

*Application Note***高速模数转换器通带平坦度解析：第 1 部分**

Rob Reeder, Camilo A. Garcia Trujillo

摘要

随着模拟输入或输出带宽需求日益增长，了解转换器带宽（亦称为通带平坦度测量）至关重要。通带平坦度测量有时会令人困惑或误导。无论用户是以 **MSPS** 还是 **GSPS** 频率进行采样，揭示转换器所需带宽、连接转换器的模拟输入/输出网络所需带宽（或两者兼具）时，均遵循相同原理。

本文件由两部分组成，其中探讨了适用于模数转换器 (ADC) 与数模转换器 (DAC) 的基础频率响应测量方法，涵盖是否内置数字下变频器 (DDC) 或数字上变频器 (DUC) 功能的情况。该方法可帮助用户测量并表征接收机设计中转换器的模拟带宽特性。

内容

1 简介	2
2 基础频率响应测量方法：ADC	3
3 基础频率响应测量方法：DDC 已启用的 ADC	5
4 总结	6
5 参考资料	6
6 修订历史记录	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

目前，测量通带平坦度主要有三种方法：

- 基本频率响应测量方法通常用于同时采集输入/输出网络与转换器带宽响应。
- 矢量网络分析器 (VNA) 方法通过 VNA 仅采集转换器响应的带宽，实现对转换器本身的精确测量。该方法可有效消除模拟输入/输出网络连接影响 [1-3]。
- 输入脉冲法：通过高频脉冲发生器输入高频方波信号。在该方法中，用户会有效输入一个纯脉冲响应，并将采集到的模数转换器 (ADC) 输出响应与理想方波进行互相关分析。结合数学运算，用户可以有效地提取转换器的带宽。

本系列仅以德州仪器的器件作为示例测试用例，重点介绍基本频率响应测量方法，系因这种方法适用于 ADC 和 DAC。第一部分重点介绍 ADC，第二部分则探讨 DAC。本文档提供了如何设置和测试带宽的指导，涵盖 ADC 和 DAC 在实际模式和旁路模式下的测试（针对 ADC），以及在启用复杂数字功能（如 DDC 和 DUC）的情况下对 AFE 进行测试。

2 基础频率响应测量方法 : ADC

基础频率响应测量方法使用数据采集程序 (例如 TI 的 HSDCPro) 仅在相关带宽内收集快速傅里叶变换 (FFT) 基波电平。例如, 如果模拟前端如 图 2-1 所示使用宽带平衡-非平衡转换器, 则在平衡—非平衡转换器的次级输出和 ADC 的模拟输入之间有一个简单的电阻输入网络。此类输入网络在宽带输入网络中很常见 [4]。

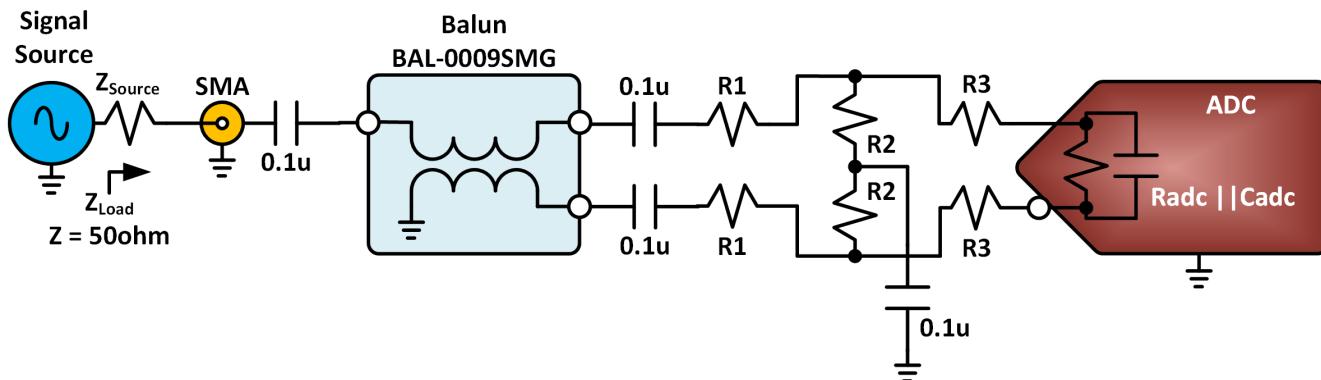


图 2-1. 连接到 ADC 的输入网络示例

设置转换器评估模块 (EVM) 或进行电路板设计以进行测量; 图 2-2 图示为基本设置。根据硬件和软件用户指南, 正常配置 EVM, 以验证数据采集的有效性。时钟信号输入端与模拟输入信号均需采用低相位噪声信号发生器, 配合具备充足电流额定值的低噪声电源, 并加装有效滤波器抑制信号发生器产生的噪声与谐波。

在此次测量中, 请勿对模拟输入进行滤波处理; 此举可使信号发生器在不经滤波衰减的情况下扫过多个目标频率, 从而采集通带平坦度或带宽测量数据。FFT 数据采集软件 (HSDCPro, Matlab, Python) 支持在每个设定频率步长处采集相应数据。

