

高速放大器测试需要足够多的数学知识来正确使用巴伦

作者：David Brandon和Rob Reeder

共享



摘要

在大多数实验室环境中，信号发生器、频谱分析仪等设备是单端仪器，用于测量高速差分放大器驱动器和转换器的失真。因此，测量放大器驱动器的偶数阶失真（例如二次谐波失真HD2，甚至阶偶数阶交调失真或IMD2）需要额外的器件，如巴伦和衰减器等，作为整体测试设置的一部分，以将单端测试仪器连接到放大器驱动器的差分输入和输出。本文通过不匹配信号的数学知识揭示了相位不平衡的重要性，并说明了相位不平衡如何导致偶数阶产物的增加（即变得更糟糕！）。本文还将展示了几种不同高性能巴伦和衰减器的权衡如何影响被测放大器的性能指标（即HD2和IMD2）。

数学背景 = 耶！

测试具有差分输入的高速器件（如模数转换器、放大器、混频器、巴伦等）时，幅度和相位不平衡是需要理解的重要指标。

当模拟信号链设计使用500 MHz及以上的频率时，必须非常小心，因为所有器件（无论有源还是无源）在频率范围内都有某种固有不平衡。500 MHz并不是一个奇妙的频率点，只是基于经验，这是大多数器件开始偏离相位平衡的地方。根据器件不同，此频率可能比这低得多或高得多。

我们来仔细看看下面的简单数学模型：

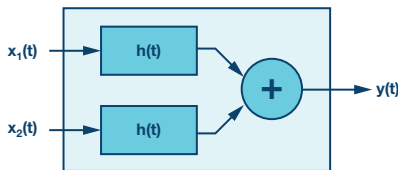


图1. 具有两个信号输入的数学模型

考虑ADC、放大器、巴伦等或任何将信号从单端转换为差分（或反之）的器件的输入 $x(t)$ 。信号对 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 是正弦信号，因此差分输入信号具有如下形式：

$$\begin{aligned} x_1(t) &= k_1 \sin(\omega t) \\ x_2(t) &= k_2 \sin(\omega t - 180^\circ + p) = -k_2 \sin(\omega t + p) \end{aligned} \quad (1)$$

如果不是这样，就因为这些器件的不平衡，ADC的偶数阶失真测试结果在工作频率范围内可能会发生显著变化。

ADC或任何有源器件可以简单地建模为对称三阶传递函数：

$$h(x(t)) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) \quad (2)$$

那么：

$$\begin{aligned} y(t) &= h(x_1(t)) - h(x_2(t)) \\ y(t) &= a_1 [x_1(t) - x_2(t)] + a_2 [x_1^2(t) - x_2^2(t)] + \\ &\quad 3[x_1^3(t) - x_2^3(t)] \end{aligned} \quad (3)$$

理想情况下没有不平衡，上述简单系统的传递函数可以建模如下：

$x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 完全平衡时，这些信号具有相同幅度（ $k_1 = k_2 = k$ ），并且恰好180°相差（ $\phi = 0^\circ$ ）。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (k) \sin(\omega t) \\ x_2(t) &= (-k) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$y(t) = (2a_1 k) \sin(\omega t) + (2a_3 k^3) \sin^3(\omega t) \quad (5)$$

对幂运用三角恒等式并收集频率等信息，我们得到：

$$y(t) = 2 \left(a_1 k + \frac{3a_3 k^3}{4} \right) \sin(\omega t) - \left(\frac{a_3 k^3}{2} \right) \sin(3\omega t) \quad (6)$$

这是差分电路的常见结果：理想信号的偶次谐波抵消，而奇次谐波没有抵消。

现在假设两个输入信号的幅度不平衡，但没有相位不平衡。这种情况下， $k_1 \neq k_2$ ， $\phi = 0$ 。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (k_1) \sin(\omega t) \\ x_2(t) &= (-k_2) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

