

利用AD9912的超奈奎斯特频率操作得到高RF输出信号

作者: Ken Gentile

简介

AD9912是一款基于DDS的多功能调制器，集成一个14位DAC。该器件属于奈奎斯特类别，利用采样时钟来产生输出信号。结果，其输出信号的频率范围一般限制在直流与采样时钟频率的 $\frac{1}{2}$ 之间。这种频率限制通常被看作是一种不足。然而，奈奎斯特器件同时会产生有用信号(镜像频谱)，其频率远远超过采样时钟，为特高频应用提供了可能。

例如，在1 GHz采样时钟下，AD9912可在直流至500 MHz的频率范围内产生基波输出信号。即使正常的输出频率范围一般限制在500 MHz之内，但输出信号实际上含有基波信号的可用镜像，其频率最大可达数千兆赫，如图1所示。

标准做法是利用一个最大带宽为~400 MHz的低通重构滤波器来抑制镜像。然而，对于超奈奎斯特操作，则要利用一

个带通滤波器来选择所需镜像和抑制无用镜像和基波。为便于说明，图1显示了典型的低通和带通滤波器带宽。

请注意，镜像频谱表现出频率相关衰减，这是著名的sinc响应导致的结果(图1所示为以dB为单位垂直缩放的sinc包络，归一化为0 dB@0 Hz)。Sinc响应则是DAC数模转换过程导致的结果。除衰减失真以外，偶数奈奎斯特频率区中的镜像相对于基波信号频谱反转。频谱反转对纯正弦DAC输出波形影响很小。然而，DAC输出端如果用于调制载波的应用，则会受到频谱反转的影响(相当于使I/Q星座图的Q分量反转)。事实上，涉及调制载波的应用也可能受到sinc包络幅度响应的影响。结果产生的频率相关衰减可能对调制方案形成负面影响，因为调制方案在传输带宽范围内要求平坦的幅度响应。

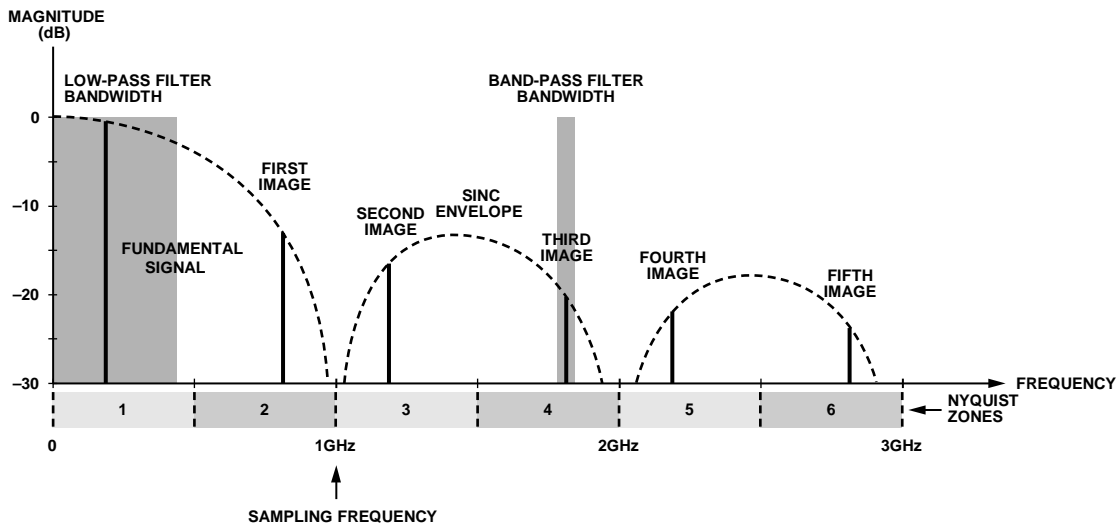


图1. 奈奎斯特镜像

优化超奈奎斯特频率操作

尽管奈奎斯特镜像会受到sinc响应导致的衰减的影响，但这并不排除其在高RF应用中的作用。对于那些能容忍sinc包络所致信号电平衰减导致的SNR和SFDR下降的应用，情况尤其如此。优化超奈奎斯特频率操作的关键是选择适当的采样频率、基波频率和奈奎斯特频率区，因为它们使镜像相对接近sinc响应曲线的峰值并将其他杂散噪音(和镜像)排除在滤波器通带之外。尽管奈奎斯特频率器件存在一些限制，但只要频率规划得当，实现极高RF应用是可能的。

