

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230832

基于高倍过采样与加窗插值FFT的电力谐波分析

张鸿博¹, 熊军华¹, 蔡晓峰²

(1. 华北水利水电大学电气工程学院, 河南 郑州 450045; 2. 河南工程学院机械工程学院, 河南 郑州 451191)

摘要: 为提高谐波分析精度, 分析了信号加窗引起的信噪比损失以及AD转换产生的量化误差, 阐述了过采样技术提高信噪比的原理。在此基础上, 提出了基于高倍过采样和加窗插值快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的谐波分析方法。该方法充分利用AD转换器的潜力, 以尽量高的采样速率进行AD采样, 同时通过均值滤波避免高倍过采样引起的采样数据量激增问题。详细研究了所提谐波分析方法对信号中谐波分量幅值和相位的影响, 并给出了简洁实用的谐波幅值和相位校正方法。仿真表明, 所提方法可在不增加系统成本的前提下改善加窗插值FFT的抗噪声能力, 提高谐波分析精度。

关键词: 插值FFT; 窗函数; 谐波分析; 量化误差; 过采样; 校正

Power harmonic analysis based on high-rate oversampling and windowed interpolation FFT

ZHANG Hongbo¹, XIONG Junhua¹, CAI Xiaofeng²

(1. College of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;
2. School of Mechanical Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: To improve the accuracy of harmonic analysis, the signal-to-noise ratio loss caused by signal windowing and the quantization error caused by AD conversion is analyzed, and the principle of improving signal-to-noise ratio by oversampling technology is expounded. A harmonic analysis method based on high-rate oversampling and windowed interpolation FFT is proposed. This method makes full use of the potential of an AD converter to take samples quickly, and at the same time, it avoids the surge of sampling data caused by high oversampling through mean filtering. The influence of the proposed method on the amplitude and phase of harmonic components in the signal is studied in detail, and a concise and practical correction method of harmonic amplitude and phase is given. Simulation results show that the proposed method can improve the anti-noise ability of windowed interpolation FFT and the accuracy of harmonic analysis without increasing system cost.

This work is supported by the Key Science and Technology Project of Henan Province (No. 222102240072).

Key words: interpolation FFT; window function; harmonic analysis; quantization error; oversampling; correction

0 引言

谐波会引起电网电压电流波形畸变, 恶化电能质量^[1-2]。准确测量谐波是电能质量监测、电网谐波抑制与电气设备故障诊断等工作的前提。

目前电力系统谐波分析最常用的方法是快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)^[3-5], 但由于电网频率存在小幅波动, 且采样间隔又只能取单片机定时时钟周期的整数倍, 因此难以做到信号的整周

期截断和同步采样, 导致频谱泄漏, 产生误差。针对这一问题, 近年来双谱线^[4]、三谱线^[5]以及多谱线插值FFT算法^[6-7]相继被提出, 同时Nuttall窗^[6, 8]、Hanning卷积窗^[9]、Nuttall卷积窗^[10-11]以及其他一些优化改良的窗函数^[11-15]也被用于加窗FFT中, 这些改进的窗函数以及插值方法显著降低了频谱泄漏的影响, 取得了不错的效果。

但以上文献并没有考虑加窗导致的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)损失对谐波分析的不良影响, 且算法的仿真验证也普遍没有考虑AD量化误差的影响。实际中谐波分析要通过一定位数的AD转换器对信号进行量化处理才能进行, 不可避免地含有量

基金项目: 河南省科技攻关计划项目资助(222102240072);
河南省高等学校重点科研项目支持(17A470011)

化噪声,当通过加窗方式对频谱泄漏进行抑制后,量化噪声就会成为影响谐波分析精度的重要因素。文献[16]提及了AD转换量化噪声对谐波分析的影响,但未就降低量化噪声的影响提出方案。除量化噪声外,采样信号还会含有热噪声、电源噪声等,即使采用频率跟踪实现精准的同步采样,这些噪声也仍然存在,降低噪声影响是进一步提高谐波分析精度的必然要求。

为了降低量化噪声,采用高精度的AD转换器是最直接的方法,然而成本会显著提高;另一种方法则是采用过采样技术^[17-19],在AD转换器的转换速率还未充分发挥的情况下,尽可能提高采样频率,充分发挥AD转换器的潜能,提高分析精度。但高速的AD转换意味着在同样的采样周期内会采集更多的采样点数,需要开展更大点数的FFT运算,当过采样率很高时,采样点数很大,FFT需要耗费大量的存储空间和运算时长。为此,一般将过采样技术与均值滤波相结合^[18-20],将多个过采样数据的平均值作为输出,这样就不会增大采样点数,同时还可以抑制量化误差和噪声,但文献[18-20]所述方法没有考虑均值滤波器对信号频谱的影响,当应用于电力谐波分析时,均值滤波器会引起信号频谱的变化,必须进行矫正,否则会出现明显误差。

本文分析了加窗导致的信噪比损失,介绍了过采样技术提升信噪比的原理,进而提出了基于高倍过采样和加窗插值FFT的谐波分析算法,给出了算法的详细实现流程,分析了均值滤波环节引起误差的原因,推导了谐波幅值和相位误差的矫正公式。通过仿真验证了所提算法具有良好的抗噪声能力,可明显提高谐波分析的精度。

1 窗函数的信噪比损失

加窗可以改善非同步采样引起的频谱泄漏,但在加窗的同时,也会带来信号波形的失真,通常用信噪比损失来衡量加窗对信号的不良影响^[21-23]。假设窗函数为 $w(n)$,长为 N_w ,加窗引入的信噪比损失 L_{SNR} 可用式(1)计算^[21-23]。表1给出了几种经典窗函数和近年来几种新型窗函数的信噪比损失。

$$L_{\text{SNR}} = \frac{\left[\sum_{n=1}^{N_w} w(n) \right]^2}{N_w \sum_{n=1}^{N_w} w^2(n)} \quad (1)$$

从表1中来看,除矩形窗(即不加窗)外,加其他窗均会引起信噪比的损失。因此在加窗的情况下,应该采取措施减少信噪比损失。另外,Hanning卷

积窗^[9]、Nuttall卷积窗^[10]虽然频谱泄漏抑制能力更强,但它们的信噪比损失比其母窗要大,意味着抗噪声能力更差,测量精度更易受噪声影响,应用这些窗函数时更应该采取措施减少信噪比损失。

表1 窗函数的信噪比损失

Table 1 SNR loss of window function

窗函数	信噪比损失/dB	窗函数	信噪比损失/dB
矩形窗	0	Nuttall窗	3.64
Hanning窗	1.76	Hanning卷积窗	3.36
Blackman	2.37	Nuttall卷积窗	5.18

注:本文Nuttall窗专指4项5阶Nuttall窗^[6]。

2 量化噪声与过采样技术

AD转换是对连续的模拟信号进行量化的过程,量化结果和被采样模拟量之间会存在差值,该差值即为量化误差,也称量化噪声。

一个 N_b 位的AD转换器,其最小分辨率为

$$\Delta = \frac{V_{\text{ref}}}{2^{N_b}} \quad (2)$$

式中, V_{ref} 为参考电压。

由式(2)可知, N_b 越大, Δ 就越小,量化误差也就越小。量化误差在 $\pm 0.5\Delta$ 之内。假设输入信号的变化大于 Δ ,并且在 Δ 间是随机分布的,可以将量化噪声看成白噪声,其总功率为一个常数。由于噪声总功率一定,所以采样频率越高,叠加在信号部分的量化噪声就越小^[18]。

根据采样定理,采样频率 f_s 必须大于信号最高频率 f_m 的2倍。而过采样则是在 $2f_m$ 的基础上将采样频率再提高一定的倍数,即采样频率为 $k \cdot 2f_m$ (k 为过采样系数)。过采样后,信号和噪声功率不发生改变,但是噪声功率分布频带展宽,平均噪声功率减小,达到提高信噪比的效果^[19]。

采样率 f_s 和信噪比 R_{SN} 的关系如式(3)所示^[19]。

$$R_{\text{SN}} = 6.02N_b + 1.76 + 10 \log_{10} [f_s / (2f_m)] \quad (3)$$

式(3)表明, f_s 每增加4倍,与 N_b 增加1位是等效的,均使信噪比增加6.02 dB。

有些AD芯片或处理器本身已经集成了过采样技术^[24-25],因此过采样过程完全不需要CPU的参与。即使AD芯片未集成过采样技术,也可以借助直接存储器访问(direct memory access, DMA)技术将采样数据自动搬运至事先指定的缓冲区内,在达到规定数据量后DMA申请中断,CPU响应中断并将缓冲区内采样数据累加求平均,需要的计算量和计算时间都非常少,因此使用过采样技术不会给CPU增加太多负担。

