

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum View のスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

Yogesh Pai、パワー・アプリケーション・プロダクト・マネージャ
N. H. Srikrishna、シニア・テクノロジスト

新しいテクトロニクスのおシロスコープは、各チャンネルにデジタル・ダウンコンバータを使用した、スペクトラム解析機能を搭載しています。これによる表示、および関連する測定データは Spectrum View と呼ばれます。電源の制御ループの周波数応答において、Spectrum View でボード線図を作成した解析は、従来のFFTによる解析に比べて周波数分解能が優れています。

従来、周波数応答は専用の計測器で解析されてきましたが、新世代のおシロスコープは電源の制御ループ応答を測定できるようになりました。この解析は、ヘンドリック・ウェイド・ボーデ氏にちなんでボード（ボーデ）線図と呼ばれています。従来、この解析ではFFTアルゴリズムを使用して、特定の周波数範囲におけるシステムのゲインと位相を測定しました。4/5/6シリーズMSOなどの新しいおシロスコープは、すべてのチャンネルに専用のデジタル・ダウンコンバータを搭載しており、それらは時間ドメインのサンプル・レートやレコード長設定とは独立して動作します。この機能は、従来のFFTに対して Spectrum View と呼んで区別しており、周波数応答解析において優れた結果が得られます。このホワイト・ペーパーでは、従来のFFTと Spectrum View を使用して、2つの異なるDUT（被測定デバイス）のボード線図（制御ループ応答）を比較します。

AFGを内蔵した5/6シリーズMSO

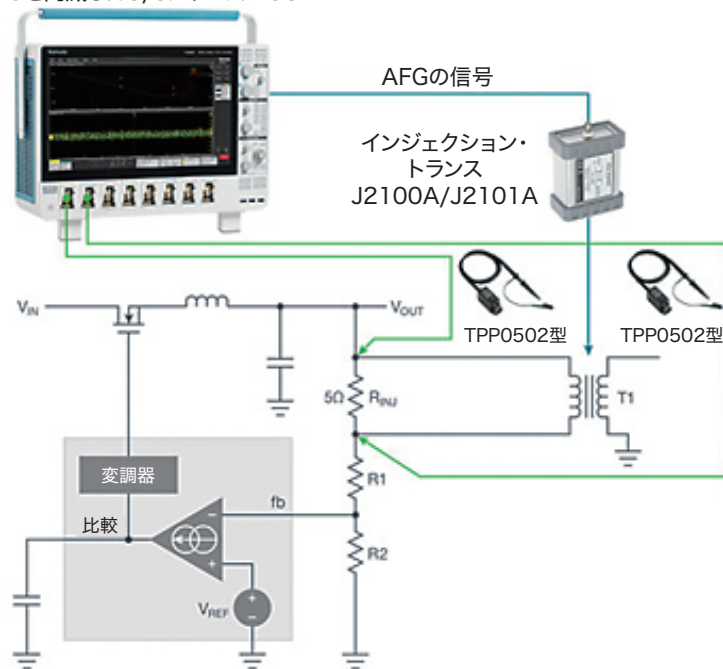


図1. このホワイト・ペーパーで使用するテスト・システムでは、ファンクション・ジェネレータ機能を内蔵した6シリーズMSO、Picotest社製J2101Aインジェクション・トランス、TPP0502型低減衰比受動プローブを使用。

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

制御ループ応答

理想的な電源は、負荷の変動にただちに応答し、過度のリングングや発振なしに一定の出力を維持します。不安定な電源は発振することがあり、制御ループの帯域内ではっきりとわかる、大きなリップルが発生します。制御ループを測定することで、負荷条件に対して電源がどのように応答するかを評価できます。

制御ループ応答の測定では、制御ループのフィードバック経路にさまざまな周波数の信号を注入します。さまざまな周波数でゲインと位相を測定し、ボード線図を作成します。ボード線図では、ボード振幅プロット（デシベルによる振幅（ゲイン））とボード位相プロット（度による位相）の2つのグラフで周波数応答を示します。

図1に示すようなオシロスコープ、シグナル・ジェネレータ、自動化ソフトウェアを使用するとボード線図がすばやく自動生成され、マージンの評価、回路性能とモデルとの比較が容易に行えます。さまざまな周波数における、実際の回路のゲインと位相を測定することで、シミュレーションのみの場合に比べて、設計の安定度を確実に把握できます。

FFTと、4/5/6シリーズMSOによるSpectrum View

最新のほとんどのデジタル・オシロスコープと同様、4/5/6シリーズMSOは基本的な演算によるFFT機能を標準で装備しており、アナログ信号だけでなく、演算波形、リファレンス波形の周波数ドメインを観測することができます。これは従来からあるFFTであり、他のオシロスコープとの一貫性を保つために4/5/6シリーズでも装備されています。しかし、4/5/6シリーズは、デジタル信号パスとデジタル・ダウンコンバータの特長を活かしたSpectrum Viewという機能も搭載しています。

従来のオシロスコープのFFTには弱点があります。オシロスコープのFFTは、サンプル・レートやレコード長などの設定された時間軸のアクイジション・パラメータに依存します。サンプル・レートとレコード長の間にトレードオフがあるため、望むべき周波数の分解能とスパンの組合せにならないことがあります。

4/5/6シリーズMSOのSpectrum Viewは、デジタル・ダウンコンバータ (DDC) と、時間ドメインのサンプル・レートやレコード長の調整からは独立したアクイジション・システムを使用しています。これには、以下のような特長があります。

- 時間ドメインと周波数ドメインをそれぞれ独立して最適に設定可能
- スペクトラム解析において、慣れ親しんだ中心周波数、スパン、分解能帯域幅 (RBW) で設定できる
- 任意の、またはすべてのアナログ・チャンネルの、時間ドメインと周波数ドメイン間の時間相関のとれた表示が可能

オシロスコープベースのシステムによる制御ループ応答の測定

電源の制御ループ応答測定のためのシステム構成

- オシロスコープ
- パワー測定／解析ソフトウェア
- 内蔵ファンクション・ジェネレータ
- インジェクション・トランス
- 低減衰比プローブ

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

テクトロニクス社の4/5/6-PWRパワー測定／解析アプリケーションは、制御ループ応答の測定を自動化します。(インピーダンス測定や電源の電圧変動除去比測定も自動化します。Spectrum Viewによるスペクトラム解析は、これらの周波数応答解析でも同様の性能改善が得られますが、このホワイト・ペーパーでは触れません。)

