

# RF/IF およびマイクロ波信号用コンポーネントの 電気的性能特性の測定

ここでの説明は入門的なものであり、測定技術の詳細について標準的な教科書の参考書として読者の助けとなるものです。ミキサやダブラの測定については、それらの製品に関するアプリケーションノートを参照してください。

## リニア測定、パッシブおよびアクティブデバイス

図1に示す測定系は、1ポート、2ポート、または多数のポートを持つデバイスの幅広い測定で使用することができます。代表的な3つのデバイスを示します。

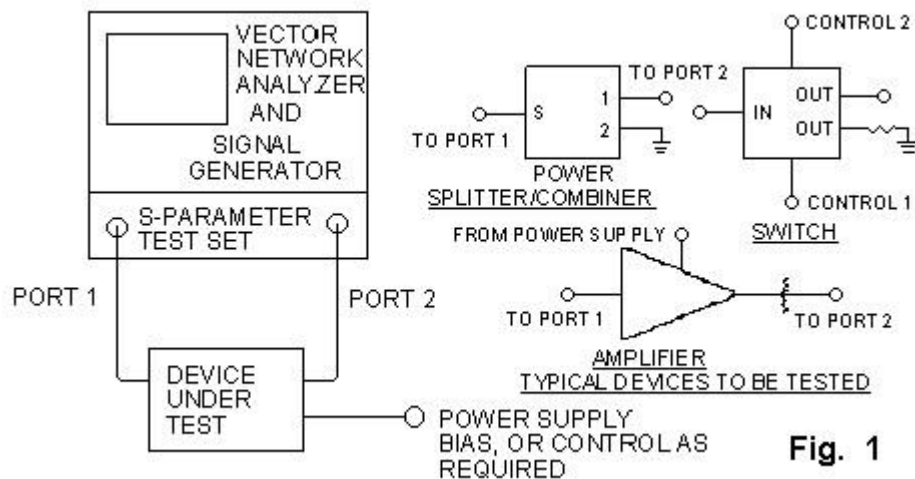


Fig. 1

測定器メーカーの説明書に従い適切に校正された測定系で、周波数の関数として以下の特性が測定できます。

挿入損失、VSWR、ゲイン、アイソレーション、指向性、振幅アンバランス、位相アンバランス、群遅延

Sパラメータテストセットは、4組の振幅と位相量を測定します。ネットワークアナライザのポート1から信号が出力されると、DUT(被試験デバイス)によって反射されポート1に戻ってきた信号が検出されてS11と表示され、DUTを通過してポート2で検出された信号はS21と表示されます。同様に、ポート2から出力された信号はS22となり、ポート2から出力される信号のうち、DUTを通過してポート1に伝達される信号がS12になります。

DUTを接続する前に、ネットワークアナライザに基準となる反射・伝送データを保存し、テストセットの校正を行います。反射については、DUTに接続する各ケーブルに、ショート、オープン、ロード基準器を順次接続します。伝送は2本のケーブルを直接接続し、スルー接続とします。

ここで2ポートのDUTを考えてみましょう。DUTの「入力」ポートをテストセットのポート1に接続し、「出力」をポート2に接続したとします。反射電力は入射電力より小さいか、最大でも入射電力を超えることはないので、dBで表されるS11とS22の大きさは、マイナスまたはゼロになります。マイナス記号を取り除くと、S11とS22のdB値はDUT入力と出力ポートのリターンロスに等しくなり、そこからVSWRを計算することができます。終端抵抗のような1ポートのDUTでは、同じ方法でVSWRを求めますが、S11のみを測定します。

挿入損失はS21として直接測定され、スイッチ、パワースプリッタ/コンバイナ、方向性結合器などの受動部品のアイソレーションも同様に測定されます。アンプの場合、利得はS21、逆方向アイソレーションはS12として測定されます。利得試験では、Sパラメータテストセットの検出器が過負荷にならないように、アンプ出力に固定アッテネータが必要な場合があります。この目的に適したMCLモデルは、SAT、NAT、およびBWシリーズです。

