

Application Note

適切な高速 A/D コンバータの通過帯域平坦性の解明 Part 1



Rob Reeder, Camilo A. Garcia Trujillo

概要

アナログ入力または出力帯域幅の需要が高くなると、コンバータの帯域幅（通過帯域の平坦性測定とも呼ばれる）を理解することが非常に重要です。通過帯域の平坦性測定は、混乱したり、誤解を招くことがあります。ユーザーが MSPS と GSPS の周波数のどちらでサンプリングを行う場合でも、コンバータに必要な帯域幅、コンバータに接続するアナログ入出力ネットワーク、またはその両方を明らかにする場合には、同じ原理が適用されます。

この 2 部構成のシリーズの本書では、A/D コンバータ (ADC) と D/A コンバータ (DAC) の両方に適用できる、基本的な周波数応答測定方法について説明します。この方法は、内部のデジタル ダウンコンバータ (DDC) 機能またはデジタル アップコンバータ (DUC) 機能を使用する場合と使用しない場合があります。この方法は、レシーバ設計でコンバータのアナログ帯域幅の測定と特性評価を行うユーザーのためのものです。

目次

1 はじめに.....	2
2 基本的な周波数応答の測定方法:ADC.....	3
3 基本的な周波数応答の測定方法:DDC をイネーブルにした ADC.....	5
4 まとめ.....	6
5 参考資料.....	6
6 改訂履歴.....	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応答の帯域幅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 の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 インスツルメンツ (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:ADC

基本的な周波数応答の測定方法では、TI の HSDCPro のようなデータキャプチャプログラムを使用して、必要な帯域幅全体にわたって高速フーリエ変換 (FFT) の基本レベルを収集します。たとえば、アナログ フロントエンドが 図 2-1 に示すようなもので、広帯域バランを使用している場合、バランの二次出力と ADC のアナログ入力の間に単純な抵抗性入力ネットワークが存在します。このタイプの入力ネットワークは、広帯域入力ネットワーク [4] で一般的です。

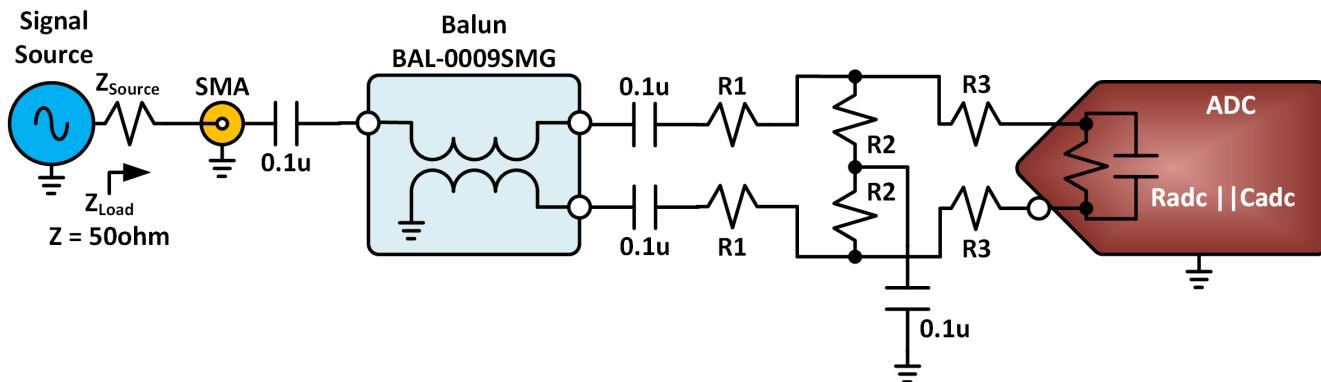


図 2-1. ADC に接続された入力ネットワークの例

測定用のコンバータ評価基板 (EVM) または基板設計を設定します。基本的な設定を 図 2-2 に示します。有効なデータキャプチャを確認するには、ハードウェアとソフトウェアの両方について、ユーザ ガイドの手順に従って通常どおり EVM を構成します。クロック信号の入力、およびアナログ入力信号には、十分な電流定格と低位相ノイズの信号ジェネレータを持つ低ノイズ電源を使用して、さらに、信号ジェネレータによって生成されるノイズや高調波を抑制するための適切なフィルタを使用します。

