

リアルタイム・スペクトラム解析のすべて

目次

第1章：はじめに	3-8	DPX®技術：信号検出の画期的ツール.....	25
RF信号技術の進歩.....	3	デジタル・フォスファ表示.....	26
最新のRF測定の問題.....	4	DPX表示エンジン.....	27
各機器の動作原理の概要.....	5	DPX変換エンジン.....	29
掃引型スペクトラム・アナライザ.....	5	DPX Density測定.....	29
ベクトル・シグナル・アナライザ：.....	7	タイミングとトリガ.....	30
リアルタイム・スペクトラム・アナライザ.....	7	リアルタイム・トリガとアキュイジション.....	31
第2章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザの動作原理	9-37	デジタル・アキュイジションを採用したシステムでのトリガ.....	32
RF/IF回路部.....	9	トリガ・モードとその特長.....	33
入力切替と信号経路.....	10	リアルタイム・スペクトラム・アナライザのトリガ源.....	33
RFとマイクロ波.....	10	周波数マスクの作成.....	34
周波数変換とIF.....	11	復調.....	35
デジタル処理（DSP）とは.....	12	振幅、周波数および位相変調.....	35
リアルタイム・スペクトラム・アナライザのデジタル信号処理.....	12	デジタル変調.....	36
IFデジタイザ.....	13	パワー測定と統計処理.....	37
補正.....	13	第3章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザ測定	38-46
デジタル・ダウンコンバータ.....	14	リアルタイム・スペクトラム・アナライザによる測定の種類.....	38
IQベースバンド信号.....	14	周波数領域の測定.....	38
間引き処理.....	15	DPXスペクトラム測定.....	39
間引き処理フィルタ.....	15	時間領域の測定.....	39
時間領域波形から周波数領域波形への変換.....	16	変調領域の測定.....	42
リアルタイム・スペクトラム解析.....	17	コード領域の測定.....	44
トランジェント・イベントの検出と取込み.....	17	統計領域の測定.....	45
リアルタイム・スペクトラム・アナライザと掃引型スペクトラム・アナライザ.....	18	第4章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザを使用したアプリケーション	47-49
リアルタイム・スペクトラム・アナライザのRBW.....	18	パルス測定.....	47
ウィンドウ.....	19	レーダ.....	47
リアルタイム・スペクトラム・アナライザのDFT（離散フーリエ変換）.....	20	RFID.....	47
デジタル・フィルタ.....	22	スペクトラム管理とサーベイランス（監視）.....	48
FIR（有限インパルス応答）フィルタ.....	22	無線通信.....	48
周波数応答とインパルス応答.....	22	パワー・アンプのテスト.....	49
畳み込み（コンボリューション）.....	23	マイクロフォニックと位相跳躍（Phase-hits）解析.....	49
		EMI/EMC.....	49
		第5章：用語解説	50-51
		用語集.....	50
		略語のリファレンス.....	51

第1章：はじめに

RF信号技術の進歩

1860年代に、James Clerk Maxwellが、空間を通してエネルギーを伝達できる電磁波の存在を数学的に予言して以来、エンジニアや科学者はRF技術の革新的な用途を捜し求めてきました。1886年には、Heinrich Hertzが「電波」の存在を物理的に証明し、Nikola Tesla、Guglielmo Marconi等がこの電波を使って遠距離通信を行う方法を開発しました。世紀が変わると、RF信号の最初の実用的な利用方法としてラジオが開発されました。その後30年にわたり、信号を送受信することによって遠距離にある物体を見つけ、位置を特定する方法を研究するために、いくつもの研究プロジェクトが実行されました。第二次世界大戦の勃発により、電波探知機（レーダ）がRFの別の有力な利用目的になりました。

RF信号が軍事部門と通信部門の成長に大きな役割を果たしたことにより、その後の20世紀後半からRFの技術革新が急速に進められ、今日もなおそれは続いています。干渉に耐え、探知を防止し、さらに性能を向上させるために、現在のレーダ・システムと商用通信ネットワークは、きわめて複雑になっています。通常これらは、複雑な適応変調、バースト、周波数ホッピングといったRF技術を高度に組み合わせて利用しています。このような高度なRF機器を設計し、実稼動しているシステムに正しく組み入れる作業は非常に複雑です。

それと同時に、最新の半導体技術やパッケージ技術を使った携帯電話や無線データ・ネットワークがますます広く一般に普及するに伴い、基本的なRF部品の価格が急激に低下しています。これにより、従来の軍事部門と通信部門以外の製造メーカーでも、比較的単純なRFデバイスを、あらゆる種類の商用製品に組み込むことができるようになってきました。RF送信機は広く浸透しており、家庭用電化製品、病院の医療機器、工場の産業用制御システム、家畜やペットなどに埋め込む追跡デバイスなど、考えられるほとんどの場所で使用されています。

現在の世界においても、RF信号はあらゆる場所で使用されるようになったため、信号を発生するデバイス間で干渉の問題も発生しています。認可された帯域内で動作する携帯電話などの製品は、隣接する周波数チャンネルにRFエネルギーの影響を与えないように設計する必要があります。これは特に、伝送モードを切り替えて異なったネットワークとのリンクを同時に維持することが必要な、複雑なマルチスタンダード・デバイスの課題にもなっています。また、認可が不要な周波数帯域内で動作するデバイスも、干渉信号が存在する環境下で正しく動作する必要があるため、規制によりパワー・レベルを低くして、短いバースト信号による伝送が要求されています。コンピュータとRF技術を組み合わせた新しいデジタルRF技術は、携帯電話、デジタルTV、RFIDなどに使用されています。デジタルRF技術は、SDR（ソフトウェア無線）やCR（コグニティブ無線）の発展に伴って新たな進展を見せており、また基本的なスペクトラムの割り当て方法が変更されると、結果的に貴重なRFスペクトラムの効率的な利用につながります。

次々と発生するこれらの課題を解決するためには、エンジニアや科学者が、時間とともに変動するRF信号を確実に検出し、特性を評価できることが必要になります。ただし、従来の計測器では容易に測定できないものも多々あります。当社ではこれらの問題に対処するため、見つけることの難しいRF信号イベントを検出し、このイベントでトリガをかけ、信号をメモリに連続して取り込み、周波数、時間、変調、統計およびコードの各領域で解析できるRTSA（リアルタイム・スペクトラム・アナライザ）を開発しました。

この入門書では、RTSAの動作方法について説明し、またRF信号に関連する測定上の問題を、RTSAを使用して解決する方法をご説明します。

現在のRF測定の問題

今日のRFデバイスの動作特性を評価するためには、短時間から長時間にわたる周波数、振幅および変調のパラメータの変化を把握する必要があります。掃引型SA（スペクトラム・アナライザ）やVSA（ベクトル・シグナル・アナライザ）といった従来の機器を使用しても、周波数領域や変調領域における信号を表示させることができます。ただし、この情報だけでは現在のRF信号の動的な特性を評価するには十分ではありません。

以下に示すのが、測定が難しい項目の一覧です。

- 間欠的で瞬間的に発生するイベント検出
- パワー・レベルの大きい信号に埋もれたレベルの小さい信号の観測
- ノイズに埋もれた信号の観測
- トランジェント（過渡的）で動的な信号の検出と解析

- バースト伝送、グリッチ、スイッチング・トランジェントの信号取込み
- PLLセトリング時間、周波数ドリフト、マイクロフォニックの特性評価
- スペクトラム拡散信号と周波数ホッピング信号の取込み
- スペクトラム使用状況の監視、逸脱した伝送の検出
- トランジェントEMIの影響度のテストと診断
- 時間とともに変化する変調方式の特性評価
- ソフトウェアとハードウェアの相互作用上の問題識別

各項目の測定には、予測が難しい、時間とともに変化するRF信号を含んでいます。これらの信号を効率的に特性評価するには、見つけることが難しい信号イベントを検出し、このイベントでトリガをかけ、信号を取込んでメモリに保存し、周波数、時間、変調、統計、コードの各領域で信号を解析するための機器が必要です。

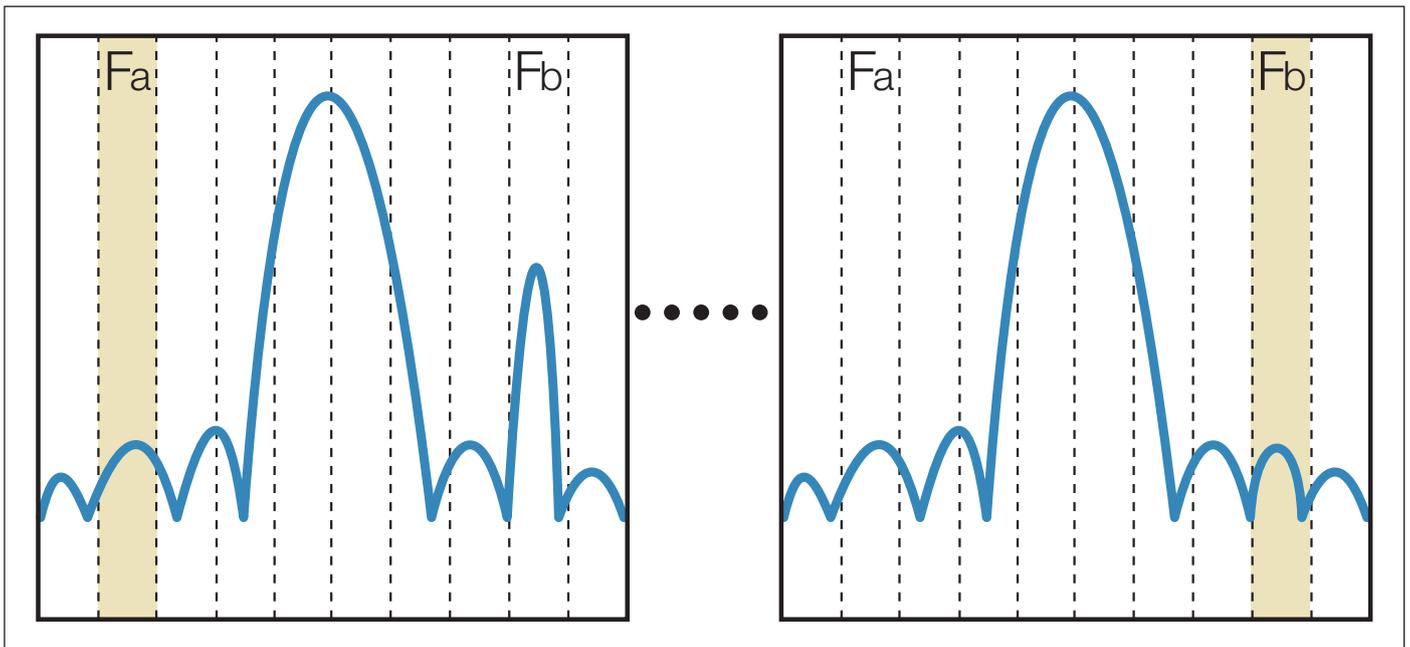


図1-1. 掃引型SAは、一連の周波数セグメントを順番に掃引していくため、黄色 (Fb) で示した現在の掃引帯域以外で発生したトランジェント信号を取込めない場合がある

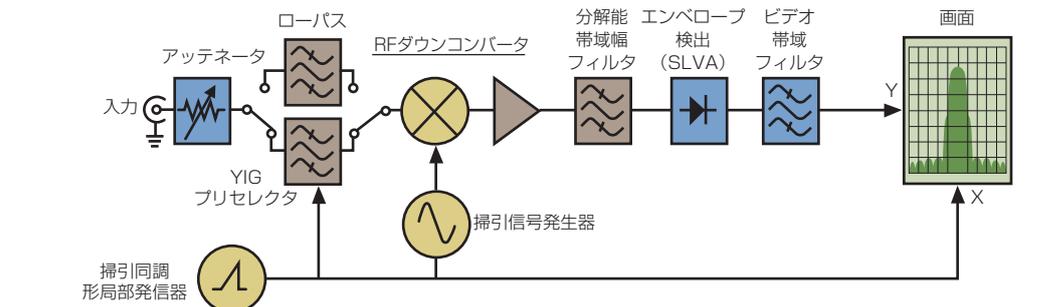
各機器の動作原理の概要

RTSAの動作原理を知り、RTSA測定の特長を理解するために、まず従来の2つのRF信号アナライザ、掃引型SA (スペクトラム・アナライザ) とVSA (ベクトル・シグナル・アナライザ) について説明します。

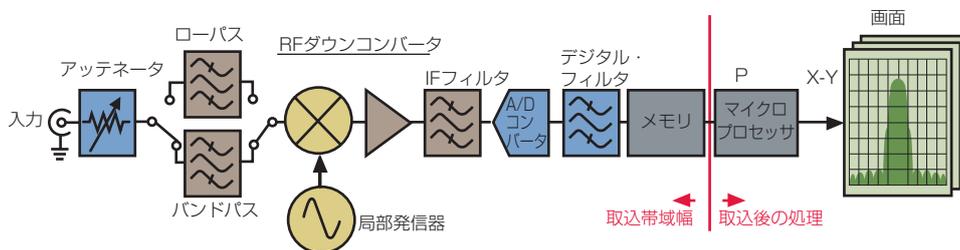
掃引型スペクトラム・アナライザ

従来型の掃引方式の周波数領域解析に特化したスーパーヘテロダイン・スペクトラム・アナライザは、数十年前に初めて周波数領域の測定が行えるようになった計測器です。当初の掃引型SAはすべてアナログ部品で構成され、利用用途に合わせて改善されてきました。現在の掃引型SAには、A/Dコンバータ、DSP、マイクロプロセッサなどのデジタル部品が組み込まれています。ただし、基本的な掃引方法はほとんど変わらず、変化の少ない安定した信号の観測に最も適しています。掃引型SAは、測定信号をダウンコンバージョンし、RBW (分解能帯域幅) フィルタの通過帯域にわたって掃引することで、パワー対周波数の測定を行います。RBWフィルタの後に、選択したスパン内の各周波数ポイントの振幅を出力する検出器があり

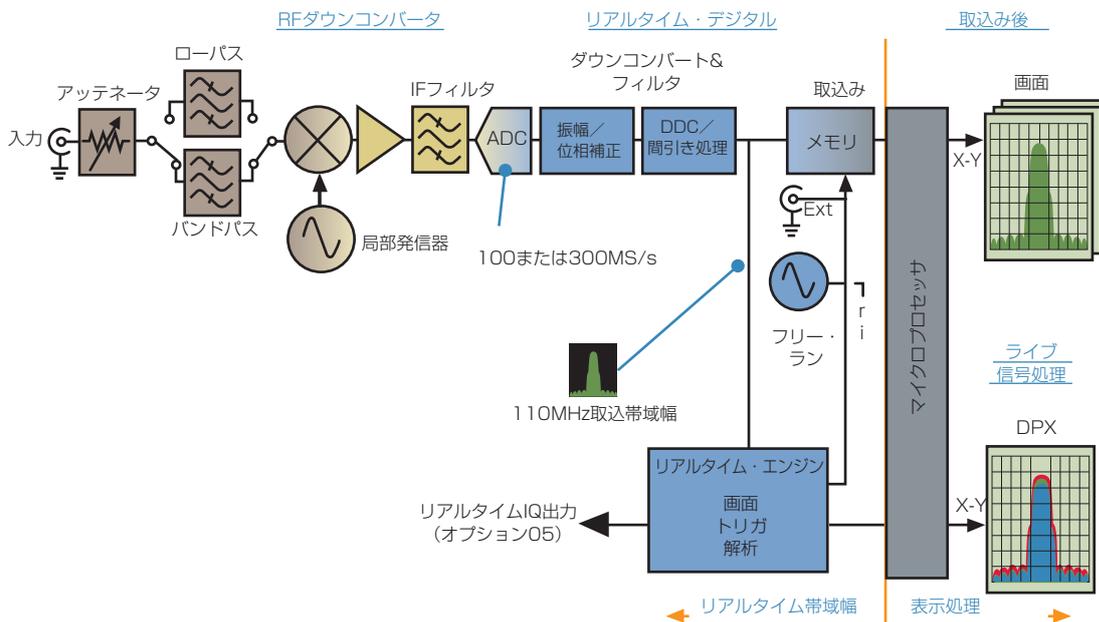
ます。この方式は、広いダイナミック・レンジに対応できますが、一度に1つの周波数ポイントに対する振幅データしか計算できません。この方式は、測定する信号が大きく変動しない状態で、アナライザが複数回の掃引を実行できることが必要です。したがって、入力信号は比較的安定し、変動しないことが求められます。信号が急激に変動する場合、統計的に見て変動が見落とされる可能性があります。図1-1では、SAが周波数セグメントFaを掃引している間に、Fbで瞬間的なスペクトラム・イベントが発生しています (左図)。掃引がセグメントFbに到達したときには、イベントはすでに消失して検出されません (右図)。掃引型SAは、このようなトランジェント信号の発生を検出する機能を備えていないため、現在のRF信号のトラブルシューティング時には、長時間にわたって多大な努力が必要となります。瞬間的な信号が検出できないことに加えて、現在の無線通信やレーダで使用されているインパルス信号のスペクトラムが不正確に表示されてしまうことがあります。掃引型SAの方式では、繰り返して掃引を行わない限り、インパルスの占有スペクトラムを表示できません。また、掃引型SAを使用するときには、特に掃引速度と分解能帯域幅の設定に注意が必要です。



a) 掃引型スペクトラム・アナライザ



b) ベクトル・シグナル・アナライザ



c) リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (RSA6000シリーズ+オプション110)

FFTをベースにした現在のアナライザ

図1-2. 掃引型スペクトラム・アナライザ (a)、ベクトル・シグナル・アナライザ(b)、リアルタイム・スペクトラム・アナライザ (c) の単純化したブロック図

図1-2aは、現在の一般的な掃引型SAの構成を示しています。現在の掃引型SAは、アナログ機能をDSP（デジタル信号処理）で置き換えています。基本的な内部構造や測定能力については変わっていません。

ベクトル・シグナル・アナライザ

デジタル変調された信号を解析するには、振幅と位相両方の情報が得られるベクトル測定が必要です。図1-2bは、簡略化したVSAのブロック図を示しています。

VSAは通過帯域内のRF信号をすべてデジタル化し、メモリにデジタル化した波形として保存します。振幅と位相の情報を持ったメモリ内の波形は、DSPにより復調、測定および表示の処理が行われます。VSA内部では、A/Dコンバータが広帯域のIF（中間周波数）信号をデジタル化した後、ダウンコンバージョン、フィルタリングおよび検波がデジタル信号処理されます。時間領域から周波数領域への変換は、FFT演算により行われます。VSAは、FM偏差、コード領域パワー、変調精度（EVMとコンスタレーション図）などの変調パラメータを測定します。また、チャンネル・パワー、パワー対時間、スペクトログラムなどの表示が得られます。

- VSAは波形をメモリに保存することはできますが、トランジェント・イベントを解析する能力には限界があります。一般的なVSAのフリー・ラン・モードでは、信号を取込んでメモリに保存した後で、信号処理が行われます。このVSAのバッチ処理方式では、アキュイジションの間に発生したイベントを取込むことはできないため、単発的なイベントや間欠的なイベントを確実に検出することは困難です。このような、まれにしか発生しないイベントでトリガをかけることができれば、このイベントをメモリに保存することが可能です。残念ながらVSAは、限られたトリガ機能しか持っていません。外部トリガ機能を使用するとしても、事前にイベントの情報がわかっている必要があります。あまり実用的ではありません。IF信号の振幅変化によってトリガをかけるレベル・トリガを使用しても、大きな信号に埋もれた小さな信号ではトリガをかけることができず、また振幅ではなく周波数が変化したときにもトリガをかけることはできません。現在の過密化した厳しいRF環境下では、このような信号は頻繁に発生します。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザ

リアルタイムという言葉は、実際のシステムに対して初期段階のデジタル・シミュレーションを行う際に使用する専門用語です。デジタル・システム・シミュレーションでは、実システムの動作速度と同じ速度でシミュレーションが動作することをリアルタイムで動作すると呼んでいます。

リアルタイムで信号を解析するということは、測定周波数バンド内のすべての信号成分が、正確に高速で解析処理が行われることを意味します。それには次の二つの項目を満足しなければなりません。

- ナイキスト定理を満足する、十分に高速なサンプリング・レートで入力信号をサンプルすることが必要です。これは、サンプリング周波数は測定信号帯域幅の2倍を超える周波数でなければならないことを意味します。
- 入力信号の変化に対応した解析結果が得られるよう、すべての処理が連続して十分に高速で行われる必要があります。

検出、トリガ、キャプチャ、アナライズ

RTSAは、掃引型SAやVSAでは測定が困難な、前述のような過渡的あるいは動的なRF信号に対して、より確実に正確に測定できることを目的に設計されています。VSAのアキュイジション後に解析処理を行う方式に対して、RTSAはDSP（デジタル信号処理）によってメモリに保存する前に信号解析を実行します。このリアルタイム処理により、他の測定機器では観測できないイベントが検出でき、またそのイベントでトリガをかけて必要な信号部分をメモリに保存することができます。メモリに保存したデータは、バッチ処理によりマルチドメイン解析が行えます。リアルタイムDSPエンジンは、信号処理、補正およびその他の解析にも使用されます。

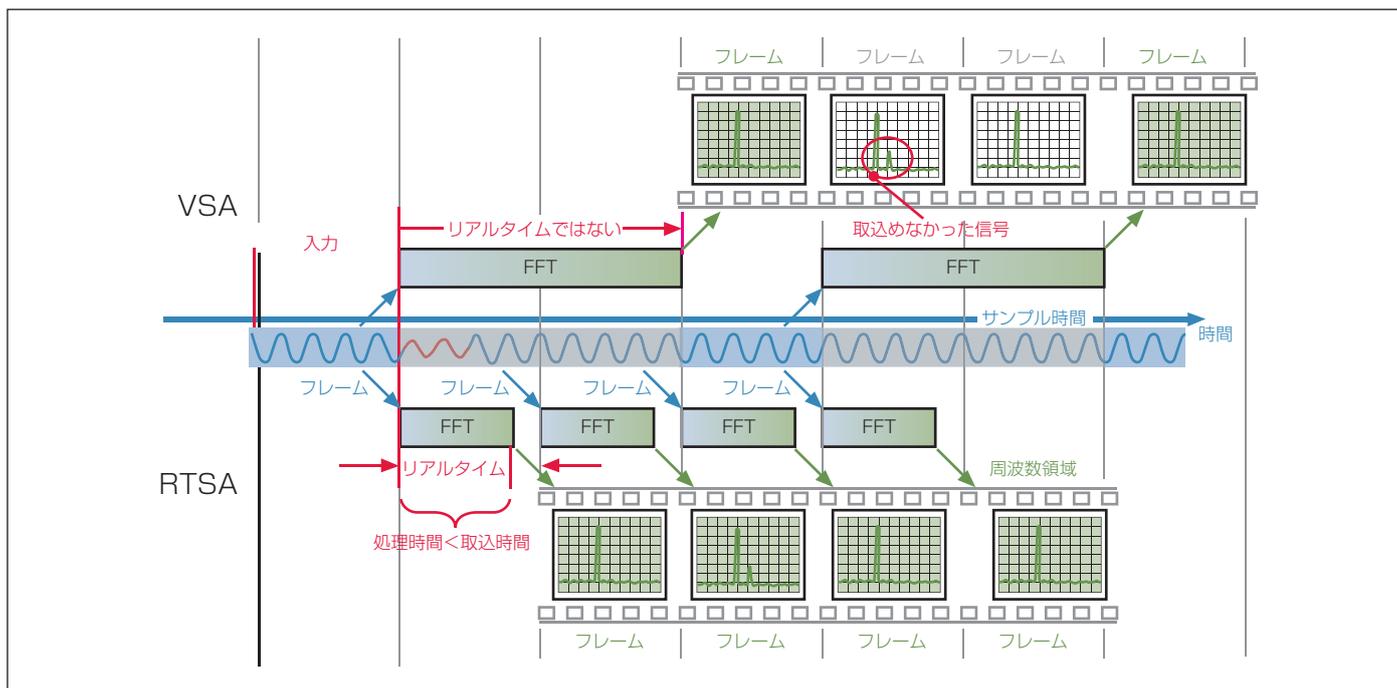


図1-3. VSAによる処理と、リアルタイム・スペクトラム・アナライザのリアルタイム・エンジンによる処理との比較

RTSAの心臓部は、図1-2cに示されるようにリアルタイム処理ブロックです。VSAと同じように、広い取込帯域にわたって入力信号をデジタル化します。VSAと違うところは、リアルタイム・エンジンは非常に高速で動作するため、図1-3に示すように間をあけることなくすべての信号をサンプルします。アナログIFとRFの応答特性を補償するための振幅と位相の補正は、連続して実行されます。メモリに保存されたデータは正確に補正され、また次のリアルタイム処理はその補正データによって実行されます。

このリアルタイム処理を実行するリアルタイム・エンジンは、RF解析に必要な以下のような機能を備えています。

- アナログ信号経路での信号劣化をリアルタイム補正
- 掃引型SAやVSAでは検出できないイベントを、DPX®ライブRF表示で検出
- DPX Density™トリガとDensity測定は、信号の発生頻度の時間密度で定義されます。

- ラント・トリガなどの時間クオリファイ拡張トリガは、一般的に高性能オシロスコープに装備されています。
- FMT（周波数マスク・トリガ）による周波数領域でのトリガ
- ユーザ設定した帯域でのトリガ/フィルタ機能付きパワー・トリガ
- 過密化したバンド内にある特定の音声変調信号を聞くことができるリアルタイム復調（RSA6100Aシリーズ）
- 外部記憶や外部処理用のための連続した信号出力を可能にするデジタル・データのデジタルIQストリーミング

リアルタイム・エンジンは、信号を検出してトリガをかけるだけでなく、連続した信号処理を行い、また利用価値の高い各種解析機能を使用することができます。VSAと同じように、RTSAでもDSPによるアキュイジション後の解析が行えます。時間相関が取れた複数領域（マルチドメイン）での測定結果を同時に表示できます（マルチドメイン解析）。

