

Keysight Technologies

最新の4G/無線LAN通信システム用 ソリューション

高速で実用的なメモリ効果を含む

デジタル・プリディストーションの実現

Application Note

概要

LTE-Advanced、802.16m WirelessMAN-Advancedなど、3.9Gや4Gのテクノロジーに移動体通信ネットワークが移行するのに伴い、さまざまな課題が生じます。これは、無線ローカル・エリア・ネットワーク(無線LAN)規格の最新版(802.11ac、802.11ad)への進化においても同様です。どちらの場合も、最新規格ではさらに高速なデータ・レートのサポートが要求され、その実現のためにさまざまな拡張や新しい技術が採用されています。その結果、規格はますます複雑化し、デザインとテストは従来よりも一層困難になっています。それに加えて、規格は常に進化し続けています。

はじめに

最新の3.9Gおよび4G規格に基づいたデバイスのデザインとテストにおいて、特に重大な関心事となるのがパワーアンプ(PA)です。スマートフォンなどの高度な無線機器はバッテリー容量に非常に依存しているので、エネルギー効率の高いデザインを行うことが極めて重要です。PAは電力消費の大きな部分を占めるため、システム性能全体への影響が大きく、デバイスのハードウェアとその4Gでの動作要件に直接影響します。このため、今日のエンジニアが直面する最大の問題の1つが、デザイン・ゴールをできるだけ低価格で達成するために最適なPAを選択/デザインすることです。

問題点

PAは、無線通信システム全体の性能およびスループットに欠かせない重要なコンポーネントであり、アクティブ・デバイスなので、本質的に非線形です。その非線形性によりスペクトラム・リグロースが生じます。その結果、隣接チャネル干渉が発生し、規制機関が管理する帯域外エミッションに関する規格に違反します。また、帯域内歪みを引き起こし、通信システムのビット・エラー・レートやデータ・スループットが低下します。このような非線形性を低減する1つの方法が、PAをより少ない電力で動作させることです。ただし、この方法では、サービス・エリアが縮小し、サービス・プロバイダの資本支出と運用コストも増加してしまいます。線形化により、PAは高い電力付加効率(PAE)の領域(飽和近傍)で、大きな信号歪みが生じることなく動作できるようになるため、コストを削減できます。

PAの線形化に現在最も広く用いられる手法が、デジタル・プリディストーション(DPD)です。この手法では、高度な信号処理技術を使用してベースバンドで作成された、複雑で時間変動する実環境の信号を使用します。その後、PAの非線形性による影響を打ち消すために、信号に対して追加の信号処理が行なわれます。DPDはPAの線形化を実現するコスト・パフォーマンスの高い方法ですが、モデリングと実装には、通常は、高度な専門技術が必要です。また、最も効率的でリニアなPA出力性能を実現するには、DPDプロセスでメモリ効果を考慮する必要があります。

ソリューション

4Gに移行するエンジニアには、4G通信システム向けのDPDの実用的な実装を実現するソリューション(あらゆる知識レベルのエンジニアが使用可能な、最小限の機器で構成されたソリューション)が必要です。またモデリングでベンダ独自のチップセットやハードウェアの実装に依存することなく、カスタムDPDを残りのベースバンド処理に取り入れることによって部品を削減することができるツール・セットが必要です。最適なレベルの確度を維持するために、PAのメモリ効果と非線形性も考慮される必要があります。さらに、その他のさまざまなハードウェア検証ツールとの接続に対応している必要があります。

このような基準に適合する1つのソリューションが、キーサイト・テクノロジーのSystemVueプラットフォームに、W1716 DPDビルダ・アドオン・パーソナリティを追加した構成です(図1)。このユーティリティを使えば、ロー・パワー/ハイ・パワー 4G PA、トランシーバIC、自動利得制御モジュールの非線形性やメモリ効果の一般的な原因をすばやくモデリングして補正することができます。このユーティリティは、いくつかの高度なクレスト・ファクタ・リダクション(CFR)、DPD、信号発生、測定器制御機能が、使いやすい単一のウィザード・ベースのユーザ・インタフェースに統合され、4種類のプリディストーション・モデルと抽出手法(Memory Polynomial、Volterra、Look-up Table(LUT)、ユーザ定義の.m演算アルゴリズム)を装備しています。また、このユーティリティは、独自のDPDモデル、抽出IP(Intellectual Property)、テスト・ベクタに加えて、カスタム・グラフィカル・ユーザ・インタフェースの作成をサポートしています。さらに、最新の広帯域テスト機器(最高800 MHz)との連携も用意されています。これには、任意波形発生器やデジタイザ、キーサイトのAdvanced Design System(ADS)をはじめとするシミュレータ、M9381Aベクトル信号発生器、M9391Aベクトル・シグナル・アナライザPXIモジュラ測定器が含まれます。

