

Delta-Sigma A/D 转换器原理及其 PSpice 仿真

陈 拓, 刘 铮

(中国科学院 西安网络中心, 陕西 西安 710043)

摘 要: 为了深入理解 Delta-Sigma A/D 转换器的工作原理, 合理地使用这类 A/D 转换器产品, 或者用 FPGA 实现自己的 Delta-Sigma A/D 转换器设计。采用 PSpice 仿真软件进行模拟仿真的方法, 对不同幅度的输入信号进行了一阶 Delta-Sigma A/D 转换器仿真实验, 获得了与理论相一致的结果。通过对元件的参数扫描仿真为实际电路设计中元件的选择提供了实验依据。仿真实验过程完整, 易于重复, 与纯数学推导相比, 仿真具有直观的特点。

关键词: Delta-Sigma A/D 转换器; 过采样; PSpice 仿真

中图分类号: TN792-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2011)16-0119-04

Principle and PSpice Simulation of Delta-Sigma AD Converter

CHEN Tuo, LIU Zheng

(Xi'an Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710043, China)

Abstract: To deeply understand the working principle of Delta-Sigma AD converter, and make people to use this kind of AD converter products rationally, or realize Delta-Sigma AD converter design with FPGA, a simulation experiment of first-order Delta-Sigma AD converter for the input signal of different amplitude was performed with PSpice simulation software. A result consistent with the theory was obtained. An experimental basis is provided for the selection of components in actual circuit design through scanning and simulating the component parameters. The simulation experimental process is complete and easy to repeat. Compared with the pure mathematics deduce, the simulation has an intuitionistic characteristic.

Keywords: Delta-Sigma AD converter; oversampling; PSpice simulation

0 引 言

Delta-Sigma A/D 转换器具有高分辨率、高集成度、成本低和使用方便的特点, 近年来, 因数字化产品对高分辨率 A/D, D/A 转换器需求的激增而得到广泛地应用。Delta-Sigma A/D 转换器的构想出现已有很多年了, 早期因受集成电路制造技术的限制, 未在产品中广泛使用, 随着集成电路制造成本不断降低, 该技术的应用渐多, 目前已成为高精度 ADC 的主流技术。随着该技术的趋热, 有更多人想了解其工作原理, 但目前国内的教材对其涉及还不多, 期刊论文多侧重数学演绎, 文献中未见有详尽的仿真实例。

除了制造专用 ADC, 该技术还易于用 FPGA 实现, 逻辑电路可以完全集成在 FPGA 内部, 只需要很少的外围元件, 就可以用 FPGA 直接进行混合信号处理。由于 FPGA 可扩展和可重配置的特性, 特别适合产品研发和小规模生产的场合, 另外用 FPGA 在单一芯片上实现多路 Sigma-Delta A/D 转换也很容易。

Delta-Sigma 有时称其为 Sigma-Delta, 或 $\Sigma\Delta$ 。

1 Delta-Sigma A/D 转换器原理

在 $\Delta\text{-}\Sigma$ A/D 转换器中, 模拟输入电压信号被连接到一个积分器的输入端。在输出端对应输入大小产生一个电压变化率, 或者斜坡。然后用比较器将该斜坡电压与地电位(0 V)进行比较。比较器的行为就像 1 位 A/D 转换器, 根据积分器的输出是正或负产生 1 位的输出(“高”或“低”)。比较器的输出通过一个以很高频率时钟驱动的 D 触发器被锁存, 并且反馈到积分器的另一个输入通道, 向 0 V 方向趋势驱动积分器。基本电路如图 1 所示。

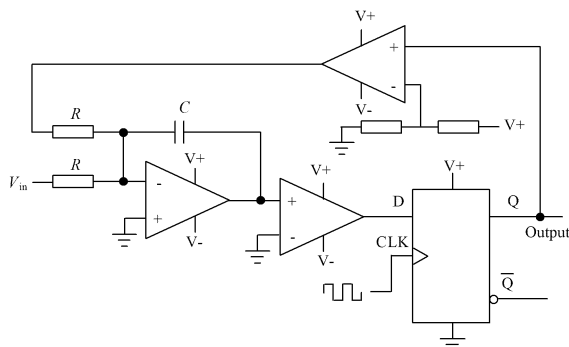


图 1 $\Delta\text{-}\Sigma$ A/D 转换器基本电路

收稿日期: 2011-03-14

在图 1 中,最左边的运放是积分器。积分器馈入的下一个运放是比较器,或 1 位 A/D 转换器。接下来是 D 触发器,在每个时钟脉冲锁存比较器的输出,发送“高”或“低”信号到电路顶部的下一个比较器。最后这个比较器用于转换信号极性,将触发器的 0 V/5 V 逻辑电平输出转换到 $V+/V-$ 电压信号再反馈到积分器。

