的多个固定位置处计算多个相位以求解出平均相位。相位解算的过程如图 5 所示,该算法仅需提取拍频信号的 4 个极值点,不需要额外的预处理,提高了算法的实效性。

首先在有效区间内通过极值检测算法截取出包含两个极大值点和两个极小值点的一段拍频信号。由于拍频信号的幅值也会被调制信号调制,且拍频信号受到信号光和参考光对比度的影响,信号底部抬高。因此,通过峰值预测法对非标准信号进行标准化处理,在每个调制周期内通过一个固定点  $p$  来计算该点的相位。根据(1)式,将拍频信号公式

简化为标准的三角函数,表达式为

$$I(O_{OPD}, t) = A [\cos(\omega t + \phi)] + B, \quad (4)$$

式中: $A$  表示信号幅值; $B$  表示信号的零偏; $\omega$  表示信号的角频率; $\phi$  表示信号的相位。根据固定点相对两个极大值点和两个极小值点的位置,推算出该固定点波形的标准波峰和波谷,如图 5(b)和图 5(c)所示,计算公式为

$$p_{\text{peak}} = \frac{y_1(x_2 - p) + y_2(p - x_1)}{x_2 - x_1}, \quad (5)$$

$$v_{\text{valley}} = \frac{y_3(x_4 - p) + y_4(p - x_3)}{x_4 - x_3}, \quad (6)$$

式中: $p$  表示固定点位置; $x_1$  和  $y_1$  分别表示第一个极大值点的位置和大小; $x_2$  和  $y_2$  分别表示第二个极大值点的位置和大小; $x_3$  和  $y_3$  分别表示第一个极小值点的位置和大小, $x_4$  和  $y_4$  表示第二个极小值点的位置和大小。根据该固定点的标准波峰波谷可以计算出该点的幅值和零偏,即

$$A = \frac{p_{\text{peak}} + v_{\text{valley}}}{2}, \quad (7)$$

$$B = \frac{p_{\text{peak}} - v_{\text{valley}}}{2}. \quad (8)$$

图 5 中用  $fuzhi$  表示幅值  $A$ ,  $mean$  表示零偏  $B$ 。

图 5(e) 为预测的标准拍频信号趋势,固定点  $p$  处校正后的信号如图 5(f) 所示。通过反余弦查表法解算出  $p$  点相位的结果如图 6 所示。通过上述四点峰值预测算法来预估出与  $p$  点对应的标准余弦信号的幅值和零偏,再根据(4)式和点  $p$  处实际采样值进行归一化,归一化后的标准幅值可表示为

$$v' = \frac{I - B}{A} = \frac{G_{\text{advalue}} - B}{A}, \quad (9)$$

式中: $G_{\text{advalue}}$  表示实际测量的点  $p$  处拍频信号采样值; $v$  表示归一化后  $p$  点的标准幅值。为提高算法的速度,将  $180^\circ$  的相位构造出 2048 点反余弦表格并进行反余弦查表解算,结果如图 6(b) 所示。将解算的  $p$  点幅值  $v$  转化为反余弦表的序号,需要将  $v$  放大 1024 倍并左移 1024 点。将  $-1 \sim 1$  的标准幅值转化为  $0 \sim 2048$  的反余弦表序号,余弦信号的下降段(下坡区)相位为正,上升段(上坡区)相位为负。固定点  $p$  的信号相位  $\phi$  可表示为

$$\phi = \arccos(v') = \begin{cases} \arccos(1024v' + 1024), & V_{p-1} > V_{p+1} \\ -\arccos(1024v' + 1024), & V_{p-1} < V_{p+1} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $V_{p-1}$  表示点  $p$  前一点的采样值; $V_{p+1}$  表示点  $p$  后一点的采样值; $V_{p-1} > V_{p+1}$  表示点  $p$  处于波形的



