

摘要

许多高性能射频模数转换器 (ADC) 采用差分输入，以抑制共模噪声和干扰、理论上将动态范围提高一倍，并因平衡信号传输而改善整体性能。尽管具有差分输入的 ADC 可以接受单端输入信号，但当输入信号为差分信号时，ADC 才能达到最佳性能。大多数射频信号链在天线端为单端结构，因此为了实现与模数转换器 (ADC) 的接口，将单端信号转换为差分信号成为提升信号链性能的重要设计环节。从单端信号转换为差分信号可以通过各种转换方式实现，但通常采用射频无源平衡-非平衡变压器、有源平衡-非平衡变压器或全差分放大器 (FDA) 来实现。

内容

1 了解差分信号的优势.....	1
2 为什么平衡-非平衡变压器被广泛使用？.....	2
2.1 平衡-非平衡变压器在低频下的劣势.....	2
3 为什么要使用全差分放大器？.....	4
4 总结.....	7

插图清单

图 1-1. 通过理论无源平衡-非平衡变压器实现非平衡到平衡信号转换.....	1
图 2-1. 放大器加平衡-非平衡变压器组合方案与 ADC 连接的简化原理图.....	4
图 3-1. FDA 的不同配置.....	4
图 3-2. 全差分放大器与 ADC 连接的简化原理图.....	4
图 3-3. TRF1208 (FDA) 与 ADC12DJ5200RF (ADC) 对比宽带 LNA 和平衡-非平衡变压器方案的二阶谐波失真 (HD2) 性能.....	6
图 3-4. 表贴宽带平衡-非平衡变压器与 TRF1208 的方案尺寸比较.....	7

1 了解差分信号的优势

单端信号传输是一种简单且常见的方式，用于从发射器向接收器传输电信号，反之亦然。单端电信号通过一个电压传输，该电压通常变化并以固定电位（通常为 0V 节点或接地）为参考；差分信号则使用两个互补的反相电压信号，以共模电压为参考来承载信息。图 1-1 展示了从单端到差分的转换，其中差分信号幅度相等但极性相反。

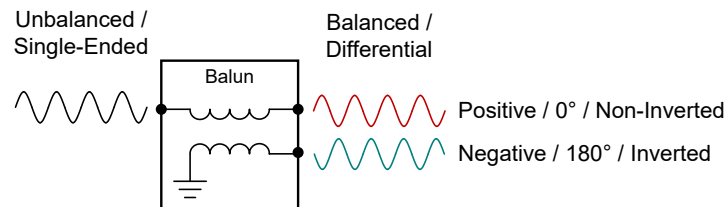


图 1-1. 通过理论无源平衡-非平衡变压器实现非平衡到平衡信号转换

差分配置允许共模噪声或串扰以共模信号形式进入，该信号在两条线路中相等，并在接收器处被减去。这使得差分信号更加稳健，因为差分拓扑具有固有的共模噪声抗扰度。差分接收器通过检测反相与非反相信号之间的差值来提取信息。两个电压信号是平衡的，意味着相对于共模电压它们具有相等幅度和相反极性。与这些电压相关的回流电流也是平衡的，因此相互抵消。

共模抑制比 (CMRR) 通常针对全差分 ADC 输入规定，描述 ADC 抑制共模（通常为直流）电压的能力。出现在 ADC 输入两端的直流共模电压与直流输入失调具有相同效果。通常，如果信号与地在物理上靠得很近，就会耦合共模噪声。CMRR 定义为差分电压增益与共模电压增益之比：

$$CMRR = \frac{\text{Differential Voltage Gain}}{\text{Common-Mode Voltage Gain}} \quad (1)$$

注意，CMRR 是频率相关参数。随着共模电压频率升高，为获得最佳共模抑制所需的非反相信号与反相信号之间的相位匹配变得更难维持。因此，在更高频率下更难获得良好的共模抑制。

差分信号的关键优势之一是动态范围提高。随着高速和射频数据转换器的电源电压降至 3.3V 及更低，设计工程师正在寻找实现更大输入动态范围的方法。理论上，在单端和全差分输入具有相同电压范围的情况下，全差分输入的动态范围将翻倍。这是因为两个差分输入可以相差 180° 相位，如图 1-1 所示。理解这一优势的另一种方式是它与信噪比 (SNR) 的关系。SNR 根据满量程输入电平和 ADC 的最小可检测信号定义：

$$MAX \text{ SNR} = 20 \log \left(\frac{\text{Full Scale Voltage Level}}{\text{Minimum Detectable Signal}} \right) \quad (2)$$