如果积分器输出是正,第一次比较器将输出一个“高”信号给触发器的 D 输入。在下一个时钟脉冲,“高”信号将从 Q 线输出到最后一个比较器的放大器输入。最上面的那个比较器将看见一个输入电压大于 $+1/2 V$ 的阈值电压,它向正方向饱和,发送一个满 $V+$ 信号到积分器的另一个输入端。这个 $V+$ 反馈信号向负方向驱动积分器输出。如果输出电压一直为负,反馈环将发送一个矫正信号($V-$)回到积分器的顶部输入,向正方向驱动它。这就是 $\Delta-\Sigma$ 行为的概念:第一个比较器感知在积分器输出和 0 V 电压之间的差(Δ),积分器求模拟输入信号与最上面比较器输出的和(Σ)。

2 PSpice 仿真

通过 PSpice 仿真模拟实验,可以更容易和更清楚地理解 $\Delta-\Sigma$ A/D 转换器的工作原理。下面采用 PSpice 仿真 $\Delta-\Sigma$ A/D 转换器。本文使用 Capture CIS Lite Edition 9.2 绘制电路图,用 PSpice Lite Version 9.2 进行仿真。

2.1 绘制电路图

先用 OrCAD Capture 绘制 $\Delta-\Sigma$ A/D 转换器电路图,如图 2 所示。信号源采用 $FREQ=100\text{ kHz}$ 的正弦信号。偏移 $VOFF=0$,幅度先设置为 0 V, $AMPL=0$ 。

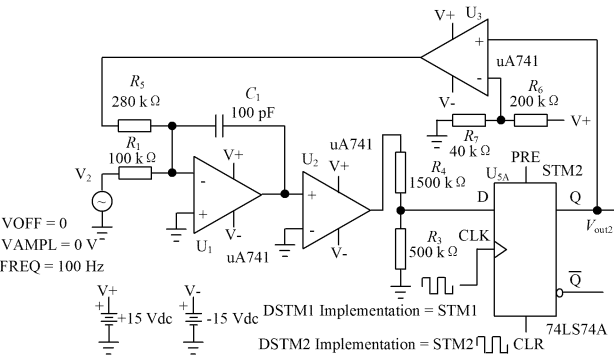


图 2 用 OrCAD Capture 绘制 $\Delta-\Sigma$ A/D 转换器电路图

为方便起见图中所有的运算放大器都使用 uA741 模型,因为这个模型很容易找到,实际项目中根据需选用合适的运放。D 触发器使用 74LS74。在 Capture CIS Lite Edition 9.2 和 PSpice Lite Version 9.2 中没有 74LS 系列的元件符号库 74ls. olb 也没有仿真库

74ls. lib, 可以从下面的网站下载:

<http://power.teipat.gr/download/OrCAD/OrCAD%20Libraries/Library%20for%20Capture/PSPIC E/>

74LS 系列是低功耗肖特基型 TTL 器件,输入高电平最小为 2.0 V,输入低电平最大为 0.8 V;输出高电平最小位 2.7 V,输出低电平最大为 0.5 V。采用 R_3 和 R_4 分压将 U_2 的输出电压转换为 0~3.75 V 电压,以适应 TTL 输入电平。74LS 模型只接受正电压作为电平信号,所以可以不理会比较器 U_2 的负电压输出。 R_6 和 R_7 分压 15 V 为 2.5 V 作为参考电压,将 74LS74 的 TTL 输出电平通过 U_3 转换为 $V+/V-$ 的电压信号。D 触发器的时钟由 DSTM1 提供。从 74LS74 的产品手册可知,当 LCR 和 PRE 端都为高电平时,在时钟的上升沿,D 触发器将输入端 D 的数据送到输出端 Q,并锁存到下一个时钟的上升沿。这个高电平由 DSTM2 提供。图 3 是在 Stimulus Editor 中显示的 STM1 和 STM2 的波形,双击波形可以对它进行编辑。

