

# リアルタイム・スペクトラム解析の処理系

ホワイトペーパー

## 製品

- | R&S®FSW
- | R&S®FSVR

本ホワイトペーパーでは、R&S®FSW のリアルタイムオプション（FSW-B160R）と R&S®FSVR のリアルタイム処理の処理系について説明します。また、技術的処理の他にアプリケーションについてもご紹介します。

# 目次

1	リアルタイム解析 .....	4
1.1	リアルタイムとは.....	4
1.2	リアルタイム解析のアプリケーション.....	5
2	リアルタイム・アナライザのリアルタイム処理系 .....	7
2.1	FFT 窓.....	8
2.2	FFT 長と窓長.....	11
2.3	FFT 更新レート.....	11
2.4	FFT オーバーラップ.....	12
2.5	FFT 結果の時間分解能 .....	14
2.6	Probability of Intercept (POI).....	16
2.7	ズーム・モードで再生する .....	18
3	リアルタイム・スペクトラムのトリガ .....	19
3.1	周波数マスクトリガ .....	19
3.1.1	周波数マスクトリガ (FMT) のセットアップ.....	20
3.1.2	技術的バックグラウンド.....	21
4	リアルタイム信号の表示モード .....	23
4.1	スペクトログラム.....	23
4.1.1	パラメータ.....	24
4.2	リアルタイム・スペクトラムのスペクトログラム.....	28
4.3	残光モード.....	29
4.3.1	パラメータ.....	31
5	オーダー情報 .....	34



# 1 リアルタイム解析

## 1.1 リアルタイムとは

今日のスペクトラム・アナライザの測定速度は、長い進化の過程で改善されてきました。R&S®FSE のような従来のスペクトラム・アナライザでは、固定の中間周波数 (IF) へ局部発振器 (LO) の周波数の掃引と入力信号をミキシングすることで周波数スペクトラムを測定していました。信号は何段かのミキシングを経て徐々にダウンコンバートされ、最終的にアナログの分解能フィルタ (画面上の各周波数点で得られる周波数分解能を決定します) を通過します。そのため、測定時間は分解能フィルタの設定時間と、第 1 局部発振器がその最終周波数から開始周波数へ戻るために必要な時間 (再トレース時間) に依存していました。

処理能力の向上に伴い、R&S®FSE の次世代アナライザ (R&S®FSP や R&S®FSU) は狭帯域用の FFT フィルタを備えるようになりました。選択された周波数スパンのトレースを表示するために、複数の狭帯域 FFT 結果を結合させます。狭帯域 RBW フィルタの設定時間に比べて FFT に対する計算時間のほうが短いため、FFT 法は従来の掃引法にと比較して測定速度の大幅な改善を実現しました。

最新世代のスペクトラム・アナライザである R&S®FSV や R&S®FSW は、狭帯域分解能にける FFT 法の活用を大幅に進化させています。さらに、この最新世代のスペクトラム・アナライザは掃引測定に複合デジタル・フィルタを導入し、アナログ掃引に比べて掃引速度が最大 30 倍も高速化されています。

測定速度は、R&S®FSE の 20 掃引/秒から R&S®FSV や R&S®FSW の 1,000 掃引/秒 以上へと劇的に向上しています。しかし、進化の過程である特性が残りました。最新世代である R&S®FSV でも、掃引の終了と、次の掃引の開始の間にある信号を検出できないことです。データ収集時に存在するギャップ (いわゆる「ブラインド時間」) は最新世代のスペクトラム・アナライザでは短縮されていますが、依然として存在しています (図 1-1)。

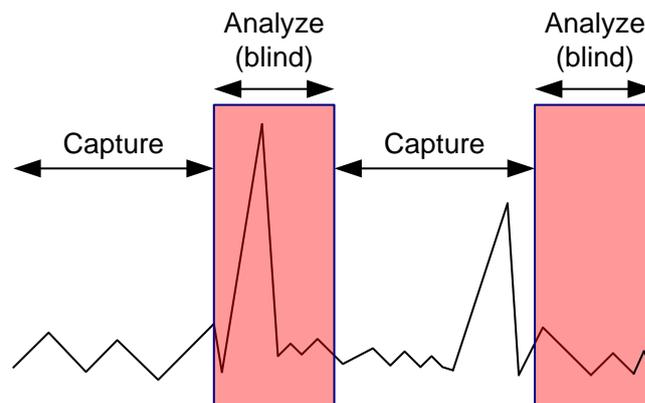


図 1-1 FFT アナライザを使用した場合の連続的なデータ収集および解析の例

リアルタイム測定とはどのような信号も逃さないということです。どうすればブラインド時間を取り除くことが可能になるのでしょうか。

その答えは、高分解能を有する広帯域アナログ／デジタル・コンバータ（ADC）です。16 ビット ADC では、一回の測定で広い周波数範囲（最大 160 MHz など）をキャプチャでき、局部発振器（LO）を変化させなくても十分なダイナミックレンジが得られます。これらの広帯域 ADC と、専用のハードウェア（FPGA など）に実装される高速 FFT アルゴリズムを組み合わせることが、リアルタイム・スペクトラム・アナライザを設計する上での基本となっています。

リアルタイム・スペクトラム・アナライザの主な特徴は以下の通りです。

- サンプルングと FFT 計算の並列処理:  
FFT を実施しながらデータ収集を続けます。
- FFT アルゴリズムの高速処理:  
計算速度は、未処理データによる“蓄積”の増大を避けるために十分高い値でなければなりません。FFT 処理が遅いと、キャプチャメモリがオーバーフローし、その結果としてデータ損失（新たなブラインド時間）が生じます。

図 1-2 は、ブラインド時間を避けるためキャプチャと解析の並列処理を行った概念図です。並列処理を行うリアルタイム・スペクトラム・アナライザを使用することで未検出の信号（ブラインド）をなくすことができます。

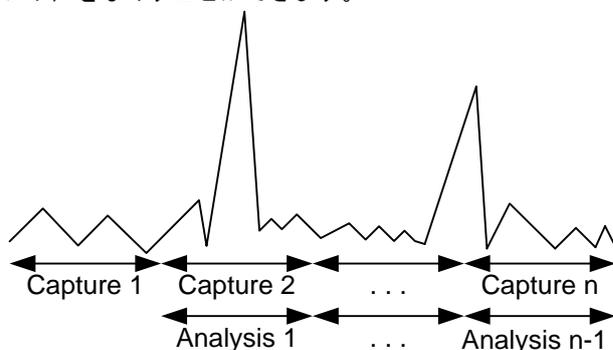


図 1-2 リアルタイム・アナライザを使用した場合のキャプチャと解析の並列処理

## 1.2 リアルタイム解析のアプリケーション

リアルタイム測定の代表的なアプリケーションを紹介します。ショート信号、セルダム信号、信号のばらつき評価などの測定では、イベントを1つでも見逃すことは望ましくありません。代表的なアプリケーションとしては、特定の周波数帯の解析が挙げられます。周波数ホッピング・アルゴリズムが実装された被測定物（DUT）を想定してください。DUT が望ましい順序で周波数を切り替わっているかどうかを解析するには、1つのステップも失うことができません。VCO をその目標周波数へチューニングするなどのトランジェント解析も、リアルタイム・アナライザの代表的アプリケーションです。アナライザは、ギャップを生じさせることなく全てのチューニング・プロセスをキャプチャし、周波数とレベルの最短のグリッチでさえ記録することができます。

信号検出におけるほとんどの場合において、対象となる特定信号の変化に対してトリガをかける機能を測定器が搭載していることは非常に重要です。R&S®FSVR や R&S®FSW-B160R に搭載されている周波数マスクトリガ (FMT) は、アナライザによって表示されるあらゆるスペクトラム形状でのトリガリングが可能です。代表的なアプリケーションとして 2.4 GHz 受信機の解析があります。この ISM バンドでは、検討対象のシステムに必要な信号に加えて、他の多くの信号が見つかる場合があります。分布している信号が検討対象のシステムへ与える影響を解析するために、FMT は周波数マスクを超過するとデータのキャプチャをすぐに停止します。図 1-3 を見ると、左側のスペクトラム・アナライザの Max Hold トレースでは信号の詳細情報が示されていませんが、右側の残光モードでは時間とともに信号が変化の様子が詳しく見て取れます。ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザと残光モードは、全く情報を失わず、信号発生確率などの時間的に変化する情報を、明瞭かつ正確に評価することができます。

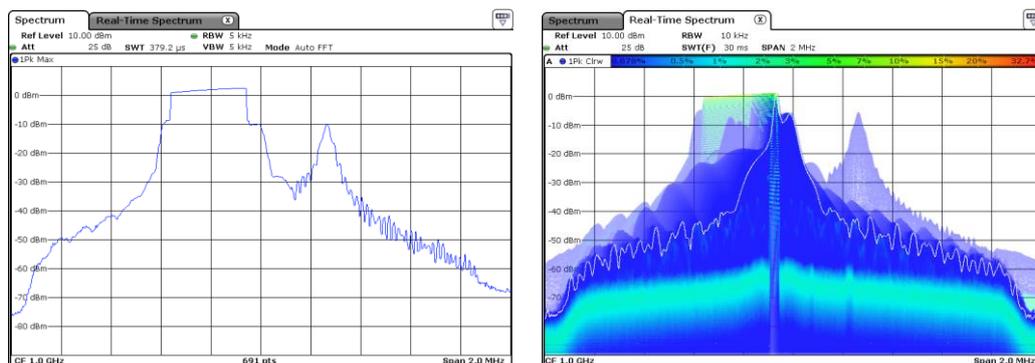


図 1-3 スペクトラム・アナライザの MaxHold トレースと残光モードスペクトラム・トレースの比較

次章では、ブラインド時間を生じることなくデータをキャプチャするメカニズムについて説明しています。また、周波数マスクのトリガについても解説します。

## 2 リアルタイム・アナライザのリアルタイム処理系

ハイエンドのシグナル・スペクトラム・アナライザ R&S®FSW は FSW-B160R オプションを追加するだけでリアルタイム・アナライザとしてアップグレード可能です。一方、R&S®FSVR はリアルタイム機能と併せて、従来のシグナル・スペクトラム・アナライザの機能を提供するリアルタイム解析専用器です。

RF 性能の面では、R&S®FSW-B160R はハイエンドの R&S®FSW の RF 性能を継承しています。R&S®FSVR は、R&S®FSV シグナル・スペクトラム・アナライザの RF 信号処理部分のデザインに基づいて設計されています。

リアルタイム解析の中核となるのがデジタル・バックエンドです。既に説明したように、リアルタイム解析において重要な点は、データ収集とデータの処理を並行して行うことにあります。これを実現するために、R&S®FSW と R&S®FSVR のデジタル・バックエンドは一連の高性能 ASIC と高性能 FPGA を備えており、これらにキャプチャされたデータ用の大容量メモリを組み合わせています。この組み合わせによって、ブロック図内の複数のステージでデータを処理できます。この経路の最終ステージとなるのが CPU です。事前処理されたデータを読み込み、必要なスケール情報を適用し、得られた曲線を画面上に表示します。

すべてのリアルタイム表示モードと周波数マスクトリガは、ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザ上で並列処理されています。これにより、リアルタイム解析の結果を一度に複数のグラフで表示することが可能で、散発的なイベントのキャプチャに加えて周波数マスクトリガを使用できることを意味しています。この柔軟性はローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザのユニークな特徴です。

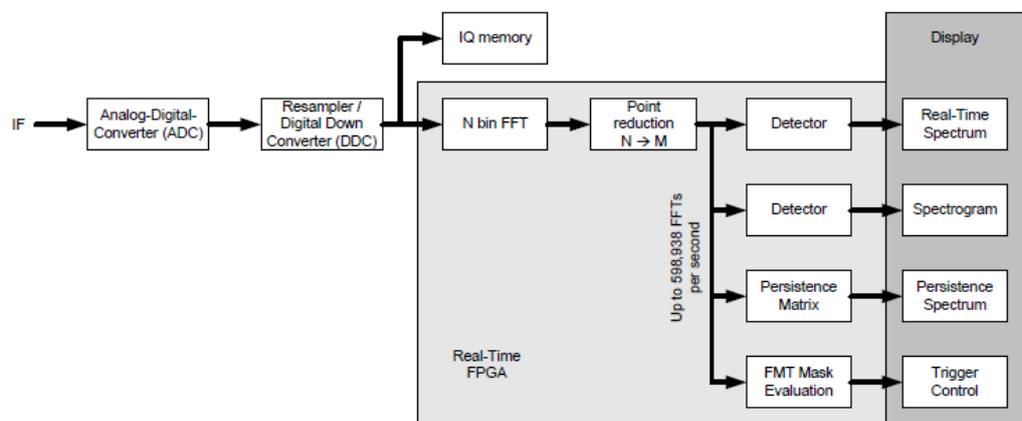


図 2-1 ロード・シュワルツのリアルタイム・アナライザのデジタル・リアルタイム処理系部分の信号フロー・チャート図

図 2-1 に、アナログ／デジタル・コンバータ（ADC）から表示部までの信号のフロー・チャート図を示します。ADC は、一定のサンプリングレート（R&S®FSVR : 128 MHz、R&S®FSW : 1 GHz）で動作します。ADC は生データをリサンブラとデジタル・ダウンコンバータへストリーミングし、リサンブラとデジタル・ダウンコンバータは入力信号をデジタル・ベースバンドへ変換します。なお、このデジタル・ベースバンドの帯域幅は選択された周波数スパンと同じであり、サンプル・レートはこの帯域幅におけるナイキスト定理を満たしています。複合ベースバンド・サンプル・レートと選択された周波数スパンとの比は 1.2 となります。これは、

例えば 40 MHz スパンで 50 MSa/s (複素数)、160 MHz スパンで 200 MSa/s を行うことを意味します。より小さな帯域幅では、このサンプル・レートは自動的に小さくなります。解析に使用できるサンプル数はサンプル・レートによって決まります。リ・サンプリングの終了後、FFT を使ってデータストリームは周波数領域へ変換されます。

