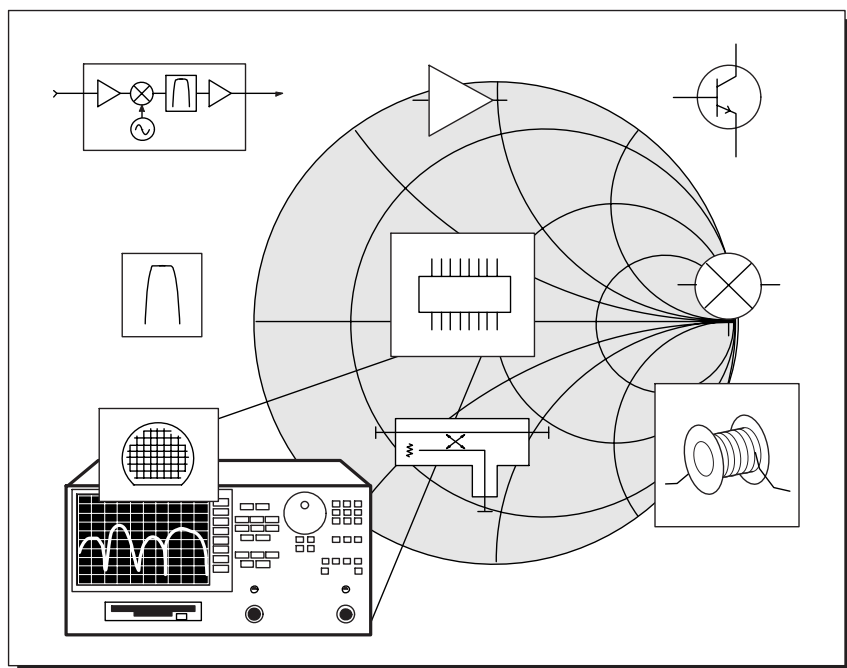


# ネットワーク・アナライザの アーキテクチャ

Application Note 1287-2



## 目次

	ページ
はじめに .....	2
ネットワーク・アナライザの アーキテクチャ .....	2
信号の結合 .....	3
方向性ブリッジ .....	6
ネットワーク・ アナライザの検出機能 .....	6
ダイナミック・レンジの比較 .....	8
スペクトラム・ アナライザによる代用 .....	9
テスト・セット .....	9
その他の考慮事項 .....	10

### ご注意

2002 年 6 月 13 日より、製品のオプション構成が変更されています。  
カタログの記載と異なりますので、ご発注の前にご確認をお願いします。



**Agilent Technologies**

Innovating the HP Way

## はじめに

今日では、ネットワーク・アナライザは高周波コンポーネントやデバイスの性能を測定するための最も重要なツールの一つです。最近のベクトル・ネットワーク・アナライザには、コンポーネントの振幅、位相、および群遅延を測定したり、ポート・インピーダンスをスミス・チャート上に表示したり、タイム・ドメイン機能があれば、テスト・ポートからインピーダンス不整合または回路障害までの距離を示したりする機能があります。ネットワーク・アナライザの性能を最大限に引き出すためには、その能力と動作を理解することが必要です。

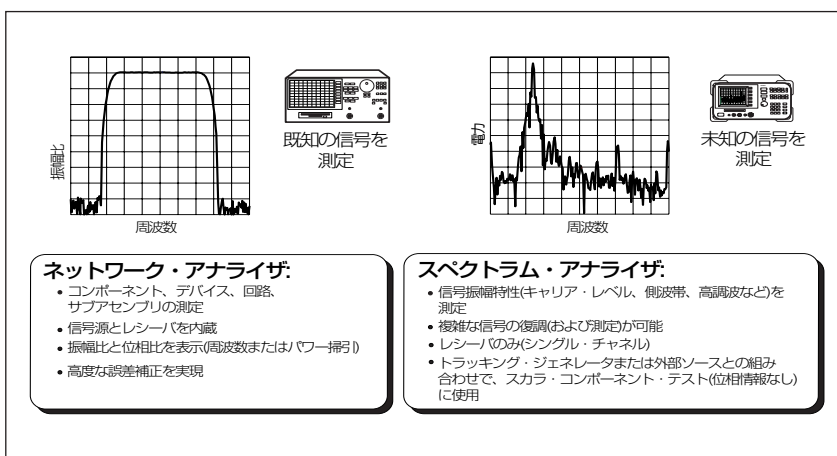
アジレント・テクノロジー社では、さまざまな種類のRF/マイクロ波ネットワーク・アナライザを販売しています。これらは、DC～110 GHzのアプリケーションに使用できます。これらの製品には、多種類のテスト・セットや校正キットが用意されており、伝送回線上で障害までの距離を推定するためのタイム・ドメイン機能などをオプションで追加することもできます。さらに当社では、Agilent EEsofマイクロ波デザイン・システム(MDS)およびSeries IVスイートをはじめとする、リニアおよびノンリニアのCAE(Computer-Aided-Engineering)ソフトウェア・ツール群を販売しています。ベクトル・ネットワーク・アナライザの測定結果に基づいてデバイスやコンポーネントのモデルを作成する際には、これらのツ