カブラの指向性は、DUT を通る信号ラインの入力ポートから結合ポートへの経路を使用して、0 dB の挿入損失基準でネットワークアナライザを最初に正規化しておくことにより直接量として測定できます。信号ラインの入力ポートに接続したケーブルは出力ポートに繋ぎ変えて指向性を測定します。未使用のポートは、MCL の BTRM、STRM、NTRM シリーズのような終端器に接続しておく必要があります。パワースプリッタ/コンバイナや多投スイッチの振幅・位相アンバランスは、まず 1 つの経路で挿入損失を正規化した後、別の経路で実際の測定を行います。ここで重要なポイントは、3 つ以上のポートを持つ DUT をテストする場合は、テストセットに接続されていない各ポートは終端しておく必要があるということです。この方法では、S パラメータテストセットの特性インピーダンスは、DUT の特性インピーダンスと同じであることが必要です。

## 圧縮点測定

挿入損失圧縮またはゲイン圧縮の測定は、対応する線形測定と同様であるため、同じ設定で測定できます。通常、対象となる量は、挿入損失またはゲインが低電力値より 1 dB 小さい入力電力（パッシブデバイスの場合）または出力電力（アンプの場合）です。

1dB 圧縮時の入力電力が指定された特性である場合、入力電力は指定された 1dB 圧縮値に設定し、10dB の固定アッテネータを DUT の出力に接続します。この構成でネットワークアナライザが正規化されます。10dB のアッテネータを DUT の入力側に繋ぎ変えて挿入損失を測定します。結果は、圧縮量が直接示されます。1 dB 未満の場合、デバイスはその仕様を満たしています。

アンプの 1dB 出力電力圧縮については、アプリケーションノート「自動圧縮測定」に記載しています。

## 2 信号 3 次、相互変調測定

測定系を図 2 に示します。発振周波数（「トーン」）は、通常、指定された周波数帯域の下限付近で 1MHz 間隔に設定します。この試験を中域と高域付近で繰り返します。各トーンに対して DUT で指定された出力電力が得られるように、各 RF 発振器の出力電力と DUT までの経路の利得または損失を調整します。測定データからインターセプトポイントを算出する場合は、DUT が飽和しないようにトーンレベルを設定し、1dB 圧縮点より 15 dB 低いレベルを目安にします。各トーンの入力を 5 dB 下げてテストを繰り返し、IM インターセプトポイントを再計算することをお勧めします。1dB 以内で一致する場合、この設定によるデータが有効であることを示しています。

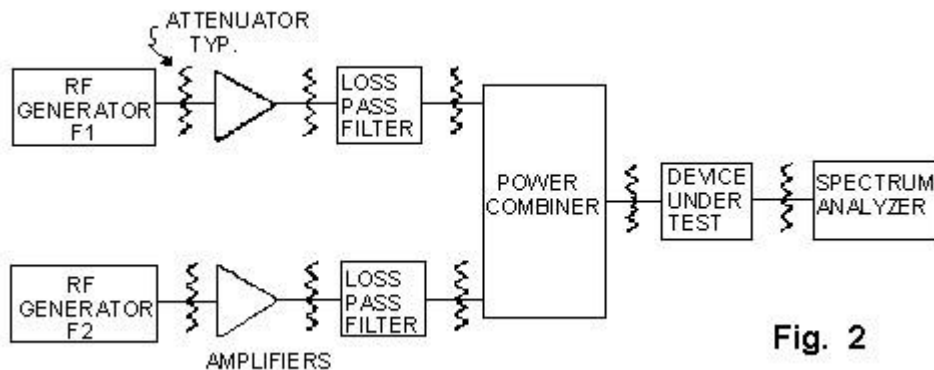


Fig. 2

この測定では、試験装置から発生する IM に注意する必要があります。パワーコンバイナ、アンプ、アッテネータはすべて、RF 発振器との間のアイソレーションを悪化させて内部で IM を発生させる可能性があります。ローパスフィルタは、DUT で歪みの発生になる可能性がある高調波を低減します。フィルタの前後のアッテネータでフィルタが所定の特性が得られるようにマッチングを取ります。スペクトラムアナライザの前段のアッテネータにより、アナライザに過負荷がかかっていないことを確認する必要があります。

