

最新の無線通信におけるテスト手法

周波数ホッピング技術を使用したSDR（ソフトウェア無線）設計の問題とソリューション

無線通信の設計エンジニアは、機器の性能と信頼性の改善に努めています。近年、RF（無線周波数）スペクトラムの過密化と干渉の増加により、それらの改善がさらに重要となってきています。特に、現在開発中の軍用や民間防衛無線のアプリケーションにとってこれらの改善は重要です。軍用アプリケーションでは、意識的な電波妨害（ジャミング）を受けるようなミッションクリティカルな環境下でも正常に動作しなければならず、堅牢で適応力のある無線通信が求められています。

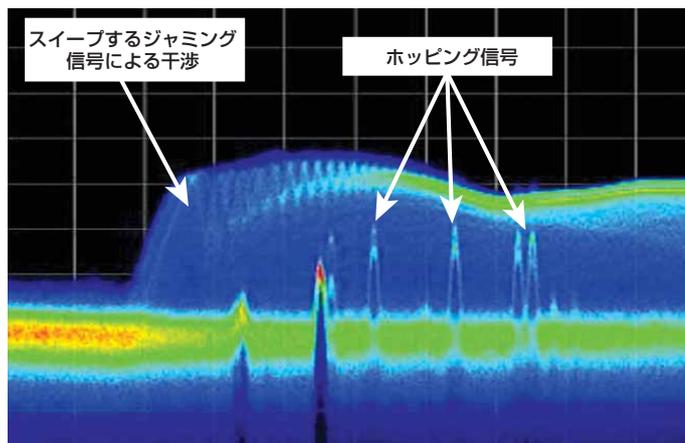


図1. 周波数ホッピング信号がジャミングによる干渉を受けた様子。当社リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA) のデジタル・フォスファ技術 (DPX) を使用して表示した様子。

過密状態の無線スペクトラムで効率的な通信を確保するために、いくつかの技術が採用され始めています。その中の代表的な技術としてSDR (ソフトウェア無線) があります。SDRとは、使用する周波数バンド、変調形式、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、ソフトウェアによってダイナミックに制御する技術です。米国国防総省は、数十億ドルをかけたJTRS (統合戦術無線機システム、Joint Tactical Radio System) プログラムによりSDR技術の開発を推進しています。多くのヨーロッパ諸国の国防機関では、JTRSプログラムに類似したSDR開発プロジェクトを進めています。これにより、コンパクトで持ち運び可能なユニットから車載用や船舶用プラットフォームまで、SDRは広範囲なアプリケーションで使用されています。防衛電子産業で利用されるSDR技術を利用した商業用アプリケーションも、最近では数多く出始めています。

SDRにはさまざまなアプリケーションがあり、またその機器の形状もさまざまですが、それらすべてに共通した特徴があります。それは周波数ホッピング技術を使用しているということです。

周波数ホッピングは、SDRシステムだけでなくアナログ・システムでも使用され、以下のアプリケーションがあります。

- 探知回避
- 電波妨害と干渉の緩和
- マルチパスやフェージング環境下での性能改善

周波数ホッピングは、システムがより確実に安定して動作するように、広い周波数帯域にわたって情報を広げてコーディングする方式を利用しています。特定の周波数で電波妨害が起きても、失われるのはその周波数で送信された情報だけで、データ・ストリーム全体が失われることはありません。この場合でも、インタリーブおよびFEC (順方向誤り訂正/Forward Error Correction) により、電波妨害された周波数ホッピングの損失データは再生されます。

周波数ホッピングは無線通信を改善するための一つの手法として知られていますが、その応用についてはますます広がりつつあります。信号の周波数ホッピングが高速になればなるほど、探知、干渉、電波妨害を受けにくくなります。周波数ホッピング自体は新しい技術ではありませんが、最新の無線通信においては、民生用機器市場と同じように軍事および民間防衛関連においても性能の改善と強化のため、周波数ホッピングのさらなる高速化を目指しています。

この高速化に伴い、設計およびテスト環境において目立った問題が起きて始めています。周波数ホッピング信号と干渉源は、極めて複雑に動作し、またスペクトラムが時間変動します。これらの信号の不規則な動作は、信号の取込み、検証および測定を難しくしています。周波数ホッピング技術はますます高速化しており、その技術を利用した最新の無線通信機器を効率的に設計しテストするためには、新しいツールと測定手法が必要となってきます。

