

高い周波数の RF 出力信号が得られる AD9912 のスーパーナイキスト動作

著者 : Ken Gentile

はじめに

AD9912 は、14 ビット DAC を内蔵した DDS ベースの多目的変調器です。ナイキスト・デバイスに分類され、サンプリング・クロックを使用して出力信号を生成します。そのため、通常は出力周波数のレンジが DC からサンプリング・クロック周波数の 1/2 までに限定されてしまいます。この周波数の制約は一般には欠点と思われませんが、実際のナイキスト・デバイスでは、サンプリング・クロックの周波数をはるかに超える帯域で有用な信号(スペクトル・イメージ)が発生するので、きわめて高い周波数でのアプリケーション動作を可能にしています。

たとえば、AD9912 は 1 GHz のサンプリング・クロックで、DC ~ 500 MHz の周波数レンジで基本出力信号を生成できます。通常は出力周波数レンジが 500 MHz に制限されていますが、実際の出力信号には図 1 に示すように、数ギガヘルツまでの利用可能な基本波信号のイメージ波が含まれています。

通常は、約 400 MHz の帯域幅の信号再構成用ローパス・フィルタでこれらのイメージを抑制しますが、スーパーナイキスト動作の場合は、バンドパス・フィルタを使って所望のイメージ波を選択し、不要なイメージ波を基本波信号とともに除去します。わか

りやすくするため、図 1 にはローパス・フィルタとバンドパス・フィルタの代表的な帯域幅を示しています。

この図から、スペクトル・イメージが周波数依存の減衰を示すこともわかります。これは主によく知られた sinc 応答(ここでは、デシベル単位で垂直方向にスケールされ、0 Hz 時に 0 dB となるよう正規化された sinc エンベロープで図示)に起因します。この sinc 応答は、DAC のデジタル/アナログ変換プロセスの結果により生じます。この減衰の歪みに加え、偶数番目のナイキスト領域内のイメージではスペクトルが基本波信号に対して反転しています。これは純粋なサイン波出力信号ではほとんど問題になりませんが、DAC 出力で変調されたキャリア波を発生させるアプリケーションでは、スペクトル反転が I/Q シンボル・コンスタレーションの Q 相成分の反転を引き起こすため、影響が出てしまいます。変調キャリアを使用するアプリケーションのもう 1 つの問題点は、sinc エンベロープの振幅特性による影響です。この周波数依存の減衰は、伝送帯域幅に対して平坦な振幅応答を必要とする変調方式に悪影響を与えることがあります。

