

## Application Note

## 高速模数转换器模拟输入前端无源匹配的精妙技巧



Rob Reeder, Luke Allen

## 摘要

理解高速模数转换器前端设计的原理，有时就像是一项独立的技巧。在任何高速模拟接收器的前端设计中，简单地放置一个平衡-非平衡变压器，然后将两条走线从变压器的次级输出连接到 ADC 的输入，这种做法并不可取。众所周知，平衡-非平衡变压器对带宽 (BW) 的寄生具有敏感性，而且还有其他小问题。本文中，我们将介绍几种方法，展示如何利用平衡-非平衡变压器实现无源模拟输入设计的出色性能。更重要的是，两个器件之间不需要昂贵的平衡-非平衡变压器或高成本的衰减器就能实现期望的带宽。所以，坐下来，拿杯饮料，我们将揭示带宽和失真调谐的精妙技巧。

## 内容

1 如何选择合适的平衡-非平衡变压器或变压器.....	2
2 如何选择合适的平衡-非平衡变压器匹配网络.....	4
3 使用 ADC3669 的示例技巧.....	5
4 总结.....	10
5 参考资料.....	10

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 如何选择合适的平衡-非平衡变压器或变压器

在打开 CAD 软件程序并开始进行 PCB 布局之前，假设您已经决定要使用的 ADC 以及为具体应用准备的带宽。现在，您需要决定无源前端是否适合您的设计。再次假设，您不需要进行直流耦合，即对直流频率频段进行采样。由于平衡-非平衡变压器不需要额外的电源，因此使用这种变压器的好处包括降低总体功耗和减小电路板空间。此外，由于没有额外的电源干扰，平衡-非平衡变压器不会对连接到 ADC 的整体射频 (RF) 信号链增加额外噪声。这反过来意味着信噪比 (SNR) 或噪声频谱密度 (NSD) 不会受到影响。

确定好系统后，必须选择平衡-非平衡变压器，并且可供选择的种类非常多。选择平衡-非平衡变压器时，建议先查看您的带宽要求。选择一个带宽稍微大于实际需求的平衡-非平衡变压器，这样平衡-非平衡变压器的作用就更像一个窗口，而不是一扇门。这在那些较高频率应用中尤其重要。请参阅图 1-1。展示了两种用于同一应用的不同平衡-非平衡变压器，搭配 ADC3669 16 位双通道 ADC。尽管这两种变压器具有相同的带宽，但由于 ADC 内部采样网络的输入阻抗变化以及 PCB 布线的寄生效应，它们的响应最终会有所不同。请注意，如果两个平衡-非平衡变压器都不匹配，带宽下降速度会相当快，如前面的两点所述。