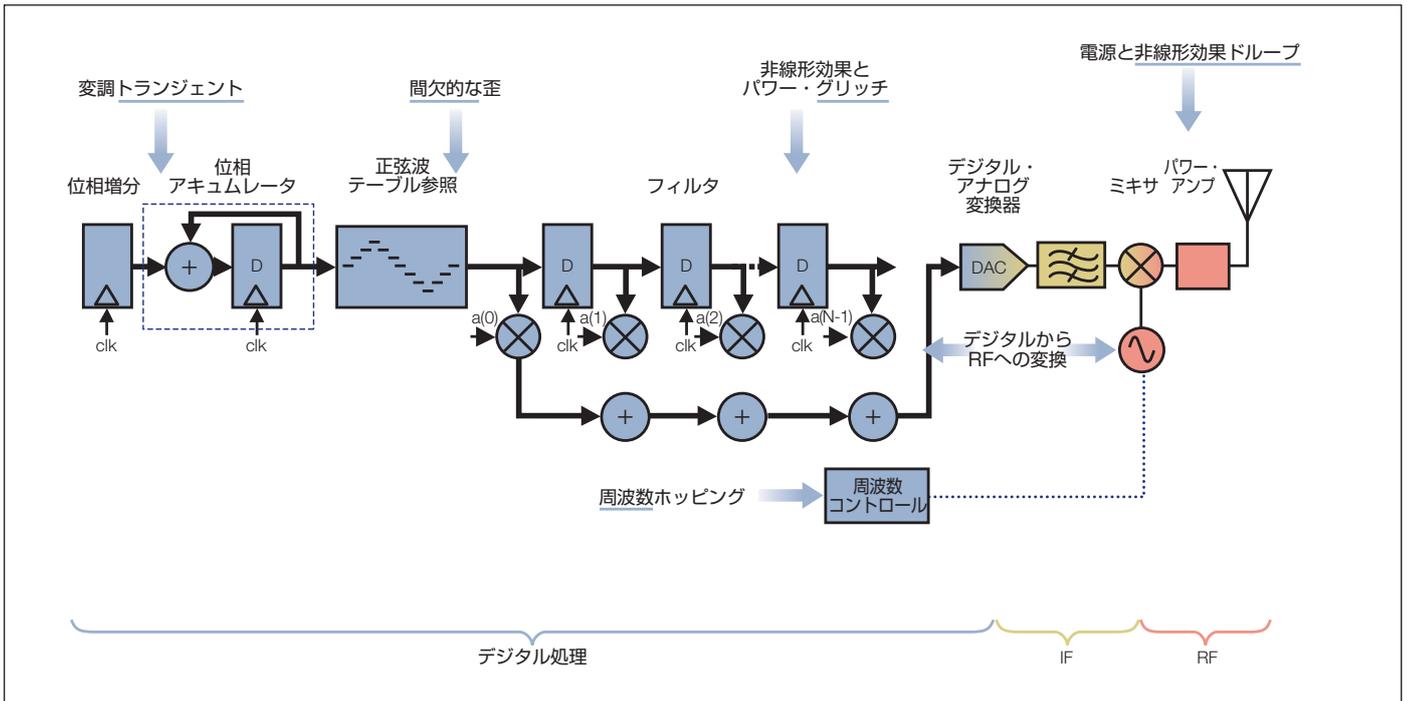


図2. 簡略化したSDRブロック図とエラーを起こす可能性のある発生源

設計とテストにおける新たな課題

周波数ホッピングが高速になると、通信システム設計時、特にシステム・アーキテクチャとシンセサイザの設計に多くの問題が現れます。最新の無線通信はシステムが複雑になっており、制御用ソフトウェア、デジタル信号処理 (DSP) およびシステム・コンポーネントが最適な相互作用を行って、最高性能を実現できるようにする必要があります。ソフトウェアによる動作パラメータの活発な変更は、ハードウェアとソフトウェアの数多くの組み合わせを作り、エラーの原因ともなります。エラーとして一般的なものは、変調とフィルタ処理でのトランジェント、歪、非線形パワー効果、パルス形状異常、周波数同調とセトリング、電源結合、デジタルRF結合、ソフトウェア依存位相エラーなどです。

同じように、高速な周波数シンセサイザの設計にも大きな課題があります。例としては、LバンドにおけるJTIDS (統合戦術情報伝達システム、Joint Tactical Information Distribution System) があり、毎秒38.461.5回のホッピングで動作します。そのため、システム内における周波数シンセサイザは、一つの周波数から次の周波数までホッピングして、26 μ s以内に安定した通信を行わなければなりません。そのためシステム・トランジェントは、エラーのない通信を行うため数百nsで安定させなければなりません。

ホッピング・キャリアの周波数セトリングによる変調品質の劣化は、送信機の品質の低下とシステムにおけるデータ・レートの低下を引き起こす一つの要因になります。過去においては、固定されたキャリアを変調アナライザの中心周波数において復調できたため、設計エンジニアは従来のテスト機器を使用することができました。残念ながら従来のテスト機器では、最新の広帯域ホッピング信号を復調することはできません。それは、ホッピング信号が動作バンドを越えてホッピングするため、最適な変調品質を得るにはオフ・センタ周波数での解析が必要となるからです。

