

Application Note

高速数据转换器测试中的相干采样



Rob Reeder

摘要

糟糕的快速傅里叶变换 (FFT) 数据捕获可能会导致您形成对高速或射频模数转换器 (ADC) 真实性能的错误认知。有些工程师喜欢进行相干采样与采集数据（这意味着，模拟输入频率和时钟频率会与基准频率保持一致），而其他工程师则不一定需要这样做。但是，无论采用哪种设置，可能都需要刷新一些详细信息，以确保能够在进行下次设计审查时提供正确数据。

内容

1 简介.....	2
2 相干采样.....	2
3 相干计算.....	4
4 非相干采样.....	7
5 为什么需要窗口函数.....	9
6 常见的 FFT 错误.....	11
7 总结.....	13
8 参考资料.....	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

尽管网上似乎有很多关于相干采样和非相干采样方法的资料，但关于为什么可以选择一种采样方法而不是另一种方法的指导资料却很少。多数可用信息未能提供进行测量所需要的具体步骤。需要记住很多细节。

本文将讨论在 ADC 测试设置方面相干采样与非相干采样的具体区别。

2 相干采样

相干采样通常是指将一个信号发生器上采样时钟使用的 10MHz 基准输出，连接到另一个信号发生器上，用作模拟输入信号的 10MHz 基准输入。仅仅将两个信号发生器连接在一起并不意味着信号发生器会自动进行相位锁定，因此要真正实现基准锁定，还需要在信号发生器菜单选择中选择、启用或启动带 10MHz 基准输入的 10MHz 基准输入的信号发生器。

信号发生器通常会显示 EXTREF 等信息，这表示两台信号发生器已实现基准锁定。请参阅图 2-1。

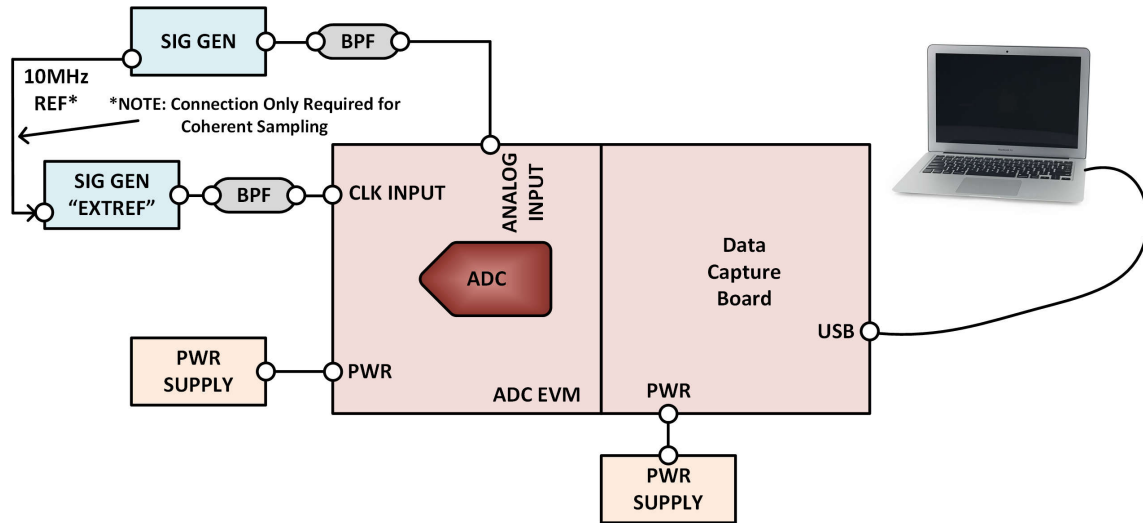


图 2-1. FFT 数据采集的典型测试测量设置

接下来，在 FFT 采集中选择“无窗口”或“矩形窗口”，输入 ADC 采样率，并且在数据采集程序或图形用户界面 (GUI) 中设置 FFT 点数。确保数据采集板硬件能够处理所设 FFT 点数。然后，确定并且计算确切的模拟输入频率，在信号发生器中输入该频率；也可以在数据采集软件中输入该频率。图 2-2 展示了一个利用德州仪器(TI) ADC12DJ5200RF 进行有效相干采样的 FFT 数据采集的示例。

