

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413303

基于量子电压和数字采样技术的信号 初始相位抖动补偿方法*

常周¹, 石照民², 王磊², 陆祖良², 许素安¹

(1. 中国计量大学机电工程学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院电磁计量科学研究所 北京 100029)

摘要: 基于可编程约瑟夫森量子电压标准和差分采样技术进行交流电压精密测量时, 由于交流电压源锁相不稳定以及时钟不完全同步导致正弦信号在多周期平均处理后产生幅值误差的问题。提出了一种基于蒙特卡洛法的误差定量评估方法, 对初始相位在 $\Delta\varphi$ 范围内随机抖动引入的幅值误差分布进行定量评估。结果表明幅值误差主要由相位抖动范围决定, 受平均周期数的影响较小。当抖动范围为 5 mrad 时, 幅值误差可达 10^{-6} 量级。进一步提出一种基于相位抖动范围的幅值误差补偿方法, 通过计算补偿系数并进行修正, 有效降低相位抖动引入的幅值误差。在抖动范围确定的情况下, 补偿效果随平均周期数的增加而提升。设计验证实验对补偿方法进行验证, 抖动范围为 50 mrad, 经过多周期平均处理后幅值误差超过 1×10^{-4} V/V, 补偿后幅值测量误差降低至 10^{-6} 量级, 验证了方法的有效性。

关键词: 相位抖动; 幅值误差补偿; 可编程约瑟夫森电压标准; 蒙特卡洛法

中图分类号: TB971 TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Signal initial phase jitter compensation method based on quantum voltage and digital sampling technology

Chang Zhou¹, Shi Zhaomin², Wang Lei², Lu Zuliang², Xu Suan¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Electromagnetic Metrology Science, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: When the AC voltage is measured precisely based on programmable Josephson voltage standard and differential sampling technology, the amplitude error of sinusoidal signal after multi-period averaging is caused by the unstable phase lock of AC voltage source and incomplete clock synchronization. This paper proposes an error quantitatively evaluation method based on the Monte Carlo method to quantitatively evaluate the amplitude error distribution caused by random jitter of the initial phase within the range of $\Delta\varphi$. The findings reveal that the amplitude error primarily depends on the range of phase jitter and is minimally influenced by the number of averaging cycles. For a jitter range of 5 mrad, the amplitude error can reach a magnitude of 10^{-6} . To address this, a compensation method based on the phase jitter range is proposed. By calculating the compensation coefficient and applying the correction, the amplitude error caused by phase jitter is significantly reduced. The compensation effect improves with an increasing number of averaging cycles when the jitter range is fixed. A verification experiment was conducted to validate the proposed compensation method. For a jitter range of 50 mrad, the amplitude error exceeded 1×10^{-4} V/V after multi-period averaging but was reduced to a magnitude of 10^{-6} magnitude. These results confirm the effectiveness of the proposed method.

Keywords: phase jitter; amplitude error compensation; programmable Josephson voltage standard; Monte Carlo method

0 引言

1990年1月1日国际计量组织在世界范围内正式启用约瑟夫森电压基准用于电压量值的复现与传递^[1],开启了电学计量的量子化时代^[2-4]。许多国家计量机构广泛开展可编程约瑟夫森电压标准(programmable Josephson voltage standard, PJVS)相关研究^[5-7],利用PJVS为电压、阻抗以及功率等电学参量提供可靠的量子化溯源依据^[8-13]。

近年来,交流约瑟夫森电压标准获得了迅速发展,许多研究致力于实现约瑟夫森电压在交流领域的量值传递。为了解决传统数模转换器和可编程量子电压标准生成的阶梯波信号过渡过程以及模数转换器测量时引入的吉布斯现象导致的测量误差,提出了片段采样的概念^[14-15]。基于这一概念,开展基于PJVS的谐波电压精密测量方法研究,研发了一种加权傅里叶变换的周期谐波信号计算方法,初步实现了谐波电压溯源至PJVS^[16]。此外,PJVS还应用于交流功率精密测量领域,结合交流功率差分测量系统建立了基于PJVS的交流功率计量标准装置^[17];为实现基于一路交流量子电压的功率计量,提出了交流量子电压分段驱动方案^[18]。这些研究为实现基于PJVS的交流电压精密测量奠定了基础^[19-21]。

差分采样方法在基于量子技术的交流电压测量中得到了广泛应用。该方法通过采样系统对被测正弦信号和PJVS产生的阶梯波信号的差值进行采样,测量幅值较小的差值信号,结合采样结果和已知的量子电压台值,可以重构被测的正弦信号,并通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)计算,可以获得正弦信号的幅值^[22-24]。

