

## Application Note

## 適切な高速 D/A コンバータの通過帯域平坦性の解明、第 2 部



Rob Reeder, Camilo A. Garcia Trujillo

## 概要

これは、データコンバータのアナログ入力または出力帯域幅を測定する方法について説明する 2 部構成のシリーズの 2 回目です。第 1 回では、基本的な周波数応答測定手法と、この手法を用いた A/D コンバータ (ADC) のアナログ入力帯域幅の測定方法について説明しました。第 2 回目となる今回の記事では、D/A コンバータ (DAC) のアナログ出力について説明し、測定の妨害による定在波などの影響を回避するためのヒントを掲載します。

## 目次

1 はじめに.....	2
2 基本的な周波数応答の測定方法: DAC.....	3
3 基本的な周波数応答の測定方法: DUC が有効化されている DAC.....	4
4 通過帯域平坦性測定に関する注記.....	6
5 まとめ.....	7
6 参考資料.....	7

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

現在、通過帯域の平坦性を測定する方法は実質的に 3 つあります。

- 基本的な周波数応答測定の方法で、通常は入出力ネットワークとコンバータの帯域幅応答をまとめて収集するときに使用されます。
- ベクトル ネットワーク アナライザ (VNA) 法は、VNA を使用してコンバータの帯域幅応答のみを収集するため、コンバータのみを高精度で正確に測定できます。この方法では、アナログ入出力ネットワーク接続 [1-3] を効果的に削除します。
- 入力パルス法では、高周波パルス ジェネレータを使用して高周波の方形波を入力します。この方法では、純粋なパルス応答を効果的に入力し、ADC 出力キャプチャ応答と理想的な方形波を比較します。この組み合わせに少し計算を加えると、ユーザーはコンバータの帯域幅を効果的に抽出できます。

このシリーズでは、ADC と DAC の両方に適用される基本的な周波数応答測定方法のみに焦点を当てています。この方法は、テキサス インストルメンツ (TI) のデバイスをサンプルのテスト ケースとして使用します。第 1 回では ADC に焦点を当て、第 2 回では DAC について説明します。本書では、ADC 向けに ADC と DAC の両方の帯域幅を実数モードとバイパス モードで設定し、テストする方法と、AFE 向けに DDC や DUC などの複雑なデジタル機能を有効にする方法に関するガイダンスを提供します。

## 2 基本的な周波数応答の測定方法: DAC

DAC の平坦性周波数応答の測定プロセスは、最初の回で ADC について説明したプロセスと似ていますが、いくつかの違いがあります。最初のステップは、テストに適した DAC 構成を用いた DAC の評価ボードのセットアップです。測定の設定は、図 2-1 に示すとおりに行う必要があります。

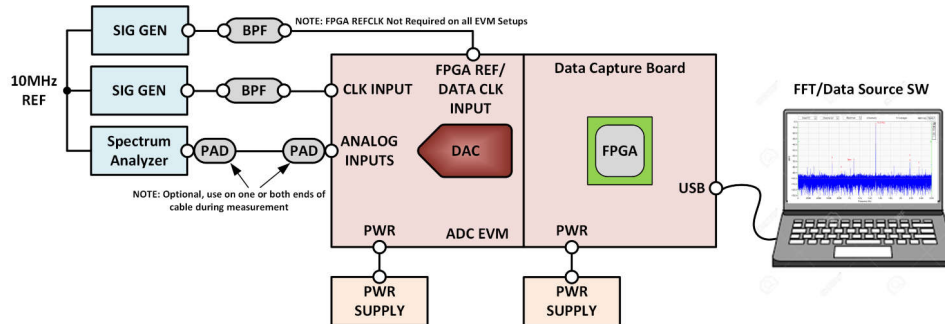


図 2-1. DAC の基本的な周波数応答測定方法のセットアップ

一部の DAC には、スプリアスを抑制したり周波数応答を平坦化するため、異なる出力モードやフィルタがあります。DAC が機能しているモードと、そのモードを使用するときに制限があるかどうかを確認します。たとえば、一部の DAC は DAC の更新レートで動作する逆 sinc () フィルタを採用しています。これにより、逆 sinc () フィルタを使用して、サンプルアンドホールド出力の周波数応答を平坦化できます。他の DAC では、異なるナイキストゾーンに異なるフィルタがあります。このため TI は、動作モードがそれをサポートしていることを確認せずに、内部フィルタを使用する場合や、それに応じて動作モードを変更できる場合は、DAC の異なるナイキストゾーンにわたりスイープすることは推奨しません。

