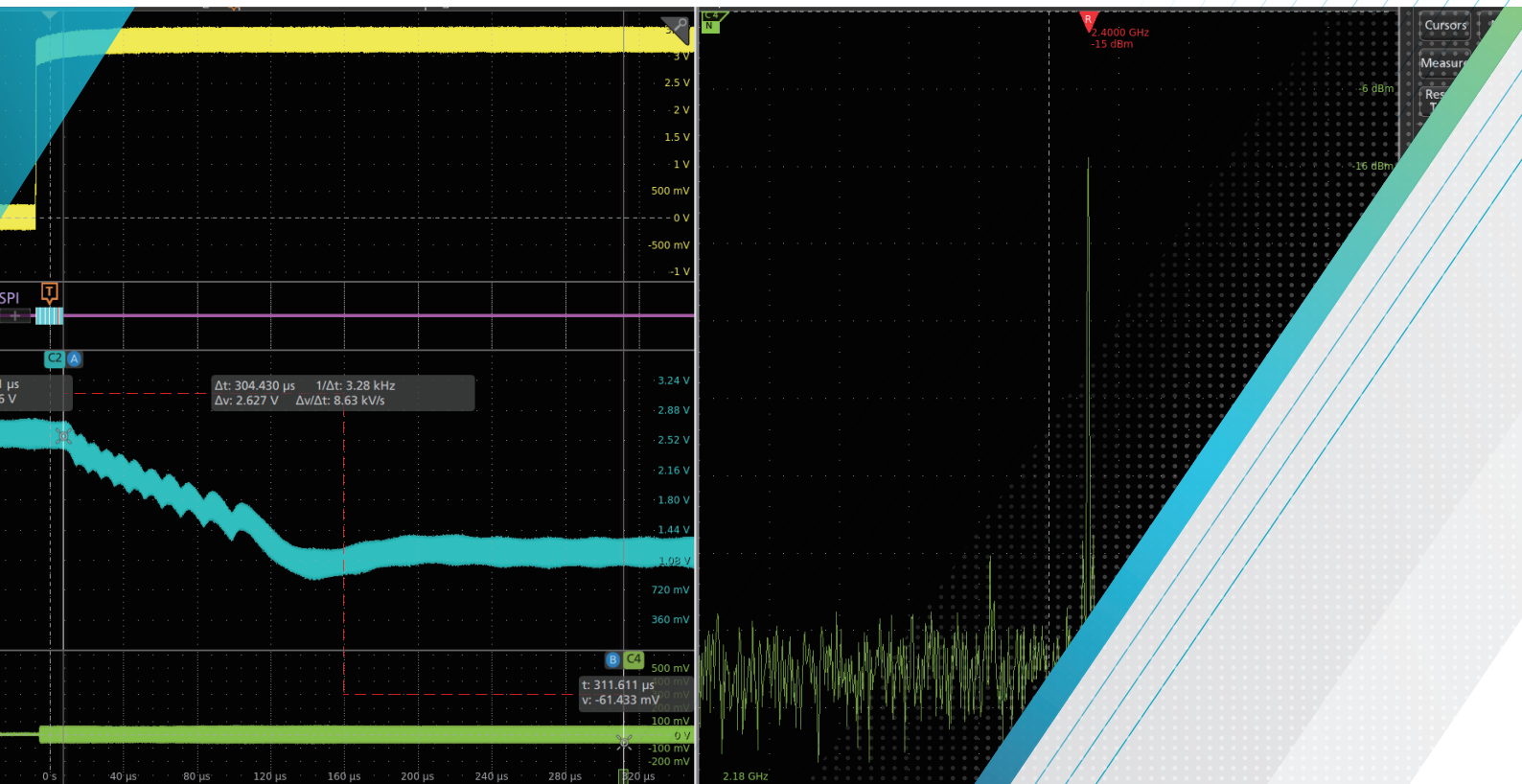


Spectrum View : オシロスコープによる 周波数ドメイン解析の新しいアプローチ

アプリケーション・ノート



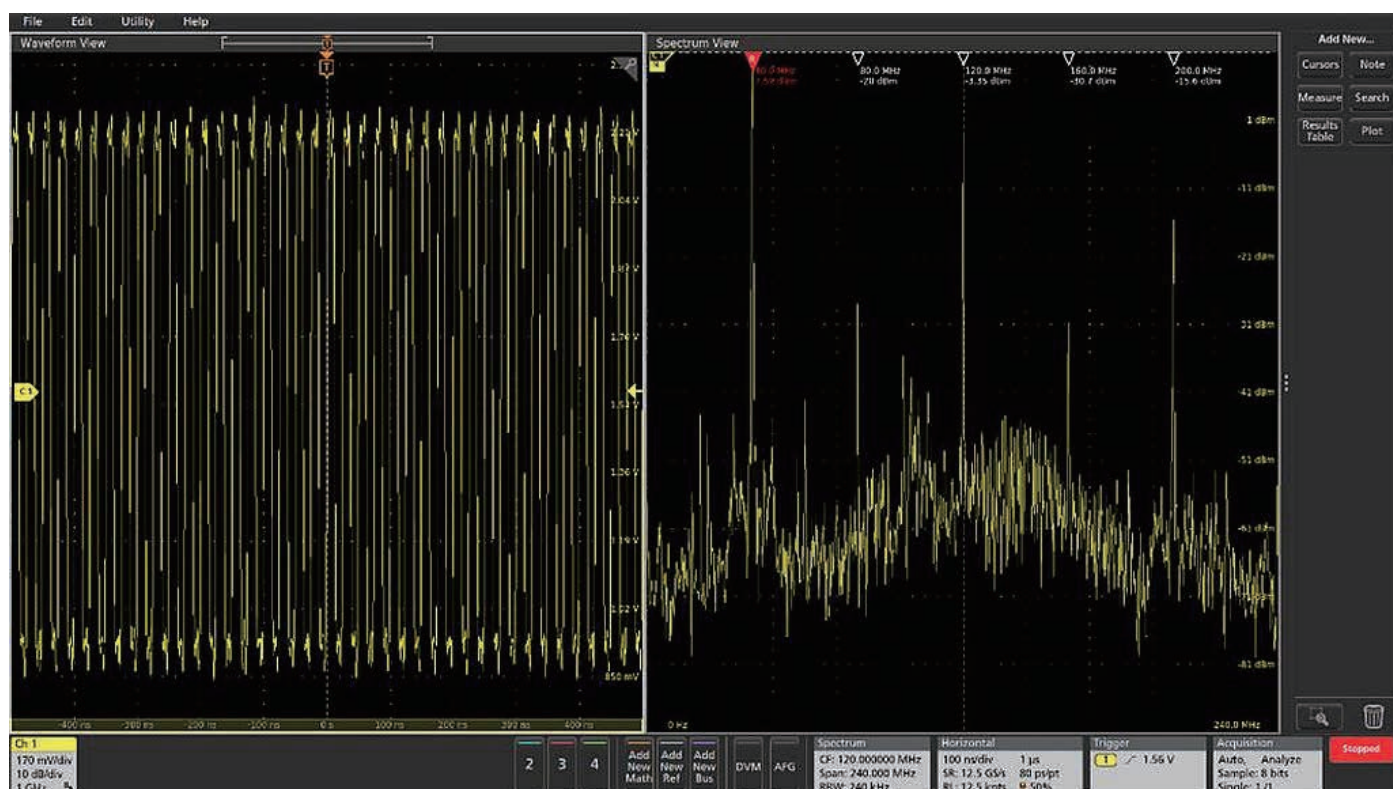


図1. Spectrum Viewはアナログ波形とスペクトラム表示をそれぞれのドメインで別々に設定し、同時に表示することが可能

組込みシステムのデバッグでは、一度に1つのドメインを観測しただけでは発見できない原因を探ることが多々あります。時間と周波数のドメインを同時に観測できれば、重要な情報が得られます。ミックスド・ドメイン解析は、以下のような状況で特に役立ちます。

