

ロードプル測定の新手法

～アクティブ・ロードプルとウェーブフォーム・
エンジニアリング技術によるノンリニアRFデバイス測定～

すべての無線通信、すべての周波数レンジにおいて、効率の良い、低コストな設計が求められています。これは特にパワー・アンプの性能に密接に関係し、広い動作帯域における電力付加効率 (PAE, Power Added Efficiency) を改善することができれば、少ない部品点数でマルチバンド設計が可能になります。既存の計測器を使用した設計では、期待値と実際の値の相関関係がとれないため、設計と検証実験を数多く繰り返す必要があります。最新の複雑な無線通信フォーマットでは、デバイスをノンリニア領域で動作させることにより最適な効率が実現できます。この領域では、通常のデバイス歪みは高調波成分で表すことができます。目的の性能を達成するためには、より高い次数の高調波を正確に把握する最新の計測器が求められています。

商用無線アプリケーションでは、基本周波数0.8~2.7GHzのパワー・アンプを使用してきました。UHF帯の下の周波数帯域では、そのほとんどをアナログ・テレビの放送局が使用してきました。デジタル・テレビへの移行と、それに続くUHF帯の周波数再編により、非常に魅力的なスペクトラムが開放されました。この結果、200~800MHzの周波数帯で新しい商用無線技術/アプリケーションが期待されています。

テクニカル・ノート

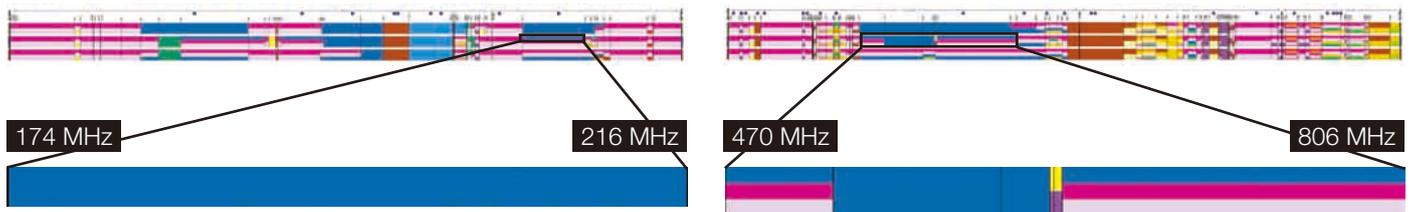


図1. アナログ・テレビからデジタル・テレビへの移行により、UHF帯においてホワイト・スペース（空白の帯域）ができた

UHF帯は、長い間、宇宙、防衛マーケット、衛星通信（SATCOM）システムで使用されてきました。今日では、商用スマート・フォンのような、音声、ビデオ、データを含んだ通信による次世代のシステムでのサービスが考えられています。

高効率UHFパワー・アンプの要求が高まるにつれ、従来の測定ソリューションの問題点が浮き彫りになりました。Mesuro社とテクトロニクスは、UHFパワー・アンプのテストを簡単にするだけでなく、従来のパッシブ・ロードブル測定が持つ、いくつかの制約、不確かさを解決する、新しいアクティブ・ロードブル技術を発表しました。このソリューションは、イギリスのウェールズにあるカーディフ大学の10年以上における技術研究の成果です。カーディフ大学の高周波エンジニアリング部門は、モバイル無線業界のリーダ企業とともに時間ドメイン測定技術、ロードブル測定技術を研究してきました。そして最適なパワー・アンプ設計のために、オープン・ループ・アクティブ・ロードブル技術の開発が行われました。

このテクニカル・ノートでは、最新のUHFパワー・アンプのマーケット概要、ノンリニア測定の技術革新について説明します。また、Mesuro社のMBシリーズ・アクティブ・ロードブル測定ソリューションの概要、およびテクトロニクスのAWG7000シリーズ任意波形ジェネレータ、DSA8200型サンプリング・オシロスコープによるノンリニア・デバイスの特性評価とアンプ開発での応用について説明します。