## ネットワーク・アナライザのアーキテクチャ

通信システムやコンポーネントの測定に広く用いられるツールとしては、ネットワーク・アナライザのほかに、スペクトラム・アナライザがあります。この2つは、形態も機能も異なっています(図1)。スペクトラム・アナライザは、未知の外部信号を測定します。これに対して、ネットワーク・アナライザは、シンセサイズド周波数信号源を使って既知のテスト信号を生成し、これを周波数や電力レベルのある範囲にわたって掃引します。ネットワーク・アナライザには、複数のレシーバを必要とする比測定(位相を含む)を実行する機能もあります。スペクトラム・アナライザでは、トラッキング・ジェネレータを併用した場合でも、この種の測定は実行できません。

スペクトラム・アナライザは一般的に、キャリア・レベル、側波帯、高調波、位相ノイズなどの信号特性の測定に用いられます。通常は信号源がないシングル・チャンネル・レシーバ構成で使用します。スペクトラム・アナライザには、多様な信号を解析するため、広範囲のIF帯域幅が用意されており、外部信号源との組み合わせでノンリニア・ステイミュラス/レスポンス・テストにも多く用いられます。スペクトラム・アナライザとトラッキング・ジェネレータを組み合わせると、振幅と周波数の関係を示すことができますが、位相に関する情報は得られません。

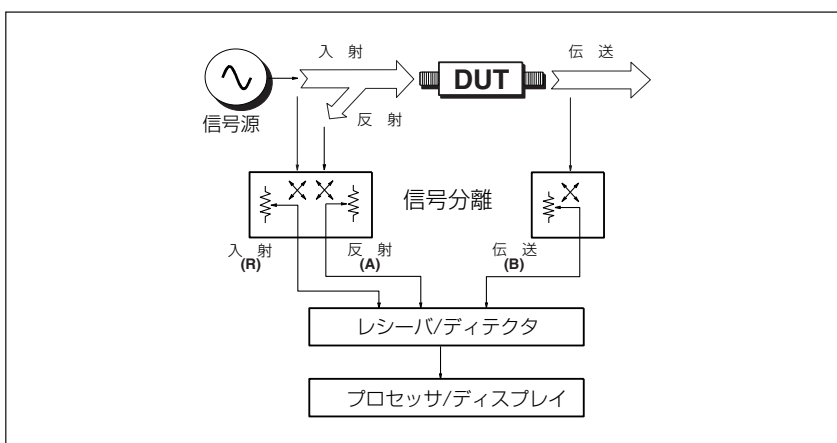
図1.  
ネットワーク・アナライザと  
スペクトラム・アナライザの違い



ネットワーク・アナライザを使うと、被測定デバイス(DUT)について、振幅、位相、群遅延応答をはじめとした豊富な情報が得られます。このために、ネットワーク・アナライザには、テスト信号を供給する信号源、信号分離デバイス、信号検出用レシーバ、および結果表示のためのディスプレイ/プロセッサ回路が内蔵されています(図2)。信号源としては、内蔵の位相ロック(シンセサイズド)電圧制御発振器が通常用いられます。

信号分離ハードウェアには、比測定用の基準として入射信号の一部を測定する役割と、DUTの入力に存在する入射(順方向)信号と反射(逆方向)信号を分離する役割があります。このために使用するハードウェアとしては、パワー・デバイダ(抵抗性で広帯域だが、挿入損失が大きい)、方向性カプラ(損失は小さいが、帯域幅は通常狭い)、および方向性ブリッジ(反射信号を広い帯域幅で測定することができるが、大きな損失を持つ場合がある)があります。