測定は、図 3 のような表示になるようにスペクトラムアナライザを設定します。入力したトーンと表示された IM は 1MHz ずつ離れています。トーンは等振幅で、2 つの 3 次積は互いにほぼ等しいはずですが。

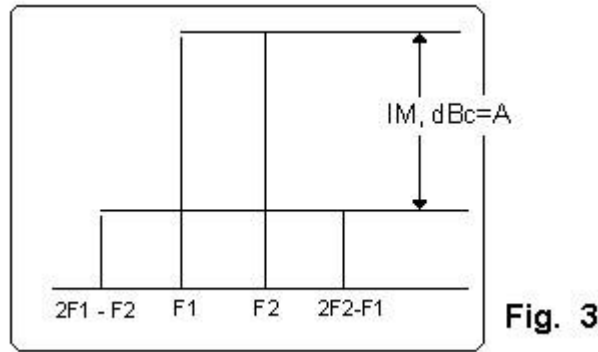


Fig. 3

IMは、入力したトーンと3次積の間のdB差として読み取ることができます。

3次インターセプトポイントは、この測定値から  $IP_3 = P + A/2$  として計算されます。PがDUTの入力電力の場合には入力  $IP_3$  になり、Pが出力電力の場合は出力  $IP_3$  になります。

### 雑音指数測定

自動NFメータを使用したアンプの測定系は、図4に示すように簡単ですが、このような測定器には高度な機能が備えられています。雑音指数と利得の測定は測定器メーカーから提供される説明書に従って行ってください。

ミキサの場合、図5に示すようにLO信号を入力します。LO周波数にチューニングされたバンドパスフィルタは、LO信号に乗る不用波によりIF帯でサイドバンドが発生しないようにするためのものです。

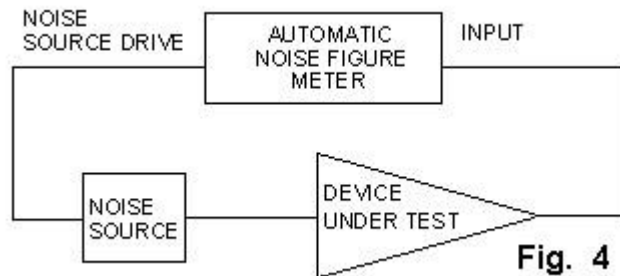


Fig. 4

一般的に使用されるIFは30MHzです。ノイズメータの校正シーケンスでは、ノイズソースはノイズメータの入力ポートに直接接続する必要があります。10dBのアッテネータは、インピーダンスのマッチングと測定の安定性を向上させますが、その値は雑音指数の読み値から差し引く必要があります。SSB（シングル・サイドバンド）の雑音指数では、代わりに7dBを減算します。

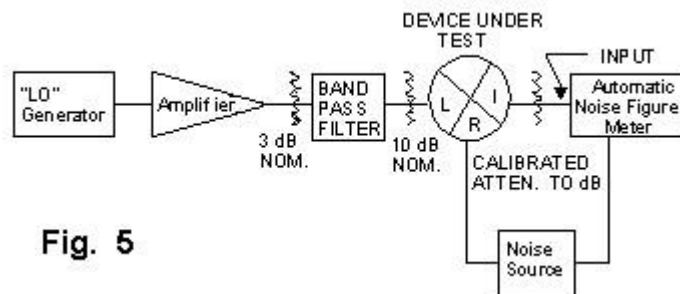
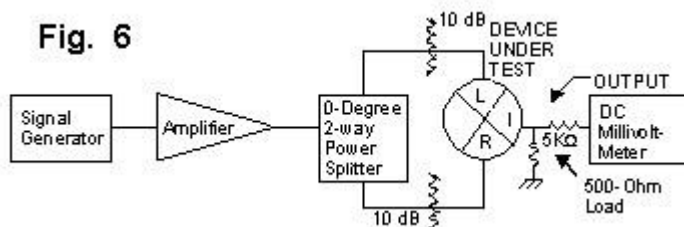