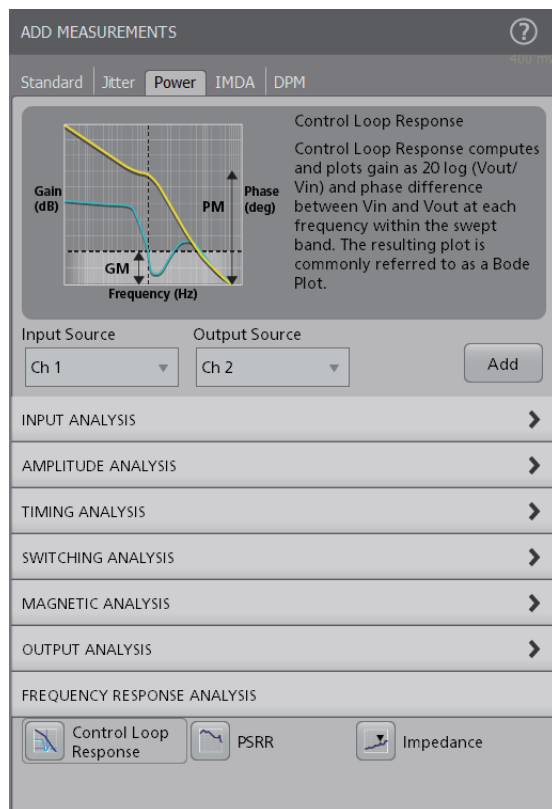


図2. 4/5/6-PWR (拡張パワー測定／解析) オプションで制御ループ測定を選択

制御ループへの信号注入は、ファンクション・ジェネレータを使用して、小さなインジェクション抵抗 (5~10Ω) の両端に信号を印加することで制御ループのフィードバックに信号を入力します (図1参照)。広い周波数帯域においてフラットな応答を持ったインジェクション・トランスフォーマを注入抵抗に接続し、電源から信号ソースのグラウンドを絶縁します。解析ソフトウェアに必要な情報は、インジェクション抵抗に接続した2本のプローブから得られます。入力と応答の振幅を測定することでゲインを計算し、同時に入力と応答間の位相遅延を測定します。

このホワイト・ペーパーでは、4/5/6シリーズの内蔵AFG (任意波形／ファンクション・ジェネレータ) オプションを使用して特定の周波数範囲の正弦波を生成しています。インジェクション・トランスフォーマは、目的の周波数に応じて選定する必要があります。Picotest社のJ2101A インジェクション・トランスフォーマには10Hz~45MHzのレンジがあり、5/6シリーズMSOのオプションで内蔵のファンクション・ジェネレータに十分に対応しています。Picotest社には、1Hz~5MHzのレンジに対応したJ2100A インジェクション・トランスフォーマも用意されています。TPP0502型低容量、低減衰比受動プローブは、電圧測定で使用します。このプローブを使用すると、4/5/6シリーズMSOでは1mV/divの感度で測定できます。

測定の設定

測定は、パワー解析パッケージで設定します (図3を参照)。この設定の中に Analysis Method という項目があり、従来のFFTによる方法と Spectrum Viewによる方法が選択できます。この2つの方法の比較が、このホワイト・ペーパーの趣旨です。

