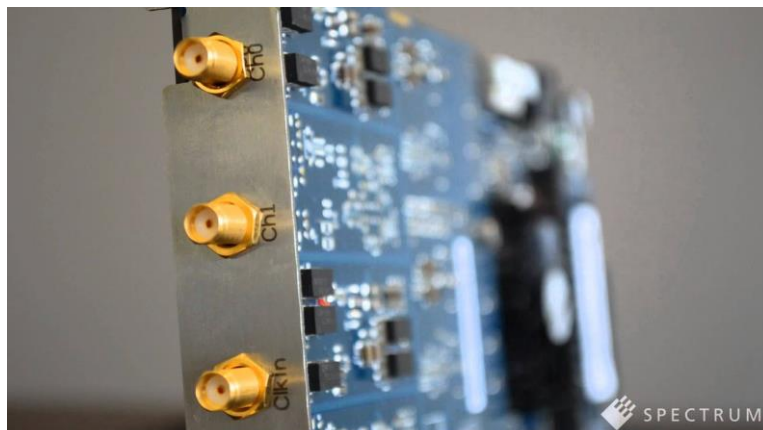


モジュラーデジタイザを使用した RF 測定

はじめに：

Spectrum 社「M4i シリーズ」などの最新のモジュラーデジタイザ (A/D ボード) は、あらゆる帯域幅でかつてないほど大きな帯域幅と高い解像度を提供します。汎用測定器のクラスに属しますが、多くの RF およびマイクロ波周波数の測定が可能です。この記事では、これらのモジュラーデジタイザ (A/D ボード) で実行できる一般的な RF 測定のいくつかの例を中心に説明します。



RF アプリケーション用のデジタイザ (A/D ボード) を検討する理由：

モジュラーデジタイザ (A/D ボード) は、以下の特性のいずれかが必要な場合、測定アプリケーションで大きな利点を提供します：

- 高い測定スループットが必要か？

マルチレーン PCIe ベースのモジュラーデジタイザ (A/D ボード) は、最大 3.4 GByte/sec の速度でデータをストリーミングできるため、コンピュータ内で簡単かつ高速に処理できます。これにより、取得後の分析のために非常に長い信号 (ディスクアレイを使用して最大数時間) を保存できます。

- 回路、デバイス、プロセスのトラブルシューティングを行うか、または分析と処理が必要な測定を行うか？

モジュール式デジタイザ (A/D ボード) は、データの測定、分析、処理を行う場合に最適なツールです。デジタイザ (A/D ボード) とコンピュータは密接に連携しているため、商用またはカスタムの分析ソフトウェアを使用して大量のデータを処理する場合に最適な機器となります。トラブルシューティングには、汎用測定器のインタラクティブな表示機能が必要ですが、自動化された信号の特性評価が必要な場合はデジタイザ (A/D ボード) が必要となります。

- 最小限の電力、小型フォームファクタ、複数チャンネルが必要か？

これは、最新のモジュラーデジタイザ (A/D ボード) の強みであり、カードごとに複数のチャンネル、システムごとに複数のカードがすべて完全に同期されています。Spectrum 社「M4i シリーズ」などのモジュラープラットフォームは、アナログまたはデジタルチャンネルの数とアナログおよびパターン波形生成機能を拡張できます。この特徴により、デジタイザ (A/D ボード) は、マルチチャンネル通信システムでの多入力多出力 (MIMO) 研究に最適です。

- コストを低く抑える必要があるか？

デジタイザ (A/D ボード) は、使いやすさ、インテグレーションの容易さ、および信頼性を備え、取得チャンネルあたりのコストを最も低く抑えます。

デジタイザ (A/D ボード) の選択 :

無線周波数測定には、3つの重要な特性を持つデジタイザ (A/D ボード) が必要です。ひとつは帯域幅です、デジタイザ (A/D ボード) は目的の信号帯域に一致する周波数範囲をサポートする必要があります。次は解像度で、測定のダイナミックレンジを決定します。最後の主要な考慮事項は、測定の更新レートに影響するデータ転送速度です。Table 1 は、RF アプリケーションの候補となる Spectrum 製 PCIe デジタイザ (A/D ボード) の特性をまとめたものです。