把公式7代入公式3，并再次运用幂的三角恒等式。

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{a_2}{2} \times (k_1^2 - k_2^2) + (a_1(k_1 + k_2) + \left(\frac{3a_3}{4}\right) \times \\ &\quad (k_1^3 + k_2^3)) \sin(\omega t) - \left(\frac{a_2}{2}\right) \times (k_1^2 - k_2^2) \cos(2\omega t) - \\ &\quad \left(\frac{a_3}{4}\right) \times (k_1^3 + k_2^3) \sin(3\omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

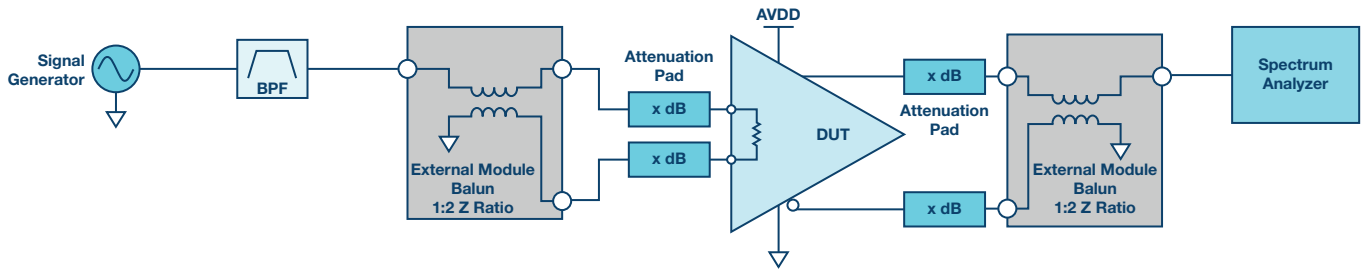


图2. 高速放大器HD2测试设置

我们看到公式8中，二次谐波与幅度 k_1 和 k_2 的平方之差成正比，简单来说即：

$$\text{second harmonic} \propto k_1^2 - k_2^2 \quad (9)$$

现在，假设两个输入信号之间相位不平衡，没有幅度不平衡。那么， $k_1=k_2$ ， $\varphi \neq 0$ 。

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (k_1)\sin(\omega t) \\ x_2(t) &= (-k_1)\sin(\omega t + p) \end{aligned} \quad (10)$$

把公式10代入公式3并简化——试试看，您能行的！

$$\begin{aligned} y(t) &= \left(a_1 k_1 + \frac{3a_3 k_1^3}{4}\right) \times (\sin \omega t + \sin \omega t \times \\ &\quad \cos p + \cos \omega t \times \sin p) - \left(\frac{a_2 k_1^2}{2}\right) \times \\ &\quad (\cos 2\omega t - \cos 2\omega t \times \cos 2p + \sin 2\omega t \times \sin 2p) \\ &\quad \left(\frac{a_3 k_1^3}{4}\right) \times (\sin 3\omega t + \sin 3\omega t \times \cos 3p + \\ &\quad \cos 3\omega t \times \sin 3p) \end{aligned} \quad (11)$$

从公式11可知，二次谐波幅值与幅度 k 的平方成正比。

$$\text{second harmonic} \propto k_1^2 \quad (12)$$

如果回过头比较公式9和公式12，并且假设三角恒等式运用正确，那么可以得出如下结论：二次谐波受相位不平衡影响比受幅度不平衡影响更严重。原因如下：对于相位不平衡，二次谐波与 k_1 的平方成正比；再看公式12，对于幅度不平衡，二次谐波与 k_1 和 k_2 的平方差成正比，或看公式9。由于 k_1 和 k_2 大致相等，因此这种差异通常很小，特别是如果将其与平方数进行比较！

测试高速放大器

既然我们清除了障碍，接下来看一个使用案例，如图2所示。这是一幅框图，显示了差分放大器实验中常用的HD2失真测试设置。

乍一看相当简单，但魔鬼隐藏在细节中。图3显示了一组HD2测试结果，其系使用本框图中的所有器件、差分放大器、巴伦、衰减器等得到的。这些测试证明：仅仅用不同方式翻转巴伦方向所导致的细微相位不匹配，便能在HD2扫频中产生不同结果。此设置中有两个巴伦，因此通过颠倒设置一侧或两侧的连接可以创建四种可能的场景。结果如图3所示。

