

$\Delta \Sigma$ ADC 工作原理，第 1 部分

作者：Bonnie Baker，
德州仪器 (TI) 信号完整性工程师

虽然模拟技术已经主导信号处理长达数十年之久，但数字技术也正在渐渐渗透到这一领域。 $\Delta \Sigma$ 模数转换器 (ADC) 设计的四分之三为数字设计，四分之一为模拟设计。现在， $\Delta \Sigma$ ADC 是在宽频率范围将模拟信号从 DC 转换为几兆赫信号的理想选择。基本上来说，这些转换器都由一个过采样调制器和一个数字/抽样滤波器组成，它们协调工作产生高分辨率的数据流输出。本系列文章将仔细研究 $\Delta \Sigma$ ADC 的核心部分，该文章共分为 2 个部分。第 1 部分将介绍 $\Delta \Sigma$ 调制器的基本拓扑结构和原理，第 2 部分将介绍数字/抽样滤波器模块的基本拓扑结构和原理。

$\Delta \Sigma$ 转换器：概览

基本的 $\Delta \Sigma$ 转换器为一种 1 位采样系统，其应用于转换器输入端的模拟信号需要相对较慢，目的是让转换器能够对其进行多次采样，即著名的过采样技术。在输出端，采样速率比数字结果快数百倍。单个采样逐渐累积，并通过数字/抽样滤波器将其与其他输入信号采样一起“求平均”。

$\Delta \Sigma$ 转换器的主要内部单元为 $\Delta \Sigma$ 调制器和数字/抽样滤

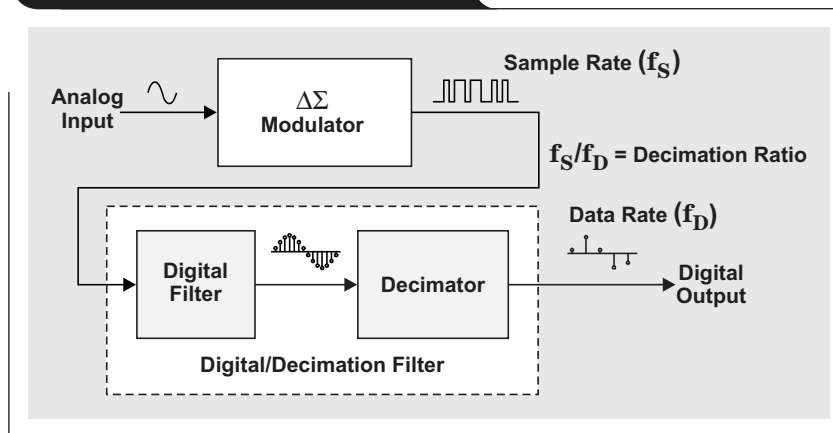
波器。图 1 所示的内部 $\Delta \Sigma$ 调制器以非常高的速率对输入信号进行粗略采样，并转换成 1 位数据流。之后，数字/抽样滤波器使用该采样数据，将其转换为高分辨率、低速数字代码。大多数转换器都有一个采样速率，而 $\Delta \Sigma$ 转换器却有两个采样速率——输入采样速率 (f_S) 和输出数据速率 (f_D)。

$\Delta \Sigma$ 调制器

$\Delta \Sigma$ 调制器是 $\Delta \Sigma$ ADC 的心脏。它负责数字化模拟输入信号和减少低频噪声。在这一级中，该架构实施了一种被称为噪声整形的功能，将低频噪声推升至相关频带以外的高频。正是由于噪声整形功能， $\Delta \Sigma$ 转换器才非常适合于低频、高精度测量。

$\Delta \Sigma$ 调制器的输入信号是时变模拟电压。对于更早的一些 $\Delta \Sigma$ ADC 来说，这种输入电压信号主要用于 AC 信号很重要的音频应用。现在，应用的重点已经转向一些精密应用，转换速率包括 DC 信号。本文将使用一个单周期的正弦波来进行说明。