3 均值滤波器对谐波分析的影响与校正

采用过采样后, 同样时长的采样点数增大, 尤其是高倍率的过采样, 会使采样点数急剧增大, 需要的存储空间和 FFT 运算时长均显著增加, 对硬件电路的要求随之提高。为避免硬件成本的增加, 当过采样率较大时, 可采用均值滤波器对过采样值进行滤波, 以降低采样点数, 减小存储空间和计算量, 同时还可以抑制量化误差和噪声^[18-20]。采样数据处理流程如图 1 所示。图 1 中实线表示原始信号, 额定频率为 f_c , 小圆点表示采样数据。假设信号每个额定周期采样 N 点, 则采样频率 f_s 为 Nf_c , 均值滤波器每 k 个采样点进行一次求平均运算, 经过均值滤波器后, 所得信号的等效采样频率 f_{s1} 为 Nf_c/k 。

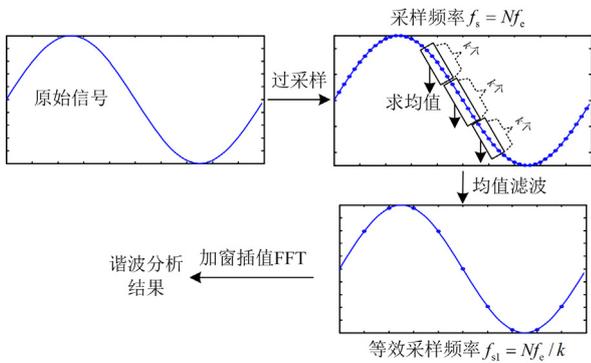


图 1 采样数据处理流程

Fig. 1 Sampling data processing flow

根据图 1 采样数据的处理流程, k 倍过采样只需要额外开辟 k 个存储空间用来暂存 k 个最新采样数据, 每采样 k 个数据就求一次均值并输出。假设最终用于 FFT 分析的序列长度为 L 个, 则引入 k 倍过采样需要的数据存储空间总数为 $L+k$ 个。

图 1 采样数据处理流程中, 均值滤波会对信号的频谱产生影响, 进而产生谐波分析误差。以下通过分析均值滤波器的幅频和相频特性来分析和量化这种误差。式(4)为 k 点均值滤波器对应的差分方程。

$$y(n) = \frac{1}{k}[x(n) + x(n+1) + \dots + x(n+k-1)] \quad (4)$$

对应的 Z 变换为

$$Y(z) = \frac{1}{k}[X(z) + X(z)z + \dots + X(z)z^{(k-1)}] \quad (5)$$

均值滤波器的传递函数为

$$H(z) = Y(z)/X(z) = \frac{1}{k}[1 + z + \dots + z^{(k-1)}] = \frac{1}{k} \frac{1 - z^k}{1 - z} \quad (6)$$

令 $z = e^{j\omega T_s}$ (ω 为角频率, T_s 为采样周期, $T_s = 1/f_s$), 得均值滤波器的频谱特性:

$$H(e^{j\omega T_s}) = \frac{1}{k} \frac{1 - e^{jk\omega T_s}}{1 - e^{j\omega T_s}} \quad (7)$$

由于

$$\begin{aligned} 1 - e^{jk\omega T_s} &= 1 - \cos(k\omega T_s) - j\sin(k\omega T_s) = \\ &= 2\sin^2(k\omega T_s/2) - 2j\sin(k\omega T_s/2)\cos(k\omega T_s/2) = \\ &= 2\sin(k\omega T_s/2)\angle(3\pi/2 + k\omega T_s/2) \end{aligned} \quad (8)$$

同理

$$1 - e^{j\omega T_s} = 2\sin(\omega T_s/2)\angle(3\pi/2 + \omega T_s/2) \quad (9)$$

于是

$$H(e^{j\omega T_s}) = \frac{1}{k} \frac{1 - e^{jk\omega T_s}}{1 - e^{j\omega T_s}} = \frac{\sin(k\omega T_s/2)}{k \sin(\omega T_s/2)} \angle \frac{\omega(k-1)T_s}{2} \quad (10)$$

令 $\omega = 2\pi f$, $f_s = Nf_c$

$$H(e^{j2\pi f/N/f_c}) = \frac{\sin\left(\pi \frac{kf}{Nf_c}\right)}{k \sin\left(\pi \frac{f}{Nf_c}\right)} \angle \frac{\pi f(k-1)}{Nf_c} \quad (11)$$

令

$$\delta = \frac{kf}{Nf_c} \quad (12)$$

则式(11)可表示为

$$H(e^{j2\pi f/N/f_c}) = \frac{\sin(\pi\delta)}{k \sin(\pi\delta/k)} \angle \pi\delta(1-1/k) = S(\delta)\angle p(\delta) \quad (13)$$

其中:

$$S(\delta) = \frac{\sin(\pi\delta)}{k \sin(\pi\delta/k)}, p(\delta) = \pi\delta(1-1/k) \quad (14)$$

这里应该有 $\delta < 1/2$, 即 $kf/f_c < N/2$, 因为均值滤波后的信号仍需要满足采样定理以避免谐波分析时的频谱混叠, 结合图 1 中均值滤波前后等效采样频率的关系有

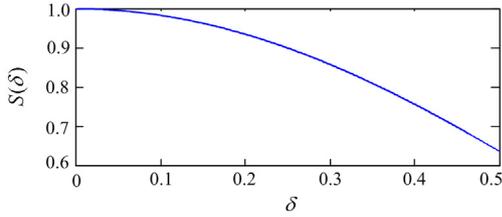
$$f_s/k = Nf_c/k > 2f_m \Rightarrow kf_m/(Nf_c) < 1/2 \quad (15)$$

根据式(12)、式(15), 有 $\delta < 1/2$ 成立, 则 $S(\delta)$ 是一个在区间 $[0, 0.5]$ 上的函数, 图 2 给出 $k=64$ 时的 $S(\delta)$ 函数曲线。

由图 2 可知, 随着 δ 的增大(即谐波频率的提高), 均值滤波器对谐波幅值和相位影响增大, 必须进行校正, 否则不能得到信号中各次谐波的真实值。

假定信号基波频率为 f_1 , d 次谐波的频率为 f_d , 则校正基波和 d 次谐波幅值的公式为

$$\delta = k \cdot f_d / (Nf_c), d = 1, 2, 3, \dots, 11 \quad (16)$$

图2 $S(\delta)$ 函数曲线图Fig. 2 $S(\delta)$ function curve

$$X_d^A = Y_d^A S_{\text{inv}}(\delta) \quad (17)$$

其中

$$S_{\text{inv}}(\delta) = \frac{1}{S(\delta)} = \frac{k \sin(\pi\delta/k)}{\sin(\pi\delta)} \quad x \in [0, 0.5] \quad (18)$$

式中: X_d^A 表示序列 $x(n)$ 中 d 次谐波的幅值; Y_d^A 表示序列 $y(n)$ 中 d 次谐波的幅值。

校正基波和各次谐波相位的公式为

$$X_d^{\phi} = Y_d^{\phi} - \pi\delta(1-1/k) \quad (19)$$

式中: X_d^{ϕ} 表示序列 $x(n)$ 中 d 次谐波的相位; Y_d^{ϕ} 表示序列 $y(n)$ 中 d 次谐波的相位。

4 算法的实现流程

经过均值滤波的信号,再通过加窗插值 FFT 算法分析其中的谐波成分,加窗插值 FFT 算法已有很多文献研究,算法成熟,本文仅简述如下:

1) 选取基波频点附近的若干谱线,构造幅值比关系式,然后利用幅值比与基波频率的关系,求得基波频率,记求得的基波频率为 f_1 ;

2) 根据求得的 f_1 和所加窗函数的频谱特征,对基波和各次谐波的幅值和相位进行插值计算。

由于前面均值滤波器的影响,加窗 FFT 插值校正之后得到的谐波幅值和相位并不是信号中原始谐波成分的幅值和相位,应当在此基础上进一步按式(16)一式(19)进行矫正,以得到原始谐波成分的幅值和相位。

因此,基于高倍过采样和插值 FFT 的电力谐波分析算法流程如下:

- 1) 以过采样方式采样数据 $x(n)$;
- 2) 通过均值滤波器对原始采样数据进行滤波处理得到序列 $y(n)$;
- 3) 对 $y(n)$ 进行加窗处理,得到数据 $y_w(n)$;
- 4) 对 $y_w(n)$ 进行 FFT 得到结果 $Y_w(n)$;
- 5) 利用谱线幅值比法计算出基波频率;
- 6) 根据计算出的基波频率,进行第一次校正,得到序列 $y_w(n)$ 中基波和各次谐波的幅值和相位;
- 7) 根据第一次校正的结果和基波频率 f_1 ,按照

式(16)一式(19)进行二次校正,得到原始采样序列 $x(n)$ 中基波和各次谐波的幅值和相位。

本文所提谐波分析算法引入高倍过采样技术提高信噪比,通过均值滤波避免高倍过采样引起的采样数据量激增问题,并通过二次校正克服均值滤波引起的谐波幅值及相位误差。与常规的加窗 FFT 谐波分析算法相比,具有更好的抗噪声能力,有望在噪声环境中获得更好的精度。

5 仿真分析

本文所提算法是基于噪声背景的,因此,仿真采用的信号模型是含噪声模型,如式(20)所示。

$$\begin{cases} x(t) = A_0 + \sum_{d=1}^{11} A_d \sin(2\pi d f_1 t + \varphi_d) + W_h(t) \\ t = i \times T_s = i / f_s, i = 0, 1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (20)$$