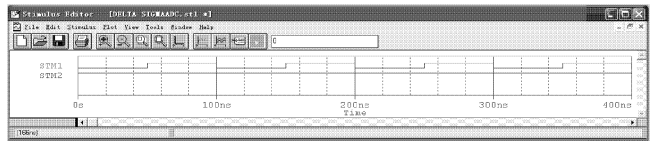


图 3 STM1 和 STM2 的波形

2.2 输入信号电压幅度为 0 V 的情况

从功能上说, $\Delta-\Sigma$ A/D 转换器的转换结果是一个由触发器输出的串行比特流。如果模拟输入是 0 V,积分器将不会有趋向正或负的斜坡,积分器只响应反馈电压。在这种情况下,触发器输出将持续在“高”和“低”之间震荡输出,反馈系统前后搜索,试图维持积分器输出在 0 V。图 4 是 $\Sigma-\Delta$ 转换器以 0 V 模拟输入运行的示意图,图中方波是 D 触发器输出,三角波是积分器输出的。

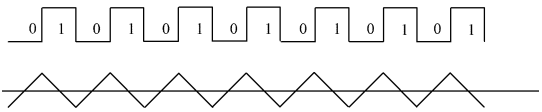


图 4 $\Sigma-\Delta$ 转换器以 0 V 模拟输入运行的示意图

图 5 是 $\Sigma-\Delta$ 转换器以 0 V 模拟输入运行的仿真图。

图 5 中,方波是 D 触发器输出的串行比特流,幅度较大的三角波是积分器的输出波形。仿真配置文件设置如图 6 所示。

2.3 输入信号电压幅度不为 0 V 的情况

如果施加一个小的负模拟输入电压,积分器将有一个向负方向倾斜它的输出的趋势。反馈只能以一个固定的电压(电源电压)在一定的时间内校正积分器的

倾斜, 这样触发器的比特流输出将和前面不完全相同。图 7 是 $\Sigma\Delta$ 转换器以小负模拟输入运行的示意图。

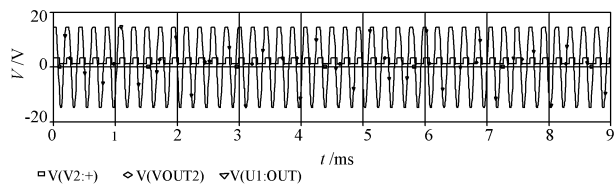


图 5 输入信号电压幅度为 0 V 的仿真图

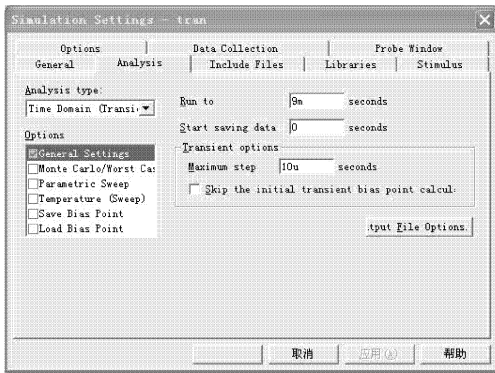


图 6 瞬态仿真配置文件设置

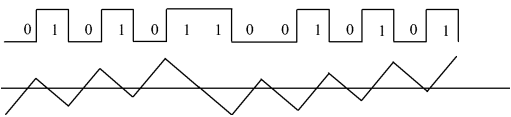


图 7 $\Sigma\Delta$ 转换器以小负模拟输入运行的示意图

施加一个较大的负模拟输入信号到积分器, 它的输出向正方向倾斜的更陡。这样, 反馈系统将输出比以前更多的 1, 以带领积分器输出回到 0 V。图 8 为 $\Sigma\Delta$ 转换器以较大负模拟输入运行的示意图。