- 無線データを伝送するとき、パワーレールの電圧はどのようになっているのか。
- メモリにアクセスするたび、どこからノイズが放射されるのか。
- 電源投入後、PLLの安定までにどのくらいの時間がかかるのか。

ミックスド・ドメイン解析は、時間ドメイン波形と周波数ドメインのスペクトラムを同期して表示することにより、上記のような問題の解決に役立ちます。つい最近まで、時間と周波数のドメイン解析で同期がとれ、波形とスペクトラム表示で独立した設定が可能なオシロスコープはテクトロニクスのMDO4000Cシリーズ・ミックスド・ドメイン・オシロスコープしかありませんでした。

このようなニーズに対応するため、4、5、6シリーズMSO（ミックスド・シグナル・オシロスコープ）にはSpectrum Viewと呼ばれる解析ツールが用意されています。4シリーズMSOではオプション機能として追加可能で、5、6シリーズMSOには標準機能として搭載されます。以下のような特長があります。

- スペクトラム解析では馴染みのある項目（中心周波数、スパン、RBW（分解能帯域幅））が設定可能
- 時間ドメインと周波数ドメインの表示を、それぞれ最適に設定可能
- 信号を別々の入力に分けることなく、波形表示とスペクトラム表示の両方で観測可能
- 時間ドメイン・イベントと周波数ドメイン測定（およびその逆）の正確な相関性
- 周波数ドメインにおける周波数分解能の大幅な改善
- スペクトラム表示の更新レートの改善

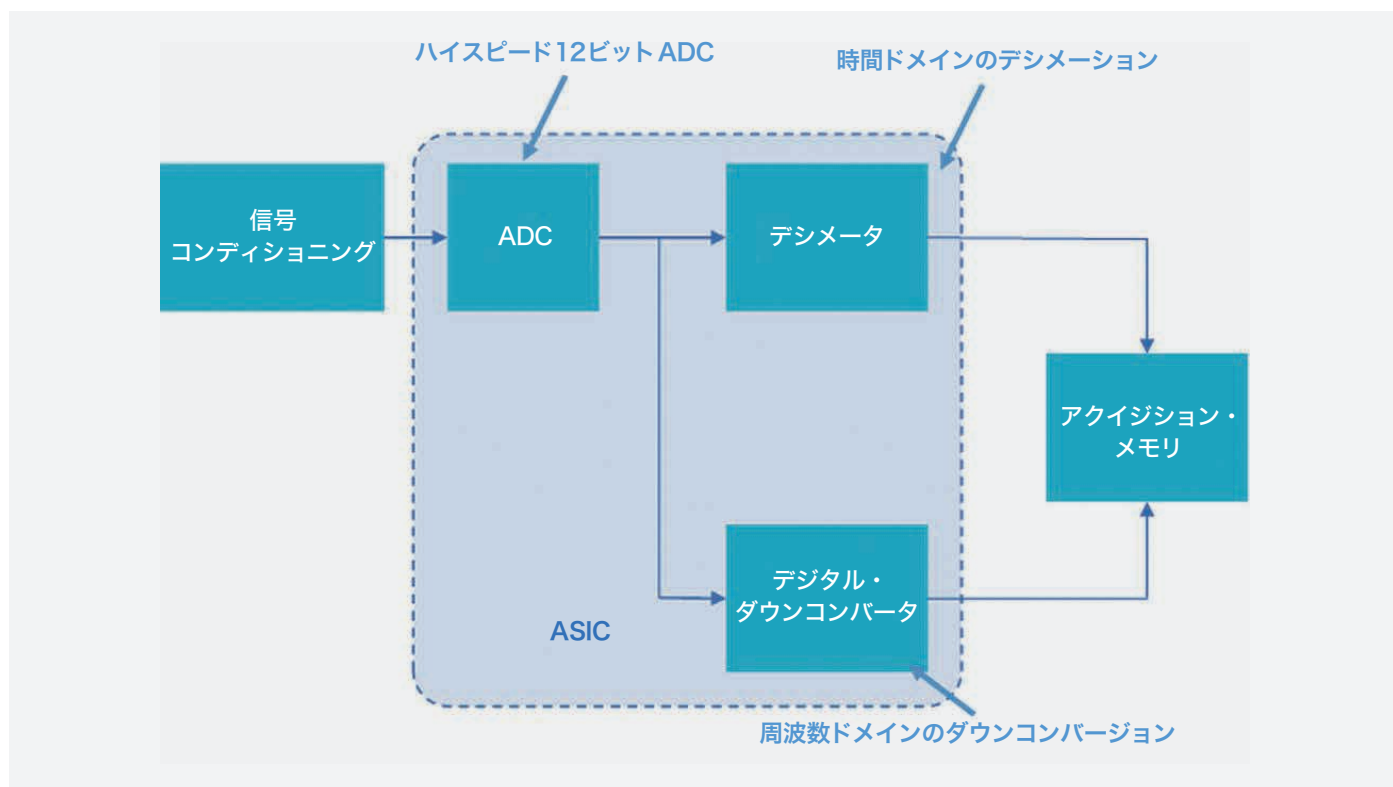


図2. テクトロニクス4、5、6シリーズMSOは、カスタムASICで実装されたデジタル・ダウンコンバータにより、波形とスペクトラムを独立に設定しながら、同時に観測できる。

新しいアーキテクチャ

Spectrum Viewは、オシロスコープに組み込まれた、当社特許のハードウェアです。動作原理を理解するため、一般にデジタル・オシロスコープは、アナログ・デジタル・コンバータ (ADC) が最高サンプル・レートで動作していることを理解しておく必要があります。ADCのサンプル・ストリームは、デシメータに送られて間引かれます。最も高速な掃引速度では、すべてのサンプルが保持されます。速度の遅い掃引では、ユーザは遅い信号を観測していると想定して、掃引レートに応じてサンプル・レートを落としますが、落とす際にその期間内のADCサンプルを平均化します。つまり、デシメータの目的は、レコード長をできる限り短くしつつ、時間ドメインで対象の信号を観測するのに適切なサンプル・レートにすることです。

4、5、6シリーズMSOでは、各FlexChannelの入力部、カスタムASIC内に12ビットのADCがあります。図2に示すように、それぞれのADCは2つの経路で高速のデジタル・データを送ります。1つの経路はハードウェアによるデシメータであり、時間ドメインのサンプルを保存するレートが決まります。もう一つの経路はデジタル・ダウンコンバータであり、同様にハードウェアで実装されています。このアプローチにより、時間ドメインと周波数ドメインの取込設定が独立して行え、信号の波形表示、スペクトラム表示の両方が最適に行えます。また、有限であるオシロスコープのレコード長をより効率的に利用できます。

