

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902875

# 应用于高精度 ADC 频谱测试的改进加窗技术\*

付江铎 伍民顺 班 诚 郭 怡 许江涛

(西安交通大学 微电子学院 西安 710049)

**摘要:**在进行模数转换器(ADC)频谱测试时,通常需要满足相干采样条件。但这一要求的实现较为困难,测试时如果不满足就会发生频谱泄漏现象。为了抑制泄漏,目前最常用的方法是使用加窗技术。但该方法的使用要求较为严格,无法胜任目前高精度 ADC 的测试,且需要使用者十分熟悉窗函数原理。通过对频谱泄漏和加窗技术进行详尽的理论推导,提出了一种选定合适窗函数类型以及扩展系数(span)的方法,使测试者不需要过多的先验知识。通过所提方法,在窗函数的第一旁瓣高于噪声基底时,仍然能完成高精度 ADC 的测试工作,扩大了常见窗函数的应用范围。使得常见窗函数如汉宁窗等,也能应用于 18 位的高精度 ADC 测试工作。仿真结果显示所提算法在任意非相干程度下仍可得到准确的测试结果,各项参数的最大误差均小于 1 dB。同时,使用了一款商用 18 位 ADC 实验结果验证了所提算法的可行性。

**关键词:**相干采样;动态测试;频谱泄露;窗函数;高精度 ADC

**中图分类号:** TN407; TN79+2

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 510.3040

## Improved windowing applied to high-precision ADC spectral test

Fu Jiangduo Wu Minshun Ban Cheng Guo Yi Xu Jiangtao

(School of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** When testing the analog-to-digital converters (ADCs), coherent sampling is required. However, it is difficult to achieve, so spectrum leakage will occur. In order to suppress leakage, the most common method used is windowing. The method is so strict that it is not suitable for the current high-precision ADC test, and the user should be very familiar with the window function. In this paper, a method for selecting the appropriate window function type and the span is proposed. Through the proposed method, accurate test results can still be obtained when the first side lobes of the window function are higher than the noise floor and the application range of common window functions is expanded. This makes common window functions, like Hanning window, can also be applied to 18-bit high-precision ADC test work. The simulation results show that the proposed algorithm can still obtain accurate test results over any level of noncoherency, and the maximum error of each parameter is less than 1 dB. The experimental results of a commercial 18-bit ADC are used to verify the feasibility of the proposed algorithm.

**Keywords:** coherent sampling; dynamic testing; spectrum leakage; windowing; high-precision ADC

## 0 引言

模数转换器(ADC)是目前最常用的集成电路类型之一。随着半导体工业的飞速发展,ADC的性能也不断提高,对其进行精确频谱测试则变得更加困难。ADC 频谱测试一直是近年来混合信号集成电路测试领域中的研

究热点<sup>[1-9]</sup>。其中,频谱分析法是目前最常用的动态参数测试方法。该方法通过得到频谱中基波以及各次谐波的功率,来计算出待测器件的各项动态参数<sup>[10-12]</sup>。但该方法需要严格满足相干采样条件,否则就会发生频谱泄漏现象<sup>[13-14]</sup>,而无法得到准确参数。

为了抑制非相干采样导致的频谱泄漏,研究人员提出了大量的方法。文献[15-17]提出了插值离散傅里叶

变换 (DFT) 技术,但其存在无法准确识别基波频率附近的杂波成分的问题,并且难以应用于高精度 ADC 频谱测试。文献[18-20]提出正弦波拟合法。该方法为了获得精确的测试结果,需要先得出谐波分量的总数。当信号存在大量谐波时,将大大增加运算量。文献[21-23]提出一种基波识别与替代方法,将非相干的基波识别出,并替换成相干的基波,从而测试出准确结果,但同样存在运算量较大的问题。此外,目前最常用的方法是使用加窗技术<sup>[24-25]</sup>。该方法是对 ADC 的数字输出乘上一个合适的窗函数,来减轻基波功率的泄漏。但使用加窗技术时,需要测试人员有大量的窗函数先验知识,以便选取合适的窗函数类型,从而正确地使用。同时,目前业界对窗函数的选取标准也有着极为严格的限制,即要求第一旁瓣需低于噪声基底,这使得常见窗函数无法适用于高精度的 ADC。而符合要求的特殊窗往往表达式十分复杂,不利于计算。

