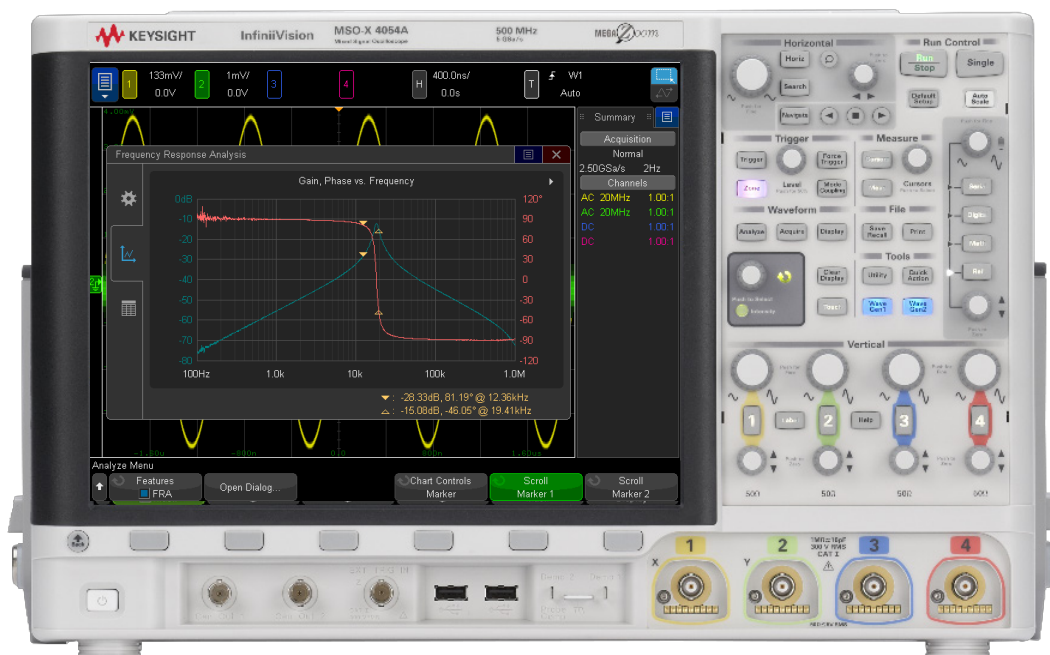


周波数応答解析（ボード線図）

Keysight InfiniiVision Xシリーズ オシロスコープ

今日の多くのエレクトロニクスデザインでは、要求された性能を満たすことを確認するために周波数応答解析が必要になります。この信号特性評価手法は設計した回路において、広いペクトラムの異なる周波数入力に対して出力がどのように応答するかを観察するために使用されます。このような解析を実行しないと、デザインや製品の欠陥につながるおそれがあります。周波数応答解析（FRA：Frequency Response Analysis）は、パッシブ/アクティブフィルタ、増幅器、スイッチング電源の負帰還回路（クローズドループ応答）などのデバイスに対してきわめて重要な役割を果たします。

このアプリケーションノートでは、FRAの概要を解説し、3種類の測定例によってこのアプリケーションの使用方法を紹介します。



周波数応答解析とは

周波数応答測定がよくわからないという方は、大学の電気工学の授業で学んだボード線図プロットの書き方を思い出してみてください。ボード線図プロットは、入力によって変化するシステム出力の周波数（周波数応答）に対する利得と位相の理論的な直線近似です。このプロットは、回路の伝達関数の極と零点に基づいています。例えば、直列R-L-C受動回路（図1）の伝達関数 $T(j\omega)$ には、2個の極と1個の零点(0 Hz)があります。これは、次の式に基づくバンドパスフィルターとなります。

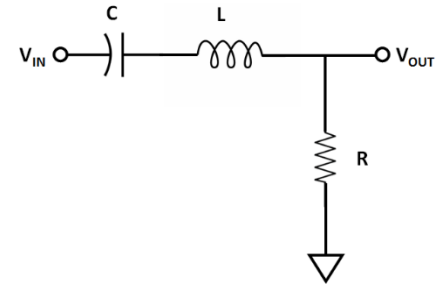


図1. 直列R-L-C受動回路。

$$T(j\omega) = \frac{V_{OUT}(j\omega)}{V_{IN}(j\omega)} = \left(\frac{R}{L}\right) \frac{j\omega}{\left[(j\omega)^2 + \left(\frac{R}{L}\right)j\omega + \frac{1}{LC}\right]}$$

$$f_{Pole1} \text{ (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \left(-\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \right)$$

$$f_{Pole2} \text{ (Hz)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \right)$$

