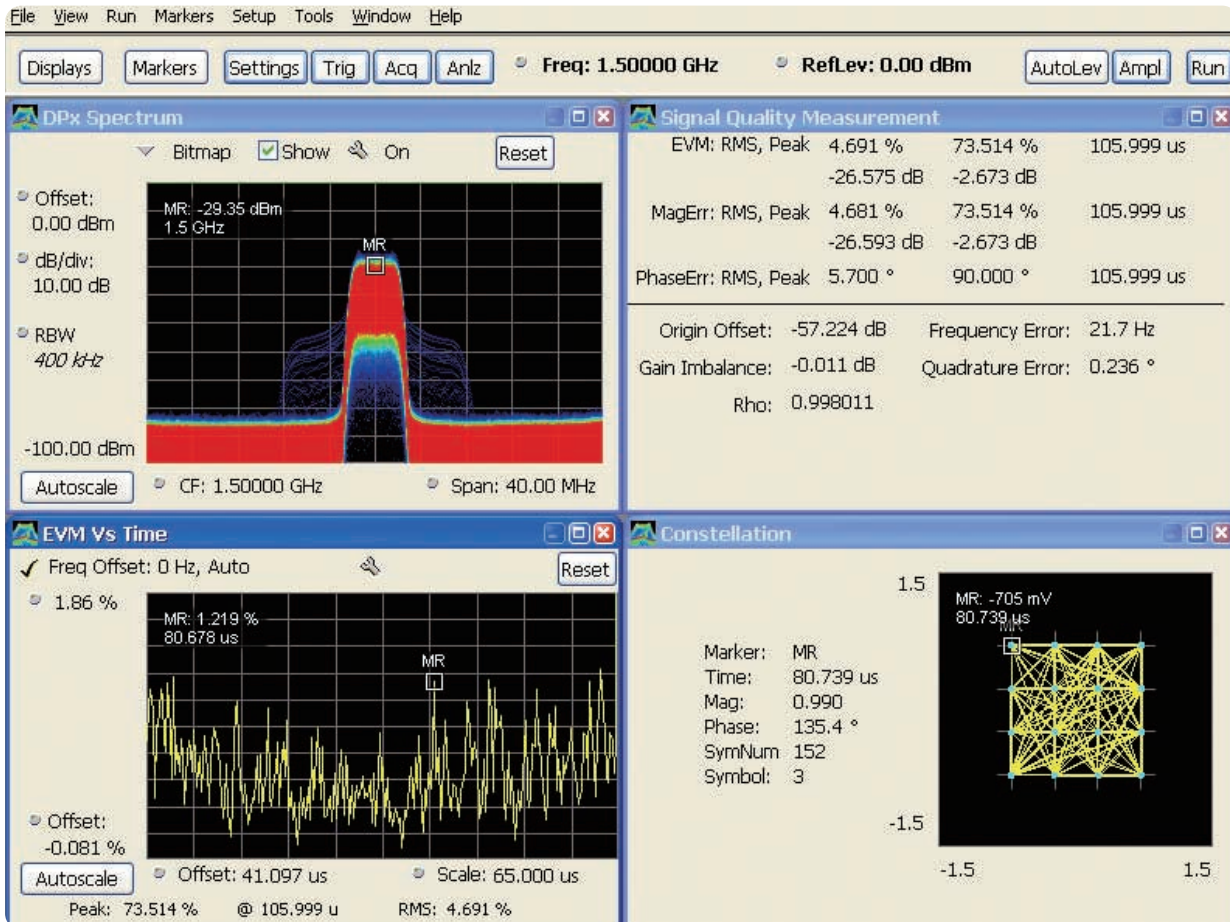


# リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト



## はじめに

ソフトウェア無線 (SDR) は、デジタル信号処理 (DSP) 機能と RF (Radio Frequency) 機能の統合により実現する技術です。この統合により、使用する周波数帯域、フィルタ、変調方式、データ・レート、周波数ホッピング方式などの通信パラメータを、ソフトウェアにより動的に制御することができます。SDR技術は、軍事、民政、商用の各種ネットワークで使用される無線デバイスで採用されています。

従来のRF送受信技術に比べて、柔軟性が高く、システムの主要な性能と機能を必要に応じて即時に再構成することができます。

しかし、SDRには従来の無線回路設計にはなかった新たな課題があるのも事実です。このアプリケーション・ノートでは、当社のアプリケーション・ノート『Software Defined Radio : An Integrated Test Method for Designing Software Communications Architecture (SCA) Compliant Radios』の基本原則を、さらに詳しく説明します。さらに、送信機設計上の一般的な問題をいくつか示し、これらの問題をリアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA) を使って簡単に特定、診断することのできる方法を説明します。

### SDRとは？

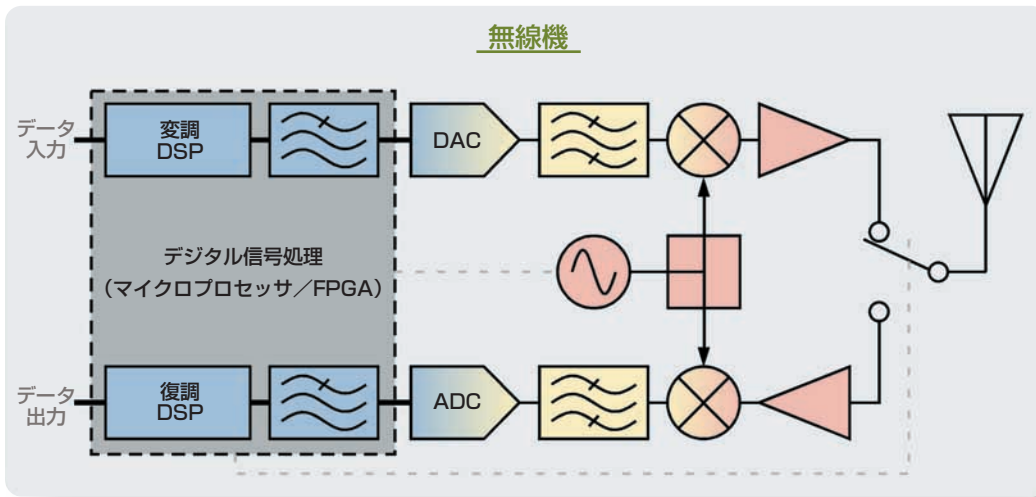
SDRとは、ソフトウェアによって通信デバイスの動作を制御する技術（またはデバイス）のことです。SDRのハードウェアは、ソフトウェアによる性能・機能を決定する各パラメータの変更に対し、確実に動作する堅牢なシステムであることが要求されます。

多くのRFデバイスがソフトウェアで制御されるようになって、設計要件が変わり、新しいテスト方法が必要とされています。加えてより高度なSDRでは、動作周波数、変調方式、周波数ホッピング・パターン、パワー・レベル、フィルタ、コーディング方式、データ・レートといったネットワークパラメータを動的に制御します。これはRFシステムの設計を複雑にするだけでなく、RFテストの方法を本質的に変えることとなります。いまや、アナログ／RF性能のテストはソフトウェアを中心に行われます。ソフトウェアの変更によりアナログ／RF性能に予想外の影響が現れないかを確認する必要があります。たとえば送信機のテストでは従来パワー、変調、スペクトラムの占有、干渉などを静的に測定していました。RFテストは、統合されたSDRのテストとして行う必要があります。