本文对非相干采样引起的频谱泄漏现象进行理论推导,并详尽分析了各种窗函数的性质,提出了一种选定合适窗函数类型以及扩展系数(span)的方法。使测试者可以按照流程来对 ADC 进行准确的频谱测试,而不需要过多先验知识。此外,测试高精度 ADC 时,目前标准选取的窗函数往往形式复杂,计算时间长。而本文提出的方法大大减轻了对窗函数要求的限制,使得常见窗函数对高精度 ADC 也能准确测试,降低计算难度。最后通过算法仿真和实验数据验证,均取得了较为准确的测试结果。并通过大量随机仿真进行鲁棒性验证,得到各项参数的最大误差均小于 1 dB。

## 1 ADC 频谱测试

### 1.1 频谱测试系统

目前学术界与工业界最常用的动态测试方法为频谱分析法,该方法向待测 ADC 输入一个高纯度的正弦信号,然后采集输出的量化数字信号,并对该数据进行快速傅里叶变换,得到待测 ADC 的频谱,从而计算出其相关的动态参数。该测试系统的框图如图 1 所示。

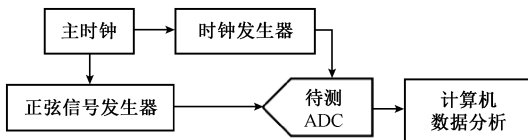


图 1 ADC 频谱测试系统框图

Fig. 1 ADC spectrum testing system

图 1 给待测 ADC 输入的正弦信号可以表示为:

$$V_{in}(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_{in} \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $f_{in}$  和  $\varphi$  分别表示输入信号的幅值、频率与相位。而输出信号的表达式为:

$$x[n] = \sum_{h=0}^H A_h \cdot \sin(2\pi \cdot h \cdot \frac{f_{in}}{f_s} \cdot n + \varphi_h) + w_n \quad (2)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, M - 1$$

式中:  $H$  表示总谐波数量;  $f_s$  为采样频率;  $M$  为总采样点数;  $w_n$  表示加性噪声。

理想情况下,ADC 的频谱中可以清晰的得到基波和各次谐波信息,从而计算出各项动态参数如 SNR、SFDR、THD、SFDR 等。

### 1.2 频谱泄漏

频谱泄漏是频谱测试中的常见问题之一,发生该现象的原因是对输入信号的采样过程中未满足相干采样条件。当频谱泄漏发生时,会导致基波功率泄漏到附近的频率上,影响甚至淹没谐波,从而无法准确计算基波和各次谐波信息,最终得到错误的参数测试结果。当采样周期为整数时,满足相干采样条件,此时亦称为整周期采样。当采样周期不为整数时,就会发生频谱泄漏现象,如图 2 所示。

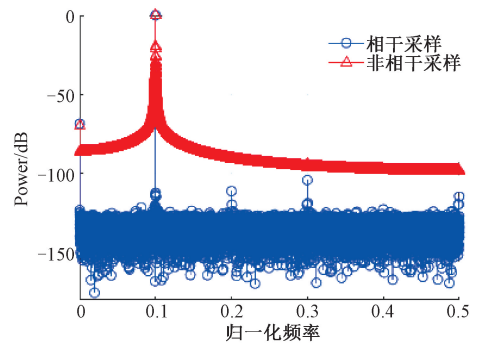


图 2 频谱泄漏现象

Fig. 2 Spectral leakage

频谱泄漏发生的原因是计算机只能分析有限长的数字信号,所以要先对模拟信号进行采样和截断。该过程可以视为将一个无限长的模拟信号与一个有限长的矩形窗函数相乘得到。理想情况下,这个模拟信号在频域表示为两根单独谱线。而长度为  $N$  的矩形窗在频域则表示为:

$$R(e^{j\omega}) = e^{-j\omega(N-1)/2} \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (3)$$

在频率为 0 时,取到其频谱最高点,该值大小为矩形窗的长度  $N$ 。而在所有频率取到  $\omega = f_s/N \cdot k$  处 ( $k$  为整数),取到过零点。快速傅里叶变换 (FFT) 会对频谱进行等间隔采样,即一个周期内的频谱只能显示出  $N$  个离散的点,频谱采样间隔为  $f_s/N$ 。当满足相干采样时,采样周期为整数。这就意味着频谱上的采样点除了采到最高

