

Application Note

高速射频 ADC 转换器前端架构评估



Rob Reeder

摘要

本文讨论了在设计新接收器前端时如何定义和理解性能权衡。本文回顾了各种有源接收器前端设计方法的比较，包括低噪声放大器 (LNA)、全差分放大器 (FDA) 和无源宽带平衡-不平衡转换器。

内容

1 简介.....	2
2 AC 性能权衡与输入网络指标解析.....	2
2.1 不同架构的交流性能权衡对比.....	3
3 总结.....	6
4 参考资料.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在比较平衡-不平衡转换器、LNA 和 FDA 时，需要考虑模拟输入接口，以便了解设计宽带高性能模数转换器 (ADC) 时涉及的指标。

2 AC 性能权衡与输入网络指标解析

以下是五个有源 (放大器) 或无源 (平衡-不平衡转换器) 模拟输入网络指标，这些指标有助于使输入网络设计重点突出并步入正轨：

- 输入网络输入阻抗或电压驻波比 (VSWR)：一个无单位参数，显示在目标带宽内反射到负载的功率大小。网络的输入阻抗是模拟输入网络 (例如负载) 输入级的定义或指定值；通常为 $50\ \Omega$ 。
- 应用带宽：这是系统中使用的起始频率和结束频率，通常是参考点的 -3dB 频带范围。
- 通带平坦度：通常定义为指定带宽内容许的波动或纹波量：例如， 1dB 或 $+0.5\text{dB}$ 。这些电平可以增加或减少，也可以用斜率定义。
- AC 性能：单频：信噪比 (SNR)、无杂散动态范围 (SFDR) 和双频：三阶互调失真 (IMD3)。
- 输入驱动电平：取决于带宽、输入阻抗和 VSWR 规范。该电平设置转换器满量程输入信号所需的增益或振幅。该电平高度依赖于前端元件：平衡-不平衡转换器、放大器和抗混叠滤波器，可能是最难实现的参数之一。