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

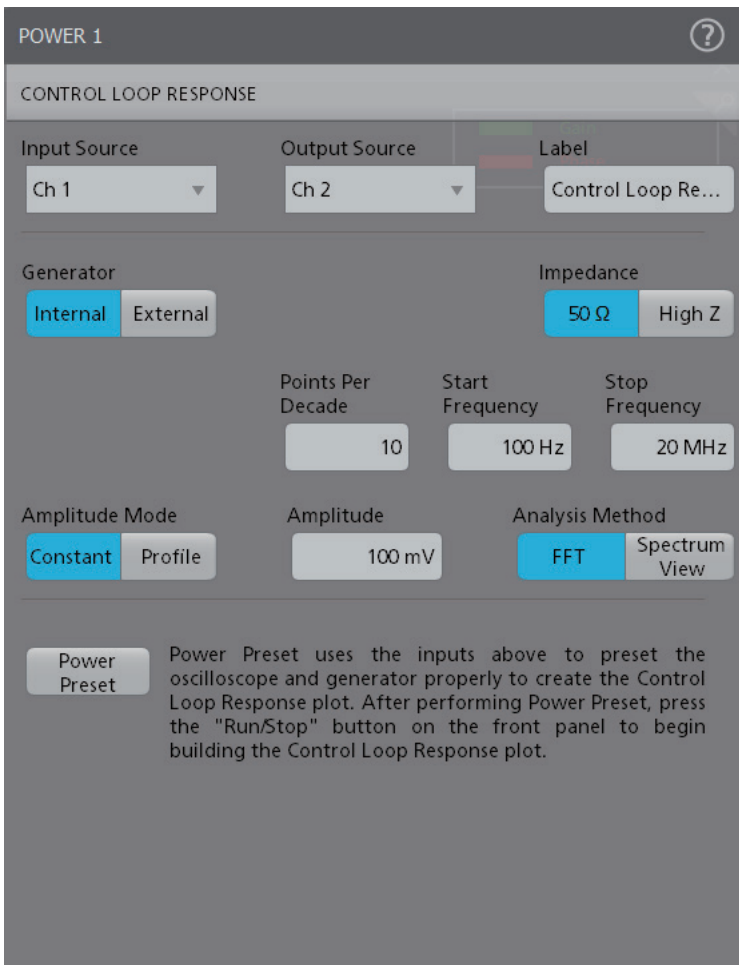


図3. ボード線図作成の設定には、開始／停止周波数、ステップ・サイズ、その他の設定項目が含まれる

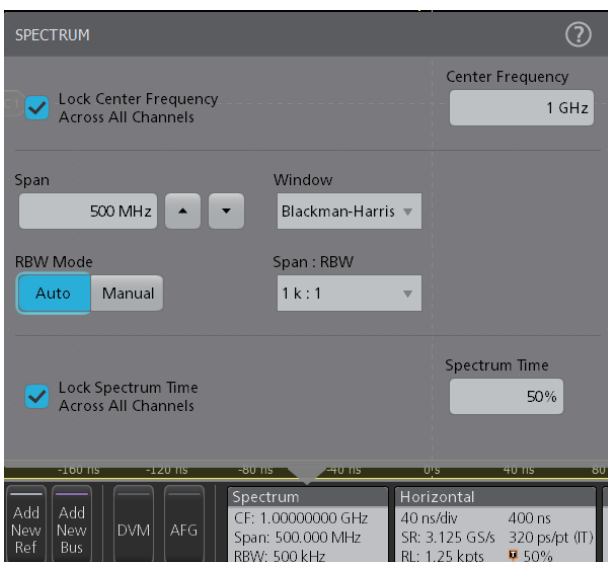


図4. Spectrum Viewによるスペクトラム解析の設定

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

事例1：ST Microelectronics 社製 STEVAL-ISA207V1 バック・コンバータ

この事例では、DUTとして STEVAL-ISA207V1 ステップダウン・スイッチング電源検証ボードを使用します。プローブは下図のように接続します。

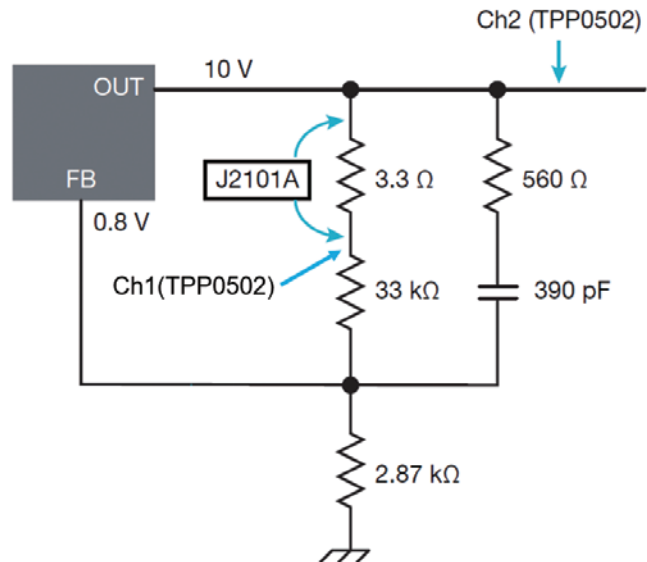
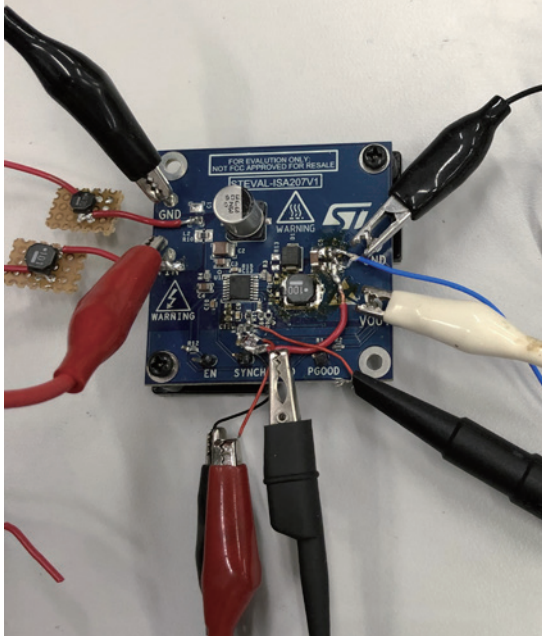


図5. STEVAL-ISA207V1バック・コンバータの制御ループ応答測定のための接続例 (もう1本のプローブは写真の外で引き出し線に接続している)

従来のFFTによる周波数応答の測定

設定で Control Loop Response を選択し、内蔵の AFG を以下のように設定します。

- Start Frequency : 10Hz
- Stop Frequency : 1MHz
- Points Per Decade : 20
- Stimulus Amplitude : Constant at 2.5Vpp

Power Preset ボタンをクリックすると、前回の結果をクリアしてオシロスコープを自動設定します。前面パネルの Run ボタンを押すと測定が実行され、位相とゲインのグラフがオシロスコープ画面に表示されます。測定結果を図6に示します。緑のプロットが0dBになったポイントの位相マージンが表示されます。赤のプロットが0°のスレッシュホールドを超えるとゲインのマージンが表示されます。FFTの手法では、位相の波形が凸凹しています。これは、主に周波数分解能の限界からくるものです。

