

了解测试和测量应用中射频采样数据转换器的快速跳频

Chase Wood

Application Engineer
High-Speed Data Converters

引言

随着数据转换器的不断发展，满足软件定义无线电、无线测试仪和频谱分析仪等系统的多频带要求是一项挑战。鉴于器件变得越来越复杂，在数控振荡器 (NCO) 频率之间转换的速度更快，系统设计人员正在不断重新评估传统的跳频方法。

在本文中，我将介绍跳频技术的演变，并对传统方法和高级方法（例如通用输入/输出 (GPIO) 和快速重新配置接口 (FRI)）进行比较。了解到这些进步后，你将能更深刻地理解有关单频带和多频带应用优化跳频的宝贵见解。但是，要充分掌握现代系统如何满足多频带要求，必须首先了解跳频的基础知识。

什么是跳频？

在现代通信系统（如 Wi-Fi® 6 和 7 或正交振幅调制 (QAM) 编码信号）中，频谱本质上是多频带，也就是说射频 (RF) 域在每个频带内包含多个通道。例如，Wi-Fi 6 和 7 在同一频段内的多个通道上运行，以便更大程度地动态提高带宽和数据吞吐量，而 QAM 则涉及将数据编码为单个通道内的不同相位偏移和振幅级别。图 1 显示了包含 7 个 QAM 通道的示例频带。

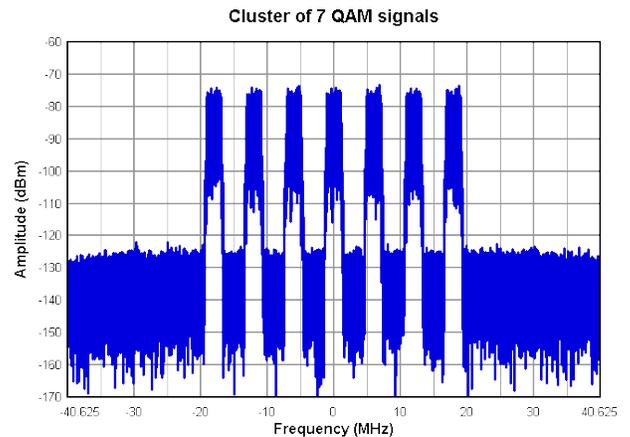


图 1. 频域中的多音调信号。

直接射频采样模数转换器 (ADC) 和数模转换器 (DAC) 结合了许多数字特性。实现直接射频采样的最重要特性之一是 ADC 中的数字下变频器 (DDC) 和 DAC 中的数字上变频器 (DUC)。

在 ADC 中，DDC 由三个主要元件组成：NCO、数字混频器和抽取器块。NCO 在传统接收器信号链中用作本地振荡器的数字版器件，与输入信号混合，在基带（奈奎斯特区 1）中提供信号以及不需要的图像。抽取器块通过有限脉冲响应 (FIR) 抽取滤波器滤除图像，然后通过下采样降低信号带宽。抽取器块与中频 (IF) 滤波器具有等效的数字效果。

在 DAC 中，DUC 包含一个内插器、一个 NCO 和一个数字混频器。与 ADC 中不同，内插器对低带宽输入信号进行向上采样，然后通过 FIR 滤波器传递以抑制图像。在内插器级之后，输出信号馈送到数字混频器，与 NCO 混合，从而使 DAC 能够在具有较低输入信号带宽的宽奈奎斯特区上运行。

