



製品：ベクトル・ネットワーク・アナライザ ZVA/B/T

## ベクトル・ネットワーク・アナライザ ZVA/B/T による 平衡デバイスの測定

### アプリケーション・ノート

RF 平衡デバイスは EMI の発生が少なく、また、EMI に対する影響も少ないため、従来の同軸デバイスより優れています。このアプリケーション・ノートでは、平衡デバイスにきわめて重要なディファレンシャル・モードとコモン・モードの信号およびミックス・モード・パラメータの基本的なコンセプトを説明します。ミックス・モード・パラメータを測定するための技術を紹介します。測定例では、平衡デバイス測定のために ZVx に実現されている機能を説明します。



2004年9月 - 本書の内容は変更されることがあります。

目次

1 はじめに..... 2  
 2 ディファレンシャル・モードとコモン・モード..... 3  
 3 測定技術..... 7  
 4 平衡デバイス測定のための ZV<sub>x</sub> の機能..... 9  
 5 測定例 ..... 11  
 6 オーダリング・インフォメーション..... 19

1 はじめに

従来、RF 信号は、2つの導体伝送路の1つを接地した伝送線路によって送信されてきました。これらの伝送線路は、不平衡型またはシングルエンド型と呼ばれています。シングルエンド系でよく使用される伝送線の種類には、同軸線路、マイクロストリップ線路、コプレーナ線路があります。たとえばマイクロストリップ伝送線路では、2つの導体の1つは金属ストリップで、もう1つの導体は導電基準面によって表されます。2つの導体は誘電体によって分離されています。導電性基準面は、基準面全体の電位が均一で理想的な接地であると考えられています。しかし、実際にはそうではありません。正常な動作を確保するために接地点を基準にしなければならない回路素子が、接地基準面内に電流を発生させます。導電率と寄生インダクタンスによって、基準面内に電位差が生じます。これらの電位差は、必要な信号の妨げになります。さらに、マイクロストリップ線路の片導体が、妨害電磁界に敏感なアンテナとして動作する可能性があります。同様に、マイクロストリップ線路も、他の伝送線路や回路素子の信号品質を損なう妨害源となる可能性があります。

この問題は、通常は対称構造になっている平衡型伝送線路を使用すれば解決することができます。図1は、プレーナ技術の平衡型伝送線路の断面を示しています。伝送線は、誘電体基板上の2つの片導体で構成されています。説明を簡単にするために、ケーブルの近くに接地はありません。

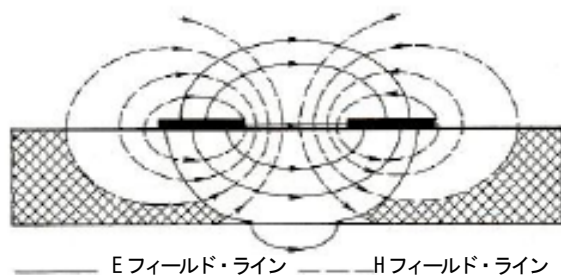


図1 平衡型プレーナ伝送線路の断面

信号は平衡線の導体間の電圧で表され、ディファレンシャル・モードと呼ばれます。少なくとも理想的な条件では、接地基準面の電位は関係ありません。しかし、実際にはほとんどの場合でも、接地基準面は導体伝送路の近くにあり、その結果、ディファレンシャル・モードのほかにもう1つのモードが存在します。回路の動作は、このモードによって阻害されることがあります。以下にこのモードを解析し、平衡型伝送線路と平衡デバイスの動作を測定する方法を説明します。

## 2 ディファレンシャル・モードとコモン・モード

接地基準面のある平衡型伝送線路は、2つのシングルエンド・ラインとしてモデリングすることができます。伝送線路理論によれば、これら対応する2つの伝送線には、偶数/奇数モード、あるいはコモン/ディファレンシャル・モードとして知られる独立した2つのモードがあります。図2には、平衡型プレーナ伝送線の断面に、2つのモードの電界と磁界の伝送線が示されています。

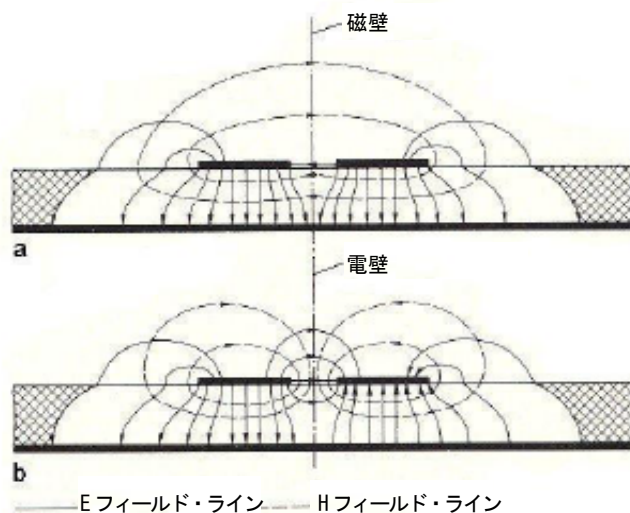


図2 平衡型プレーナ伝送線路の断面に示された電界と磁界の伝送線

- a: 偶数モードまたはコモン・モード
- b: 奇数モードまたはディファレンシャル・モード

コモン・モードの場合には垂直の対称面に磁壁を、ディファレンシャル・モードの場合には電壁を考えることができます。

通常、2つのモードの特性インピーダンスと伝搬定数は異なっており、それらの間に固定した関係はありません。これらのパラメータは、伝送線路の種類によって決まります。ディファレンシャル・モードの特性インピーダンスは $Z_d$ 、コモン・モードでは $Z_c$ です。2つのシングルエンド・ラインの特性インピーダンスが $Z_0$ であれば、 $Z_d$ と $Z_c$ は簡単に計算することができます。ディファレンシャル・モードの場合には、振幅の電圧は同じですが、位相は正反対です。電圧は倍加しますが電流はそのまま、 $Z_d = 2Z_0$ となります。コモン・モードの場合には、電流は倍加しますが電圧は一定で、 $Z_c = Z_0/2$ となります。

伝送線路は、シングルエンド・モードに関する波形測定値とSパラメータ、およびディファレンシャル・モードとコモン・モードに関するパラメータによって特徴を示すことができます。後者の記述は、同一のモード（シングルエンドなど）をベースにしていなかったため、対応するSパラメータはミックス・モード・パラメータと呼ばれます。次に示されているように、伝送線路のシングルエンドとミックス・モードのパラメータの記述はまったく同じで、相互に変換可能です。

## ZVxによる平衡デバイスの測定

ミックス・モード・パラメータのコンセプトは伝送線路だけに限定されず、すべてのリニア回路に当てはめることができます。図3には、シングルエンド・ポートが1つ、バランス・ポートが2つのフィルタが示されています。



図3 シングルエンド・ポートとバランス・ポートのあるフィルタ

このフィルタのミックス・モード・マトリクスは、次のように表すことができます。

$$S = \begin{pmatrix} S_{ss11} & S_{sd12} & S_{sc12} \\ S_{ds21} & S_{dd22} & S_{dc22} \\ S_{cs21} & S_{cd22} & S_{cc22} \end{pmatrix} \quad (1)$$