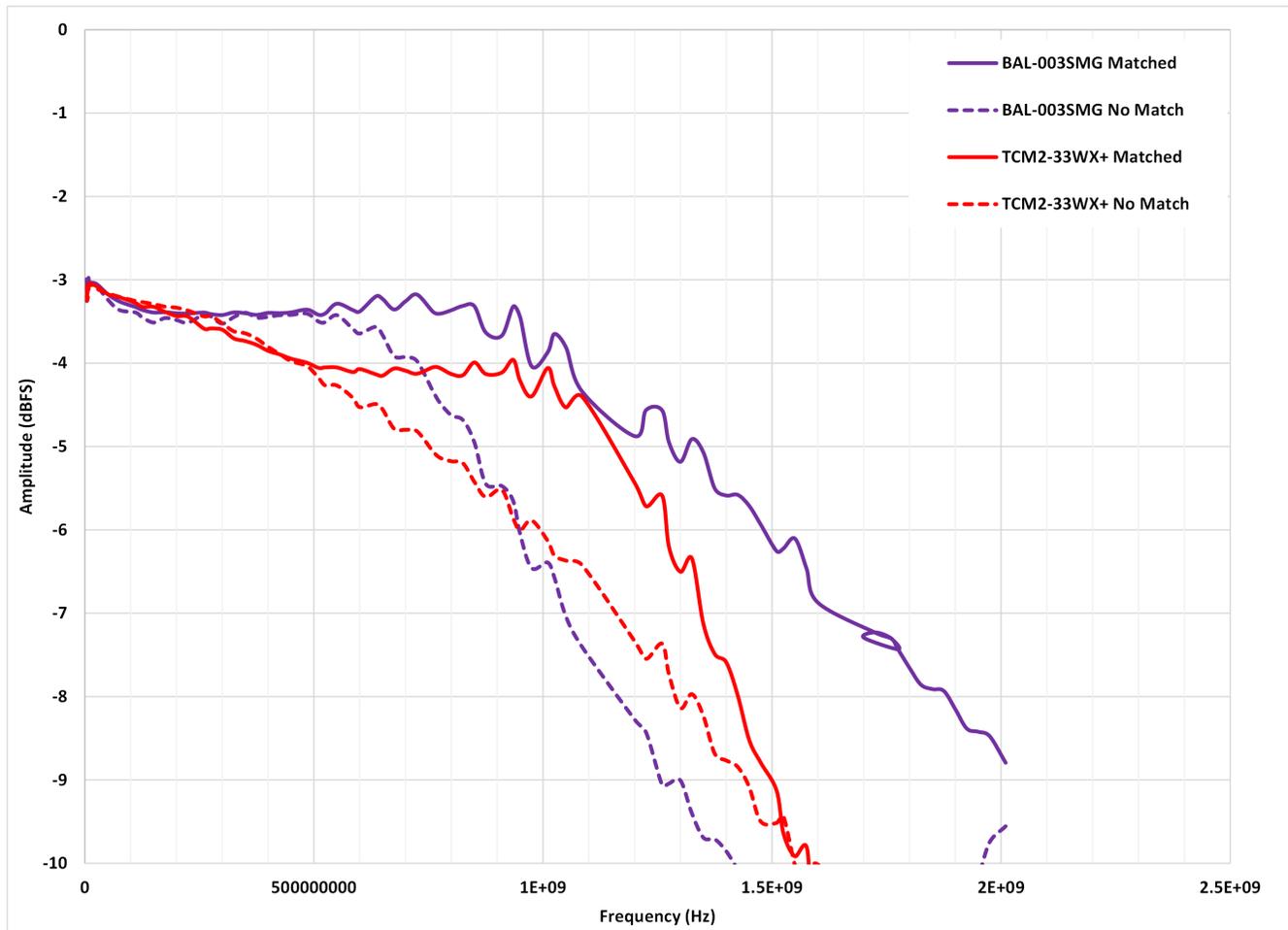


图 1-1. ADC3669 和平衡-非平衡变压器带宽比较：匹配 (实线) 与不匹配 (虚线)

在选择合适的平衡-非平衡变压器过程中以及在开始仿真之前需要考虑的一些其他关键点。仔细查看数据表中平衡-非平衡变压器的 PCB 尺寸和布局建议，因为这些设计背后有其特定的理由和考虑。建议严格遵循这些建议，否则您可能会无意中使平衡-非平衡变压器的表现发生变化。平衡-非平衡变压器进行数据表收集和 S 参数测量时使用此封装进行表征，只有在这些条件下才能达到规格要求。这让我想到另一个问题，有时我们的平衡-非平衡变压器供应商使用平衡-非平衡变压器测试板来测量 s 参数，但他们没有考虑到测试板上的连接器和走线所带来的额外影响。所以要注意带宽的准确性！

最后，开始了解平衡-非平衡变压器的相位不平衡与特定带宽之间的关系。平衡-非平衡变压器的固有相位不平衡越大，ADC 可能表现出的偶次谐波失真 (HD2 或二次谐波失真) 就更加明显。如果 HD2 在您的频率规划应用中很重要，则建议选择相位不平衡性能良好的平衡-非平衡变压器。在这方面并没有明确的指导，因为每种 ADC 对相位差异的灵敏度在其可用频率范围内也各不相同。一般来说，最好在开始时选择一个在应用带宽内相位不平衡  $\leq 5$  度的平衡-非平衡变压器。这样对射频信号链中已有的偶次谐波失真的总量影响甚微。有关平衡-非平衡变压器相位不平衡及其对偶次谐波失真影响的更多信息，请参阅[参考链接](#)。图 1-2 再次展示了上述两种匹配的平衡-非平衡变压器方案之间的区别，及其对使用 ADC3669 时的偶次谐波失真的影响。请注意，HD3、奇次谐波失真或第三谐波响应在不同频率下的表现相似，并且其影响没有显著变化。