作为具体实例，可以考虑工作于1000 MHz采样时钟的AD9912。其测量配置的功能框图如图2所示。

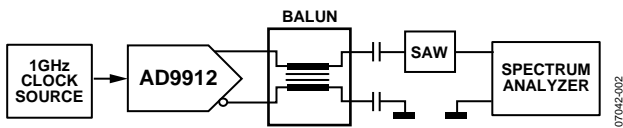


图2. 测量配置

AD9912中的DDS被编程为产生一个385 MHz的正弦波，出现在集成的14位DAC的输出端。结果产生的未滤波输出频谱如图3所示。产生该频谱时，SAW滤波器被移除，频谱分析仪连接至巴伦的输出端。图3中，基波信号(385 MHz)以及第1、第2和第3奈奎斯特频率镜像(分别为615 MHz、1385 MHz和1615 MHz)均清晰可见。用于展示AD9912的超奈奎斯特频率性能的是1615 MHz的第3镜像。

利用SAW滤波器的超奈奎斯特频率操作

超奈奎斯特频率操作要求采用带通滤波器。另外，对于本应用笔记所示超奈奎斯特频率操作，目标镜像的带宽极窄(即单音1615 MHz)。由于表面声波(SAW)滤波器可以提供极窄的带宽，因此，SAW滤波器是这种特定应用的首选技术。SAW滤波器的目的是以尽量少的额外衰减捕获第三镜像，同时显著抑制其他杂散信号。本例使用了一个Sawtron SAW滤波器(型号: STA0528A)，其频率响应特性如图4和图5所示，提供以1615 MHz为中心的20 MHz通带。带外响应旨在抑制基波信号、无用镜像和阻带中的任何其他杂散信号。

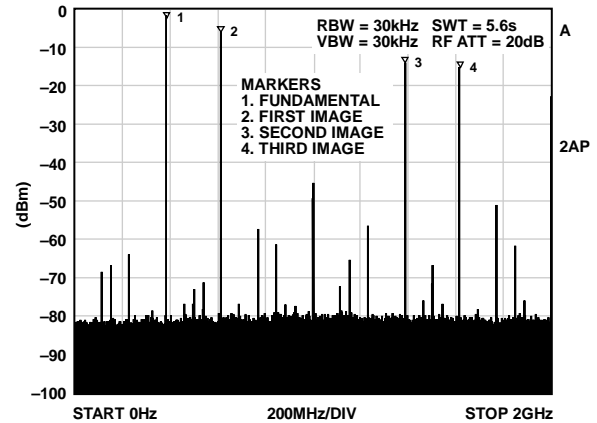


图3. 未滤波输出频谱

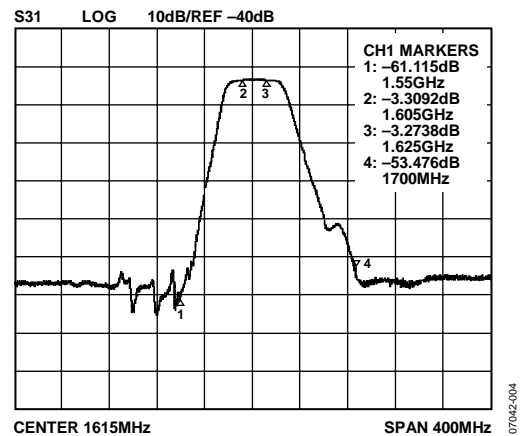


图4. SAW滤波器频率响应的窄带视图(400 MHz)

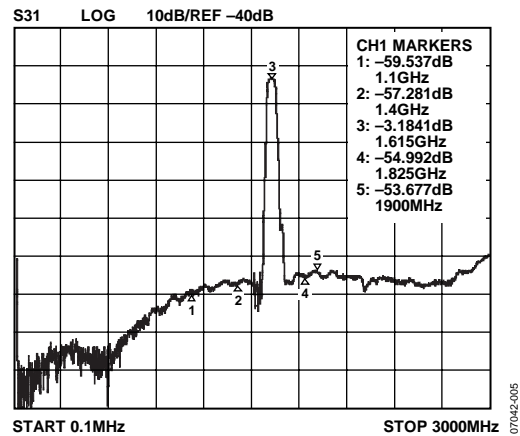


图5. SAW滤波器频率响应的宽带视图(3 GHz)