この測定では、アナログ入力をフィルタリングしないでください。これにより、信号ジェネレータは、フィルタによる減衰なしに、対象の複数の周波数にわたってスイープでき、通過帯域の平坦性または帯域幅の測定値を収集できます。FFT データキャプチャソフトウェア (HSDCPro, Matlab, Python) を使用すると、設定された各周波数ステップで適切なデータを収集できます。

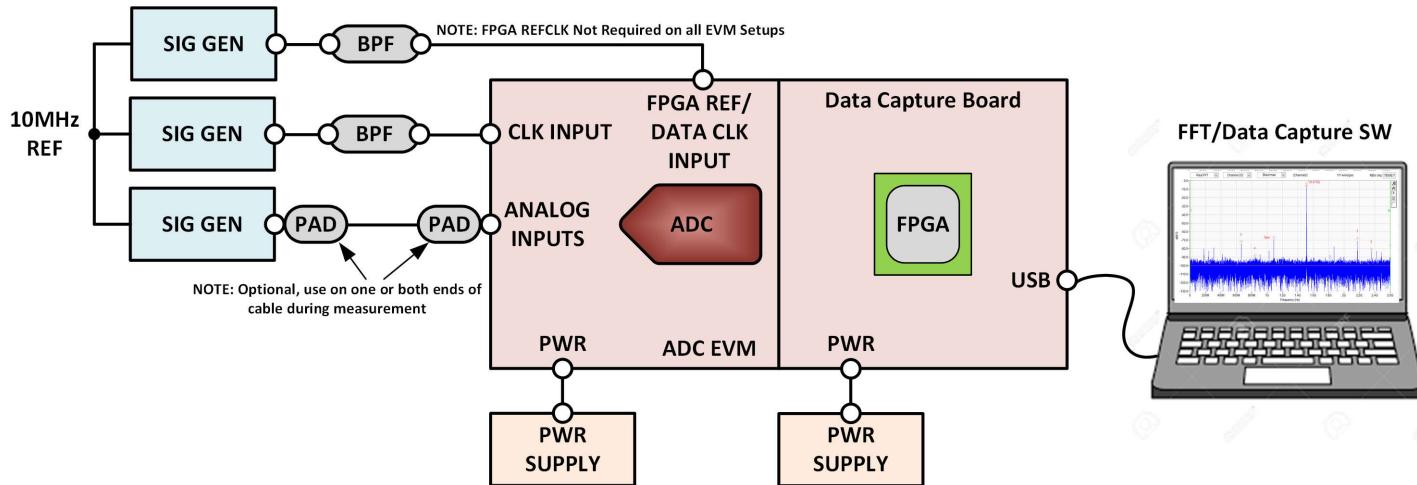


図 2-2. ADC の基本的な周波数応答測定方法のセットアップ

次のステップでは、通過帯域の平坦性スイープ測定の開始周波数と停止周波数、初期アナログ入力駆動レベルを設定するための基準点周波数を決定します。ユーザーが基準点の周波数を手動で取得する場合は、帯域幅の輪郭を把握するために、各ナイキスト ゾーンにわたって少なくとも 5 ~ 10 個のデータ ポイントを取得します。

狭い周波数帯域または部分的な周波数帯域に关心がある場合、または ADC への入力ネットワークに通過帯域アンチエイリアス フィルタが存在する場合は、対象の帯域の中心周波数を基準点周波数として使用します。

より広帯域の測定やスイープを使用する場合は、設定点の周波数として約 1/3 の帯域幅を使用することで、周波数が低すぎたり、高すぎたりしないことが保証されます。そのため、測定値の上限または下限帯域でロールオフが発生する場合があります。ADC のデータシートでは、約 8GHz の帯域幅が規定されています。8GHz の 1/3 は約 2.67GHz なので、これが設定点周波数です。[図 2-3](#) を参照してください。

