

# 基于 LabVIEW 的多重相关法测量相位差研究

叶敦范, 李 星

(中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**针对全硬件的传统相位测量方法中电路本身的温度漂移、干扰信号及噪声等使测量结果产生误差的问题,结合 LabVIEW 功能强大、程序开发周期短、图形化编程简单直观以及相关法抗干扰能力强的特点,在虚拟仪器 LabVIEW 环境下,提出基于快速傅里叶变换(FFT)计算相关函数的多重相关法测量两路信噪比极低的同频正弦波相位差的设计思想和实现方法。通过实测证明:与传统的硬件电路相位差测量方法相比,基于 LabVIEW 的多重相关法测量相位差具有算法简单、测量精度高、设计灵活等特点,非常适合于微弱正弦信号的参数估计。

**关键词:**LabVIEW 软件;相位差;快速傅里叶变换;多重相关法

**中图分类号:**TM930.115;TM933.3+12;TN911.7;TP301.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5124(2014)06-0095-04

## Research of multiple correlation method to measure phase difference based on LabVIEW

YE Dun-fan, LI Xing

(Mechanical and Electronic Information Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of the circuit itself drift, interference signal and noise and so on, which will produce errors on the full hardware-based conventional phase measurement method, and combined with the characteristics of the powerful and flexible function, the short programming development cycle and the simple and intuitive graphical programming of LabVIEW and strong anti-interference ability of correlation method, the authors proposed the design thought and implementation method to measure phase difference of two same frequency sine waves with very low signal to noise ratio in the virtual instrument environment, which is the multiple correlation measurement method based on fast Fourier transform(FFT) to calculate the correlation function. The experimental data show that compared with the traditional hardware circuit of phase difference measurement method, the multiple correlation method to measure phase difference based on LabVIEW has the characteristic of simple algorithm, high accuracy, and flexible design and so on, and it can be very suitable for parameter estimation of weak sinusoidal signal.

**Keywords:** LabVIEW; phase difference; FFT; multiple correlation method

## 0 引 言

相位差的测量在电力电子、通信、航空航天技术和地质勘探中有广泛的应用。基于全硬件的传统相位测量方法有相乘法、二极管鉴相法、取样混频

收稿日期:2014-02-07;收到修改稿日期:2014-04-04

作者简介:叶敦范(1956-)女,湖北武汉市人,教授,硕士,研究方向为无线传感器网络、检测技术与方法和数字系统设计。

法、虚实分量检测法、李沙育测量法、相位-时间转换法、过零法和电压测量法等<sup>[1]</sup>,这些方法在操作上虽然简单,但由于电路本身的温漂、噪声和干扰信号的影响以及人工观测的误差,会使测量精度降低。而在现代测试技术领域,目前国外提出了许多提高相位测量准确度的方法,如利用专用数字处理芯片,结合正余弦表格及傅里叶变换方法来计算相位差以及

采用新器件和新设计方法提高相位测量精度、拓宽工作频率范围等<sup>[2-3]</sup>,但这些方法对器件的选取要求高,且适用的频率范围非常窄,同时噪声的干扰会使测量结果不准确。

本文结合 LabVIEW 功能强大、程序开发周期短、图形化编程简单直观的特点以及相关检测法<sup>[4-5]</sup>能极好地抑制谐波、直流和噪声,提出了基于快速傅里叶变换(FFT)计算相关函数的多重相关法测量两路信噪比极低的同频正弦波相位差的设计思想和实现方法。

### 1 多重相关法相位差测量的数学分析

基于多重相关法<sup>[6-7]</sup>的相位差测量原理框图如图1所示。

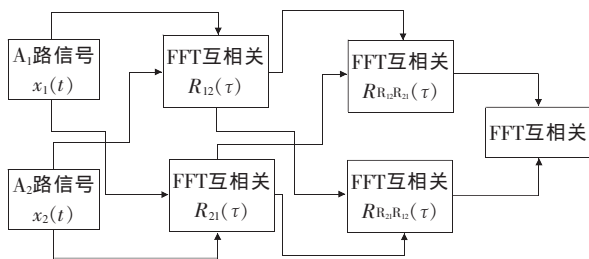


图1 三重互相关运算原理框图

设含有随机噪声的两路信号的表达式分别为

$$X_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + N_1(t) \quad (1)$$

$$X_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + N_2(t) \quad (2)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\omega t + \varphi_1$ 、 $\omega t + \varphi_2$ ——两路被测信号的幅度和相位；

$\omega$ ——信号频率；

$N_1(t)$ 、 $N_2(t)$ ——叠加到两路信号上的高斯白噪声或量化噪声信号。

将这两路信号进行第一次互相关运算,得到以下两式：

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t)x_2(t-\tau) dt = \frac{A_1 A_2}{2} \cos(\omega\tau + \Delta\Phi) + n(t) \quad (3)$$