Model	Channels	Resolution	Sample Rate (MS/s)	Bandwidth (MHz)
M4i.2210-x8	1	8 bits	1250	500
M4i.2211-x8	2	8 bits	1250	500
M4i.2212-x8	4	8 bits	1250	500
M4i.2220-x8	1	8 bits	2500	1500
M4i.2221-x8	2	8 bits	2500	1500
M4i.2223-x8	2	8 bits	2500 (1 Channel) 1250 (2 Channels)	1500
M4i.2230-x8	1	8 bits	5000	1500
M4i.2233-x8	2	8 bits	5000 (1 Channel) 2500 (2 Channels)	1500
M4i.2234-x8	4	8 bits	5000 (1 Channel) 2500 (2 Channels) 1250 (4 Channels)	1500
M4i.4450-x8	2	14 bits	500	250
M4i.4451-x8	4	14 bits	500	250
M4i.4410-x8	2	16 bits	130	65
M4i.4411-x8	4	16 bits	130	65
M4i.4420-x8	2	16 bits	250	125
M4i.4421-x8	4	16 bits	250	125

Table 1 RF およびマイクロ波測定と互換性のある Spectrum 製デジタイザの概要

ダイナミックレンジ測定の例 :

表に要約されている仕様を確認すると、分解能と帯域幅のトレードオフが明らかになります。デジタイザモデルの選択は、アプリケーションによって決定されます。測定対象の信号の振幅の最大値と最小値の比率が小さい場合、分解能の低いデジタイザ (A/D ボード) を使用できます。送信レーダー信号の特性評価など、このタイプのアプリケーションは

ダイナミックレンジ要件が低い傾向にあります。一方、信号に高振幅成分と低振幅成分が混在している場合は、より高い分解能が必要です。ソフトウェア無線（SDR）や測距（レーダーなど）などのアプリケーションには、大きなダイナミックレンジを持つデジタイザ（A/D ボード）が必要です。Figure 1 は、Spectrum 社 SBench 6 ソフトウェアを使用して表示および処理された、14 ビット分解能の Spectrum M4i.4450-X8 A/D ボード入力に単純なアンテナを接続した結果の波形を示しています。波形の時間領域と周波数領域の両方のビューが表示されています。これは、高ダイナミックレンジ信号の例です。

