スペクトラム・アナライザ
測定を成功させる8つのヒント

Application Note 1286-1

Agilent Technologies

スペクトラム・アナライザ

スペクトラム・アナライザはオシロスコープと同様に、信号の観測に使用する基本測定器です。図1に示すようにオシロスコープがタイム・ドメインの観測をするのに対し、スペクトラム・アナライザは周波数ドメインの観測をします。

図2は、掃引同調型スーパーヘテロダイン・スペクトラム・アナライザの簡単なブロック図です。スーパーヘテロダインでは、オーディオ周波数よりも上の周波数に変換します。アナライザは、入力信号を最初にアッテネータに通してミキサにおける振幅を制限し、次にローパス・フィルタに通して不要な周波数を除去します。入力フィルタを通過した信号は、掃引発生器で制御される局部発振器（LO）の信号とミキシングされます。LOの周波数が変化すると、ミキサの出力信号（元の2つの信号、その和、差、それらの高調波を含む）は、分解能帯域幅フィルタ（IFフィルタ）でフィルタされ、対数スケールで増幅または圧縮されます。次に、IFフィルタを通過する信号のパワー・レベルが検波器により測定され、そのDC電圧がディスプレイの垂直軸に表示されます。このようにして掃引発生器がその周波数レンジを掃引することにより、トレースが画面に描かれます。このトレースが、選択した周波数レンジでの入力信号のスペクトラム分布を表します。

デジタル・テクノロジーが実用になり始めたころ、このテクノロジーは図2に示すようにビデオ信号をデジタイズするために用いられました。その後、デジタル・テクノロジーの進歩とともに、スペクトラム・アナライザはデジタル信号処理（DSP）を取り込んで進化してきました。点線のボックスで示すように最終IFフィルタの後にDSPを置くことにより、複雑化する信号フォーマットの測定が可能になりました。DSPにより、ダイナミック・レンジの拡大、掃引速度の向上、確度の向上が実現されました。

スペクトラム・アナライザの測定では、入力信号の歪みをなくし、アプリケーション固有の測定に合わせてスペクトラム・アナライザを適切に設定し、仕様を最大限に活用するために測定手順を最適化する必要があります。これらの手順の詳細についてはヒントの中で説明します。

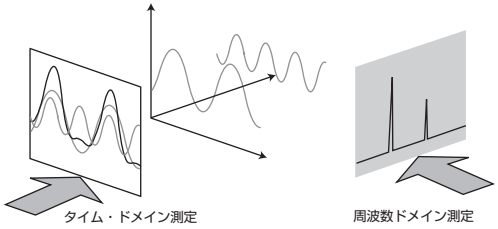


図1. 測定ドメイン

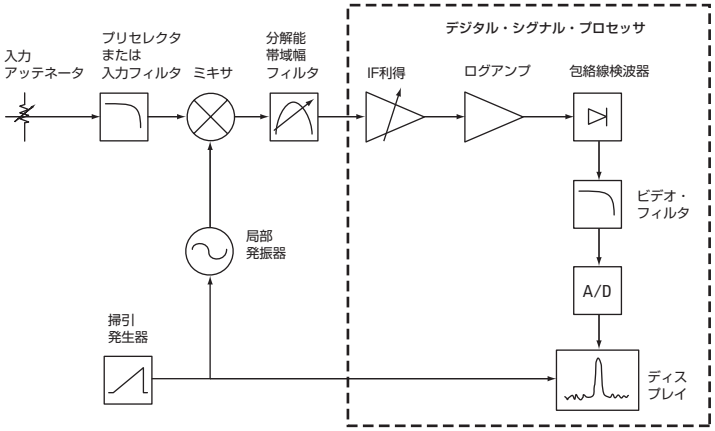


図2. スーパーヘテロダイン・スペクトラム・アナライザのブロック図

ヒント1.　最適な分解能帯域幅（RBW）の選択

分解能帯域幅（RBW）の設定は、スペクトラム成分の分離、適切なノイズ・フロアの設定、信号の復調が目的の場合に考慮する必要があります。

条件の厳しいスペクトラム測定を行う場合は、スペクトラム・アナライザの確度、速度、ダイナミック・レンジが重要です。ほとんどの場合、これらのパラメータのどれかを重視すると、他のパラメータに悪影響があります。このトレードオフにはしばしばRBW設定が関連します。

狭いRBWを使用する利点の1つは、低レベル信号を測定する際に明らかとなります。狭いRBWを使用すると、スペクトラム・アナライザの表示平均ノイズ・レベル（DANL）が下がり、ダイナミック・レンジが広がって、スペクトラム・アナライザの感度が向上します。図3では、RBWを100 kHzから10 kHzに変更することにより、−95 dBmの信号が適切に分解されています。

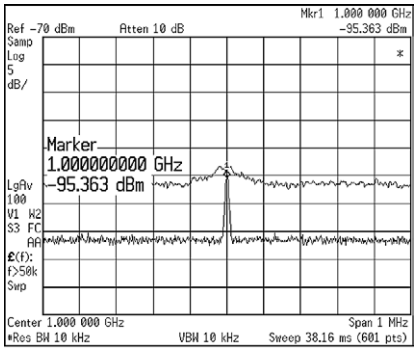


図3.　100 kHz RBWと10 kHz RBWの測定の表示

ただし、最も狭いRBWが常に最善というわけではありません。変調された信号の場合、信号の側波帯が含まれるようにRBWを設定することが重要です。そうしないと、測定結果がきわめて不正確になります。

