スペクトラム・アナライザ入門

瀬賀 幸一

テクトロニクス(〒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)

Fundamentals of Spectrum Analyzer

Koichi SEGA

Tektronix, Shinagawa Intercity Building B6th Floor, 2-15-2 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-6106

(Received April 6, 2011)

There are three method to realize Spectrum Analyzers as concept, which are swept filter method, multiple filter method and superheterodyne method. A superheterodyne is traditional technique for realization of Spectrum Analyzer and this technique has still utilized in modern Spectrum Analyzer. With advance of semiconductor technology and digital signal processing technology, modern Spectrum Analyzer has various useful functions for signal analysis with dramatic improvement of RF performance. A signal to be analyzed becomes complex and widely spread frequency, and change signal condition over time. The demand of complex signal analysis from different aspects which are time, frequency, modulation, phase and etc. has been increasing. Understanding of Spectrum Analyzer basic and measurement limitation is very important to avoid incorrect measurement. In this paper, basic of Spectrum Analyzer will be described and also modern Spectrum analyzer will be introduced.

1. スペクトラム・アナライザとは

すべての電気信号は、周波数と振幅の異なった正弦波の組み合わせにより成り立っている。

これらの信号は、時間軸上の波形としてはオシロスコープにより、また周波数軸上ではスペクトラム・アナライザにより観測される (Fig. 1)。

オシロスコープでは電気信号の時間とともに変化する振幅が観測できる。同様に、スペクトラム・アナライザでは、電気信号を構成する個々の正弦波の振幅と周波数を観測できる。どちらの場合も縦軸を振幅に、また横軸はオシロスコープでは時間軸、スペクトラム・アナライザでは周波数軸として表示する。

スペクトラム・アナライザは、基本的に電気信号の周波数とレベルを測定する測定器であるが、一般に広い周

波数帯域を持ち、高感度で高い周波数を発振する局部発振器とミキサによる周波数変換を繰り返すことから、基本性能に影響を与える数多くの項目があり、それらについての理解を深めることにより、より精度の高い測定が可能になる (Fig. 2)。

掃引型スペアナは、RF入力信号と局部発振器をミキサに入力して積算させ、ミキサが両信号の周波数の和、差成分を出力する性質を利用して、RF入力信号を包絡線検波が可能な低い周波数に変換(ダウンコンバート)するスーパーヘテロダイン周波数変換を利用することで可能になる。ミキサからは不要な両入力信号も通り抜けてくるため、広い帯域で良質な周波数変換が出来るように、一度、高い周波数に上げてから下げるなど多段のミキサ

Fig. 1 What kind of frequency components included can't be displayed with Oscilloscope.

Fig. 2 For example watch the radio wave of a television with Spectrum Analyzer.

複雑な電波波形の観測には、一般にオシロスコープが多く使用されているが、スペクトラム・アナライザはこの合成波形を解析し、構成している個々の周波数成分の

Fig. 4 (a) 3 MHz sine waveform display with Oscilloscope, (b) 3 MHz sine waveform with Spectrum Analyzer.

Fig. 5 (a) Modulating waveform display with Oscilloscope (Carrier wave: 1 MHz, Modulating wave: 15 kHz), (b) Modulating waveform display with Spectrum Analyzer (Carrier wave: 1 MHz, Modulating wave: 15 kHz).

(a)

(b)

Fig. 6 (a) 100 MHz rectangular waveform display with Oscilloscope, (b) 100 MHz rectangular waveform display with Spectrum Analyzer.