式中: A_0 表示信号直流偏移; $A_d (d=1, 2, \dots, 11)$ 表示 d 次谐波幅值; φ_d 表示 d 次谐波初相位; $W_h(t)$ 表示白噪声; L 表示采样序列长度; i 为采样点序号。

基波与谐波信号构成如表 2 所示。本文假定 AD 转换器的量程在 0~5 V 范围内,因此仿真信号中存在一个 2.5 V 的直流偏置电压,各次谐波的幅值均设置在 2.5 V 之内,以保证仿真信号的幅值不超过 AD 量程。

表 2 仿真信号构成

Table 2 Simulation signal composition

谐波次数	幅值/V	相位/(°)	谐波次数	幅值/V	相位/(°)
0	2.5	—	5	0.05	60
基波	2	30	7	0.04	-50
2	0.02	5	9	0.03	-100
3	0.1	160	11	0.02	20

注: 0 次谐波幅值表示直流偏置电压。

仿真信号的基波频率根据仿真需要设置为两种情况:近似同步采样情况下基波频率设置为 50.02 Hz;非同步采样情况下基波频率设置为 50.2 Hz。

电力谐波分析常用的 AD 转换器有 12 位与 16 位,篇幅所限本文仅给出 12 位 AD 转换器下的仿真结果。仿真中,采用 Matlab 2019b 中的 ideal ADC quantizer 来模拟 AD 的量化过程。

由于量化误差与白噪声具有随机性,单独一次的测量结果具有偶然性,难以衡量算法的优劣,因此以下仿真均是进行多次计算的结果。具体来讲,就是对式(20)含噪声信号进行 100 次谐波分析,计算出每次谐波分析的幅值误差 A_{err} 和相位误差 φ_{err} ,幅值误差、相位误差分别按式(21)、式(22)计算。

$$A_{\text{erro}} = \left| A_d^z - A_d^c \right| / A_d^z \times 100\% \quad (21)$$

$$\varphi_{\text{erro}} = \left| \varphi_d^z - \varphi_d^c \right| \quad (22)$$

式中: A_d^z 为 d 次谐波幅值的真值(见表2); A_d^c 为 d 次谐波幅值的测量值; φ_d^z 为 d 次谐波初相位的真值(见表2); φ_d^c 为 d 次谐波初相位的测量值。

再计算出100次测量误差的均值和方差, 如式(23)、式(24), 并根据均值和方差来衡量算法的精度。

$$\begin{cases} A_{\text{erro_mean}} = \text{mean}(A_{\text{erro100}}) \\ A_{\text{erro_std}} = \text{std}(A_{\text{erro100}}) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \varphi_{\text{erro_mean}} = \text{mean}(\varphi_{\text{erro100}}) \\ \varphi_{\text{erro_std}} = \text{std}(\varphi_{\text{erro100}}) \end{cases} \quad (24)$$

式中: A_{erro100} 表示100次谐波幅值误差组成的数组; φ_{erro100} 表示100次谐波相位误差组成的数组; mean 函数表示求数组中所有元素的均值; std 表示求数组中所有元素的方差。幅值(相位)误差的均值和方差越接近于0, 则表明算法获得高精度的概率越大。

5.1 近似同步采样情况下仿真分析

在一些采用软件或硬件同步措施的场合, 采样过程接近同步采样, 这种情况下频谱泄漏非常小, 量化误差是影响谐波分析精度的主要因素。本节将基

波频率设置为 50.02 Hz, 模拟近似同步采样的情况。

为较全面地检验所提算法的谐波分析效果, 分别对加 4 种不同窗函数的情况进行仿真, 4 种窗函数分别为 Hanning 窗、Hanning 卷积窗、4 项 5 阶 Nuttall 窗、Nuttall 卷积窗。

为对比分析, 每个窗函数下又分别采用 3 种算法进行谐波分析, 算法 1 采样频率为 5120 Hz, 采样时长为 0.2 s, 采样点数为 1024 点, 采样后直接对这 1024 点数据进行加窗插值 FFT 分析得到信号中各次谐波的幅值与相位。算法 2 采样频率为 5120 Hz \times 64 = 327 680 Hz, 采样时长为 0.2 s, 采样点数为 65 536 点, 之后直接对这 65 536 点数据进行加窗插值 FFT 分析得到信号中各次谐波的幅值与相位。算法 3 为本文所提算法, 即采样频率也为 327 680 Hz, 采样时长也是 0.2 s, 但每采样 64 点进行一次均值滤波, 最后得到的采样数据仍为 1024 点, 之后采用加窗插值 FFT 以及本文提出的谐波幅值和相位校正方法计算得到信号中各次谐波的幅值与相位。同一窗函数下 3 种算法采用的插值 FFT 算法是相同的, 分别为: Hanning 窗采用文献[5]的方法, Nuttall 窗采用文献[6]的方法, Hanning 卷积窗采用文献[9]的方法, Nuttall 卷积窗采用文献[10]的方法。

表 3、表 4 分别给出了信噪比为 60 dB 时的谐波幅值和相位的仿真结果。对比每种窗函数下的 3 种

表 3 谐波幅值仿真结果($f_0 = 50.02$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{\text{SN}} = 60$ dB)

Table 3 Simulation results of harmonic amplitude ($f_0 = 50.02$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{\text{SN}} = 60$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数							
			1	2	3	5	7	9	11	
Hanning窗	均值	1	6.89×10^{-3}	6.34×10^{-1}	1.71×10^{-1}	2.67×10^{-1}	3.67×10^{-1}	5.32×10^{-1}	5.64×10^{-1}	
		2	8.42×10^{-4}	8.93×10^{-2}	1.52×10^{-2}	3.59×10^{-2}	4.67×10^{-2}	5.60×10^{-2}	9.32×10^{-2}	
		3	9.06×10^{-4}	8.80×10^{-2}	1.83×10^{-2}	3.52×10^{-2}	4.61×10^{-2}	6.02×10^{-2}	9.66×10^{-2}	
	方差	1	4.88×10^{-3}	5.15×10^{-1}	1.16×10^{-1}	1.93×10^{-1}	2.50×10^{-1}	4.09×10^{-1}	4.59×10^{-1}	
		2	6.19×10^{-4}	6.75×10^{-2}	1.18×10^{-2}	2.79×10^{-2}	3.43×10^{-2}	3.69×10^{-2}	6.74×10^{-2}	
		3	6.79×10^{-4}	6.90×10^{-2}	1.40×10^{-2}	2.61×10^{-2}	3.43×10^{-2}	4.32×10^{-2}	7.27×10^{-2}	
Hanning卷积窗	均值	1	7.08×10^{-3}	6.51×10^{-1}	1.44×10^{-1}	2.98×10^{-1}	4.00×10^{-1}	4.57×10^{-1}	7.01×10^{-1}	
		2	8.28×10^{-4}	1.07×10^{-1}	1.91×10^{-2}	3.38×10^{-2}	4.23×10^{-2}	6.40×10^{-2}	9.81×10^{-2}	
		3	9.30×10^{-4}	9.15×10^{-2}	1.72×10^{-2}	3.69×10^{-2}	4.56×10^{-2}	6.80×10^{-2}	8.71×10^{-2}	
	方差	1	5.89×10^{-3}	5.01×10^{-1}	1.30×10^{-1}	2.11×10^{-1}	2.92×10^{-1}	3.62×10^{-1}	5.62×10^{-1}	
		2	6.57×10^{-4}	7.47×10^{-2}	1.43×10^{-2}	2.46×10^{-2}	3.62×10^{-2}	4.87×10^{-2}	6.68×10^{-2}	
		3	7.41×10^{-4}	7.73×10^{-2}	1.26×10^{-2}	3.11×10^{-2}	3.22×10^{-2}	5.48×10^{-2}	6.06×10^{-2}	
Nuttall窗	均值	1	8.07×10^{-3}	9.99×10^{-1}	1.69×10^{-1}	4.10×10^{-1}	5.35×10^{-1}	5.92×10^{-1}	8.79×10^{-1}	
		2	1.11×10^{-3}	9.84×10^{-2}	2.41×10^{-2}	3.87×10^{-2}	4.43×10^{-2}	7.31×10^{-2}	1.08×10^{-1}	
		3	1.04×10^{-3}	1.13×10^{-1}	2.08×10^{-2}	4.55×10^{-2}	5.52×10^{-2}	6.88×10^{-2}	1.12×10^{-1}	
	方差	1	6.42×10^{-3}	6.80×10^{-1}	1.31×10^{-1}	3.17×10^{-1}	3.39×10^{-1}	4.83×10^{-1}	6.48×10^{-1}	
		2	7.91×10^{-4}	7.83×10^{-2}	2.01×10^{-2}	2.83×10^{-2}	3.58×10^{-2}	6.05×10^{-2}	7.38×10^{-2}	
		3	7.73×10^{-4}	8.47×10^{-2}	1.66×10^{-2}	3.39×10^{-2}	4.26×10^{-2}	5.39×10^{-2}	9.02×10^{-2}	
Nuttall卷积窗	均值	1	9.88×10^{-3}	9.90×10^{-1}	1.85×10^{-1}	4.16×10^{-1}	4.99×10^{-1}	6.82×10^{-1}	1.11×10^0	
		2	1.22×10^{-3}	1.32×10^{-1}	2.63×10^{-2}	5.18×10^{-2}	6.65×10^{-2}	7.21×10^{-2}	1.29×10^{-1}	
		3	8.78×10^{-4}	9.17×10^{-2}	2.06×10^{-2}	3.79×10^{-2}	4.99×10^{-2}	6.80×10^{-2}	1.04×10^{-1}	
	方差	1	7.05×10^{-3}	7.90×10^{-1}	1.40×10^{-1}	3.09×10^{-1}	3.68×10^{-1}	4.97×10^{-1}	7.84×10^{-1}	
		2	9.08×10^{-4}	8.95×10^{-2}	1.85×10^{-2}	3.73×10^{-2}	5.26×10^{-2}	5.40×10^{-2}	9.83×10^{-2}	
		3	6.13×10^{-4}	7.11×10^{-2}	1.53×10^{-2}	2.79×10^{-2}	3.31×10^{-2}	5.08×10^{-2}	6.99×10^{-2}	