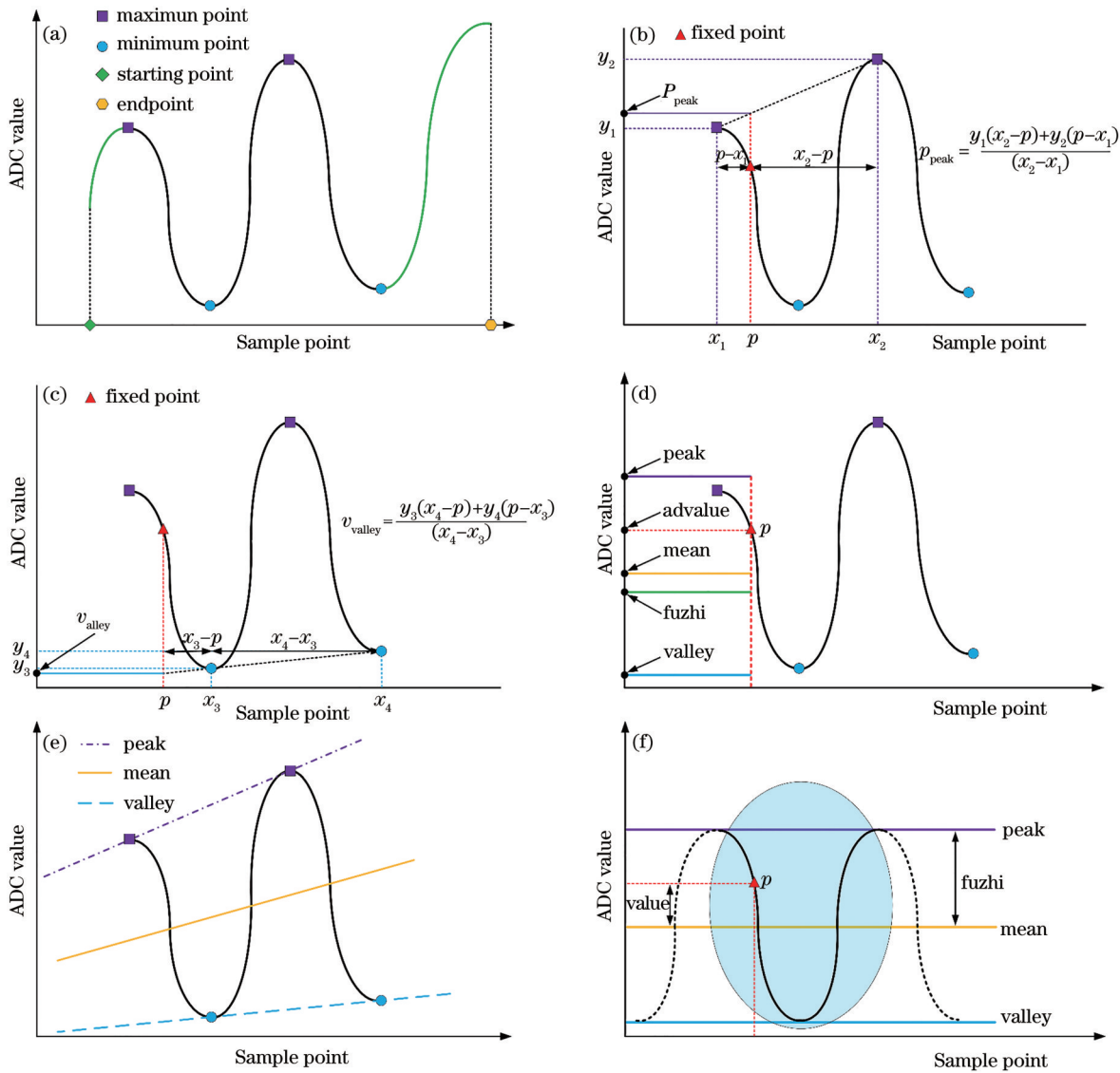


图 5 拍频信号的解算步骤示意图。(a)截取有效信号；(b)推算理论波峰；(c)推算理论波谷；(d)计算幅值和零偏；(e)推算拍频信号的趋势；(f)固定点处的标准拍频信号