R&S®FSVR では、各 FFT は 1024 の bin またはデータ・ポイントで構成されます。FFT アルゴリズムを実行している FPGA は、最大で 250,000 の FFT/s を実現します。R&S®FSW の FSW-B160R オプションでは、FFT 長は 16,384 bin から最低 1024 bin まで柔軟に設定できます。FFT 長と操作モードによっては、R&S®FSW は最大 585,938 FFT/s の FFT 更新レートを実現します。

FFT 処理プロセスと並行して、リ・サンプリングされたベースバンド・データは解析器の I/Q メモリに蓄積されます。ここでは、キャプチャされた領域へのズームイン、あるいは LAN や GPIB 経由での I/Q サンプラの読み出しなどリアルタイムではない追加のオフライン後処理が行われます。I/Q メモリは回路バッファとして実装されています。つまり、メモリが一杯になると最も古いサンプルから上書きされていきます。

ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザはリアルタイム・モードで時間領域の表示を可能としています。時間領域画面では、パワー対時間とパワー対時間のウォーターフォールで表示されます。

R&S®FSW リアルタイム測定は「ハイレゾ」と「マルチドメイン」2つのモードがあります。ハイレゾ・モードでは FPGA の全てを FFT 計算に費やし、マルチドメイン・モードでは FPGA の一部を時間領域表示に使用しています。そのため、ハイレゾ・モードに比べマルチドメイン・モードの最大帯域幅は 100 MHz に制限され、周波数分解能も制限されています。

## 2.1 FFT 窓関数

多くの技術者は、周波数領域信号は一般的な時間領域信号と対比しており、その逆もまた然りということに理解しているでしょう。sin 波は周波数領域で 2 つのディラック・パルスであり、パルス信号は Si 関数に対応します。それらは無限連続フーリエ変換では真となりますが、すべてのデジタル信号処理は個々の時間でサンプルされた信号の有限数です。そのため、離散フーリエ変換 (DFT) は周波数領域に時間領域信号を変換するために最もよく利用されます。最もよく知られている DFT アルゴリズムは高速フーリエ変換 (FFT) です。サンプルされた有限の信号は連続的な無限の信号と同じ情報が含まれている場合に限り、DFT は連続的な変換と同じ結果となります。sin 波を例にとってみると、2 倍以上の周波数でサンプルされ、かつ、1 周期の正確に整数倍である場合は、FFT アルゴリズムのプロセスでもディラック・パルスとなります。その他のほとんどの場合では、周波数領域の結果にいわゆる「スペクトル・リーク」「スカルップ・ロス」「プロセス・ロス」といった現象が現れます。

FFT 処理の前の時間領域で窓関数を定義することによって、それらの現象を抑えることができます。窓関数は信号を正確に窓長の周期にしています。一般的に、窓長  $N_{\text{window}}$  は FFT 長  $N_{\text{FFT}}$  と同じです。しかし、いくつかの特別な場合において、FFT 長より短い窓長が使われます (2.2 章に示します)。

さまざまな特性の窓関数が存在しています。一般的には、スペクトル・リーク、強度の正確性、周波数分解能の特性が窓関数を決定する際に影響します。有限長に制限された信号をサンプルした場合にはいわゆる矩形窓関数が自動的に適応されます。この場合、窓長はサンプル取得長と等しくなります。

異なる窓関数は窓関数でとらえられた信号のスペクトラム表現だけでなく時間領域表現にも影響を与えます。図 2-2 では、矩形窓関数と比べブラックマン窓関数により減衰（重みづけ）された様子が示されています。

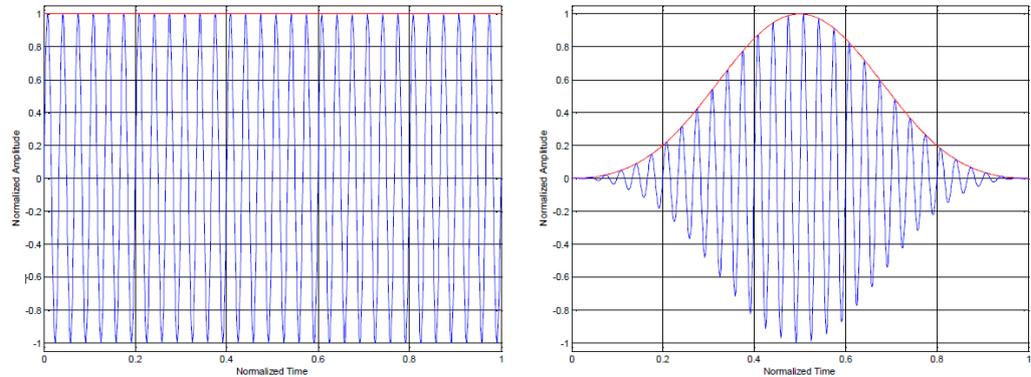


図 2-2: 時間領域での sin 波信号。異なる窓関数を適応した : 左 - 矩形窓、右 - ブラックマン窓

パルスなどのレアなイベントでは、窓関数の位置はレベル確度の面からみると明らかに異なっています。窓関数の中央にパルスが位置している場合は正しいパワーが表示されます。窓関数の端のほうにパルスが位置するにしたがって、明らかに減衰されてしまいます。この現象はリアルタイム・アナライザではオーバーラップ処理を十分に行うことで最小化されています(2.4 章を参照してください)。

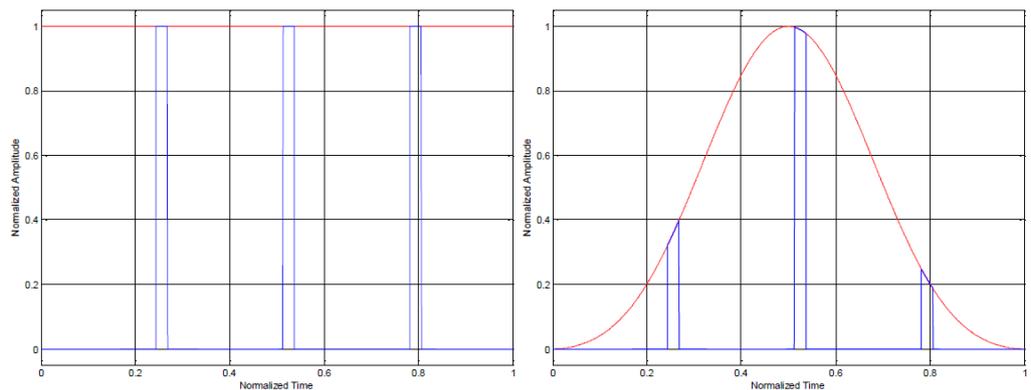


図 2-3: 時間領域でのパルス信号。異なる窓関数を適応した : 左 - 矩形窓関数 - 重みづけ無し、右 - ブラックマン窓関数 - 右と左のパルスが強く減衰されている。

初めに説明したように、窓関数は通常、周波数領域の特性によって選択されます。図 2-4 は図 2-2 の sin 波信号のスペクトルを示しています。ブラックマン窓と矩形窓では形状が異なります。ブラックマン窓関数では明らかにスペクトル・リークが減衰されています。つまり、全体のスペクトル範囲において減衰がありません。これに対して、矩形窓関数では最も良い周波数分解能を提供することができます。つまり、最も狭くローブを描きます。強い信号下で微弱な信号を見つける場合、スペクトル・リークがないためブラックマン窓が良い選択肢となります。同じようなパワーで隣接した多数のキャリアに対しては、矩形窓を選択することで、含まれるキャリアを高精度に分解することができます。

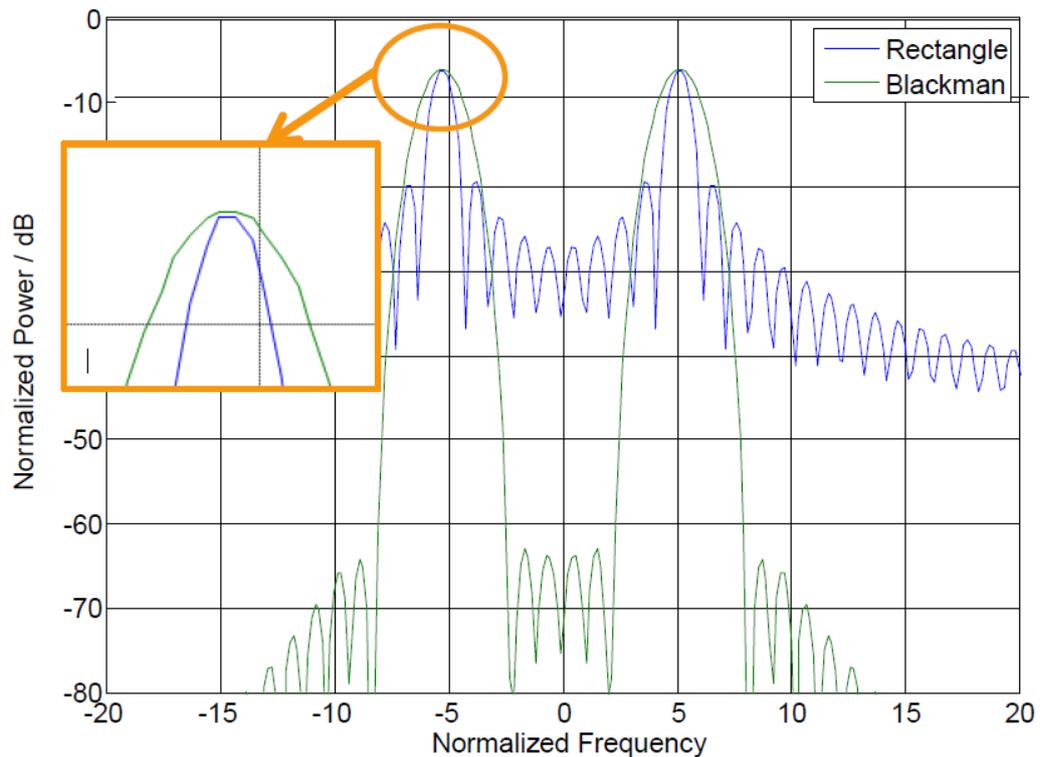


図 2-4：図 2-2 の周波数領域でのスペクトラム。ブラックマン窓は矩形窓より明らかに低いスペクトル・リークを示していますが、メイン・ローブは広がっています。拡大した図は振幅の精度を比較しています。

表 2-1 では、一般的な窓関数のスペクトル・リークと周波数分解能の関係についてまとめています。また、振幅精度はスカラップ・ロスとも呼ばれています。信号の周波数成分は正確な FFT bin に位置していないときは常にどこか二つの bin においてスカラップ・ロスが発生しています。図 2-4 では矩形窓とブラックマン窓で振幅精度は異なっています。この例では約 1 dB ほど異なっています。

多くの FFT スペクトラム・アナライザ（リアルタイム・アナライザ含む）では、最大の性能を発揮するため、いくつかの異なる窓関数が用意されています。表 2-1 を参考に、アプリケーションに最適な窓関数を選択してください。

窓関数	スペクトル・リーク	振幅確度	周波数分解能
ブラックマン	◎	○	△
フラップトップ	○	◎	×
ガウシアン	△	○	△
矩形（無）	△	△	◎
ハニング	○	△	○
ハミング	△	△	○
カイザー	○	○	△

表 2-1：窓関数の特性の一覧

## 2.2 FFT 長と窓長

これまでに紹介してきた FFT 長は 1 回の FFT に使われるサンプル数によって決まります。FFT のほとんどの実装は、2 のべき乗の長さを使用アルゴリズムに基づいています。一般的な長さは 1024 bin です。

測定中の帯域幅（あるいはスパン）により、FFT 長は最小の分解能帯域幅（RBW）または周波数間隔を決定します。サンプリングレートを一定と仮定した場合、より長い FFT 長をとることは、より多くのサンプル数を取ることであり、そのためより長いキャプチャ時間を必要とします。より長い観測（キャプチャ）時間となることで、より良い周波数分解能、すなわちより小さな RBW が可能になるため、表示ノイズレベルが低くなり高感度となります。短い FFT は少ない処理ですみ、そのためより高い FFT 更新レートとなります。

次に、FFT 処理の前に時間領域に適用される窓関数の長さについて説明します。窓長は FFT 長と同じ長さ、もしくはそれ未満となります。窓関数を FFT 長より短くすることで、キャプチャ時間を最小化することができます。この手法により、非常に短いパルスを測定する場合においても、100%補足確率（POI）を提供することができます。（2.6 章で詳しく解説します。）R&S®FSVR は、1024 bin 固定の FFT 長と窓長を使用しています。R&S®FSW はスパン対 RBW の比を選択できるという柔軟性を持っています。前述のように、決められたスパンにおいて、より長い FFT 長をとることで、より小さな分解能（RBW）が得られます。つまり、スパン対 RBW 比が高められます。スパンと RBW はスペクトラム測定において一般的なパラメータであるため、リアルタイム測定で R&S®FSW の FFT 長を変化させることでパラメータを調整可能です。スパンと RBW の設定はもちろん、FFT 長と窓長によって制限を受けます。R&S®FSW では FFT を 1024 bin から 16,384 bin までサポートしています。スパン対 RBW 比が 200 より小さなものについて（1024 bin FFT のブラックマン窓関数に相当します）窓長は 32 bin まで下げることができます。スパン対 RBW 設定はユーザが単に FFT 長と窓長の長さをその都度気にすることなく、適切なスパンと RBW を設定することができます。

## 2.3 FFT 更新レート

連続した FFT は、スペクトル表示の際に使用される生のスペクトラム・データです。これは高精度な周波数マスクトリガができるだけ早く FFT 処理するために必要です。3.1 章で説明するように、各 FFT はマスクを違反した際チェックされます。1 秒当たりの FFT を多くすることはより高い周波数マスクトリガ（FMT）の精度と再現性をもたらします。

