

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003047

DFT 算法频率和相位差测量不确定度评估*

彭钰钦 涂亚庆 杨辉跃

(陆军勤务学院 重庆 401311)

摘要:由于存在测量误差,测量结果就带有不确定性,测量不确定度是评估测量结果质量高低的重要指标。将采样长度与信号周期比值分为整数和小数部分,推导出离散傅里叶变换(DFT)算法频率和相位差的测量误差;运用B类不确定度评估方法,分别分析由频谱泄漏、加窗和栅栏效应造成的频率测量不确定度,得到频率测量合成不确定度表达式;通过相位差测量误差与频率测量误差的关系,推导出相位差不确定度表达式;最后通过计算分析,验证了频率和相位差测量误差、测量不确定度与采样长度的关系,分析结果表明了评估过程的可行性和有效性。

关键词: DFT; 频率测量; 相位差测量; 不确定度评估

中图分类号: TH701; TN06

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Uncertainty evaluation of DFT frequency and phase difference measurement

Peng Yuqin Tu Yaqing Yang Huiyue

(Army Logistics University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: Because of the measurement error, the measurement result is uncertain. Measurement uncertainty is an important indicator for evaluating the quality of measurement results. The ratio of the sampling length to the signal period is divided into integer and decimal parts, and the measurement errors of the DFT frequency and phase difference are deduced. The Class B uncertainty evaluation method is adopted to analyze the frequency measurement uncertainty caused by spectrum leakage, windowing, and fence effect, and the synthetic uncertainty of frequency measurement is obtained. Then the phase difference uncertainty is determined through the relationship between phase difference measurement error and frequency measurement error. Finally, through calculation and analysis, the relationship between the sampling length and measurement error as well as uncertainty of frequency and phase difference is verified. The analysis results show that the evaluation process is feasible and effective.

Keywords: DFT; frequency measurement; phase difference measurement; uncertainty evaluation

0 引言

频率和相位差测量在测控、通信、雷达、电力电网等方面有着重要应用与意义^[1-4]。利用离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)来实现频率和相位差测量是一种常用的方法。DFT算法在抗干扰能力和计算量等方面有其独有的优势,但在非整周期采样时,DFT算法会产生频谱泄漏,同时算法还存在栅栏效应,这都导致频率和相位差测量存在误差^[5-9]。

由于存在测量误差,测量结果就带有不确定性。在测量时,应该对测量结果的质量给出定量的说明,即应该展开测量不确定度评估^[10-15]。DFT算法在实际应用时,由于存在频谱泄漏和栅栏效应,导致频率和相位差测量存在不确定度,因此要对测量结果的不确定度进行评估。

目前对于DFT算法频率和相位差测量不确定度评估的研究尚未完善。以往研究中,大多关注DFT算法频率和相位差的测量误差,侧重分析测量误差产生的原因和探讨误差补偿机制,较少针对算法的测量不确定度展开相关研究^[16-18]。文献[19-20]研究了DFT算法的舍入

收稿日期: 2020-04-01 Received Date: 2020-04-01

* 基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003900)、国家自然科学基金(61871402)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0245)资助项目

不确定度和截取不确定度,得到了确定 DFT 算法测量不确定度的方法,并以具体窗函数推导了测量不确定度的表达式。但文献[19-20]是从傅里叶变换后得到的幅值测量误差来确定算法的测量不确定度,而幅值测量误差与频率测量误差、相位差测量误差有所不同,其没有深入研究利用 DFT 算法测量频率和相位差的不确定度评估方法。

本文根据 DFT 算法的频率和相位差测量误差,研究 DFT 算法频率和相位差测量不确定评估方法。首先推导 DFT 算法频率和相位差的测量误差;然后分析造成频率测量不确定度的原因,并将不同原因造成的不确定度合成,得到 DFT 算法频率测量不确定度;通过相位测量误差与频率测量误差的关系,结合不确定度确定规则,得到 DFT 算法相位差测量不确定度;最后通过计算分析,以验证不确定度评估的可行性和有效性。