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

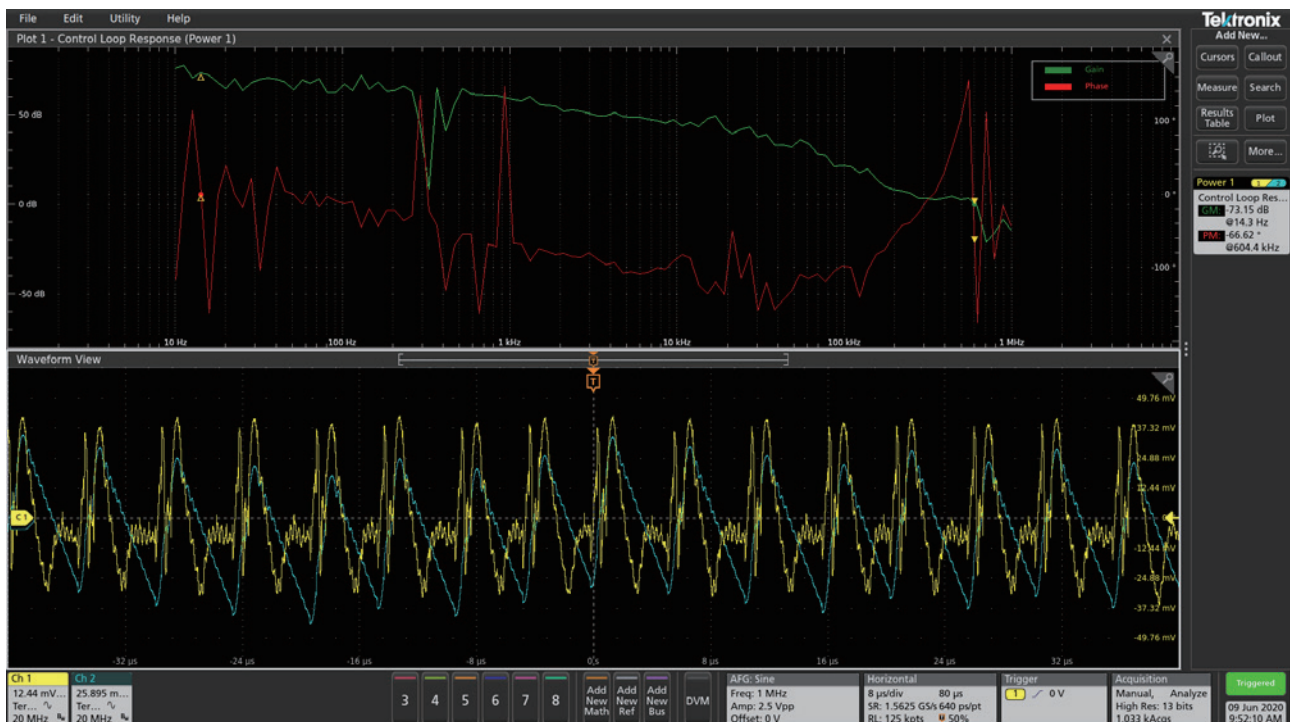


図6. FFTによる制御ループ応答の例。位相波形の凸凹は、主に小さな周波数の差を分解する能力の限界による

Spectrum Viewによる周波数応答の測定

このテストでは、オシロスコープに内蔵されたデジタル・ダウンコンバータを使用したSpectrum Viewで実行します。Control Loop Response設定のAnalysis MethodでSpectrum Viewに設定します。その他すべての設定はFFTの場合と同じです。Power Presetをクリックすると、Spectrum Viewのスペクトラム解析は以下のように設定されます。

- RBW : 100Hz
- Span : 10MHz

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

前面パネルのRunボタンを押すとテストが実行され、図7に示すような位相とゲインのグラフが表示されます。FFTによる凸凹のグラフと比べると、位相のプロットの凸凹が大きく低減しており、100kHz～10MHzでは比較的平坦に表示されています。これは、Spectrum ViewではmHzの周波数を分解、測定できるためです。

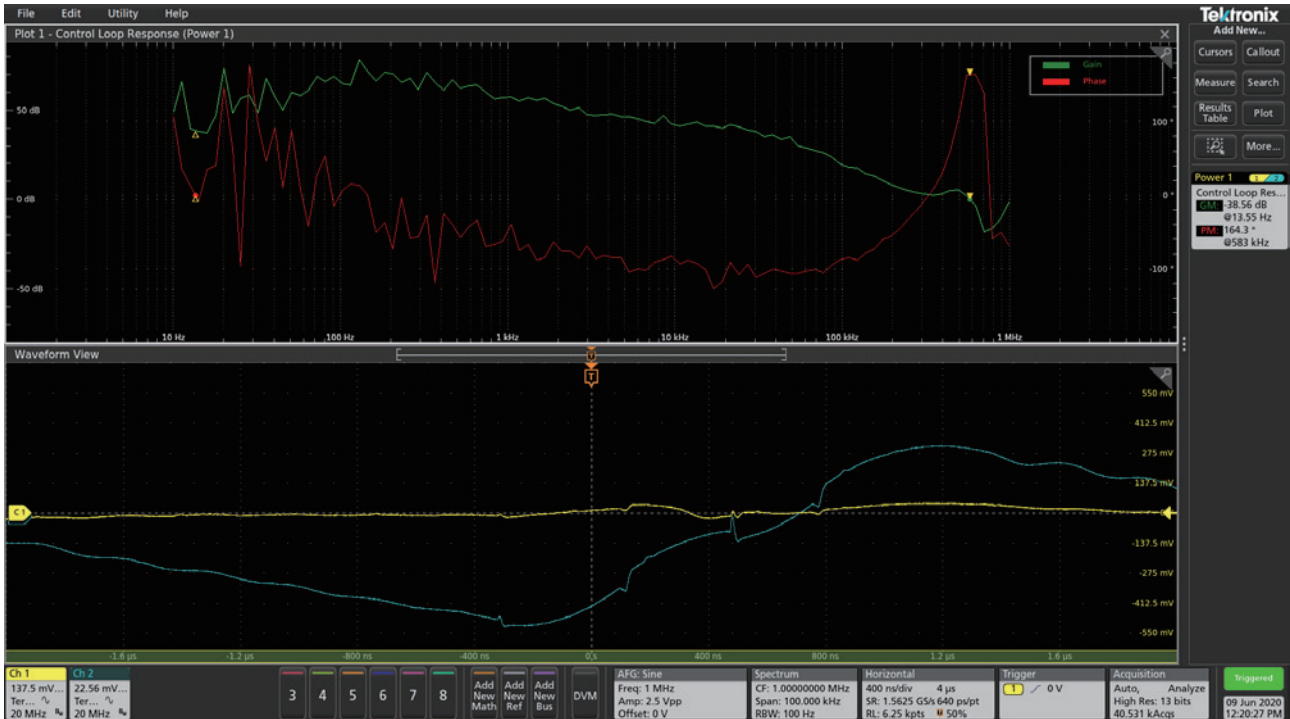


図7. RBWを100Hzに設定したSpectrum Viewによる制御ループ応答の例

Spectrum ViewのRBW（分解能帯域幅）設定を下げることで、周波数分解能はさらに上がり、応答のグラフもさらになめらかになります。図8の応答のグラフは、RBWを10Hzにしており、1kHz～100kHzがなめらかになっています。

