

文章编号 1004-924X(2017)09-2309-08

单频激光干涉仪正交信号的高精度处理

夏豪杰*, 胡梦雯, 张欣

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了提高单频激光干涉仪正交信号相位细分辨向的可靠性与重复性, 本文在正交信号 Heydemann 误差模型和数字信号处理技术的基础上, 提出一种结合误差修正和相位细分辨向技术的正交信号高精度误差补偿算法。该算法采用基于最小二乘法的矩阵运算计算正交误差补偿参数初值, 通过迭代运算进一步提高补偿精度, 并对修正后的信号构建了基于相位的细分辨向算法。最后通过 MATLAB 软件对该算法进行了验证。实验结果表明, 上述算法可实现对正交信号误差的精确补偿, 使测量精度可达亚纳米甚至皮米数量级, 从而有效提高测量信号的解调精度。

关键词: 单频激光干涉仪; 正交信号; 误差补偿; 细分辨向; 测量精度

中图分类号: TH711; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2309

High precision processing of quadrature signals for homodyne interferometer

XIA Hao-jie*, HU Meng-wen, ZHANG Xin

(College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: hj.xia@hfut.edu.cn

Abstract: In order to improve the reliability and repeatability of phase counting and subdivision of quadrature signals for homodyne interferometers, a high accuracy error compensation algorithm for quadrature signals combined error correction with phase-based counting and subdivision was proposed based on the Heydemann correction model of quadrature signals and digital signal processing technology. Matrix manipulation based on the least square method was adopted to calculate compensation parameter initials of quadrature signals, which were corrected by iterative operation to further improve the compensation accuracy. Then phase-based counting and subdivision algorithm was established base on the revised signals. Finally, the algorithm was verified with Matlab software. Experimental results show that the proposed algorithm can accurately compensate the error of the quadrature signals, and the measurement accuracy achieves sub-nanometer or even picometer scales, thus the demodulation accuracy of the measured signals can be improved effectively.

Key words: homodyne interferometer; quadrature signals; error compensation; counting and subdivision; measurement accuracy

收稿日期: 2017-04-09; 修订日期: 2017-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375138); 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (No. 51427805)

1 引言

激光干涉仪可实现波长可溯源到长度测量基准,通过高倍细分输出正交信号,可实现纳米甚至亚纳米级精度的测量,是目前公认的高精度大量程测量方法。干涉仪测量结果的误差影响因素较多,有光源(稳频性能,能量输出漂移)、光路结构(光学镜片缺陷)、测量环境(温度、湿度、振动)等。随着现代精密测量技术的发展,对测量精度的要求愈来愈高,例如在 LIGO^[1]、SPM^[2]、精密光刻^[3]等领域对测量精度的要求已达亚纳米甚至皮米量级,从而对激光干涉系统的光路结构、信号处理、环境控制等的要求更加苛刻。在实际应用中,单频激光干涉仪因光源性能、光学器件偏差、光电转换器件对准误差、光电转换电路等因素影响而导致的正交信号误差,直接限制了干涉仪测量分辨力向更高精度发展。因此,正交信号高精度误差的补偿修正是激光干涉仪精密测量应用中重要的研究内容。

目前,提升单频激光干涉仪的测量精度主要有两种方法:一种是在信号细分后,通过更高精度测量设备对该类传感器误差进行比对标定,并对测量误差进行数值插补。该方法虽可有效提升测量系统精度,但可靠性差,一旦测量结构改变或者振动等引起补偿起点位置发生变动,需重新标定;第二种方法是先对测量正交信号进行误差补偿,再进行相位解调。1981年,Heydemann^[4]提出 Heydemann 正交信号误差模型,结合电子技术该模型被用于正交信号的高精度误差补偿中,目前 PTB^[5]、NPL 等都采用该模型对正交信号进行补偿。不过由于算法复杂、数据量较大,该模型通常情况只可以进行正交信号的离线分析与补偿,难以实现正交信号的快速补偿和高精度处理^[6]。

