

ADC 噪声系数如何影响射频接收器设计

Thomas Neu
System Engineer

引言

为了制造更小的数字接收器，航天和国防工业采用了现代直接射频 (RF) 采样模数转换器 (ADC)。这些 ADC 消除了射频混合级，并更靠近天线，从而简化了数字接收器设计，同时还节省了成本和印刷电路板 (PCB) 面积。

一个关键（经常被误解的）参数是 ADC 噪声系数，该参数设置用于检测极小信号的射频增益量。本文介绍了如何计算射频采样 ADC 的噪声系数，并说明了 ADC 噪声系数对射频信号链设计的影响。

为什么噪声系数在数字接收器设计中很重要

数字接收器在两种不同场景下工作，如图 1 所示。在阻断情况下，存在干扰或干扰器，接收器必须以较低的射频增益运行，以免使 ADC 饱和。在此设置中，ADC 被干扰信号驱动至接近满量程；因此，ADC 的大信号信噪比 (SNR) 决定了可检测到的信号微弱程度。还有其他降级机制，例如相位噪声和无杂散动态范围。

在第二种场景中，不存在干扰。检测可能的最弱信号仅取决于接收器的固有本底噪声，这种情况通常以接收器灵敏度进行测量。噪声系数用于测量由接收器信号链中的元件引起的 SNR 降级。

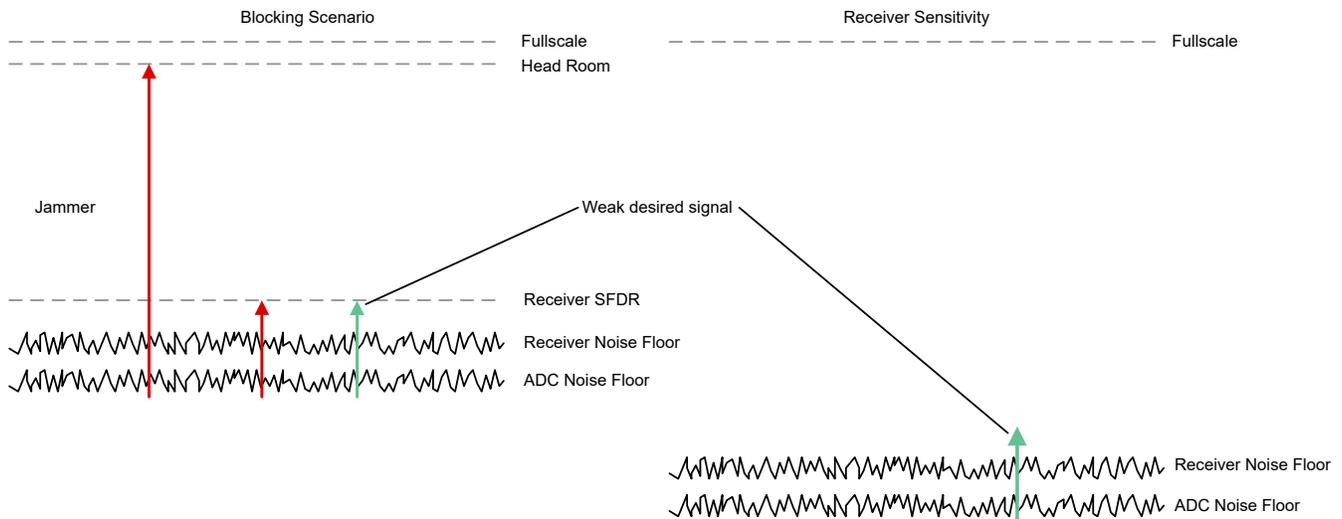


图 1. 阻断或干扰情况与接收器灵敏度场景的比较。

ADC 的噪声系数通常是接收器的薄弱环节（约为 25dB 至 30dB），而低噪声放大器 (LNA) 的噪声系数低至 <1dB。不过，可以通过使用 LNA 向模拟射频前端（靠近天线）添加增益来改善 ADC 噪声系数。1dB 接收器系统噪声系数和 2dB 接收器系统噪声系数之间的差异约为 20%。这种差异意味着噪声系数为 1dB 的接收器可以检测振幅大约弱 20% 的信号。在软件定义无线电 (SDR) 中，这意味着无线电输出功率降低，从而延长电池寿命，而在雷达中，这使得覆盖更远的距离成为可能。

SDR 或数字雷达中的现代接收器设计使用直接射频采样 ADC 来减小尺寸、减轻重量并降低功耗。该架构无需射频下变频混频级，从而简化了接收器设计。ADC 噪声系数越好，所需的增益越低，实现的节省越多。此外，使用更少的额外射频增益意味着当存在干扰时，需要降低的增益更小，并在接收器中保持更高的动态范围。