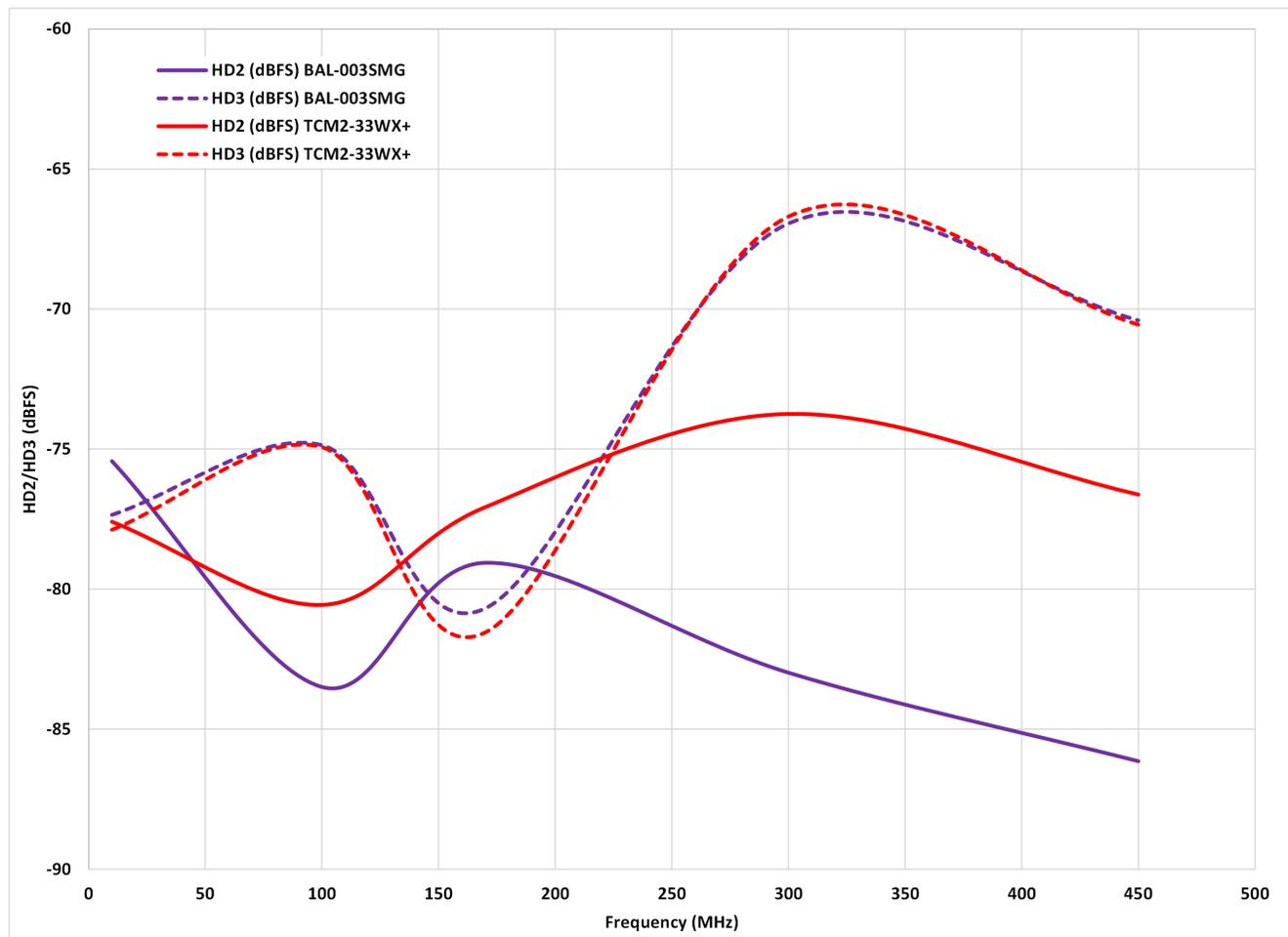


图 1-2. 两个平衡-非平衡变压器之间的 ADC3669 HD2/HD3 比较：高成本与低成本

## 2 如何选择合适的平衡-非平衡变压器匹配网络

多年来，我们看到许多人尝试仿真和完善平衡-非平衡变压器匹配网络的设计。经过数周到数月的仿真和努力理解某种程度的寄生效应后，当 PCB 设计被制作出来时，匹配效果并没有完全达到预期。建议采用不同的设计流程，从图 2-1 所示的以下拓扑结构开始。这样就可以为您提供一个很好的试验平台，让您可以使用任何想要的元件来完成匹配。我在想，所有这些努力和权衡是否值得，建议您参考图 1-1。下一节介绍了每个元件，以便了解它们在 ADC 输入匹配网络中的作用或功能。

**C1/C2**：通常为 0.1 $\mu$ F，用于阻断直流电流进入平衡-非平衡变压器或变压器。有些平衡-非平衡变压器设计可能连接地和/或直流电源，从而影响变压器的功能，导致性能下降。所以，这就是它们的用途，把它们放进来吧。

**R1**：在直流阻断电容器之后，可以在平衡-非平衡变压器输出附近实现反向端接，这并非总是必要的，如果您的布线长度足够长，您可能就需要这个元件。假设在感兴趣的频带范围内无法实现完美匹配，为了应对因匹配不完美而在频率范围内来回反射的驻波，需要进行反向端接。

**R2/R3/R4**：这样就可以采用各种匹配技术。这三个元件是匹配的核心，可以通过多种组合的形式来求解平衡-非平衡变压器或 ADC 匹配难题。为了实现最宽频带的匹配，通常将这三个元件配置为匹配衰减器。这有助于消除平衡-非平衡变压器和 ADC 之间的驻波，提供这两个器件通常都需要的“稳定”50 $\Omega$  阻抗。虽然这些元件表示为电阻，但它们也可以采用电容和/或电感的形式。

**C3**：此电容器（通常为 0.1 $\mu$ F）用于连接 R3 的中心点，为交流电流提供通路。这也是一个不错的选择，因为当超出 ADC 输入的满量程时，就可以让这个交流电流有一个去处...不客气。旁注：这个电容器也可以改为位于 R5。

