

Brian Pisani

摘要

本应用报告讨论了数字滤波器，数字滤波器是 Δ - Σ 模数转换器 (ADC) 中的一个常见特性。数字低通滤波器对实现 Δ - Σ ADC 的功能至关重要，后者依赖过采样和噪声整形来减小带外量化噪声。 Δ - Σ ADC 中使用的数字滤波器类型各不相同，它们具有各种优点和缺点，从而适用于不同的应用。本报告论述了数字滤波器的类型及其权衡取舍。

内容

1 引言.....	2
2 Δ - Σ ADC 中的数字滤波器.....	2
3 Sinc 滤波器.....	4
4 宽带滤波器.....	6
5 参考文献.....	8
6 修订历史记录.....	8

插图清单

图 2-1. Δ - Σ 量化噪声的频谱和 sinc 低通滤波器.....	2
图 2-2. 宽带滤波器频率响应.....	3
图 2-3. Sinc ³ 频率响应.....	3
图 3-1. Sinc ¹ 、Sinc ³ 和 Sinc ⁵ 数字滤波器的频率响应.....	4
图 3-2. Sinc ¹ 、Sinc ³ 和 Sinc ⁵ 数字滤波器的阶跃响应.....	5
图 3-3. ADS124S08 数字滤波器的幅度响应， $f_{DR} = 20\text{SPS}$	5
图 4-1. 达到 f_{DR} 时 ADS127L01 宽带滤波器的幅度响应.....	6
图 4-2. ADS127L01 宽带滤波器对单位阶跃输入的响应.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

Δ - Σ 模数转换器 (ADC) 通常集成了数字滤波器, 所以它们不同于其他类型的数据转换器。数字滤波器对于 Δ - Σ ADC 如何在各种带宽范围内获得高分辨率至关重要。本应用报告讨论了在 Δ - Σ ADC 中加入数字滤波器的动机、不同类型的数字滤波器以及各种类型的数字滤波器在涉及到不同应用时的权衡。

2 Δ - Σ ADC 中的数字滤波器

要了解数字滤波器为何在 Δ - Σ 模数转换中具有重要作用, 就需要对 Δ - Σ 调制器有基本的了解。调制器从采样保持电路获取输入, 该电路将以比 ADC 输出数据速率 (f_{DR}) 快很多倍的速率 (f_{MOD}) 对 ADC 输入进行采样。

调制器包含至少一个积分器和一个低分辨率 ADC, 后者将积分器输出电压量化为仅几位。调制器将低分辨率 ADC 的输出转换回模拟量, 并将其反馈回调制器输入, 然后减去输入电压, 作为误差校正的一种方式。结果是一个离散时间反馈系统, 此系统允许采样输入信号以单位增益传递, 但会使量化噪声密度在低频时更低, 在高频时更高。

为了降低更高频率的量化噪声, 调制器输出会馈送到数字低通滤波器。随后, 目标信号会传递到数字滤波器的输出, 同时滤除大部分更高频率的量化噪声。

图 2-1 展示了使用 Δ - Σ ADC 中一种常见低通数字滤波器 (称为 sinc 滤波器, 其名称源于其 $\sin(x)/x$ 频率响应) 的响应而绘制出的量化噪声。