在射频采样转换器的给定输入上激活的 DDC 数量，决定了转换器是在单频带输出下运行还是多频带输出下运行。本文将重点介绍跳频的 ADC 内容。

图 2 展示了德州仪器 (TI) **ADC32RF55** 的 DDC 示例。该器件是一款射频采样 ADC，能够以 3GSPS 的速率进行双通道、四频带运行。

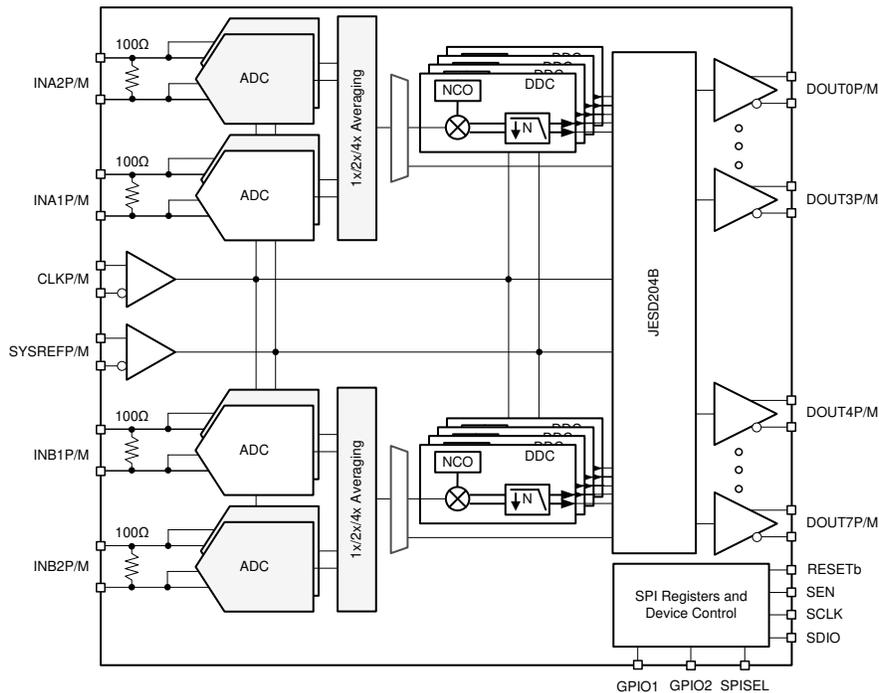


图 2. ADC32RF55 的功能方框图（每个通道四个 DDC）。

通常，所需的频带可能会发生变化：同一个射频采样转换器只需调整 NCO 频率即可匹配新的频段，而无需为每个频段切换完全不同的信号链。这是现代射频采样转换器的一项主要优势。将 NCO 从一个频率更改为另一个频率的行为称为跳频。

NCO 不直接生成模拟频率，而是以高分辨率生成所需频率的数字表示。每个 NCO 接收一个数字字（通常为 48 位或更高）。与 NCO 相位累加器组合使用时，该数字字可以表示适合数字混合级的信号。在对 NCO 编程时，对应于所需 IF 的数字表示形式是编程的内容，而不是实际频率。NCO 频率范围通常在 $-F_s/2$ 和 $F_s/2$ 之间，其中 F_s 表示转换器的采样频率。负频率字用于偶数奈奎斯特区的信号，而正频率字用于奇数奈奎斯特区的信号。

要确定高阶 NCO 频率在基带中的位置，首要任务是在目标频率与采样率之间执行模数运算，以消除 F_s 的任意倍

数。现在，目标 NCO 频率介于 0Hz 和转换器采样率 F_s 之间。

如果 NCO 频率小于奈奎斯特频率 ($F_s/2$)，则目标 NCO 频率将转换为奇数奈奎斯特区，如方程式 1 所示：

$$NCO_{\text{word}} = f_{\text{NCO}} \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } 0 \text{ to } F_s/2 \quad (1)$$

如果计算出的 NCO 频率高于奈奎斯特频率，则该频率将位于偶数奈奎斯特区，如方程式 2 所示：

$$NCO_{\text{word}} = (f_{\text{NCO}} + F_s) \times \frac{2^{48}}{F_s}, \text{ for } -F_s/2 \text{ to } 0 \quad (2)$$