また、狭いRBW設定の重大な欠点は、掃引速度です。同じスパンに対する掃引速度は、RBW設定が広いほど高速になります。図4と5に、200 MHzのスパンに対する10 kHzと3 kHzのRBWによる掃引時間の比較を示しています。

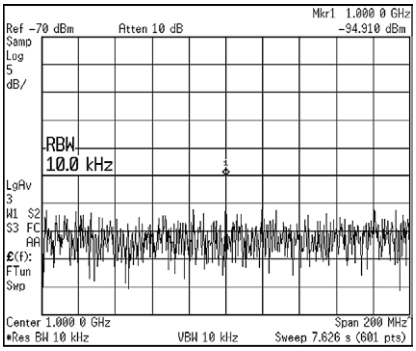


図4.　10 kHz RBWでの掃引時間は7.626 s

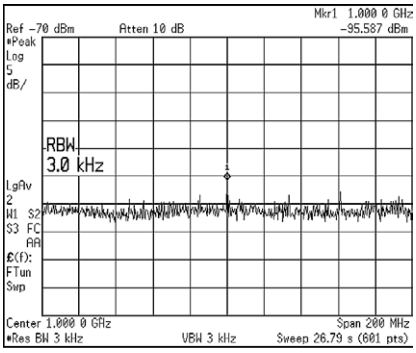


図5.　3 kHz RBWでの掃引時間は26.79 s

どの測定パラメータの最適化が最も重要かがわかっている場合は、RBWの選択に伴う基本的なトレードオフを理解することが大切です。しかし、測定パラメータのトレードオフが避けられない場合のために、今日のスペクトラム・アナライザには、トレードオフを緩和したり除去したりする方法が用意されています。デジタル信号処理を利用することにより、狭いRBWを使用した場合でも、正確な測定を実行しながら掃引速度を上げることができます。

ヒント2.　測定確度の改善

測定する前に、振幅と周波数の測定確度を上げるためにいくつかの手法があることを知っておく必要があります。

自己校正ルーチンは誤差係数（振幅変化と分解能帯域幅の関係など）を作成し、アナライザは後でそれを使って測定データを補正します。これにより、振幅測定の確度が向上し、測定中に設定をより柔軟に変更できるようになります。

校正済みのアナライザに被試験デバイス（DUT）を接続すると、信号伝送回路により信号が劣化したり、変化するおそれがあります。これは図6のようにして除去する必要があります。このための方法として、アナライザの振幅補正機能と信号源、パワー・メータを使用します。図7は、DUTの信号を減衰させる伝送回路の周波数応答です。不要な効果を除去するには、測定範囲内の周波数ポイントで信号伝送回路の減衰を測定します。振幅補正は周波数と振幅が対になったリストから各ポイントを直線的に結んで補正「波形」を作成し、それに従って入力信号を補正します。図8では、信号伝送回路の不要な減衰と利得が測定値から除去され、より正確な振幅測定が得られています。

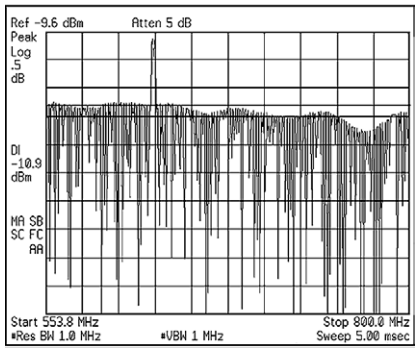


図7.　元の信号

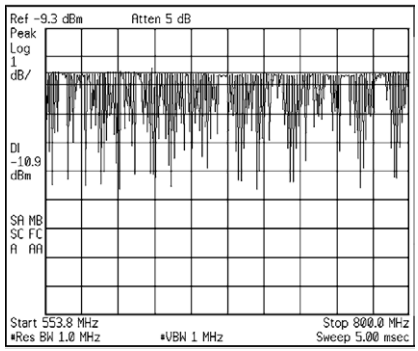


図8.　補正された信号

今日のスペクトラム・アナライザでは、アンテナ、ケーブルなどの機器に対する補正値を個別に保存しておけるので、設定を変更してもそのたびに校正を実行する必要はありません。

より正確な周波数測定の方法は、スペクトラム・アナライザの周波数カウンタを使用することです。これにより、スパンなどの、周波数の不確かさの原因の多くが取り除かれます。周波数カウンタは、IF信号のゼロ交差をカウントし、変換の残りの部分にある局部発振器の周波数オフセットによりそのカウントを補正します。

測定の全不確かさを求めるには、スペクトラム・アナライザのさまざまな不確かさの要素を加算します。RFアッテネータの設定、分解能帯域幅、基準レベルなどを変更せずに済めば、その変更に伴うすべての不確かさが除去され、測定の全不確かさが低減されます。これは、アナライザについて理解することの重要性を示す例です。例えば、IFをデジタル処理する高性能スペクトラム・アナライザでは、RBWを変更しても誤差は加算されませんが、それ以外のアナライザでは誤差が加算されます。

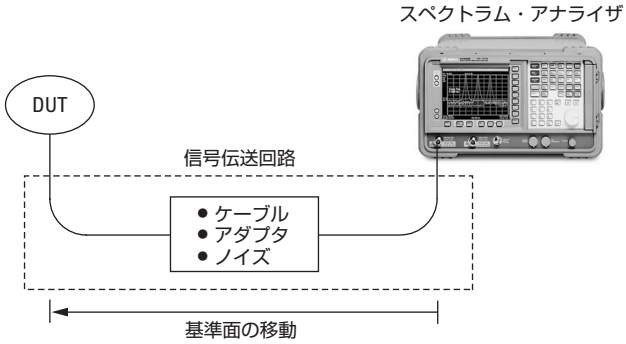


図6.　テスト・セットアップ

ヒント3.　低レベル信号の測定の際の感度の最適化

スペクトラム・アナライザの低レベル信号の測定能力は、スペクトラム・アナライザの内部で発生するノイズにより制限されます。この低レベル信号に対する感度は、アナライザの設定に影響されます。