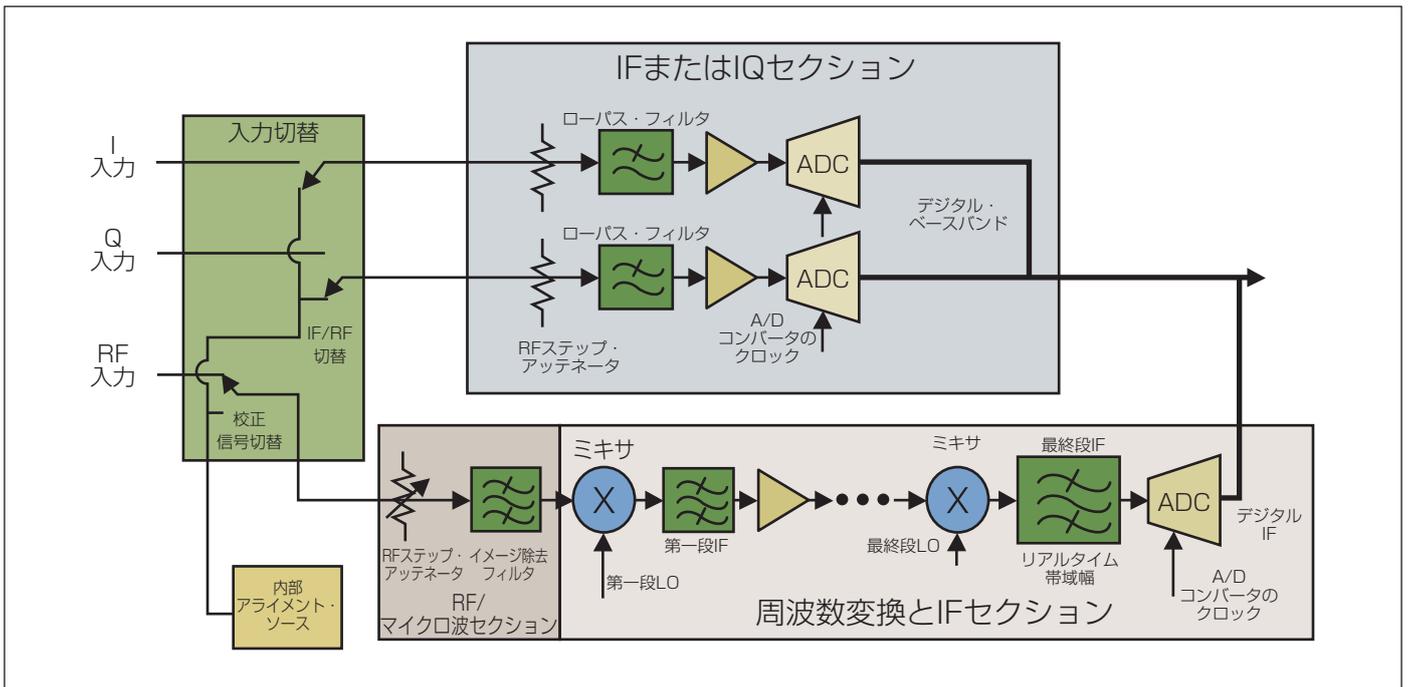


図2-1. リアルタイム・スペクトラム・アナライザとIFブロック図

第2章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザの動作原理

この章では、当社RTSAのメイン・アキュイジションと解析処理の構成ブロック図について説明します。説明を容易にするため、主要な機能以外は省略しています。

最新のRTSAは、入力周波数範囲内であればどんな通過帯域やスパンの信号でも取込むことができます。この性能を実現する重要な心臓部は、IF（中間周波数）セクションに信号を渡すRFダウンコンバータです。IF信号をA/Dコンバータによりデジタル化した後は、すべてデジタル的に処理します。すべての信号処理と解析機能は、DSP演算により実行されます。

この優れたリアルタイム・エンジンによる主な特徴を以下に示します。

- 広帯域IFパスと広いダイナミック・レンジを実現するRF回路部
- YIGプリセクション・フィルタの代わりにバンドパス・フィルタを使用することにより、入力周波数範囲全体にわたるイメージのない周波数変換と広帯域幅測定が同時に行えます。
- 測定要求に応える十分な信号忠実性とダイナミック・レンジを持ち、またリアルタイム帯域幅全体にわたってデジタル化を可能にするA/Dコンバータ・システム
- 連続したアキュイジションの処理ができるDSP（リアルタイム・デジタル信号処理）エンジン

- 必要な測定時間にわたって、連続したリアルタイム・アキュイジションが行える十分な取込メモリと優れたDSP性能
- 測定対象信号の解析表示を、すべて時間相関が取れた状態で複数領域表示する、統合された信号解析システム

RF/IF回路部

図2-1は、RTSAの簡易RF/IFブロック図です。RTSAの周波数範囲内であれば、どんな周波数成分を持った信号でも入力できます。RTSAに入力した信号は、必要な解析の種類に応じて処理されます。アッテネータ・ゲイン調整が行われた後、多段周波数変換および同調型と固定型局部発信器の組み合わせにより同調が行われます。各IF周波数に対してアナログ・フィルタ処理が行われ、IFセクションの最終段で、IF信号をA/Dコンバータでデジタル化します。デジタル化した後は、DSP技術を使用して各種処理を実行します。RTSAの何機種かは、オプションとして、周波数変換することなく直接入力信号をデジタル化できるベースバンド・モードを備えています。ベースバンド信号用DSPも、RF信号用DSPと同じように使用されています。

入力切替と信号経路

入力切替と信号経路切替を行うこのセクションでは、各信号経路に入力信号を送ります。RTSAの何機種かは、低周波数信号を解析する際にダイナミック・レンジと精度を高めるため、DC結合IQベースバンド・パスと同じように、別にDC結合ベースバンド・パスを備えています。またRTSAは、内部校正用信号源も持っています。RTSAのPRBS（擬似ランダム・バイナリ・シーケンス）、校正された正弦波、変調リファレンスなどに対応した信号を生成するこの校正用信号源は、温度変化によるシステム・パラメータの変動を補正するセルフアライメント調整に使用されます。補正が行われるパラメータを以下に示します。

- ゲイン
- アクイジション帯域幅での振幅フラットネス
- アクイジション帯域幅での位相直線性
- 時間アライメント
- トリガ遅延の校正

工場あるいは修理センタでの外部機器を使った校正と、セルフアライメント処理とを組み合わせることが、RTSAの重要な測定性能を満足させるために必要です。

RFとマイクロ波

RFとマイクロ波セクションでは、最適なダウンストリーム処理が行えるレベルと周波数特性を持つように、入力信号を最適化する広帯域回路を備えています。

ステップ・アッテネータ

ステップ・アッテネータは、抵抗アッテネータ・パッドとRFとマイクロ波スイッチで構成されるデバイスで、設定されたレベル量だけ広帯域信号のレベルを減少させます。ステップ・アッテネータは以下の2項目を実行します。

1. 処理に最適なレベルまで、入力部でRFとマイクロ波の信号のレベルを減少させます。さらにステップ・アッテネータは、過大なRFパワーを持った高レベル信号による入力部の損傷を保護します。
2. 周波数範囲全体にわたって広帯域インピーダンス整合を行います。このインピーダンス整合は、RF信号を高精度で測定するには特に重要です。そのため、ほとんどの機種仕様では、10dB以上の減衰で規定しています。

ステップ・アッテネータは、RTSAの機種によって変わりますが、一般的には、5または10ステップで0から50dBまでの減衰が設定可能となります。

イメージ除去フィルタとYIGプリセクタ

RTSAは、入力部からIF最終段にわたって、RFおよびマイクロ波信号をイメージの発生しない状態で周波数変換します。これは、最初のみキサの直前に各種フィルタを置くことにより実現しています。RTSAの機種の多くは広帯域フィルタ内蔵の多段みキサ方式を採用しているので、取込帯域幅すべてにわたって、再現性が高く優れた振幅フラットネスと位相直線性を持ったイメージのない変換が行えます。

YIGプリセクタは、広帯域幅信号を測定するときに非常に大きな歪みを発生させます。広帯域幅信号を正確に測定（特に位相測定）するには、狭帯域プリセクタを通さないことが必要です。

この同調フィルタは、本質的に狭帯域幅なので、フィルタの通過帯域幅にわたり大幅な位相変動が起き、特にフィルタのエッジ部分で大きくなります。

この位相変動を校正により補正しようとしても、フィルタの持つ同調機能により校正が正しく動作しません。同調は、YIGの磁気フィールドを変化させることにより行われます。この磁気フィールドにより同調周波数を制御しますが、最初の同調周波数に戻る場合、磁気構造が持つ磁気ヒステリシスにより、最初の正確な同調周波数に戻ることができなくなります。

位相校正が行われていたとしても、このヒステリシスによる同調周波数の変動により、位相校正に誤差が生じます。結果として、広周波数帯域幅で同調が行われるときに、振幅と位相の測定結果にわずかな変動が発生します。このわずかな変動は、通常温度によっても変化します。

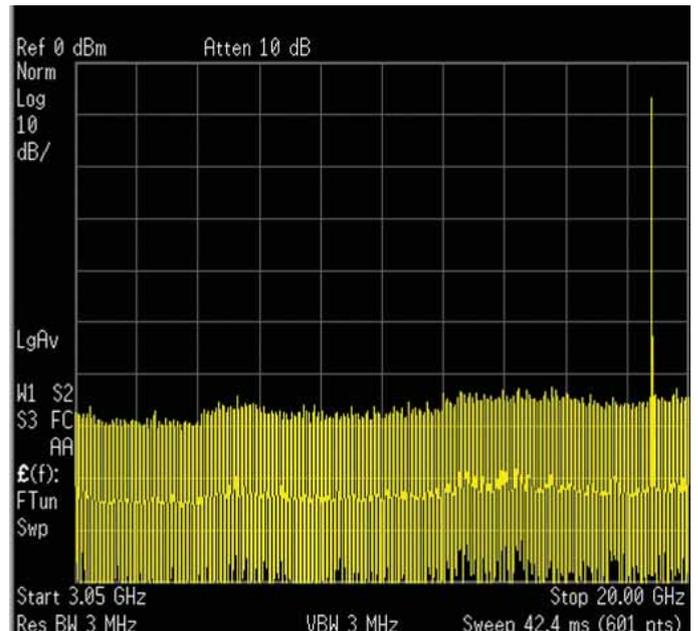
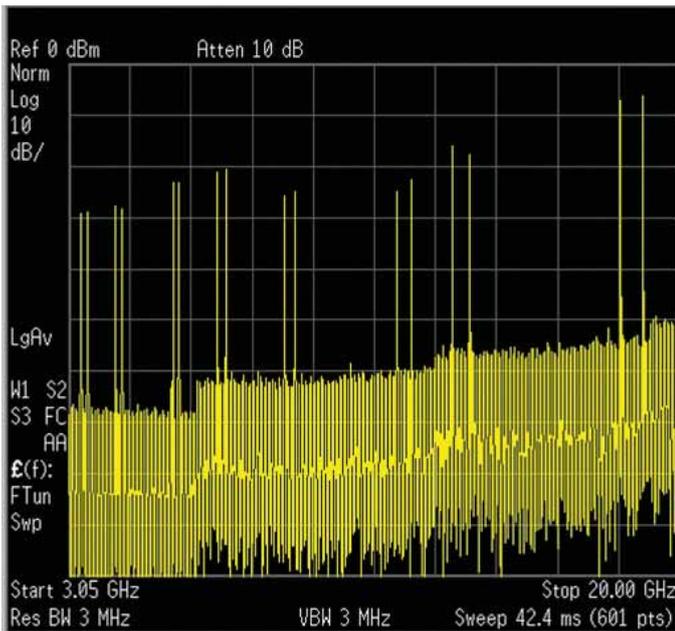


図2-2. 左図は、従来のスペクトラム・アナライザによるYIGプリセレクタを通さないときのマイクロ波周波数信号表示。右図は、YIGプリセレクタを通した時の信号表示

プリアンプ

RTSAの何機種かには、イメージ除去フィルタに送る前で信号のゲインを増幅するセレクタブル・プリアンプをオプションで用意しています。このオプションは、RTSAのノイズ・フィギュアを改善できるので、非常に小さな信号を解析するときには有効です。入力部でゲインを増幅すると、解析しようとしている最も大きな信号を制限することになります。これを避けるには、信号経路からこのアンプを切り離すことにより、RTSAの入力範囲は元の状態に戻ります。

周波数変換とIFセクション

RTSAのすべての機種は、その測定周波数範囲内であれば中心周波数がどこにあっても広帯域で解析できます。これは、測定対象となる周波数バンドを、固定のIFに変換することにより行います。固定IFではフィルタリング、増幅および振幅調整を行い、その後IF信号をデジタル化します。リアルタイム処理およびバッチ処理は、測定信号のマルチドメイン解析を行うときに使用します。

多段周波数変換

周波数変換セクションの動きは、周波数バンドのRF信号から、A/D変換に最適なIF信号に変換することです。図2-1に示すように、同調は、多段変換スーパーヘテロダイン方式の局部発信器の周波数を選択することにより行われます。周波数変換の各段には、IFフィルタと増幅の前にミキサ（アナログ乗算器）が含まれます。IF周波数、フィルタ特性、ゲイン、レベルの選択は、RTSAの機種によって異なり、また以下に示す項目で、性能が最適になるように機器を設定することによって変わってきます。

- ミキサとフィルタの欠陥によるスプリアス応答
- 最小信号と最大信号をエラーなしに同時に観測できるダイナミック・レンジ

- リアルタイム帯域幅での振幅フラットネス
- リアルタイム帯域幅での位相フラットネス
- 信号経路とトリガ経路間の遅延調整

内部校正用信号源

多くの特長を備えたRTSAは、アナログ機器に比べて格段に優れた性能を持っています。機器が持つフィルタ特性、遅延、ゲインなどは温度によって変化し、また機器によっても異なります。RTSAの性能は、RTSA内部のフィルタ特性、遅延、ゲインを実際に測定し、DSPを使用して性能を満足するよう測定結果を補正することにより実現しています。広帯域RF成分に対する周波数応答とゲイン変化は、NIST、NPL、PTBなどのNMI (National Metrology Institutes) にトレーサビリティを持った校正済みの機器を使用して、工場出荷時に測定しています。この校正機器は、RTSAを実際に使用する時間と場所の測定状況で校正するための内部校正用信号源にも使用されます。RTSAは次の2種類の内部信号を使用します。

- 高精度で温度補償されたリファレンス周波数100MHz（代表値）の正弦波が、信号経路のゲイン調整に使用されます。この信号は、内部RFレベル・リファレンスで、取込帯域幅の中心周波数でRFパワーを測定したときの精度を決定します。
- 校正済み広帯域信号は、リアルタイム取込帯域幅にわたって振幅と位相特性を補正するために使用します。この信号は、内部チャンネル応答リファレンスです。この信号はDSPに情報を提供し、DSPはこの情報によりアキュイジション帯域幅での振幅、位相および遅延の変動を補正します。

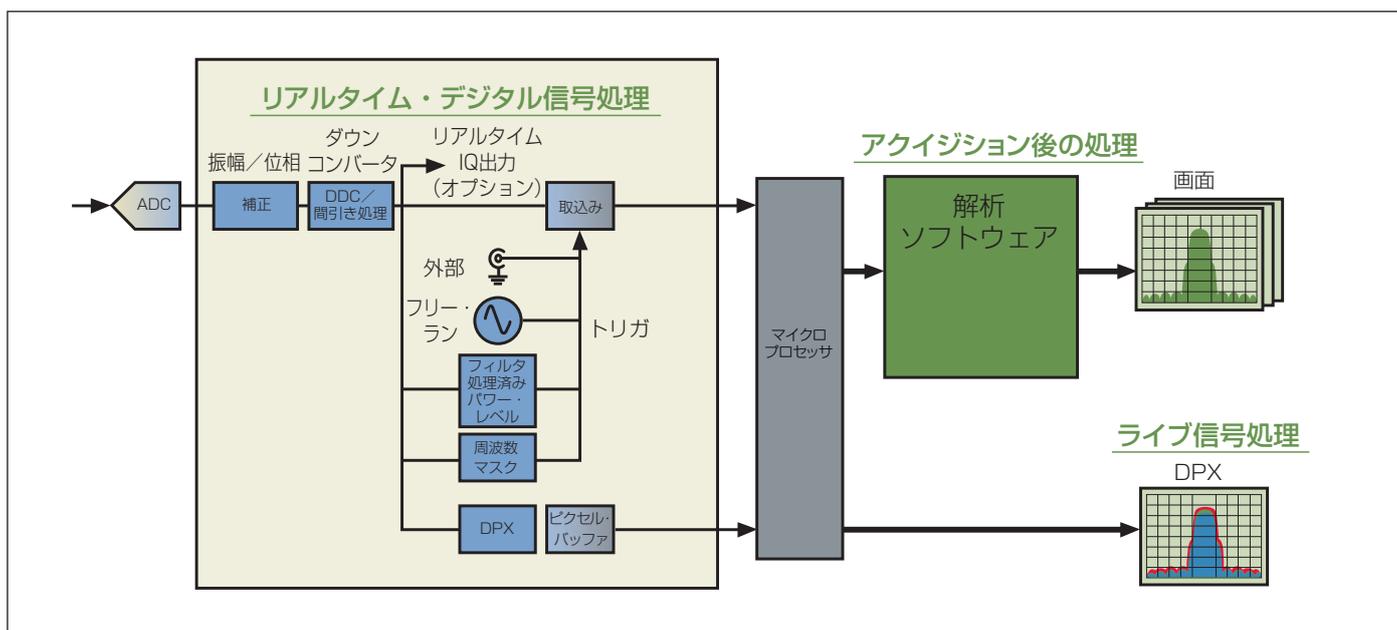


図2-3. リアルタイム・スペクトラム・アナライザのデジタル信号処理ブロック図

DSP（デジタル信号処理）とは

このセクションでは、当社のRTSAのメイン・アキュイジションと解析のブロック構成図について説明します。実際の構成は、機種や測定機能により異なります。説明を容易にするため、付随的な機能は省略しています。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザのデジタル信号処理

RF信号を時間相関の取れたマルチドメイン解析が行える信号に変換するため、RTSAではアナログ信号処理とDSP(デジタル信号処理)を組み合わせて使用しています。このセクションでは、RTSAの信号処理のデジタル部分について説明します。

図2-3は、RTSAで使用している主信号処理ブロック図を示しています。RF入力から入った信号の周波数バンドは、バンドパス・フィルタを通してからアナログIF信号に変換されます。サンプルしたデジタル・データに対して、振幅フラットネス、位相直線性およびその他の信号経路での劣化を補正します。いくつかの補正はリアルタイムで行い、その他は次の信号処理部分で行います。

デジタル・ダウンコンバージョン処理と間引き処理では、図2-4に示すようにA/D変換した信号を、I（同相）とQ（直交）のデジタル化したベースバンド信号ストリームに変換します。このIQ信号に変換した信号は、RTSAすべての機種に共通な基本的な信号となります。この後のすべての信号処理と測定は、DSPによって実行されます。リアルタイムDSPとバッチ・モードDSPの両方ともRTSAで使用しています。

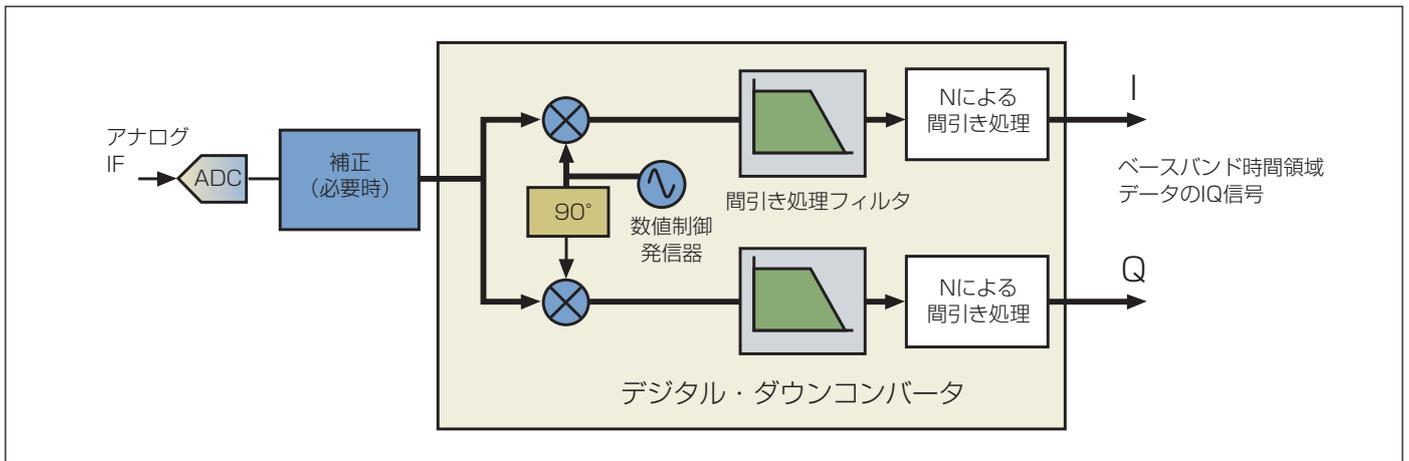


図2-4. リアルタイム・スペクトラム・アナライザにおけるIFからIQ信号への変換

IFデジタイザ

当社のRTSAでは、通常IF（中間周波数）の中心にある周波数バンドをデジタル化します。この周波数バンドは、リアルタイム解析を実行するため最も広帯域な周波数となります。DCあるいはベースバンドに比較して高周波数IFでデジタル化の方が、信号処理におけるスプリアス、DC除去、ダイナミック・レンジなどの各性能が向上します。図2-5に示すように、IF帯域がナイキスト定理の範囲に入るようにサンプリング・レートを設定します。サンプリング・レートは、IF帯域の少なくとも2倍は必要となります。全IF帯域が、ゼロとサンプリング周波数の1/2、1/2と1、3/2と2などの間にある時は、エイリアシングのないサンプリングが行えます。実際のIFフィルタに対しては、通常IF帯域の少なくとも2.5倍のサンプリング・レートが必要です。

補正

RTSAの仕様にある振幅フラットネス、位相直線性、レベルの各精度は、アナログのRFとIF信号処理部で構成される機器と比較して格段に向上しています。当社のRTSAは、工場出荷時校正と、信号経路に使用しているアナログ部品の温度、許容誤差、経年変化などのばらつきを補正する内部セルフアライメントの組み合わせで高精度を維持しています。

工場出荷時校正

入力周波数範囲にわたるRTSAのRF周波数応答は、工場出荷時に測定されます。アキュイジション帯域幅の中心周波数におけるRF信号の変動は、温度変化に対しては予測可能で、また機器の使用年数に対しても目立った変化はありません。工場出荷時の校正で、RF応答は不揮発性メモリに補正データとして保存されます。

内部校正

アキュイジション帯域幅の応答特性は、IF処理セクションを構成するミキサ、フィルタ、アンプの組み合わせによって影響されます。これらのコンポーネントは、RTSAで広帯域にわたって取込んだ信号に対して、わずかな振幅と位相のリップルを与えてしまうことがあります。内部校正処理では、中心周波数からのオフセットに対応した振幅と位相の応答特性を測定します。校正処理は、機器を使用する時にその測定場所で行われ、手動あるいは温度変化に対応して開始します。ここで測定された応答特性は、メモリに保存されます。

補正処理

RTSAの補正処理は、工場出荷時に測定したRF応答と、内部校正が補正フィルタ・セット用FIR係数を生成して測定したIF応答とを組み合わせで行います。この補正フィルタ・セットは、入力コネクタとA/Dコンバータ間の全経路の振幅フラットネスと位相特性を補正します。この補正フィルタは、RTSAの機種によってリアルタイム・デジタル・ハードウェアまたはソフトウェア・ベースのDSPにより実行され、デジタル化したIQストリームに適用されます。

デジタル・ダウンコンバータ（DDC）

バンドパス信号を表す、一般的で計算上効率的な方法は、波形のベースバンド複素表記を使用することです。

RTSAは直交複素座標系を使用し、信号のI（同相）とQ（直交）のベースバンド成分のサンプル・データとして表します。この処理は、図2-4に示すようにDDC（デジタル・ダウンコンバータ）で実行します。

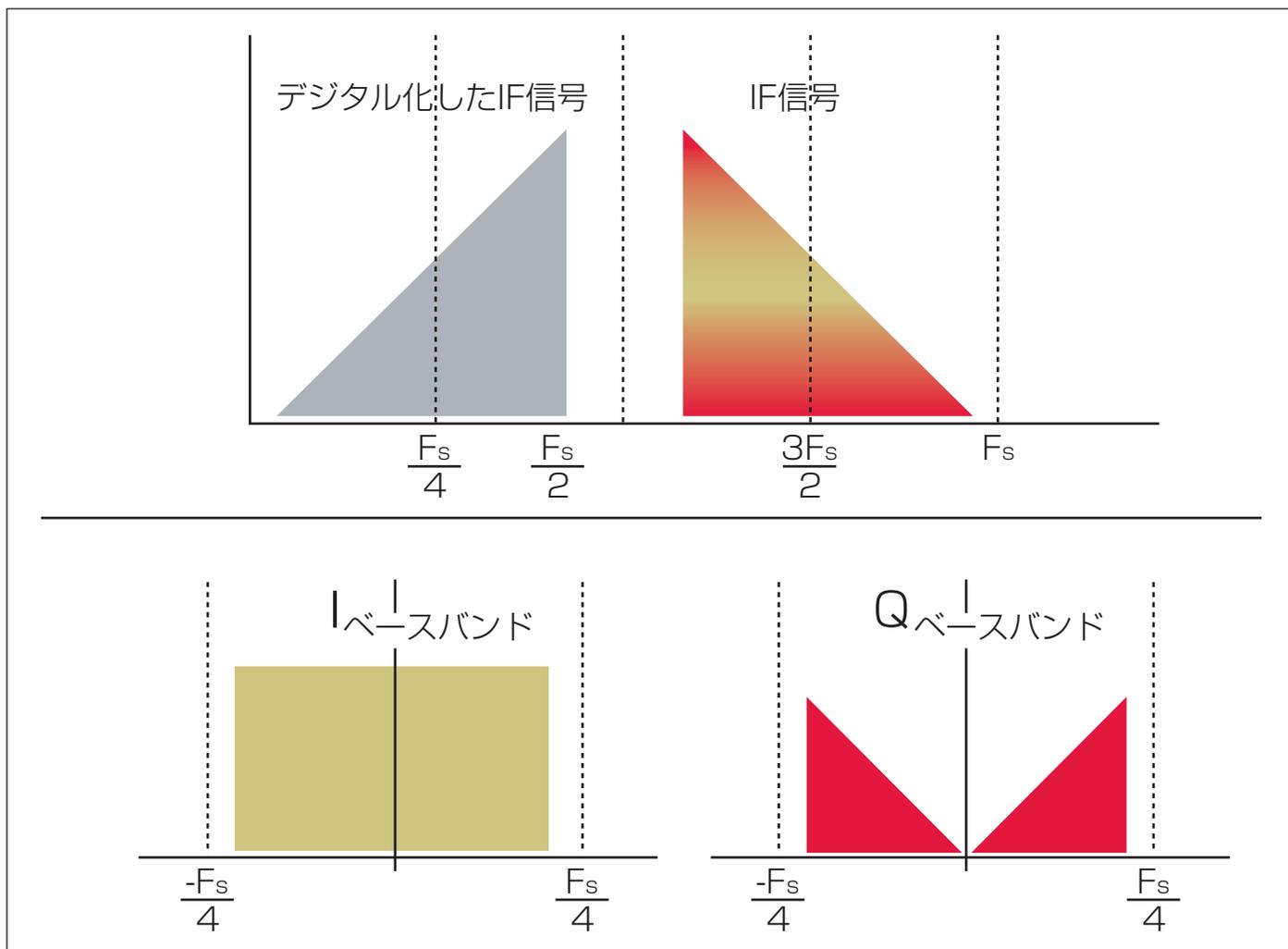


図2-5. パスバンド情報は、1/2のサンプル・レートでもIとQに含まれる

一般的にDDCの数値制御発信器は、測定対象バンドの中心周波数でサインとコサインを生成します。サインとコサインを、デジタル化したIF信号と数値的に乗算し、元のIFに存在するすべての情報を含んだIとQのベースバンド・サンプルのストリームを生成します。DDCでは、デジタル化したIF信号をベースバンドに変換し、また周波数同調の微調整も行います。