DSPとデジタル/RF統合回路 (多くの場合は同一IC上) によってRF波形を動的に生成する場合には、従来のRF無線機の見られなかった問題も起きています。図2はSDRで発生するエラーの原因を示しています。原因としては変調トランジェント、アンプの非線形効果およびデジタルからRFへの変換時のクロストークなどが挙げられます。SDR送信機の性能は、従来のRF送信機の適合性テストに加え、他の測定でも検証されなければなりません。これらのテストをパス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。システム・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測する必要があります。

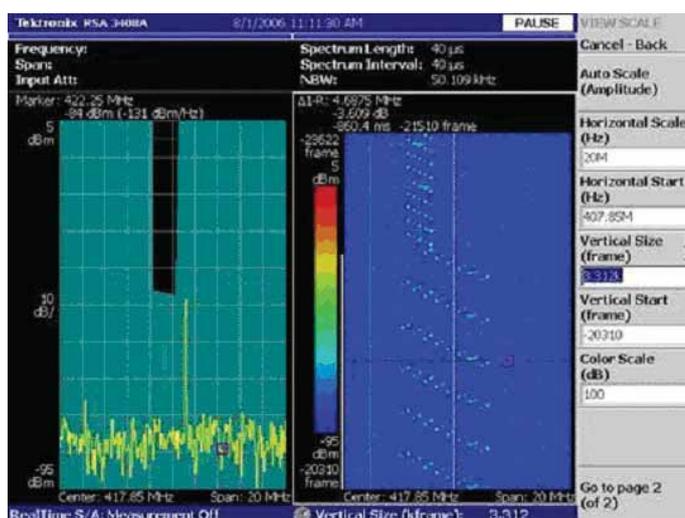


図3. 当社リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA) で取込んだ高速ホッピング信号。左側の画面はユーザ定義のFMT (周波数マスク・トリガ) 表示で、右側は取込んだホッピング信号のスペクトログラム表示です。

テスト・ソリューション

SDR設計エンジニアがこれらの問題に対処するためには、そのシステムを十分に解析し、特性評価する必要があります。システム本来の動作を理解するには、RFスペクトラム異常の可能性を確認することが重要です。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特定するには、設定した周波数でトリガできなければなりません。個々の問題の原因を特定するには、複数領域で時間相関のとれた解析が必要です。トランジェント発生時の状況を再現するのは困難なため、トランジェント全体をシーム

レスにメモリに取込み解析することが重要です。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手法と、従来の静的な適合性テストを組み合わせることが、統合的なSDRテストには必要です。

システム・レベルでのシステム全体性能の検証とトラブルシューティング

システム・アーキテクチャ・レベルでの設計検証は、最新の通信システムでは不可欠です。より多くのアクセス・ポイントをテストし検証することで、システム最終統合段階で問題の発生がより少なくなることは明らかです。システム障害の主な原因は、DSP、RF回路およびソフトウェア・コントロールにあります。検証用デバッグ・ツールは、システム設計エンジニアが効率的に問題を把握するために非常に有効です。

エラーを特定できさえすれば、そのエラーを識別し解析できます。問題を識別し、その根本原因を突き止めるためには、信号パス上でエラーの発生と時間に関連付けることが重要です。SDR設計における信号情報は、デジタル・ワードから連続的なアナログ可変電圧にその形状が変化するため、何種類かのテスト機器で問題の正確な発生源を診断する必要があります。信号パス上のどのポイントでも問題が発生する可能性があり、またオシロスコープおよびロジック・アナライザのメモリ容量には制限があるため、複数のテスト機器に同時にトリガをかけて、現象が発生したその瞬間を取込むことが重要です。そのためにはロジック・アナライザではデジタル・トリガ、オシロスコープでは時間領域の振幅トリガ、スペクトラム・アナライザでは周波数領域トリガのように、各機器がその領域でトリガをかけることが必要です。