本文基于正交信号 Heydemann 误差模型,结合数字信号处理技术设计了正交信号高精度误差补偿算法^[7-9],采用最小二乘法计算误差补偿参数初值,通过迭代运算进一步提高补偿精度,并对修正后的信号构建了基于相位的细分辨向算法。此算法可精确补偿正交信号误差,有效提高测量信号的解调精度,从而为正交信号误差补偿和高精度处理提供一种新方法。

2 单频激光干涉仪测量原理

典型的单频激光干涉仪位移测量系统的光路结构如图 1 所示。He-Ne 稳频激光光源发出的线偏振光经光学镜片调整其偏振方向后,在偏振分光镜 PBS1 的偏振分光面处被分解成一束振动方向平行的线偏振光和一束振动方向垂直的线偏振光。两束偏振光在 $\lambda/4$ 波片、反射镜和角锥棱镜的透射和反射下,偏振方向各自改变 90° ,再次在偏振分光镜 PBS1 的偏振分光面处合束出射,两束振动方向相互垂直的线偏振光经 $\lambda/4$ 波片和偏振分光镜 PBS2 后,分别经偏振分光镜 PBS3、PBS4 生成 4 路相差 90° 的干涉信号。

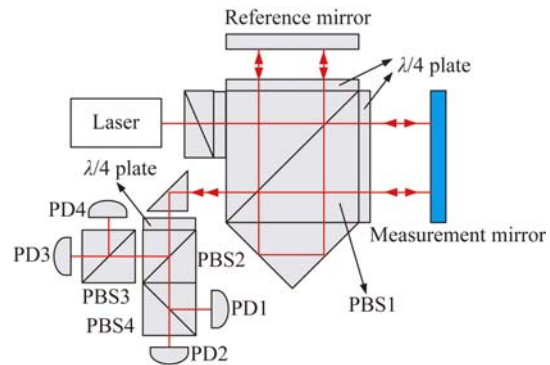


图 1 单频激光干涉仪位移测量系统光路结构

Fig. 1 Optical structure of homodyne laser interferometer displacement measuring system

在光学镜片理想的情况下,由各波片的琼斯矩阵和干涉光路的原理可知,光电探测器 PD1、PD2、PD3、PD4 探测到的光强分别为:

$$\begin{aligned} I_1 &= \vec{E}_{d1}^2 = \frac{A^2}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{8\pi}{\lambda} \cdot L \right\} \right], \\ I_2 &= \vec{E}_{d2}^2 = \frac{A^2}{2} \left[1 - \sin \left\{ \frac{8\pi}{\lambda} \cdot L \right\} \right], \\ I_3 &= \vec{E}_{d3}^2 = \frac{A^2}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{8\pi}{\lambda} \cdot L - \frac{\pi}{2} \right\} \right], \\ I_4 &= \vec{E}_{d4}^2 = \frac{A^2}{2} \left[1 - \sin \left\{ \frac{8\pi}{\lambda} \cdot L - \frac{\pi}{2} \right\} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

其中: A 为光源输出光矢量的振幅, L 为测量镜位移。将相位相反的两组信号 I_1 与 I_3 、 I_2 与 I_4 分别输入两个差分放大器,可以得到两个相位正交的信号:

$$I_{\sin} = I_3 - I_2 = A^2 \sin \left\{ \frac{8\pi}{\lambda} \cdot L \right\},$$

$$I_{\cos} = I_1 - I_4 = A^2 \cos \left[\frac{8\pi}{\lambda} \cdot L \right]. \quad (2)$$

参考反射镜固定不动,相位差每周期变化一次,干涉条纹亮暗变化一次,对应测量反射镜移动 $\lambda/4$ 长度。因此,用两路正交信号的光强值可得到亮暗变化的干涉条纹 K 组, K 由整周期数 N 和不满周期细分数 n 组成,那么测量反射镜的实际位移 L 为:

$$L = K \cdot \frac{\lambda}{4} = (N + n) \cdot \frac{\lambda}{4}. \quad (3)$$

在单频激光干涉仪精密测量中,由于存在各种干扰,测量信号存在直流漂移、幅值波动以及正交误差,因此精确计算整周期数 N 和不满周期细分数 n 是单频激光干涉仪高精度测量的关键。