在正弦信号与阶梯波信号差分采样过程中,为消除采样通道间的固有差异,需要进行通道换相测量,并将两次结果取平均。此外,为了降低系统随机噪声对测量精度的影响,采用多次独立采样取平均的方法^[25-28]。然而,特定校准器的相位和频率锁定功能以及校准器实际振幅的低频调制可能产生相位噪声,并且当采样时钟与交流电压源时钟不完全一致时,频率差异会引入锁相不稳定的问题,从而导致各周期初始相位不一致。由于每次测量信号的初始相位无法完全一致,导致将采样结果取平均后进行幅值计算时存在幅值误差。本文提出了一种基于蒙特卡洛法的相位抖动引起的幅值误差定量评估方法,并进一步进行理论推导,针对该误差提出了一种补偿方法,推导出相应的补偿公式,并通过实验验证了该补偿方法的可行性。

1 基于蒙特卡洛法的幅值误差定量评估

当利用差分采样系统对商用交流电压源产生的正弦信号与PJVS输出的阶梯波信号进行测量时,交流电压源由于锁相不稳定,导致采样测得的正弦信号初始相位会出现微小抖动,从而导致阶梯波信号不同周期的相同台阶与正弦信号的交叉点位存在变化,如图1所示。理想状态下正弦信号交于台阶中点,当相位抖动存在时,交点会向左右偏移。

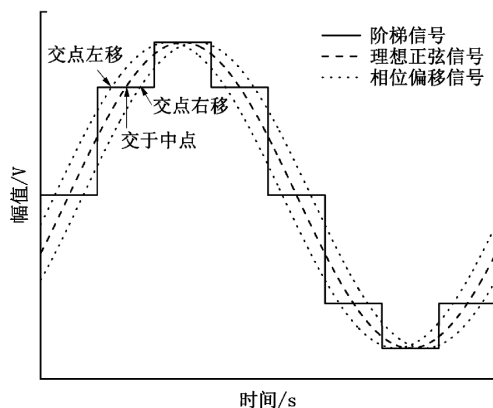


图1 阶梯波信号与正弦信号交叉点位变化

Fig. 1 Schematic diagram of step wave and sine wave crossing point change

在进行正弦信号与阶梯波信号的差分采样实验中,会将多周期采样值进行平均,以减小随机噪声对实验的影响。为了研究上述交叉点位的变化对多周期正弦信号平均后的幅值测量结果的影响,提出一种基于蒙特卡洛的正弦信号初始相位抖动引入的幅值误差定量评估方法,计算不同初始相位抖动范围下的幅值误差分布。

首先构建一个带有初始相位抖动的单位正弦信号:

$$x(t) = \sin(2\pi f_0 t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: f_0 为正弦信号频率; φ_i 为随机抖动的初始相位,在 $[0, \Delta\varphi]$ 均匀分布。每周期采样点数 M 为 2 000, 设定 $\Delta\varphi$ 后,对正弦信号进行 500 次采样,获取 500 次随机相位的正弦序列。然后,对这 500 次序列取平均,得到平均序列 $\bar{x}$ 。通过 DFT 计算平均序列 $\bar{x}$ 的幅值,并与理论幅值进行比较,以获得幅值误差。利用蒙特卡洛方法重复上述实验步骤,通过 100 000 次仿真实验,获取在特定 $\Delta\varphi$ 下幅值误差的分布结果。

当 $\Delta\varphi$ 取值分别为 1 和 5 mrad 时,通过蒙特卡洛仿真实验可以得到 100 000 次仿真的幅值误差分布(如图 2 所示)以及相关数据(如表 1 所示)。其中 μ 为 100 000 次仿真的幅值误差均值, σ 为 100 000 次仿真的幅值误差的标准差。

