ANALOG DEVICES
超 越 一 切 可 能™

技术文章

Σ-Δ型ADC拓扑结构基本原理：第一部分

Michael Clifford
应用工程师
ADI公司

in | 分享至LinkedIn　✉ | 电子邮件

简介

Σ-Δ型ADC是当今信号采集和处理系统设计人员的工具箱中必不可少的基本器件。本文的目的是让读者对Σ-Δ型号ADC拓扑结构背后的根本原理有一个基本了解。本文探讨了与ADC子系统设计相关的噪声、带宽、建立时间和所有其他关键参数之间的权衡分析示例，以便为精密数据采集电路设计人员提供背景信息。

它通常包括两个模块：Σ-Δ调制器和数字信号处理模块，后者通常是数字滤波器。Σ-Δ型ADC的简要框图和主要概念如图1所示。

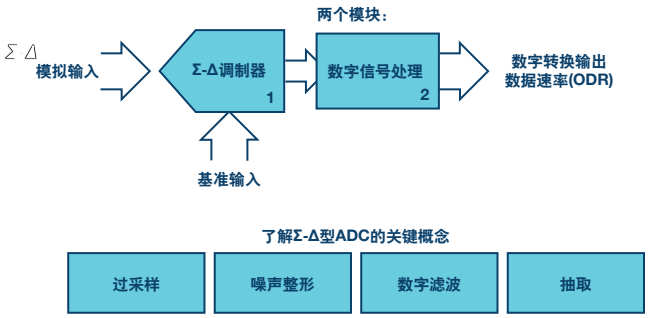

图1. Σ-Δ型ADC的关键概念。

Σ-Δ调制器是一种过采样架构，因此，我们从奈奎斯特采样理论和方案以及过采样ADC操作开始讨论。

图2比较了ADC的奈奎斯特操作、过采样方案和Σ-Δ调制(也是过采样)方案。

图2a显示了ADC以标准奈奎斯特方式运行时的量化噪声。这种情况下，量化噪声由ADC的LSB大小决定。F_S为ADC的采样速率，$F_S/2$为奈奎斯特频率。图2b显示的是同一转换器，不过现在它以过采样方式运行，采样速率更快。采样速率提高K倍，量化噪声扩展到$K \times F_S/2$的带宽上。低通数字滤波器(通常带抽取功能)可消除蓝色区域之外的量化噪声。