添字  $xyij$  のうち、 $x$  と  $y$  はシングルエンド (single ended) の “s”、ディファレンシャル・モード (differential mode) の “d”、またはコモン・モード (common mode) の “c” を表します。 $i$  と  $j$  はポート番号を示します。文字と番号の順番は、シングルエンドの  $S$  パラメータと同じです。最初の文字と番号 ( $x$  と  $i$ ) は、負荷のポートのモードと番号を表し、2番目の文字と数字 ( $y$  と  $j$ ) は、ソース・ポートのモードと番号を表します。シングルエンド・ポートまたはバランス・ポートが複数ある場合のパラメータは、インデックス文字の組合せに従って最大 9 のブロックにグループ化されます。 $S$  パラメータ・マトリクスでは、これらのブロックが次のように配列されます。

$$S = \begin{pmatrix} S_{ssij} & S_{sdij} & S_{scij} \\ S_{dsij} & S_{ddij} & S_{dcij} \\ S_{csij} & S_{cdij} & S_{ccij} \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2) のブロックは次の特性を表しています。

- $S_{ssij}$  には、シングルエンド・ポートの全反射パラメータと、シングルエンド・ポート間である伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{ddij}$  には、ディファレンシャル・モードのバランス・ポートの全反射パラメータと、バランス・ポート間である伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{ccij}$  には、コモン・モードのバランス・ポートの全反射パラメータと、バランス・ポート間である伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{sdij}$  には、ディファレンシャル・モード信号が入力されるバランス・ポートからシングルエンド・ポートまでである全伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{dsij}$  には、シングルエンド・ポートからディファレンシャル・モードのバランス・ポートまでである全伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{scij}$  には、コモン・モード信号が入力されるバランス・ポートからシングルエンド・ポートまでの全伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{csij}$  には、シングルエンド・ポートからコモン・モードであるバランス・ポートまでの全伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{dcij}$  には、コモン・モード信号が入力されるバランス・ポートからディファレンシャル・モードであるバランス・ポートまでの全伝送特性パラメータが含まれています。
- $S_{cdij}$  には、ディファレンシャル・モード信号が入力されるバランス・ポートからコモン・モードであるバランス・ポートまでの全伝送特性パラメータが含まれています。

## ZI<sub>x</sub>による平衡デバイスの測定

理想的な平衡デバイスはディファレンシャル・モードの動作に合わせて最適化されており、コモン・モード信号はすべて除波されます。図4は、完全な平衡デバイスと平衡デバイスから同軸デバイスのこの動作を示しています。

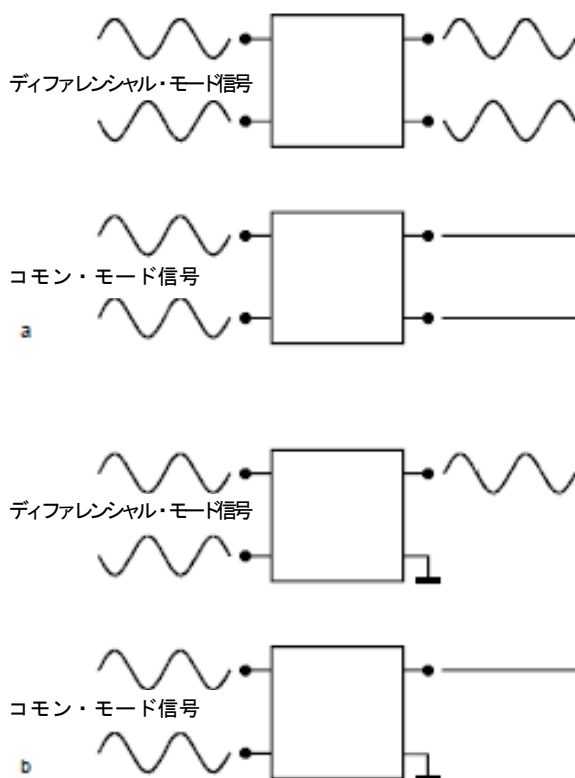


図4 理想的な平衡デバイス：

- a 完全な平衡デバイス
- b 平衡デバイスから同軸デバイス

完全に理想的な平衡デバイスでは、Sパラメータ・マトリクス(2)の対角線から外れているブロックはすべてゼロです。しかし、理想的な平衡デバイスから同軸デバイスでは、 $S_{sd}$ と $S_{ds}$ のブロックにゼロ以外の要素があります。実際には、平衡に優れた動作は、回路を完全に左右対称に設計することによって実現することができます。

それでは、あまり理想的とは言えない状態を考えてみましょう。図3のフィルタは、シングルエンド・ポート1とディファレンシャル・モードのポート2の間の送信を、既定の周波数範囲に限定するために使用されます。ここで必要とされる伝送特性は、 $S_{ds21}$ によって表されます。しかし、 $S_{cs21}$ の構成要素があまり理想的ではないため、ポート1に入力された信号エネルギーのいくらかはポート2でコモン・モードに変換されます。ポート2の負荷は、この信号を吸収するか、またはコモン・モードかディファレンシャル・モードとしてこの信号を反射します。(図5参照)

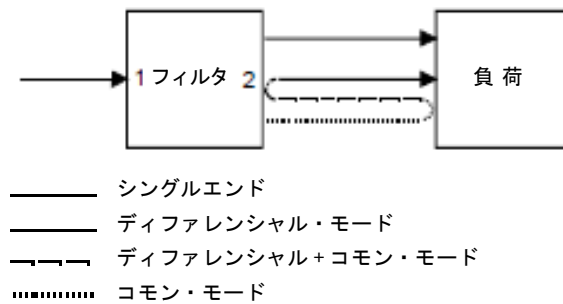


図5 図3のフィルタの順方向測定の信号フロー

フィルタの出力でさらに別の反射（およびコモン・モード成分からディファレンシャル・モード成分への変換）が生じると、反射された両方の信号成分によって、直接送信された差分信号が妨害される可能性があり、フィルタ特性が損なわれることがあります。このことは、モード変換をゼロに保つことができなければ、平衡デバイスには少なくともコモン・モードに優れた適合性が必要だということを示しています。

いったんコモン・モードに変換され、コモン・モードのままの信号成分は、必要な伝送特性に影響を与えることはありません。ただし、これらの信号成分は、ポート1に不要な信号（雑音など）があるとEMIを発生させることがあります。逆に、コモン・モード雑音は、取り込まれてディファレンシャル・モードに変換されると信号対雑音比（SNR）を下げます。