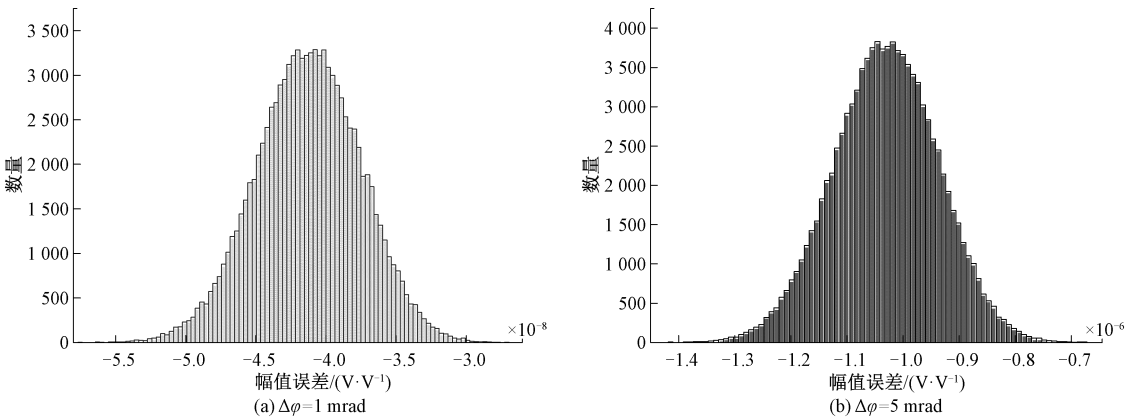


图 2 $\Delta\varphi$ 不同取值幅值误差

Fig. 2 Histogram of amplitude error at different values of $\Delta\varphi$

表 1 不同 $\Delta\varphi$ 取值下幅值误差仿真结果

Table 1 Simulation results of amplitude error at different values of $\Delta\varphi$

$\Delta\varphi/\text{mrad}$	$\mu/(\text{V}\cdot\text{V}^{-1})$	$\sigma/(\text{V}\cdot\text{V}^{-1})$
1	-4.1×10^{-8}	3.8×10^{-9}
5	-1.0×10^{-6}	9.4×10^{-8}

进一步通过蒙特卡洛实验评估不同相位抖动范围的 $\Delta\varphi$ 取值对幅值误差的影响,得到不同抖动范围大小对幅值误差的影响曲线,如图 3 所示。从图 3 可知,随着抖动范围的增加,正弦信号幅值计算的误差也会相应增大。当抖动范围达到 5 mrad 时,平均幅值误差绝对值约为 1.0×10^{-6} V/V。特别是在高频测量中,相位抖动对幅值的影响更加显著,因此有必要建立模型来补偿这种抖动误差。

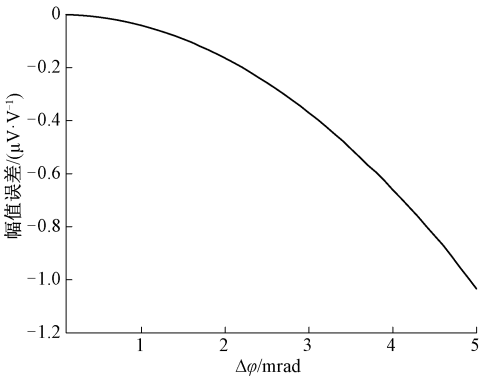


图 3 不同抖动范围大小对幅值误差的影响

Fig. 3 Influence of different jitter ranges on amplitude errors

2 相位抖动引入的幅值误差补偿

在实际采样数据处理过程中,多周期正弦信号初

始相位抖动可以等效视为单周期信号各采样点的抖动,因此在基于蒙特卡洛法的幅值误差定量评估中,确定好相位抖动范围 $\Delta\varphi$ 后,对正弦信号采样 500 次,获取 500 次随机初始相位的正弦序列,然后对 500 次序列求平均获得平均序列 $\bar{x}$,该操作等同于在同一正弦信号上,每个采样点在 T_i 范围内 500 个随机值取平均,其中 T_i 为 $\Delta\varphi$ 所对应的时间范围,最终得到平均序列。等效示意图如图 4 所示,其中点划线为存在相位抖动的正弦信号,实线为无相位抖动的理想正弦信号,虚线为相位抖动正弦信号多周期平均后的信号, T_i 为 $\Delta\varphi$ 所对应的时间范围, T_a 为 T_i 范围的起始时间点。由图 4 可知,多周期平均后的正弦波幅值与理想正弦波幅值存在误差。

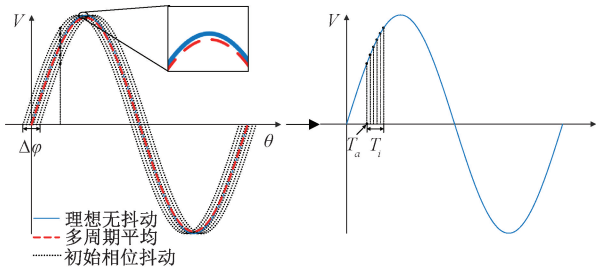


图 4 多次采样取平均等效

Fig. 4 Multiple sampling average equivalent diagram

图 4 右图中理想采样点为 $T_a + \frac{1}{2}T_i$,当存在抖动时,抖动以理想采样点为中心,左右均匀分布在 T_i 范围内。此时,正弦信号与阶梯波信号交点抖动问题已经转换为在同一正弦信号上,每个采样点在 $[T_a, T_a + T_i]$ 范围内取随机值做平均。当平均的周期数足够多时,可以看作是 在 T_i 范围内积分求有效值,正弦信号如下:

$$x(t) = A_m \sin(2\pi f_0 t) \tag{2}$$

式中: A_m 为正弦信号幅值; f_0 为正弦信号频率。理想无相位抖动的采样点为:

$$x_{\text{ideal}} = A_m \sin\left(2\pi f\left(T_a + \frac{T_i}{2}\right)\right) \quad (3)$$