例えば図9に示す50 MHzの信号は、アナライザのノイズ・フロアにより覆い隠されています。低レベル信号を測定するには、入力アッテネータを最小にしたり、分解能帯域幅（RBW）フィルタを狭めたり、プリアンプを使用したりして、スペクトラム・アナライザの感度を上げる必要があります。これらの手法は、表示平均ノイズ・レベル（DANL）を実効的に下げることにより、低レベル信号の測定を可能にします。

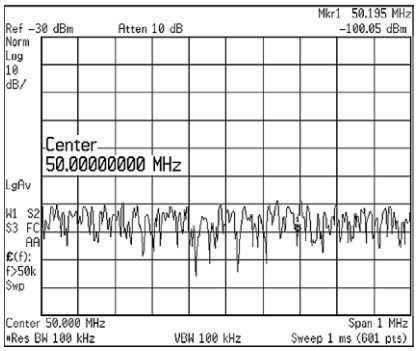


図9.　ノイズにより隠された信号

入力アッテネータの値を大きくすると、入力ミキサでの信号レベルが下がります。スペクトラム・アナライザのノイズは入力アッテネータの後で発生するので、アッテネータ設定はS/N比に影響します。利得を入力アッテネータと連動させて減衰の変化を補正した場合は、実際の信号は画面上では変化しません。これに対して、表示ノイズ・レベルは、入力アッテネータの設定の変更に伴うS/N比の変化を反映して、IF利得とともに変化します。したがって、DANLを下げるには、入力アッテネータの値を小さくする必要があります。

ミキサ出力では、アナライザのディスプレイで信号のピークを一定のポイントに保つために、増幅器が減衰した信号を増幅します。そこで入力信号の増幅に加えて、アナライザ内に存在するノイズも同時に増幅されます。このため、スペクトラム・アナライザのDANLも増加します。

その後、再増幅された信号はRBWフィルタを通ります。RBWフィルタの帯域幅を狭めることにより、アナライザの包絡線検波器に到達するノイズ・エネルギーが減少し、アナライザのDANLが低下します。

図10は、DANLを段階的に下げていった結果を示しています。一番上のトレースは、分解能帯域幅を最小化し、パワー・アベレージングを使用した場合で、信号がノイズ・フロアより上に現れています。その下のトレースは、減衰を最小化した場合です。3番目のトレースは、対数パワー・アベレージングを使用することにより、ノイズ・フロアをさらに2.5 dB下げた場合で、きわめて高い感度が必要な測定に適しています。

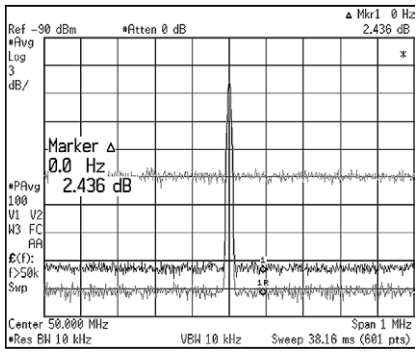


図10.　分解能帯域幅、入力アッテネータを最小化し、対数パワー・アベレージングを使用した後の信号

感度を最大にするには、低雑音／高利得のプリアンプを使用する必要があります。増幅器の利得が十分高い場合は（プリアンプを接続すると、アナライザに表示されるノイズは最低10 dB増加します）、プリアンプとアナライザの組み合わせた場合のノイズ・フロアは、増幅器の雑音指数により決まります。

信号キャリアが特定の振幅と周波数の「マスク」の範囲内に入ることを確認するために、被試験デバイスのスプリアス信号の測定が必要になる場合があります。今日のスペクトラム・アナライザはリミット・ライン機能を備え、トレース・データをある周波数（または時間）における振幅と比較できます。信号がリミット・ラインの境界内に入る場合は、PASS MARGINまたはPASS LIMIT（Agilentのアナライザの場合）という表示が現れます。信号がリミット・ラインの外に出た場合は、図11のようにFAIL MARGINまたはFAIL LIMITという表示が画面に現れ、スプリアス信号の存在を示します。

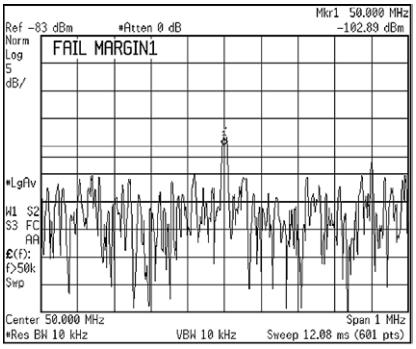


図11.　リミット・ラインを使ったスプリアス信号の検出

ヒント4.　歪み測定の際のダイナミック・レンジの最適化

信号を測定する際に生じる問題の1つは、大きな基本波トーン信号と、小さな歪み成分とを区別する能力です。信号と歪み、信号とノイズ、信号と位相雑音を区別できる最大範囲のことを、スペクトラム・アナライザのダイナミック・レンジと呼びます。