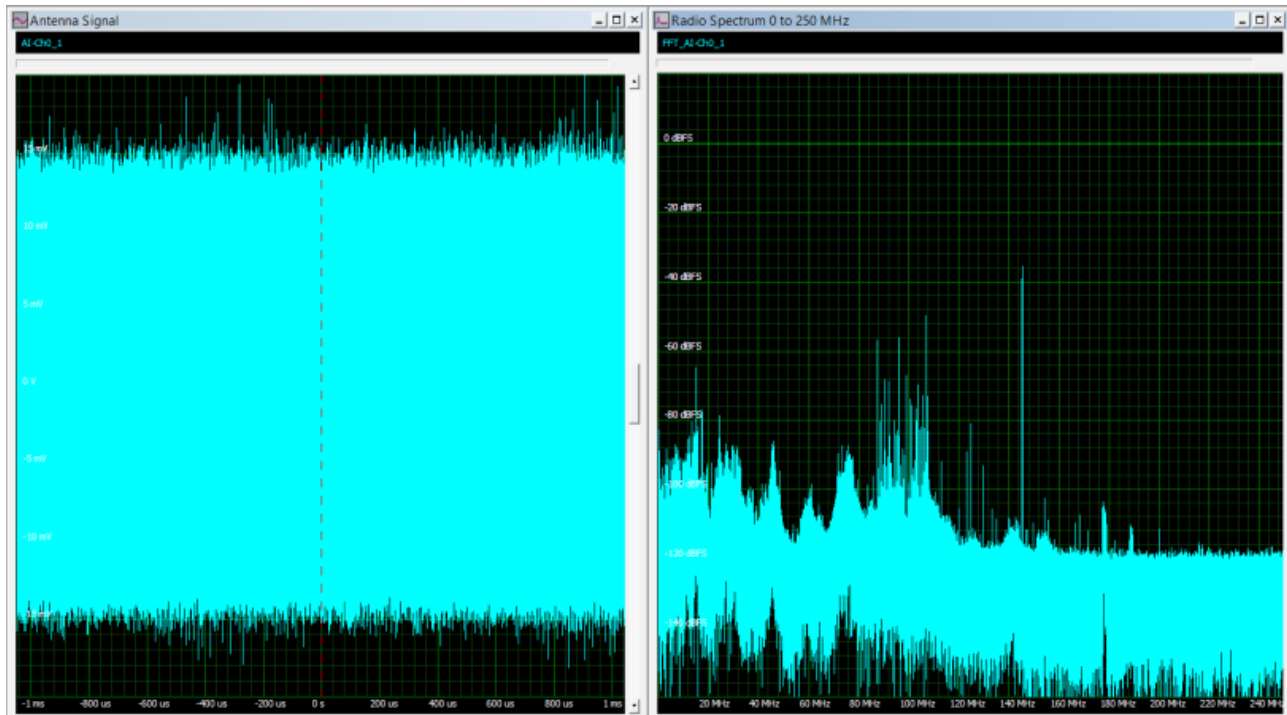


Figure 1 アンテナを 14 ビットデジタイザの入力に接続して取得した信号(左グリッド)と、0~250 MHz の信号(右グリッド)の周波数スペクトルを示す FFT

左側のグリッドに示されている取得信号は、ピーク間振幅が 38 mV です。右側のグリッドに表示される高速フーリエ変換（FFT）は、ノイズのように見えますがデジタイザの広いダイナミックレンジが複数の RF ソースを拾っていることを示しています。最も高いピークは、振幅が約 -36 dBFS（フルスケールに対する dB）の 145 MHz 信号です。88~108 MHz の FM 放送帯域は、-50 dBFS のピーク振幅を持つ放送波を示しています。ピークノイズフロア振幅は約 -120 dBFS です。14 ビットデジタイザ（A/D ボード）のダイナミックレンジは約 85 dB です。大きな FFT 変換（500k ポイント）は、この例に示す追加のダイナミックレンジを提供する大きな処理ゲインに貢献します。

RF 測定：

デジタイザ（A/D ボード）はデータを取得し、測定と分析に使用できるようにします。測定と分析はソフトウェアを使用して実行されます。ここでは、Spectrum 社の SBench 6 を使用してタスクを実行しています。また、MathWorks 社の MATLAB や National Instruments 社 LabVIEW などのサードパーティソフトウェアも使用できます。同様に、特定の測定および分析操作用にカスタムソフトウェアを作成できます。すべての場合において、ドライバーソフトウェ

アは、デジタイザ (A/D ボード) を特定のアプリケーションプログラムに結合することができます。いくつかの基本的な RF 測定を Figure 2 に示します。この例でも、SBench 6 が使用されています。