这些指标包含了整个前端接口设计，而不仅仅是模数转换器 (ADC)。首先考虑这些指标有助于决定是采用有源前端还是无源前端

以下部分显示了五种不同的前端设计，用于比较这些指标权衡，如图 2-1 所示。

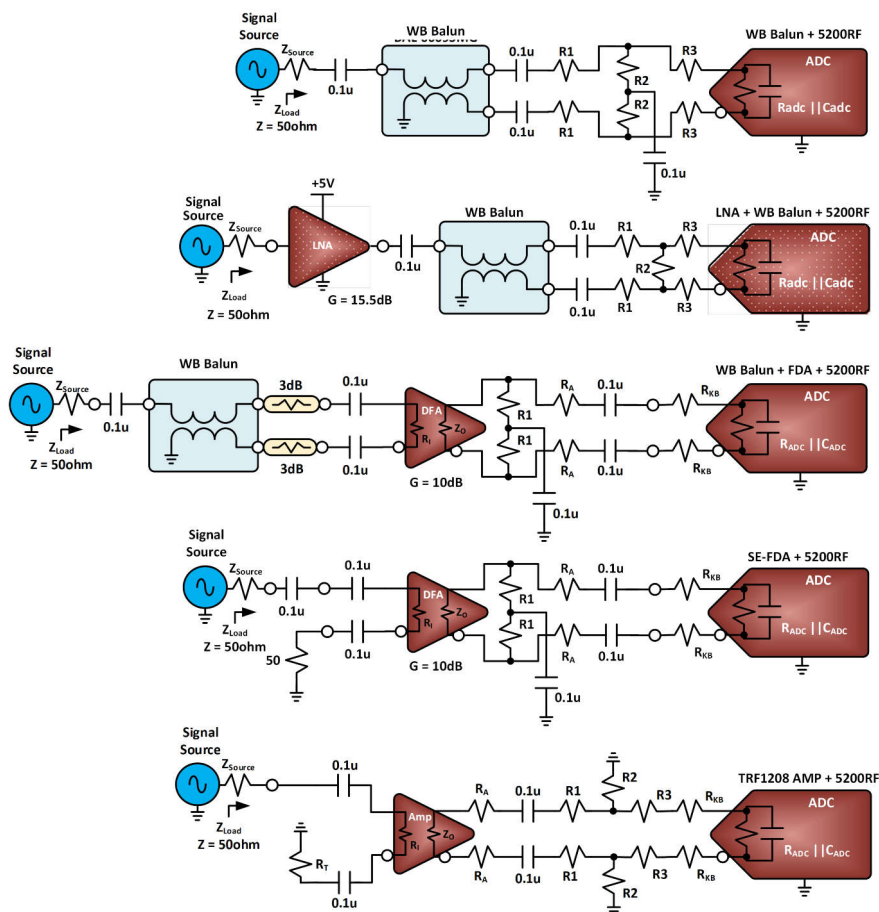


图 2-1. 五种前端设计：仅平衡-不平衡转换器、LNA、平衡-不平衡转换器 + FDA、单端 FDA 和 TRF1208

2.1 不同架构的交流性能权衡对比

图 2-2 展示了五种不同前端在高达 10GHz 频率下的输入带宽和输入驱动电平权衡曲线。每种设计的前端带宽对于 -3dB 带宽及在 1.4GHz 达到 -6dBFS 所需的输入驱动电平具有指导意义。以 TRF1208 设计为例，仅需 -16dBm 输入信号即可使 ADC 满量程值达到 -6dBFS。而 WB 平衡-不平衡转换器需要约 1dBm 才能达到相同的电平。两者之间存在需要前一级提供的 17dBm 信号强度差。平衡-不平衡转换器和宽带接口网络会产生损耗，从而增大整个信号链的噪声系数。平衡-不平衡转换器会产生损耗，LNA 和 FDA 前端设计中包含单端转差分信号的平衡-不平衡转换器同样会产生损耗。