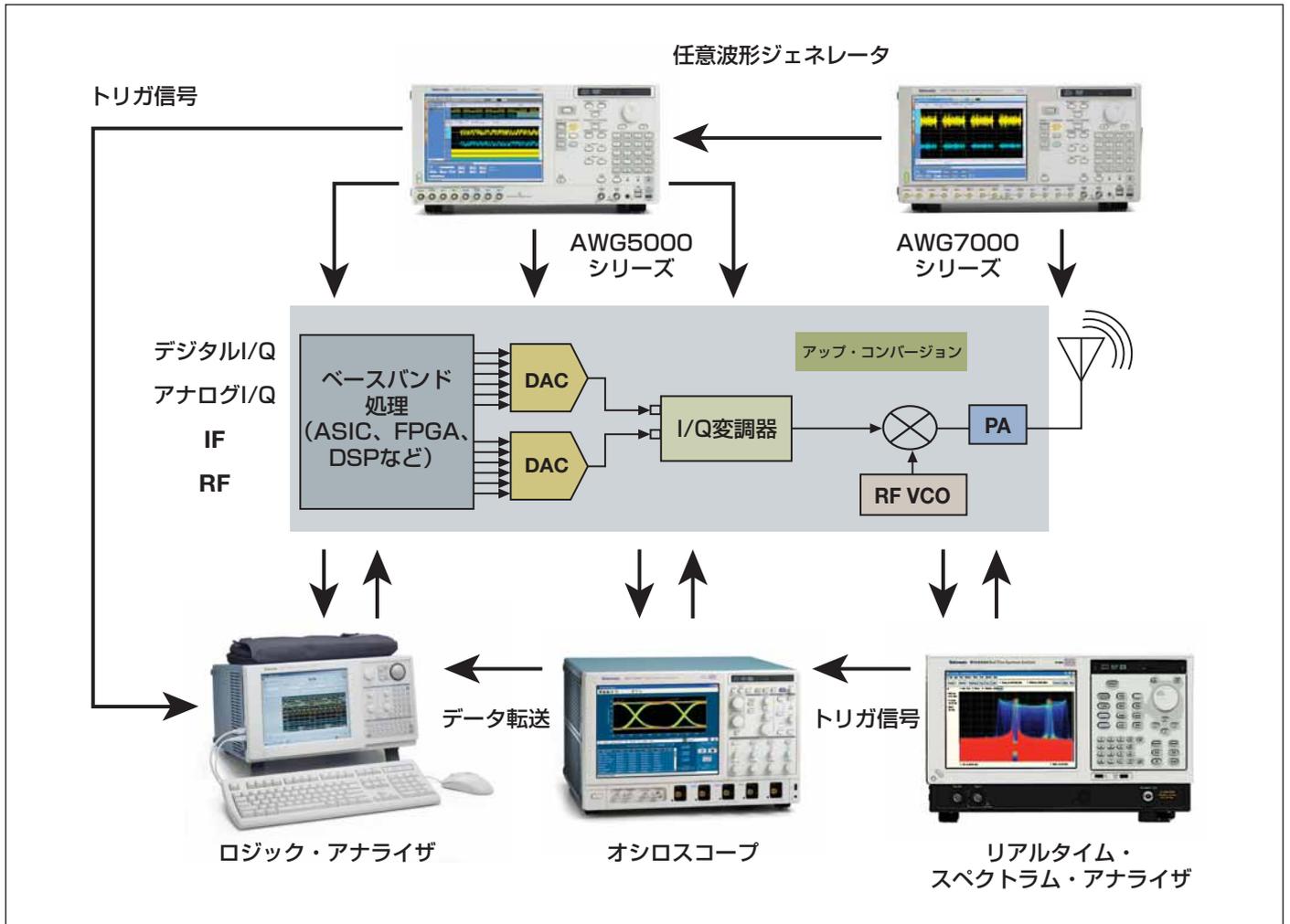


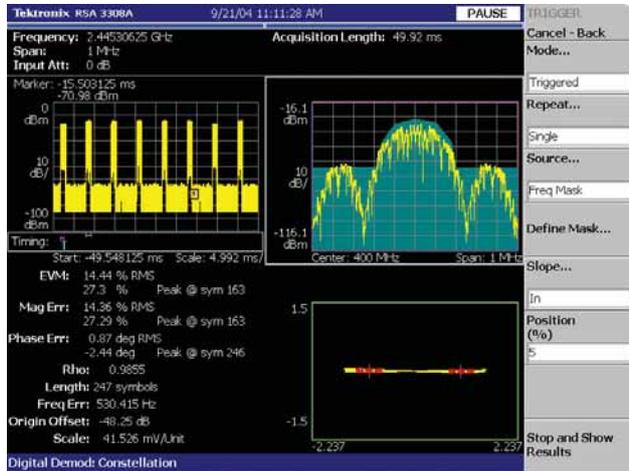
図4. 当社のリアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA)、任意波形ジェネレータ (AWG)、オシロスコープ、ロジック・アナライザを使用したSDRの検証およびトラブルシューティングのための統合テスト・システム

当社のリアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA)、任意波形ジェネレータ (AWG)、オシロスコープおよびロジック・アナライザで構成される統合的かつ、上流から下流まで対応可能なテスト・システムは、SDRのテストに最適です。これらのテスト機器は、機器間相互にトリガをかけるクロス・トリガと時間相関を持ったサブシステム表示を結合して働かせることで、物理レイヤおよび各種ソフトウェア・レイヤにおけるSDRの性能検証と複数のテスト手順を実行します。またこのテスト・システムは、周波数領域のSDRサブシステムと時間領域との間の複雑な相互関係、特にバーストおよび周波数ホッピングで伝送される信号を理解するのに向いています。

フィルタリングおよび増幅時のソフトウェア異常は、RF出力端で一時的なRFインパルス・バーストを発生させます。ソフトウェア性能とハードウェア性能を分離するため、RTSAでは、周波数領域でトランジェントにトリガし、メモリに取込み、エラーの可能性がある発生源を特定するために他の機器を駆動させます (図2を参照)。取込んだ信号は時間相関を持っているため、SDRのデジタル・ブロックまたはアナログ・ブロックでの異常が、どのようにインパルス・ノイズとしてRF出力に送られるかを解析するときに有効です。