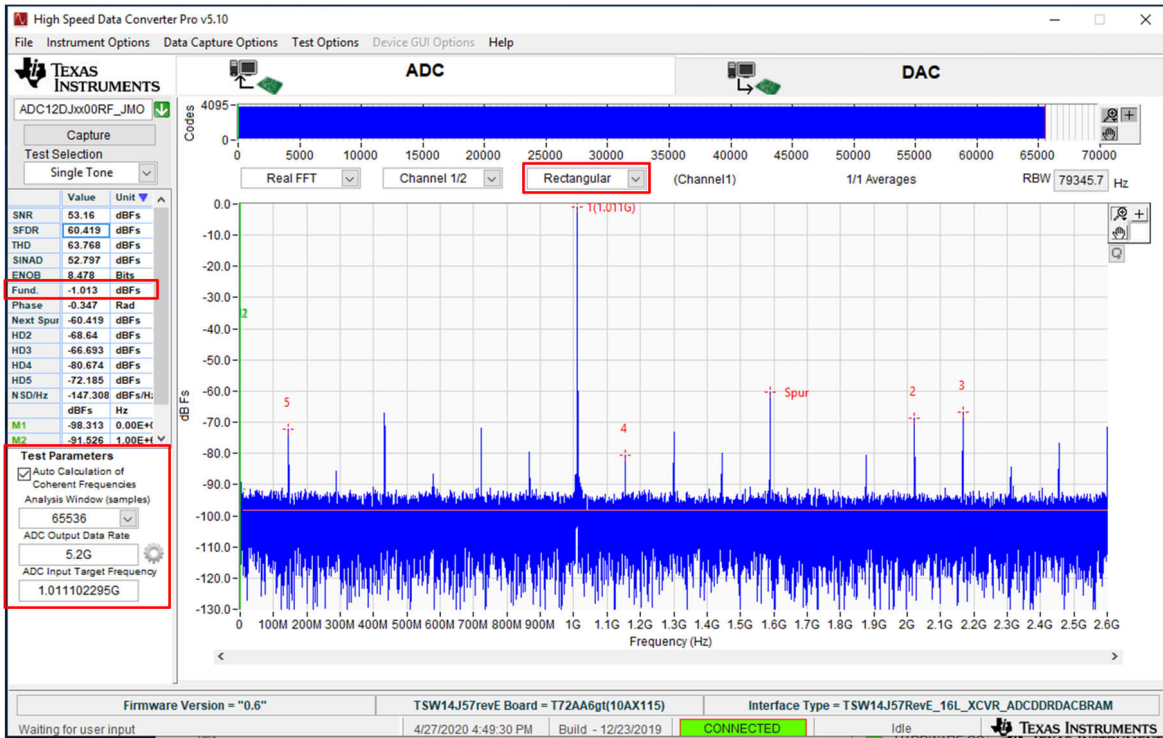


图 2-2. 使用相干采样的 ADC12DJ5200RF FFT 图示例

相干采样能够确保所有 FFT 点位于频段中心，即：基波与谐波能量仅驻留在 FFT 的一个频段或点上，并且可以精确地放置在该位置，以便进行信噪比 (SNR) 与无杂散动态范围 (SFDR) 等测量计算。图 2-3 是基波频段附近的 FFT 放大图。注：基波水平为 -1dBFS，与 FFT 图所示水平相同。

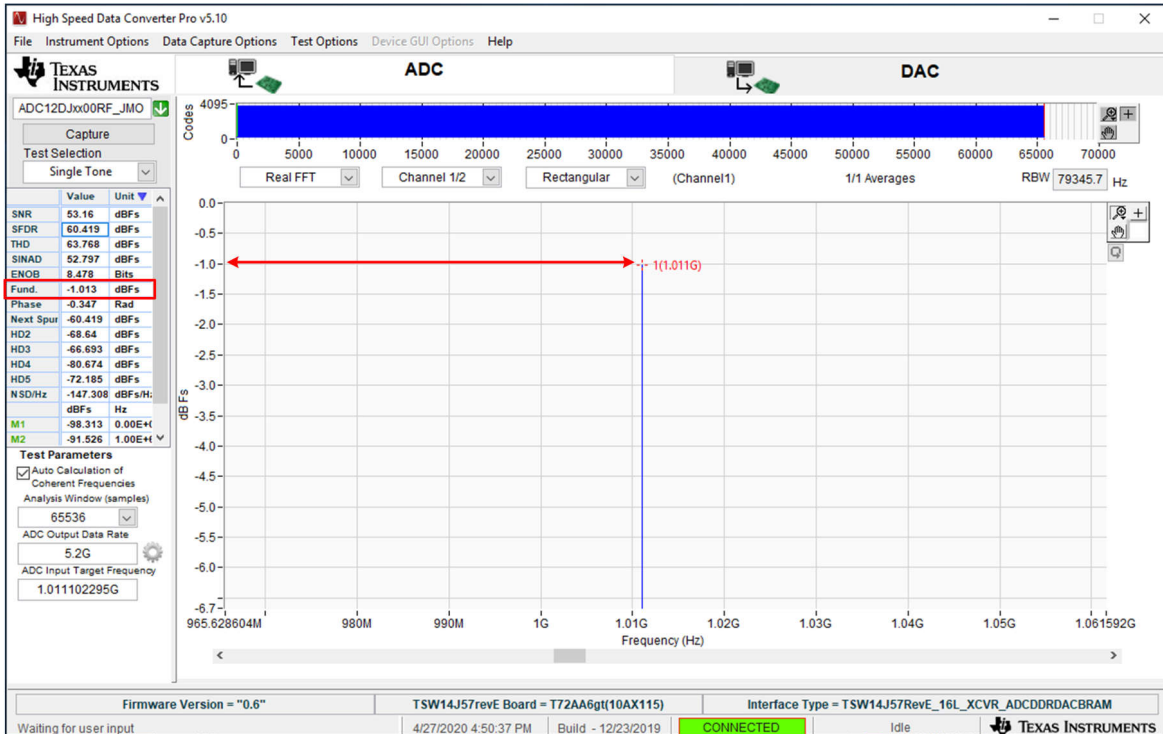


图 2-3. 使用相干采样的 ADC12DJ5200RF 基波频段附近放大 FFT 图示例

3 相干计算

现在，需要进行一些数学计算。在之前的 FFT 图示例中，ADC12DJ5200RF 采用的 ADC 采样频率 (F_s) 为 5,200MSPS (65,536FFT 个点)，模拟输入频率为 1,011MHz。通过计算可知，模拟输入频率为 1011.102295MHz。在信号发生器与数据采集软件中输入该频率。

