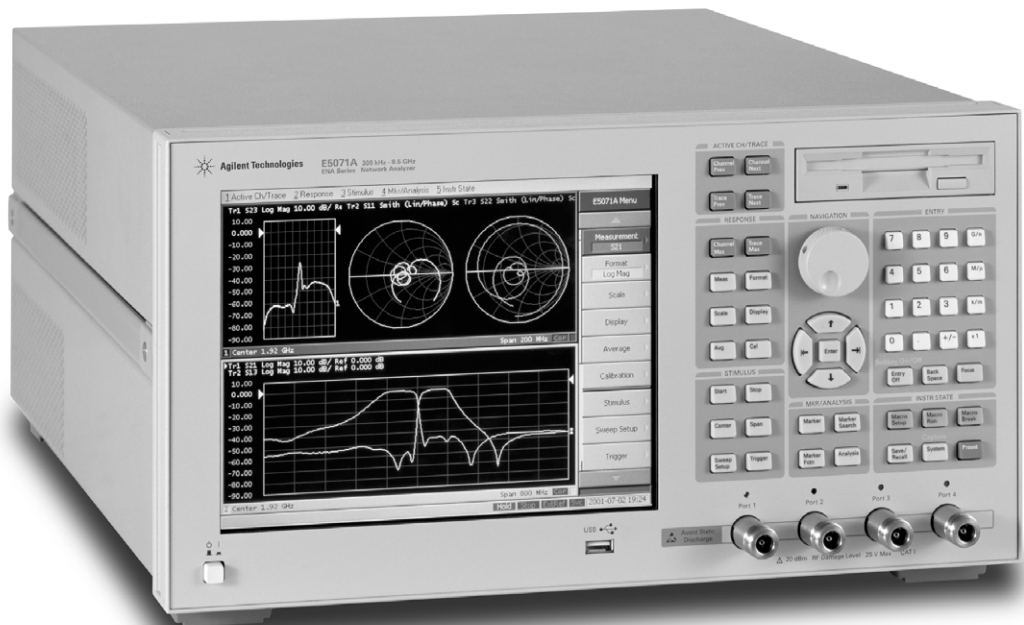


ENAシリーズ
RFネットワーク・アナライザ
フィクスチャ・シミュレータ機能の紹介
平衡・不平衡変換、マッチング回路付加
及びネットワーク除去
プロダクト・ノート E5070/71-1



Agilent Technologies

はじめに

最近のRF回路評価においてはSパラメータ測定データの後処理がしばしば要求されます。RF部品がさまざまな形態をとっているにもかかわらず、多くのネットワーク・アナライザの測定は正確に定義された50 Ωの同軸・不平衡端子面に限られているということが、後処理を必要とする要因の一つです。部品の形態は、通信機器の小型化、低消費電力化、低価格化に応えるためにますます多様化が進むことが予想されます。測定データの後処理は、外部コンピュータでの計算とそれに伴う測定器とコンピュータ間のデータ転送を必要とし、大変厄介で時間を要するプロセスです。ENAシリーズに内蔵されているフィクスチャ・シミュレータは測定データの後処理を大幅に簡略化して高速化を実現します。フィクスチャ・シミュレータは以下の4つのアプリケーションで大変有効です。

1. テスト・フィクスチャによる誤差の除去
2. 50 Ω系以外の部品の測定
3. 平衡部品の測定
4. マッチング回路など外部回路が付加された場合の特性評価

以下は、これら4つのアプリケーションについての簡単な説明です。

1. 表面実装部品 (SMD) の増加に伴って、RF部品の測定においてもテスト・フィクスチャを使用することが一般的になっています。更に、SMDの高性能化に伴いフィクスチャによる測定誤差をできるだけ少なくすることが要求されています。フィクスチャの特性をモデル化して、計算によって取り除くことにより測定誤差を改善することが可能です。
2. 回路特性を最適化するために50 Ω以外の特性インピーダンスを持った部品が増えています。ネットワーク・アナライザのポートの特性インピーダンスは一般に50 Ωですが、測定後の計算により特性インピーダンスを50 Ω以外の任意の値に変換することが可能です。
3. 平衡部品がその優れたノイズ特性からRF通信機器に多数採用されていますが、一般にネットワーク・アナライザは不平衡特性の測定しか行えません。この問題は測定結果を計算により平衡特性のデータに変換することによって解決できます。
4. 評価対象部品にマッチング回路などを付加した場合の特性を評価することが要求される場合があります。実際に回路を付加する代わりに、計算によって理想的な回路を付加することで測定が簡略化できます。