時間相関性を持った信号の複数機器での解析

SDR



マルチ・プラットフォーム表示

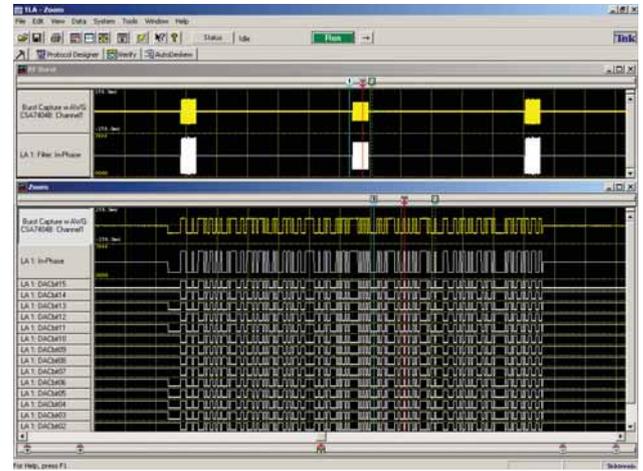


図5. スペクトラム・マスクに違反したBPSK信号の時間相関解析および複数領域解析。左側の画面は、リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RTSA) で取込んだRF波形表示です。右側は、オシロスコープとロジック・アナライザで取込んだ信号のアナログ・チャンネルとデジタル・チャンネル表示です。

ソース・コード・ラインへのトレース

リアルタイム・ハードウェア・トレース

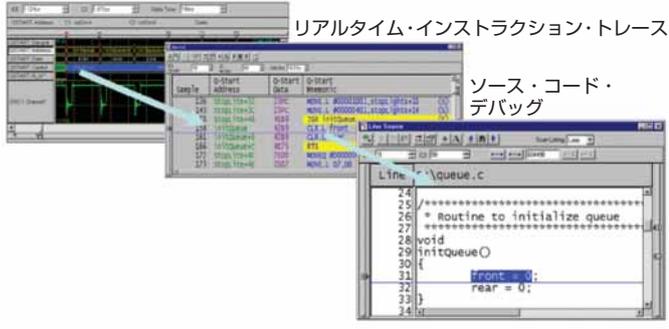


図6. RTSAのイベント・トリガによって取込まれたロジック・アナライザのデータは、元のソフトウェアのハードウェア・トレース、インストラクション・プランチ、ソース・コード・ラインへのトレースなどに利用できます。

スペクトラム・トランジェントから問題を見つけ出すことができるRTSAのユニークな機能により、RTSAは他の機器にトリガをかけ、またハードウェアとソフトウェアのさまざまな機能動作状態を、時間相関をとって表示することができます。例としては、RTSAで信号パスのRF部とIF部の信号を取込み、ロジック・アナライザでデジタル・ベースバンド信号を取込んで、RTSAで生成されたシンボル・テーブルと比較します。その上で、ハードウェアとソフトウェア測定の相関を取り、RTSAのオフライン・ソフトウェア (RSAVu) を使用してロジック・アナライザとオシロスコープで取込んだデータを解析します。