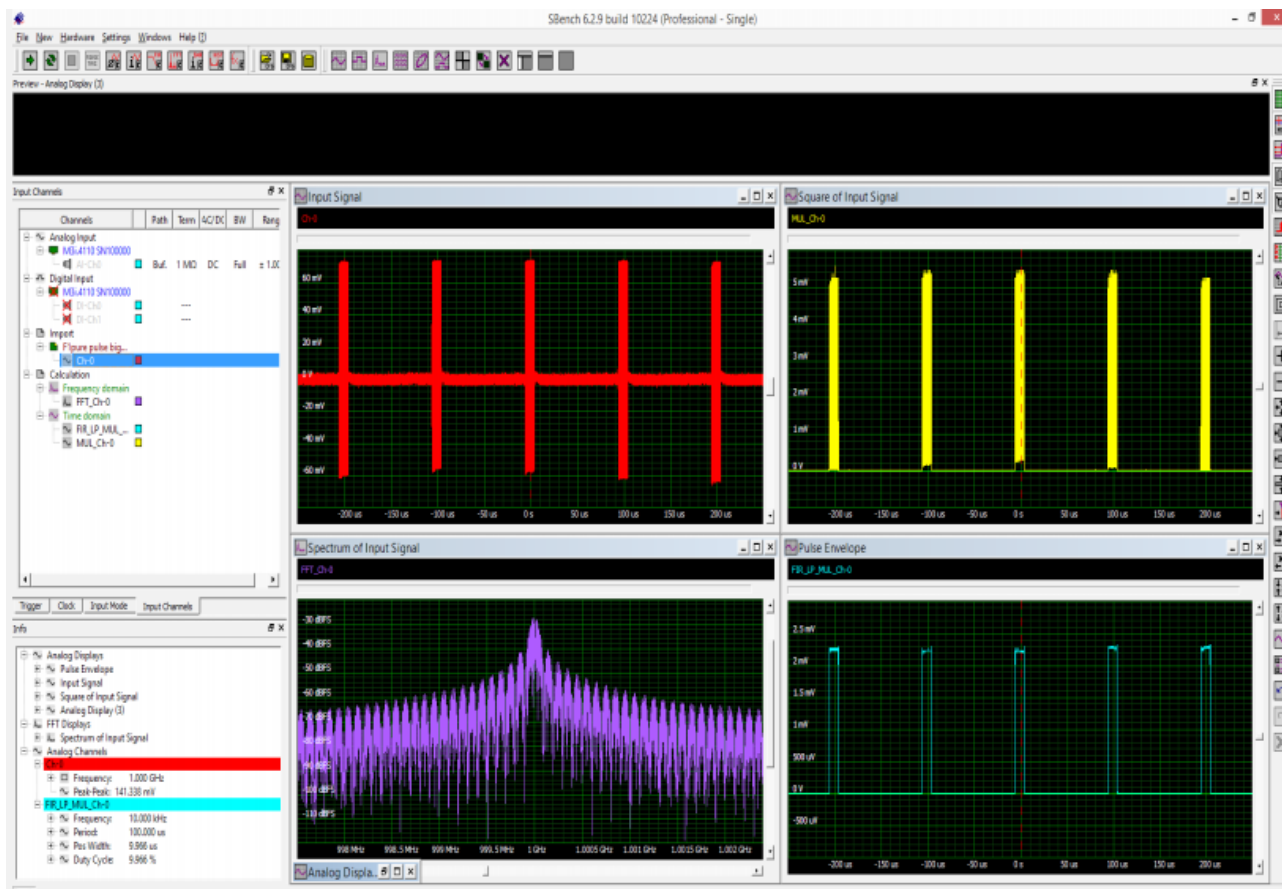


Figure 2 Spectrum の SBench 6 ソフトウェアを使用したいくつかの基本的な RF 測定と分析の例。取得した信号の周波数、振幅、パルス繰り返し率(周波数)、周期、デューティサイクル、幅を測定します。

左上のグリッドに示されている取得波形は、レーダーアプリケーションで一般的なパルス変調された 1 GHz の正弦波です。この信号はデジタイザ (A/D ボード) に直接入力されていますが、周波数がデジタイザ (A/D ボード) の帯域幅を超えている場合はダウンコンバーターから入力することもできます。左下のグリッドにある FFT は、取得波形のスペクトルを示します。SBench 6 には、多数の測定パラメーターが組み込まれています。図の左中央にある「情報」ペインには、取得した波形のピークからピークまでの振幅と周波数の測定値が一覧表示されます。パルスタイミングの分析には、信号エンベロープを抽出するためのさらなる処理が必要です。これは 2 つのステップで実行されます。まず、基本的なアナログ計算を使用して波形を二乗し、取得した波形とそれ自体の積を取ります。方形波は右上のグリッドに表示されます。二乗信号は、カットオフ周波数 10 MHz のデジタルローパスフィルターでフィルターされます。これにより、残りの 1 GHz キャリアが除去され、目的のパルスエンベロープが生成されます。パルス周波数、周期、幅、デューティサイクルの測定値は、パルスエンベロープに関連する情報ペインに表示されます。SBench 6 は、振幅変調波形の二乗検出を実行するツールを提供し、パルス波形パラメーターの直接測定を可能にしました。より複雑な復調プロセスは、モジュラーデジタイザと組み合わせて使用される MATLAB または LabVIEW によって提供されます。これにより、レーダー「チャープ」およびバーカー符号化信号の周波数および位相復調が可能になります。