さらに、100% POI の最小信号持続時間は FFT 更新レートから直接影響を受けます（2.6 章を参照してください）。つまり、100% POI のイベント最小持続時間は、対応する CW 信号のスペクトル・パワーを正しく表示することができるパルスの最小幅とほぼ同じです。これは真の 100%電力測定値と呼ばれています。パルスの持続時間が FFT 長以上となると、FFT の連続波（CW）信号として表れる時間以上のパルスは、真の 100%電力測定値の最小パルス幅は FFT 長に相当します。

リアルタイム・スペクトログラムで利用可能な時間分解能も FFT 更新レートに依存します。しかし、時間分解能は FFT 更新レート以上に多くのパラメータに依存しています（2.5 章参照）。

R&S®FSVR は最大、250,000 FFT/s の更新レートを提供します。一方、R&S®FSW は最大、585,938 FFT/s を提供します。FFT 更新レートを制限している要因は FPGA の処理能力です。

最後に、時間分解能、オーバーラップ、100% POI の最小信号持続時間などのほとんどのパラメータは FFT レートに依存しています。そのため、リアルタイム・スペクトラム・アナライザのパワーと汎用性はその FFT 更新レートに強く依存します。

## 2.4 FFT オーバーラップ

ショートイベント（FFT キャプチャ時間より短い）の FFT 結果の取り扱いが課題となっており、レベル誤差を最小化するためにリアルタイム・スペクトラム・アナライザを使用して適切に処理する必要があります。

FFT の処理における良くない例として、キャプチャ時間がオーバーラップしない場合を仮定してみましょう。

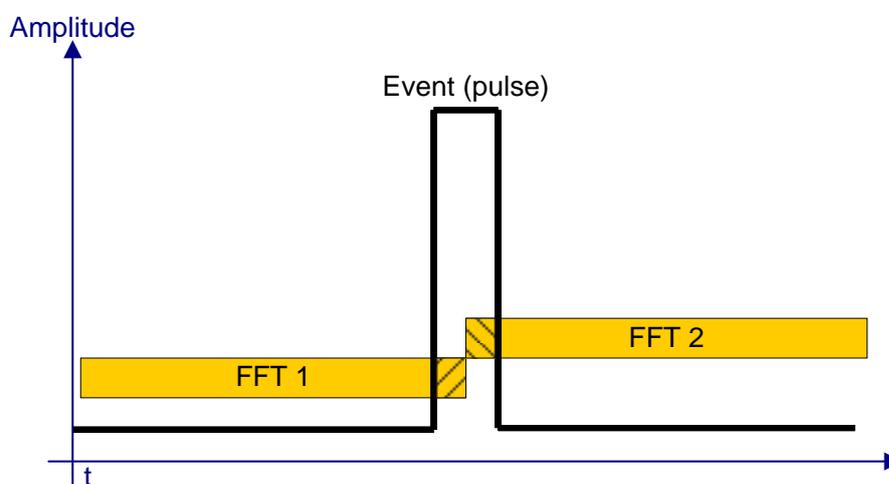


図 2-5: 重複していない2つの連続するFFTタイムフレームを使ってキャプチャしたパルス

図 2-5 に示すように、2つの FFT キャプチャ時間の境界にある短パルスのパワーは、2つの FFT に分配されています。その結果、各 FFT 結果は時間領域での本当のパルスのパワーに比べて低いパワーで表示されてしまいます。

ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザはこのような状況を回避するため、オーバーラップ FFT と呼ばれる技術を採用しています。オーバーラップはその前の FFT で計算された結果のサンプルを「再使用」します。図 2-6 にいくつかのオーバーラップした FFT タイムフレームによってキャプチャされたパルス信号を示します。

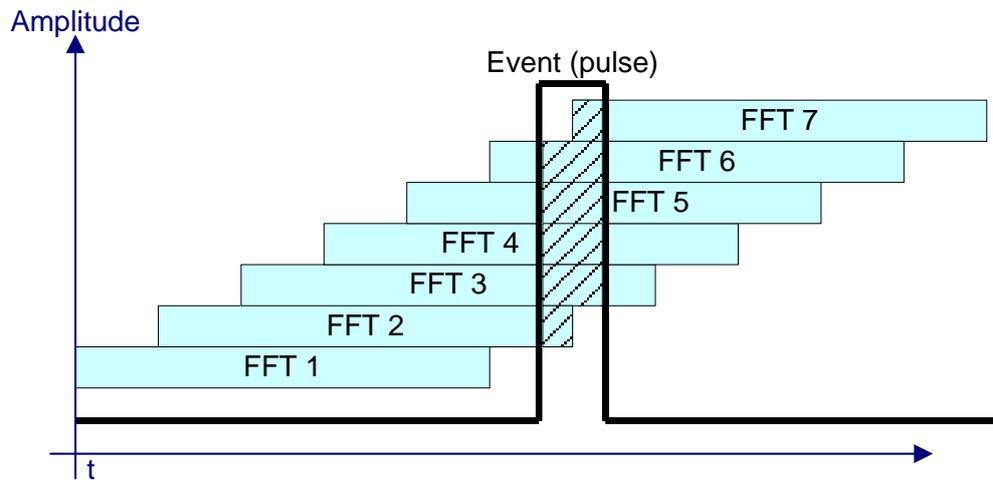


図 2-6 : 連続するオーバーラップFFT タイムフレームによってキャプチャされたパルス

図 2-6 の例では、複数の FFT があり、FFT はパルスの一部だけではなく、いくつかの FFT でパルス全体をキャプチャしています。オーバーラップ係数とは、再使用されたサンプル数と全サンプル数の比を表しています。R&S®FSVR では、80%以上のオーバーラップ係数が使われています。R&S®FSW-B160R ではオーバーラップは多くの要因により変化します。特に、FFT 長と動作モード（ハイレゾ・モードまたはマルチドメイン・モード）に依存しており、窓長が 1024 bin を下回らない限り、50%以上のオーバーラップが得られます。FFT 長を 1024 bin で 160 MHz 帯域幅の場合、R&S®FSW は 2/3 をオーバーラップしており、つまり、684 サンプルが再使用されています。帯域幅に応じて（つまり、現在のサンプリングレートに応じて）、オーバーラップは最大  $\{(N_{\text{window}}-1) / N_{\text{window}}\}$  を達成します。ここで  $N_{\text{window}}$  は窓長です。

最後に、FFT 技術に関するより詳細な図より、適切なオーバーラップ比が必要となる他の問題が見えてきます。FFT アナライザは通常、FFT 計算の前に、非矩形窓関数によりキャプチャした I/Q データへ適用します（2.1 章参照）。図 2-7 より、窓長より短いパルスは、窓の端の近くに位置する場合ほど、強く減衰されることは明らかです。十分なオーバーラップにより、窓の端で減衰されてしまうかもしれない短パルスであっても、その次の FFT では窓の中心で正しく測定されます。

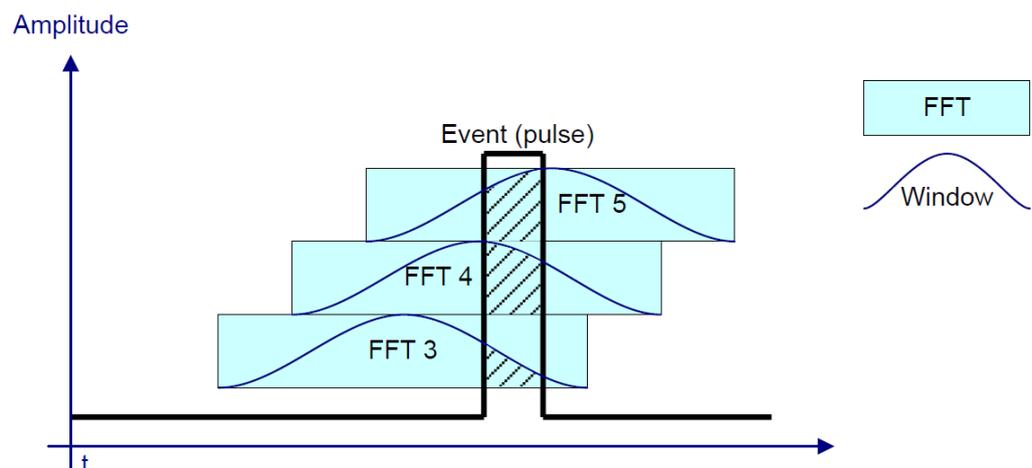


図 2-7 : オーバーラッピングは窓関数によって生じる影響を相殺します

オーバーラップ比が 50% 以上の場合、窓関数によるレベル誤差は無視することができます。オーバーラップはリアルタイムの最大帯域幅と、1 秒間あたりに計算できる最大の FFT 数により直接求めることができます。そのため、リアルタイム・スペクトラム・アナライザを比較する場合、FFT 更新レート（1 秒間あたりの FFT 数）の性能に着目することが重要になります。

## 2.5 FFT 結果の時間分解能

FFT 結果はある時点のスペクトラムを表すものではなく、特定のタイムフレームのスペクトラムを表すものであることに留意しておく必要があります。これが FFT 技術のもう一つの基本的特性です。

この特性の副作用は、連続したイベントが同じ FFT 中の結果として現れうることです。露出時間内に起こったすべてのものを描写する写真と似ています。帯域幅（つまり、サンプリングレート）を考慮すると、露出時間の効果は以下のように計算できます。

$$t_{\text{exposure}} = N_{\text{FFT}} \cdot \frac{1}{f_s}$$

ここで、 $N_{\text{FFT}}$  は FFT 長、 $f_s$  はサンプリングレートです。

しかし、ほとんどのリアルタイム・アナライザはオーバーラップを採用しているため、露出時間は必ずしも時間分解能と同義ではありません（2.4 章参照）。

2 つの連続する FFT は（少なくとも 1 サンプルは）異なっているため、理論的には最大時間分解能は 1 サンプル時間です。リアルタイム表示におけるスペクトログラムにおいて、時間分解能は連続する 2 つのフレーム（ライン）間のステップ幅です。4.1.1 章で説明するように、掃引時間パラメータは時間分解能を決定します。R&S®FSW でリプレイ・ズーム・モードで設定可能な最小掃引時間は 30 ns です。

次の例では、時間分解能と露出時間の差を示しています。CW 信号の周波数が変わっています。周波数が周波数 1 ( $f_1$ ) から周波数 2 ( $f_2$ ) へ変化する間の  $2 \mu\text{s}$  の間は RF 信号が存在していません（図 2-8 のタイミング線を参照してください）。

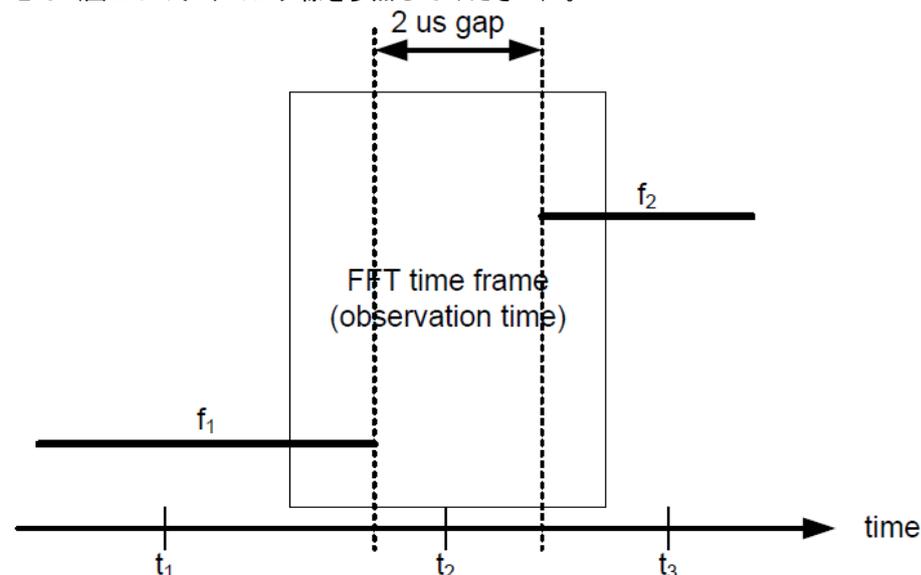


図 2-8 FFT 観察時間のタイミング線図

上の原理を思慮しておかないと、FFT 結果は何も示しておらず、2  $\mu$ s のギャップ中にノイズがあると考えるかもしれません。FFT プロセスについての知識があるユーザであれば、これがどういったことなのかを予想できるでしょう。つまり、連続する FFT の結果は、まず始めにスペクトル成分である  $f_1$  を示し、2  $\mu$ s の間信号が無く、FFT 結果はスペクトル成分である  $f_2$  のレベルが減衰されているのと同様に、スペクトル成分である  $f_1$  が減衰された結果となるでしょう。5.12  $\mu$ s より小さい信号のない間隔は ( $N_{FFT}=1024$  bin、 $f_s=200$  MHz)、FFT 結果はノイズ成分だけではありません。図 2-9 に示すスペクトログラムでは、信号対時間変化の様子を示しています。図 2-9 の下から 2 つめのトレースは、明らかに FFT タイムフレームの影響を示しています。つまり、全てのイベントは FFT 長の中で起きており、同様の FFT 結果中に現れています。両周波数は同時にアクティブになっている印象を受けますが、パワーは減衰しています。