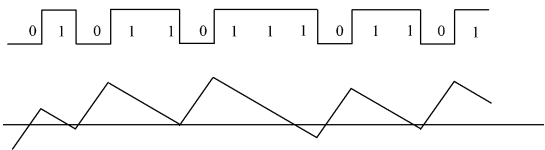


图 8 $\Sigma\Delta$ 转换器以大负模拟输入运行的示意图

用平均串行比特流的方法可以从该电路获得并行二进制数输出。例如, 用一个计数电路搜集在一个给定时钟脉冲中触发器输出 1 的总数(正输入电压数输出 0 的总数), 该计数器的值可以用来表示模拟输入电压。图 9 是 $\Sigma\Delta$ 转换器以 5 V 模拟输入运行的仿真图。

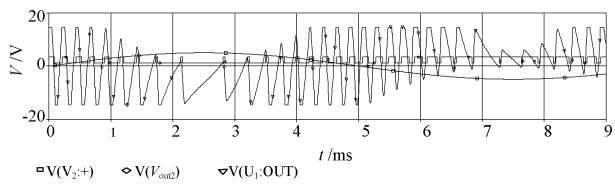


图 9 $\Sigma\Delta$ 转换器以 5 V 模拟输入运行的仿真图

图中, 正弦波是输入信号, 方波是 D 触发器输出的

串行比特流, 三角波是积分器的输出波形。图 10 只显示输入信号和 D 触发器输出。

从图 10 中可以清楚地看到输入信号对输出脉冲宽度和频率的调制, 输出是占空比随模拟输入电压大小变化的 1, 0 位流。

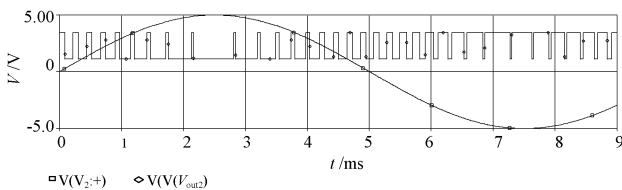


图 10 只显示输入信号和 D 触发器输出

3 PSpice 仿真对不同电压幅度的输入信号积分器参数的调整

对不同幅度的输入信号, 需要调制积分器的参数, 以提高 A/D 转换的精度。图 11 是理想积分器及其输入/输出公式, 其中 RC 是积分器的积分常数。

$$v_O = \frac{-1}{RC} \int_{t_0}^t v_i(t) dt + v_O(t_0)$$

对应本文的电路 R_1 、 R_5 和 C_1 决定积分器的时间常数, $R_1 C_1$ 是输入信号的积分常数, $R_5 C_1$ 是反馈信号的积分常数。改变电阻或电容值会改变转换精度。改变 C_1 会同时改变输入信号和反馈信号的时间常数, 当输入信号的幅值范围变化时通过改变 R_1 来提高转换精度要好一些。通过对 R_1 的参数扫描可以看出积分器时间常数对转换精度的影响。

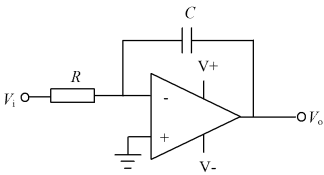


图 11 理想积分器及其输入/输出公式

通过参数扫描分析可知, 电阻增加, 减小了输入信号的强度, 脉冲直接的间距减小, 脉冲之中包含更少的“0”或“1”, 说明转换精度降低。但是 R_1 也不能太小, 如果 R_1 太小在对应输入信号幅值较高处会丢失一些脉冲, 也就是丢失了数据。时间常数的选取要根据实际需求中输入信号波形的幅值范围进行反复仿真以获取最佳参数, 并用实际电路测试来确定。

4 小信号输入的仿真例子

前面在说明 $\Sigma\Delta$ 转换器原理时输入信号电压幅值为 5 V, 实际应用中很多情况下输入信号是毫伏量级的, 下面对幅值为 0.05 V (50 mV) 的正弦信号进行仿真。用参数仿真的方法确定 $R_1 = 1.1 \text{ k}\Omega$ 。仿真结果如