次章では、フィクスチャ・シミュレータが上記アプリケーションでどのように適用されるか、その全体像を示します。以降の章で個々の機能について詳細を説明します。

フィクスチャ・シミュレータの全体像

フィクスチャ・シミュレータは実際にテスト・フィクスチャ（誤差成分を含む）を用いて測定したSパラメータを計算処理することによって、理想的なフィクスチャを用いた測定をシミュレートします。フィクスチャ・シミュレータは優れた操作性を備えており、測定データの後処理を大幅に簡略化します。

図1はフィクスチャ・シミュレータの機能を物理的な回路を用いて等価的に示したものです。図の上半分は不平衡回路を測定する場合の機能を、下半分は平衡回路を測定する場合の機能を表しています。（ポート延長及びネットワーク除去の機能は不平衡測定、平衡測定共通です。）各機能はアプリケーションに応じて個別に使用することも可能ですし、組み合わせて使用することもできます。例えば、不平衡で100Ω系の部品を評価する場合フィクスチャによる誤差が無視できる程度であれば、インピーダンス変換機能を単独で使用することになります。もしこの部品にマッチング回路を付加した場合の特性を評価する必要がある場合は、あわせてマッチング回路付加機能を使用することになります。

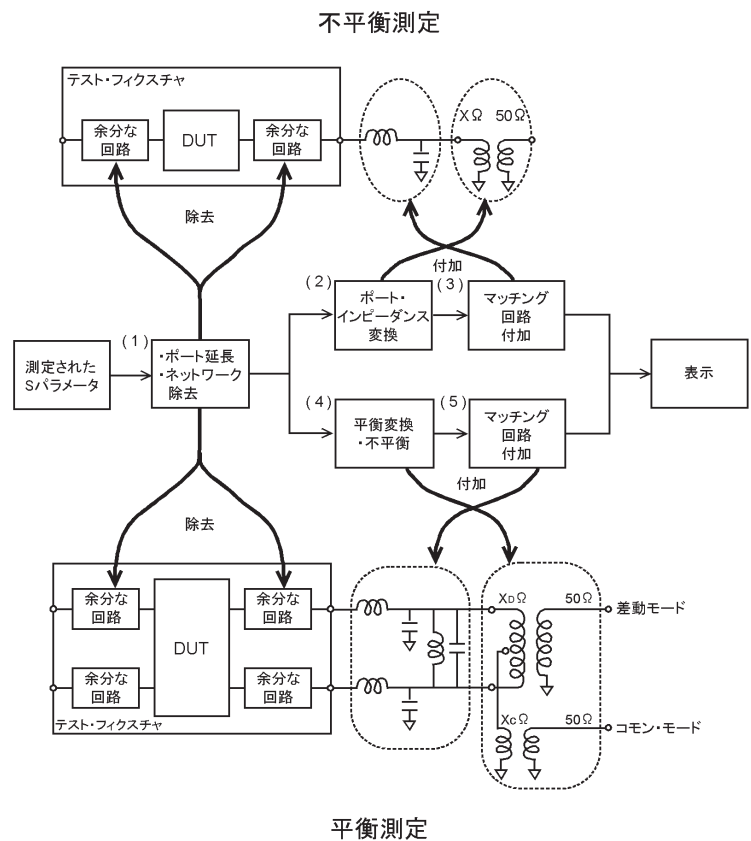


図1 フィクスチャ・シミュレータの全体像

フィクスチャ・シミュレータの全体像(続き)

以下は、フィクスチャ・シミュレータの個々の機能に関する簡単な説明です。(段落番号が図中の番号に対応しています。)

- (1) ポート延長とネットワーク除去機能によってテスト・フィクスチャによる追加誤差を小さくすることができます。
- (2) ポート・インピーダンス変換機能を用いることにより、所望の特性インピーダンスを持ったネットワーク・アナライザで測定した場合の測定結果をシミュレートできます。これは適切な巻線比を持った理想的なトランスを付加することと等価です。
- (3) マッチング回路付加機能は指定されたマッチング回路が付加されたときの測定結果をシミュレートします。
- (4) 平衡・不平衡変換機能は不平衡のSパラメータをミックス・モード(差動及びコモン)Sパラメータに変換します。これは理想的なハイブリッド・バランを付加することと等価です。また、この変換における差動及びコモンの特性インピーダンスを個別に設定することができます。
- (5) 差動マッチング回路付加機能は、指定されたマッチング回路が差動ポート間に付加された時の測定結果をシミュレートします。