Fig. 5

## 位相検出器測定

位相検出器の動作はミキサに似ていますが、L0ポートとRFポートに同じ周波数を入力するように規定されています。そのため、ミキサのIFに相当するポートにはDC出力が得られます。したがって、位相検出器に特有の測定として、L0信号とRF信号が同相のときの「最大電圧」と、L0信号のみを加えたときに発生するDCオフセットというDC出力に関するものになります。

図6に、測定系を示します。Mini-circuit'sのモデルZFSC-2-1などの0度のパワースプリッタは、それぞれ+7dBmの位相信号をDUTのL0入力とRF入力に入力します。最大DC出力は、出力ポートに500オーム負荷を接続した状態で測定しています。DCオフセットの測定は、RFポートからパワースプリッタを取り外し、DUTのRFポートと使用していないスプリッタ出力を終端してDC電圧を読み取ります。



## リミッタ測定

図1のネットワークアナライザの測定系に、30dBm以上の1dB出力圧縮点を持つアンプと、14dB以上のレンジを1dB単位で可変できる可変アッテネータを追加すれば、主なりミッタ測定（入力電力の変化に伴う出力電力と位相変化）を容易に行うことができます。インピーダンスマッチングを良好にするため、可変アッテネータの前後には3dB以上の固定アッテネータを入れることをお勧めします。

リミッタの出力電力は、外部から印加される制御電流の値に依存します。この電流は、試験中は一定に保たれ、通常、指定された「標準」値であり、正極性または負極性のいずれかになります。試験を行うには、まずDUTへの入力を使用する最小電力値に設定し、振幅0dB、位相0度の基準を定めます。次に、可変アッテネータでDUTの入力電力を増加させ、振幅と位相の変化を読み取ります。

## I&Q 変調器および復調器

測定方法については、「I/Q測定」アプリケーションノートを参照してください。

## QPSK 変調器測定

挿入損失、VSWR、振幅および位相のアンバランスが最も重要な特性です。この記事の冒頭の測定系に加え、2つの制御ポートに±20 mAのバイアスを供給する50オームの電流源を追加して使用します。

挿入損失は、+20 & +20、+20 & -20、-20 & +20、および -20 & -20 mAの4つの制御電流状態すべてで測定します。読み取り値の最悪値は、デバイスの挿入損失を表します。4つの状態における最大挿入損失と最小挿入損失のdB差は、振幅のアンバランスを表します。位相アンバランスは、+20 & +20 mAの制御電流で挿入位相を0度に正規化することによって測定されます。次に、他の制御電流の各状態で実際の位相を測定し、それぞれの位相値（90°、180°、270°）からの偏差が位相アンバランスを表します。VSWRは、2ポートデバイスと同じ方法で測定しますが、4つの制御電流状態すべてで測定します。最悪のケースが、QPSK変調器のVSWR性能を表しています。