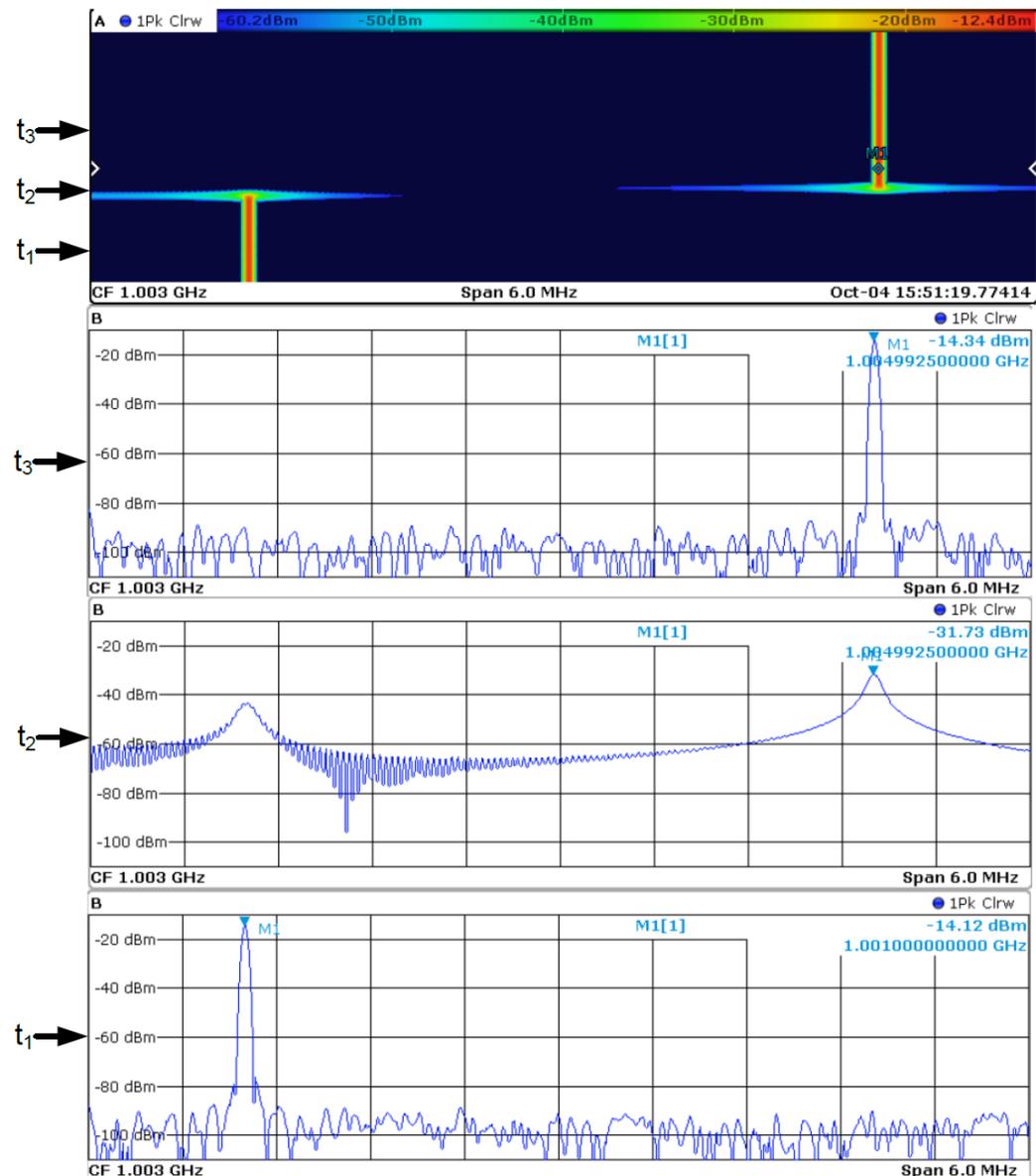


図 2-9 : 周波数ホップのスペクトログラム、上から順に、スペクトルは周波数  $f_2$ 、両方の周波数、周波数  $f_1$  のスペクトラムです。両方の周波数のスペクトル図より、FFT タイムフレームは信号間のギャップより長くなっています。

## 2.6 捕捉確率(POI: Probability of Intercept)

100% POI の最小信号期間はリアルタイム・アナライザの性能を示すパラメータの一つです。定義によると、少なくとも 1 つ以上の FFT が完全に 100% POI に到達していなければなりません。標準的なリアルタイム・アナライザの操作モード（窓長=FFT 長）において、100% POI はオーバーラップ比  $P_{overlap}$  を用いて次のように計算されます。

$$t_{100\%POI} = (2 - P_{overlap}) \cdot \frac{N_{FFT}}{f_s}$$

FFT 時間（からオーバーラップを引く）の 2 倍の時間である場合、信号と FFT が行われていようがいまいが、少なくとも FFT が一つ完全に信号中に含まれます。図 2-10 に 100% POI の最小時間のイベントが確かに表示されています。これにより周波数領域で常に 100%正しいパワーを読み取ることができます。

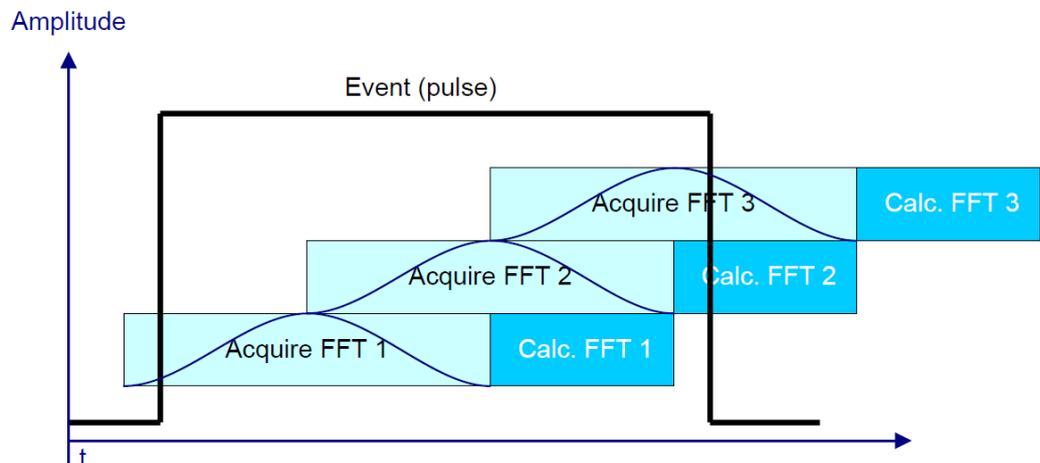


図 2-10：オーバーラップのあるリアルタイム。測定されたイベントは POI 時間より長く、そのため、100% 正しいパワーが表示されています。

図 2-10 で示したシナリオは、どんなに短いパルスでも表示することができ、オーバーラップによりどんなイベントも取り逃しません。しかし、最小の 100% POI より短い期間のパルスのスペクトル・パワーは減衰して表示されます。

上に示した定義により、最小信号時間の 100% POI 時間を小さくするために、多くのリアルタイム・アナライザは FFT 長より短い窓関数を用いています。図 2-11 ではこの FFT 長より短い窓関数を用いた場合のスキームを示しています。この利点として、1024 bin の FFT と 32 bin の窓関数のため、32 値のサンプルのみ取得することで、より早く FFT 計算を始めることができます。残りの 992 値は、ゼロにされます。32 値サンプルした後は、FFT 計算と次に行われる FFT のためのサンプル取得がすでに開始されています。しかし、完全なサンプリングレートで 32 値を取得する時間より、FFT 計算時間のほうが長いため、計算処理中に取得したいくつかの値は捨てられます。その結果がブラインド時間です。リアルタイム・アナライザの可能性を全て記述するには、100% POI の最小信号時間はメリットの 1 つでしかありません。使用上のほとんどの場合において、何も取り逃さないということが少なくとも重要です。そのため、完全に取り逃してしまう最長のイベントについて議論する必要があります。

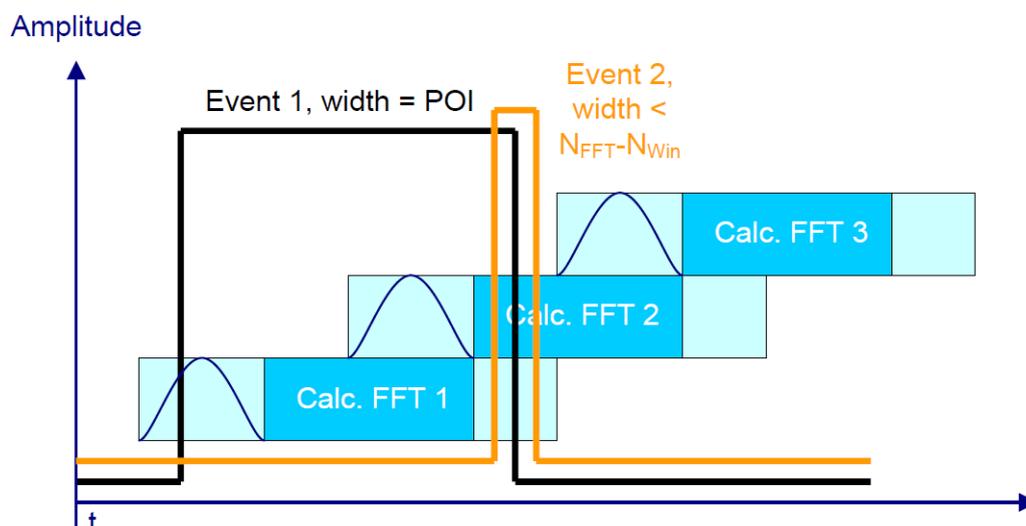


図 2-11：オーバーラップのない場合のリアルタイム処理：イベントは十分に短いため、2 つの連続する窓関数間で完全に消えています。

初期設定の状態では、ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザは 50%以上のオーバーラップで操作されています。つまり、ブラインド時間は存在しません。（R&S®FSW では設定変更が可能です。）とても小さな 100% POI の信号滞留時間を実現するために、FFT 長より短い窓長を設定することができます。R&S®FSW は FFT 長が変更できる（1000 bin から最大 16000 bin まで）だけでなく、1024 bin より小さな窓長（最小 32bin まで）の変更を可能としています。表 2-2 にデフォルトの窓関数（ブラックマン）でのリアルタイム・パラメータの一覧を示します。FFT 更新レートは操作モード（高分解能もしくはマルチドメイン）に依存しているということに注意してください。最小信号時間 100% POI は FFT レートと選択したスパンに依存しています。

ブラックマン窓関数						
スパン/RBW	FFT 長 (N <sub>FFT</sub> in bin)	窓長 (N <sub>window</sub> in bin)	FFT 更新 レート f <sub>FFT</sub> (FFTs/s)	窓のオー バーラップ (%)	最小信号時 間 100% POI (μs)	完全に信号 を取りの がず最長時間 (μs)
3200	16384	16384	36,621	66.7	109.22	0
1600	8192	8192	73,242	66.7	54.61	0
800	4096	4096	146,484	66.7	27.30	0
400	2048	2048	292,969	66.7	13.65	0
200	1024	1024	585,938	66.7	6.82	0
100	1024	512	585,938	33.4	4.26	0
50	1024	256	585,938	0	2.99	0.43
25	1024	128	585,938	0	2.35	1.07
12	1024	64	585,938	0	2.03	1.39
6	1024	32	585,938	0	1.87	1.55

表 2-2：デフォルトで 160MHz スパン、高精度操作モードでのブラックマン窓関数のリアルタイム・パラメータ一覧。

オーバーラップ無しの際の 100% POI 最小信号時間は次の式で表されます。

$$POI = \frac{1}{f_{FFT}} + \frac{N_{window}}{f_s}$$

窓関数が FFT 長より短いことによるアナライザで完全に見逃してしまうイベントの最長の時間は次の式で表されます。

$$T_{MaxMiss100} = \frac{1}{f_{FFT}} - \frac{N_{window}}{f_s}$$

既知の信号のレベルを周波数マスクトリガでトリガする場合など、100%正しい真のパワーを読み取りたいアプリケーションの場合は、短い窓を用いることが推奨されます。しかし、ほとんどのリアルタイム・アプリケーションでは「どんな信号も見逃さない」ことが肝心となります。そのような大多数のアプリケーションにおいては、窓長と FFT 長が一致していなければならない、リアルタイム・アナライザはオーバーラップ比が十分なければなりません。

## 2.7 ズーム・モードで再生する

ローデ・シュワルツが提供するリアルタイム・アナライザではズーム・モードで再生することが可能です。ユーザはメモリに蓄えられた I/Q データで処理を行うことができます。ほとんどの場合で、リアルタイム・アナライザは最大の帯域幅で実行されています。デバッグの過程で周波数マスクトリガは特定の側波帯のレベルをトリガするために使用されます。トリガ・イベントによりキャプチャした後で、設定した分解能帯域幅では妨害波を解析するのに十分でないことに気づきます。

R&S®FSVR はもちろん、R&S®FSW でもキャプチャした I/Q データを異なる FFT パラメータで再び実行することができます。つまり、キャプチャした I/Q データで、中心周波数、RBW、スパンの設定、さらには他の妨害波が現れるまで待つよう保存することができます。

もちろん、FFT パラメータはキャプチャしたオリジナルの I/Q データ内でしか変化させられません。使用が簡単となるように、ツールバーの虫眼鏡アイコンを選択すると、スペクトログラム表示ではズーム・モードの再生がアクティブになっています。さらに、ズームインできる箇所を明るく表示し、ズームインできない箇所は暗く表示しています。タッチパネル等で四角にズームする場所を選択すると、ズーム・パラメータである中心周波数やスパンが自動的に再設定されます。

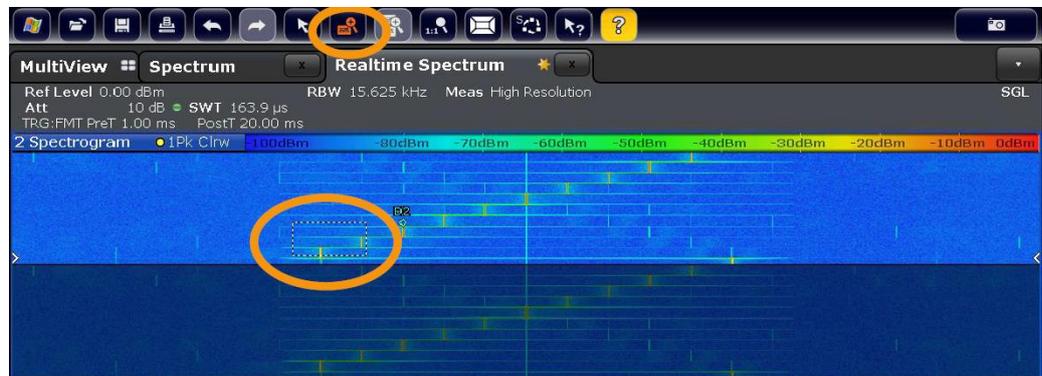


図 2-12：ツールバーの虫眼鏡を選択したときのスペクトログラム。スペクトログラム中の明るい部分がズーム可能エリアで、ズームできないエリアは暗く表示されています。

