

# 基于正弦波点击率的非线性误差测试方法

杨景阳 刘路扬 吕兵

(航天科工防御技术研究试验中心 北京 100854)

**摘要:** 针对 ADC 在通讯和多媒体技术上的应用需求,研究了基于正弦波点击率的 ADC 非线性误差测试方法,实现了正弦波点击率技术在 ADC 非线性误差测试中的应用。向 ADC 输入正弦波信号,对输出数字码进行标准化处理,补偿正弦波形电压分布的不均匀性,通过点击率算法推算 ADC 的微分非线性误差,并在大规模数模混合测试设备 Catalyst-200 上验证了算法的可靠性和精确性。实验结果表明,该算法能够精确地估算 ADC 非线性误差,完整地表征了 ADC 线性度和丢码率,为 ADC 在通讯和多媒体技术上的应用提供了重要的参数依据,具有较强的工程实用性和市场前景性。

**关键词:** 正弦波点击率;标准化处理;微分非线性误差

**中图分类号:** TN401 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3010

## Nonlinear error testing method based on sine wave click rate technology

Yang Jingyang Liu Luyang Lü Bing

(Aerospace Science and Industry Defense Technology Research Testing Center, Beijing 100854, China)

**Abstract:** To fulfill the ADC applied on communication and imedia technology, this article researches the ADC's Nonlinear error testing method based on Sine Wave click rate technology, and realizes the application of Sine wave click rate technology in ADC's nonlinearity error testing. Put the sine wave into ADC's input, deal the output data with normalized conduct to compensate the uneven distribution of sine waveform voltage, and then, calculate the ADC's differential Nonlinearity Error by means of click rate algorithm, at the end, verify reliability and accuracy of the algorithm at the e-scale mixed-signal test equipment Catalyst-200. The experimental results show that this algorithm can estimate the ADC's nonlinearity error accurately, represent the ADC's linearity and dropout rate entirely, provide important parameter to the application of ADC on communication and imedia technology. it has a strong engineering practicality and a fine market outlook.

**Keywords:** Sine wave click; normalized conduct; differential nonlinearity error

## 1 引言

ADC(模数转换器)的作用是将模拟信号转换为数字信号<sup>[1]</sup>。作为模拟技术和数字技术的接口<sup>[4]</sup>,近年来,ADC被广泛地应用于工业控制、雷达、通信等领域<sup>[5]</sup>,在信息技术中起着重要作用。尤其在图像处理应用中,ADC的线性度和丢码率在很大程度上决定了采集信号的完整性和稳定性<sup>[6]</sup>。积分非线性误差是表征 ADC 线性度和丢码现象的重要参数,因此,如何精确测估 ADC 静态参数非线性误差具有重大的工程实用价值。

传统的测试方法是采用高精度数模转换器(DAC)重建 ADC 输出信号,再用模拟方法分析<sup>[7]</sup>。此法简单直观,但是引入了 DAC 的误差,分析结果无法确定误差源于

ADC 还是 DAC;通过步长搜索可以寻找到输出代码边沿,同时检测到相邻输出代码边沿对应的输入电压,进而求得积分非线性误差,但该方法检测的数据量大,测试时间过长,对于多位数的 ADC 并不适用。本文采用正弦波点击率法测估 ADC 非线性误差,通过对 ADC 输出码标准化处理补偿正弦波形电压分布不均匀性,再进行点击率算法处理得到 ADC 微分非线性误差,最后在大型 ATE<sup>[8]</sup>平台 Catalyst-200 上验证算法的可靠性和精确性。该测试方法相较于传统的非线性误差测试方法外界误差影响因素少,测试时间短。

## 2 ADC 非线性误差测试原理

ADC 非线性误差包含两个误差参数,微分非线性

(DNL)和积分非线性(INL)<sup>[9]</sup>。其中,微分非线性定义为在规定的测试条件下,测试一特定输出码的输入电压和前一个输出码的输入电压之差的实际值与 1 LSB 间的最大偏差;积分非线性定义为在规定的测试条件下,测试 ADC 实际转换曲线与理想转换曲线之间的最大偏差,以确定 ADC 转换点的实际模拟之与理想值之间的偏差所能达到的最小极值。积分非线性相当于微分非线性的积分,可以用 DNL 曲线相加计算,如下公式:

$$INL(i) = \sum_{k=0}^{i-1} DNL(k) \quad (1)$$

因此,本文的目的就是要精确地测估出微分非线性 DNL 的值。系统测试流程图如图 1 所示。由稳定的信号源输出相对纯净的正弦波信号激励高速 ADC,数字通道在输出端以采样时钟采集 ADC 输出的数字信号,再进行点击率运算处理得到微分非线性 DNL。