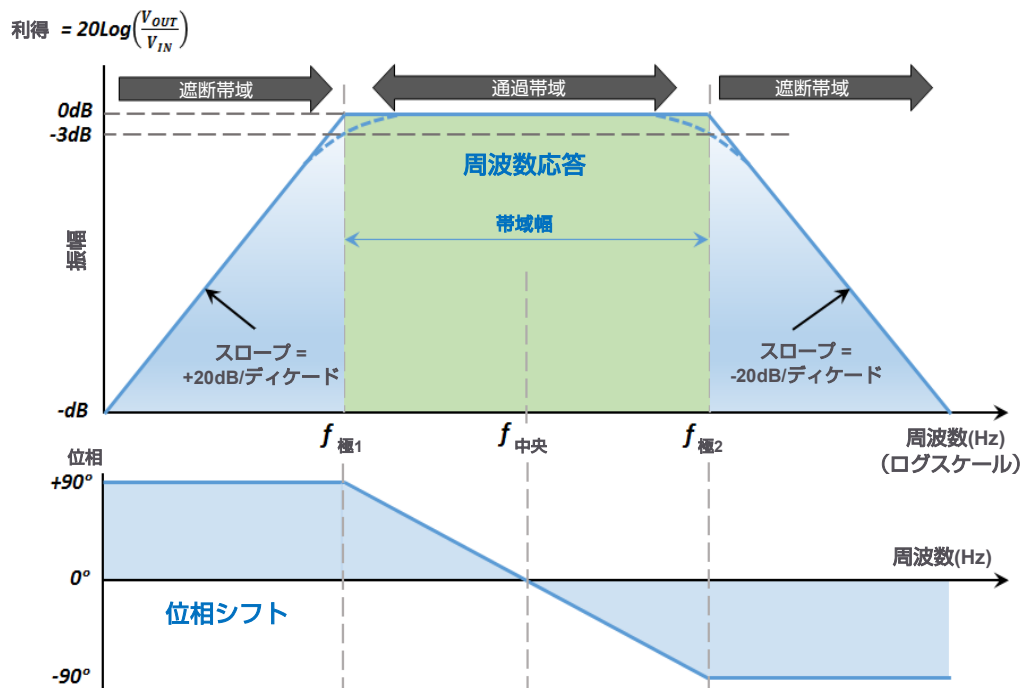


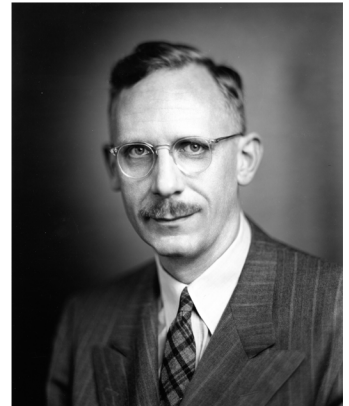
図2. 直列R-L-Cバンドパスフィルターの利得および位相ボード線図プロット。

$R=50\ \Omega$ 、 $L=10\ \mu\text{H}$ 、 $C=1\ \mu\text{F}$ と仮定すると、理論的には $f_{\text{Pole}1}$ は3.2 kHzで、 $f_{\text{Pole}2}$ は800 kHzとなります。図2に示すように、これらは $\pm 20\ \text{dB/ディケード}$ の直線近似が0 dBと交わる周波数です。ただし、この受動回路をテストしてみると、実際の利得と位相のトレースは、完全な直線にはなりません。特に極周波数の近辺ではそうです。利得は約3 dB低く、位相は2つの極周波数のそれぞれで約 $\pm 45^\circ$ になります。

それでは、デザインをテストして実際の性能を理論と比較するにはどうすればよいでしょうか。

自動周波数応答解析

専用の周波数応答アナライザ(FRA)またはベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)が使用できる恵まれた環境を除いて、この解析は従来、オシロスコープと正弦波入力信号源としてのファンクションジェネレーターの組み合わせを使用して行われており、非常に面倒な測定でした。この作業では、複数の周波数設定で利得 ($A=20\text{Log}V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}}$) と位相を知るために、多数の振幅/時間測定を手動で実行する必要がありました。電気工学の学生のほとんどは現在もこの方法を使用しています。しかし、キーサイトの周波数応答解析(FRA)アプリケーションの導入により、この状況は一変しました。オシロスコープの内蔵波形発生器を正弦波入力信号源とし、オシロスコープ内で動作する自動FRAソフトウェアを使用することで、自動周波数応答測定が初めて可能になったのです。