**R5**：用于在 ADC 输入端的另一侧进行反向端接，再说一次，这并非总是必需的。此电阻的作用与 R1 相同，但从相反的方向帮助解决可能累积的驻波问题。通常，当布线连接长度为 300mil 或更长时，需要 R1 和/或 R5。

**R6**：这些是反冲元件。通常以电阻的形式存在，但在某些情况下也可作为电感或低 Q 值铁氧体磁珠，用于抑制从 ADC 内部采样电路回流到模拟输入网络的残余电荷。此元件在使用无缓冲 ADC 时尤其重要。

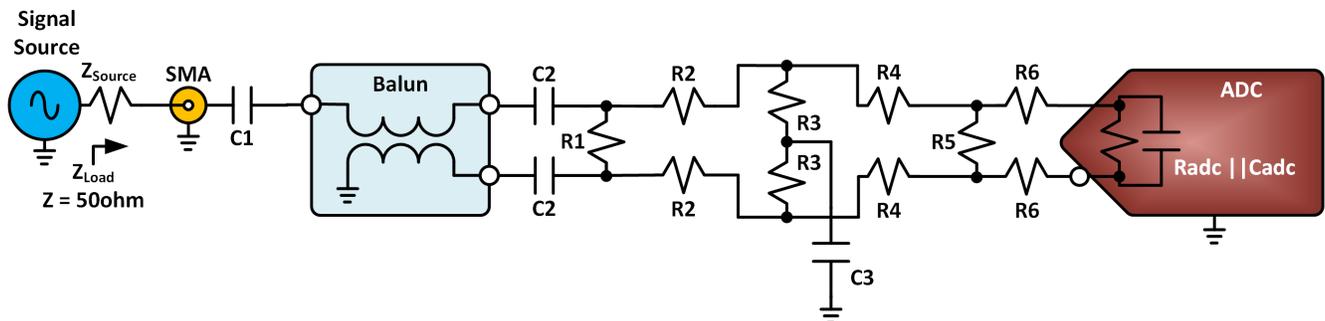


图 2-1. 通用无源网络元件预留位置

在设计时，如果仅仅打算将两条走线从平衡-非平衡变压器输出连接到 ADC 输入，要格外小心。即使您收集了 s 参数、进行了仿真并向同事展示了输出，这种方法可能仍然代价高昂，除非您对该平衡-非平衡变压器与 ADC 组合有丰富的使用经验。

### 3 使用 ADC3669 的示例技巧

现在来看一个使用低成本平衡-非平衡变压器和 ADC3669 ( 16 位双通道模数转换器 ) 的示例, 以实现具有 1.5GHz 模拟采样带宽的宽带前端匹配设计。

在本例中, 我们计划使用来自 Mini-Circuits (MC) 的 TCM2-33WX+。与更易于匹配但成本更高的平衡-非平衡变压器相比, 这个平衡-非平衡变压器具有 3GHz 的带宽和低插入损耗。此外, 相比其他同频率范围的低成本同类产品, 这个 MC 平衡-非平衡变压器还具有非常好的相位不平衡性能 ( 小于 5 度 )。有关更多详细信息, 请参阅 [MC 平衡-非平衡变压器](#) 数据表的链接。

使用上面的通用电路, 定义匹配时所需的元件不是纯阻性元件。在本例中, 我们可以使用 R-C-L (R2-R3-R6) 方法, 这在我们的例子下已证明是有益的, 请参阅 [图 3-1](#)。

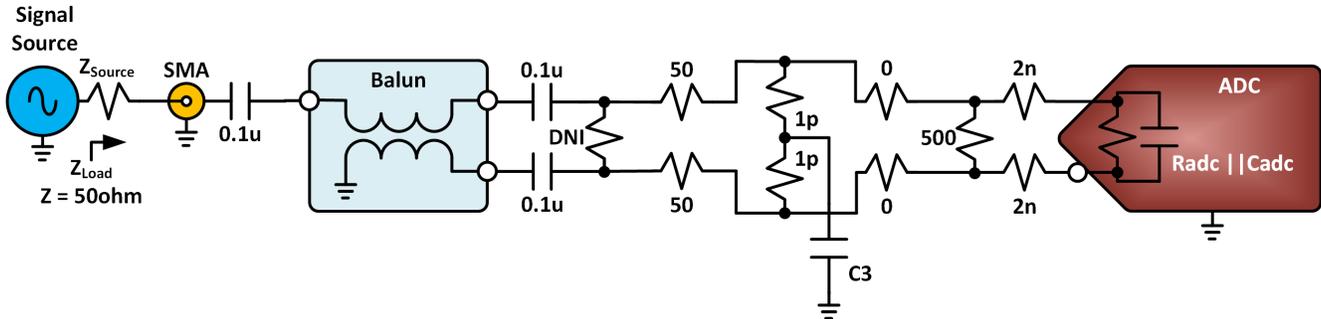


图 3-1. 最终确定的无源网络匹配

这就是艺术的精妙之处。您如何处理这个平衡-非平衡变压器匹配设计难题？我应该对此进行建模还是仿真？可以进行一些建模来帮助提供指导。但坦率地说, PCB 寄生效应仍然会产生影响, 除非您是非常专业的仿真专家, 已经掌握了消除 PCB 寄生效应细微影响的关键技巧, 否则, 典型的做法是在电路板上测试几种不同的迭代, 找到更合适的方案。

接下来的内容可以作为一个很好的起点, 获取平衡-非平衡变压器和 ADC 的两组 S 参数 ( 如果有 ), 并使用您喜欢的仿真软件。请注意供应商的 s 参数, 如上所述。接下来, 使用 [图 2-1](#) 中给出的匹配网络格式。然后, 针对以下情况之一使用 R2-R3-R4 匹配方法:

1. 使用衰减器方法, 分别将 R2、R3 和 R4 的阻值设置为 8.6  $\Omega$ 、140  $\Omega$  和 8.6  $\Omega$ , 可以提供 3dB 的衰减。有关此方法的更多信息, 请参阅 [链接](#)。
2. 分别对 R2-R3-R4 使用 R-C-L 方法。请记住, 这种方法有助于使用电感器 ( “L” ) 作为最后一个元件来抵消 ADC 内部寄生电容 ( “C” )。这可以使带宽平坦化, 从而让平衡-非平衡变压器可以发挥其额定带宽的作用。但是, 这种方法确实需要通过多次尝试和调整才能最终获得理想的结果。