スペクトラム・アナライザで信号と歪みを測定する際のダイナミック・レンジは、ミキサ・レベルにより決まります。ダイナミック・レンジを最適化するためのミキサ・レンジは、スペクトラム・アナライザの2次高調波歪み、3次相互変調歪み、表示平均ノイズ・レベル（DANL）により決まります。これらの仕様から、内部で発生する歪み／ノイズとミキサ・レベルとの関係のグラフを作成できます。

図12は、－40 dBmのミキサ・レベルでの－75 dBcの2次高調波歪みポイント、－30 dBmのミキサ・レベルでの－85 dBcの3次歪みポイント、10 kHz RBWでの－110 dBmのノイズ・フロアをプロットしたものです。2次高調波歪みの線の傾きは1です。理由は、ミキサでの基本波のレベルが1 dB上がるごとに、SHDは2 dB増加するからです。しかし、歪みは基本波と歪み成分の差により決まるため、変化は1 dBだけです。同様に、3次歪みの傾きは2です。ミキサ・レベルが1 dB変化するごとに、3次成分は3 dB変化しますが、相対的には2 dBの変化になるからです。2次／3次ダイナミック・レンジを最大にするには、2次／3次歪みがノイズ・フロアと等しくなるレベルにミキサを設定します。このミキサ・レベルはグラフからわかります。

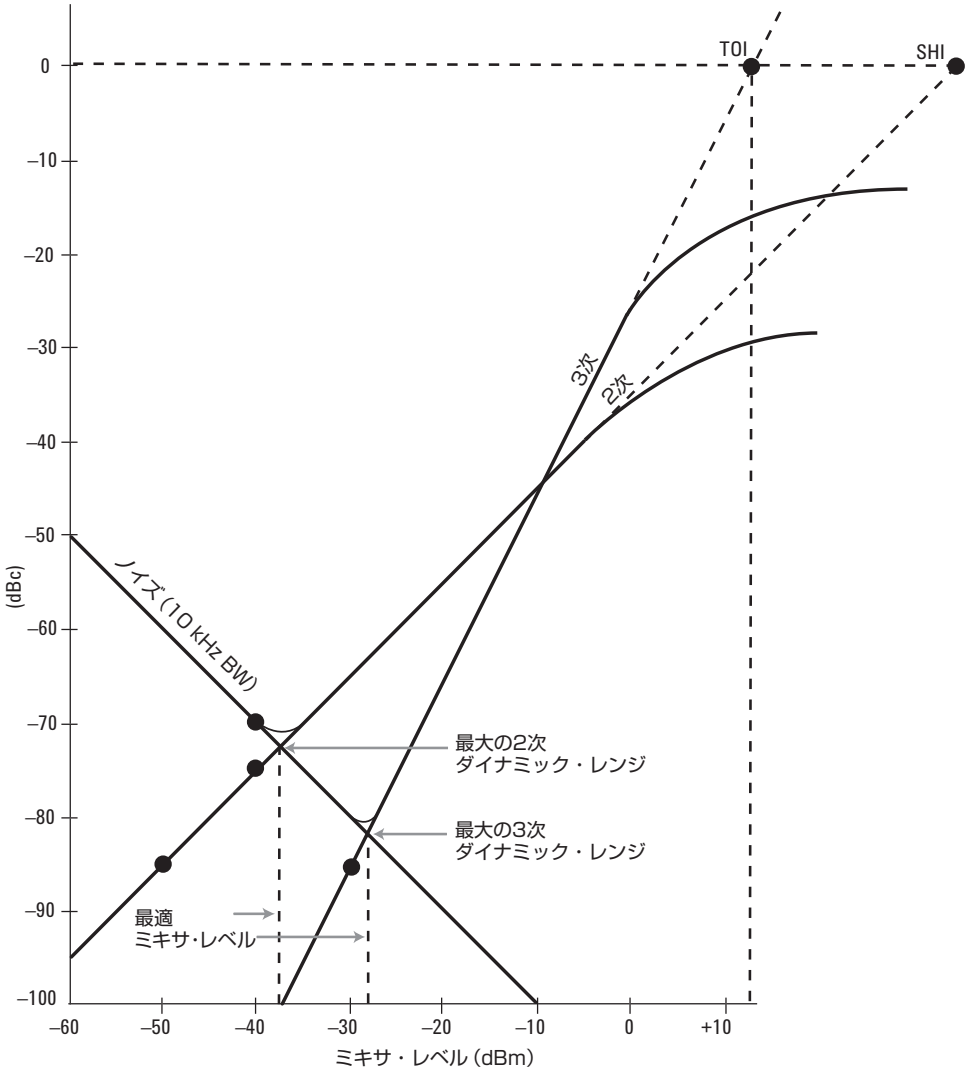


図12.　ダイナミック・レンジと歪み／ノイズとの関係

ダイナミック・レンジを増やすには、分解能帯域幅を狭める必要があります。図13に示すように、RBW設定を10 kHzから1 kHzに下げると、ダイナミック・レンジが増加します。増加量は、2次歪みについては5 dB、3次歪みについては6 dB以上です。

最後に、相互変調歪みのダイナミック・レンジは、スペクトラム・アナライザの位相雑音により影響される場合があります。これは、各スペクトラム成分（テスト・トーンと歪み成分）の周波数間隔が、テスト・トーンの間隔に等しいからです。例えば、テスト・トーンの間隔が10 kHzの場合は、1 kHzの分解能帯域幅を使用すると、図に示すノイズ曲線が得られます。10 kHzオフセットでの位相雑音が80 dBcの場合は、この測定のダイナミック・レンジの限界は、図14に示す88 dBの最大ダイナミック・レンジではなく、80 dBとなります。