システム・アーキテクトやRFコンポーネント・デザイナーは、W1716 DPDビルダを使用して、リンク・レベル性能、パーティショニング、コンポーネント選択を迅速

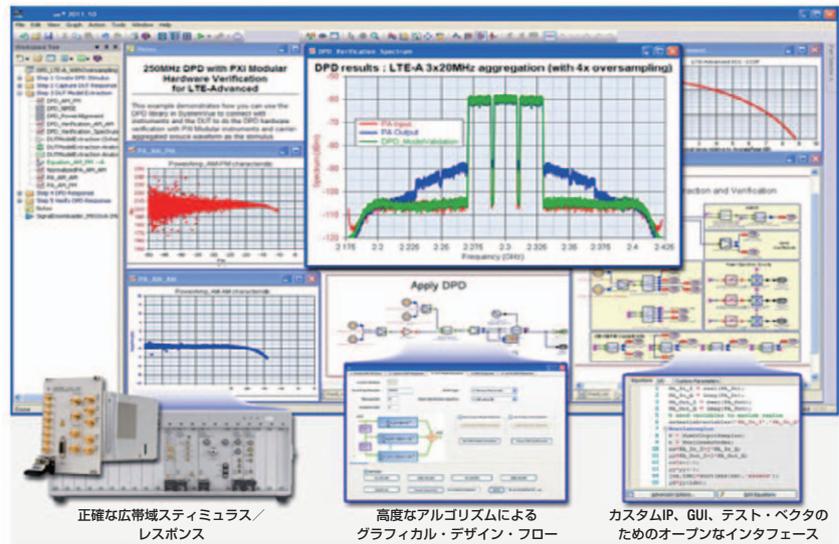


図1. W1716 DPDビルダのLUT DPDは、携帯端末、フェムトセル、無線LANインフラなど、量産用のPAアプリケーションに広く用いられています。カスタムIPおよびテスト波形が使用できるので、サポートされる商用モデリング・プラットフォームを利用しながら、独自のモデルや抽出アルゴリズムの制御が可能です。

に評価して改善することができます。一方、ベースバンド・アルゴリズム開発者、RFアーキテクト、RFコンポーネント・デザイナーは、線形化回路の実際の実装時間を短縮することができます。特に、無線システム・アーキテクトにとっては、テスト・ラボにある市販のテスト機器を使用した、研究開発の早い段階でのアーキテクトチャやコンポーネントの研究に便利です。W1716 DPDビルダを使用すれば、最高のハードウェアの柔軟性と4G測定の高い信頼性を維持しながら、コンポーネントがどの程度「線形化可能」かを数分で評価できます。ユーザは、検証(掃引EVMおよびACP検証など)の際に自動パワー・バックオフを使用するかしないかを選択できます。これに対して、専用DPDソリューションでは4Gの実現可能性を調査するために、実装の決定を早まってしまうことが多くありますが、W1716 DPDビルダでさまざまな角度の検証を行うことで、こうした問題を回避することができます。

CFRIは、DPDの効果を補い、改善します。最新の通信システムのスペクトラム効率の高い広帯域RF信号のピーク対アベレージ・パワー比(PAPR)は、13 dBです。CFRIは、信号をプリコンディショニングすることにより信号のピークを低減し、大きな信号の歪みをなくします。PAPRを低減することにより、PAは、CFRIによってより効率的に動作します。また、CFRIにより、スペクトラム・マスク/EVM仕様に適合する信号を作成できます。

CFR機能を内蔵しているので、W1716 DPDビルダはより広い帯域幅とダイナミック・レンジを補正でき、さまざまな増幅器トポロジに対応できます。この最初のデザインを、フル機能のベースバンド/DSPデザイン環境であるSystemVue内で行なえます。このため、真のDPDアルゴリズムをカスタム・ハードウェア実装に移行したり、DPDアルゴリズムを既存のFPGA/ASICに取り込むことによって部品点数を抑えることができます。W1716 DPDビルダの高性能CFRアルゴリズムは、WCDMA、LTE、LTE-Aの規格に準拠したCFRブロックに加えて、ほとんどどのような変調方式や規格にも対応します。

