

## Application Note

## 通过通道求和提高音频 ADC 的动态范围和 SNR



Arash Loloee, Sakshi Markhedkar

## 摘要

本应用手册讨论了一种增加音频 ADC 动态范围和 SNR 的简单而强大的方法，即通道求和。本应用手册还演示了 ADC 的动态性能如何随着并联转换器数量每增加一倍而提高 3dB。

TLV320ADC6140、TLV320ADC5140、TLV320ADC3140、TLV320ADC6120、TLV320ADC5120 和 TLV320ADC3120 音频 ADC 提供通道求和功能。实际结果是通过 TLV320ADC6140 获得的，用于深入演示这种通道求和方法。

## 内容

1 引言.....	2
2 通过 ADC 求和来增强 SNR.....	2
3 求和的替代方法.....	3
4 实际结果.....	3
5 总结.....	6
6 参考资料.....	6
7 修订历史记录.....	6

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

在音频领域，要增加系统动态范围，一种常见的技术是将两个、四个或更多 ADC 并联，再将输入连接在一起。该方法的原理是相关信号会以线性方式相加，而不相关信号（例如噪声源）会以平方和根形式相加。使用两个 ADC 时，对于两个振幅相等的信号，这会导致信噪比 (SNR) 幅度增加 1.414 倍（即 3dB）。本应用手册更详细地讨论了该技术，并推导出了可提高性能的公式。

## 2 通过 ADC 求和来增强 SNR

在音频 ADC 中，过采样会降低目标频带中的量化噪声，从而提高 SNR。N 位 ADC 的信噪比理论值可以表示为：

$$\text{SNR} = 6.02N + 1.76 \text{ dB} \quad (1)$$

其中，N 是位数。通过过采样，可以提高 SNR，而设计人员可以使用以下公式来量化 SNR 的改进：

$$\text{SNR}_{\text{OS}} = 6.02N + 1.76 \text{ dB} + 10 \times \log(\text{OSR}) \quad (2)$$

其中 OSR（过采样率）是采样频率与输入频率两倍之比，也称为奈奎斯特频率。这个比率可通过以下公式得出：

$$\text{OSR} = \frac{f_s}{2 \times f_{\text{in}}} \quad (3)$$

上述公式表明，SNR 每倍频程会提高 3dB。因此，如果 OSR = 2，SNR 会提高 3dB；如果 OSR = 4，则 SNR 会提高 6dB。

TI 音频 ADC 产品系列中的 TLV320ADC5140 和 TLV320ADC6140 器件采用动态范围增强器 (DRE) 算法，该算法可用于通过提高 ADC 通道在低信号电平下的动态范围来提升远场录音性能。DRE 是一种数字辅助算法，可动态调整前端可编程增益放大器 (PGA)，以提高低电平信号的信噪比，同时防止高电平信号使 PGA 和 ADC 饱和。

前面几节中介绍的两种方法都已嵌入到 ADC 设计中。还有另一种方法可以改善动态范围，这与过采样方法类似。这种方法并联使用两个、四个或更多 ADC，而不是进行过采样。在这种方法中，相同的输入被馈送到所有 ADC，因为输入全都连接在一起，并且对输出进行求和并取平均值，以获得改进的动态范围。在图 2-1 中，输入端连接了两个相同的 ADC，接收相同的电压。输出在数字域中进行求和，并使用 FPGA 或数字信号处理器内的后端数字处理取平均值。

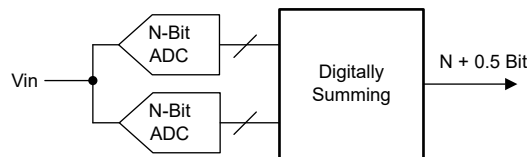


图 2-1. 连接两个相同的 ADC 并对 ADC 输出求和

方程式 1 至方程式 9 展示了使用此方法如何改善动态范围。当对两个频率和相位相同的信号求和时，信号会以电压形式相加。这个求和的结果是：

$$V_{\text{sum}} = V_1 + V_2 \quad (4)$$

但是，随机信号（例如具有不同频率和相位的噪声）会以功率形式相加。来自两个独立转换器或通道的噪声为白噪声和随机噪声，这意味着来自不同通道或器件的噪声绝大多数是不相关的。由于噪声信号是随机的，因此必须通过统计方法来处理信号。两个噪声源的求和结果为：

$$V_n^2 = V_{n1}^2 + V_{n2}^2 \quad (5)$$

图 2-1 展示了一个具有两个相同 ADC 的电路。图中使用了两个相同的 ADC，为这两个 ADC 提供了相同的输入，并且每个 ADC 的输出均发送到数字域中进行求和并取平均值。每个 ADC 的输入由输入信号和噪声组成。两个输出可以使用以下公式进行求和：

$$V_{out\_sum} = V_{in1} + V_{in2} + \sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2} \quad (6)$$