アナログ入力に信号ジェネレータを接続して、その周波数で設定点レベルを設定または調整します。これは、FFT キャプチャにおける基本信号の振幅であり、入力ドライブ レベルの仕様です。設定点レベルを -3dBFS または -6dBFS より少し低く調整すると、十分なヘッドルームが確保されます。これは、対象の信号帯域幅が測定の開始周波数設定点および停止周波数設定点全体にわたって上下に移動する可能性があるためです。

信号ジェネレータで使用されるレベルはデシベル ミリワット単位で示しています。信号ジェネレータの出力設定の振幅値は、信号ジェネレータの出力のみを記録することに留意してください。ケーブル損失または RF 配管、この接続に沿ったコネクタが原因で、EVM の SMA コネクタやユーザ自身の基板などのエントリ ポイントで振幅レベルが異なる可能性があります。実際の信号レベルをより正確に把握するため、EVM の入力ネットワーク前段に信号が到達する時点での測定結果から、ケーブルなどによる損失を補正する追加のキャリブレーション手順を実施します。

設定点周波数と入力ドライブ レベルの調整が完了したら、そのままにします。信号ジェネレータレベルをさらに調整する必要はありません。この値は、設定点の周波数だけでなく、周波数スイープ全体で必要な信号振幅のキャリブレーション ポイントを提供します。信号ジェネレータの周波数設定のみをスイープの開始周波数ポイントに移動し、FFT キャプチャを行います。ユーザーが全周波数範囲をスイープするときの、開始周波数とその後の各ポイントの FFT キャプチャの基本振幅を記録します。スイープが停止周波数に達するまでこれを続けます。

スイープの最後に達したら、データを 2 つの列に編成します。1 つは周波数ステップポイントごとのもので、もう 1 つは優先データ キャプチャソフトウェアを使用してキャプチャした FFT の基本振幅レベルです。

結果の測定値からプラスおよびマイナスレベルを取得して、[図 2-3](#) に示すように、スイープ測定値または結果として得られる通過帯域平坦性曲線における実際の信号振幅を決定します。この場合、設定点周波数が -3dBFS に設定されているため、 -6dBFS ポイントから -3dB の帯域幅が得られます。結果の測定スイープにこれらのパラメータを適切に記録する方法については、[図 2-3](#) の例を参照してください。