セットアップの接続後、DAC の出力トーンを確認し、スペクトラム アナライザの設定を適切に調整します。通常、周波数通過帯域平坦性を測定する場合、連続波トーンによって DAC の出力すべてが単一の周波数ビン内に確実に収まるようになります。この点を考慮し、スペクトル アナライザのスパンを非常に狭くし、基本振幅が安定するまで解像度の帯域幅を狭くするようにしてください。

セットアップを確認したら、スイープ測定の開始周波数と停止周波数を選択し、スペクトル アナライザのマーカーを使用して、スイープする帯域に沿ったいくつかのポイントで DAC の出力をチェックします。これは、スペクトル アナライザの振幅基準を設定するのに役立ちます。これは追加の手順ですが、これによりユーザーがスペクトラム アナライザをオーバードライブしたり、不適切な測定結果を収集したりしないようになります。

次に、開始周波数で設定された入力トーンを DAC に提供し、各周波数でスペクトラム アナライザによって示される振幅出力を記録しつつ、DAC への入力の周波数を変更することで、目的の帯域全体のスイープを開始します。収集されたデータは 2 列に分けられ、列 A は各周波数ステップポイントに等しく、列 B はスペクトル アナライザに示されている基本振幅レベルに等しくなります。

スペクトラム アナライザの動作とケーブルの損失を考慮し、一定の無線周波数 (RF) ソースを使用し、ケーブルとスペクトラム アナライザの両方を周波数全体にわたりスイープすることを推奨します。たとえば、システム基板または評価基板上の DAC のアナログ出力からケーブルを取り外し、このケーブルと測定セットアップ用の RF アダプタを信号ジェネレータの出力に接続します。信号ジェネレータの振幅を一定の、可能であれば DAC の出力の振幅に近い値にします。次に、信号ジェネレータの振幅を変更せずに、スペクトラム アナライザの入力に接続しつつ、同じ意図した測定周波数範囲全体で信号ジェネレータの出力をスイープし、信号ジェネレータからのみスペクトル アナライザによって示される基本データを記録します。これは、ケーブルおよびスペクトラム アナライザ内の、その周波数範囲全体での損失をキャプチャします。DAC 測定からのこの損失を減算すると、より正確な結果が得られます。

このセットアップでは、PC を使用して FPGA またはフィールド プログラマブル ゲート アレイを搭載したデータソース基板を制御し、評価ボード内の DAC のデジタル入力に渡すデータを供給し、制御します。必要な電源入力とクロック入力はすべて、DAC の評価ボードやデータソース基板に接続します。機器の基準周波数出力と入力を接続することで、すべてのクロック入力とスペクトラム アナライザのリファレンスをロックすることが重要です。最後に、周波数ドメインの出力を測定するため、DAC のアナログ出力をスペクトラムアナライザに接続します。TI は、スプリアスや高調波による測定の中断を防止するため、それに応じて周波数計画を立てることを推奨します。

### 3 基本的な周波数応答の測定方法:DUC が有効化されている DAC

ここまでで説明した手順は、実数サンプリングを使用する DAC についての手順です。つまり、選択した信号をベースバンドから選択した周波数にアップコンバートするためにデジタルアップコンバータ (DUC) を使用しない場合です。テキサスインスツルメンツ (TI) の AFE などのトランスミッタチェーン内で複合ミキサーを使用するデバイスでは、通過帯域の平坦性スイープを行うプロセスに追加する必要があります。このステップは、数値制御発振器 (NCO) の周波数を調整し、DAC の出力周波数を、目的の周波数帯域全体で出力をスイープするのに適切な周波数にします。NCO 使用時、ADC の帯域幅をキャプチャするために、このシリーズの前の記事で説明したように DAC DUC 向けの NCO を処理します。例として、図 3-1 および図 3-2 を参照してください。ここでは、トランスミッタチャンネルの出力ネットワーク例と、3GHz 帯域幅の整合ネットワークを使用して AFE の TX チャンネルから取得したデータを示します。