进行该等计算的一种方法是下载德州仪器 (TI) 高速数据转换器专业软件，该软件是一个用于评估德州仪器 (TI) 高速数据转换器与模拟前端平台的 GUI。

选择“测试参数”左下角的“相干频率自动计算”后，该软件能够自动计算出准确的相干频率。

相干输入频率计算公式如下所示。该公式有三个主要参数：

- F_s - ADC 采样频率。
- N - FFT 点数。 n 必须是一个可以用 2 的幂表示的数字 (例如：1,024、2,048 或 4,096)。
- F_{in} - 模拟输入频率。

将 ADC12DJ5200RF 的值代入该等参数以后，能够得出：

- $F_s = 5,200\text{MHz}$ 。
- $N = 65,536$ 。
- $F_{in} = 1,011\text{MHz}$ 。

首先，需要计算 FFT 频带大小或频率分辨率，通常称为分辨率带宽 (RBW)。RBW 是 FFT 图显示的两个频率频带之间的最小差值，表示为 [方程式 1](#)。

$$RBW = \frac{F_s}{N} = \frac{5200\text{MHz}}{65536} = 79345.704 \text{ Hz} \quad (1)$$

接下来，计算 F_{in} 为 1,011MHz [方程式 2](#) 时对应的 FFT 频带号。

$$\text{bin number} = \frac{F_{in}}{RBW} = 12741.710769 \quad (2)$$

能够发现，频段号并非整数，这意味着，1,011MHz 信号的能量并非集中在单个 FFT 频段；也会泄漏到相邻频段。要获得相干采样，就要对输入信号进行频段居中处理，即：将所有能量集中在一个频段。

要获得频段居中 (相干) 信号，就必须将频段号四舍五入为整数。在该示例中，对频段号四舍五入后，可以得到 12,742。

接下来，根据四舍五入后的频段号，重新计算 F_{in} 值，获得相干输入频率 (公式 3)：

$$\text{coherent } F_{in} = \text{round}(\text{bin number}) \times RBW = 12,742 \times 79345.703125\text{Hz} = 1011.0229492\text{MHz} \quad (3)$$

[方程式 3](#) 计算出的 F_{in} 值是相干的，但可以通过选择一个质数频段号的方式进一步优化 FFT 性能测量。这样，就能够消除信号量化的周期性；换句话说，能够防止 ADC 周期性地沿输入信号一次又一次地击中相同编码。此外，选择质数频段号能够防止谐波相互叠加，效果如 [图 3-1](#) 所示。

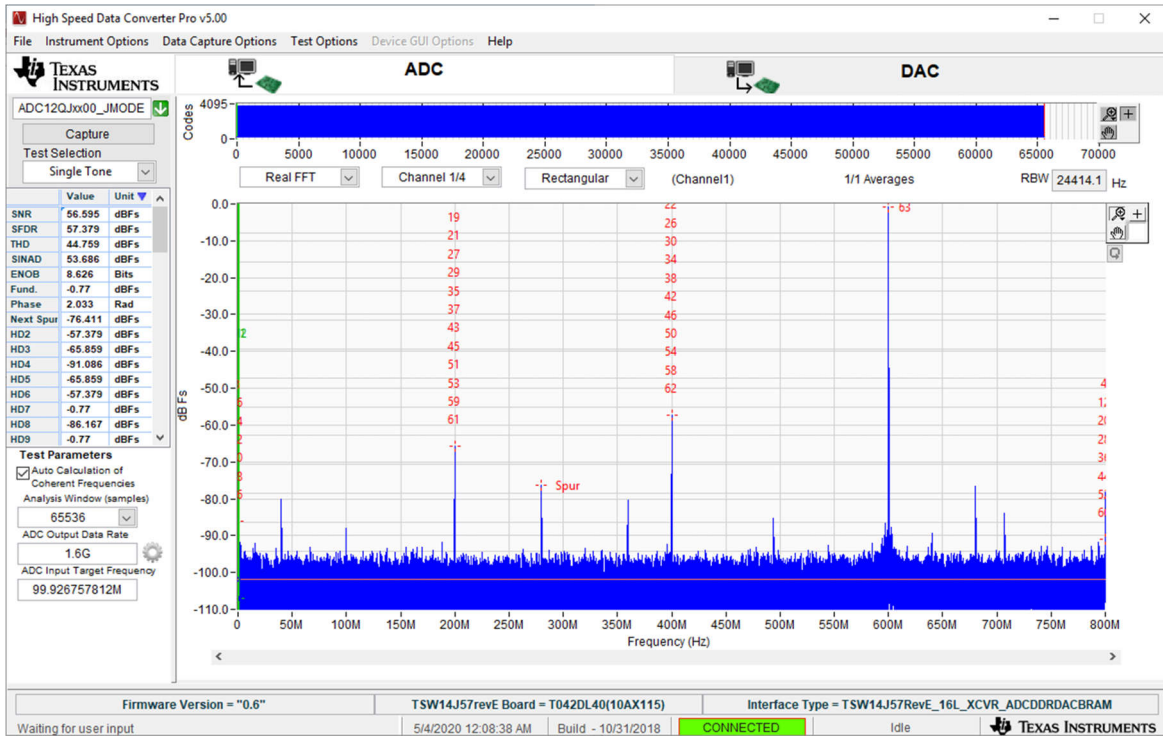


图 3-1. 不使用质数频段号的相干采样

接下来，可能需要修改 方程式 3，并且对频段号进行四舍五入，得到最接近质数的整数频段号。现在，可以重新计算，得到 F_{in} 方程式 4。

$$\text{coherent } F_{in} = \text{nearest prime number (round (bin number))} \times \quad \geq \quad (4)$$

