

高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的非线性研究

林茂六, 吴芝路, 王金龙, 任广辉
(哈尔滨工业大学电子与通信工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 本文研究了高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的 DNL (微分非线性) 与 INL (积分非线性) 及有关测试理论与方法. 根据统计学方法由单片 ADC 的 DNL 和 INL 导出了并行/交替式数据采集系统的 DNL 和 INL 的数学表达式; 并且采用统计直方图方法分别对单片 ADC 和由双片 ADC 组成的并行/交替式数据采集系统进行计算机仿真. 结果表明, 并行/交替式数据采集系统的 DNL 与 INL 小于每一通道单片 ADC 的 DNL 和 INL.

关键词: ADC; DNL; INL; 数据采集

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 02-0072-03

Nonlinearity of High-Speed ADC and a Data-Acquisition System with Interleaving/Multiplexing

LIN Mao-liu, WU Zhi-lu, WANG Jir-long, REN Guang-hui

(Dept of Electronic and Communication Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The differential nonlinearities (DNL) and integral nonlinearities (INL) of high-speed ADC and a data-acquisition system with interleaving/multiplexing and their measurement methods are discussed. According to statistic method, the mathematical expression of DNL and INL of data-acquisition system with interleaving/multiplexing is demonstrated by the DNL and INL of monolithic ADC. Furthermore, the simulations of monolithic ADC and data-acquisition system with two ADCs are finished with histogram methods. It is shown that the DNL and INL errors of data-acquisition system with two ADCs are smaller than linearity errors of each ADC channel.

Key words: analog-to-digital conversion; differential nonlinearities; integral nonlinearities; data-acquisition

1 引言

ADC 是将模拟量转换为数字量的重要部件, 在其将模拟信号转换为数字信号时, 会降低信号的质量. 为确定 ADC 及其构成系统是否满足可接受的质量水平, 必须测试 ADC 及其系统的微分非线性、积分非线性及有效比特位等参数.

目前, 实现高速波形数字化的常用方法是用图 1 的并行/交替式数据采集系统. 该系统由 M 个单片 ADC、延时电路 (D) 和采样时钟等组成. 理论上, 如果所有 ADC 都有相同的信噪比 (SNR), 则该数字化系统的信噪比与单片 ADC 的信噪比相同. 但实际上, 由于时基抖动误差的影响, 导致采样的非均匀, 结果降低了系统的信噪比. 有关文献对此有详细的报导 [1,2,4].

微分非线性和有效比特位是高速 ADC 的重要参数. 本文研究了高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性及有关测试方法. 关于有效比特位及 ADC 非线性与输入信号的摆率关系的研究, 将另文讨论.

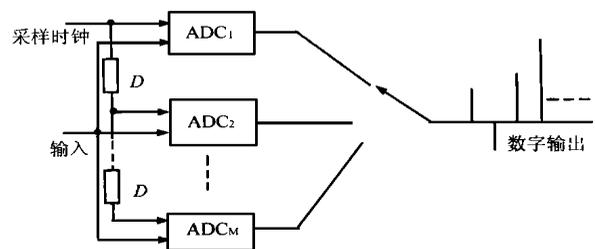


图 1 并行/交替式数据采集系统

文中的第二部分给出了单片 ADC 微分非线性与积分非线性的定义, 并由此导出了并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性的数学表达式. 第三部分研究高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性的测试方法, 从理论上推导出测试微分非线性与积分非线性的统计分析方法. 第四部分是采用第三部分提出的统计分析方法对高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采