SFDR性能

图6所示为滤波输出的频谱。请注意图3所示未滤波频谱中出现的1615 MHz时的所需镜像、385 MHz时基波信号的虚拟消除以及显著减少的无用镜像及其他杂散噪音。最差的是第二镜像信号(1385 MHz)，已相对于第三镜像信号抑制48 dB左右。由于第三镜像信号(1615 MHz)出现的频率显著高于1000 MHz采样时钟，因此，超奈奎斯特频率操作得到了较好的展示。出于信息完整性考虑，图7显示了频率缩放(30 MHz带宽)。

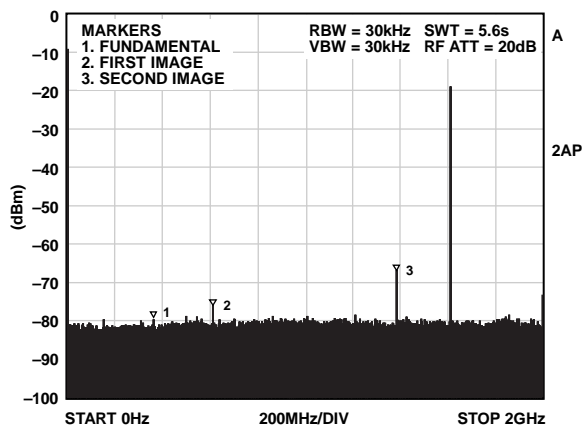


图6. 滤波输出频谱

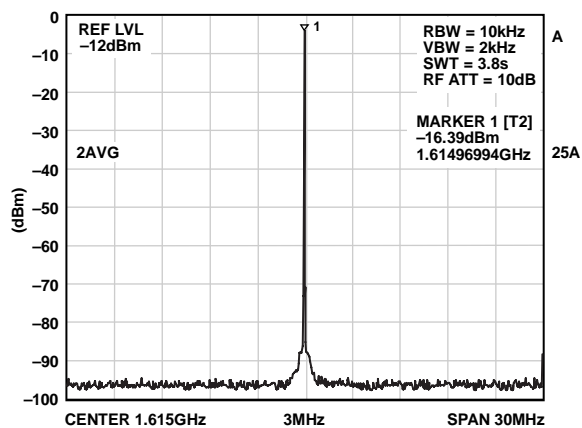


图7. 以1615 MHz超奈奎斯特频率镜像为中心的30 MHz频率缩放

图6和图7展示了AD9912 SFDR在1615 MHz第三奈奎斯特频率镜像下的性能。图8则展示了AD9912在较宽DDS调谐频率范围内的最差SFDR性能。

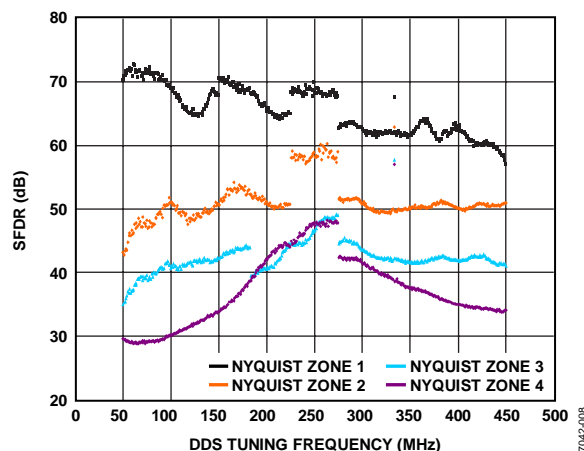


图8. AD9912的典型SFDR性能
(第1至第4奈奎斯特频率区域)

图8包括四个图线，各奈奎斯特频率区域以不同颜色表示(有关各奈奎斯特频率区域的枚举情况，请参考图1)。水平轴对应于DDS调谐频率。各个数据点之间存在约1 MHz的水平间距。数据点显示了基于DDS调谐频率的典型宽带SFDR性能。各点的宽带SFDR性能相关的频带为400 MHz，跨越所示奈奎斯特频率区域，不包括各端的50 MHz禁入区域。禁入区域代表奈奎斯特频率区域带宽的10%。另外，各数据点的SFDR性能相对于所示奈奎斯特频率区域中的镜像信号幅度。