基本的な電力測定値を見てみましょう。取得信号の二乗は、波形の瞬時電力を計算するために再び使用されます。電圧

の二乗は、50 オームのインピーダンスで除算するためにスケーリングされ、結果はワットでキャリブレーションされます。この波形に適用されるパラメーターは信号の平均パワーを計算します。このプロセスを Figure 3 に示します。

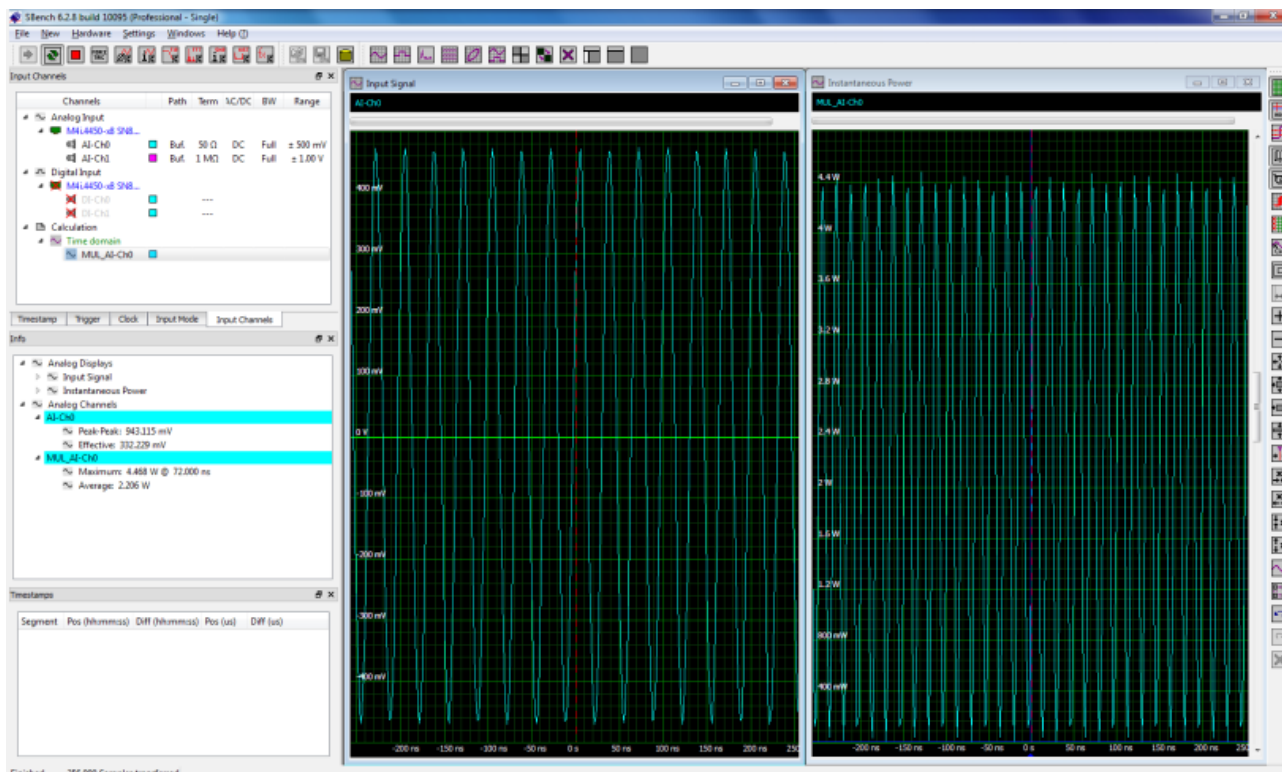


Figure 3 デジタル化された正弦波の瞬時および平均パワーの計算。瞬時電力の計算は、取得した信号の二乗をスケーリングし、その二乗をインピーダンスで除算することに基づいています。