持つ電力を表示する。このような性質を持つことによりスペクトラム・アナライザは発振機、高周波搬送波、高周波スペクトラム監視などに伴う測定に適している。

2. スペクトラム・アナライザの基本機能

スペクトラム・アナライザには、以下の基本性能がある。

- 周波数に関する機能
 - 中心周波数
 - 周波数スパン
- 振幅に関する機能
 - スケール・ファクタ
 - 基準レベル
- 分解能帯域幅
- 掃引時間

2.1 周波数に関する機能

2.1.1 中心周波数

中心周波数の設定により、画面中央の周波数を変化させ、スペクトラムをこの位置に移動させることにより周波数を読み取る。通常は、画面中央の周波数を表示するが、ある操作モードにおいては、ほかの箇所の場合もある。この場合、周波数を読み取る箇所は、ドット、また

は他のマーカーにより表示される。

2.1.2 周波数スパン

周波数スパンの設定により、スペクトラム解析する周波数幅を変えることができる。通常10目盛全体の周波数幅をSPANと呼ぶが、1目盛りあたりの周波数幅を表すSPAN/divで設定する機種もある。

たとえば、1 MHz/divの周波数スパンでは、画面全体で10 MHzの周波数を表す。

もし、中央周波数が100 MHzに設定されていたとすれば、スペクトラム・アナライザは、95 MHz-105 MHzの範囲を掃引することになる。

Fig. 7には、3つの信号が表示されている。その中央の大きな信号の周波数は100 MHzで、レベルは-17 dBm[†]である。2つの小さな信号は99.95 MHzと100.05 MHzで、レベルは-62 dBmである。

この小さな信号は、中央の信号に対して対称であり、100 MHzの搬送波を変調していることがわかる。この例は、45dBレベル低い(-45 dBc)50 KHzの側波帯を伴う100 MHzの信号である。(dBcは搬送波からの減衰レベルを意味する。)

2.2 振幅に関する機能

スペクトラム・アナライザには、振幅に関する主な機能として、スケール・ファクタと基準レベルの2つがある。

2.2.1 スケール・ファクタ(縦軸)

スペクトラム・アナライザの測定では、dBm, dBμVなどの対数系の測定単位が使用され、振幅目盛も通常は対数目盛となる。この対数目盛を使用する利点を以下に述べる。

スペクトラム・アナライザは、幅の狭い可変分解能フィルタを等価的に掃引し、広い周波数をカバーするから、本質的には非常に帯域幅の狭い測定器である。また、雑音レベルは帯域幅に比例するから、スペクトラム・アナライザは他の測定器、たとえばオシロスコープなどと比較して非常に高感度となりえる。そして、スペクトラ

Fig. 7 100 MHz carrier frequencies, Span /500 k.

[†] dBmは電力の絶対値を表す単位である。

ム・アナライザの持つ周波数分解能力と、周波数軸上に複数の周波数成分を同時表示する能力とにより、高レベルの信号とその近傍の低レベル信号の観測も行える。

2.2.2 基準レベル(Reference Level)

基準レベルの設定は、スペクトラム・アナライザの基本的な操作機能の一つである。これは、画面上に現れた信号の振幅を測定に適した状態にするためのもので、画面上いっばいに信号を表示するように設定する。基準レベルを0 dBmに設定した場合、0 dBmの信号は目盛の最上部に現れる。垂直スケールが10 dB/divモードでは、-20 dBmの信号は基準レベルより2目盛下に表示される。

$$0 \text{ dBm} - 2 \text{ div}(10 \text{ dB/div}) = -20 \text{ dBm}$$

スペクトラム・アナライザ内部では、基準レベルの設定はRFアッテネータ・コントロールとIFゲイン・コントロールの2か所の調整で行われる。

RFアッテネータは、アナライザの入力端子のすぐうしろにあり、信号の減衰量を決定する。入力信号は、アナライザの性能を最大限に生かすため、第一のミキサの最適動作レベルまで減衰させなければならない(Fig. 8)。

通常、第一ミキサの最適レベルは、-30 dBm程度になる。もし、被測定信号が-10 dBmのレベルであれば、RFアッテネータは20dBの減衰が得られるように設定しなければならない。

その時の第一ミキサのレベルは

$$\begin{aligned} \text{入力信号} - \text{減衰} &= \text{ミキサ・レベル} \\ -10 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} &= -30 \text{ dBm} \end{aligned}$$