UHF帯における最新技術

UHF帯は、その周波数におけるいくつかの物理伝播特性により、非常に貴重な帯域といえます。従来のアナログ・テレビは、長い間UHF帯で放送されてきました。多くの人は、TV信号の優れた通過特性に慣れ親しんでいます。WiFiなどの最新の無線アプリケーションに比べると、UHF信号は障害物の通過性、カバー範囲の両方において優れています。このセクションでは、今後成長が見込まれる商用無線および航空宇宙、防衛アプリケーションについて説明します。

世界各地で成長するブロードバンド

今日、世界人口の20%以下の人々がインターネットにアクセスしています。調査によれば、ブロードバンドの使用頻度の高さがインターネットの成長を促進させています。インターネットを利用することで大きな成功を収めている大手企業もあります。世界人口の5~10%がさらにインターネットへアクセスすることになれば、大きなビジネス・チャンスになります。

アメリカやその他の国で行われたアナログ・テレビからデジタル・テレビへの移行により、以前では利用できなかった貴重な帯域が利用できるようになりました。US National Broadband Plan(全米ブロードバンド計画)では、この新しくできた120MHzの帯域幅をホワイト・スペース(White Space)と呼んでいます。この「ホワイト・スペース」は、デジタル・テレビへの移行によって生まれた従来のアナログ・テレビの帯域を表す新しい用語です。



図2. 増加するデータ量に対応する通信衛星、ブロードバンド・サービス

大手ITベンダー8社（マイクロソフト、グーグル、デル、HP、インテル、フィリップス、サムスン、Earthlink）は「ホワイト・スペース連合」を設立し、このホワイト・スペースで新しい高速インターネット技術が利用できるように働きかけています。一つのオプションとして考えられているのが、UHFにおけるWLAN技術をベースとした新しいホワイト・スペース・ネットワークです。考えられている用途を以下に記します。

- 過疎地域におけるブロードバンド・サービス
- 家庭内マルチメディア環境
- オープン・ネイバーフッド・アクセス
- 公共の保安
- バックホール運用
- 公共通信インフラ

新しいホワイト・スペース・ネットワークは、パワー・レベルを増やすことなく信号レンジを3倍拡張することができます。天候による影響が大幅に減り、屋内における信号通過特性が大幅に改善されます。このアプリケーションによるビジネス・チャンスは、この先15年間に於いて1000億ドルと見込まれています。

次世代のUHF衛星通信

商用におけるスマート・フォンと同様、防衛用途におけるデータ量も急激に増加しています。SATCOM（衛星通信）ネットワークにおける衛星は、商用携帯ネットワークにおける基地局と同様の役割を果たします。既存のUHF衛星ネットワークは既に使用されており、現在その機能拡張が計画されています。

計画中のプログラムの一つが、MUOS（Mobile User Objective System）です。MUOSでは、WCDMA技術を利用してUHF SATCOM帯を使用します。目標は、商用技術を使用し、従来のシステムと比べて16倍の通信性能を実現することです。

UHF帯でWCDMAを実装するには、いくつかの問題点があります。現行の商用システムでは1920～1980MHz帯を使用しますが、MUOSではダウンリンクで240～270MHz帯を、アップリンクで290～320MHz帯を使用します。ユーザ端末のパワー・アンプは、数倍もの比帯域幅（約10%対3.6%）で動作しなければなりません。また、ノッチドWCDMAによるPAR（Peak to Peak Average Ratio）も2～3dB上がり、高効率とリニアリティ性能が主な改善点です。効率が改善できれば、消費電力の低減によりバッテリーの軽量化、長時間使用、さらに熱の問題も解決できます。目標は、パワー効率を50%以上にする事です。最大出力パワーは、一般的な商用アンプの800mWに対して8Wと見込まれています。