他のタスクやチップセット、測定器に依存するDPD手法とは異なり、キーサイトのSystemVueとW1716 DPDビルダの組み合わせは、キーサイトのMXG信号発生器やPXAスペクトラム・アナライザなどのハードウェア検証用の測定器とのリンク機能を内蔵した、デザイナーの観点に立った手法です(図2)。MXGは、高性能の広帯域RF出力内部校正機能を備えているので、DPDアプリケーションに最適です。その高い性能により、RF信号発生器の残留誤差を低減し、デバイス特性の評価が向上します。

PXAも、高性能の広帯域中間周波数の内部校正機能を備えているので、DPDアプリケーションに最適です。広帯域、広ダイナミック・レンジ、優れた位相／振幅フラットネス性能と線形性を兼ね備え、デバイスの優れた応答測定を行えます。

図2に示すセットアップと、W1716 DPDビルダを使用すれば、DPDプロセスは6つの基本ステップで実装できます。これらのステップを図3に示します。

基本的に、DPDステミュラス波形(LTE、802.11ac、ユーザ定義など)は、W1716 DPDビルダ・ウィザードによって作成され、ベクトル信号発生器にダウンロードされます。この波形は、PAハードウェアまたはPAのモデルに印加されます。次に、PAの応答(入力と出力の両方)が、VSAソフトウェアによってベクトル・シグナル・アナライザから捕捉されます。PAの出力信号は、ベクトル信号発生器とアナライザの間にPAハードウェアを挿入し、アッテネータによる信号パディングなど適切な校正をした状態で捕捉されます。または、PAの出力信号をPAモデルのシミュレーションから得ることもできます。W1716 DPDビルダは、捕捉した出力波形と目的の歪みのないパススルー波形を比較します。これに基づいて、DPDモデルが抽出され、検証されます。次に、DPD+PA応答は、抽出されたDPDモデルに信号を印加し、DPD出力波形をベクトル信号発生器にダウンロードすることによって捕捉されます。その後、PAの出力波形が、VSAソフトウェアによってベクトル・シグナル・アナライザから捕捉されます。最後に、DPD+PA応答が検証され、DPDによって実現可能な性能の向上を表示することができます。市販のPAを対象としたこのDPDプロセスの結果の例を、図4に示します。

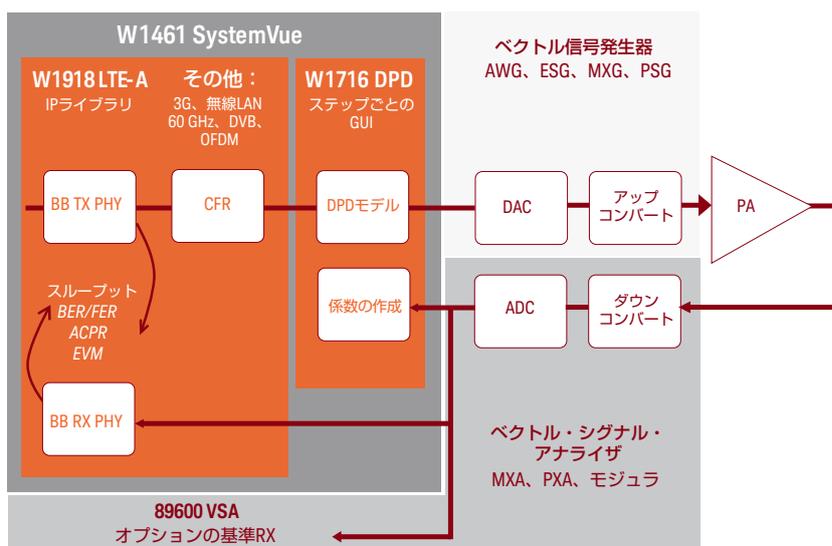
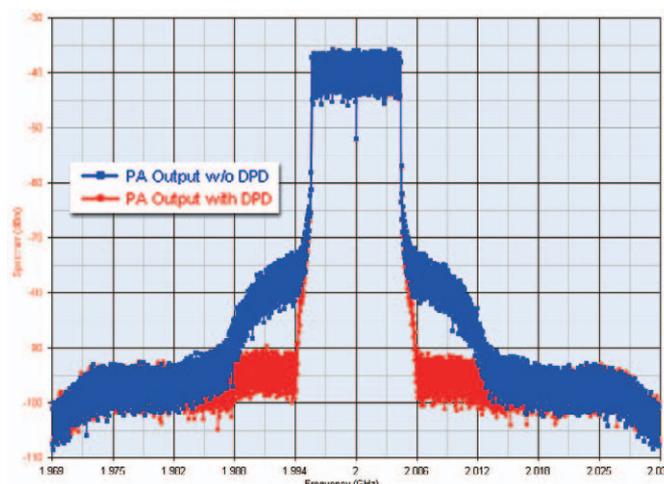