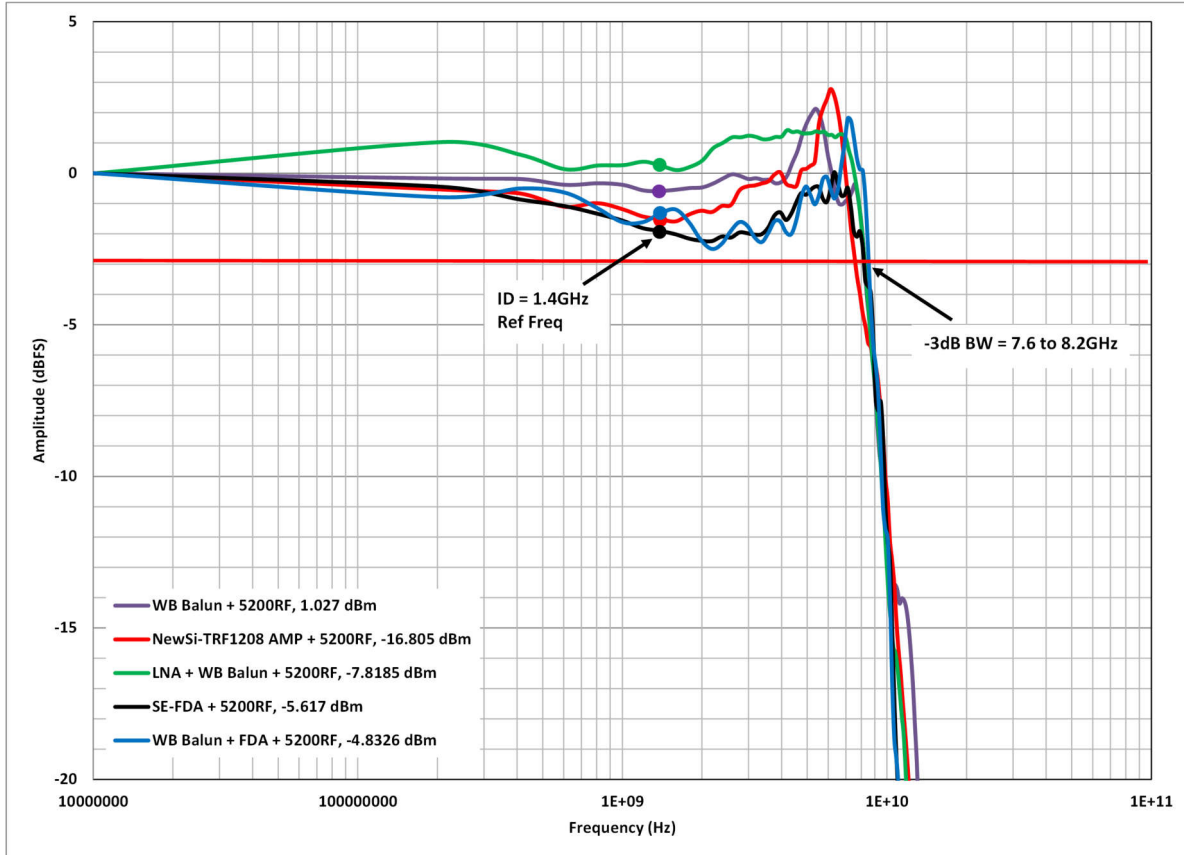


图 2-2. 五种前端设计的频率响应对比

如前所述，平衡-不平衡转换器具有损耗，因此宽带平衡-不平衡转换器接口需要最高的信号驱动强度，这要求平衡-不平衡转换器初级端有 +1dBm 的信号电平才能使 ADC 输出达到 -6dBFS。所有其他比较都使用有源放大器器件(均具有固有增益)，因此所需的输入驱动电平非常低：在 -5dBm 至 -16dBm 之间。可以对每个前端网络工作进行进一步分析，以均衡增益和输入网络损耗。但这些信息已为深入评估 AC 性能提供了预判依据。