UHF SATCOM無線におけるパワー・アンプの性能向上のための技術要求と潜在的なビジネス・チャンスは、研究／開発エンジニアにとって新しい課題となっています。

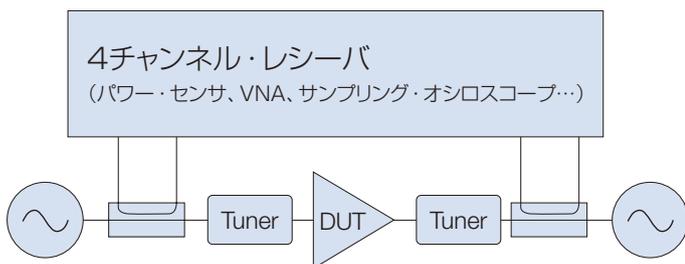


図3. 代表的なパッシブ・ソースプル/ロードプル構成

ノンリニア測定技術の進歩

ネットワーク・アナライザによるSパラメータ解析は、パッシブ・コンポーネントとアクティブ・コンポーネントの両方のテストで長く使用されてきました。周波数に関係なく、アクティブ・コンポーネントがリニア領域にある限りは、Sパラメータ測定の基本はCWテストです。ネットワーク・アナライザは、9kHzから100GHzおよびそれ以上の周波数において使用されます。しかし、アクティブ・コンポーネントがノンリニア領域に入ると、理論と測定はさらに複雑になります。一般的なネットワーク・アナライザは掃引型の計測器であるため、高調波における正確な位相相関の管理が必要です。この方法により、繰り返し信号を用いて高調波応答を測定することはできますが、さまざまなインピーダンスでのテストに対応するには、ロードプル機能が必要になります。

パッシブ・ソースプル/ロードプル

パッシブ・ロードプル・ソリューションは、デバイス/パワー・アンブ設計エンジニアにとっては長い間便利なツールとして使用されてきました。ノンリニア測定では、パワー・センサ、VNAまたはサンプリング・オシロスコープを使用します(図3を参照)。チューナは、DUT (Device Under Test、被測定デバイス) の入出力においてインピーダンス値を設定します。これにより、回路とパワー・レベルの設計マッチングをとるためのインピーダンス値が得られます。一般的には、入力ソースとDUT間の不整合を低減するために入力に1つのチューナが、必要な負荷条件を生成するために出力に1つのチューナが用いられます。チューナの位置は正確であり再

パッシブ・ロードプルの問題点

- 損失によって基本波における実質のチューニング・レンジが狭くなり、高調波の周波数ではさらに狭くなる
- 単一または有限個の周波数を制御するだけでは、ワイドバンド信号または高調波信号の測定精度が低下する。
- チューナにおける大きな反射により、レシーバ/センサで検出可能な信号が限定されてしまい、大きなダイナミック・レンジのレシーバが必要になる。
- 校正パスの中にチューナがあるため、すべての基本波と高調波のインピーダンスで誤差係数を求める必要がある。
- UHF周波数では、大きなサイズのチューナが必要 — チューナごとに91cm [3ft] 以上。

現性があるため、校正することができます。校正では、スラグとスライディング・ショート間の位置関係を正確に調整します。この校正ステージをもとに、DUTに挿入されるパワーは入力ソースで設定されるパワー・レベルから、この校正をもとに決定され、出力パワーはパワー・センサの読み値から計算することができます。複数の高調波を見るため、複数のチューナを連結して高調波インピーダンスをさらに制御します。現在では、1つのチューナで複数の高調波を設定できるパッシブ・チューナもあります。

このシステムの大きな問題点は、1つの周波数に対してインピーダンスを制御することはできませんが、特定の周波数におけるインピーダンスだけでなく広範囲な周波数レンジでのインピーダンスに影響を及ぼすことです。パッシブ・チューナはスラグの位置を調整することで特定の周波数のインピーダンスを制御することができますが、チューナが動作するすべての周波数に対して物理的に影響を及ぼします。この結果、すべての高調波インピーダンスが制御できないだけでなく、ポジションが変わることでインピーダンスの値も変化してしまい、実際の回路とは異なる測定結果となってしまいます。このため、ロードプル測定結果と実際のパワー・アンブ性能が大きく異なってしまいます。

| | 単一の高調波 | 複数の高調波 |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 周波数レンジ | 250~2500MHz | 400~3000MHz |
| 高調波の数 | 1 | 3 |
| 寸法 (高さ×幅×長さ) | 0.31×0.25×0.94m | 0.33×0.32×1.30m |