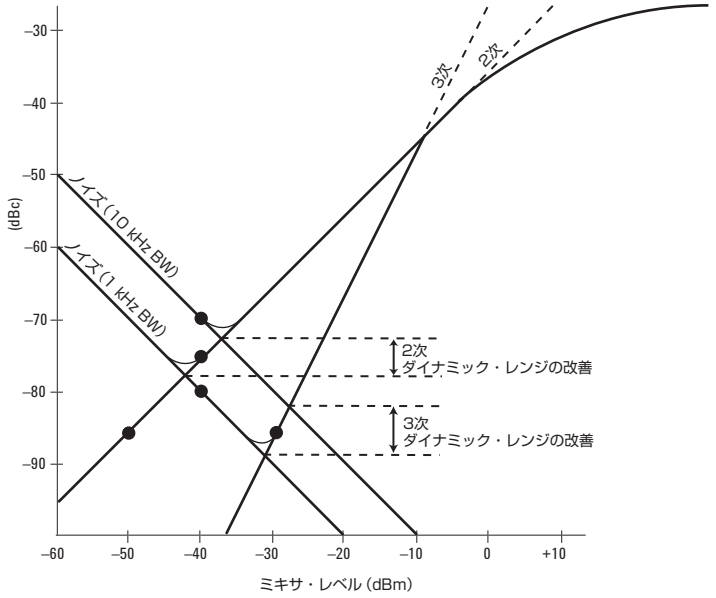


図13.　分解能帯域幅の減少によるダイナミック・レンジの改善

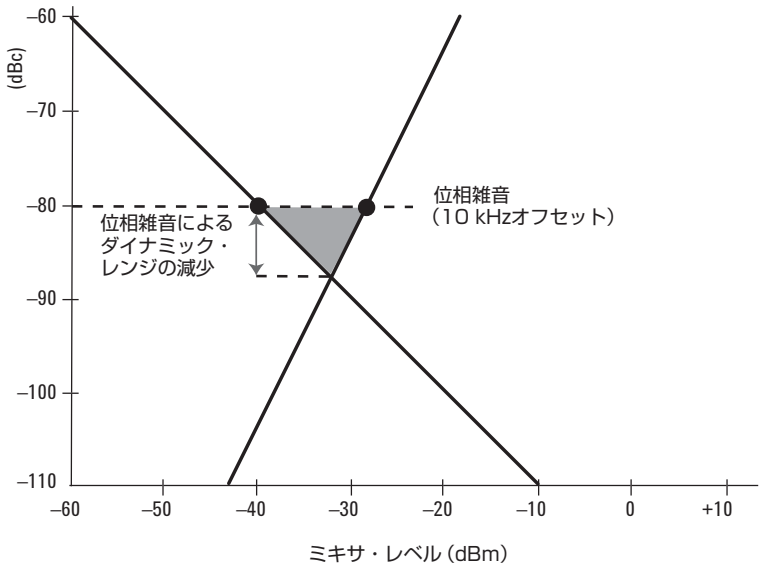


図14.　位相雑音による3次相互変調テストの制限

ヒント5.　内部歪み成分の特定

高レベルの入力信号はスペクトラム・アナライザの内部で歪み成分を発生させ、入力信号の本当の歪み測定を阻害することがあります。デュアル・トレースとアナライザのRFアッテネータを使用すると、アナライザ内部で発生した歪みが測定に影響するかどうかを判定できます。

初めに、入力信号レベルからアッテネータの設定値を引いた結果が約－30 dBmになるように入力アッテネータを設定します。内部歪み成分を識別するには、入力信号の2次高調波に同調して、入力アッテネータを0 dBmに設定します。次に、画面データをトレースBに保存し、アクティブ・トレースとしてトレースAを選択し、Δマーカをアクティブにします。これによりスペクトラム・アナライザは、保存したデータをトレースBに、測定データをトレースAに表示します。また、Δマーカは、2つのトレース間の振幅と周波数の差を示しています。最後にRF減衰を10 dB増加させて、トレースAの応答とトレースBの応答とを比較します。

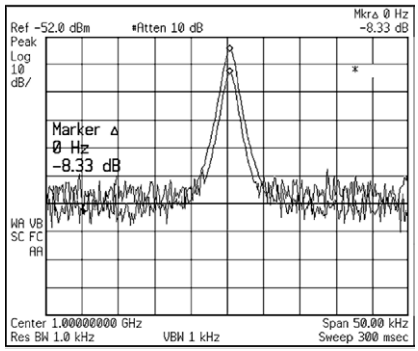


図15.　内部で発生した歪み成分

図15のように2つの応答に差があれば、入力信号のレベルが高いために、アナライザのミキサで内部歪み成分が発生しています。このような場合は、減衰量を増加させる必要があります。

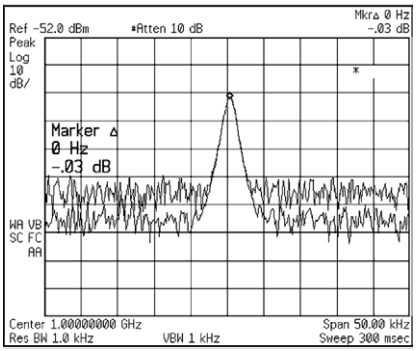


図16.　外部で発生した歪み成分

図16では、信号のレベルに変化がないので、内部で発生した歪みは測定に影響しません。表示された歪みは、入力信号に存在するものです。

ヒント6.　過渡信号測定時の測定速度の最適化

高速掃引は、過渡信号を捕捉したり、テスト時間を最小にするために必要になります。高速掃引のためにスペクトラム・アナライザの性能を最適化するには、掃引時間を決定するパラメータを適切に変更する必要があります。