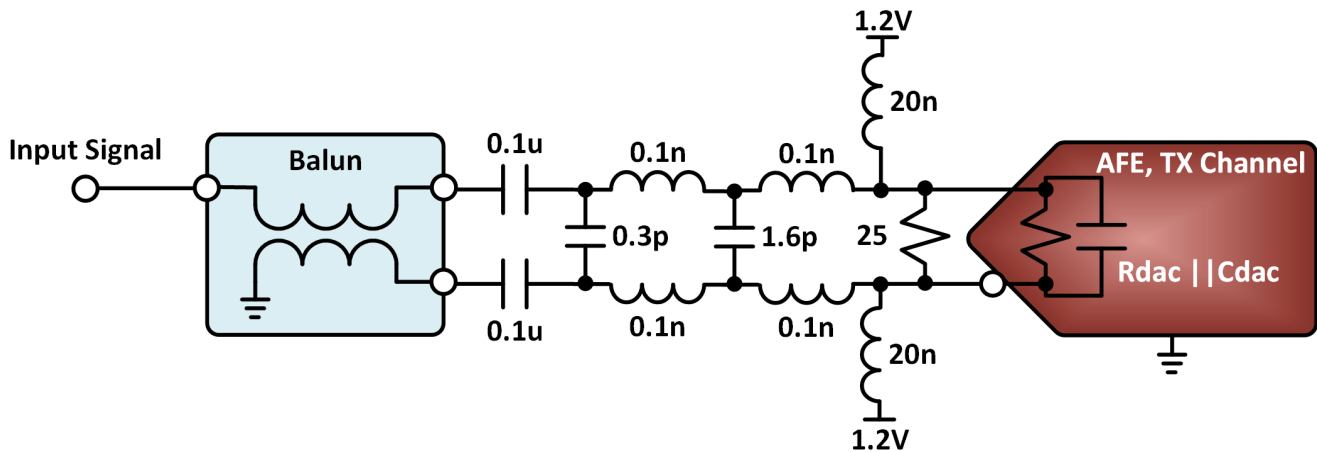


図 3-1. DAC に接続された出力ネットワーク例

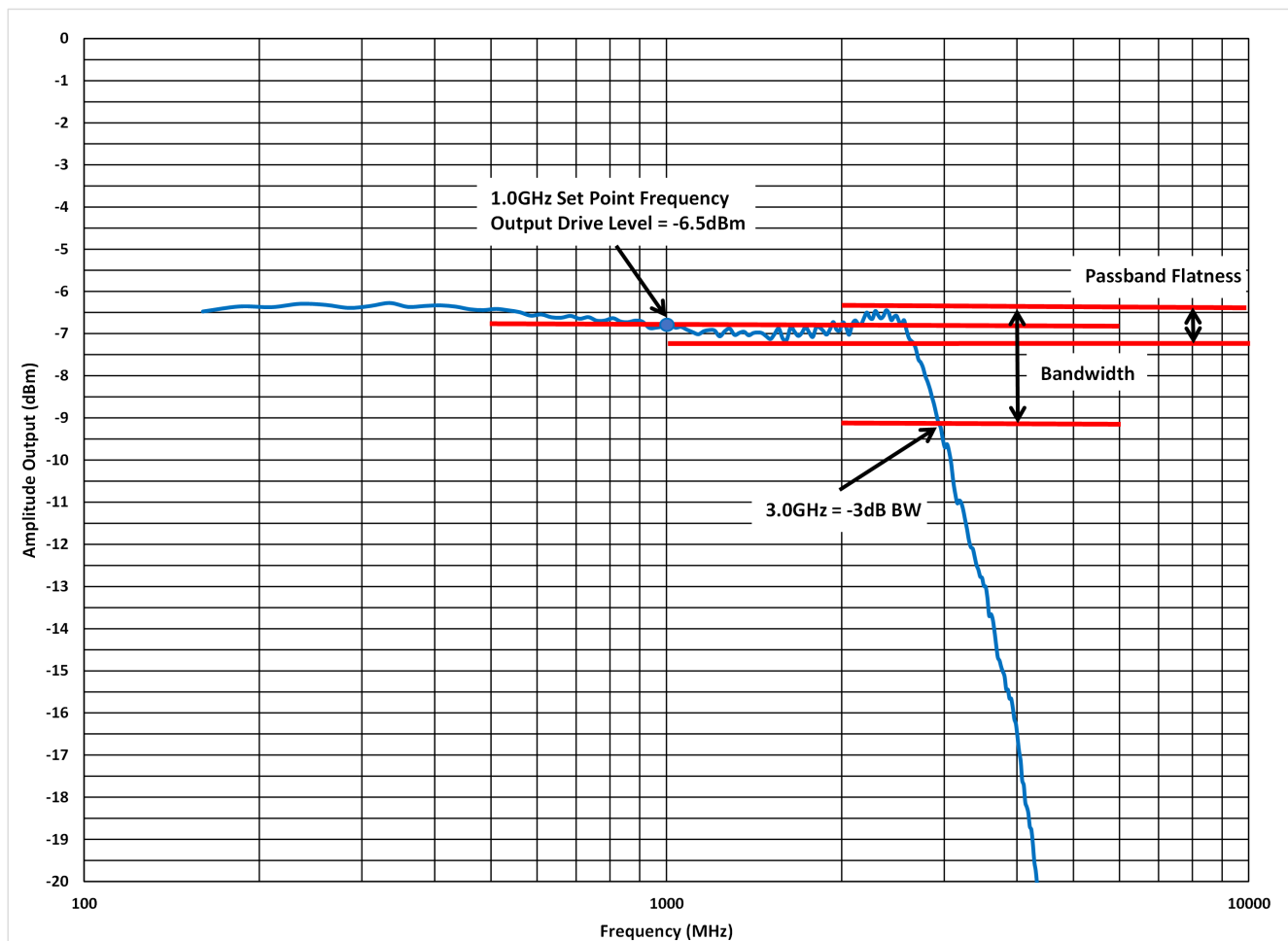


図 3-2. AFE DAC 出力通過帯域の平坦性応答:DUC イネーブル

## 4 通過帯域平坦性測定に関する注記

最後に、TI は、ADC または DAC のいずれかで、この測定の実行時、いくつかのインライン減衰パッドを入出力ケーブルの一方または両端で使用するをお勧めします。TI は、3dB～6dB の減衰パッドを推奨します。この記事の手順に従って、測定からこの追加の損失を調整します。信号ジェネレータまたはスペクトラム アナライザからコンバータのアナログ入出力に入出力ケーブルで損失の多いパッドを追加する主な理由は、インピーダンスの不整合によって生じる定在波に対処することです。

信号ジェネレータまたはスペクトラム アナライザは、負荷 ADC への電力を最大にする (または DAC から電力を受け取る) ため、良好かつ堅固な 50Ω インピーダンスマッチングを期待していることに注意してください。コンバータの入出力インピーダンスは、周波数全体にわたり安定して 50Ω になることは決してありません。特に、数 GHz のスパン全体にわたって、帯域幅がロールオフ始めたときはそうです。定在波は蓄積されて測定値に現れ、接続パスに損失を追加することで対処しなかった場合、測定された周波数帯域全体で余分なリップルが発生します。図 4-1 に、例を示します。どちらの測定結果も、ケーブルの片側の端に減衰パッドがあり、もう一方の測定値は図 4-1 の凡例に記載されているように行われなかったことを除き、まったく同じ方法で収集されました。