1 DFT 算法频率和相位差测量原理分析

在基于 DFT 的参数测量中,通常的测量方法是在信号经过 DFT 算法处理后,选取频谱中最大谱线对应频率值作为频率的测量值;在相位差测量时,选择 2 组信号各自频谱中最大谱线对应相位值作差,得到相位差测量值^[21-22]。

设被测信号为:

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: A 是信号幅度; f_0 是信号真实频率; φ_0 是信号初相位。

以采样频率 $f_s = 1/T_s$ 对信号采样,得到采样信号为:

$$x(n) = A \cos(2\pi f_0 T_s n + \varphi_0) \quad (2)$$

式中: $n=0, 2, \dots, N-1, N$ 为采样点数。对式(2)的 N 个点进行离散傅里叶变换,并忽略单频信号的负频域成分,得到:

$$X(k) = \frac{A}{2} e^{j[\varphi_0 + \frac{\pi(N-1)(f_0 T_s N - k)}{N}]} \frac{\sin[\pi(k - f_0 T_s N)]}{\sin[\pi(k - f_0 T_s N)/N]} \quad (3)$$

由式(3)可得,在第 k 根谱线对应的幅值 A_k 和相位值 φ_k 分别为:

$$A_k = |X(k)| = \left| \frac{A \sin[\pi(k - f_0 T_s N)]}{2 \sin[\pi(k - f_0 T_s N)/N]} \right| \quad (4)$$

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{\text{Im}[X(k)]}{\text{Re}[X(k)]}\right) = \varphi_0 + \frac{\pi(N-1)(f_0 T_s N - k)}{N} \quad (5)$$

分析式(4),在 N 较大时有:

$$A_k \approx \left| \frac{AN \sin[\pi(k - f_0 T_s N)]}{2\pi(k - f_0 T_s N)} \right| =$$

$$\left| \frac{AN}{2} \text{sinc}[\pi(k - f_0 T_s N)] \right| \quad (6)$$

利用 DFT 算法测量频率和相位差时,通常选取最大谱线位置对应的值来计算,由式(6)可知,当 k 为最接近 $f_0 T_s N$ 的整数值,记为 $k_0 = [f_0 T_s N]$ 时, A_k 有最大值。

为研究非整周期程度对频率和相位差测量的影响,将采样长度与信号周期比值分为整数和小数部分分析,设:

$$f_0 T_s N = m = m_0 + m' \quad (7)$$

式中: m 代表采样长度为 m 倍信号周期; m_0 是最接近 $f_0 T_s N$ 的整数,有 $m_0 = k_0$; m' 是绝对值 < 0.5 的实数。

最大谱线在 $k = k_0$ 取到,将式(7)代入式(5)得到 k_0 处频率测量值 \hat{f} 和相位测量值 φ_{k_0} 分别为:

$$\hat{f} = \frac{f_s}{N} k_0 = \frac{m_0 f_0}{m_0 + m'} \quad (8)$$

$$\varphi_{k_0} = \varphi_0 + \frac{\pi(m_0 + m' - f_0 T_s) m'}{m_0 + m'} \quad (9)$$

频率和相位测量的绝对误差分别为:

$$e_f = |\hat{f} - f_0| = \left| \frac{m' f_0}{m_0 + m'} \right| \quad (10)$$

$$e_\varphi = |\varphi_{k_0} - \varphi_0| = \left| \frac{\pi(m_0 + m' - f_0 T_s) m'}{m_0 + m'} \right| \quad (11)$$

在测量相位差时,设另一路信号为:

$$y(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi_1) \quad (12)$$

对 $y(t)$ 采样过程同 $x(t)$, 同前推导过程,可得在 k_0 处的相位测量值 φ_{1k_0} 为:

$$\varphi_{1k_0} = \varphi_1 + \frac{\pi(m_0 + m' - f_0 T_s) m'}{m_0 + m'} \quad (13)$$

由此相位差表示为:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 = \varphi_{1k_0} - \varphi_{k_0} \quad (14)$$