テスト・フィクスチャによる誤差の除去：

ポート延長とネットワーク除去

SMDなど同軸コネクタを持たない部品を測定する場合、ネットワーク・アナライザと部品を接続するためのテスト・フィクスチャが必要になります。(図2参照) ネットワーク・アナライザは同軸コネクタの先端で校正されているので(校正基準面)、測定結果は部品そのものの特性に加えて、部品の端子面とコネクタ先端の間にあるフィクスチャの特性を含んだものになります。従って、正確な測定を実現するためには、フィクスチャによる誤差をできるだけ小さくするように注意深くフィクスチャを設計・製作する必要があります。しかしながら、フィクスチャがある程度の物理的な長さを持つことは避けられませんし、同軸から非同軸への変換により無視できない大きさの誤差が生じる場合が多々あります。従って、同軸コネクタを持たない部品を正確に測定するためには、フィクスチャによる追加誤差を何らかの方法で取り除く必要があります。

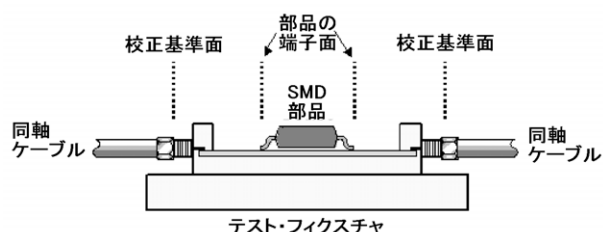


図2 テスト・フィクスチャと校正基準面

最も単純な方法は、フィクスチャに接続される同軸ケーブルの先端で校正を行い、フィクスチャを50 Ω系の理想的な伝送線と仮定して、ポート延長を行うことにより、校正基準面を部品の端子面まで移動する方法です。この仮定が受け入れられない場合はネットワーク除去機能を使用することが推奨されます。フィクスチャ・シミュレータは、ユーザが各測定ポート毎に指定したフィクスチャのSパラメータ・モデルを用いて、ネットワークの除去を行いリアルタイムで変換後の測定結果を表示します。フィクスチャの誤差モデルは2ポートのSパラメータ Touchstone ファイル (.s2p) を用いて指定します。図3はSAWフィルタの伝送測定 (S_{21}) におけるフィクスチャによる悪影響をネットワーク除去機能によって取り除いた例です。フィクスチャの影響によって通過帯域での挿入損失がかなり大きくなっていることが分かります。この例では、フィクスチャは無損失の伝送線路に直列インダクタンスとシャント・キャパシタンスが付加されたものとしてモデル化されています。

テスト・フィクスチャのモデリングを含むネットワーク除去に関する詳細情報については参考文献1) アジレント・アプリケーション・ノート1364-1参照

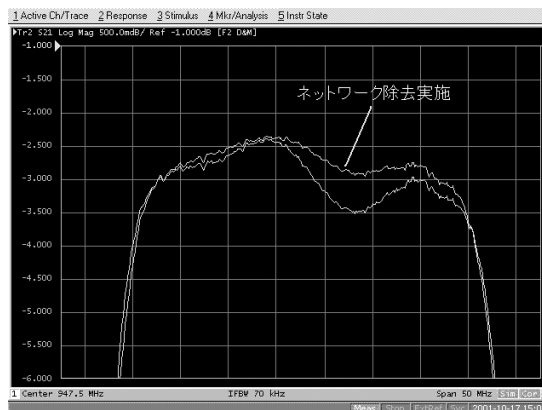


図3 SAWフィルタ測定におけるネットワーク除去の効果

50 Ω系以外の部品の評価： ポート・インピーダンス変換

ネットワーク・アナライザのポート・インピーダンス(通常は50 Ω)以外の特性インピーダンスを持った部品を評価する場合は、アナライザのポート・インピーダンスを変換する必要があります。理論的には、適当なトランスを付加することによって、ポート・インピーダンスを任意の正の値に設定することが出来ますが、この方法にはいくつかの大きな問題があります。理想的なトランスは存在しないので、トランスを付加することにより必ず測定誤差を生じますが、50 Ω系以外のトレーサブルな校正用標準器がないため、この誤差を効果的に取り除くことは出来ません。しかもRFのトランスは一般に帯域の制限があります。さらに、部品のインピーダンスに応じて適当なトランスを用意することは大変手間がかかります。

