

## モジュラーデジタイザを使用しての NMR、MRI、レーダー用のパルスバースト RF 測定

多くの RF システムは、無線周波数 (RF) 信号が短期間送信されるバーストモードを使用して動作します。この種の操作の例には、レーダー、磁気共鳴画像法 (MRI)、核磁気共鳴 (NMR) における緩和放射線検出などのエコー測距アプリケーションが含まれます。これらのアプリケーションは、比較的高出力の RF のバーストを送信し、戻ってくるエコーまたは緩和放射線信号を待ちます。このタイプの信号の測定には、広い帯域幅、高いサンプリングレート、長い収集メモリ、高速処理、および高速データストリーミングを備えた機器が必要です。

### RF 測定用の高帯域幅デジタイザ

Spectrum Instrumentation は、高速 PCIe デジタイザの M5i フラッグシップシリーズを拡張し、最大 4.7 GHz の超広帯域幅を備えた 2 つの新しいモデルを追加しました。M5i. 3360-x16 と M5i. 3367-x16 は、それぞれ 1 つと 2 つの広帯域幅チャンネルを提供します (図 1)。

各カードは、12 ビットの垂直解像度で最大 10 GS/s のレ

ートでサンプリングでき、GHz 範囲で最も正確な信号の取得と分析を実現するように特別に設計されています。

高速サンプリングによってサポートされる高帯域幅は、非常に高い周波数信号の処理に最適です。10 GS/s のサンプルレートにより、ナイキスト周波数は 5 GHz となり、これはデジタイザの帯域幅 4.7 GHz と一致します。各カードは、内部収集メモリに最大 8 ギガ サンプル (GS) を収集できます。このオンボードメモリは、オシロスコープのようなリングバッファとして、または連続データストリーミング用の FIFO バッファとして使用できます。M5i シリーズデジタイザは 16 レーンの Gen 3 PCIe テクノロジーを採用しており、取得したデータをデジタイザからコンピュータに 12.8 GB/秒という驚異的な速度でストリーミングできます。データは、ストレージのためにホスト コンピュータのメモリに送信したり、GPU やコンピューティング ユニファイド デバイス アーキテクチャ (CUDA) ベースのグラフィックプロセッシングユニット (GPU) に直接送信して、高速にカスタマイズされた信号処理と分析を行うこともできます。

1 つまたは 2 つ以上のチャンネルを必要とするアプリケーションの場合、Spectrum の Star-Hub オプションを使用して、最大 8 つの M5i. 33xx-x16 デジタイザをマルチチャンネルシステムに組み



図 1 Spectrum Instrumentation による新しい M5i. 3360-x16 (1 チャンネル) および M5i. 3367-x16 (2 チャンネル) の主要な帯域幅デジタイザは、10 GS/s サンプリング、12 ビット分解能、4.7 GHz 帯域幅および 12.8 GB/s データストリーミングを組み合わせている。

合わせることができます (図 2)。

Star-Hub は、共通のクロックとトリガ信号を共有することで、個々のカードのデータ取得を同期します。ユーザーがプログラム可能なスキュー調整により、位相遅延を最小限に抑えます。Star-Hub オプションは、マルチチャンネルシステムの M5i シリーズ カードに単一のピギーバックモジュールを取り付けることでインストールされます。



図 2 Star-Hub オプションを使用すると、共通のサンプリングクロックとトリガソースを共有することで、最大 8 つのデジタイザを同期できます。

正確に整合されシールドされた同軸ケーブルを使用して、ボードはクロックを各モジュールに分配し、正確に同期します。システムクロックでイベントをトリガします。

## バーストモード測定

NMR は、バーストモード RF 信号が発生する一般的なアプリケーションです。NMR 分光法は、化学組成とサンプルの分子構造を明らかにするために使用される分析手法です。