表1. パッシブ・チューナの数によって生ずるUHF周波数での問題点

高調波チューナ（複数のスラッグ、スライディング・ショートを用いたパッシブ・チューナ）でも同様の問題点があり、高次の高調波（3次以上）が制御できないため、高調波のインピーダンス制御が限定されてしまい、実際の回路とは大きく異なったものになります。例えば、チューナにおいてDUTからの微小電流は、オームの法則にしたがって非常に大きな電圧、高調波インピーダンス（3次以上の高調波）に変換され、発生します。制御されていない負荷変動では大きな容量負荷、誘導負荷が発生してしまい、ウェーブフォーム・エンジニアリングで求められるクリーンな波形とはならず、時間ドメインにおける波形は大きく歪みます。

DUTとレシーバの間にパッシブ・チューナがあるため（図3を参照）、不具合がチューナから発生したのか、DUTそのものから発生したかを区別することができません。これは、パワー・アンプ設計におけるネットワークの入出力マッチングにも影響を及ぼす可能性があります。DUTとチューナ間の損失のため、スミス・チャートの一部のみがカバーされます。低い周波数では損失が比較的小さいため、この影響は大きくありませんが、高調波などの高い周波数では大きな影響となります。

UHFアプリケーションでは、チューナのサイズは波長に比例するため（表1を参照）、物理的な問題が発生します。低い周波数での反射係数の制御は、同軸ラインの物理的長さで制限されます。数百MHzで動作するパッシブ・チューナでは、0.9mにもなります。このチューナをDUTの両側に追加することは、さらに大きな問題となります。ウェーハ・アプリケーションでは、チューナの大きさや重さはプローブ・ステーションのコストや複雑さといった問題となります。さらに、この大きなチューナでは、振動によるインピーダンスの変化も問題となります。高性能のUHF帯パワー・アンプ設計でパッシブ・ロードブルを使用する場合は、UHFならではの問題に直面します。

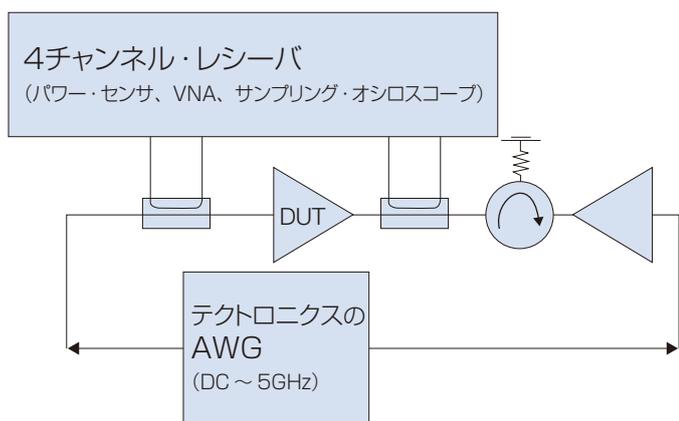


図4. 代表的なオープン・ループ・アクティブ・ソースブル/ロードブル構成

オープン・ループ・アクティブ・ロードブル

ノンリニア測定の新たなアプローチとして、「オープン・ループ・アクティブ・ロードブル」または短く「アクティブ・ロードブル」と呼ばれる手法が開発されました。この方法では、個別の信号ソースおよび負荷側に加えることで、DUTとロードブル・システム間の相互作用を除去します（図4を参照）。オープン・ループ・システムでは、DUTから発生する信号は吸収され、独立した信号源からの信号をデバイスに入力します。使用されるアンプは、インピーダンス制御が必要なすべての高調波周波数をカバーするのに十分な帯域を持っています。

UHFアプリケーションでは、パッシブ・チューナが不要になり、物理的な問題も解決します。アクティブ・ロードブルでは、すべてのインピーダンス変動は電氣的に生成されます。パッシブ・チューナが不要になるため、低い周波数でのロードブル測定における物理的な制約がなくなります。2GHz、200MHz、200kHzで測定する場合でも、測定帯域は信号源となる信号発生器で決まり、波長で制約を受けることはありません。