每个采样点位取平均值如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{T_i} \int_{T_a}^{T_a+T_i} x(t) dt \quad (4)$$

积分展开可以得到:

$$\bar{x} = \frac{A_m}{2\pi f_0 T_i} [\cos(2\pi f_0 T_a) - \cos(2\pi f_0 T_a + 2\pi f_0 T_i)] \quad (5)$$

通过变换最终可以得到:

$$\bar{x} = \left[\frac{\sin(\pi f_0 T_i)}{\pi f_0 T_i} \right] A_m \sin\left(2\pi f\left(T_a + \frac{T_i}{2}\right)\right) \quad (6)$$

最终,可以得到理想无相位抖动的采样点与存在相位抖动多次采样后的平均值点之间的关系,并推导出连续的修正系数 k :

$$x_{\text{ideal}} = k\bar{x} \quad (7)$$

$$k = \left[\frac{\sin(\pi f_0 T_i)}{\pi f_0 T_i} \right]^{-1} \quad (8)$$

当正弦信号离散化时,理想的采样序列为:

$$x(n) = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \quad (9)$$

式中: $n=1, 2, \dots, N$ 。假设实际采样相位在理想采样左右范围内均匀间隔时,设定范围大小为 $\Delta\varphi$, 采样 S 周期信号取平均,可以得到离散的平均序列:

$$\bar{X} = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^{S-1} A_m \sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \frac{\Delta\varphi}{S-1}i\right) \quad (10)$$

通过变换可以得到:

$$\bar{X} = \frac{A_m}{S} \frac{\sin\left(\frac{S}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{S-1}\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{S-1}\right)} \sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \frac{\Delta\varphi}{S-1} \cdot \frac{S}{2}\right) \quad (11)$$

理想采样序列为:

$$X_{\text{ideal}} = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \frac{\Delta\varphi}{S-1} \cdot \frac{S}{2}\right) \quad (12)$$

可以确定理想采样序列与平均序列之间的关系,进而得到离散的修正系数 K :

$$X_{\text{ideal}} = K\bar{X} \quad (13)$$

$$K = \left[\frac{\sin\left(\frac{S}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{S-1}\right)}{S \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{S-1}\right)} \right]^{-1} \quad (14)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为 T_i 所对应的相位范围。当平均周期 S 趋于无穷时,离散修正系数 K 等同于连续修正系数 k 。

3 补偿结果仿真分析

为验证补偿公式的可行性,利用 MATLAB 进行仿真实验,比较补偿前后的采样平均点变化。首先构建理想正弦信号,每个周期采样 2 000 个点。然后,在该正弦信号的初始相位上加入一个随机抖动,其范围控制在 $\Delta\varphi=5 \text{ mrad}$ 之内均匀分布,以模拟实际情况下相位无法完全同步的影响。该随机相位作为相位误差项加入信号中,正弦信号公式为:

$$x(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{2000}n + \varphi_i\right) \quad (15)$$

式中: φ_i 为初始相位的随机抖动,在 $[0, \Delta\varphi]$ 中随机取值。

通过对 $S=500$ 组周期信号进行采样并求平均,可以得到平均序列。利用式(7)对该平均序列进行补偿。为了更明显地观察补偿前后点位的变化,在峰值处对比补偿前后的平均点位置,如图 5 所示。

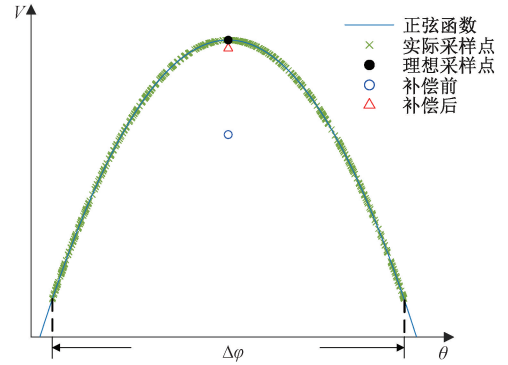


图5 补偿前后有效点位置

Fig. 5 Effective point position before and after compensation

其中“x”表示 500 组正弦信号在该采样点位的采样值,“o”表示补偿前的采样平均序列值,“△”表示通过式(7)进行补偿后的采样平均值。理想值则代表无抖动时的采样值。由图 5 可以明显看出,补偿后的平均值更接近理想值,验证了式(7)能够有效地补偿相位抖动所引起的幅值误差,从而显著提高采样结果的准确性。