在实际计算时,分别计算出 2 路信号的相位值 φ_{1k_0} 和 φ_{k_0} , 再相减便可得出相位差测量值。

2 频率和相位差测量不确定度评估

根据国际标准《测量不确定性的表达指南》(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM) 和国家标准《测量不确定度评定和表示》(GB/T 27418-2017), A 类不确定度评估是通过统计分析法评定测量不确定度,要求在同一测量条件下独立重复 n 次观测得到统计值,在分析 DFT 算法频率和相位差测量时,不能满足这一条件。而 B 类不确定度评估是不同于 A 类不确定度评估的方法,是利用一切有用信息对测量结果加以综合评估,由此分析时采用 B 类不确定度评定方法。

B 类评估方法首先要确定区间半宽度 a , 从而确定出

被测量值的可能值区间 $[x - a, x + a]$, 然后根据实际情况, 假设测量值的概率分布, 由概率分布确定置信因子 k , 由 $u(x) = a/k$, 得到测量不确定度评估结果。

2.1 频率测量不确定度

频率测量不确定度可分为频谱泄漏不确定度、加窗和栅栏效应不确定度^[19]。非整周期采样导致采样信号在起点和终点不连续, 引起频谱泄漏。在式(10)得到了频谱泄漏造成的频率测量绝对误差, 将其作为频率测量不确定度区间宽度, 则不确定度区间半宽 a 可设为:

$$a = \frac{e_f}{2} = \left| \frac{m'f_0}{2(m_0 + m')} \right| \quad (16)$$

由此确定出频率测量值的可能区间为 $[x - a, x + a]$, 而由式(10)可知, 在 $m' = 0$ 没有频率测量误差, 在其余情况均存在测量误差, 所以测量值在区间中心的位置可能性最小, 故可假设概率分布为反正弦分布, 得到置信因子 $k = \sqrt{2}$, 从而得到由于频谱泄漏造成频率测量不确定度为:

$$u_1(x) = \frac{a}{\sqrt{2}} = \left| \frac{m'f_0}{2\sqrt{2}(m_0 + m')} \right| \quad (17)$$

在采用 DFT 算法测量频率时, 当信号频率不是频率分辨率的整数倍时, 栅栏效应便会带来测量误差, 加不同窗函数可以决定频谱图是否与真实频谱图更接近。分析频率测量时, 栅栏效应和加窗带来的不确定度, 是在信号真实频率位置与最高和次高谱线等距时, 频率测量误差最大, 最大测量误差为 $e_{\max} = \Delta f/2$, $\Delta f = 1/NT_s$ 为频率分辨率。由此, 可设最大测量误差的 1/2 为加窗和栅栏效应引起的频率测量不确定度区间半宽 a :

$$a = \frac{e_{\max}}{2} = \left| \frac{f_0}{4(m_0 + m')} \right| \quad (18)$$

由于测量值在区间中心的位置可能性最小, 可假设概率分布为反正弦分布, 得到置信因子 $k = \sqrt{2}$, 由此得到由于加窗和栅栏效应造成频率测量不确定度为:

$$u_2(x) = \frac{a}{\sqrt{2}} = \left| \frac{f_0}{4\sqrt{2}(m_0 + m')} \right| \quad (19)$$

在分析非整周期采样造成的不确定度 $u_1(x)$ 和加窗与栅栏效应引起的不确定度 $u_2(x)$ 时, 两者相互独立。根据 GUM 不确定度合成规则, 合成不确定度 $u_c(x)$ 与各个相互独立不相关不确定度分量 $u_i(x)$ 的关系为:

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(x)} \quad (20)$$

所以频率测量的合成不确定度为:

$$u_f(x) = \sqrt{u_1^2(x) + u_2^2(x)} = \frac{f_0 \sqrt{4m'^2 + 1}}{4\sqrt{2}(m_0 + m')} \quad (21)$$