点外,剩下的点均位于过零点处。否则所有的频谱采样点均不为0,而总功率不变,即原本集中的功率泄漏到了附近,故称为频谱泄漏。当发生泄漏时,由于基波的功率相对于谐波来说很大,基波功率泄漏到谐波处,影响谐波甚至将其淹没。所以当泄漏发生时,会带来两个问题。

- 1) 由于基波功率发生泄漏,导致无法准确计算基波功率;
- 2) 基波泄漏到附近频率的功率很大,影响二次谐波,从而导致谐波功率计算不准确。

## 2 加窗技术及改进方法

### 2.1 加窗技术

目前最常用的抑制泄漏的方法是使用加窗技术。该方法是一个合适的窗函数,并与采样信号相乘。由于特殊窗函数相比于矩形窗来说,旁瓣性能更好,这就意味着可以将功率集中到窗函数主瓣附近,从而减轻旁瓣上的泄露。

窗函数的主要参数有3种,主瓣宽度、第一旁瓣高度和旁瓣衰减速度。其中主瓣宽度定义为窗函数频谱中最中间两个零点间的宽度。如一个长度为 $N$ 的矩形窗, $|\omega_0| \leq 2\pi/N$ 的部分为主瓣。主瓣宽度决定频谱的分辨率,主瓣越窄则分辨率越高。而第一旁瓣峰值高度和旁瓣衰减速度决定了功率泄漏的严重程度。所以一个理想的窗函数,应该具有最窄的主瓣宽度,最小的第一旁瓣高度和最快的旁瓣衰减速度。但遗憾的是,主瓣和旁瓣性能互相矛盾,选取时存在折中关系。矩形窗具有所有窗函数中最窄的主瓣宽度,但有最高的第一旁瓣,所以当泄漏发生时,会对附近谐波造成很大影响。

以矩形窗和汉宁窗为例,解释加窗技术原理。如图3所示,令两个窗函数长度 $N=8$ ,利用三角形和圆分别表示矩形窗和汉宁窗的采样点。可以看出,汉宁窗虽然主瓣较宽,但旁瓣很低,所有功率几乎全部集中在主瓣内的3根谱线上。而矩形窗由于旁瓣较高,大量的功率发生泄漏。由于汉宁窗的旁瓣较低,且衰减速度快,所以能将基波能量集中在主瓣附近。而较好的旁瓣性能也会使基波对二次谐波的影响会大大减小。所以使用加窗技术可以将扩散的信号功率集中在主瓣附近,抑制泄漏。

### 2.2 加窗技术测试流程

加窗技术的具体使用方法如图4所示。其中,使用关键在于两点,窗函数类型的选择和合适的(span)大小。扩展系数的定义为,在频谱中将基波或谐波附近的几根谱线上的功率一起算入总功率。如将基波左右各5个谱线上的功率一起算作基波功率,那么则设置扩展系数为5。选择合适的扩展系数可以使得计算功率近似等于原功率,这也是本文所提方法的关键所在。