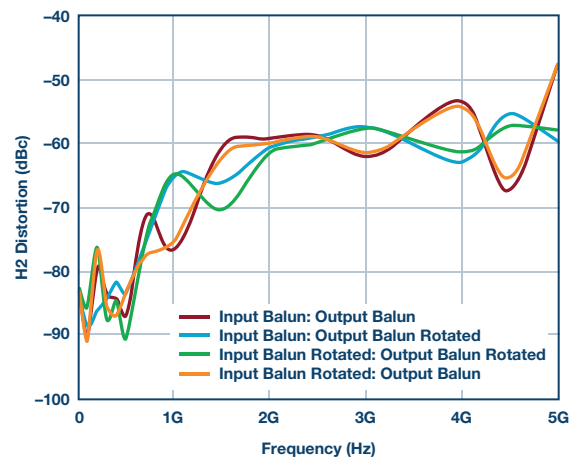


图3. 使用供应商1A巴伦和不同巴伦方向测试HD2性能

图3揭示的HD2失真曲线方差量证明，需要进一步考察巴伦的性能，特别是相位和幅度不平衡。以下两幅图显示了不同制造商的几款巴伦的相位和幅度不平衡。使用网络分析仪来测量不平衡。

图4和图5中的红色曲线对应于图3中用于采集HD2失真数据的实际巴伦。供应商1A的这款巴伦具有最高带宽和良好的通带平坦度，但在同样的10 GHz频率测试带上，相位不平衡比其他巴伦要差。

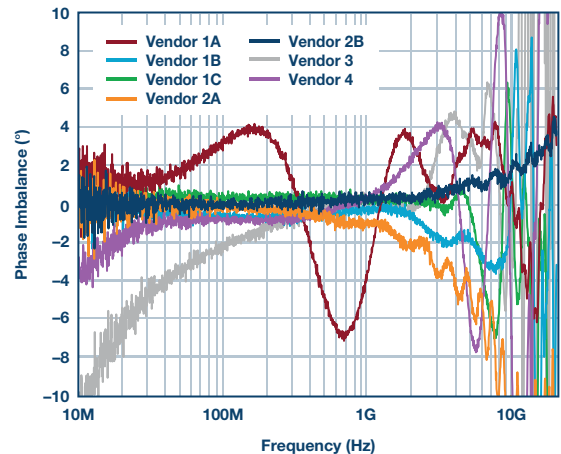


图4. 各种巴伦的相位不平衡

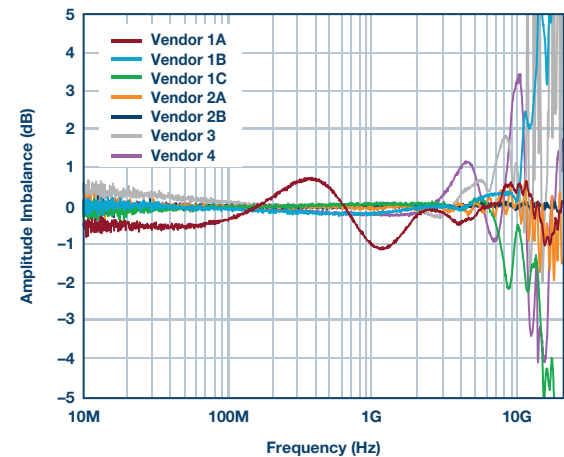


图5. 各种巴伦的幅度不平衡

接下来的两幅图代表使用最佳巴伦对HD2失真重新测试的结果，这些巴伦分别来自供应商1B和供应商2B，具有最低的相位不平衡，如图6和图7所示。注意，如果有更好的不平衡性能，则HD2失真方差会相应降低，如图7所示。