2.2 相位差测量不确定度

DFT 相位差测量通过分别测量 2 路信号在最大谱线

对应相位值, 再相减得到相位差测量结果。而 2 路信号在最大谱线对应的相位值都存在测量误差, 因此存在相位差测量不确定度。

相位差测量值 $\Delta\varphi = \varphi_{1k_0} - \varphi_{k_0}$, 由于 2 路信号在 k_0 处相位测量不确定度 $u_{\varphi_{k_0}}(x)$ 和 $u_{\varphi_{1k_0}}(x)$ 是无关的, 根据不确定度合成方法, 相位差测量的不确定度 $u_{\Delta\varphi}(x)$ 为:

$$u_{\Delta\varphi}(x) = \sqrt{u_{\varphi_{k_0}}^2(x) + u_{\varphi_{1k_0}}^2(x)} \quad (22)$$

其中一路信号 $x(t)$ 在 k_0 处相位测量不确定度 $u_{\varphi_{k_0}}(x)$ 分析如下。由式(11)可知, 相位的测量不确定度与频率测量不确定度有关, 根据不确定度评定规则, 有:

$$u_{\varphi_{k_0}}(x) = \left| \frac{df}{df_0} \right| u_f = \left| \frac{\pi T_s m'}{m_0 + m'} \right| u_f \quad (23)$$

同理可得 $y(t)$ 在 k_0 处相位测量不确定度 $u_{\varphi_{1k_0}}(x)$:

$$u_{\varphi_{1k_0}}(x) = \left| \frac{df}{df_0} \right| u_f = \left| \frac{\pi T_s m'}{m_0 + m'} \right| u_f \quad (24)$$

将式(20)、(22)、(23)代入式(21)得到相位差测量的不确定度:

$$u_{\Delta\varphi}(x) = \left| \frac{\pi T_s m' f_0 \sqrt{4m'^2 + 1}}{4(m_0 + m')^2} \right| \quad (25)$$

3 计算分析

为验证上述测量不确定度评估的可行性和有效性, 以 2 个频率相同、初始相位不同的单频正弦信号为例, 进行计算分析, 参数值设置如表 1 所示。

表 1 计算分析参数值

Table 1 Parameter values of calculation and analysis

参数	$x(t)$	$y(t)$
采样频率 f_s / kHz	3	3
信号频率 f_0 / Hz	27	27
幅值 A/V	1	1
初始相位 φ_0 / rad	$\pi/3$	$\pi/6$

计算分析时选取不同的 m_0 和 m' 值, 由式(7)得到具体截取点数 N , 再对信号进行 N 点采样, 由 DFT 算法对采样信号处理后得到的测量结果, 分析截取长度对频率和相位差测量误差和测量不确定度的影响。设置 $m_0 = 50, 100, 200, 300, 400, 500$, $m' = -0.5 : 0.02 : 0.5$, 计算每一组值对应的频率和相位差测量误差和不确定度, 得到结果如图 1、2 所示。

分析图 1 和 2 可知, 当截取长度是信号周期的整数倍时, 即图中 $m' = 0$ 时, 频率和相位差测量无误差, 其余情况存在误差; 随着 m_0 增大, 即随着采样整周期数增加, 频率和相位差的测量误差都在减小。

当 m_0 一定时, 频率测量误差随着采样长度的非整周

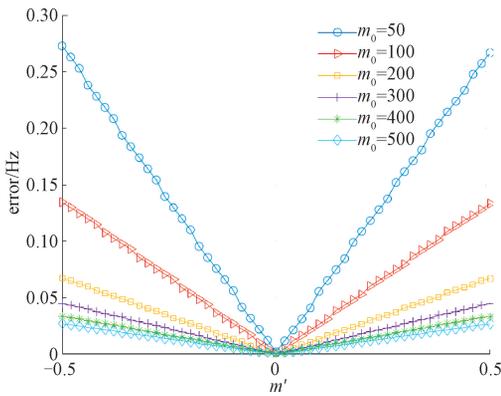


图 1 不同截取长度的频率测量误差
Fig. 1 Frequency measurement errors of different truncation length