和

$$R_{21}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_2(t)x_1(t-\tau) dt = \frac{A_1 A_2}{2} \cos(\omega\tau + \Delta\Phi) + n'(t) \quad (4)$$

式(4)中  $\Delta\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$ ,且  $n(t)$ 和  $n'(t)$ 远远小于  $N_1(t)$ 和  $N_2(t)$ 。

由式(3)和式(4)可以看出,第一次互相关运算

后,两路同频正弦信号的相位差信息被保留了下来。如果把  $R_{12}(\tau)$ 和  $R_{21}(\tau)$ 看成新的信号再进行第二次互相关运算,则可以得到两次互相关运算后的结果：

$$R_{R_{12},R_{21}}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T R_{12}(\tau)R_{21}(t-\tau) dt = \frac{A_1^2 A_2^2}{2} \cos(\omega\tau + 2\Delta\Phi) + n''(t) \quad (5)$$

和

$$R_{R_{21},R_{12}}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T R_{21}(\tau)R_{12}(t-\tau) dt = \frac{A_1^2 A_2^2}{8} \cos(\omega\tau - 2\Delta\Phi) + n'''(t) \quad (6)$$

式中  $n''(t)$ 和  $n'''(t)$ 远远小于  $n(t)$ 和  $n'(t)$ ,且

$$\Delta\Phi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\arccos\left(\frac{128R_{R_{12},R_{21}}R_{R_{21},R_{12}}(0)}{A_1^4 A_2^4}\right)}{4} \quad (7)$$

若两路信号的幅度  $A_1$ 和  $A_2$ 未知,则可通过  $R_{R_{12},R_{21}}(\tau)$ 零时刻的自相关运算得到,过程如下：

$$R_{R_{12},R_{21}}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T [R_{R_{12},R_{21}}(0)] \times [R_{R_{12},R_{21}}(0)] dt$$

令式(5)中  $\tau=0$ ,代入上式简化得：

$$R_{R_{12},R_{21}}(0) = \frac{A_1^4 A_2^4}{128} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),消掉两路信号的未知幅度  $A_1$ 和  $A_2$ ,得到：

$$\Delta\Phi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\arccos\left(\frac{128R_{R_{12},R_{21}}R_{R_{21},R_{12}}(0)}{R_{R_{12},R_{21}}(0)}\right)}{4} \quad (9)$$

由以上理论推导可知,使用多重相关法测量相位差可以使噪声得到极大的抑制,被测信号每经过一级互相关运算,信噪比便会提高一次,但是这样会导致计算量增加,同时计算周期增大。

### 2 基于 LabVIEW 的多重相关法相位差测量程序设计

虽然 LabVIEW 自带了自相关和互相关函数节点,但是这两个函数在对周期信号做相关运算时有一定的误差<sup>[8]</sup>,得到的结果并不是相关函数的无偏估计。图2是对 LabVIEW 中自带的互相关函数进行测试的波形图,其中,两路信号的频率均为 10 Hz,幅度分别为 2.1 V,初相分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ ,两路信号都叠加了 0.1 V 的高斯白噪声。

由测试结果图可以看出,利用 LabVIEW 自带的自相关和互相关函数节点得到的波形都是逐渐衰减的正弦曲线,但理论上进行相关计算后应为等幅振荡的标准余弦信号。导致这种情况的原因是:自相关函数丢失了自身的初相信息,而互相关函数保留了

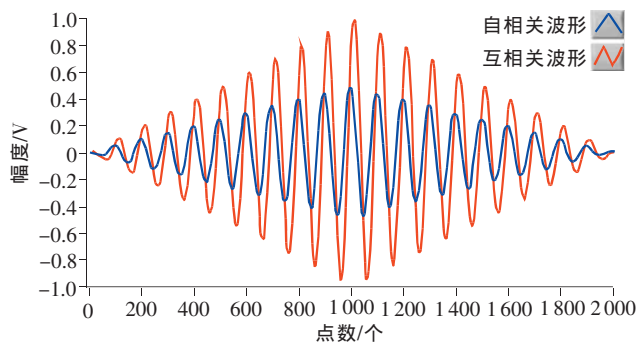


图 2 LabVIEW 中自带相关函数测试波形图

两路信号之间的相位差信息。由式(8)和式(9)可知,幅值变化( $\tau=0$ 时,信号功率的大小)会对相位差的准确测量产生不可忽略的影响。因此,必须对 LabVIEW 中自带的相关函数做相应的修正。