SDRの設計エンジニアは、より適応性の高いデバイスを設計しなければなりません。さらに、価格競争力も求められており、従来とは異なる設計アプローチを取らざるを得ません。このような背景の下、DSPをベースに、設計の多くの部分をソフトウェアで実装する“デジタルRF”手法が生まれています。さらに、設計を簡素化するためにデジタル補正技術が使われるようになりました。D/Aコンバータ（DAC）の出力からRFへのダイレクト・アップコンバージョンなどの技術により、アナログ・ハードウェアの統合が進み、より高い柔軟性と適応性が得られるようになりました。

DSPとデジタル／RF統合回路（多くの場合、ワンチップにより構成される）によってRF波形を動的に生成することに関しては、従来のRF無線機の設計では発生しなかった問題も出てきました。しかも、SDR送信機の性能は、従来のRF送信機の静的な適合性試験だけではなく、ソフトウェアの影響も考慮する必要があります。適合性試験に合格したからといってデバイスが正しく動作するとは限りません。パラメータがソフトウェアにより頻繁に変更されるシステムについては、その動作を注意深く観察する必要があります。このようなソフトウェア制御による変更は、グリッチ、間欠的な干渉、パルス・アベレージョン、デジタル・RF結合、ソフトウェアに依存する位相エラーなどをもたらします。

このようなトランジェントにまつわる新しい問題に対処するには、SDRシステムを完全に解析し、その特性を評価する必要があります。システム・パラメータは時間とともに変化するため、トランジェントが発生する瞬間をピンポイントで検出するには、設定した周波数でトリガできなければなりません。トランジェントにおいて、正しく調整されていないフィルタ、ゲインの変化、ソフトウェア内部の機能モジュールの競合（レース・コンディション）などは、スペクトラム異常の原因となります。個々の問題の原因を特定するには、複数のドメインで時間相関をとった解析が必要です。また、トリガ発生時の状況を再現するのは難しいため、あとで詳細に解析できるよう、現象全体を取りこぼしなく連続的にメモリに取り込む必要もあります。このような、時間とともに変化する信号の性能を検証する高度なトラブルシューティング方法と、従来の静的な適合性試験を組み合わせることで、SDR設計の効率的なテストが可能となります。



▶ 図1：一般的なSDR無線機実装の機能ブロック図

### 無線機テスト

先に説明したように、SDRの実装にはいろいろな方法があります。SDR設計が過度に複雑にならないようにするには、必要な機能の実装に使うコンポーネントの数をぎりぎりまで絞り込むことが大切です。SDR無線機の送信部であれば、次のようなコンポーネントで構成できます。

- パワー・アンプ
- ミキサ
- DAC
- 発信器
- DSP回路

受信部についても、設計をシンプルに保ちながらも必要な機能を実現するという、相反する2つの要件のバランスをとる必要があります。受信部のコンポーネントとしては、次のものが挙げられます。

- 低ノイズ・アンプ
- ミキサ
- ADC
- 発信器
- DSP回路

図1に無線機の簡単な機能ブロック図を示します（これには、デジタルIF (Intermediate Frequency) またはデジタルRFは含まれていません）。この図のいずれのブロックも、ソフトウェアで制御することができます。また、その機能を完全にソフトウェアだけで実装することもできます。

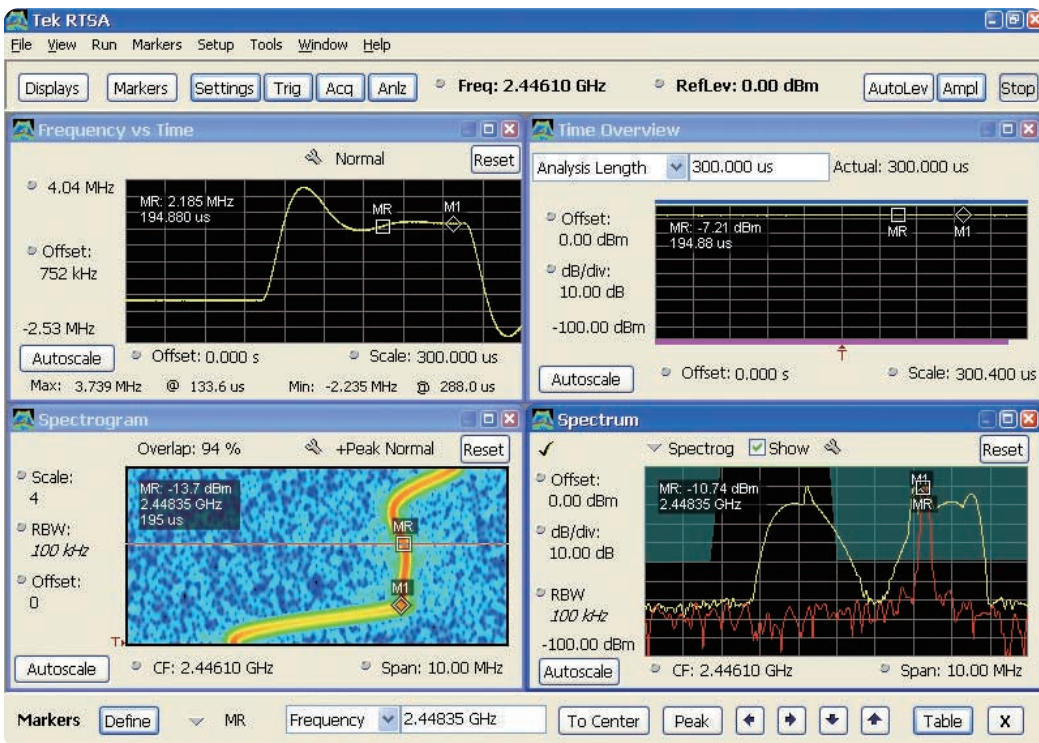
一般的なSDR無線機の性能を検証するには、送受信チェーンの複数のポイントを測定し、その相関を取るという統合テスト・ストラテジが必要です。たとえば、間欠信号は、RTSAのFMT（周波数マスク・トリガ）で取り込むことができます。RTSAで周波数マスク・トリガにより間欠信号が取り込まれると、次に、ロジック・アナライザとオシロスコープがトリガされます。これにより、関連する信号のデジタル特性とアナログ特性を観測できる環境が整います。このアプローチにより、周波数ドメインの違反に関連する問題がロジック回路で発生しているのか、アナログ制御電圧で発生しているのかが判断できます。優れたトリガによりデジタル/RFを切り分けられるだけではありません。RTSAでは、時間、周波数、変調の各ドメインの時間相関を取りながら、信号を解析し、表示することができます。

### 静的な適合性試験を超えた試験

SDRテストには従来の送信機テストの内容も含まれます。いかなる無線システムであろうと、その構成の相違にかかわらず、占有帯域幅、チャンネル・パワー、隣接チャンネル・パワーなど、従来の仕様を満足しなければなりません。時分割複信 (Time Division Duplex) または時分割多重 (Time Division Multiplex) のシステムには、立上り時間や立下り時間などのタイミング要件があります。SDRデバイスは、従来の送信機にはない、より広範囲な動作モードにおいてこれらのテストに合格しなければならず、それが適合性試験をさらに複雑なものにしています。ソフトウェアによる無線構成機能を検証するため、テストには新しい側面からの項目を追加する必要があります。

## リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト

▶ アプリケーション・ノート



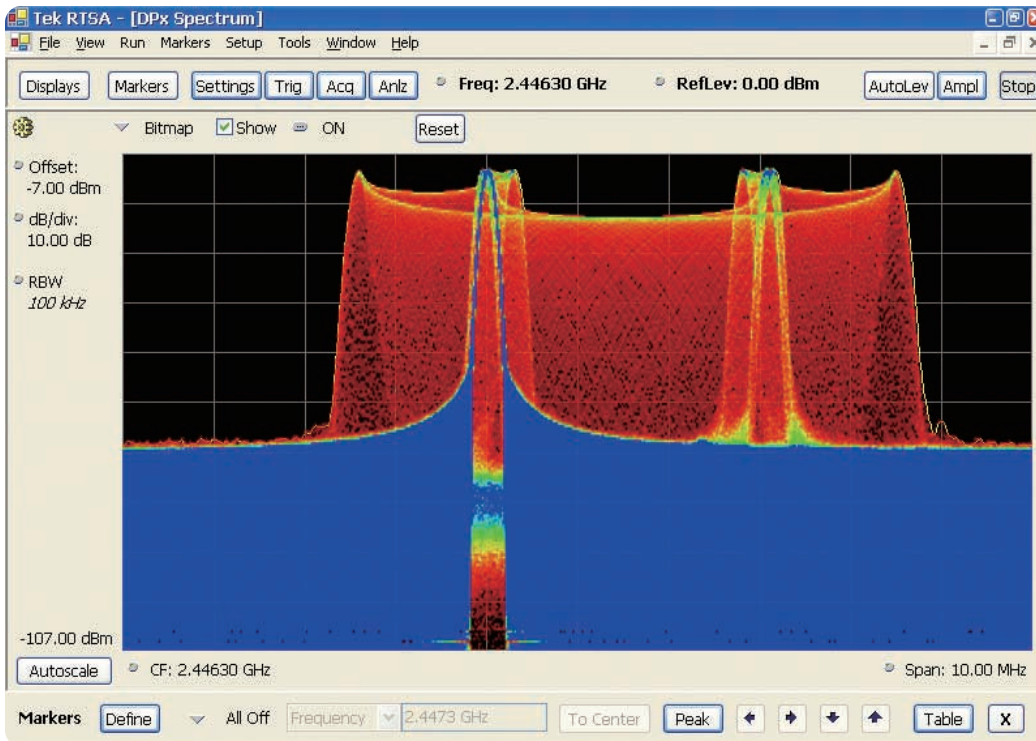
▶ 図2: RSA6100Aシリーズ・リアルタイム・スペクトラム・アナライザで測定した、PLLの周波数セリングタイム。マーカーがオンになっており、すべてのドメインにおいて自動的に相関が取られ、測定値が表示されています。

変調品質の測定は、適合性試験の主要項目でもあります。デジタル変調信号の場合は、通常EVM（エラー・ベクトル振幅）またはRHO（変調品質）を測定します。さらに、アナログ・モードをサポートするSDR設計の場合は、適合性試験にも合格しなければなりません。変調品質は、システム性能の問題であると同時に適合性測定の問題でもあります。EVMの値が低いとデータ・レートが低下し、送信される音声の明瞭さと送信レンジが低下します。EVM測定は、送信機の潜在的な問題をも明らかにします。このような理由により、SDRのトラブルシューティングでは、EVMは最初に行われる検査項目の一つです。

残念ながら、適合性試験だけではSDRが正しく機能することを保証できません。ネットワークに柔軟性を持たせるには、個々のSDRデバイスにおいて時間とともに動作パラメータを頻繁に変更して、ネットワークの要求に応えられるようにする必要があります。もちろん、これらのすべての変更は、ソフトウェア制御の無線機ハードウェアによって実行されます。そこで欠かせないのが、RF

グリッチ、トランジェントなどの異常なスペクトルの取り込みに役立つツールです。問題の原因となったコンポーネントを突き止めることも重要ですが、徹底的なトラブルシューティングも必要です。デバイスやネットワークを正しく機能させるためには、SDR RFリンクが時間によってどう変化するかを評価および解析する新しいテスト方法を考慮する必要があります。

RTSAには、SDRトラブルシューティング用の強力な機能が装備されています。まず、物理層に問題がないかを確認することが重要です。これらのトランジェントは瞬時に発生するものであるため、時間による変化を周波数ドメインで観測できる機能が必要です。図2の例では、RTSAの周波数対時間測定により、PLL（Phase Locked Loop）のセリングタイムを直接観測しています。検出された問題については、それに関連する信号をトリガして取り込み、複数のドメインで時間相関を取りながら解析することができます。信号の動的な特性評価やトラブルシューティングでは、通常の適合性試験以上の能力が必要です。



▶ 図3：RSA6100AシリーズのDPX表示による、PLL（図2と同じ）のセトリングタイム測定。DPX表示では統計的な情報が得られるため、時間とともに変化する信号の様子を観測することができます。RSA6100AシリーズのDPX表示では、このような信号の動きを、他のスペクトラム・アナライザでは考えられないほどはっきりと見て取ることができます。

## 検出

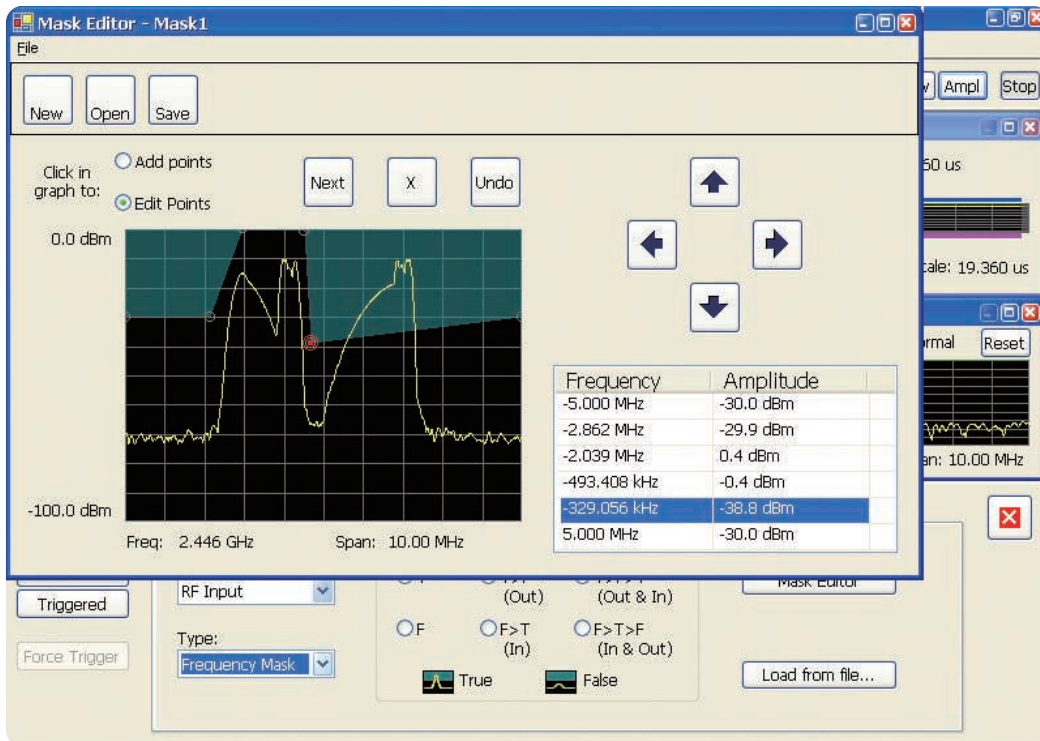
DPXデジタル・フォスファ表示技術は、従来、上位機種のおシロスコープに採用されていましたが、RFドメインにも適用され、RSA6100AシリーズRTSAで新たに採用されました。DPXのおかげで、初めてRF信号をライブで観測し、その振る舞いを克明に観測することができます。