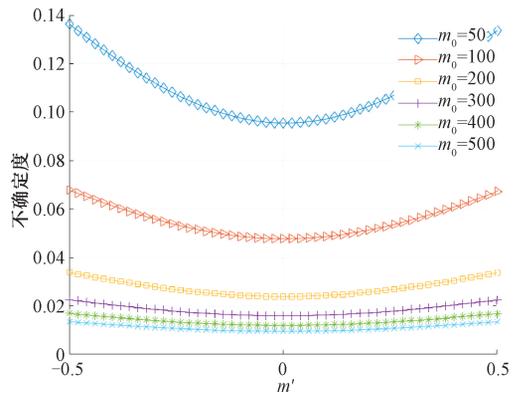


图 3 不同截取长度的频率测量不确定度
Fig. 3 Frequency measurement uncertainty of different truncation length

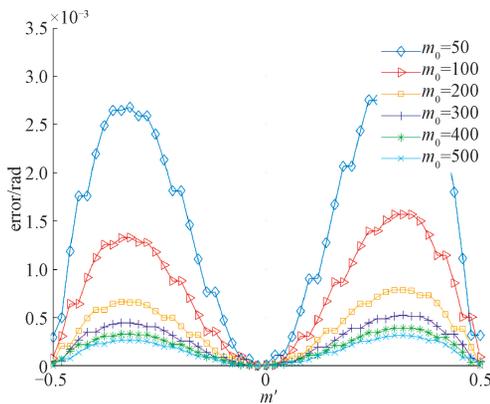


图 2 不同截取长度的相位差测量误差
Fig. 2 Phase difference measurement errors of different truncation length

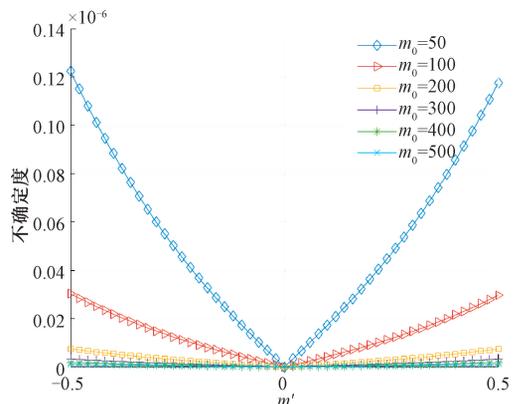


图 4 不同截取长度的相位差测量不确定度
Fig. 4 Phase difference measurement uncertainty of different truncation length

期程度,即 $|m'|$ 的增加而增加,在 $|m'| = 0.5$ 时误差最大;相位差测量误差随着 $|m'|$ 变化,在计算分析中 $|m'| = 0.32$ 时误差最大。计算分析结果这与式(10)、(11)相符。

同时在 m_0 较小时,增大 m_0 ,可以较为明显的降低频率和相位差最大测量误差,但是在 m_0 较大时,增大 m_0 对降低最大测量误差作用变小。

式(19)、(23)得出的频率和相位差测量不确定度计算分析结果如图 3、4 所示。由图 3、4 可知,频率和相位差的测量不确定度都是随着采样整周期数的增加在减小;在 m_0 一定时,测量不确定度随着采样非整周期程度增加而增加,在 $|m'| = 0.5$ 时测量不确定度最大;在频率测量不确定度中,由于加窗和栅栏效应造成的不确定度始终存在,所以在 $m' = 0$ 时频率不确定度不为 0。

在表 2 选取了在 $m' = 0.2$ 时,不同 m_0 值对应的频率和相位差测量不确定度值。由图 4 和表 2 可知,在 m_0 值较小时,增加 m_0 值对降低频率和相位差不确

定度影响较为明显,在 m_0 较大时,增加 m_0 值作用变小。

表 2 不同 m_0 值的频率和相位差不确定度
Table 2 Frequency and phase difference uncertainty of different m_0

m_0 值	不确定度	
	频率	相位差
50	0.102 4	1.81×10^{-6}
100	0.051 3	4.55×10^{-7}
200	0.025 7	1.14×10^{-7}
300	0.017 1	5.10×10^{-8}
400	0.012 8	2.90×10^{-8}
500	0.010 3	1.80×10^{-8}