根据傅里叶变换的线性性质,通过式(7)可以得到:

$$V_{\text{ideal}} = \left[\frac{\sin(\pi f_0 T_i)}{\pi f_0 T_i} \right]^{-1} \bar{V} \quad (16)$$

式中: V_{ideal} 为被测正弦信号理想幅值; $\bar{V}$ 为采样结果平均后计算得到的幅值。

重复采样存在抖动的正弦信号序列,每次采样 S 组序列。将这些序列平均后进行傅里叶分析,计算出相应幅值。通过重复 100 000 次实验,得到平均幅值与理想幅值的误差记为 E ,根据式(16)对计算后幅值进行补偿,

补偿后的平均幅值与理想幅值误差记为 E_{sa} 。当 S 组值取不同值时,补偿前后幅值误差值如表 2 所示。比较不同 S 取值下补偿效果,可以明显发现,随着平均周期数的增加,补偿后的平均幅值误差逐渐减小,补偿效果越理想。

表 2 抖动范围为 5 mrad 时,不同 S 组数补偿前后平均幅值误差

Table 2 When the jitter range is 5 mrad, the averaged amplitude error before and after compensation for different groups

S 组	补偿前误差 $E/(V \cdot V^{-1})$	补偿后误差 $E_{sa}/(V \cdot V^{-1})$
10	-9.3×10^{-7}	1.1×10^{-7}
30	-1.0×10^{-6}	3.5×10^{-8}
50	-1.0×10^{-6}	2.0×10^{-8}
100	-1.0×10^{-6}	1.1×10^{-8}
300	-1.0×10^{-6}	3.1×10^{-9}
500	-1.0×10^{-6}	2.0×10^{-9}

为了减少初相位随机性对实验结果的影响,设置取样序列的平均周期数 S 为 500 组。通过重复该补偿实验 100 000 次,统计获得补偿前后的幅值误差构成的直方图分布,如图 6 所示。

结合表 2 和图 6 可以看出,随着 S 的增大,补偿效果得到了显著改善。这表明该补偿方法能有效减小信号的幅值误差,并将抖动引入的幅值误差控制在一个非常小的范围内,这验证了所提出补偿方法的稳定性和正确性。

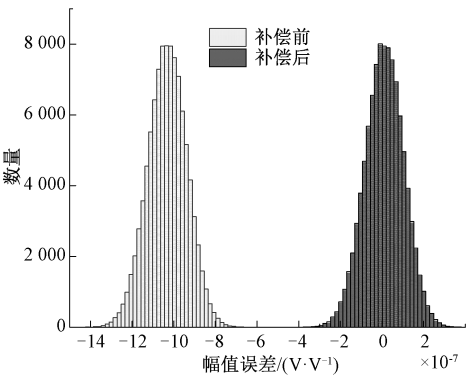


图 6 抖动范围为 5 mrad 时,100 000 次仿真实验补偿前后幅值误差分布

Fig. 6 Histogram of amplitude error distribution before and after compensation for 100 000 simulation experiments with a jitter range of 5 mrad

4 实验验证

为了通过实验分析初始相位抖动对幅值测量误差的影响,并进一步验证所提出的幅值误差补偿方法的可靠性,搭建基于 PJVS 的相位可控正弦信号测量系统,如图 7 所示。该系统与常规交流量子电压测量系统区别在于可实现任意初始相位可控的正弦信号精密测量。系统时钟源提供频率参考与触发信号,该触发信号用于控制输出被测正弦信号、PJVS 阶梯波信号以及触发采样测量,实现被测正弦信号任意初始相位可控。信号发生器提供锁相信号,控制交流电压源同步输出被测正弦信号,以及交流 PJVS 系统输出阶梯波信号。差分模块实现正弦信号与阶梯波信号差分输出,高精度采样模块采样测量差分信号并传输至上位机进行处理计算。