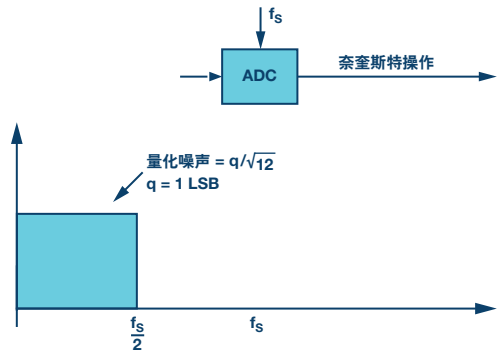

图2a. 奈奎斯特方案。采样速率为F_S，奈奎斯特带宽为$F_S/2$。

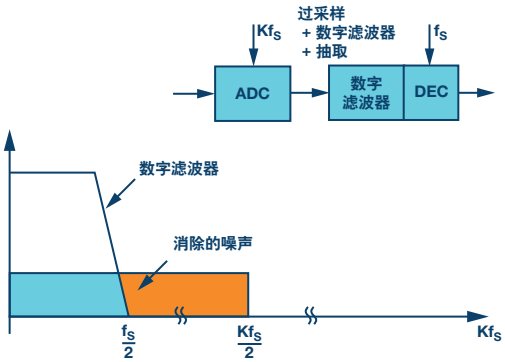

图2b. 过采样方案。采样速率为$K \times F_S$。

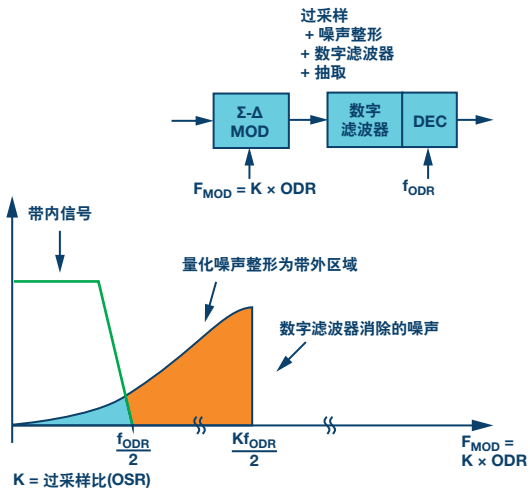

图2c. Σ-Δ型ADC方案。过采样和噪声整形，采样速率为$F_{MOD} = K \times F_{ODR}$。

Σ-Δ调制器多了一个特性，那就是噪声整形，如图2c所示。模数转换的量化噪声被调制整形，从低频移动到较高频率(通常如此)，低通数字滤波器可将其从转换结果中消除。Σ-Δ型ADC的噪底由热噪声决定，而不受量化噪声的限制。

采样、调制、滤波

Σ-Δ型ADC使用内部或外部采样时钟。ADC的主时钟(MCLK)常常要先分频，再交由调制器使用；阅读ADC数据手册时应注意这点，并了解调制器频率。传送到调制器的时钟设置采样频率F_{MOD}。调制器以该速率将数据输出到数字滤波器，进而数字滤波器(通常为低通，带抽取功能)以输出数据速率(ODR)提供数据。图3显示了这一过程。

一阶Σ-Δ调制器的深入观察

Σ-Δ调制器是一种负反馈系统，与闭环放大器相似。环路包含低分辨率ADC和DAC，以及一个环路滤波器。输出和反馈被粗略量化，常常只有一比特表示高电平或低电平的输出。ADC的模拟系统实现了这种基本结构，量化器就是完成采样的模块。如果存在保证环路稳定的条件，那么输出就是输入的粗略表示。数字滤波器获得该粗略输出并重构模拟输入的精确数字转换结果。

图4显示了响应一个正弦波输入的1密度输出。调制器输出从低电平到高电平的变化率取决于输入的变化率。当正弦波输入为正满量程时，调制器输出开关速率会降低，输出以+1状态为主。同样，当正弦波输入为负满量程时，+1和–1之间的转换会减少，输出以–1为主。当正弦波输入处于最大变化率时，调制器输出发生最高密度的+1和–1切换。输出变化率与输入变化率同步。因此，模拟输入由Σ-Δ调制器输出的转换率来描述。

若使用线性模型来描述这种1位调制器(Mod 1)，则可将该系统表示为一个带负反馈的控制系统。量化噪声为量化器的输入与输出之差。输入偏差节点之后是一个低通滤波器。在图5b中，量化噪声用N来表示。

H(f)是环路滤波器的函数，定义噪声和信号的传递函数。H(f)是一个低通滤波器函数，在低频(目标带宽内)时具有非常高的增益，可衰减高频信号。环路滤波器可实现为简单的积分器或积分器级联。实践中常常把一个DAC放在反馈路径中，以便获取数字输出信号并将其转换为模拟信号反馈到模拟输入偏差节点。