再次使用该示例，先前得到的最接近质数的频段号由 12,742 变为 12,743。将示例值代入 方程式 4，利用最接近质数的频段号重新计算的 F_{in} 变为：

$$\text{coherent } F_{in} = 12,743 \times 79345.703125\text{Hz} = 1011.1022949\text{MHz} \quad (5)$$

图 3-2 显示了通过选择质数频段号改进的 FFT 测量结果。注：高阶谐波不再像 图 3-1 中那样相互叠加，因此能够对 ADC 进行更精确评估。

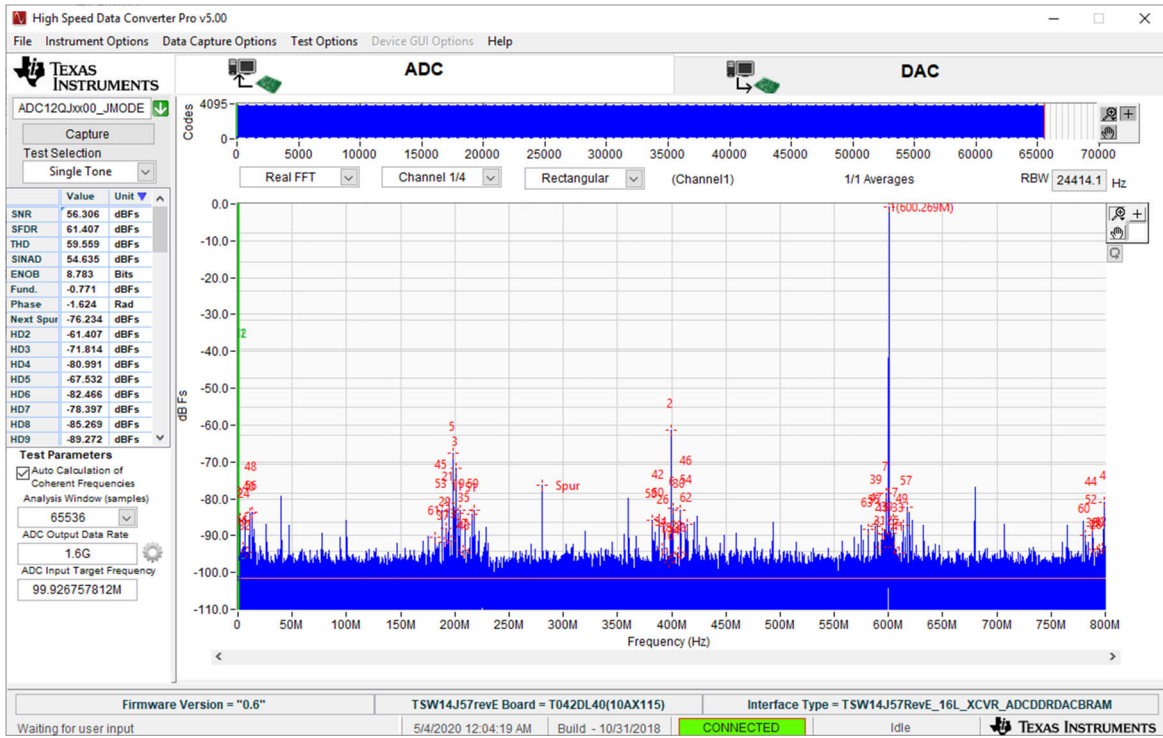


图 3-2. 使用质数频段号的相干采样

4 非相干采样

非相干采样是指模拟输入频率与时钟频率未进行基准锁定。如果使用图 2-1 所示类似设置，则不需要利用 10MHz 基准连接将两个信号发生器锁定在一起。相反，您可以进行模拟输入频率拖尾。例如，如果需要对 100MHz 模拟输入信号采样，拖尾就意味着可以改用接近 100MHz 的质数频率：99.1235MHz 或 101.1235MHz。拖尾能够确保 ADC 不会每次都在正弦波输入信号的相同采样点采样，而是会沿着信号移动，对多个点采样。

在 FFT 数据采集程序中，可通过 Blackman-Harris 等窗口化选项，确保 FFT 采集在边缘适当分散采样，避免 FFT 采集之间的不连续性。如需了解更多详细信息，可参阅本文后续节 5 部分。