通常，最小可检测信号受噪声底限制。由于全差分输入具有两倍的满量程输入电压电平，噪声水平与单端配置大致相同，同时具有更优的直流和交流共模抑制，因此 SNR 提高。然而，许多单端信号必须保持相对较高的电压以确保足够的 SNR。常见的单端接口电压为 5V 或更高。由于抗噪声能力提高，在较低电压系统中采用差分方案有利于保持足够的 SNR。

2 为什么平衡-非平衡变压器被广泛使用？

balun 一词是 *balanced* 和 *unbalanced* 的合成词，表示平衡-非平衡变压器会在平衡（也称差分）传输线（相反信号均在传输线中传输）与非平衡（也称单端）传输线（回流电流在地中传输）之间进行转换。然而，这一描述掩盖了平衡-非平衡变压器的简单性。平衡-非平衡变压器具有相等的输出功率，就像威尔金森功分器、电阻功分器或正交混合耦合器一样。然而，其输出之间存在 180° 相位差。这与相位差为 0° 的功分器以及相位差为 90° 的正交混合器形成对比。此外，平衡-非平衡变压器是无源元件，不需要供电电压，而且很可能不会增加太多噪声。一些设计工程师认为，在窄带应用中进行单端与差分信号转换时，平衡-非平衡变压器是标准首选元件。

理想的平衡-非平衡变压器是一种具有一个单端端口和一个差分端口的器件。差分端口可以被视为两个独立端口，也可以被视为一个组合端口。以下 S 参数方程描述了一个理想的平衡-非平衡变压器，其中端口 1 为输入，端口 2 和端口 3 为输出端口。

$$|S_{12}| = |S_{13}| = |S_{21}| = |S_{31}| \quad (3)$$

$$S_{11} = -\infty \quad (4)$$

注意由此可推出：

- 平衡-非平衡变压器是一个三端口功分器
- 两个输出将幅度相等且相位相反
- 非平衡输入与输入传输线阻抗匹配（通常为 50 Ω）
- 与隔离器或环行器不同，平衡-非平衡变压器是互易器件，可双向使用

还要注意由此并不能推出：

- 两个输出不一定匹配
- 平衡-非平衡变压器的输出阻抗与输入阻抗可能相同，也可能不同
- 对 S₂₃ 没有约束，因此输出之间可能具有隔离，也可能没有隔离
- 因此，对于差分信号和共模信号，输出端可能具有不同的回波损耗

2.1 平衡-非平衡变压器在低频下的劣势

在低频下，平衡-非平衡变压器和变压器这两个术语常被互换使用，因为低频平衡-非平衡变压器几乎总是用磁通耦合变压器来实现。因此，人们常说平衡-非平衡变压器是变压器的一种，但更准确的说法是：变压器有时可用于实

现平衡-非平衡变压器的功能。许多其他结构也可用于实现平衡-非平衡变压器功能。平衡-非平衡变压器的关键指标包括增益平衡和相位平衡、共模抑制比 (CMRR)、插入损耗、隔离度以及延迟平坦度。

单端转差分通常使用无源磁平衡-非平衡变压器来实现，这类平衡-非平衡变压器一般是窄带的，并且随着工作频率降低而尺寸增大；支持更宽频率范围也会使平衡-非平衡变压器更笨重、成本更高。宽带无源平衡-非平衡变压器可能价格昂贵，并且相位与幅度平衡以及插入损耗都会有所妥协。无源平衡-非平衡变压器具有高线性度的优势；然而，其插入损耗会直接拉低前级放大器的输出三阶截点 (OIP3)，同时影响整体噪声系数。较差的相位和幅度不平衡会直接影响 ADC 的二阶非线性。与所有射频和微波电路一样，每项性能指标仅在某个规定带宽内有效。在不牺牲性能的前提下，将带宽从倍频程扩展到十倍频程、再到多十倍频程，是一项重大挑战。一般来说，平衡-非平衡变压器可分为两类。采用磁耦合的平衡-非平衡变压器在 10MHz 以下工作，而仅采用电容耦合的平衡-非平衡变压器其低频端性能限制在约 1GHz，但可工作到毫米波频率。