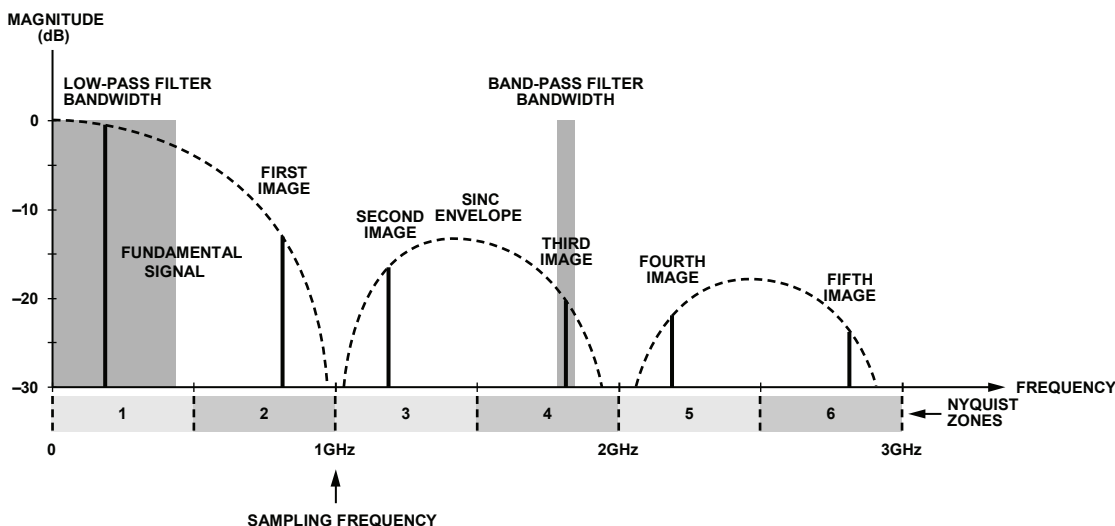


図 1. ナイキスト・イメージ

スーパーナイキスト動作の最適化

ナイキスト・イメージは sinc 応答に起因する減衰によって損なわれますが、高い周波数の RF のアプリケーションでは必ずしも使用できないわけではありません。信号レベルの減衰 (sinc エンベロープに起因) による S/N 比と SFDR の低下を許容できるアプリケーションなどはその良い例です。スーパーナイキスト動作を最適化するためのポイントは、サンプリング周波数、基本周波数、ナイキスト領域の選択にあたり、イメージ波が sinc 応答曲線のピークの比較的近くに置かれ、他のスプリアス・ノイズ (およびイメージ) がバンドパス・フィルタの阻止帯域に留まるようにすることです。適切な周波数関係を設定することで、ナイキスト・デバイスによる制約があっても、きわめて高い周波数の RF アプリケーションが実現できます。

ここでは、1000 MHz のサンプリング・クロックで動作する AD9912 の例を考えてみます。図 2 に、測定セットアップのブロック図を示します。

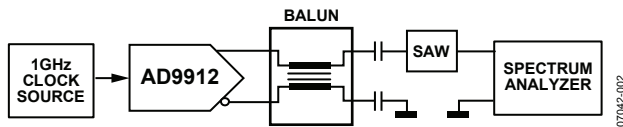


図 2. 測定のセットアップ

AD9912 内の DDS で、内蔵の 14 ビット DAC の出力に現れる 385 MHz サイン波を生成します。図 3 にフィルタ処理しない出力スペクトルを示します。このスペクトルは、SAW フィルタを除去してスペクトル・アナライザをバランの出力に接続したときのものです。図 3 では、基本波信号 (385 MHz) と 1 次、2 次、3 次のナイキスト・イメージ波 (それぞれ 615 MHz、1385 MHz、1615 MHz) がはっきりと示されています。ここで AD9912 のスーパーナイキスト性能を示すために使用するのが 1615 MHz の 3 次のイメージ波です。

SAW フィルタを用いたスーパーナイキスト動作

スーパーナイキスト動作は、バンドパス・フィルタを使用する必要があります。また、本書に示したスーパーナイキスト動作の場合、目的とするイメージ波はきわめて狭い帯域幅 (1615 MHz のシングルトーン) となります。表面弾性波 (SAW) フィルタはきわめて狭い帯域幅を提供できるため、この特定アプリケーションにとって最適のテクノロジーです。SAW フィルタでは余分な減衰を最小限に押さえつつ 3 次のイメージ波を取り込み、それ以外のスプリアス信号を大幅に抑制します。ここでは Sawtron SAW フィルタ (型番 STA0528A) を使用しており、その周波数応答特性を図 4 と図 5 に示しています。1615 MHz を中心とした 20 MHz のパスバンドを持っています。帯域外の応答特性で、基本波信号、不要なイメージ波、あるいはそのストップバンドに含まれるほかのすべてのスプリアス信号を抑制します。