図2.  
一般化した  
ネットワーク・  
アナライザの  
ブロック図

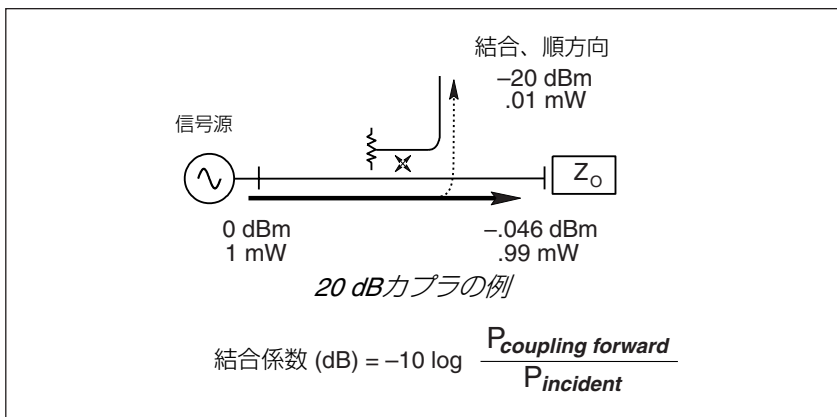


## 信号の結合

方向性カプラは、DUTの入力に存在する入射信号と反射信号の両方を測定するのに便利です。方向性カプラは、「スルー」パスと、「結合」パスからなっています。結合パスは、スルー・パスを通る電力のごく一部を分岐させる役割を果たします(図3)。結合される電力の量は、次の結合係数で決まります。

結合係数(dB) =  $-10 \log(\text{順方向結合電力}/\text{入射電力})$

図3.  
周波数による  
位相変化

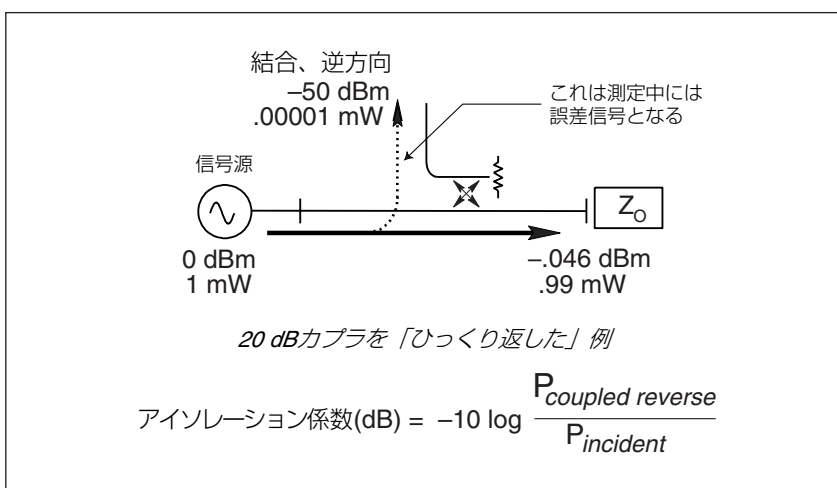


20 dBカプラの例では、結合電力レベルは入力ポートにおける電力レベルより20 dB低くなります。方向性カプラには、結合係数のほかにも、周波数応答や方向性などのパラメータがあり、これによって主出力ポートと結合ポートに現れる全電力レベルが決まります。

理想的なカプラの場合、カプラを逆方向に通過する信号は結合ポートに現れません。実際には、カプラのポート間アイソレーションが有限であるために、いくらかのエネルギーが常に結合ポートに現れます(図4)。アイソレーションを測定するには、カプラに逆方向に電力を通します。アイソレーションは、結合ポートに現れる漏れ電力を入射電力を基準として表したものと定義されます。

$$\text{アイソレーション(dB)} = -10 \log(\text{逆方向結合電力}/\text{入射電力})$$

図4.  
方向性カプラの  
アイソレーション  
(逆方向結合係数)



カプラについて測定されるパラメータのうちで最も重要なものの一つが、方向性です(図5)。方向性は、カプラのスルー・パスを互いに逆方向に流れる信号をカプラがどの程度分離できるかを表します。これは反射測定において得られるダイナミック・レンジと考えることができます。定義上、方向性は結合係数にスルー・パスの損失をかけて逆方向アイソレーションで割ったものになります(すべての項はリニアとします)。対数尺度では、逆方向結合係数(アイソレーション)から順方向結合係数を引き、さらにスルー・アームの損失を引いたものが方向性になります(すべての項はdB単位とします)。順方向および逆方向結合係数を測定する際には、テスト・システムの特性インピーダンスと正確に等しい負荷インピーダンスでカプラを終端する必要があります。