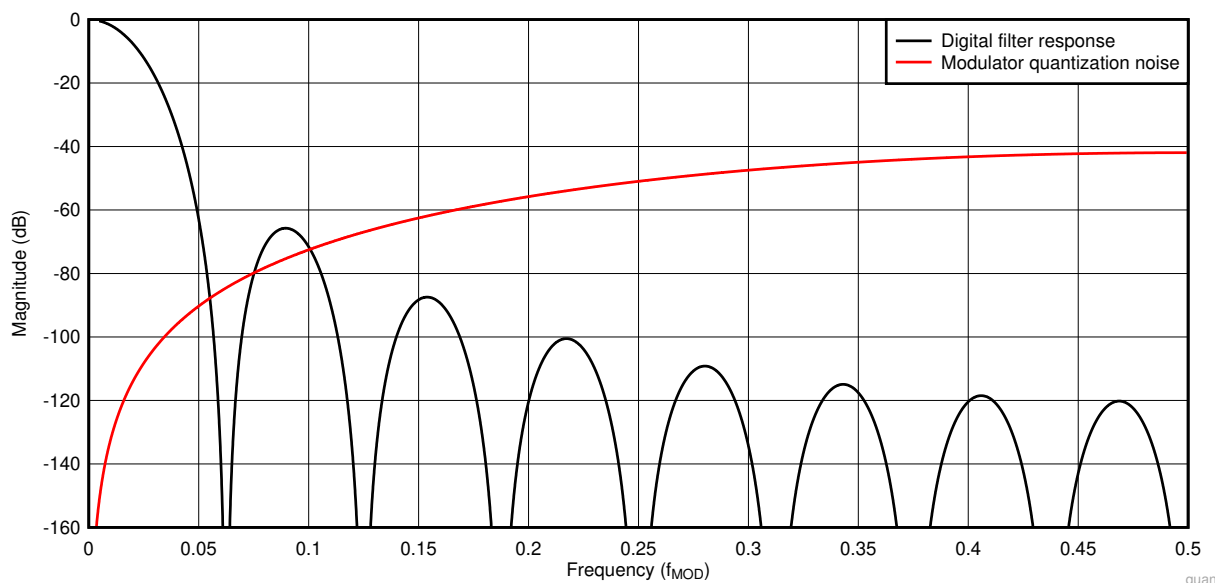


图 2-1. Δ - Σ 量化噪声的频谱和 sinc 低通滤波器

Sinc 滤波器虽然极其常见, 但它并不是唯一用于 Δ - Σ ADC 的数字低通滤波器类型。例如, 一些 ADC (如 ADS124S08) 添加了一个额外的 50Hz 和 60Hz 陷波滤波器, 旨在用于具有大量电力线干扰的应用。另一方面, ADS127L01 具有一个宽带宽平坦通带数字滤波器, 旨在用于频率更高的应用。

Δ - Σ ADC 中的数字滤波器具有另一个功能 - 抽取。这些滤波器按照一个称为过采样率 (OSR) 的因数以 f_{MOD} 的频率抽取从调制器输出的数据。 f_{DR} 和 f_{MOD} 之间的关系是 $f_{DR} = f_{MOD} / OSR$ 。OSR 和滤波器类型共同决定了数字滤波器的输出带宽和 ADC 的整体频率响应。大 OSR 产生小滤波器带宽, 意味着可获得非常好的噪声性能、简化的抗混叠电路以及更低的主机控制器数字接口速度。

Δ - Σ ADC 中的大多数数字滤波器具有有限脉冲响应 (FIR)。这些滤波器本质上很稳定且易于设计, 具有线性相位响应。图 2-2 和图 2-3 并排绘制了 Δ - Σ ADC 中两种类型 FIR 滤波器的响应。图 2-2 对应 ADS127L01 中的宽带滤波器。图 2-3 是一款经典的三阶 sinc 响应滤波器或 sinc^3 , 与 ADS124S08 中的滤波器类似。