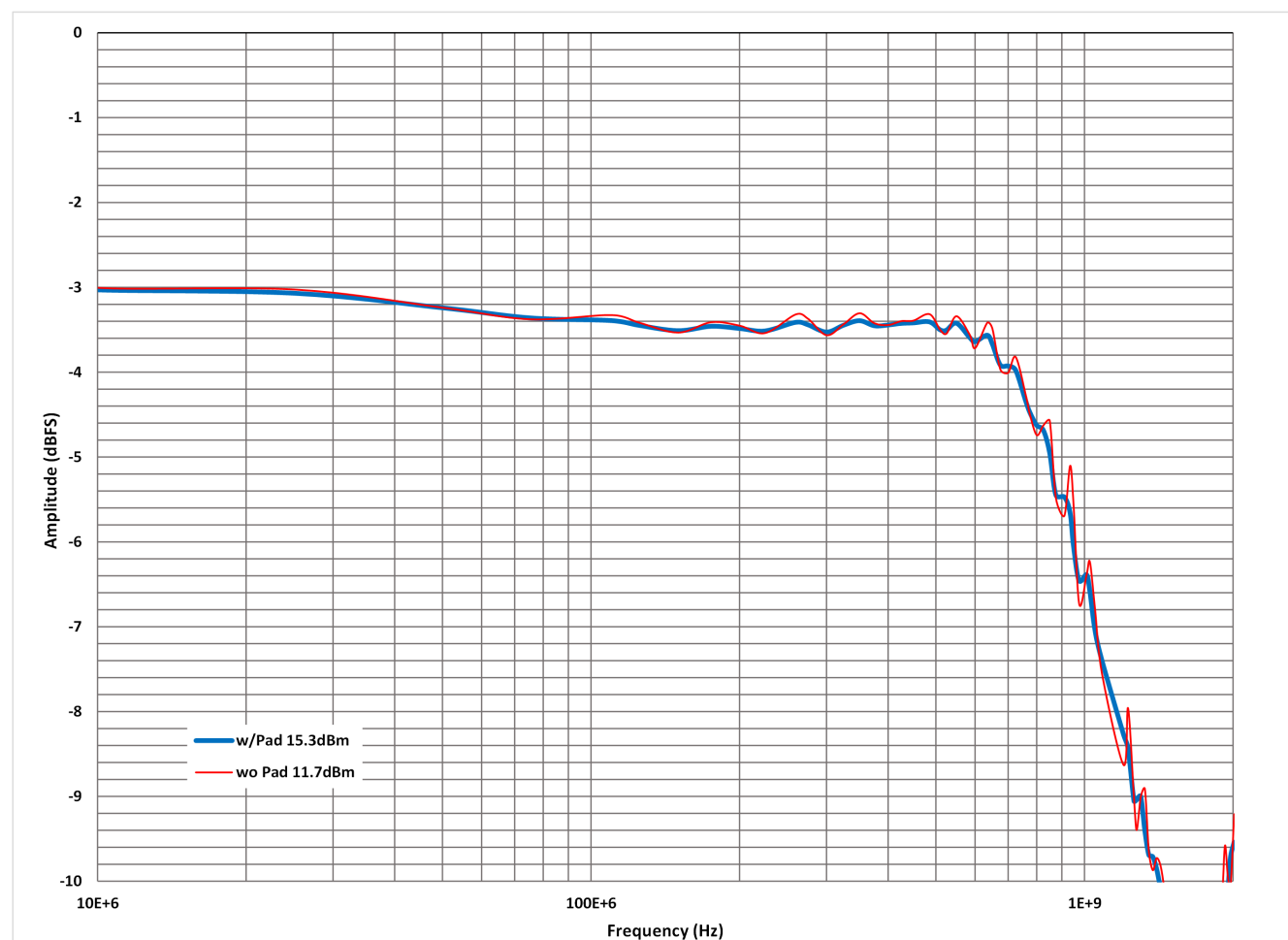


図 4-1. ケーブルで 4dB 減衰を使用する場合と使用しない場合の ADC 出力応答

## 5 まとめ

特に、コンバータが GHz 以上の範囲に移行する現状では、システム設計への統合を評価する際には、データコンバータのアナログ入力または出力帯域幅は重要な要件となります。基本的な周波数応答測定方法を用いることは、データコンバータと、すべての通過帯域平坦性指標を取得するために使用するフロントエンドネットワークの周波数応答を適切に測定および収集する効果的な方法です。

ADC または DAC の帯域幅をキャプチャする場合、セットアップ時に追加の接続損失を逆算し、DDC や DUC などのデジタル機能を使用する場合は NCO を適切に配置し、DAC の出力応答内で使用される出力モードやフィルタに合わせて調整することを忘れないでください。最後に、機器ケーブルに損失の多いパッドを追加し、在波を最小限に抑えます。これらの推奨事項を遵守することで、次の設計で最良の帯域幅の結果が得られ、リップルを低減できます。

## 6 参考資料

- テキサス・インスツルメンツ、[「S-パラメータとは何か？」](#)、技術記事。
- テキサス・インスツルメンツ、[「VNA とは何か？」](#)、技術記事。
- テキサス・インスツルメンツ、[「周波数応答とは何か？」](#)、技術記事。
- Reeder, Rob. 2020.*RF* コンバータのアナログ入力に関するフルスケールの謎の解明。Electronic Products、2020 年 4 月 13 日版

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月