Sigma-delta 转换器测量技术

白皮书

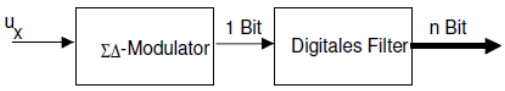
By Prof.Dr.Ing Klaus Metzger　　翻译：王金

最近，ΣΔ 转换器应用于各种测试与测量应用。实际上，许多 imc Meßsysteme 的系统和设备（如 imc CRONOScompact,imc CANSAS 等）用这些转换器作为标准硬件，这种转换器的功能如何，为什么它的重要性增涨如此迅速，以及它给工程师和技术员们带来了什么益处，这本白皮书会一一解答。

Sigma-delta 转换器在音频技术上应用普遍，目前深入渗透到测试和测量领域。特别是对于智能测量系统，这种转换方法是最好的方法，它具有高采样率和出色的信噪比（SNR）。测量设备的这些转换器从一开始的主要优势在于抗混叠滤波器，（见白皮书：“选择正确的采样率”）。它们非常简单而且价格便宜，每个测量通道都可以配备一个，由于这些组件价格较低，没有配置模拟多路器架构的测量设备越来越少见。

下图显示 1 位 ΣΔ 调制器和高阶滤波器的转换，该调制器运行在一个高的、恒定的开关频率（过采样）。数字滤波后，数字滤波后的 n 位的输出率根据所需要的测量速率（采样）而降低。

a）框图



b) ΣΔ 调制器

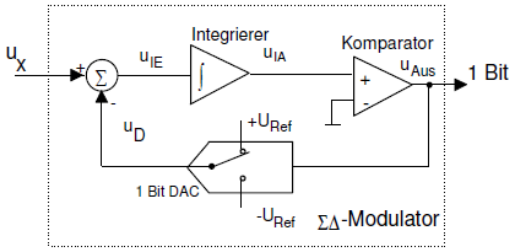


图 1： ΣΔ 转换器

ΣΔ 调制器的基本原理是一个由循环积分器和下游比较器，由于比较器只能读取逻辑值“1”和“0”，因此 1 位 DAC 信号、UD 和输入信号 UX 之间的平均差必须是“0”（否则积分器失控),DAC 信号的平均值要等于输入信号。由于输出信号是数字性质的， 1 位 DAC 要把信号变回模拟信号。UX 的输入电压范围值–URef ≤ UX ≤ URef。通过比较器信号的数字低通滤波，可以得出平均值（相当于 UX）。

如稍后示出的，频率达到采样频率的一半会降低噪声功率。如上图所示，控制环路引起噪声频谱高频部分移动（噪音整形），下面将会介绍。

1 位 ADC 之后是低通滤波器，一方面，会在感兴趣的频率范围内滤波噪音，另一方面，会降低采样频率（采样），用这些转换器，16 和 24 位的分辨率有可能实现。

量化噪声

首先，要理解转换器，一些必要的概念要澄清，包括量化噪音的概念，量化噪音 UNoise 是阶梯型电压和理想直线之差，转化器的采样率越高，量化噪声的步骤越少。

正弦输入信号的峰值 UP 和有效值

$$U_{Signal} = u_p / \sqrt{2}$$

由于1LSB=2UP/2^n：

$$U_{Signal} = 1LSB\, 2^{n-1} / \sqrt{2}$$

量化噪音的平均值对应下图：

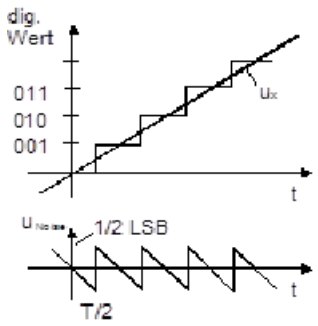


图2：量化噪音RMS值

UNoise信号的RMS：

$$U_{Noise} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T u_{Noise}^2 dt}$$

$$U_{Noise} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} u^2{}_{Noise} dt} = 1LSB/\sqrt{12}$$

信噪比（SNR）：

$$SNR = U_{Signal}/U_{Noise} = 2^n \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$$