通过相同带宽的频率扫描，我们捕获和对比了 SNR、SFDR 和 IMD3 这三项交流性能。这三项测试是设计高速转换器时用于比较权衡的典型标准。

图 2-3 显示了各种配置在 SNR 方面的权衡。

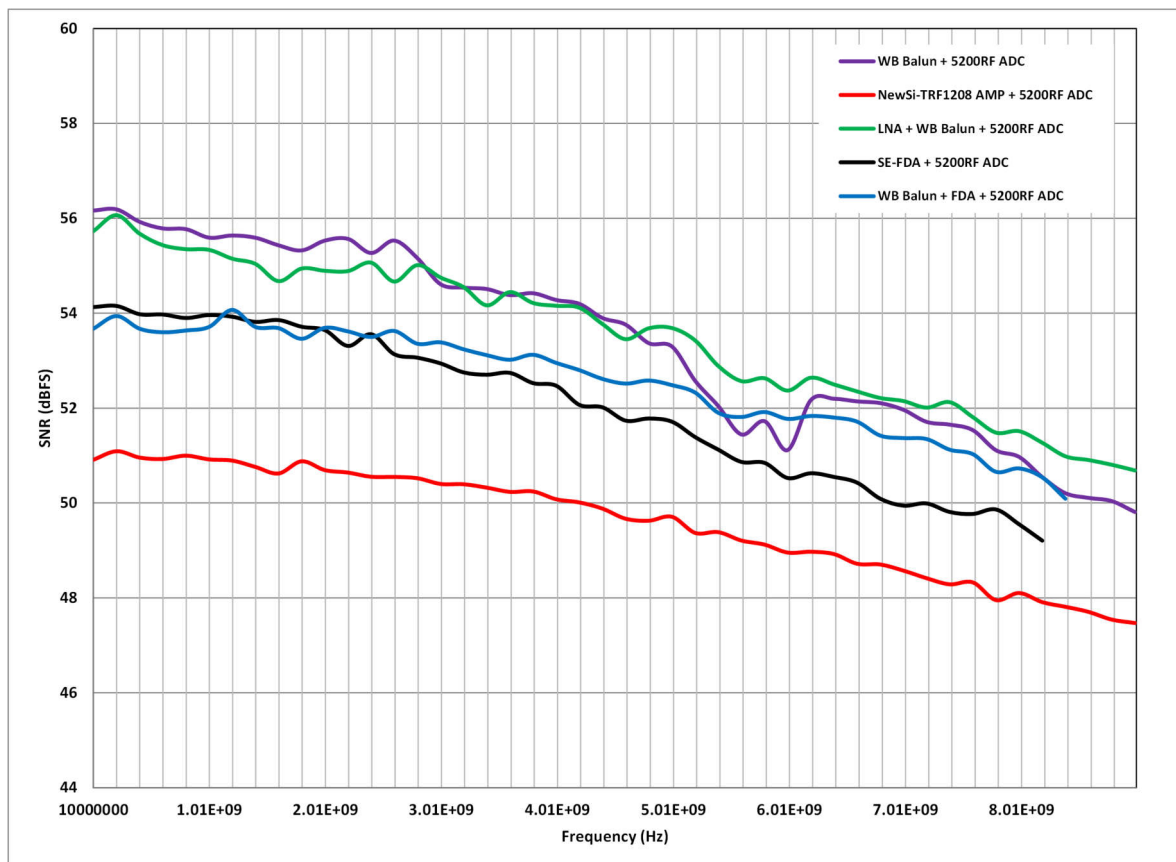


图 2-3. 五种前端设计的 SNR 比较

紫色曲线为基线性能，可以看出宽带平衡-不平衡转换器接口在转换器的整个带宽内提供最佳的 SNR 性能。绿色曲线代表 LNA 方法，位居第二，因为这类有源器件通常具有非常低的噪声系数，增加的噪声约为 1dB 至 2dB。FDA 位列第三，因为 FDA 的宽带噪声高于 LNA 但优于 TRF1208。FDA 在单端输入配置时存在共模噪声抵消问题，因其原生设计针对全差分输入信号。使用这类配置会略微影响 SNR。

TRF1208 排在最后；但是，该器件产生更多输出噪声，因为它的增益比 FDA 高。请记住，较高的有源增益会增加自生噪声。例如，对于 2GHz 的模拟输入信号，TRF1208 在 -166.7dBm/Hz 时的增益为 16dB，噪声系数为 8dB，产生的输出噪声为 -150.7dBm/Hz 。FDA 在 -163.3dBm/Hz 时的增益为 10dB (S2D)，噪声系数为 11dB，输出噪声为 -153.3dBm/Hz 。

如图 2-2 所示，所有设计都被配置为具有尽可能宽的带宽。在任何有源设计中，通过在放大器的输出和 ADC 的输入之间使用抗混叠滤波器来降低带宽，有助于降低目标频带外的宽带噪声和转换器看到的噪声，从而将 SNR 推回到基准性能，如图 2-1 所示 (WB 平衡-不平衡转换器和 5200RF 配置)。

图 2-4 展示 10GHz 频率扫描下各前端配置的线性 SFDR 动态范围。SFDR 是一种单频测量，可以很好地反应任何限制谐波，例如在目标频率范围内的二次谐波，三次谐波，四次谐波等。