取得した正弦波は、左側のグリッドに表示されます。左側の情報ペインに表示されているパラメータは、正弦波信号のピークツーピークおよび実効（RMS）振幅を読み取ります。入力信号は、乗算計算関数を再度適用することにより二乗されます。結果の波形は、信号設定コントロールを使用して振幅がスケーリングされます。これにより、ユーザーはユーザー定義単位で表示を再スケーリングできます。データは、二乗波形の垂直測定値を 50 オームのインピーダンスで除算することによりスケーリングされます。結果は右側のグリッドに表示されます。垂直単位はミリワット（mW）です。この表示は、ソースの瞬時電力です。情報ペインを再度参照すると、この波形の測定に適用される 2 つのパラメーターがあります。ひとつは最大値です、これは観測されたピーク電力を記録します。二つ目は、電力波形の平均値です、これは平均または平均電力です。これらの測定の精度は、いくつかの要因に依存します。最も重要なのは、デジタイザ（A/D ボード）の周波数応答の平坦性です。ほとんどのブロードバンドデジタイザは、周波数応答の平坦性を 0.5 dB 以内に維持しようとします。これにより、電圧不確か性は最大で約 5% となります。より高い精度が必要な場合は修正を適用できます。

マルチチャネル集録および分析：

【直交変調信号】

RF の世界には、マルチチャネル分析の機会が多くあります。おそらく最も一般的なのは、直交変調信号の分析です。

RF キャリアを変調するために、ベースバンド同相 (I) および直交 (Q) コンポーネントが組み合わせられます。変調は、単純な位相変調でも、位相変調と振幅変調の組み合わせでもかまいません。Figure 4 は、16 直交振幅変調 (16 QAM) 信号の I および Q 成分の取得を示しています。この変調方式では、2 つのシリアルデータストリームを組み合わせ、16 個の送信シンボル状態のそれぞれで 4 つのデータ状態を送信します。右側の 2 つのグリッドは、取得した I および Q コンポーネントを示しています。これらのコンポーネントが X-Y プロットでクロスプロットされている場合、この信号エンコーディングを補完する 16 の振幅/位相状態を識別できます。45 個、135 個、225 個、315 個の同じ位相を使用しますが、振幅を減らした 12 の特有の位相状態と 4 つの追加状態があります。