### 3 測定技術

被測定物 (DUT) のミックス・モード・パラメータを直接測定するときには、ディファレンシャル・モードやコモン・モードの高精度の信号を入力する計測器が必要です。さらに、計測器のレシーバには被測定物からのディファレンシャル・モードとコモン・モードの応答を区別できる能力が必要で、最終的には、明確に定義された測定基準面と、これらの基準面に対するバランス・キャリブレーション・スタンダードが使用できなければなりません。市販の VNA の場合には、テストポートが不平衡型で、一度に1つのテストポートしか信号を発生させることができないため、これらの条件を満たすことはできません。この制限は、平衡不平衡変換回路 (バラン) を使用することによって解決することができます。図 6 では、VNA によって 2 ポートの被測定物のディファレンシャル・モード特性を測定するために、簡単なバランが使用されています。ディファレンシャル・モードの基準インピーダンスが  $Z_0$  の場合、バランの巻数比  $n_D$  は次の数式によって選択されます。

$$n_D = \sqrt{\frac{Z_D}{50\Omega}}$$

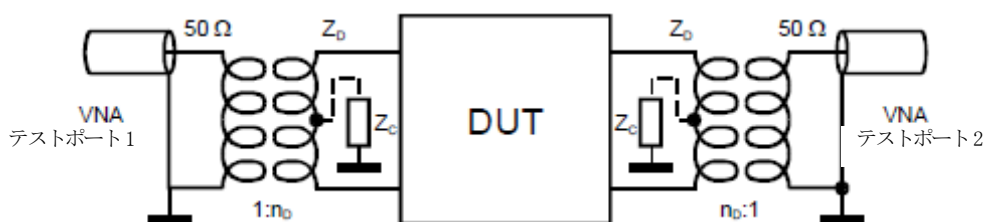


図 6 バランによる 2 ポートの被測定物のディファレンシャル・モード特性の測定

ただし、この測定方法にはいくつかの欠点があります。

- 被測定物の S パラメータは、被測定物のバランス・ポートで測定しなければなりません。VNA の場合には、VNA の同軸ポートで校正されるのに、バランに組み込まれた被測定物を測定します。バランの特性が適切でなければ、伝送線が長くなったことによる影響が生じ、測定結果が著しく損なわれることがあります。バランス・キャリブレーション・スタンダードは簡単に入手できるものではないため、多くの場合、バランス・ポートで直接校正するという事は不可能です。
- 簡単な 4 端子のバランが使用される場合、コモン・モードの負荷インピーダンスは開放回路です。したがって、図 5 に示されているような複数の反射によって測定精度が損なわれます。このような状態は、バランの被測定物側の巻線にセンタ・タップを装着し、図 6 の破線で示されているように、タップと接地の間にコモン・モードの基準インピーダンス  $Z_c$  を接続することによって改善することができます。
- コモン・モードの特性やディファレンシャル・モードとコモン・モード間の変換を測定することはできません。
- バランの帯域幅は約 1 GHz に限定されます。

コモン・モード特性を測定するためには、図 7 に示されているように、図 6 の構成にコモン・モードのトランスを加えることができます。

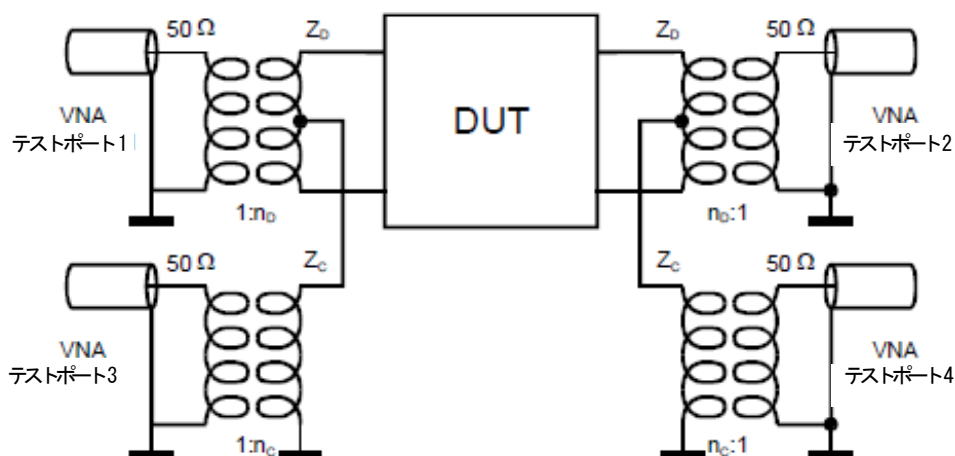


図7 平衡デバイスのディファレンシャル・モードとコモン・モードの特性

コモン・モードのトランスはディファレンシャル・モードのバランのセンタ・タップに接続されるため、VNAのシングルエンドのテストポートによって、ディファレンシャル・モードとコモン・モードを個別に測定することができます。しかし、バランが適切でない場合や、帯域幅の制約に対する問題は解決できません。

このため、別の方法が選択されています。前に説明したように、デバイスのシングルエンドの解析はミックス・モードの解析と同じです。シングルエンド・マルチポート測定の場合には、計測器や付属品、同様に校正や測定の技術も簡単に使用することができます。シングルエンドのパラメータがわかっているならば、実行方式が決まっている分解技術を使用して、それらをミックス・モードに変換することができます。この変換には、次のように異なった2つの方法を使用することができます。

- まず、シングルエンドのSパラメータは、シングルエンドのZパラメータに変換されます。これらのパラメータによって、シングルエンドの電圧とシングルエンドの電流が対応づけられます。シングルエンドとミックス・モードの電圧と電流には直線的な関係があるため、マトリクスの数式  $U=Z \cdot I$  のシングルエンドの電圧と電流はミックス・モードの電圧と電流に置き換えることができ、その結果、ミックス・モードのZパラメータになります。これらのZパラメータは、最終的に、ミックス・モードのSパラメータに再変換することができます。この手順は、シングルエンド・ポートとバランス・ポートの任意の基準インピーダンスについても使用することができます。
- シングルエンドとミックス・モードのSパラメータの間に直接的なマトリクスの関係を発見したのは、ボッケルマンとアイゼンシュタットです。ただし、この関係は、ポートのインピーダンスについて何らかの制限があることを示しています。条件が合わなければ、さらに正規化を繰り返さなければなりません。



### 4 平衡デバイス測定のための ZVx の機能

ZVx のテストポートは、シングル・ポートまたはバランス・ポートとして任意に設定することができます。ZVx の 4 つのシングルエンド・テストポートのうち、任意の 2 つを組み合わせてバランス・ポートを形成することができます。テストポートには、次の 2 種類の番号体系が平行に存在します。

- **物理ポート番号** — ZVx のフロント・パネルに表示されている番号で、シングルエンド・ポートを表し、変更することはできません。
- **論理ポート番号** — 測定値 (S パラメータなど) のインデックスを表す番号です。バランス・ポートが定義されていない場合には、ポートの論理ポート番号は物理ポート番号と同じです。バランス・ポートの論理番号は、ユーザが指定することができます。この番号は、構成している物理ポートの番号とともに指定されます。あとの物理ポートは、自動的に番号が振りなおされ、1 で始まる連続した一連の論理ポート番号になります。

ポートの構成は、**MODE: Port Config...** によって設定することができます。このメニューによって **Port Configuration** ダイアログがオープンされます。(図 8)