表 4 谐波相位仿真结果($f_0 = 50.02$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{SN} = 60$ dB)
Table 4 Simulation results of harmonic phase ($f_0 = 50.02$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{SN} = 60$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	1.92×10^{-4}	6.17×10^{-3}	1.32×10^{-3}	2.79×10^{-3}	3.32×10^{-3}	1.02×10^{-3}	7.04×10^{-3}
		2	2.38×10^{-5}	7.72×10^{-4}	1.75×10^{-4}	3.01×10^{-4}	3.92×10^{-4}	4.38×10^{-4}	7.59×10^{-4}
		3	2.40×10^{-5}	7.88×10^{-4}	1.71×10^{-4}	3.16×10^{-4}	4.18×10^{-4}	5.53×10^{-4}	8.13×10^{-4}
	方差	1	1.37×10^{-4}	4.88×10^{-3}	1.16×10^{-3}	1.99×10^{-3}	2.68×10^{-3}	4.61×10^{-3}	4.85×10^{-3}
		2	1.86×10^{-5}	6.00×10^{-4}	1.41×10^{-4}	2.55×10^{-4}	2.98×10^{-4}	7.47×10^{-4}	6.36×10^{-4}
		3	1.77×10^{-5}	5.87×10^{-4}	1.26×10^{-4}	2.41×10^{-4}	3.08×10^{-4}	4.16×10^{-4}	6.31×10^{-4}
Hanning卷积窗	均值	1	3.56×10^{-4}	8.56×10^{-3}	1.71×10^{-3}	3.65×10^{-3}	3.71×10^{-3}	5.95×10^{-3}	8.38×10^{-3}
		2	4.64×10^{-5}	8.83×10^{-4}	2.24×10^{-4}	4.54×10^{-4}	5.93×10^{-4}	6.94×10^{-4}	1.11×10^{-3}
		3	4.47×10^{-5}	8.38×10^{-4}	2.49×10^{-4}	4.58×10^{-4}	5.11×10^{-4}	7.48×10^{-4}	9.38×10^{-4}
	方差	1	2.61×10^{-4}	5.53×10^{-3}	1.31×10^{-3}	2.97×10^{-3}	2.96×10^{-3}	7.22×10^{-3}	6.89×10^{-3}
		2	3.04×10^{-5}	6.55×10^{-4}	1.78×10^{-4}	3.48×10^{-4}	4.09×10^{-4}	7.88×10^{-4}	9.05×10^{-4}
		3	3.34×10^{-5}	7.22×10^{-4}	1.87×10^{-4}	3.56×10^{-4}	4.08×10^{-4}	5.34×10^{-4}	6.93×10^{-4}
Nuttall窗	均值	1	3.28×10^{-4}	9.00×10^{-3}	1.97×10^{-3}	3.58×10^{-3}	4.50×10^{-3}	5.06×10^{-3}	8.19×10^{-3}
		2	3.82×10^{-5}	8.96×10^{-4}	2.29×10^{-4}	4.34×10^{-4}	5.38×10^{-4}	7.73×10^{-4}	1.02×10^{-3}
		3	4.27×10^{-5}	9.56×10^{-4}	2.17×10^{-4}	4.72×10^{-4}	5.54×10^{-4}	6.72×10^{-4}	1.05×10^{-3}
	方差	1	2.55×10^{-4}	6.63×10^{-3}	1.27×10^{-3}	2.87×10^{-3}	3.05×10^{-3}	7.24×10^{-3}	6.37×10^{-3}
		2	3.23×10^{-5}	7.05×10^{-4}	1.73×10^{-4}	3.32×10^{-4}	4.06×10^{-4}	1.00×10^{-3}	6.90×10^{-4}
		3	3.18×10^{-5}	7.59×10^{-4}	1.73×10^{-4}	3.05×10^{-4}	3.76×10^{-4}	5.58×10^{-4}	9.42×10^{-4}
Nuttall卷积窗	均值	1	4.45×10^{-4}	8.25×10^{-3}	2.26×10^{-3}	3.68×10^{-3}	5.49×10^{-3}	7.34×10^{-3}	8.91×10^{-3}
		2	5.96×10^{-5}	1.21×10^{-3}	2.71×10^{-4}	5.19×10^{-4}	6.40×10^{-4}	9.52×10^{-4}	1.26×10^{-3}
		3	4.38×10^{-5}	9.25×10^{-4}	2.27×10^{-4}	4.17×10^{-4}	4.91×10^{-4}	7.37×10^{-4}	1.01×10^{-3}
	方差	1	3.61×10^{-4}	6.01×10^{-3}	1.80×10^{-3}	3.28×10^{-3}	4.28×10^{-3}	8.07×10^{-3}	6.09×10^{-3}
		2	4.23×10^{-5}	8.79×10^{-4}	2.19×10^{-4}	3.92×10^{-4}	5.41×10^{-4}	1.07×10^{-3}	9.66×10^{-4}
		3	3.35×10^{-5}	7.12×10^{-4}	1.86×10^{-4}	3.38×10^{-4}	3.81×10^{-4}	5.37×10^{-4}	7.28×10^{-4}

算法可以发现,无论是谐波幅值还是相位,算法 2 和算法 3 的均值和方差均明显小于算法 1(近似有一个数量级的差别),表明算法 2 与算法 3 的精度普遍高于算法 1,这得益于算法 2、3 有更好的抗噪声能力。另外算法 2 和算法 3 的均值和方差均相当接近,因此可认为二者精度相当,但算法 3 所需的计算量和存储空间明显小于算法 2,因为算法 2 需要的存储空间为 65 536 个,而根据前文分析,算法 3 需要的存储空间仅为 1024 + 64 个,仅为算法 2 的约 1/64。在计算时间上,通过对算法的用时测量,算法 3 的耗时约为算法 2 的 1/15。算法 3 在达到相同精度的情况下存储空间和运算时间均有明显减少。

5.2 非同步采样情况下仿真分析

为检验所提算法在非同步采样情况下的谐波分

析效果,本节将基波频率设置为 50.2 Hz,再次进行仿真,所得结果如表 5、表 6 所示。对比表中每个窗函数下 3 种算法的均值和方差可以发现,算法 2 和算法 3 的均值和方差均明显小于算法 1,同时算法 2 和算法 3 的均值及方差均相当接近。表明在非同步采样下,算法 2 与算法 3 的精度仍然普遍高于算法 1,且算法 2 和算法 3 精度相当。

除表 3—表 6 外,本文还进行了 SNR 为 80 dB 以及采用 16 位 AD 转换器情形下的仿真,由于仿真结果数据量较大放在了附录 A 中。这些仿真结果均表明算法 2 与算法 3 的精度相当且均普遍高于算法 1,而算法 3 在计算量和存储空间需求上明显小于算法 2。