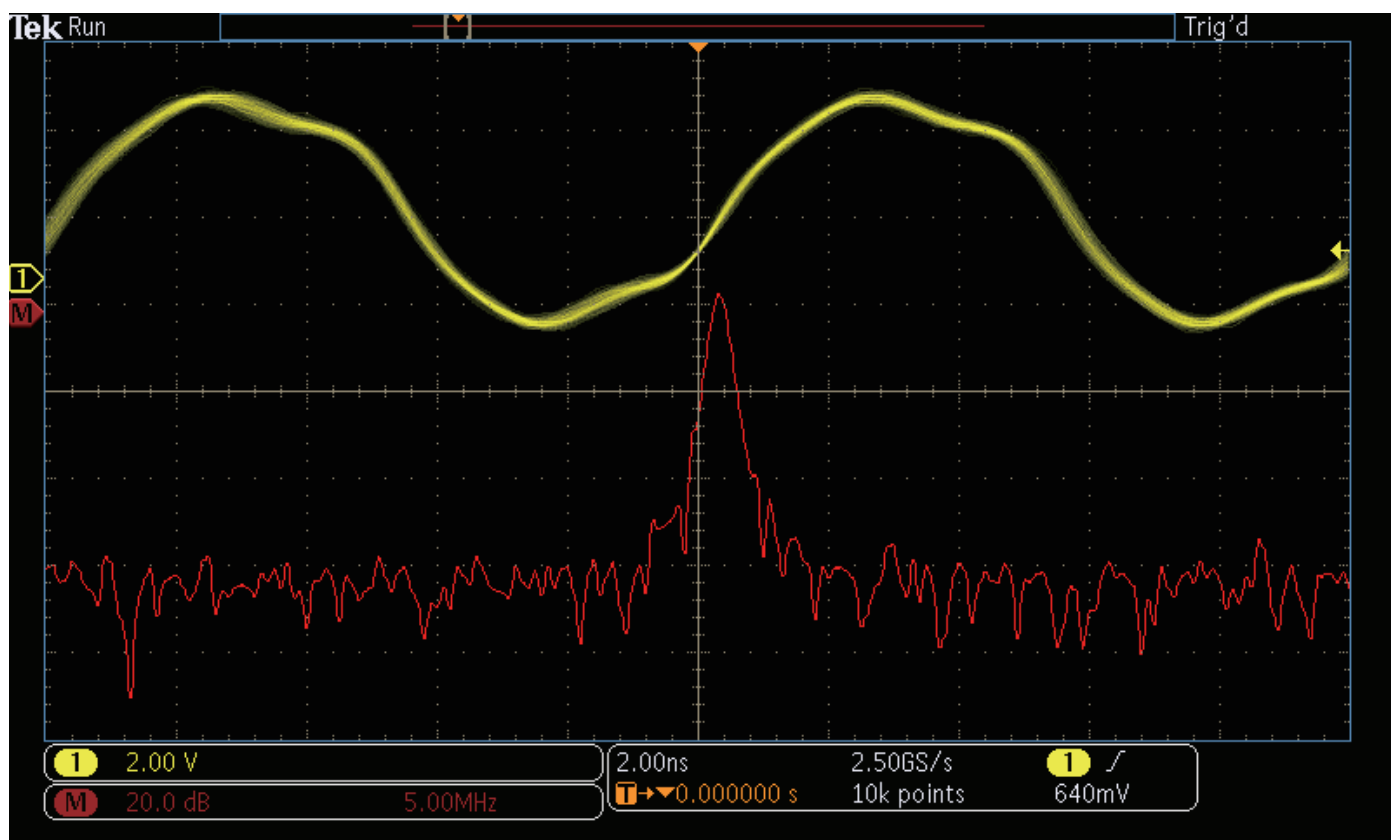


図3. 従来のFFTでは、時間ドメインで最適化された設定にすると、このスペクトラム拡散クロック信号の周波数ドメインでのふるまいを詳細に観測できない。

独立した設定が可能な Spectrum Viewと従来のFFTの違い

スペクトラム・アナライザは、周波数ドメインでの信号観測に特化して設計されています。一方、オシロスコープは常に研究室にあるため、エンジニアは可能な限りオシロスコープを利用しようとします。このため、オシロスコープには何十年も演算ベースのFFT (Fast Fourier Transforms、高速フーリエ変換) が搭載されていました。しかし、FFTは以下の2つの理由で使い方が難しいのです。

まず、周波数ドメインの解析を行う場合、スペクトラム・アナライザでは中心周波数、スパン、分解能帯域幅 (RBW) などの設定で容易に目的のスペクトラムを観測することができます。しかし、オシロスコープのFFTにはほとんどの場合、サンプル・レート、レコード長、時間/divなど、時間ドメイン表示のみを想定した従来の設定項目がなく、目的のスペクトラムを観測するには適していません。

次に、オシロスコープがスペクトラム・アナライザのような設定機能を持っていたとしても、アナログの時間ドメイン表示のために使用されるのと同じアキュイジション・システムによってFFTは得られます。中心周波数、スパン、分解能帯域幅を変更すると、オシロスコープの水平軸スケール、サンプル・レート、レコード長は予期しない設定、望まない設定に変更されてしまいます。望ましい周波数ドメイン表示になったとしても、他の信号の時間ドメインの表示は望ましいものではなく、時間ドメインで望ましい表示になるように水平軸スケール、サンプル・レート、レコード長を調整すると、今度はFFT表示が望ましいものでなくなります。次の2つのスクリーンショットはMDO3000シリーズによるものであり、97MHzから100MHzで動作するスペクトラム拡散クロックの時間ドメインとFFTを表示しています。図3を見ると、時間ドメインではクロックが見やすく表示されていますが、FFTでは適切な表示になっていません。図4を見ると、FFTではクロックのスペクトラム拡散が確認できますが、時間ドメインは見やすく表示されていません。