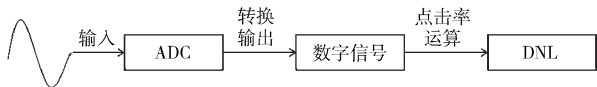


图 1 系统测试流程

ADC 的输入电压在特别小的变化范围内,对应输出的是同一个数字码,电压逐步增加时连续几次采样都会得到同样输出代码,这些采样次数则称为“点击率”。从统计上讲,每个代码的点击率直接与该代码的相应输入电压范围成正比,点击率越大表明该代码的输入电压范围越大,非线性微分误差 DNL 越大;同样,代码点击率越小表明该代码输入电压范围越小,非线性微分误差 DNL 也越大;只有在点击码宽接近于 1LSB,DNL 才会接近于 0。图 2 是一个简易 ADC 转换示意图,ADC 将模拟输入信号转换成数字信号,在记录激励电压的同时由数字通道测得其对应的数字码。

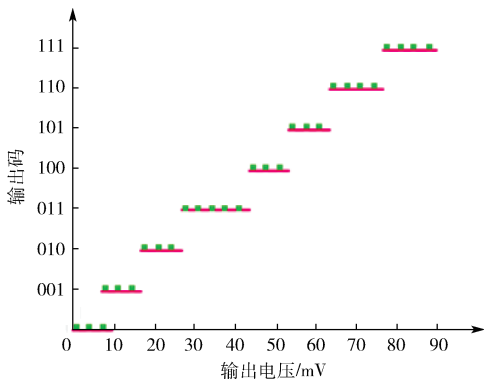


图 2 ADC 转换示意图

### 3 基于点击率的 DNL 算法推导

DNL 误差定义为实际量化台阶与 1 个 LSB 的理想值之间的差异。对于 1 个理想 ADC,其微分非线性为  $DNL =$

0 LSB,也就是说每个模拟量化台阶等于 1 LSB,跳变值之间的间隔为精确的 1 LSB。在实际工作中,若 DNL 误差指标小于 1 LSB,就意味着传输函数具有保证的单调性,模数转换过程没有出现丢码。当 1 个 ADC 器件的数字量输出随着模拟输入信号的增加而增加时(或保持不变),就称其具有单调性,相应传输函数曲线的斜率没有变号。DNL 指标是在消除了静态增益误差的影响后得到的。

正弦波是 1 个不均匀的电压分布,在正弦波的波峰和波谷处,采样到的点击数较中间段多,如图 3 所示为正弦波的采样点击数分布图,这种电压不均匀的分布将会导致输出代码的不均匀分布,因此需要进行标准化处理,补偿正弦波电压分布的不均匀性。

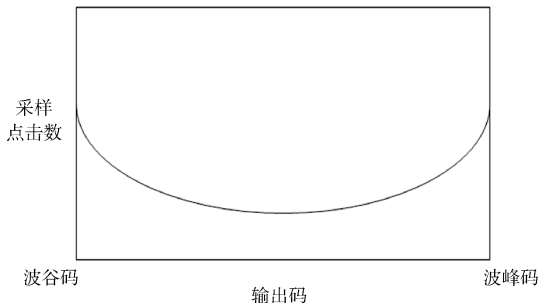


图 3 正弦波点击数分布

由于 ADC 的增益和偏移的未知性和输入正弦波形的不确定度,因此,利用波峰波谷采样数来推算输入信号的偏移和振幅,波峰和波谷的差得到正弦波偏移量,波峰和波谷的和得到正弦波振幅。联系波峰码和波谷码采样、偏移和正弦波振幅等式如下:

$$offset = \left( \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \right) (2^{N-1} - 1) \quad (2)$$

$$peak = \frac{2^{N-1} - 1 - offset}{C_1} \quad (3)$$

这里:

$$C_1 = \cos\left(\pi \frac{H(2^N - 1)}{N_s}\right) \quad (4)$$

$$C_2 = \cos\left(\pi \frac{H(0)}{N_s}\right) \quad (5)$$

其中  $H(2^N - 1)$  是波峰码采样次数,  $H(0)$  是波谷码采样次数,  $N$  是转化的分辨率(位数),  $N_s$  是采样总数(包括结束的代码计数)并且足够大使得每个 ADC 转换码最少采样 16 次。