图 3 显示了基频信号 (Fund) 及其二阶、三阶和四阶谐波 (HD2、HD3 和 HD4) 如何折回第一奈奎斯特区，尽管实际频率分量位于更高阶的奈奎斯特区。

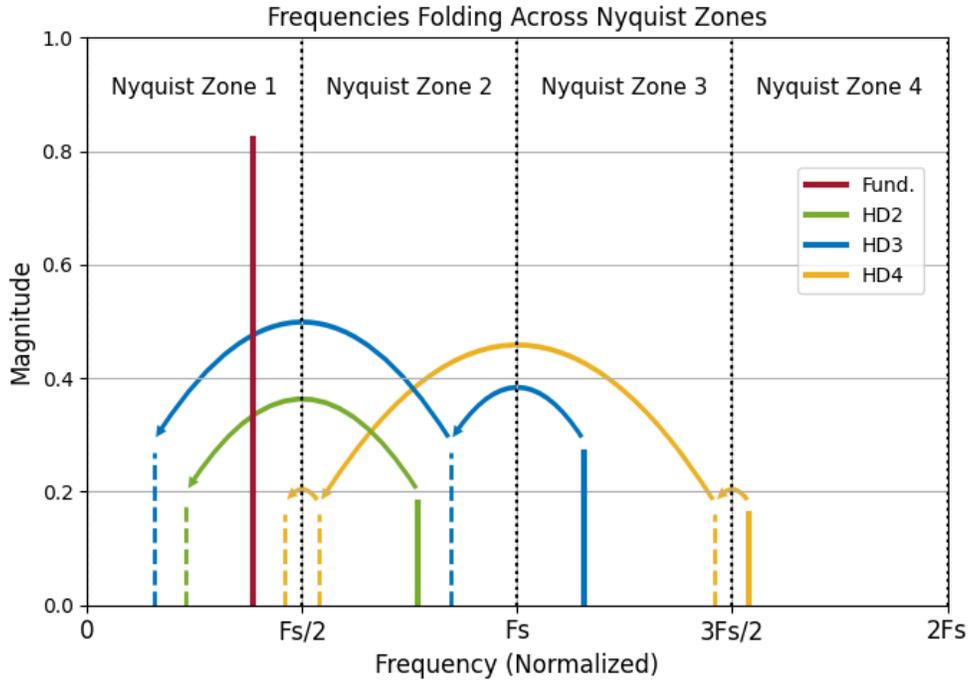


图 3. 谐波穿过高阶奈奎斯特区折叠到奈奎斯特区 1。

与传统 ADC 相比，射频采样 ADC 的一个优势是无需更改硬件即可切换频段。这种固有的灵活性使射频采样 ADC 能够快速适应新的频带，而无需增加硬件元件，从而简化了系统设计，并降低了成本。然而，这一发展不是一蹴而就的。在射频采样 ADC 的早期设计中，每个 NCO 和后续 DDC 只提供了一个 NCO 字选项。因此，跳转到另一个频率需要多次寄存器写入操作。

新 NCO 字必须通过串行外设接口 (SPI) 写入，然后再写入另一个寄存器，以便将新 NCO 字推入 DDC 块，使其实际生效。跳频所需的时间受多个因素影响，包括 NCO 字的长度和 SPI 事务速度。ADC 的寄存器大小通常限制为 8 位，因此总共需要七次寄存器写入才能更新 48 位 NCO：六次寄存器写入用于 NCO 字本身，另一次寄存器写入用于更新 DDC。

考虑到每个 SPI 事务的开销（通常是每个寄存器写入 16 位地址），事务时间将变为三倍。假设 SPI 数据流的不间断，当串行时钟信号 (SCLK) 速率为 20MHz 时，**方程式 3** 计算的跳频时间如下：

$$t_{\text{hop}} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 7 \text{ (transactions)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (3)$$

$$= 8.4 \mu\text{s}$$

跳频技术的演变

目前，射频转换器的设计中每个 DDC 包含多个 NCO 字，允许对 NCO 字进行预编程。这种创新方法通过将多个频率值预加载到转换器的存储器中，可实现更快的跳频。这种存储预先计算的 NCO 字的概念就是快速跳频中的“快速”。

图 4 按 ADC32RF55 的 NCO 索引和字索引展示了 48 位 NCO 寄存器地址。尽管通道 A 和 B 的地址相同，但频字是唯一的，因为该器件实现了寄存器映射分页，该分页可屏蔽未包含在活动页中的寄存器，防止对其进行任何读取和写入操作。

Channel A		Channel B	
NCO1 1: 0x100..0x105 2: 0x108..0x10D 3: 0x110..0x115 4: 0x118..0x11D	NCO3 1: 0x140..0x145 2: 0x148..0x14D 3: 0x150..0x155 4: 0x158..0x15D	NCO1 1: 0x100..0x105 2: 0x108..0x10D 3: 0x110..0x115 4: 0x118..0x11D	NCO3 1: 0x140..0x145 2: 0x148..0x14D 3: 0x150..0x155 4: 0x158..0x15D
NCO2 1: 0x120..0x125 2: 0x128..0x12D 3: 0x130..0x135 4: 0x138..0x13D	NCO4 1: 0x160..0x165 2: 0x168..0x16D 3: 0x170..0x175 4: 0x178..0x17D	NCO2 1: 0x120..0x125 2: 0x128..0x12D 3: 0x130..0x135 4: 0x138..0x13D	NCO4 1: 0x160..0x165 2: 0x168..0x16D 3: 0x170..0x175 4: 0x178..0x17D

图 4. 按 ADC32RF55 的通道和 NCO 索引排列的 NCO 字地址。

对这些字进行编程后，如何实际选择特定字呢？更改 NCO 字只需为 DDC 选择一个新的 NCO 字。您可以通过 SPI 或 GPIO 引脚来执行此操作。表 1 展示了一个示例，说明如何根据活动频带的数量为 ADC32RF55 中的指定 DDC 选择单个字。在标准配置中，每个 DDC 有四个唯一的 NCO 字；但在单频带模式下，相邻 DDC 的四个 NCO 字也可以提供活动的 NCO，也就是说这意味着每个通道的 DDC 都可以访问八个预编程的 NCO 字。