在前面的公式中，两个输入是相同的。对这些信号求和会使信号电平加倍，这相当于信号电平增加 6dB，而对不相关噪声源求和则会将噪声电平增加 1.4 倍（即 3dB）。总体而言，动态范围提高了 3dB。这个概念可以扩展到更多并联器件，从而可以进一步提高 SNR。例如，如果并联使用四个 ADC，结果是 SNR 提高 6dB。结合 [方程式 1](#)（用于根据位数计算 SNR），有效位数 (ENOB) 可使用以下公式计算得出：

$$ENOB = \frac{SNR - 1.76}{6.02} \quad (7)$$

在 SNR 提高 3dB 后，新的 ENOB 计算如下：

$$ENOB' = \frac{SNR' - 1.76}{6.02} \quad (8)$$

其中，对于两个并联使用的转换器， $SNR' = SNR + 3$ 。替换 [方程式 8](#) 中的  $SNR'$  后，便会得到以下公式。

$$ENOB' = \frac{SNR + 3 - 1.76}{6.02} = ENOB + 0.498 \quad (9)$$

并联使用的器件数量每增加一倍，有效位数增加大约 0.5，而 SNR 将提高 3dB。

### 3 求和的替代方法

在同一 IC 中使用两个 ADC 或通道可获得更好的结果，因为转换器的许多参数（例如增益、增益误差、失调电压和带宽）通常都匹配良好，并且在将两个信号相加并求平均值时不会引入不必要的误差。在理论情况下，当  $V_{in} = V_{in1} = V_{in2}$  时，得到的输出为  $(V_{in1} + V_{in2})/2 = V_{in}$ 。但是，如果在输入中添加了共同误差，则会传递到输出。为避免这种情况，可以将一个 ADC 的其中一个输入反转，然后可以在输出端执行数字消减，而不是求和。这种方法本质上与求和方法相同，其额外优势是能够消除两个器件的任何共同误差。[方程式 10](#) 以数学方式表示了  $V_{in1} + e$  和  $V_{in2} + e$  的两个转换器输入。

$$V_{out} = \frac{(V_{in1} + e) - (V_{in2} + e)}{2} \quad (10)$$

但是，由于  $V_{in2} = -V_{in1}$ ，[方程式 11](#) 可以表示为以下公式，从而消除共同误差 (e)。

$$V_{out} = \frac{V_{in1} + V_{in1}}{2} \quad (11)$$

使用的转换器数量每增加一倍，上述任何一种方法都可以将 SNR 提高 3dB。

### 4 实际结果

这里使用了德州仪器 (TI) 的 TLV320ADC6140 来演示如何提高 ADC 的动态范围和 SNR。TLV320ADC6140 具有嵌入式通道求和模式，以实现更高的 SNR。可以使用分配的寄存器 (0x6B) 为 2 个通道或 4 个通道激活此选项。本演示中启用了 4 通道求和模式，对应的数学运算公式如下： $(CH1 + CH2 + CH3 + CH4) / 4$ 。[表 4-5](#) 至 [表 4-8](#) 展示了 TLV320ADC6140 2 通道求和及 4 通道求和带来的性能提升。

该模式下会以等加权方式对数字记录数据取平均值，这有助于降低等效记录噪声。

表 4-1. 通过启用 2 通道求和及 DRE 带来的动态范围改进

动态范围	求和前 (dBFS)	求和后 (dBFS)	改进 (dB)
通道 1	123.25	126.54	3.29
通道 2	123.25		
通道 3	123.19	126.52	3.33
通道 4	123.19		

**表 4-2. 通过启用 4 通道求和及 DRE 带来的动态范围改进**

动态范围	求和前 (dBFS)	求和后 (dBFS)	改进 (dB)
通道 1	123.25	129.52	6.3
通道 2	123.25		
通道 3	123.19		
通道 4	123.19		

**表 4-3. 通过启用 2 通道求和及 DRE 带来的 SNR 改善**

SNR	求和前 (dBFS)	求和后 (dBFS)	改进 (dB)
通道 1	123.25	126.25	3.00
通道 2	123.25		
通道 3	123.19	126.13	2.94
通道 4	123.19		