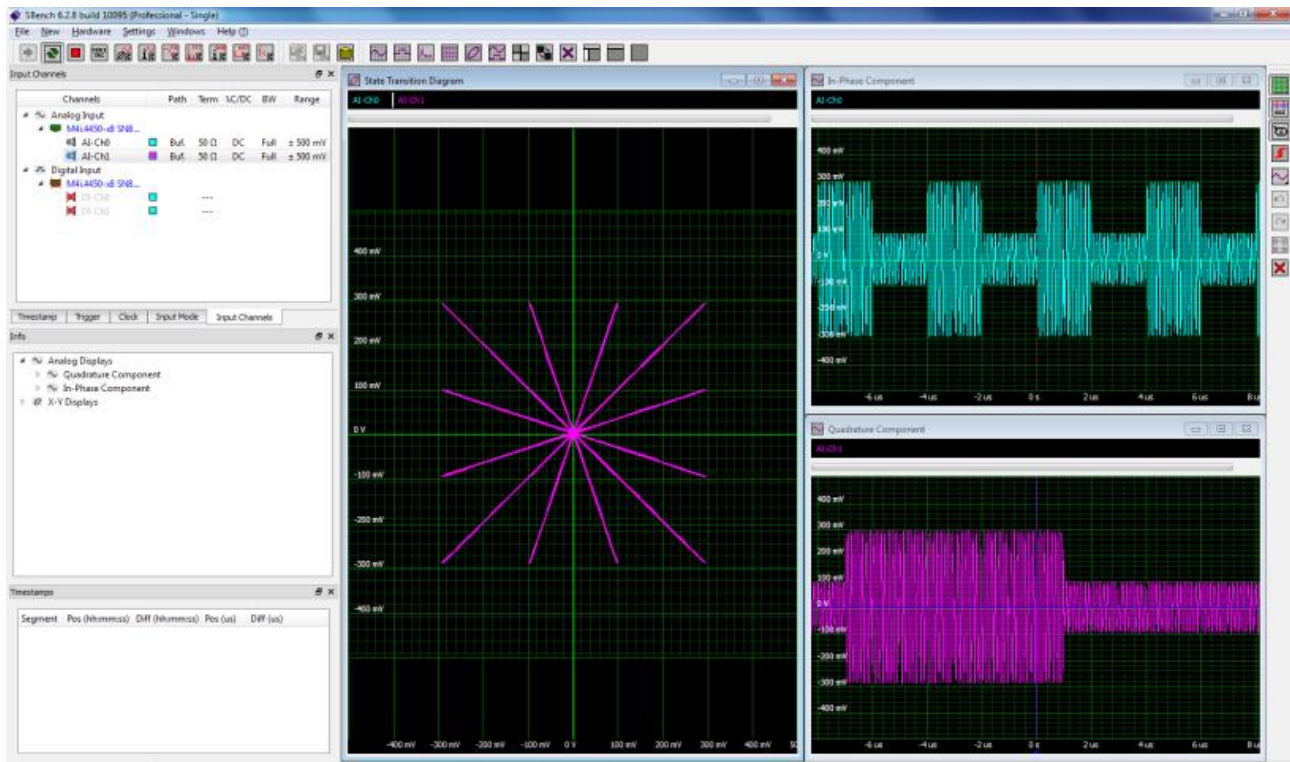


Figure 4 16 QAM 信号のベースバンド I および Q コンポーネントの取得と、16 のデータ状態すべての位相と振幅の変化を示す信号のクロスプロット(状態遷移図)。

【周波数応答測定】

回路またはデバイスの周波数応答は、2 つの A/D チャンネルとブロードバンド信号ソースを使用して簡単に推定できます。ある範囲の周波数にわたって均一な振幅を示す 3 種類の信号があります。掃引正弦波、インパルス、およびホワイトノイズには、それぞれ、周波数の範囲にわたって均一なスペクトル応答があります。掃引正弦波は最大のダイナミックレンジを提供します。一般的に、インパルス関数はセットアップと使用が最も簡単です。ホワイトノイズは、高いピーク対有効振幅比により、ダイナミックレンジが最も低くなります。Figure 5 は、36 MHz ローパスフィルターの周波数応答測定例です。使用される信号ソースは、125 MHz の帯域幅を持つ任意波形発生器 (AWG) (D/A ボード) からのインパルス関数です。インパルス関数は左上のグリッドに表示され、その下はこの入力信号の FFT です。スペクトル整形は、AWG (D/A ボード) の出力応答とインパルス関数の制限された遷移時間によるものです。この例ではスペクトルは 50 MHz まで比較的平坦であることに注意してください。右上のグリッドの波形は、フィルターの出力です。