## 3 リアルタイム・スペクトラムのトリガ

本章では、リアルタイム・スペクトラム・アナライザでのみ使用可能なトリガ（周波数マスクトリガ：FMT）について説明します。FMT は信頼性の高い高性能ツールで、迅速な解析に必要なデータを、正確にキャプチャする際に役立ちます。残光モードおよびスペクトログラムの計算と並行して評価されるため、FMT はすべてのリアルタイム表示モードで使用することが可能です（図 2-1 参照）。

### 3.1 周波数マスクトリガ

特定の周波数範囲内の散発的なイベントを解析する 1 つの方法は、非常に長い時間にわたってリアルタイムデータをキャプチャすることです。この方法には、大容量の高速メモリが必要です。その結果、イベントを見つけ出すために大量の保存データを後処理することが大幅な時間の浪費となる場合があります。

もう 1 つの方法は、周波数スペクトラム内のイベントでトリガを実行し、対象のデータを正確に捕捉することです。この方法は、必要なメモリサイズを大幅に縮小することに加えて、収集したメモリの中で対象のイベントを見つける時間も減少されます。ここで次のような疑問が生じます。特定の周波数範囲の中で極まれに出現するイベントのトリガを、アナライザはどのようにして行っているのでしょうか？

その答えとなるのが周波数マスクトリガ（FMT）です。FMT は周波数領域の中でのマスクで、FFT の計算が終わるたびにチェックを行います。これは 1 秒間に最大 585,938 回行います（R&S®FSW の場合）。時間に換算すると、時間分解能が 1.71  $\mu$ s に相当します。

周波数マスクは、最大 1001 ポイント（R&S®FSVR では 801 ポイント）で構成され、どのような形状でも設定可能です。

ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザはデータをキャプチャするためのトリガのシナリオを 2 つ備えています。次の場合にデータ収集を開始、または停止することができます。

- 信号がマスク領域へ入ったとき（エンタリング）
- 信号がマスク領域を出たとき（リービング）

上記の判定基準はすべて、設定可能な下限ラインと上限ラインで判定されます。さらに、これらの判定基準は同時に両方のライン（下限ラインと上限ライン）にも適用されます。

FMT は、リアルタイム動作中の全てのディスプレイのトリガ・ソースとして選択することができます。選択された表示モードに並列して評価されているため、リアルタイム・アナライザ機能への影響はありません。

普通のスペクトラム・アナライザは、トリガ・イベントが発生してからデータ取得を開始します。周波数マスクトリガも同様に同じことを行います。さらに、多くのリアルタイム・アプリケーションはあるイベントが発生するとデータの取得を終了するようトリガを行います。このトリガ・モードは「ストップ・トリガ」とよばれており、デフォルト操作モードは「オート・リアーム」と呼ばれています。

FMT は、標準のスペクトラム・アナライザの可能性を超えたトリガ・ソースです。テスト・システムの他の計測器が FMT を使えるよう、ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザは、トリガ・アウトプット (Trigger Out) が用意されています。トリガ・アウト・ポートは、FMT がトリガを行うたびに 1  $\mu$ s のパルス幅と 5 V の電圧レベルを有するトリガパルスを出力します。このトリガパルスは、外部トリガ・ソースとして出力することができます。

### 3.1.1 周波数マスクトリガ (FMT) のセットアップ

2.4 GHz の ISM バンドは、多数の妨害波が考えられる一般的な RF 周波数帯域です。Bluetooth や WLAN など様々なサービスが存在しています。Bluetooth 受信機を想定します。Bluetooth リンクはシングル・チャンネルのみを使用しているため、ラボ環境で受信機は対応する送信機との接続を失います。Bluetooth 接続を妨害する妨害源を解析するため、既知の Bluetooth 信号の周辺に FMT を設定します。想定した例に対するトリガ条件は以下の通りです。

- Bluetooth チャンネルの隣で大きなパワーが測定された場合に、データ収集を停止する。

この条件は、アクティブ・チャンネルを横切るために接続が切断される原因となりうる周波数ホッピング信号についてトリガされます。

トリガのマスクは、FMT マスクエディタを使って簡単に設定できます (図 3-1)。このエディタは信号のライブアップデート機能と自動マスク作成機能を備えているため、必要なマスクの作成を容易かつ直観的に行うことができます。

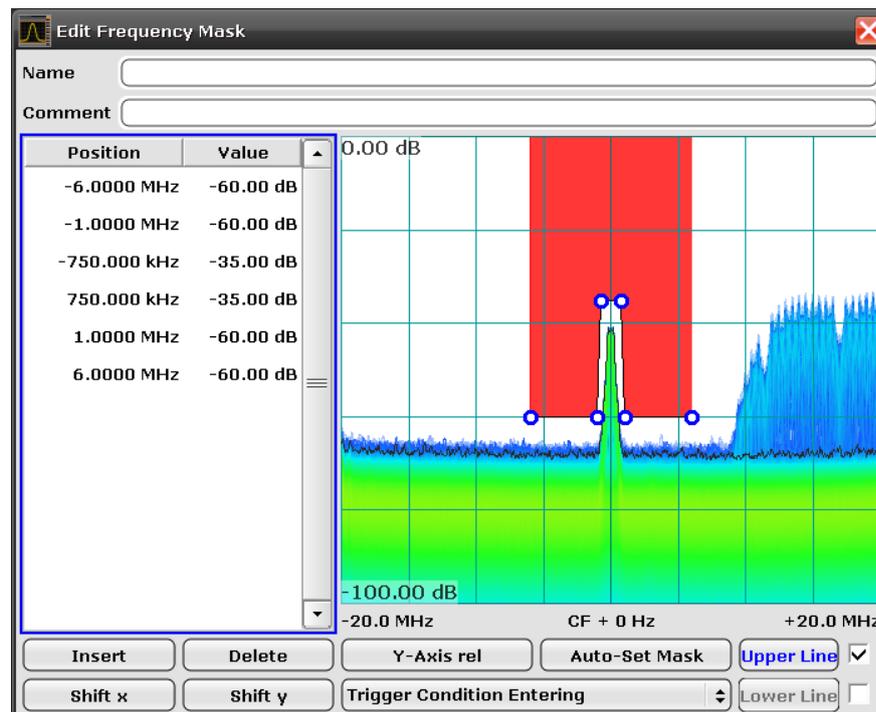


図 3-1: FMT ダイアログ・ボックス

アクティブな FMT を示すために、トリガ・マスクは現在の残光モード・スペクトラム表示、またはリアルタイム・スペクトラム表示の中に赤色の背景として現れています (図 3-2)。「ストップ・トリガ」モードを利用する場合は、Run Continuous モードであることを確認してください。表示されたデータの中に解析に必要なすべての情報が入っていることを確かにするために、プリトリガ時間とポストトリガ時間を調整してください。

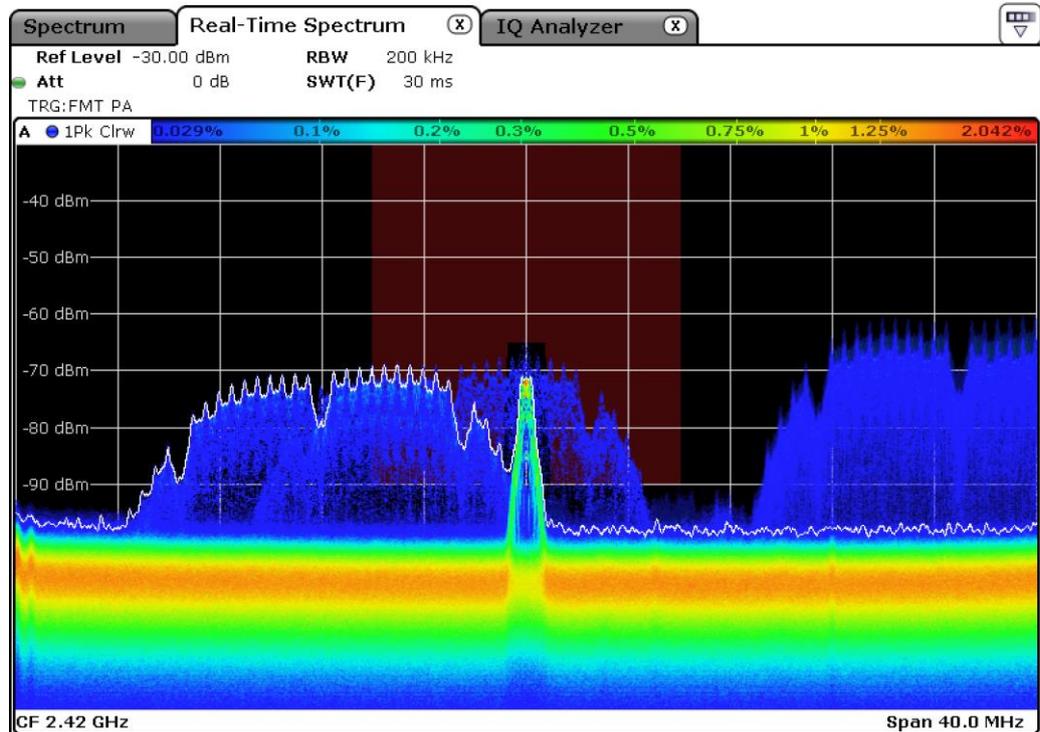


図 3-2: WLAN 信号の周波数変化によってトリガされたアクティブ FMT

トリガ条件が現れると、アナライザは設定されたポストトリガ時間が満了した後、データ取得を停止します。トリガ・イベントの前に記録された時間間隔は、指定のプリトリガ時間より短い場合がありますので注意してください。FMT はリアルタイムなトリガであり、プリトリガ時間が満了しているか否かにかかわらず、FMT が認識する最初のトリガ・イベントによってポストトリガ時間がスタートするタイミングが決まります。リアルタイム・アナライザを使用することで、イベントを一つも見逃すことがなくなります。

### FMT の利用性

FMT はすべてのリアルタイムの表示モードで機能します。さらに、ベクトル信号解析オプションなど非リアルタイム・オプションもサポートしています。

### ストップ・トリガとオート・リアーム・トリガ

前述したように、両方のモードがサポートされています。たまに起きる妨害波を探索する場合、ストップ・トリガが最適です。一方で、オート・リアーム・トリガは周期的に繰り返される信号を観察するアプリケーションに最適です。このコンセプトによると、ストップ・トリガ・モードは連続掃引モードで最高の結果をもたらします。オート・リアーム・モードでは外部トリガと同様に単掃引モードまたは連続掃引モードのどちらも使用されている多くのアプリケーションで使用することができます。

## 3.1.2 技術的バックグラウンド

周波数マスクトリガ (FMT) は、リミットラインチェックの拡張機能です：FMT マスクはリアルタイム・ハードウェアで計算されるすべての FFT スペクトラムと比較されます。

R&S®FSW は、FFT 更新レートにより最大で 585,938 回/s のマスクチェックを実施します。リアルタイム・トリガ、つまり応答時間を保証するために、FMT はリアルタイム・ハードウェアによって評価されます。

図 3-3 に、リアルタイム FFT と FMT マスクの要素単位比較を示します。FMT マスクの値から FFT 結果を引き、結果が一つでも負となると、アナライザはトリガリングを実行します。

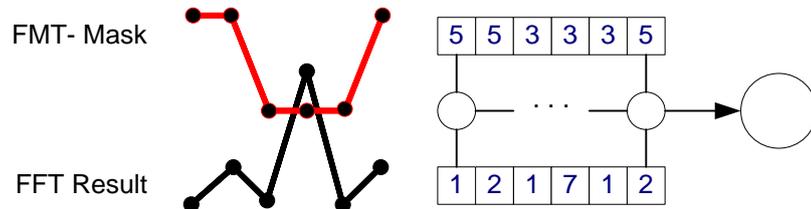


図 3-3 FMT マスクと現在の FFT 結果との要素単位での比較

拡張されたリミットチェックは、FMT がエンタリング、リービングといったリミットラインを違反するなどの複雑な条件を行うことができることを意味します。

既に説明したように、FMT マスクには最大で 1001 ポイント（R&S®FSVR では 801 ポイント）で構成されていますが、2 ポイントまで短くすることができます。より短い FMT は、ファームウェアによる補間により 1001 個のポイント数に拡張されます。そのため、FMT トリガは常に 1001 個の FFT ポイントと 1001 個の FMT マスク定義ポイントで比較することができます。マスクが 1 ポイントでも違反されることで、FMT はトリガを実行します。

FMT の評価とは、パワー・レベルの比較に他なりません。2.6 章で既に説明したように、パルスのような信号に対し FFT 全体が満たされている場合でのみ FFT の比較が可能となります。短パルスのスペクトラム・パワー・レベルは、イベントの持続時間と FFT 長さとの比に依存しています。各パルスが 0 dBm のレベルまで立ち上がるようなパルス信号では、0 dBm に達するスペクトラム成分の最小パルス持続時間は 1.87  $\mu$ s（R&S®FSW で 32bin の窓で高分解モードのとき）となります。この値は、POI を説明した式を用いて計算されます（2.6 章を参照してください）。FFT の観測時間中に、（非変調）パルスは連続波（CW）信号に相当する信号は、パルスのエッジが FFT タイムフレームの中に位置していないことによるものです。結果としては、パルスが時間領域で持っているのと同じレベルに達するスペクトラム成分となります。これより短いパルス、いわゆるパルスを認識することのできないパルスでは、時間領域のパワー・レベルと主スペクトラム成分のパワー・レベルの間の依存性により説明されます。パルス測定の詳細については、アプリケーションノート 1EF48 を参照してください。