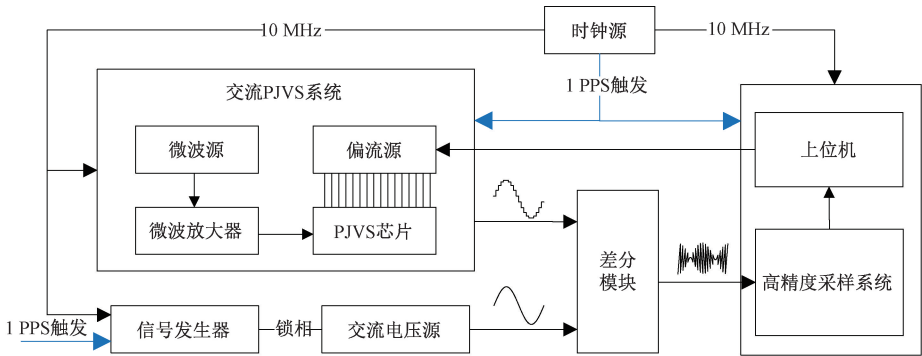


图 7 基于 PJVS 的初始相位可控正弦信号测量系统

Fig. 7 Initial phase controlled sinusoidal signal measurement system based on PJVS

基于 PJVS 的相位可控正弦信号测量系统实物如图 8 所示,选用北斗高精度授时服务器作为系统时钟源,为系统提供 10 MHz 参考频率与 1 PPS 脉冲信号;信号发生器选用 Keysight 33500B 提供锁相信号;交流电压源选

用多功能高精度校准器 Fluke 5700A,输出被测正弦信号;采样系统选用 NI 公司研制的双通道高精度采样板卡 PXI-5922,通过同轴线连接以减小外界环境的干扰。

实验通过 1 PPS 脉冲信号触发 Keysight 33500B 输

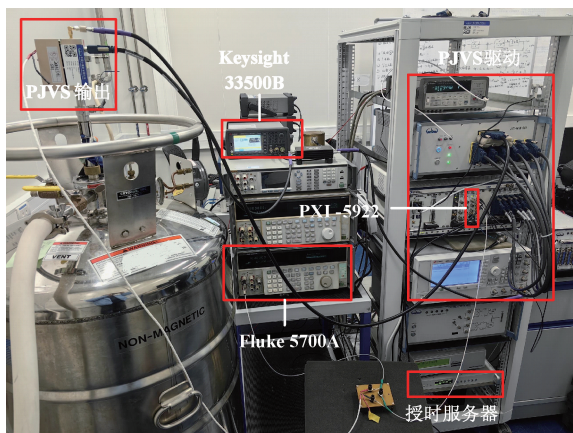


图 8 基于 PJVS 的初始相位可控正弦信号测量系统实物
Fig. 8 Picture of initial phase controlled sinusoidal signal measurement system based on PJVS

出可控初始相位的锁相信号,控制 Fluke 5700A 输出频率为 400 Hz、有效值为 1 V 的被测正弦信号。当被测正弦信号输出稳定后,交流 PJVS 系统通过 PXIe-6672 时钟板卡接收 1 PPS 脉冲信号触发,输出频率为 400 Hz、台阶数为 40 的逼近被测正弦信号的阶梯波信号。随后,由 1 PPS 脉冲信号触发 PXI-5922 采样差分信号。为了消除采样误差的影响,本文中控制差分信号幅值低于 0.1 V。最后,由上位机根据交流 PJVS 系统输出的标准阶梯波信号及差分信号重构被测正弦信号,计算幅值与相位信息。

根据上述实验,控制输出初始相位为 0 的被测正弦信号,由 PXI-5922 以 800 KS/s 采样率连续采样 500 周期差分信号,评估实际相位抖动对幅值测量的影响。通过 PJVS 输出的标准阶梯波信号重构被测正弦信号,计算 500 周期正弦信号初始相位抖动范围,对 500 周期信号进行平均并计算幅值。基于抖动范围计算补偿系数,结合式(16)对平均后幅值进行补偿修正。重复进行 5 次实验,补偿前后幅值测量结果如表 3 所示。

表 3 实际相位抖动引入的幅值误差补偿结果
Table 3 Compensation results for amplitude errors caused by actual phase jitter

相位抖动范围 /mrad	补偿前幅值 /V	补偿后幅值 /V	补偿效果 /(V·V ⁻¹)
5.6	1.000 000 7	1.000 002 0	1.3×10 ⁻⁶
3.8	1.000 001 2	1.000 001 8	0.6×10 ⁻⁶
4.6	1.000 002 3	1.000 003 2	0.9×10 ⁻⁶
4.5	1.000 000 2	1.000 001 1	0.8×10 ⁻⁶
4.4	1.000 000 6	1.000 001 4	0.8×10 ⁻⁶

根据表 3 实验结果可知,本文系统控制 Keysight 33500B 锁相 Fluke 5 700A 输出 400 Hz 被测正弦信号时,相位抖动范围在 5 mrad 左右。结合仿真结果,抖动范围 5 mrad 引入的幅值误差约为 1×10⁻⁶ V/V,与表中所示的补偿效果一致,因此通过本文提出的补偿方法可有效减小该误差的影响。