如上所述, 此方法的目标是不使用有损耗的衰减器。因此, 要获得 R-C-L 方法的更多背景信息, 请参见 [图 3-2](#)、[图 3-3](#) 和 [图 3-4](#), 了解在网络中改变 L、C 和 R 的作用 ( 参见 [图 3-1](#) ), 以及它们在定义最终带宽和网络匹配方面的作用。

[图 3-2](#) 展示了在保持其他元件值不变的情况下, 改变 L 值对带宽的影响。可以看到, 随着 L 值的增加, 带宽会逐渐减小。这意味着 L 值对 ADC 的内部 C 寄生产生了不利的反应性效应。

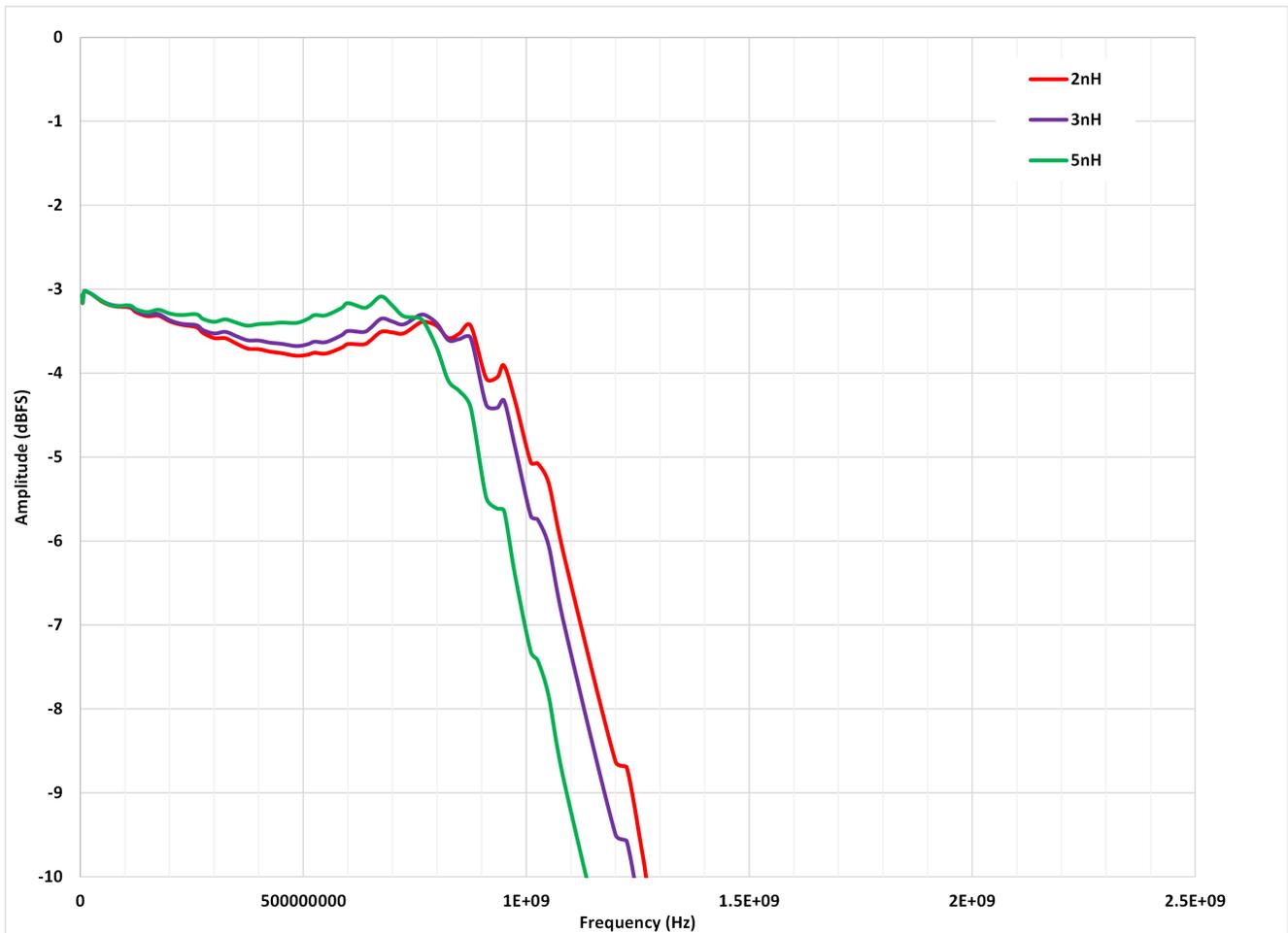


图 3-2. 通带平坦度响应与 R4 位置的各种电感 ( “L” ) 值

在下一个实验中，图 3-3 展示了在保持其他元件值不变的情况下，改变 C 值对带宽的影响。请注意，随着 C 值的减小，带宽会缓慢提高，但代价是带宽的平坦度有所下降。这意味着 C 值对平衡-非平衡变压器在频率范围内的回波损耗产生了反应性效应。这些电容器有助于保持平衡-非平衡变压器的带宽与频率。