3 正交信号高精度处理算法

单频激光干涉仪正交信号处理系统通常先对测量信号采用 Heydemann 误差模型进行误差补偿,再通过信号细分提升测量系统精度。由于误差补偿算法复杂、数据量较大、计算较慢,通常情况只可以进行正交信号的离线分析与补偿;同时在信号处理中,AD 位数、采样频率和测量反射镜移动速度等都会影响误差补偿的精度和信号细分倍数,因此难以实现正交信号的高精度误差补偿和处理。本文结合实际应用,在 Heydemann 模型的基础上,提出一种通过迭代运算计算误差修正参数的正交信号高精度误差补偿算法^[10-12],并结合数字信号处理技术^[13-14]对修正后的信号构建了一种基于相位的细分辨向算法,实现了对正交信号的误差精确补偿,提高了测量信号的解调精度。

3.1 正交信号误差模型

在实际应用中,光源、光电器件自身性能、对准等因素的非理想性,以及信号检测与处理电路带来的误差,会导致实际测量信号存在 3 类主要误差:相位误差 α 、不等幅误差 R_1, R_2 和直流误差 p, q ,探测器输出的实际信号数学模型为:

$$\begin{cases} U_1^d = R_1 \cos \theta + p \\ U_2^d = R_2 \sin(\theta - \alpha) + q \end{cases} \quad (4)$$

用实际信号直接求相位时,正交信号误差引入的相位测量误差 $\delta\theta$ 为:

$$\delta\theta = \left[\arctan \left(\frac{U_2^d}{U_1^d} \right) - \hat{\theta} \right], \quad (5)$$

$$\delta\theta \leq \frac{4 \cdot |\Delta L|}{\lambda}, \quad (6)$$

其中: $\hat{\theta}$ 为正交信号相位的估计值, ΔL 为系统测量的有效分辨力。根据干涉原理,系统测量的有效分辨力 ΔL 与相位误差 $\delta\theta$ 的关系如式(6)所示, λ 为激光波长。因此,测量精度要求的相位实时最优估计值 $\hat{\theta}$ 应满足:

$$\arctan \left(\frac{U_{2i}^d}{U_{1i}^d} \right) - \frac{4 \cdot |\Delta L|}{\lambda} \leq \hat{\theta} \leq \arctan \left(\frac{U_{2i}^d}{U_{1i}^d} \right) + \frac{4 \cdot |\Delta L|}{\lambda}. \quad (7)$$

3.2 误差补偿算法

本文采取按误差源分步补偿的方法对正交信号进行误差补偿,可有效提高信号的处理效率。如图 2 所示,首先通过减法运算计算并补偿直流误差 p, q ,使信号中只存在交流分量;接着通过乘法运算归一化交流幅值;最后结合 Heydemann 算法修正信号的正交误差 α ,将式(7)作为测量精度要求,对正交信号的修正效果进行判断和迭代运算。

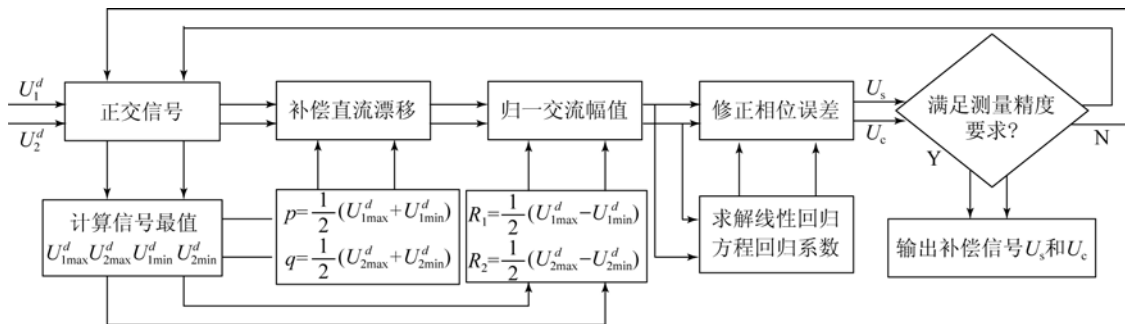


图 2 误差补偿算法流程图

Fig. 2 Flowchart of error compensation algorithm

具体补偿过程如下:分别得到正交信号极值,其中信号峰值为 $U_{1\max}^d, U_{2\max}^d$, 谷值为 $U_{1\min}^d, U_{2\min}^d$, 因此信号的直流误差和交流幅值误差为:

$$\begin{cases} p = \frac{1}{2}(U_{1\max}^d + U_{1\min}^d) \\ q = \frac{1}{2}(U_{2\max}^d + U_{2\min}^d) \\ R_1 = \frac{1}{2}(U_{1\max}^d - U_{1\min}^d) \\ R_2 = \frac{1}{2}(U_{2\max}^d - U_{2\min}^d) \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8),通过减法运算补偿直流分量 p, q ,使信号中只存在交流分量。然后,分别利用乘法对两路信号的交流幅值进行归一化处理,处理后的两路信号为:

$$\begin{cases} U_1^d = R_1 \cdot R_2 \cos \theta \\ U_2^d = R_1 \cdot R_2 \sin(\theta - \alpha) \end{cases} \quad (9)$$

令 $x = U_1^d, y = U_2^d, R = R_1 \cdot R_2$, 根据 Heydemann 算法建立式(9)的椭圆方程,则仅存在正交误差的误差补偿算法的数学模型如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + Axy + B = 0 \\ A = 2\sin \alpha \\ B = -R^2 \cos^2 \alpha \end{cases} \quad (10)$$

通过最小二乘法进行如式(11)所示的矩阵运算,计算椭圆参数 A, B 的值,则正交误差为:

$$\begin{pmatrix} \sum y^3 & \sum xy^2 & \sum y \\ \sum xy^2 & \sum x^2 y & \sum x \\ \sum y^2 & \sum xy & \sum 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sum 1 \\ \sum A \\ \sum B \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum x^2 y \\ \sum x^3 \\ \sum x^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan \sqrt{\frac{-A^2 R^2}{4B}} \quad (12)$$

通过对 U_2^d 进行相位误差校正,得到两路修正后的信号。

在干涉信号处理系统中,输入信号会因采样频率过低、测量反射镜移动速度过快和光电转换电路噪声等影响导致周期采样点数较少,致使信号极值计算不准确,从而导致信号误差无法消除,使修正后的信号中仍然存在无法忽视的直流漂移、交流幅值误差和相位误差,这些误差会继续影响系统的测量精度。因此,根据式(7),利用修正后的正交信号计算相位实时估计值,判断它是否满足测量精度要求的相位实时最优估计值范围。当相位实时估计值满足测量精度要求时,则修正后的信号可作为输出信号进行下一步细分运算;当相位实时估计值不满足测量精度要求时,则认为修正后的信号中含有的误差项较大,通过上述方法进行迭代对修正信号中的各误差项继续补偿,直至满足系统测量精度的需求。

3.3 基于相位的高精度细分算法

误差补偿后的正交信号可以通过相位细分提高测量精度,细分处理流程如图 3 所示。

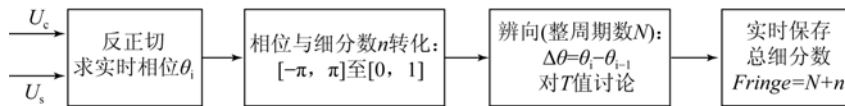


图 3 细分算法流程图

Fig. 3 Flowchart of subdivision algorithm

测量反射镜位移 L 与相位变化 K 的关系如式(3)所示。本文根据 CORDIC 算法^[15-16],通过反正切运算计算相位,实现测量过程跟踪。如表 1 所示,反正切函数值域为 $[-\pi, \pi]$,它可以用来实现四象限反正切运算。