4 结 论

本文通过分析 DFT 算法频率和相位差测量不确定度来源,确定了频率和相位差测量不确定度评估方法,得

到了不确定度的表达式,最后通过计算分析,验证了不确定度评估的可行性。

通过计算分析,得到了不同截取长度对 DFT 算法频率和相位差的测量误差和测量不确定度的影响结果。结果表明,测量误差和测量不确定度都随着截取长度所包含的信号整周期个数增加而减小;截取长度为信号周期整数倍时,频率和相位差测量误差、相位差测量不确定度为 0;截取长度不为信号周期整数倍时,测量误差和不确定度随着截取长度与信号周期的比值而变化,其中频率测量误差、频率测量不确定度和相位差测量不确定度,在采样周期含奇数个半信号周期时误差最大。

此外,虽然总体趋势是随着截取长度增加,测量误差和不确定度相应的降低,但是在截取长度增加到一定的值之后,再增加截取长度对于降低测量误差和不确定度的作用不再明显。在实际应用之中考虑延时问题,也不可能无限制的增加截取长度,所以要在达到一定的精度要求时,合理设置截取长度,使得整体测量性能较优。

参考文献

- [1] 张静,赵庆生,王旭平,等. 基于扩展 DFT 的谐波检测算法的研究[J]. 现代电子技术,2017,40(21):175-179.
ZHANG J, ZHAO Q SH, WANG X P, et al. Research on harmonic detection algorithm based on extended DFT[J]. Modern Electronics Technique,2017,40(21):175-179.
- [2] 沈艳林,涂亚庆,刘鹏,等. 非整周期采样信号频率估计的相频匹配方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1221-1226.
SHEN Y L, TU Y Q, LIU P, et al. Phase and frequency matching method for the frequency estimation of sampling signals with non-integer period[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(6):1221-1226.
- [3] 杨辉跃,涂亚庆,毛育文. 科氏流量计相位差估计的 ap-Hilbert 法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):38-45.
YANG H Y, TU Y Q, MAO Y W. ap-Hilbert method for phase difference estimation of Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):38-45.
- [4] 黄晓红,尹扬帆,许先凤,等. 改进的 ApFFT 算法及其在超声波流量计中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(11):44-49.
HUANG X H, YIN Y F, XU X F, et al. Improved ApFFT algorithm and its application in ultrasonic flow meter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11):44-49.
- [5] 刘翔宇,涂亚庆,王刚,等. 基于 DSP 的科氏流量计变送器设计及算法验证[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(3):439-446.
LIU X Y, TU Y Q, WANG G, et al. Design and algorithm verification for DSP-Based CMF transmitter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(3):439-446.
- [6] SHEN Y L, TU Y Q. Correlation theory-based signal processing method for CMF signals [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6):1-7.
- [7] PARK C S. Guaranteed-stable sliding DFT algorithm with minimal computational requirements[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2017,65(20):5281-5288.
- [8] 乐静,徐科军,刘文. 面向不同应用的两种科氏质量流量计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(5):97-106.
LE J, XU K J, LIU W. Two Coriolis mass flowmeter signal processing methods for different applications [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(5):97-106.
- [9] 乐静,徐科军,张建国. CNG 加气机中科氏质量流量计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(4):110-118.
LE J, XU K J, ZHANG J G. Signal processing method of Coriolis mass flowmeter for compressed natural gas filling machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(4):110-118.
- [10] 程银宝,陈晓怀,王汉斌,等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(8):1175-1182.
CHENG Y B, CHEN X H, WANG H B, et al. Measurement uncertainty estimation and analysis based on accuracy theory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(8):1175-1182.
- [11] 崔明涛,田芳,李玉全,等. 差压补偿液位测量的不确定度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1524-1531.
CUI M T, TIAN F, LI Y Q, et al. Research on uncertainty evaluation of the compensated differential pressure level measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2016,37(07):1524-1531.
- [12] ZHOU Y, QUAN X, YANG T. The evaluation of measurement uncertainty and its application in the vacuum pressure measurement [J]. Open Journal of Applied Sciences, 2015, 5(8):495-500.
- [13] 褚进华,唐修雄,矫健,等. 能见度仪校准系统的不确定度评定分析[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(2):180-187.