**表 4-4. 通过启用 4 通道求和及 DRE 带来的 SNR 改善**

SNR	求和前 (dBFS)	求和后 (dBFS)	改进 (dB)
通道 1	123.25	129.16	5.94
通道 2	123.25		
通道 3	123.19		
通道 4	123.19		

**表 4-5. 通过禁用 2 通道求和及 DRE 带来的动态范围改进**

动态范围	求和前 (dB)	求和后 (dB)	改进 (dB)
通道 1	113.25	116.13	2.88
通道 2	113.25		
通道 3	113.19	116.13	2.94
通道 4	113.19		

**表 4-6. 通过禁用 4 通道求和及 DRE 带来的动态范围改进**

动态范围	求和前 (dB)	求和后 (dB)	改进 (dB)
通道 1	113.25	118.73	5.51
通道 2	113.25		
通道 3	113.19		
通道 4	113.19		

**表 4-7. 通过禁用 2 通道求和及 DRE 带来的 SNR 改善**

SNR	求和前 (dB)	求和后 (dB)	改进 (dB)
通道 1	112.94	116.06	2.96
通道 2	112.94		
通道 3	113.05	116.01	2.97
通道 4	113.05		

表 4-8. 通过禁用 4 通道求和及 DRE 带来的 SNR 改善

SNR	求和前 (dB)	求和后 (dB)	改进 (dB)
通道 1	112.94	118.99	5.92
通道 2	112.94		
通道 3	113.05		
通道 4	113.05		

表 4-9. 改善 TLV320ADCx1x0 音频 ADC 系列的器件 SNR 和动态范围的通道汇总

器件	器件 SNR/动态范围 (默认) (dB)	器件 SNR/动态范围 (4 通道求和) (dB)	器件 SNR/动态范围 (2 通道求和) (dB)
TLV320ADC6140	使用 DRE : 123dB	使用 DRE : 129dB (单通道模式)	使用 DRE : 126dB (立体声模式)
	无 DRE : 113dB	无 DRE : 119dB (单通道模式)	无 DRE : 116dB (立体声模式)
TLV320ADC5140	使用 DRE : 120dB	使用 DRE : 126dB (单通道模式)	使用 DRE : 123dB (立体声模式)
	无 DRE : 108dB	无 DRE : 114dB (单通道模式)	无 DRE : 111dB (立体声模式)
TLV320ADC3140	106 dB	112dB (单通道模式)	109dB (立体声模式)
TLV320ADC6120	使用 DRE : 123dB	不适用	使用 DRE : 126dB (单通道模式)
	无 DRE : 113dB	不适用	无 DRE : 116dB (单通道模式)
TLV320ADC5120	使用 DRE : 120dB	不适用	使用 DRE : 123dB (单通道模式)
	无 DRE : 108dB	不适用	无 DRE : 111dB (单通道模式)
TLV320ADC3120	106 dB	不适用	109dB (单通道模式)

这些测量是在交流耦合差分线路输入的情况下进行的，在 4 通道求和情况下，动态范围和 SNR 改善了约 6dB，在 2 通道求和情况下，动态范围和 SNR 改善了约 3dB。表 4-8 中列出的音频 ADC 提供了类似的通道求和功能，并预期动态范围和 SNR 会有所改善。

## 5 总结

总之，并联使用的 ADC 数量每增加一倍，动态范围和 SNR 性能会提高约 3dB。德州仪器 (TI) 的 TLV320ADC6140、TLV320ADC5140、TLV320ADC3140、TLV320ADC6120、TLV320ADC5120 和 TLV320ADC3120 具有内置通道求和功能。本应用手册详细介绍了使用此内置通道求和功能提高音频 ADC 动态范围和 SNR 性能的方法。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC6140 四通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频 ADC 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC5140 四通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频 ADC 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC3140 四通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频 ADC 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC6120 具有 123dB SNR 的立体声通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频模数转换器 \(ADC\) 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC5120 具有 120dB SNR 的立体声通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频模数转换器 \(ADC\) 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [TLV320ADC3120 具有 106dB SNR 的立体声通道、768kHz、Burr-Brown™ 音频模数转换器 \(ADC\) 数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [PCM6xx0-Q1 具有集成麦克风偏置和输入故障诊断功能的汽车类、4 通道和 6 通道、768kHz 音频 ADC 数据表](#)。
- Electronic Products, [Practical considerations for estimating SNR and SFDR](#), Arash, L. (2018).

## 7 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (June 2023) to Revision A (November 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 添加了已启用 DRE 的通道求和性能结果.....	1
• 仅更新了音频 ADC 的通道求和应用手册.....	1
• 添加了音频 ADC 器件型号，可利用通道求和提高 SNR 和动态范围性能.....	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