オープン・ループ・アーキテクチャでは、すべての帯域内、帯域外インピーダンスは、ともにしっかりと制御されます。アクティブ・ロードブルが動作するすべての周波数は、ロード・ソースによって完全に制御されます。測定対象周波数外は50Ωで終端されます。AWGから出力がない場合は、アクティブ・ソースブル/ロードブル・アーキテクチャは広帯域の50Ωインピーダンス環境であるため、システムの全帯域において反射係数はほぼゼロになります。この50ΩインピーダンスはAWGが出力する信号の周波数帯域でのみ変化します。結果として、オープン・ループ・アクティブ・ロードブル・アーキテクチャは、パッシブ・チューナ手法で説明した欠点をなくすることができます。

アクティブ・ロードブルの利点

- さまざまな条件化での高い安定性
- すべてのロード/ソース・インピーダンスの完全制御
- ハイ・パワー・レベルでのソースブル/ロードブルが可能
- UHF帯で大きなパッシブ・チューナが不要
- オンウェハ測定に最適
- 基本周波数、高調波周波数におけるスミス・チャートの内側または外側でロード/ソース・インピーダンスが生成可能
- ソース/ロード反射係数の高精度測定
- 従来のリファレンス規格をベースにしたシンプルな校正手順

テクトロニクスのAWGは、チャンネルごとにソースブル/ロードブルに必要な5GHz帯域の信号を生成することができます。CWまたは複雑なマルチトーン信号に関係なく、すべての周波数成分は、制御され、位相および振幅で変調できます。興味深いことに、オープン・ループ・アーキテクチャは1以上の反射係数を生成するために安全に使用することもできます。これにより、ドライバとメインのパワー・ステージ間における相互関係を調べることができます。オープン・ループ・アーキテクチャは安定性が高いため、測定システムを簡単に使用することができます。

新しい領域としては、ベースバンド周波数におけるロードブル測定に関するものです。電気メモリ効果は、トランジスタ表面の浮遊容量により急激に変化する変調エンベロープの合成ヒステリシスとなります。変調信号のベースバンド測定により、この現象と影響を知ることができます。ベースバンド（ほとんどの変調信号では50MHz以下）におけるインピーダンス制御は、メモリ動作を正確に予測する上で重要な要素です。テストでは信号生成と応答波形を捉える計測器が使われます。信号生成には、テクトロニクスのAWG7000シリーズ任意波形ジェネレータを、応答波形の捕捉にはDSA8200型サンプリング・オシロスコープを使用します。この計測器を使用することで、DC動作までカバーすることができます。