表 5 非同步采样时谐波幅值仿真结果($f_0 = 50.2$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{SN} = 60$ dB)Table 5 Simulation results of harmonic amplitude in asynchronous sampling ($f_0 = 50.2$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{SN} = 60$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	7.18×10^{-3}	7.54×10^{-1}	1.31×10^{-1}	2.89×10^{-1}	3.50×10^{-1}	4.92×10^{-1}	8.36×10^{-1}
		2	9.67×10^{-4}	8.40×10^{-2}	1.54×10^{-2}	4.02×10^{-2}	4.70×10^{-2}	5.28×10^{-2}	1.06×10^{-1}
		3	8.34×10^{-4}	8.47×10^{-2}	1.70×10^{-2}	3.38×10^{-2}	4.55×10^{-2}	6.47×10^{-2}	9.99×10^{-2}
	方差	1	5.90×10^{-3}	6.30×10^{-1}	1.07×10^{-1}	2.02×10^{-1}	2.78×10^{-1}	3.51×10^{-1}	5.12×10^{-1}
		2	7.57×10^{-4}	6.48×10^{-2}	1.15×10^{-2}	2.79×10^{-2}	3.73×10^{-2}	4.22×10^{-2}	7.68×10^{-2}
		3	6.20×10^{-4}	6.52×10^{-2}	1.17×10^{-2}	2.54×10^{-2}	3.41×10^{-2}	4.98×10^{-2}	7.53×10^{-2}
Hanning 卷积窗	均值	1	7.70×10^{-3}	7.00×10^{-1}	1.44×10^{-1}	3.00×10^{-1}	3.83×10^{-1}	5.52×10^{-1}	8.38×10^{-1}
		2	8.67×10^{-4}	8.74×10^{-2}	1.80×10^{-2}	3.52×10^{-2}	4.91×10^{-2}	6.97×10^{-2}	9.87×10^{-2}
		3	7.87×10^{-4}	8.60×10^{-2}	2.05×10^{-2}	4.24×10^{-2}	5.13×10^{-2}	7.08×10^{-2}	9.56×10^{-2}
	方差	1	6.18×10^{-3}	5.29×10^{-1}	1.16×10^{-1}	2.30×10^{-1}	2.86×10^{-1}	3.98×10^{-1}	7.33×10^{-1}
		2	6.68×10^{-4}	6.76×10^{-2}	1.24×10^{-2}	2.79×10^{-2}	3.51×10^{-2}	5.10×10^{-2}	7.81×10^{-2}
		3	6.02×10^{-4}	7.41×10^{-2}	1.50×10^{-2}	3.37×10^{-2}	3.64×10^{-2}	4.53×10^{-2}	7.22×10^{-2}
Nuttall窗	均值	1	8.90×10^{-3}	8.73×10^{-1}	1.98×10^{-1}	3.50×10^{-1}	4.47×10^{-1}	6.11×10^{-1}	1.02×10^0
		2	9.28×10^{-4}	1.20×10^{-1}	1.95×10^{-2}	4.65×10^{-2}	5.17×10^{-2}	6.63×10^{-2}	1.17×10^{-1}
		3	9.83×10^{-4}	1.12×10^{-1}	2.26×10^{-2}	4.04×10^{-2}	5.46×10^{-2}	6.43×10^{-2}	1.06×10^{-1}
	方差	1	6.65×10^{-3}	6.50×10^{-1}	1.51×10^{-1}	2.72×10^{-1}	3.26×10^{-1}	4.68×10^{-1}	7.90×10^{-1}
		2	6.99×10^{-4}	8.79×10^{-2}	1.63×10^{-2}	3.70×10^{-2}	4.11×10^{-2}	5.19×10^{-2}	9.55×10^{-2}
		3	7.52×10^{-4}	8.29×10^{-2}	1.69×10^{-2}	3.50×10^{-2}	3.94×10^{-2}	4.94×10^{-2}	9.04×10^{-2}
Nuttall 卷积窗	均值	1	1.02×10^{-2}	8.91×10^{-1}	1.82×10^{-1}	4.13×10^{-1}	5.35×10^{-1}	7.00×10^{-1}	9.81×10^{-1}
		2	1.22×10^{-3}	1.26×10^{-1}	2.61×10^{-2}	5.48×10^{-2}	5.65×10^{-2}	6.85×10^{-2}	1.16×10^{-1}
		3	1.21×10^{-3}	1.21×10^{-1}	2.48×10^{-2}	4.97×10^{-2}	5.98×10^{-2}	8.55×10^{-2}	1.17×10^{-1}
	方差	1	8.46×10^{-3}	6.60×10^{-1}	1.58×10^{-1}	2.73×10^{-1}	3.72×10^{-1}	5.12×10^{-1}	7.04×10^{-1}
		2	8.56×10^{-4}	8.90×10^{-2}	1.94×10^{-2}	4.58×10^{-2}	3.94×10^{-2}	5.16×10^{-2}	8.45×10^{-2}
		3	7.32×10^{-4}	8.98×10^{-2}	1.85×10^{-2}	3.64×10^{-2}	4.84×10^{-2}	6.58×10^{-2}	9.03×10^{-2}

表 6 非同步采样时谐波相位仿真结果($f_0 = 50.2$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{SN} = 60$ dB)Table 6 Simulation results of harmonic phase in asynchronous sampling ($f_0 = 50.2$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{SN} = 60$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	1.88×10^{-4}	6.73×10^{-3}	1.45×10^{-3}	2.12×10^{-3}	3.19×10^{-3}	5.07×10^{-3}	7.58×10^{-3}
		2	2.68×10^{-5}	1.16×10^{-3}	1.72×10^{-4}	3.39×10^{-4}	4.64×10^{-4}	5.42×10^{-4}	8.84×10^{-4}
		3	2.43×10^{-5}	1.12×10^{-3}	1.84×10^{-4}	3.29×10^{-4}	4.25×10^{-4}	5.77×10^{-4}	9.40×10^{-4}
	方差	1	1.50×10^{-4}	5.32×10^{-3}	1.06×10^{-3}	1.71×10^{-3}	2.17×10^{-3}	3.49×10^{-3}	5.43×10^{-3}
		2	2.01×10^{-5}	8.63×10^{-4}	1.21×10^{-4}	2.22×10^{-4}	3.99×10^{-4}	4.30×10^{-4}	6.59×10^{-4}
		3	1.76×10^{-5}	7.54×10^{-4}	1.44×10^{-4}	2.52×10^{-4}	3.50×10^{-4}	4.47×10^{-4}	6.97×10^{-4}
Hanning 卷积窗	均值	1	2.49×10^{-4}	8.28×10^{-3}	1.58×10^{-3}	3.31×10^{-3}	4.63×10^{-3}	5.96×10^{-3}	1.00×10^{-2}
		2	5.02×10^{-5}	1.01×10^{-3}	2.54×10^{-4}	4.48×10^{-4}	6.21×10^{-4}	7.98×10^{-4}	1.09×10^{-3}
		3	4.64×10^{-5}	9.32×10^{-4}	2.03×10^{-4}	4.37×10^{-4}	5.02×10^{-4}	7.69×10^{-4}	1.29×10^{-3}
	方差	1	1.97×10^{-4}	6.34×10^{-3}	1.21×10^{-3}	2.51×10^{-3}	3.87×10^{-3}	4.71×10^{-3}	7.41×10^{-3}
		2	3.46×10^{-5}	7.36×10^{-4}	1.79×10^{-4}	3.10×10^{-4}	4.23×10^{-4}	5.58×10^{-4}	8.33×10^{-4}
		3	3.12×10^{-5}	7.04×10^{-4}	1.53×10^{-4}	3.26×10^{-4}	3.97×10^{-4}	5.24×10^{-4}	9.52×10^{-4}

续表 6

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Nuttall窗	均值	1	3.29×10^{-4}	7.41×10^{-3}	1.90×10^{-3}	3.28×10^{-3}	4.73×10^{-3}	5.88×10^{-3}	8.63×10^{-3}
		2	4.60×10^{-5}	8.65×10^{-4}	2.46×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.17×10^{-4}	7.08×10^{-4}	1.19×10^{-3}
		3	4.37×10^{-5}	9.92×10^{-4}	2.35×10^{-4}	4.58×10^{-4}	6.11×10^{-4}	7.31×10^{-4}	1.18×10^{-3}
	方差	1	2.27×10^{-4}	4.73×10^{-3}	1.47×10^{-3}	2.53×10^{-3}	3.23×10^{-3}	4.87×10^{-3}	6.67×10^{-3}
		2	2.86×10^{-5}	5.92×10^{-4}	1.98×10^{-4}	3.25×10^{-4}	3.86×10^{-4}	5.17×10^{-4}	9.05×10^{-4}
		3	3.13×10^{-5}	7.58×10^{-4}	1.75×10^{-4}	3.62×10^{-4}	4.58×10^{-4}	5.60×10^{-4}	9.34×10^{-4}
Nuttall 卷积窗	均值	1	5.19×10^{-4}	1.04×10^{-2}	2.30×10^{-3}	5.07×10^{-3}	5.71×10^{-3}	7.65×10^{-3}	1.15×10^{-2}
		2	5.78×10^{-5}	1.23×10^{-3}	2.80×10^{-4}	5.91×10^{-4}	7.78×10^{-4}	1.02×10^{-3}	1.31×10^{-3}
		3	6.00×10^{-5}	1.17×10^{-3}	2.73×10^{-4}	5.24×10^{-4}	7.20×10^{-4}	9.89×10^{-4}	1.32×10^{-3}
	方差	1	3.85×10^{-4}	6.58×10^{-3}	1.85×10^{-3}	4.01×10^{-3}	3.87×10^{-3}	5.81×10^{-3}	7.56×10^{-3}
		2	4.35×10^{-5}	8.94×10^{-4}	2.17×10^{-4}	4.54×10^{-4}	5.67×10^{-4}	7.30×10^{-4}	1.07×10^{-3}
		3	4.34×10^{-5}	9.91×10^{-4}	2.22×10^{-4}	4.10×10^{-4}	5.07×10^{-4}	7.79×10^{-4}	8.89×10^{-4}