图 1 $\Delta \Sigma$ ADC 结构图



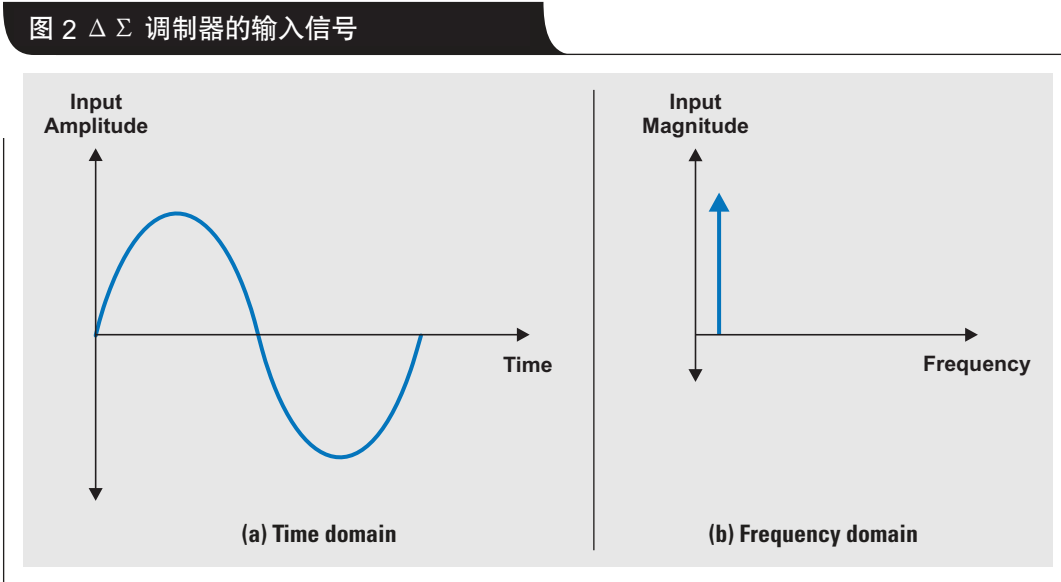


图 2a 显示了 $\Delta\Sigma$ 调制器输入的一个单周期正弦波。该单周期的电压振幅随时间变化。图 2b 显示了图 2a 所示时域信号的频域表示。图 2b 中的曲线图代表图 2a 的连续正弦波，并表现为一条直线或者支线。

研究 $\Delta\Sigma$ 调制器的方法有两种——时域研究（请参见图 3）或者频域研究（请参见图 4）。图 3 所示时域结构图描述了一阶 $\Delta\Sigma$ 调制器的结构。该调制器将模拟输入信号转换为一个高速、单位、调制脉波。更重要的是，图 4 所示频率分析表明了调制器如何影响系统噪声，以及如何帮助产生更高分辨率的结果。

图 3 所示 $\Delta\Sigma$ 调制器获得大量输入信号的采样，生成 1 位代码数据流。系统时钟与调制器的 1 位比较器一起实施采样速度 f_s 。

这样，便在一个与系统时钟相等的高采样速率下产生 $\Delta\Sigma$ 调制器的量化行为。同所有量化器一样， $\Delta\Sigma$ 调制

器生成代表输入电压的数值数据流（此处为 1 位数据流）。这样，1 和 0 的数量比便代表输入模拟电压。同大多数量化器不一样的是， $\Delta\Sigma$ 调制器包括一个积分器，其具有将量化噪声整形为更高频率的作用。因此，调制器输出端的噪声谱并非为平直均匀。

在时域中，对 1 位数模转换器 (DAC) 的模拟输入电压和输出求微分，得到 x_2 模拟电压。该电压被送至积分器，得到负或者正向输出。 x_3 的信号方向和斜率取决于 x_2 电压的符号和大小。 x_3 电压等于比较器基准电压时，比较器输出由负转为正，或者由正转为负，具体取决于其初始状态。比较器的输出值 x_4 回到 1 位 DAC 中，同时输出到数字滤波器级 y_i 。比较器输出从高电平转为低电平或者从低电平转为高电平时，1 位 DAC 通过改变差动放大器的模拟输出电压来做出响应。这样便在 x_2 形成了不同的输出电压，导致积分器反方向运行。该时域输出信号是采样速率 (f_s) 下输入信号的脉波表示。若对输出脉冲串求平均，其等于输入信号的值。