図3は、1.28秒ごとに発生する周波数ホッピングのDPX表示の例です。この信号は、新しい周波数に約200 $\mu$ sとどまり、ホッピング後は元の周波数に戻っています。DPX表示では、周波数ホッ

ピング、オーバーシュート、リングングをはっきりと目視できます。従来のスペクトラム・アナライザでは、信号のこの部分を確実にとらえることができません、その振る舞いをこのレベルまで観察することはほぼ不可能でした。DPX表示で直接観測できる信号パワー・レベルの変化も、従来のスペクトラム・アナライザでは小さ過ぎて確実にトリガすることができません。SDRの領域では、DPXは信号のRF状態を簡単に評価するまったく新しい方法であり、質の高い設計と信頼性のあるデバイス動作の実現に役立ちます。

## リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図4：間欠的に発生する現象を取り込むための周波数マスクを任意に描くことができます。この例では、間欠的に発生する周波数ホッピングが確実にトリガされています。この独自機能は、間欠的に発生する障害のトラブルシューティングに大いに役立ちます。

### トリガ

DPX表示でグリッチまたはトランジェントを特定できたら、RTSAの周波数マスク・トリガで信号を確実に取り込み、詳細に解析することができます。図4に示すように、周波数マスクはユーザ定義が可能であり、信号を取り込めるように描くことができます。この例のように、間欠的に周波数ホッピングが発生する場合、パ

ワーの変化でトリガするのではなく（グリッチの間でパワーの変化は認められません）、周波数の変化でトリガするマスクを定義した方が役に立ちます。DPX表示を見ると、測定対象の信号の約3MHz上までホッピングしていることがわかります。周波数マスクは、この信号を包絡するエンベロープとして定義され、信号が周波数マスク領域に入るとトリガします。

## 取込

前の例では、解析のために取り込んだデータ・レコード長は900  $\mu$ sです。RTSAのリアルタイム帯域幅は110MHz、最大取込時間は約1.7秒です。これは、SDRで発生するほとんどのグリッチとトランジェントを取り込むのに十分な時間です。一度取り込んだファイルは、異なるユーザ、異なる測定設定で何回も解析することができます。その都度、データを取り直す必要はありません。

## 解析

特定の瞬間の信号データを詳細に解析できるという機能は、その瞬間における他の現象の有無を知るうえでも大いに役立ちます。どの時点で異常が発生したかを特定できる能力は、マルチドメイン相関解析の最も優れた特長です。これは、広い周波数帯域で長時間記録することのできるRTSAならではの機能です。たとえば、デジタル変調信号で大きなEVM値が観測された場合、周波数ドメインを観測すると、PLLセトリングタイムが長いなどの原因で予期せぬ信号が発生していないかを確認することができます。SDRデバイスは、ソフトウェアによってモードが頻繁に変更される可能性があるため、どのような状況でも正しく動作するRFハードウェアの設計が必要です。RTSAのマルチドメイン解析では、

信号に問題が発生した瞬間をピンポイントでとらえ、その結果を関連付けることでハードウェアの信頼性を測定することができます。

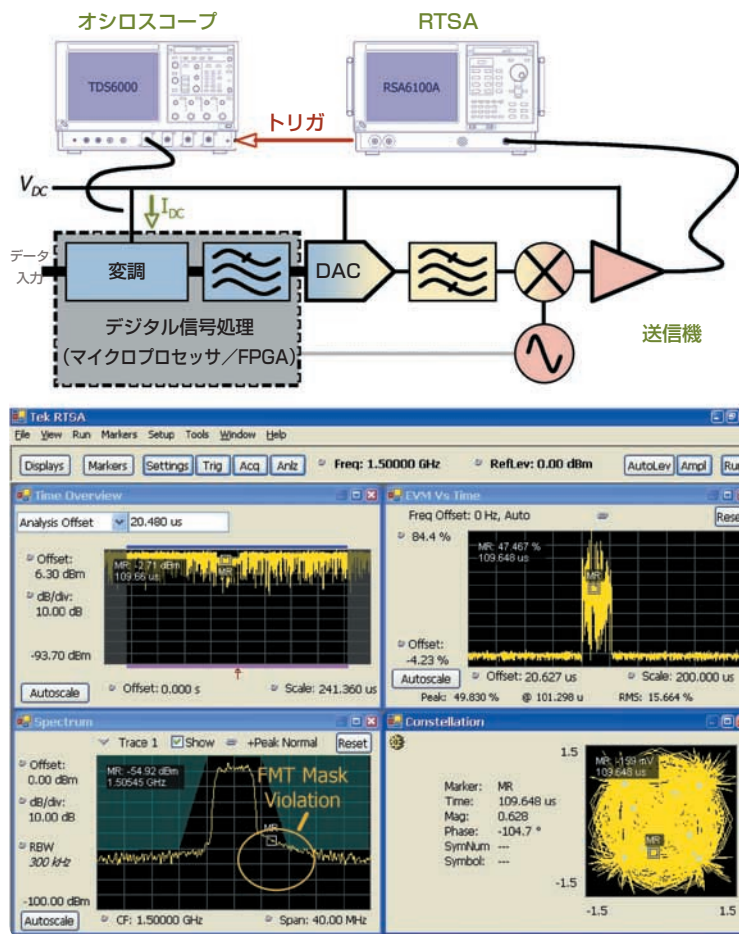
## アプリケーション例

### RF出力に影響を及ぼす電源ドループ

DSP処理の負荷による電源容量の不足は、RF出力に影響を及ぼす可能性があります。多くのSDR設計では、CPUとFPGAも考慮する必要があります。デジタル・コンポーネントの消費電流は、実行するプログラムの内容によって異なるため、プログラムの一部のセクションでCPUに重い負荷がかかり、電源が一時的に不安定になることがあります。さらに、送信 (Tx) と受信 (Rx) を同時に実行できる無線機の場合、受信信号の内容によっては、複雑なDSP動作が実行されることもよくあります。これは、アナログRF送信チェーン、特にバッテリー駆動デバイスのバイアス電圧に影響し、信号の品質が突如、一時的に損なわれるという結果を招くことになります。したがって、電源電圧の変化を監視して、時間とともに変化する送信出力の状態と関連付けて観測することが大切です。

## リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図5：(上) RTSAの周波数マスク・トリガ出力をオシロスコープに接続し、オシロスコープで信号を取り込むためのテスト・セットアップ。(下) 取り込んだレコードのマルチドメイン表示。左上から時計回りに、パワー対時間、EVM対時間、コンスタレーション・ダイアグラム、スペクトラム。この例では、電源電圧が瞬間的に低下し、EVMが増加していることがわかります。