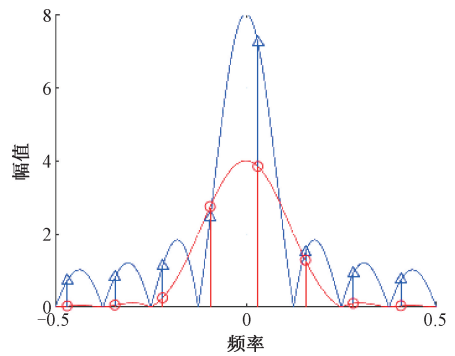


图3 频谱对比

Fig. 3 Comparison of spectrum

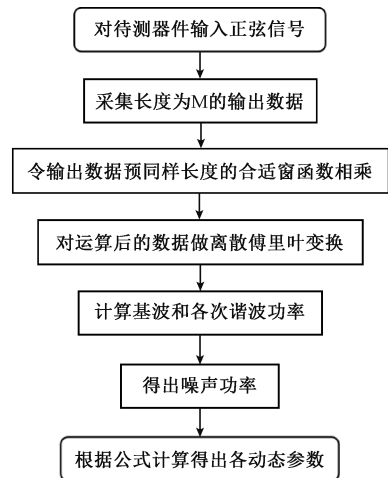


图4 加窗技术流程

Fig. 4 Flow chart of windowing

### 2.3 窗函数的类型选择

在使用加窗技术时,根据具体情况来选择合适窗函数的类型十分关键。不合适的窗函数往往会对测试带来困难。窗函数的旁瓣性能好意味着功率集中,谐波间影响小,功率计算准确,但同时也意味着主瓣较宽,频率分辨率低。但对于ADC单频测试来说,更重要的是选择旁瓣性能更好的窗,来尽量抑制功率的泄漏。但是旁瓣性能好的窗,其表达式往往十分复杂,不利于计算。如一些特殊的组合窗,其旁瓣很低,但是表达式的项数却达到了十几项之多。所以窗函数的旁瓣性能越好时,功率计算越准确,但相应的也会带来计算复杂度的提升以及频率分辨率的降低。目前来看,后两个指标的牺牲换来功率计算准确是值得的,所以频谱测试中,首先要满足旁瓣需求的性能。同时在符合要求的基础上,尽量选择主瓣较窄的窗函数。

对于旁瓣性能的要求,目前业界通用的标准是窗函数第一旁瓣要低于噪声基底,这样可以保证基波完全集中在主瓣上,泄漏可以忽略。但是目前高精度的ADC噪声基底已经做到很低,符合这一要求的窗函数往往计算

十分复杂,同时主瓣会非常宽,大大降低了频率分辨率。所以本文在此标准上提出一个改进,不需要第一旁瓣低于噪声基底,只需根据窗函数的衰减系数表格,使得基波的泄漏在选择的扩展系数处小到可以忽略即可。因为此时可以保证将基波的绝大部分功率计算进去,系数以外旁瓣上的泄漏也不会影响到谐波。而泄漏可以忽略的标准定义为,窗函数的衰减在扩展系数处小于噪声基底,这样的话就可以将其以外基波泄漏的功率视为噪声。

经过对常见窗函数频域表达式的推导计算,本文总结了常见窗函数衰减系数表格,如表 1 所示。表 1 介绍了窗函数第  $k$  个旁瓣处的衰减值。使用时只需根据表格上的旁瓣衰减值和噪声基底进行比较,以选择合适的窗函数类型和扩展系数。由于基波与二次谐波间的距离恰好为采样周期数  $J$ ,所以希望窗函数的衰减在  $\text{span}$  处小于噪声基底,那么就需要  $\text{span}$  小于  $J$ ,这样可以保证加窗后不会影响到二次谐波。

表 1 常见窗函数旁瓣衰减

Table 1 Sidelobe attenuation of common window function (dB)

	$k=4$	$k=8$	$k=16$	$k=32$	$k=64$	$k=128$	$k=256$	$k=512$
矩形窗	-23	-28	-34	-40	-46	-52	-58	-64
哈密窗	-44	-47	-52	-57	-63	-69	-75	-81
汉宁窗	-54	-68	-84	-101	-118	-136	-154	-172
布莱克曼窗	-67	-79	-93	-109	-126	-144	-162	-180

具体方法是,首先根据公式得到噪声基底的大小:

$$\text{NoiseFloor} = 6.02 N + 1.76 + 10\lg(M/2) \quad (4)$$

式中:  $N$  表示 ADC 位数;  $M$  表示采样点数。

然后根据采样周期数和噪声基底的值,对照表格在  $k$  小于  $\text{span}$  的情况下,要求窗函数的衰减值在噪声基底附近。选取符合条件的窗函数类型,要求在旁瓣性能能满足的情况下,尽量选取主瓣较窄的窗函数,以减少计算量和提高频率分辨率。同时设置合适的  $\text{span}$ ,使得窗函数衰减到噪声基底附近。