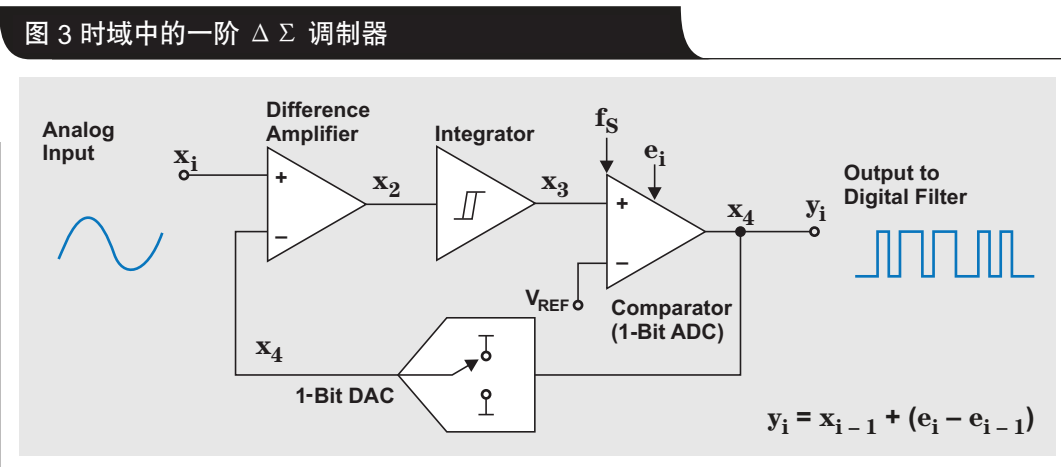


图 3 时域中的一阶 $\Delta\Sigma$ 调制器

图 4 频域中的一阶 $\Delta\Sigma$ 调制器

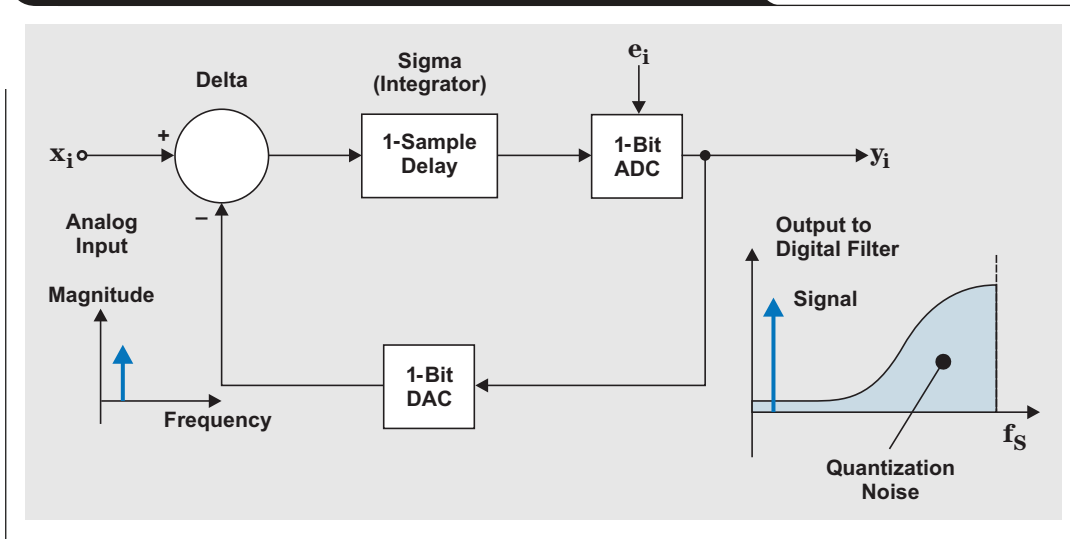


图 3 所示离散时间结构图也表明了这种时域传输函数。时域中，1 位 ADC 将信号数字化成粗糙的 1 位输出代码，从而产生转换器量化噪声。调制器的输出等于输入加量化噪声 $e_i - e_{i-1}$ 。该公式表明，量化噪声是当前量化误差 (e_i) 和之前量化误差 (e_{i-1}) 的差。图 4 显示了这种量化噪声的频率位置。

图 4 还表明组合使用积分器和采样策略，实现了对数字输出代码的噪声整形滤波。在频域中，时域输出脉冲表现为输入信号（即尖峰）和经过整形的噪声。图 4 所示噪声特性是理解调制器频率使用和 $\Delta\Sigma$ ADC 能够达到这种高分辨率原因的关键。