図2. この測定ベースのDPDモデリング・プラットフォームでは、ベクトル信号発生器(EXG, MXG, PSGなど)からコンポーネント・テストに必要な規格に準拠した信号を供給し、ベクトル・シグナル・アナライザ(MXA, PXA, モジュラPXIなど)でキーサイトの内蔵ベクトル信号解析(VSA)ソフトウェアを動作させて信号を捕捉することにより、PAの非線形性を測定します。SystemVueとベクトル信号発生器およびアナライザを組み合わせることで、DPDデザイン・フロー・プロセス全体を自動化／制御できます。



図3. 図2のセットアップを使用するDPDモデリング・フローは、6ステップのプロセスです

図4.この例のDPD抽出は、RFパワー=-2.9 dBmで行われています。元の生データは青で、DPD+PA出力は赤で示されています。



DPDプロセスでのメモリ効果の考慮

PAの重要な特徴に、メモリ効果があります。PAの瞬時出力は、現在のサンプルだけでなく、過去のサンプルにも依存する可能性があります。このため、DPDアルゴリズムは、非線形性に加えてこの動作も考慮する必要があります。通常、PAのメモリ効果は、出力での相互変調レベルを使用するか、AM-AMおよびAM-PM曲線をプロットすることによって判断されます。

前述のように、PAの入力波形と出力波形は、実際のPAハードウェアのラボでの測定か、PAモデルのシミュレーションから得られます。ラボで測定機器を使用してPAハードウェアに対してDPDプロセスを実行すると、PAの真の動作(非線形動作とメモリ効果)が得られます。しかし、この方法の欠点は、測定システム(測定器、ケーブル、アダプタなど)の不完全性がメモリ効果として表れる可能性があることです。このため、測定の効果とPAの効果とを切り分ける手段が必要になります。

DPDプロセスをシミュレーションで実行する場合、2つの方法が可能です(図5)。

- PAのモデルを作成してから、DPDプロセスを適用します。
- アナログにおけるPAの実際の回路と、デジタルにおけるDPDアルゴリズムとのコ・シミュレーションを実行します。

PAをモデリングする場合、何種類かのモデリング手法が利用できます。例えば、多項式フィッティング・モデルは、高調波の非線形性は適切に表現できますが、ある種のRF信号劣化(基本波および高調波周波数での大信号入力/出力終端不整合効果など)を完全に考慮することはできず、PAのメモリ効果も再現できません。PAのメモリ効果は、より複雑で高度なPAモデリング手法(Volterra級数、Hammerstein多項式、Weiner-Hammerstein多項式、非線形複素エンベロープ・インパルス応答モデルなど)を使えば説明できます。しかし、このような高度なモデルを十分に適用した場合には、非常に複雑な多項式になり、項数が膨大になります。このため、シミュレーション速度と収束性に悪影響を及ぼします。

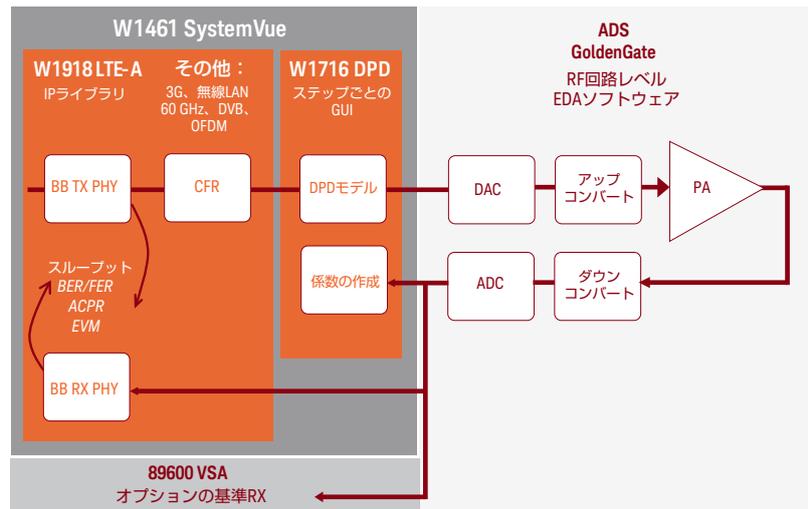


図5. キーサイトのシミュレーション・ベースのDPDモデリング・プロセスを使えば、ハードウェアPAのプロトタイプがまだできていなくても、シミュレートされたPA性能をADSおよびGolden Gate回路エンベロープ・シミュレータで観察できます。