1つのアプローチとして考えられるのが、電流の変動でオシロスコープをトリガし、そのトリガ出力を使ってRTSAまたはVSAで信号を取り込み、送信出力を監視するという方法です。しかし、このアプローチでは、電流の変動がRF問題につながることもあり、つながらないこともあり、間違ったトリガが何回も発生する可能性があります。RTSAでは、もう1つ別のより便利なアプローチをとることができます。それは、FMT（周波数マスク・トリガ）を使う方法です。送信スペクトラム付近で周波数マスクを設定して、瞬間的に増加するスペクトラムを取り込み、RTSAとオシロスコープをトリガして波形を取り込みます。スペクトラムの

急な増加は電源容量不足により悪影響を受けて発生します。送信スペクトラムを変化させるこのようなイベントだけを取り込むことで、不要なトリガを防ぐことができます。RTSAの時間相関表示（EVM対時間、周波数対時間、位相対時間、パワー・レベル対時間、CCDF、ACLR、またはスペクトログラムなど）では、RF出力の変化をDSPの電源要求や信号品質とからめて観測することができます。図5の表示例では、電源ドロップによってEVMが大幅に増加していることがわかります。この独自のFMT機能と時間相関のとれたマルチドメイン解析により、DSPが原因となる非同期的な現象を簡単に見つけることができます。





▶ 図6：Bluetooth®のホッピング・シーケンス。左から時計回りに、時間オーバービュー、スペクトログラムのある瞬間のスペクトラム、スペクトログラム。時間とともに変化するホッピング・シーケンスの測定が可能です。時間または周波数で自動的に時間相関が取られる複数のドメインでマーカーを使用し、DPX表示ですばやく問題を特定することができます。

## 周波数ホッピングと送信機テスト

周波数ホッピングは、多くのシステム（ソフトウェアで制御されるものも含む）で使用されています。周波数ホッピングを使用する、3つの大きな理由を以下に示します。

- 盗聴を防ぐ
- ジャミングや干渉を防ぐ
- マルチパスやフェーディングの影響を軽減する

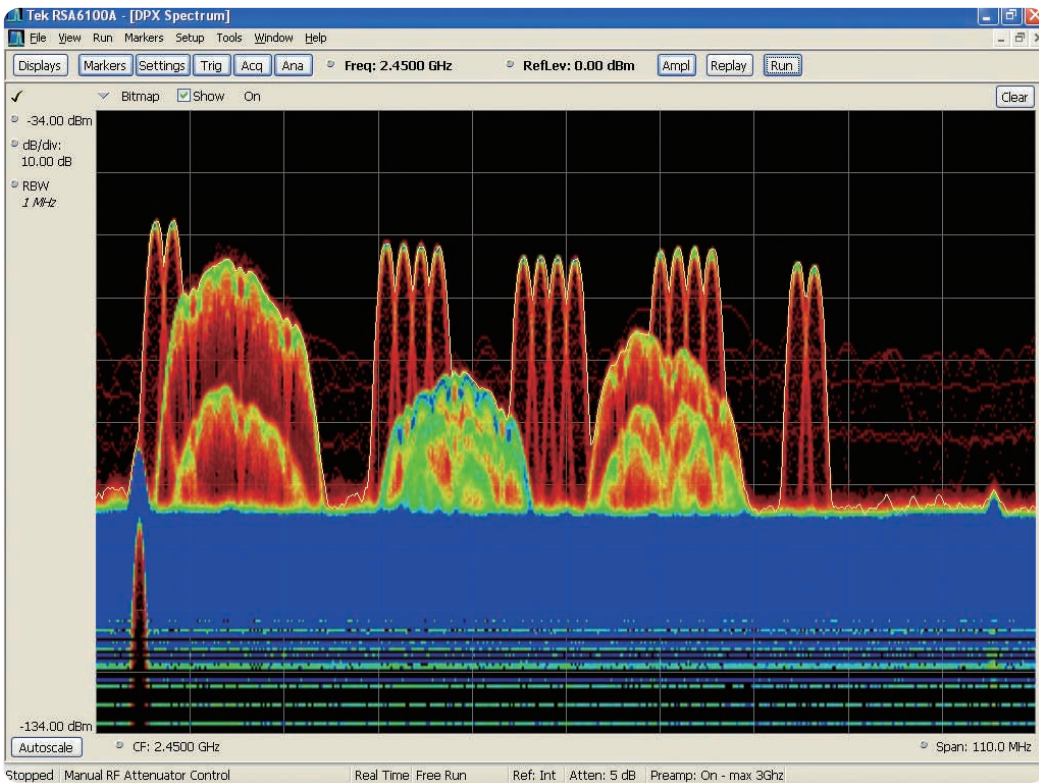
周波数ホッピングとは、広い周波数帯域を使用して情報を送信する技術です。データを複数の周波数で送信することによって、システムの堅牢性（ノイズに対する耐性）を高めることができます。特定の周波数でノイズが発生しても、失われるのはその周波数で送信されたデータだけで済みます。データ・ストリーム全体が失われることはほとんどありません。ノイズにより失われたデータは、エラー訂正デコーディングで再生されます。

ホッピング・タイミング、周波数セリングタイム、振幅セリングタイムなどの代表的な測定項目以外にも、周波数ホッピングのトラブルシュー트에役立つ測定項目がいくつかあります。ホッピングでは、周波数、時間、変調の各ドメインの相関が重要です。この3種類のすべてのドメインにて時間相関をとりながら表示できる機能は、SDRデバイスのトラブルシューティングにきわめて大きな威力を発揮します。

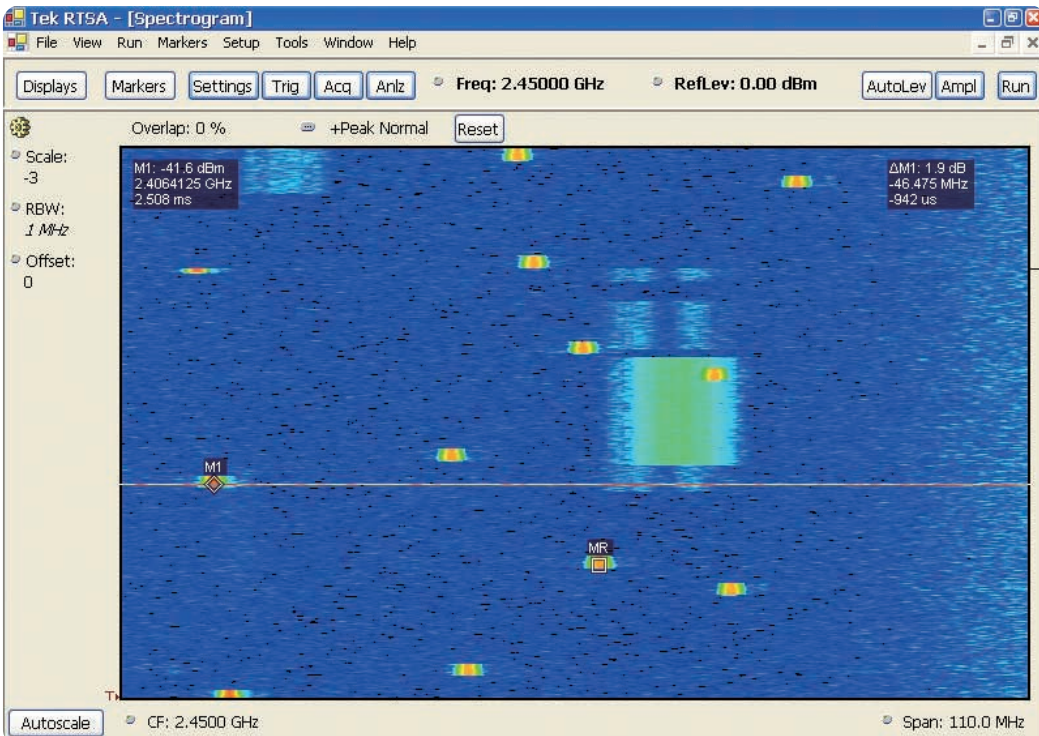
図6に、Bluetooth®信号を示します。RTSAのスペクトログラム（右下）では、時間とともに変化する周波数の振る舞いが表示されています。ホッピングの周辺でスペクトラム・エネルギーが高くなっていることがわかります。この場合、周波数ホッピングが発生すると、送信機が隣接デバイスに干渉する可能性があります。周波数ホッピングを取り込む測定機器では、広いホッピング・シーケンス帯域と、その周辺で発生する周波数スプラッタを取り込むための十分なリアルタイム帯域が必要です。

## リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図7：2.4GHz ISMバンドDPX表示（110MHzスパン）。この信号は図6に示したものに似ています。この画面ではDPXにより、RF信号の真の振る舞いをライブで観測できます。



▶ 図8：2.4GHz ISMバンドのスペクトログラム表示（110MHzスパン）。この例では、Bluetoothデバイスの周波数ホッピングを観測しています（マーカーを設定し、ホップ間の時間間隔を測定しています）。また、画面中央では20MHzのWLAN信号が確認できます。よく見ると、Bluetooth®の周波数ホッピングがWLAN信号の間で発生していることがわかります。このWLAN信号による干渉は、従来の方法ではおそらく認識できなかった可能性があります。

Bluetooth®は、ソフトウェア無線を使用しなくても実装できるのですが、周波数ホッピング・システムの実装で直面する典型的な課題を示すため、ここであえてとりあげています。通常、周波数ホッピング・システムでは、個々のホッピング周波数を測定できる必要があります。たとえば、Bluetoothの仕様では、79のホッピング周波数（1MHzチャンネル間隔）の誤差がそれぞれ75kHz以下の値を持つように規定されています。これにより、異なるメーカーのデバイス間でも適切な相互運用が可能になります。ホッピング・シーケンスの測定には、ホッピング・レンジ全体をカバーする測定器が必要です。2.4GHz ISMバンドの場合、110MHzのリアルタイム帯域をカバーしているRSA6100Aシリーズであれば、83MHzのバンドをカバーし、同時にアウトオブバンドの干渉の有無をチェックするのに十分な性能を備えています。図7は、20MHz WLAN信号の存在下におけるBluetoothデバイスのホッ

ピングをDPXで表示した例です。図8は、Bluetoothデバイスのホッピングをスペクトログラムで表示した例です。図9は、時間とともに変化するBluetooth®信号のホッピング・シーケンスの例です（マルチドメイン表示により、特定の信号の振る舞いを測定しています）。

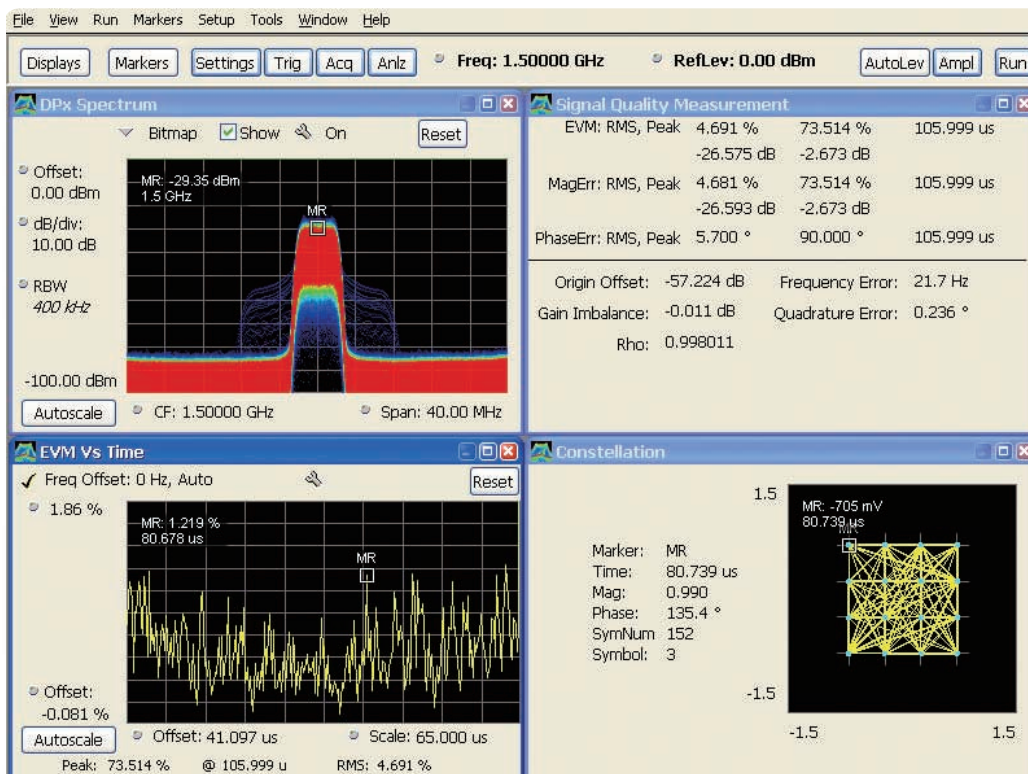
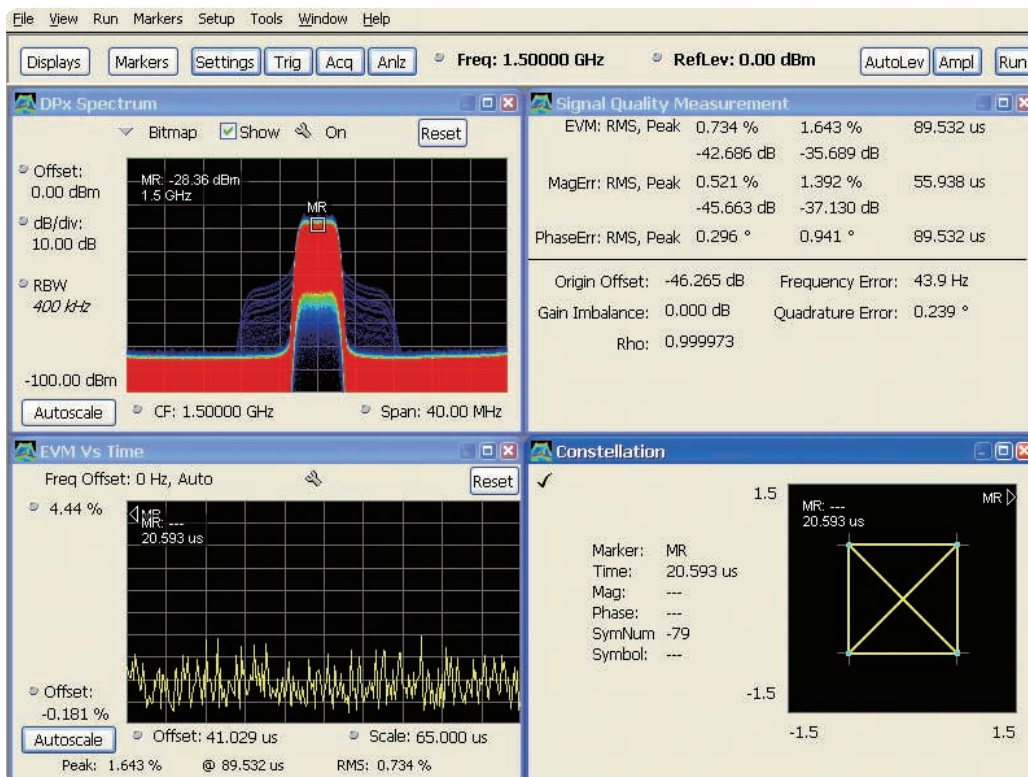
RSA6100Aシリーズは広い帯域をカバーしているため、ホッピング・シーケンスを解析し、周波数ホッピングごとに、最小60ナノ秒までの周波数セトリングタイムを測定することができます（110MHzのリアルタイム帯域で6ナノ秒のタイミング分解能）。周波数セトリングタイムの測定では、使用する機器の時間分解能と周波数分解能がトレードオフの関係にあります。非常に広い周波数スパンでは、時間分解能は高くなりますが、周波数対時間表示の周波数分解能は低くなります。