それに対してフィクスチャ・シミュレータを用いて計算によりインピーダンスを変換する方法は効率的で現実的です。この方法は理想的なトランスを測定ポートに付加することと等価なので実際にトランスを使う場合の問題を解決します。特性インピーダンスは任意の正の値に簡単に設定できますので、複数のトランスを用意する手間が省けます。

平衡部品の評価： 平衡・不平衡変換

平衡部品は差動とコモン・モードの2つの動作モードがあります。従って平衡部品を完全に評価するためにはこれら2つの動作モードの両方について測定する必要があります。図4に示されるようなハイブリッド・トランスを使用することにより一般的な(不平衡の)ネットワーク・アナライザで平衡部品の差動及びコモン特性を評価できます。実際にこの方法を用いた場合、ハイブリッド・トランスによる測定誤差が避けられません。現在平衡の校正標準は存在しませんし、平衡の校正方法は確立されていないので、この誤差を効果的に取り除くことは出来ません。

また、差動の信号のみを不平衡に変換して伝送するバランが、その容易さから、より広く使用されていますが、明らかにこの方法ではコモン特性を評価できません。バランの不完全さが測定誤差を生じますし、バランの差動入力で反射されたコモン信号がさらに測定を不正確にします。

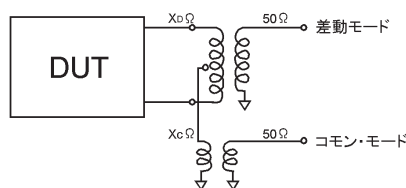


図4 平衡測定用ハイブリッド・トランス

フィクスチャ・シミュレータは計算によって不平衡の測定データを平衡のデータに変換することにより、正確な測定を実現します。これは理想的なハイブリッド・トランスを付加することと等価です。ENAシリーズでは、この分野で既に業界標準となっているAgilent N444X 平衡測定システムと同一のアルゴリズムを用いて変換を行っています。ソフトウェアによる変換はハードウェアによる変換と比べて正確だけでなく、差動とコモン・モードの特性インピーダンスを独立に任意の値に設定できるという利点もあります。(フィクスチャ・シミュレータにおいて特性インピーダンスは正の実数で設定されます。)

ENAシリーズのフィクスチャ・シミュレータはAgilent N444X システムに倣ってミックス・モード Sパラメータによって平衡部品の特性を表します。ミックス・モード Sパラメータは入射信号と反射信号の比によって定義されるという点においては、通常の(不平衡の)Sパラメータと同じです。ミックス・モード Sパラメータにおいては信号が差動及びコモンのモード毎に取り扱われるという点が大きく異なります。図5は2ポートの平衡部品に対応するミックス・モード Sパラメータを行列形式で表したものです。ミックス・モード Sパラメータは一つの部品に平衡ポートと不平衡ポートが混在している場合も同様に適用できます。図6は平衡ポートと不平衡ポートをそれぞれ1つ持つ部品に対応するミックス・モード Sパラメータの例です。

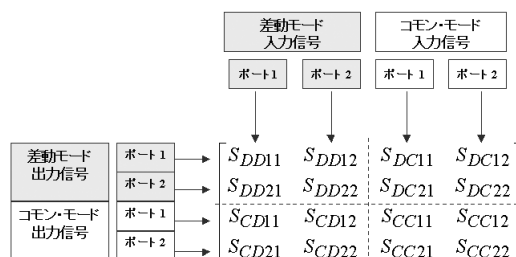


図5 平衡2端子部品に対応するミックス・モード Sパラメータ

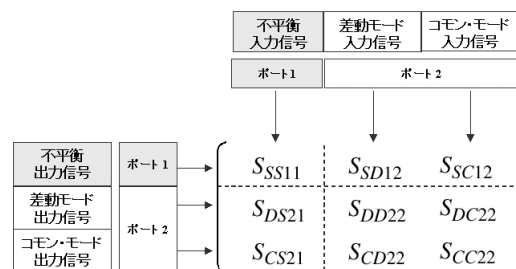


図6 平衡・不平衡部品に対応するミックス・モード Sパラメータ

図7は不平衡-平衡型のSAWフィルタを通常のSパラメータで評価した測定例です。同じフィルタをミックス・モードSパラメータで評価した結果が図8です。ミックス・モードSパラメータを用いると不平衡のポート・マッチングは S_{SS11} で、また平衡ポートの差動マッチングは S_{DD22} で表されます。また S_{DS21} は本来の伝送特性、即ち不平衡入力から差動出力への伝送特性を表しています。これに対して S_{CS21} を見ることにより、EMIの原因となるコモン・モード信号の発生具合がわかります。このように、ミックス・モードSパラメータは平衡部品のふるまいを理解する上で大変有効です。一方、通常のSパラメータから平衡フィルタの動作を推測することは非常に困難です。例えば、このSAWフィルタは S_{DS21} を見るとわかるように、阻止域で約60 dBの減衰量を持ちますが、通常の伝送Sパラメータ(S_{21} 及び S_{31})における減衰量は40 dBしかありません。