PAのビヘイビア・モデル(動作モデル)は、測定ベースのXパラメータ*を使用し作成できます。このタイプのモデルは、PAの非線形動作を、高精度で最新、かつ安定して、トランスポータブルな、高い収束性のある非線形測定ベースの表現として提供します。ただし、複数の次元(周波数、パワー・レベル、バイアス電源、入力/出力負荷条件など)でのモデルの測定ニーズに対処するには、大量のデータを収集する必要があります。また、モデルの精度は、測定の対象となる高調波の数に依存します。さらに、現在のXパラメータ測定ベースのモデルの実装では、PAのバイアス変調による静的メモリ効果は考慮されますが、長期的な動的メモリ効果は考慮できません。

もう1つの手法であるFast Circuit Envelope(FCE)モデルは、キーサイトのGoldenGate RFシミュレーション環境で利用できるエンベロープ・トランジェント・ソルバを使用して抽出されます。FCEモデルは非線形性とメモリ効果の両方が考慮された高忠実度のPAモデルです。この手法はRFICデザインに広く用いられています。デザインは、パワー、周波数、バイアス、ソース、負荷インピーダンスやRFICの製造/測定プロセスで制御可能な任意のパラメータを目的の次元として、複数のシミュレーションを構成するだけで済みます。この方法は、FCEシミュレーション・ベース・ビヘイビア・モデルをDPDプロセスに統合するための、正確で、高速かつ信頼性の高いデザイン/解析フ

ローを実現します。ただし、必要なPA動作をさまざまな次元で捕捉するには、何通りものシミュレーションを実行しなくてはならない場合があります。また、DPDプロセスの途中でFCEモデルの範囲の拡大が必要と判断された場合は、モデル抽出プロセス全体を繰り返す必要があります。

DPD増幅器線形化のプロセスでメモリ効果を捕捉するための最適な方法は、ADS RFアナログ回路シミュレータで表現されたネイティブRFアナログ回路ベースのモデルとのコ・シミュレーションを実行することです。ADSに含まれるCircuit Envelope(CE)ソルバは、ハーモニック・バランス(HB)ソルバとSPICEソルバの優れた機能と利点を兼ね備えています。このソルバは、無線規格準拠の波形を含むアナログ/デジタル変調された複雑な信号など、高周波(搬送波)成分と低周波の時間変動(変調)の両方をもった回路の、時間変動する(非定常状態の)非線形解析に最適です。

CEソルバの最大の利点は、従来のSPICEシミュレーションに比べて効率や速度が大幅に向上していることです。さらに、AVM(Automatic Verification Modeling)、または"Fast Cosim"オプションを使用すると、履歴とメモリ効果を除外して、瞬時応答だけの非線形PAモデルを抽出できます。AVMにより、シミュレーション速度が大幅に向上し、1次の非線形PA効果の研究／解析時間を短縮できます。例として、図6に、AVMを使用した場合と使用しない場合の、ダイレクト・ネイティブ回路レベル・モデルとのコ・シミュレーションのAM-AM曲線を示します。

結果のまとめ

4Gへの移行に当たって、デザイン・ゴールをできるだけ低価格で達成するのに最適なPAを選択／デザインすることは、基地局のPAについても移動機のPAについても極めて困難な作業になっています。DPDにより、PAは高PAE領域(飽和近傍)で、大きな信号歪みが生じることなく動作できるようになるため、DPDは多くの基地局／移動機のPAのデザイン上の問題に対処するのに最適です。

SystemVueプラットフォーム、W1716 DPDユーティリティ、およびキーサイトのMXG、PXA、PXIモジュラ測定器を組み合わせ使用すれば、あらゆる専門知識レベルのエンジニアが、コスト・パフォーマンスの高い方法で非常に簡単に、DPDを4Gおよび無線LAN通信システムに実装できます。DPDプロセスでメモリ効果を完全に考慮するには、ラボ環境で測定機器を使用して、PAハードウェアに対してDPDを実行する必要があります。ハードウェアが利用できない場合の次善の方法は、回路レベルPAとのコ・シミュレーションによってDPDアルゴリズムを開発することです。この方法では、柔軟性と精度の両方が得られます。DPDアーキテクトによりDPDアルゴリズムのマーシとリミットがわかり、RF PAエンジニアは、PAのデザイン・マーシとリミットを改善または変更することで、より効率的でリニアなPA出力性能を実現する方法を知ることができます。