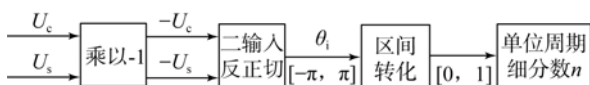


图 4 细分数计算流程图

Fig. 4 Flowchart of fractional calculation

如图 4 所示,将相位值 θ_i 通过加法和移位可得到 $[0, 1]$ 的细分数 n ,处理结果如图 5 所示。

表 1 反正切算法原理

Tab. 1 Principle of arctangent algorithm

位置条件	$\arctan(y, x)$
$x > 0$	$\arctan(y/x)$
$x < 0, y \geq 0$	$\pi + \arctan(y/x)$
$x < 0, y < 0$	$-\pi + \arctan(y/x)$
$x = 0, y > 0$	$\pi/2$
$x = 0, y < 0$	$-\pi/2$

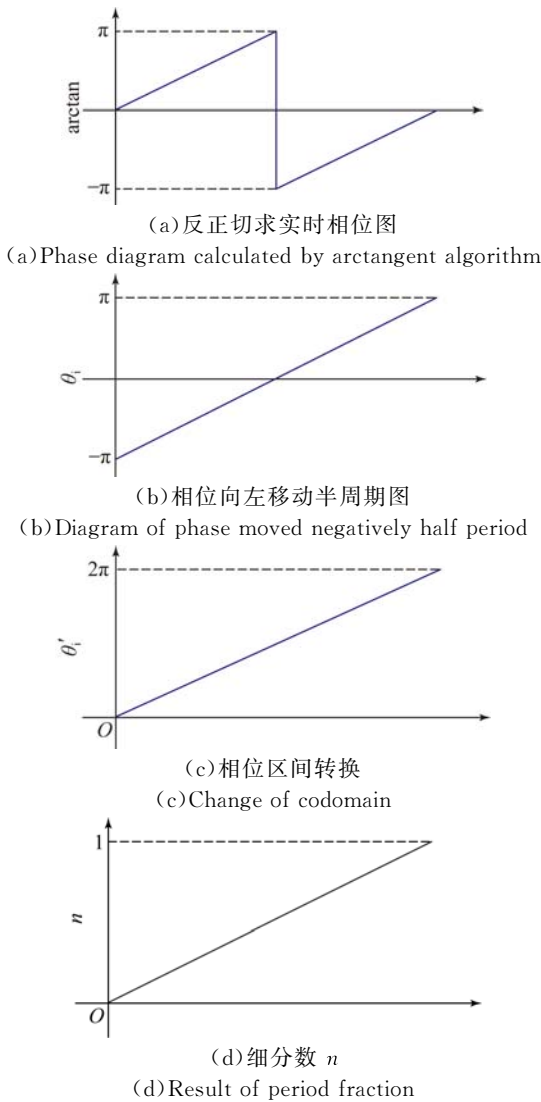


图 5 细分处理示意图
Fig. 5 Results of fractional calculation

整周期数 N 可根据相邻两点的相位差判断信号移动方向,并在进入新周期时刻对整周期数作相增、减运算。当测量数据正向递增时,同周期内实时相位值递增,细分数 n 从 0 增到 1,如图 6(a)所示,即信号正向移动一周,相邻两点相位差 $\Delta\theta$ 始终为正,正向移动至新周期时刻细分数由 1 变为 0,该时刻相邻两点的相位差为负且接近 2π ;测量数据反向递减时,同周期内实时相位值递减,细分数 n 从 1 减到 0,如图 6(b)所示,即信号反向移动一周,相邻两点的相位差 $\Delta\theta$ 始终为负,反向移动至新周期时刻细分数由 0 变为 1,该时刻相邻两点的相位差为正且接近 2π 。因此根据测量反射镜位置、信号移动方向与 $\Delta\theta$ 的关系,当采样频率较高时,得到如图 6 所示的整周期数判断条件。