调制器噪声被移出至更高的频率。图 4 表明，一阶调制器的量化噪声开始于零赫兹，然后迅速升高，最终在调制器采样频率 (f_s) 达到最大值并保持平稳状态。

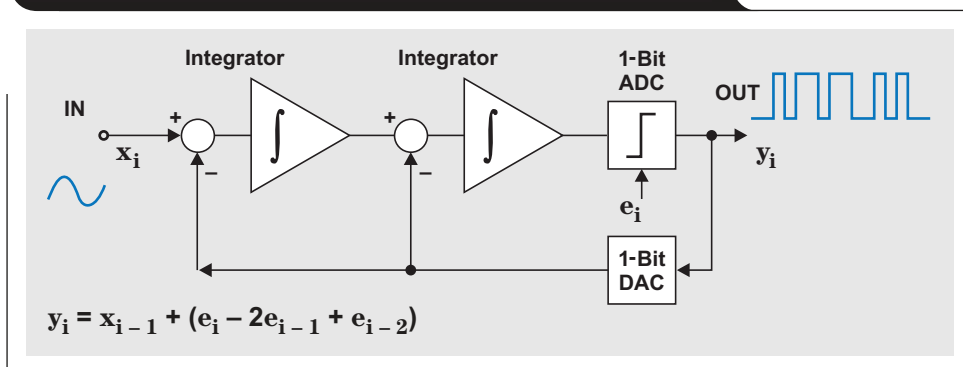
使用一个两次积分而非一次的积分电路，是减少调制器频带内量化噪声的很好方法。图 5 显示了一个 1 位、二

阶调制器，其拥有两个积分器。该二阶调制器举例中，噪声项不仅仅取决于前面一个误差，而是取决于前面两个误差。

二阶或者多阶调制器存在的一些缺点包括过于复杂、多重循环以及设计困难等。但是，大多数 $\Delta\Sigma$ 调制器均为高阶，如图 5 所示。例如，TI $\Delta\Sigma$ 转换器就包括了二到六阶调制器。

相比低阶调制器，多阶调制器可将量化噪声整形至更高的频率。图 6 中，频率 f_s 位置最高的那根线条表明三阶调制器的噪声响应。请注意，在其 f_s 采样频率下，该调制器的整个输出过程都有大量噪声。但是，在更低频率下，即 f_D 以下和输入信号尖峰附近，三阶调制器却非常安静。 f_D 是数字/抽样滤波器的转换频率。本系列文章的第 2 部分将讨论如何选择 f_D 的值。

图 5 二阶 $\Delta\Sigma$ 调制器结构图



调制器：故事才讲了一半

$\Delta\Sigma$ ADC 的调制器成功地在转换过程中减少了低频噪声。但是，高频噪声却又成了问题，它是转换器最终输出所不需要的。系列文章的第 2 部分将讨论如何使用低通数字/抽样滤波器来处理这种噪声。

参考文献

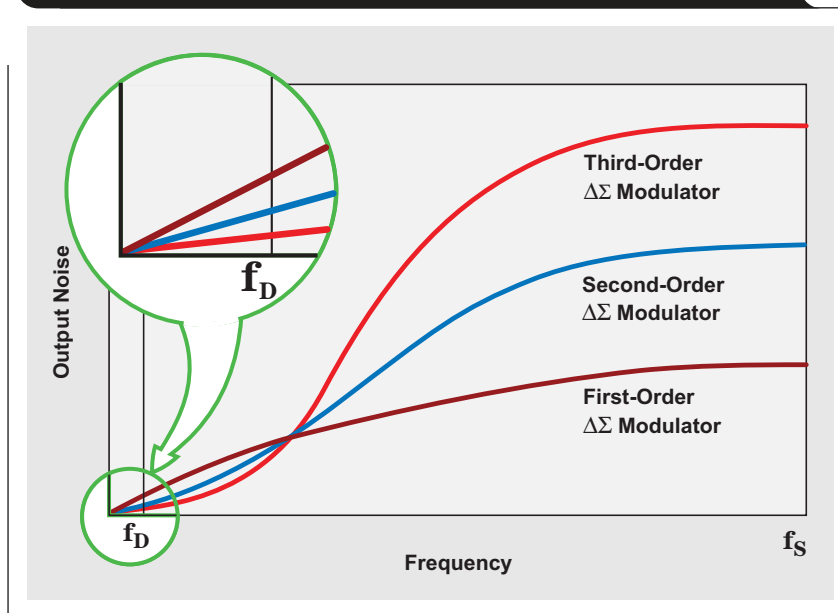
1、《CMOS：混频信号电路设计》，作者：R. Jacob Baker，约翰·威利国际出版公司，2002 年。

2、TI，《 $\Delta\Sigma$ 基础视频教程》（在线），网址：<http://focus.ti.com/docs/training/catalog/events/event.jhtml?sku=WEB408001>

相关网站

Dataconverter.ti.com

图 6 $\Delta\Sigma$ 调制器噪声整形与采样频率 f_S 位置调制阶数的关系



重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。仅在TI 保证的范围内, 且TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于TI 的产品手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由TI 提供, 但他们将独力负责满足在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP 机动性处理器	www.ti.com/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity		
	德州仪器在线技术支持社区		www.deyisupport.com

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2011 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司