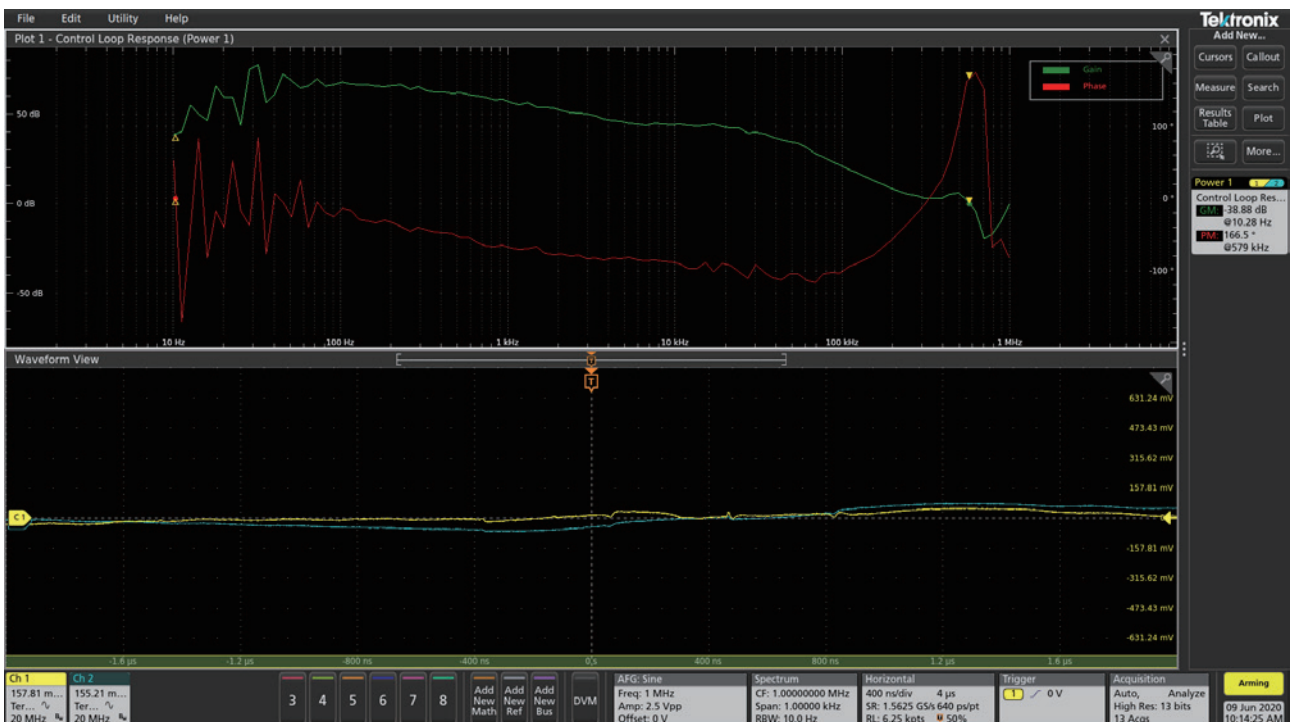


図8. RBWを10Hzに設定したSpectrum Viewでの制御ループ応答

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

事例2：Picotest社VRTS3ボード

この事例では、Picotest社製VRTS3デモ・ボードのPOL電圧レギュレータのループ応答を測定します。

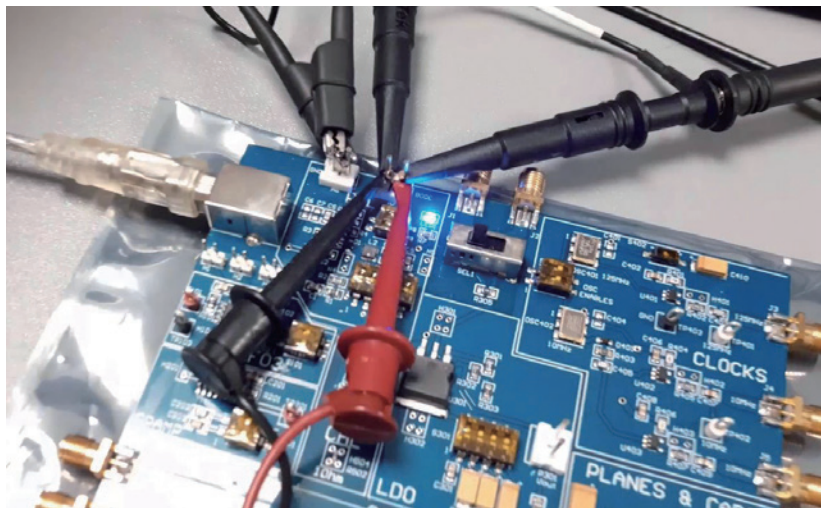


図9. Picotest社製VRTS3デモ・ボードの制御ループ応答測定のためのプロービング

従来のFFTによる周波数応答の測定

まず、従来のFFTで以下のように設定し、制御ループ応答を測定します。

- Start Frequency : 100Hz
- Stop Frequency : 1MHz
- Points Per Decade : 20
- Stimulus Amplitude : Constant at 400mVpp