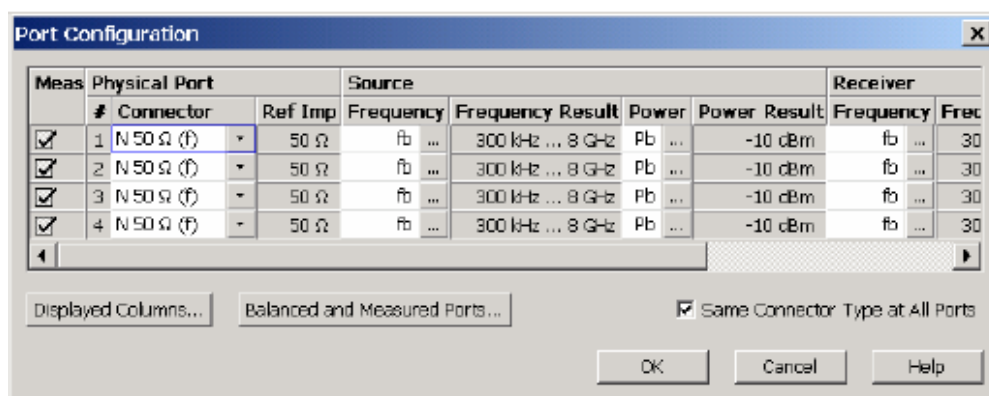


図 8 Port Configuration ダイアログ

**Balanced and Measured Ports...** のボタンをクリックすると、バランス・ポートの接続形態 (トポロジ) を設定するためのサブダイアログがオープンされます。

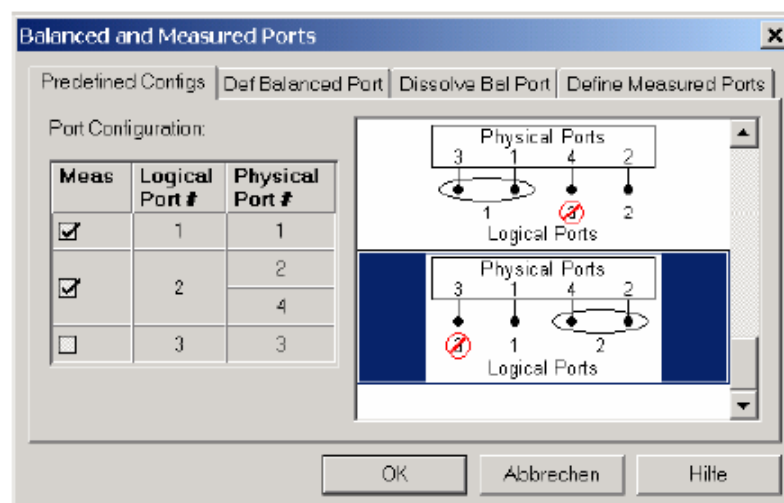


図 9 Balanced and Measured Ports ダイアログ

**Predefined Configs** (デフォルト選択) のタブで可能なポート設定は、ほとんどの用途に使用することができます。図 9 には、図 3 のフィルタに該当する選択項目が示されています。他の設定については、各バランス・ポートを明確に定義しなければなりません。この設定は、**Def Balanced Port** のタブによって行うことができます。バランス・ポートを物理ポートに分解するときには、**Dissolve Bal Port** を使用してください。

シングルエンド・ポートの基準インピーダンスは、コネクタの種類によって指定されます。しかし、バランス・ポートのディファレンシャル・モードとコモン・モードの基準インピーダンスは、ユーザが設定することができます。ディファレンシャル・モードのインピーダンスのデフォルト値は  $2 * 50 \Omega = 100 \Omega$  ですが、コモン・モードのインピーダンスは  $50 \Omega / 2 = 25 \Omega$  にプリセットされています。通常、これらの値は、被測定物の仕様に従って変更しなければなりません。

VNA には被測定物用のポートの数はわかりませんし、反射係数を 1 つだけ測定する場合に、4 ポート・システム全体のエラー修正を行うのは非効率的です。そのために、測定したり、補正したりするテストポートの範囲を指定しなければなりません。図 9 に示されている選択項目では、測定するポートの範囲が 1~3 に限定されています。あらかじめ決められた設定の代わりに、**Defined Measured Ports** のタブによって、測定するポートの範囲を設定することもできます。

オープンされている両方のダイアログで OK をクリックすると、選択したポート設定がアクティブになります。設定の変更によって前に選択した測定値が無効になっている可能性があるため、すべてのトレースの測定値がデフォルトに設定されます。このデフォルト値は、測定されるポートの範囲で最も小さな論理番号のポートの反射係数です。このポートが平衡型であれば、差動反射  $S_{ddii}$  が選択されます。

**MEAS** メニューでは、現在のポートの設定で定義された測定値だけを選択することができます。

## 5 測定例

ミックス・モード・パラメータを理解していただくために、まず、シングルエンドの環境で行われる非常に簡単な測定を説明します。VNAのテストポートにはすべてオスのコネクタが装着されており、フル4ポート校正によって校正されています。次のようなバランス・テストポートが設定されています。

論理ポート	物理ポート
1	1、3
2	2、4

ここで、非常に簡単な被測定物を接続します。図10に示されているように、メス/メスのアダプタによって物理的なテストポート1と2を接続します。ポート3とポート4の間には、同じ長さの別のアダプタを挿入します。

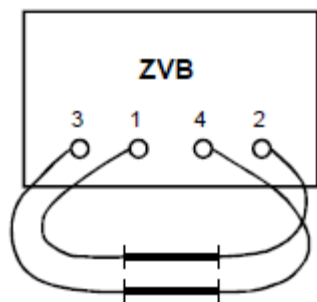


図10 同じ長さの2つのアダプタの測定

この左右対称の被測定物の場合には、ミックス・モード・パラメータのマトリクスの半分、言い換えると、論理ポート1からの反射特性と、論理ポート1から2への伝送特性だけを測定する必要があります。各バランス・ポートには2つのモードがあるため、パラメータ1つだけでは反射や伝送の特性を表すことはできません。各特性を適切に表すためには、それぞれ4つのパラメータが必要です。反射特性のパラメータは  $S_{dd11}$ 、 $S_{cd11}$ 、 $S_{dc11}$ 、および  $S_{cc11}$  で、伝送特性のパラメータは  $S_{dd21}$ 、 $S_{cd21}$ 、 $S_{dc21}$ 、および  $S_{cc21}$  です。ここで使用されている反射特性と伝送特性という一般的な用語には、ディファレンシャル・モードとコモン・モードのピュア・モードの反射係数だけでなく、モード変換係数の意味も含まれています。

図11のメモリ・トレース5～8には、この簡単な被測定物のポート1の反射に対する測定結果が示されています。アダプタの反射係数の振幅と位相がすべて同じだとすると、理論的にはピュア・モードの反射係数  $S_{dd11}$  と  $S_{cc11}$  (および  $S_{dd22}$  と  $S_{cc22}$ ) は、シングルエンドの反射  $S_{11} \sim S_{44}$  と同じです。クロス・モードの反射  $S_{dc11}$  と  $S_{cd11}$  は、シングルエンドの反射のわずかな非対称性から発生します。