Fig. 5 Schematic of calculating steps of beat signal. (a) Interception of valid signal; (b) calculation of theoretical wave peaks; (c) calculation of theoretical troughs; (d) calculation of amplitude and zero bias; (e) trends in extrapolating beat signals; (f) standard beat signal at fixed point

下坡区； $V_{p-1} < V_{p+1}$  表示点  $p$  处于波形的上坡区。通过构造反余弦表可以将相位细分 2048 点，在算法中用整形变量来计算能够实现  $0.1^\circ$  的相位分辨率和 1 nm 的位移分辨率。

由于拍频信号的周期性，当相邻两个调制周期的相位差超过  $\pi$  时，就无法判断出拍频信号相位周期移动的方向。因此，采取“就近原则”对相位进行限制，整周期相位累计如图 7 所示， $\varphi_0$  为前一个调制周期测量的相位， $\varphi_1$  为后一个调制周期测量的相位。当相位差大于  $\pi$  时，根据“就近原则”计算出后一个调制周期的预测相位  $\varphi'_1$ ，认为相位差的整周期部分减少一个整周

期  $2\pi$ ，如图 7(a) 所示，此时，相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi'_1 = \varphi_0 - (\varphi_1 - 2\pi) \quad (11)$$

当相位差小于  $-\pi$  时，计算出后一个调制周期的预测相位  $\varphi'_1$ ，认为相位差的整周期部分增加一个整周期  $2\pi$ ，如图 7(b) 所示，此时，相位差可表示为

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi'_1 = \varphi_0 - (\varphi_1 + 2\pi) \quad (12)$$

基于一个固定点峰值预测的鉴相算法可以解算出拍频信号相位，当算法实现时，通过多个固定点来解算拍频信号的平均相位以减少鉴相算法的随机误差。该算法仅需要对原始拍频信号进行一次峰值查找，即可对相位进行解算，鉴相速度很快，

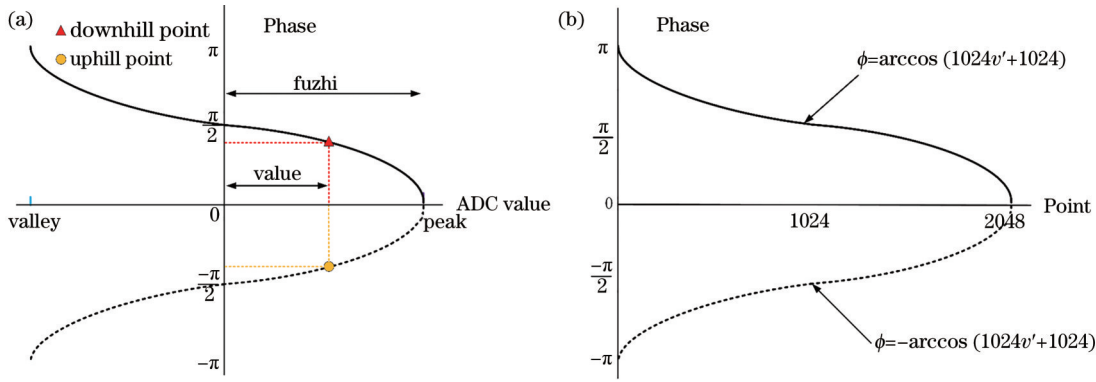


图 6 反余弦查表法的相位解算结果。(a)计算相对幅值; (b)反余弦表的曲线

Fig. 6 Phase solution results of inverse cosine look-up method. (a) Calculation of relative amplitude; (b) curve of arccosine tables