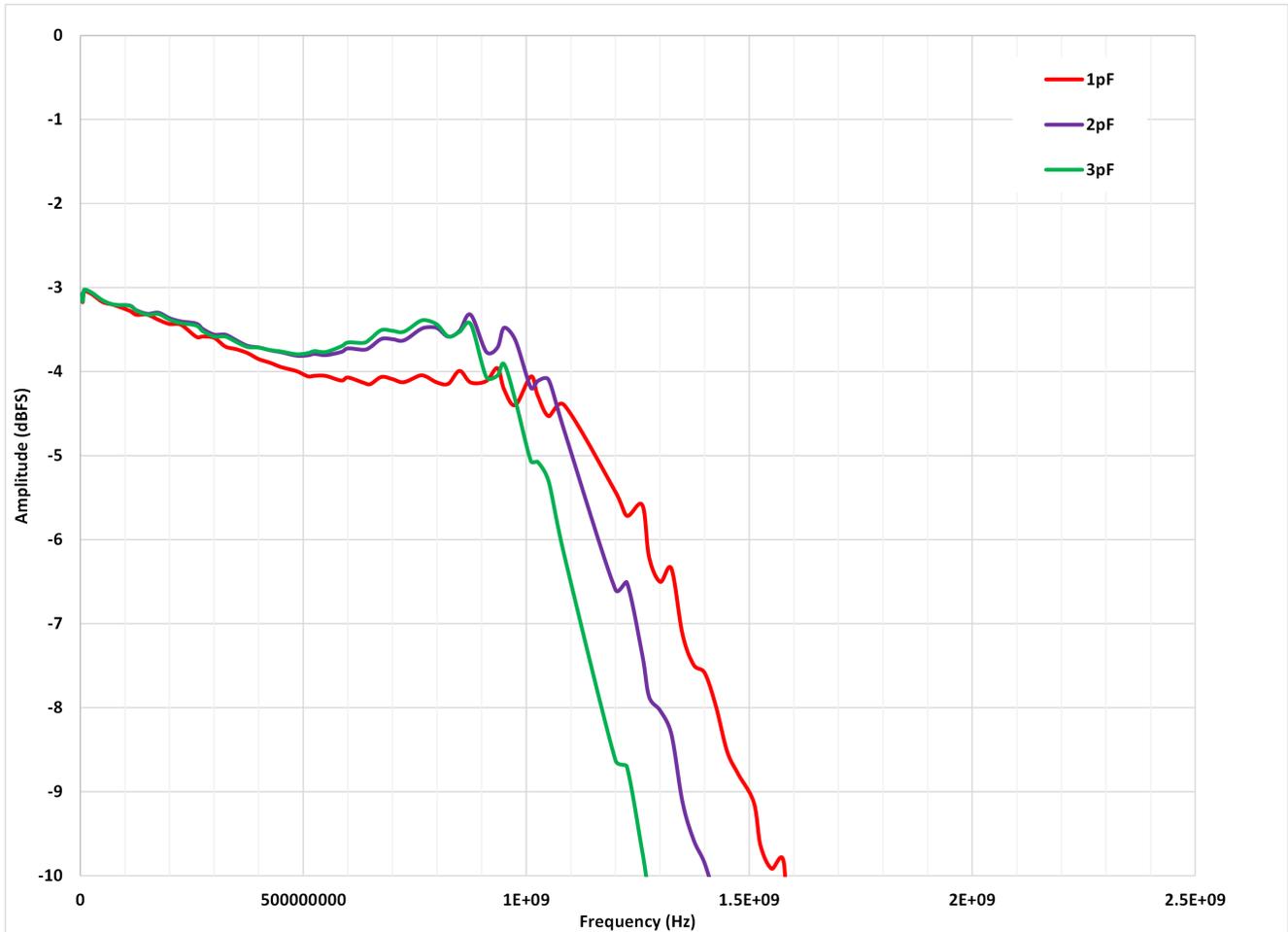


图 3-3. 通带平坦度响应与 R3 位置的各种电容 ( “C” ) 值

在最后一个实验中，图 3-4 展示了在保持其他元件值不变的情况下，改变 R 值对带宽的影响。可以看到，随着 R 值的增加，带宽缓慢提高，但平坦度有所下降，或者在带宽响应中出现峰值。R 值的影响几乎与 L 值相同，因此保持了平衡-非平衡变压器和 ADC 所需的阻抗要求，以确保它们能够协同工作。