集系统的微分非线性与积分非线性进行了计算机仿真,得到了较好的仿真结果。

2 微分非线性与积分非线性

2.1 高速 ADC 的微分非线性与积分非线性

图 2 示出了理想线性 ADC 的转换特性。\$q\$ 是台阶宽度,其值为相邻两个转换电平之差。\$T(4)\$ 是代码 4 的转换电平。\$V_{FSR}\$ 是实际满标度范围,是指模拟量的输入范围,如果采用 \$r\$ 位标准二进制代码格式表示,则有

$$V_{FSR} = (2^r - 1) \times q \quad (1)$$

理想情况下,ADC 的各输出代码的台阶宽度是相等的。而在实际情况中,ADC 的各输出代码的台阶宽度是不相等的,用微分非线性与积分非线性表示这种非线性特性。定义为

$$DNL(i) = (T(i+1) - T(i)) / q_{ref} - 1 \quad (2)$$

$$INL(i) = \sum_{k=0}^i DNL(k) \quad (3)$$

式中,DNL 表示 ADC 的微分非线性(differential nonlinearities); INL 表示 ADC 的积分非线性(integral nonlinearities)。\$T(i)\$ 表示代码 \$i\$ 的转换电平。\$q_{ref}\$ 表示 ADC 输出代码的理论台阶宽度。

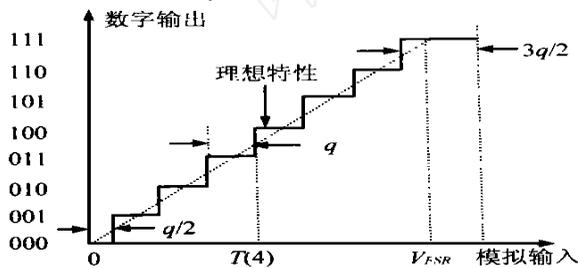


图 2 理想 ADC 的转换特性

2.2 并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性

如图 1 所示,并行/交替式数据采集系统是由 \$M\$ 个单片 ADC 组成的。在实际中,当输出相同代码时,每个单片 ADC 的转换电平是不同的。因此,当系统输出一个代码时,其转换电平是随机的,定义系统的微分非线性与积分非线性如下

$$DNL(i) = \frac{E[T(i+1)] - E[T(i)]}{q_{ref}} - 1 \quad (4)$$

其中, \$E[T(i)]\$ 是指代码 \$i\$ 的转换电平 \$T(i)\$ 的数学期望值。\$E[T(i)]\$ 的值可由如下公式求得

$$E[T(i)] = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_j(i) \quad (5)$$

其中, \$T_j(i)\$ 是指第 \$j\$ 个单片 ADC 输出代码 \$i\$ 时的转换电平。将公式(5)代入公式(4)中,经整理可得到如下公式

$$DNL(i) = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_j(i+1) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_j(i) \right] / q_{ref} - 1$$

$$= \frac{1}{M} \left[\sum_{j=1}^M (T_j(i+1) - T_j(i)) / q_{ref} - M \right] \quad (6)$$

令 \$DNL_j(i) = [T_j(i+1) - T_j(i)] / q_{ref} - 1\$ 表示第 \$j\$ 个单片 ADC 输出代码 \$i\$ 时的微分非线性,则

$$DNL(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M DNL_j(i) \quad (7)$$

同理,可得系统的积分非线性为

$$INL(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M INL_j(i) \quad (8)$$

3 微分非线性与积分非线性的测试方法

在微分非线性与积分非线性的测试中,一般将一纯度很高的模拟正弦信号作为激励信号输入到 ADC 系统,然后测量其数字输出,通过对数字输出结果进行分析得出微分非线性与积分非线性。其实现如图 3 所示。其中程控函数发生器产生 ADC 动态测试所需要的各种激励信号,高速缓冲存储器是快进慢出(FISO)存储器,用于暂存 ADC 输出响应数据。时钟与逻辑控制电路产生系统需要的各种时序控制信号和时钟信号。微型计算机在各种应用软件包的驱动下对 ADC 输出数据进行处理,外围设备可输出所需要的测试结果。这种方法可以直接对 ADC 的采样数据进行处理,可以利用不同的测试程序对不同的动态参数进行测量。