虽然该误差可以通过 LabVIEW 高级信号处理工具包中的 TSA Auto-Correlation Function VI 函数进行修正,但是其在实际工程应用中需要另外单独付费购买才能使用,而本文所述的 FFT 多重相关法既不需要额外的成本又可以实现相关函数的无偏估计。因此,基于 LabVIEW 的 FFT 多重相关法测量相位差具有一定的实际意义。

本文根据数字信号处理的相关知识<sup>[9]</sup>,使用快速傅里叶变换(FFT)求取两路信噪比极低的正弦波信号的互相关函数和它们各自的自相关函数<sup>[10]</sup>,步骤如下:

设  $A_1, A_2$  两路信号经过 AD 采样后得到有限长序列  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$ , 长度分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。

1) 当周期  $N \geq N_1 + N_2 - 1$ , 且  $N = 2^m$  时, 可以用两个有限长序列  $x_1(n), x_2(n)$  的圆周相关来替代其线性相关, 且不产生混淆, 这时便可以使用 FFT 了。在  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  的右端补零, 使序列长度为  $N$ , 可以得到:

$$x_1(n) = \begin{cases} x_1(n) & n=0, 1, \dots, N_1-1 \\ 0 & n=N_1, N_1+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

$$x_2(n) = \begin{cases} x_2(n) & n=0, 1, \dots, N_2-1 \\ 0 & n=N_2, N_2+1, \dots, N-1 \end{cases}$$

2) 分别对采集到的两路信号  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  进行 FFT 计算, 得到  $X_1(k), X_2(k) (k=0, 1, \dots, N-1)$ 。

3) 将  $A_1$  路信号进行 FFT 计算得到复数序列  $X_1(k)$  并求共轭, 再与  $A_2$  路信号进行 FFT 计算, 得到的复数序列  $X_2(k)$  相乘, 得到:

$$R(k) = X_1^*(k) X_2(k)$$

4) 最后对  $R(k)$  做逆傅里叶变换 (IFFT), 即得到两路信号的互相关序列  $r(n) (n=0, 1, \dots, N-1)$ 。

值得注意的是, LabVIEW 中自带的 FFT 函数在进行 FFT 运算时, 若点数不是 2 的整数次幂, 该函数将自动调用混合基算法来进行 FFT 计算, 即运算点数不需要是 2 的整数次幂。

由前面介绍的利用 FFT 来求取相关函数的方法, 可编写出 FFT 多重相关法测量相位差的程序框图如图 3 所示。

图中  $A_1, A_2$  为两路信号都是带有随机噪声的正弦信号, 在将两路信号进行 3 次 FFT 互相关运算的同时, 对  $A_1$  路信号进行 3 次 FFT 自相关运算, 最终通过一些简单的数学处理算出两路信号的相位差。

### 3 测量结果分析

#### 3.1 NI ELVIS II+ 数据采集卡介绍

本研究中使用的硬件是 NI ELVIS II+ 数据采集卡, 其部分功能如下: 16 个模拟输入单端通道 (8 个差分通道); ADC 分辨率为 16 位, 最大采样率为 1.25 M/s; 模拟电压输入范围  $\pm 10 V$ ; 2 个模拟输出通道; DAC 分辨率为 16 位, 输出电压范围  $\pm 10 V$ 。

#### 3.2 实验波形分析

程序中, 设置  $A_1, A_2$  两路正弦波信号的幅度为 1V, 频率为 10 Hz, 且均叠加有标准差为 1V 的高斯白噪声, 并通过 NI ELVIS II+ 数据采集卡的两个模拟输出通道输出配置好的正弦信号, 将两路正弦信号分别接到采集卡的两路模拟输入端。将  $A_1$  路信号的初相

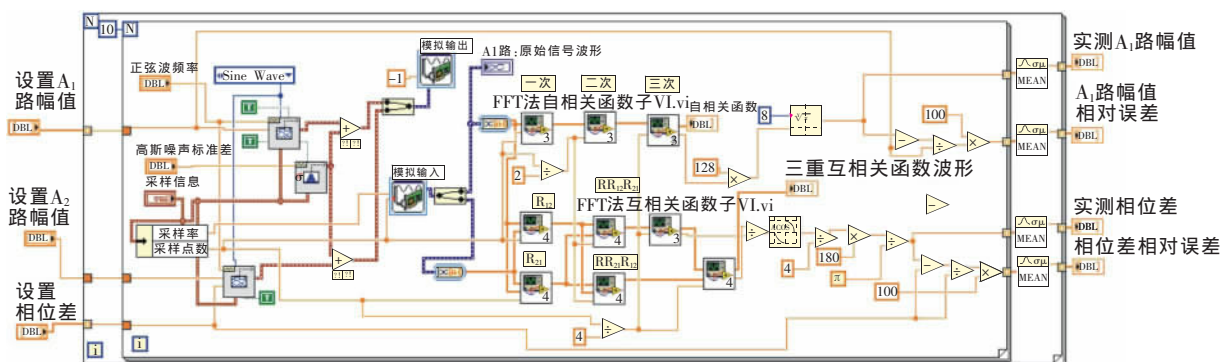


图 3 FFT 多重相关法相位差测量程序框图

固定为0,运行后得到9次不同相位差的测量值,并与设置的相位差理论值比较,得出相对误差。图4为FFT多重相关法测量相位差的前面板(图中数据为已经减去由于两路模拟信号的采集卡的非同步采样导致的相位误差)。