频段数	ADDR	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
单	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]	0	NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]	0	NCO1 CHB[1:0]	
双	0x3B	0	0	0	0	NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	0	0	0	0	NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	
四	0x3B	NCO4 CHA[1:0]		NCO3 CHA[1:0]		NCO2 CHA[1:0]		NCO1 CHA[1:0]	
	0x41	NCO4 CHB[1:0]		NCO3 CHB[1:0]		NCO2 CHB[1:0]		NCO1 CHB[1:0]	

表 1. 通过 NCO 索引在 ADC32RF55 上选择 NCO 字。

执行跳频所需的时间因转换器而异。一般情况下，SPI 方法只需要单个 SPI 事务的持续时间，而不是方程式 3 中所示的七个。SPI 的最大时钟速率和串行数据传输所涉及的开销会限制 SPI 方法的速度。假设使用相同的 20MHz SCLK，方程式 4 显示了器件启动 NCO 字更改之前所需的时间：

$$t_{\text{thop}} = \frac{1}{20 \times 10^6 \text{ (Hz)}} \times 1 \text{ (transaction)} \times \frac{24 \text{ (bits)}}{\text{(transaction)}} \quad (4)$$

$$= 1.2\mu\text{s}$$

相比之下，GPIO 方法的速度可以与 GPIO 输入的更新速度一样快。一旦电压超过其高电平或低电平阈值，NCO 字就开始变化。

在这两种方法中，一旦器件收到 NCO 字更改，内部 NCO 字就会立即更新；但是，抽取滤波器必须清除所有旧值，因此会根据抽取因子产生一些额外的延迟。

表 2 展示了 ADC32RF55 使用与新 NCO 频率混合的数据刷新其抽取滤波器所需的时间。

抽取设置	NCO 切换时间
/4	约为 250ns
/8	约为 350ns
/16	约为 600ns
/32	~1μs
/64	~2μs
/128	~4μs

表 2. ADC32RF55 上的抽取滤波器刷新时间。

通常，GPIO 方法比 SPI 跳频方法更快，因为 GPIO 接口与串行接口之间存在固有的并行特性。不过，需要考虑以下情况：在 GPIO 字选择模式下，相同的字索引将应用于所有活动的 DDC。当在 DDC2 上使用字 3 时，器件无法在 DDC1 上使用字 1；GPIO 接口会将所有 DDC 设置为相同的字索引。

另一种方法是 FRI，它通过特定器件引脚发送数据的速度比标准 SPI 支持的速度快得多。某些器件（例如 TI DAC39RF12）可以支持高达 200MHz 的 FRI 通信。您可以使用它来选择活动的 NCO 字。

测试和测量中的应用

鉴于各种应用不断发展的多样化需求，支持多个频段对于测试和测量设备至关重要。宽带测试设备能够在多个频率范围内运行，因此是一款用于对不同系统和技术进行全面测试的通用工具。随着技术进步和新频段的出现，设备越来越需要能够在多个频段之间快速适应和切换。

在频谱分析仪中，快速跳频技术通过减少扫描时间和提高检测瞬态信号的能力来实现快速准确的测量。采用多个 NCO 或快速重新配置方法（如 FRI）的高级 ADC 具有快速切换功能，可在广泛的频率范围内进行更高效的分析，

从而提高频谱分析仪在研究和现场应用中的整体性能和实用性。

对于无线测试仪，快速跳频技术在通信系统的特征描述和故障排除方面发挥着至关重要的作用。通过实现频率间的快速转换，这些技术可提高信号保真度，缩短测试周期。此功能尤其适合评估无线器件在多频率条件下的性能。

除频谱分析仪和无线测试仪之外，快速跳频技术在许多其他测试和测量应用中具有显著优势。例如，通用信号分析仪和射频信号发生器可以利用这些技术在多个频带上提供更灵活、更准确的测试。多频带接收器还能够在频带之间快速切换，确保在动态测试环境下具有可靠的性能。

结语

通过实现快速准确的频率转换，快速跳频技术可提高灵活性、精度，并更好地适应不断变化的技术需求。随着对测试和测量设备的需求不断增长，了解并实施快速跳频方法对于保持前沿性能和确保全面的测试功能至关重要。

相关网站

1. Wood, Chase. 2024. “[ADC Decimation: Addressing High Data-Throughput Challenges](#)”. Embedded Computing Design, February 5, 2024.
2. Wood, Chase. 2024. “[ADC Decimation: Unlocking RF Potential with Downconverters](#)”. Embedded Computing Design, February 29, 2024.
3. Wood, Chase. 2024. “[ADC Decimation: Analyzing High-Bandwidth Spectrum Clusters](#)”. Embedded Computing Design, May 9, 2024.
4. [TI ADC32RF55 数据表](#)
5. [TI DAC39RF12 数据表](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司