

# 光栅莫尔信号正交误差实时补偿研究

叶树亮, 张 潜, 朱维斌

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所 杭州 310018)

**摘要:**针对光栅读数头输出信号存在正交误差的问题,提出基于坐标旋转数字式计算机算法(CORDIC)的正交误差实时补偿方法。针对CORDIC算法在正余弦信号角度解算时存在误差较大区间以及在正余弦信号峰值区间角度解算灵敏度低的问题,引入向量模式双迭代方法抑制CORDIC算法因迭代收敛过快而带来的角度解算误差,并结合局部查表法消除信号峰值区间的角度解算误差。正交误差补偿过程包括相位解算、相位补偿和信号重构3个环节。以解算出的角度值为对象进行整周期误差角度的实时补偿,采用CORDIC算法旋转模式根据补偿后的角度值重构余弦信号,实现对莫尔信号正交误差的实时补偿。以FPGA为平台实现该补偿方法并验证其相位差检测和补偿效果,实验表明信号在正交误差 $[1^\circ, 10^\circ]$ 时,相位检测误差在 $\pm 0.04^\circ$ 以内;信号在不同频率不同相位差时,补偿后其相位最大误差在 $\pm 1^\circ$ 以内,平均误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内,均方差在 $0.5^\circ$ 以内,证明该方法可有效实现对莫尔信号正交误差的实时补偿。

**关键词:**光栅莫尔信号; 正交误差; 实时补偿; CORDIC算法

**中图分类号:** TH7      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Study on quadrature error real-time compensation for grating Moiré signal

Ye Shuliang, Zhang Qian, Zhu Weibin

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that quadrature error exists in the output signals of grating reading heads, a quadrature error real-time compensation method based on Coordinate Rotation Digital Computer, (CORDIC) algorithm is proposed. Aiming at the problems that there exist large error interval in the sine-cosine signal angle solution and low angle solution sensitivity in the sine-cosine signal peak interval in the CORDIC algorithm, a vector pattern bi-iteration method is introduced to suppress the angle solution error caused by the CORDIC algorithm due to too quick iteration convergence speed, and the local table look-up method is used in combination to eliminate the angle solution error in the signal peak interval. The quadrature error compensation process consists of three steps: phase solution, phase compensation and signal reconstruction. Taking the solved angle value as the object, the angle errors are compensated in real time in complete period. The CORDIC rotation mode is used to reconstruct the cosine signals from the compensated angle values so as to realize the real-time compensation of the quadrature errors of Moiré signals. This compensation method was implemented on an FPGA platform, and the phase difference measurement and compensation performance of this method were verified. Test results indicate that with the signal quadrature error of  $[1^\circ, 10^\circ]$ , the phase measurement error is within  $\pm 0.04^\circ$ ; for the signals with different frequencies and phase differences, after compensation the maximum phase error is within  $\pm 1^\circ$ , the mean error is within  $\pm 0.1^\circ$ , and the mean square deviation is within  $0.5^\circ$ , which proves that the proposed method can effectively achieve the real-time compensation of the quadrature errors of Moiré signals.

**Keywords:** grating Moiré signal; quadrature error; real-time compensation; CORDIC algorithm

## 1 引言

光栅位移传感器在精密测量领域被广泛使用,通过对光栅莫尔信号的细分可以实现对位移的精密测量<sup>[1-4]</sup>。莫尔信号质量是影响细分精度的主要因素,包括直流漂移、幅值偏差、正交性误差、正弦性等<sup>[5]</sup>。在各项指标中正交性误差对细分精度影响最大<sup>[6]</sup>,因此莫尔信号的正交误差补偿对于光栅精密测量具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

近年来,国内外多家研究单位持续进行着对莫尔信号正交性误差补偿的研究。美国天文台提出基于 Heydemann 模型的补偿方法<sup>[9]</sup>,该方法需要处理  $5 \times N$  矩阵的计算量(采样数  $N > 20$ ),计算量大。其他方法如合肥工业大学徐从裕<sup>[10]</sup>采用单变量递推式分离信号中各项误差;长春光机所冯英翘等人<sup>[11]</sup>采用最小二乘法求解正交误差来校正参数,其补偿过程都涉及矩阵运算,需要大量先验数据,运算缓慢,对正交误差补偿的实时性差;日本 SONY 公司使用三角函数运算法来消除正交误差<sup>[12]</sup>,但其三角函数运算次数较多,补偿过程不够优化;长春光机所罗刚等人<sup>[6]</sup>采用锁相环检测正交误差,该方法要求物体必须匀速运动,环境适应性差;高旭等人<sup>[13]</sup>还采用 Hilbert 变换算法求解正交误差,但其解算过程中