これは、選択した周波数の RF 放射と、強力な磁場に置かれた分子の核との相互作用を研究することです。外部磁場により、分子内の特定の核が選択された無

線周波数を吸収します。吸収されたエネルギーは物質の共鳴周波数で再放出され、サンプル内の正体や分子内関係が明らかになります。NMR 分光計の概念的なブロック図を図 3 に示します。送信/受信 (T/R) スイッチは、RF コイルの機能を制御します。送信状態では、パワーアンプからのゲートされた RF バーストがサンプルを励起します。受信状態では、RF コイルが信号を受信します。

サンプルの RF 応答を検出し、それを受信機に送ります。高帯域幅デジタイザを使用して、T/R スイッチの動作を調査し、パワーアンプからの RF 信号、T/R スイッチの状態を決定するゲート信号、および T/R スイッチの出力を監視できます。図 4 は、それぞれ 10 GS/s のサンプリングレートを持つ 3 つの M5i. 3360-x16 4.7 GHz 帯域幅シングルチャンネル デジタイザを使用した T/R スイッチ動作のシミュレーション測定を示しています。

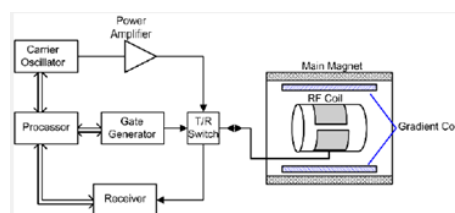


図 3 NMR 分光計の概念的なブロック図。RF パルスが RF コイル内のサンプルを刺激して、サンプルの元素と分子構造に関連する RF 信号を放射します。

これらのユニットは Star-Hub を使用してリンクされ、Spectrum Instrumentation の SBench6 取得および分析ソフトウェアが制御と表示に使用されます。T/R スイッチへの入力は、左上のグリッドに示されている 350 MHz の連続正弦波です。

入力信号の高速フーリエ変換 (FFT) は、左下のグリッドに 350 MHz の単一のスペクトル線を示しています。FFT、フィルタリング、および基本的な測定は SBench6 ソフトウェアに含まれています。NMR で一般的に使用される RF 励

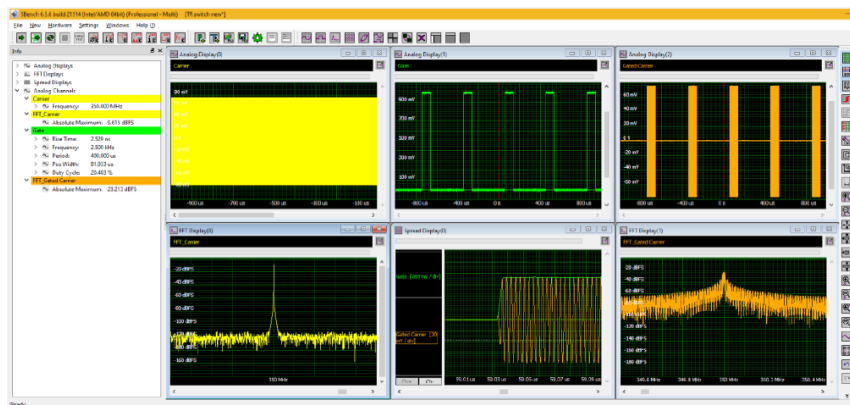


図4 T/R スイッチの RF 入力(左上のグリッド)、ゲート信号(中央の上部のグリッド)、および T/R スイッチの出力(右上)の分析。

起周波数の範囲は MHz ~ 1 GHz。これは、Spectrum デジタイザの帯域幅内に十分収まります。レーダーなどの他の関連アプリケーションでは、より高い周波数が使用されます。たとえば、M5i.33xx-x16 デジタイザは、4.7 GHz の -3dB 帯域幅まで使用でき、3 ~ 4 GHz の範囲の S バンドレーダー信号を受け入れます。