従来のFFTでは、100kHzより上でゲインと位相のグラフに変動があります(図10を参照)。

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

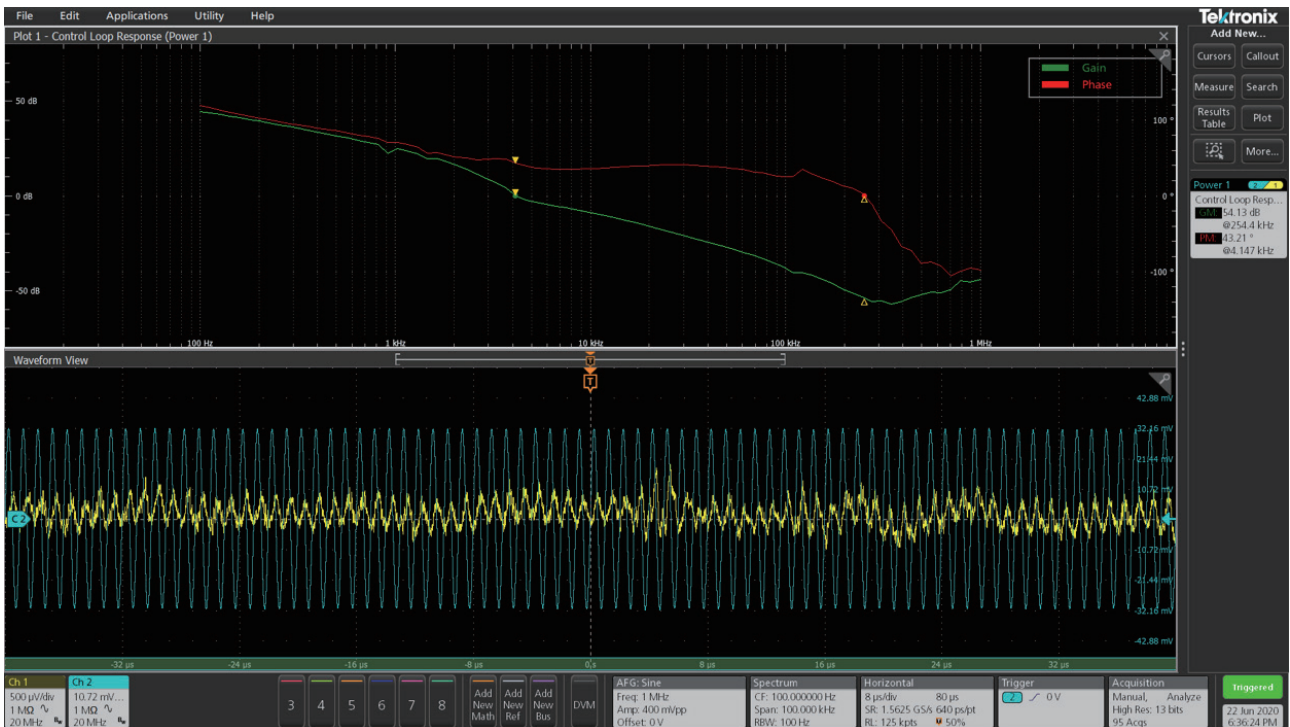


図10. 入力振幅400mVppのFFTによる制御ループ応答の測定例。100kHzより上で変動が見られる

RBWを100Hzに設定したSpectrum Viewでは、100kHzより上の周波数変動がなめかになり、ノイズが減ったことにより、レポートされている4.1kHzの位相マージンもより正確になっています。

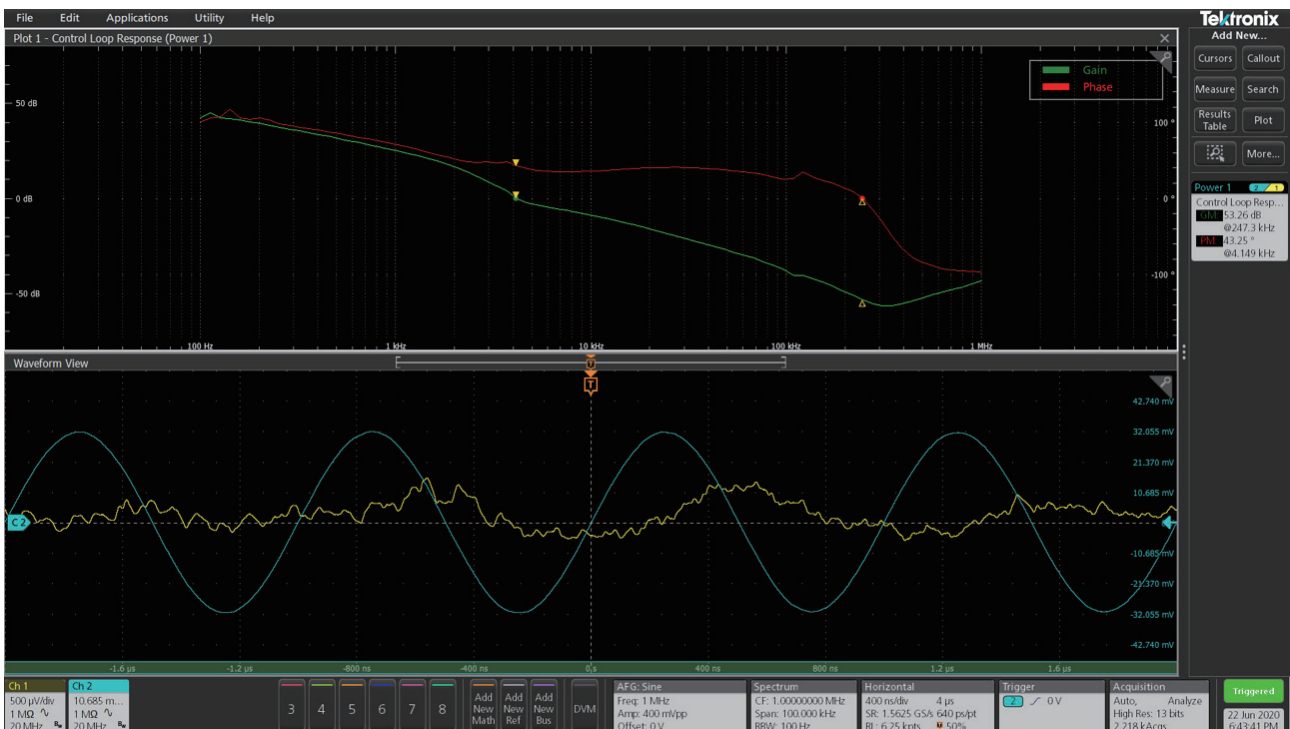


図11. RBWを100Hzに設定したSpectrum Viewによる制御ループ応答

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

Spectrum View による周波数応答の測定

次に、設定を変えて測定を実行し、Spectrum Viewで確実に改善されることを確認します。信号の電圧レベルを100mVppに下げます。

- Start Frequency : 100 Hz
- Stop Frequency : 1MHz
- Points Per Decade : 20
- Stimulus amplitude : Constant at 100mVpp

従来のFFTによる結果を図12に示します。やはり、100kHzより上でゲインと位相に変動が見られます。図13は、内蔵のダウンコンバータ (Spectrum View) による測定結果です。周波数スweepの高い周波数帯域で、ゲインと位相のグラフがなめらかになっています。一般に、入力の振幅を大きくするとよい結果が得られますが、大きすぎるとDUTが飽和する原因になることがあります。さまざまな振幅の信号を入力することで、DUTが飽和しない電圧を確かめることができます。