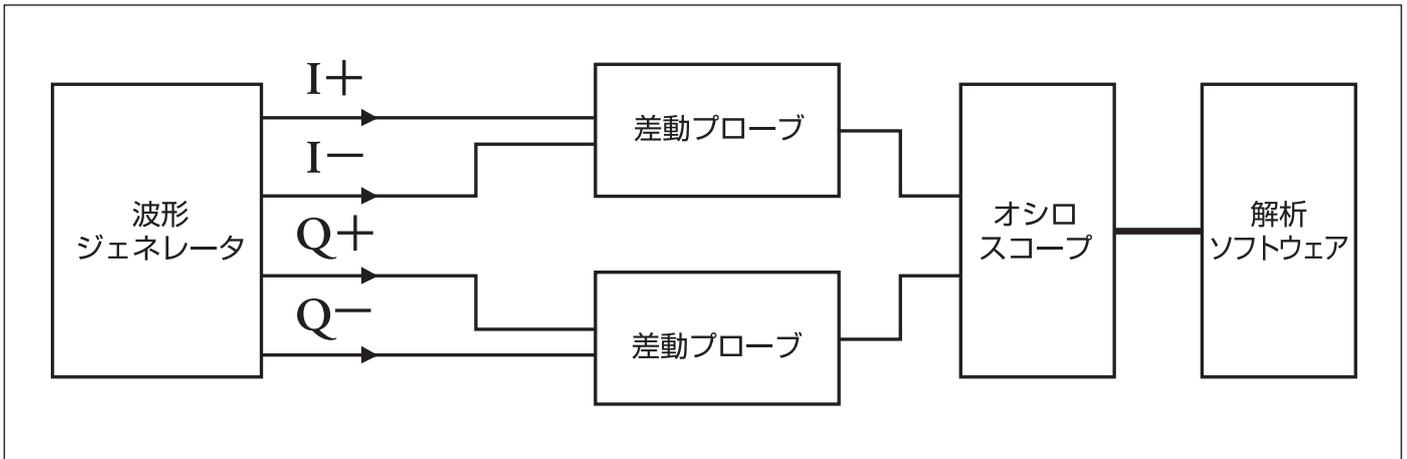


図7. オシロスコープを使用したベースバンドIQ信号の従来のテスト方法

ベースバンドIQ波形品質の検証

システム・エンジニアとFPGA（Field Programmable Gate Array）設計エンジニアにとって、ベースバンドIQの波形品質を検証することは非常に重要です。デジタル回路で発生する多くの問題はFPGAの設計に起因することが多く、開発段階の早い時点でベースバンドが正常に動作するかどうかのテストが必要です。

実際の設計とアプリケーションにおけるベースバンド信号は、差動（I+、I-、Q+、Q-）で、またDCオフセットを持つこともあります。従来、IQ信号を直接テストできるスペクトラム・アナライザは少なく、またDCオフセットのあるベースバンドIQ信号をテストできるスペクトラム・アナライザはほとんどありませんでした。設計エンジニアは、オシロスコープと、取込んだ信号の解析用追加ソフトウェアを組み合わせるしか方法がありませんでした。

RTSAには差動入力のベースバンドIQテストができる機種もあります。RTSAを使用したIQ信号テストには、以下のような利点があります。

- 整合性のあるIQ、IF、RF測定ツールと解析
- システムの複雑さが減少し、テストが容易
- 汎用オシロスコープに比較して、RTSAはより高ダイナミック・レンジで長いメモリ長

当社RTSAは、ベースバンド解析、RF解析および信号取込み後の解析を一台で実現できます。たとえばRSA3000シリーズでは、高測定精度の14ビット・アナログ・デジタル変換（ADC）を使用したDCベースバンド測定が行えます。RTSAの差動IQ入力機能により、直接ベースバンドIQ信号を接続して、エラー・ベクトル振幅（EVM）解析ができます。差動プローブ・セットを使用する必要はありません。EVM解析機能に加えてRTSAは、時間領域、周波数領域、コンスタレーションのマルチドメイン（複数領域）で完全に時間相関のとれた測定が行えます。

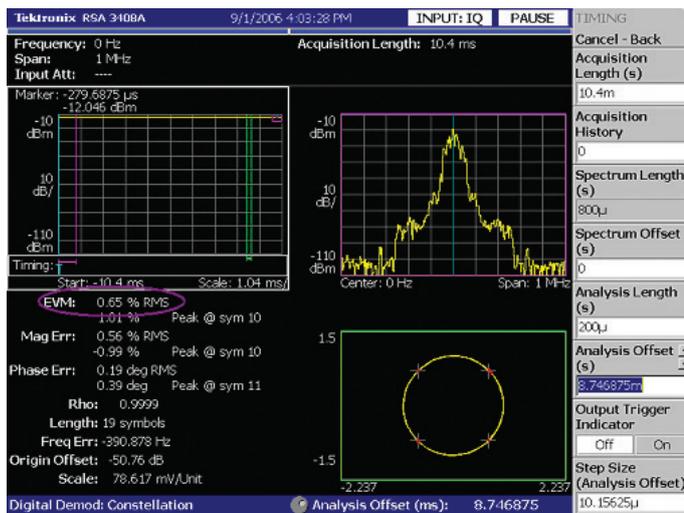


図8. RTSAの直接接続による $200\ \mu\text{s}$ のベースバンドIQ信号品質測定。
1MHzスパンで、中心周波数は0Hzに設定。

ホッピング信号の周波数セトリング時間測定

周波数セトリング時間は、2つの周波数間をホッピングする時間で定義されます。このセトリング時間は、周波数ホッピングの効率を表す主要な指標の一つです。周波数セトリング時間が短ければ短いほど、システムのホッピングを速くすることが可能です。周波数セトリング時間を測定することによってシンセサイザの動作を最適にし、システム全体の性能の最大化が図れます。

従来の周波数セトリング時間測定方法は、測定機器によって制限され、また測定にかなりの時間がかかっていました。設計エンジニアは、オシロスコープのエンベロープ機能や、信号の安定度を示唆する周波数弁別器によってテストするしかありませんでした。オシロスコープは優れた時間分解能測定能力を備えています。わずかな周波数変化を測定する場合、測定に要求される周波数分解能によっては問題がありました。オシロスコープでは、自動的に