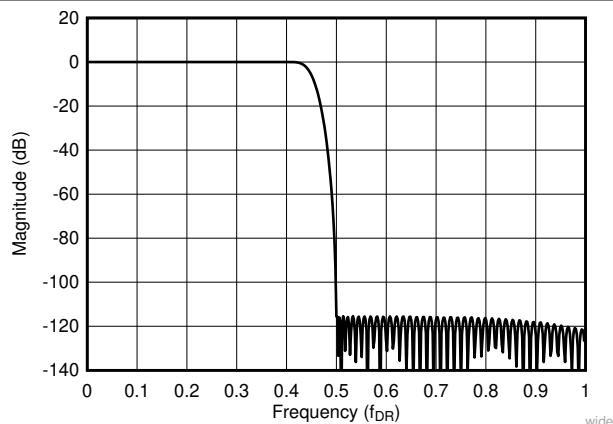


图 2-2. 宽带滤波器频率响应

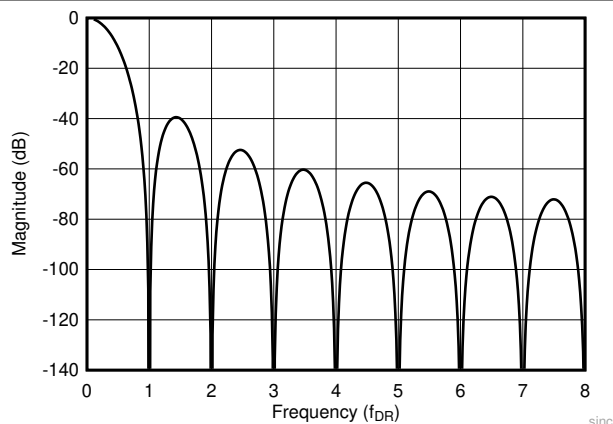


图 2-3. Sinc^3 频率响应

在交流测量应用中使用宽带滤波器的好处可以从其幅度响应中明显看出。它的增益在接近数据速率的奈奎斯特带宽 ($f_{\text{DR}}/2$) 之前一直是接近 0dB，这样可确保信号频率在通带内不会有信号功率损耗。陡峭过渡频带限制了混叠。另一方面， sinc^3 滤波器在 $0.262 \times f_{\text{DR}}$ 时使信号衰减至 -3dB，即使在 $f_{\text{DR}}/2$ 之后也会缓慢过渡，这将使更多的带外噪声混叠到目标带宽中。从表面上看，宽带 FIR 滤波器是各种应用的理想选择；然而，这种出色的频域性能是有代价的。

应在时域方面对宽带滤波器和 sinc 滤波器进行权衡。宽带滤波器是一种非常高阶的滤波器，这意味着在接收一个阶跃输入后需要很长时间才能稳定至最终值。在 ADS127L01 的宽带滤波器中，需要进行 84 次转换才能实现稳定的输出。 sinc^3 滤波器在输入端阶跃后进行三次转换即可稳定，从而可在多个输入通道之间快速进行周期运行。所有 FIR 滤波器需要在频率响应和延迟之间进行权衡。

3 Sinc 滤波器

该滤波器具有 $\sin(x)/x$ 函数形式曲线，其名称“sinc”来源于这种函数的频率响应。该滤波器为什么具有这种响应，以及为何经常用于 $\Delta-\Sigma$ ADC，二者之间实际上密切相关。

数字滤波器通过将一定数量的调制器时钟周期内的调制器输出相加，从而创建一个数字输出代码。 $\Delta-\Sigma$ ADC 的调制器速率 (f_{MOD}) 与其输出数据速率 (f_{DR}) 之比为 OSR。这等效于在采样周期内取这些样本的移动平均值。在时域中取移动平均值，可以转换为在频域中得到一阶 sinc 响应。在数据速率的整数倍时 sinc 响应等于零，这在滤波器的幅度响应图中显示为陷波。

当级联多个串联的 sinc 滤波器时，平均值计算次数会增加，从而增加滤波器的阶数。在频谱中，这对应于较低的截止频率和较高的阻带衰减，进而降低噪声。图 3-1 显示了一阶 sinc 滤波器 (sinc^1)、三个串联 sinc 滤波器 (三阶 sinc, sinc^3) 和五个串联 sinc 滤波器 (sinc^5) 的频率响应差异。