图 4-1 展示了一个有效的非相干采样 FFT 数据采集。

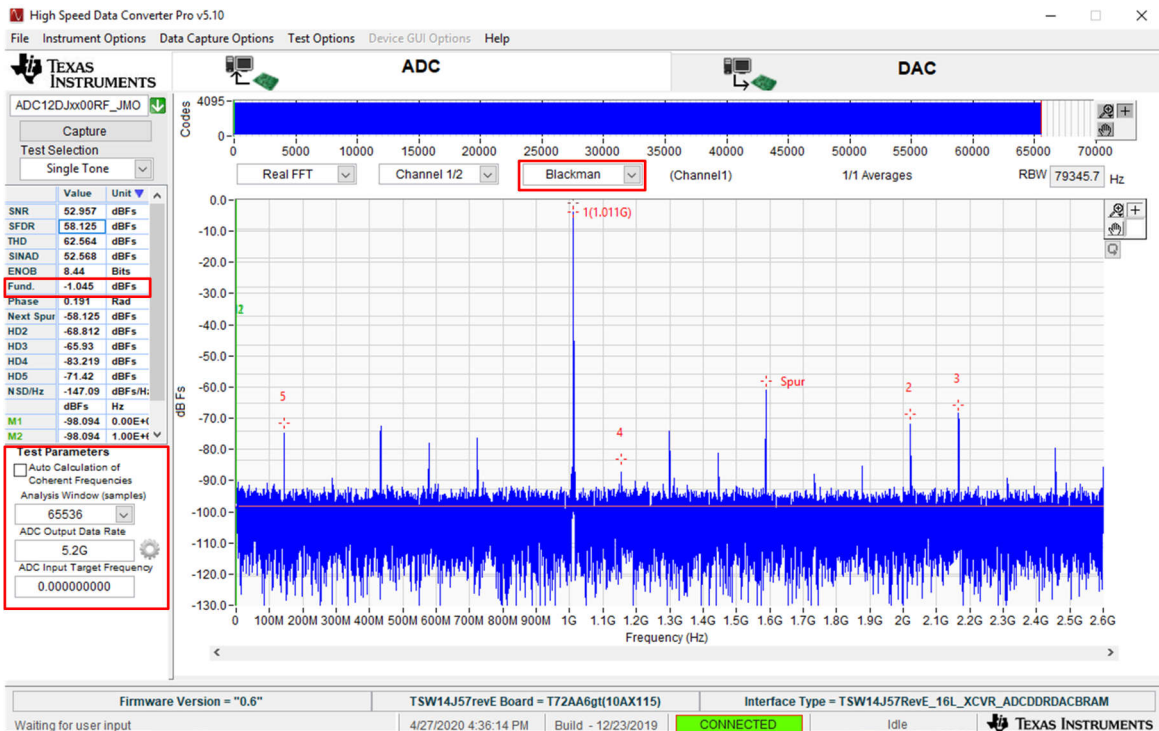


图 4-1. 使用非相干采样的 ADC12DJ5200RF FFT 图示例

非相干采样能够确保对所有 FFT 点均进行适当拖尾。基波与谐波能量驻留在 FFT 采集的多个频段或点中，可用于进行 SNR 与 SFDR 等测量计算。

图 4-2 是基波频带附近的 FFT 放大图。基波水平相差大约 -3.5dBFS；和参数表左侧所列数值相比，基波电平大致为 -1dBFS。谐波水平也可能有所不同。同样，这是因为 FFT 采集包含来自多个点或频段的数据，并且是该等频段的集体功率总和。在参数表左侧与图 4-2 中，该数值为 -1dBFS。

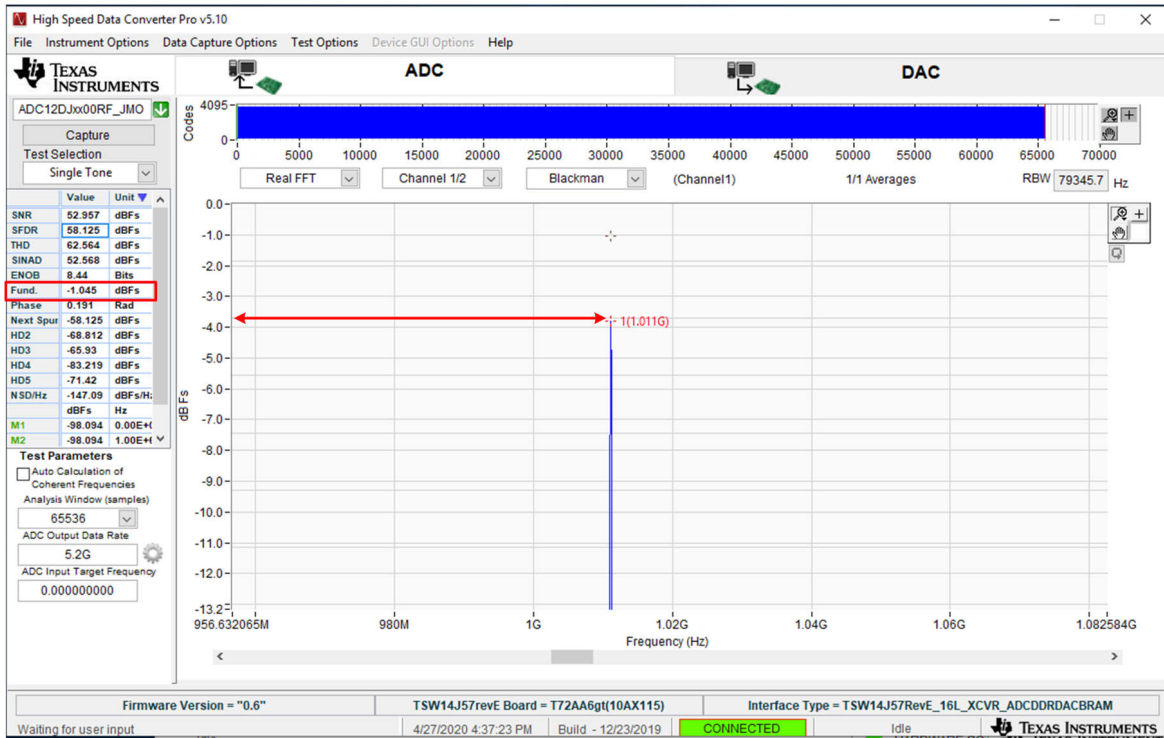


图 4-2. 使用非相干采样的 ADC12DJ5200RF 基波频段附近放大 FFT 图示例

5 为什么需要窗口函数

计算 FFT 时，需假定信号的整数周期数需要与 FFT 中分析的样本数相匹配。此外，如果将采样波形首尾相连，就能够产生一个连续的采样信号。图 5-1 展示了一个相干信号的例子，该信号在 1,024 个样本数据集中完成了五个周期。注意正弦波的起点与终点是如何无缝融合的，从而创建一个没有间断、跳跃或不连续情况的连续信号。