## ZVxによる平衡デバイスの測定

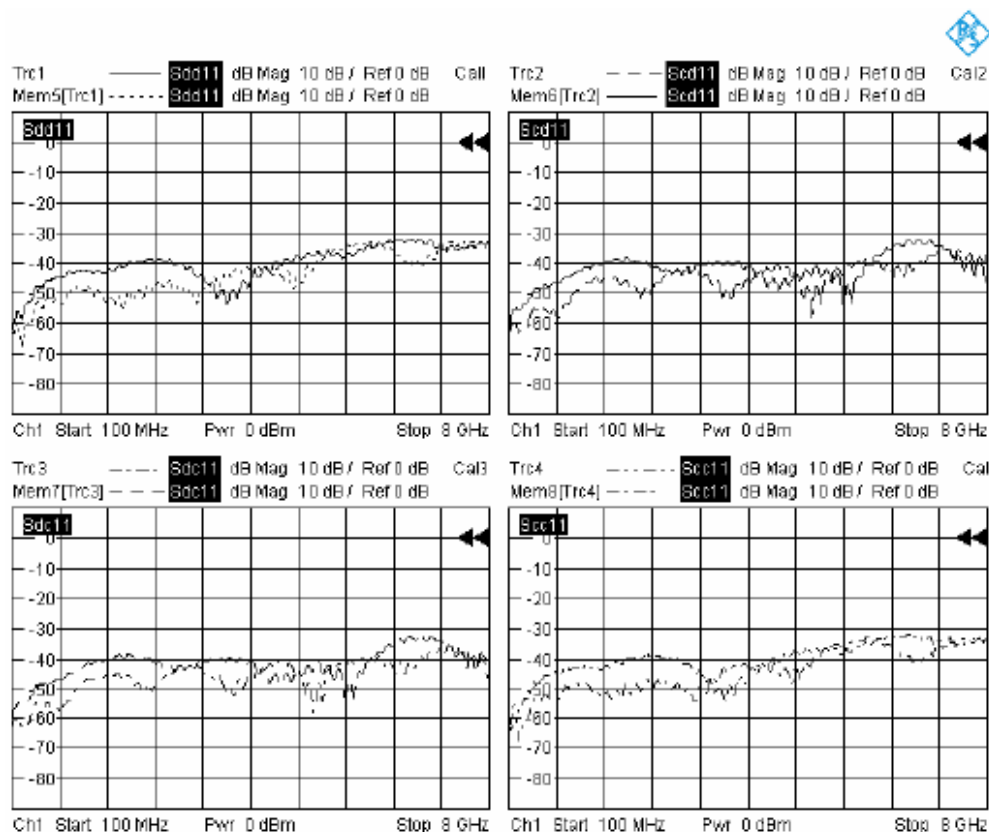


図 11 2つのアダプタで構成された被測定物のミックス・モードの反射パラメータ

次の手順では、図 12 に示されているように、物理ポートの 3 と 4 の間のアダプタを短いアダプタに交換します。今度は 2 つのアダプタの長さが異なるため、2 つのシングルエンド・パス間に 8 GHz で 180° に達する位相差があります。

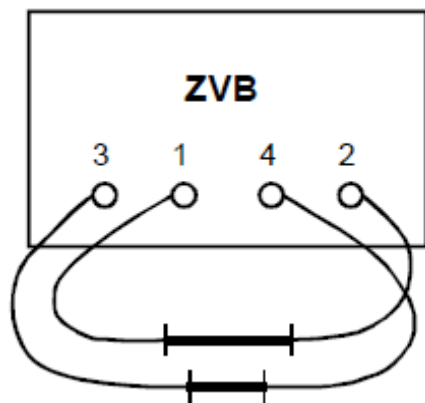


図 12 長さの異なる 2 つのアダプタの測定

この測定によって図 11 の 1~4 のトレースが示されます。アダプタを交換してもマッチング状態はあまりかわらないため、反射パラメータの振幅はほぼ一定のままです。

## ZI<sub>x</sub>による平衡デバイスの測定

図 13 には、ミックス・モード・マトリクスの順方向の伝送特性パラメータが示されており、すべてのパラメータのポート番号のインデックスが共通で 21 です。図 11 の場合と同じく、メモリ・トレースは 2 つのアダプタの長さが等しい例を示しています。 $S_{dd21}$  と  $S_{cc21}$  のトレースが 0 dB で基準線と一致することに注意してください。左右対称であることから、モード変換パラメータの  $S_{cd21}$  と  $S_{dc21}$  はやや小さめです。

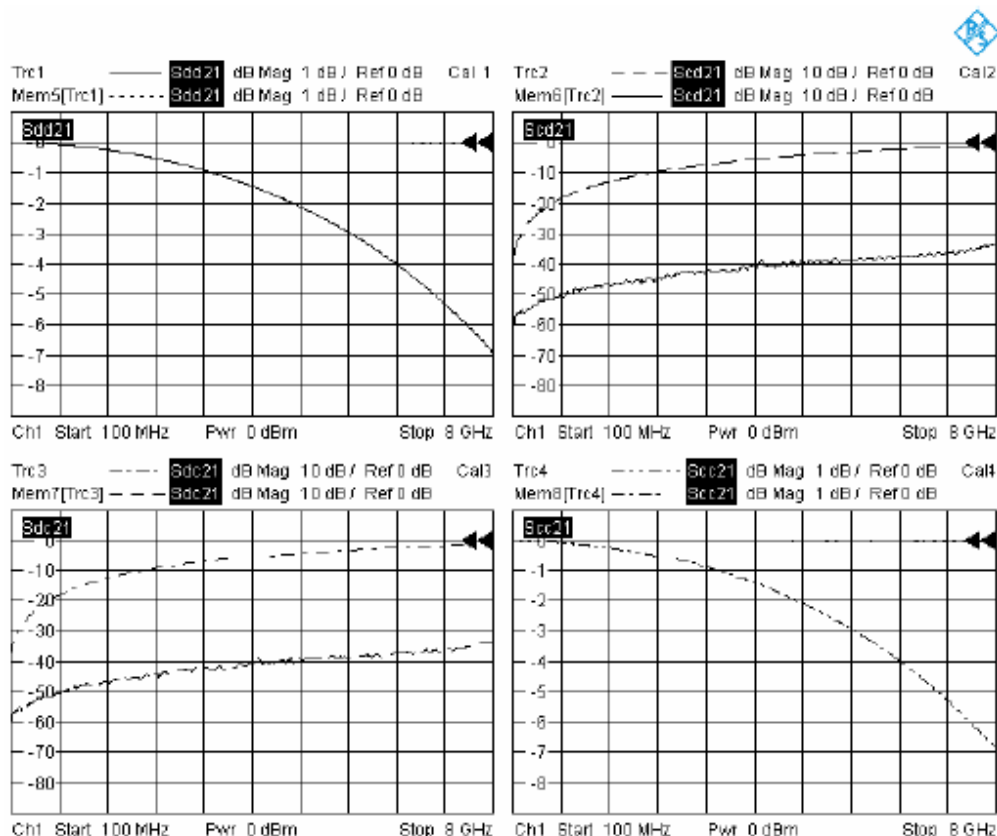


図 13 2つのアダプタで構成された被測定物のミックス・モードの伝送特性パラメータ

前に説明した反射パラメータとは対照的に、短いアダプタを挿入すると伝送特性のパラメータは明らかに変化します。周波数が高くなるにつれて、ピュア・モードの伝送係数の  $S_{dd21}$  と  $S_{cc21}$  は小さくなり、モード変換伝送係数の  $S_{cd21}$  と  $S_{dc21}$  は大きくなります。この状態は次のように説明されます。周波数が掃引されると、2つの伝送パスの長さの違いによって、シングルエンドの伝送特性パラメータ  $S_{21}$  と  $S_{43}$  の間の位相偏移は  $0^\circ$  から  $180^\circ$  に向かって大きくなります。この状態をミックス・モード・パラメータで表すと、たとえば低周波では、純粋なコモン・モードの信号はほぼ純粋なコモン・モードの応答になりますが、周波数が高くなると、コモン・モードで送られるエネルギーがディファレンシャル・モードに変換される割合が大きくなるということです。