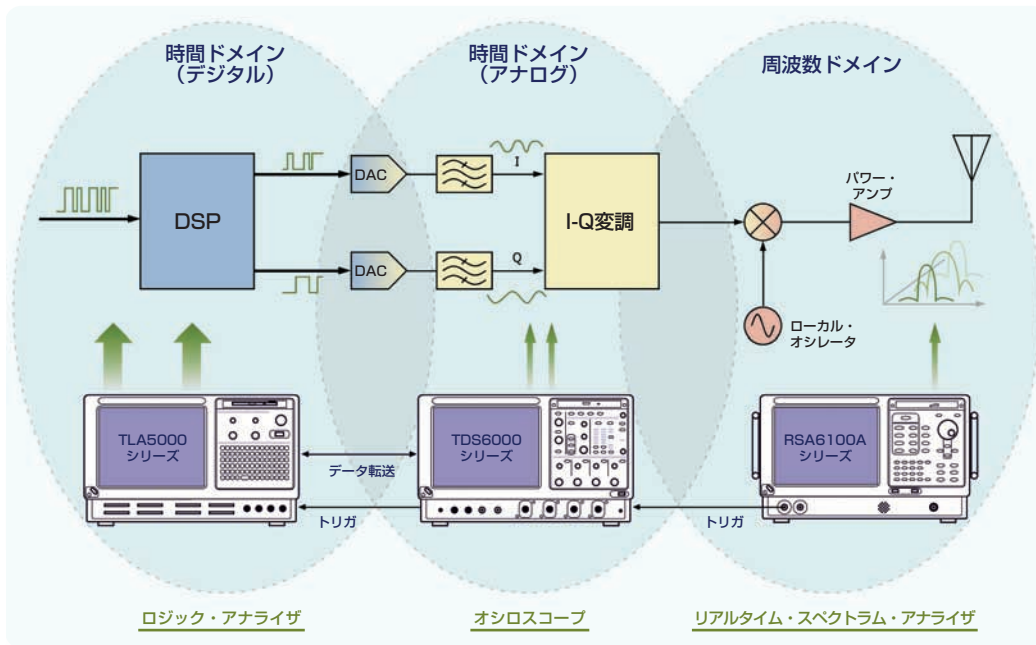
▶ 図9：Bluetoothの110MHzホッピング・シーケンス。左上から時計回りに、周波数対時間、スペクトラム（特定の時間における赤のスペクトログラム波形のもの）、スペクトログラム、パワー対時間オーバービュー。

# リアルタイム信号解析によるソフトウェア無線テスト

▶ アプリケーション・ノート



▶ 図10：同じ信号の2つの変調方式。どちらの画面でも、EVM対時間と信号品質を観測しています。RSA6100Aシリーズでは、1回の取り込みでそれぞれの変調方式を解析することができます。DPXは、トランジェントの存在を示すインジケータとして使用できます。グリッチやトランジェント（変調方式の変更など）があると、高い隣接チャンネル・ノイズ・フロアが観測されます。



▶ 図11：複数の計測器によるクロス・トリガ、およびデジタル・ビット・レベルからRFコンポーネント・レベルに至る解析の代表的セットアップ例。機器間でトリガすることにより、信号パラメータの変化による各ドメインの影響がわかります。

### 変調方式の変更に伴うトランジェント

最新の通信システムでは、状況に応じて変調／コーディング方式を変化させるシステムが広く使用されています。たとえば、3GPP/HSDPAシステムでは、フェーディング状況およびネットワーク負荷に基づいて、16-QAMとQPSKのどちらを使用するかがプロトコルによって決定されます。この変調方式は、フレームごとに変更されることもあります。QPSKから16-QAMに変調方式が変更された場合の影響を、図10に示します。左上のDPX表示は、信号を連続的に監視しているときの様子で、変調方式がQPSKと16-QAMの間で切り替わっているのがわかります。DPX表示の青い波形部分は、隣接チャンネル性能が著しく低下していることを示します。この期間においては、隣接チャンネル・パワーの仕様に違反している可能性があります。その場合は、DPX表示では、変調方式の切り替えにより発生したグリッチを確認し、それをEVMの違反として判断することができます。

### 基板上の他のデバイスからのクロストーク

最近のRF機器では実装するデバイスの集積度は高くなる一方であり、これがRF無線機の低価格化と小型化につながっています。RF

設計の大部分をデジタル方式で実現し、最後にIFへの直接変換を行うことで、高価なアナログRFハードウェアの使用を最小に抑えているケースもあります。つまり、高速デジタル・コンポーネントに、RFコンポーネントと同様の役割を持たせているのです。コンピュータでは、CPUとバスの動作周波数と高調波がRF受信信号周波数に近づいています。たとえば、多くのCPUは、各種民生機器やコンピュータ自体に組み込まれているWLAN (Wireless Local Area Network) デバイスやBluetooth®デバイスと同じ2.4GHz (ISMバンド) またはそれに近い周波数で動作します。そのため、システムを適切に隔離しておかないと、システム間でクロストークが発生するおそれがあります。

このような問題を特定するには、対象の送受信経路で信号をトレースし、クロストークの発生箇所を識別することが重要です。そこで、RTSAで信号経路のRF部とIF部の信号を取り込み、ロジック・アナライザでデジタル・ベースバンド信号を取り込んで、RTSAで生成されるシンボル・テーブルと比較します。この種の解析に使用する一般的なテスト・セットアップ (代表的SDR無線機チェーンを対象とする統合テスト・ソリューション) を図11に示します。

### 過渡的な歪の影響

SDR設計の主要目的は、ほとんどの場合、消費電力とコストの低減が目標となっています。この2つを実現するため、今、注目を集めているのが、デジタル化されたRFパワー・アンプ (PA) を使うという方法です。従来一般的なリニアパワー・アンプと違い、SDR用の多くのパワー・アンプはノンリニアであり、性能要件を満たすためにDSPが使用されています。これに関しては、以下に示す手法が単独で、または組み合わせで使用されています。