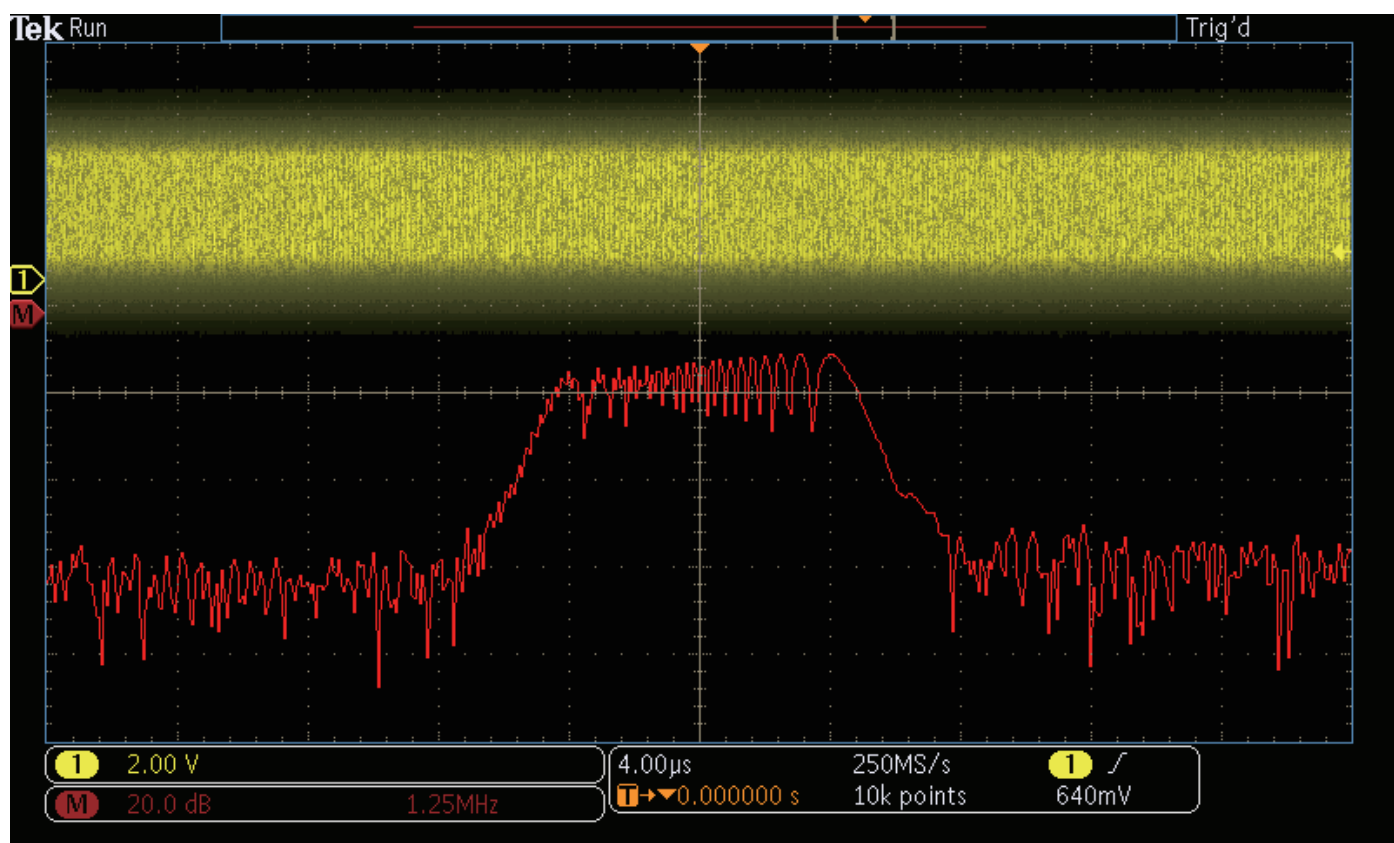
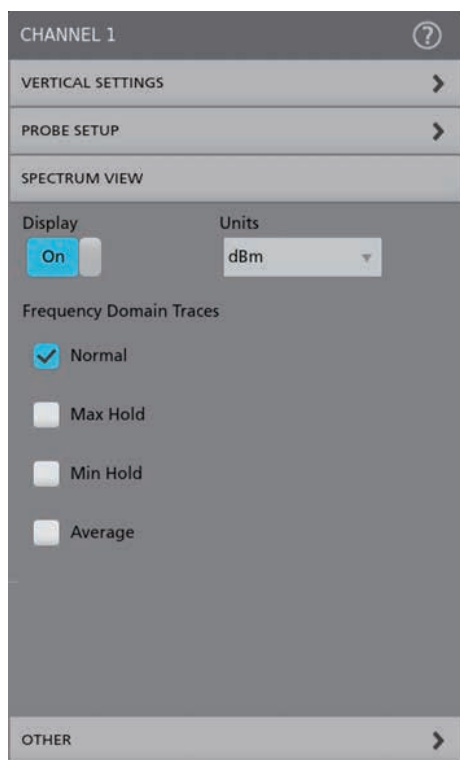
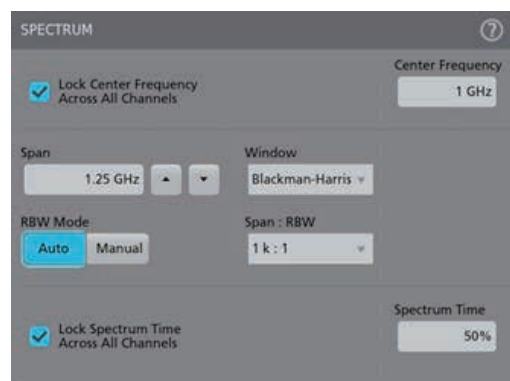