図5. テクトロニクス製の計測器の機能、性能を活用したMesuro社のソリューション。波形測定と高調波アクティブ・ロードプル機能の同時利用が可能

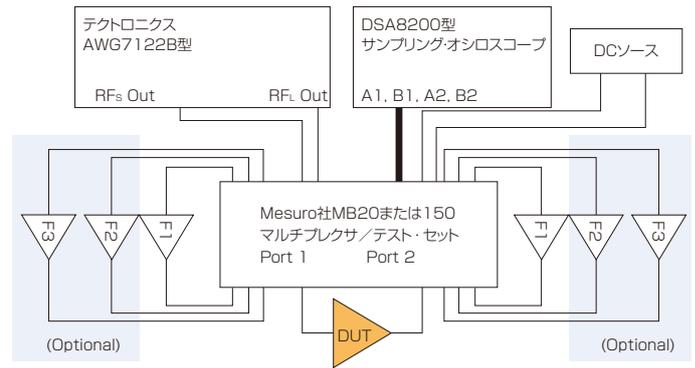


図6. MBシリーズは、ソース/ロードプル側の両方で複数の高調波設定が可能

ウェーブフォーム・エンジニアリングによるアクティブ・ロードプル・ソリューション

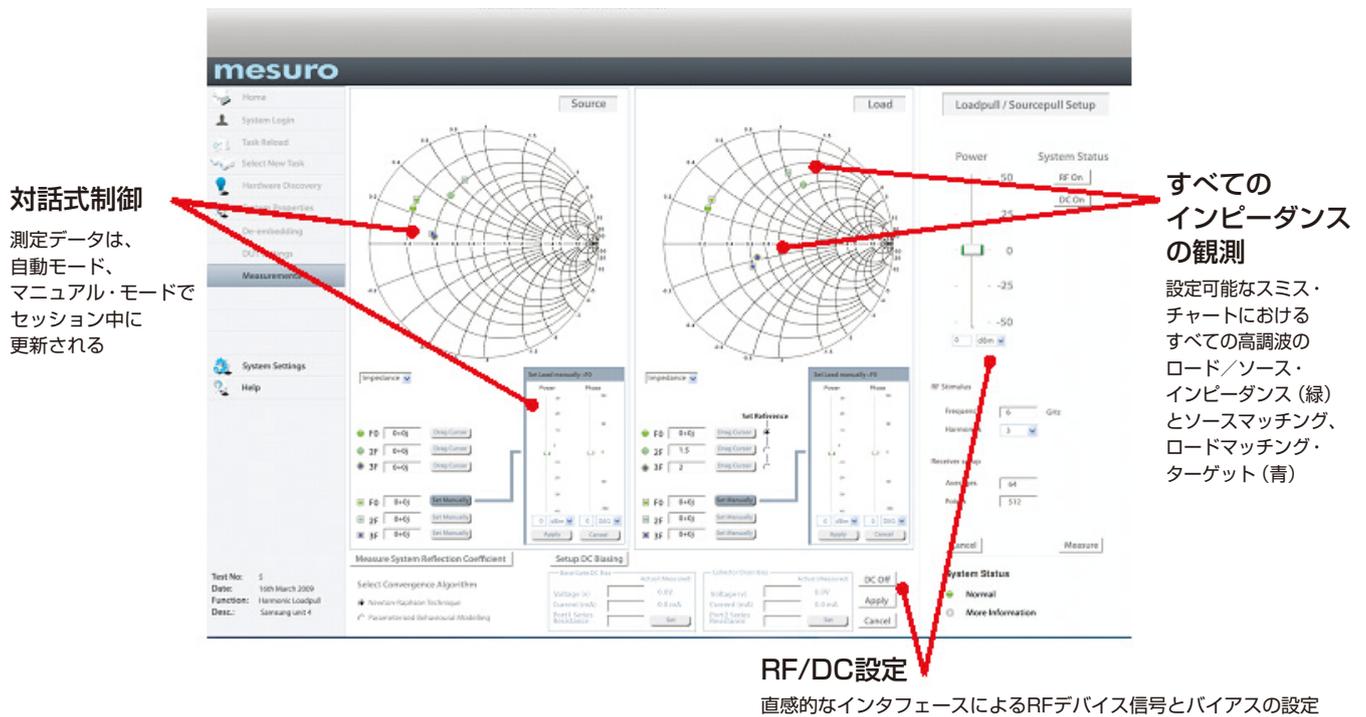
新しいオープン・ループ・ロードプル技術は、10年以上にもわたってカーディフ大学 (Cardiff University) で開発され、その技術を用いてMesuro社により商用化されました。MB20、MB150シリーズは、それぞれ20W、150Wのハイパワー・ソリューションを提供します (図5を参照)。このソリューションでは、信号ジェネレータとアンプがパッシブ・チューナから置き換えられます。ジェネレータで振幅と位相を制御することで、あらゆるインピーダンスを生成することができます。任意波形ジェネレータを利用して、再現性の高い信号を供給することができ、また信号をすばやく変更することができます。これにより、ロードプル測定はより迅速に実行でき、広範囲の測定アプリケーションに対応することができます。

先にも説明したように、UHF (またはそれ以下の) アプリケーションでは、AWG7000シリーズ任意波形ジェネレータとDSA8200型サンプリング・オシロスコープを使用することで、測定周波数をDCから開始することができ、非常に低い周波数におけるロードプル測定が可能になります。AWG7000シリーズ・ジェネレータは5GHz以上の信号生成能力があるため、数HzからGHzまでのロー

ドプル測定に対応でき、ベースバンド、基本波、高調波の周波数におけるアクティブ・ロードプル測定で使用できます。レシーバとして使用するDSA8200型サンプリング・オシロスコープはDC~20GHz (オプションの電気サンプリング・モジュールの使用で最高70GHzまで) に対応できるため、低い周波数での制約から解放されます。システムの動作周波数はMesuro社のマルチプレクサとRFテスト・セットに依存し、目的の周波数レンジにあわせて決定します。

