参考文献

Application Note

高速数模转换器通带平坦度解析，第 2 部分

Rob Reeder, Camilo A. Garcia Trujillo

摘要

本系列由两部分组成，介绍测量数据转换器模拟输入或输出带宽的方法。第一部分介绍了基本频率响应测量方法以及如何使用此方法测量模数转换器 (ADC) 的模拟输入带宽。在第二部分中，本文档将讨论数模转换器 (DAC) 模拟输出，并提供一些避免驻波等影响干扰测量的技巧。

内容

1 简介.....2
2 基础频率响应测量方法：**DAC**.....3
3 基础频率响应测量方法：启用 **DUC** 的 **DAC**.....4
4 通带平坦度测量注意事项.....6
5 摘要.....7
6 参考资料.....7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA202
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 仅采集转换器的带宽响应，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。本文件为 ADC 和 DAC 在 ADC 的实测模式与旁路模式下的带宽设置与测试进行说明，同时针对启用 DDC 和 DUC 等复杂数字功能的 AFE 进行说明。

English Document: SDAA202
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2 基础频率响应测量方法：DAC

尽管测量 DAC 平坦度频率响应的过程与第一部分中针对 ADC 介绍的过程类似，但仍有一些差异。第一步是使用首选 DAC 配置设置 DAC 评估板以进行测试。测量的设置必须如图 2-1 所示。

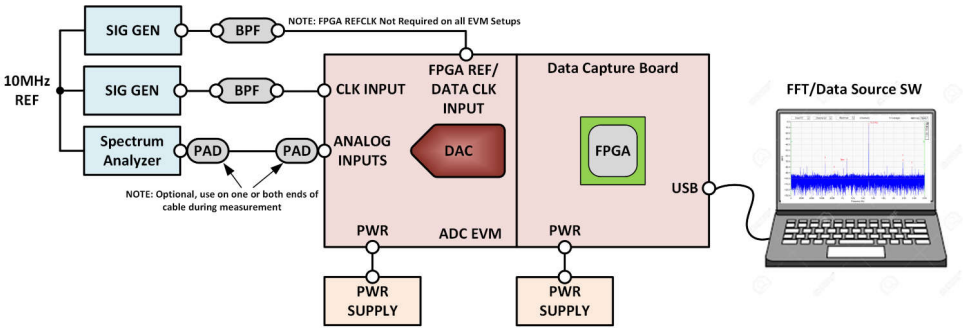

图 2-1. 设置 DAC 的基频响应测量方法

一些 DAC 可具有不同的输出模式或滤波器来抑制杂散或使频率响应变得平坦。验证 DAC 当前的运行模式以及使用该模式时是否存在任何限制。例如，有些 DAC 采用逆 sinc() 滤波器，该滤波器以 DAC 的更新速率运行；这使得逆 sinc() 滤波器可以用于平坦采样保持输出的频率响应。其他 DAC 针对不同的奈奎斯特区域具有不同的滤波器；因此，如果未确保工作模式支持扫描，或者您可以相应地更改工作模式，TI 不建议在使用内部滤波器时对 DAC 的不同奈奎斯特区域进行扫描。

连接设置后，验证 DAC 的输出音调并适当调整频谱分析仪的设置。通常在测量频率通带平坦度时，连续波音调可确保 DAC 的所有功率都位于单个频率频段中。考虑到这一点，应尝试使频谱分析仪的范围非常窄并降低分辨率带宽，直到基波振幅稳定。

验证设置后，为扫描测量选择起始频率和终止频率，然后使用频谱分析仪的标记检查 DAC 在您计划扫描的频带上的几个点的输出。这有利于设置频谱分析仪的振幅基准。虽然这是一个额外的步骤，但可确保用户不会过驱频谱分析仪并收集不良的测量结果。

接下来，为 DAC 提供一个设置为起始频率的输入音调，并通过更改 DAC 的输入频率在目标频带内开始扫描，同时记录频谱分析仪在每个频率下所示的振幅输出。请注意收集的数据分为两列：第 A 列等于每个频率阶跃点，而第 B 列等于频谱分析仪中所示的基波振幅水平。

考虑到频谱分析仪的行为和电缆的损耗，我们建议使用恒定射频 (RF) 源在整个频率范围内扫描电缆和频谱分析仪。例如，用户可以断开电缆与系统板或评估模块上 DAC 的模拟输出的连接，然后将此电缆和测量设置中的任何射频适配器连接到信号发生器的输出。将信号发生器设置成恒定振幅；最好接近 DAC 输出的振幅。然后，在不改变信号发生器振幅的情况下，在相同预期的测量频率范围内连接到频谱分析仪输入时扫描信号发生器的输出，仅记录信号发生器中频谱分析仪所示的基波。这捕获了电缆及频谱分析仪在该频率范围内的损耗。从 DAC 测量中减去此损耗可获得更准确的结果。