涉及卷积运算,并且补偿环节较多,整体补偿方法复杂。针对传统方法存在的计算量大、补偿实时性差、环境适应性差、运算环节复杂不够优化等问题,提出一种基于坐标旋转数字式计算机 (coordinate rotation digital computer, CORDIC) 算法的数字式正交误差实时补偿方法。CORDIC 算法运算简单通过“加减和移位”操作便可实现,是一种常用三角函数运算算法<sup>[14-15]</sup>,但是鲜有将其应用到光栅信号正交误差补偿的报道。本文利用 CORDIC 的高运算效率和硬件实现便利性,以 FPGA 为平台采用高速流水线架构实现 CORDIC 算法,对莫尔信号正交误差进行补偿。通过对 CORDIC 算法的优化和局部查表法的结合,解决了正交误差补偿过程中计算存在原理误差和信号峰值区间角度解算不敏感问题,实现了正交误差实时补偿。实验表明该补偿方法补偿效果好、运算速率高,补偿效果稳定不受环境影响。

## 2 正交误差补偿原理

本文提出的正交误差实时补偿方法以莫尔信号采集数据的对应角度值为对象,通过相位解算、相位补偿和信号重构 3 个环节实现对信号正交误差的实时补偿。正交误差补偿流程如图 1 所示。

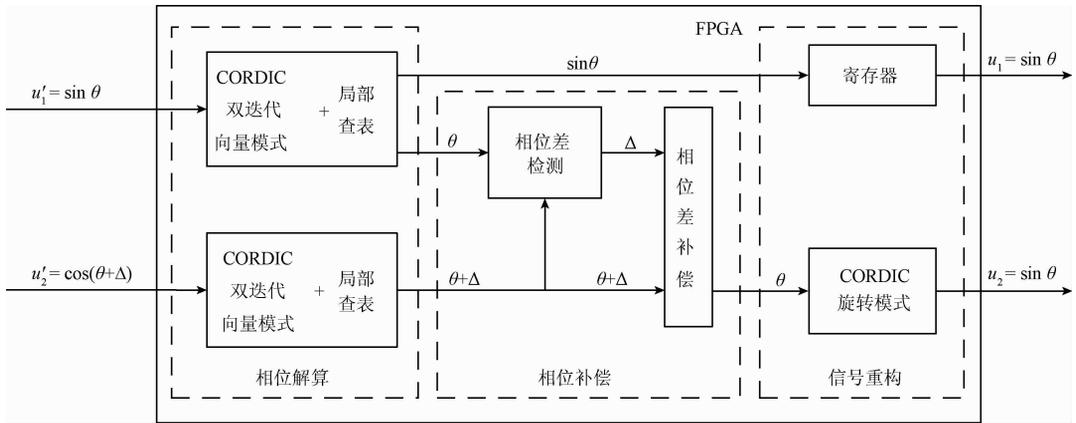


图 1 正交误差补偿流程

Fig. 1 Process diagram of quadrature error compensation

如图 1 所示,正交误差补偿的相位解算、相位补偿和信号重构 3 个环节全部在 FPGA 平台实现。硬件采用流水线架构,实现过程使用了 CORDIC 算法的向量模式和旋转模式<sup>[16]</sup>。在相位解算环节使用向量模式结合局部查表将两路信号幅值解算为对应角度值;在相位补偿环节对解算出的角度值做差得两路信号相位差值,以正弦信号角度为基准对余弦信号进行整周期角度补偿,实现对信号的相位差补偿;在信号重构环节使用旋转模式根据补偿后的余弦角度值重构余弦信号,调整两路信号正交性。

为实现实时补偿,利用信号在相邻周期相位差变化缓慢的特点<sup>[17]</sup>,根据信号当前周期相位差检测结果对下一周期信号进行补偿。整个正交误差补偿过程以相位解算环节为基础,以相位补偿环节为核心,最终通过信号重构输出补偿信号,实现对光栅莫尔信号正交误差的实时补偿。

## 3 基于向量模式的相位解算

在正交误差补偿过程中,采用 CORDIC 算法向量模

式对信号进行角度值解算。针对原始 CORDIC 算法在向量模式解算角度时,存在局部区域角度解算误差较大的问题,引入了双迭代向量模式,并结合局部查表解决峰值区间角度解算灵敏度低的问题。

### 3.1 CORDIC 算法原理

CORDIC 算法是一种基于坐标旋转的数字计算方法,通过对数据的加减和移位操作实现三角函数运算,本文 CORDIC 算法进行了 16 次迭代运算,其在圆周坐标系下的基本迭代方程为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - D_i(2^{-i}y_i) \\ y_{i+1} = y_i + D_i(2^{-i}x_i) \\ z_{i+1} = z_i - D_i\arctan 2^{-i} \end{cases} \quad (1)$$