無線デザインとテストを加速するパワー

キーサイトは無線テスト分野のリーダーとして、高性能の無線デバイス／ネットワークのデザイン／テストにフォーカスして、現在と将来の規格向けに最適なアプリケーション専用プラットフォームを提供していきます。さらに、キーサイトは、適確な研究開発とフィールド・サポートにより、エンジニアが進化し続ける高度な無線技術を理解する支援をし、お客様の製品開発の促進に貢献します。

キーサイトのテスト／測定製品スイートの詳細については、以下のWebサイトをご覧ください。

www.keysight.co.jp/find/powerofx

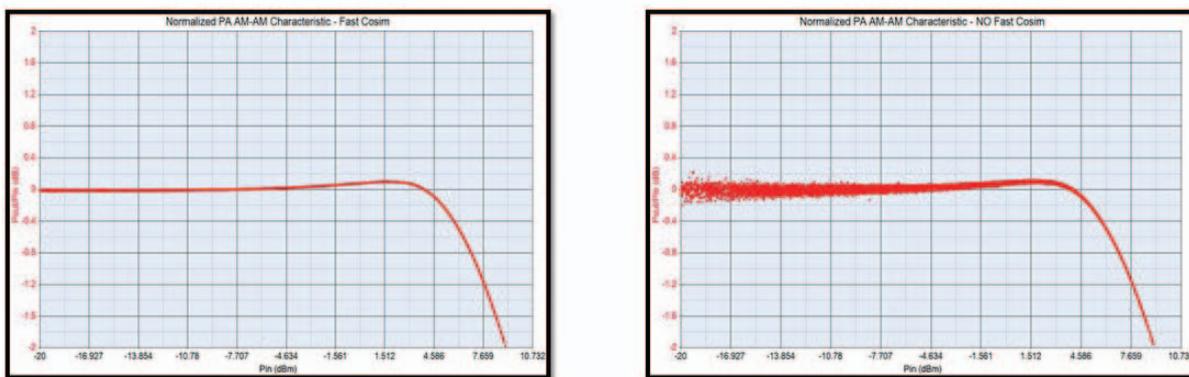


図6. 左側のグラフは、AVMオプションをオンにしたAM-AM曲線を示しています。モデルはメモリ効果を捕捉していません。右側は、AVMオプションをオフにしたAM-AM曲線です。こちらでは、モデルはメモリ効果を捕捉しています。

myKeysight

myKeysight

www.keysight.co.jp/find/mykeysight
ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。



www.lxistandard.org

LXIは、Webへのアクセスを可能にするイーサネット・ベースのテスト・システム用インターフェースです。Keysightは、LXIコンソーシアムの設立メンバーです。



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.
DEKRA Certified ISO 9001:2008
Quality Management System

契約販売店

www.keysight.co.jp/find/channelpartners
キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。
お気軽にお問い合わせください。

* Xパラメータは、米国、欧州、日本などにおけるキーサイト・テクノロジーの商標および登録商標です。Xパラメータのフォーマットと基礎となる式は公開され、文書化されています。詳細については、<http://www.keysight.co.jp/find/eesof-x-parameters-info> をご覧ください。

www.keysight.co.jp/find/powerofx

関連アプリケーション

- 無線基地局トランスミッタ
- ハンドセットおよびモバイル・チップセット
- 衛星通信リンク
- ポイントツーポイント地上マイクロ波リンク
- 軍用バックホール通信中継局
- 狭帯域レーダ

キーサイトの関連製品

- Advanced Design System
- GoldenGate
- Signal Studio
- VSA 89600
- W1461BP SystemVue Communications Architect
- W1716 DPDビルダ(SystemVue)
- W1917無線LANベースバンド検証ライブラリ(SystemVue)
- W1918 LTE-Advancedベースバンド検証ライブラリ(SystemVue)
- N5182B MXGベクトル信号発生器
- N9030A PXAシグナル・アナライザ
- M9381A PXIベクトル信号発生器
- M9391A PXIベクトル・シグナル・アナライザ

キーサイト・テクノロジー合同会社

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 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ■■■ 0120-421-345

(042-656-7832)

FAX ■■■ 0120-421-678

(042-656-7840)

Email contact japan@keysight.com

電子計測ホームページ

www.keysight.co.jp

● 記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。