非常に短いイベントにおいて信頼度の高い FMT トリガを得るには、予測されるスペクトラム・パワー・レベルよりも低くマスク・リミット・レベルを設定することが望ましいでしょう。

## 4 リアルタイム信号の表示モード

最新の従来型スペクトラム・アナライザは I/Q データをキャプチャできる能力を有しています。I/Q データをキャプチャすることは、それ自体がリアルタイムで、情報の取りこぼしがないことを意味しています。アナライザの I/Q メモリが観察時間をカバーできる十分な容量を有している限り、リアルタイムであるということは妥当なものといえます。保存された I/Q データは後処理されます。後処理の実行中は新しい情報をキャプチャすることができません。R&S®FSV や R&S®FSW などのデジタル・ストリーミング・インタフェースを備えたアナライザはリアルタイムでデータを処理できる機構を有していないため、これらのアナライザでも後処理が必要となります。

ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザはリアルタイムでデータを処理するだけでなく、データを表示しながら解析するのに役立ついくつかの表示モードも提供しています。人間の目では変化を検出できる能力に限界があるため、リアルタイム表示では時間軸、すなわち、時間の経過に伴う信号の変化が視覚化されています。過去と現在のスペクトラムに関する情報を同時に表示する表示モードにより、人間の目でも変化を迅速に解析することができます。

R&S®FSW-B160R は高分解能モードとマルチドメイン・モードの二つの操作モードがあります。マルチドメイン・モードは 100 MHz の帯域幅とスパン/RBW 比を 800 (ブラックマン窓のため) に制限されていますが、パワー対時間表示モードをおこなうことができます。

### 4.1 スペクトログラム

スペクトログラムは、複数の連続するスペクトルを時間軸で表示することができる方法です。通常、周波数に対して表示されるパワー、より正確に言えばパワー・レベルが、周波数と時間に対して表示されます。図上では、時間と周波数はそれぞれ表示面の縦軸と横軸で表されます。この平面の各座標 (周波数  $f$  と時間  $t$ ) には、それぞれの周波数と時間に対応するレベルを表す色が付けられます。

測定を開始したときはこの平面には何も表示されていません。測定が進むのに従って、グラフの上から下に向かって線が描画されていきます。スペクトログラム中の 1 ラインはフレームと呼ばれ、各フレームはいくつかの FFT を含んだ 1 つのスペクトラムを表しています。

グラフは上から下に向かって描画されていくため、最上のラインが最新のスペクトルです。一方で、古くなった FFT は下へと移動してゆきます。

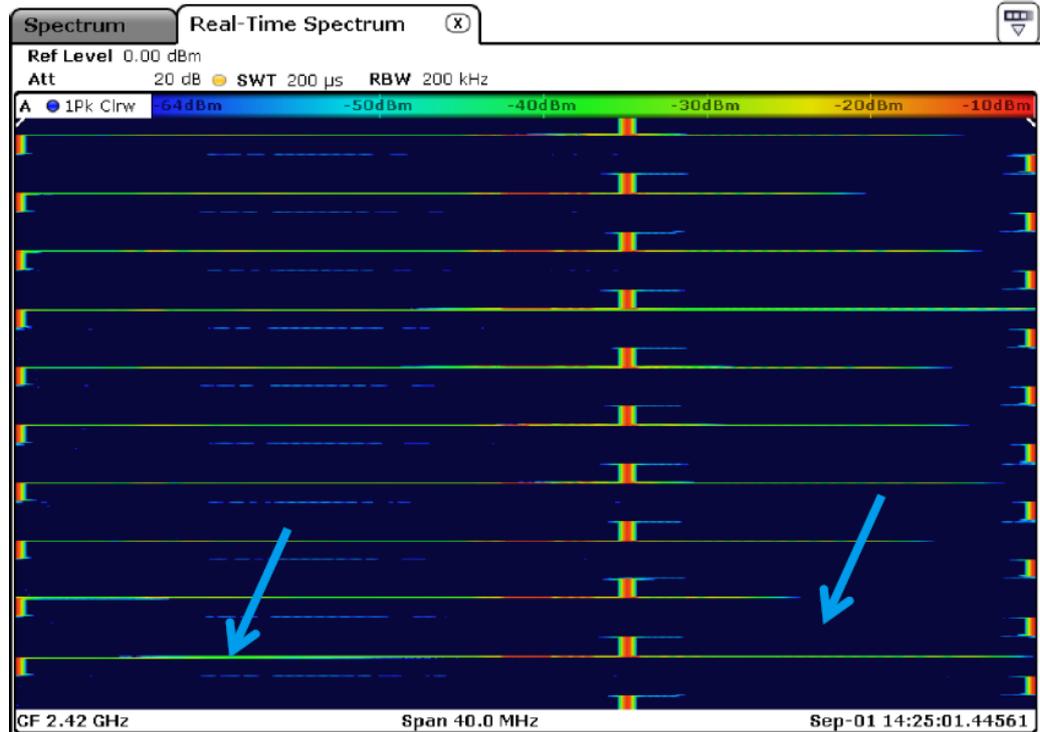


図 4-1: 定期的に 3 つの周波数をホッピングする信号のスペクトログラム。1 つ目の遷移は RF レベルを示しており、2 つ目の遷移はホッピング中にほとんど信号を示していません。遷移は矢印で示す部分です。

スペクトログラムは時間的に変化するスペクトルを解析する有効なツールです。代表的なアプリケーションとして、VCO の過渡応答の振動や周波数ホッピング信号の解析があります。

図 4-1 に、3 つの周波数の間で定期的にホッピングする周波数ホップの例を示します。最初のホップ（一番左から真ん中）の間では信号が完全にはオフとなっていないことが観察され、2 番目のホップの間では RF レベルが十分に観察されていないことがわかります。

#### 4.1.1 パラメータ

スペクトログラムは、特定のアプリケーションに最適化するのに役立つ各種のパラメータを提供しています。既に説明したように、このユーザインタフェースはスペクトラム・アナライザを元としているため、直観的に使用することができます。パラメータ表示についても同様です。

##### 中心周波数、スパン、RBW

VCO 過渡応答解析のスペクトログラムを最適化するには、まず始めに、VCO の目標周波数を中心周波数パラメータとして設定します。中心周波数を中心として R&S®FSVR で 40 MHz 幅、R&S®FSW で最大 160 MHz 幅の帯域で、アナライザの IF を通過し、最終的にデジタル化されます。FFT コンセプトにより、最大の IF 帯域幅はリアルタイム・モードで表示できる最大スパンと同じです。

リアルタイムの FPGA では、分解能帯域幅（RBW）は FFT 長とスパンに関係付けられています。R&S®FSVR では FFT 長は固定であり、RBW を設定することができません。しかし、R&S®FSW-B160R では FFT 長を設定することができます。スパン/RBW の比を設定することで、スパンを変更し RBW を変化させることができます。選択する窓関数を変化させることでスパン/RBW 比を変化できるため、表 4-1 に最大をとる比の一覧を示します。つまり、スパン/RBW 比は 16000 FFT に対応し、FFT 長や窓長が選択した比により小さくなります。

スパン/RBW 比の最大値(16000 FFT)						
ブラックマン	フラットトップ	ガウシアン	矩形	ハニング	ハミング	カイザー
3200	1600	3200	6400	4000	4000	3200

表 4-1: 各窓関数のスパン/RBW 比の最大値

### 掃引時間、検波器

4.1 章で既に説明したように、スペクトログラムは連続するスペクトラムを表示します。ここで、各スペクトラムは複数の FFT から構成されています。掃引時間のパラメータは、FFT 長とスペクトラムのサンプリングレートを決定します。

スペクトログラムの各パラメータ名は、スペクトラム・アナライザに由来しています。掃引型のスペクトラム・アナライザでは、掃引時間はローカル発信器（LO）が選択したスパンをどれだけ早く掃引したかを示しています。つまりフルスパンにかかる時間です。一般的なシングル・スペクトラム・アナライザはこの掃引時間というパラメータを使用します。その際、LO を掃引させるのではなく FFT 計算をおこなっている場合も同様です。FFT 掃引時間はデータ取得時間であり、測定時間ではないことに注意してください。測定時間とは処理時間も含まれています。

リアルタイム・アナライザの結果に掃引時間の考え方を考慮すると、リアルタイム・スペクトラムは選択した掃引時間で取得したデータにより構成されているということです。FFT は連続して処理されているため、掃引時間は 1 つのスペクトラム中にいくつの FFT が組みあわされているかを示しています。

掃引時間でいくつかの FFT を 1 つのスペクトラムに描画する際には、各 FFT 結果の重みづけを行いません。平均化がその例として挙げられます。他には各周波数における最大値、最小値の選択が考えられ、任意の FFT 結果を画面上に表示します。FFT の結合には検波器が用いられます。従来のスペクトラム・アナライザでは、検波器は複数の測定ポイントのあるアルゴリズムを用いて 1 つのトレース・ポイントへと結合しています。リアルタイム・アナライザの検波器は複数の FFT を各 bin で結合します。つまり、従来のスペクトラム・アナライザと同じです。利用可能な検波器は Average、Positive Peak、Negative Peak、Sample です。Positive Peak はどんな短いイベントであっても解析することができるようにデフォルトで選択されています。検波器は図 2-1 で示したように、スペクトログラムとリアルタイム・スペクトラム表示でのみ利用可能です。

まとめると図 4-2 の Peak 検波器で示されているように、パラメータである検波器と掃引時間は複数の FFT を一つのスペクトラムへとデータの間引きを行いません。

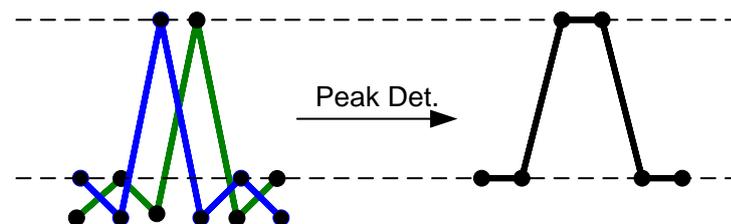


図 4-2: 2 つの FFT を 1 つのスペクトラムに統合する Peak 検波器

## 履歴長

ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザは、表示したスペクトラムをメモリ中に I/Q データとして保存しています。スペクトラムは各掃引時間で 801 から 1001 ポイントしかデータを持たないため、スペクトラムのトレースをメモリに保存しておくほうが、I/Q データを保持しておくより少ないメモリですむことは明かです。測定器には最大で 100,000 スペクトラムを保存できるほど十分なメモリ容量があります。掃引時間が 200  $\mu$ s とした場合、スペクトラムのメモリ長は、最大 20 秒となります。そうなる一方で、掃引時間を 30 ms とした場合、スペクトログラムは 3000 秒、ほぼ一時間カバーすることになります。リアルタイム・アナライザを操作する際、履歴長は選択した掃引時間で 100,000 フレームを掛算したもので最大表示時間としてあらわされます。しかし、トリガ・モードやシングル掃引をおこなう場合、表示されるスペクトログラムは黒のラインによるギャップが存在します。そのため、履歴長は時間に変換することはできません（図 4-3 参照）。

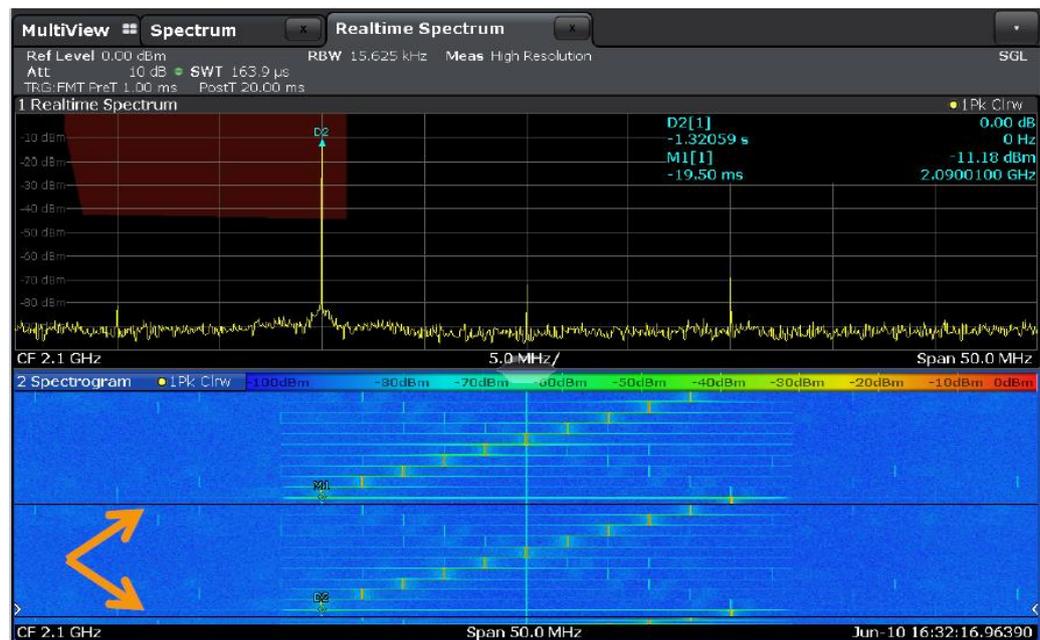


図 4-3: 2 つの黒線のあるスペクトログラム。トリガ・モードやシングル掃引操作によりギャップがあるため、非連続なキャプチャであることを示しています。

## カラーマッピング

スペクトログラムの主要な要素となるのがカラーマッピングで、パワーの数値を対応する色に変換します。スペクトログラムから必要な情報を入手しやすくするために、ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザはカラーマッピングを調整するための 4 つの主要なパラメータを備えています。これらのパラメータは以下の通りです。