CORDIC 算法的旋转模式和向量模式由判断因子  $D_i$  的取值表征。采用向量模式对正弦信号进行角度解算,其判断因子为:

$$D_i = \text{sign}(c - y_i) \quad (2)$$

式中:  $c$  为输入正弦值。经过  $n$  次迭代运算得到:

$$\begin{cases} x_n = K_n\sqrt{(x_0)^2 + (y_0)^2} \\ y_n = c \\ z_n = z_0 + \arcsin\left(\frac{c}{k_n \cdot x_0}\right) \end{cases} \quad (3)$$

$$K_n = \prod_{i=0}^n \sqrt{1 + 2^{-2i}} \quad (4)$$

式(4)是旋转向量的增益因子。通过初始化设置  $x_0 = 1/K_n, y_0 = 0, z_0 = 0$ , 可得反正弦值  $z_n = \arcsin(c)$ 。反余弦的计算用  $\pi/2$  减反正弦计算的结果。

### 3.2 相位解算误差

相位解算是正交误差补偿的基础,其角度解算误差将直接传递到后续的相位补偿和信号重构环节,最终将影响正交补偿精度。作为一种角度解算方法,CORDIC 算法本身存在解算误差。在 MATLAB 环境下对 CORDIC 算法对正弦信号的角度解算误差进行分析,  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围角度解算误差曲线如图 2 所示。

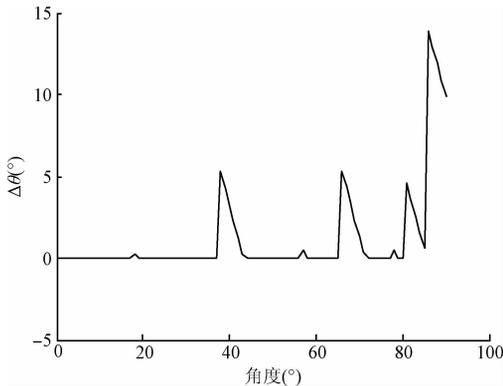


图2 CORDIC 算法角度解算误差

Fig. 2 The angle solution error of the CORDIC algorithm

由图 2 可知,CORDIC 算法进行角度解算时,在几个局部区间存在误差较大问题。引起误差存在的原因:1) 算法在这些区间迭代收敛过快,造成的原理误差;2) 正余弦信号在信号峰值区间角度解算不敏感造成的解算误差。

### 3.3 算法改进

针对传统 CORDIC 算法在角度解算时存在的问题,引入双迭代模式解决迭代收敛过快,并对峰值区间进行局部查表,从而达到减少角度解算系统误差的目的。双迭代模式进行两次基本角度的迭代旋转,第 2 次迭代通过对信号迭代方向的再次判断降低了旋转角度的收敛速度。迭代方程为<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - 2D_iy_i2^{-i} - D_i^2x_i2^{-2i} \\ y_{i+1} = y_i + 2D_ix_i2^{-i} - D_i^2y_i2^{-2i} \\ z_{i+1} = z_i + 2D_i\arctan 2^{-i} \end{cases} \quad (5)$$

在式(5)中双迭代增加了迭代次数,引起了增益因子的变化,其大小为:

$$K'_n = K_n \times \prod_{i=i}^n \cos(\arctan 2^{-i}) \quad (6)$$

双迭代模式降低了传统 CORDIC 算法中角度迭代的收敛速度,结合增益因子的改进,有效改善由算法原理造成的角度解算误差问题。在 MATLAB 环境下,对改进后的 CORDIC 算法对正弦信号的角度解算误差进行仿真分析,在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围的计算误差如图 3 所示。

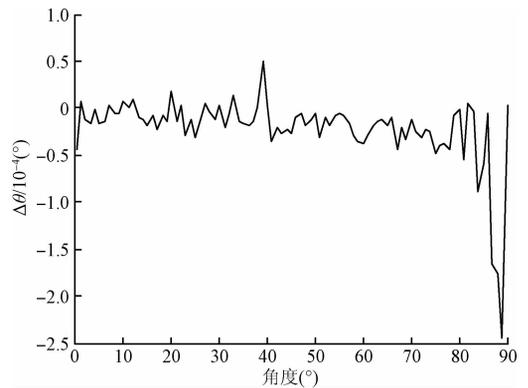


图3 仿真验证角度解算误差

Fig. 3 Simulation verification of the angle solution error

由图 3 可知,CORDIC 算法进行双旋转改进后,计算误差由最大值 14 降到  $10^{-4}$  量级,最大误差不超过  $3 \times 10^{-4} (\circ)$ ,证明了在 CORDIC 算法引入双迭代模式可实现对角度的有效解算。