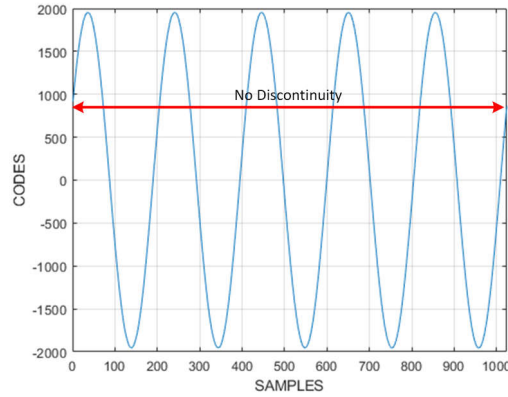


图 5-1. 相干信号

图 5-2 展示了一个非相干正弦波信号。能够发现，正弦波的起点与终点并未重合，如果将它们首尾相连，可能会导致巨大的不连续性。最终得到的信号也只能是非相干信号，并且能够发现，FFT 测量的信号功率变得非常模糊。

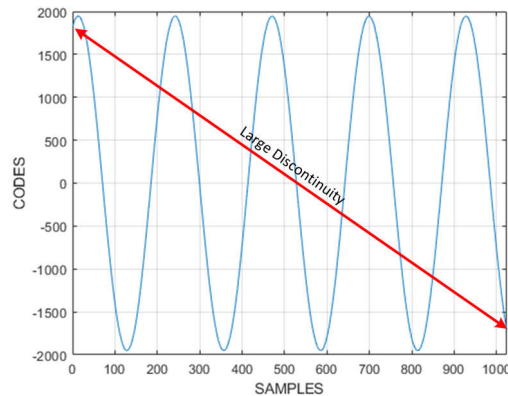


图 5-2. 非相干信号

这种情况下，应用窗口函数后，能够发现相干采样与非相干采样之间的区别。窗口函数（例如：Blackman-Harris、Hamming 等）具有与之相关的特定形状，也具有可供选择的多种不同函数。德州仪器 (TI) 的高速数据转换器专业软件默认采用 Blackman-Harris 窗口函数。将窗口函数与非相干信号相乘，并且在两端置零，就能够消除任何不连续性，创建更准确的 FFT 图。图 5-3 显示了 Blackman-Harris 窗口函数的大致轮廓。

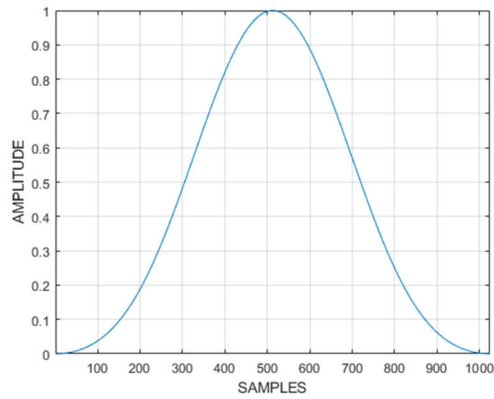


图 5-3. Blackman-Harris 窗口函数

将非相干信号 (如 图 5-2 所示) 与窗口函数 (如 图 5-3 所示) 相乘以后, 输出函数就成了非相干信号 (如 图 5-4 所示) 的窗口版本。能够发现, 两端同时置零, 端点之间不存在不连续性。

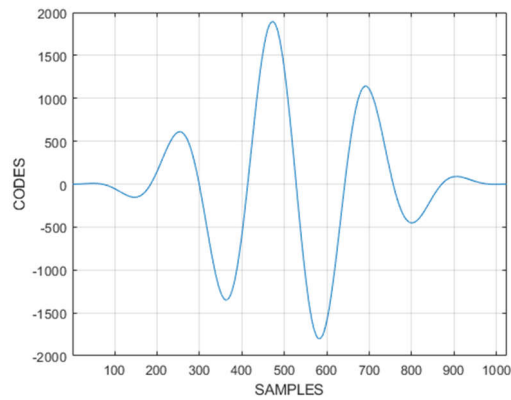


图 5-4. 非相干信号与窗口函数相乘

6 常见的 FFT 错误

图 6-1、图 6-2 与图 6-3 强调了一些可能导致 ADC 性能理解不准确的无效 FFT 数据采集。我们的目的是帮助那些刚通过评估模块或系统级设计角度进行 ADC 测试的设计人员，利用 FFT 数据采集来确定信号链设计的整体性能。

第一种 FFT 特征类型称为“FFT 异常波动”，如图 6-1 所示。这种 FFT 特征类型会在基频附近显示一个较大的偏移，当设计人员打算进行相干采样，但未采用正确的模拟输入频率，或使用了错误的计算时，就会出现这种情况。注：SNR/SFDR 性能与 ADC 数据表性能规格相差甚远。