図5の真ん中の例で、カプラの出力に損失(アッテネータなど)を接続すると、生の(補正されていない)方向性がアッテネータの値の2倍だけ低下することに注目してください。このことから、反射測定に使うネットワーク・アナライザのテスト・ポートにアッテネータを接続したり損失の高いケーブルを使うことは通常避けるべきです。校正によって損失の影響を補正したとしても、生の方向性が低下しているために校正の安定性が悪くなります(ドリフトが多く生じます)。下の例でわかるように、信号源とカプラの間にアッテネータを接続しても、方向性には影響がありません。ここには示していませんが、結合ポートにアッテネータを接続しても明らかに方向性には影響がありません。これは、アイソレーションと結合係数の両方がアッテネータの値だけ増加するからです。

方向性が有限であることが原因となっており、リターン・ロス測定でリップル・パターンが見られることがよくあります。リップルのピークでは、方向性がDUTからの反射と同位相で加算されています。場合によっては、方向性がDUTからの反射を打ち消し、リターン・ロス応答に鋭い落ち込みを生じます。

カブラの方向性測定には、順方向と逆方向の両方を測定しなくてもすむ簡単な方法があります(図6)。この方法では、ネットワーク・アナライザの実効的な方向性をフロント・パネルのテスト・ポートから測定できるので便利です。はじめに、テスト・ポート(カブラのスルー・アームの出力)に短絡負荷を接続します。次に反射を測定し、結果をノーマライズします(データをメモリにセーブし、データをメモリで割った結果を表示します)。この結果が、順方向結合係数とスルー・アーム損失を含む0 dB基準となります。その次に、テスト・ポートに高品質の終端(校正キットに付属する負荷など)を接続します。終端が完全だとすれば、ここで測定される信号はもっぱら漏れ(方向性)誤差によるものです。測定値はすでにノーマライズされているので、測定された値がそのままカブラまたはアナライザの実効的な方向性を表します。

図5.  
方向性カブラの  
方向性

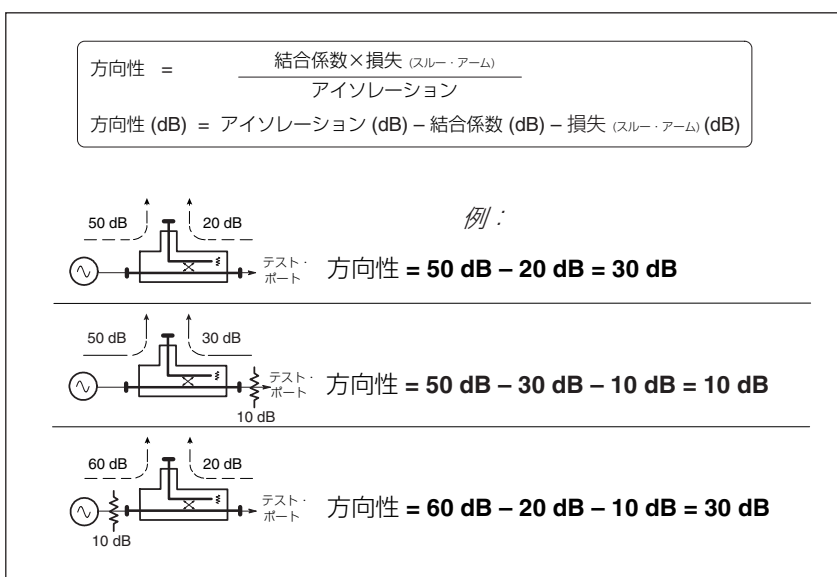
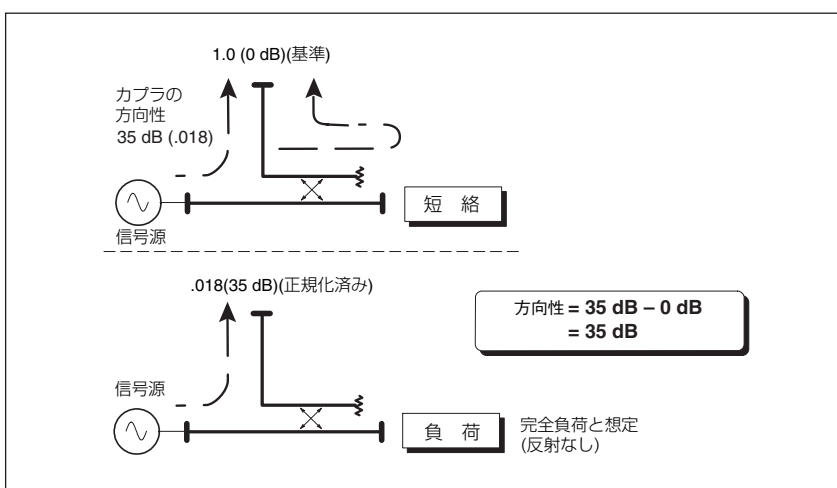