図4. FFT 表示を最適化すると、今度はクロック信号の時間ドメイン表示が適切でなくなる。



Spectrum Viewは、使い慣れた中心周波数、スパン、RBW設定を使って周波数ドメイン表示が調整できます。

また、この設定を調整しても時間ドメインのスケール設定は影響されないため、図5に示すように両方のドメインを最適に表示できます。



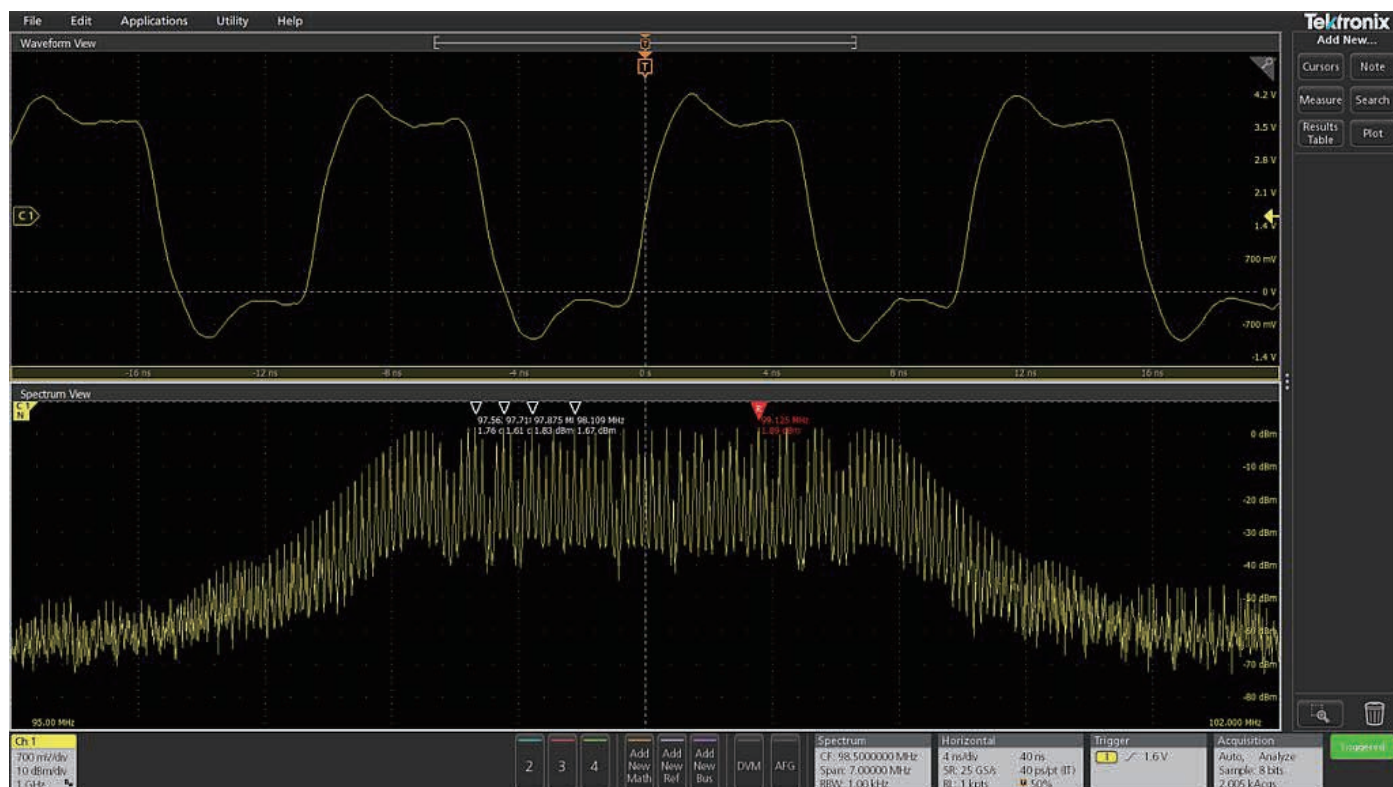


図5. 図3、図4で観測したものと同一スペクトラム拡散クロック信号。Spectrum Viewでは、時間ドメインと周波数ドメインの両方を同時に、最適に表示できる。

スペクトラム・タイム

スペクトラム・タイムと呼ばれるスクリーン上のインジケータは、Spectrum Viewのウィンドウで表示されているスペクトラムが時間的にどこから来ているのかを示しています。スペクトラム・タイムのインジケータは、ウィンドウ係数を分解能帯域幅で割ったものです。（ウィンドウ係数の詳細については、「付録」の項を参照してください。）スペクトラム・タイムをアキュイジション内で移動することで、時間と共に変化する周波数ドメイン表示の様子が確認できます。取込みを停止した状態でも確認できます。

図6～9は、このスペクトラム拡散クロックのスタート・シーケンスを取込んでいます。スペクトラム・タイムのインジケータはスクリーンショットでは非常に狭く現れていますので、赤い枠で示しています。この例では、スペクトラム・タイムは1.9（ウィンドウ係数）÷10,000Hz（RBW）=190μs幅となっています。

Spectrum View : オシロスコープによる周波数ドメイン解析の新しいアプローチ

アプリケーション・ノート



図6. スペクトラム・タイム (赤の枠で囲まれている) は取込みの前半、トリガ・イベントの前に設置されている。クロックはまだオンになっていないため、予想通り周波数ドメインでは強い信号は確認できない。



図7. スペクトラム・タイムはクロックがオンになった約20ms後に設置されている。クロック周波数は94MHzで、まだスペクトラム拡散はされていない。

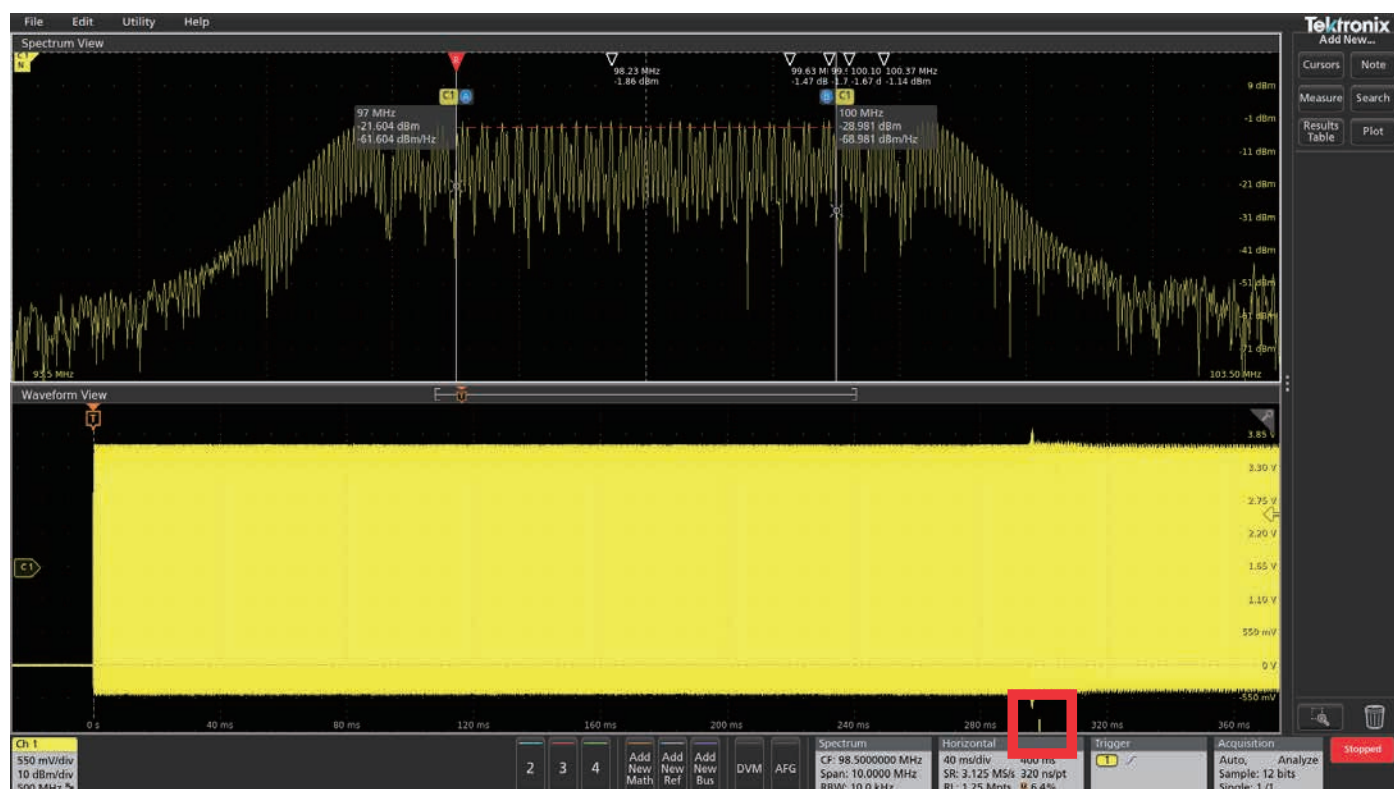


図8. クロックがオンになってから約300ms後にスペクトラム・タイムが設置されている。クロックはスペクトラム拡散され始めているが、意図した幅以上のスペクトラム拡散になっている。カーソルは、期待したスペクトラム拡散の幅を示している。