SNR用dB表示：

$$SNR_{dB} = 20\log 2^n \sqrt{1{,}5} = 20\,(n\log 2 + \log 1{,}225)$$

如下：

$$SNR_{dB} = 6{,}02\,n + 1{,}76$$

根据等式，1位ADC的信噪比是7.78dB，对于16位ADC，要达到98dB，采用过采样和噪音整形可以实现。噪声的信噪比SNRdB和采样频率f_T：

$$SNR_{dB} = SNR\big|_{f_T}$$

过采样

根据采样定理，测量信号UX包含的频率成分只能到fT /2，UX最高的频率为f_m：

$$f_T = 2f_m$$

如果测量信号通过因子k（通常是3264）过采样，使得测量噪声分布在较宽的范围，会导致k倍过采样：

$$f_T = k \cdot 2f_m$$

噪声电压RMS：

$$U_{Noise} = 1LSB/\sqrt{12}$$

噪声功率：

$$P_{Noise} \sim (1LSB)^2/12$$

由于噪声频率超过范围–fT/2 to fT/2，噪声功率密度为：

$$p_{Noise} \sim (1LSB)^2/(12\,f_T)$$

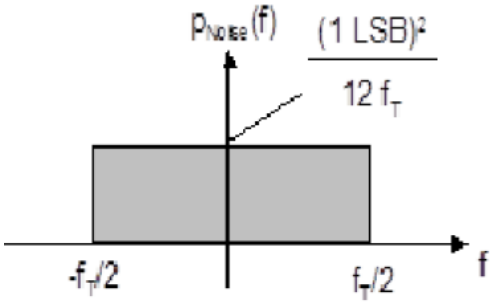


图3：过采样噪声功率密度

如果采样频率fT通过k因子增加，噪声功率密度通过相同的k因子减小

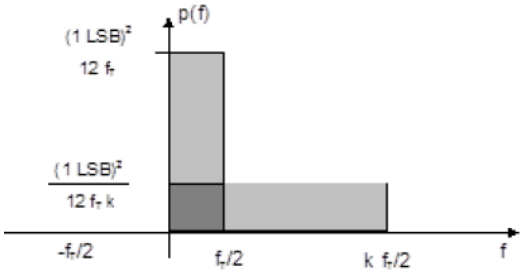


图4：减小的噪声功率密度

采样频率为fT，从0到+fT/2频率范围内的噪声电压：

$$U_{Noise}\Big|_{f_T} = \frac{1LSB}{\sqrt{12}}$$

采样频率为k fT，噪声电压：

$$U_{Noise}\Big|_{kf_T} = \frac{1LSB}{\sqrt{12k}} = \frac{1LSB}{\sqrt{12}}\frac{1}{\sqrt{k}} = U_{Noise}\Big|_{f_T}\frac{1}{\sqrt{k}}$$

通过k倍过采样，噪声电压减小

k倍过采样的信噪比：

$$SNR\big|_{kf_T} = 20\log\left(\frac{U_{Signal}}{U_{Noise}\big|_{kf_T}}\right) = 20\log\left(\frac{U_{Signal}}{U_{Noise}\big|_{f_T}}\sqrt{k}\right)$$

$$SNR\big|_{kf_T} = SNR\big|_{f_T} + 10\log(k)\,\text{in dB}$$

这意味着对于1位转换器64倍过采样，

信噪比是7.78dB + 18.06dB = 25.84dB.仍然不足的是16位的系统必须要98dB才能实现，采样率加倍，信噪比才增加3dB。

过采样的一个巨大优势，是抗混滤波器可以简单的被省略（第一或第二顺序），因为模拟数字转换器的采样频率很高，为避免混淆滤波器的陡度不用考虑，此外，过采样频率kft保持恒定，抗混滤波器不需要切换。和传统的数模转换器相比节省了很大成本。

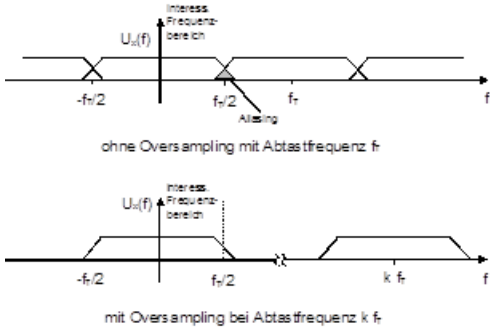


图5：过采样避免混叠

噪声整形

如下图所示，1位调制器和工作比较器具有同步采样频率，被称作1位噪声源UNoise，1位ADC的下游比较器在阈值URef和 -URef之间转换，作为比较器输出信号的水平调整，下面框图描述了噪声频谱如何移动。

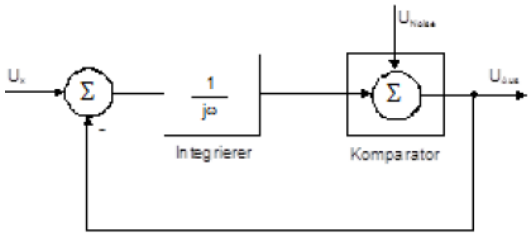


图6：调制器框图

输出信号UAus：

$$U_{Aus} = U_{Noise} + \frac{1}{j\omega}(U_x - U_{Aus})$$

根据UAus，结果可分为：

$$U_{Aus} = \underbrace{\frac{U_{Noise}}{1+\frac{1}{j\omega}}}_{\text{Hochpass}} + \underbrace{\frac{U_x}{1+j\omega}}_{\text{Tiefpass}}$$