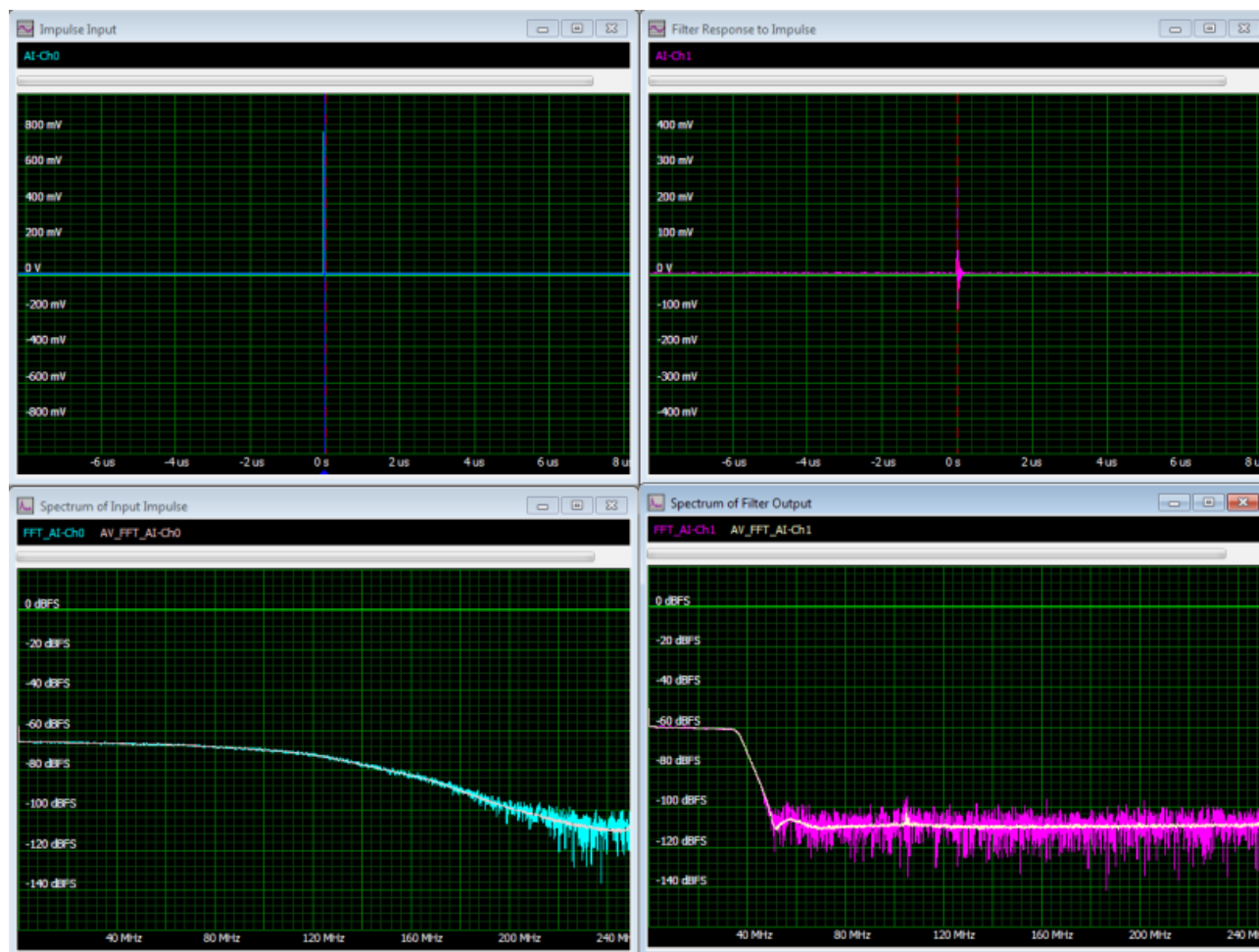


Figure 5 フィルターへの入力としてインパルス関数を使用して、ローパスフィルターの周波数応答を推定し、インパルスに対する入力および出力応答のFFTを使用するプロセス。

FFTは右下のグリッドにあります。ここで、フィルター応答の形状を確認できます。カーソルを使用して、-3dBポイントを推定し、帯域幅を測定できます。これらは、マルチデジタイザチャンネルに基づいたRF測定の2つの簡単な例です。複数のチャンネルでのデータ収集は完全に同期しているという事実を利用しています。この概念は、Star-Hubと接続された複数のデジタイザ(A/Dボード)に拡張できます。これは、1つのシステムで最大8種類のボードの位相安定同期を提供する追加モジュールです。たとえば、8台の「M4iシリーズ」デジタイザ(A/Dボード)とStar-Hubを接続すると、最大32個の完全に同期されたチャンネルを持つシステムを作成できます。Star-Hubは、すべてのボード間でトリガーおよびクロック情報を分配します。その結果、接続されたすべてのボードは同じクロックと同じトリガーで実行され、どのチャンネル間でも位相遅延は発生しません。すべてのトリガーソースを論理ORと組み合わせて、すべてのカードのすべてのチャンネルを同時にトリガーソースにすることができます。このマルチチャンネル機能により、デジタイザ(A/Dボード)を複数の通信チャンネルに同時に適用したり、アンテナおよび伝搬研究用の測定チャンネルの配列を作成したりできます。モジュラーデジタイザ(A/Dボード)は、最大1.5GHzの帯域幅を持つRFアプリケーションで重要な測定機能を提供します。汎用性、コンパクトなサイズ、マルチチャンネル機能を組み合わせて、RFアプリケーション用の強力なテストシステムにすることが可能です。



Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準（PCIe、LXI、PXIe）で 500 を超える デジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト&メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、www.spectrum-instrumentation.com を参照してください。