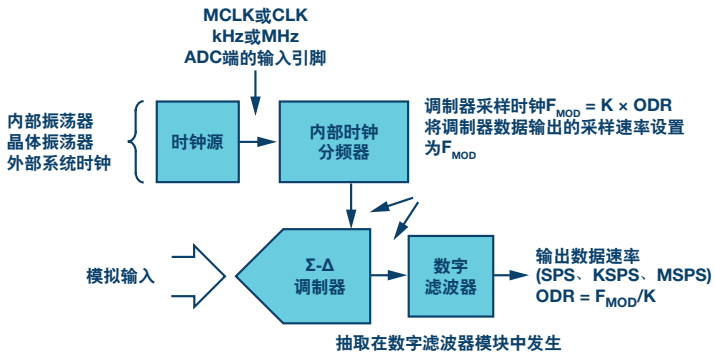

图3. Σ-Δ ADC流程：从调制器输出到数字滤波输出的采样。

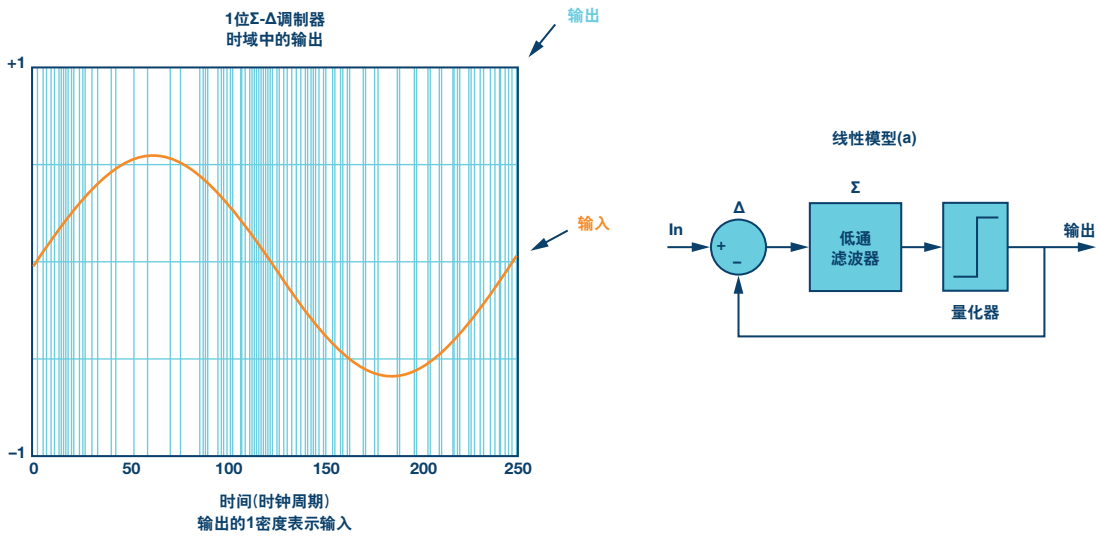

图4. 输入正弦波的Σ-Δ输出1码值的密度。1阶Σ-Δ调制器环路的线性模型(a)。

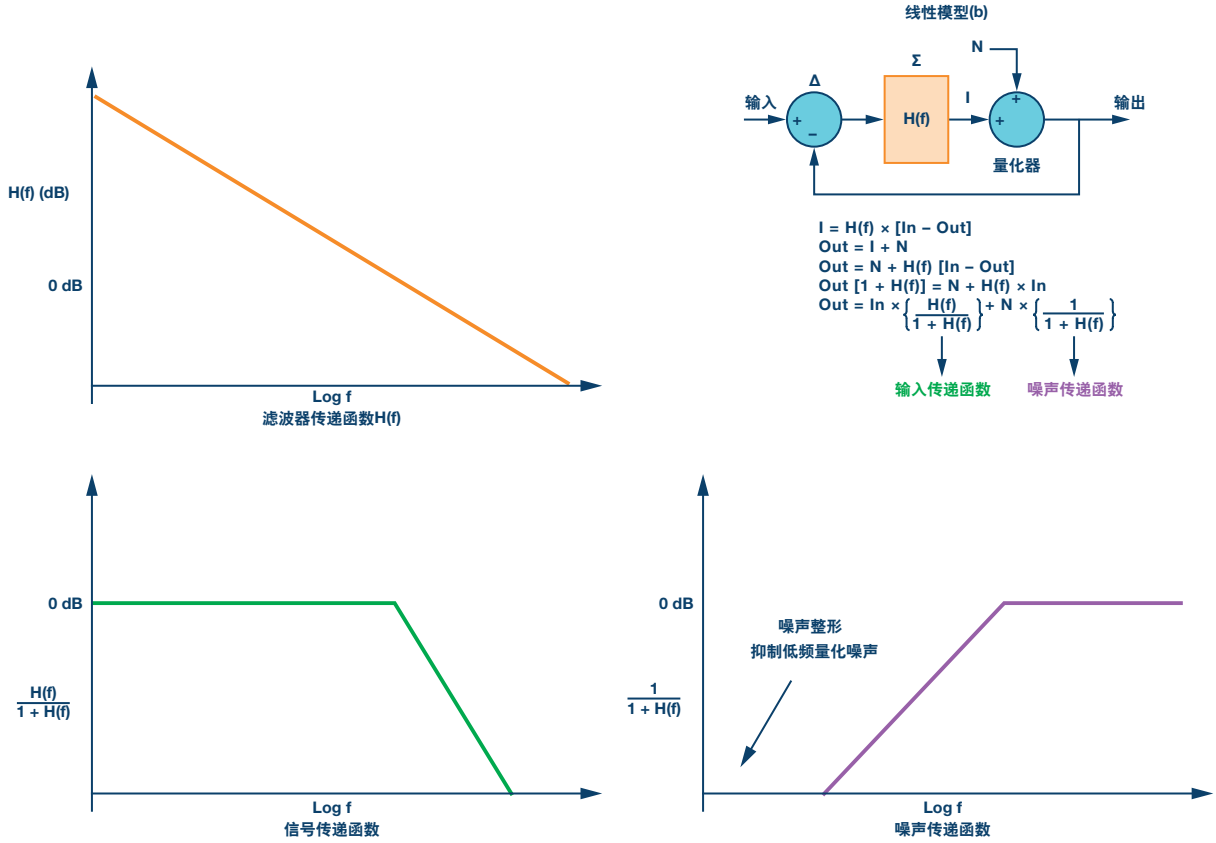

图5. Mod 1 Σ-Δ环路的线性模型(b)，包括方程、滤波器、信号和噪声传递函数图。

解出图5所示方程便可得到信号和噪声传递函数。信号传递函数用作一个低通滤波器，在目标带宽内的增益为1。噪声传递函数是一个高通滤波器函数，提供噪声整形，在DC附近的较低频率，对量化噪声有很强的抑制。在超出目标带宽的较高频率看到的量化噪声会增加。对于一阶调制器(Mod 1)，噪声以大约20 dB/十倍频程的速率提高。

为了提高系统分辨率，常见方法是将两个环路滤波器级联起来以增加环路滤波器阶数。现在，总环路滤波器的H(f)具有更大的滚降，Mod 2型的噪声传递函数具有40 dB/十倍频程的上升速率。噪声所处的频率越低，噪声整形就越厉害。图6比较了Mod 1型和Mod 2型Σ-Δ ADC。Σ-Δ调制器的变化和样式非常多。规避了高阶1位环路稳定性问题的架构称为多级噪声整形调制器(MASH)架构。多级(MASH型)架构支持通过具有内在稳定性的低阶环路组合来设计稳定的高阶Σ-Δ调制器。