となり、IFゲイン・コントロールはスペクトラム・アナライザの増幅段の利得を設定し、表示を構成された状態に保つ。

最近のスペクトラム・アナライザでは、基準レベルの設定に従い、マイクロプロセッサが最適な比率のRFアッテネータやIF利得を設定する。このため、通常は基準レベルの操作だけで振幅の測定が可能であるが、アッテネータのコントロールを手動で行う場合にはミキサの動作レベルに対する配慮が必要になる。

ミキサへの入力レベルが最適入力レベル、-30 dBmを超えて増加してくると、やがてミキサは非直線動作を始め、利得が飽和してくる。利得が1dB圧縮されたとき、

Fig. 8 Spectrum analyzer's optimum input level.

き、直線的な動作範囲はこの点まで、と考えこのミキサ入力レベルを1dB圧縮点と呼ぶ。

スペクトラム・アナライザでは、各々の信号ごとに振幅および周波数の両方を表示することができる。しかし、入力回路(RFアッテネータ、第一ミキサ)には電力信号と同じようにすべての信号が加わることになる。したがって、最大入力レベルとしては、画面に信号が表示されているかいないか、には関係なく、その時入力回路に加えられているすべての信号の和と考える。

2.2.3 分解能帯域幅

理想的には振幅周波数の表示は、Fig. 9のように、非常に接近した信号でも個々に識別された細い線でなければならない。搬送波に対しても非常に接近した2つの側波帯があることに注目してほしい。もし、Fig. 10のように、太い線で書いた場合、側波帯は搬送波下部に隠れて見落とされる。

スーパー・ヘロテダイン方式2のスペクトラム・アナライザでのスペクトラム分解能力は、最終的には中間周波数段の分解能フィルタによって決まる。フィルタの帯域幅は、-3dB点または-6dB点の帯域幅として定義されているが、アナライザの製造メーカやRBW(resolution bandwidth: 分解能帯域幅)の設定によって異なる場合がある。比較する場合には注意が必要である。また、接近した2信号を分離するには選択度の高いフィルタ特性が望まれる。この選択度という観点からは、十分に幅が狭くスカート特性の鋭いフィルタが好ましくこの選択度の目安としてテクトロニクスでは、-6dB幅と-60dB幅の比(シェープ・ファクタ)を用いている。この数値が1:1に近い程、そのフィルタの形状は理想フィルタに近

Fig. 9 Resolvable the close spectrums with narrow line.

Fig. 10 Un-resolvable with bold line.

く、レベル差のある近接2信号の分解能力にも優れる。

たとえば、振幅が-60dB異なる2信号が、シェーブ・ファクタ15:1のフィルタで分離されるには、帯域幅の7.5倍以上離れている必要があるから、シェーブ・ファクタが10:1のフィルタでは帯域幅の5倍近く離れている2信号まで分解できる事になり、3次相互変調歪などのようにレベル差の大きい近接2信号を測定する場合などにはシェーブ・ファクタの比の小さなフィルタが有利になる。

2.2.4 掃引時間

分解能帯域幅の設定と同様に、最近のスペクトラム・アナライザの多くは、最適な掃引速度をマイクロプロセッサが選択するAUTO(自動)機能を備えている。掃引速度が速すぎると分解能帯域幅フィルタの出力波形は歪んでしまうなど、信号本来の振幅に達せず正確な振幅表示が得られない。また、逆に遅すぎると観測しづらくなる。

3. スペクトラム・アナライザの基本性能

3.1 周波数測定精度

スペクトラム・アナライザによる周波数測定は、中心周波数として測定されるが、その測定精度は、分解能帯域幅設定、周波数スパン設定に左右され、特定のアナライザの最良の周波数測定精度は普通、そのアナライザの最小周波数スパン設定、最小分解能設定のときに得られる。これは、周波数スパンの持つ直線性誤差の影響を最小にできることによる。さらに、周波数スパン設定をゼロ・スパンとすると、周波数スパンの持つ誤差を除去した周波数測定が可能になる。