- CHU J H, TANG X X, JIAO J, et al. Uncertainty analysis of the calibration system of visibility meter[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34(2):180-187.
- [14] 梁伟,韦铁平,杨晓翔. 超大量程力传递系统不确定度评定研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4):35-42.
LIANG W, WEI T P, YANG X X. Study on uncertainty evaluation of force transfer system with a super-large range [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4):35-42.
- [15] 朱江森,王世鏢,缪京元. 宽带取样示波器时基漂移的不确定度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3):184-188.
ZHU J M, WANG SH B, MIAO J Y. Study on uncertainty of time-base drift for broadband sampling oscilloscope[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,32(3):184-188.
- [16] 季鸣,何玉珠. 基于 DFT 插值的频率测量技术[J]. 电子测量技术, 2016,39(6):48-50,75.
JI M, HE Y ZH. A method of frequency measurement based on DFT interpolation[J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(6):48-50,75.
- [17] 王欣欢,陈怀海. 一种改进的频谱修正法[J]. 国外电子测量技术, 2016,35(11):27-31.
WANG X H, CHEN H H. Improved spectrum correction method [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016,35(11):27-31.
- [18] 曾玲,陈伟,陶金. 低信噪比正弦信号相位差测量算法对比研究[J]. 电子测量技术, 2017,40(1):71-75,89.
ZENG L, CHEN W, TAO J. Comparative study of the phase difference measurement algorithms for low signal to noise ratio sine signal [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(1):71-75,89.
- [19] 荆学东,陈芷,丁虎. FFT 算法截取不确定度评估[J]. 船舶工程, 2016,38(7):67-69,75.
JING X D, CHEN ZH, DING H. Truncation uncertainty evaluation of fast fourier transform algorithm [J]. Ship Engineering, 2016,38(7):67-69,75.
- [20] 荆学东,陈芷,张智慧,等. 基于 FFT 的舍入不确定度评估[J]. 计量学报, 2016,37(1):105-108.
JING X D, CHEN ZH, ZHANG ZH H, et al. The round-off uncertainty evaluation of fast fourier transform [J]. Acta Metrologica Sinica, 2016,37(01):105-108.
- [21] 刘春艳,王春民,崔艳群. 频谱泄漏效应补偿的信号处理方法研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2016,

34(3):339-344.

LIU CH Y, WANG CH M, CUI Y Q. Research on signal processing method of spectrum leakage compensation[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition) 2016,34(3):339-344.

- [22] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019,33(5):180-186.

CHEN C Y, HU Z J, YANG Y R, et al. Method of ultrasonic phase difference detection based on FFT and IFFT [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(5):180-186.

作者简介



彭钰钦, 2018 年于陆军勤务学院获得学士学位, 现为陆军勤务学院硕士研究生, 主要研究方向为智能检测技术与系统。

E-mail: pyq_fly@163.com

Peng Yuqin received his B. Sc. degree from Army Logistics University of PLA. Now he is a M. Sc. candidate at Army Logistics University of PLA. His main research interest includes intelligent detection technology and system.



涂亚庆, 分别在 1984 年于成都科技大学获得学士学位, 1991 年和 1994 年于重庆大学获得硕士学位和博士学位, 现为陆军勤务学院教授, 主要研究方向为智能检测与仪表、智能自动化系统。

E-mail: yq.tu@163.com

Tu Yaqing received his B. Sc. degree in 1984 from Chengdu University of Science and Technology, M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 1991 and 1994, respectively. Now he is a professor at Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent detection and instrumentation, intelligent automation system.



杨辉跃, 分别在 2009 年、2012 年、2015 年于后勤工程学院获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为陆军勤务学院讲师, 主要研究方向为智能仪表、智能控制、数字信号处理。

E-mail: huiyue_yang@163.com

Yang Huiyue received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Logistical Engineering University in 2009, 2012 and 2015, respectively. Now he is a lecturer at Army Logistics University of PLA. His main research interests include intelligent instrumentation, intelligent control and signal processing.