使用表格来选取合适窗函数类型以及扩展系数的流程图如图 5 所示。

### 3 算法验证结果

#### 3.1 算法功能性仿真验证

为了验证所提算法的功能性,进行程序仿真。首先建模一个 18 位的高精度 ADC,其微分非线性和噪声均服从正态分布,方差分别为  $0.01\text{LSB}$  和  $0.5\text{LSB}$ ,采样点总数为 4 096。仿真中设置一组相干采样数据作为对照,采样周期数  $J=255$ 。同时设置两组非相干数据,其中轻微非相干采样数据  $J=255.12$ ,严重非相干采样数据  $J=255.45$ 。根据式(4)得出噪声基底为  $-143.233\text{ dB}$ ,查表

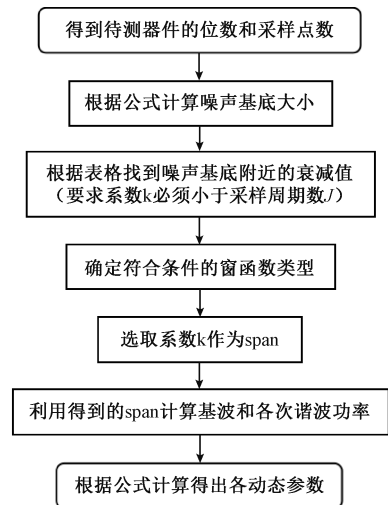


图 5 所提方法流程

Fig. 5 Flow chart of the proposed method

1 可知,只有汉宁窗和布莱克曼窗符合要求。仿真中以汉宁窗为例,  $\text{span}$  设置为 128。旁瓣性能较好的哈密窗不符合要求,经过仿真可得到图 6 和 7 所示频谱。

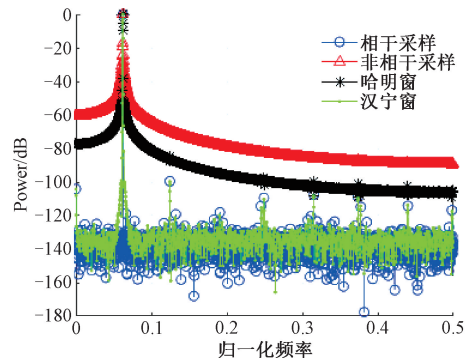


图 6 轻微非相干仿真结果

Fig. 6 Simulation result of slight noncoherency

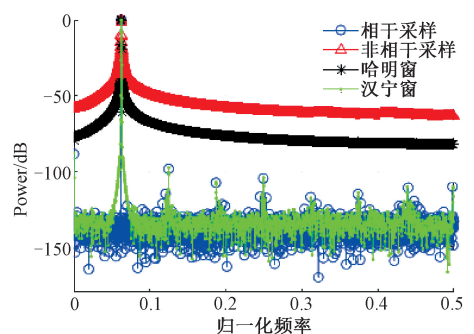


图 7 严重非相干仿真结果

Fig. 7 Simulation result of severe noncoherency

可以看出当不满足相干采样条件时,待测 ADC 的频谱中发生了严重的频谱泄漏现象。基波泄漏的功率淹没了附近谐波,导致无法识别出频谱中的各项成分。仿真

中选取汉宁窗和哈明窗进行对比,来验证算法的功能性。经过汉宁窗处理的频谱泄漏大大减轻,各次谐波分量清晰可见。相比之下,不符合算法要求的哈明窗尽管对基波功率泄漏有一定的缓解,但依然无法得到准确的频谱。表 2 和 3 分别给出了两次仿真的动态参数结果对比,可以发现非相干采样的数据与真实结果相比误差很大,而汉宁窗得到的结果与相干采样数据十分接近。可见本文所提算法可以得到准确的测试结果,能够有效应用于高精度 ADC 测试。

表 2 动态参数仿真结果

Table 2 Simulation result of dynamic parameter (dB)

窗函数类型	SINAD	SNR	THD	SFDR
相干采样	98.906	100.362	-104.36	105.338
非相干采样	23.013	23.013	-62.060	62.966
哈明窗	41.520	41.521	-78.547	79.457
汉宁窗	99.183	100.853	-104.143	105.135

表 3 动态参数仿真结果

Table 3 Simulation result of dynamic parameter (dB)

窗函数类型	SINAD	SNR	THD	SFDR
相干采样	97.035	100.277	-99.825	101.890
非相干采样	14.261	14.263	-46.627	48.774
哈明窗	32.923	32.927	-63.251	65.398
汉宁窗	97.051	100.351	-99.789	102.006