Hendrik Wade Bode
(1905年～1982年)

Hendrik Wade Bodeは、1905年12月24日に米国ウィスコンシン州マディソンで生まれました。1926年にオハイオ州立大学で数学の学士号と修士号を取得した後、Bodeはベル研究所で工学および科学研究の輝かしいキャリアをスタートさせました。ベル研究所在籍中の1935年に、Bodeはコロンビア大学で物理学の博士号を取得しています。1938年に発明されたのが、今日Bode博士の名にちなんで工学を学ぶ学生に広く知られている「ボード線図プロット」です。当初はそのような名前ではなく、単に「漸近周波数領域振幅/位相プロット」と呼ばれていました。ベル研究所時代に、Bode博士は多数の学術的なメダルや賞を受賞し、電気工学や通信工学のさまざまな分野に関する25件の特許を取得しました。また、Claude ShannonやHarry Nyquistといったベル研究所の他の著名な科学者や研究者とも共同研究を行っています。



図3. InfiniiVisionの周波数応答解析アプリケーションの設定画面

周波数応答テストを実行して利得／位相ボード線図プロットを作成する前に、InfiniiVisionオシロスコープのFRAの設定メニュー（図3）にあるテストパラメータの基本を理解しておく必要があります。

- 周波数モード：
 - **掃引(Sweep)** – 指定した開始周波数から停止周波数まで周波数を掃引しながら利得／位相測定を実行します。これにより、周波数に対する利得プロット（対数）と位相プロット（リニア）とリニア位相プロットを重ね合わせて表示します。測定結果は、プロットまたは表形式のリスト（エクスポート可能）で表示します。
 - **シングル** – 指定した1つの周波数で利得／位相測定を実行し、設定画面下部の結果に、周波数、利得、位相を表示します。（プロットおよび表形式の表示はなし）
- 周波数（開始、停止）：開始周波数は、掃引測定を開始する周波数を指定します。停止周波数は、停止する周波数を指定します。周波数は、10 Hz～20 MHzの範囲内で指定できます。
- ディケードごとのポイント数：指定した掃引周波数の範囲内の測定ポイント数（1～1000）を指定します。測定ポイント数が多いほど分解能は高くなりますが、すべてのデータのプロットにかかる時間が長くなります。
- ソース（入力、出力）：オシロスコープの入カソース（チャンネル1、チャンネル2、チャンネル3、またはチャンネル4）と出カソース（チャンネル1、チャンネル2、チャンネル3、またはチャンネル4）を指定します。
- 波形発生（振幅、出力負荷）：印加するテスト信号の振幅と負荷を指定します。線形システムの場合、通常はテスト振幅が大きいほど、ダイナミックレンジの大きい測定が得られます。ただし、飽和による非線形アリティーが生じる可能性があるシステム（フィードバック増幅器回路など）では、テスト振幅を大きく設定しすぎると、波形の歪みが生じ、テスト結果が不正確になる可能性があります。
- 振幅プロファイル：ONに設定した場合、スタートからストップまでの全掃引範囲で、周波数のディケードごとにテスト振幅をリニアに増加または減少させるように指定できます。このテストモードは、非線形アリティーを示す可能性があるシステムをテストする際に、ダイナミックレンジを最適化するために有効です。なお、振幅プロファイルは、1000 Xシリーズのオシロスコープにはありません。

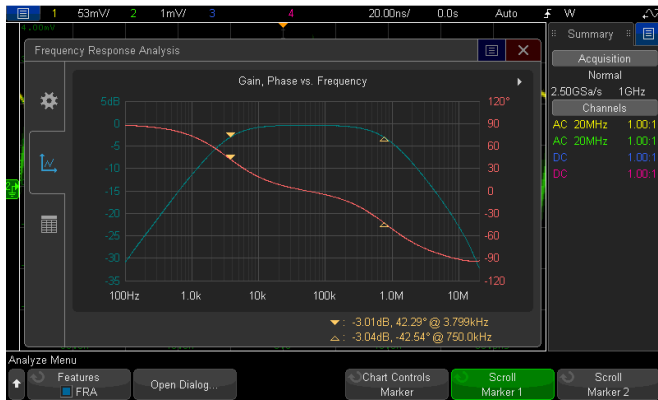


図4. 直列R-L-Cバンドパスフィルターの利得/位相プロット (利得=青のトレース、位相=オレンジのトレース)。



図5. 直列R-L-Cバンドパスフィルターの利得/位相のリスト (エクスポート可能な.csvフォーマット)