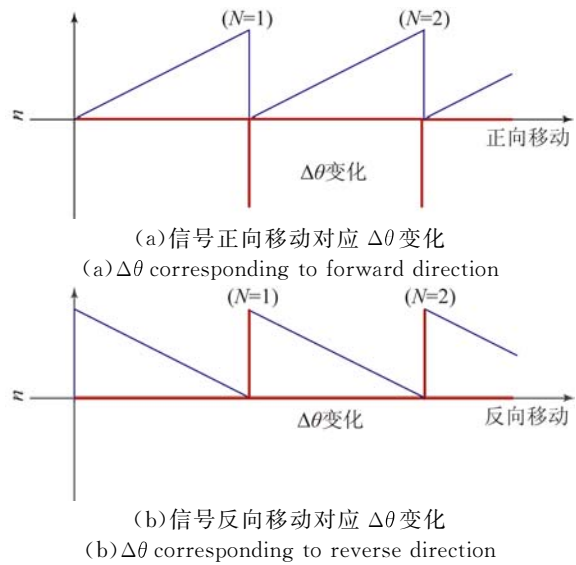


图 6 位移方向对应 $\Delta\theta$ 变化图
Fig. 6 $\Delta\theta$ corresponding to displacement direction

当单位周期采样数充足时:

- (1)信号正向移动时,同周期内 $\Delta\theta$ 始终为正且 $\Delta\theta \approx 0$, N 值无变化,进入下一周期时刻, $\Delta\theta \approx -1$, N 值加 1;
- (2)信号反向移动时,同周期内 $\Delta\theta$ 始终为负且 $\Delta\theta \approx 0$, N 值无变化,进入下一周期时刻, $\Delta\theta \approx 1$, N 值减 1。

4 实验验证

为验证本文所提算法的有效性,由信号发生器产生两路含有直流漂移、交流幅值误差和相位误差的正交信号,通过 16-bit 采集卡对两路信号进行实时采集,将采样数据传入 MATLAB 中进行算法验证。

4.1 误差补偿实验

基于 MATLAB 构建 3.2 所述的误差补偿算法结构。采样数据中按顺序选择 500 个点,采取误差源分步修正的误差修正方法,降低采样信号中的直流误差、交流幅值误差和正交误差。表 2 为正交信号各误差项的设定值与实验计算值,图 7 为误差补偿效果图。实验证明了误差修正算法的可行性。

表 2 正交信号误差补偿实验结果
Tab. 2 Result of error compensation test

	p	q	R_0	R_c	a
参数输入值	0.1	0.1	1.1	0.9	$\pi/100$
误差补偿值	0.100 001 43	0.099 997 89	1.099 990 94	0.899 996 15	0.031 431 00

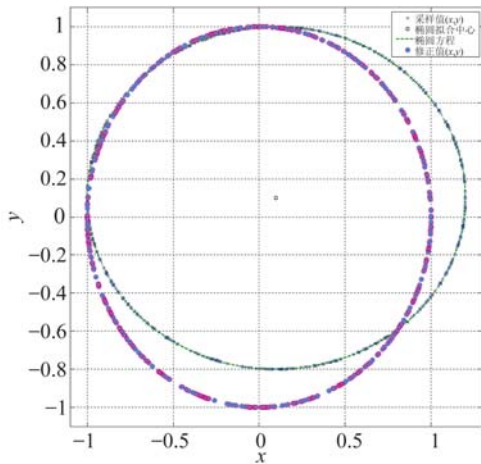


图 7 误差补偿效果图

Fig. 7 Result of error compensation

根据式(5),实验中相位测量误差的最大值、最小值结果如表 3 所示。

表 3 误差补偿实验实时相位误差极值

Tab. 3 Maximum and minimum values of phase error in error compensation experiment

$ \Delta\theta_{\min} $	$ \Delta\theta_{\max} $
0.000 006 24°	0.001 467 80°

由表 3 可知,系统经误差补偿后存在由实时相位误差引起的位移测量误差,即:

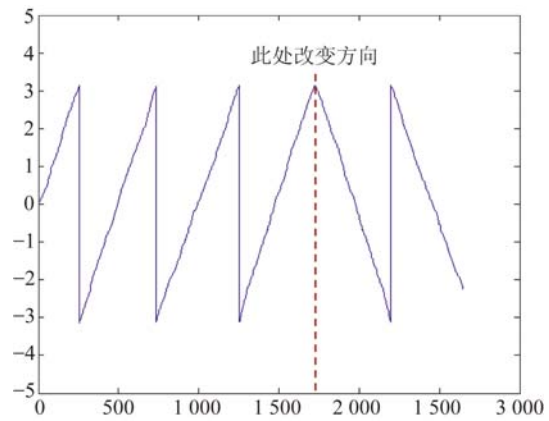
$$\Delta L = \frac{|\Delta\theta_{\max}|}{360^\circ} \cdot \frac{\lambda}{4} \approx 6.45 \times 10^{-4} \text{ nm}. \quad (12)$$