为了进一步验证补偿方法的可靠性,控制被测正弦信号初始相位抖动范围为 50 mrad,连续采样 500 周期被测正弦信号,并按上述过程对被测信号进行处理,获得补偿前后的幅值测量结果,如表 4 所示。

表 4 抖动范围为 50 mrad 幅值误差补偿结果
Table 4 The compensation results of the amplitude error introduced by phase jitter of 50 mrad

补偿前幅值/V	补偿后幅值/V
0.999 897 1	1.000 002 7

本文选用的 Fluke 5700A 输出频率为 400 Hz,有效值为 1 V 的正弦信号经校准后其实际输出幅值为 1.000 005 V。由表 4 实验数据可知,当抖动范围达到 50 mrad 时,引入的测量误差超过 1×10⁻⁴ V/V。通过本文提出的补偿方法进行补偿修正后,可将测量误差降至不超过 3 μV/V。表明本文提出的幅值误差补偿方法补偿效果明显。

5 结 论

本文研究了在基于量子技术的交流电压测量中出现的信号初始相位抖动引入的幅值误差问题,通过蒙特卡洛实验定量评估了相位抖动对幅值测量的影响。结果表明,幅值误差受平均周期数的影响较小,而主要由抖动范围决定,当抖动范围为 5 mrad 时引入的幅值误差为 10⁻⁶ 量级。进一步通过理论推导,提出了一种基于相位抖动范围的幅值误差补偿方法。该方法可有效补偿相位抖动导致的信号幅值误差,并通过实验进行验证。实验结果表明,当抖动范围为 5 mrad 时,该补偿方法可将误差降低 1×10⁻⁶ V/V,与仿真结果一致。将抖动范围进一步放大至 50 mrad,该补偿方法可将幅值误差由 1×10⁻⁴ V/V 降低至 10⁻⁶ 量级,证明了补偿方法的可靠性。

参考文献

[1] QUINN T J. News from the BIPM[J]. Metrologia, 1989, 26(1):69-74.
[2] 李红晖,王曾敏,徐晴,等. 中国计量科学研究院量子电压基准研究与发展综述[J]. 计量学报,2023, 44(10):1564-1573.
LI H H, WANG Z M, XU Q, et al. Summary of research

- and development of quantum voltage datum in Chinese Institute of Metrology [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2023, 44(10):1564-1573.
- [3] IHLENFELD W G K. Digital sampling techniques for AC Josephson standards at NRC-Canada [J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2021, 24(3):18-22.
- [4] TOLPYGO S K, RASTOGI R, WEIR T, et al. Development of self-shunted Josephson junctions for a ten-superconductor-layer fabrication process: Nb/NbN_x/Nb Junctions[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(3):1-8.
- [5] BURROUGHS C J, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Development of a 60 Hz power standard using SNS programmable Josephson voltage standards [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2):289-294.
- [6] 王曾敏,高原,李红晖. 建立新一代约瑟夫森电压基准——正弦量子电压信号的合成[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(9):1965-1971.
- WANG Z M, GAO Y, LI H H. Establishment of new type Josephson voltage standard in China——synthesis of AC quantum voltage [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9):1965-1971.
- [7] DURANDETTO P, SOSSO A. Non-conventional PJVS exploiting first and second steps to reduce junctions and bias lines[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(4):1294-1301.
- [8] 贾正森,王磊,张江涛,等. 交流约瑟夫森量子电压在电磁计量中的应用[J]. *计量科学与技术*, 2020(8):44-50,60.
- JIA ZH S, WANG L, ZHANG J T, et al. Application of AC Josephson quantum voltage in electromagnetic measurement [J]. *Metrology Science and Technology*, 2020(8):44-50,60.
- [9] 石照民,张江涛,潘仙林,等. 超低频电压交直流转换关键参数分析[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11):82-89.
- SHI ZH M, ZHANG J T, PAN X L, et al. Analysis on the key parameters of AC-DC transfer system for ultra-low frequency voltage[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11):82-89.
- [10] SHI ZH M, WANG Z M, ZHANG J T, et al. AC-DC transfer and verification of ultra-low frequency voltage from 0.1 to 10 Hz[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72:1501207.
- [11] WALTRIP B C, NELSON T L, BERILLA M, et al. Comparison of AC power referenced to either PJVS or JAWS [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70:1501406.
- [12] 周琨荔,韩琪娜,赵建亭,等. 1 V 脉冲驱动型交流量子电压源研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(12):1529-1535.
- ZHOU K L, HAN Q N, ZHAO J T, et al. Pulse-driven AC Josephson voltage standard with an output voltage of one volt [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(12):1529-1535.
- [13] LI ZH K, BAI Y, WANG Y, et al. Improvements of the NIM-2 Joule balance since 2020[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72:1004907.
- [14] 陆祖良,杨雁,黄璐,等. 阶梯波性质的进一步探讨——阶梯波研究之一[J]. *计量学报*, 2018, 39(6):759-767.
- LU Z L, YANG Y, HUANG L, et al. Further discussion on characteristics of staircase waveform[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(6):759-767.
- [15] 陆祖良,杨雁,黄璐,等. 片段采样与阶梯波测量——阶梯波研究之二[J]. *计量学报*, 2019, 40(1):31-39.
- LU Z L, YANG Y, HUANG L, et al. Piecewise sampling and measurement of staircase waveform[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(1):31-39.
- [16] 徐熙彤,贾正森,王磊,等. 基于约瑟夫森量子电压的谐波电压测量方法研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(3):311-316.
- XU X T, JIA ZH S, WANG L, et al. Research on harmonic voltage measurement method based on Josephson quantum voltage[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(3):311-316.
- [17] 贾正森,王磊,徐熙彤,等. 基于约瑟夫森量子电压的交流功率测量系统及方法研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(4):469-474.
- JIA ZH S, WANG L, XU X T, et al. Research on ac power measurement system and method based on Josephson quantum voltage[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(4):469-474.
- [18] 段梅梅,赵双双,徐晴,等. 基于量子电压的数字化电能值传递应用技术研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(2):100-104.
- DUAN M M, ZHAO SH SH, XU Q, et al. Research on digital electrical energy value transmission application technology based on quantum voltage [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(2):100-104.
- [19] WALTRIP B C, GONG B, NELSON T L, et al. AC power standard using a programmable Josephson voltage standard [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and*