对于宽带应用，平衡-非平衡变压器可能无法抑制二阶谐波，而二阶谐波会在整个所需通带内造成纹波。在更高频率下，放大器送入平衡-非平衡变压器的输出阻抗可能发生变化，并可能导致整个频率范围内的不平衡更加明显。相反，频率范围向下扩展到 10MHz 及更低的平衡-非平衡变压器，其尺寸会显著增大，并占用更多布板空间。尽管平衡-非平衡变压器可以将单端信号转换为差分信号并提供差分信号传输的优势，但高性能宽带无源平衡-非平衡变压器可能成本高、尺寸大，并且若采用机械构造则可能不可靠。图 2-1 展示了平衡-非平衡变压器用于与 ADC 接口的典型用例。

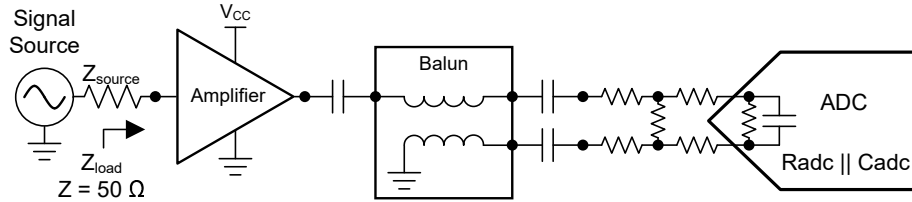


图 2-1. 放大器加平衡-非平衡变压器组合方案与 ADC 连接的简化原理图

对于性能要求高的应用，只要有源平衡-非平衡变压器的整体规格能够优于两个级联部分，那么将前级放大器与无源平衡-非平衡变压器组合起来的方案就非常具有吸引力。然而，最终的检验是：当与 ADC 级联时，有源平衡-非平衡变压器对 ADC 原生性能的影响必须可以忽略不计。优选方案是有源平衡-非平衡变压器不与 ADC 位于同一芯片上；否则，共模杂散注入可能限制 ADC 性能。

有源平衡-非平衡变压器通常采用两种基本架构：闭环或开环。对于高频应用，开环结构因其稳定性优势而更受青睐。虽然开环结构具有噪声系数优势，但它们往往采用交流耦合并带有一个高通极点。闭环实现不仅解决了这一问题，还能获得跟随 ADC 线性度曲线的 OIP3 或 OIP2（在低频时较高，并随频率升高而平缓下降）。这一点至关重要，因为在整个频率范围内，有源平衡-非平衡变压器必须始终比 ADC 优至少 6dB 到 8dB，才能对 ADC 产生最小影响。

3 为什么要使用全差分放大器？

全差分放大器 (FDA) 在提供有源增益环节的同时，具备与平衡-非平衡变压器相同的优势，并有可能减少射频信号链的整体 BOM 数量和布板空间。然而，FDA 确实需要供电，并会向通过的信号添加噪声，还可能使相位不平衡更加明显。