此设置使用 PC 来控制带有 FPGA 或现场可编程门阵列的数据源板，以提供和控制进入评估板中 DAC 数字输入的数据。所有必要的电源和时钟输入均连接到 DAC 的评估板及数据源板。通过连接设备的基准频率输出和输入来锁定所有时钟输入及频谱分析仪基准非常重要。最后，DAC 模拟输出连接到频谱分析仪，以便测量频域中的输出。TI 建议进行相应的频率规划，以防止任何杂散或谐波干扰测量。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3 基础频率响应测量方法：启用 DUC 的 DAC

此处讨论的步骤适用于使用实数采样的 DAC，这意味着一种不使用数字上变频器 (DUC) 将所选信号从基带上频转换为所选频率的 DAC。如果器件在发送器链中使用复杂混频器，例如 Texas Instruments (TI) 的 AFE，则必须在进行通带平坦度扫描的过程中添加一个步骤。此步骤是调整数控振荡器 (NCO) 频率，使 DAC 的输出频率处于合适的频率，以在相关频带内扫描输出。按照本系列上一部分中的说明，处理 DAC DUC 的 NCO，以便在使用 NCO 时捕获 ADC 的带宽。作为示例，请参见图 3-1 和图 3-2，其中说明了发射器通道的输出网络示例以及从具有 3GHz 带宽匹配网络的 AFE TX 通道获取的数据。