図6.  
方向性測定の  
簡単な方法



## 方向性ブリッジ

方向性ブリッジも反射信号の測定に用いられます。方向性ブリッジでは、4つのアームの抵抗がすべて等しいときに、電圧が0になります(これを平衡条件といいます)。これは、テスト・ポートがテスト・システムの特性インピーダンス(通常50  $\Omega$ )で終端された場合に当たります。テスト・ポートのインピーダンスが50  $\Omega$  でなければ、ブリッジの両端の電圧はDUTの不整合に比例します。ブリッジの両端で振幅と位相を測定することにより、テスト・ポートの複素インピーダンスを測定することができます。

ブリッジの等価方向性は、最大均衡(完全負荷 $Z_0$ で測定)と最小均衡(短絡または開放で測定)との比(またはdBでの差)で表します。ブリッジの方向性が測定の不確実さに与える影響は、カブラの場合とまったく同じです。

## ネットワーク・アナライザの 検出機能

ネットワーク・アナライザは、スカラ型でもベクトル型でも、ダイオード検出(広帯域)または同調レシーバ法(狭帯域)を利用しています。狭帯域検出はフィルタなど除去比が高いデバイスの測定に適しており、位相測定が必要な場合にも用いられます。広帯域検出は、チューナなどの周波数変換コンポーネント、とくに局部発振器(LO)を内蔵したものの測定に適しています。

従来のスカラ・ネットワーク・アナライザでは、ダイオード・ディテクタによりRF入力信号を比例するDCレベルに変換します。この手法は同調レシーバ法に比べて安価ですが、本質的にスカラ型です。すなわち、検出過程において位相情報を取り出すことができません。ダイオード・ディテクタが測定できる信号は-60 dBm程度までであり、最大ダイナミック・レンジは約75 dBです。ノイズ・フロアは測定帯域幅によって決まるので、ダイナミック・レンジを改善するためには入力テスト電力レベルを上げるしかありません。マイクロ波以上の高い周波数では、電力レベルを上げるのは不可能(あるいはきわめて高価)な場合があります。広帯域ダイオード・ディテクタは、その性質上、ミキサなどの周波数変換デバイスの測定に適しています。これは、ダイオードのDC出力が理想的にはテスト信号周波数に依存しないからです。

AC検出(振幅変調されたテスト信号のエンベロープをダイオード・ディテクタで抽出)を使うと、測定誤差の原因となるダイオードのDCドリフトを排除でき、ノイズとスプリアス信号も少なくなるため、全体的な測定確度が向上します。ただし、AGC(Automatic-Gain-Controlled)アンプなど一部のコンポーネントの測定では、AC検出により悪影響が出ることがあります。これは、テスト信号が変調されていなければならないからです。この種のコンポーネントに対しては、DC検出が最適です。

すべてのベクトル・ネットワーク・アナライザと、最近の一部のスカラ・ネットワーク・アナライザでは、同調レシーバ・アーキテクチャを採用して、高い信号感度と広いダイナミック・レンジ(100 dB以上)を実現しています。同調レシーバは、ダイオード検出に比べてはるかに高い感度と広いダイナミック・レンジを持ち、高調波とスプリアス信号の除去性能も向上しています。同調レシーバでは、高周波入力信号がより低い中間周波数(IF)に変換されます。ノイズ信号も周波数変換されますが、ノイズ電力の大部分はIF帯域幅の外に追い出されます。IF信号の狭い帯域だけをフィルタで取り出すことにより、ノイズを削減し、感度とダイナミック・レンジを改善することができます。同調レシーバのIF帯域幅は通常3 kHz(あるいはそれ以下)という狭さであるのに対し、ダイオード・ディテクタを使ったスカラ・ネットワーク・アナライザの測定帯域幅は40 GHzもあります。