IQベースバンド信号

図2-5は、デジタル・ダウンコンバータを使用して、1つの周波数バンドをベースバンドに変換する処理を示しています。元のIF信号

は、サンプリング周波数の1/2と、サンプリング周波数の間に含まれています。サンプリングにより、サンプリング周波数のゼロ位置と1/2の間、この信号のイメージが生成されます。次に、この信号を、通過帯域の中心で位相がそろったサインおよびコサインの信号で乗算し、エイリアシング防止フィルタを通してIQベースバンド信号を生成します。このベースバンド信号は実数値で、原点に対して対称となり、正と負の周波数に同じ情報を含みます。元の通過帯域に含まれていた信号成分はすべて、これら2つの信号にも含まれています。各信号に最低限必要なサンプリング周波数は、これで元の半分になっています。次に2で割って信号を間引くことが可能です。

間引き処理

ナイキスト定理では、ベースバンド信号には、測定対象信号が持つ最高周波数の2倍のサンプリング・レートがあればよいと述べています。すなわち、バンドパス信号に対しては、少なくとも帯域幅の2倍のサンプリング・レートが必要です。測定帯域幅が最高帯域幅より低いときは、サンプリング・レートを遅くすることができます。サンプリング・レートの減少や間引き処理は、帯域幅、処理時間、レコード長あるいはメモリ使用量を軽減するために行います。当社のRSA6000シリーズでは、たとえば40MHzのスパン（取込帯域幅）をデジタル化するために、A/Dコンバータによる100MS/sのサンプリング・レートを使用します。DDC、フィルタリングおよび間引き処理によって得られたこの40MHzスパンに対するIとQのレコードは、元のサンプリング・レート半分のである50MS/sでのレコードです。サンプルの総数は変わりません。100MS/sでは1レコードでも、50MS/sの実効サンプリング・レートでは2レコードのサンプル・データが得られます。スパンがより狭い場合は

さらに間引き処理が行われ、同数のサンプルに対して、より長時間のサンプルの保存が可能です。ただし、実効サンプリング・レートが遅い場合の不利な点は、時間分解能が低下することです。反対に実効サンプリング・レートが遅いときの利点は、解析演算に必要な時間とメモリ使用量を減少できることです。

間引き処理フィルタ

間引き処理のときにもナイキスト定理に従うことが必要です。データ・レートが2の係数で減少すると、デジタル信号の帯域幅も2の係数で減少します。これは、エイリアシングを防止するため、サンプリング・レートを減少させる前にデジタル・フィルタで行われなければなりません。当社のRTSAでは、多種類の間引き処理を使用しています。各間引き処理は、デジタル・フィルタを通った後にサンプル数を減少させています。間引き処理とフィルタリングのその他の利点は、バンド幅の減少でノイズも減少できます。ノイズの減少は、処理利得（Processing Gain）とも呼ばれます。

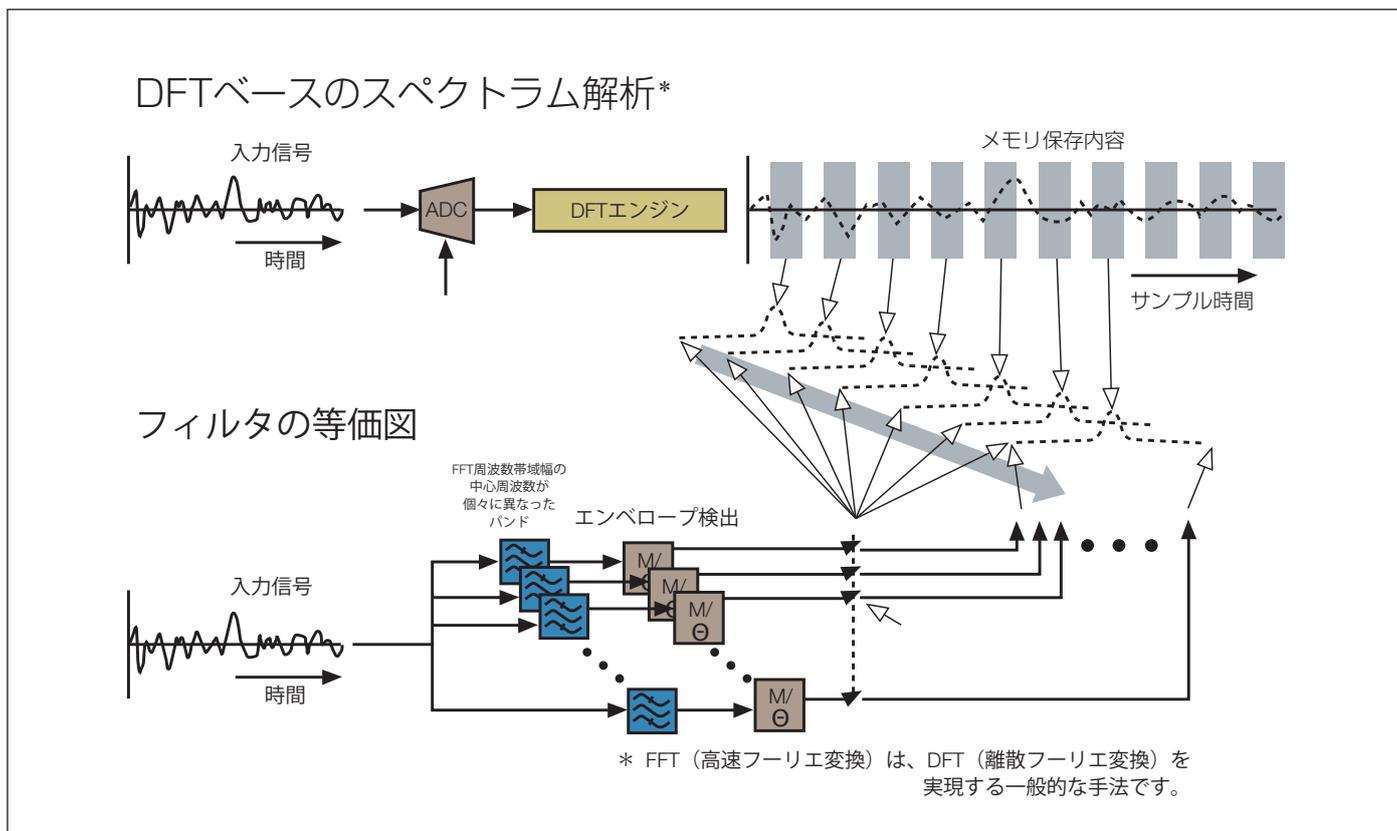


図2-6. DFTベースのスペクトラム・アナライザとバンドパス・フィルタ群を使用した等価図

時間領域波形から周波数領域波形への変換

フーリエ解析とも呼ばれるスペクトラム解析は、入力信号の各周波数成分を周波数ごとに分割します。一般的なスペクトラム・アナライザは、周波数に対する個々の周波数成分のレベルをプロットして表示します。プロットの開始周波数と終了周波数の差がスパンとな

ります。図2-6に示すように、DFTを繰り返して行うときは入力信号に追従して信号を処理するので、リアルタイムでスペクトラム解析を実行できます。フーリエ変換がリアルタイムの要求に完全には対応しない場合でも、周波数領域における間欠的なトランジェント・イベントの検出、取込みおよび解析に使用できます。

リアルタイム・スペクトラム解析

リアルタイムと定義できるスペクトラム解析では、測定対象となるスパンのすべての情報を取りこぼすことなく連続して処理しなければなりません。RTSAは、時間領域信号に含まれるすべての情報を取込んで、その信号を周波数領域信号に変換します。この動作をリアルタイムで行うには、次のような信号処理が必要となります。

- 測定対象となる信号の解析が行える十分な取込帯域幅
- 取込帯域幅に対するナイキスト定理を超える十分高速なA/Dコンバータのクロック・スピード
- 最も狭いRBW（分解能帯域幅）に対応する十分長い解析インターバル
- RBWのナイキスト定理を超える十分高速なDFT変換速度
- DFTフレームをオーバーラップするために必要なRBWのナイキスト定理を超えるDFT変換速度
 - ウィンドウ関数によるオーバーラップ量
 - ウィンドウ関数はRBWにより決定

現在のRTSAは、最高リアルタイム取込帯域幅までのスパンでFMT（周波数マスク・トリガ）が行えるので、上述の各項目の要求を満たすことができます。また、周波数領域のイベントでトリガをかけることができるので、設定した取込帯域幅に含まれるすべての情報が利用できます。

トランジェント・イベントの検出と取込み

高速なフーリエ変換におけるその他のアプリケーションとしては、周波数領域でまれにしか発生しないイベントの検出、取込みおよび観測があります。繰り返しのない単発イベントを100%の確率で取込むために必要な最小イベント幅は、重要な性能の一つです。最小イベントは、性能で規定された精度で100%の確率で取込むことができる最も狭い方形波パルスとして定義されます。さらに狭いイベントも検出できますが、精度と確率が低下します。トランジェント・イベントを検出し、取込んで解析するために必要な項目を以下に示します。

- 測定対象となる信号の解析が行える十分な取込帯域幅
- 取込帯域幅のナイキスト定理を超える十分高速なA/Dコンバータのクロック・スピード
- 最も狭いRBW（分解能帯域幅）に対応する十分長い解析インターバル
- 最小イベントを取込んで解析できる十分高速なDFT変換速度

毎秒292,000回以上のスペクトラム測定が行えるRSA6000シリーズのDPXスペクトラム・モードでは、性能で規定された精度および100%の確率で10.3 μ sまでの狭いRFパルスを検出できます。毎秒50回の掃引ができる掃引型SAでも、性能で規定された精度および100%の確率で検出するには少なくとも20ms以上のパルス幅が必要です。

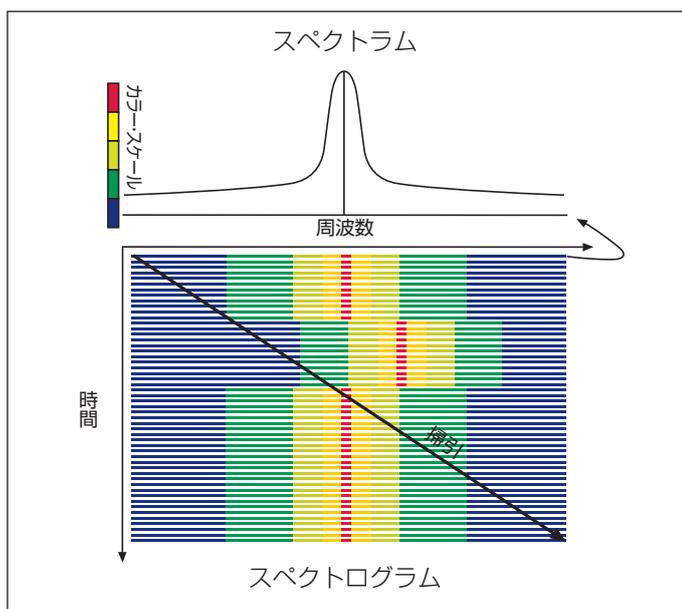


図2-7. スペクトラム、スペクトログラムおよび掃引

リアルタイム・スペクトラム・アナライザと掃引型スペクトラム・アナライザ

前のページで説明したように、RTSAはいくつもの優れた機能を持っています。測定対象となる通過帯域の信号は、IF信号に変換されデジタル化するためダウンコンバートされます。時間領域でサンプルされた信号は、I (同相) とQ (直交) のサンプル・シーケンスで構成されるベースバンド・レコードにデジタル的に変換されます。図2-6 (16ページ) に示すように、DFTはIQレコードの各セグメントを順次演算し、数学的に表された周波数に変換します。

連続的に等しく配列されたDFTの動作は、入力信号をバンドパス・フィルタ群を通したことと数学的に等しくなります。その後、各フィルタの出力で振幅と位相をサンプルします。周波数領域で時間

とともに変化する信号の動作は、図2-7に示すようにスペクトログラムとして観測できます。スペクトログラムでは、周波数は水平方向に、時間は垂直方向にプロットされ、振幅は色別で表されます。リアルタイムDFTでは、新しいスペクトラムを計算する速度で入力信号の全スペクトラムを効率的にサンプルします。FFTが動作している時間セグメント間に発生したイベントは、検出することはできません。RTSAは、ハードウェア・ベースのDFT動作によりデッド・タイムを最小にするか取り除くことができ、また最高サンプリング・レートでは時間セグメントをオーバーラップするように変換できます。

反対に掃引型SAは、ある特定の時間には一つの周波数にしか同調できません。図2-7に示すように、斜線の方向に掃引が行われ周波数変化します。斜線は掃引が遅くなるにつれて急角度になり、SAのゼロスパンで単一周波数に同調したときは、垂直方向の直線として表示されます。図2-7はまた、シングル周波数ホッピングのようなトランジェント・イベントを一掃引では検出できないことを示しています。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザのRBW

周波数分解能はスペクトラム・アナライザにとって重要な性能の一つです。隣接周波数の信号を測定するときは、その信号を識別できるかどうかは周波数分解能で決まり、その周波数分解能がスペクトラム・アナライザの性能を決定します。従来のSAでは、IFフィルタ帯域幅あるいはRBW (分解能帯域幅) と呼ばれる性能が、隣接した信号の識別能力を決定していました。たとえば、振幅が同じで周波数が100kHzしか離れていない信号を識別するためには、100kHz以下のRBWが必要となります。

DFT技術を使用したSAでは、RBWはアキュイジション時間に反比例します。同じサンプリング周波数でRBWを小さくするためには、より多くのサンプル数が必要です。ウィンドウもまたRBWに影響を与えます。

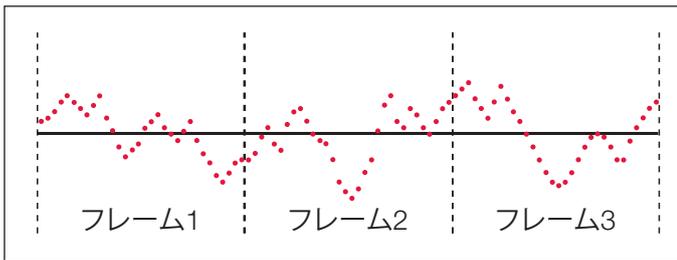


図2-8. サンプルした時間領域の3つのフレーム

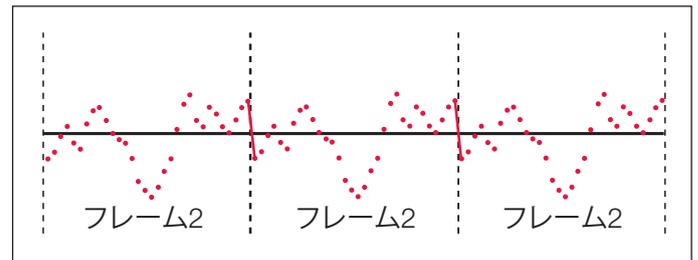


図2-9. 1つのフレームを繰り返して拡張することにより発生する不連続

ウィンドウ

DFT（離散フーリエ変換）解析の数学的な背景には、処理するデータは周期的な繰返し信号の1期間であるという前提があります。図2-8に、一連の時間領域サンプルを示します。たとえば、DFT処理を図2-8のフレーム2に適用する場合、繰り返し拡張を信号に実行します。フレームを継続したフレーム間では、図2-9に示されているように通常、不連続が発生します。

この不連続により、元の信号にはない人工的なスペクトラムが発生します。この現象をスペクトル・リークと呼び、信号の測定が不正確になります。スペクトル・リークは、入力していない信号を出力してしまうばかりでなく、大きな信号に隣接した小さな信号の検出を難しくします。

当社のRTSAでは、ウィンドウ技術を使用してスペクトル・リークの影響を軽減しています。DFT処理を実行する前に、DFTフレームにサンプルごとの同じ長さのウィンドウ関数を掛け合わせます。通常、ベルの形をしたウィンドウ関数により、DFTフレームの最後の不連続を減少あるいは取り除くことができます。

どのウィンドウ関数を選ぶかは、サイドローブ・レベル、等価ノイズ帯域幅および振幅エラーなどの周波数応答特性によって変わります。ウィンドウの形状は、RBWフィルタの有効性にも影響します。

他のSAと同じように、RTSAでもRBWフィルタを選択することができます。RTSAはまた、一般的に使用されている多くのウィンドウ関数の中からも選んで使用できます。直接ウィンドウの形状が規定できれば、特殊な測定を行う際には便利です。たとえば、パルス信号のスペクトラム解析には特別の注意が必要です。ウィンドウ長よりパルス幅が短いときは、DFTフレームの両端に現れるディエンファシスの影響を避けるため、ユニフォーム・ウィンドウ（ウィンドウなし）を使用します。アキュジション、信号処理、ウィンドウ効果に関連するオーバーラップ処理の重要性、およびリアルタイム処理の必要性についてのより詳細な情報は、当社アプリケーション・ノート「リアルタイム・スペクトラム・アナライザのFFTオーバーラップ処理について」をご参照ください。

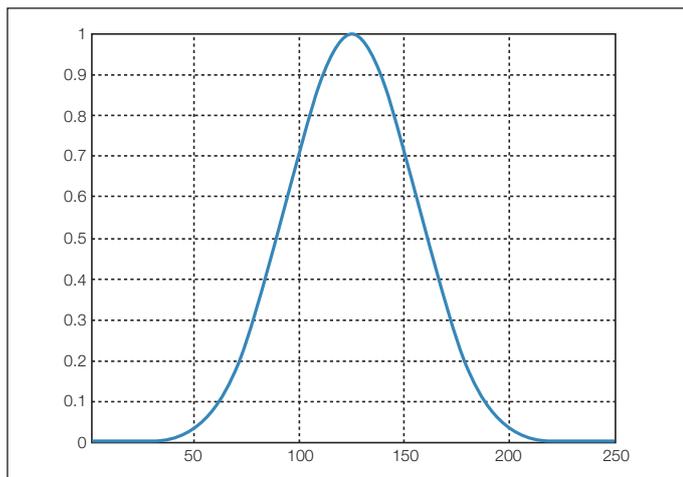


図2-10. カイザ・ウィンドウ（ベータ16.7）の時間領域表示、水平軸は時間サンプルで垂直軸はリニア・スケール

ウィンドウ関数の周波数応答の振幅が、RBWの形状を決定します。たとえばRSA6000シリーズのRBWは、3dB帯域幅として定義され、また次のようにサンプリング周波数とDFTのサンプルに関連付けられます。

$$RBW = \frac{k \times F_s}{N} \quad \text{式1}$$

または

$$N = \frac{k \times F_s}{RBW} \quad \text{式2}$$

Kはウィンドウに関連した係数、NはDFT演算で使用する時間領域のサンプル数、 F_s はサンプリング周波数です。ベータ16.7のカイザ・ウィンドウでは、kはおよそ2.23になります。RBWのシェープ・ファクタは、60dBと3dBのスペクトラム振幅間の周波数比で定義します。RSA6000シリーズのスペクトラム解析測定では、DFTに必要なサンプル数は、入カスパンとRBWの設定に基づいて式2を使用して計算します。

RSA6000シリーズで使用しているカイザ・ウィンドウの時間領域表示とスペクトラム表示を、図2-10と図2-11に示します。このウィンドウは、RSA6000シリーズのスペクトラム解析用の標準ウィンドウです。ブラックマン・ハリス、ユニフォームあるいはハニングなどのウィンドウも選択でき、特殊な測定やその他の測定要求に対応するときに使用します。

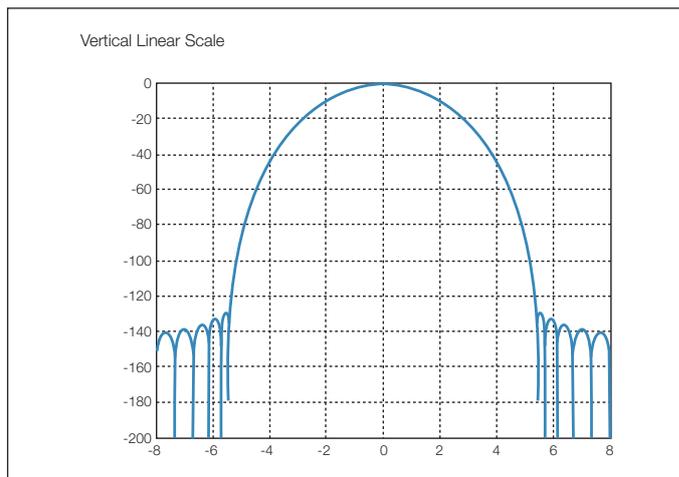


図2-11. カイザ・ウィンドウ（ベータ16.7）のスペクトラム表示、水平軸は周波数ビン（ F_s/N ）で垂直軸はdB

リアルタイム・スペクトラム・アナライザのDFT （離散フーリエ変換）

DFTは次の式で定義されます。

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

これは、リアルタイム・スペクトラム・アナライザの基本となる式で、入力シーケンス $x(n)$ から個々の周波数成分 $x(k)$ を求めるために使用します。DFTはブロックを基本とし、Nは各ブロックあるいは各フレームのサンプル数の合計です。入力シーケンス $x(n)$ は、入力信号 $x(t)$ をサンプルしたものです。入力シーケンスはnの整数で定義しますが、出力はkの連続した関数となり、 $k = (N\omega) / (2\pi)$ で表し、 ω は角周波数です。X[k]の振幅は、入力シーケンス $x(n)$ の周波数 ω における周波数成分の振幅を表します。

DFT演算を行うには、FFT（高速フーリエ変換）やCZT（チャープZ変換）など、いろいろな効率的手法があります。実際にどの手法を選択するかは、アプリケーションの測定要求によって変わってきます。たとえばCZTでは、FFTに比較して周波数範囲と出力ポイント数の選択が広範囲に行えます。FFTでは、適応性が少ない代わりに演算が少なく済みます。RTSAでは、CZTとFFTの両方とも使用しています。

[参照1] Oppenheim, A.V., R.W Schaferによる「Discrete-time Signal Processing, Prentice-Hall」 1989年、453ページ

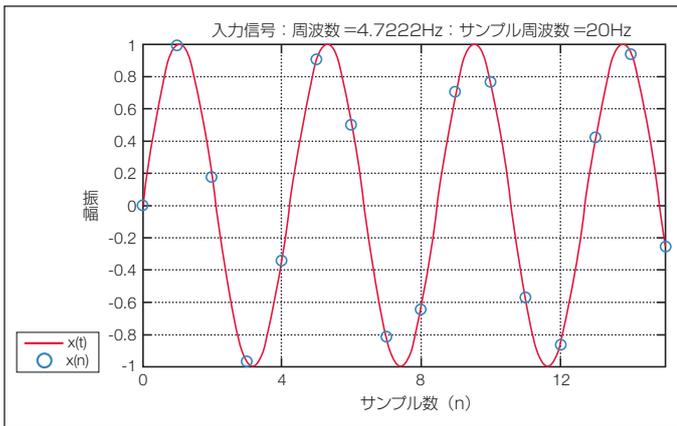


図2-12. 入力信号

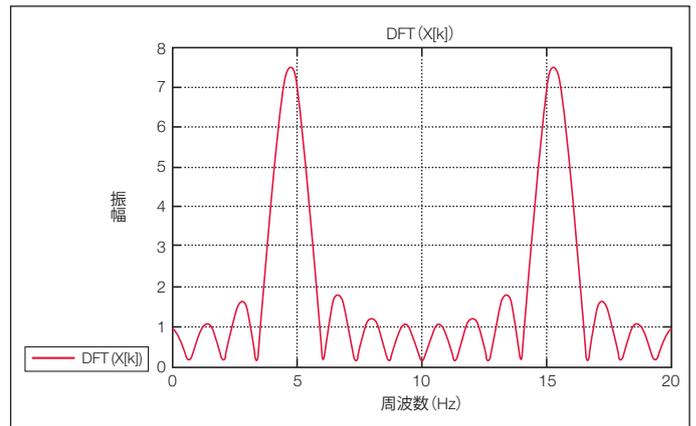


図2-13. 連続して演算されたx(n) のDFT

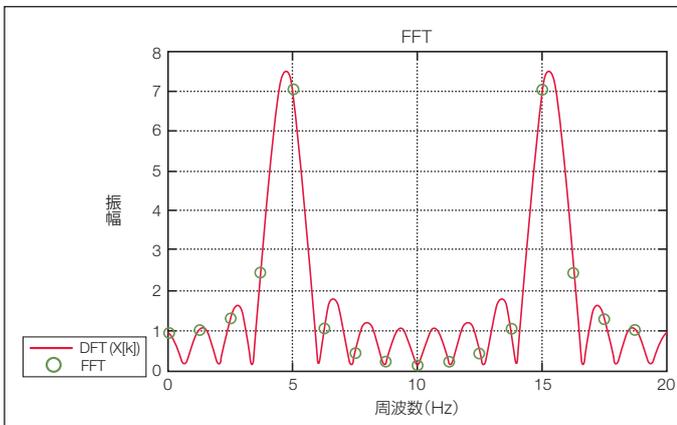


図2-14. x(n) のFFT、FFT長=N=x(n) 長

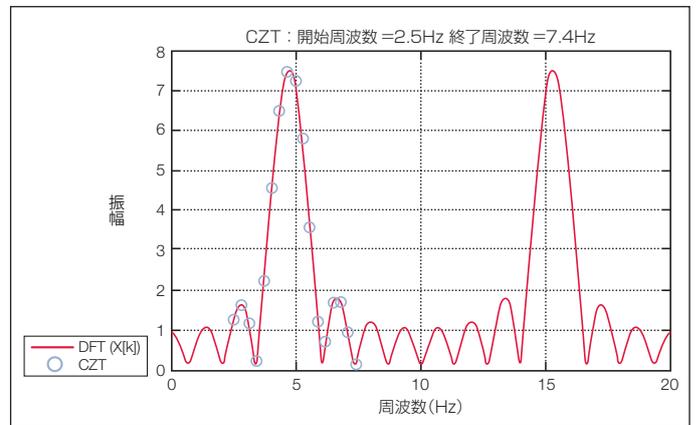


図2-15. x(n) のCZT

周波数成分に分解する性能は、DFTの演算手法には影響されずに、入力シーケンスの長さあるいはRBWによって決定されます。

FFTとCZTに対するDFTとの関連性を表すために、サンプルしたCW（連続正弦波）信号を解析してみます。図で表示するため、実数値の正弦波x(t)を入力信号として使用します（図2-12参照）。入力信号X(t)をサンプルしたものがx(n)となります。この場合はN=16で、サンプリング・レートは20Hzです。