由图 3 还可以看出,正弦信号在  $90^\circ$  峰值区间角度解算误差明显偏大,这是由于在正余弦峰值区间幅值变化缓慢引起角度解算不敏感造成的。在实际电路中由于受

算法位宽和迭代次数的限制<sup>[20]</sup>,信号峰值区间角度解算误差将会更大,最终可能输出不满足精度要求的角度解算值。因此采用查表法解决峰值区间角度解算不敏感问题。

以 FPGA 为平台实现双迭代 CORDIC 算法对信号进行角度解算,在 $[83^\circ, 90^\circ]$ 区间结合查表法,针对改进的 CORDIC 算法对正弦信号角度解算误差进行分析,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的计算误差如图 4 所示。

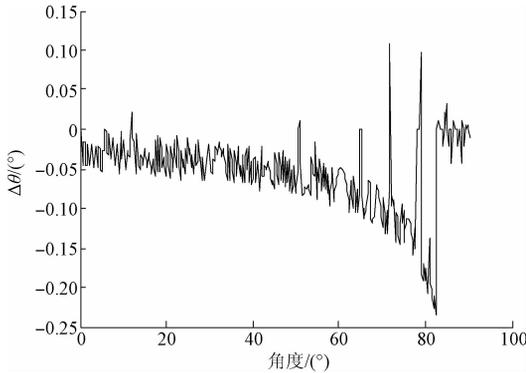


图 4 电路验证角度解算误差

Fig. 4 Circuit verification of the angle solution error

由图 4 可知,在 FPGA 平台实现的双迭代 CORDIC 算法并结合查表法角度解算误差曲线与原理仿真的图 3 相吻合,峰值区间部分误差被有效抑制, $0^\circ \sim 90^\circ$ 的最大误差不超过 $0.25^\circ$ ,表明 CORDIC 算法双迭代结合查表法在 FPGA 平台可实现对信号角度的有效解算。在使用查表法对峰值区间进行角度查表时,查表数需要根据角度解算精度设置,角度解算精度要求越高查表数越大。

## 4 基于角度的相位差补偿

在光栅莫尔信号正交误差补偿过程中,以角度为对象进行信号相位差补偿。相位差补偿环节首先对两路信号相位差进行检测,然后以整周期正弦信号为基准,对余弦信号相位进行补偿。相位差在信号相邻周期,甚至相邻多个周期都变化缓慢,因此通过检测信号前一周期相位差来补偿当前周期相位,实现对正交误差的实时补偿。

### 4.1 相位差检测

为保证两路信号相位差检测精度,以正弦信号在 $45^\circ$ 点对应幅值作为相位差检测点,同时解算两路信号在该点相位值并做差即求得相位差。设置两路信号不同相位差,检测结果如表 1 所示。

表 1 相位差检测数据表

Table 1 The data table of phase difference measurement

设定相位差	检测相位差	检测误差
0	0.019	-0.019
1	0.983	0.017
2	1.966	0.034
3	2.96	0.040
4	3.996	0.004
5	5.018	-0.018
6	6.015	-0.015
7	7.017	-0.017
8	7.960	0.04
9	9.027	-0.027
10	9.977	0.023

由表 1 可知,本文的相位差检测方法误差在 $\pm 0.04^\circ$ 范围,对每周期的信号均进行相位差计算实现对信号相位差的实时动态检测。

### 4.2 整周期相位差补偿

为实现对余弦信号相位差的整周期补偿,需要把解算出的 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围角度值对应到整周期 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围。利用信号极性和幅值特征将整周期信号划分为 4 个象限,各象限角度值 $\theta_1 \sim \theta_4$ 与整周期角度值 $\theta_n$ 的对应公式如表 2 所示。

表 2 各象限角度计算公式表

Table 2 The angle calculation formula table for various quadrants

象限	$\theta_1 \sim \theta_4$ 角度	$\theta_n$ 计算公式
1	$\theta_1$	$\theta_n = \theta_1$
2	$\theta_2$	$\theta_n = 180^\circ - \theta_2$
3	$\theta_3$	$\theta_n = 180^\circ + \theta_3$
4	$\theta_4$	$\theta_n = 360^\circ + \theta_4$

为表示正余弦信号的 4 个象限,根据两路信号的幅值和极性特征(信号递增为“1”,递减为“0”;信号正为“1”,负为“0”),把信号划分为 00 ~ 11 四个象限。当两路信号存在正交误差时,综合两路信号象限关系,以整周期正弦信号角度为基准,标识出超前和滞后情况下两路信号的相位相对关系,如图 5 所示。