6 结论与展望

1) Hanning 卷积窗与 Nuttall 卷积窗比其母窗的信噪比损失更大。

2) 本文所提基于高倍过采样和加窗插值FFT的谐波分析方法可在不增加系统成本的前提下充分发挥AD转换器的潜力,改善加窗FFT的抗噪声能力,

提高谐波分析精度,且所需存储空间和计算量较小。

本文仍有一些问题没有解决: 1) 是否可以构造出更好的窗函数,既有较强的频谱泄漏抑制能力,信噪比损失又小; 2) 在一定的频偏和量化噪声下,如何选择窗函数才能既可抑制频谱泄漏,又能尽量减少信噪比损失。这些问题还需要进一步研究。

附录 A

表 A1 幅值分析结果($f_0 = 50.2$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{SN} = 80$ dB)

Table A1 Amplitude analysis result ($f_0 = 50.2$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{SN} = 80$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	1.14×10^{-3}	1.08×10^{-1}	2.35×10^{-2}	4.37×10^{-2}	5.73×10^{-2}	7.45×10^{-2}	1.35×10^{-1}
		2	1.37×10^{-4}	2.86×10^{-2}	2.53×10^{-3}	5.42×10^{-3}	6.65×10^{-3}	1.01×10^{-2}	1.50×10^{-2}
		3	1.52×10^{-4}	2.99×10^{-2}	2.91×10^{-3}	4.86×10^{-3}	6.78×10^{-3}	1.03×10^{-2}	1.47×10^{-2}
	方差	1	7.73×10^{-4}	7.74×10^{-2}	1.74×10^{-2}	2.92×10^{-2}	3.71×10^{-2}	5.32×10^{-2}	9.96×10^{-2}
		2	1.05×10^{-4}	1.55×10^{-2}	1.82×10^{-3}	4.22×10^{-3}	5.23×10^{-3}	7.93×10^{-3}	1.16×10^{-2}
		3	1.10×10^{-4}	1.68×10^{-2}	2.26×10^{-3}	3.62×10^{-3}	4.78×10^{-3}	7.61×10^{-3}	1.17×10^{-2}
Hanning 卷积窗	均值	1	1.29×10^{-3}	1.17×10^{-1}	2.48×10^{-2}	5.07×10^{-2}	6.06×10^{-2}	7.70×10^{-2}	1.19×10^{-1}
		2	1.37×10^{-4}	1.56×10^{-2}	2.76×10^{-3}	6.09×10^{-3}	7.41×10^{-3}	9.53×10^{-3}	1.60×10^{-2}
		3	1.49×10^{-4}	1.65×10^{-2}	3.04×10^{-3}	6.81×10^{-3}	6.81×10^{-3}	1.11×10^{-2}	1.71×10^{-2}
	方差	1	1.02×10^{-3}	8.55×10^{-2}	1.86×10^{-2}	3.47×10^{-2}	4.49×10^{-2}	5.30×10^{-2}	9.25×10^{-2}
		2	1.22×10^{-4}	1.19×10^{-2}	1.78×10^{-3}	4.64×10^{-3}	5.61×10^{-3}	7.15×10^{-3}	1.19×10^{-2}
		3	1.19×10^{-4}	1.16×10^{-2}	2.12×10^{-3}	5.36×10^{-3}	5.37×10^{-3}	8.28×10^{-3}	1.35×10^{-2}
Nuttall窗	均值	1	1.43×10^{-3}	1.30×10^{-1}	2.67×10^{-2}	6.00×10^{-2}	7.14×10^{-2}	9.52×10^{-2}	1.36×10^{-1}
		2	1.59×10^{-4}	1.87×10^{-2}	3.21×10^{-3}	6.38×10^{-3}	7.49×10^{-3}	1.31×10^{-2}	1.51×10^{-2}
		3	1.52×10^{-4}	1.74×10^{-2}	3.72×10^{-3}	6.51×10^{-3}	7.54×10^{-3}	1.19×10^{-2}	1.76×10^{-2}
	方差	1	8.98×10^{-4}	9.83×10^{-2}	2.14×10^{-2}	4.57×10^{-2}	5.02×10^{-2}	7.39×10^{-2}	1.12×10^{-1}
		2	1.31×10^{-4}	1.34×10^{-2}	2.49×10^{-3}	4.93×10^{-3}	5.94×10^{-3}	9.98×10^{-3}	1.31×10^{-2}
		3	1.13×10^{-4}	1.27×10^{-2}	2.57×10^{-3}	5.36×10^{-3}	5.76×10^{-3}	8.46×10^{-3}	1.20×10^{-2}
Nuttall 卷积窗	均值	1	1.59×10^{-3}	1.35×10^{-1}	3.97×10^{-2}	5.92×10^{-2}	7.25×10^{-2}	8.98×10^{-2}	1.45×10^{-1}
		2	1.74×10^{-4}	2.15×10^{-2}	4.22×10^{-3}	8.27×10^{-3}	9.87×10^{-3}	1.35×10^{-2}	1.85×10^{-2}
		3	2.08×10^{-4}	1.75×10^{-2}	3.40×10^{-3}	7.00×10^{-3}	9.83×10^{-3}	1.42×10^{-2}	1.90×10^{-2}
	方差	1	1.22×10^{-3}	1.11×10^{-1}	2.54×10^{-2}	4.15×10^{-2}	5.44×10^{-2}	7.90×10^{-2}	1.12×10^{-1}
		2	1.28×10^{-4}	1.67×10^{-2}	3.11×10^{-3}	6.12×10^{-3}	7.40×10^{-3}	1.06×10^{-2}	1.44×10^{-2}
		3	1.28×10^{-4}	1.35×10^{-2}	2.72×10^{-3}	5.43×10^{-3}	7.56×10^{-3}	1.05×10^{-2}	1.19×10^{-2}

表 A2 相位分析结果($f_0 = 50.2$ Hz, 12 位 AD 转换器, $R_{SN} = 80$ dB)Table A2 Phase analysis result ($f_0 = 50.2$ Hz, 12-bit AD converter, $R_{SN} = 80$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	2.97×10^{-5}	1.35×10^{-3}	2.29×10^{-4}	4.08×10^{-4}	5.18×10^{-4}	7.81×10^{-4}	1.20×10^{-3}
		2	5.91×10^{-6}	9.75×10^{-4}	4.92×10^{-5}	5.71×10^{-5}	6.99×10^{-5}	8.67×10^{-5}	1.76×10^{-4}
		3	5.30×10^{-6}	8.59×10^{-4}	3.75×10^{-5}	5.35×10^{-5}	7.97×10^{-5}	9.85×10^{-5}	1.73×10^{-4}
	方差	1	2.36×10^{-5}	9.13×10^{-4}	1.46×10^{-4}	3.26×10^{-4}	4.04×10^{-4}	5.71×10^{-4}	8.48×10^{-4}
		2	3.67×10^{-6}	1.39×10^{-4}	3.21×10^{-5}	4.65×10^{-5}	5.21×10^{-5}	6.73×10^{-5}	1.37×10^{-4}
		3	3.75×10^{-6}	1.41×10^{-4}	2.35×10^{-5}	4.26×10^{-5}	5.26×10^{-5}	7.22×10^{-5}	1.41×10^{-4}
Hanning 卷积窗	均值	1	5.57×10^{-5}	1.03×10^{-3}	2.62×10^{-4}	5.64×10^{-4}	8.74×10^{-4}	9.51×10^{-4}	1.35×10^{-3}
		2	3.89×10^{-5}	1.46×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.87×10^{-4}	2.77×10^{-4}	3.73×10^{-4}	4.38×10^{-4}
		3	3.99×10^{-5}	1.45×10^{-4}	1.19×10^{-4}	1.94×10^{-4}	2.87×10^{-4}	3.69×10^{-4}	4.52×10^{-4}
	方差	1	4.38×10^{-5}	8.19×10^{-4}	2.07×10^{-4}	4.46×10^{-4}	6.25×10^{-4}	7.45×10^{-4}	9.90×10^{-4}
		2	7.31×10^{-6}	1.18×10^{-4}	3.83×10^{-5}	7.94×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.45×10^{-4}	1.81×10^{-4}
		3	7.08×10^{-6}	1.03×10^{-4}	4.06×10^{-5}	7.47×10^{-5}	9.25×10^{-5}	1.39×10^{-4}	1.88×10^{-4}
Nuttall窗	均值	1	4.91×10^{-5}	1.19×10^{-3}	3.03×10^{-4}	6.29×10^{-4}	6.18×10^{-4}	9.53×10^{-4}	1.41×10^{-3}
		2	6.28×10^{-6}	1.58×10^{-4}	3.92×10^{-5}	8.14×10^{-5}	9.24×10^{-5}	1.27×10^{-4}	1.70×10^{-4}
		3	6.03×10^{-6}	1.46×10^{-4}	3.34×10^{-5}	6.57×10^{-5}	8.70×10^{-5}	1.18×10^{-4}	1.64×10^{-4}
	方差	1	3.96×10^{-5}	8.98×10^{-4}	2.41×10^{-4}	4.11×10^{-4}	4.57×10^{-4}	7.65×10^{-4}	9.52×10^{-4}
		2	4.86×10^{-6}	1.31×10^{-4}	2.36×10^{-5}	4.96×10^{-5}	7.74×10^{-5}	9.88×10^{-5}	1.21×10^{-4}
		3	4.68×10^{-6}	1.16×10^{-4}	2.79×10^{-5}	5.19×10^{-5}	6.72×10^{-5}	8.87×10^{-5}	1.36×10^{-4}
Nuttall 卷积窗	均值	1	7.54×10^{-5}	1.48×10^{-3}	3.65×10^{-4}	7.27×10^{-4}	9.60×10^{-4}	1.13×10^{-3}	1.77×10^{-3}
		2	9.61×10^{-6}	1.97×10^{-4}	4.51×10^{-5}	9.78×10^{-5}	1.09×10^{-4}	1.41×10^{-4}	1.97×10^{-4}
		3	9.23×10^{-6}	1.68×10^{-4}	4.49×10^{-5}	8.76×10^{-5}	9.81×10^{-5}	1.32×10^{-4}	2.08×10^{-4}
	方差	1	5.83×10^{-5}	1.09×10^{-3}	2.72×10^{-4}	5.29×10^{-4}	6.61×10^{-4}	8.76×10^{-4}	1.25×10^{-3}
		2	7.23×10^{-6}	1.51×10^{-4}	3.55×10^{-5}	6.51×10^{-5}	8.27×10^{-5}	9.76×10^{-5}	1.63×10^{-4}
		3	6.31×10^{-6}	1.25×10^{-4}	3.15×10^{-5}	6.80×10^{-5}	7.83×10^{-5}	1.00×10^{-4}	1.47×10^{-4}