- カラーマップ：レベルをコード化するための色群を決定します。“Hot”はカラー Spektrum 全体の色調で、青色は低レベルを示し、赤色は高レベルを示します。“Cold”はこれとは逆となり、赤色を低レベル、青色を高レベルであらわします。“Radar”は黒色から緑色（暗緑色から淡緑色）の全範囲に及びます。“Grayscale”は黒色と白色で、低レベルを表す黒色から灰色を通して白色までの範囲をカバーします。
- Start 値：色が変わり始めるしきい値を決定します。この Start 値より低いすべてのパワー・レベルは同じ色（たとえば、暗青色）で表示されます。数値で表された百分率値は基準レベルと関連性があります。

- Stop 値：上のしきい値を決定します。この値より高いすべてのパワー・レベルは同じ色（たとえば、淡紅色）で表示されます。
- Shape 値：-1 から 1 までの数値が表示され、0 は、下のしきい値と上のしきい値との間の色の直線分布を示します。0 より大きな値では、より高いパワー・レベルに対応する曲線の勾配がより急になります。そのため、高いパワー・レベルは下のしきい値に近いレベルよりも大きな色等級を使って解析されます。0 より小さな値では、より大きな色等級を使って下のしきい値に近いレベルの解析が行われます。

リアルタイム・アナライザは、パワー・レベルの確率分布でカラーマッピングの設定を簡単にします。下記の表示は、パワー・レベルに関するスペクトログラム表示確率のライブアップデートを示したものです。このグラフの左側には、ノイズフロアをあらわすガウシアン分布があらわされています。ノイズフロアを排除して対象の信号をはっきりと表示させるために、Start 値は調整されています。

デフォルトの設定ではリファレンス・レベルから表示する最小レベルまでリニアにカラーマップを行なっています。

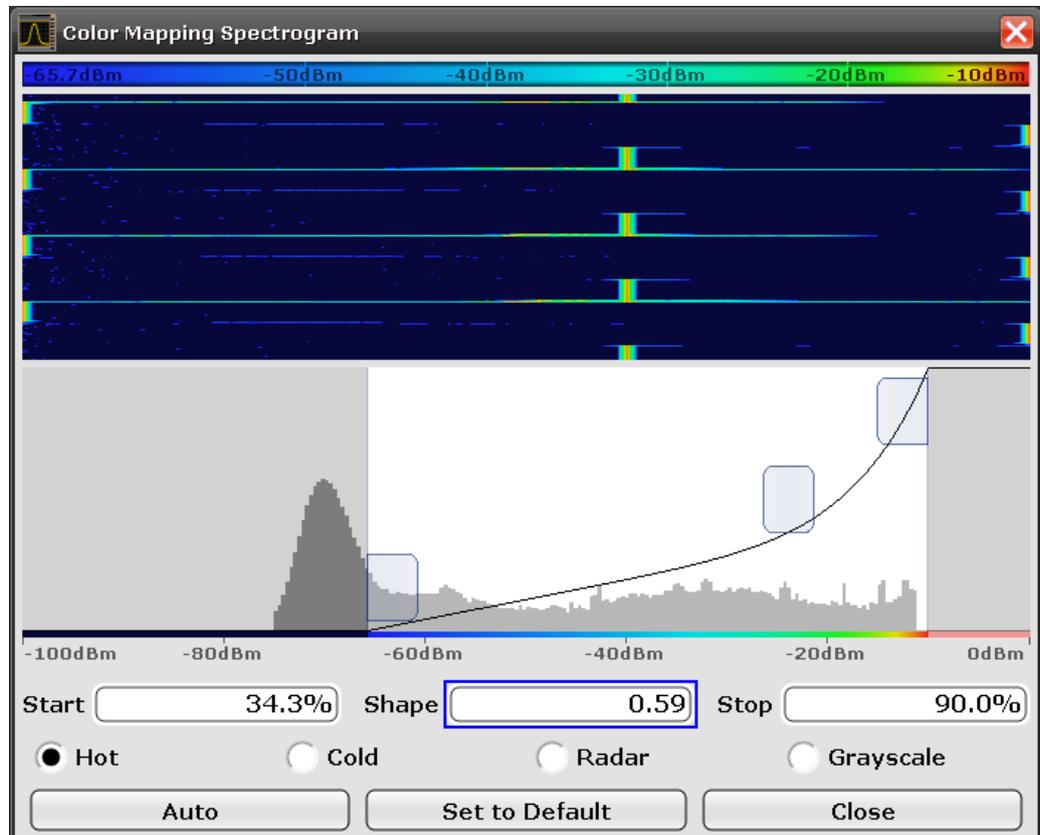


図 4-4: カラーマッピング: 所望の信号を見やすくするためにノイズ部を表示させないよう、カラーマップを調整しています。 - デフォルトの直線も-20 dBm を超える信号レベルを強調するために調整しています。

## 4.2 リアルタイム・スペクトラムのスペクトログラム

後処理過程におけるスペクトログラムの解析では、リアルタイム・スペクトラムの表示を追加で有効にしておくと便利です。リアルタイム・スペクトラムは常に 1 つのスペクトラム（すなわち、スペクトログラムの 1 ラインまたは 1 フレーム）を表示します。アクティブなマーカの時間位置によって、リアルタイム・スペクトラムの画面内に表示される特定のスペクトラムが決まります。マーカがアクティブになっていない場合には、最新のスペクトラム（一番上のライン）が表示されています。

リアルタイム・スペクトラムを組み合わせたスペクトログラムは、タイミングとスペクトラムの詳細解析に最適です。レベルによる色づけをおこなった結果、スペクトログラム内の対象となるピークの上に、正確にマーカを置くことは容易ではありません。この例で取り上げた対象の信号は、短区間で周波数変調（FM）を行った連続波（CW）信号です。2 つの連続する周波数変調区間を解析するには、一対のマーカを使用します。現在のマーカの時間位置と周波数位置を指示する 2 つの入力ボックスが表示されます。

上記の例では、変調信号が既知の 1 kHz の連続波（CW）信号です。1 kHz の変調信号により、対応する FM 変調信号は RF 搬送波信号の両サイドにおいて 1 kHz の場所で大きなピークを示します。マーカをアクティブな FM セクションへ移動させ、いずれかの 1 kHz サイドローブの上に置きます。ローデ・シュワルツのリアルタイム・アナライザでは、タッチスクリーン機能や時間および周波数の入力ボックスを使用することでスペクトログラム内でのマーカの移動と配置が可能です。リアルタイム・スペクトラム表示を使用することで、マーカがサイドローブの上に正しく置かれているかどうかを確認することができます。

マーカによるピーク・サーチは、時間軸または周波数軸で行われます。デフォルトでのサーチ軸は周波数軸です。両軸を同時にサーチする最大サーチも利用可能です（2D サーチ）。マーカによるサーチ機能は、表示されているスペクトログラム全体に対して、もしくはメモリ内に保存されているスペクトログラム全体（最大で 100,000 ライン）に対して実行されます。タイミング測定の結果は、デルタ・マーカのフレーム・タイム・ボックスから直接得ることができます。デルタ・マーカの周波数内における位置と時間は、基準となるマーカを参照しています。図 4-5 に、タイミング測定の結果を示します。

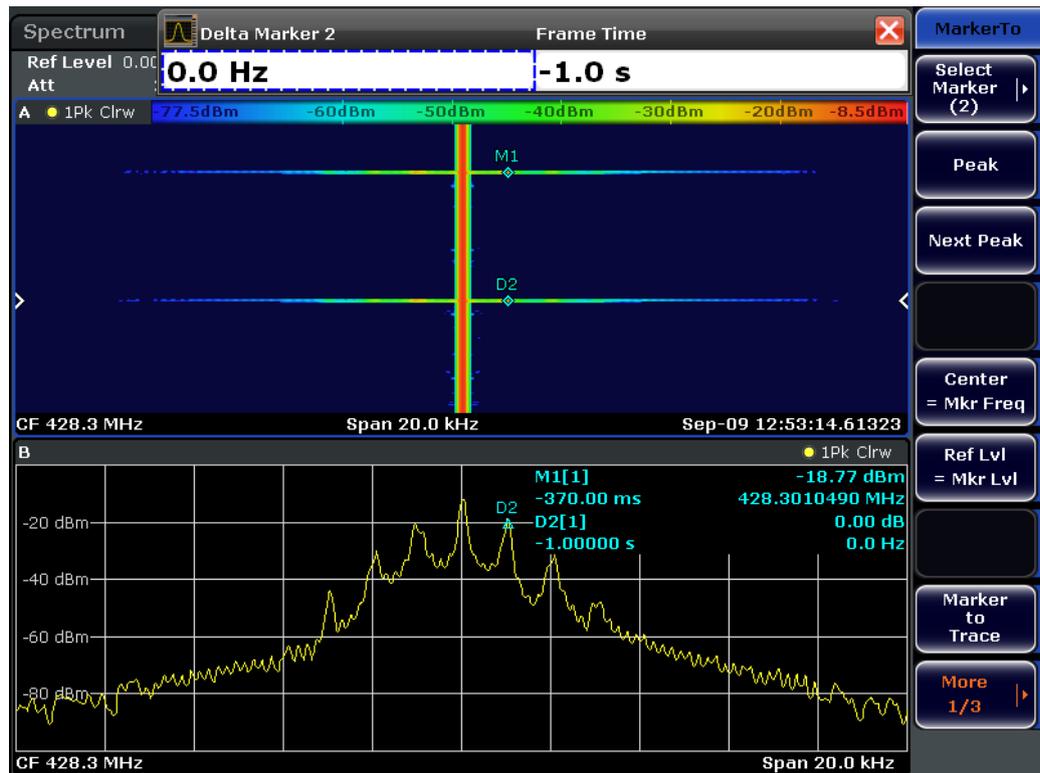


図 4-5: スペクトログラムとリアルタイム・スペクトラムのタイミング測定

### 4.3 残光モード

最も良く知られているリアルタイム表示は、残光モードと呼ばれるスペクトラムのヒストグラム表示したものです。残光情報とヒストグラム情報という 2 つの名前は、表示モードの主な機能をよくあらわしています。残光モードは、人間の目では捕らえられないほど非常に短いイベントでも確認することを容易にしてくれます。ヒストグラム情報により、同じ周波数軸上でも異なる変調方式の信号を確認できるようになります。

残光モードのスペクトラムのカラーコードは、信号の状態（各レベル一周波数ペアの出現確立）を示しています。同時に、フェージング効果により、実際のスペクトルが存在しているより長く画面に表示させることが可能です。

残光モードは、正規のスペクトラム表示と同じように周波数を表す横軸と、レベルを表す縦軸から構成されます。残光モードの中にある各ドットの色にはヒストグラム情報（すなわち、確率情報）が含まれています。

残光モードの代表的アプリケーションは、時間的に変化する信号の解析です。残光モードは、信号の詳細解析を実施する前に、信号に関する最初のイメージをつかむのに特に有効なツールです。残光モードを使うことで、高速周波数ホップを振幅のドロップと明確に区別できます。一方、在来のアナライザは、誤ったイメージをもたらす場合があります。スペクトログラムの表示とは違い、残光モードはカラー・コーディングを採用していないため、高いレベル分解能を得られます。図 4-6 に 2.4 GHz の ISM バンドと、5 GHz での周波数アジャイル DUT の 2 つの残光モード・スペクトルを示します。スクリーンショットが撮られた瞬間は、信号はスペクトラムの右側に位置しています。しかし、残光モードにより、同じ場所もしくはスペクトラムの中央付近に以前に信号が存在したことが観察されます。

R&S®FSW はリアルタイム・オプションを順番に操作し、それらを同時に表示することができます。そのため、2 つ以上の異なる帯域において同時に表示可能です。このとき、帯域が隣り合っているかどうかは関係ありません。

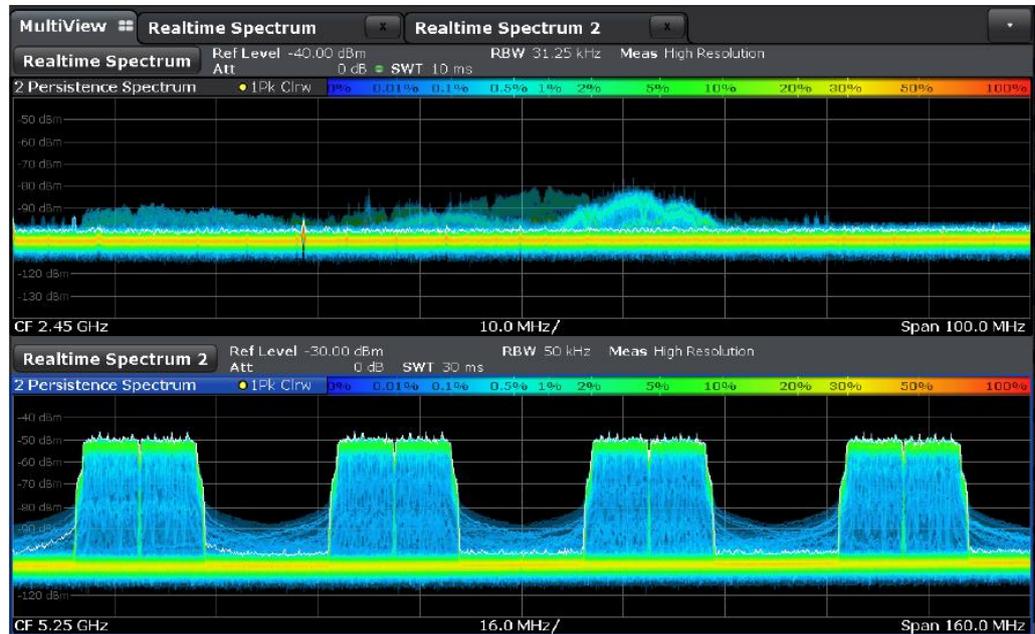


図 4-6: 2.4 GHz の ISM バンドと 5 GHz 帯の周波数アジャイル DUT。残光モードは実際の信号の滞留時間より長く表示することができます。

残光モードのもう一つの代表的なアプリケーションとして、重なっている信号の分離が挙げられます。これは、周波数—レベル ペアの確率分布の観点から区別することができる場合に有効です。図 4-7 にブラシ付モーターによるノイズのような信号の残光スペクトラムを示します。中心付近に弱い WCDMA 信号が確認できます。標準的なスペクトラム・アナライザでは、各信号点での確率分布として表示されていないため、2 つの異なる信号を解析することができません。