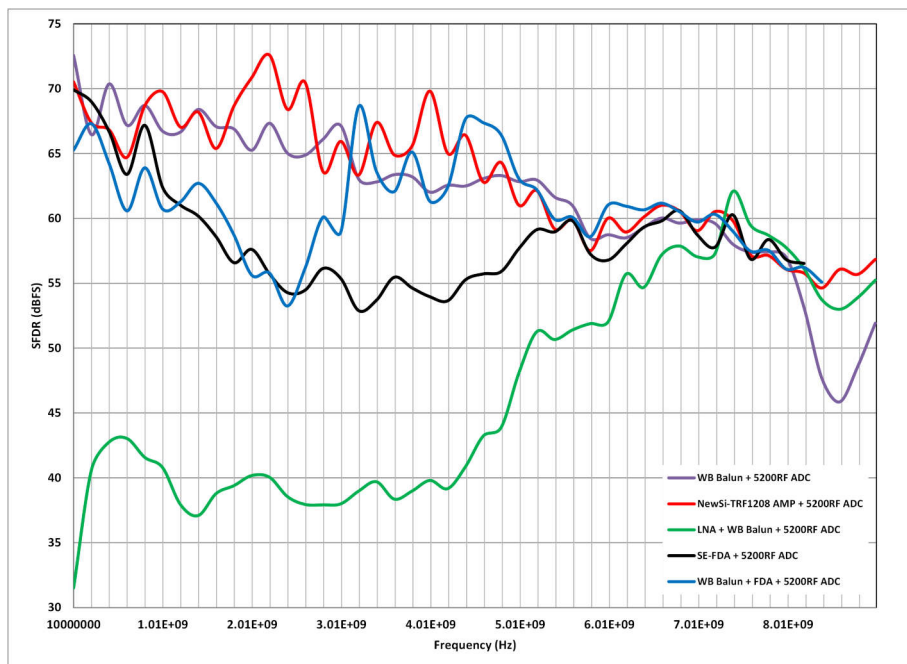


图 2-4. 五种前端设计的 SFDR 比较

紫色曲线为基准性能，宽带平衡-不平衡转换器接口可在转换器的整个带宽内产生最佳 SFDR。表示 LNA 的绿色曲线显示较差性能，尤其是在最高 5GHz 的较低频带，因为考虑到 LNA 的单端性质，偶数阶失真 (HD2) 始终占主导地位。HD2 最终会超出 ADC 的带宽。

使用差分前端方法时，FDA 设计在 0.5-3.5GHz 呈现三阶主导失真。使用单端方法时，0.5-5GHz 偶次失真更明显。

TRF1208 设计全程与无源基线前端性能持平，证明该放大器是宽带有源前端的一个选择。

另一个常见的转换器测试指标是双频，这会产生 IMD3 结果或三阶互调失真，并更快地模拟现实系统应用信号。简而言之，双频测量同时主动测量注入前端接口的两个信号。这两个信号通常会相互偏移 10Mhz，并驱动至相同的电平，即每个信号为 -7dBFS。图 2-5 显示了 $IMD3 + (2 \times F1 + F2 \text{ 和 } 2 \times F2 + F1)$ 结果。为了清楚地说明性能差异，在捕获时，图 2-5 不包括 $IMD3 - (2 \times F1 - F2 \text{ 和 } 2 \times F2 - F1)$ 。