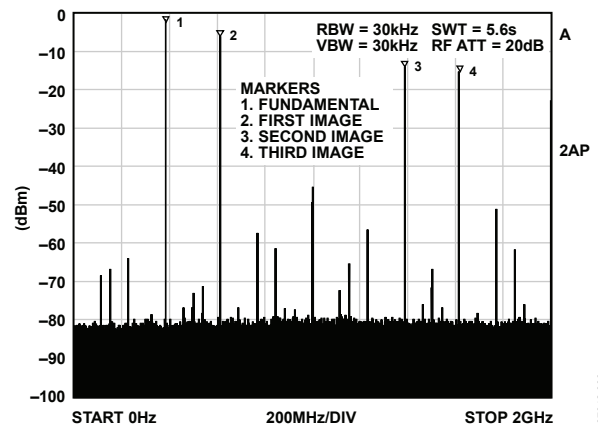


図 3. フィルタ未処理の出力スペクトル

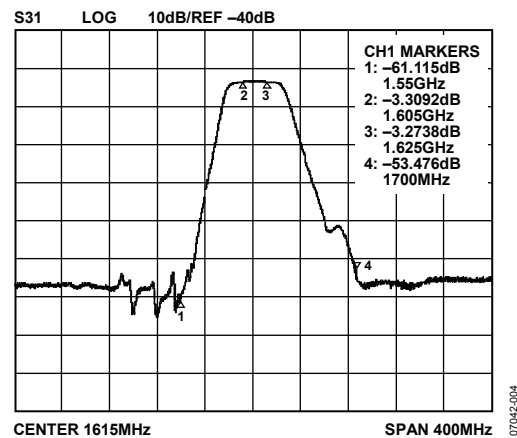


図 4. SAW フィルタ周波数応答、ナローバンド (400 MHz)

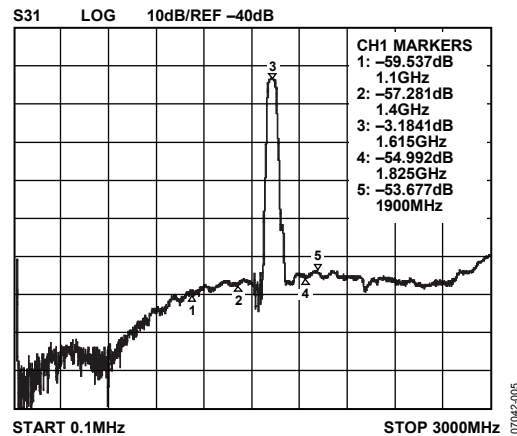


図 5. SAW フィルタ周波数応答、ワイドバンド (3 GHz)

SFDR 性能

図 6 に、フィルタされた出力のスペクトルを示します。ここでは、1615 MHz の所望のイメージ波、実質的に除去された 385 MHz 基本波信号や図 3 のフィルタ未処理の出力スペクトルに現れていた不要なイメージ波やその他のスプリアス・ノイズが観測されず、最悪の有害信号は、3 次のイメージ（目的）信号に対して約 48 dB しか抑制されていない 2 次のイメージ波（1385 MHz）です。3 次のイメージ信号（1615 MHz）は 1000 MHz のサンプリング・クロックよりかなり高い周波数に現れるため、スーパーナイキスト動作が適切に示されています。完全性を期すために、図 7 に周波数ズームしたものを（30 MHz 帯域幅）を示します。