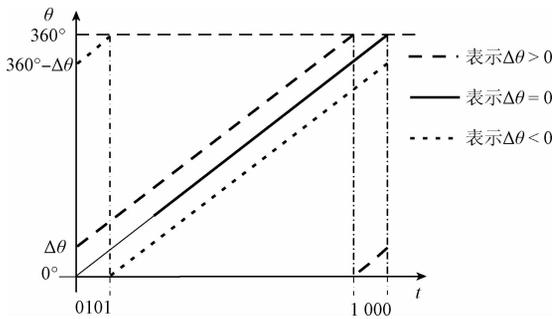


图 5 补偿区间划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of compensation interval partition

由图 5 可知,当两路信号存在相位差时,误差补偿区间在整周期内可分为两段。针对超前和滞后两种情况,对不同区间采用不同的补偿公式。补偿过程通过对纵轴方向角度值加减补偿量,来实现横轴方向的相位差补偿。

### 5 基于旋转模式的信号重构

正交误差补偿过程在完成相位差补偿之后,需要根据角度值重构余弦信号。采用 CORDIC 算法旋转模式对余弦信号进行重构,实现对光栅莫尔信号的正交误差补偿。

#### 5.1 算法原理

在 CORDIC 算法旋转模式下,其算法迭代方程如式(1)所示,判断因子为:

$$D_i = \text{sign}(z_i) \quad (7)$$

由式(1)经过  $n$  次迭代运算得到:

$$\begin{cases} x_n = K_n(x_0 \cos z_0 - y_0 \sin z_0) \\ y_n = K_n(y_0 \cos z_0 + x_0 \sin z_0) \\ z_n = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $K_n$  与式(4)相同。通过初始化设置  $x_0 = 1/K_n$  和  $y_0 = 0, z_0 = \theta$ , 可得初始角度  $z_0$  对应的余弦值  $x_n = \cos(z_0)$ 。

#### 5.2 信号重构

为满足 CORDIC 算法旋转模式对角度输入范围的要求,需要把补偿后  $0^\circ \sim 360^\circ$  的角度值对应到  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围。此时根据正弦信号特征把补偿后整周期余弦信号角度划分为 4 个象限,由表 3 关系式可得各象限对应角度值  $\theta_1' \sim \theta_4'$ 。根据 CORDIC 算法旋转模式计算各象限角度对应的余弦值,并利用信号极性特征将输出的半波信号补偿为全波信号,实现对余弦信号的重构。信号重构过程如图 6 所示。

信号重构过程以 FPGA 为平台实现流水线架构的 CORDIC 算法旋转模式,根据补偿后 4 个象限对应角度值重构余弦信号最终实现正交误差补偿。

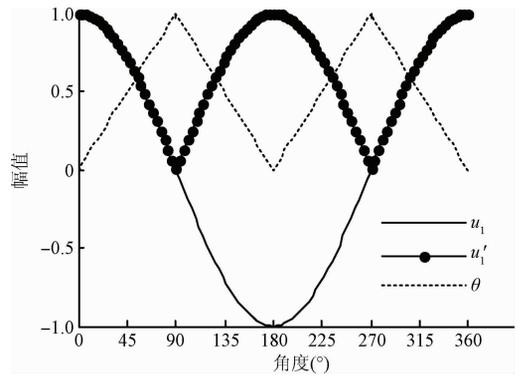


图 6 余弦信号构建示意图

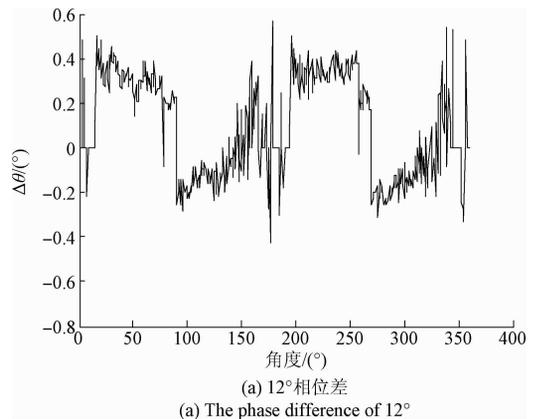
Fig. 6 Schematic diagram of cosine signal reconstruction

## 6 实验及数据分析

对改进算法在不同频率、不同相位差情况下的正交误差补偿效果进行实验验证。选用 RIGOL DG4162 信号发生器产生正弦信号以排除实际信号源所带来的噪声等问题,信号发生器精度为  $\pm 2 \times 10^{-6}$ ; ADC 模块使用 50 MHz、12 bit 的 AD9226 芯片进行信号采集;FPGA 平台选用 Cyclone EP4CE115F22N7 芯片。