次に示す被測定物は、実際に使用されている技術に深く関係しています。図 14 は、携帯電話のダイプレクサのレシーバ・パスに使用されている SAW フィルタのミックス・モード・パラメータを示しています。トレース 4 には通過域が詳細に示されています。対応するトレース評価フィールドから、2.3 dB あたりで変化するフィルタの損失とリップルを読み取ることができます。ポート 2 からのコモン・モードの反射がほとんどすべてです。ただし、通常、ポート 2 から大きなコモン・モードの信号が入射されることはないため、この反射がフィルタの動作に大きな影響を与えることはありません。

## ZI<sub>x</sub>による平衡デバイスの測定

図 15 には、比較できるように、同じデバイスのシングルエンドの S パラメータが示されています。これらが、図 14 のミックス・モード・パラメータの計算のベースになります。ただし、これらのパラメータは通過域の位置についてそのままの印象を示す程度で、損失、適合性、およびモード変換に対する情報はまったくありません。

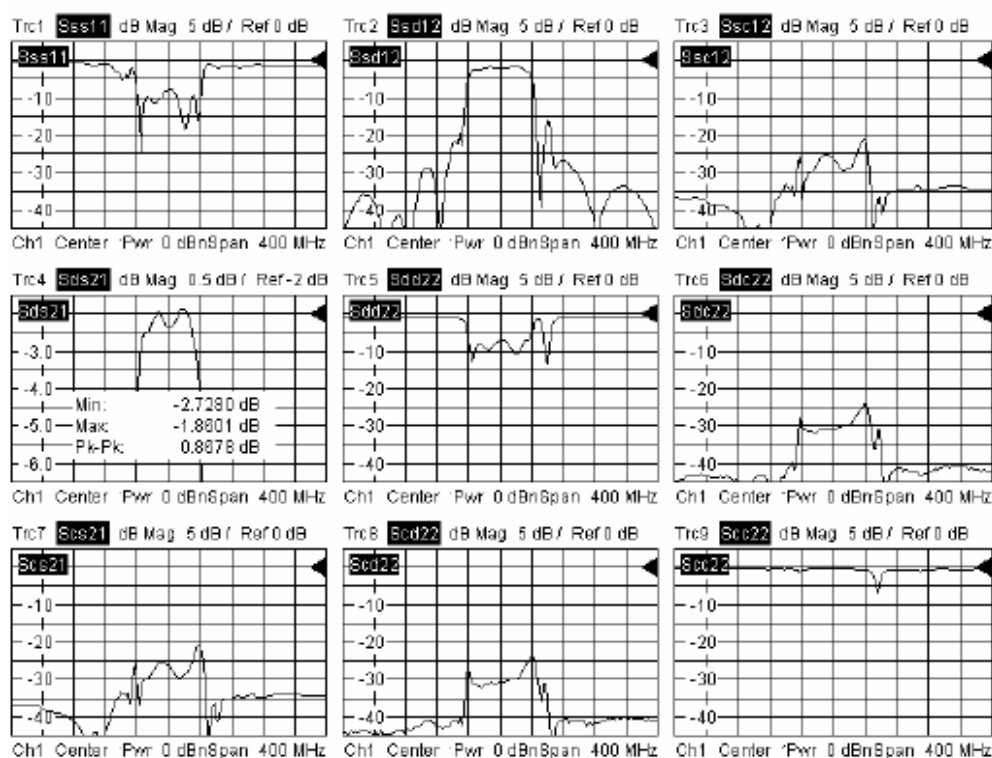


図 14 ダイプレクサ・フィルタのミックス・モード・パラメータ



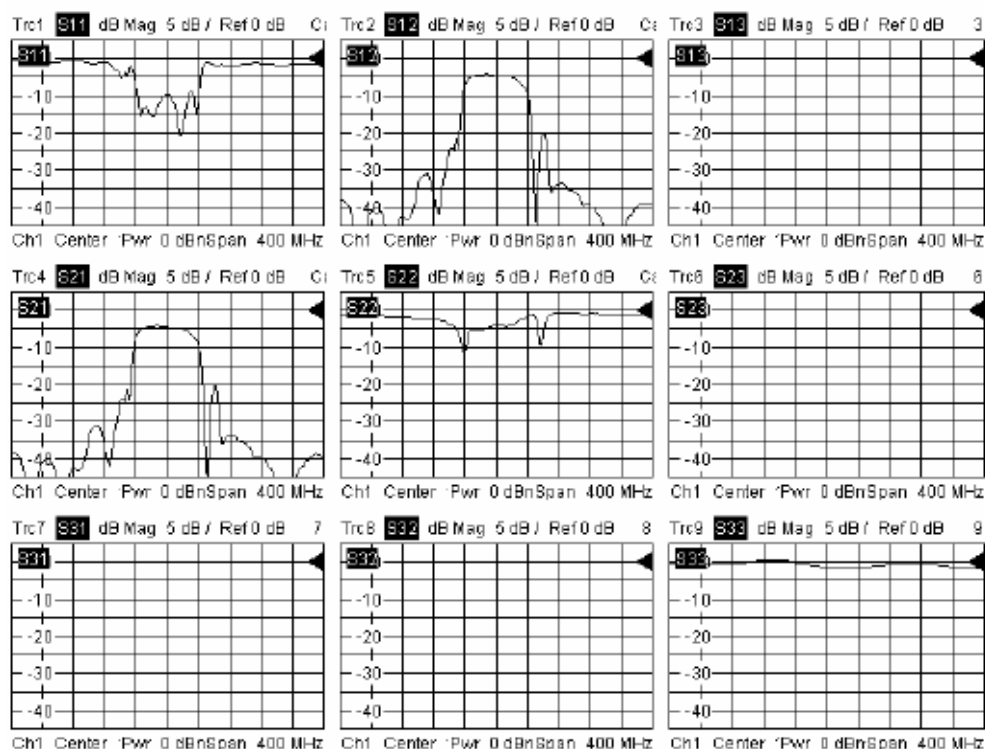


図 15 図 14 のダイプレクサ・フィルタのシングルエンドの S パラメータ

最後の例ではケーブル測定を説明します。イーサネット LAN の規格、たとえば 10Base-T、100Base-T、または 1000Base-T は、高速データ転送用のツイストペア・ケーブルをベースにしています。1000Base-T の規格では、1 Gbit/s のデータ・レートが設定されます。ケーブルを 1 組ずつ分けたりケーブルの束全体をまとめたりしてシールドする方法に従って、ケーブルには UTP (Unshielded Twisted Pair、シールドされていないツイストペア)、FTP (Foil shielded Twisted Pair、フォイルでシールドされたツイストペア)、S/FTP (Screened Foil shielded Twisted Pair、ケーブルを 1 組ずつ分けてフォイルでシールドしたツイストペア)、または S/STP (Screened Shielded Twisted Pair、ケーブルを 1 組ずつ仕切ってシールドしたツイストペア) の名称がつけられています。S/STP の場合には、ツイストペア・ケーブル同士が個別にシールドされ、さらにケーブル全体がシールドで覆われているため、ツイストペア同士が確実に分離されており、外部の EMI からも保護されています。

