

Application Brief

噪声频谱密度：解锁更优方案



Russell Hoppenstein

简介

模数转换器 (ADC) 是接收器链中的最后一个模拟器件。接收器通常在存在噪声的情况下识别小信号。恰当地说，ADC 的一个关键性能参数是其自身的噪声对系统性能的影响。

ADC 的传统噪声指标为 SNR (信噪比) 或 ENOB (有效位数)。尽管这些参数各自都在特定领域内发挥着作用，但对于数据转换器器件来说，有一个更好的评判标准：噪声频谱密度 (NSD)。NSD 可以更好地表征 ADC 性能，更接近实际场景，并且不会受到不同数字下变频/抽取配置的影响。

SNR

模数转换器 (ADC) 是接收器链中的最后一个模拟器件。接收器通常在存在噪声的情况下识别小信号。恰当地说，ADC 的一个关键性能参数是其自身的噪声对系统性能的影响。

ADC 的传统噪声指标为 SNR (信噪比) 或 ENOB (有效位数)。尽管这些参数各自都在特定领域内发挥着作用，但对于数据转换器器件来说，有一个更好的评判标准：噪声频谱密度 (NSD)。NSD 可以更好地表征 ADC 性能，更接近实际场景，并且不会受到不同数字下变频/抽取配置的影响。

噪声要素

ADC 噪声包括三个核心要素：量化噪声、热噪声和时钟抖动。根据 [方程式 1](#)，每个要素均会影响整体 SNR 性能。

$$SNR_T = -10 \times \log \left[10^{\left(\frac{-SNR_Q}{10} \right)} + 10^{\left(\frac{-SNR_N}{10} \right)} + 10^{\left(\frac{-SNR_j}{10} \right)} \right] \quad (1)$$

采样速率超过 1GSPS 的高速 ADC 通常不受量化噪声的限制。热噪声和抖动的其他参数起主导作用。[图 1](#) 详细直观地展示了假定的 12 位转换器 (速率为 10GSPS) 的噪声影响因素。

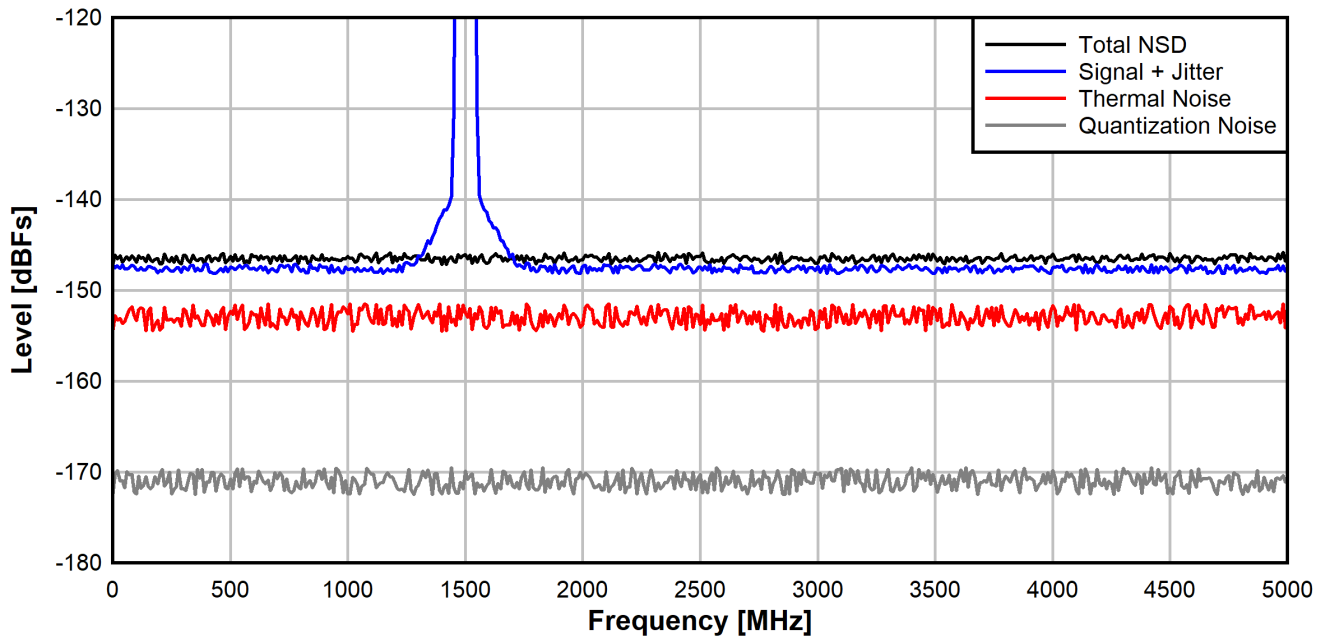


图 1. 噪声比较详解

ENOB

ENOB 是可以呈现以上相同信息的另一个指标。ENOB 将 SNR 值转换为理想化情况，其中转换器的噪声仅受由位数决定的量化噪声的限制。ENOB 可通过 SNR 参数计算得出：

$$ENOB = \frac{SNR[dBFS] - 1.76}{6.02} \quad (2)$$

例如，如果 14 位转换器报告的 SNR 值为 62dBFS，则 ENOB 为 10 位。也就是说，该转换器的噪声性能相当于一个理想 10 位转换器只受量化噪声限制时的性能。