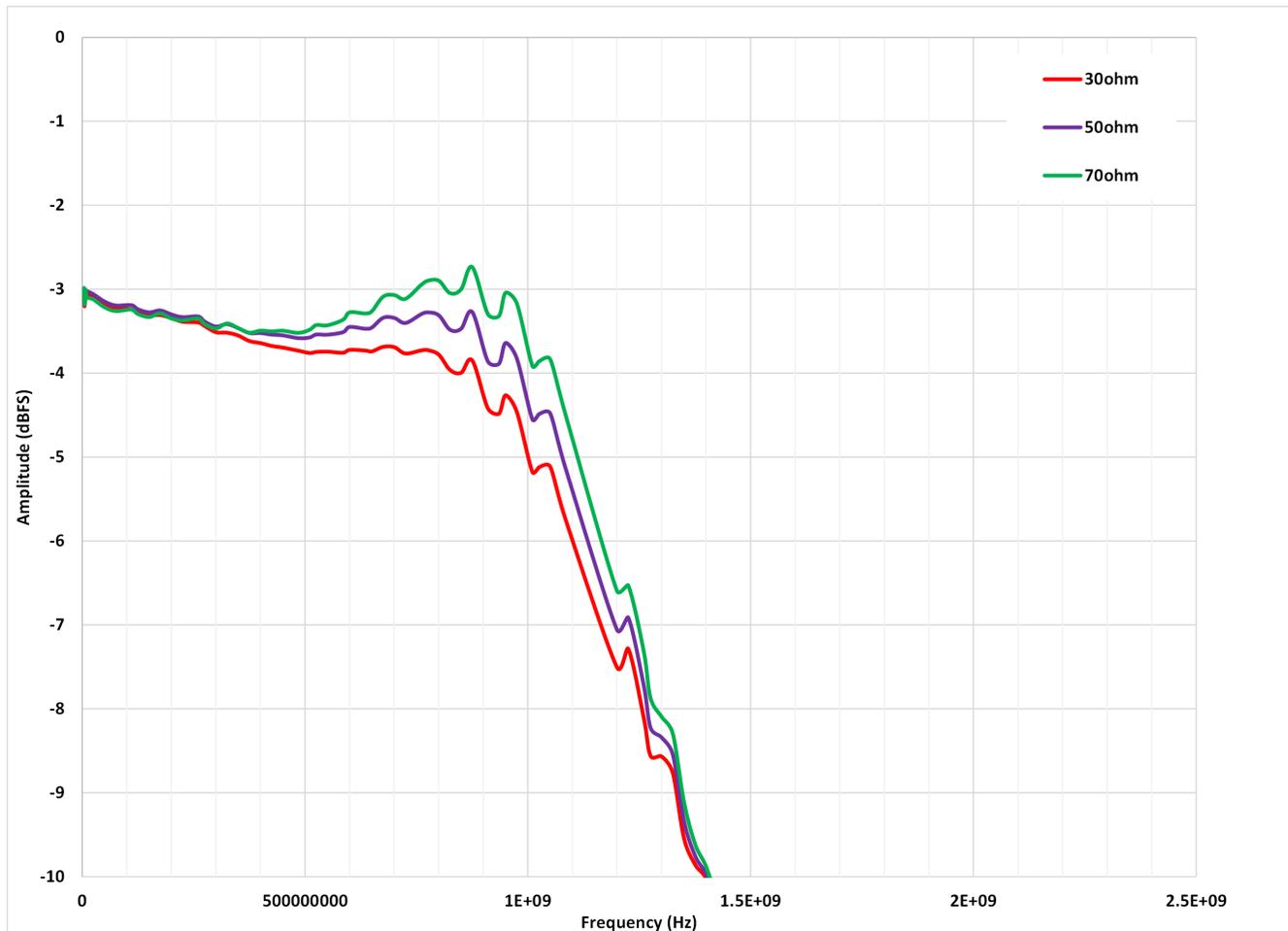


图 3-4. 通带平坦度响应与 R2 位置的各种电阻 ( “R” ) 值

最后，R-C-L 方法也可以进行仿真，从而通过使用您喜欢的仿真软件包中的 *调优* 功能，为您提供一个良好的起点。这样您就可以看到每个元件在网络匹配中所扮演的相同角色。确定一些合适的初始值，有助于在需要的情况下迭代和完善匹配时，明确应采用的方向。