由式(12)可知,修正后的信号可实现亚纳米级的测量精度。

4.2 相位的高精度细分实验

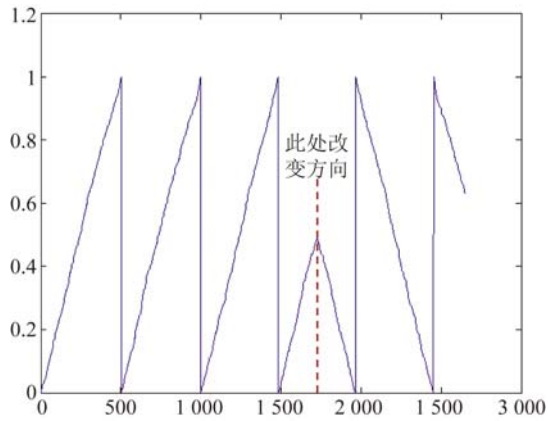
基于 MATLAB 搭建 3.3 所示的相位细分实验结构。实验将经误差补偿实验得到的修正信号作为本实验的输入信号,运用 MATLAB 中的双输入反正切函数等运算,计算输入信号对应的细分数 n 和整周期数 N ,并由此计算始末相位差,最后可得到信号移动的位移。

本实验设定每周期的采样点数为 500,总共采集 2 650 个点,其中包括前 1 725 个正向移动点(正向移动 3.5 个周期)和其后 925 个反向移动点(反向移动 1.85 个周期)。因此,信号最终实际正向移动 1.65 个周期。



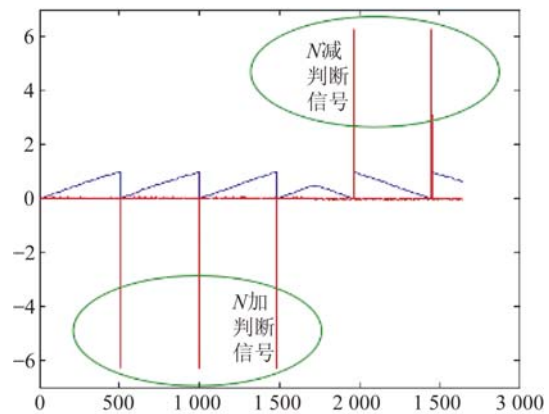
(a)测量臂移动对应相位角变化图

(a) θ corresponding to displacement direction



(b)测量臂移动对应单位周期细分数 n 变化图

(b) n corresponding to displacement direction



(c)测量臂移动对应整周期数 N 变化图

(c) N corresponding to displacement direction

图 8 细分辨向算法实验效果图

Fig. 8 Experimental results of counting and subdivision process

实验运用二输入反正切算法计算单位周期细

分数 n , 根据二输入反正切算法的值域和加减算法对测量过程实时跟踪计算整周期 N 。图 8(a) 表示信号移动对应相位角变化的测量结果, 经数学运算得到相位角对应单位周期细分数, 图 8(b) 表示信号移动对应单位周期细分数 n 的变化, 图 8(c) 表示信号正、反方向变化时对整周期数 N 的影响。

表 4 为信号实际移动周期数与实验计算结果。

表 4 细分实验位移误差表

Tab. 4 Displacement error in subdivision experiment

信号最终实际移动周期数	细分辨向模块输出始末相位差
1.65	1.650 018 205 640 261

$\Delta L = (1.650\ 018\ 205\ 640\ 261 - 1.65) \cdot \lambda / 4 \approx 0.002\ 880\ 031\ \text{nm}$

参考文献:

- [1] KAWABE K, COLLABORATION L. Status of LIGO [C]. *10th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground*, IOP Publishing Ltd, 2008:396-401.
- [2] OHARA T. Scanning probe position encoder (SPPE): a new approach for high-precision and high-speed position measurement system [J]. *SPIE*, 2001, 4344:552-561.
- [3] 苏东风, 续志军, 贾继强, 等. 提高圆光栅测角系统精度的读数头设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(7):653-657.
- SU D F, XU Z J, JIA J Q, et al.. Read-head design for improving the precision of circular grating angular measuring system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(7):653-657. (in Chinese)
- [4] HEYDEMANN P L M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(19):3382-3384.
- [5] KÖCHERT P, FLÜGGE J, WEICHERT C, et al.. A fast phase meter for interferometric applications with an accuracy in the picometer regime [C]. *10th IMEKO TC14 Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry*, IMEKO, 2011.
- [6] 赵素文. 单频干涉精密距离测量关键技术研究

5 结论

本文在正交信号 Heydemann 误差模型基础上, 结合数字信号处理技术设计了正交信号高精度误差补偿算法, 采用分步补偿法首先分离出信号中的直流误差和交流幅值误差补偿参数初值, 再建立只包含正交误差信号的椭圆方程。采用基于最小二乘法的矩阵运算计算正交误差补偿参数初值, 通过迭代运算进一步提高补偿精度, 并对修正后的信号构建基于相位的细分辨向算法。实验验证表明, 上述算法可实现对正交信号误差的精确补偿, 分辨力可达亚纳米甚至皮米。高精度算法可有效提高测量信号的解调精度。

[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2012.

ZHAO S W. *Study on Key Technologies of Precise Distance Measurement by Homodyne Interferometry* [D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics), 2012. (in Chinese)

- [7] PISANI M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(8):084008.
- [8] 黄雷. 单频激光干涉系统性能优化及高精度测量技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2013.
- HUANG L. *Research of Optimization Performance and High Accuracy Measurement Technology for Single Frequency Laser Interferometer* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] LAWALL J, KESSLER E. Michelson interferometry with 10 pm accuracy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(7):2669-2676.
- [10] KÖNING R, WIMMER G, WITKOVSKÝ V. The statistical uncertainty of the Heydemann correction: a practical limit of optical quadrature homodyne interferometry [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8):084004.
- [11] KÖNING R, WIMMER G, WITKOVSKÝ V. Ellipse fitting by nonlinear constraints to demodulate quadrature homodyne interferometer signals and to determine the statistical uncertainty of the interfer-

- ometric phase [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(11):115001.
- [12] POŽAR T, MOŽINA J. Enhanced ellipse fitting in a two-detector homodyne quadrature laser interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(8):085301.
- [13] 刘世峰. 基于幅值采样的光栅莫尔条纹信号细分技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2007: 10-21.
LIU SH F. *Research of Subdivision Technology of Grating Moiré Fringe Based on Amplitude Sampling* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:10-21. (in Chinese)
- [14] 李怀琼, 陈钱, 王钰. 新型光栅信号数字细分技术及其误差分析[J]. *计量学报*, 2001, 22(4): 281-283.
LI H Q, CHEN Q, WANG Y. A new digital subdividing technique for grating signal and its error analysis [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2001, 22(4):281-283. (in Chinese)
- [15] VOLDER J E. The CORDIC trigonometric computing technique [J]. *IRE Transactions on Electronic Computers*, 1959, EC-8(3):330-334.
- [16] 卢少武, 唐小琦, 马泽龙, 等. CORDIC 算法在光栅莫尔条纹细分中的应用[J]. *自动化仪表*, 2010, 31(5):23-25.
LU SH W, TANG X Q, MA Z L, *et al.*. Application of CORDIC algorithm in subdivision of grating moiré fringe [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2010, 31(5):23-25. (in Chinese)

作者简介:



夏豪杰(1979—),男,安徽宿州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电精密测试技术及微纳米测量技术的研究。E-mail:hjxia@hfut.edu.cn



胡梦雯(1993—),女,安徽六安人,硕士研究生,主要从事光电精密测试技术及微纳米测量技术的研究。E-mail:2015110021@mail.hfut.edu