### 3.2 算法的可靠性验证

为了验证所提算法在不同非相干程度下的可靠性,进行大量随机仿真。作为参照,首先以一组相干采样数据得到的参数结果作为真实值。然后令采样周期的小数部分  $\delta$  在  $-0.5 \sim 0.5$  内的范围内随机产生,其他仿真设置均与 3.1 节相同,并进行 1 000 次仿真。使用汉宁窗对每次仿真中的非相干数据进行处理,得到的结果与真实值的误差如图 8 所示。可以看出经过本文所提算法处理后,得到的各项参数的最大误差绝对值均小于 1 dB。即使在  $\delta$  十分接近 0.5 时的严重非相干采样中,算法依然可以得到准确的结果。因此对于任意程度的非相干采样,各参数的误差均在可接受的范围内,算法具有可靠性。

### 3.3 实验结果

通过实验数据来验证算法的可行性,所用数据来自于 ADI 公司的 18 位 SAR ADC (AD4003)。实验中利用相干采样得到的参数作为真实值进行对比,由于相干采样条件较难实现,实验数据是经过长时间的仪器频率调节才得到。令相干采样数据中输入信号频率为 2 kHz,采样频率为 64.503 937 kHz,采样点数  $M=4\ 096$ ,采样周期数  $J=127$ 。并另外采集两组不同非相干程度的数据,其中两组数据的输入信号频率和采样点数均与相干采样组

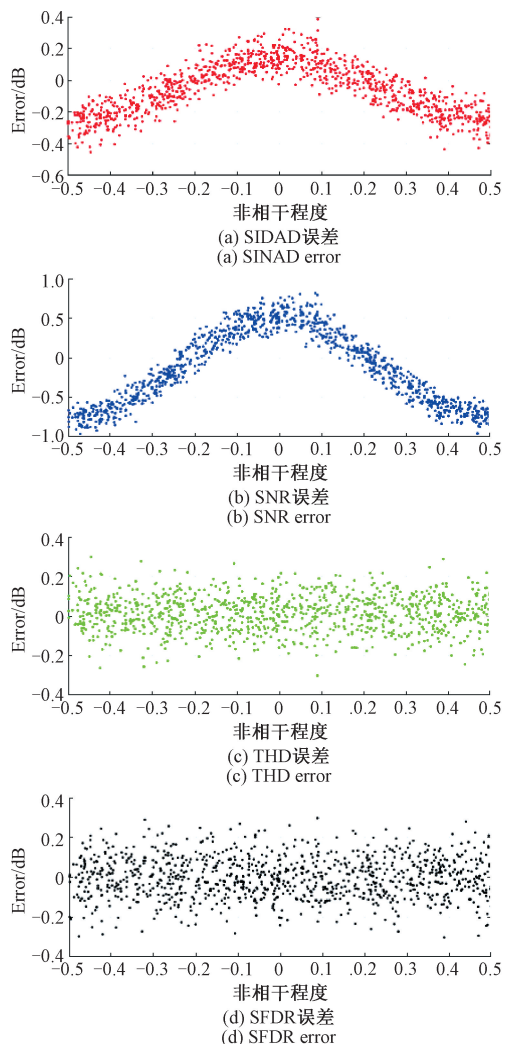


图 8 鲁棒性验证

Fig. 8 Robust verification

相同。不同的是轻微非相干组采样频率为 64.44 kHz,  $J=127.13$ ; 严重非相干组采样频率为 64.28 kHz,  $J=127.45$ 。选择汉宁窗对非相干数据进行处理,图 9 和 10 所示中分别为两组实验数据的频谱图对比,实验结果如表 4、5 所示。