接下来，在进行迭代时的匹配设计工作期间，建议不时对转换器的应用带宽进行交流性能扫描。这样您就可以了解如何动态地提升性能，并确保 ADC 没有任何问题。

图 3-5 说明了使用这种方法将输入网络匹配到 1.5GHz 时，在 ADC3669 带宽内测得的最终交流性能 ( SNR 和 SFDR )。

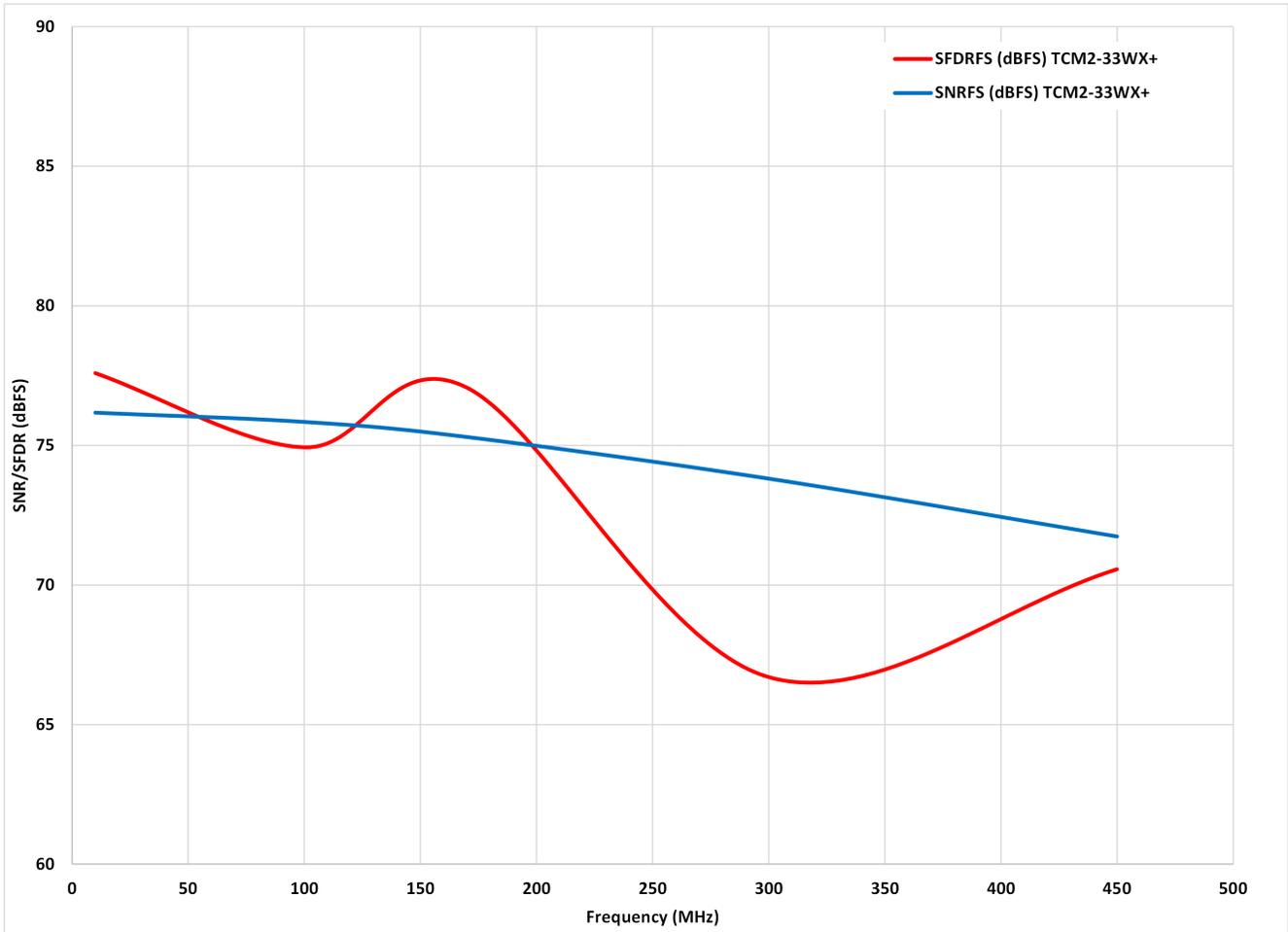


图 3-5. 最终匹配网络的交流性能 (SNR/SFDR) 与频率间的关系

在结束之前，还有另一种匹配方法（即窄带方法），适用于只需要 ADC 能够提供的部分带宽的应用。如果我们对上面的清单进行扩展，我们可以称之为第 3 种方法或...

- 3. 使用窄带方法，有效地使用图 2-1 中所述的相同示例网络。但改为使用 R5，通过在 R5 处并联一个电感器（“L”）来抵消 ADC 内部采样网络寄生电容（“C”）。只需提取 ADC 的 S 参数中的频率中心点即可实现。假设 s 参数 S1P 文件采用实部/虚部形式，则可将这个 C 值等效为一个 L 值。下面我们举例说明：

使用 s 参数文件，根据滤波器的设计中心频率，在文件中找到中心频率。在本例中，可以在窄带滤波器设计的 110MHz 中心频率处找到 4pF。

第一步，求出 4pF 和 110MHz 下的反应性阻抗：

$$X_C = \frac{1}{(2 \times \pi \times f \times C)} = \frac{1}{(2 \times \pi \times 110M \times 4p)} = 361.7\Omega \quad (1)$$

接下来，使得 Xc 等于 XL，如以下公式所示：

$$X_C = X_L = (2 \times \pi \times f \times L) \quad (2)$$

现在，L 的解为：

$$L = \frac{X_C}{(2 \times \pi \times f)} = \frac{361.7}{(2 \times \pi \times 110M)} = 523nH \quad (3)$$

如前所述，通过使两个反应性阻抗相等，可以求出  $L$ ，从而可以抵消 ADC 的内部  $C$  值（在本例中为  $4\text{pF}$ ）。这将设置要使用的  $L$  值的起始点。如果需要优化窄带宽匹配的中心点，可以从此处迭代该值以调整频率。

## 4 总结

总之，设计频率范围为几 GHz 的匹配网络具有挑战性，并不总是轻而易举。希望本文档能为您提供良好的指导，告诉您从哪里开始，并且指出在过程中可能遇到的一些陷阱。确保选择具有一定带宽余量的平衡-非平衡变压器或变压器，从而满足您的特定应用需求。如果 HD2 对您的频率应用非常重要，确保选择相位不平衡小于等于 5 度的平衡-非平衡变压器。使用上面的简化输入网络可为大多数使用平衡-非平衡变压器或放大器与 ADC 匹配的设计提供所有初始预留位置。最后，您不需要列出每个元件，但最初最好拥有这些元件，因为您无法在仿真中捕获所有电路板布局布线和 PCB 寄生。最后，了解可能对带宽性能产生影响的迭代权衡。请记住，其中一些权衡还会影响 ADC 的线性性能。虽然这里有很多内容需要消化，但本文提供了设计千兆赫兹范围内的平衡-非平衡变压器与 ADC 匹配网络的基本步骤，从而可以避免您的下一次匹配工作受限于带宽。

## 5 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[探索和理解射频转换器前端的实际设计与工作原理](#) 研讨会。
- 德州仪器 (TI)，[ADC3668、ADC3669 双通道、16 位、250MSPS 和 500MSPS 模数转换器 \(ADC\) 数据表](#)。

## 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