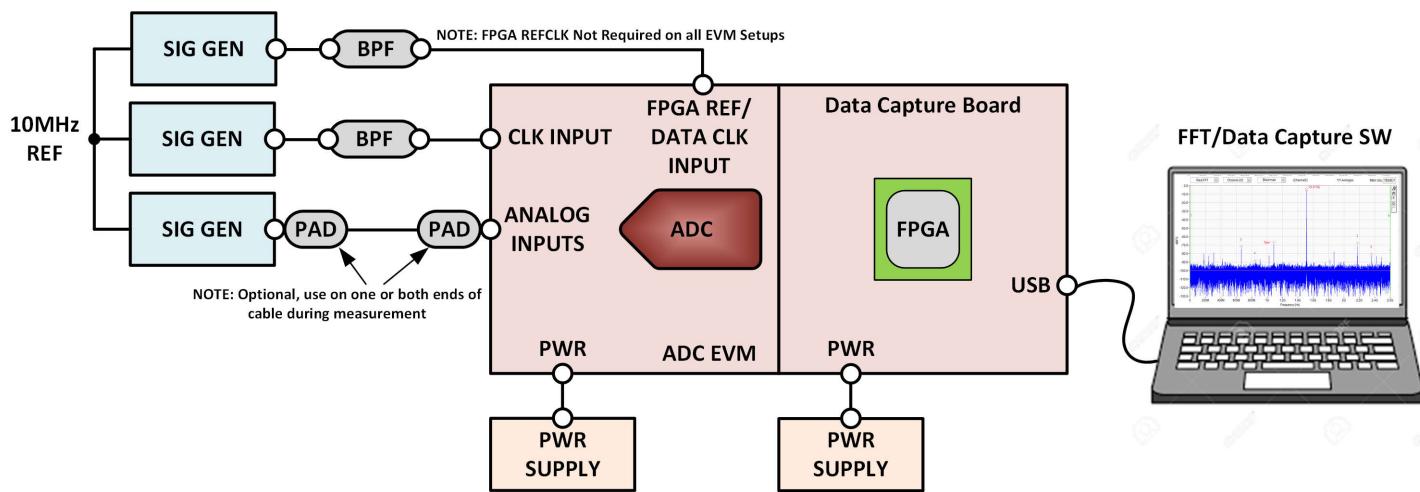


图 2-2. 设置 ADC 的基频响应测量方法

下一步是确定通带平坦度扫描测量的起始频率和终止频率以及设置初始模拟输入驱动电平的基准点频率。若用户手动采集基准点频率, 需在每个奈奎斯特区采集至少五至十个数据点, 以清晰呈现带宽轮廓。

若用户关注窄频段或部分频段, 或 ADC 输入网络设有通带抗混叠滤波器, 则应采用相关频段中心频率作为基准点频率。

若用户需进行更宽带的测量或扫描, 将带宽的三分之一作为设定点频率可避免频率过低或过高导致测量上下频段出现滚降现象。ADC 的数据表规定带宽约为 8GHz。由于 8GHz 的三分之一大约为 2.67GHz, 故该值即为设定点频率。请参阅 图 2-3。

将信号发生器连接至模拟输入端，设置或调整该频率下的设定点电平。此值即 **FFT** 采集中基波信号的振幅，亦为输入驱动电平规格。将设定点电平调低至略低于 **-3dBFS** 或 **-6dBFS**，可确保留有足够的余量，因相关信号带宽可在测量起止频率设定点范围内上下波动。

注意信号发生器上使用的分贝毫瓦级电平。请注意，信号发生器输出设置的振幅值仅记录本机的输出；由于电缆损耗或射频布线和与此项连接保持一致的连接器的影响，信号在进入 **EVM** 的 **SMA** 接口或用户自有电路板时的振幅电平可能存在偏差。需采取额外措施校正测量中的线缆及其他损耗，以便准确掌握信号进入 **EVM** 输入网络前端时的实际电平。

设定点频率与输入驱动电平调整完成后保持不变，无需再调整信号发生器电平。该值不仅提供设定点频率下的信号幅度校准点，更覆盖整个频率扫描范围。仅将信号发生器上的频率设置移动到扫描的起始频率点并进行 **FFT** 采集。在用户扫描频率时，在 **FFT** 采集中记录起始频率及之后每个点的基波振幅。继续执行此操作，直到扫描达到终止频率。

完成扫描后，将数据整理为两列：一列记录每个频率步进点，另一列记录使用首选数据捕获软件捕获的 **FFT** 中的基波振幅水平。

从测量结果中提取正负电平值，据此确定扫频测量或最终通带平坦度曲线中的实际信号振幅，如 **图 2-3** 中所示。在本例中，由于设定点频率设置为 **-3dBFS**，因此 **-6dBFS** 点会产生 **-3dB** 带宽。请查看 **图 2-3** 中的示例，了解如何在生成的测量扫描结果中正确记录这些参数。