高性能のスペクトラム・アナライザには、通常恒温槽に収めるなどした温度安定度の高い水晶発振回路があり、周波数基準としている。水晶発振器は比較的安価で形状も小型で使いやすいが、時間とともに周波数が変動する特性を持っている。このため、水晶発振器の周波数安定度の目安として、 1×10^{-9} /日というようなエージング・レート(長期安定度)の表現が使用される。

適切に設計された基準発振器では、そのエージング・レートの桁数により数倍正確に校正することができるから、エージング・レートがその基準発振器の精度を決める第一の要素となる。

低価格品におけるエージング・レートは約 5×10^{-10} /日～、高性能品では 1×10^{-9} /日あたりが目安であるが各メーカーにより異なる。

3.2 振幅測定精度

スペクトラム・アナライザによる振幅測定では、以下の誤差要因があり、最悪の場合の誤差はそれらがすべて加算された値になる。従ってあり得る誤差の最大値は誤差がすべて加算されたものとなる。実際には表示振幅誤差のように、測定の際に信号先端を基準レベル線上に位置してレベルを読み取るなどの測定技法による除去でき

る誤差もある。また、誤差の最大値は個々の誤差がベクトル的に同じ方向にそろった場合の値になるが、この可能性は確率的に低く、通常起こりうる誤差はこれよりも小さな値となる。

3.3 安定度

スペクトラム・アナライザは広い周波数帯域をカバーする掃引型の狭帯域周波数変換装置とすることができる。原理的に数回の周波数変換を繰り返すために複数の局部発振器を持っているから、スペクトラム・アナライザの安定度は、その局部発振器の周波数安定度そのものによって決まる。スペクトラム・アナライザの安定度は、通常以下の3項目によって表現される。

3.3.1 残留FM

残留FMは、局部発振器の短時間内での発振周波数の揺らぎにより発生する。通常この時間は、ミリ秒から秒の単位でHz/p-pと表現される。残留FMの大きなスペクトラム分解能力は意味の低いものになる。

したがって、スペクトラム・アナライザの実用的なスペクトラム分解能力は、そのアナライザの持つ最小分解能帯域幅だけではなく、その値、もしくは残留FM値のどちらかにより決まる。

最小分解能帯域幅を使用する場合に残留FMが目立れば測定の障害となるのでアナライザの良し悪しを判定する一つの目安ともなる。

3.3.2 側波帯雑音

信号の両側に現れるレベルの低いランダムノイズは側波帯雑音と呼ばれ、スペクトラム・アナライザの性能の一部として評価される。側波帯雑音は、発振回路内のノイズなどにより発生し、キャリアから離れるに従い減少し、やがてアナライザのノイズ・フロア以下になる。

したがって、側波帯雑音の評価は、キャリアからの決められた周波数差でどの程度減衰しているかをdBcまたはdBc/Hzで表現する。

当然のことながら、スペクトラム・アナライザで信号の側波帯雑音を測定する場合には、アナライザ自身の側波帯雑音は測定される側よりも十分に低い必要がある(Fig. 12)。

Fig. 11 Residual FM.

Fig. 12 Sideband noise.

3.3.3 ドリフト

スペクトラム・アナライザの長時間安定度は、ドリフトとして規定される。ドリフトは周囲温度変化、電源電圧変動により発生し、残留FMよりもゆっくりした大きな周波数変化と考える事が出来る。ドリフトは、数分から場合によっては1時間程度の長い時間帯での周波数変化量を表す。