表 A3 幅值分析结果($f_0 = 50.2$ Hz, 16 位 AD 转换器, $R_{SN} = 80$ dB)Table A3 Amplitude analysis result ($f_0 = 50.2$ Hz, 16-bit AD converter, $R_{SN} = 80$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	6.97×10^{-4}	7.08×10^{-2}	1.40×10^{-2}	2.73×10^{-2}	3.26×10^{-2}	4.98×10^{-2}	7.18×10^{-2}
		2	7.02×10^{-5}	1.80×10^{-2}	1.95×10^{-3}	3.20×10^{-3}	4.38×10^{-3}	6.54×10^{-3}	1.02×10^{-2}
		3	8.49×10^{-5}	1.90×10^{-2}	1.59×10^{-3}	3.35×10^{-3}	4.19×10^{-3}	5.45×10^{-3}	1.01×10^{-2}
	方差	1	5.04×10^{-4}	5.72×10^{-2}	1.06×10^{-2}	2.23×10^{-2}	2.89×10^{-2}	3.72×10^{-2}	5.39×10^{-2}
		2	6.06×10^{-5}	1.00×10^{-2}	1.43×10^{-3}	2.32×10^{-3}	3.60×10^{-3}	4.57×10^{-3}	8.02×10^{-3}
		3	6.46×10^{-5}	1.02×10^{-2}	1.31×10^{-3}	2.83×10^{-3}	3.50×10^{-3}	3.96×10^{-3}	7.61×10^{-3}
Hanning 卷积窗	均值	1	7.29×10^{-4}	8.11×10^{-2}	1.60×10^{-2}	3.67×10^{-2}	3.10×10^{-2}	5.00×10^{-2}	7.67×10^{-2}
		2	1.07×10^{-4}	1.05×10^{-2}	1.85×10^{-3}	3.94×10^{-3}	4.78×10^{-3}	6.78×10^{-3}	9.96×10^{-3}
		3	9.57×10^{-5}	1.05×10^{-2}	1.95×10^{-3}	3.97×10^{-3}	5.37×10^{-3}	7.68×10^{-3}	1.05×10^{-2}
	方差	1	5.44×10^{-4}	6.05×10^{-2}	1.21×10^{-2}	2.81×10^{-2}	2.54×10^{-2}	4.28×10^{-2}	5.88×10^{-2}
		2	7.69×10^{-5}	7.73×10^{-3}	1.48×10^{-3}	2.82×10^{-3}	3.48×10^{-3}	5.20×10^{-3}	7.73×10^{-3}
		3	7.63×10^{-5}	7.69×10^{-3}	1.45×10^{-3}	2.70×10^{-3}	3.76×10^{-3}	5.34×10^{-3}	7.53×10^{-3}
Nuttall窗	均值	1	8.68×10^{-4}	8.38×10^{-2}	1.65×10^{-2}	3.07×10^{-2}	4.55×10^{-2}	5.88×10^{-2}	9.06×10^{-2}
		2	1.21×10^{-4}	1.25×10^{-2}	2.18×10^{-3}	3.79×10^{-3}	5.58×10^{-3}	7.73×10^{-3}	1.22×10^{-2}
		3	9.49×10^{-5}	1.15×10^{-2}	2.34×10^{-3}	4.46×10^{-3}	5.29×10^{-3}	7.56×10^{-3}	9.96×10^{-3}
	方差	1	6.65×10^{-4}	6.15×10^{-2}	1.34×10^{-2}	2.49×10^{-2}	3.36×10^{-2}	4.26×10^{-2}	6.41×10^{-2}
		2	9.72×10^{-5}	8.78×10^{-3}	1.69×10^{-3}	3.03×10^{-3}	4.06×10^{-3}	6.30×10^{-3}	9.14×10^{-3}
		3	7.42×10^{-5}	8.30×10^{-3}	1.72×10^{-3}	3.47×10^{-3}	4.72×10^{-3}	4.82×10^{-3}	7.72×10^{-3}
Nuttall 卷积窗	均值	1	1.02×10^{-3}	1.01×10^{-1}	2.08×10^{-2}	3.98×10^{-2}	4.50×10^{-2}	7.04×10^{-2}	9.45×10^{-2}
		2	1.15×10^{-4}	1.45×10^{-2}	2.51×10^{-3}	5.79×10^{-3}	6.15×10^{-3}	7.88×10^{-3}	1.28×10^{-2}
		3	1.28×10^{-4}	1.20×10^{-2}	2.86×10^{-3}	5.28×10^{-3}	5.90×10^{-3}	8.44×10^{-3}	1.43×10^{-2}
	方差	1	7.02×10^{-4}	8.49×10^{-2}	1.61×10^{-2}	2.66×10^{-2}	3.49×10^{-2}	4.79×10^{-2}	7.38×10^{-2}
		2	8.44×10^{-5}	9.22×10^{-3}	2.01×10^{-3}	4.22×10^{-3}	4.16×10^{-3}	5.77×10^{-3}	8.62×10^{-3}
		3	9.07×10^{-5}	9.44×10^{-3}	2.03×10^{-3}	3.42×10^{-3}	4.68×10^{-3}	5.88×10^{-3}	1.05×10^{-2}

表 A4 相位分析结果($f_0 = 50.2$ Hz, 16 位 AD 转换器, $R_{SN} = 80$ dB)

Table A4 Phase analysis results ($f_0 = 50.2$ Hz, 16-bit AD converter, $R_{SN} = 80$ dB)