在 FPGA 电路平台实现正交误差补偿的 3 个环节,以信号发生器输出一定相位差的非正交正弦信号,通过逐点对比补偿后信号与标准信号的相位差来验证正交误差补偿效果。为满足 500 ~ 1 000 细分对信号正交性要求,选取 40 ~ 120 kHz 范围信号进行正交误差补偿。实验对在 100 kHz,存在  $4^\circ、8^\circ、12^\circ$  相位差;在 120、80、40 kHz,存在  $12^\circ$  相位差;以及 40 ~ 120 kHz,补偿后信号正交误差的均方差进行数据分析,各工况下的数据结果,如图 7 ~ 9 所示。

对图 7 中(a) ~ (c)误差分布情况进行分析,可得补偿后误差分布情况,如表 3 所示。



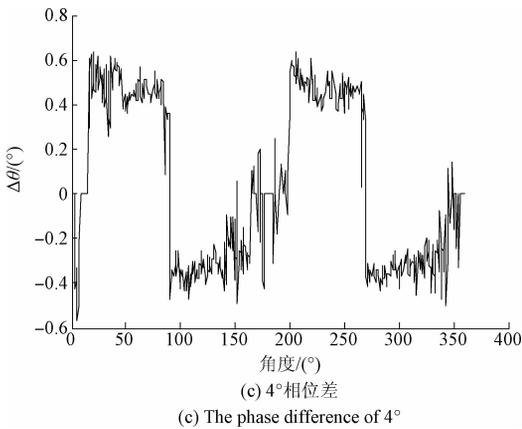
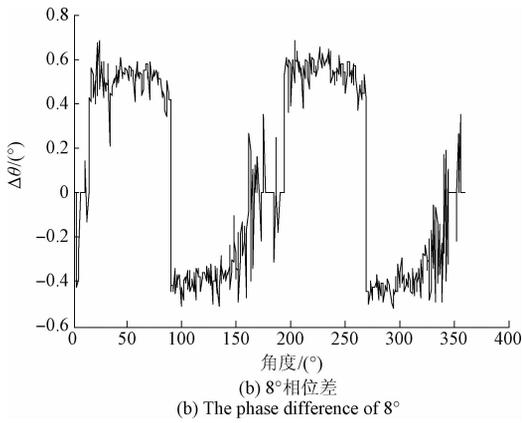


图7 频率100 kHz信号误差补偿效果图

Fig. 7 Effect diagram of the error compensation at frequency of 100 kHz

表3 频率100 kHz信号正交补偿误差数据表

Table 3 Data table of the quadrature compensation error at frequency of 100 kHz

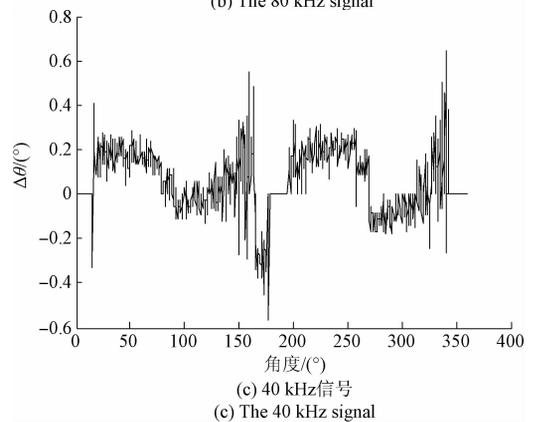
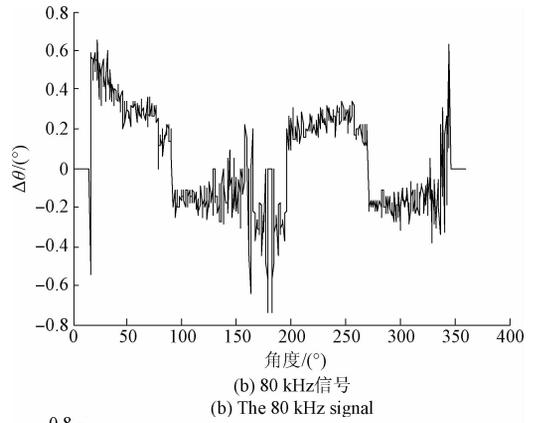
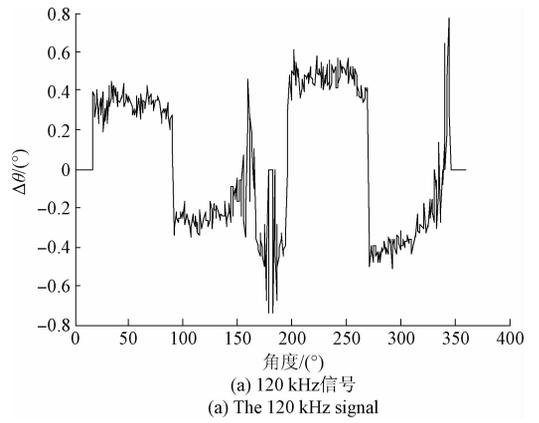
相位差	平均误差	最大误差	均方差
12	0.096	0.569	0.224
8	-0.067	-0.685	0.416
4	0.046	-0.639	0.371