图 3-1 展示了 FDA 的三种不同拓扑配置：差分转差分、单端转差分和差分转单端，使工程师能够用单个器件满足多种射频配置需求。

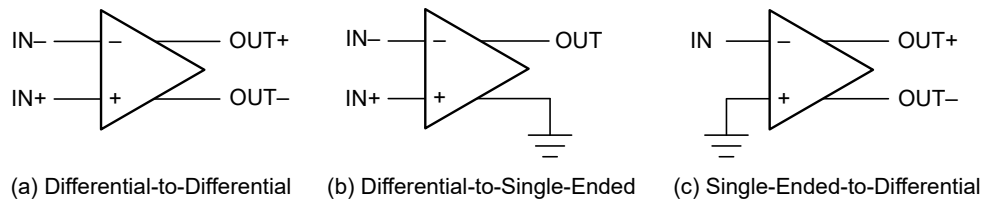


图 3-1. FDA 的不同配置

在图 3-2 中，FDA 配置为单端转差分放大器，可用于替代单端增益放大器和无源平衡-非平衡变压器，以与 ADC 接口，如图 2-1 所示。

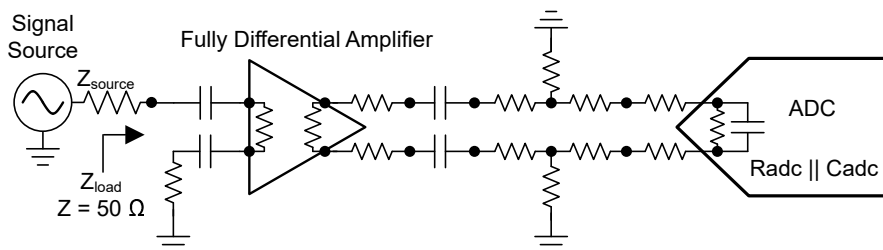


图 3-2. 全差分放大器与 ADC 连接的简化原理图

本质上，放大器和增益模块是单端的，会带来较差的相位不平衡和更高的偶次失真。例如，ADC 的模拟输入通常是差分接口，理想情况下要求两个输入幅度相等且相位相差 180 度。然而，维持这种平衡信号可能相当具有挑战性。当这两个输入信号偏离理想的 180 度时，会产生相位偏移，从而生成共模信号，使偶次失真 (HD2) 更加明显。

具体而言，对于宽带应用，**TRF1208**（单通道、10MHz 至 11GHz、3dB 带宽、采用小型 4 mm² QFN 封装的单端转差分射频放大器）提供优异的增益不平衡和相位不平衡指标： $\pm 0.3\text{dB}$ 和 $\pm 3^\circ$ ，可与市场上最好的无源宽带平衡-非平衡变压器相竞争。在图 3-1 中，**TRF1208** 与 **ADC12DJ5200RF** 配合，在高达 8GHz 时提供低于 -60dBFS 的二阶谐波失真。采用分立宽带低噪声放大器 (LNA) 和无源平衡-非平衡变压器方案时，放大器可能成为线性度的限制因素，并最终导致不期望的更高 HD2，如图 3-3 所示。TRF1208 在 HD2 性能方面比竞争对手的 LNA 和平衡-非平衡变压器方案高出最多 -30dBFS。

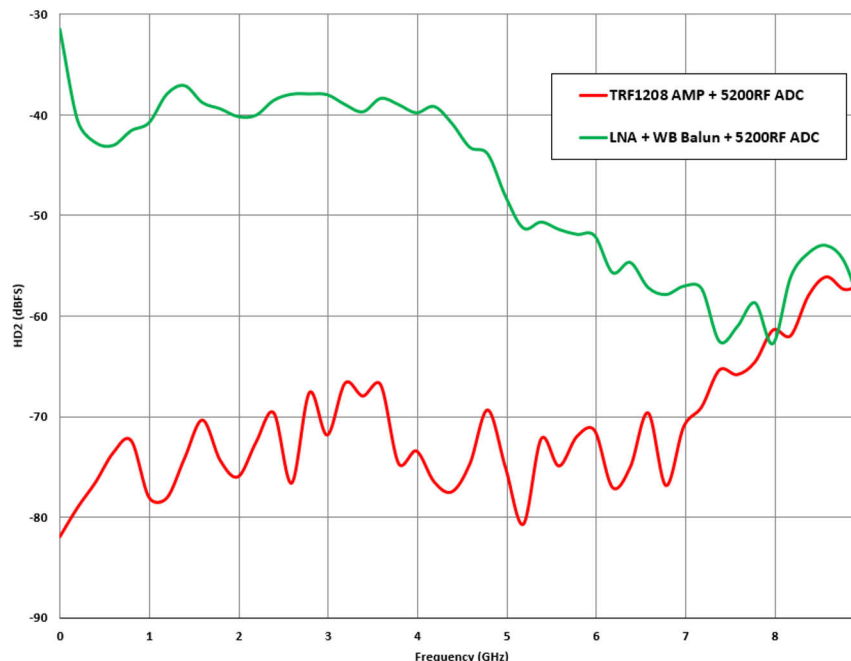


图 3-3. TRF1208 (FDA) 与 ADC12DJ5200RF (ADC) 对比宽带 LNA 和平衡-非平衡变压器方案的二阶谐波失真 (HD2) 性能

将宽带 ADC 与单端源匹配可能是一项艰巨挑战，尤其是在高于第一奈奎斯特区的频率上。ADC 的输入阻抗通常远高于 50Ω ，一般为 100Ω 或处于 $k\Omega$ 量级。这意味着，输出阻抗较高的平衡-非平衡变压器通常比 1:1 平衡-非平衡变压器更能与 ADC 输入匹配。由于 ADC 的带限特性，在纯 50Ω 系统中，通常需要使用比所需系统带宽宽得多的平衡-非平衡变压器。然而，系统频率越低，无源平衡-非平衡变压器的尺寸可能越大，导致单端放大器加平衡-非平衡变压器的组合方案使整体系统尺寸增大。