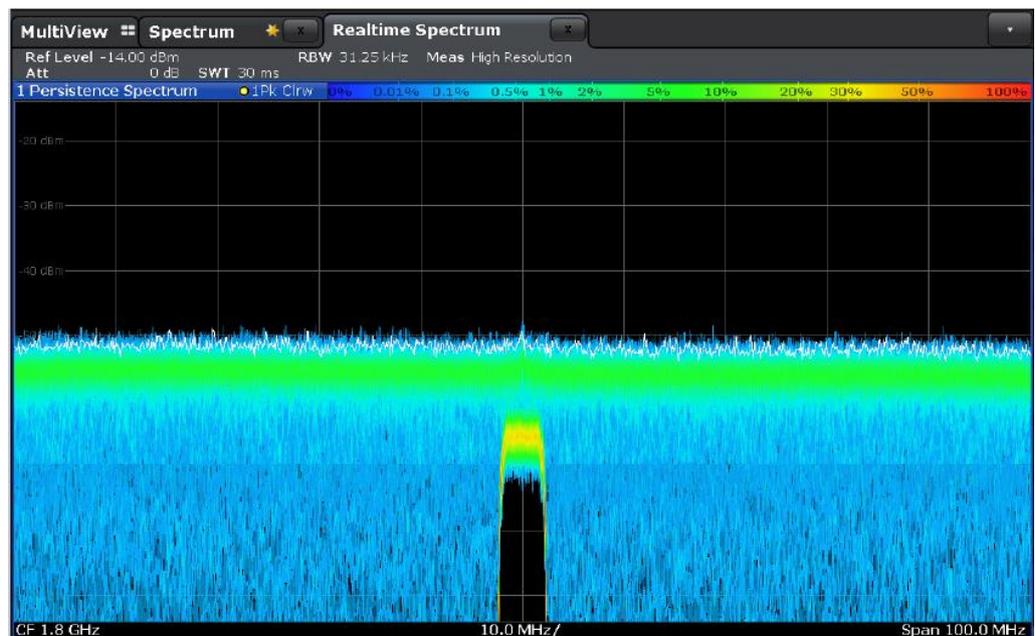


図 4-7: WCDMA 信号を覆う広帯域ノイズのような信号

### 4.3.1 パラメータ

#### 中心周波数、スパン、RBW

これらパラメータは、リアルタイム・アナライザの周波数と帯域幅の設定により仕様化されています。各パラメータは、リアルタイム表示全体で同じです。

#### 残光モードの細度

1つのヒストグラム・イメージは残光表示中に計算されています。600×1001（R&S®FSVR では 600×801）の要素を持つ初期ゼロ行列は、600個の離散パワー・レベルと1001個の離散周波数ステップを表しています。例として160 MHzのフルスパンでFFT長を1024と仮定すると、R&S®FSWは毎秒585,938 FFT更新レートで実行し、1.71 μsごとにFFTが1つ生成されます。100 msのデフォルト残光解像度を使用すると、マトリクスの中の1つのセルの最大カウント数は約60,000です。新しい1つのヒストグラムごとに（すなわち、100 msの間隔ごとに）行列の各要素はゼロにリセットされます。

図4-5に、600×1001の行列とFFT/解像度比が約60,000の全プロセスを紹介するのは大変なので、6×8の要素を持つ行列とFFT時間/解像度比が2を使ったこのプロセスを紹介します。2つのFFTを計算します。2つのFFT中には同じ信号が入っており、信号の隣に変化するノイズが存在しています。図4-5は、1つのFFTを周波数-レベルペアの行列へ変換する処理を示しています。2つの行列は1つの行列へと統合され、得られた行列は、トレースの色を決めます。この例において、赤色は高いカウント数または確率を表し、ノイズは低い確率を表す青色で表示されています。

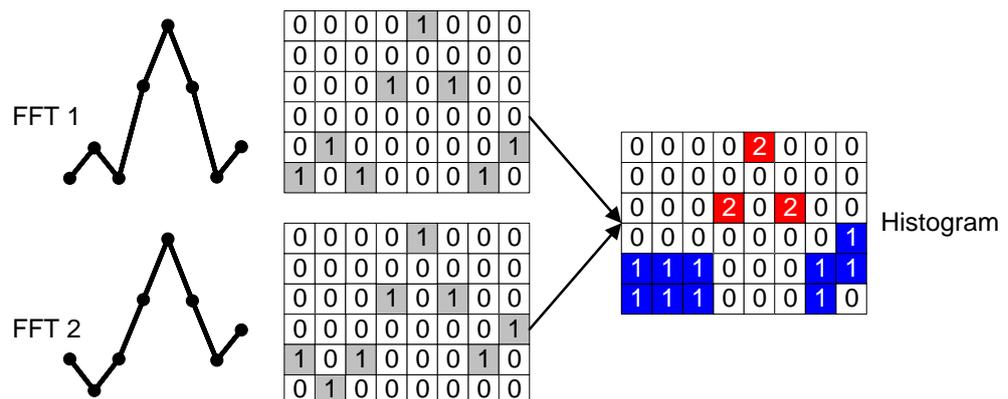


図4-5: ヒストグラム計算のスキーム (ドット形式)

#### 残光

残光パラメータは、トレースが完全に消えるまでの時間量を決定します。インターバルの間、トレースは徐々に薄くなっていきます。各新規トレースは最大の強度でプロットされるため、複数のヒストグラムが同じ表示内にプロットされるにもかかわらず、フェージングによって連続するヒストグラム間での量定が可能となります。残光機能は、陰極管の計測器によって観察できる残光のように表示されます。

#### MaxHold 強度

通常、時間的に変化する信号の解析中はレベルの変動が大きな関心対象となります。さらに言えば、現在の信号と最大のレベルの信号との比率です。MaxHold と呼ばれるトレースを使うことで、ノイズまたは妨害源に言及した場合に最悪ケースでの信号対雑音比 (SNR) を推定できます。有用信号の場合は、振幅の変動を推定できます。残光モード表示は、MaxHold トレースを残光モードの一番上に保持します。既に説明したように、残光トレースは明度が減少していきます。MaxHold トレースと残光モード間の透過値が割り当てられています。MaxHold 強度パラメータは、透過のレベルを指定します。透過状態でない場合には、トレースを現在のヒストグラム・トレースから区別することができなくなります。

MaxHold トレースは、R&S®FSVR 上で新しい設定を行うたびに、あるいは Reset MaxHold ボタンを押すたびにクリアされます。

### スタイル

図 4-5 の FFT 行列には各周波数欄に値が 1 つだけ入っています。これは、FFT から返されるレベル値を表しています。この例では、ドット形式を採用しています。すなわち、行列はドットで埋められています。これに対して、ベクトル形式モードは 1 エントリで各要素が少なくとも 1 つ以上の隣接要素を持つようにさせます。2 つの連続する周波数ポイントはレベルの違いとは無関係に常に 1 つの要素とつながっています。図 4-5 のマトリクスから図 4-6 のマトリクスを求めるために、列 3 および 5 に隣接する“1”の列 4 を接続するために、列 4 に“1”を挿入します。図 4-6 は、図 4-5 のドット形式の例をベクトル形式で表したものです。

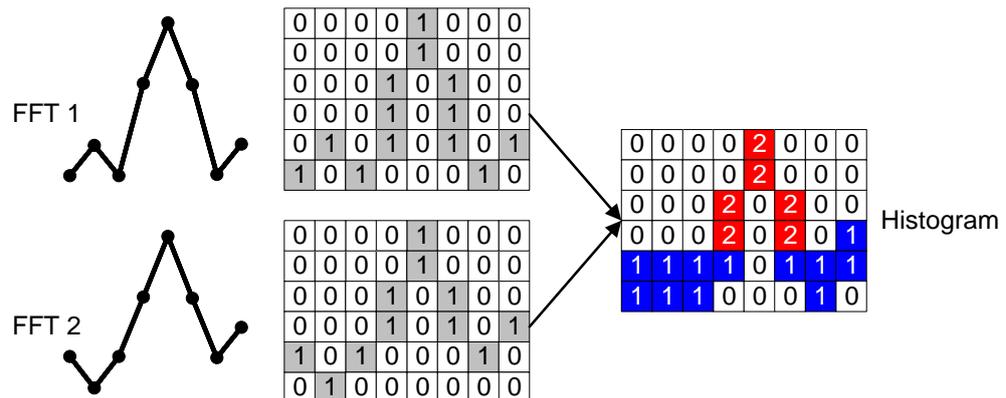


図 4-6 ベクトル形式を使用したヒストグラムの計算

ドット形式からベクトル形式へ変更した場合に、“1”の要素を追加することで確率レベルが増加します。この増加は、特に疑似雑音信号を持つ領域で明確に見ることができます。つまり、レベルが大きく変動します。

### リアルタイム FFT トレース：検波器、掃引時間

残光モード表示は、FFT 結果から直接、残光情報とヒストグラム情報を作り出します。ヒストグラム・アルゴリズムは容易に表示可能なレートまでデータの削減を行っているので、スペクトログラムの場合のようにデータの削減のために検波器を使う必要がありません。

残光モードでの検波器の設定は、残光モードの一番上にトレースをプロットできるリアルタイム・スペクトラムのみに影響します。検波器は、最新の信号形状を迅速に認識するのに役立ちます。FFT プロットでは、検波器、掃引時間、およびトレース・モードなどの一般的なパラメータが用いられます。これらのパラメータはリアルタイム FFT トレースのみに影響し、残光モード表示またはヒストグラム表示には影響しません。

### カラーマッピング

残光モードにおけるカラーマッピングはスペクトログラムにおけるカラーマッピングと同じです。同様に入力ボックスが表示され、同様の機能を提供します。ダイアログの一番下にある確率分布は、カラーコード化された確率の分布に関する情報を提供します。

ダイアログ・ボックスで、Truncate というチェック・ボックスが用意されています。このチェック・ボックスを有効にすると、Start 値より下にあるすべての値と Stop 値より上にあるすべての値が最低または最高のレベルを示す色で表示されなくなり、代わって黒色で表示されます（これらの値は見えなくなります）。特定の確率のスペクトラム成分のみを表示する場合に特に有効です。

一般的に、残光の形式をベクトルからドットへあるいはドットからベクトルへ変更した場合には、新しいカラーマッピングが必要となります。これは、上述したように、変更した結果、発生確率が大幅に変わる可能性があるためです。

## 5 オーダー情報

型名		オーダーNo
R&S®FSW8	シグナル・スペクトラム・アナライザ、2 Hz ~ 8 GHz	1312.8000.08
R&S®FSW13	シグナル・スペクトラム・アナライザ、2 Hz ~ 13.6 GHz	1312.8000.13
R&S®FSW26	シグナル・スペクトラム・アナライザ、2 Hz ~ 26.5 GHz	1312.8000.26
R&S®FSW43	シグナル・スペクトラム・アナライザ、2 Hz ~ 43 GHz	1312.8000.43
R&S®FSW50	シグナル・スペクトラム・アナライザ、2 Hz ~ 50 GHz	1312.8000.50
R&S®FSW-B160R	160MHz 帯域幅、リアルタイム解析アプリケーション	1313.1668.06
R&S®FSVR7	リアルタイム・スペクトラム・アナライザ、10 Hz ~ 7 GHz、40 MHz 帯域幅	1311.0006.07
R&S®FSVR13	リアルタイム・スペクトラム・アナライザ、10 Hz ~ 13 GHz、40 MHz 帯域幅	1311.0006.13
R&S®FSVR30	リアルタイム・スペクトラム・アナライザ、10 Hz ~ 30 GHz、40 MHz 帯域幅	1311.0006.30
R&S®FSVR40	リアルタイム・スペクトラム・アナライザ、10 Hz ~ 40 GHz、40 MHz 帯域幅	1311.0006.40



#### ローデ・シュワルツについて

ローデ・シュワルツ・グループ（本社：ドイツ・ミュンヘン）は、エレクトロニクス分野に特化し、電子計測、放送、無線通信の監視・探知および高品質な通信システムなどで世界をリードしています。

75年以上前に創業し、世界70カ国以上で販売と保守・修理を展開している会社です。

#### ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

本社／東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1

住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 2-8-12

Attend on Tower 16 階

TEL:045-477-3570 (代) FAX:045-471-7678

大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市江坂町 1-23-20

TEK 第2ビル 8 階

TEL:06-6310-9651 (代) FAX:06-6330-9651

サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区針ヶ谷 4-2-11

さくら浦和ビル 4 階

TEL:048-829-8061 FAX:048-822-3156

E-mail: [info.rsjp@rohde-schwarz.com](mailto:info.rsjp@rohde-schwarz.com)

<http://www.rohde-schwarz.co.jp/>

Certified Quality System  
**ISO 9001**  
DQS REG. NO 1954 QM

Certified Environmental System  
**ISO 14001**  
DQS REG. NO 1954 UM

このアプリケーションノートと付属のプログラムは、ローデ・シュワルツのウェブサイトのダウンロード・エリアに記載されている諸条件に従ってのみ使用することができます。

掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。

おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。あらかじめご了承ください。

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1 住友不動産西新宿ビル 27 階

TEL:03-5925-1288/1287 FAX:03-5925-1290/1285

[www.rohde-schwarz.co.jp](http://www.rohde-schwarz.co.jp)