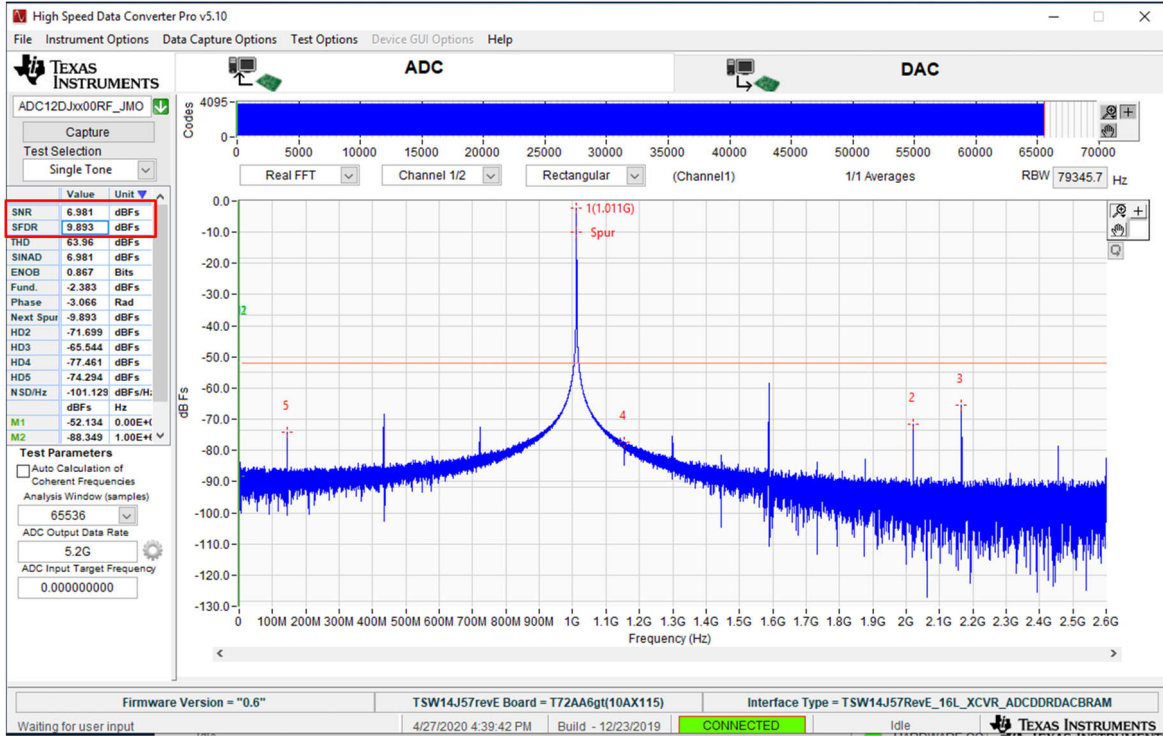


图 6-1. 导致 FFT 异常波动的相干采样

图 6-2 显示了另一种 FFT 特征类型，称为 FFT 栅栏效应，当用户在模拟输入信号的相同位置进行几乎精确的非相干采样时，就会出现这种现象。这里的问题在于，模拟输入频率不是一个质数，因此频率不够分散，无法沿输入信号在不同点移动。这种情况下， $F_s = 5,200\text{MSPS}$ ，模拟频率正好是 1000.0000MHz ，这不是一个质数。例如，采用 1011.1235MHz 等类似质数频率，能够确保对模拟输入信号进行精确采样的充足拖尾。