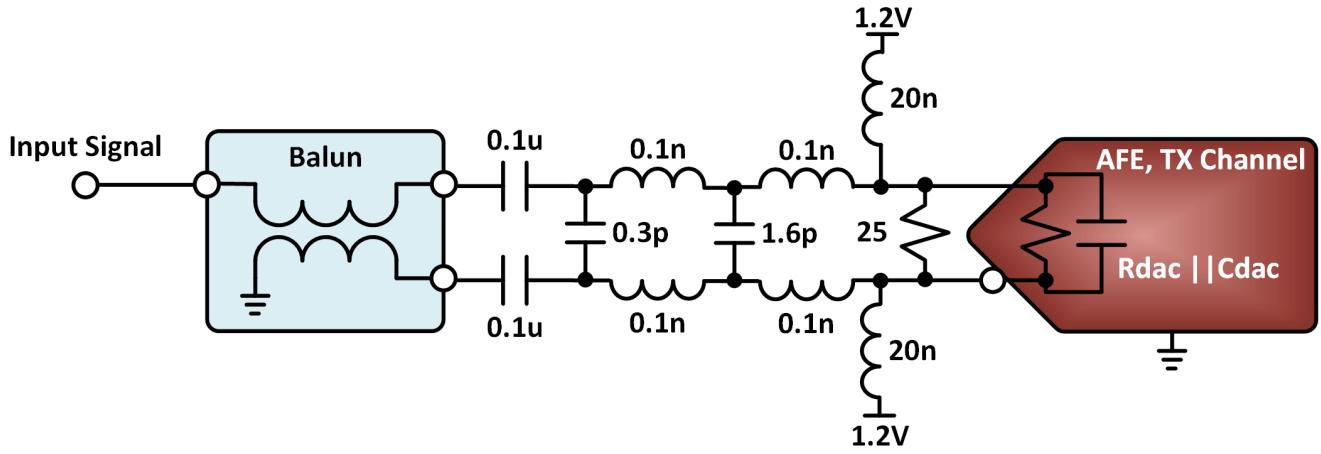

图 3-1. 连接到 DAC 的输出网络示例

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

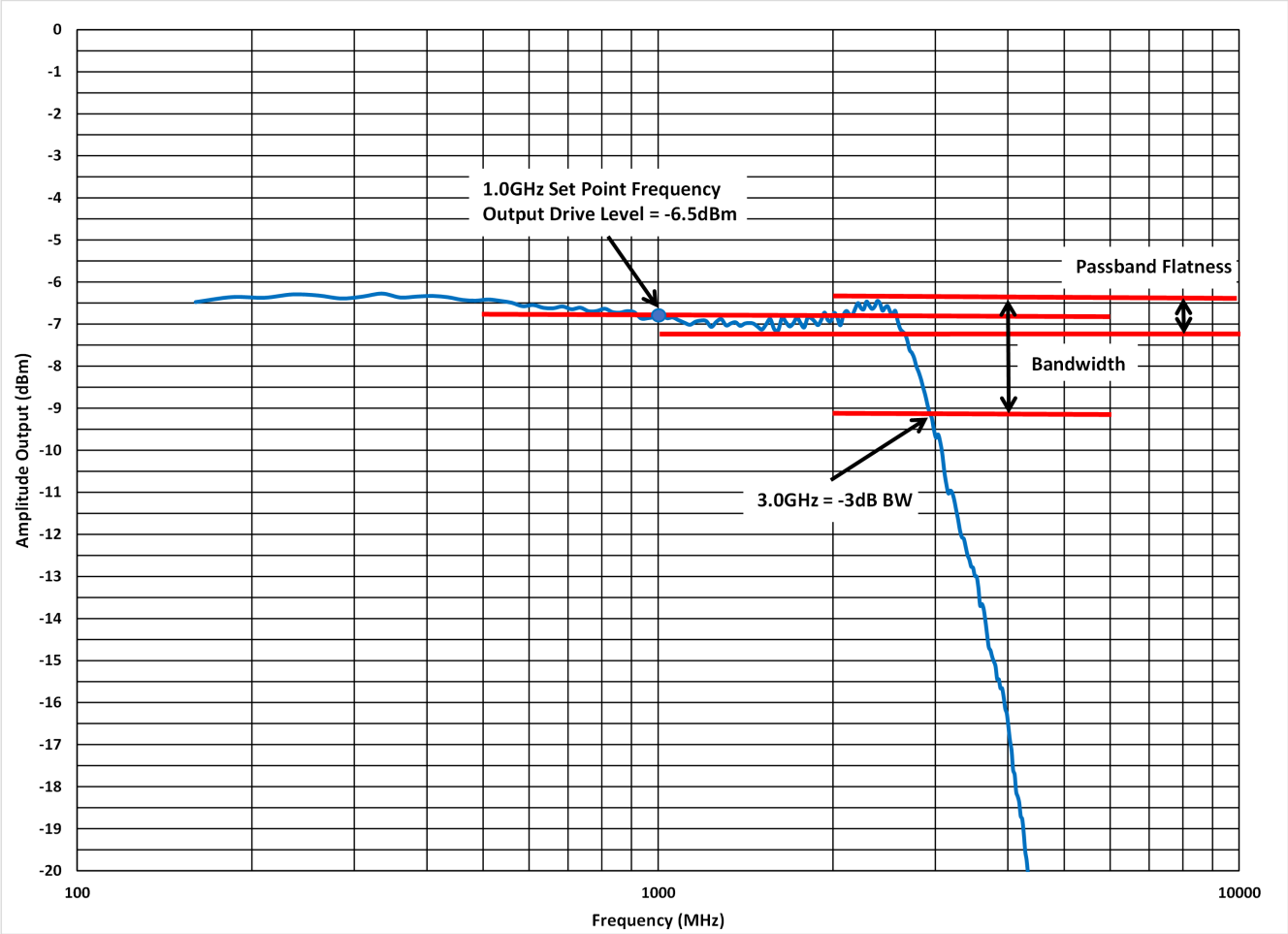

图 3-2. AFE DAC 输出通带平坦度响应：启用 DUC

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4 通带平坦度测量注意事项

最后，TI 建议在任一种情况下（ADC 或 DAC），在执行此测量时，用户应使用一些连接到输入/输出电缆的直列式衰减焊盘的一端或两端。TI 建议用 3dB 至 6dB 衰减器焊盘。按照本文中的步骤，从测量中校准这一额外损失。输入/输出电缆上从信号发生器或频谱分析仪连接到转换器模拟输入/输出的损耗焊盘主要是为了处理阻抗不匹配引起的任何驻波。

请注意，信号发生器或频谱分析仪需要良好的硬 50Ω 阻抗匹配，以便最大程度地将功率传输到负载 ADC（或从 DAC 接收功率）。转换器的输入/输出阻抗在整个频率范围内永远不会是稳定的 50Ω，尤其是在数千兆赫兹范围内以及带宽开始滚降时。驻波会在测量中累积和显示，如果未通过在连接路径上增加额外损耗来处理，则会导致测得的频段上出现额外的纹波。例如，参阅图 4-1。两个测量值的收集方式完全相同，只是其中一个测量值在电缆的一端有衰减垫，而另一个测量值与图 4-1 中的图例所示不同。