求出偏移量和幅值,即可计算理想的点击率采样正弦波分布,表示为  $H_i$ ,第  $i$  次点击率计算(除了波峰和波谷点击码计算)如式(6)所示:

$$H_i(i) = \frac{N_s}{\pi} \left[ \arcsin\left(\frac{i+1-2^{N-1}-offset}{peak}\right) - \arcsin\left(\frac{i-2^{N-1}-offset}{peak}\right) \right] \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, 2^N - 2$

$H_s(i)$  代表每个点击码可能的采样数量,因此不需要是整数。

得到了点击码即可通过式(7)求得微分非线性 DNL:

$$DNL = \max(DNL[i]) = \max\left(\frac{H(i)}{H_s(i)} - 1\right)$$

$$i = 1, 2, \dots, 2^N - 2 \quad (7)$$

#### 4 基于 Catalyst-200 平台的实验验证与分析

Catalyst-200 可提供高精度的 AWG 模拟源,提供最纯净的正弦波信号,提供高速实时的数字通道,为模拟量和数字量的同步处理提供硬件支持。

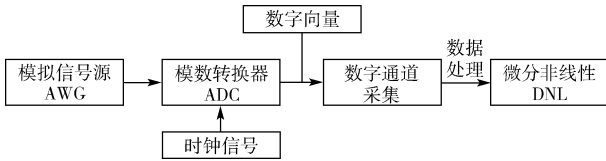


图4 Catalyst-200 测试 ADC 原理

由 Catalyst-200 内部集成的模拟信号源 AWG 激励模数转换器 ADC,向 ADC 发送纯净的正弦波信号,再由数字通道向 ADC 发送转换时钟信号触发 ADC 转换动作,辅以数字向量对 ADC 输出端的控制接收,采集数字信号进行点击率算法处理得到 ADC 的微分非线性误差 DNL,进而求得积分非线性 INL。

点击码分布图如图 5 所示。为保证测试的准确性,采样总数要足够大,因此对 ADC 的转换曲线的每个代码采样 32 次(至少采样 16 次),图 5 中横坐标表示为点击码,纵坐标表示为每个码被点击的采样数。由图可知,在波峰波谷的点击码被采样的点数多于中间段的被采样点数。利用图中的点击率求出 DNL 和 INL 如图 6 和图 7 所示。

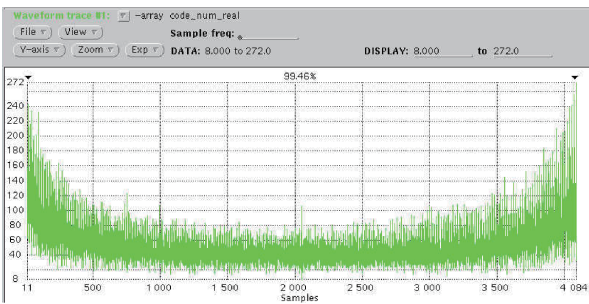


图5 点击码分布

以 AD7656 为例,测出如图的 DNL 和 INL,纵坐标单位为 LSB,AD7656 技术手册要求 DNL 在  $\pm 2$ LSB 范围内,图 6 中最大的 1.9 LSB,满足了器件测试指标要求。实验结果证明了正弦波点击率算法应用于 ADC 非线性误差测试的可靠性和精确性,具有一定的工程实用性和优越性。

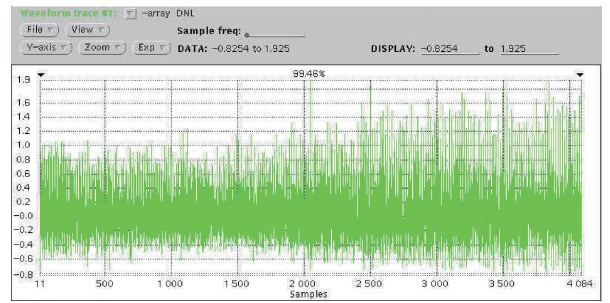


图6 DNL 波形

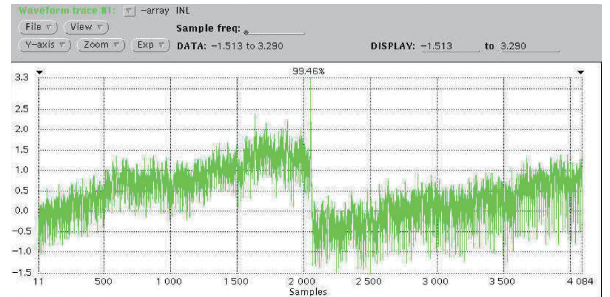


图7 INL 波形

#### 5 结 论

为满足 ADC 在通讯和多媒体技术上的应用需求,本文研究了正弦波点击率技术在 ADC 非线性误差测试中的应用;针对正弦波电压分布不均匀的问题,设计了标准化过程,利用波峰波谷采样数反推输入信号的偏移和振幅;最后通过大规模数模混合测试设备 Catalyst-200 验证了算法的可靠性和精确性,因此,该方法具有较强的工程实用性和市场前景性。为 ADC 在通信和多媒体技术上的应用提供了重要的参数依据。