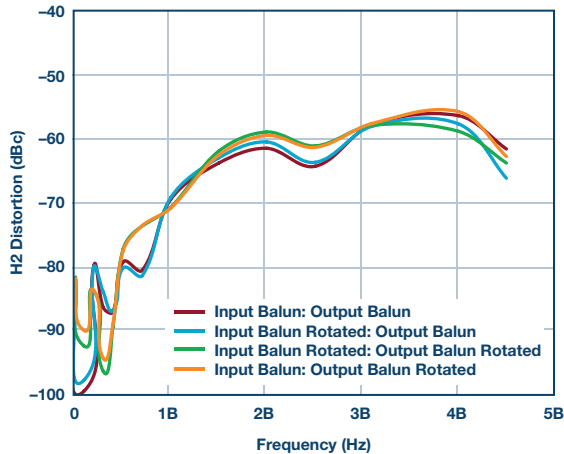


图6. 使用供应商1B巴伦和不同巴伦方向重新测试HD2性能

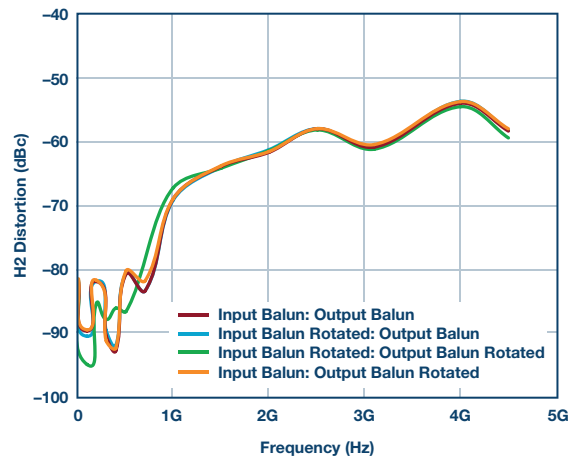


图7. 使用供应商2B巴伦和不同巴伦方向重新测试HD2性能

为了进一步说明相位不平衡如何直接影响偶数阶失真性能，图8显示了与前一HD2图相同条件下的HD3失真。请注意，所有四条曲线大致相同，符合预期。因此，如前面的数学推导示例所证明的，HD3失真对信号链中的不平衡不太敏感。

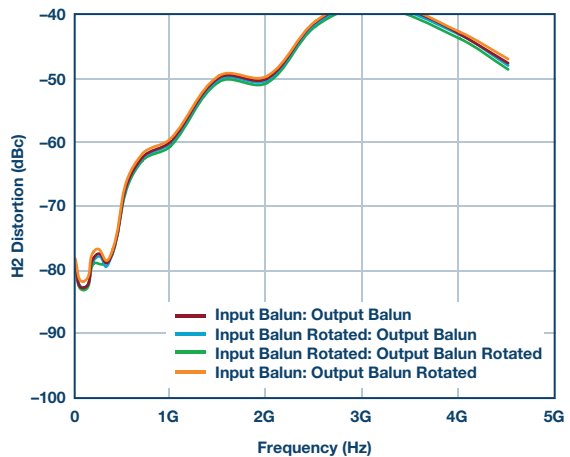


图8. 使用供应商2B巴伦和不同巴伦方向测试HD3性能

到目前为止，应假定输入和输出连接的衰减器焊盘（如图2所示）是固定一致的，且在巴伦方向测量期间无变化。下图图7所示的相同曲线，仅测试供应商2B的巴伦性能，输入和输出之间交换衰减器。这就产生另一组（四条）曲线，如图9中的虚线所示。结果是我们回到了开始的地方，因为这在测试测量中表现出更多的变化。这进一步强调了差分信号对任一侧的少量不匹配在高频率下影响很大。务必详细记录测试条件。