図 16 は、4 組のツイストペアを含む S/STP CAT7 ケーブルのうちの 1 組の、ミックス・モード・パラメータをいくつか示しています。

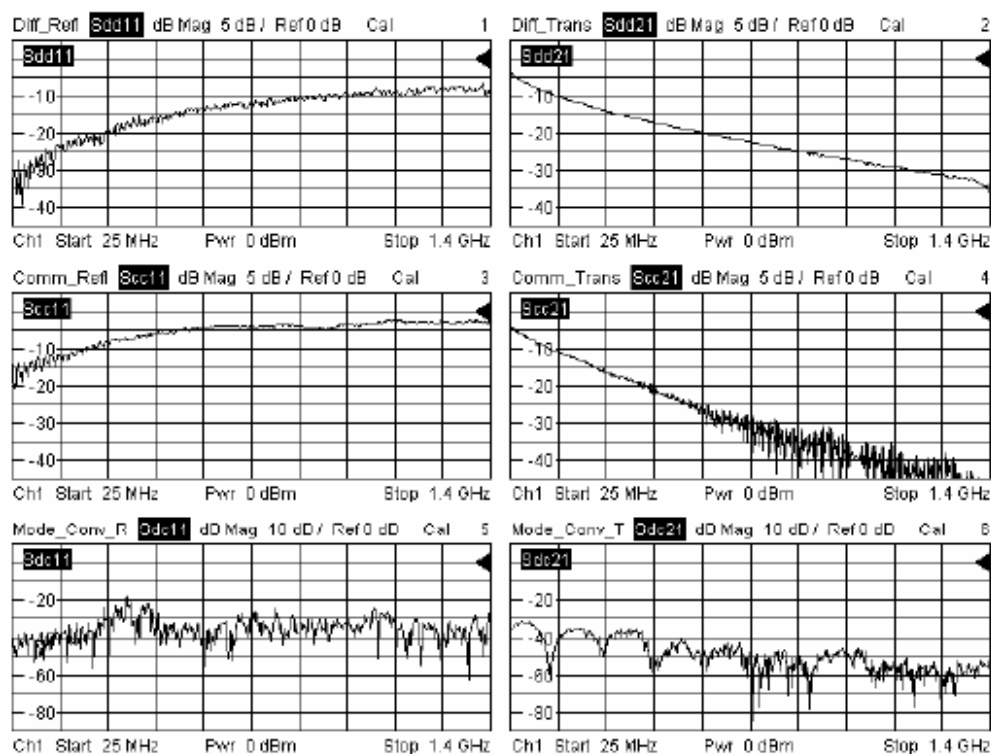


図 16 ケーブルの 1 組の導体ペアのミックス・モード・パラメータ

上の列のダイアグラムは、ディファレンシャル・モードの反射測定（左側）と伝送特性（右側）を示しています。中央の列は、コモン・モードについて同じパラメータが示されています。2 つのモード両方に対して物理的に同じ作用が働くため、2 つのモードの周波数動作は類似したように見えます。しかし、ケーブルは、ディファレンシャル・モードの伝播に合わせて最適化されています。このモードでは、コモン・モードと比較して、反射係数は小さく、伝送時の損失の増える速度も遅くなります。図 16 の下の列のダイアグラムでは、反射（左側）と伝送特性（右側）について、コモン・モードからディファレンシャル・モードへの変換損失を観察することができます。ケーブルの対称性と相反性によって、逆方向とディファレンシャル・モードからコモン・モードへの変換の測定パラメータは、示されているパラメータとほぼ同じです。

図 16 の測定値は、導体ペアが 1 組だけの場合を示しています。しかし、ケーブルの仕様に 2 組の導体ペア間のクロストークやモード変換の特徴を示す特性パラメータが含まれていることは少なくありません。近端クロストーク (Near-End CrossTalk, NEXT) は、ケーブルの同じ末端にある導体ペアから別の導体ペアへのディファレンシャル・モードのクロストークの尺度です。ケーブルの長さには関係ありません。NEXT 測定では、2 組の導体ペアはケーブルの遠端で、ディファレンシャル・モードとコモン・モードの公称インピーダンスによって終端されます。近端では、導体ペア間の分離度が測定されます。

$$\text{NEXT} = 10 \log_{10} (P_{1N}/P_{2N}) \text{ (dB)}$$

- $P_{1N}$  は信号を搬送する導体ペア - 妨害を与えるペア - の入力パワーです。
- $P_{2N}$  は信号が混入してくる導体 - 妨害を受けるペア - の出力パワーです。

## ZI<sub>x</sub>による平衡デバイスの測定

図 17 の上のダイアグラムは、図 16 で使用されたケーブルの NEXT を示しています。

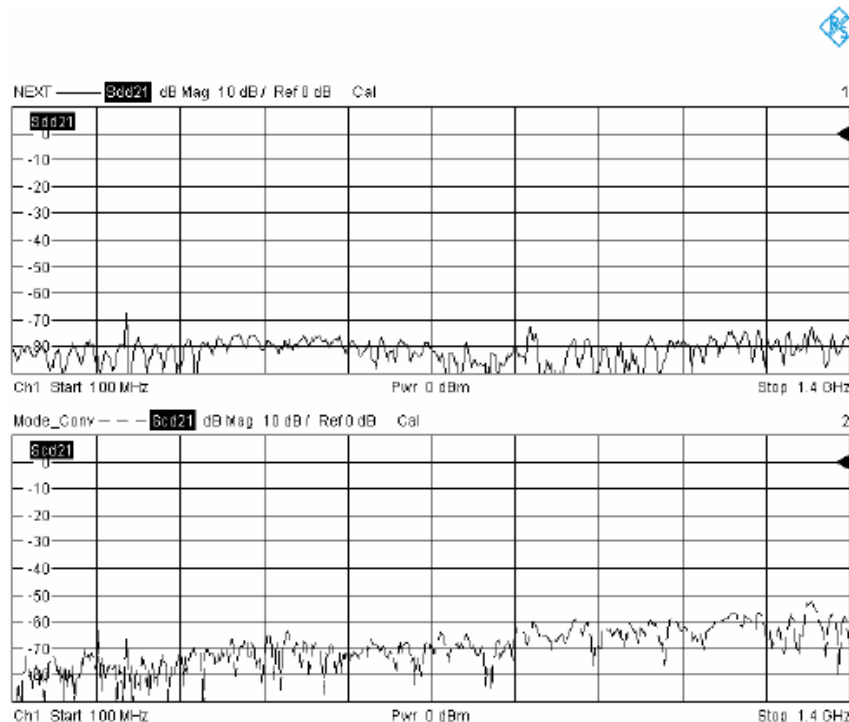


図 17 ケーブル近端での導体ペア間のクロストーク NEXT とモード変換 TCL

下のダイアグラムには、NEXT の場合と同じ設定で測定された、2 組の導体ペアのディファレンシャル・モードからコモン・モードへの近端変換損失が示されています。標準的な仕様の中には、この測定値を横変換損失 (Transverse Conversion Loss, TCL) と呼んでいるものもあります。ほとんどのケーブルでごく当然に考えられる相反性によって、TCL は、通常、コモン・モードからディファレンシャル・モードへの近端変換損失、縦変換損失 (Longitudinal Conversion Loss, LCL) と同じです。場合によっては、さらにケーブルのモード変換損失の別称として、アンバランス・アッテネーションが使用されていることがあります。

クロストーク測定、特に NEXT では、VNA の同軸テスト・ケーブルから心線までの接続が明確に設計されなければなりません。接触させるためにシールドを取り除かなければならない部分では、導体ペア間を確実に分離しておくことが非常に重要です。ねじれた状態の導体の原型を変えてはなりません。