図4と5は、図1の直列R-L-Cバンドパスフィルターに対する100 Hz～20 MHzの掃引から得られたボード線図プロットと表形式のリストを示します。オシロスコープの利得/位相のデュアル・トラッキング・マーカを使用することで、図4のマーカ上段の-3 dBカットオフ周波数が3.8 kHz、下段の-3 dBカットオフ周波数が750 kHzであることがわかります。カットオフ周波数の理論値と実測値の差は、デバイスの許容値やリードインダクタンスなどの実環境の欠陥が原因です。このことから、実際にテストを行うことの重要性があらためてわかります。

キーサイトのオシロスコープベースのFRAテストソリューションの利点の1つは、掃引中に V_{IN} と V_{OUT} のタイムドメイン波形を観察できることです。これは2つの理由で重要です。第1に、これによって被試験回路がテスト中に動作していることを視覚的に確認できます。第2に、波形を観察することで、アクティブ回路のオーバードライブによる非線形性の発生を監視できます。これは、スタンドアロンのワンボックス型周波数応答アナライザではできないことです。図6に示すのは、 V_{IN} と V_{OUT} の正常な正弦波波形の例です。この例では200 mV_{PP}のテスト振幅が使用されています。図7は、1 V_{PP}でのテストの際の歪んだ非正弦波波形の例です。利得と位相の誤差を避けるには、掃引全体を通じて V_{IN} と V_{OUT} が正弦波波形を維持することが重要です。

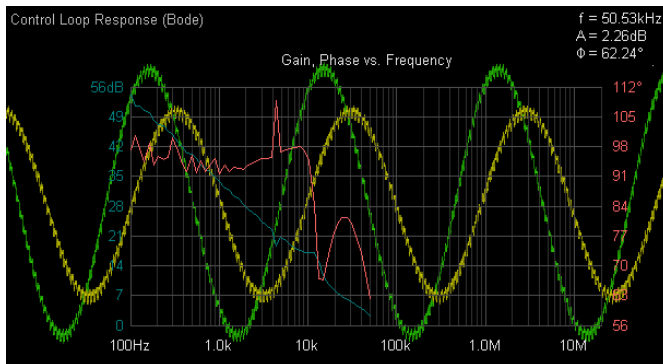


図6. FRA掃引中の V_{IN} と V_{OUT} の正常な正弦波波形。

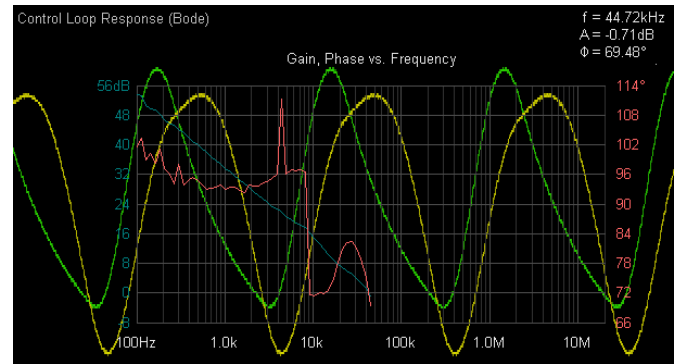


図7. オーバードライブによる V_{IN} と V_{OUT} の歪んだ正弦波波形。

制御ループ応答テスト

周波数応答解析は、図8に示すようなスイッチング電源の負帰還増幅器補正回路の安定性をテストする際にも重要です。負荷の上昇（負荷が必要とする電流の増加）などの突然の負荷変動が起きると、通常は出力電圧が一時的に低下します。負帰還増幅器は、出力電圧をドライブして目標の出力電圧レベルに戻す役割を果たします。ただし、フィードバック増幅器回路の応答が速すぎると、出力が不安定になったり発振したりする可能性があります。応答が遅すぎると、負荷の動作に必要な電力を供給できなくなる可能性があります。インサーキット制御ループ応答テスト（ボード線図プロット）は、こういった状況を防ぐために重要な役割を果たします。