掃引同調スーパーヘテロダイン・スペクトラム・アナライザの掃引時間は、スパンを分解能帯域幅（RBW）の2乗で割った値で近似されます。このため、掃引時間はRBW設定に大きく影響されます。RBWフィルタの帯域幅が狭いほど、掃引時間は長くなります。すなわち、掃引時間と感度の間にはトレードオフがあります。図17に示すように、RBWが10倍変化すると、感度は約10 dB向上します。

今日の高性能スペクトラム・アナライザのRBWは、必要な掃引速度、感度、選択度を実現するために、用途に応じて（細かいステップで）減少させることができます。図2では10 kHz RBWでの掃引時間が7.626 sであるのに対して、図3では3 kHz RBWでの掃引時間が26.79 sであることが示されています。

時間と感度のバランスを取るために、スペクトラム・アナライザに内蔵されている高速フーリエ変換（FFT）を使用する方法があります。FFTを使用することにより、アナライザはスパン全体を1つの測定サイクルで捕捉できます。FFT解析を使用する場合は、掃引時間はRBW設定ではなく周波数スパンにより決まります。したがって、スパンが狭い場合は、FFTモードの方が掃引モードよりも掃引時間が短くなります。この速度の違いがはっきりするのは、低レベル信号を測定するために狭いRBWフィルタを使用している場合です。20 MHzスパン、1 kHz RBWの場合は、下の図18に示すように、FFTモードでの掃引時間が747.3 msであるのに対し、掃引モードでの掃引時間は24.11 sです。スパンとRBWが非常に広い場合には、掃引モードの方が高速になります。

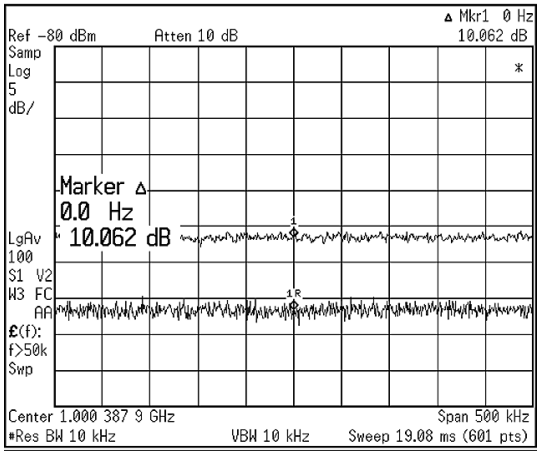
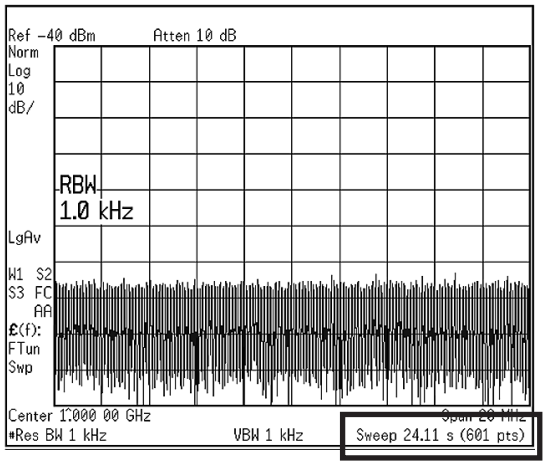


図17.　RBWが10倍変化すると感度は約10 dB低下



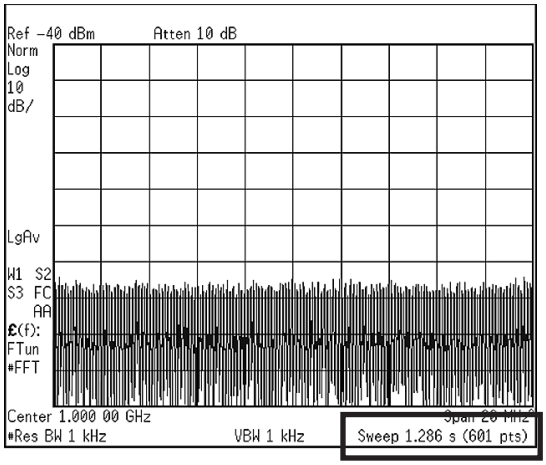


図18.　FFTモードと掃引モードの掃引時間の比較

ヒント7.　最良のディスプレイ検波モードの選択

今日のスペクトラム・アナライザは、信号をIFで、またはビデオ・フィルタの後でデジタイズします。デジタイズしたデータのどれを表示するかは、ADCの後ろにあるディスプレイ検波器により決まります。これは、データが複数のバケットに分割され、各バケットからどのデータを表示するかの選択がディスプレイ検波モードにより決まるからです。

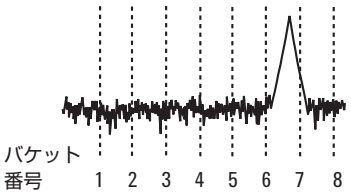


図19.　サンプル・バケット

図20に、正ピーク、負ピーク、サンプルの各検波モードを示します。ピーク検波モードは、各バケットの最大レベルを検出するもので、正弦波の解析には適していますが、ノイズに過剰に応答する傾向があります。これは最も高速な検波モードです。