例如，可以考虑前面提到的测试方案，其中，DDS采样速率为1 GHz，输出信号为385 MHz。在该测试方案中，目标镜像是在第四奈奎斯特频率区域的第三镜像(位于1615 MHz)。从图8可以看出，典型SFDR性能为~36 dB。得出该值的方法是：想像水平轴385 MHz处存在一条垂直线，与第四奈奎斯特频率区域相关SFDR图线相交。然后，想像一条通过该点的水平线与垂直轴相交。

请注意，测试方案产生的SFDR为48 dB，而图8显示为36 dB。导致这一显著差异的原因在于，图8所示SFDR性能跨越了80%的奈奎斯特频率带宽而且未采用带通滤波。然而，在测试方案中，SAW滤波器可消除大多数不良杂散元件的影响。因此，图8所示结果提供了较为保守的最差SFDR性能。显然，测试方案表明，带通滤波具有显著改善图8中SFDR性能的能力。

图8中的图线表现出的几个异常点需要进一步说明。首先注意，相对于相邻数据点，333 MHz处数据点的SFDR有显著改善。因为333 MHz正好相当于1 GHz采样速率的 $\frac{1}{3}$ ，其频率具有独特性。相当于采样速率 $\frac{1}{3}$ 的频率使偶数阶DAC谐波(及其奈奎斯特频率镜像)与基波频率(及其镜像)重合。另外，奇数阶DAC谐波表现为采样频率的整数倍。因此，谐波要么包含于基波频率(及其镜像)之中，要么处于带外，两种情况下都被排除在SFDR测量之外。由于DAC谐波通常是SFDR性能的限制因素，因此，其在333 MHz基波频率下的消失导致了性能的提高。

图8表现出的另一个异常点是，第一和第二奈奎斯特频率区域图线中存在以250 MHz为中心的基底误差。该基底误差由跨进SFDR禁入区域的第二谐波引起。由于第二谐波有可能是前两个奈奎斯特频率区域中SFDR性能的限制因素，在其消失在禁入区域后，SFDR性能立即改善。

图8中的第三个异常点是第三奈奎斯特频率区域图线中存在的一对间断点。在DDS调谐频率低于183 MHz时，第二谐波成为第三奈奎斯特频率区域中的主要组分。在DDS频率等于183 MHz时，第三谐波退出第三奈奎斯特频率带右侧的禁入区域，进入SFDR测量区域。受第三奈奎斯特频率区域中sinc包络形态的影响，当DDS调谐至183 MHz时，第三谐波的幅度处于最高水平(SFDR测量频带之内)。因而成为SFDR性能的限制因素，使183 MHz下的性能立即下降。从这一点开始，SFDR性能随着第三谐波幅度的下降以及DDS频率的增加而上升，基波镜像的幅度则上升。在DDS调谐频率约等于275 MHz时，第二谐波退出第三奈奎斯特频率带右侧的禁入区域，进入SFDR测量区域。这是导致275 MHz下性能立即下降的原因。

图8中的最后一个异常点是在275 MHz下，第四奈奎斯特频率区域中图线不连续。在该频率下，第二谐波退出第四奈奎斯特频率带左侧的禁入区域，进入SFDR测量区域。受第四奈奎斯特频率区域中sinc包络形态的影响，当DDS调谐至275 MHz时，第二谐波的幅度处于最高水平(SFDR测量频带之内)。因而成为SFDR性能的限制因素，使275 MHz下的性能立即下降。

图8的水平轴显示DDS调谐频率。在第一奈奎斯特频率区域中，基波频率和DDS调谐频率相同。在其他奈奎斯特频率区域中，基波镜像的绝对频率和DDS调谐频率并不相同。镜像频率(f_{image})的位置与DDS调谐频率(f_{DDS})直接相关。 f_{image} 与 f_{DDS} 的关系详见表1。

表1: f_{image} 为 f_{DDS} 的函数

奈斯特频率区域	f_{image}
1	f_{DDS}
2	$1 \text{ GHz} - f_{\text{DDS}}$
3	$1 \text{ GHz} + f_{\text{DDS}}$
4	$2 \text{ GHz} - f_{\text{DDS}}$

结论

AD9912可用于所需频率合成超过常见的奈奎斯特频率限制(即采样速率的 $\frac{1}{2}$)的应用。该器件可以工作于1 GHz采样速率之下，产生的镜像为某些高RF应用提供了可能。本应用笔记展示了如何通过适当的带通滤波在1.615 GHz及以上频率实现频率合成。