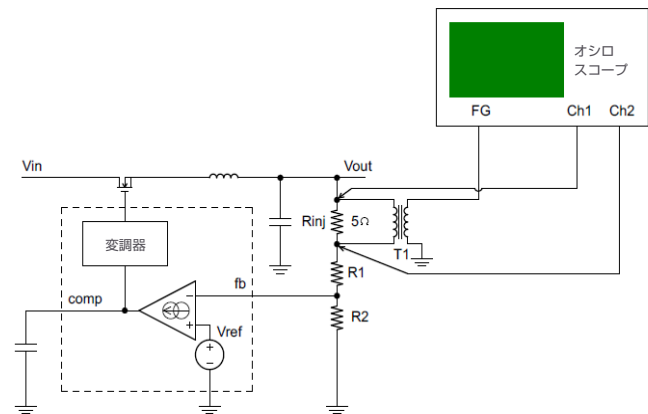


図8. スイッチング電源の制御ループのテスト。

図9に、スイッチング電源のフィードバック回路に対するインサーキット制御ループ応答測定の結果を示します。重要な測定としては、位相余裕(PM: Phase Margin)と利得余裕(GM: Gain Margin)が挙げられます。InfiniiVisionオシロスコープは、オプションのパワー測定ソフトウェアパッケージのライセンスがあれば、周波数応答テストの最後にこの結果を自動的に表示します。このテストでは、0 dBのクロスオーバー周波数で 49° の位相マージンと、 0° のクロスオーバー周波数で10 dBの利得マージンがあれば、安定性を確保するのに十分であることが確認できます。



図9. スイッチング電源の負帰還回路の制御ループ応答テスト。

制御ループ応答テストの詳細については、このアプリケーションノートの巻末にリストされている関連資料を参照してください。これらの関連資料には、このインサーキット測定の実行に必要なアクセサリや推奨プローブについても記述しています。

電源変動除去比テスト

電源変動除去比 (PSRR: Power Supply Rejection Ratio) も周波数応答測定の一つであり、主に低電圧ドロップアウトレギュレーター (LDO: Low DropOut) などのリニアDC/DCコンバーターに対して実行されます。リニアコンバーターは、きわめてフラットでノイズ/リップルがほとんどないDC出力が必要なアプリケーションに多く用いられます。コンバーターが入力の変動にどの程度影響されるかをテストするため、DC入力をさまざまな周波数のAC信号によって変調します。

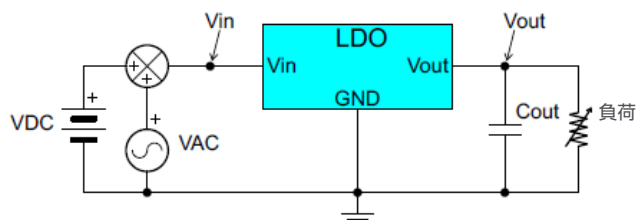


図10. リニア電圧レギュレーターのPSRRのテスト。

図10に、PSRR測定テストセットアップのブロック図を示します。ただし、「除去比」は「利得」の逆であることに注意が必要です。通常の周波数応答テストでは、利得対周波数を $20\text{Log}(V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}})$ に基づいてプロットするのに対して、PSSRでは除去比対周波数を $20\text{Log}(V_{\text{IN}}/V_{\text{OUT}})$ に基づいてプロットします。

図11に、リニア電源のPSSRテスト結果を示します。このテストでは、電源の最大除去比は36 kHzでの99 dBであり、最小除去比は掃引の終わりに近い19 MHzでの42 dBです。

電源変動除去比(PSRR)テストの詳細については、このアプリケーションノートの巻末にリストされている関連資料を参照してください。これらの関連資料には、このインサーキット測定の実行に必要なアクセサリや推奨プローブについて記述しています。