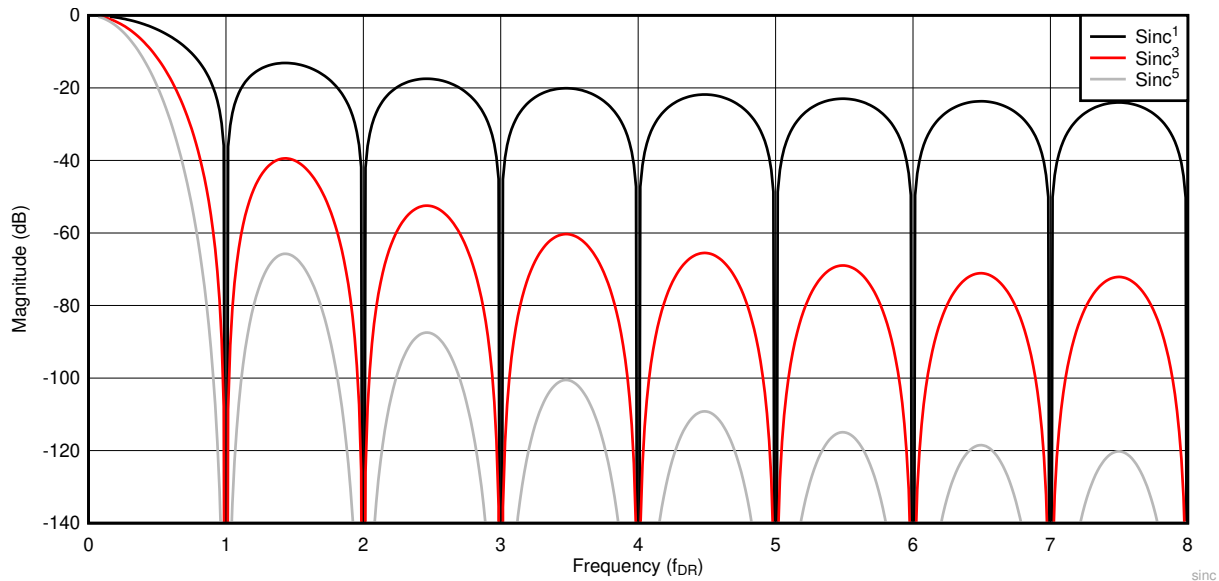


图 3-1. Sinc^1 、 Sinc^3 和 Sinc^5 数字滤波器的频率响应

从这些响应来看，数字滤波器输出中似乎没有太多的带宽，从而限制了可测量的信号内容。这在某些低带宽应用中不是一个缺点。一些精密传感器应用（如温度和压力传感器）的测量不需要太多的带宽，而需要一个良好的低通滤波器来抑制带外噪声。sinc 滤波器非常适合这些应用。

在给定应用情况下，可能需要相对较快地在多个传感器输入之间进行多路复用。为此，数字滤波器需要响应输入变化并快速稳定。Sinc 滤波器也非常适合这种情况。与具有更精细调节频率响应的其他数字滤波器相比，sinc 滤波器可提供更短的建立时间。在许多情况下，可以将这些滤波器设计为在单个转换周期内稳定至阶跃输入。

然而，即使不同的 sinc 滤波器类型之间也需要进行权衡。sinc 滤波器的阶数越高，稳定所需的时间就越长 - 但相应也会带来更好的阻带衰减。图 3-2 显示了 sinc^1 、 sinc^3 和 sinc^5 滤波器如何响应单位阶跃输入。请注意，sinc 滤波器的阶数与稳定至输入所需的样本数相匹配。