図2-13は $0 \leq k < N$ におけるDFTの演算結果を示しています。 $\Omega > \pi$ ($f > 10\text{Hz}$)における $X[k]$ の振幅は、最初の半分のミラー・イメージです。これが実数値の入力シーケンスx(n)の演算結果です。実際の入力信号を解析するときには、 $\pi < \Omega < 2\pi$ の結果は不要となるか、あるいは演算されません。複雑な入力信号に対しては、 $0 \leq \Omega < 2\pi$ ($0 \leq f < 20\text{Hz}$)で結果が求められます。

FFTでは、N個の等間隔に配置された、 $X[k]$ の周波数領域サンプルが得られます。 $X[k]$ の振幅を図2-14に示していますが、FFTに

よって得られたサンプルは、 $X[k]$ の振幅のピークをサンプルしていないことがあるので注意が必要です。

CZTでは任意の開始と終了の周波数間で、M個の周波数領域サンプルが得られます（図2-15参照）。CZTは、波形として表示されているDFTの周波数領域出力を変更することはありません。CZTとFFTとの違いは、異なった周波数領域のデータ・サンプルを使っていることです。

CZTを使用する利点は、周波数領域の最初と最後のサンプル周波数が任意に選択でき、また入力サンプリング・レートに影響されないことです。FFTの入力サンプリング・レートを任意に設定することにより、FFTの出力はCZTと同じサンプル出力となります。最終的には両方とも同じになります。どちらを選ぶかは、測定方法、測定要求および入手可能な計測器によって変わりますが、最適なソリューションを選ぶことが重要です。

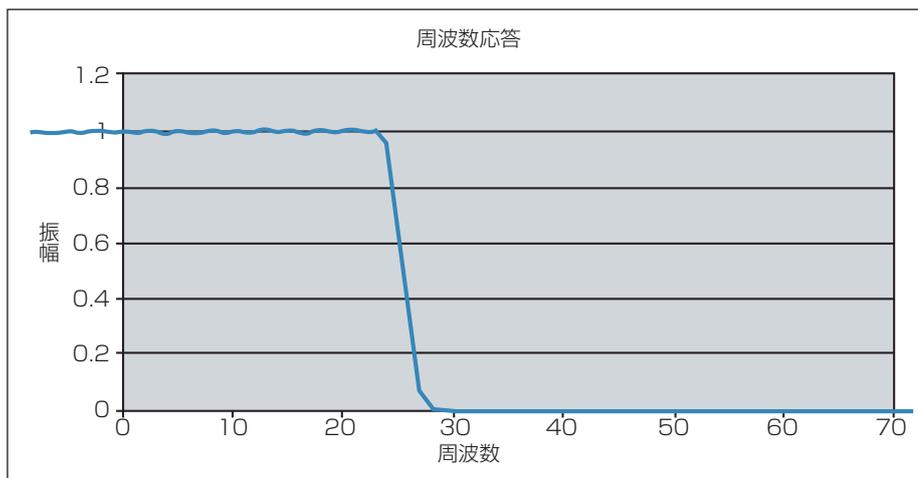


図2-16. ローパス・フィルタの周波数応答

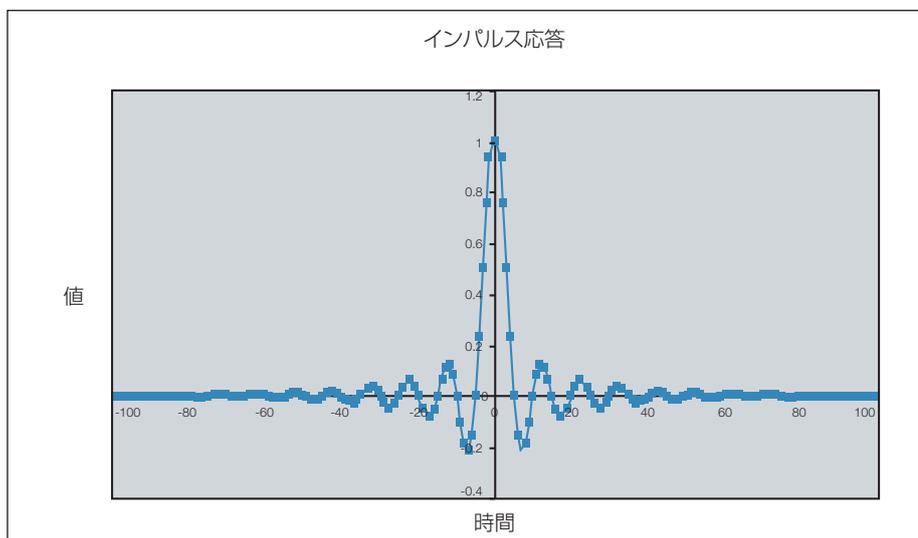


図2-17. 図2-15のローパス・フィルタのインパルス応答

デジタル・フィルタ

FIR (有限インパルス応答) フィルタ

周波数フィルタは、周波数を選択するかあるいは除去する目的で、多くのアプリケーションで使用されます。従来のフィルタはアナログ回路素子 (RLC) で構成していましたが、現在ではDSPによる

演算で、周波数成分の増幅や減衰が選択できるようになっています。一般的な演算手法としては、FIR (有限インパルス応答) フィルタがあります。RTSAは、FIRフィルタの機能を拡張して使用しています。通常の信号処理アプリケーションでは、特定の周波数バンドを通過させるか、あるいは除去するときにFIRフィルタを使用しますが、アナログ信号経路での劣化を調整するときにもFIRフィルタを使用します。FIRフィルタは、工場での保存校正データとフィルタ内部で生成したアライメント・データとを組み合わせで校正され、アナログとデジタルが混在した信号経路で、平坦な振幅特性とリニアな位相特性が得られるよう、アナログ信号経路の周波数応答を補正する応答特性を持っています。

周波数応答とインパルス応答

フーリエ変換の理論では、周波数領域と時間領域は等価であると述べられています。さらに、周波数領域でデバイスの振幅と位相の応答特性として表すことができる伝達関数は、時間領域でのそのインパルス応答と等価であるとも言えます。FIRフィルタは、フィルタが持つ伝達関数のインパルス応答をエミュレーションします。伝達関数は、有限の時間幅を持った離散時間近似値で表します。次に、フィルタのインパルス応答で、入力信号の畳み込みにより信号のフィルタリングを行います。

図2-16はローパス・フィルタの伝達関数の振幅を示し、図2-17はそのインパルス応答を示しています。

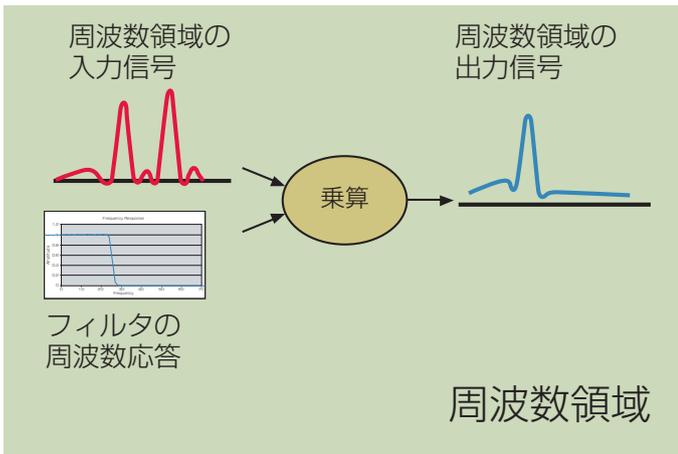


図2-18. フィルタとその周波数応答との乗算

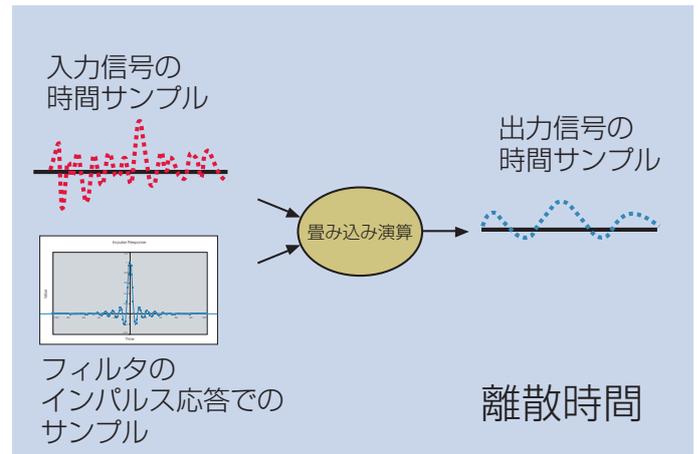


図2-19. 時間領域での畳み込みは周波数領域の乗算に等しくなる

畳み込み (コンボリューション)

周波数領域は、フィルタなどのリニアなシステムの応答特性を解析するときによく使用します。信号は、周波数成分として表します。フィルタ出力での信号スペクトラムは、入力信号スペクトラムをフィルタの周波数応答で乗算することにより計算できます。図2-18は、周波数領域における動作を示しています。

フーリエ変換理論では、周波数領域での乗算は時間領域での畳み込みと等価であると述べています。図2-18に示す周波数領域での乗算は、図2-19で示すインパルス応答を持ったフィルタと、入力信号の時間領域での畳み込みに等しくなります。

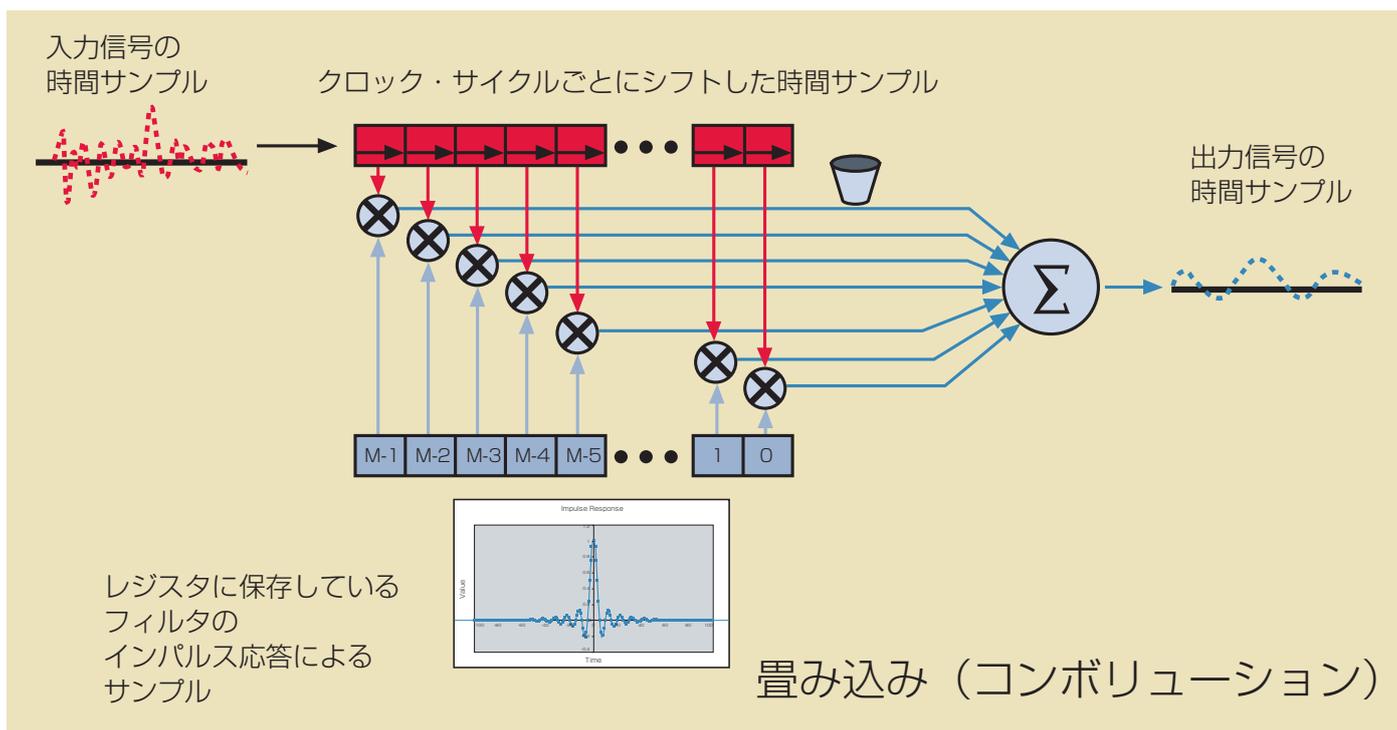


図2-20. 離散時間畳み込み

周波数フィルタはすべて、メモリ素子を使用しています。アナログ・フィルタで使用しているコンデンサやインダクタなどのリアクタンス素子は、メモリ機能を持っています。それは時間的に前のポイントの入力と同じように、回路の出力は時間的には前の電流入力に依存しているからです。離散時間フィルタは、図2-20に示すように実際のメモリ素子で構成されています。

下位のレジスタは、右側の時間的に前のサンプルと、左側の後のサンプルを持ったフィルタのインパルス応答を保存します。上位レジスタは、入力信号をクロック・サイクルごとに1クロックずつ左から右にシフトさせるために使用します。各々対応するレジスタの内容をまとめて乗算し、乗算したすべての結果をクロック・サイクルごとに合計します。合計した結果が、フィルタを通った信号となります。

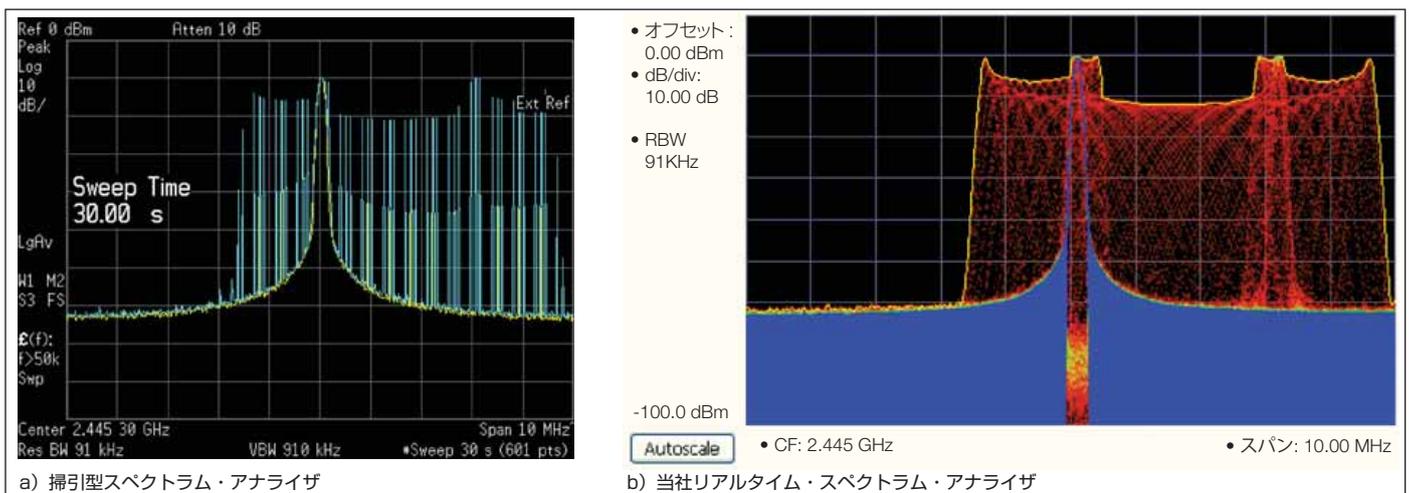


図2-21. a) 掃引型スペクトラム・アナライザによる120秒後のマックスホールド・トレースと、b) 当社リアルタイム・スペクトラム・アナライザによる20秒後のDPXヒットマップ・マックスホールド・トレースの比較

このようにRTSAは、デジタル信号処理によってほとんどのスペクトラム解析を実行しています。以下の項目がRTSAで使用しているDSPの主な特徴です。

- RSA6000シリーズは、スペクトラム表示するためにFFTとCZTを併用しています。
 - FFTでは、効率的な演算により高速な変換速度が得られ、またCZTではより適応性が広く、固定の入力サンプル数のフレームで可変RBW（分解能帯域幅）が得られます。
 - RBWの形状は、フーリエ変換を実行する前に、時間領域の信号に最適なウィンドウ関数を適用することにより決められます。RBWはアナログの帯域幅と同じように、3dB帯域幅とシェープ・ファクタ（60dB：3dB）で規定します。デジタル的に構成したフィルタのシェープ・ファクタは、アナログのフィルタに比べて一般的に小さく（急峻に）なっているので、振幅差が大きく隣接した信号の識別が可能な分解能が得られます。
- その他のシェープ・ファクタは、ウィンドウ関数を最適化して応用するような特殊なアプリケーションに使用します。

RSA3000Bシリーズでは、以下項目を組み合わせることでスペクトラム解析を実行しています。

- スペクトラム・モードでは、アナログ式SAと同じように、ウィンドウ化したFFTの結果と、RBWのシェープ・ファクタとの畳み込みを行い、設定したRBWのスペクトラム・トレースを得ています。この処理では、RSA6000シリーズの4.1：1に比較してわずかに広い、約5：1のシェープ・ファクタが得られます。

- DPXモードでは、分解能帯域幅に柔軟性を持たせるためにCZTを使用します。
- RTSAモードでは、従来のFFT解析方式、すなわちノイズ帯域幅で規定したウィンドウFFTを使用しています。ノイズ帯域幅は、RBWよりも約6%（0.25dB）広くなります。

このセクションで説明したように、RTSAに必要な高速変換レートを実現するには、デジタル的な補正とフィルタ機能が重要となります。次のセクションでは、RTSAのユニークな表示機能であるデジタル・フォスファ・スペクトラム表示機能により、このフィルタが実際に動作している状態を観測します。

DPX®技術：信号検出の画期的ツール

当社特許のDPX（デジタル・フォスファ）技術により、従来のスペクトラム・アナライザやVSA（図2-21）では見落としていた信号が検出でき、信号の詳細を観測できます。実際のRF信号を生々の動画のように表現するDPXライブ・スペクトラム表示により、今まで観測できなかった信号を瞬時に表示できるので、問題の発見と診断に要する時間を大幅に短縮できます。DPXは、当社RTSAのすべての機種に標準で装備されている機能です。

デジタル・フォスファ表示

「デジタル・フォスファ」という言葉は、テレビ、コンピュータ・ディスプレイ、テスト機器などで使用しているブラウン管（CRT）の内側にコーティングされている蛍光体（フォスファ）に由来しています。ブラウン管内の電子ビームは、入力波形で直接制御します。電子ビームが蛍光体に衝突すると発光し、電子ビームが通過した軌跡が明るく光ります。

奥行きが短く、低消費電力などの特長により、従来のCRTは多くのアプリケーションでLCD（液晶ディスプレイ）に置き換えられつつあります。しかし、CRTの蛍光体コーティングとベクタによる描画の組み合わせには、いくつかの利点があります。

パーシスタンス：電子ビームが通過した後も蛍光体は発光を持続します。一般に、蛍光体の発光は短時間に消えてしまうので、残光していることに気づきません。しかし、残光が短過ぎて見ることができない場合でも、多少のパーシスタンス（残光）があれば、人間の目はイベントとして検出することができます。

頻度：電子ビームが蛍光面を通過する速度が遅いほど明るく表示され、電子ビームが頻繁に当たる部分も明るく表示されます。このZ軸（輝度）情報は、肉眼で直感的に識別できます。すなわち、波形の明るい部分は頻繁に発生するイベントか、あるいは電子ビームがゆっくりと移動しているときで、また暗い波形は発生頻度が少ないか、または電子ビームが高速に移動しているときであることがわかります。DPX表示では、色彩と輝度によってこのZ軸情報を表します。

パーシスタンスと頻度は、信号をデジタル化しLCDで表示する機器にとっては、本来関係のないものでした。当社が開発したデジタル・フォスファ技術は、可変パーシスタンスCRTが持つアナログの利点をさらに改善して、最高性能のオシロスコープとRTSAに装備されています。輝度階調、選択可能なカラー・スキーム、統計的な波形表示など、デジタル化のもたらす機能強化により、より多くの情報を短時間に処理することができます。

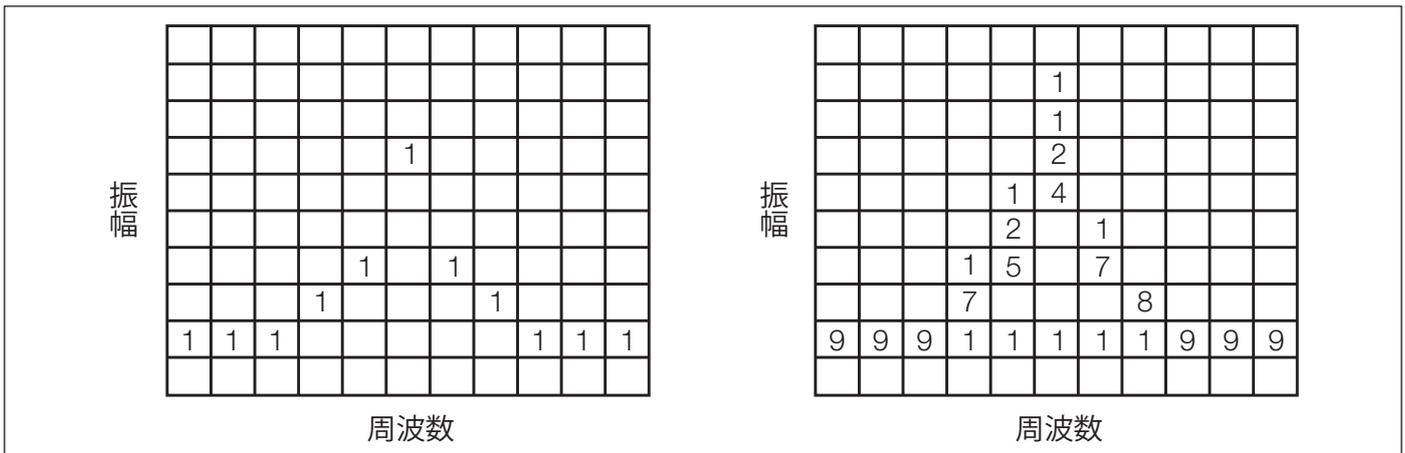


図2-22. 左図は1回目、右図は9回目までの3次元ビットマップ・データベース表示例。各列の合計ヒット数は同じになる

DPX表示エンジン

DPXによる毎秒数千回のスペクトラム測定を1画面に圧縮して、生の動画のように見える速度で更新するというのが、RTSAのDPX技術の機能を極端に簡略化した表現です。毎秒数千回の取込みを実行し、スペクトラムに変換します。間欠的に発生するイベントの検出には、この高速な変換レートが重要となります。しかし、液晶表示ではあまりにも高速で対応できず、肉眼でも認識できません。そこで、取込んだスペクトラムを高速でビットマップのデータベースに書き込み、その後、観測可能なレートで画面に転送します。ビットマップ・データベースは、波形の振幅を表す行と、周波数軸のポイントを表す列にスペクトラム・グラフを分解し、頻度データを持ったグリッドとして表示します。グリッドの各セルには、入力するスペクトラムによってヒットする回数を記録します。このヒット回数をカウントすることでデジタル・フォスファの頻度測定を行うため、通常の信号やバックグラウンド・ノイズと、まれにしか発生しないトランジェント信号を区別することができます。

RTSAの実際の三次元データベースは、数百の列と行で構成されていますが、ここでは便宜上、11×10の配列を使用しながら、データベースの動作について説明します。図2-22の左図は、1回目のスペクトラムがデータベースのセルにデータとしてマッピングされた様子を示しています。空白のセルにはゼロの値が入っており、これはスペクトラムのデータがまだヒットしていないことを意味します。

発生回数	カラー
0	黒
1	青
2	水色
3	シアン
4	青緑
5	緑
6	黄
7	橙
8	赤橙
9	赤

図2-22. カラーマッピング・アルゴリズム例

右図は、さらに8回のスペクトラム変換を実行した後、簡易データベースのセルに記録した値を示しています。9回のスペクトラム変換のなかで、1回は信号がないときに計算されていますが、これはノイズ・フロアの連続した"1"の値から判断することができます。発生回数をカラー・スケールにマッピングすると、記録したデータは直感的なビジュアル情報になります。この例で使用するカラーマッピング・アルゴリズムを、図2-23に示します。暖色系の色（赤、オレンジ、黄）は、発生頻度が高いことを示しています。同様に輝度諧調表示も使用されます。