ハイ・パワー測定では、基本波および高調波を中心周波数とした複数のナローバンドのパワー・アンプを使うことで、コスト効率に高い設計となっています。マルチプレクサにより、高調波信号を分離します (図6を参照)。同じマルチプレクサを使用して、高調波信号を再結合させることができます。

アクティブ・ロードプル・システムは、実際の回路設計におけるインピーダンス・ネットワークとは異なり、AWGで生成した信号の周波数成分の位相と振幅を調整することで簡単に補正することができます。アクティブ・ロードプル・システムは、カプラやサンプリング・オシロスコープへの接続などの校正パスの外側にあるため、測定システムを再校正することなくロードプルを設定することができます。



対話式制御
測定データは、自動モード、マニュアル・モードでセッション中に更新される

すべてのインピーダンスの観測
設定可能なスミス・チャートにおけるすべての高調波のロード/ソース・インピーダンス (緑) とソースマッチング、ロードマッチング・ターゲット (青)

RF/DC設定
直感的なインタフェースによるRFデバイス信号とバイアスの設定

図7. MBシリーズのソフトウェアは、測定、ソース/ロード・インピーダンスの自動設定が可能

優れた自動測定ソリューション

MBシリーズのソリューションにはシステム・レベルのソフトウェアと、操作性の高いユーザ・インタフェースによって構成されています。すべての計測器の設定は自動的に行われ、制御されるため、測定に集中することができます。グラフィック・ユーザ・インタフェースは、測定設定画面と測定結果画面に分かれています。測定設定の表示例を図7に示します。

- 接続された計測器の自動検出、初期化、校正、および測定セットアップの自動化
- 入力信号のDCおよびRFパラメータなど、すべての測定パラメータを簡単に設定
- 高調波ソースとロードブル・インピーダンスの同時制御
- マクロコマンドによる測定システムの自動化

すべての測定データの表示と
プロット

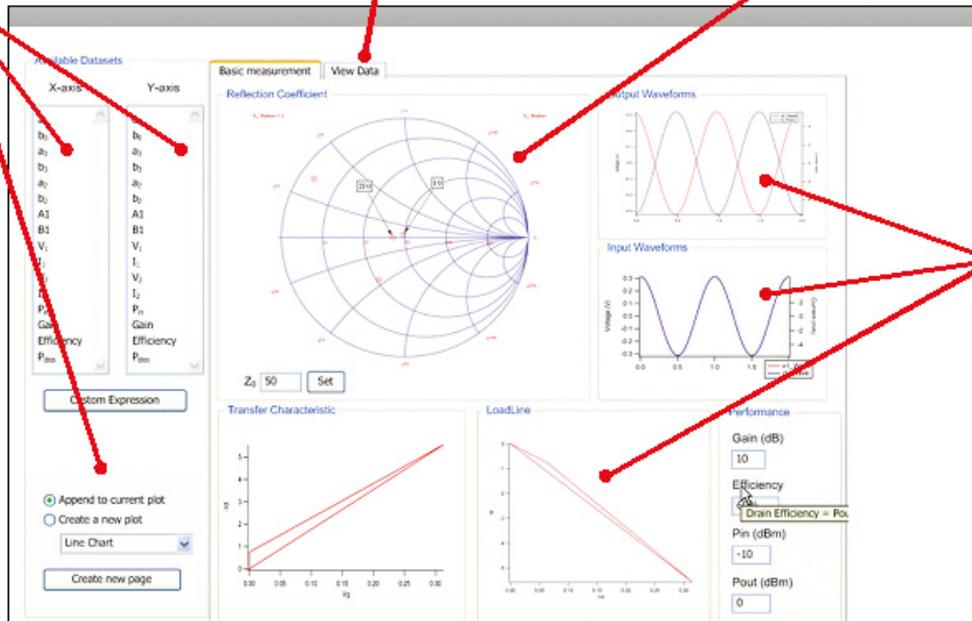
重要なデータを観測するための解析パネル

デバイス性能のモニタ

表形式によるデバイス性能の
詳細表示

すべてのインピーダンスの観測

すべての高調波のロード/ソース・インピーダンスが
観測できるユーザ設定可能なスミス・チャート



すべての波形表示

電流/電圧波形、
ダイナミック負荷、
伝送特性の表示

図8. さまざまなフォーマットによる波形、測定結果表示

測定結果の表示例を図8に示します。

- ユーザ設定可能な変数による、すべての測定データの表示
- 測定波形の詳細情報を表示する大きな表示画面
- タブによる複数シートで関連したデータを表示
- ユーザ定義の変数生成と等式ジェネレータ