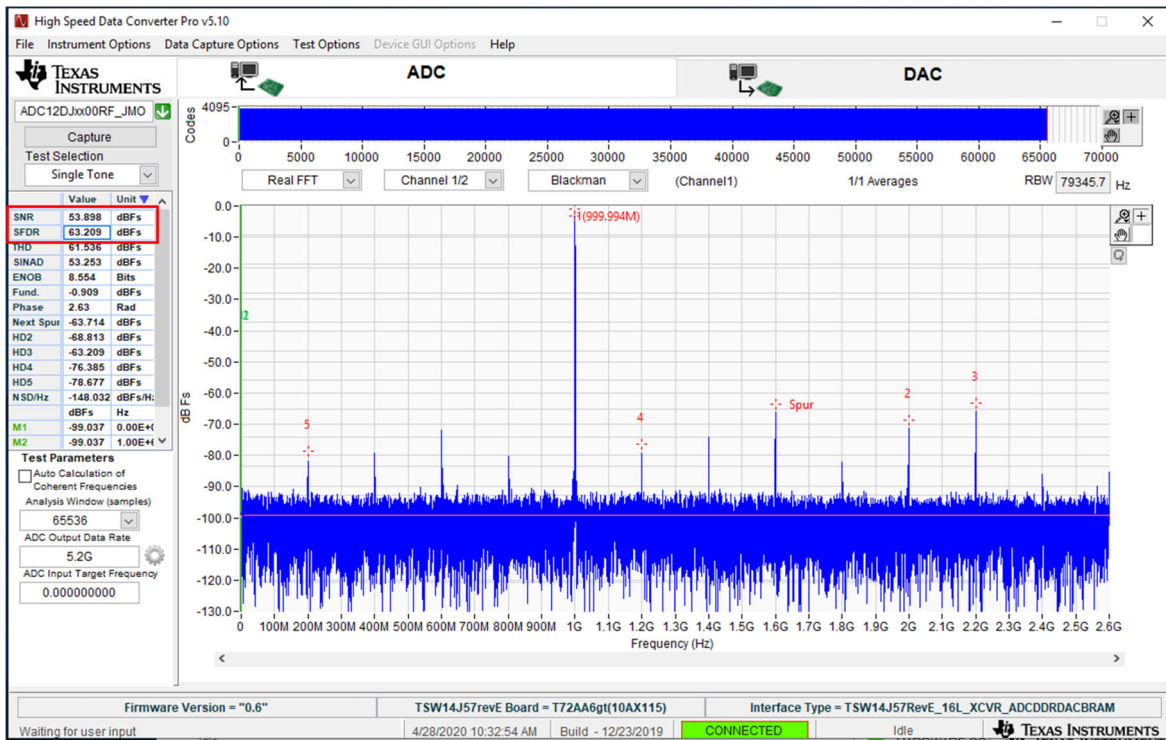


图 6-2. 相干采样时的 FFT 栅栏效应

第三种特征类型称为“FFT 分箱误差”。FFT 分箱误差与 FFT 栅栏效应相类似，但它是采样率的直接倍数。例如，如图 6-3 图所示， $F_s = 5,200\text{MSPS}$ ，模拟输入频率正好是采样频率的五分之一，即：1040.0000MHz。

这种情况下，同样是对模拟输入信号的相同点进行采样，该采样率下，会导致所有谐波（图 6-3 中的 HD2 与 HD3，以及基波与 HD4）相互叠加。通过采用随机质数（例如：1041.1359MHz），能够轻松解决 FFT 分箱误差。

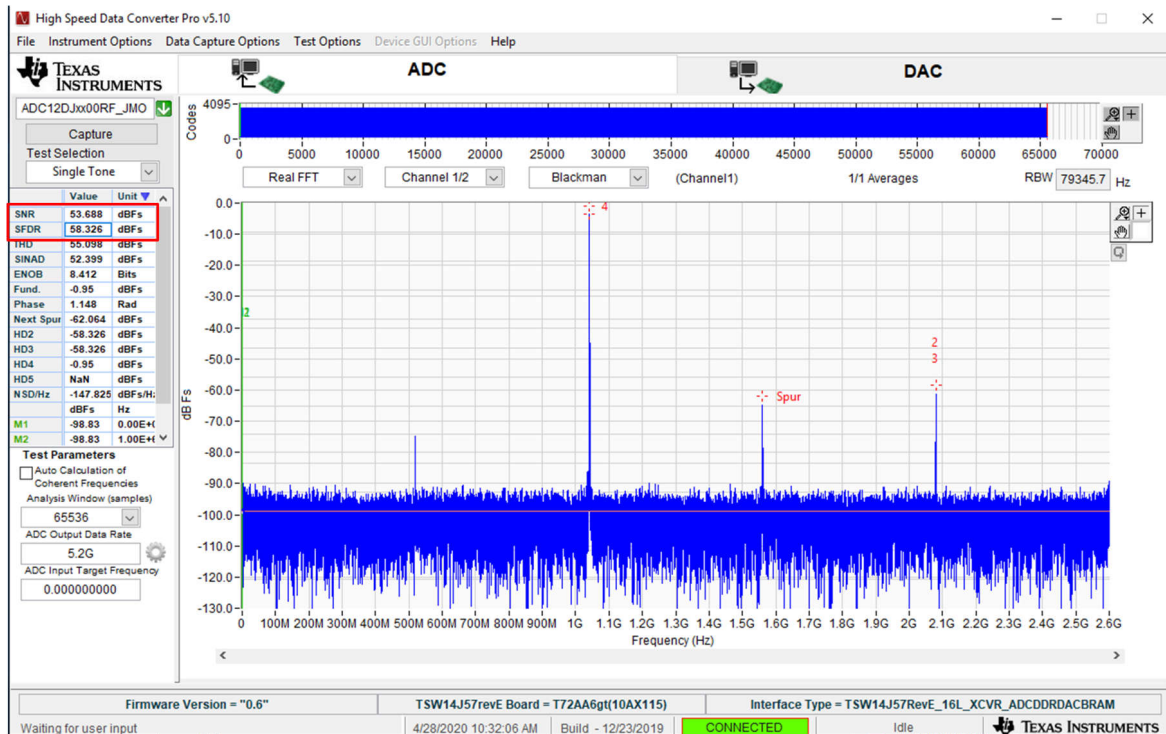


图 6-3. 相干采样时的 FFT 分箱误差

7 总结

本文消除了对于相干采样和非相干采样测试方法以及各种高速/射频 ADC 的正确 FFT 数据采集的困惑。下次，当你在实验室收集信号链 ADC 设计相关数据时，你需要自信地展示准确的 FFT 数据采集测量结果，纠正任何 FFT 数据异常波动、栅栏效应以及分箱误差。

8 参考资料

- [相干采样计算器在线计算工具](#)。
- 《FFT 基础与概念》Robert W. Ramirez
- 德州仪器 (TI)，[ADC12DJ5200RF 10.4GSPS 单通道或 5.2GSPS 双通道 12 位射频采样模数转换器 \(ADC\)](#)
- 德州仪器 (TI)，[DATA CONVERTER PRO-SW 高速数据转换器专业软件](#)。

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