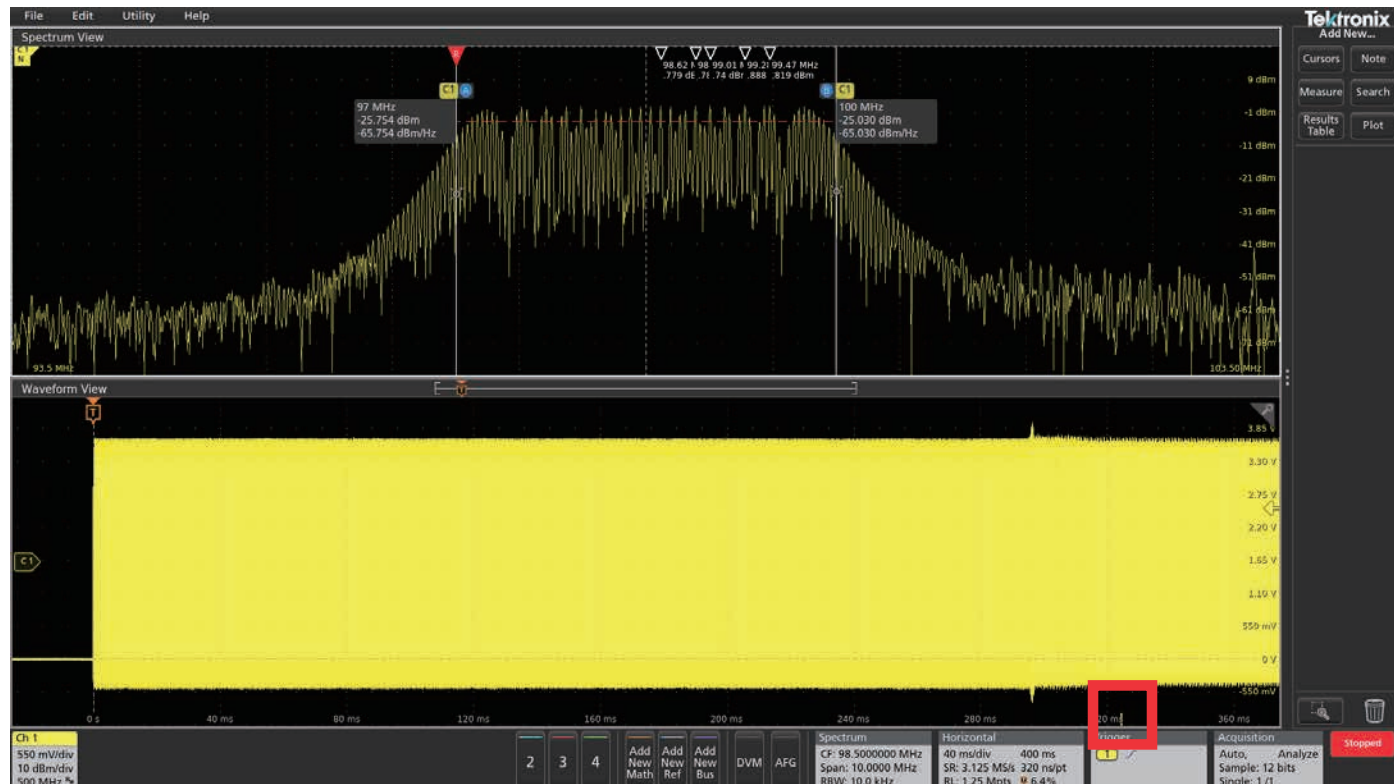


図9. クロックがオンになってから約324 ms後にスペクトラム・タイムが設置されている。クロックはスペクトラム拡散されており、意図したスペクトラム拡散範囲に収まっている。

RF 対時間の波形

Spectrum View でスペクトラムを作成するために使用される IQ データは、RF 対時間波形の計算のためにも使用できます。RF 対時間の波形により、スペクトラム・タイムがどの位置にあるかだけでなく、すべての取込みにおいて RF 波形の特性がどのように変化するかわかります。以下の3種類の波形が利用できます。

- 振幅 — スペクトラムの瞬時振幅対時間
- 周波数 — スペクトラムの瞬時周波数 (中心周波数に対する相対値) 対時間
- 位相 — スペクトラムの瞬時位相 (中心周波数に対する相対値) 対時間

これらの波形は個々にオン/オフすることも、3つ同時に表示することもできます。

図10~12には、対象の信号に関する追加情報を示しています。それぞれの図には、4つの時間ドメイン波形が表示されています。一番上は、信号のアナログ波形です。その下は RF 振幅対時間波形、その下は RF 周波数対時間波形、一番下は RF 位相対時間波形です。



図10. 振幅対時間波形、周波数対時間波形により、この拡散スペクトラム・クロックの変化の様子が容易に観測できる。振幅対時間波形では、非常の小さなレベルのトリガ・ポイントで信号がオンになっている様子が、周波数対時間波形では最初の約300ms、一定の周波数にとどまっている様子がわかる。このポイントにおいて、信号の振幅が大きくなり、周波数が変化しだしていることがわかる。