(°)

由表3可知,该算法对信号在100 kHz频率下不同相位差进行补偿,补偿后平均误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内;最大误差在 $\pm 1^\circ$ 以内;均方差在 $0.5^\circ$ 以内。结果表明改进算法可实现对同一频率下不同相位差的有效补偿,且补偿效果稳定与信号相位差无关。

为验证在信号不同频率下的补偿效果,设计对120、80、40 kHz频率下存在 $12^\circ$ 相位差的信号进行补偿,补偿效果如图8所示。

对图8中(a)~(c)误差分布情况进行分析,可得补偿后误差分布情况,如表4所示。

图8 不同频率下相位差 $12^\circ$ 误差补偿效果图Fig. 8 The compensation effect diagram of the signal with phase difference of  $12^\circ$  at different frequencies表4 相位差 $12^\circ$ 正交补偿误差数据表Table 4 Data table of the quadrature compensation error for the signal with phase difference of  $12^\circ$  at different frequencies

信号频率/kHz	平均误差/(°)	最大误差/(°)	均方差/(°)
120	0.036	-0.742	0.347
80	0.030	-0.742	0.247
40	0.062	0.648	0.141

由表4可知,该算法对信号在 $12^\circ$ 相位差下不同频率进行补偿,补偿后平均误差在 $0.1^\circ$ 以内;最大误差在 $\pm 1^\circ$ 以内不受信号频率影响,均方差在 $0.5^\circ$ 以内。

为验证该方法在不同频率下对正交误差补偿的稳定性,实验设置对频率在 $40 \sim 120$  kHz,相位差在 $12^\circ$ 的两路信号进行正交误差补偿,补偿后两路信号正交误差的均方差如图9所示。

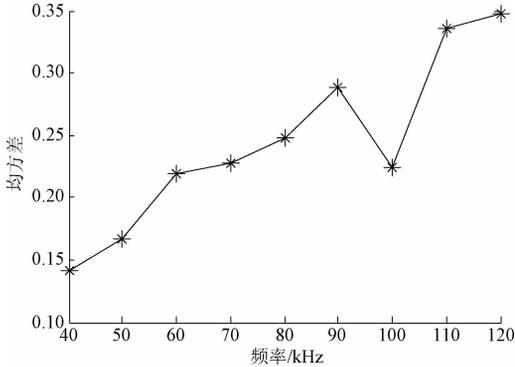


图9 补偿后正交误差的均方差值

Fig.9 The mean square deviation of the quadrature error after compensation

由图9可知均方差值随信号频率增大呈现增大趋势。结果表明算法可实现对信号在不同频率下相位差的有效补偿,且信号频率越低补偿越稳定。

## 7 结 论

针对光栅读数头输出信号存在正交误差的问题,提出一种基于CORDIC算法改进的数字式正交误差实时补偿方法。在FPGA平台实现正交误差补偿过程的3个环节,验证了该算法对相位差的检测和补偿效果。实验结果表明,算法对相位差的检测误差在 $\pm 0.04^\circ$ 以内;算法在信号 $100$  kHz频率下不同相位差以及在 $12^\circ$ 相位差不同频率下的补偿效果为,最大误差在 $\pm 1^\circ$ 以内、平均误差在 $0.1^\circ$ 以内、均方差在 $0.5^\circ$ 以内。分析数据可知补偿效果不受信号相位差变化影响,且信号频率越低补偿效果越稳定。表明该补偿方法适应性强、补偿效果好、运行效率高、且不增加外部电路,对于光栅测量系统具有实际应用价值。

## 参考文献

[1] 刘小康,陈自然,王先全,等. 空间精密位移信号软细分方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 33(3): 540-545.  
LIU X K, CHEN Z R, WANG X Q, et al. Soft interpolating method of precision spatial displacement signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2016, 33(3): 540-545.