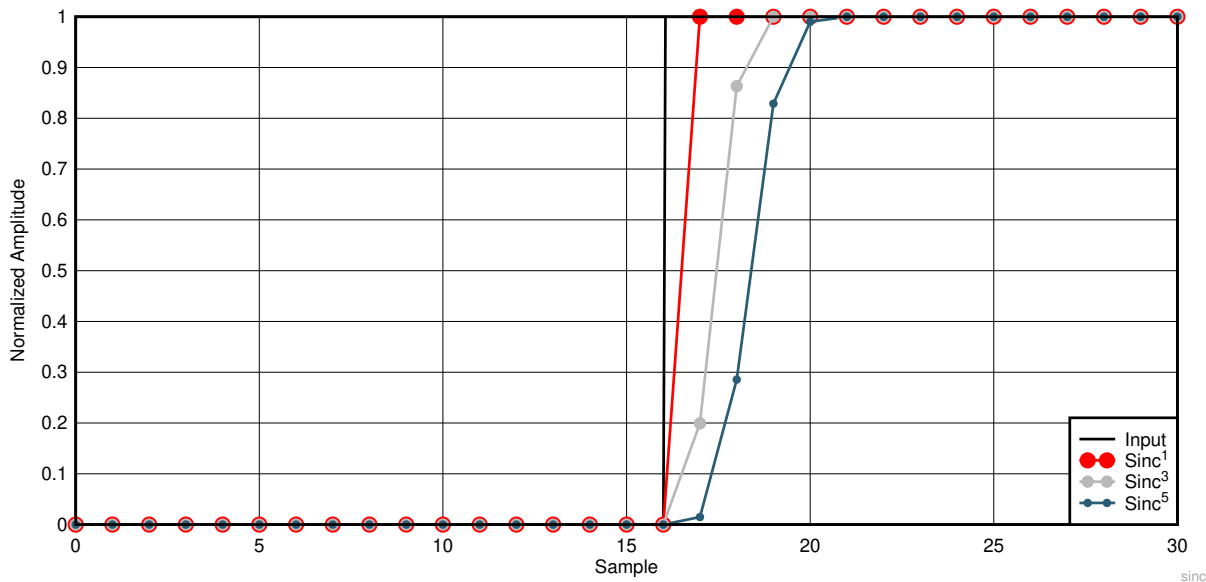


图 3-2. Sinc¹、Sinc³ 和 Sinc⁵ 数字滤波器的阶跃响应

一些数据转换器采用略有改动的 sinc 滤波器。在某些工业应用中，电力设施产生的干扰会在 50Hz 或 60Hz 的频率下污染设备环境。数字滤波器在 50Hz 或 60Hz 频率响应下具有陷波，这有助于抑制电网频率并保持高效的系统电源抑制 (PSR)。

在许多情况下，可以将这些滤波器设计为在单个转换周期内稳定至阶跃输入。但是，在单个周期内稳定的滤波器不会像未修改的高阶 sinc 滤波器那样具有很大的带外抑制效果。图 3-3 显示了使用低延迟滤波器将数据速率设置为 20SPS 时，ADS124S08 上数字滤波器的幅度响应。请注意，此滤波器同时抑制 50Hz 和 60Hz。因为在 10Hz 的倍数频率下会出现滤波器陷波，所以正常 sinc 滤波器的数据速率需要是 10SPS 的整数倍才能实现此目的。

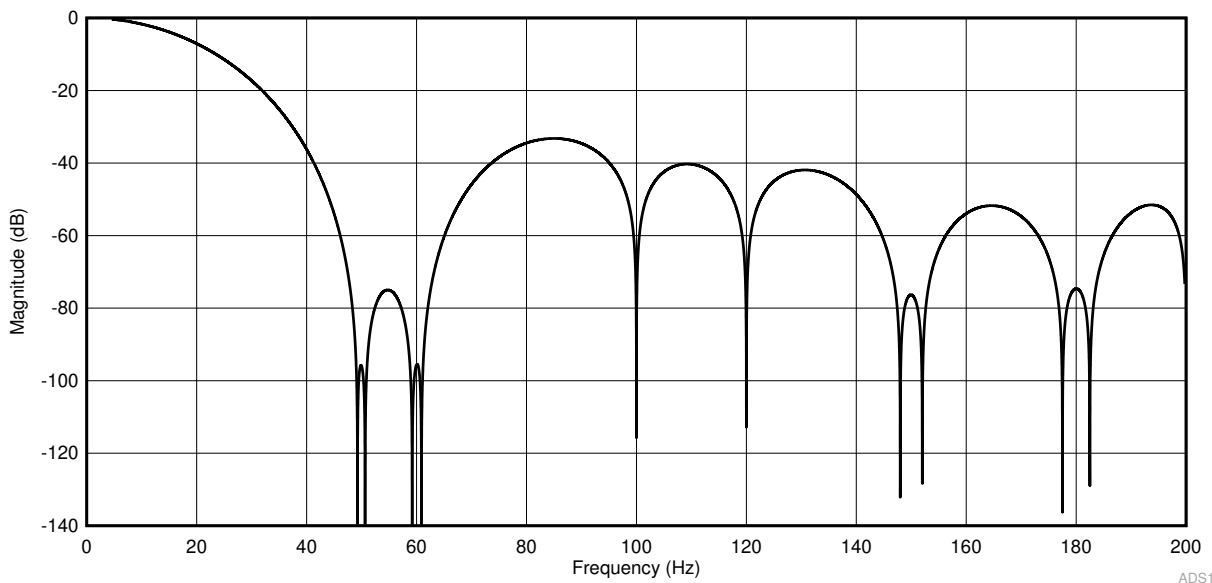


图 3-3. ADS124S08 数字滤波器的幅度响应， $f_{DR} = 20SPS$

总之，sinc 滤波器用作 Δ - Σ ADC 中的基本低通滤波器。这类滤波器具有合理的阻带衰减和快速阶跃响应，因此成为直流测量应用的理想选择，尤其是在多个输入信号间进行多路复用。