図11. 特定の期間でズーム表示している(トリガ・ポイント後の約300~320ms)。振幅が変動し、本来よりも広い範囲で周波数が変化してる様子がわかる。



図12. さらにズーム表示することで三角周波数変調の様子がわかり、結果バーの自動測定により39.07kHzの正しい変調レートになっていることがわかる。

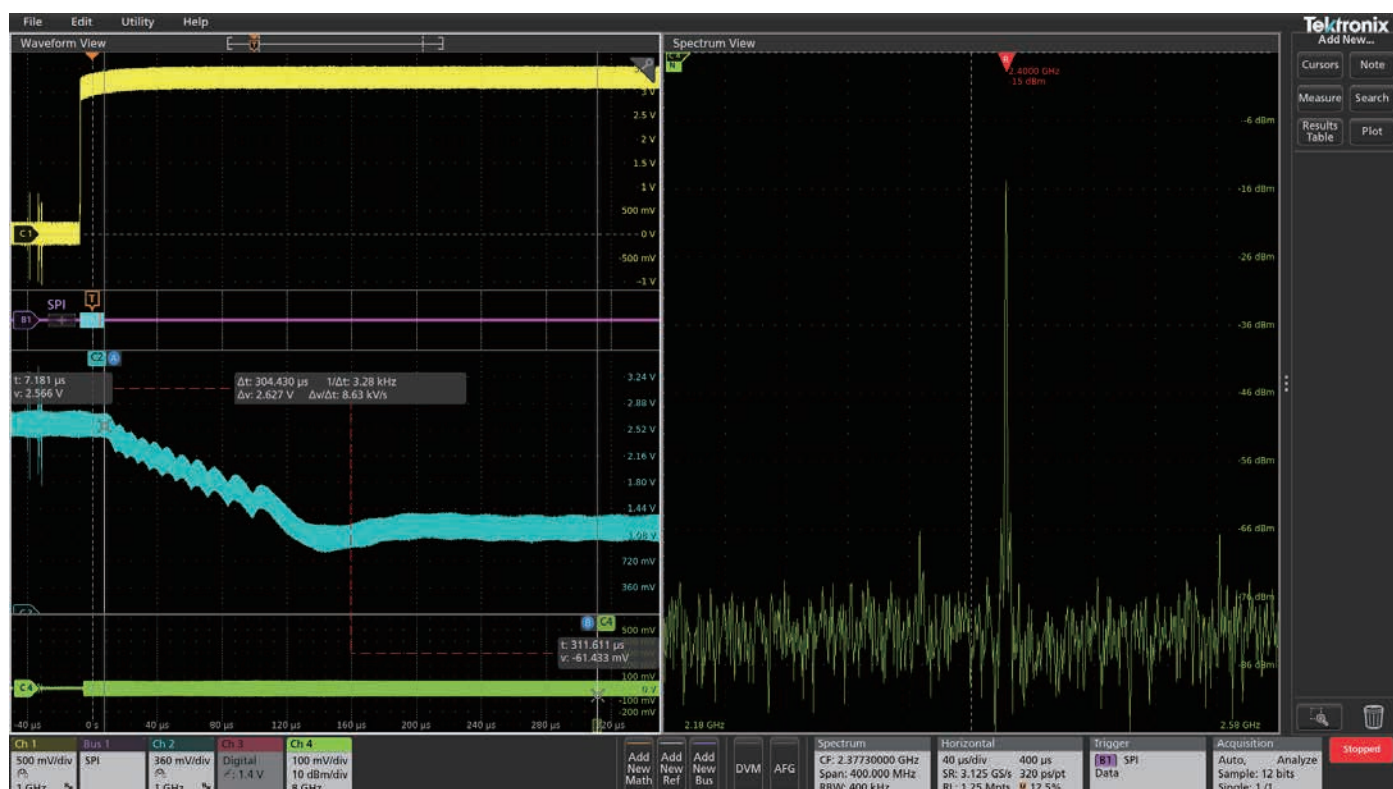


図13. VCOの同調周波数を示すSPIバス・コマンドでトリガした例。この例では、2.4GHzになっている。アキュイジション内でスペクトラム・タイムをスクロールすることで、RF出力がいつ2.4GHzに安定するかがわかる。次に、カーソルを使用することで、トリガ・イベントからスペクトラム・タイムまでの時間が測定できる。この例では、出力が目的の周波数になるまで304 μ sかかったことがわかる。

他の信号との時間相関

周波数ドメイン信号が時間と共にどのように変化しているかを示すだけでなく、スペクトラム・タイムにより、周波数ドメインのイベントとシステムの他の特定の信号との相関性がわかります。図13は、PLL/VCOのスタートアップを取込んでいます。

- Ch1 (黄) は、VCOのイネーブル信号。
- Ch2 (赤) は、PLLの電圧。
- Ch3 (表示されていない) は8つのデジタル・チャンネルとして設定されており、PLL/VCOを制御するSPIバスにプロービングしている。
- Ch4は、RF出力。

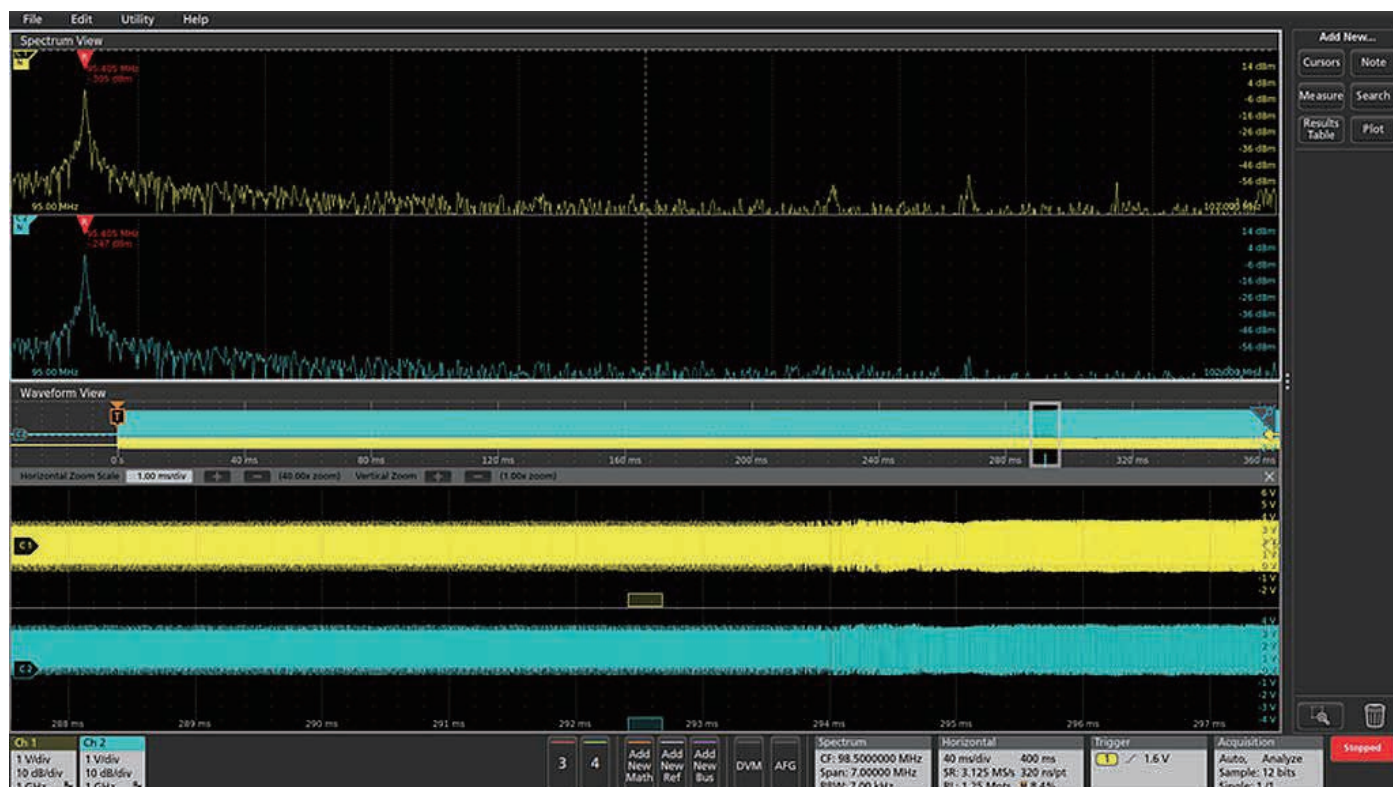


図14. デバッグ作業が必要な場合は、複数のチャンネルを同時に解析できる。この例では、回路の異なる2つのポイントでクロック信号のスタートアップを観測している。

複数チャンネルの解析

さらに複雑なトラブルシュートでは、図14に示すように複数のチャンネルでSpectrum Viewが利用できます。色別された2つのアナログ波形には、それぞれに対応したスペクトラムが表示されています。チャンネルごとにスペクトラム・タイムのインジケータが表示されます。デフォルトでは、すべてのスペクトラム・タイムのインジケータはチャンネル間でロックされており、アキュイジション内でパンすると連動します。これにより、すべてのチャンネルで時間相関のとれたスペクトラムが観測できます。この例では、回路の異なる2つのポイントでクロック信号のスタートアップを表示しています。

より進んだトラブルシュートを行う場合は、ロックを外してチャンネルごとにスペクトラム・タイムを別々に移動できます。また、各スペクトラムの中心周波数は別々にシフトできますが、すべてのSpectrum Viewのチャンネルは、同じスパン、分解能帯域幅、ウィンドウ・タイプの設定を共有します。

より効率的なシステム解析に向けて

組込みシステムを効率的に解析、デバッグするには、詳細な観測が必要です。時間ドメイン、周波数ドメインの両方で正確に、同期しながら観測しなければ、なぜシステムが期待通りに動作しないかを理解することはできません。エンジニアは、従来のオシロスコープのFFTには制約が多く、これが実現できないことを理解していました。