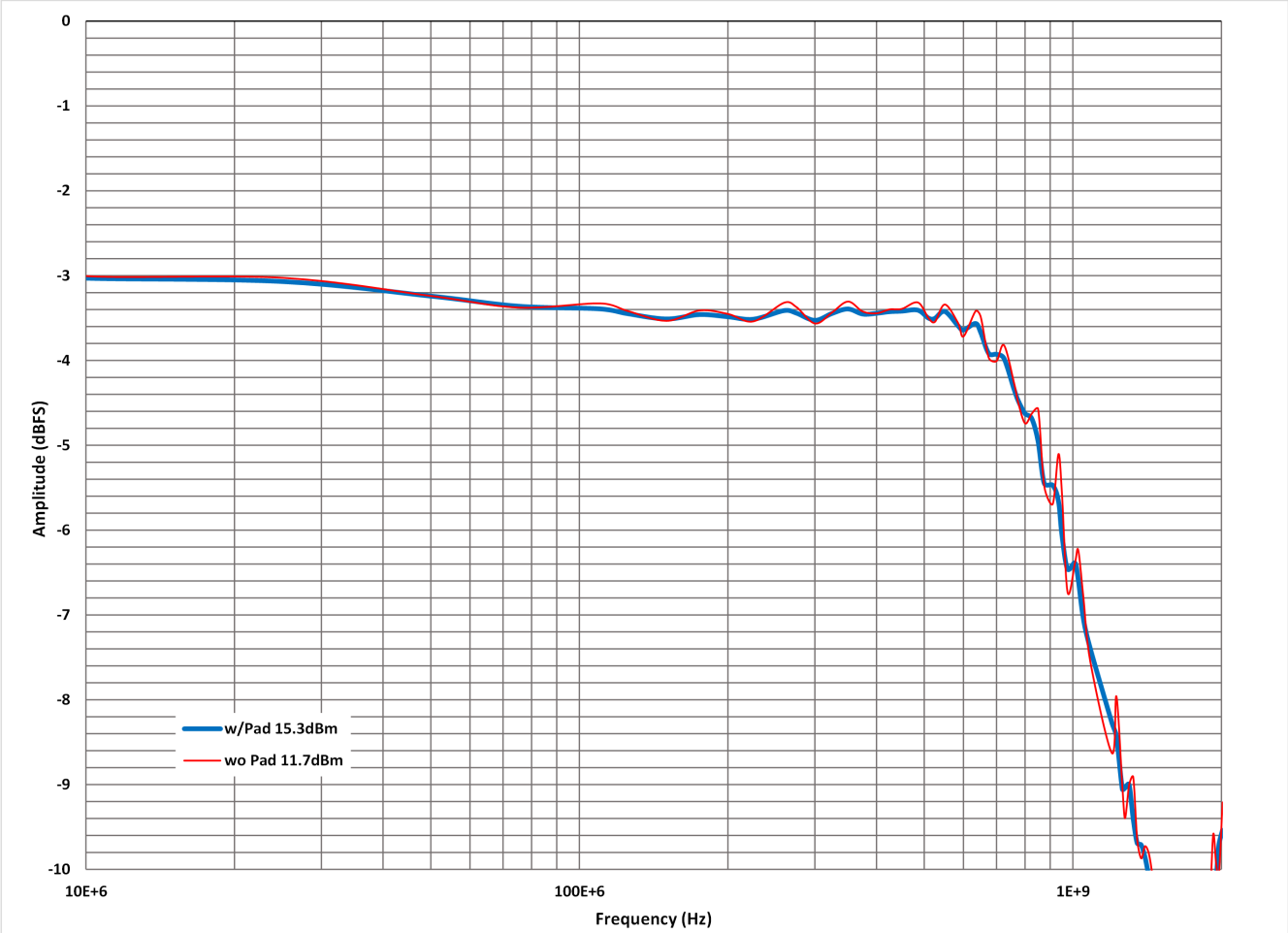

图 4-1. 电缆上有和没有 4dB 衰减时的 ADC 输出响应

English Document: SDAA202
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5 摘要

在评估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。使用基频响应测量方法是正确测量及收集数据转换器和用于获取所有通带平坦度指标的前端网络的带宽响应的有效方法。

捕获 ADC 或 DAC 的带宽时，请记住回算出设置中的任何额外连接损耗，在使用 DDC 和 DUC 等数字功能时适当地放置 NCO，并针对 DAC 输出响应中使用的任何输出模式或滤波器进行调整。最后，在设备电缆上添加损耗电极垫，以尽量减少驻波。遵守这些建议有助于在下个设计中产生更佳的带宽结果并减少纹波。

6 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。
- Reeder, Rob.2020.*揭示射频转换器模拟输入的满量程推断方法*。Electronic Products，2020 年 4 月 13 日。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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