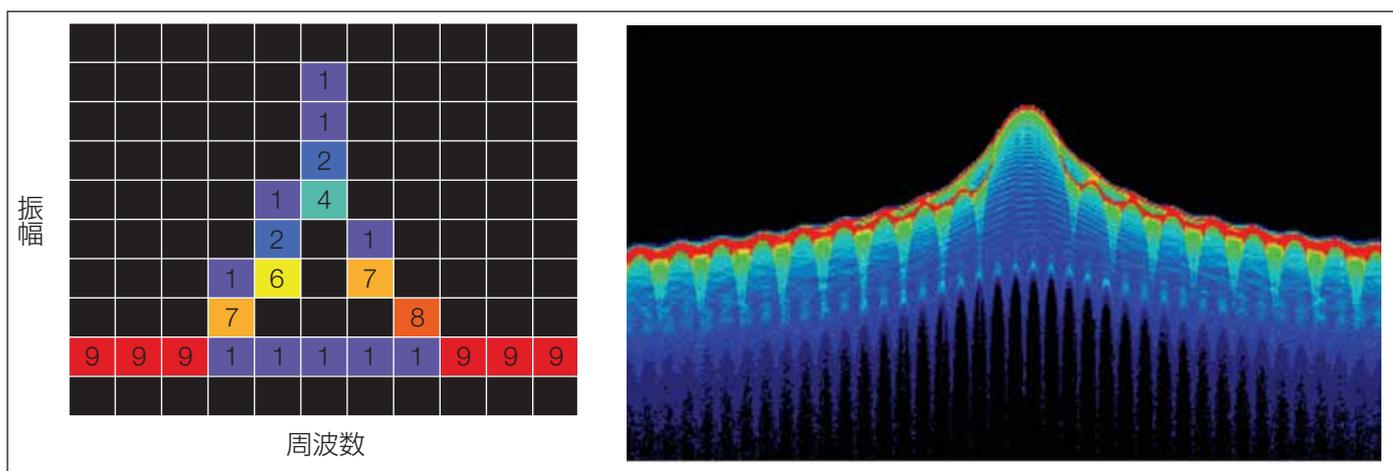


図2-24. 簡易データベースのカラー・コーディングによる色温度ビットマップ表示例（左図）と、スペクトラム・ビットマップによる実際のDPX表示（右図）

図2-24の左図は、9回のスペクトラム変換によってデータベースのセルに書き込んだ回数を、カラー・スケールで表した例です。この右図にあるように、画面のピクセルごとに色分けしたセルを対応させることで、優れたDPX表示を実現しています。

パーシスタンス

たとえばRSA6000シリーズでは、毎秒292,000回を超えるスペクトラムをデータベースに入力します。14,600回あまりの入力スペクトラム（毎秒およそ20回）の各フレームの終わりで、ビットマップ・データベースは、表示前の必要な処理のために転送されます。次に、再び新しいフレームのデータがビットマップに入力されます。

DPXエンジンでパーシスタンスを実現するため、新しいフレームの開始時にビットマップのデータベースのカウントをクリアするのではなく、既存のカウントを残したまま新しいスペクトラムを追加します。フレームのすべてのカウント値を加えていくときは、“無限

パーシスタンス”となります。書き込んだカウントの一部を次のフレームに持ち越すのが“可変パーシスタンス”になります。持ち越す数を調整することで、データベースから信号イベントが徐々に消えて、完全になくなるまでの時間を設定できます。

DPXが動作しているときに、1回だけしか発生しない信号について考えてみます。さらに、この信号は1つのフレームの14,600回のスペクトラムすべてに存在し、可変パーシスタンスにより、各フレームの後25%減衰するとします。影響を受けるセルは14,600の値でスタートします。1フレーム後、発生回数は10,950になります。次のフレームでは8,212になり、完全に見えなくなるまでこの値は小さくなります。画面上では、最初は信号周波数における明るいスパイク波形として表示されます。そして、信号が発生した部分は徐々に消えていきます。この間、消えて行く信号よりも低いノイズ・レベルのピクセルは明るくなり始めます。最後に、ベースラインだけが表示されます（次ページの図2-25参照）。

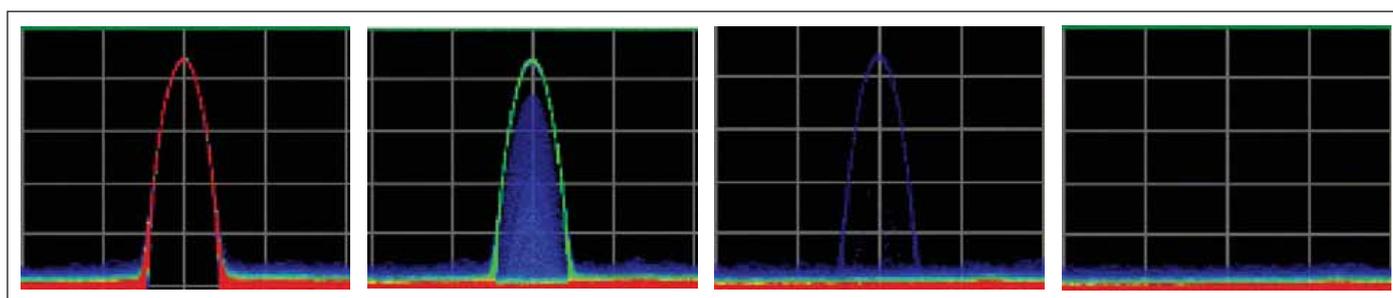


図2-25. 可変パーシスタンス表示により、DPXによって取込んだ短時間のCW信号は、設定した時間消えずに残る

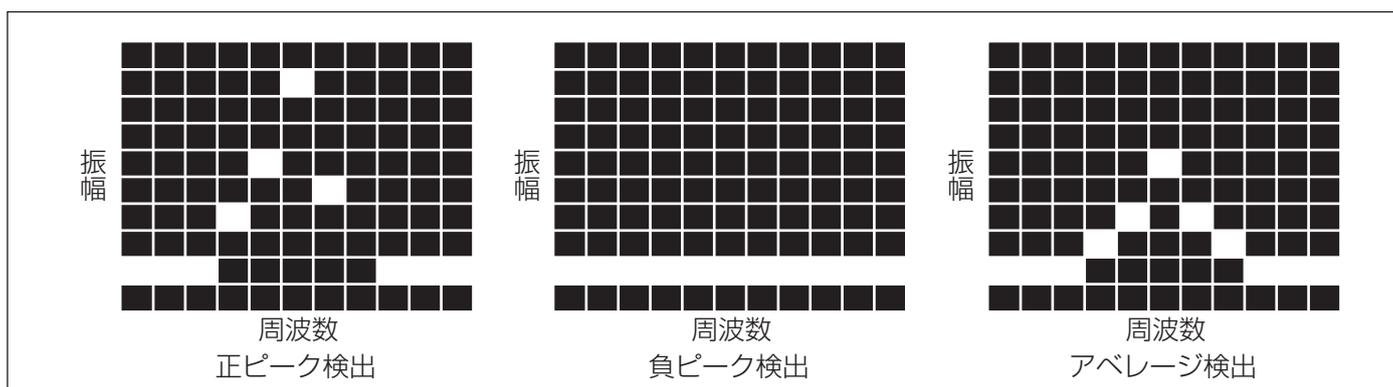


図2-26. 検出波形例、正ピーク検出（左図）、負ピーク検出（中央図）、アベレージ検出（右図）

パーシスタンス機能は、マックスホールドの持つすべての特長と、それ以外の機能も持った非常に優れたトラブルシューティング・ツールです。間欠的な信号や、まれにしか発生しない周波数またはは振幅のシフトを検出する場合は、まずRTSAを無限パーシスタンスに設定して放置しておきます。しばらくすると、各周波数ポイントの最も高いレベルだけでなく、低いレベルやその間のレベルも表示されます。信号トランジェントや障害となる信号の存在が確認できたならば、可変パーシスタンスに設定して問題の詳細を観測します。

統計的な波形表示

DPXスペクトラム表示では、カラーによるビットマップ波形を表示でき、また統計的な波形表示も可能です。データベースには、各周波数の列に記録した最大値、最小値、平均値の振幅値が保存されています。この値を使った検出機能が、正ピーク、負ピーク、平均です（図2-26参照）。

正ピークと負ピーク波形では、信号の最大値と最小値を瞬時に表示します。平均検出では、各周波数ポイントにおける信号の平均値を検出します。これらの波形はリファレンス波形として保存し、呼び出すことができます。

通常のSAIによる波形表示のように、DPXの波形表示でもマックスホールド、ミニマムホールド、アベレージ波形のような蓄積機能があります。DPXの正ピーク波形は、通常のSAのマックスホールド波形とほぼ同等機能ですが、大きな違いはDPXの波形更新レートがきわめて高速であるという点です。

DPX変換エンジン

それでは、これらのスペクトラムはどのようにして生成されるのでしょうか。DPXエンジンでは、ソフトウェアによるパッチ処理と並列に、同じIQデータ・ストリームを使用した連続したリアルタイム信号処理用に、ハードウェア・ベースの計算エンジンを装備しています。このサブシステムは、パワー・レベル・トリガ、周波数マスク・トリガなど、時間が重要な要素となる機能をサポートします。また、DFT（離散フーリエ変換）を高速に実行し、DPX表示システムで使用する毎秒292,000回以上のスペクトラムを生成します。

DPX Density測定

密度は、設定した測定期間内で、DPXスペクトラム・ビットマップの特定エリアに信号が存在する時間を測定して求められます。クリーンな連続正弦波の密度は100%になり、1msごとに1μsオンになるパルスの密度は0.1%になります。

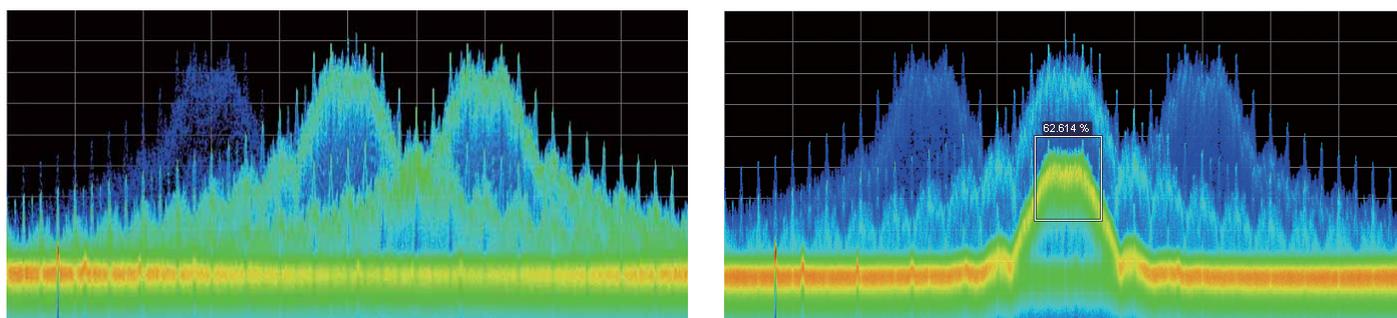


図2-27. Densityトリガの例。左図：フリーランのDPXスペクトラム表示では、周波数が変化しているパルスが表示されている。時折、幅の狭いパルスが発生しているようだが、Run/Stopボタンの操作だけでは捉えることが難しい。右図：トリガのかかったDPX表示では、トリガされていない表示では見つからない低振幅のパルスが表示されている。ユーザ定義のボックスで測定された平均密度が50%を超えた場合にトリガするように設定されている

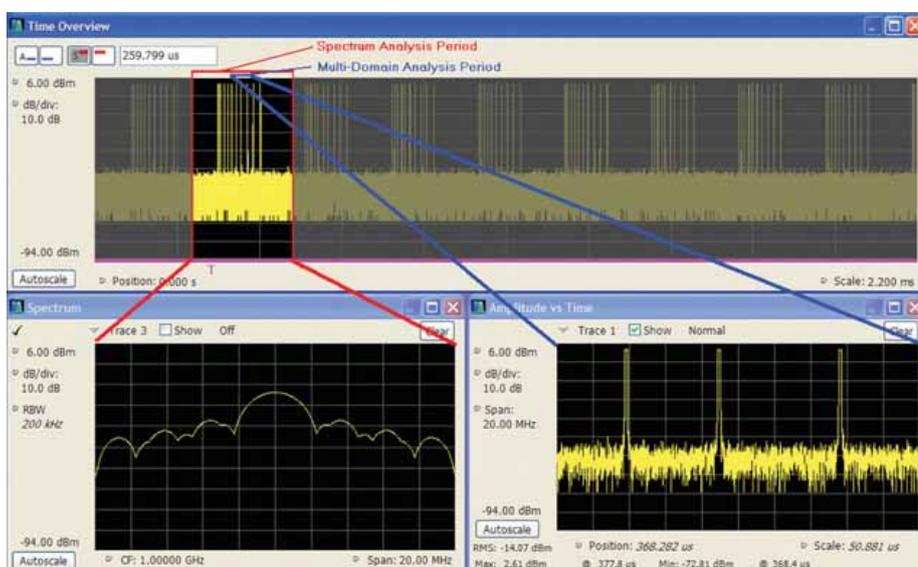


図2-28. RSA6000シリーズの時間オーバービューでのスペクトラム長と、マルチドメイン解析長の設定例

タイミングとトリガ

リアルタイム処理によるDPX表示を備えたRTSAは、検出ツールとして最適です。DPX Densityトリガにより、測定信号の特性がまったく分からない場合でも、正確な振幅 — 周波数範囲内で信号が識別できます。当社特許のDPX技術の拡張機能の詳細については、入門書「リアルタイム・スペクトラム・アナライザにおけるデジタル・フォスファ技術の基礎」をご参照ください。ただし、DPX表示では時間領域の記録はできないため、マルチドメイン解析はできません。信号を取込んで解析するには、信号をメモリに記録することが必要であり、また波形の解析対象となる部分を選択できることが必要です。このセクションでは、図2-28 (RSA6000シリーズ) に示すように、RTSAのトリガ、アキュジションおよび解析範囲の設定について説明します。

タイミングのコントロールとトリガを併用すると、トランジェント(過渡的現象)やタイミングに関連するパラメータを解析するのに最適な組み合わせとなります。

アキュジション長の設定は、トリガがかかってサンプル・データがメモリに保存され始め、そしてサンプルが終了するまでの時間の長さを指定します。

アキュジション・ヒストリは、新しいトリガの発生後に以前のアキュジションをいくつ残すかを決定します。当社のRTSAでは、時間領域のオーバービュー・ウィンドウにアキュジションの全体長を表示します。

スペクトラム長は、スペクトラム表示が計算される時間の長さを決定します。スペクトラム・オフセットは、トリガがかかってからFFTフレームの開始位置までの遅延または先行する時間を決定します。スペクトラム長とスペクトラム・オフセットの時間分解能は、どちらもFFTフレーム1つ分です。RSA3000シリーズは固定FFT長を使用していますが、多機能で高性能なRSA 6000シリーズでは、スペクトラム表示のFFT長を1ポイント単位で変更することができます。当社のRTSAでは、時間領域のオーバービュー・ウィンドウの下側に位置するカラー・バーを使用して、スペクトラム・オフセットとスペクトラム長を表示します。カラー・バーの色は、関連する表示にも適用されます。

解析長は、変調解析やその他の時間に関連する測定を行う時間の長さを決定します。解析オフセットは、トリガがかかってから解析の開始点までの遅延または先行する時間を決定します。当社のRTSAでは、時間領域のオーバービュー・ウィンドウの下側に位置するカラー・バーを使用して、解析オフセットと長さを表示します。カラー・バーの色は、関連する表示にも適用されます。

出力トリガ・インジケータによって、トリガがかかったときに後部パネルのTTL出力をオンにすることができます。この機能は、オシロスコープやロジック・アナライザなど他の機器とRTSAを同期させて測定するとき使用できます。

リアルタイム・トリガとアキュジション

RTSAでは、時間、スペクトラムおよび変調解析が行えます。トリガは、時間領域のイベントを取込むときには不可欠です。RTSAは、独自のトリガ機能を備えており、通常の外部トリガやレベル・トリガはもちろんのこと、パワー・トリガやFMT（周波数マスク・トリガ）も用意しています。

もっとも一般的なトリガ・システムは、ほとんどのオシロスコープで使用されているものです。従来のアナログ・オシロスコープでは、測定信号は信号用入力に接続し、トリガは別のトリガ入力に接続します。トリガ・イベントにより水平掃引が開始され、信号の振幅は垂直方向の変化量として校正された目盛上に表示されます。もっとも簡単な方式では、図2-29に示すように、アナログ・トリガによりトリガの後に発生したイベントを観測することができます。

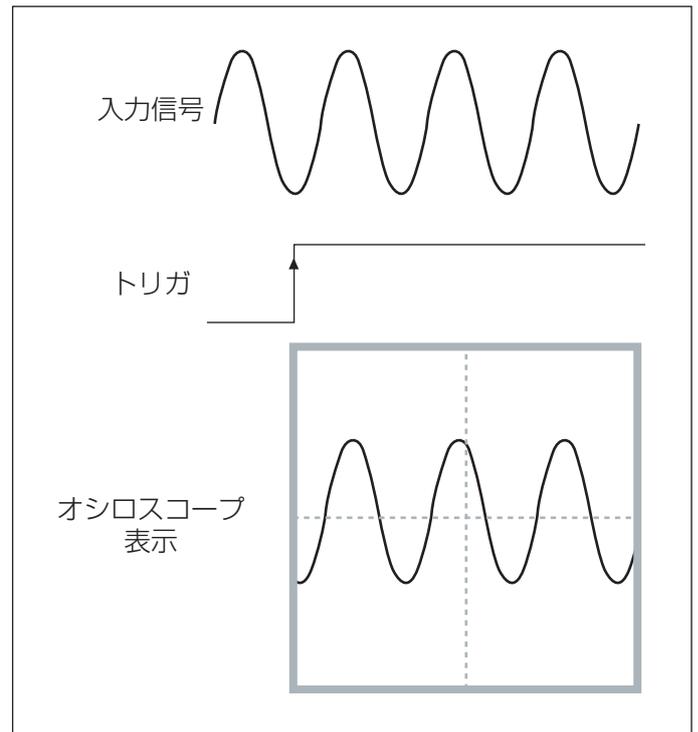


図2-29. 従来のオシロスコープでのトリガ

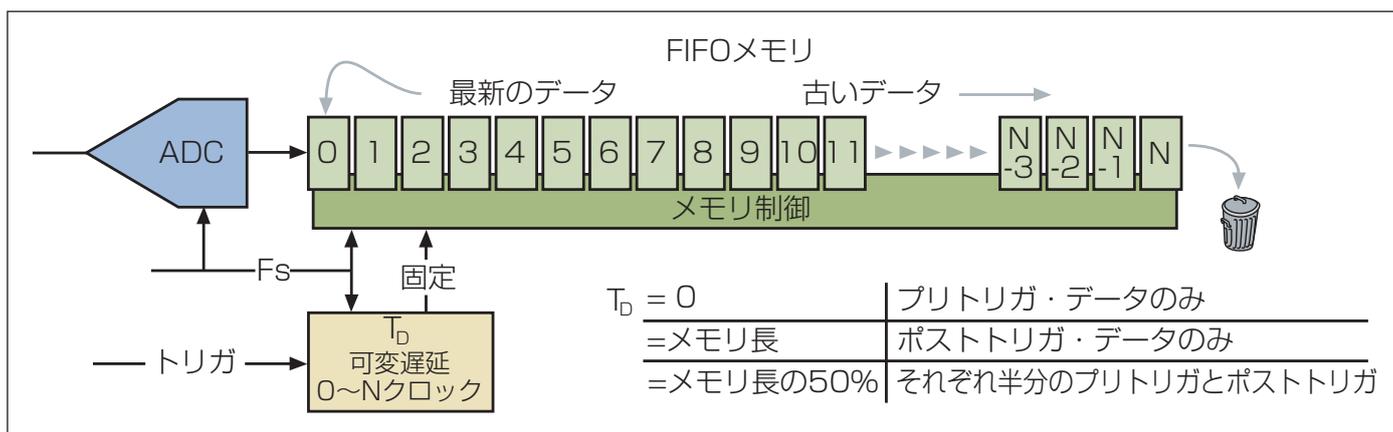


図2-30. デジタル・アキュイジション・システムでのトリガ

デジタル・アキュイジションを採用したシステムでのトリガ

信号をデジタルで処理して表示する機能と、大容量メモリとの組み合わせにより、トリガ後はもちろんのこと、トリガ以前に発生したイベントの取込みが実現できます。

RTSAで使用しているデジタル・アキュイジション・システムでは、A/Dコンバータにより入力信号を時間サンプルして大容量メモリに保存しています。理論的には、新しいサンプルを連続してメモリに保存し、最も古いサンプルから順次削除していきます。図2-30の例は、N個のサンプルを保存するように設定したメモリを示しています。トリガがかかるとアキュイジションが停止し、メモリの内容が固定されます。トリガ信号の経路に可変遅延回路を追加すると、トリガ後に発生したイベントはもちろん、トリガ以前に発生したイベントも取込むことができます。

遅延がない場合を考えてみます。トリガ・イベントにより、トリガと同時のサンプルを保存した直後にメモリを固定します。メモリには、トリガ時のサンプルからトリガ以前に発生した「N」個のサンプルが保存されています。トリガ以前のイベントのみ保存されています。

では次に、遅延がメモリ長と正確に一致するように設定された場合を考えてみます。トリガの発生後、「N」個のサンプルはメモリが固定される前にメモリ内に保存することができます。これでメモリには、トリガ後の信号のサンプルを「N」個保存していることになり、結果的にトリガ以後のイベントのみ保存することになります。

メモリ長以内に遅延を設定した場合は、ポストトリガ・イベントとプリトリガ・イベントのどちらも取込むことができます。遅延をメ

モリ長の半分に設定した場合、保存したサンプルの半分はトリガ以前のもので、残りの半分はトリガ後のサンプルとなります。この方法は、従来の掃引型SAのゼロ・スパン・モードで使用するトリガ遅延と似ています。ただしRTSAでは、より長時間の信号サンプルを取込むことができ、またこの信号データを周波数領域、時間領域、および変調領域で解析することができます。RTSAは、信号の監視やデバイスのトラブルシューティングなどのアプリケーションに強力なツールとなります。

トリガ・モードとその特長

フリーラン・モードでは、入力したIF信号のサンプルはトリガ条件とは無関係に取込みます。スペクトラムや変調などの測定は、信号を取込んで解析してから表示します。

トリガ・モードでは、トリガ条件や機器の動作に対応したトリガ・パラメータ設定のほか、トリガ・ソースも必要となります。

連続トリガを選択すると、トリガが発生するごとにアキュイジションを繰り返します。シングル・トリガでは、測定が開始されたときに1回だけアキュイジションを実行します。トリガ位置は、0~100%の範囲で調整可能で、アキュイジション範囲のどの部分でプリトリガするかを選択します。10%を選択すると、選択したアキュイジション範囲の10分の1をプリトリガ・データとして取込み、10分の9をポストトリガ・データとして取込みます。トリガ・スロープでは、立上りエッジ (Rise)、立下りエッジ (Fall) またはそれらの組み合わせが選択できます。立上りと立下りスロープ (Rise and Fall) に設定すると、バースト全体を取込むことができ、また立下りと立上りスロープ (Fall and Rise) に設定すると、連続した信号で一部分が落ち込んだ信号部分の取込みが可能です。

トリガ・ソース	トリガ信号	設定の単位	時間の不確定さ	注
外部	外部トリガ・コネクタ	V (可変) またはTTL	RSA3300シリーズ: ±40ns RSA3400シリーズ: ±20ns RSA6000シリーズ: ±12ns	RSA3000シリーズ: 外部トリガ入力x1 RSA6000シリーズ: 外部トリガ入力x2 (前面と後部パネル)
パワー・レベル・トリガ	現在のアキュイジションBWで計算したパワー	パワーまたはフル・スケールに対するdB	±1時間領域ポイント (実効サンプリング・レートによる)	RSA6000シリーズは、トリガに対するユーザ設定可能なフィルタ帯域幅
周波数マスク・トリガ	FFTプロセッサの出力でのポイントごとの比較	画面にグラフ表示されたマスクによるdBとHz	±1フレーム長	フレーム長 (実効サンプリング・レートによる)
DPX Density トリガ	ユーザ定義の振幅・周波数エリアと信号密度	画面上に書かれた方形波エリアのdBとHzおよび密度測定パーセント	約50ms	RSA6000シリーズ Opt. 200
タイムクオリファイ・トリガ	信号のロジック状態とオフセット・タイミングおよび計算されたパワー	パワー、dB以下と以上、時間オフセット	±1時間ドメイン・ポイント (有効サンプリング・レートによる)	RSA6000シリーズ Opt. 200

表2-1. リアルタイム・スペクトラム・アナライザのトリガ源の比較表

リアルタイム・スペクトラム・アナライザのトリガ源

RTSAでは、内部トリガと外部トリガを用意しています。表2-1に、リアルタイム・トリガの信号源とその設定、および各信号源に関連する時間分解能の概要を示します。

外部トリガを使用すると、外部信号でアキュイジションを制御できます。これは通常、測定システムからの周波数スイッチング・コマンドなどの制御信号です。この外部信号により、測定システムの信号のアキュイジションが開始されます。

内部トリガの設定は、測定信号の特性によって変わってきます。RTSAは、デジタル化した信号のレベルやフィルタリング、間引き処理後の信号パワー、あるいは周波数マスク・トリガによる特定のスペクトラム成分でトリガする機能を備えています。トリガ信号源とトリガ・モードは、周波数の選択、時間分解能およびダイナミック・レンジなど、個々に特長があります。これらの特長を実現する機能的要素を次ページの図2-31に示します。

レベル・トリガは、A/D変換によってデジタル化した信号とユーザが設定したレベルとを比較します。フィルタリングと間引き処理が必要な狭いスパンを観測する場合でも、デジタル化した信号の全帯域幅を使用します。レベル・トリガでは、デジタル化するときの最

高レートを使用し、最高サンプリング・レートの1サンプルと同程度の短時間のイベントが検出できます。ただし、取込んだデータによる時間分解能は、間引き処理後の実効サンプリング・レートに制限されます。レベル・トリガは、RTSAの何機種かに装備しています。

パワー・トリガでは、フィルタリングおよび間引き処理後の信号パワーを計算してトリガをかけます。IQサンプル (I^2+Q^2) の各フィルタ・ペアのパワーを、ユーザが設定したパワーと比較します。RTSAの何機種かでは、トリガ信号の帯域幅が選べるフィルタを通してトリガをかけることができるフィルタ・パワー・トリガを用意しています。

DPX Densityトリガは、DPX Density測定と同じ画面上の測定ボックスを使用します。トリガ・システムは、密度測定結果をモニタし、その密度が設定した密度スレッシュホールドを越えたときにトリガをかけます。