中央上部のグリッドに示されているゲート信号は、T/R スイッチの状態を制御するパルス波形です。SBench6 には、トレースの左側の情報パネルに示されている測定機能が含まれており、ゲートパルス列の周波数が 2.5 kHz (周期 400 us)、パルス幅が 81.9 us (デューティサイクル 20.5%) であることが示されています。デジタイザは 10 GS/s で 2 ms の記録長を取得しました。この記録には、各チャンネルの 20 MS のデータが含まれます。デジタイザは標準で 2 GS の収集メモリがあり、オプションではメモリは、8 GS になります。8 GS メモリでは、10 GS/秒のサンプリングレートで 800 ミリ秒を記録できます。長い取得記録により、複数のサイクルに渡って時間の経過に伴う応答の変化を追跡することができます。このような長い記録であっても、時間分解能が失われることはありません。水平方向に拡大されたズームトレースは、ゲート信号パルスエッジの詳細をゲート搬送波と比較し、T/R スイッチの時間応答を示します。さらに、ゲート信号の立ち上がり時間は 2.5 ns と測定されます。右上のグリッドの T/R スイッチ出力は、ゲートされた波形を RF パーストとして示しています。このパルス変調により、右下のグリッドに見られるように RF スペクトルが変化し、パルス変調による  $\sin x/x$  変調エンベロープが追加され、情報パネルの絶対最大測定値からわかるように、ピークスペクトル振幅が約 14 dB 減少します。

SBench6 に加えて、M5i.33xx-x16 シリーズデジタイザには、カスタムソフトウェア用のツールを提供する Windows および Linux オペレーティングシステム用のソフトウェア開発キット (SDK) とドライバが含まれています。SDK には、Visual C++、Delphi、Visual Basic、VB.NET、C#、Python、

Java、Julia、IVI などの最も一般的なプログラミング言語を使用した詳細なドキュメントと動作するプログラムのサンプルが含まれています。Spectrum は、LabVIEW や MATLAB などのサードパーティシステムソフトウェア製品もサポートしています。

このタイプのアプリケーションで価値があるもう 1 つのデジタイザオプションは、デジタルパルスジェネレータ (DPG) です。DPG オプションを使用すると、デジタイザはユーザーが設定した周期、位相、幅を持つ最大 4 つの方形パルスを出力できます。パルスのタイミング分解能はサンプリング クロックに基づきます。たとえば、M5i. 33xx-x16 デジタイザに取り付けられた DPG オプションは、わずか 3.2 ns のタイミング分解能で最大 4 つのパルスストリームを出力できます。パルス発生器はデジタイザと連動して動作し、両方が同時に動作します。

長い取得レコードを処理する際の懸念の 1 つは、このデータをホストコンピュータにストリーミングして、さらなる分析とアーカイブを行うことです。M5i デジタイザは、最大 12.8 GB/秒の速度でデータを転送できる 16 レーン Gen3 PCIe バスを利用します。この並外れた速度により、6.4 GS/s のサンプリングレートで取得したシングルチャネルデータを、FIFO プロセスでデータ損失なくコンピュータに直接ストリーミングできます。データなしでもさらに高速なサンプリングレートをストリーミングできます。

新しい 8 ビット転送モードを使用して損失を軽減します。このモードは、単一チャネルから最大 10 GS/s の取得レートでのデータストリーミングをサポートします。

この例では、単一の T/R スイッチ操作を調べました。一部の NMR はフェーズアレイに配置された複数の RF コイルを使用しており、これらのシステムでの測定にはより多くのチャンネルが必要になる場合があります。これも、Star-Hub オプションを使用して対処できます。

## 結論

Spectrum Instrumentation M5i. 33xx-x16 デジタイザファミリは、NMR、MRI、レーダーなどのパルス RF アプリケーションによく適合します。長い取得レコード長で最大 10 GS/s のサンプリングレートでサポートされる GHz 帯域幅を提供します。オプションの機能には、複数のチャンネルの同期や、プログラム可能なパルス出力の生成も含まれます。