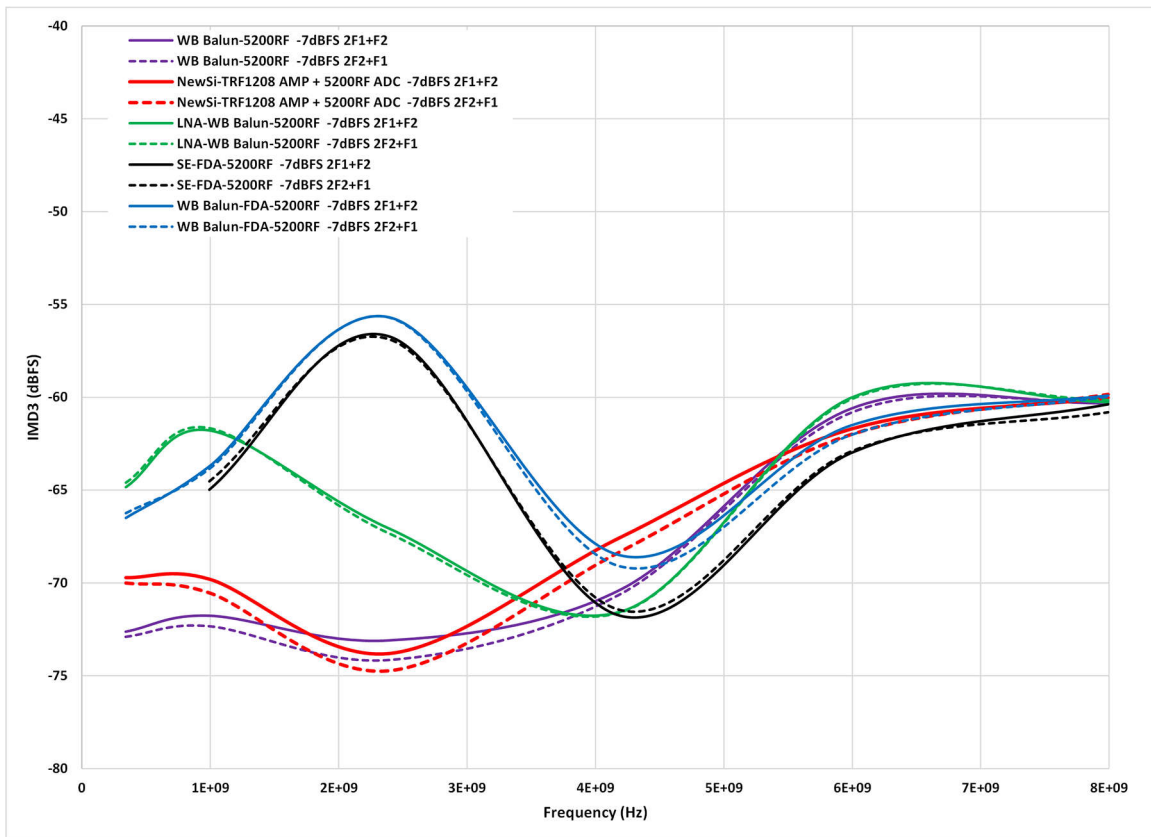


图 2-5. 五种前端设计的 IMD3 比较

紫色曲线再次说明了基线性能，宽带平衡-不平衡转换器接口可在转换器的整个带宽内产生最佳 IMD3 性能。绿色曲线表示 LNA，显示与宽带平衡-不平衡转换器接口相关的性能下降。代表 FDA 接口的蓝色和黑色曲线相对于 5GHz 以下的基线性能也有所下降。在整个频率扫描中，TRF1208 设计与无源基线前端持平。该放大器具有一个明显的优势，即该放大器是满足宽带前端要求的一个选择。

值得注意的是，此前端比较的 FDA 采用双电源供电（含负压）并消耗 1.8W 功率以降低噪声。这是一种降低噪声，增加放大器余量并增加设计功率的方法。LNA 耗散的功率最少；在单个 5V 电源下仅为 0.275W。TRF1208 依靠单个 5V 电源供电，功耗为 0.675W。

3 总结

本应用说明旨在为 ADC 模拟前端接口设计提供快速入门指南，包含一些有用且熟悉的对比分析，并介绍最新推出的 TRF1208 TI 宽带放大器。针对任何新的宽带前端设计，TI 建议首先按照第一节内容评估关键指标权衡，提前做好规划。通过预先审查和了解这些权衡因素，我们可以在平衡-非平衡变压器和放大器前端架构之间做出恰当选择，以用于您的下一代高速接收器设计。

4 参考资料

- 德州仪器 (TI), [高速模数转换器基础](#)应用说明。
- 德州仪器 (TI), [突破多 GHz 带宽壁垒：有源与无源转换器前端对比](#)应用说明。
- 德州仪器 (TI), [揭秘射频转换器前端的实用奥秘](#)研讨会。

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司