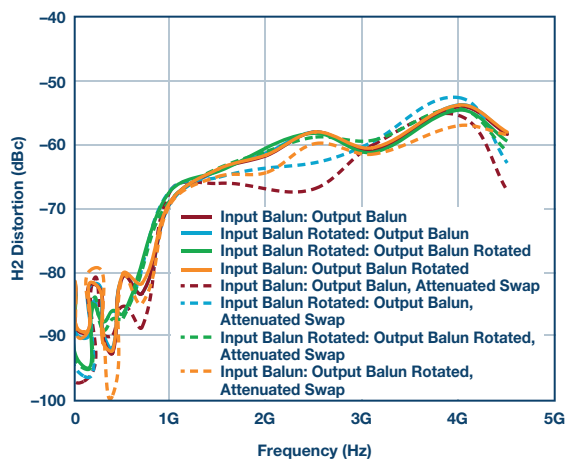


图9. 仅使用供应商2B巴伦以及不同巴伦方向和衰减焊盘交换测试HD2性能

全部抵消

总之，在GHz区域开发全差分信号链时，所有东西都很重要，包括衰减器焊盘、巴伦、电缆、印刷电路板上的走线等。我们已经在数学上和实验室中使用高速差分放大器作为测试平台证明了这一点。因此，在开始责备器件或供应商之前，请在PCB布局和实验室测试期间特别小心。

David Brandon [david.brandon@analog.com]是ADI公司高速放大器部门（位于北卡罗来纳州格林斯博罗）的产品工程师。David从1982年开始便在ADI公司工作，迄今已35年。他在DDS部门担任应用工程师愈20年，发表了多篇应用笔记和杂志文章。David经常与Rob Reeder和其他人合作评估新的行业器件声明和交流测试设备功能。David业余时间喜欢打高尔夫球，并与家人共度美好时光。David于1982年获得美国北卡罗来纳州格林斯博罗的吉尔福德科技社区学院电气工程学位。



David Brandon

Rob Reeder [rob.reeder@analog.com]是ADI公司高速转换器和射频应用集团（位于美国北卡罗来纳州格林斯博罗）的资深系统应用工程师。他发表了大量有关各种应用的转换器接口、转换器测试和模拟信号链设计的文章。Rob曾在航空航天和防务部担任应用工程师5年之久，专注于雷达、EW和仪器仪表等各种应用领域。此前，他还曾在高速转换器产品线工作9年时间。在此之前，Rob还从事过测试开发和模拟设计工作（效力于ADI多芯片产品集团），拥有5年的太空、防务和高度可靠的应用模拟信号链模块设计经验。Rob于1996年和1998年分别获得北伊利诺斯州大学（伊利诺斯迪卡尔布市）的电子工程学士（BSEE）学位和电子工程硕士（MSEE）学位。Rob晚上不写文章或不在实验室研究电路时，他喜欢在健身房活动，听电子音乐，用旧木板制作家具，最重要的是和他的家人一起放松自己。



Rob Reeder

该作者的其它文章：

[利用采样保持放大器和RF ADC从根本上扩展带宽以突破X波段频率](#)

第51卷，第4期

最后，您可能会问自己，多大相位不平衡是可以容忍的？例如，一个巴伦在x GHz时相位不平衡为x度，它对具体器件或系统有何影响？线性度性能是否会有一定程度的损失或多少dB恶化？

这是一个很难回答的问题。在理想世界里，如果信号链中的每件东西都完美匹配，那么就不会有偶数阶失真需要担心。其次，如果有一个经验法则或公式来告诉我们每x°的相位不平衡会带来x dB的线性度损失（HD2性能降低），岂不美哉。但是，这不可能。为什么？因为每个器件，无论有源、无源还是差分式，都会有某种固有的相位不匹配。根本没有办法在内部使IC设计实现完美的平衡，或者切割出长度绝对一致的电缆。因此，不论这些不匹配有多小，随着系统使用的频率越来越高，它们都会变得更加突出。

总之，当使用全差分输入和输出时，我们会尽我们所能做好我们的工作，让IC布局不匹配保持最小。当您在实验室测试我们的产品时，希望您也这样做。