- Measurement, 2009, 58(4):1041-1048.
- [20] PALAFOX L, RAMM G, BEHR R, et al. Primary AC power standard based on programmable Josephson junction arrays[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(2):534-537.
- [21] 周天地, 贾正森, 杨雁, 等. 基于 PJVS 的交流量子电压比例研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):85-92.
- ZHOU T D, JIA ZH S, YANG Y, et al. Research on AC quantum voltage ratio based on PJVS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2):85-92.
- [22] JIA ZH S, LIU ZH Y, WANG L, et al. Design and implementation of differential AC voltage sampling system based on PJVS[J]. Measurement, 2018, 125:606-611.
- [23] LUNA E, SCHNEIDER G, REAL M, et al. Differential measurement techniques using a programmable Josephson voltage standard [C]. 2024 Argentine Conference on Electronics (CAE), 2024:32-35.
- [24] BEEV N, BASTOS M C, MARTINO M, et al. Design and metrological characterization of a digitizer for the highest precision magnet powering in the high luminosity large hadron collider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 6501710.
- [25] RUFENACHT A, BURROUGHS C J, BENZ S P, et al. Precision differential sampling measurements of low-frequency synthesized sine waves with an AC programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4):809-815.
- [26] 王辰辰, 姚贞建, 杨梦冉, 等. 基于经验与变分混合分解的超声回波信号噪声消除方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6):197-204.
- WANG CH CH. YAO ZH J, YANG M R, et al. Noise elimination method of ultrasonic echo signal based on empirical and variational hybrid decomposition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6):197-204.
- [27] 王映植, 严天峰, 汤春阳, 等. 基于 SAMP-VMD 的局放信号去噪方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(2):160-167.
- WANG Y ZH, YAN T F, TANG CH Y, et al. Denoising method for partial discharge signals based on SAMP-VMD[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(2):160-167.
- [28] 马亚平, 胡计昶, 吴定会, 等. 一种稳健的窄带反馈型主动噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1):269-277.
- MA Y P, HU Y CH, WU D H, et al. Robust narrowband feedback active noise control system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1):269-277.

作者简介



常周, 2022 年于中国计量大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为电能质量及电磁测量。

E-mail: cz_0708@163.com

Chang Zhou received his B.Sc. degree from China Jiliang University in 2022. He is currently a M.Sc. candidate at China Jiliang University. His main research interest is power quality and electromagnetic measurement.



石照民 (通信作者), 2014 年于吉林大学获得学士学位, 2019 年于吉林大学获博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为交流电量精密测量方法。

E-mail: shizhaoming@163.com

Shi Zhaomin (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Jilin University in 2014, and Ph.D. degree from Jilin University in 2019. He is currently an associate researcher at National Institute of Metrology, China. His main research interest is the precision measurement method of AC quantity.