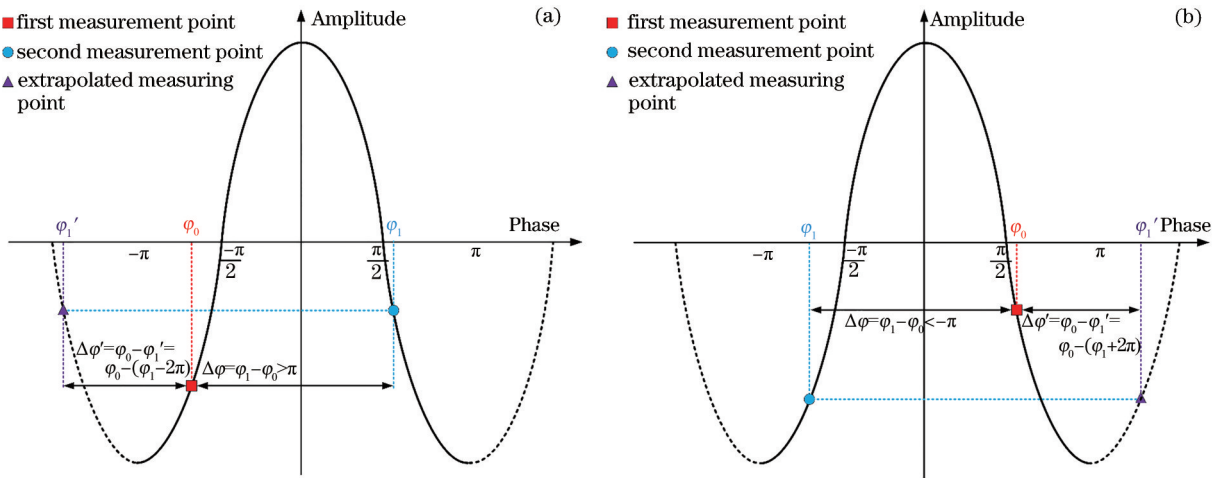


图 7 整周期相位累计的结果。(a)  $\Delta\varphi > \pi$ ; (b)  $\Delta\varphi < \pi$

Fig. 7 Result of integral period phase accumulation. (a)  $\Delta\varphi > \pi$ ; (b)  $\Delta\varphi < \pi$

DSP 对激光器的调制频率达到 20~35 kHz 时,依然可以满足鉴相算法的运行时间要求。

“就近原则”限制了算法对相邻调制周期相位差鉴别的阈值不能超过  $\pi$ , 根据(3)式计算出被测目标的最大运动速度为

$$v = \frac{\lambda_0}{4\pi} \cdot \pi \cdot f = \lambda_0 \cdot f / 4, \quad (13)$$

式中:  $f$  表示调制频率。通过上述快速鉴相算法能够显著提高调制频率, 在此基础上, 对该算法进行方向优化(被测目标仅在单一方向上的运动速度较快)可以进一步提高测量速度。假定被测目标正向移动(位移增大, 相位正向增加)的速度较快, 当相邻两个调制周期的相位差大于  $\pi$  时或相位差小于  $-\pi$  时, 均认为相位差为正向变化的。此时一个调制周期内允许的最大相位变化量提高到  $2\pi$ , 对正向移动目标的最大运动速度  $v$  可表示为

$$v = \frac{\lambda_0}{4\pi} \cdot 2\pi \cdot f = \lambda_0 \cdot f / 2. \quad (14)$$

## 5 实 验

为减小空气扰动以及振动等外界因素对测量的干扰, 将实验装置固定在气浮光学平台上。使用 Thorlabs 公司 DDS600/M 直驱线性平移台进行实验, 该线性平移台的行程为 0~600 mm, 分辨率为 100 nm, 实验装置如图 8 所示。FMCW 光纤位移传感器采用 DSP 芯片作为核心处理器, 型号为德州仪器公司的 TMS320F28377。将光纤探头和被测目标置于线性平移台上并使用防风罩保护, 将被测目标固定在距离光纤探头 200 mm 处, 测试过程中的调制频率为 20 kHz。