奈奎斯特困境

第一奈奎斯特区域定义为从直流到 ADC 采样频率除以 2 ($F_s/2$) 的范围。根据传统的采样理论，所有信号都将落入第一奈奎斯特区域。量化噪声存在于整个第一奈奎斯特区域中。宽带热噪声会混叠到第一奈奎斯特区域。SNR 或 ENOB 的计算会整合第一奈奎斯特区域中的所有噪声。

现代射频采样转换器通常采用数字下变频和抽取来降低将数字数据传输到 FPGA 或处理器所需的数据速率。抽取从流中移除数据点，可在不影响信号的情况下降低数据速率。每进行 2 倍抽取即可有效地将奈奎斯特区域减半，并相应地消除一半的噪声（由于抽取滤波）。由于信号保持不变，而噪声降低了一半，因此 SNR 提高了 3dB。使用任意抽取值 D 时的 SNR 性能可通过方程式 3 计算。

$$SNR_D = SNR + 10 \times \log(D) \quad (3)$$

当不同器件的分辨率、采样率和抽取率不完全相同时，比较这些器件的 ADC 性能会比较困难。判断哪个器件的噪声最低时，SNR 或 ENOB 等参数可能会导致您得出错误结论。因此，必须采用更优方案！

NSD：解锁更优方案

噪声频谱密度 (NSD) 是一个更适合噪声分析和比较的指标。NSD 对每单位带宽的噪声性能进行标准化；通常，单位为 dBFS/Hz（例如，与满量程电压有关，并按单位 Hz 带宽进行标准化）。通常在无信号或低信号的情况下测量 NSD。在灵敏度至关重要的低信号电平下，NSD 可以更好地衡量噪声影响。在较低的信号驱动电平下，抖动分

量被抵消，而热噪声分量得以轻微改进。通过使用 NSD 参数，依赖采样率和抽取率的噪声性能按单位带宽进行标准化，可更方便与其他器件进行比较。

为了证明这一点，本文讨论了几个假设的示例。此处，假设转换器具有等效的满量程电压，因此以 dBFS/Hz 或 dBm/Hz 来表示 NSD 是等效的。表 1 展示了两个假设的 ADC 的性能比较。器件 1 以 10GSPS 采样率运行，器件 2 以 5GSPS 采样率运行。乍一看数据表中报告的 SNR 或 ENOB 参数，器件 2 似乎性能更好。器件 2 具有较高的 SNR 和相应较高的 ENOB。自然而然地，我们会认为器件 2 是低噪声转换器，但这并不准确，因为采样率（以及相应的奈奎斯特频带）不相等。器件 1 的 NSD 性能实际上比器件 2 低 1dB。器件 1 实际上是低噪声转换器。要查看 SNR 参数，请适当对每个器件进行抽取，以获得等效带宽。在本示例中，每个器件都被抽取以获得 2.5GHz 带宽。果然，在等效带宽下，NSD 参数低 1dB 也会使 SNR 参数优化 1dB。这一点也可以通过另一种方法进行理解，即认识到过采样的优势（例如，以比奈奎斯特定理要求的高得多的速率进行采样）可以转化为提高系统噪声性能的优势。

表 1. 示例性能比较

	器件 1	器件 2
Fs [GHz]	10	5
SNR [dBFS]	58.0	60.0
ENOB [位数]	9.3	9.7
NSD [dBFS/Hz]	-155	-154
抽取因子	4	2
奈奎斯特带宽 [GHz]	2.5	2.5
SNR [dBFS]	64.0	63.0

结语

在研究高速数据转换器时，不能仅看分辨率（位数）或已发布的信噪比。在比较以不同采样速率运行的不同转换器时，这些参数会造成困扰。为了进行正确的比较，奈奎斯特带宽必须等效。通过比较 NSD 性能可以轻松地简化比较过程，因为这样可以大部分地消除外部时钟抖动对测量的影响，并将噪声按 1Hz 带宽进行标准化。

参考资料

- 德州仪器 (TI), [射频采样：过采样如何超越物理限制](#), 技术文章。
- 德州仪器 (TI), [使用射频采样接收器中的数字下变频器消除干扰](#), 技术文章。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司