次世代のASIC技術によって実現されたSpectrum Viewは、このように問題を解決し、以下のような特長を持っています。

- スペクトラム解析では馴染みのある項目（中心周波数、スパン、RBW（分解能帯域幅））が設定可能
- 時間ドメインと周波数ドメインの表示を、それぞれ最適に設定可能
- スペクトラム表示の更新レートの改善
- 周波数ドメインにおける周波数分解能の大幅な改善
- 信号経路を分割することなく、波形表示とスペクトラム表示の両方で観測可能
- 周波数ドメインの観測が、アキュイジションの中で、時間とともにどのように変化するかを簡単に調べられる
- 時間ドメインのイベントと周波数ドメインのイベントの相関性が簡単に、正確に理解できる

付録

詳細な例： 従来のFFTとSpectrum View

従来のFFTの問題点は、その操作性以上のものがあります。性能のトレードオフを理解するため、次のような例を考えてみます。900MHzのトーンがあり、その両側の50kHzまでの位相ノイズを100Hzの分解能で観測するとします。理想的には、スペクトラム表示は以下のような設定になります。

- 中心周波数：900MHz
- スパン：100kHz
- RBW：100Hz

従来のオシロスコープによるFFT

従来のオシロスコープによるFFTでは、水平軸スケール、サンプル・レート、レコード長を設定することでFFTの動作が決まり、期待する表示にするためには全体的に設定を考える必要があります。

水平軸スケール設定により、取込むトータルの時間が決まります。周波数ドメインでは、トータルの取込時間で分解能が決まります。取込む時間が長いほど、周波数ドメインの分解能は上がります。

100Hzの分解能を得るには、少なくとも $1/100\text{Hz}=10\text{ms}$ の時間、波形を取込む必要があります。しかし、実際にはほぼその2倍の時間を取込む必要があります。FFTを行う前の時間波形の最初と最後が連続的につながらないと、結果のスペクトラムにはこれに伴う誤差が発生します。この不連続を抑えるため、取込んだ時間波形とFFT「窓」関数を掛け合わせます。ほとんどのFFT窓はベルまたはガウシアン形状をしており、その両端は低く、中央部は高くなっています。表示されるスペクトラムは、主にFFTを行う時間波形の中央部によって決まります。それぞれの窓のタイプには、それに関連した係数（ウィンドウ係数）があります。この例では、1.90のウィンドウ係数を持ったブラックマン-ハリスの窓関数を使用すると、以下の時間を取込む必要があります。

$$10\text{ ms} \times 1.9 = 19\text{ ms}$$

サンプル・レートにより、 $F_{\text{max}} = SR/2$ でスペクトラムの最高周波数が決まります。900MHzの信号では、最低でも1.8GS/sのサンプル・レートが必要です。5シリーズMSOのアナログ・サンプリングでは、3.125GS/sのサンプル・レートにします（1.8GS/sより高く、最も近いサンプル・レート設定です）。

次に、レコード長を求めます。これは、単純に取込時間×サンプル・レートで求められます。この例では、以下のようになります。

$$19\text{ ms} \times 3.125\text{ GS/s} = 59.375\text{ M ポイント}$$

オシロスコープによっては、このレコード長がないことさえあります。オシロスコープが十分な長さのレコード長を持っている場合であっても、多くのオシロスコープではコンピューティング負荷が重いため、FFTの最大レコード長に制限をかけています。例えば、前世代のテクトロニクス製のオシロスコープの最大FFTレコード長はおよそ2Mポイントです。それでも900MHzの信号波形を観測する場合（高いサンプル・レートが必要）、希望する時間の約1/30しか取込めず、これによって希望する周波数ドメイン表示では30倍低い分解能になります。

この例からわかるように、期待する表示にするためには、水平軸スケール、サンプル・レート、レコード長の複雑な相互関係を理解する必要があります。さらに、有限であるレコード長では妥協が必要になり、周波数ドメインで分解能を高くして高周波信号を観測するには、非常に長いデータが必要になるか（それほど長いレコード長はないことが多い）、処理にコストや時間がかかることになります。スペクトラム解析パッケージの中には、このようなトレードオフに対応しようとしているものもありますが、現在のすべてのオシロスコープによるFFTには上記のような制約があります。

Spectrum View

次に、同じ問題を Spectrum View とハードウェアによるデジタル・ダウンコンバータで対処する様子を見てみましょう。

取込んだトータルの時間で周波数ドメインの分解能が決まるのは変わりません。FFT 窓関数を適用し、19ms データを取込むのも同様です。4、5、6シリーズ MSO では、ADC はデジタル化した時間ドメインのデータをデシメータに送って時間ドメインの波形を生成しますが、デジタル・ダウンコンバータ (DDC) にもデータを送ります。

考えられ得るように、DDC は必要なサンプル・レートに対して大きな影響を与えます。DDC は、目的の中心周波数を 900MHz から 0Hz にシフトします。100kHz のスパンは -50kHz ~ +50kHz になります。50kHz 信号を適切にサンプルするためのサンプル・レートは、わずかに 125kS/s です。アキュイジション・プロセスに DDC を入れることで、必要なサンプル・レートは、中心周波数ではなく、スパンの関数になります。

レコード長は先ほどと同じ関係になりますが、ここでは以下のようになります。

$$19\text{ ms} \times 125\text{ kS/s} = 2375\text{ ポイント}$$

データは同相／直交 (IQ) サンプルとして保存され、時間ドメイン・データと IQ データ間で正確な同期が維持されます。従来の FFT では、59.375M ポイントのレコード長が必要でしたが、ダウンコンバージョンでは、2,375 ポイントしか必要としません (99.996% の低減)。

このように、2,375 ポイントの IQ データで FFT を実行することでスペクトラムを得ました。データ・ポイントが大幅に削減できることで、以下のような利点があります。

- 更新レートの大幅な向上
- 長い時間幅でデータを取込めるため、周波数解析における周波数分解能が向上
- 時間ドメイン表示を変更することなく、希望する周波数ドメインで取込み可能

Spectrum View :
オシロスコープによる周波数ドメイン解析の新しいアプローチ

[アプリケーション・ノート](#)

お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア 00800 2255 4835
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777
ベルギー 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
カナダ 1 800 833 9200
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777
デンマーク +45 80 88 1401
フィンランド +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835
ドイツ 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
イタリア 00800 2255 4835
日本 81 (3) 6714 3086
ルクセンブルク +41 52 675 3777
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
中国 400 820 5835
フィリピン 1 800 1601 0077
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
韓国 +82 2 6917 5000
ロシア +7 (495) 6647564
シンガポール 800 6011 473
南アフリカ +41 52 675 3777
スペイン 00800 2255 4835
スウェーデン 00800 2255 4835
スイス 00800 2255 4835
台湾 886 (2) 2656 6688
タイ 1 800 011 931
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835
アメリカ 1 800 833 9200
ベトナム 12060128

2017年4月現在



jp.tek.com

テクトロニクス／ケースレーインスツルメンツ

お客様コールセンター：技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡

TEL: 0120-441-046 ヨッ! 良い オ シ ロ 営業時間／9:00～12:00・13:00～18:00
(土日祝日および当社休日を除く)

サービス・コールセンター：修理・校正の依頼

TEL: 0120-741-046 なんと良い オ シ ロ 営業時間／9:00～12:00・13:00～17:30
(土日祝日および当社休日を除く)

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © 2019, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX およびTEK はTektronix, Inc. の登録商標です。
記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

2019年9月 48Z-61563-1