タイムクオリファイ・トリガは、他のトリガ方式と組み合わせて使用でき、また高速サンプリング・レート時のタイミングの不確かさを持つこれらのトリガ方式に対して、計算されたパワー、信号のロジック状態、オフセット・タイミングを利用することができます。

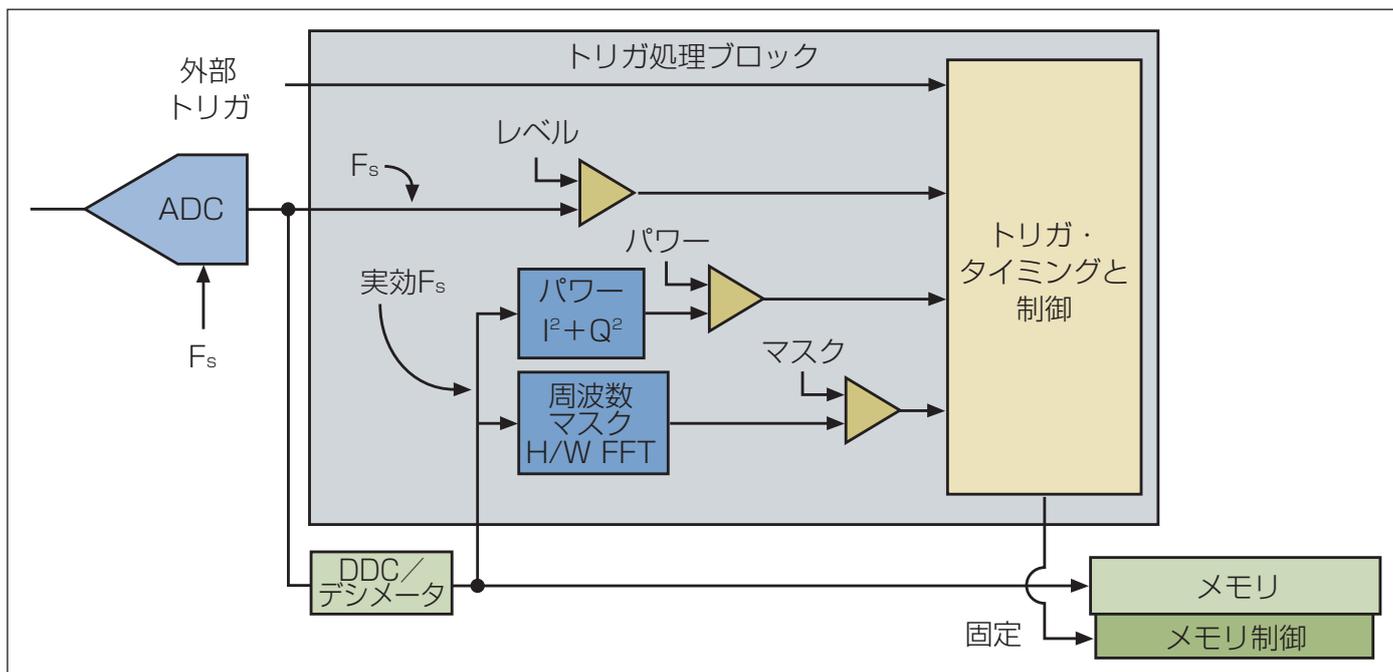


図2-31. リアルタイム・スペクトラム・アナライザのトリガ処理

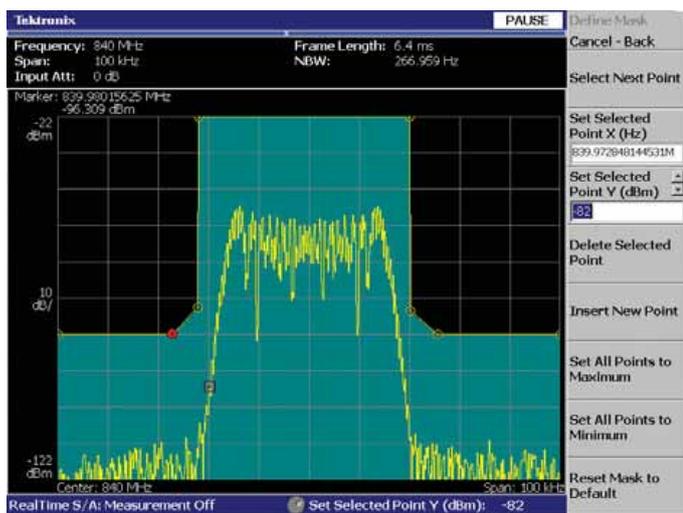


図2-32. 周波数マスクの定義

FMT (周波数マスク・トリガあるいは周波数領域トリガとも呼ばれます) は、スペクトラムの形状とユーザ定義のマスクを比較してトリガをかけます。この優れた技術により、スペクトラム形状の変化でトリガをかけることができます。FMTを使用すると、非常にレベルが高い信号が存在している場合でも、フル・スケールのはるか下に位置する信号を確実に検出できます。パワーの大きい信号の中の小さい信号でトリガをかけることができるこの機能は、間欠的な信

号、相互変調歪み、トランジェント・スペクトラムの抑制違反などを検出するためには必要不可欠です。信号とマスクを比較するためには、十分に高速なDFTが必要で、それには抜けのないフレームが必要です。周波数マスク・トリガの時間分解能は、およそ1DFTフレームになります。トリガ・イベントは、図2-31のブロック図に示すように、専用ハードウェアのDFTプロセッサを使用して、周波数領域で判定します。

周波数マスクの作成

他のマスク・テストと同様に、FMTの設定は画面でのマスク定義から始めます。この定義は、周波数ポイントとそのポイントの振幅を用いて行います。マスクはポイントごとに定義するか、あるいはマウスなどのポインティング・デバイスでマスクを描画してグラフィカルに定義することができます。トリガは、マスクより外にある信号がマスク内に入った場合、またはマスク内の信号がマスクより外に出た場合に発生するように設定できます。

図2-32は、通常の信号スペクトラムの通過は許可し、瞬間的な異常は許可しないように定義したFMTを示しています。次ページの図2-33は、信号が瞬間的にマスクを越えた場合にトリガがかかり、その結果信号を取込んだ後のスペクトログラム表示を示しています。図2-34は、信号がマスクを越えた最初のフレームのスペクトラムを示しています。プリトリガ・データとポストトリガ・データを取込んで、両方のデータのスペクトログラムを表示しています。



図2-33. キャリアに隣接するトランジェント信号を表示したスペクトログラム。カーソルはトリガ・ポイントに設定しているため、カーソル線の上側にプリトリガ・データが、カーソル線の下側にポストトリガ・データを表示。青色の領域の左側にある細い白線は、その部分がポストトリガ・データであることを示す

復調

変調とは、RF信号によって情報を伝える方法のことです。RTSAを使用した変調解析では、送信されたデータを抽出するだけでなく、変調信号の精度も測定します。さらに、変調品質を低下させるエラーや障害を検出してデータ化できます。

最近の通信システムでは、いろいろな変調方式を使用するようになってきました。RTSAは、一般的な変調方式を解析する機能のほか、今後現れる可能性のある新しい方式も解析できる構造を持っています。

振幅、周波数および位相変調

RFキャリア（搬送波）は、キャリアの振幅または位相の変化に

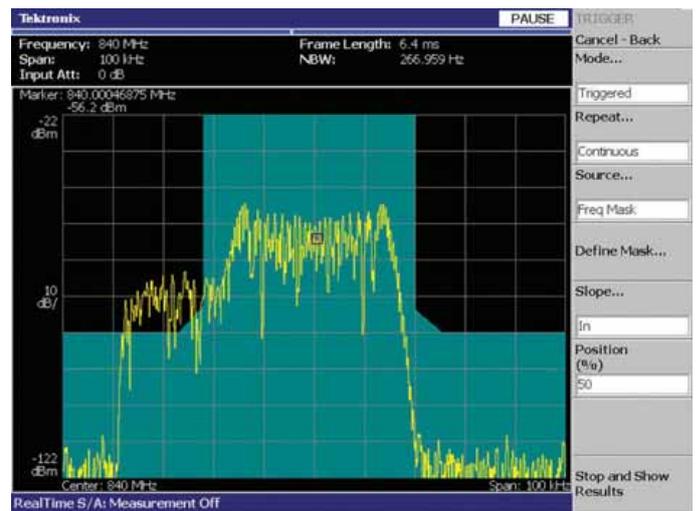


図2-34. スペクトログラムの1つのフレームで、トランジェント信号が周波数マスクを越えたときのトリガ・イベントを示す

よって情報を伝えることができます。周波数は、位相の時間的な導関数なので、FM（周波数変調）は、PM（位相変調）の時間的な導関数になります。QPSK（Quadrature Phase Shift Keying、四位相偏移変調）は、90度の位相の倍数でシンボル決定ポイントが発生するデジタル変調方式です。QAM（Quadrature Amplitude Modulation、直交振幅変調）は、振幅と位相の両方が同時に変化して、複数の状態が存在する高次変調方式です。OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing、直交周波数分割多重方式）などの非常に複雑な変調方式の場合でも、振幅と位相成分に分解することができます。

極座標では、振幅と位相はベクトルの長さや角度として考えることができます。同様に、デカルト座標系（Cartesian）または直交座標系（X,Y）でも表現できます。メモリに保存した時間サンプルのIQフォーマットは、水平またはX成分を表すIと、垂直またはY成分のQを持ったデカルト座標系と数学的に等しくなります。

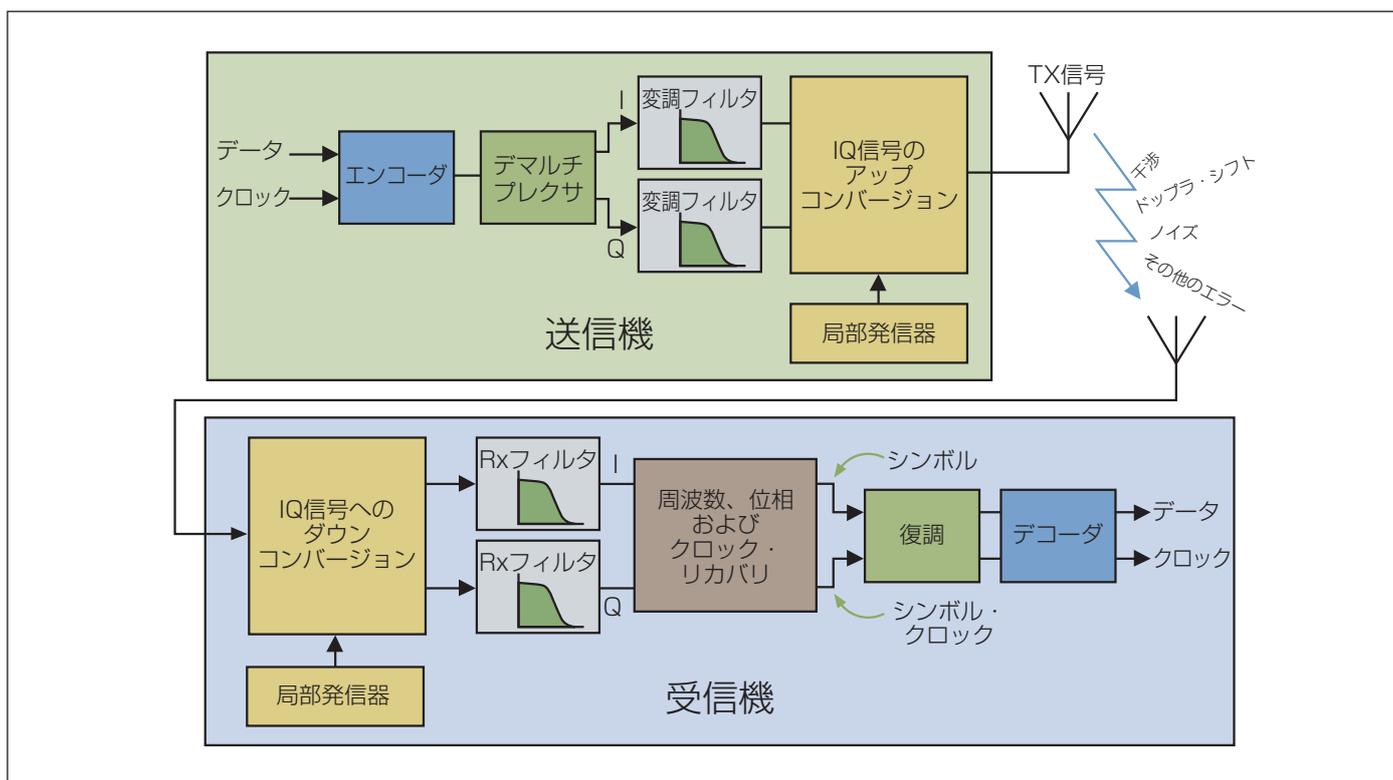


図2-36. 代表的なデジタル通信システム

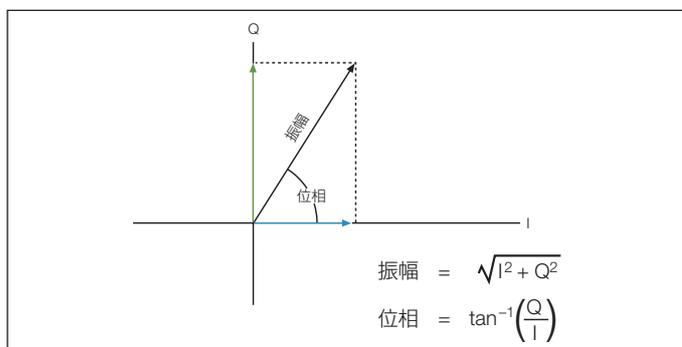


図2-35. 振幅および位相のベクトル表示

図2-35は、IQ成分に対応した振幅と位相のベクトルを示しています。AM復調は、各IQサンプルの瞬時振幅値を計算して、時間に対してプロットしたもから構成されます。PM復調は、逆正接関数の $\pm \pi/2$ における不連続を考慮して、各IQサンプルの位相角度を計算したもから構成されます。周波数は位相の時間的な導関数としてFMを計算することができ、FMIはPMの時間的な導関数となります。

デジタル変調

図2-36は、一般的なデジタル通信システムにおける信号処理を示しています。送信処理は、送信データとクロックにより開始します。データとクロックは、エンコーダによりデータの並び替え、同期ビットの追加、エンコーディングおよびスクランブルのエラー修復が実行されます。次にデータをIとQに分割およびフィルタリングし、ビット・データからアナログ波形に変換します。さらに、割り当てたチャンネルに対してアップコンバートし、空中に送信します。

受信処理は、送信とは逆の手順になり、いくつかの手順を加えます。RF信号は、IとQのベースバンド信号にダウンコンバートされ、シンボル間干渉を除去するためにRxフィルタを通ります。次に信号は、正確な周波数、位相およびデータ・クロックを復元するためのアルゴリズムが実行されます。これは、マルチパス遅延および伝送路のドップラ・シフトの補正と、RxとTxの局部発信器が通常同期していないための補正が必要となります。周波数、位相およびクロックを復元した後は、信号の復調とデコードおよびエラー訂正を行い、伝送路での信号劣化によって失われたビットを復元します。

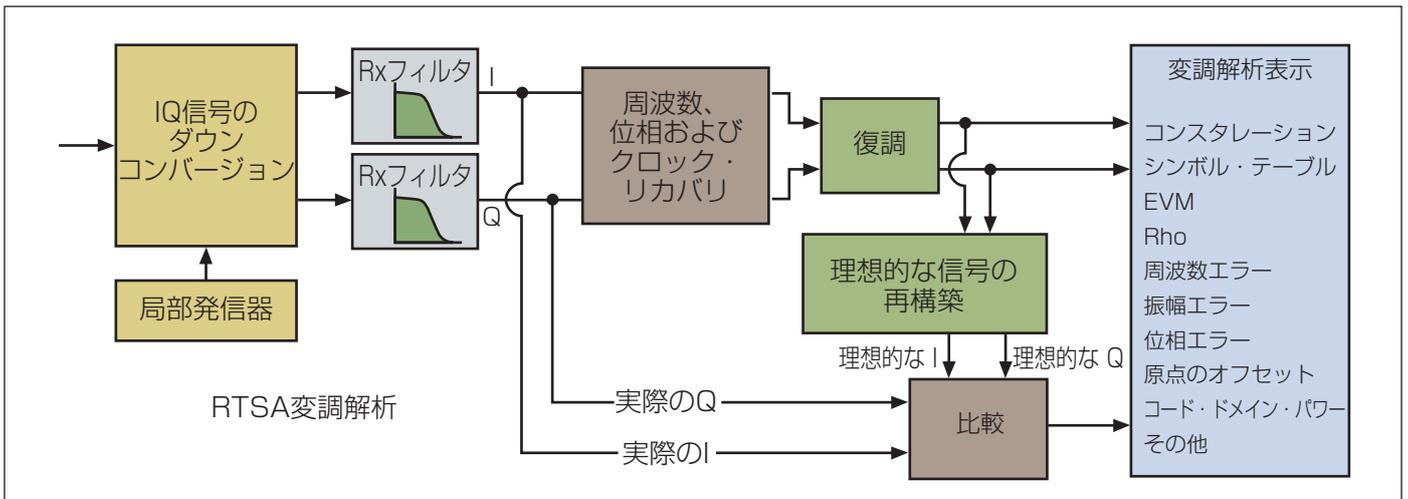


図2-37. RTSAの変調解析ブロック図

デジタル変調には、よく知られているFSK、BPSK、QPSK、GMSK、QAM、OFDMなど多くの種類があります。デジタル変調は、チャンネル割り当て、フィルタリング、パワー制御、エラー訂正および通信プロトコルと組み合わせられ、リンクの両端の無線通信機器間で情報を誤りなく伝送するように、特定のデジタル通信規格に準拠しています。このように、デジタル通信方式が複雑になるのは、信号が空中や他の媒体を伝播したときに、システムに影響を与えるエラーや障害を補正することが必要になるからです。

図2-37は、デジタル変調解析で必要となる信号処理手順を示しています。基本的な処理は受信機と同じですが、変調精度の測定だけは、実際に受信した波形と理想的な変調波形との比較が必要となります。RTSAで使用している変調品質測定方法では、復元したシンボルを、数学的に理想的なIQ信号を再構築するために使用します。この理想的なIQ信号は、実際の信号または劣化したIQ信号と比較し、必要な変調解析表示と測定を行います。

パワー測定と統計処理

RTSAは、周波数領域および時間領域でパワー測定が実行できます。時間領域測定は、メモリに保存した特定の時間範囲におけるIとQのベースバンドのパワーを積分することで実現できます。周波数領域測定は、特定の周波数範囲におけるスペクトラムのパワーを積分することで実現できます。チャンネル・パワーを得るために、標準規格に基づいたチャンネル・フィルタを適用する場合があります。特殊な状況下でも精度を維持するため、校正パラメータおよびユーザ校正パラメータも使用します。

通信標準規格により、部品やエンド・ユーザのデバイスに対して統計的な測定が必要となる場合があります。RTSAは、信号のCCDF (Complementary Cumulative Distribution Function、相補累積分布関数) などの統計計算を行う測定ルーチンを備えています。このCCDFは、複雑な変調信号のPAR (ピーク・アベレージ比) のような統計的な特性評価に使用します。

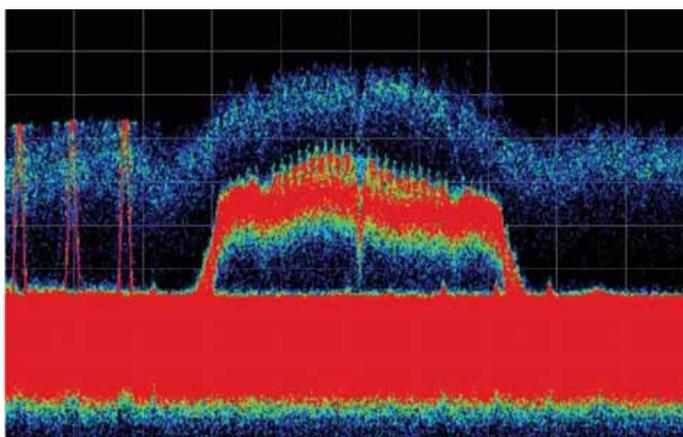


図3-1. 異なった時間で同じ周波数帯域に存在する複数信号のDPXライブ・スペクトラム表示

第3章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザ測定

この章では、RTSAの操作モードと測定について説明します。サンプリング・レートやDFTポイント数などの測定解析性能やレコード長などは、RTSAの機種によって異なります。この入門書で説明されているその他の測定例と同様に、この章で説明する内容はRSA 3000BシリーズおよびRSA6000シリーズに対応します。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザによる測定の種類

RTSAは、周波数、時間、変調および統計の各領域での測定が行えます。この章では、RTSAの機種ごとに異なる測定性能についても説明します。

周波数領域の測定

この章では、RFのDPXライブ・スペクトラム表示測定、スペクトラム表示測定およびスペクトログラム表示測定など、基本的な周波数領域の測定について説明します。

DPXライブ・スペクトラム測定

DPXライブ・スペクトラム測定は、他のアナライザでは検出できない、見つけることが難しい信号を検出できるRTSAの優れた機能です。DPX技術で重要な性能パラメータは、信号イベントの100% POI (Probability of Intercept, 捕捉確率) の最小時間幅です。RSA6000シリーズの特長は、最小10.3 μ sの信号を検出できることです。

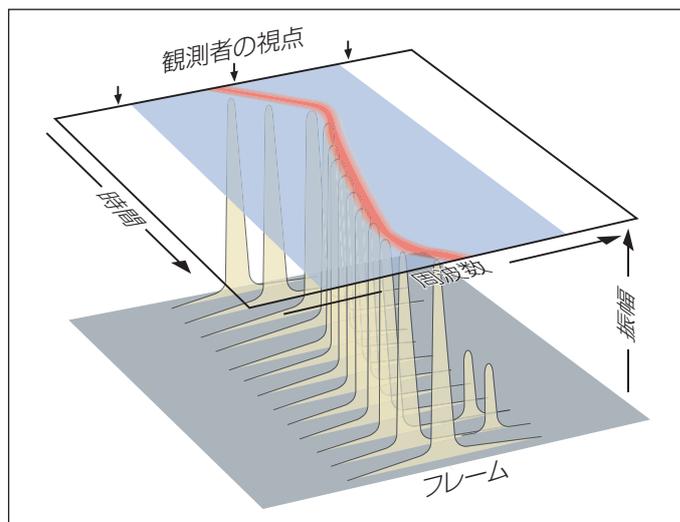


図3-2. スペクトログラム表示

DPXスペクトラムは、図3-1に示すように、異なった時間で発生した同じ周波数帯域を持つ複数の信号を表示できます。また、発生してすぐに消えてしまうような信号でも、ライブRF表示により、信号を検出して問題を解決する時間を大幅に短縮できます。RSAシリーズの一部の機種では、DPXスペクトラム表示のスペクトラム幅は、リアルタイム帯域幅で制限されません。DPX掃引は、複数のリアルタイム周波数セグメントから構成される通常のスペクトラム表示と同じように動作し、波形とビットマップのワイドスペクトラム表示ができます。

スペクトラムとスペクトログラム測定

スペクトラムとスペクトログラムの測定は、メモリに保存したデータをDFT解析して測定します。これらの測定は、トリガを使用するか、またはフリーラン・モードのどちらかで実行できます。スペクトラムとスペクトログラムの測定結果は、別々に表示されます。ただし、ここでは両測定とも同じデータを使用しており、また時間と周波数でマークがリンクしているため、まとめて説明します。

図3-2に示すように、スペクトログラム表示は、周波数と振幅が時間とともにどのように変化するかを直感的に分かりやすく表示できる重要な測定です。スペクトラム表示と同じように、水平軸は周波数レンジのスペクトラムを表します。ただし、スペクトログラム表示では垂直軸は時間を表し、振幅は波形の色で表します。スペクトログラム表示の断面は、1スペクトラム長のデータで計算した単一の周波数スペクトラムに相当します。

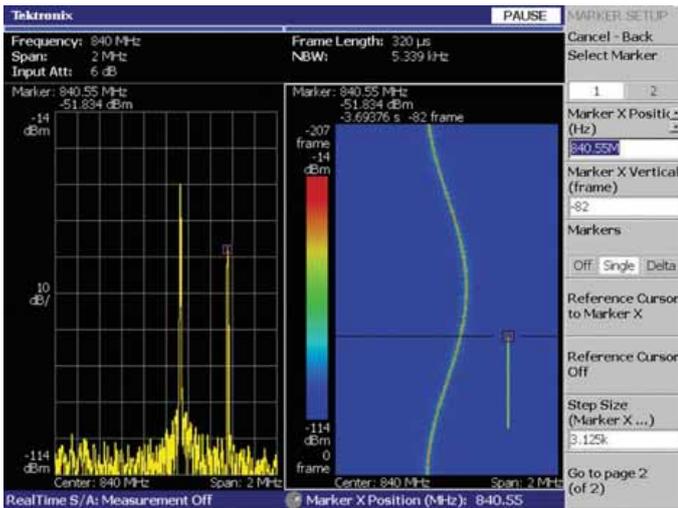


図3-3. 時間相関が取れた、パワー対周波数表示 (左図) とスペクトログラム表示 (右図)

図3-3は、図3-2で示しているイラストの信号を、実際にスペクトラムとスペクトログラムで表示した画面です。スペクトログラム表示では、最も古いフレームを画面の最上部に表示します。この測定では、時間とともに周波数が変化するRF信号を表示でき、また時間ブロックの終わり近くで発生し、消滅したレベルの小さいトランジェント信号も表示できています。データはメモリに保存されているので、マーカーにより、スペクトログラム表示上の時間を移動させることができます。図3-3では、スペクトログラム表示のトランジェント・イベント上にマーカーを設定し、その特定したポイントの時間に相当するスペクトラムを表示しています。