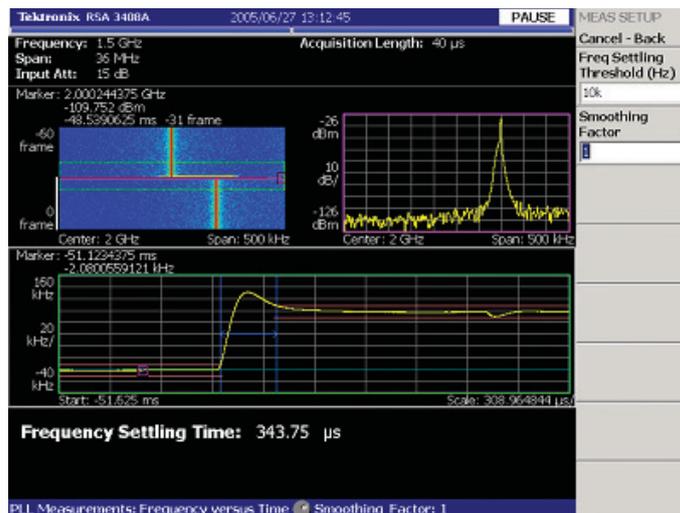


図9. $343.75\ \mu\text{s}$ の周波数セトリング時間で、RTSAによる高速ホッピング信号の測定。スペクトrogramと周波数対時間表示によりシステム性能が検証できます。

ホッピング周波数の測定はできず、また周波数セトリング時間測定結果は推定値となります。

当社の最新のRTSAでは、自動でセトリング時間測定が行えます。周波数セトリング・スレッシュホールドやスムージング係数などのパラメータを設定することにより、ホッピング信号の周波数セトリング時間が素早く正確に測定できます。またホッピングしている間のスペクトラム変化も観測可能です。

付け加えるならば、当社RTSAは、マルチドメイン(複数領域)で時間関連のとれた測定の他に、デジタル・フォスファ技術(DPX)や周波数マスク・トリガ(FMT)などの優れた機能を有します。これらのユニークな機能により、周波数ホッピング信号のトラブルシューティングが、以前に比べてより効率的に、かつ簡単にできるようになりました。

- DPXでカバーできない問題
 - ホッピングにおける最終キャリア周波数までの
オフセット時間の表示
- 周波数マスク・トリガによる問題の取込み
 - ホッピングした周辺のデータの取込み
- 問題の測定
 - シグナル・ソース解析機能によるセトリング時間と
周波数変化の測定

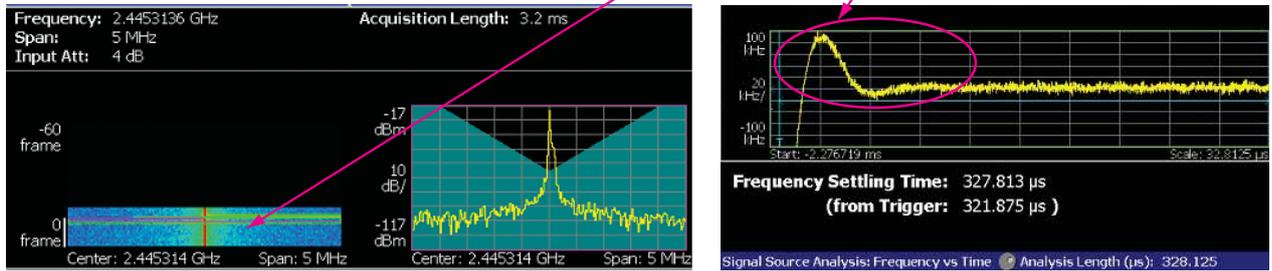


図10. RTSAのユニークなDPX（デジタル・フォスファ）表示とFMT（周波数マスク・トリガ）による周波数ホッピング信号のすばい検出、取込み、トラブルシューティング

DPXは、問題をすばやく発見できる優れたツールです。DPXにより初めてRF信号をライブで観測し、その動作状態を克明に観測することができます。掃引型スペクトラム・アナライザに比べて、500倍高速なスペクトラム・アップデートを持ったRTSAは、周波数トランジェントの変化をDPX表示で直接観測できます。SDRの測定においては、DPXはRF信号の状態を簡単に評価できる極めて新しい方法であり、迅速に潜在的な問題が検出できます。

DPXによってグリッチまたはトランジェントを検出し、周波数領域

のイベントとして定義した後、FMTにより詳細なポスト・プロセッシング解析のための信号を確実にメモリに取込むことができます。周波数マスクはユーザで定義でき、最良の状態では信号を取込むことができるようマスクを設定できます。不規則に周波数ホッピングが発生する場合には、パワー・レベルの変化でトリガをかけるのではなく、マスクを設定して周波数変化でトリガをかけることが可能です。周波数マスクは、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の領域に入るとトリガをかけます。