- [2] 冯济琴,刘浩,陈自然,等. 基于域变换和灰色预测的光栅信号软细分方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 263-269.  
FENG J Q, LIU H, CHEN Z R, et al. Soft subdivision method for the grating signal using grey prediction model based on time-space domain transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 263-269.
- [3] 赵长海,万秋华,梁立辉,等. 小型高精度航天级光电编码器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1224-1230.  
ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(8): 1224-1230.
- [4] 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, 24(7): 653-657.  
SU D F, XU ZH 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 Instrumentation, 2013, 27(7): 653-657.
- [5] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.  
WANG X J. Error and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[C]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 379-386.
- [6] 罗刚,熊文卓. 光电轴角编码器光电信号正交偏差的测量和补偿方法[J]. 传感技术学报, 2008, 21(11): 1853-1857.  
LUO G, XIONG W ZH. A method to measure and offset quartering deviation of encoder[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(11): 1853-1857.
- [7] 吕恒毅,刘杨,王延东,等. 莫尔条纹正交偏差的智能补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2075-2080.  
LV H Y, LIU Y, WANG Y D, et al. Intelligent compensation method of Moire fringe orthogonality deviation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2075-2080.
- [8] 吕孟军,郭琪,吕印晓,等. 莫尔条纹信号相位误差补偿[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1694-1700.  
LV M J, GUO Q, LV Y X, et al. Signal phase error compensation of Moiré fringe[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1694-1700.
- [9] WARNER M, KRABBENDAM V, SCHUMACHER G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoders [C]. Proceeding of SPIE-The International

- Society for Optical Engineering, 2008, 7012: 70123N-70123N-8.
- [10] 徐从裕. 单变量递推法莫尔条纹信号误差分离算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1708-1713.  
XU C Y. Separation algorithm for Moiré fringe signal errors based on single-variable recursive method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1708-1713.
- [11] 冯英翘, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.  
FENG Y Q, WAN Q H. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1374-1379.
- [12] SONY. Interpolation device for scale arrangement, Japan, 93118447. 7 [P]. 1996.
- [13] 高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.  
GAO X, WAN Q H, ZHAO CH H, et al. Real-time compensation of orthogonality deviation for Moire fringe photoelectric signal [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 213-219.
- [14] MAHER P K, VALLS J, JUANG T B, et al. 50 Years of CORDIC: Algorithms, architectures, and applications [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2009, 56(9): 1893-1907.
- [15] JUANG T B, HSIAO S F, TSAI M Y. Para-CORDIC: Parallel CORDIC rotation algorithm [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2004, 51(8): 1515-1524.
- [16] MAZENC C, MERRHEIM X, MULLER J M. Computing functions arccos and arcsin using CORDIC [J]. IEEE Transaction on Computers, 1993, 42(1): 188-122.
- [17] 余文新, 邹自强, 胡小唐. 光栅纳米测量中实时动态误差修正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(增刊1): 63-64.  
YU W X, ZOU Z Q, HU X T. Research on dynamic realtime error correction method in grating-based nanometrology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(Suppl. 1): 63-64.
- [18] ANDRAKA R. A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computer [M]. New York: ACM, 1998: 191-200.
- [19] WANG S, PIURI V, WARTZLANDER E E. Hybrid CORDIC algorithms [J]. IEEE Transactions on Computers, 1997, 46(11): 1202-1207.
- [20] 王晓娜, 钟玉龙, 朱维斌, 等. 光栅数字细分的CORDIC算法总量化误差分析[J]. 计量学报, 2016, 37(1): 10-14.  
WANG X N, ZHONG Y L, ZHU W B, et al. Analysis of the overall quantization error for CORDIC algorithm in grating digital subdivision [J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(1): 10-14.

## 作者简介



E-mail: itmt\_paper@126.com

**Ye Shuliang** (Corresponding author) received his Ph. D. Degree in 2005 from Harbin Institute of Technology. He is now a professor in precision instrument specialty and the head of Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University. His main research areas are chemical product safety testing technology and instrument, nondestructive testing technology and instrument, grating signal processing, and gear precision vision metrology.



**Zhang Qian** received his B. Sc. degree in 2014 from Tianjin University of Technology and Education. He is a master student in China Jiliang University now. His research direction is grating signal processing and error analysis in precision measurement.



**Zhu Weibin** received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2007. Currently, he is an associate professor at China Jiliang University. His research is focused on grating signal processing and high-precision vision metrology.

**叶树亮** (通讯作者), 2005年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为中国计量大学精密仪器专业教授、工业与商贸计量技术研究所所长, 主要研究方向为化工安全及工艺安全测试技术与仪器、零部件无损检测设备与仪器、光栅信号处理、齿轮精密测量。

**张潜**, 2014年于天津职业技术师范大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士生, 主要研究方向为精密测量中光栅信号处理与误差分析。

E-mail: 13920693607@163.com

**朱维斌**, 2007年于浙江大学获得博士学位, 现为中国计量大学副教授, 主要研究方向为光栅信号处理和高精度视觉检测。

E-mail: zhuweibin@cjlu.edu.cn