为验证不同固定点个数下峰值预测算法测量的位移误差分布, 对固定在滑轨上的静止目标进行测量, 算法采用 1~10 个固定点鉴相, 分别对采用不同固定点个数的算法解算出的标准差和算法耗时进行记录, 得到的实际测量结果如图 9 所示, 当算法采用 1 个固定点鉴相时, 测量结果的标准差为 11.55 nm,

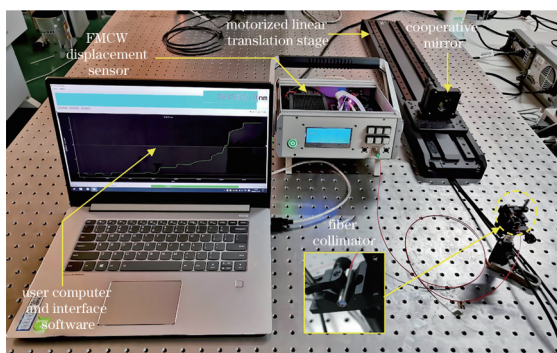


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental devices

算法耗时为  $8.72 \mu\text{s}$ , 当算法采用 5 个固定点鉴相时, 标准差下降到  $2.73 \text{ nm}$ , 算法耗时增加到  $15.97 \mu\text{s}$  (小于  $16 \mu\text{s}$ ), 此时再增加鉴相的固定点个数时, 标准差基本保持在  $2.51 \text{ nm}$  左右。当算法采用 10 个固定点鉴相时, 算法耗时增加到了  $24.92 \mu\text{s}$ 。实验结果表明, 多点鉴相可以有效减小测量的随机误差, 但是点数越多, 鉴相算法的耗时越长, 采用 5 个固定点鉴相的算法在测量效果和实效性上是最优的。

根据 (13) 式可以计算出在  $20 \text{ kHz}$  的调制频率

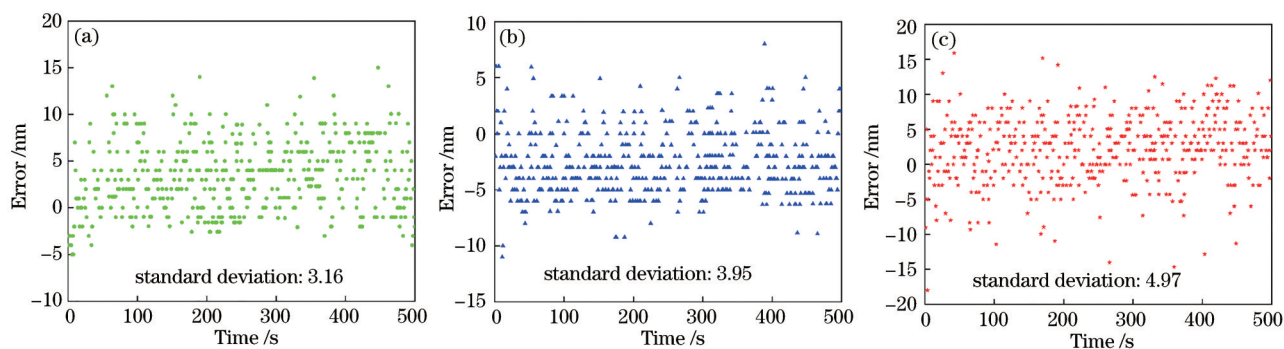


图 10 不同位移情况下测量误差的标准差。(a) 200 mm; (b) 400 mm; (c) 600 mm

Fig. 10 Standard deviation of measurement error under different displacements. (a) 200 mm; (b) 400 mm; (c) 600 mm