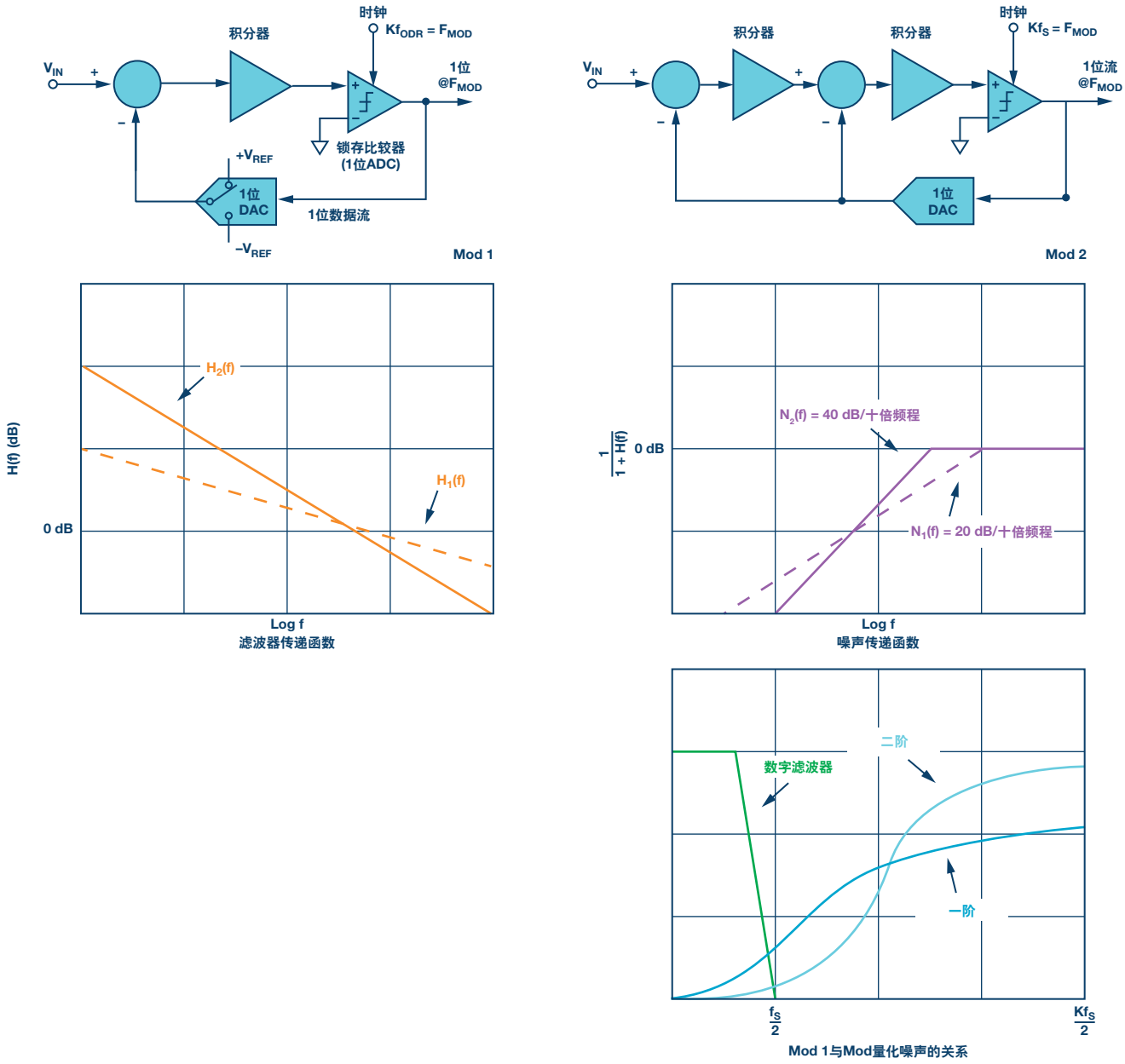

图6. Mod 1和Mod 2框图配置以及滤波器和噪声传递函数的比较图。

作者简介

Michael Clifford是ADI公司位于爱尔兰的线性与精密技术部门的应用工程师。

作者感谢ADI公司的Adrian Sherry、Colin Lyden和Walt Kester对本文的支持。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

ezchina.analog.com

engineerzone® 中文技术论坛

全球总部
One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部
上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编 : 201203
电话 : (86 21) 2320 8000
传真 : (86 21) 2320 8222

深圳分公司
深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编 : 518048
电话 : (86 755) 8202 3200
传真 : (86 755) 8202 3222

北京分公司
北京市海淀区
上地东路 5-2 号
京蒙高科大厦 5 层
邮编 : 100085
电话 : (86 10) 5987 1000
传真 : (86 10) 6298 3574

武汉分公司
湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编 : 430073
电话 : (86 27) 8715 9968
传真 : (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices.
TA13204sc-0-4/16

analog.com/cn

ANALOG DEVICES
超 越 一 切 可 能 ™