同調レシーバでは、検出過程で位相情報が保存されるため、高度な誤差補正の手法が利用できるという特長もあります。このため、HP 8711Cや8713Cなどのスカラ・ネットワーク・アナライザは、ベクトル誤差補正(通常はベクトル・ネットワーク・アナライザだけの機能)を使って測定確度を向上させています。

同調レシーバのダイナミック・レンジを改善するには、入力電力レベルを上げる、IF帯域幅を狭める、テスト信号に対してアベレージングを行うという3つの方法があります。あとの2つの手法では、ノイズ・フロアと測定速度がトレード・オフの関係になります。ネットワーク・アナライザでは、アベレージングによりノイズ・フロアが低下します(これに対して、スペクトラム・アナライザでデータのアベレージングを行っても、ノイズ・エクスカーションが小さくなるだけです)。これは、ネットワーク・アナライザが複素数のデータを平均するからです。位相情報がなければ、アベレージングによってアナライザの感度が改善されることはありません。

同調レシーバを実現するには、高周波ミキサとサンプラの2つの手段があります。広帯域フロント・エンドの作成には、通常サンプラを使うほうがミキサよりも簡単で安価です。特にマイクロ波周波数領域ではこれが当てはまります。Agilent 8753ESや8720ESなどのアジレント・テクノロジー製ベクトル・ネットワーク・アナライザでは、サンプリング法が使われています。ダイオード・ベースのサンプラは、パルス・ジェネレータを内蔵したミキサと考えることができます。

パルス・ジェネレータは、アナライザのLOで生成された高調波関係のある多数の信号から、広帯域の周波数スペクトラム(コム)を生成します。入力RF信号を適当なコム信号とミックスすることにより、目的のIF信号を生成します。ただし、すべてのコム信号がIFにダウンコンバートされるノイズに寄与するため、サンプラの雑音指数はミキサ・ベースの同調レシーバを使った場合よりもいくぶん悪くなります。それでも、サンプラ・ベースのアナライザは広帯域ダイオード・ディテクタに比べればはるかに広いダイナミック・レンジを実現できます。



## ダイナミック・レンジの比較

スイッチやハイ・ダイナミック・レンジ・フィルタなど、ある種のコンポーネントの測定には、ダイナミック・レンジがきわめて重要です。90dBの帯域外除去比を持つフィルタの測定には、ダイオード検出のみを備えたスカラ・ネットワーク・アナライザの能力をはるかに超えるダイナミック・レンジが要求されます。代表的な狭帯域フィルタを、ダイオード・ディテクタ・ベースのスカラ・ネットワーク・アナライザである8757と、ベクトル・ネットワーク・アナライザである8720で評価してみると、フィルタの真の帯域外応答はダイナミック・レンジが広い8720でしか求められないのがわかります(図7)。

スカラ・ネットワーク・アナライザの広帯域ダイオード検出による応答を見ると、フィルタの通過帯域より低い周波数に疑似信号が生じています。これはテスト信号の高調波に起因するものです。テスト・トーンの高調波がフィルタの通過帯域内に入ると(例えば、信号源周波数がフィルタの通過帯域の1/2であると)、アナライザに応答が記録されます。実際には、テスト・トーンの基本周波数はフィルタの阻止帯域にあるので強く減衰されています。同調レシーバの狭帯域IFは、このようなスプリアス信号を効果的に除去します。

ダイナミック・レンジを制限するノイズも、測定精度に影響することがあります。測定の不確かさを減らすには、測定システムのダイナミック・レンジがDUTのダイナミック・レンジを上回る必要があります。例えば、振幅誤差を0.1dB未満、位相誤差を0.6°未満にするには、ノイズ・フロアが測定される電力レベルよりも40dB以上低くなければなりません(図8)。70dB除去比の測定でこのレベルの精度を達成するには、110dBのダイナミック・レンジが必要です。同調レシーバ・ベースのネットワーク・アナライザでテスト・データをアベレージングすれば、これを実現できます。