计算系统的噪声系数

您可以使用 Friis 公式来计算接收器系统的噪声系数。假定一个具有两个放大器和一个 ADC 的简化的理想接收器，如图 2 中所示，方程式 1 按如下方式计算级联系统噪声因子：

$$F_{System} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 \cdot G_2 \dots \cdot G_{n-1}} \quad (1)$$

其中 F_x 是噪声因子， G_x 是功率增益。

以分贝为单位的系统噪声系数为：

$$NF_{System} = 10 \log(F_{System}) \quad (2)$$

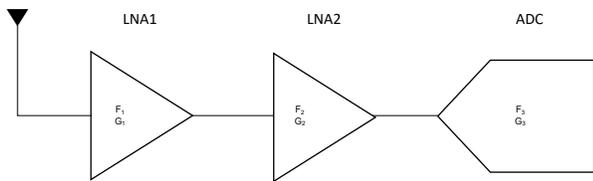


图 2. 典型接收信号链。

此处需强调两个要点：系统噪声系数主要由第一个元件的噪声系数 F_1 决定，前提是增益 G_1 和 G_2 足够大，以至于 ADC 噪声系数 F_3 可以忽略不计。

在具有两个级联 LNA 的系统中比较两个分别具有 20dB 与 25dB 噪声系数的不同 ADC，可以看出系统噪声系数有很大差异（请参阅表 1）。

	LNA1	LNA2	ADC1	ADC2
噪声系数	1dB	3dB	20dB	25dB
增益	12dB	15dB	0dB	0dB
所得系统噪声系数			1.8dB	2.9dB

表 1. 具有两个 LNA 级的系统噪声系数。

如表 2 所示，将 ADC2 列中列出的系统（噪声系数相差 5dB）设置为低于 2dB 的系统噪声系数，将需要使用第三个 LNA（噪声系数 = 3dB）额外增加 10dB 的增益。

表 2 突出了 ADC 噪声系数对整体系统噪声系数的影响。添加第三个 LNA 会增加成本、电路板面积（匹配元件、布线和电源）和系统功耗，并进一步降低满量程余量。

	LNA1	LNA2	LNA3	ADC2
噪声系数	1dB	3dB	3dB	25dB
增益	12dB	15dB	10dB	0dB
所得系统噪声系数				1.4dB

表 2. 使用 ADC2 且具有三个 LNA 级的系统噪声系数。

假设目标接收器灵敏度为 -172dBm，或非常弱的信号仅比绝对本底噪声高 2dB (-174dBm + 2dB = -172dBm)，则该接收器需要优于 2dB 的噪声系数。在上面的示例中，我们使用 ADC1（噪声系数为 20dB，如表 1 中所列），级联系统噪声系数为 1.8dB。

如图 3 和表 3 所示，增益为 12dB 的 LNA1 将输入信号和噪声提高 12dB，而将噪声系数降低 1dB（噪声系数 $LNA1 = 1dB$ ）。LNA2 将信号和噪声提高了 15dB。尽管 LNA2 具有更高的固有噪声 3dB，但由于 LNA1 的增益为 12dB，其影响仅降至 0.2dB。

最后，ADC1 的噪声分量（噪声系数 = 20dB）减少至仅 0.6dB，因为它会被两个 LNA 的 27dB 增益降低。因此，您最终会得到 1.8dB 的系统噪声系数，从而留下大约 0.2dB 的余量来检测微弱的输入信号。