## スイッチング速度測定

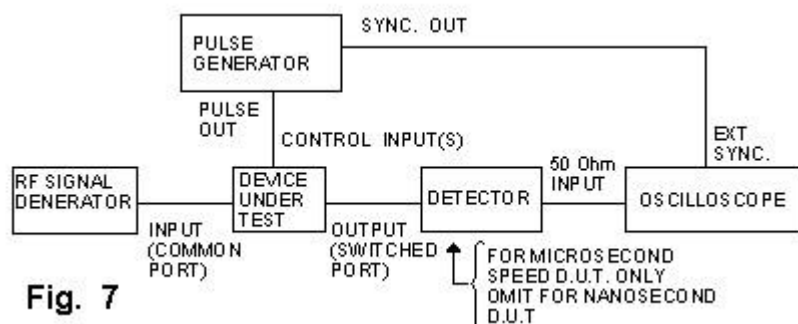
スイッチング速度は、制御信号にตอบสนองして伝送状態が変化する部品の重要な特性です。PIN ダイオードや GaAs スイッチの場合、状態の変化は完全 OFF から完全 ON へ、またはその逆になります。スイッチング速度に関連する量として、次の定義がよく使われます。

- (1) 立ち上がり時間と立ち下がり時間を、それぞれ RF 出力振幅の 10% と 90% の間、および 90% と 10% の間の間隔として定義。
- (2) ターンオン、ターンオフ時間を、制御波形の 50%が RF の 90%、10%にそれぞれ遷移するまでと定義。

デジタルステップアッテネータのスイッチング速度も同様に定義されますが、10%と 90%は制御信号の状態変化による RF 振幅ステップの一部とされます。

測定技術は、主に予想されるスイッチング速度の範囲と、RF 信号の周波数範囲に基づいて決まります。スイッチング素子として PIN ダイオードを使用するデバイスの場合、測定される時間間隔は通常 1 マイクロ秒以上です。図 7 の測定系を参照すると、パルス発振器は、TTL または その他 DUT が要求する電圧/電流値の制御レベル間で繰り返し切り替わる必要があります。制御遷移時間は、DUT の RF 遷移時間より少なくとも 1 桁小さくする必要があります。DUT に 2 つ以上の制御入力がある場合、パルス発振器から正しい極性ですべての制御入力に供給する必要があります。RF 発振器は、DUT が歪まない範囲で高いレベルに設定し、検出器がその線形範囲で動作し、オシロスコープに表示される検出信号振幅が十分あるようにします。DUT に複数のスイッチポート (SPDT または SP4T スイッチなど) がある場合、測定していない各ポートは終端する必要があります。

オシロスコープの帯域幅は少なくとも 10 MHz あれば、波形は忠実に表示されます。入力は検出器に対して 50 オームのフィードスルーロード終端とし、検出器自身のターンオフ応答時間が測定の制限にならないようにする必要があります。非常に広帯域のオシロスコープを使用する場合や RF が低周波の場合には、検出器からリークする RF を減衰させるために、検出器の後段にローパスフィルタが必要になる場合があります。また、DUT 出力のビデオリーク (コントロールブレークスルー) により観測波形が歪む場合は、検出器の前段にハイパスフィルタを挿入することにより、その影響を軽減させることができます。このフィルタは、RF は通過させ約 5MHz 以下の信号を減衰させるもので、Mini-Circuits の SHP または NHP シリーズが選択できます。



ナノ秒の領域で動作する GaAs スイッチの速度を測定するための測定系には若干の違いがあります。図 7 を参照すると、オシロスコープの帯域幅は 500MHz 以上である必要があります。検出器は使用せず、DUT のスイッチポートから 50 オーム終端されたオシロスコープに直接入力します。オシロスコープはパルス発生器により外部トリガをかける必要があります。その結果、変調された RF 波形が得られ非同期の RF キャリアによって安定した信号包絡線が「書き込まれ」ます。ターンオンまたはターンオフ時間を測定するには、制御信号も表示できるデュアルトレースディスプレイが必要で、これには広帯域高インピーダンスプローブを使用する必要があるかもしれません。いずれにしても、ケーブルなどの経路長の違い (1 フィートあたり約 0.5 ナノ秒) やオシロスコープ自体のチャンネル間タイムスキューを補正するために、細心の注意を払わなければなりません。デジタルストレージオシロスコープには、この補正を行うためのキャリブレーション機能が備わっています。