#### 参考文献

- [1] YIN SH R. Analog stimulus generator for ADC testing in mixed-signal SoC[C]. Proceedings of 2012 International Conference on Applied Informatics and Communication(ICAIC 2012), 2012:256-260.
- [2] KIM S, ELKIS R, PECKERAR M. Device verification testing of high-speed analog-to-digital converters in satellite communication systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(2):270-280.
- [3] VORA S C, SATISH L. A Proposal for concurrent estimation of static and dynamic nonlinearity of ADC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):524-530.
- [4] 须自明, 吴俊, 黄蕴. ADC 测试中 INL 与 THD 之间的关系[J]. 电子与封装, 2010, 10(7):7-11.

- [5] 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.
- [6] 张磊. 数字芯片 ADC 模块的常见失效分析[J]. 电子测试, 2009(3): 83-85.
- [7] 伍民顺,陈贵灿,张瑞智,等. 一种新的估计模数转换器积分非线性误差的直方图方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 59-63.
- [8] 田雨,黄俊,王海涛,等. ATE 系统中基于相关采样定理的 ADC 测试方法和波形重建[J]. 电子测量技术, 2009, 32(12): 140-143.
- [9] 潘洋,詹国钟,糜坚平,等. 冲击高压用数字示波器动态局部非线性评价方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 24(12): 2690-2695.
- [10] 郝志刚,杨海钢. 高精度 ADC 有效精度的测试方法[J]. 半导体技术, 2010, 35(3): 269-271.

## 作者简介

**杨景阳**,工学硕士,助理工程师,主要研究方向为元器件可靠性技术、元器件测试测量技术、可靠性工程等。

E-mail: 523856559@qq.com

## 简仪科技首次亮相 PXI Show

2016年8月11日、8月16日——上海简仪科技有限公司(简称 简仪科技)首次亮相 PXI Show 中国(西安站、武汉站),一个专注于全球最热门的模块化测试、测量以及自动测试平台领域的技术交流盛会。简仪科技总经理陈大庞博士亦亲临活动现场,并向参会者热情介绍业界第一个开源测试平台——锐视(SeeSharp)测控平台。

简仪科技市场部经理吴珂珂在会议上介绍锐视测控平台,获得了现场参会者的极大关注。锐视测控平台基于 Microsoft 的 .Net 平台和 Visual Studio 开发环境,可以提供基于 Visual C# 语言和 x86 结构的一系列软硬件解决方案,是一个强大、易用、开源的测控系统开发平台。在锐视测控平台下,开发者不但可以获得大量基于 Microsoft Visual Studio 开发环境的成熟技术和强大功能(例如:图形界面、文件/IO、算法类库、硬件驱动、仪器接口、网络访问等),还可以第一时间获得更高效的运行引擎更新,功能更强大的基础开发环境,以及最新的技术和设备支持。对于锐视测控平台技术的领先性,陈大庞博士称之为“站在巨人的肩膀上”。

为提高测试测量工程师在 .NET 平台下的系统开发效

率,降低开发入门门槛,简仪科技已经开发了大量基于 .NET 平台的附加功能,包括:易用开源的硬件接口、专业美观的图形界面、功能强大的信号分析功能、面向应用的设计范例。“这样,具有基本 C 语言基础的测控工程师,可以轻松地使用功能强大的 Visual Studio 和 Visual C# 开发环境,创建功能完善的测控程序和软件。”吴珂珂经理点明锐视测控平台的优势所在。

本次会议上,简仪科技现场还展示了众多产品和应用,吸引了层层围观:世界第一个开源 SeeSharp 锐视测控平台编程环境——工程师现场演示编程;声音照相机——简仪科技多通道同步声音与振动 PXI 采集系统;产线自动化测试应用——简仪科技综合数据采集 PXI 系统。

简仪科技整合凌华科技(中国)有限公司优势资源强势崛起,在测试测量行业知名职业经理人陈大庞博士的率领下,简仪科技将致力于推动中国测试测量产品本土化、共创测试测量开放性架构,并凭借其过去在测试测量领域的专业和服务能力,成为抢占中国测量测试市场的领军企业,并在国际市场开拓新天地。