図7.  
レシーバ技術の比較

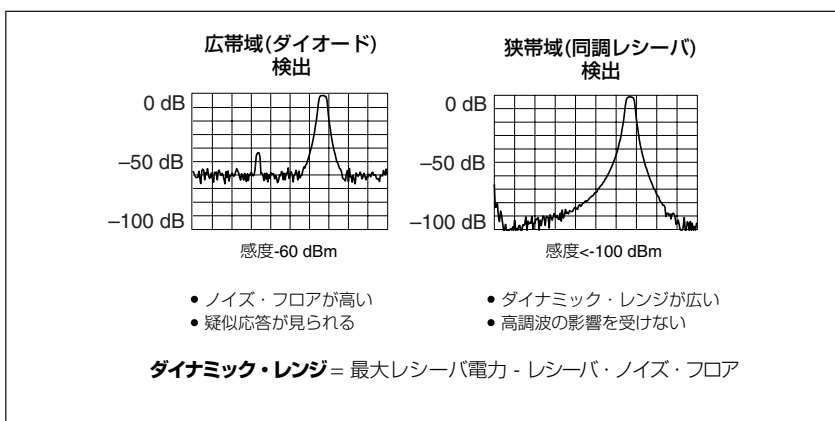
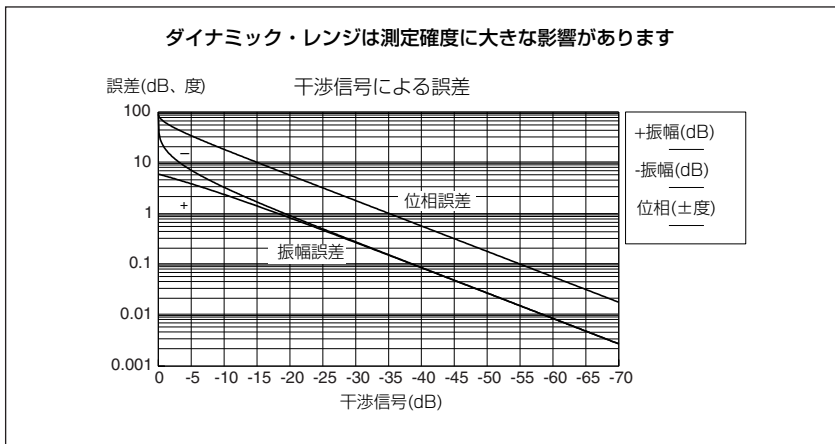


図8.  
ダイナミック・レンジと精度





## スペクトラム・アナライザによる 代用

スペクトラム・アナライザに専用のトラッキング・ジェネレータと外部カブラまたは方向性ブリッジを組み合わせると、スカラ・ネットワーク・アナライザに近い動作が可能になり、振幅を掃引周波数の関数として表すことができます。ただし、比測定や位相測定はスペクトラム・アナライザではできません。また、誤差補正は単純なノーマライズに限られ、測定確度は大幅に劣ります(ネットワーク・アナライザ測定に対する誤差補正の適用、アプリケーション・ノート1287-3参照)。スペクトラム・アナライザの振幅確度は、スカラ・ネットワーク・アナライザよりも1桁程度悪くなります。しかも、スペクトラム・アナライザとトラッキング・ジェネレータの組み合わせは、スカラ・ネットワーク・アナライザよりも高価なのが普通です。このため、この方法に意味があるのは、他の測定やアプリケーションでスペクトラム・アナライザが必要な場合に限ります。