窗函数	比较项	算法	谐波次数						
			1	2	3	5	7	9	11
Hanning窗	均值	1	1.70×10^{-5}	1.03×10^{-3}	1.41×10^{-4}	2.73×10^{-4}	3.51×10^{-4}	4.60×10^{-4}	7.36×10^{-4}
		2	5.66×10^{-6}	9.29×10^{-4}	4.53×10^{-5}	4.31×10^{-5}	5.24×10^{-5}	6.99×10^{-5}	1.04×10^{-4}
		3	5.81×10^{-6}	8.33×10^{-4}	4.02×10^{-5}	4.05×10^{-5}	5.78×10^{-5}	6.06×10^{-5}	1.08×10^{-4}
	方差	1	1.22×10^{-5}	6.52×10^{-4}	1.11×10^{-4}	2.35×10^{-4}	2.80×10^{-4}	3.16×10^{-4}	5.95×10^{-4}
		2	2.86×10^{-6}	9.98×10^{-5}	2.25×10^{-5}	3.18×10^{-5}	4.10×10^{-5}	5.11×10^{-5}	7.28×10^{-5}
		3	3.15×10^{-6}	9.11×10^{-5}	2.06×10^{-5}	3.04×10^{-5}	4.26×10^{-5}	4.90×10^{-5}	8.61×10^{-5}
Hanning 卷积窗	均值	1	4.19×10^{-5}	9.07×10^{-4}	1.85×10^{-4}	3.53×10^{-4}	4.66×10^{-4}	6.29×10^{-4}	9.96×10^{-4}
		2	3.89×10^{-5}	1.04×10^{-4}	1.17×10^{-4}	2.04×10^{-4}	2.72×10^{-4}	3.46×10^{-4}	4.16×10^{-4}
		3	4.01×10^{-5}	1.10×10^{-4}	1.22×10^{-4}	2.00×10^{-4}	2.87×10^{-4}	3.54×10^{-4}	4.22×10^{-4}
	方差	1	2.80×10^{-5}	5.95×10^{-4}	1.54×10^{-4}	2.97×10^{-4}	3.84×10^{-4}	4.72×10^{-4}	6.45×10^{-4}
		2	3.92×10^{-6}	8.72×10^{-5}	2.59×10^{-5}	4.44×10^{-5}	5.95×10^{-5}	8.62×10^{-5}	1.16×10^{-4}
		3	4.18×10^{-6}	7.97×10^{-5}	2.94×10^{-5}	5.35×10^{-5}	5.73×10^{-5}	9.15×10^{-5}	1.28×10^{-4}
Nuttall窗	均值	1	3.60×10^{-5}	6.72×10^{-4}	1.72×10^{-4}	3.52×10^{-4}	4.20×10^{-4}	5.58×10^{-4}	9.45×10^{-4}
		2	4.09×10^{-6}	8.95×10^{-5}	2.10×10^{-5}	4.40×10^{-5}	5.42×10^{-5}	7.89×10^{-5}	1.11×10^{-4}
		3	4.51×10^{-6}	9.33×10^{-5}	2.29×10^{-5}	4.46×10^{-5}	6.04×10^{-5}	7.80×10^{-5}	1.04×10^{-4}
	方差	1	2.84×10^{-5}	4.87×10^{-4}	1.43×10^{-4}	2.89×10^{-4}	3.31×10^{-4}	3.97×10^{-4}	7.02×10^{-4}
		2	3.25×10^{-6}	5.75×10^{-5}	1.60×10^{-5}	3.40×10^{-5}	4.14×10^{-5}	6.11×10^{-5}	7.38×10^{-5}
		3	3.10×10^{-6}	6.53×10^{-5}	1.74×10^{-5}	3.14×10^{-5}	4.29×10^{-5}	6.01×10^{-5}	7.39×10^{-5}
Nuttall 卷积窗	均值	1	4.56×10^{-5}	1.01×10^{-3}	2.17×10^{-4}	4.56×10^{-4}	5.37×10^{-4}	5.91×10^{-4}	9.90×10^{-4}
		2	6.35×10^{-6}	1.01×10^{-4}	2.72×10^{-5}	6.14×10^{-5}	7.66×10^{-5}	9.94×10^{-5}	1.24×10^{-4}
		3	6.58×10^{-6}	1.12×10^{-4}	2.89×10^{-5}	5.73×10^{-5}	6.85×10^{-5}	1.09×10^{-4}	1.21×10^{-4}
	方差	1	3.74×10^{-5}	7.42×10^{-4}	1.78×10^{-4}	3.05×10^{-4}	4.28×10^{-4}	4.98×10^{-4}	7.59×10^{-4}
		2	4.82×10^{-6}	7.65×10^{-5}	2.08×10^{-5}	4.62×10^{-5}	6.38×10^{-5}	7.29×10^{-5}	9.20×10^{-5}
		3	4.44×10^{-6}	7.95×10^{-5}	1.98×10^{-5}	4.33×10^{-5}	5.95×10^{-5}	7.81×10^{-5}	8.10×10^{-5}

参考文献

[1] WANG Y, TANG J, SI J, et al. Power quality enhancement in islanded microgrids via closed-loop adaptive virtual impedance control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 163-179.

[2] 李倩, 雷诚诚, 刘霞. 电力系统谐波检测方法研究现状分析[J]. 通信电源技术, 2017, 34(5): 85-86.

LI Qian, LEI Chengcheng, LIU Xia. Analysis of harmonic detection methods in power system research status[J]. Telecom Power Technology, 2017, 34(5): 85-86.

[3] 周群, 官子超, 马晓阳, 等. 基于嵌入式系统的非同步采样高精度谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 138-146.

ZHOU Qun, GUAN Zichao, MA Xiaoyang, et al. High precision harmonic detection in non-synchronous sampling based on an embedded system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 138-146.

[4] 卿柏元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153-158.

QING Baiyuan, TENG Zhaosheng, GAO Yunpeng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 153-158.

[5] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 130-136.

NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. An algorithm for electrical harmonic analysis based on triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 130-136.

[6] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.

LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.

[7] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.

HUA Min, CHEN Jianyun. A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectral-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.

[8] 黄星宇, 罗萍萍, 龚锦霞, 等. 新能源并网系统次同步谐波相量检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 38-44.

HUANG Xingyu, LUO Pingping, GONG Jinxia, et al. Subsynchronous harmonic phasor detection in a renewable energy grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 38-44.

[9] 温和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164-169.

WEN He, TENG Zhaosheng, QING Baiyuan. Hanning

- self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [10] 刘冬梅, 杨重良, 张艳, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 12-17.
LIU Dongmei, YANG Zhongliang, ZHANG Yan, et al. Harmonic analysis of power system based on Nuttall self-convolution window four-spectral-line interpolation FFT[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2018, 41(1): 12-17.
- [11] 张超, 王维庆, 王海云, 等. 新能源汇集地区次同步谐波检测方法的研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 104-113.
ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on subsynchronous harmonic detection method in dense new energy areas[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(9): 104-113.
- [12] 陈至豪, 王立德, 王冲, 等. 基于组合余弦优化窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1105-1113.
CHEN Zhihao, WANG Lide, WANG Chong, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on optimized composite cosine window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1105-1113.
- [13] 陈砚圃, 张介秋, 谭薇. 交流电参数的卷积窗加权测量及其单片机实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 127-133.
CHEN Yanpu, ZHANG Jieqiu, TAN Wei. Convolution window weighted measurement for AC parameters and its MCU implementation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 127-133.
- [14] 宋树平, 马宏忠, 徐刚, 等. 五项最大旁瓣衰减窗插值电力谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 83-89, 103.
SONG Shuping, MA Hongzhong, XU Gang, et al. Analysis of the three-largest side petal attenuation window interpolation electric power harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 83-89, 103.
- [15] 孙冬雪, 王江波, 姚国盛, 等. 基于余弦平顶窗的谐波相量测量[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 139-147.
SUN Dongxue, WANG Jiangbo, YAO Guosheng, et al. Harmonic phasor measurement based on a cosine flat-top window[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 139-147.
- [16] 陈砚圃, 杨一鸣, 解云虹, 等. 一种基于准均匀采样的电力谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 115-120.
CHEN Yanpu, YANG Yiming, XIE Yunhong, et al. A power harmonic analysis method using quasi-uniform sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 115-120.
- [17] 张新刚, 王泽忠. 基于过采样技术提高数据采集精度的新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 58-62.
ZHANG Xingang, WANG Zezhong. A new method based on over-sampling technique to improve sampling precision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 58-62.
- [18] 郭纪佑, 范琦, 乔双. 过采样和非线性校正在中子发生器控制台上的应用[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, 53(2): 127-133.
GUO Jiyu, FAN Qi, QIAO Shuang. Application of oversampling and nonlinear error correction in neutron generator console[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2021, 53(2): 127-133.
- [19] 何峰, 李刚, 林凌. 基于过采样的通用生物电检测系统的实现[J]. 天津大学学报, 2008, 41(10): 1178-1182.
HE Feng, LI Gang, LIN Ling. Realization of an all-purpose bioelectricity detecting system based on oversampling technique[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(10): 1178-1182.
- [20] 洪磊, 谢川, 李玉玲, 等. 基于新过采样方法的 APF 电流 THD 测量[J]. 电力电子技术, 2011, 45(1): 96-98.
HONG Lei, XIE Chuan, LI Yuling, et al. The current THD measurement of active power filter based on a novel over-sampling method[J]. Power Electronics, 2011, 45(1): 96-98.
- [21] HARRIS F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(1): 51-83.
- [22] 邹宁, 徐松涛, 刘明园, 等. 一种重叠加窗频域抑制窄带干扰算法及研究[J]. 现代防御技术, 2010, 38(3): 120-125, 152.
ZOU Ning, XU Songtao, LIU Mingyuan, et al. An overlap window-based frequency-domain narrowband interference suppression algorithm and its analysis[J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3): 120-125, 152.
- [23] 曾祥华, 李峥嵘, 王飞雪. 扩频系统频域窄带干扰抑制算法加窗损耗研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(8): 1276-1281.
ZENG Xianghua, LI Zhengrong, WANG Feixue. Study on windowing degradation of frequency-domain narrowband interference suppression algorithms in spread spectrum system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(8): 1276-1281.
- [24] Analog Devices Inc. AD7606 datasheet[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7606_7606-6_7606-4.pdf.
- [25] STMicroelectronics. STM32G431 datasheet[EB/OL]. [2023-08-15]. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g431c6.pdf>.

收稿日期: 2023-07-02; 修回日期: 2023-08-17

作者简介:

张鸿博(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电能质量分析与控制、电力电子技术; E-mail: zhbbncwu@163.com

熊军华(1973—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网发电技术、电能质量分析与控制技术; E-mail: xjh2004@ncwu.edu.cn

蔡晓峰(1981—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统谐波分析与治理。E-mail: cxfzjy@126.com

(编辑 魏小丽)