サンプル検波モードでは、パワーに関係なく、各バケットの中央のポイントが表示されます。サンプル検波はノイズ測定に適していて、ノイズの真のランダム性を正確に表示できます。しかし狭い分解能帯域幅による連続波（CW）の測定では不正確となり、各バケットで同じポイントにならない信号は見落とされます。

負ピーク検波モードでは、各バケットの最低パワー・レベルが表示されます。このモードは、AM/FM復調、およびランダム・ノイズとインパルス・ノイズとの見分けに適しています。負ピーク検波の場合は、見かけ上のノイズ・フロアは下がりますが、アナライザの感度が改善されることはありません。正弦波信号のバケットに対する各検波モードによる表示の比較を図20に示します。

高性能スペクトラム・アナライザには、図21に示すノーマル検波という検波モードも装備されています。このサンプリング・モードは、データ・ポイントをノイズまたは信号として動的に分類します。これによりランダム・ノイズはピーク検波よりも良く表示され、またサンプル検波における信号の見逃しも防止できます。

アベレージ検波は、各バケットの平均パワー、電圧、または対数パワー（ビデオ）を表示します。パワー・アベレージングは真の平均パワーを計算するもので、複雑な信号のパワー測定に最適です。電圧アベレージングは、バケット・インターバルの間に測定された包絡線信号のリニア電圧データの平均を取ります。これはEMIテストに多く用いられ、AM信号や、レーダ／TDMAトランスミッタなどのパルス変調信号の立ち上がり／立ち下がり動作のモニタにも適しています。対数パワー（ビデオ）アベレージングは、バケット・インターバルの間に測定された包絡線信号の対数振幅値（dB）を平均します。対数パワー・アベレージングは正弦波信号に適していて、特に信号がノイズに近い場合に威力を発揮します。これは、ノイズが実際のレベルよりも2.5 dB低く表示され、スペクトラム（正弦波）成分のS/N比が改善されるからです。

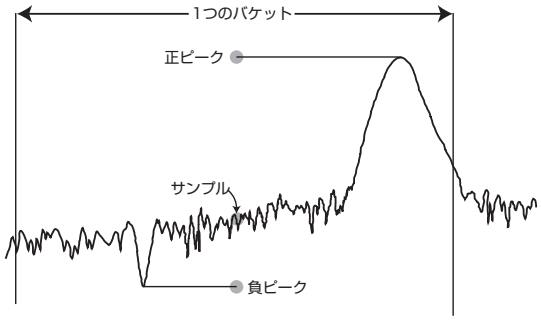


図20.　メモリに保存されるトレース・ポイントは検波タイプのアルゴリズムに基づきます。

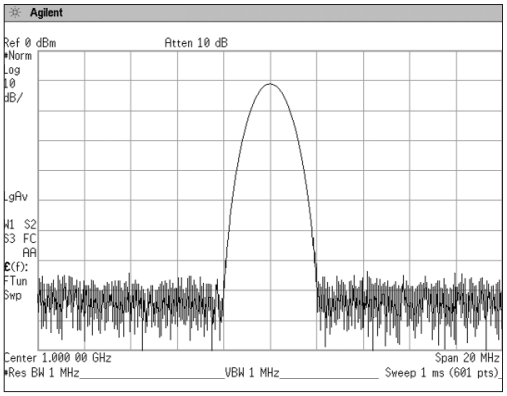


図21.　ノーマル検波は、信号が単調増加または単調減少する場合の、バケットの最大値を表示します。

ヒント8.　バースト信号の測定: タイム・ゲーティッド・スペクトラム解析

スペクトラム・アナライザを使用したバースト信号（パルス）の解析は、非常に困難なものとなります。これは、パルスに載っている情報だけでなく、パルスの形状（パルス・エンベロープ）の周波数成分もアナライザに表示されるからです。パルス・エンベロープの高速な立上がり／立下がり時間からは、不要な周波数成分が発生し、元の信号の周波数成分に加算されます。このような不要な周波数成分は、最悪の場合、目的の信号を覆い隠してしまうことがあります。

例えば図22は、単純なAM信号を伝送するパルスの周波数成分を示したものです。ここでは、AM側波帯はパルスのスペクトラムによりほぼ完全に覆い隠されています。

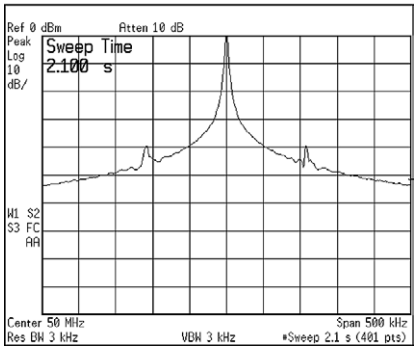


図22.　タイム・ゲーティングなしのスペクトラム

タイム・ゲーティッド・スペクトラム解析を使用すると、パルス自体のエンベロープの影響を受けることなく、パルスの内容を解析できます。タイム・ゲーティングを実現する方法の1つは、図23に示すように、スペクトラム・アナライザのビデオ経路にゲート（スイッチ）を配置する方法です。このようなタイム・ゲーティングの方法をゲーティッド・ビデオと呼びます。

タイム・ゲーティッド測定では、アナライザはバーストの開始を検出して、分解能フィルタがパルスの立ち上がり時間に応答した後に、測定を開始し、バーストが終了する前に解析を停止します。これにより、図24に示すように、パルスにより伝送される情報だけが解析されます。また図24の例では、このパルスには、40 MHzのキャリアが100 kHzの正弦波信号で変調されたものが含まれていることが明確になります。