リアルタイム帯域幅を超えるスペクトラム測定

図3-4で示している標準SAモードでは、従来の掃引型SAによる周波数領域測定と同じ測定が行えます。機器の持つリアルタイム帯域幅を超える周波数スパンも、従来のスペクトラム・アナライザと同様に、対象となるスパンに渡ってRTSAを同調させることにより実現できます。連続したスペクトラム・アキュイジションは、一定間隔で周波数をステップ同調することに行われます。RSA6000シリーズにオプションのハードウェアを装備することにより、DPX掃引機能が使用できます。DPX掃引では、最高で14,600個のスペクトラムで構成されるDPXフレームの各周波数セグメントに一定時間滞留します。この滞留時間は設定可能で、次のセグメントに移動するまで最高100秒間、各セグメントが観測できます。掃引が各セグメントに滞留している間、その周波数バンド内の信号干渉確率 (Probability of intercept) は、最少10.3 μ s幅のイベントを100%の確率で取込むことができる通常のリアルタイム・スパンと同じです。ピクセル・ビットマップはセグメントごとに構成され、周波数セグメントを表示するのに必要な縦列数まで水平方向に圧縮

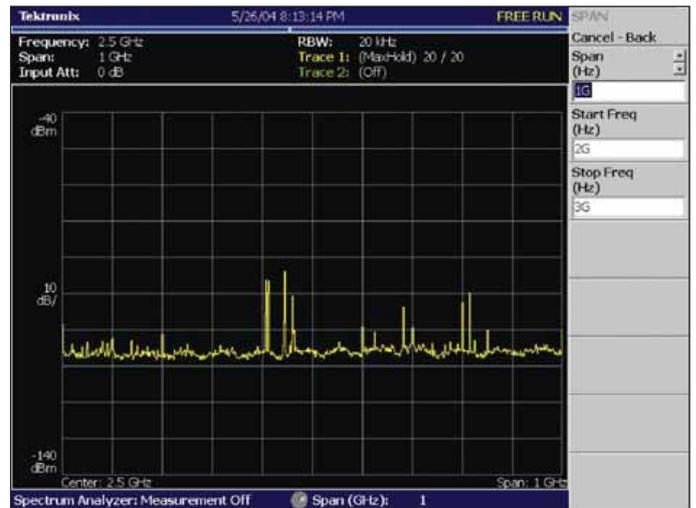


図3-4. 標準SAモードのマックス・ホールドを使用した、1GHz周波数スパンにおける空中での電波測定結果

されます。圧縮は、複数ポイントのピクセル密度を平均化することにより行われます。最終的な掃引ビットマップは、掃引しないときのビットマップと同じピクセル・ビットマップ分解能になります。波形はセグメント全体で構成され、ユーザが設定した全スパンの波形ポイント数まで水平方向に圧縮されます。

時間領域の測定

周波数対時間

周波数対時間測定は、垂直軸に周波数、水平軸に時間を表示します。これは、スペクトログラム表示と同様の結果を示しますが、2つの重要な相違点があります。周波数対時間表示は、次に詳細に説明するように、スペクトログラムより数段優れた時間分解能を持ちます。この測定では、すべての時間ポイントで1つの周波数を計算します。これは、スペクトログラムのような複数のRF信号の表示は不可能であること意味します。

スペクトログラムはDFTの結果をまとめたもので、1つのDFTフレーム長に等しい行ごとの時間分解能を持っています。周波数対時間表示では、1サンプル間隔の時間分解能を持ちます。1,024の時間領域サンプルをスペクトラム計算する場合、このモードの分解能はスペクトログラムの分解能より1,024倍細かくなります。これにより、小さな瞬間的に起きる周波数シフトを、より詳細に観測できます。このモードの結果は、周波数弁別器や周波数カウンタのように表示されます。各サンプル・ポイントは、スパンが数百Hzか数MHzであっても、一つの周波数の値を表します。CWまたはAMなどでの一定した周波数の信号は、平坦で水平な表示になります。

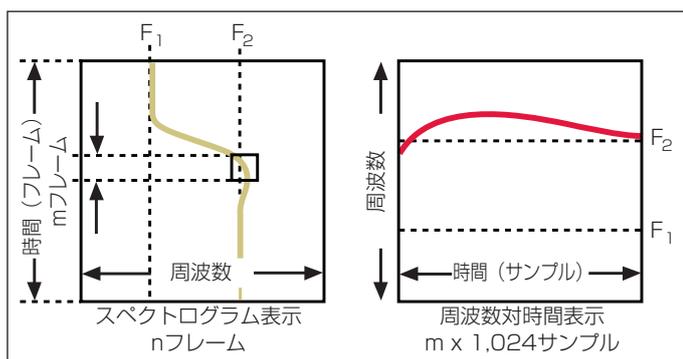


図3-5. スペクトログラムと周波数対時間表示の比較

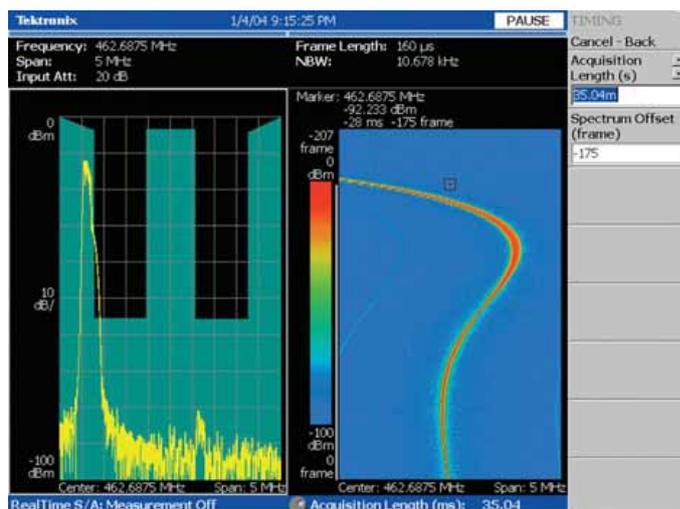


図3-6. 5MHzの周波数と35msの時間範囲で安定する信号のスペクトログラム表示

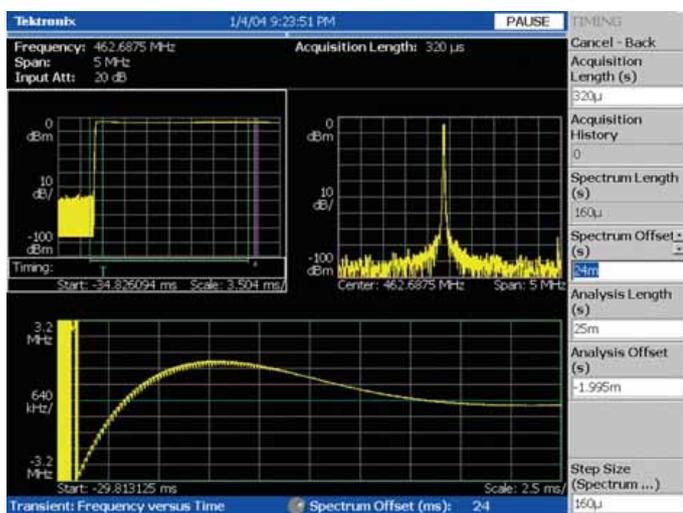


図3-7. 5MHzの周波数と25msの時間範囲で安定する信号の周波数対時間表示

周波数対時間表示は、1つの特定の周波数で相対的に強い信号が存在する場合の測定に最適です。図3-5は、スペクトログラムと周波数対時間表示を簡単に比較したものです。周波数対時間表示は、スペクトログラムの一部を拡大したズームイン表示となります。これは、周波数のオーバーシュートやリングングなどのトランジェント・イベントの測定に最適です。測定環境に複数の信号がある場合、あるいはノイズに埋もれた信号や間欠的に発生する信号の測定にはスペクトログラム表示が有効です。この表示では、選択したスパンのすべての周波数と振幅の変化を観測できます。

図3-6、図3-7、図3-8に、取込んだ同一信号を3種類の異なる解析表示で示しています。図3-6に示すように、発信器がオンする時に周波数の安定性に問題がある送信機からのトランジェント信号を取込むために、FMT（周波数マスク・トリガ）を使用しています。左側画面中央の周波数に発信器が同調していないので、RF信号が周波数マスクを越えてしまい、その結果トリガが発生しています。右側のスペクトログラム表示は、デバイスの周波数が安定していく様子を示しています。

次の図3-7と図3-8は、同じ信号の周波数対時間表示を示します。図3-7は25msの解析長を使用して、スペクトログラム表示と同様に周波数が安定していく様子を示しています。図3-8は、1msの解析長に拡大表示した結果を示しています。ここではより詳細な時間領域分解能を使用して、時間に対する周波数の変化を見ることができます。これにより、正しい周波数に安定した後も信号の残留振動があることを表示しています。

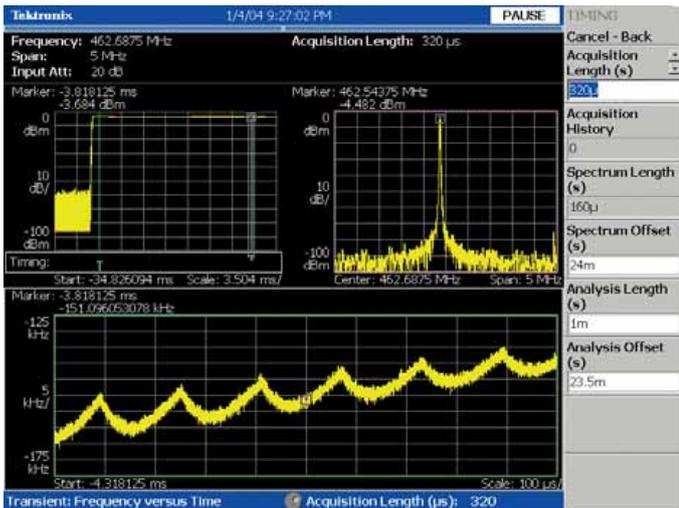


図3-8. 50kHzの周波数と1msの時間範囲で安定する信号の拡大表示

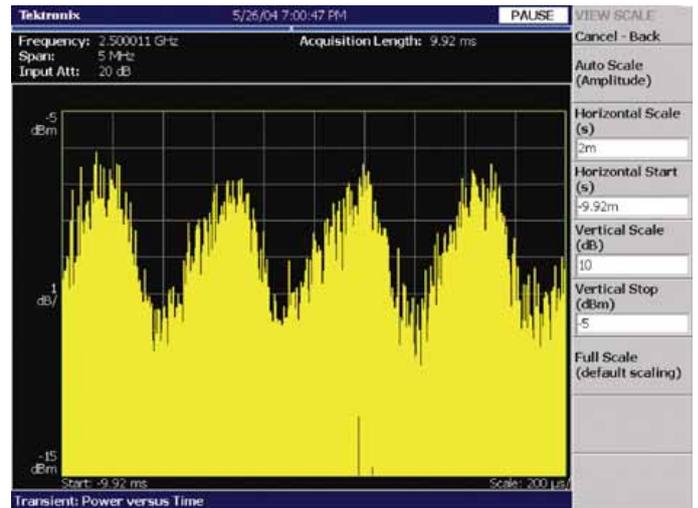


図3-9. パワー対時間表示

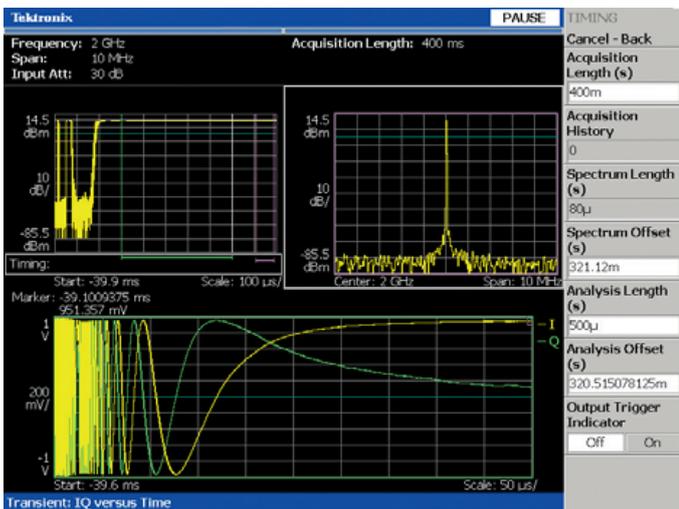


図3-10. 徐々に安定していくトランジェント信号のIQ対時間測定

振幅またはパワー対時間

図3-9のパワー対時間表示では、サンプルごとの信号パワーの変化を示しています。信号の振幅は、対数目盛を使用してdBmでプロットされています。この表示は、オシロスコプの水平軸が時間を表す時間領域表示に似ています。ただし、垂直軸は直線目盛の電圧ではなく、対数目盛のパワーを表しています。RSA3000シリーズの波形は、スパン内で検出したトータル・パワーを表しています。RSA6100シリーズでは、フル・スパン帯域幅に加えてユーザ選択可能なフィルタを用意しています。一定パワーの信号では、時間が経過してもパワーの変化がないため、平坦な波形表示となります。

時間領域における各サンプル・ポイントのパワーは、次のように計算できます。

$$\text{パワー} = 10 * \log \left(\frac{I^2 + Q^2}{1 \text{ mW}} \right)$$

パワー対時間表示は、時間オーバビューでも表示できます。時間オーバビュー表示は、アキュイジション帯域幅すべてのアキュイジションのRF振幅を表し、パワー対時間表示は、解析オフセットと解析長表示によって設定された時間セグメントを表します。

位相対時間

位相対時間は、理論的にパワー対時間と似ています。各IQペアの位相を計算し、その結果を時間の関数として表示します。各IQサンプルの位相は次のように計算できます。

$$\text{位相} = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right) * \frac{180}{\pi} \text{ 度}$$

IQ対時間

図3-10に示すトランジェントIQ対時間は、IとQの振幅を時間の関数として表示するもう1つの時間領域表示です。この測定では、デジタル・ダウンコンバータから入ってくる、設定された中心周波数でのIとQの出力信号を表示します。この表示では、信号が持っているいずれの変調に対しても同期されませんが、いくつかのデジタル復調測定では、同期後のIQ対時間測定が表示できます。

この測定は、周波数エラー、位相エラーや不安定性を深く追求する必要のあるエンジニアにとって、便利なトラブルシューティング・ツールとなります。

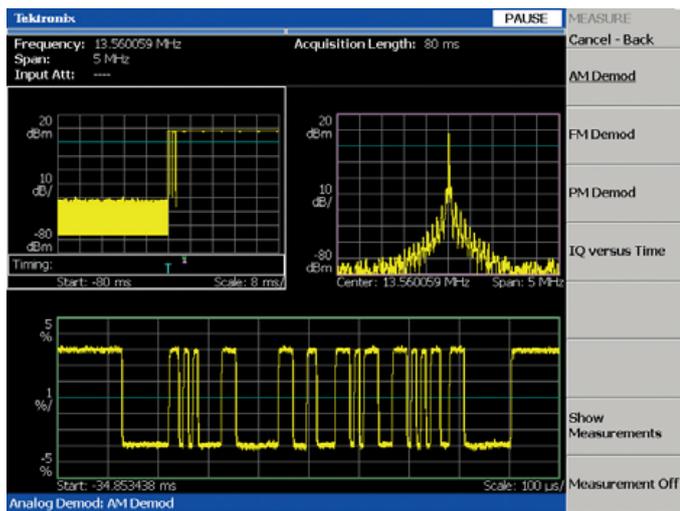


図3-11. データをエンコードするためにASKを使用したパルス信号のAM復調解析

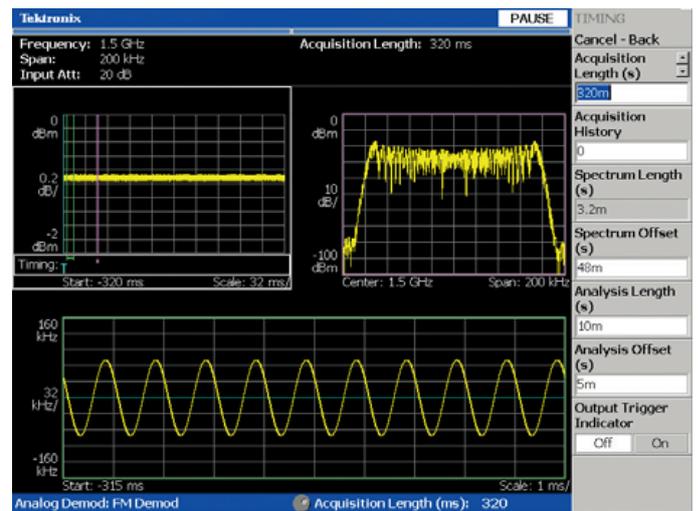


図3-12. 正弦波により変調した信号のFM復調解析

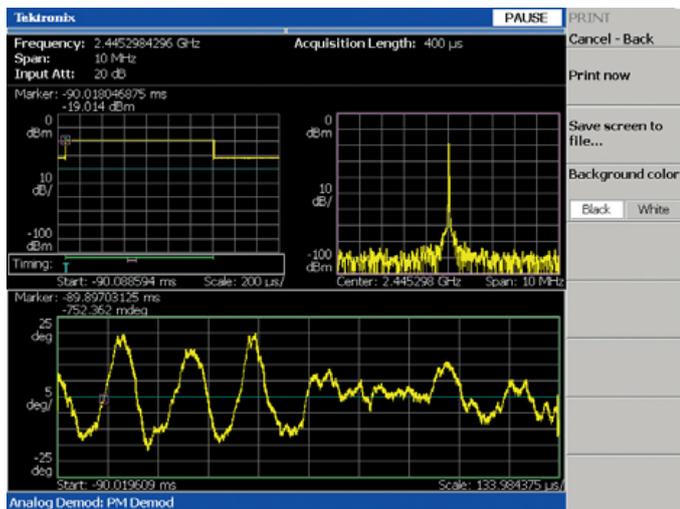


図3-13. 長いバーストで位相の不安定性を示すPM復調解析

変調領域の測定

アナログ変調解析

アナログ復調モードでは、振幅変調 (図3-11)、周波数変調 (図3-12)、および位相変調 (図3-13) の復調および解析が行えます。時間領域測定と同様に、マルチドメイン解析が行えるよう、スペクトラムおよび解析ウィンドウを、時間オーバービュー・ウィンドウに示されているブロック内の任意の位置に配置することができます。

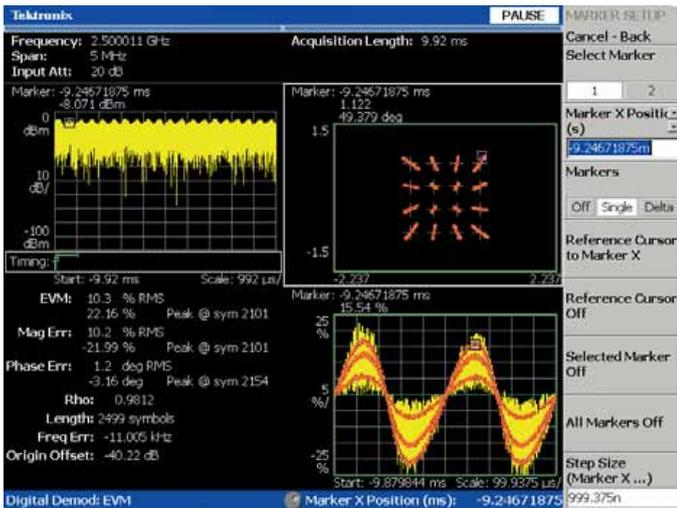


図3-14. 16QAM信号のEVM解析により明らかになった、正弦波振幅状の歪みを、EVM対時間で右下に表示

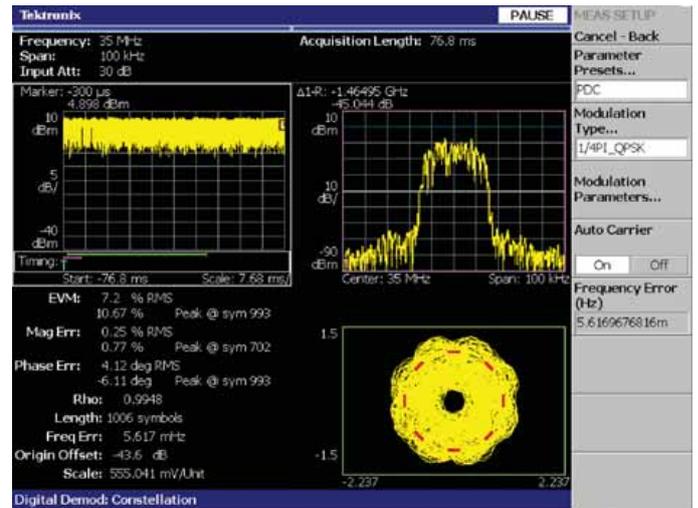


図3-15. PDC信号で位相の不安定性を示すコンスタレーション表示。図の右下は、位相の不安定性を象徴する一定振幅のシンボル・タイミング不良表示

デジタル変調解析

デジタル復調解析機能では、PSK (Phase Shift Keying、位相偏移変調)、FSK (Frequency Shift Keying、周波数偏移変調) およびQAM (Quadrature Amplitude Modulation、直交振幅変調) などで変調したデジタル信号の復調と解析ができます。RTSAは、コンスタレーション、EVM (変調精度)、振幅エラー、位相エラー、復調IQ対時間、シンボル・テーブル、アイ・ダイアグラムなど、多様な測定機能を備えています。これらの測定を実行するには、変調の種類、シンボル・レート、測定 (受信) フィルタの種類、リファレンス・フィルタの種類およびRRC (Root-raised cosine) フィルタのロールオフ係数のパラメータなどの変数を正しく設定する必要があります。

図3-14、図3-15、図3-16に示すように、RTSAは、リアルタイム・トリガと時間相関の取れたマルチドメイン解析と、VSAのデジタル復調測定を組み合わせることで、ダイナミックな変調信号の特性を評価できます。

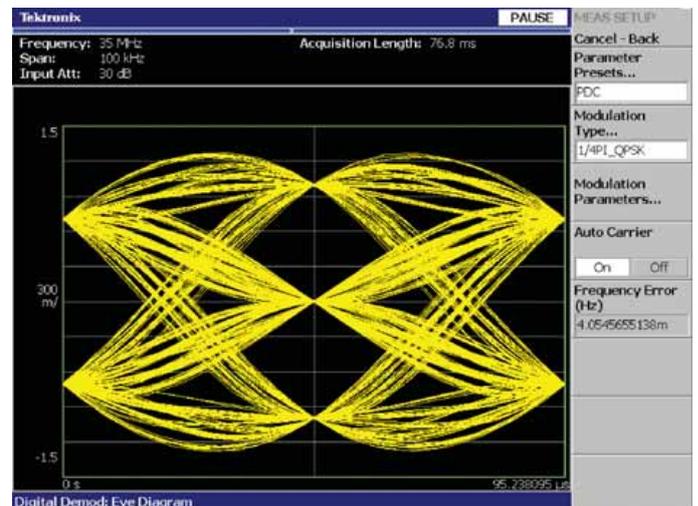


図3-16. PDC信号でのアイ・ダイアグラム表示

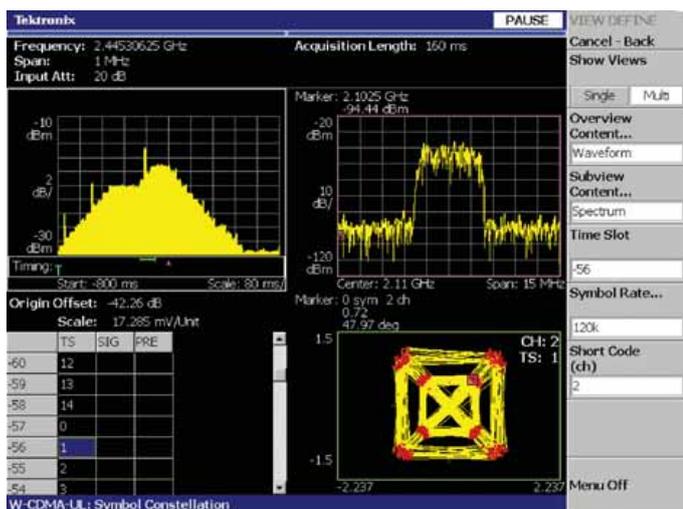


図3-17. 閉ループ・パワー制御でのW-CDMA携帯電話機の変調解析コンスタレーション表示(右下)は、レベルが変化する際に発生する大きなグリッチによるエラーを示す。これは、パワー対時間表示(左上)で観測することが可能

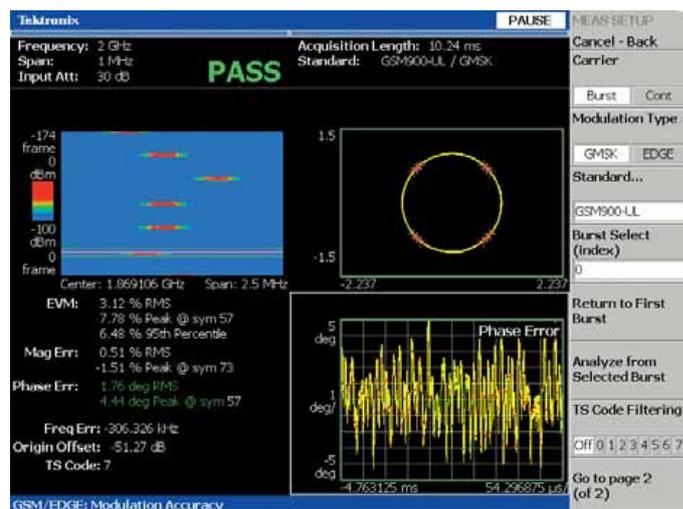


図3-18. 周波数ホッピングするGSM信号のスペクトログラム、コンスタレーション、EVMおよび位相エラー対時間表示

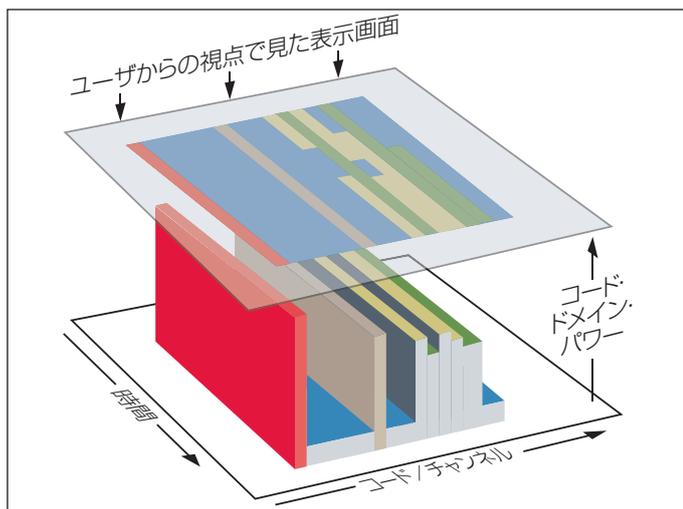


図3-19. コードグラム表示の説明図

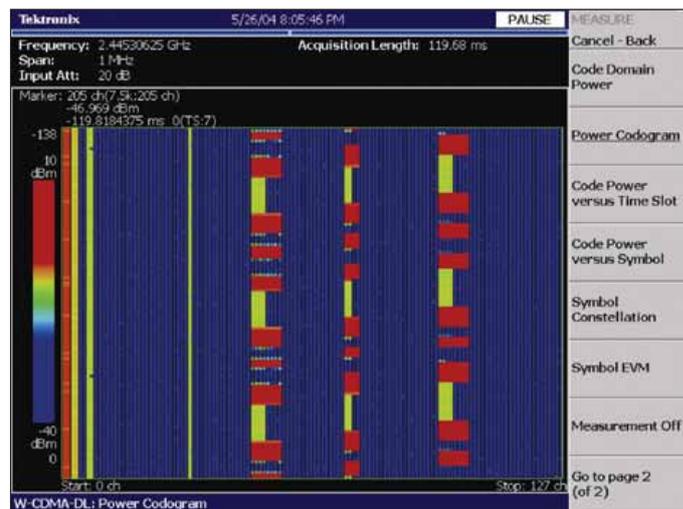


図3-20. W-CDMAの圧縮モードのコードグラム測定

図3-20は、RTSAのW-CDMAコードグラム表示を示しています。

標準規格に基づいた変調解析

RTSAは、W-CDMA、HSDPA/HSUPA、GSM/EDGE、cdma2000、1xEV-DO、ZigBee、WiMAX、WLAN (IEEE802.11a/b/g/n) などの通信標準規格の変調解析用ソリューションも提供しています。図3-17および図3-18に標準規格に基づいた変調解析の例を示します。