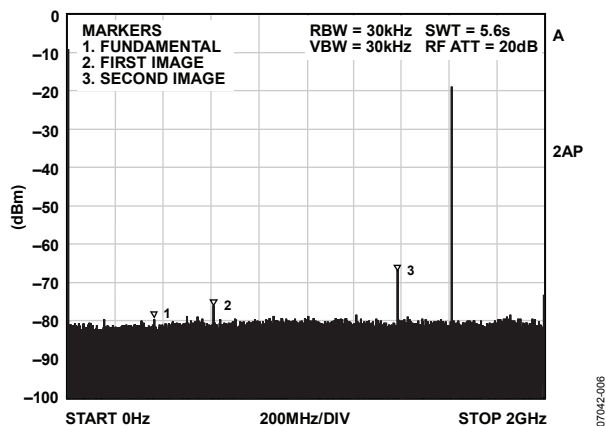


図 6. フィルタされた出力スペクトル

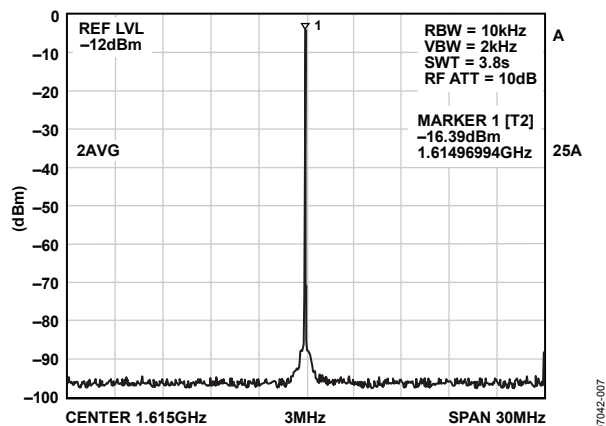


図 7. 1615 MHz のスーパーナイキスト中央の 30 MHz 周波数ズーム

図 6 と図 7 は、3 次のナイキスト・イメージ信号（1615 MHz）を用いた場合の AD9912 の SFDR 性能を示しています。一方、図 8 は広い DDS チューニング周波数レンジにおける AD9912 の最悪時の SFDR 性能を示しています。

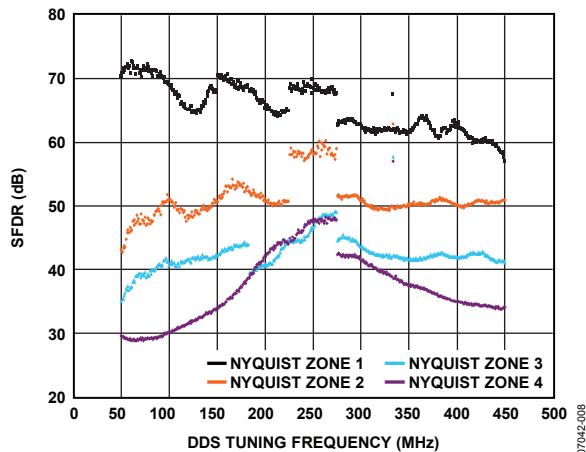


図 8. AD9912 の代表的な SFDR 性能
（ナイキスト領域 1～4）

図 8 では、ナイキスト領域ごとに色分けされた 4 つのトレースを示しています（各ナイキスト領域については、図 1 を参照）。図の横軸は DDS チューニング周波数に対応しています。各データ・ポイント間は約 1 MHz の間隔です。これらのデータ・ポイントは、DDS チューニング周波数に基づく代表的な広帯域 SFDR 性能を示しています。各ポイントでの広帯域 SFDR 性能を示す周波数帯域幅の範囲は 400 MHz です。この範囲は両端の禁止領域 50 MHz を除いたナイキスト領域です。禁止領域は、ナイキスト領域の帯域幅の 10% としています。また、各データ・ポイントの SFDR 性能はそれぞれのナイキスト領域におけるイメージ信号の振幅との相対値になります。

ここで、前述したテスト・ケースについて考えてみましょう。DDS サンプル・レートは 1 GHz、出力信号は 385 MHz でした。この場合は、4 番目のナイキスト領域に現れる 3 次のイメージ（1615 MHz）に注目します。図 8 から、SFDR 性能の代表値は約 36 dB となります。この値を得るには、まず横軸の 385 MHz の位置から縦線を垂直に伸ばします。そうすれば、4 番目のナイキスト領域の SFDR のトレースと交差します。次に、その点を通る水平線を縦軸まで引けば 36 dB が求められます。

図 8 では 36 dB SFDR になりますが、テスト・ケースでは 48 dB SFDR になります。このように値が大きく異なる理由は、図 8 がナイキスト帯域幅の 80% における SFDR 性能を示しているためです（バンドパス・フィルタ処理のメリットが得られない）。しかし、テスト・ケースの場合は有害なスプリアス成分のほとんどが SAW フィルタで除去されます。したがって、図 8 に示されている結果は、最悪時の SFDR 性能についての控え目な指標とみなすことができます。このテスト・ケースでは、バンドパス・フィルタ処理によって図 8 の SFDR 性能よりも大幅な改善が可能であることを示しています。