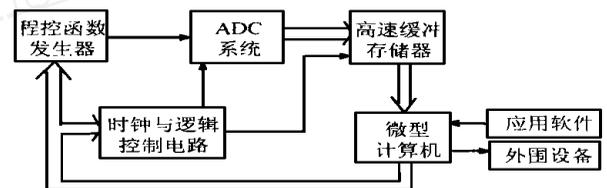


图 3 数字域测试方法原理图

设输入加偏置的正弦信号为 \$v(t) = A \sin(\omega t) + O\$, 因为在 \$[-A, A]\$ 上服从均匀分布,所以可以求出 \$v\$ 在 \$[O - A, O + A]\$ 上的概率密度函数为:

$$p(v) = 1 / (\sqrt{A^2 - (v - O)^2}) \quad (9)$$

因此可以求出代码 \$i\$ 出现的理论概率为:

$$P(i) = \int_{T(i)}^{T(i+1)} p(v) dv = \frac{1}{A} \left[\arcsin \left(\frac{T(i+1) - O}{A} \right) - \arcsin \left(\frac{T(i) - O}{A} \right) \right] \quad (10)$$

进一步可以求出代码 \$i\$ 出现的理论概率分布为:

$$F(i) = \sum_{j=0}^i P(j) = \frac{1}{A} \left[\arcsin \left(\frac{T(i+1) - O}{A} \right) - \arcsin \left(\frac{T(0) - O}{A} \right) \right] \quad (11)$$

因为 \$T(0) = O - A\$, 所以由公式(11)可得:

$$T(i+1) = O - A \cos(F(i)) \quad (12)$$

进一步可以简化为:

$$\tilde{T}(i+1) = -\cos(F(i)) \quad (13)$$

实际测试中, \$O, A\$ 及 \$q_{ref}\$ 是未知的,一般可用下式估计^[3]

$$A = (i_{max} - i_{min} + 1) / 2 \quad (14)$$

$$O = 1 / \left(\sum_{j=i_{min}}^{i_{max}} \tilde{T}(j) \right) \quad (15)$$

$$q_{ref} = (T(i_{max}) - T(i_{min})) / (i_{max} - i_{min} + 1) \quad (16)$$

其中, \$i_{max}, i_{min}, T(i_{max})\$ 及 \$T(i_{min})\$ 分别是测试数据中的最大代码、最小代码和各自的转换电平。

4 计算机仿真

在这部分,本文采用 MATLAB 对高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的非线性进行了仿真。在仿真中,

利用 MATLAB 的可视化建模和仿真功能 (Simulink) 仿真测试数据, 然后进行数据处理。

图 4 是单片 ADC 微分非线性的仿真结果。图 4(a) 是采用公式 (2) 计算的结果, 图 4(b) 是采用公式 (13) 计算的结果。在仿真中, 由于采用大样本 (10^6), 基本消除了统计误差, 对照图 4(a) 和图 4(b) 可知, 采用公式 (13) 计算 ADC 微分非线性与采用公式 (2) 计算的结果非常接近, 方差均为 0.015。同时分别采用定义和统计直方图测试方法对单片 ADC 的积分非线性进行仿真, 结果方差为 0.0073 和 0.0102。