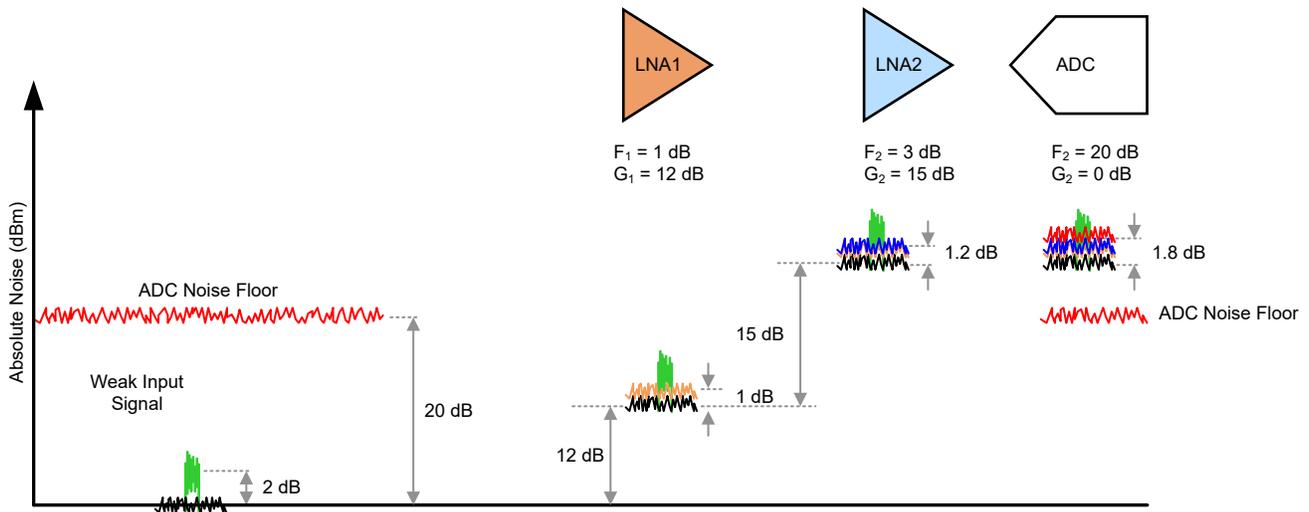


图3. 接收信号链中各个噪声系数贡献的图示。

	LNA1	LNA2	ADC
噪声系数 (dB)	1	3	20
增益 (dB)	12	15	0
噪声功率 (线性) 10 [^] (噪声系数/10)	1.26 10 ^{1/10}	2 10 ^{3/10}	100 10 ^{100/10}
功率增益 (线性) 10 [^] (增益/10)	15.85 10 ^{12/10}	31.62 10 ^{15/10}	1 10 ^{0/10}
仅 LNA1 的噪声系数 (dB)	1	-	-
仅 LNA1 + LNA2 的噪声系数 (dB)	1.2 10log[1.26+(2-1)/15.85]		-
LNA1 + LNA2 + ADC 的噪声系数 (dB)	1.8 10log[1.26 + (2-1)/15.85 + (100-1)/15.85/31.62]		
对系统噪声系数的额外影响 (dB)	1	0.2	0.6

表3. 计算各个噪声系数的贡献。

高速数据转换器很少在器件特定数据表中列出噪声系数。可以使用方程式 3 根据 ADC32RF54 射频采样 ADC 的常用数据表参数 (请参阅表 4) 计算 ADC 的噪声系数。

参数	说明	ADC32RF54 (1 倍 AVG)	ADC32RF54 4 (2 倍 AVG)
V	输入满量程电压峰峰值 (V _{pp})	1.1	1.35
R _{IN}	输入端接阻抗 (Ω)	100Ω	
FS	ADC 采样率	2.6GSPS	
SNR	小输入信号的 ADC SNR (dBFS), 通常为 -20dBFS	64.4	67.1

表4. ADC32RF54 的数据表参数。

$$\text{ADC Noise figure (dB)} = P_{\text{SIG, dBm}} + 174 \text{ dBm} - \text{SNR (dBFS)} - \text{bandwidth (Hz)}$$

$$\text{NF}_{\text{ADC}} (\text{dB}) = 10\log\left(\left(\frac{\left(\frac{V}{2 \times \sqrt{2}}\right)^2}{R_{\text{IN}}}\right) \times 1000\right) + 174 - \text{SNR} \quad (3)$$

$$- 10\log\left(\frac{FS}{2}\right)$$

对于 ADC32RF54, 噪声系数计算结果为:

$$\text{噪声系数 (1 倍 AVG)} = 20.3\text{dB}$$

$$10\log\left[\left(\frac{1.1/2/\sqrt{2}}{100} \times 1000\right)^2\right] + 174 - 64.4 - 10\log[2.6\text{e}9/2]$$

$$\text{噪声系数 (2 倍 AVG)} = 19.3\text{dB}$$

$$10\log\left[\left(\frac{1.35/2/\sqrt{2}}{100} \times 1000\right)^2\right] + 174 - 67.1 - 10\log[2.6\text{e}9/2]$$

结论

接收器噪声系数是一个重要的系统设计参数，因为它决定了最弱可检测信号。除了非常低的固有噪声系数外，**ADC32RF54** 还提供了高 SNR，即使在输入功率信号较大的情况下，也能让系统保持其噪声系数。具有相同噪声系数但 SNR 更低的 ADC 需要降低输入增益，以防止饱和，在这种情况下，ADC 噪声系数开始增加总体噪声。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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