从该式可以看出，低通滤波实测电压UX和高通滤波噪声电压UNoise，如下图所示，由于高通滤波，在感兴趣的频率范围内，一小部分噪声仍然保留。

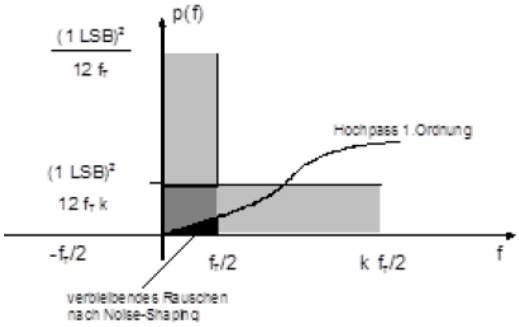


图7：噪声整形后的噪音

根据这些结果，在16和24位之间的n位数字滤波之后，可实现高信噪比值。使用高阶ΣΔ调制器，相应的高通也是高阶，噪声进一步减少到采样频率的一半。

了解这种转换技术具有的所有优点后，你可能想知道AD转换器的缺点，转换器（数字滤波器）输出合理的值需要相当长的时间（大约100us到200us），如果你有多个同种延迟的测量通道，对于测量目的来说，它不是缺点，因为所有通道都以这种方式延迟。如果你看整个的开闭环控制，这种延迟对于某些应用非常快，综上所述，转换器高分辨率、高采样率以及简单的抗混滤波器目前为止利大于弊。

附加信息

imc Meßsysteme GmbH

Voltastr. 5
13355 Berlin, Germany
Telephone: +49 (0)30-46 7090-0
Fax: +49 (0)30-46 31 576
E-Mail: hotline@imc-berlin.de
Internet: www.imc-berlin.com

德国 imc 集成测控有限公司，以 26 年专业经验，融合精湛的德国工艺、先进的制造技术与多项开发专利，设计制造专业的测试测量系统，致力于为全球工程技术领域提供包含硬软件的解决方案。

无论是整车测试、试验台架还是工厂或机械设备的自动化监控——imc 数据采集系统的优势获得测量业界的广泛认同，易于操作、性价比高，令测试更有效率！无论是研究、开发、测试还是试运行，imc 可提供标准化的测量设备和软件产品，以及完整的交钥匙解决方案。

对于机械/电子类测试应用，imc 测量系统提供高达每通道 100kHz 的采样频率，支持物理量测量的各种传感器，如压力、力、速度、振动、噪声、温度、电压或电流等信号。imc 的产品系列集成了信号调理和硬件的实时分析，并结合软件分析和测试管理产品，涵盖测量控制工作流程的所有方面，从信号调理单元、实时分析与控制，到自动化测试控制和生成测试报告。

imc成立于1988年，总部设在柏林，拥有约200名员工，在全球28个国家或地区拥有25家合作伙伴。我们不断努力，为地面交通工具（汽车、商用车辆和铁路机车等）、航空航天、能源和土木工程等工业领域的客户创新提供最佳的测量解决方案！

imcAccess Co.

北京
西城区裕民路 18 号北环中心 1110 室 100029
电话: 010-6552 8700 传真: 010-6552 1600

上海
长宁区新华路 728 号华联发展大厦 M10 室 200052
电话: 021-5230 1156 传真: 021-5230 1117

重庆
沙坪坝区沙正街 174 号理科楼 530 室 400040
电话：023-8131 6242

电邮: hotline.1@imcaccess.com
网站: www.imc-china.com

imcAccess 公司是由德国 imc 集成测控有限公司控股的贸易及技术服务公司，公司成立于 2002 年，独家负责德国 imc 公司产品在中国的全面推广以及技术服务！

我们竭诚为您提供快速、准确、及时的技术支持和服务：

1. 周到和专业地产品咨询服务，如产品的详细技术指标、硬件的方案配置；
2. 系列化的培训服务，从产品的硬件连接到软件的使用操作，以及结合应用的高级技术培训；
3. 快捷方便的沟通平台，如您在产品使用过程中有任何问题或需要，均可与我们专业的技术支持工程师取得联系；
4. 客制化服务，针对用户的实际需要，可谓客户完善现有分析功能，以及二次开发定制界面和功能；
5. 已有设备的定期校准、系统检查、系统升级等服务。

使用条款：

本文档版权归imc Meßsysteme GmbH所有，并保留一切权利。未经书面许可，任何公司或个人不得对此文档内容进行编辑、修改或以任何方式改变。该文档可以出版或复制。如果单独发表，我们要求必须包含我公司名称和网页链接www.imc-berlin.com。尽管内容已精心准备，文档内容仍有可能包含错误。若有任何信息不正确，请通过info@imcaccess.com告知我们。如因文档使用不当造成的直接或间接损失，本公司不承担任何责任。