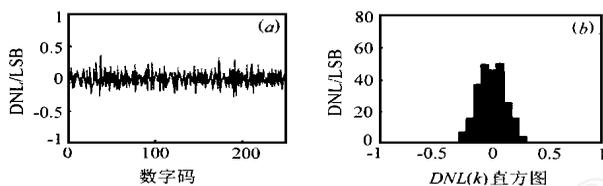


图 4 单片 ADC 的微分非线性

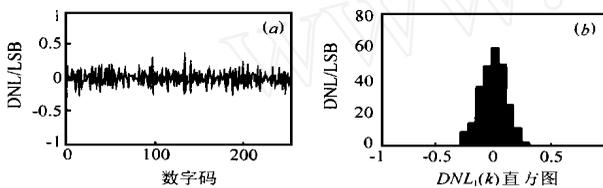


图 5 系统中每片 ADC 的微分非线性

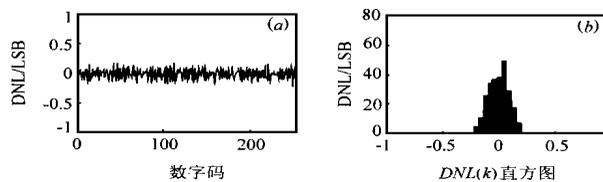


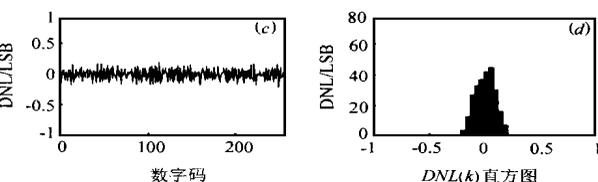
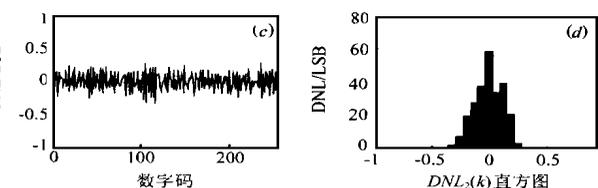
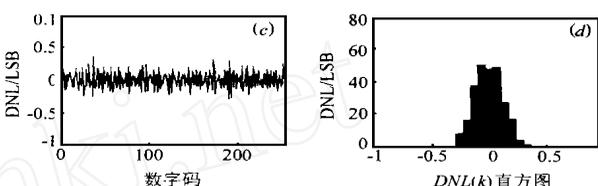
图 6 系统的微分非线性

性^[5]。对系统的积分非线性进行仿真, 单片 ADC 的方差为 0.0097 和 0.0103, 系统的积分非线性的方差为 0.0069。结果表明, 与组成系统的单片 ADC 相比, 系统的积分非线性也变好。

5 结论

本文研究了高速 ADC 及其构成的并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性, 并根据统计方法由单片 ADC 微分非线性与积分非线性导出了并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性的数学表达式。采用统计直方图方法对单片 ADC 和由双片 ADC 组成的并行/交替式数据采集系统进行计算机仿真。结果表明, 并行/交替式数据采集系统的微分非线性与积分非线性小于组成系统的单片 ADC 的微分非线性与积分非线性。理论推导表达式与仿真相吻合。

图 5 和图 6 是由两片 ADC 组成的并行/交替式数据采集系统微分非线性的仿真结果。两片 ADC 组成的系统是这种并行/交替式结构中最简单的, 但其不失一般性。其中图 5(a) 和图 5(b) 是两片 ADC 各自的微分非线性, 方差分别为 0.0129 和 0.0152。图 6(a) 是由公式 (7) 计算的结果, 图 6(b) 是由公式 (2) 计算的结果, 由图可知结果吻合较好, 方差均为 0.0074。与单片 ADC 相比, 系统的微分非线性的方差变小了, 从这种结构本身考虑, 结果也应如此, 因为多片 ADC 并行引起统计平均作用, 也因此并行/交替式数据采集系统有较好微分非线性。



林茂六 1943 年生, 1967 年毕业于成都电讯工程学院电讯系。现任哈尔滨工业大学电子与通信工程系教授, 中国电子学会电子测量与仪器分会理事。目前主要研究领域为超高速数字化系统的体系结构, 非均匀取样信号理论及校准技术等。



吴芝路 1961 年生, 1983 和 1989 年分别获得哈尔滨工业大学学士和硕士学位, 现任哈工大应用电子技术教研室主任, 副教授, 在职博士。目前主要研究方向为超高速数字化系统的体系结构, 非均匀取样信号理论及校准技术以及数字视频技术等。

(下转第 78 页)

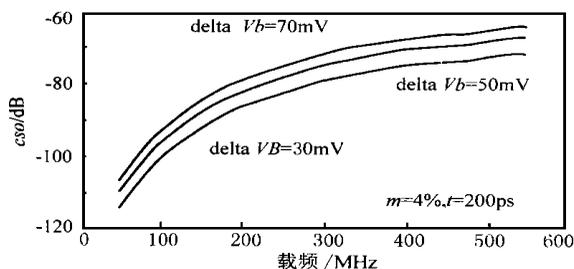


图 6 偏置点漂移对系统 CSO 的影响
(调制度 4%, 路径延时 0.2ns)

没有影响,可以证明对 CNR 也基本没有影响. 要保证 CSO < -70dBc, 偏置点偏移最佳点不能大于 50mV. 因而必须采取措施稳定工作点. 控制的方法可以通过引入导频进行自动电平控制的方法.