4 宽带滤波器

尽管带有 sinc 滤波器的 Δ - Σ ADC 非常适合低带宽应用，但在高带宽应用中使用 Δ - Σ 架构也会大有裨益。例如，可以使用 Δ - Σ ADC 精确测量音频或振动信号。需要高带宽的测试和测量设备是 Δ - Σ ADC 非常适合的另一个应用。对于这些应用，宽带滤波器可用作 Δ - Σ ADC 上的集成数字滤波器。

交流应用需要衰减或纹波很小的宽通带，但仍然需要 Δ - Σ ADC 过采样拓扑标配的精度。所以有些 ADC 采用具有陡峭过渡频带的宽通带滤波器进行设计。ADS127L01 是一款针对宽带宽应用进行优化的 24 位 Δ - Σ ADC，它带有此类滤波器。图 4-1 显示了在达到 ADC 的输出数据速率 f_{DR} （即 512kHz）时滤波器的幅度响应。注意滤波器的过渡频带在 f_{DR} 的大约一半处（信号开始混叠到通带的频率）有多陡峭。这有助于极大地限制不必要的信号或噪声混叠。滤波器的响应在 ADC 的调制器频率 f_{MOD} 附近重复之前，阻带幅度绝不会超过 -116dB。

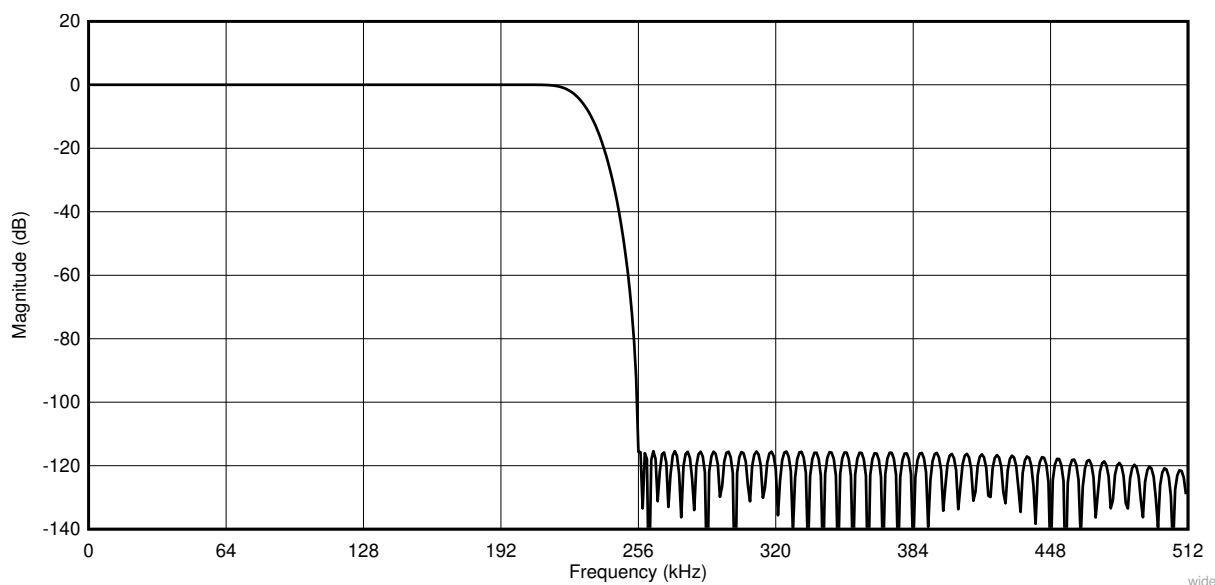


图 4-1. 达到 f_{DR} 时 ADS127L01 宽带滤波器的幅度响应

对于更高带宽的应用，出于一些原因，sinc 滤波器不足以满足要求。首先，频率响应会提前滚降，并在相对较低的频率下降低。这限制了可用的信号带宽。另一方面，宽带滤波器在 f_{DR} 的大约一半处几乎保持完全平坦，从而在任何给定数据速率下可更大幅度地提高可用的信号带宽。

其次，对于交流应用来说，混叠是一个更值得关注的问题。sinc 滤波器并不是很适合，因为它在 ADC 输出数据速率的一半（即 $f_{DR}/2$ ）时没有充分衰减。或者，宽带滤波器具有出色的阻带衰减，从而更大幅度地减少混叠。