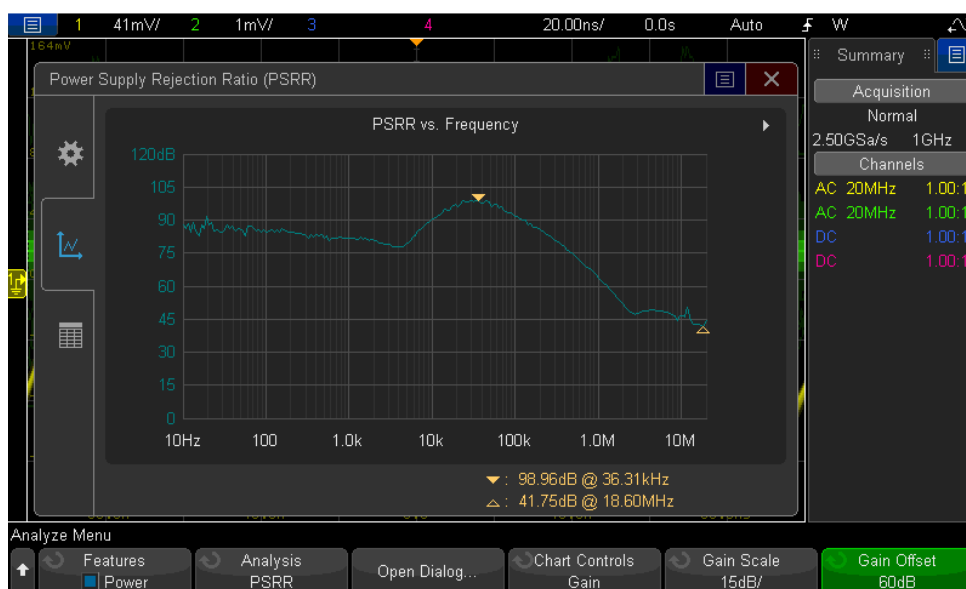


図11. リニア電源の電源変動除去比(PSRR)テスト。

システム要件

周波数応答解析(FRA)は、エントリーレベルのInfiniiVision 1000 Xシリーズ オシロスコープの“G”モデル(波形発生器内蔵)に標準で付属しています。高性能のInfiniiVision 3000T X、4000 X、6000 Xシリーズ オシロスコープの場合は、パワー、組み込み、車載用、航空宇宙、USB、またはUltimateバンドル・ソフトウェア・パッケージのライセンスを購入すると、周波数応答解析が付属します。以下に示す各ソフトウェアパッケージのデータシートに、詳細を記載しています。オプションのパワー測定ソフトウェアパッケージには、汎用FRA測定(利得/位相ボード線図プロット)に加えて、制御ループ応答テスト(自動位相マージン(PM)/利得マージン(GM)測定を含む)および電源変動除去比(PSRR)テスト(自動利得反転(除去比)プロットを含む)が付属しています。

まとめ

周波数応答測定は、回路デザインが必要な帯域幅性能仕様を満たすことを確認し、システムの安定性を確保するために必要です。これらの測定を、オシロスコープとファンクションジェネレーターを組み合わせた従来の方法によって手動で実行することは、手間がかかり、テスト結果のダイナミックレンジも不十分です。一方、専用の周波数応答アナライザは、汎用的に利用できるものではなく、使い方も複雑です。キーサイトのInfiniiVisionオシロスコープに内蔵のFRA測定機能は、次の特長を備えています。

- 内蔵波形発生器
- 自動FRAソフトウェア
- デュアルトラッキング利得/位相マーカー
- タイムドメイン波形をモニターすることでテスト中に歪みを検出可能
- 振幅プロファイルによるダイナミックレンジの最適化
- 位相/利得余裕の自動測定

関連資料

タイトル	カタログタイプ	カタログ番号
制御ループ応答テスト	Application note	5992-0593JAJP
電源変動除去比(PSRR)テスト	Application note	5992-0594JAJP
InfiniiVision 1000 Xシリーズ オシロスコープ	Data sheet	5992-3484JAJP
InfiniiVision 3000T X-シリーズ オシロスコープ	Data sheet	5992-0140JAJP
InfiniiVision 4000 Xシリーズ オシロスコープ	Data sheet	5991-1103JAJP
InfiniiVision 6000 Xシリーズ オシロスコープ	Data sheet	5991-4087JAJP
Power Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3925EN
Automotive Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3912EN
Embedded Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3924EN
Aero Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3910EN
USB Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3920EN
Ultimate Bundle Software Package (FRA included)	Data sheet	5992-3918EN

製品の構成と見積の請求については、こちらをご参照ください。

<http://www.keysight.co.jp/find/software>

詳細またはご注文については、キーサイトの計測お客様窓口または販売代理店までお問い合わせください。

www.keysight.co.jp/find/contactus

詳細情報：www.keysight.co.jp

キーサイト・テクノロジー株式会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-12:00 / 13:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL：0120-421-345 (042-656-7832) | Email：contact_japan@keysight.com