大きな信号の正確、迅速なシミュレーション生成

設計エンジニアは、長年、シミュレーションと実際の測定結果間の不一致に悩んできました。このため、何回も設計サイクルを繰り返さなければならず、開発コスト、開発時間も増えてしまいます。従来、非線形・デバイス動作の特性評価で最適な結果を求めるには、測定とモデリングが必要でした。測定サイドから見ると、従来の計測器はこのような要求に対し、ビヘイビア・モデルを生成するためのアプリケーション・ソフトウェアを拡張することで対応してきました。しかし、このパワー・アンプ測定方法では高調波ソース/ロードプル・システムと一貫した統合がなされていないため、最終のデバイスやパワー・アンプが想定とは異なったインピーダンスを持つことがあります。このため、測定されたデバイス特性をパワー・アンプの設計に活かしたり、デバイスや採用されたアーキテクチャから性能を引き出すことが難しくなります。

Mesuro社のMBシリーズ・テスト・システムを用いることで、ハイ・パワーおよび50Ω系と異なるアプリケーションでの、高速で大きな信号のシミュレーションが行えます。このシステムは、高調波バランスとエンベロープ・シミュレーションに必要な情報となる、基本的な電圧と電流波形をサンプリング・オシロスコープで測定します。サンプリング・オシロスコープで収集された時間ドメイン・データは周波数ドメインに変換され、一般的なCADツールでインポートできるMDIFフォーマットで保存されます。CADツールはこのデータをインポートすることでスポット解析に使用でき、ビヘイビア・モデルの動作再現を信頼性高く行うことができます。これにより、非線形のデバイスとアンプの優れた特性評価が行え、その結果を一般的な非線形・シミュレーション・エンジンで使用することができます。複雑なコンポーネントまたはシステム・レベルのシミュレーションを行うエンジニアは、このビヘイビア・モデルを使用することができます。

まとめ

UHF周波数帯を利用するさまざまなアプリケーション、技術が開発されています。そこでのデバイスやパワー・アンプ設計で 사용되는従来のパッシブ・ロードブル・ソリューションには制約があり、また低い周波数において問題があります。研究／開発エンジニアは、RFデバイス、パワー・アンプ設計に適した次世代のツールを求めています。Mesuro社のMBシリーズ・アクティブ・ロードブル技術は、テストが簡単になるだけでなく、パッシブ・ロードブル測定にあるいくつかの制約を取り払うことができます。アクティブ・ロードブルとウェーブフォーム・エンジニアリングは、ソース／ロードの高次の高調波をより正確に解析できるため、設計エンジニアは理論性能に近い結果を得ることができます。設計ツールと測定結果の相関が改善されるため、設計サイクルが減り、製品の市場投入までの時間が短縮できます。

Mesuro社のMBシリーズの詳細については、Mesuro社のウェブ・サイト (www.mesuro.com) を参照してください。

Tektronix お問い合わせ先：

日本
お客様コールセンター
0120-441-046

地域拠点

米国 1-800-426-2200
中南米 52-55-54247900
東南アジア諸国／豪州 65-6356-3900
中国 86-10-6235-1230
インド 91-80-42922600
欧州／中近東／北アフリカ 41-52-675-3777
他 30 カ国

Updated 9 October 2009

詳細について

当社は、最先端テクノロジーに携わるエンジニアのために、資料を用意しています。当社ホームページ (www.tektronix.com/ja) をご参照ください。



TEKTRONIX および TEK は、Tektronix, Inc. の登録商標です。記載された商品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

04/10

37Z-24977-0



日本テクトロニクス株式会社

www.tektronix.com/ja

〒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
ヨッ!良い オシロ
お客様コールセンター TEL:0120-441-046
電話受付時間 / 9:00~12:00・13:00~19:00 (土・日・祝・弊社休業日を除く)

■ 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。

© Tektronix