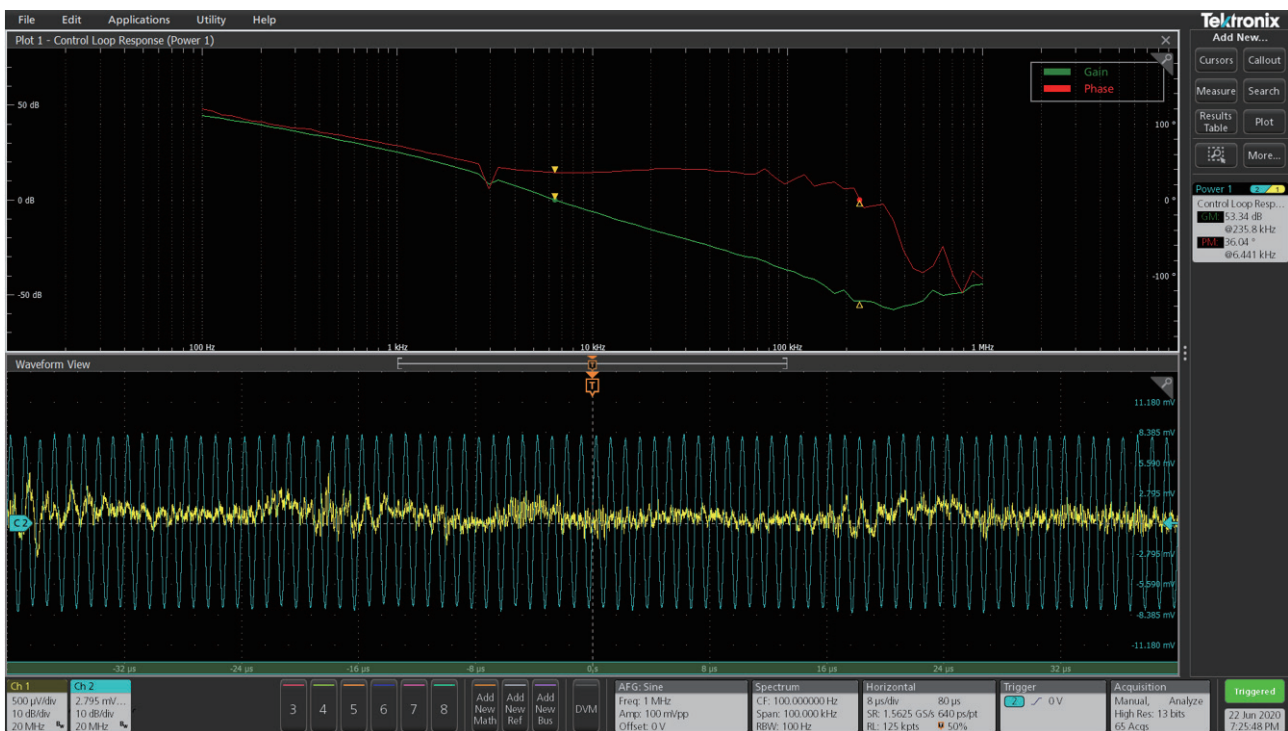


図12. 入力の振幅100mVppのFFTによる制御ループ応答の測定例。100kHzより上でゲインと位相に変動が見られる

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

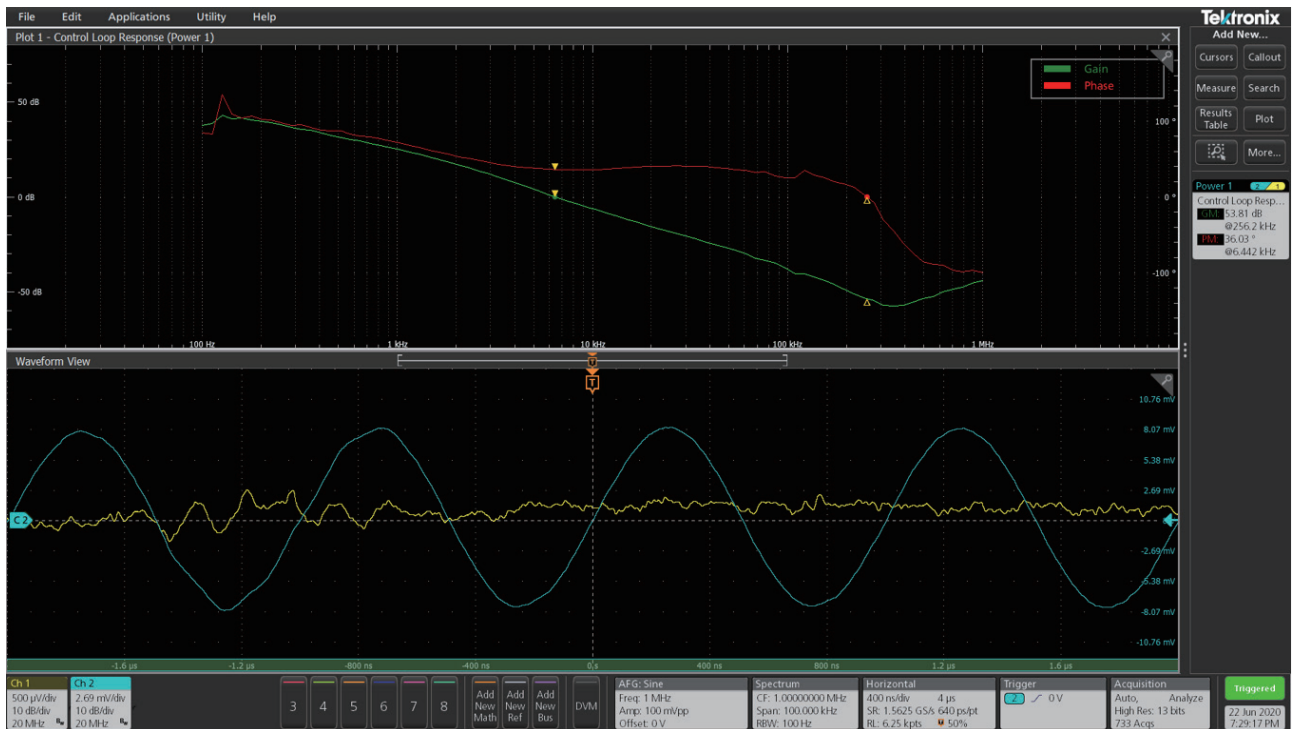


図13. RBWを100Hz、入力の振幅を100mVppにしたSpectrum Viewによる制御ループ応答の測定例

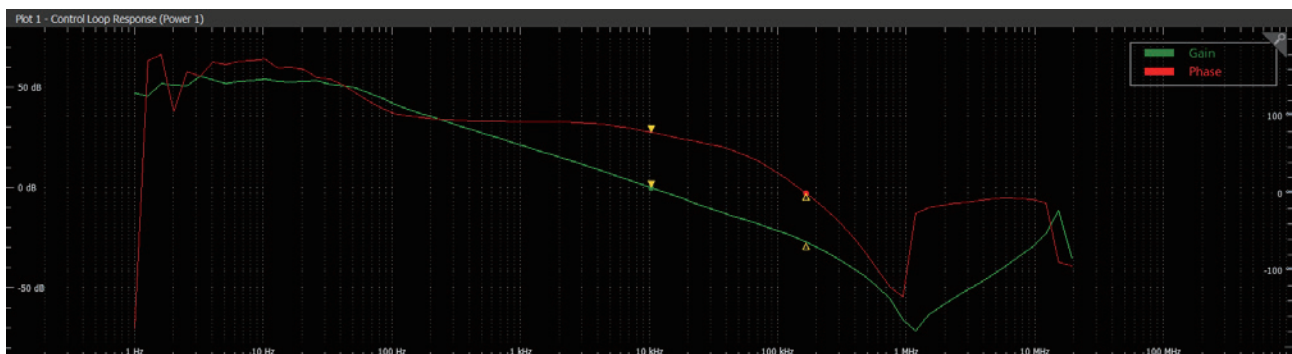


図14. 1Hzから開始したSpectrum Viewによる制御ループ応答の測定例。1Hzにおける不連続は、 $180^\circ = 0^\circ$ における位相の折り返しによる

Spectrum Viewは、優れた分解能だけでなく、図14に示すように1Hzから解析できるという特長があります。これは、従来のFFTではできないことです。

従来のオシロスコープのFFTによる電源制御ループの周波数応答測定と Spectrum Viewのスペクトラム解析による周波数応答測定を比較する

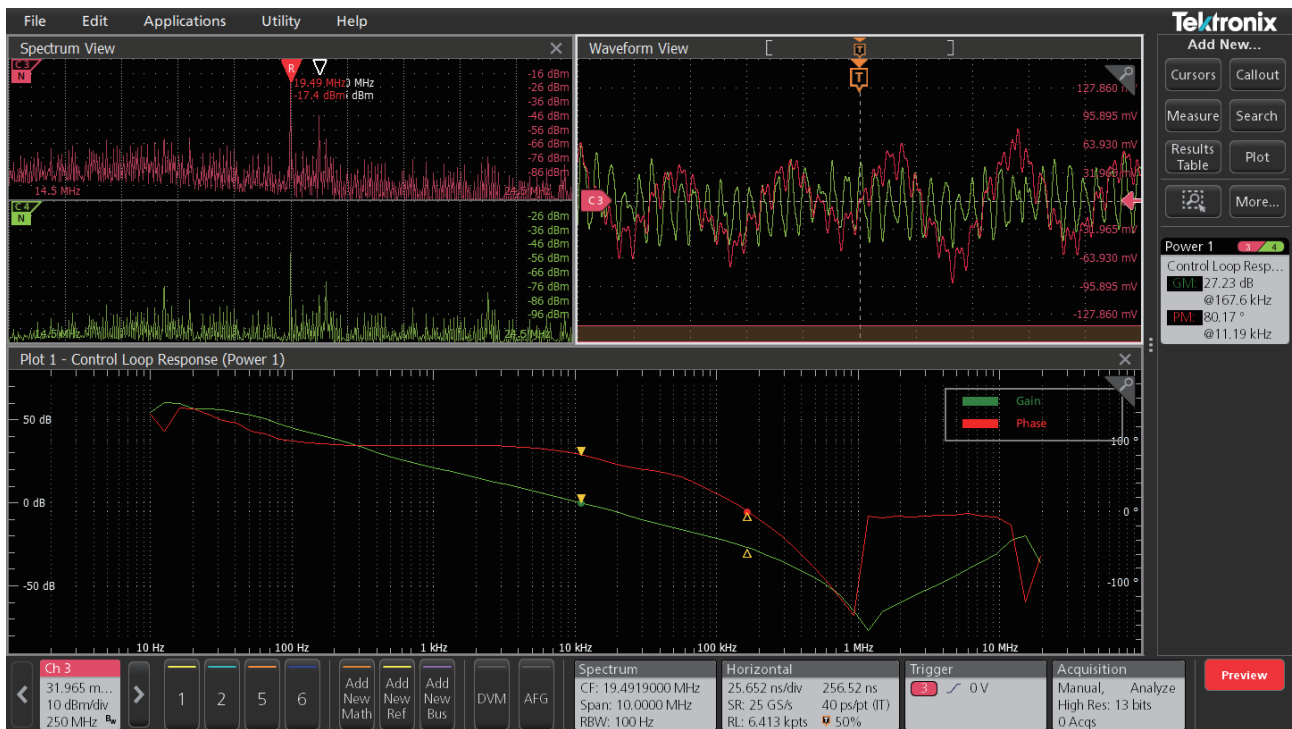


図15. 10Hzから開始し、測定実行中にSpectrum Viewウィンドウをオンにした、Spectrum Viewによる制御ループ応答の測定例

Spectrum Viewのツールでサポートされているスペクトラム・ウィンドウにより、入出力信号の両方において支配的な掃引周波数を確認できます。これにより、掃引信号が安定しているのか、ノイズが多いのかがわかります。

まとめ

従来のオシロスコープによるFFTを使用し、2種類のDUT、異なる信号設定で測定した例では、周波数分解能の制約からゲインと位相のグラフに暴れが生じます。Spectrum Viewを使用した場合、高い周波数、低い周波数ともに暴れは少なくなります。低いRBW設定が可能であり、時間ドメインのサンプリングには依存しておらず、優れた周波数分解能により、より正確なゲイン・マージン、位相マージンが得られます。すなわち、Spectrum Viewは時間ドメインのアクイジション・パラメータから独立し、専用のダウンコンバータを搭載しているため、制御ループの解析、周波数応答の解析がより正確に、優れた再現性で測定できます。これにより、4/5/6シリーズMSOは、電源の制御ループ解析において、VNA（ベクトル・ネットワーク・アナライザ）、周波数応答アナライザと同等の結果が得られます。

参考文献：

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 (<https://jp.tek.com/document/application-note/spectrum-view-new-approach-frequency-domain-analysis-oscilloscopes>)