遠端クロストーク (Far-End CrossTalk, FEXT) 測定では、一方のケーブル終端で、妨害を与える側のペアにディファレンシャル・モードの信号を入力し、他の終端で、妨害を受けるペアへのクロストークを測定します。また、使用されないペアの終端は、公称インピーダンスによって終端されます。FEXT には次の 2 つの種類があります。遠端入/出力クロストーク、IO FEXT (Input/Output Far-End CrossTalk) は次のように定義されます。

$$IO\ FEXT = 10 \log_{10} (P_{1N}/P_{2F}) \text{ (dB)} \quad (3)$$

ケーブルが長くなるとアッテネーションが原因で  $P_{2F}$  が小さくなるため、測定値はケーブルの長さによって変わります。ケーブルの長さに関係なく遠端クロストークの測定値を得るために、次のように等レベルの遠端クロストーク (Equal-Level Far-End CrossTalk, EL FEXT) が定義されています。

$$EL\ FEXT = 10 \log_{10} (P_{1F}/P_{2F}) \text{ (dB)} \quad (4)$$

## ZVxによる平衡デバイスの測定

(3) と (4) の数式の変数は次のとおりです。

- $P_{IN}$  はケーブル近端の妨害を与えるペアの入力パワーです。
- $P_{IF}$  はケーブル遠端の妨害を与えるペアの出力パワーです。
- $P_{2F}$  はケーブル遠端の妨害を受けるペアの出力パワーです。

伝送損失  $\alpha$  は次の数式によって計算されます。

$$\alpha = 10 \log_{10} (P_{IN} / P_{IF}) \text{ (dB)} \quad (5)$$

(4) は、(3) と (5) によって次のように表すことができます。

$$EL \text{ FEXT} = IO \text{ FEXT} - \alpha \quad (6)$$

ELFEXT は、(6) を使用し、ZVx のトレース計算機能によって計算することができます。

1. ディファレンシャル・モードの伝送損失を測定し、メモリに保存します。
2. IO FEXT 測定の設定を変更します。
3. **Trace: Trace Funct: Math = Data / Mem** を選択します。

図 18 には、このようにして測定された EL FEXT が示されています。

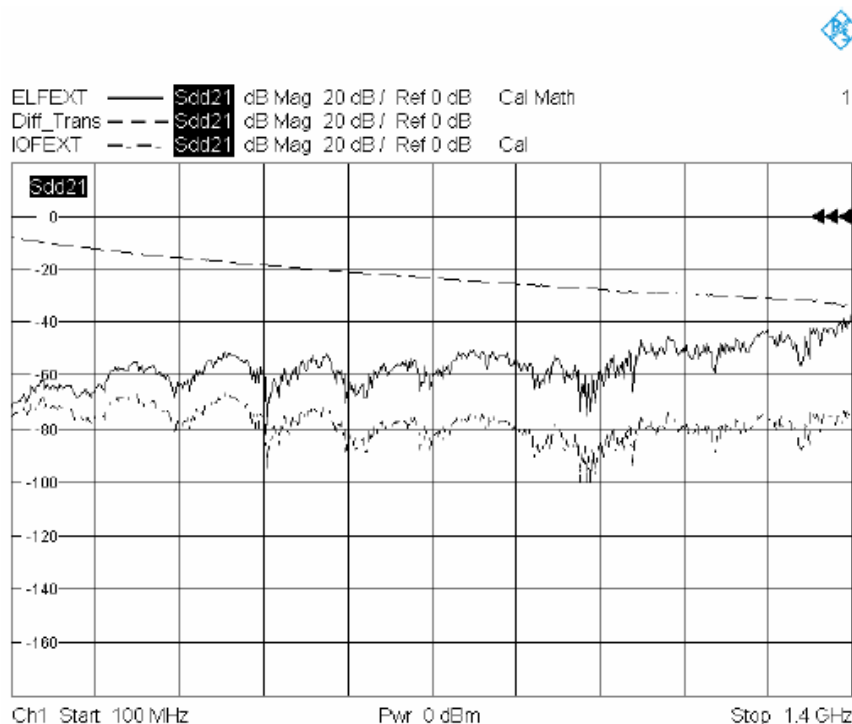


図 18 ケーブル遠端の EL FEXT

上記で説明したように、一点鎖線の IOFEXT は直接測定されます。破線のトレース Diff\_Trans は図 16 と同じ伝送損失で、メモリに保存されています。**Data / Mem** を選択すると、実線のトレース ELFEXT が表示されます。

最後に、ケーブル遠端のモード変換パラメータについても触れておく必要があります。FEXT と NEXT に関連性があるように、これらは TCL と LCL に関連しています。横変換伝送損失 (Transverse Conversion Transfer Loss, TCTL) と縦変換伝送損失 (Longitudinal Conversion Transfer Loss, LCTL) は直接測定することができますが、等レベルの横変換伝送損失 (Equal-Level Transverse Conversion Transfer Loss, EL TCTL) と等レベルの縦変換伝送損失 (Equal-Level Longitudinal Conversion Transfer Loss, EL LCTL) は、トレース計算機能を使用して求めます。測定値は、(6) に従い、対応するアッテネーションによって分類しなければなりません。

### 文献

[1] D. E. Bockelman and W. R. Eisenstadt: Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters (ディファレンシャル・モードとコモン・モードの散乱パラメータの結合) : Theory and Simulation, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (理論とシミュレーション、マイクロ波の理論と技術に対する IEEE の対応) , Vol. 43, No. 7, July 1995, pp. 1530-1539

## 6 オーダリング・インフォメーション

ベクトル・ネットワーク・アナライザ

R&S®ZVA8 (2 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1145.1110.08
R&S®ZVA8 (4 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1145.1110.10
R&S®ZVA24 (2 ポート)	10 MHz ~ 24 GHz	1145.1110.24
R&S®ZVA24 (4 ポート)	10 MHz ~ 24 GHz	1145.1110.26
R&S®ZVA40 (2 ポート)	10 MHz ~ 40 GHz	1145.1110.40
R&S®ZVA40 (4 ポート)	10 MHz ~ 40 GHz	1145.1110.42
R&S®ZVB4 (2 ポート)	300 kHz ~ 4 GHz	1145.1010.04
R&S®ZVB4 (3 ポート)	300 kHz ~ 4 GHz	1145.1010.05
R&S®ZVB4 (4 ポート)	300 kHz ~ 4 GHz	1145.1010.06
R&S®ZVB8 (2 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1145.1010.08
R&S®ZVB8 (3 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1145.1010.09
R&S®ZVB8 (4 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1145.1010.10
R&S®ZVB20 (2 ポート)	10 MHz ~ 20 GHz	1145.1010.20
R&S®ZVB20 (4 ポート)	10 MHz ~ 20 GHz	1145.1010.22
R&S®ZVT8 (2 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.0000.08
R&S®ZVT8-B63 (3 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.03
R&S®ZVT8-B64 (4 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.04
R&S®ZVT8-B65 (5 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.05
R&S®ZVT8-B66 (6 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.06
R&S®ZVT8-B67 (7 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.07
R&S®ZVT8-B68 (8 ポート)	300 kHz ~ 8 GHz	1300.1506.08