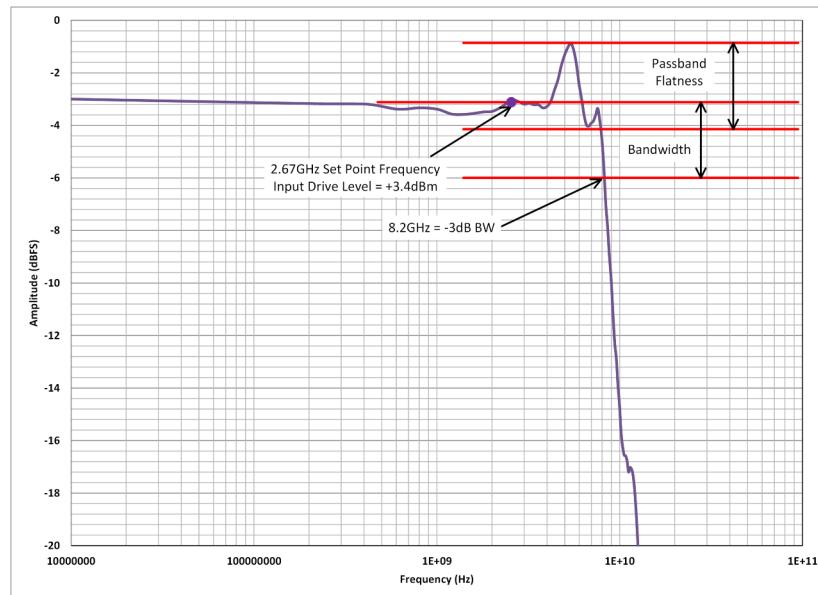


図 2-3. ADC 入力通過帯域の平坦性応答: バイパス モード

3 基本的な周波数応答の測定方法: DDC をイネーブルにした ADC

この ADC の例は、実数サンプリングを使用しています。これはバイパス モードと呼ばれることがあります。内部 DDC を使用して、優先する信号をベースバンドにダウンコンバートしていません。AFE などのレシーバ チェーンで複合ミキサを使用するデバイスでは、適切な通過帯域の平坦性スイープを利用するには、さらにいくつかの手順が必要です。入力が全周波数範囲にわたってスイープされて入力信号を適切にキャプチャするように、数値制御発振器 (NCO) の周波数を調整します。

このタイプの測定には、2 つの主な方法があります。最初の方法は、NCO を 1 つの周波数に設定し、次に DDC デシメーション フィルタの通過帯域 (通常は約 80%) でカバーされる周波数の全体で入力をスイープします。

この方法は、次の 2 つの条件を満たす場合にのみ推奨します。

- DDC 後の帯域幅は帯域幅を完全にカバーできる。DDC デシメーション フィルタにより、通過帯域外のすべての入力が減衰するため、測定精度が無効になります。
- アプリケーションでレシーバ チェーンが動作している場合は、NCO を測定が記録される周波数に維持する。これは必須要件です。最も正確な測定値を得るには、DDC デシメーション フィルタの通過帯域リップルなどの効果をキャプチャできるように、NCO を 1 つの周波数に維持する必要があります。通過帯域の平坦性測定を行った後に NCO を移動すると、通過帯域がシフトするため、誤差が発生します。この条件は主に、組込み DDC を搭載した従来のコンバータに当てはまります。これは、現在の DDC テクノロジーは、帯域内ピークツーピークのリップルが 0.2dB 未満のデバイスを使用するのに十分進歩しているためです。

両方の条件が真である場合、説明している測定手順の変更点は、DDC 通過帯域が帯域幅全体をカバーできるように NCO 周波数を設定することです。

一方または両方の条件が満たされない場合、2 つ目の方法は、ユーザーが測定している帯域幅全体にわたって入力信号をスイープしながら NCO 周波数を変更することです。たとえば、ユーザーは、NCO を入力トーンから一定の距離 (10MHz など) に常に保ちながら、入力トーンを 1.5GHz から 2.5GHz まで 10MHz ずつスイープして、2GHz を中心とした 1GHz 帯域を 101 ポイントで測定する必要がある場合があります。この方法では、DDC フィルタの帯域内リップルなどの効果はキャプチャされません。これにより、NCO が入力トーンとともに移動するためです。したがって、他の外部要因の変動に比べて、DDC フィルタの帯域内リップルは十分に小さく、無視できると仮定しています。

NCO 周波数がナイキスト境界に近づかないように周波数計画を立ててください。ナイキスト境界に近づくと、スペクトル上に望ましくないスプリアスやイメージが発生する可能性があります。

2 つ目の方法を使用する場合、説明した測定手順に対する 1 つの変更点は、入力信号のスイープ中を含め、手順全体を通して NCO 周波数を常に入力信号から特定の周波数だけ離しておくことです。NCO 周波数を入力信号から 10 MHz 離しておくのが一般的です。

4 まとめ

2部構成のシリーズの第1回では、基本的な周波数応答測定方法を使用してADCの帯域幅応答を測定する方法について説明しました。特に、コンバータがギガヘルツ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検討する際には、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。このシリーズの第2回は、DACに焦点を当て、定在波による測定の妨害などの影響を防止するためのヒントを掲載しています。

5 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。

Electronic Products、*RFコンバータのアナログ入力に関する謎の全容解明*

6 改訂履歴

Changes from Revision * (November 2025) to Revision A (November 2025)	Page
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	2
• すべての部品番号を ADC12DJ5200RF から ADC に、AFE8000 を AFE に変更しました.....	2

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默示保証、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、明示的または默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、(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、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