コード領域の測定

コードグラム表示

RTSAのコードグラム表示(図3-19)は、CDMA通信標準規格のコード・ドメイン・パワー測定に時間軸を追加しています。コードグラム表示はスペクトログラム表示と同様に、時間に伴う変化が直感的にわかるように表示します。

この特別なコードグラムは、W-CDMA圧縮モード・ハンドオフのシミュレーションを示します。ここでは、データ・レートが瞬間的に増加して、伝送時に一時的な短いギャップが現れています。このギャップにより、デュアルモードW-CDMA/GSM装置がW-CDMAノードBへの接続を維持しながら、利用可能なGSMベース・ステーションを検索することが可能になります。

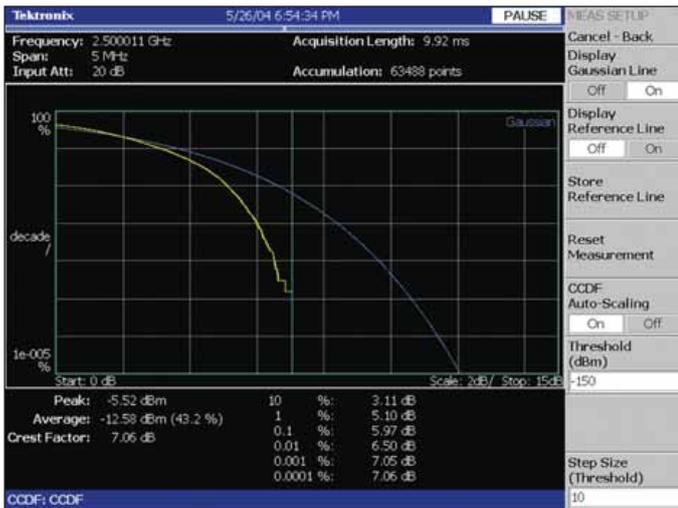


図3-21. CCDF測定

統計領域の測定

CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function、相補累積分布関数)

CCDF (相補累積分布関数) 表示は、測定信号の平均パワーを超える信号パワーが、水平目盛で表示される振幅を超える確率を表示します。水平軸は、平均信号パワーを表すdB目盛です。確率は、垂直軸に対数目盛でパーセント値と表示します。

CCDF解析は、時間とともに変化するクレスト・ファクタを測定します。このクレスト・ファクタは、CDMAやOFDMを使用する多くのデジタル変調信号にとって重要となります。クレスト・ファクタは、信号のピーク電圧を平均電圧で割った比率となり、dBで表します。

$$C = 10 \log \left(\frac{P_{peak}}{P_{average}} \right) = 20 \log \left(\frac{V_{peak}}{V_{rms}} \right)$$

信号のクレスト・ファクタは、信号の歪みを許容範囲に収めるための送信機または受信機の直線性を決定します。図3-21のCCDF曲線は、測定信号を黄色で、ガウシアン曲線を青色で示しています。CCDFとクレスト・ファクタは、増幅器などの電力消費とデバイスの歪み特性とのバランスを取る必要のあるときには特に重要です。CCDFを、波形上の選択した範囲で使用するときや、ACPなどの歪み測定の比較に使用するとき、信号の統計的変化が増幅器の出力でどのように歪みを発生しているかがわかります。

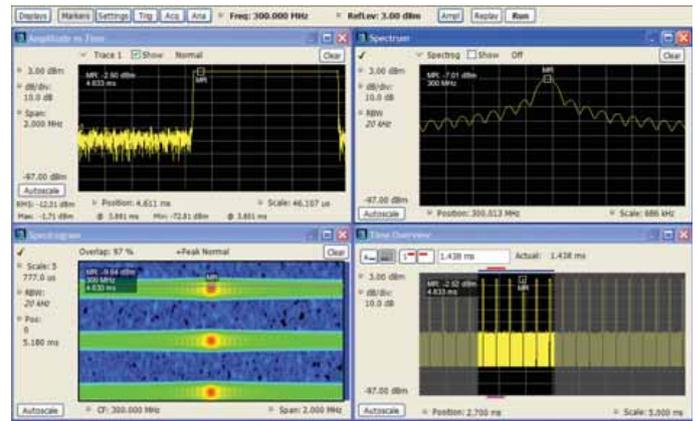


図3-22. 各表示上のマークは、アキュイジション・メモリ内の同じポイントを表す

時間相関の取れたマルチドメイン解析

信号を取込んでメモリに保存すると、図3-22に示すような、時間相関の取れた各種表示によって信号を解析できます。

この機能は、特にデバイスのトラブルシューティングと信号の特性評価に有効です。これらの測定はすべて、同じ時間領域サンプル・データによって実行されます。この方法には次の2つの重要な構成上の利点があります。

- 1回のアキュイジションによる周波数、時間および変調の各領域における総合的な信号解析。
- 時間相関の取れた周波数、時間および変調の各領域における特定イベントの領域間の相関関係。

スペクトラムとスペクトログラム

RTSAは、時間と周波数およびスペクトラムとスペクトログラムの2つの時間相関の取れた画面を表示します。この2つの画面は、時間オーバービューと振幅対時間解析とともに図3-22に示します。各画面のマークは、アキュイジション・メモリ内の同じポイントに相当します。

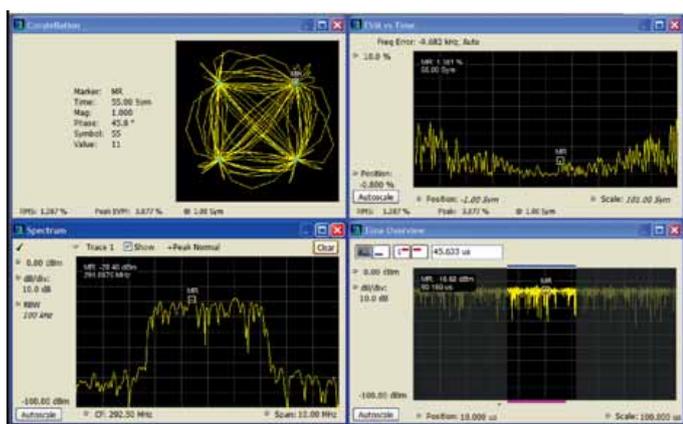


図3-23. 時間オーバービュー表示、EVM対時間表示、時間相関の取れたマーカを表示したコンスタレーションとスペクトラム表示

変調領域と時間領域との相関

時間領域解析や変調領域解析などのリアルタイム測定モードでは、図3-23に示すように、RTSAは取込んだ信号を複数の方法で表示します。

図3-23の右下のウィンドウは、全アキュジションの時間オーバービュー（パワー対時間）表示です。このオーバービューでは、ブロック内で取込んだすべてのデータを表示するので、他の解析ウィンドウの指標となります。

図3-24の右上のウィンドウでは、左上のスペクトログラムの1フレームのスペクトラムまたはパワー対周波数を表示しています。図3-23の画面と同様に、このウィンドウでは1つのフレームのデータをスペクトラム表示し、時間記録全体をスクロールして任意の時間ポイントにおけるスペクトラムを表示できます。この操作は、スペクトラム・オフセットを調整することで実行できます。またスペクトラム・ウィンドウの周波数領域表示画面に対応する時間の位置を示す紫色のバーが、スペクトログラム・ウィンドウに表示されます。

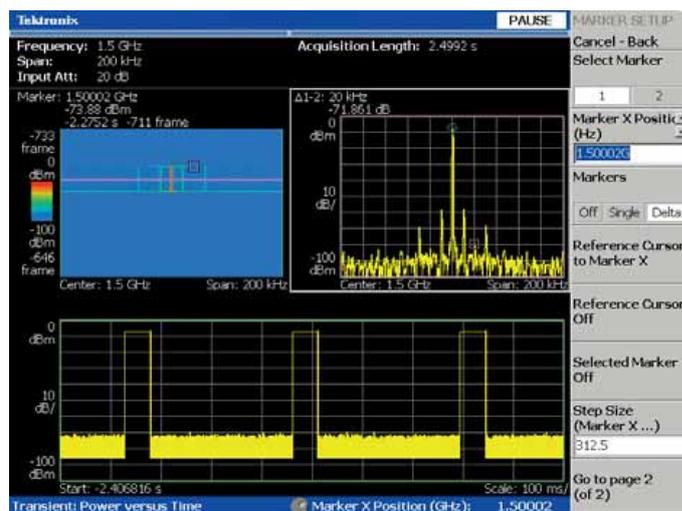


図3-24. スペクトログラム、パワー対周波数およびパワー対時間を表示したマルチドメイン表示

画面下半分のウィンドウ（緑色の輪郭線）には、選択した時間または変調解析の測定結果が表示されます。

図3-23はQPSK変調解析例を示し、図3-24は過渡的なパワー対時間解析例を示しています。緑色の解析ウィンドウは、時間オーバービュー・ウィンドウに表示される時間記録内の任意の場所に配置でき、同じ緑色のバーでその位置が示されます。また解析ウィンドウの幅と位置は、解析長と解析オフセットのコントロールにより調整できます。

第4章：リアルタイム・スペクトラム・アナライザを使用したアプリケーション

今日のRF/マイクロ波の世界では、デジタル・コンピューティングと従来のアナログRF技術とが融合しています。このデジタルとアナログが統合されたRFでの測定環境は非常に複雑なものとなり、RF/マイクロ波の新しい世代のテスト・ツールが必要になります。当社は、RF/マイクロ波設計時の問題点の解決に必要な信号生成や解析機能を提供しています。リアルタイム・スペクトラム・アナライザを使用したアプリケーションについての最新情報は、当社ホームページ (<http://www.tek.co.jp>) をご覧ください。

パルス測定

RTSAはパルス測定に最適で、自動パルス測定ソフトウェアが全機種で装備可能です。機種によっては拡張解析機能が備えられ、またパルス・トレンド情報（測定値のトレンド）を選択できます。従来のSAと違ってRTSAでは、システム立ち上がり時間/立ち下り時間（各10ns）、最小パルス幅（最小50ns）、110MHzまでの変調帯域幅の各性能を規定しています。より高速な立ち上がり時間やパルス測定、あるいはより広変調帯域の測定には、RTSAのオフライン・ソフトウェアと当社のDP070000シリーズおよびDSA70000シリーズを組み合わせて使用することにより、20GHzまでの周波数帯域で自動パルス測定が可能です。

オシロスコープのアクイジション・エンジンに組み込まれているSignalVuは、RSA6000シリーズ・スペクトラム・アナライザと同様なユーザ・インタフェースを持ち、オシロスコープのすべての機能とメモリを使用することができます。

立ち上がり時間、立ち下り時間、ドループ、リップル、占有スペクトラム、パルス幅などのキャリア周波数のパルス情報は、パルス測定解析ソフトウェアで測定して特性評価が行えます。

パルス・トレンド統計情報には、PRF、デューティ・サイクル、パルス間位相の各情報が含まれます。RSA6000シリーズは統計情報をグラフとして表示し、また測定結果統計をFFT処理することにより、対象機器の診断情報が得られます。

レーダ

パルスの時間領域と周波数領域の測定を1つの機器にまとめることにより、レーダ・テストが簡単に行え、また試験効率を改善できます。RTSAは、レーダ送信機テスト解析に必要な測定機器（オシロスコープ、スペクトラム・アナライザ、ベクトル・アナライザ、パワー・メータ、ピーク・パワー・メータ）を置き換えることができる測定能力を持っています。またDPXでは、他の機器では検出できない干渉信号や機器の非直線性を表示できます。

RTSAによるレーダ・テストについてのアプリケーション・ノートや技術文書を各種用意しています。

RFID

RFIDシステムは、さまざまなアプリケーションに使用されています。携帯電話での代金決済や情報交換に使用されているトランザクション用NFC（短距離無線通信）、車の安全性を高めるため、最近法制化されたTPMS（タイヤ空気圧モニタ・システム）、品物のトラッキング用、あるいはEPC Globalによる商品のアセット・トラッキング用のRTLS（リアルタイム・ロケーション・システム）などがあります。RFIDシステムは、HF（135KHz）からマイクロ波（2.4GHz）までの周波数で、パッシブおよびアクティブ・モードのさまざまパワー・レベルで動作します。多くのRFIDシステムは、無線局免許の不要なISM（Industrial Scientific and Medical）バンドで動作しますが、ただし他のRFIDシステムや同じバンドで動作する通信機器との干渉に影響されやすくなります。

RTSAは、産業用、国際的および専用のRFID標準規格のほとんどをサポートしています。タグとリーダ/ライタの性能と相互動作の測定にRTSAを使用すると、素早く簡単に再現性の高い測定の設定ができ、また信号をロング・メモリに取込むことができます。

スペクトラム管理とサーベイランス（監視）

設備の安全性を高め、また使用周波数帯を保護するためには、干渉をできるだけ軽減する必要があります。高レベル信号中に存在する低レベルで間欠的な干渉信号の検出や、突発的なノイズの特性評価は、通常のスペクトラム・アナライザではほとんど不可能です。

ライブRF表示ができるDPXは、今まで存在さえ気がつかなかった信号を観測することができます。RTSAにより、見つけることの困難な信号を探し出して検出できるようになります。業界をリードする取込周波数帯域とダイナミック・レンジ性能を持ったRTSAは、測定対象バンドの信号を100%の確率で検出できることを規定している唯一のスペクトラム・アナライザです。

DPX DensityトリガやFMT（周波数マスク・トリガ）などの優れたトリガ機能により、低レベル信号やインパルス信号に対して100%の確率でトリガをかけて検出し解析できます。

無線通信

最新の無線通信では、ますますソフトウェアによってコントロールと操作が行われるようになってきています。変調の動的動作、パワー、チャンネル制御、チャンネル・ローディングなどのアナログ

機能は、デジタル回路に置き換わりつつあります。最新の無線通信では、パワー、周波数、変調、コーディング、統計などを瞬時に切り替えることができます。

時間解析領域と周波数解析領域を切り替えなくても観測できるよう、RTSAでは時間相関の取れたデータを、時間、周波数、変調、コードおよび統計のマルチドメインで解析できます。信号を一度取込んだ後は、その信号データにより各種解析が可能となります。

DPXライブ・スペクトラム表示機能とFMTの組み合わせは、無線通信のデバッグに強力なサポート・ツールとなります。DPXでは、ソフトウェア障害や低レベル・スペクトラム・ノイズによるインパルス・ノイズなど、間欠的なトランジェント・イベントを検出でき、FMTではそのトランジェント・イベントでトリガをかけることができます。FMTと外部トリガ出力を併用すると、他の機器に対してトリガをかけることができます。オシロスコープやロジック・アナライザにトリガをかけることで、回路の詳細まで入り込んでイベントを検出でき、問題の根本原因を識別できます。当社のiView機能やミックスド・シグナル・オシロスコープは、ピコ秒精度を持つアナログとデジタルの信号に対して、正確な時間測定や表示が行えます。ソフトウェア・コードのサブルーチンやラインは、実際に取込んだスペクトラム・イベントとの時間相関を取ることができます。

パワー・アンプのテスト

移動無線通信の音声通信は、比較的安定した状態のトラフィックで動作します。高速データ・サービスが可能なHSDPA/HSUPA、1xEV-DO、WiMAXなどの最新の無線通信規格では、出力電力は急激に変化する負荷に対応しなければなりません。変調品質、スペクトラムの漏洩、パワー効率はアンプの設計時には常に問題となります。

高効率化、高性能化およびコスト削減の必要性によるリニアライゼーションの改善によって、適応型DPD（デジタル・プリディストーション）などを使用したデジタル技術が、携帯電話のアンプ設計には一般的になっています。アンプ設計時には、メモリ効果、バイアス・フィードスルーおよびその他のトランジェント・スペクトラムの再生障害に注意する必要があります。

メモリ効果を見つけだすことができるDPXライブ・スペクトラム表示を持ったRTSAは、アンプ設計に最適です。また時間相関の取れた振幅統計、変調品質、隣接チャンネル・パワーの解析が行えるRTSAは、アンプ設計には欠かすことのできない機器となっています。

マイクロフォニックと位相跳躍（Phase-Hits） 解析

マイクロフォニックと位相跳躍問題は、開発プログラムを中断させ、製造ラインをストップさせてしまうと言われています。最新の通信システムやエレクトロニクス機器はより小型化されているため、機

器内部で発生する予測できない変調（信号変動）に対しては、影響を受けやすくなっています。従来、この間欠的に発生する障害イベントの検出と識別は、非常に時間のかかる作業でした。

最高で毎秒48,000回のスペクトラム更新ができるDPXライブ・スペクトラム表示により、RTSAはこのイベントを確実に検出できます。問題の根本原因解決のための検出、特性評価、測定、時間相関は、FMT（周波数マスク・トリガ）と外部トリガ出力を組み合わせることで、より簡単に実現できます。

EMI/EMC

EMC（電磁適合性）測定には、設計、検証、規格適合試験の各段階で、適切な測定機器と測定技術が必要です。多くの高性能電子デバイスは、業界、国内および国際的な適合性規格で規定される一方、その規格以上の性能を持っていることを実証するためのテストが必要です。低レベル・ノイズや内部インパルス・ノイズに対する耐性、あるいはクロックとフェーズ・ロック・ループの安定性などによる性能への影響を少なくするためには、適切なデバイス性能やRF製造技術が必要となります。デジタル技術の導入により現在の電子デバイスの取り扱う信号は、複雑化し短時間の現象や急激に変動することが多くなってきています。従来の測定機では取込むことが困難なこのようなイベントに対して、多くの機能と優れた性能を持つ当社のリアルタイム・スペクトラム・アナライザなしでは、測定が難しくなっています。

第5章：用語解説

用語集

アキュイジション — 時間的に連続した整数個のサンプルあるいは信号の取込み。

アキュイジション時間 — 1つのアキュイジションで表される時間の長さ。

振幅 — 電気信号の大きさ。

振幅変調 (AM) — 搬送波 (キャリア) の振幅を、送信信号 (変調信号) の波形に応じて変化させる方式。

解析時間 — 解析表示の入力として使用される、1ブロックからの時間的に連続したサンプルのサブセット。

解析表示 — リアルタイム測定結果を表示するために使用されるウィンドウ。

キャリア — 変調を行うためのRF信号あるいは搬送波。

キャリア周波数 — 搬送波信号の正弦波周波数。

中心周波数 — スペクトラム・アナライザ表示で、周波数スパンの中心に相当するスペクトラムの周波数。

CZTチャープZ変換 — DFT (離散フーリエ変換) の計算を行う効率的な演算方式CZTは従来のFFTに比較して、計算量は増加するが出力周波数のポイントを選ぶことができる汎用性を持つ。

コードグラム — CDMAコード・チャンネルがX軸、時間がY軸で表されるコード・チャンネル対時間対パワー表示。パワー・レベルは色別で表示。

CW信号 — 連続した正弦波信号。

dBfs — フル・スケールに対するデシベルで、パワー・レベルを表す単位。内容により表示画面のフル・スケール、またはA/Dコンバータのフル・スケールとなる。

dBm — 1mWに対するデシベル値で、パワー・レベルを表す単位。

dBm — 1mVに対するデシベル値で、電圧レベルを表す単位。

デシベル (dB) — 2つの電力比の対数に10を掛けたもの。

DFT (離散フーリエ変換) — 時間領域でサンプルした信号の周波数スペクトラムを、数学的に演算する処理方法。

表示ライン — 波形表示の水平または垂直ライン。設定したレベル、時間、周波数での視覚的な (または自動的な) 比較の基準として使用される。

歪み — 信号の劣化。非線形動作の結果発生することが多く、不要な周波数成分を含む。高調波歪みおよび相互変調歪みが一般的。

DPX (デジタル・フォスファ解析) — 時間の経過によって変化する信号を、ライブのように表示する信号解析および圧縮方式。まれにしか発生しないトランジェント・イベントの検出が可能。

DPXライブ・スペクトラム表示 — スペクトラム解析に使用するDPX技術。DPXライブ・スペクトラム表示により、周波数領域でトランジェント・イベントが観測できます。ダイナミック・レンジ - 信号の最小値と最大値の比率をdB単位で表したもの。

FFT (高速フーリエ変換) — DFT (離散フーリエ変換) を演算するための数学的な効率的な手法一般的なFFTアルゴリズムは、入力サンプル数と出力サンプル数が2の累乗で等しいことが必要。

周波数 — 信号が振動するレート。ヘルツまたは毎秒あたりの周期で表される。

周波数領域表示 — 周波数の関数として、信号のスペクトラム成分のパワーを表示。

周波数ドリフト — 一定時間内における周波数の緩やかなシフトまたは変化で、Hz/sで表される。

FMT (周波数マスク・トリガ) — 周波数領域で発生する特定のイベントでトリガをかけることが出来るリアルタイム・トリガ。トリガ・パラメータは画面のマスクで定義する。

周波数変調 (FM) — 搬送波 (キャリア) の周波数を、送信信号 (変調信号) の波形に応じて変化させる方式。

周波数レンジ — デバイスが動作する周波数の上限と下限の範囲。

周波数スパン — 2つの周波数間の周波数範囲。

マーカ — 波形トレース上の視覚的に識別できるポイント。そのポイントで表される領域やレンジの値を読み取るために使用される。

変調 — 信号の情報を搬送波に乗せて送信するための操作をいう。

ノイズ (雑音) — 信号に重畳する不要でランダムな信号。

ノイズ・フロア — 観測可能な入力信号の最小レベルを表すシステム特有のノイズ・レベル。最終的に熱雑音 (kTB) によって制限される。

ノイズ帯域 (NBW) — ノイズまたはノイズに似た信号の絶対パワーを計算するために使用するフィルタの帯域。dBm/Hzで表される。

捕捉確率 (POI) — 設定したパラメータで信号が検出できる確率。

リアルタイム帯域幅 — リアルタイムで連続した取込みができる周波数スパン。デジタイズおよびリアルタイム・スペクトラム・アナライザのIF帯域の性能で決まる。

リアルタイムでシームレスな取込み — 長期間にわたるRF信号の動作を時間領域データとして連続して取込んで保存する機能。

リアルタイム・スペクトラム解析 — DFTにより、測定信号の帯域を、時間的隙間を空けずに連続して解析するスペクトラム解析技術。リアルタイム・スペクトラム解析は、設定したスパン、分解能帯域幅および時間パラメータの範囲で、100%の確率でトランジェント信号にトリガをかけて表示可能。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザ — RF信号中の捕捉困難なRFイベントでトリガをかけることができ、その信号を連続してメモリに取込んで、周波数、時間および変調の各領域で解析できる測定器。

基準レベル — アナライザ表示で、画面の最大レベルの目盛ラインの値。

分解能帯域幅 (RBW) — スペクトラム・アナライザ表示で、最も狭い測定可能な周波数バンド幅。RBWにより、2つの隣接した信号成分を識別する能力が決まる。

感度 — スペクトラム・アナライザが信号として表示できる最小レベルの値。通常、表示平均ノイズ・レベル (DANL) で表される。

スペクトログラム — 周波数がX軸、時間がY軸で表される周波数対時間対振幅表示。パワー・レベルは色別で表示。

スペクトラム — 信号の周波数に対するスペクトラム成分のパワーを周波数領域で表示。

スペクトラム解析 — RF信号の周波数成分を測定して解析する技法。

ベクトル信号解析 — RF信号の変調の特性を評価する測定技法。ベクトル解析は振幅と位相の両方に対して行われる。

略語のリファレンス

ACP — 隣接チャンネル・パワー

ADC — A/Dコンバータ

AM — 振幅変調。

BH4B — ブラックマン-ハリス4Bウィンドウ

BW — 帯域幅

CCDF — 相補累積分布関数

CDMA — 符号分割多重接続

CW — 連続正弦波

dB — デシベル

dBfs — dBフル・スケール

DDC — デジタル・ダウンコンバータ

DFT — 離散フーリエ変換

DPX — デジタル・フォスファ表示、スペクトラムなど

DSP — デジタル信号処理

EVM — 変調精度

FFT — 高速フーリエ変換

FM — 周波数変調

FSK — 周波数偏移変調

IF — 中間周波数

I/Q — 同相/直交位相

LO — 局部発信器

NBW — ノイズ帯域幅

OFDM — 直交周波数分割多重方式

PAR — ピーク対アベレージ比

PM — 位相変調

POI — 捕捉確率

PRBS — 疑似ランダム・バイナリ・シーケンス

PSK — 位相偏移変調

QAM — 直交振幅変調

QPSK — 四位相偏移変調

RBW — 分解能帯域幅

RF — 無線周波数

RMS — 実効値

RTSA — リアルタイム・スペクトラム・アナライザ

SA — スペクトラム・アナライザ

VSA — ベクトル・シグナル・アナライザ

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。

11/09

37Z-17249-4



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
お客様コールセンター TEL:0120-441-046
ヨッ!良い オシロ
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