今日の高性能スペクトラム・アナライザで使用できるタイム・ゲーティングの方法には、他にゲーティッドLOとゲーティッドFFTの2種類があります。ゲーティッドLOは、パルスド信号部分で局部発振器を掃引することにより、信号の各発生毎に複数のトレース・ポイントを記録します。これに対して、ゲーティッドFFTは、デジタイズされたバースト信号のFFTを行うことにより、パルス・スペクトラムの影響を除去します。どちらの方法も、速度の向上に効果があります。

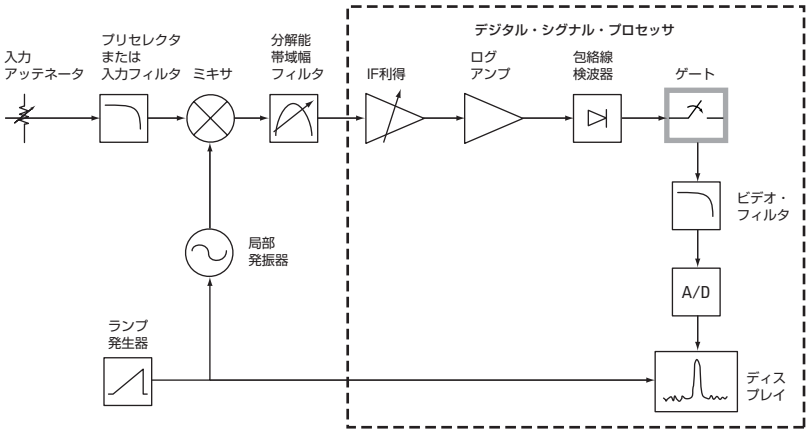


図23.　ゲーティッド・ビデオ・タイム・ゲーティングを使用したスペクトラム・アナライザのブロック図

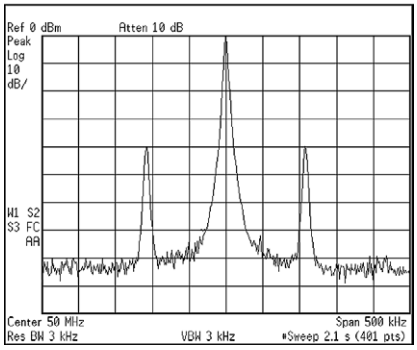


図24.　タイム・ゲーティングを行った信号

Agilentのスペクトラム・アナライザ

Agilent PSAシリーズ

PSAシリーズ・スペクトラム・アナライザは、50 GHzまでの高性能スペクトラム解析を実現します。強力なワンボタン測定、豊富な機能、最先端の柔軟性、速度、確度、解析帯域幅、ダイナミック・レンジを提供します。

ミリ波、位相雑音、雑音指数測定からスプリアス・サーチ、デジタル変調解析まで、PSAシリーズは、携帯電話や最新の無線通信テクノロジー、航空宇宙防衛など、さまざまな分野で柔軟なソリューションを提供します。

図25. Agilent PSAシリーズ・スペクトラム・アナライザ

Agilent ESAシリーズ

ESAシリーズ・スペクトラム・アナライザは、スケーラブルなベーシック／ミッド・パフォーマンス・スペクトラム解析を提供し、携帯電話や無線ネットワークからケーブルTVまでの汎用測定やアプリケーション専用の測定に威力を発揮します。ESAには、短納期で安価なExpress Analyzer構成が用意されています。

図26. Agilent ESAシリーズ・スペクトラム・アナライザ

Agilent 8560 ECシリーズ

条件の厳しい測定に対して高いパフォーマンス、機能、品質を提供するこのスペクトラム・アナライザ・シリーズは、研究開発で必要な性能と機能を兼ね備えています。

生産現場では高い信頼性と測定速度が得られ、フィールド・ユースでは使いやすさ、携帯性、MIL準拠の堅牢性をも備えています。

図27. Agilent 8560 ECシリーズ

関連カタログ

スペクトラム解析の基礎、
カタログ番号5952-0292JAJP

スペクトラム・アナライザの測定速度の最適化、Application Note、カタログ番号5968-3411JAJP

Optimizing Dynamic Range for Distortion Measurements、Product Note、カタログ番号5980-3079EN

スペクトラム・アナライザの振幅確度の最適化、Application Note、カタログ番号5968-3659JAJP

シグナル・アナライザ・セレクション・ガイド、Selection Guide、カタログ番号5968-3413JAJP

PSAシリーズ：掃引解析とFFT解析、
Product Note、カタログ番号5980-3081JA

Webリソース

www.agilent.co.jp/find/spectrumanalyzers

アジレント・テクノロジー株式会社

本社〒192-8510 東京都八王子市高倉町9-1

計測お客様窓口

受付時間 9:00-19:00（土・日・祭日を除く）

FAX、E-mail、Webは24時間受け付けています。

TEL ■■ 0120-421-345
(042-656-7832)

FAX ■■ 0120-421-678
(042-656-7840)

Email contact_japan@agilent.com

電子計測ホームページ
www.agilent.co.jp

● 記載事項は変更になる場合があります。
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2007
アジレント・テクノロジー株式会社

Agilent Open

www.agilent.co.jp/find/open

Agilentは、テスト・システムの接続とプログラミングのプロセスを簡素化することにより、電子製品の設計、検証、製造に携わるエンジニアを支援します。Agilentの広範囲のシステム対応測定器、オープン・インダストリ・ソフトウェア、PC標準I/O、ワールドワイドのサポートは、テスト・システムの開発を加速します。

Agilent Technologies

February 5, 2007
5965-7009J
0000-00DEP