在  $200, 400, 600 \text{ mm}$  的位移情况下测量误差的标准差分别为  $3.16, 3.95, 4.97 \text{ nm}$ , 在  $15 \text{ mm/s}$  的正向运动速度下,  $600 \text{ mm}$  位移行程下的测量误差均优于  $5 \text{ nm}$ 。实验结果表明, 方向优化后算法对被测目标运动速度的上限提高了 2 倍, 与理论分析一致。

通过线性平移台控制软件控制滑轨上的被测目标进行  $1 \text{ mm/s}$  匀速运动, 从起始位置运动到  $600 \text{ mm}$ , 每间隔  $50 \text{ mm}$  记录一次位移测量结果, 进行三次重复测量, 如图 11 所示。经计算, 三次测量结果的线性回归  $R^2$  分别为:  $R_1^2 = 0.99998, R_2^2 = 0.99998,$

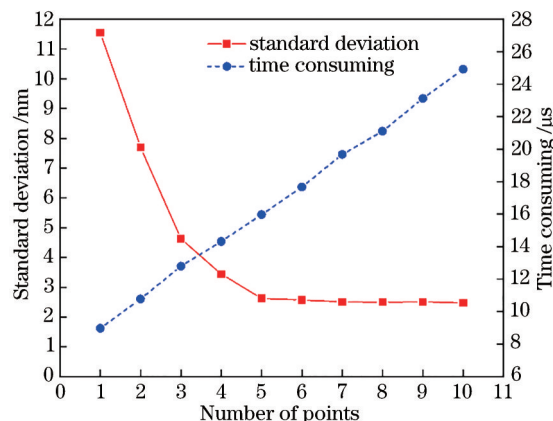


图 9 不同固定点个数下的位移漂移标准差和算法耗时

Fig. 9 Standard deviation and time consuming of displacement drift at different fixed points

下, 允许被测目标的最大运动速度为  $7.75 \text{ mm/s}$ , 对该算法进行方向优化后, 则允许被测目标的正向最大运动速度可以达到  $15.5 \text{ mm/s}$ 。为验证算法的有效性, 通过线性平移台控制软件控制滑轨以  $15 \text{ mm/s}$  的速度匀速运动, 记录传感器在  $200, 400, 600 \text{ mm}$  位置处的位移测量结果, 将测量结果标定后作出误差散点图, 如图 10 所示。

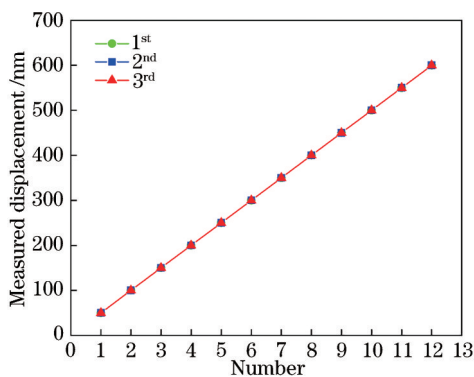


图 11 线性度和重复性的测试结果

Fig. 11 Linearity and repeatability test results

$R_3^2 = 0.99997$ , 线性度均在 0.99997 以上, 实验结果表明了传感器具有良好的线性度和重复性。

多固定点峰值预测鉴相算法与现有极值点鉴相算法的关键指标如表 1 所示, 两种算法的标准差

均优于 3 nm, 但多固定点峰值预测鉴相算法的鉴相速度和对被测目标的适应速度均有大幅提高, 表明该算法有效提高了传感器对动态目标的位移测量速度。

表 1 峰值预测鉴相算法与现有算法的性能对比

Table 1 Performance comparison between peak prediction phase detection algorithm and existing algorithms

Types of phase detection algorithm	Adaptation speed / ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Algorithm time-consuming / $\mu\text{s}$	Measurement standard deviation / nm
Extreme point detection	0.38	752.39	2.81
Peak prediction phase detection	15.50	15.97	2.73