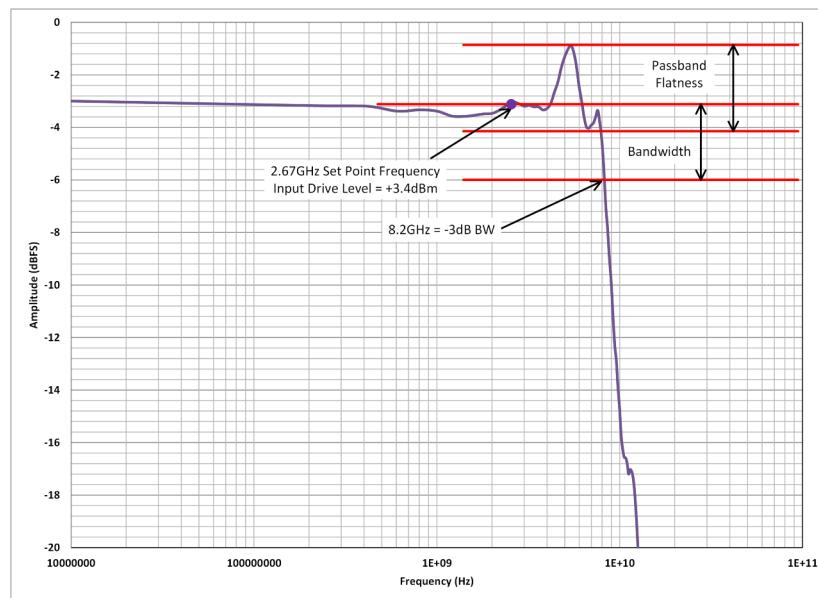


图 2-3. ADC 输入通带平坦度响应：旁路模式

3 基础频率响应测量方法 : DDC 已启用的 ADC

ADC 示例使用实际采样，有时称为旁路模式；这不使用内部 DDC 将目标信号下变频至基带。对于在接收器链中使用复杂混频器的器件（例如 AFE），进行适当的通带平坦度扫描还需额外几个步骤。调整数控振荡器 (NCO) 频率，确保用户在输入信号扫频过程中能准确捕获输入信号。

此类测量的两种主要方法。第一种方法是将 NCO 设置为一个频率，然后在 DDC 抽取滤波器通带覆盖的频率范围内扫描输入，通常约为 80%。

我们建议仅在满足以下两个条件时使用此方法：

- DDC 后处理带宽能完全覆盖信号带宽。由于 DDC 抽取滤波器的影响，通带之外的任何输入都会衰减，从而使测量的精度失效。
- 当接收器链在您的应用中正常运行时，请将 NCO 保持在记录测量值的频率。这是必要条件，因为要获得最精确的测量结果，必须将 NCO 固定在单一频率，这样才能同时捕捉到诸如 DDC 抽取滤波器通带纹波等效应。若在完成通带平坦度测量后移动 NCO，通带将发生偏移，从而引入误差。这种情况主要适用于内置 DDC 的旧版转换器，当前 DDC 技术已足够先进，可获取带内峰峰值纹波 $<0.2\text{dB}$ 的器件。

若两种情况同时成立，测量流程的唯一调整是将 NCO 频率设定为使 DDC 通带覆盖整个带宽。

若其中一种或两种情况不成立，则采用第二种方法：在用户测量的带宽范围内扫描输入信号的同时改变 NCO 频率。例如，用户需测量 2GHz 中心频率的 1GHz 带宽（含 101 个测量点），可通过将输入信号以 10MHz 步长从 1.5GHz 扫频至 2.5GHz 实现，同时保持 NCO 与输入信号保持固定距离（如 10MHz）。该方法无法捕捉 DDC 滤波器的带内纹波等效应，因为输入音调会带动 NCO 同步移动。因此，此方法假设 DDC 滤波器的带内纹波相对于其他外部因素的变异性而言足够微小，可忽略不计。

确保相应地进行频率规划，避免将 NCO 频率置于接近任何奈奎斯特边界的位置，否则会导致不必要的杂散和图像出现在频谱上。

若采用第二种方法，测量流程中唯一需要调整的是：在整个测量过程中（包括扫描输入信号时），始终保持 NCO 频率与输入信号频率存在固定偏移量。常见做法是将 NCO 频率与输入信号保持 10MHz 的偏移。

4 总结

该系列由两部分组成，其中第一部分介绍了如何使用基本频率响应测量方法来测量 ADC 的带宽响应。在考虑将数据转换器集成到系统设计时，其模拟输入或输出的带宽是一个重要要求，尤其当转换器进入吉赫兹范围及更高频率时。本系列的第二部分专门讨论 DAC，其中包括避免驻波干扰测量等影响的技巧。

5 参考资料

德州仪器 (TI) , [那么 S 参数到底是什么？](#) , 技术文章。

德州仪器 (TI) , [那么什么是 VNA？](#) 技术文章。

德州仪器 (TI) , [那么什么是处理频率响应](#) , 技术文章。

电子产品 , 全面揭开射频转换器模拟输入的奥秘

6 修订历史记录

Changes from Revision * (November 2025) to Revision A (November 2025)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	2
• 将所有器件型号从 ADC12DJ5200RF 更改为 ADC、将 AFE8000 更改为 AFE.....	2

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出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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月