对于没有集成数字滤波器的 ADC，实现如此陡峭的抗混叠响应的选项很有限。众所周知，具有陡峭滚降的高阶模拟抗混叠滤波器很难设计，并且会受到元件容差和温度的影响。或者，可以对转换器进行过采样并在处理器中以数字方式进行滤波，但这会以牺牲指令周期为代价，而在高速应用中，指令周期可能非常有限。 Δ - Σ ADC 中的宽带滤波器凭借其内置的“过采样，低通滤波器，然后抽取”拓扑真正解决了这一问题。

所有数字滤波器之间都需要进行权衡，为了实现出色的频域性能，需要更长的建立时间。对输入应用阶跃函数后，ADS127L01 的数字滤波器需要 84 个输出采样周期才能稳定至最终输出。因此，宽带滤波器不适合在多个信号源输入之间循环的应用。

图 4-2 显示了 ADS127L01 宽带滤波器的阶跃响应。

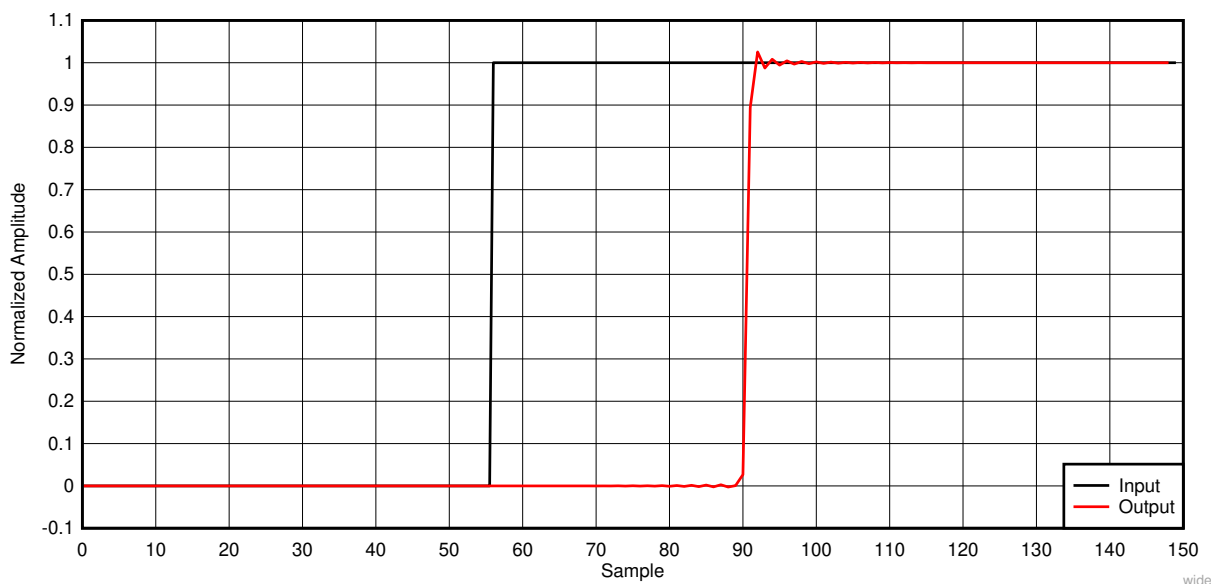


图 4-2. ADS127L01 宽带滤波器对单位阶跃输入的响应

该滤波器具有线性相位响应，这意味着其群延迟（由于相移造成的延迟）在整个频率范围内保持恒定。对于此滤波器，群延迟为 42 个输出数据样本。

Δ - Σ ADC 中的宽带数字滤波器为不需要在不同信号源之间进行多路复用的宽带、精密测量信号链提供了理想的功能块。具有低纹波的平坦通带可确保不会丢失带内信号内容，陡峭的过渡和出色的阻带衰减可在抗混叠至关重要的环境中提供灵活性。此外，仍然可以达到 Δ - Σ ADC 的预期精度。

5 参考文献

- [ADS124S08](#) 数据表 ([SBAS660](#))
- [ADS127L01](#) 数据表 ([SBAS607](#))

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (May 2017) to Revision A (March 2023)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司