図8のトレースには通常とは異なる特徴がいくつかあるため、もう少し説明を加えます。まず、333 MHzのデータ・ポイントを見てみます。このポイントは、隣接データ・ポイントに比べてSFDRが大幅に改善されています。これは、333 MHzが1 GHzの1/3という特有の周波数のためです。周波数がサンプル・レートの1/3の場合、偶数次のDAC高調波（およびそのナイキスト・イメージ）は基本周波数（およびそのイメージ）と一致します。一方、奇数次のDAC高調波はサンプリング周波数の整数倍で発生します。したがって、高調波は基本周波数（およびそのイメージ）に埋もれるか、帯域外の周波数となるため、いずれの場合もSFDRの測定から除外されます。DAC高調波は一般にSFDR性能を抑制する原因となるため、333 MHzの基本周波数でそれらが効果的に消え去るので性能が改善されます。

図8のもう一つの特異な点は、ナイキスト領域1、2の両パターンにみられる250 MHzを中心とする凸領域です。第2次高調波がSFDR禁止領域に入り込むと、この凸が発生します。第2高調波は最初の2つのナイキスト領域でSFDR性能を制限する原因になることがよくあるため、それが禁止領域内に落ちてしまうと、SFDR性能が見かけ上改善されます。

図8の3つ目の特異な点は、ナイキスト領域3における2箇所の不連続性です。183 MHzを下回るDDSチューニング周波数範囲においては、ナイキスト領域3では第2次高調波が支配的です。DDS周波数が183 MHzに達すると、第3次高調波が3番目のナイキスト領域の右側にある禁止領域を抜け出し、SFDR測定領域に入ります。ナイキスト領域3のsincエンベロープの形状に従って、第3次高調波の振幅はDDSが183 MHzにチューニングされたときに（SFDR測定バンド内では）最大となります。これはSFDR性能を制限する原因となるため、183 MHzにおけるSFDRの急激な低下をまねきます。このポイントから先は、DDS周波数の増加による第3次高調波の振幅の低下（このとき基本イメージ波の振幅は増大）に伴ってSFDR性能は改善されます。約275 MHzのDDSチューニング周波数では、第2次高調波が3番目のナイキスト領域の右側にある禁止領域を抜け出て、SFDR測定領

域に入ります。これによって、275 MHzでSFDRは急激に低下します。

図8の最後の特異な点は、275 MHzのナイキスト領域4のパターンにみられる不連続性です。この周波数では、第2次高調波が4番目のナイキスト領域の左側にある禁止領域を抜け出て、SFDR測定領域に入ります。ナイキスト領域4のsincエンベロープの形状に従って、第2高調波の振幅はDDSが275 MHzにチューニングされたときに（SFDR測定バンド内では）最大となります。これはSFDR性能を制限する原因となるため、275 MHzでSFDRは急激に低下します。

図8の横軸は、DDSチューニング周波数を示しています。最初のナイキスト領域では、基本周波数とDDSチューニング周波数は同じです。ほかのナイキスト領域では、基本イメージ波の絶対周波数とDDSチューニング周波数は異なります。イメージ周波数(f_{image})の位置は、DDSチューニング周波数(f_{DDS})と直接関係があります。表1に、 f_{image} と f_{DDS} の関係を示します。

表1 f_{DDS} の関数としての f_{image}

Nyquist Zone	f_{image}
1	f_{DDS}
2	$1 \text{ GHz} - f_{\text{DDS}}$
3	$1 \text{ GHz} + f_{\text{DDS}}$
4	$2 \text{ GHz} - f_{\text{DDS}}$

結論

AD9912は、通常のナイキスト制限値（サンプル・レートの1/2）を超える周波数合成を必要とするアプリケーションに適用できます。1 GHzのサンプル・レートをサポートしているため、高周波数RFアプリケーションに対応したイメージ波を発生できます。本書では、適正なバンドパス・フィルタを用いることで1.615 GHzを超える周波数合成を実現する方法を示しました。