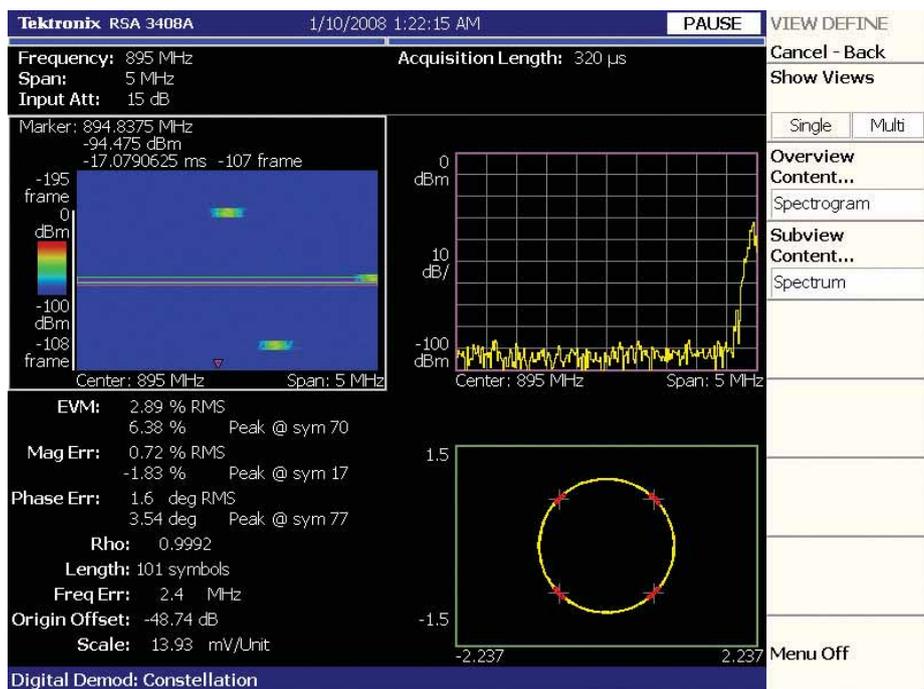


図 11. オフ・センタ周波数ホッピング信号を復調したスペクトログラム表示（上部左側）、スペクトラム表示（上部右側）、信号の変調品質（下部左側）およびコンスタレーション表示（下部右側）

ホッピング信号の変調解析

ホッピング信号の全周波数帯域にわたる変調解析には、トリガをかけてダイナミックRF信号を取込むだけでなく、ベクトル解析をするためのキャリア・トラッキングができる機器も必要となります。従来のベクトル・シグナル・アナライザ（VSA）は、中心周波数上でのベクトル解析が行えましたが、オフ・センタ周波数信号の解析は非常に制限されていました（300kHz以下）。ほとんどのベクトル・アナライザは、ホッピング信号を全取込帯域で復調するキャリア・トラッキング機能を持っていません。

当社RSA3000シリーズなどのRTSAでは、全取込帯域でホッピング信号を復調できる機能を備えています。設計エンジニアは、どのようなオフ・センタ周波数であっても変調品質を気にすることなく、設計の検証とデバッグが行えます。また取込んだいずれのホッピング信号も復調でき、複数領域で時間相関のとれた詳細な変調品質解析表示が可能です。

まとめ

周波数ホッピング技術を利用したSDR（ソフトウェア無線）は、従来のテスト機器では測定できない全く新しいテストを必要とします。これらの無線には、SDRサブシステムとシステム検証に対して新しく柔軟で統合されたアプローチが必要です。

当社リアルタイム・スペクトラム・アナライザ（RTSA）は、複数領域で時間相関のとれた測定、ユニークなデジタル・フォスファ技術（DPX）、周波数マスク・トリガ（FMT）、ベースバンドIQ測定、オフ・センタ周波数ホッピング信号の復調など優れた機能を備えています。これらの機能により、周波数ホッピングを行う無線のテストと解析が容易に行えます。当社のRTSAは単独、あるいは他の当社テスト機器と使用することで、最新の無線通信設計、実験室でのRFデバッグ、屋外でのシステム検証などに最適なテスト・ソリューションを提供します。

Tektronix お問い合わせ先：

日本

本社 03-6714-3111
SA営業統括部 03-6714-3004
ビデオ計測営業部 03-6714-3005

大宮営業所 048-646-0711
仙台オフィス 022-792-2011
神奈川営業所 045-473-9871
東京営業所 042-573-2111
名古屋営業所 052-581-3547
大阪営業所 06-6397-6531
京都オフィス 075-323-9048
福岡営業所 092-472-2626
湘南カスタマ・サービス・センタ 0120-7-41046

地域拠点

米国 1-800-426-2200
中南米 52-55-542-4700
東南アジア諸国/豪州 65-6356-3900
中国 86-10-6235-1230
インド 91-80-2227-5577
欧州 44-0-1344-392-400
中近東/北アフリカ 41-52-675-3777
他30カ国

Updated 17 October 2007

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)またはwww.tektronix.com)をご参照ください。



TEKTRONIXおよびTEKI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。

04/08 EA/PDF

37Z-21488-0

Tektronix

Enabling Innovation

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 E-mail ccc.jp@tektronix.com

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

当社ホームページをご覧ください。 www.tektronix.co.jp
製品のFAQもご覧ください。 www.tektronix.co.jp/faq/

●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