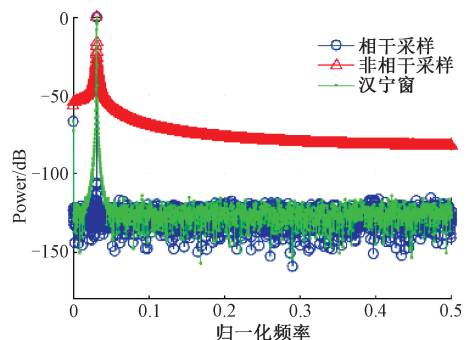


图 9 轻微非相干实验结果

Fig. 9 Experiment result of slight noncoherency

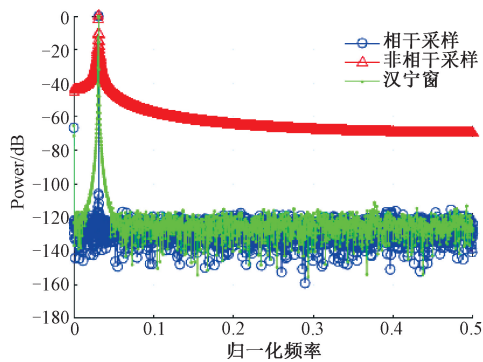


图 10 严重非相干实验结果

Fig. 10 Experiment result of severe noncoherency

表 4 动态参数实验结果

Table 4 Experiment result of dynamic parameter

窗函数类型	SINAD	SNR	THD	SFDR
相干采样	92.634	92.675	-112.851	117.659
非相干采样	21.855	21.859	-53.186	54.496
汉宁窗	93.150	93.215	-111.421	115.016

表 5 动态参数实验结果

Table 5 Experiment result of dynamic parameter

窗函数类型	SINAD	SNR	THD	SFDR
相干采样	92.634	92.675	-112.851	117.659
非相干采样	14.292	14.296	-44.800	46.270
汉宁窗	93.004	93.058	-112.08	115.45

从图 9、10 可以看出,在非相干采样条件下对数据进行直接处理出现了严重的频谱泄漏现象,各次谐波成分以及噪声信息均被基波泄露的功率淹没。而经过算法处理后其频谱泄漏大大减轻,与相干采样数据得到的频谱非常相似。对比表 4、5 的数据结果对比,也表明了加窗得到的参数结果十分接近相干采样。在不同的非相干程度下,都得到了较为准确的参数值。可见所提算法成功解决了实验数据中由非相干采样引起的频谱泄漏问题,可以用来测试实际的高精度 ADC。

## 4 结论

本方法为利用加窗技术进行 ADC 频谱测试提供了一种新的思路,使得常见的窗函数如汉宁窗、布莱克曼窗等,也可以适用于高精度的 ADC 测试,而不需要使用复杂的组合窗。同时,为正确使用加窗技术提供了一套切实可行的参考标准和使用流程。使测试者不需要过多的先验知识,也能选择合适的窗函数,并且按照流程来对高精度 ADC 进行准确的频谱测试。最后通过大量仿真和统计性分析验证了所提方法的鲁棒性。本方法可以在任意非相干的条件下实现准确测试,而无需过多的复杂计

算,大大降低了测试成本。

## 参考文献

- [1] 何芹,黄朴,虞致国,等. 基于平均频谱测试高速 ADC 动态参数的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7): 755-762.  
HE Q, HUANG P, YU ZH G, et al. The method for testing dynamic parameters of high-speed ADCs based on average spectrum[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(7): 755-762.
- [2] 黄朴,冯洋,虞致国,等. 高速高精度 ADC 动态参数评估系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(6): 294-297.  
HUANG P, FENG Y, YU ZH G, et al. Design and implementation of dynamic parameter testing system for high-speed and high-precision ADCs [J]. 2016, 24(6): 294-297.
- [3] 朱江. 高精度 ADC 测试技术研究[J]. 电子与封装, 2014, 14(9): 9-12.  
ZHU J. Research on testing technology of high quality ADC[J]. Electronics and Packaging. 2014, 14(9): 9-12.
- [4] 冯耀莹,杨晓强. 基于 ATE 的 8 位超高速 ADC 动态参数测试[J]. 微电子学, 2015, 45(3): 413-416.  
FENG Y Y, YANG X Q. Measurement of dynamic parameters for a 8 bit high-speed A/D converter based on ATE[J]. Microelectron. 2015, 45(3): 413-416.
- [5] 闫辉,邓红辉,万祝娟,等. 误差提取自适应修正的前馈式 TIADC 校准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 171-176.  
YAN H, DENG H H, WAN ZH J, et al. Adaptive fully digital feedforward calibration algorithm of timing mismatch for sub-sampling TIADCs. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 171-176.
- [6] 王学伟,杨京. 动态测试信号模型及电能压缩感知测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 92-100.  
WANG X W, YANG J. Dynamic test signal model and the electric energy measurement method based on compressed sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 92-100.
- [7] WU M S, LIU Z Q. Noncoherency correction algorithm for removing spectral leakage in ADC spectral test [J]. IEICE Electronics Express, 2015, 13(2): 1-11.
- [8] ALBRECHT H H. Tailoring of minimum sidelobe cosine-sum windows for high-resolution measurements[J]. Open Signal Process Journal, 2010, 13(1): 20-29.
- [9] BELEGA D, PETRI D, DALLET D. Accuracy of sine-wave frequency estimation by an iterative Interpolated DFT algorithm [C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2015: 1795-1800.