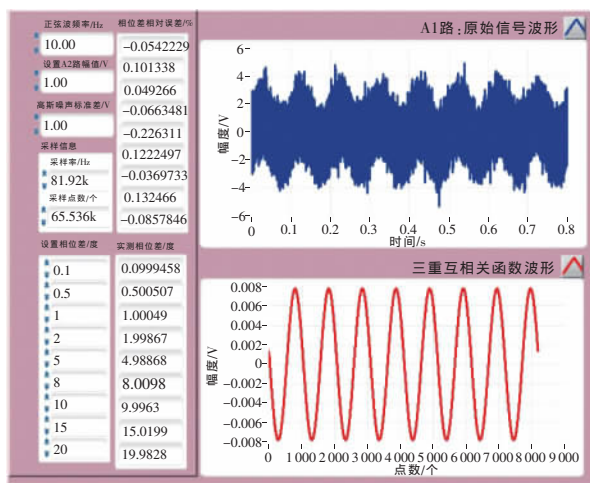


图4 FFT多重相关法测量相位差的前面板

A<sub>1</sub>路原始信号的信噪比极低,为0 dB,从图中可以看出,幅度为1 V,频率为10 Hz的正弦波信号完全被方差为1 V的高斯白噪声淹没了,因此用普通的FFT来测量相位差误差很大。而经过三重相关后,原始信号中正弦波的频率、幅值和相位信息都很好的表现出来了。

### 3.3 实验数据分析

如图4所示,通过设置采样信息、理论相位差和正弦波频率等信息,测出实际的相位差,并计算出相对误差。从实验数据可以看出,基于LabVIEW的多重相关法测量得到的相位差相对误差在0.3%以内,在误差允许的范围内基本上是可以忽略的。该方法对于不同信噪比采用不同级数的互相关算法,适应性强,不需改变硬件结构,同时,不需要引入参考信号,不需要事先知道信号的频率<sup>[11]</sup>,而且可以求出两路正弦信号的幅度之比。故已知一路信号的幅度和初相,就可以确定另一路信号的幅度和初相,但是它不能用于两路方波信号的测量。

## 4 结束语

基于LabVIEW的FFT多重相关法测量相位差,充分利用了计算机的强大功能,同时,发挥了LabVIEW软件图形化编程方便、简洁、效率高的优势,实现了两路信噪比极低的正弦信号相位差的测量,测量精度很高、算法简单,而且对AD量化位数要求不高,大大的降低了系统成本,尤其适合微弱信号相位差的高精度估计,具有一定的工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 杜保强,左艳迪,王延峰,等.基于群相位量子化处理的新型高分辨率相位差测量方法[J].宇航学报,2013,34(7):993-1000.
- [2] Yang J R. Measurement of amplitude and phase differences between two RF signals by using signal power detection[J]. IEEE Microw Wireless Comp Lett, 2014,24(3):206-208.
- [3] Hasan A, Chen Z C M, Griffin J D. The phase difference method for transmit diversity in monostatic RFID systems [J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012,8(14):1-2.
- [4] 李建立,刘华君.相关技术在弱信号检测中的应用[J].测试技术学报,2001,6(2):20-22.
- [5] 张志刚,秦树人,邱建伟.基于虚拟仪器技术的数字相位计[J].中国测试技术,2006,32(1):38-41.
- [6] 郑胜峰,楼梅燕,范文晶,等.一种基于多重相关法的相位差测量方法[J].宇航测试技术,2008,28(5):57-60.
- [7] 李一兵,岳欣,杨莘元.多重自相关函数在微弱正弦信号检测中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2004(4):525-528.
- [8] 乔晓艳,贾莲凤.基于虚拟仪器的相位差软件测量算法研究[J].计算机测量与控制,2003,11(6):401-403.
- [9] 胡广书.数字信号处理理论、算法与实现[M].北京:清华大学出版社,2003:423-425.
- [10] 张毅刚,付平,王丽.采用数字相关法测量相位差[J].计量学报,2000,21(3):216-221.
- [11] 刘越,刘富,戴一松.参考信号频率自调整的数字相敏检波器算法的研究[J].计量学报,1998,19(4):312-316.