- クレスト・ファクタの低減 — アップコンバージョンのためのデジタルIQストリームを、D/Aコンバータの前段で解析します。ピークを特定し、ピーク・アベレージ比を低減するため、信号に意図的な歪を加えます。送信EVMのわずかな増加で、クレスト・ファクタを大幅に低減することができます。
- デジタル・プレディストーション — パワー・アンプのノンリニア特性は、工場出荷時の校正段階で特定されています。これらの特性に基づいて、DA変換前にデジタルIQストリームにあらかじめ歪を加え、パワー・アンプから正しい波形が出力されるようにします。
- デジタル・フィードバック・リニアライゼーション — デジタル的に直線化されたパワー・アンプの出力スペクトラムを制御することは、RF設計エンジニアが直面する最も難しい問題の一つです。最善の方法は、送信機のスペクトラムを測定し、DSPによりノンリニア・プレディストーション係数をフィードバック方式で変更することです。ここでは、信号をIFまたはベースバンドにダウンコンバージョンし、高品質のA/Dコンバータを使って高速DSPプロセッサに送るといった作業がよく行われます。DSPプロセッサは、出力スペクトラムを連続的に測定し、入力IQストリームのスペクトラムと比較して、差が最小になるように非直線性を補正します。

過渡的な歪の影響は、送信RFレベルの変化に伴う瞬間的なスペクトラム・マスク違反として現れます。これは、アンプの非直線性が温度に大きく左右されるからです。入力信号が変化すると、パワー・アンプに使用されている半導体デバイスのパワーが変化し、それに伴い温度も変化します。この過渡的な歪の影響は、送信データの変化よりはゆっくりですが、デジタル・フィードバックのリニアライゼーションよりは高速です。これらの過渡的な歪の影響は、周囲の環境に大きく左右され、工場出荷時の校正から予測するのはまず不可能です。定常的な動作温度で正しいプレディストーション係数も、熱の変化というトランジエントの下においては、著しく不正確なものとなる可能性があります。過渡的な歪の影響は、デバイスやパワー・レベルに応じて、通常、数十マイクロ秒からミリ秒のオーダーで安定します。

これらの過渡的な歪の影響は、RSA6100Aシリーズで診断することができます。DPXでは、従来なら検出不可能だったトランジエントを検出し、時間とともに変化する信号の振る舞いを、“ライブ”で観察することができます。ユーザ定義可能なFMTを使用することで、トランジエントそのものでトリガし、信号の不安定性を取り込むことができます。現象全体は、ロング・メモリに取り込むことができます。RSAのアーキテクチャでは、信号変化の前後の情報を取り込むこともできます。1回の取り込みで、周波数、時間、変調の各ドメインでの影響を解析することができます。

### RF出力パワーによるノンリニア効果とグリッチ

従来の送信機もSDRデバイスも、その出力パワー・レベルは時間とともに変化することがあります。パワー・レベルは、信号チェインのアンプが飽和状態になるまで増加することもあります。アンプが飽和状態のとき大きなひずみが見られるのは当然のこととして、飽和の手前の状態でも、望ましくない影響は現れます。アンプのPAR（ピーク・アベレージ比）の上昇が起こると結果として、アンプが非直線領域で駆動されることが必要以上に多くなり、ACLR（隣接チャンネル漏洩電力比）が一時的に高くなる可能性があります。これが隣接信号への干渉につながることもあります。必ずしもEVMが大きくなるわけではありません。

DPX機能を備えたRSA6100Aシリーズでは、イベント発生と同時にライブRF信号が表示され、この種の歪の影響を観測することができます。また、FMTを使用して、選択した周波数ドメインでこれらのイベントにトリガし、非直線性に起因する現象全体を取り込んで、CCDF（累積分布関数）とACLR測定の相関をスペク

トログラムで表示することができます。この例では、時間とともに変化する信号の振る舞いを観測して、各種の測定値を関連付けることが重要であり、これによってRF出力パワーの変動が信号に及ぼす影響を知ることができます。

詳細については、当社のアプリケーション・ノート『Wide Band Distortion Characterization and Troubleshooting Using a Real-Time Spectrum Analyzer』をご参照ください。

### まとめ

SDRはRF無線機で急速に実装されており、RFハードウェアにはさらなる要件が追加されています。RTSAは、ソフトウェア無線の研究、開発における複雑な問題に対処するため、複数の動作モードの時間と共に変化する要件のテストに広く使用されています。RTSAは、DPX表示、周波数マスク・トリガ、時間相関を持ったマルチドメイン解析機能を装備しており、SDRデバイスの設計、特性評価に最適のトラブルシューティング・ツールです。

**Tektronix お問い合わせ先:**

東南アジア諸国/オーストラリア (65) 6356 3900

オーストリア +41 52 675 3777

バルカン半島/イスラエル/アフリカ南部諸国およびISE諸国  
+41 52 675 3777

ベルギー 07 81 60166

ブラジルおよび南米 55 (11) 3741-8360

カナダ 1 (800) 661-5625

中東ヨーロッパ/ウクライナおよびバルト海諸国 +41 52 675 3777

中央ヨーロッパおよびギリシャ +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 +33 (0) 1 69 86 81 81

ドイツ +49 (221) 94 77 400

香港 (852) 2585-6688

インド (91) 80-22275577

イタリア +39 (02) 25086 1

日本 81 (3) 6714-3010

ルクセンブルグ +44 (0) 1344 392400

メキシコ、中米およびカリブ海諸国 52 (55) 5424700

中東アジア/北アフリカ +41 52 675 3777

オランダ 090 02 021797

ノルウェー 800 16098

中華人民共和国 86 (10) 6235 1230

ポーランド +41 52 675 3777

ポルトガル 80 08 12370

大韓民国 82 (2) 528-5299

ロシアおよびCIS諸国 +7 (495) 7484900

南アフリカ +27 11 254 8360

スペイン (+34) 901 988 054

スウェーデン 020 08 80371

スイス +41 52 675 3777

台湾 886 (2) 2722-9622

イギリスおよびアイルランド +44 (0) 1344 392400

アメリカ 1 (800) 426-2200

その他の地域からのお問い合わせ 1 (503) 627-7111

Updated 12 May 2006

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.co.jp](http://www.tektronix.co.jp))または[www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)をご参照ください。



Copyright © 2006, Tektronix. All rights reserved. Tektronix製品は、米国およびその他の国の取得済みおよび出願中の特許により保護されています。本書は過去に公開されたすべての文書に優先します。仕様および価格は予告なしに変更することがあります。TEKTRONIXおよびTEKはTektronix, Inc.の登録商標です。その他本書に記載されている商品名は、各社のサービスマーク、商標または登録商標です。

8/06 FLG/WOW

37Z-19680-0

## 日本テクトロニクス株式会社

東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階 〒108-6106  
製品についてのご質問・ご相談は、お客様コールセンターまでお問い合わせください。

**TEL 03-6714-3010 FAX 0120-046-011**

電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00 月曜~金曜(祝日は除く)

当社ホームページをご覧ください。 [www.tektronix.co.jp](http://www.tektronix.co.jp)  
お客様コールセンター [ccc.jp@tektronix.com](mailto:ccc.jp@tektronix.com)