## 6 结 论

提出了一种基于 DSP 处理器的 FMCW 光纤位移传感器快速信号处理方法, 该方法通过 DMA 和多固定点峰值预测鉴相算法实现高效的内存传输和快速相位解算, 并在此基础上对该算法进行方向优化, 进一步增大了传感器对动态目标运动速度的适应范围。搭建实验平台, 对位移传感器进行实验, 当调制频率为 20 kHz 时, 采用 5 个固定点的峰值预测鉴相算法的标准差为 2.73 nm, 算法耗时小于 16  $\mu\text{s}$ , 对速度为 15 mm/s 的运动目标进行 600 mm 位移行程测试, 测量误差优于 5 nm, 线性度均在 0.99997 以上。研究结果表明, 所提的快速信号处理方法对动态目标的适应速度可以达到 15 mm/s, 且具有较高的测量精度, 有效扩展了调频连续波光纤维位移传感器的适用范围。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Applied Optics, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [2] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interferometry[M]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [3] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers[J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2723-2730.
- [4] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 124401-124405.
- [5] Zheng G, Wang H, Bai L, et al. Space division type multi-wavelength frequency modulation continuous wave laser interferometer: CN110864621A[P]. 2020-03-06.  
郑刚, 王欢, 白浪, 等. 一种空分式多波长调频连续波激光干涉仪: CN110864621A[P]. 2020-03-06.
- [6] Sheng Q M, Zheng G, Zhang X X, et al. Three-channel frequency-modulated continuous-wave laser interferometric displacement measurement system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0312004.  
盛启明, 郑刚, 张雄星, 等. 三通道调频连续波激光干涉位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0312004.
- [7] Ma L Q, Wang L D, Jin S Y, et al. Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(6): 1-5.  
马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2006, 26(6): 1-5.
- [8] Huang Y W, Tao J, Huang X G. Research progress on F-P interference-based fiber-optic sensors[J]. Sensors, 2016, 16(9): E1424.
- [9] Wang H, Zheng G, Chen H B, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(5): 87-93.  
王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 87-93.
- [10] Zheng C, Zheng G, Han L, et al. Polarization decoherence differential frequency-modulated continuous-wave gyroscope[J]. Optics Letters, 2014, 39(23): 6597-6599.
- [11] Bai L, Zheng G, Zhang X X, et al. Optical fiber pressure sensor based on frequency-modulated continuous-wave and analysis of its measurement characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0328002.  
白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 调频连续波光纤维压力传感器及其测量特性分析[J]. 光学学报, 2021, 41(3): 0328002.
- [12] Bai L, Zheng G, Guo Y, et al. Analysis and



compensation method of temperature characteristics of high-precision frequency-modulated continuous wave fiber optic pressure sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 092802.

白浪, 郑刚, 郭媛, 等. 高精度调频连续波光纤压力传感器温度特性分析及补偿方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 092802.

- [13] Jing L Q, Zheng G, Zhang X X, et al. Nonlinear correction of frequency-modulated continuous wave interferometric laser sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1114001.

井李强, 郑刚, 张雄星, 等. 一种调频连续波干涉激光光源非线性校正方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1114001.

- [14] Zheng G, Gao M, Liu W G, et al. High-precision

digital phase discrimination method: CN108318737A [P]. 2018-07-24.

郑刚, 高明, 刘卫国, 等. 一种高精度数字鉴相方法: CN108318737A[P]. 2018-07-24.

- [15] Zhang X X, Zheng G, Jing L Q, et al. A novel digital phase detection method for frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor[J]. *Optik*, 2019, 183: 742-750.

- [16] Zheng G, Gao M, Liu W G, et al. Frequency modulated continuous wave laser interference fiber displacement sensor and its displacement detection method: CN108050941A[P]. 2018-05-18.

郑刚, 高明, 刘卫国, 等. 一种调频连续波激光干涉光纤位移传感器及其位移检测方法: CN108050941 A[P]. 2018-05-18.