图12所示。

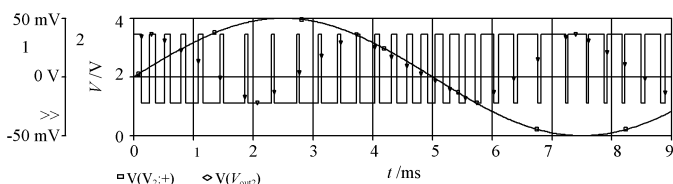


图12 小信号输入仿真结果

5 结 语

$\Sigma\Delta$ A/D 转换器具有非常高的分辨率,而且噪声很低,因为它采用了过采样的技术,因此对于前端的抗混叠滤波器的要求也大大降低,一般一个简单的 RC 低通滤波器就足够了。这类 ADC 的线性度也非常好,目前已成为实现高精度 A/D 转换的主要方式,但是它付出的代价是采样速率的降低。另外,由于内部滤波器对于模拟信号的突变和通道的切换需要相对长的建立时间,而且输出的数据与模拟输入之间有较长的延时,所以这类 A/D 转换器适用于那些模拟信号近似于直流或变化很慢的应用,如温度测量、压力测量等,近年来在音频领域也有应用。

参 考 文 献

- [1] KUPHALDT T R. Lessons in electric circuits volume IV-Digital [R/OL]. [2006-01-18]. <http://www.openbook->

作者简介: 陈 拓 男,1957 年出生,湖南长沙人,研究员。研究方向为嵌入式技术应用。

刘 铮 男,1978 年出生,内蒙古临河人,工程师。研究方向为嵌入式技术应用。

(上接第 118 页)

宽带放大器的自激问题及减小输出噪声,采用了多种形式的抗干扰措施,抑制噪声,改善放大器的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 康华光.电子技术基础模拟部分[M].5版.北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 秦龙.MPS430 单片机常用模块与综合系统实例精讲[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 胡大可.MSP430 系列单片机 C 语言设计与开发[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [4] 黄智伟.全国大学生电子设计竞赛训练教程[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [5] Texas Instruments Incorporated. MSP430X1XX family users

作者简介: 王晓斐 女,1981 年出生,江苏无锡人,硕士,讲师。主要研究方向为电子测控技术。

封为忠 男,1950 年出生,江苏南京人,硕士,教授。主要研究方向为电子与传感器技术。

吴海青 女,1969 年出生,安徽芜湖人,硕士,副教授。主要研究方向为电子测控技术。

project.net.

- [2] DICK C, HARRIS F. FPGA signal processing using sigma-delta modulation [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 17 (1): 20-35.
- [3] KULCHYCKI Scott. Continuous-time Sigma-Delta A/D converters [R]. USA: National Semiconductor Corporation, 2008.
- [4] JAN Van der Spiegel. Pspice a brief primer [R]. USA: University of Pennsylvania, 2006.
- [5] LYONS R G. Understanding digital signal processing [M]. 3rd ed. [S. l.]: Prentice Hall, 2010.
- [6] FRIEDEL Gerfers, MAURITS Ortmans. Continuous-time Sigma-Delta A/D conversion: fundamentals, performance limits and robust implementations [M]. [S. l.]: Springer, 2005.
- [7] NORSWORTHY S R, SCHREIER R, TEMES G C. Delta-Sigma data converters: theory, design, and simulation [M]. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 1996.
- [8] SCHREIER R, TEMES G C. Understanding Delta-Sigma data converters [M]. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 2004.
- [9] JAMES C Candy, TEMES G C. Oversampling Delta-Sigma data converters: theory, design, and simulation [M]. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press, 1991.
- [10] PARK Sangil. Principles of Sigma-Delta conversion for analog to digital converters [M]. [S. l.]: Published by Motorola, 2010.
- guide [M]. [S. l.]: Texas Instruments Incorporated, 2006.
- [6] Texas Instruments Incorporated. MSP430F155 [M]. [S. l.]: Texas Instruments Incorporated, 2006.
- [7] 黄争.德州仪器高性能单片机和模拟器件在高校中的应用和选型指南 [M].上海:德州仪器半导体技术(上海)有限公司大学计划部,2010.
- [8] 黄争.德州仪器高性能模拟器件在大学生创新设计中的应用与快速选型指南 [M].上海:德州仪器半导体技术(上海)有限公司大学计划部,2009.
- [9] 鹿璇.一种可控直流宽带放大器的设计 [J].宇航计测技术, 2010, 30(4): 63-65.
- [10] 韦穗林.集成运算放大器构成交流放大电路的分析和设计 [J].电子技术, 2009(8): 26-28.