3.3.3 干涉噪声的抑制 与基于激光器的前馈补偿相比,基于调制器的补偿方案中仅采用了一个光源,但带来的问题是如不采取措施,两个调制器的输出将是相干叠加,这样势必会产生不利的干涉噪声. 因此,可考虑在主调制器输入光路中插入相位调制器,以避免发生信号间的干涉.

4 结论

本文在对外调制光发射机原理及非线性补偿技术进行阐述的同时,重点论述了 BBI 调制器的前馈补偿技术的原理和系统结构,并对这一方案的关键技术进行了详细分析. 采用前馈补偿法可以使发射机的非线性获得很好的改善. 其中外调制偏置的稳定性控制和信号延时量的严格要求是实现这一技术的关键. 可以肯定,随着外调制光发射机在 CATV 传输中发

挥越来越大作用,前馈补偿法以其在实现的复杂程度、达到的性能和成本等方面所具有明显的优势,必将受到人们的关注.

参考文献

- [1] M. Nazarathy, et al. Progress in Externally Modulated AM CATV Transmission Systems. J. of Lightwave Technology, 1993, 11(1): 82 ~ 104
- [2] 蒋洪涛, 查开德. 光纤 AM CATV 外调制发射技术. 光通信技术, 1997, (1)
- [3] S. K. Korotky, et al. Dual Parallel Modulation Schemes for Low-Distortion Analog Optical Transmission. J. on Selected Areas in Communication, 1990, 8(7)
- [4] K. E. Alameh, et al. Optimization of Fiber Amplifier SCM Lightwave Video Systems Using Direct and External Modulation. J. of Lightwave Technology, 1993, 11(1): 76 ~ 80
- [5] S. P. Dye, et al. Dual Modulation Compensation for Optical Intensity Modulator Nonlinearities. IEEE Photonics Tech. Lett, 1996, 8(1)
- [6] J. D. Farina, et al. New Linearization Technique for Analog Fiber-Optic Links. DFC '96, THR6

杨 静 1974 年生, 分别于 1997 年和 1999 年在清华大学电子工程系获得学士和硕士学位. 主要研究方向为光纤通信系统及光电器件. 目前主要从事光纤接入网及外调制光发射机技术研究.

查开德 1938 年生, 1965 年毕业于清华大学电子工程系. SPIE 会员, 中国光子学会会员, 中国兵工学会光学学会工程光学专业委员会副主任, 北京市光通信专业委员会委员. 目前主要从事微波副载波光传输与技术、HFC 及光纤 CATV 技术、宽带综合业务接入网技术以及微波光电子技术等方面的研究.

(上接第 74 页)

参考文献

- [1] Y. C. Jenq. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: Fundamentals and high-speed waveform digitizers. IEEE Trans. Instrum. Meas., June 1988, 37: 245 ~ 251
- [2] Y. C. Jenq. Digital spectra of nonuniformly sampled signals: Robust sampling time offset estimation algorithm for ultra high-speed waveform digitizers using interleaving. IEEE Trans. Instrum. Meas., Feb. 1990, 39: 71 ~ 75
- [3] D. Dallet, Y. berthoumieu. A survey on the dynamic characterization of A/D converters. Measurement, 1998, 24: 263 ~ 279
- [4] 林茂六等. 试论非均匀取样周期信号的数字频谱. 电子学报, 1991, 19(3): 42 ~ 49
- [5] J. B. Simões, Jorge Landeck, Carlos Mannel B. A. Correia. Nonlinearity of a Data-Acquisition System with Interleaving/Multiplexing. IEEE Trans. Instrum. Meas., Dec. 1997, 46: 1274 ~ 1279