スペクトラム・アナライザの周波数スパンは1 kHz/minのドリフトのあるアナライザでは使用できない。測定ができる前に信号が画面から消えてしまうからである。

使用するスパン設定で十分に安定なドリフト特性を持ったスペクトラム・アナライザを選ぶ必要がある。

3.4 感度

スペクトラム・アナライザで観測可能な最小レベルを感度と呼ぶ。通常、アナライザ内部で発生するノイズをスペクトラム・アナライザ入力に換算したものを感度としている。雑音量は基本雑音として次式で定義され、実際にはこの基本雑音に雑音指数(NF)が加算された値がアナライザ自身の等価雑音発生量となる。基本雑音は帯域幅(アナライザの分解能帯域幅)、絶対温度で決定されるので、常温では帯域幅に比例し、帯域幅が1/10になるとノイズ・レベルも1/10(10dB)向上したことに相当する。NFはミキサの変換損失、入力の回路損失、IF増幅器の雑音指数に支配される。

$$N = kTB + NF$$

ここで、

N = ノイズ電力(ワット)

k = ボルツマン定数 $= 1.37 \times 10^{-23}$ (ワット秒・K)

T = 絶対温度(K)

B = 帯域幅

アナライザ内部で発生したノイズのレベルと等しいレベルの信号はノイズと加算され、アナライザのノイズ・フロアよりも3dB高く表示される。スペクトラム・アナライザの最高感度に近い微小な信号、すなわち、アナライザのノイズ・フロアより10dB以内程度に表示される信号は、必ずアナライザのノイズ・パワーが加算された

ことになる。

3.5 ダイナミック・レンジ

ダイナミック・レンジは基本的に測定のために取りうる振幅レベルの範囲を表すが、より良い測定のためには考慮しなければならない要素が数多くある。

3.5.1 表示ダイナミック・レンジ

校正された精度で画面上同時に測定可能な範囲をdBで表したものである。この表示のダイナミック・レンジは、検波器、ログ・アンプ、表示部がこの測定レンジを持つことを意味するだけでなく、常にこのダイナミック・レンジ内で真の表示を得られるわけではない。

3.5.2 歪みとダイナミック・レンジ

スペクトラム・アナライザに信号が入力されると、ミキサの非直線性により歪みが発生し、測定によっては障害となる。入力が単一信号の場合には入力信号の高調波が、複数の信号が入力されている場合にはさらにその相互変調積がゆがみとなって現れる。

ミキサ入力レベルが高いほど、ゆがみも大きくなるので、通常歪みが十分小さく、尚、かつダイナミック・レンジも大きく取れるレベルとして、-30 dBm程度がミキサの最適入力レベルとなる。

高調波または相互変調歪は、スペクトラム・アナライザ自身の非直線性により作られる。入力信号レベルの増加に伴い基本波の入出力関係は1:1の比率で変化するが、歪積は N を次数とすると、1: N の比率で変化し、歪みのレベルは入力レベルよりも早く増加する。

ここから、歪みが入力レベルと等しくなる理論的な点、インタセプト・ポイントの概念が生まれた。

実際には、このレベルに達する前にミキサが飽和する

Fig. 13 Spectrum Analyzer's intercept point.

から、インタセプト・ポイントを実現することはできない。インタセプト・ポイントは次のようになる。

$$I(\text{dBm}) = \frac{(\Delta \text{db})}{N-1} + S(\text{dBm})$$

ここで、

I : インタセプト・ポイント

S : 入力信号レベル

Δ : 歪レベルと入力信号レベルの差

N : 次数

まとめ

近年では解析する信号が複雑でかつ時間的に変化するため、従来のスペクトラム・アナライザでは解析することが困難となってきた。そのような信号解析におい

て要求されるスペクトラム・アナライザの機能は、時間変動する信号を取り落としなくとらえ、時系列で周波数解析を行うことができることである。しかしそれだけでは不十分で、いつどの周波数で発生するかわからない信号を確実にとらえることができるリアルタイムの周波数トリガ機能も必要である。さらに収集した信号の振幅の変化、位相の変化、周波数の変化、変調解析など多角的な信号解析を同時に行うことも要求される。それを実現するアナライザがリアルタイム・スペクトラム・アナライザであるが、オシロスコープ+FFTの方法との違いは高いダイナミック・レンジを持つことである。

スペクトラム・アナライザによって正しく信号解析を行うためには、測定信号の性質をよく理解すると同時にスペクトラム・アナライザの測定限界を理解して、用途に合ったスペクトラム・アナライザを選択する必要がある。