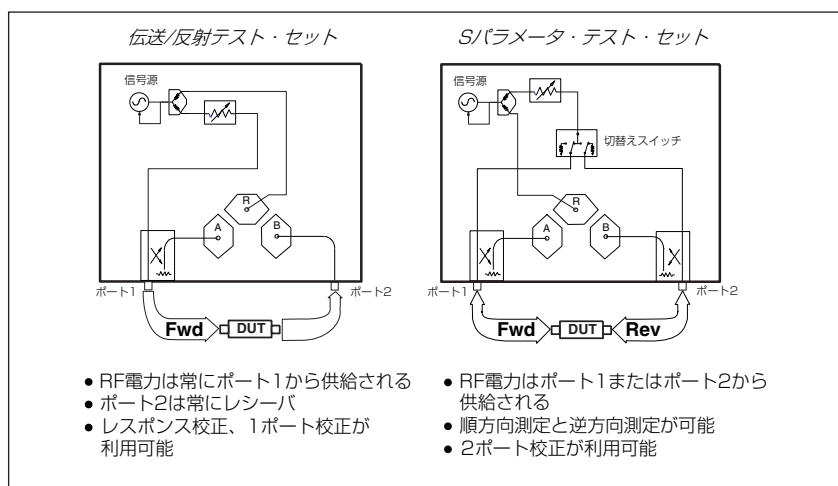
## テスト・セット

ネットワーク・アナライザで利用できるテスト・セットには何種類かあります。例えば、伝送/反射(T/R)テスト・セットや、Sパラメータ・テスト・セットなどです(図9)。T/Rテスト・セットでは、DUTに入力するテスト信号がポート1から供給され、ポート2を介してDUTの出力ポートをネットワーク・アナライザのレシーバに接続します。DUTの逆方向伝送や出力反射を測定するには、いったん接続を外し、DUTの向きを逆にして再びアナライザに接続します。T/Rベースのネットワーク・アナライザでは、ポート2から電力を供給できないという本質的な限界があるため、レスポンス校正法および1ポート校正法だけが利用できます。

Sパラメータ・テスト・セットはさらに進んだ能力を持ち、DUTの順方向測定と逆方向測定の両方を実行できます。ポート1とポート2のどちらからもRF電力を供給でき、どちらのテスト・ポートもベクトル・ネットワーク・アナライザのレシーバ入力に接続できます。この種のテスト・セットでは、2ポート誤差補正技術がフルに利用できるため、高い測定確度が得られます。

Sパラメータ・テスト・セットには、3レシーバのものと4レシーバのものがあります。3レシーバ・アーキテクチャのほうが単純で安価ですが、4レシーバ・アーキテクチャのほうが高度な誤差補正(TRL校正、LRM校正など)を利用できます。3レシーバのSパラメータ・テスト・セットでは、TRL\*校正およびLRM\*校正だけが利用できます。4レシーバ・テスト・セットはより柔軟性の高い校正能力を持つため、オンウェーハ測定などの非同軸アプリケーションに適しています(ネットワーク・アナライザ測定に対する誤差補正の適用、アプリケーション・ノート1287-3参照)。

図9.  
T/Rテスト・セット  
とSパラメータ・  
テスト・セット



## その他の考慮事項

デバイス・テストに使用するネットワーク・アナライザを選ぶ際は、測定精度と確度が最も重要ですが、そのほかにも考慮すべき要素があります。柔軟性の高い表示画面があれば、フィルタのチューニングなどの作業が容易になります。画面に豊富なマーカ機能があれば、生産テストの繰返しの間にフィルタの3 dB帯域幅などの特性を定義するのに便利です。製造において重要なもう一つの機能はリミット・ラインで、これがあれば合否テストがきわめて容易になります。

ネットワーク・アナライザは自動テスト機器(ATE)の一部として用いられる場合も多いので、計算能力とインタフェース機能も重要です。多くのネットワーク・アナライザにはオンボードのマイクロコンピュータが搭載されており、ミキサ・テスト用の掃引信号源や高度な校正機能のためのパワーメータをはじめとする外部機器の制御が可能です。さらに、アジレント・テクノロジーのアナライザのほとんどに3.5インチ・フロッピーディスク・ドライブが搭載されており、内部ソフトウェアのアップグレードや、テスト・データをダウンロードして外部コンピュータで解析したりCAEプログラムで使用する作業が容易になります。

ネットワーク・アナライザに内蔵された計算能力を使って、スタンド・アロンのアプリケーションでも測定の自動化を実現することができます。例えば、8720および8753ベクトル・ネットワーク・アナライザのテスト・シーケンシング機能を使うと、アナライザのキーストロークをストアして測定ルーチンとして用いることができます。このようなテスト・ルーチンをいくつかアナライザのメモリにセーブすれば、外部コンピュータなしに簡単な自動テストを行うことができます。この機能は生産環境で行われる繰返しテストに最適です。8712/14Eファミリでは、Instrument BASIC(IBASIC)を使うことによりさらに高度な自動測定機能を利用できます。

## 参考文献

ベクトル・ネットワーク解析の基礎、Application Note 1287-1

ネットワーク・アナライザ測定に対する誤差補正の適用、  
Application Note 1287-3

ネットワーク・アナライザ測定：フィルタとアンプ、Application Note 1287-4

---

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 9:00～17:00  
(土・日・祭日を除く)  
※FAXは24時間受け付け

TEL ☎0120-421-345  
(0426-56-7832)

FAX ☎0120-421-678  
(0426-56-7840)

E-mail: mac\_support@agilent.com

電子計測ホームページ

<http://www.agilent.co.jp/find/tm>

- 記載事項は変更になる場合があります。  
ご注文の際はご確認ください。



**Agilent Technologies**

Innovating the HP Way

5965-7708J  
040001302-H