图 3-4 表明，覆盖高达 12GHz 频率范围的平衡-非平衡变压器加增益模块方案，其方案尺寸显著大于 FDA（如 TRF1208）。TRF1208 采用 4 mm² QFN 封装，整体板级方案尺寸为 120 mm²；而机械结构平衡-非平衡变压器的封装尺寸可超过 64 mm²，布板空间占位平均约为 171 mm²。在平衡-非平衡变压器方案中增加增益模块后，布板空间可接近 200 mm² 的 PCB 面积。

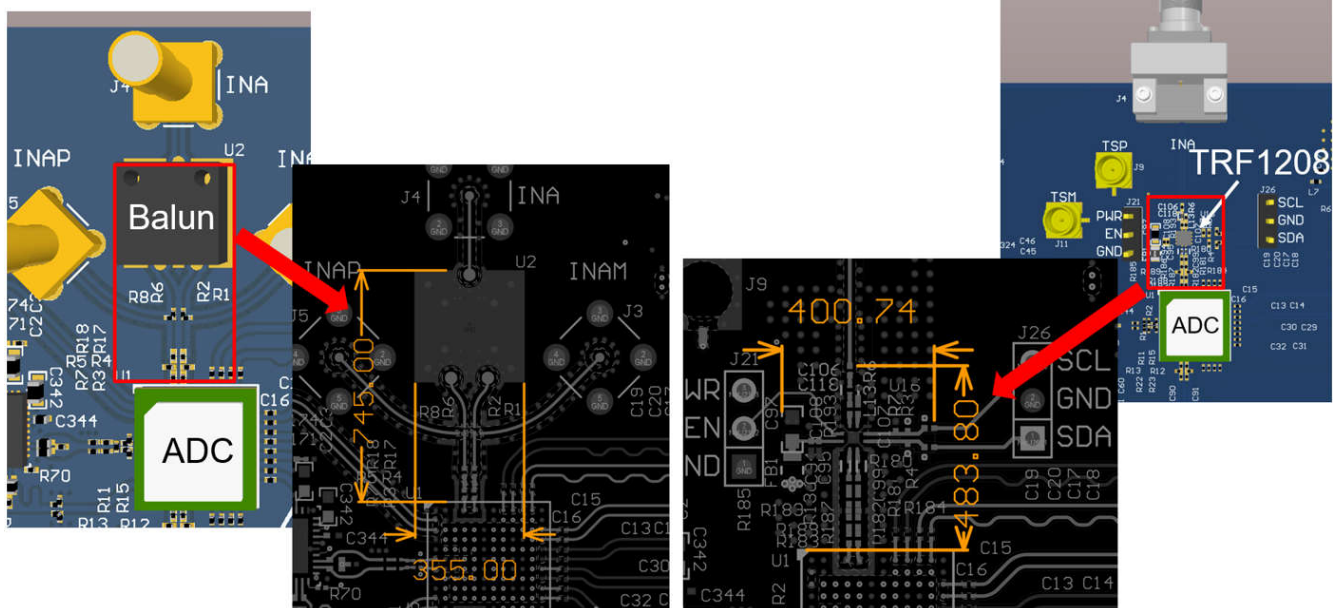


图 3-4. 表贴宽带平衡-非平衡变压器与 TRF1208 的方案尺寸比较

4 总结

平衡-非平衡变压器带来多项好处：支持差分信号传输、无需滤波即可消除共模噪声、隔离端口、提供不错的信噪比 (SNR) 性能，并抑制偶次谐波失真产物 (HD2)。TI 的差分放大器（如 TRF1208）可提供与平衡-非平衡变压器相当的有竞争力性能，且通常优于“增益模块+ 平衡-非平衡变压器”的组合方案。此外，它在射频信号链中提供增益环节，并减少 IC 物料清单 (BOM) 数量。

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月