- [10] 张丛丛, 谭博. 用于 ADC 测试的数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39 (10): 162-165.  
ZHANG C C, TAN B. Data acquisition system for ADC testing[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39 (10): 162-165.
- [11] 俞宙, 李静, 魏亚峰, 等. 基于模拟仪器的告诉混合信号自动测试系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37: 94-101.  
YU ZH, LI J, WEI Y F, et al. Automatic test system of high-speed mixed-signal based on virtual instruments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37: 94-101.
- [12] 李海虎, 张超. 基于 FPGA 的 GHz 宽带中频数字采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (4): 55-58.  
LI H H, ZHANG CH. Design of GHz wideband IF digital acquisition system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology. 2016, 35 (4): 55-63.
- [13] IEEE standard for terminology and test methods for analog-to-digital converters [S]. IEEE Std 1241-2010 (Revision of IEEE Std 1241-2000), 2011: 1-139.
- [14] IEEE standard for digitizing waveform recorders-redline[S]. IEEE Std 1057-2007 (Revision of IEEE Std 1057-1994) -Redline, 2008: 1-210.
- [15] BELEGA D, PETRI D, DALLET D. Accuracy of sine-wave frequency estimation by an iterative interpolated DFT algorithm [C]. International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015: 1795-1800.
- [16] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27 (12): 270-277.  
WEN H, TENG ZH SH, WANG Y, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27 (12): 270-277.
- [17] BELEGA D, PETRI D. Influence of the noise on DFT-based sine-wave frequency and amplitude estimators[J]. Measurement, 2019, 137: 527-534.
- [18] PÁLFI V and KOLLÁR I. Efficient execution of ADC test with sine fitting with verification of excitation signal parameter settings [C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012: 2662-2667.
- [19] PÁLFI V and KOLLÁR I. Acceleration of the ADC Test with Sine-Wave Fit [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (5): 880-888.
- [20] LAPUH R. Estimating the Fundamental Component of Harmonically Distorted Signals from Noncoherently Sampled Data, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, vol. 64, no. 6, pp. 1419-1424.
- [21] SUDANI S, CHEN D. FIRE: A fundamental identification and replacement method for accurate spectral test without requiring coherency [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (11): 15-25.
- [22] SUDANI S, XU L, CHEN D. A comparative study of state-of-the art high-performance spectral test methods[J]. IEEE Design & Test, 2015, 32 (1): 26-35.
- [23] ZHUANG Y, CHEN D. Algorithms for accurate spectral analysis in the presence of arbitrary noncoherency and large distortion [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66 (10): 2556-2565.
- [24] ALBRECHT H H. Tailoring of minimum sidelobe cosine-sum windows for high-resolution measurements[J]. Open Signal Processing Journal, 2010, 13 (1): 20-29.
- [25] 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 D M, HE Y G. 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.

## 作者简介



付江铎, 2017 年于西北工业大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为 ADC 低成本测试算法。  
E-mail: fujiangduo@163.com

**Fu Jiangduo** received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include low-cost algorithm for ADCs testing.



伍民顺 (通信作者), 2012 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学微电子学院副教授, 主要研究方向为模拟与混合信号集成电路测试及内建自测试。  
E-mail: minshunwu@xjtu.edu.cn

**Wu Minshun** (Corresponding author) received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2012. Now he is an associate professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include analog and mixed-signal integrated circuit testing and built-in self-test.