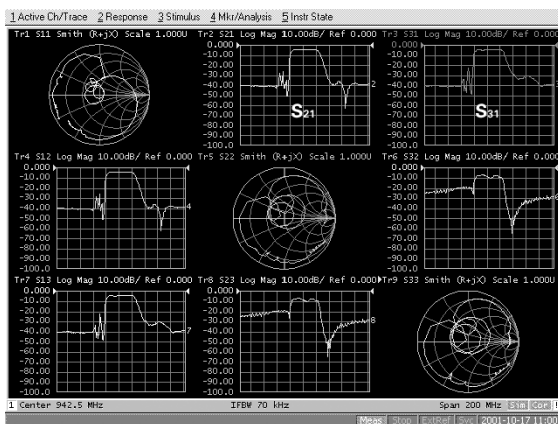


図7 通常のSパラメータによるSAWフィルタ測定結果

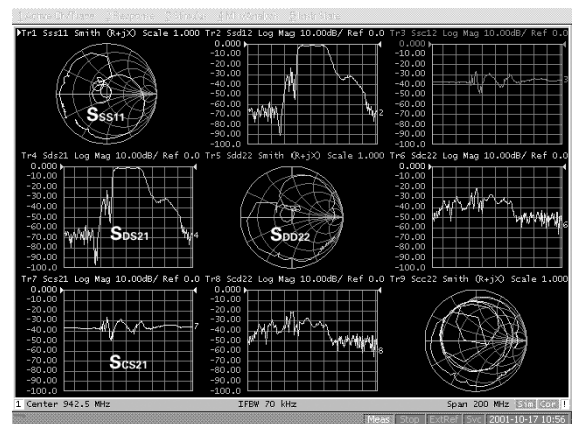


図8 ミックス・モードSパラメータによるSAWフィルタ測定結果

参考文献2、3) アジレント・アプリケーション・ノート1373-2A及び2Bにミックス・モードSパラメータの解釈の方法が説明されています。参考文献4 (Bockelman他)にはミックス・モードSパラメータの論理の詳細が記述されています。

ENAシリーズはフィクスチャ・シミュレータ以外にも平衡測定に役立つ機能を2つ持っています。全ての内蔵ポートを同時に測定するレシーバ・アーキテクチャと4ポートまでのフルNポート校正機能も平衡測定の効率化に役立ちます。平衡部品は少なくとも3ポート以上のポートを持ち(不平衡のポートとして数えた場合)、一般に全ての経路を測定する必要があります。ENAシリーズは全ての内蔵ポートを同時に測定できるため、平衡部品のような多ポート部品を測定する際の掃引回数を大幅に減らすことができ、効率的な測定を実現します。例えば4ポート部品を評価する場合、4ポートのENAシリーズであれば4回の掃引で全ての経路を測定できますが、従来の(2ポートしか同時に測定できない)アナライザの場合12回もの掃引を必要とします。フル4ポート校正は平衡部品をマルチポート・ネットワーク・アナライザで評価したときの高い測定確度を実現します。その結果ENAシリーズではいままでにない高速かつ高確度の平衡部品測定を実現しています。

外部回路が付加された場合の 特性評価：

マッチング回路付加

RF部品は通常他の部品と組み合わせられてより大きな回路を構成するために使用されます。そのためインピーダンス・マッチング回路などの外部回路を付加した時の回路特性の評価がしばしば必要とされます。フィクスチャ・シミュレータはSパラメータ測定データを計算により変換して、ユーザが定義した回路が付加された場合の特性をシミュレートします。この機能を使うことにより、実際に回路を付加して評価する場合と比べて、大幅にテスト時間を削減できます。また、付加回路の特性のバラツキによる影響がなくなるため一貫性のある測定が行えます。回路付加機能は以下に説明するように不平衡測定・平衡測定のどちらに対しても有効です。

不平衡測定においては、予めフィクスチャ・シミュレータ内に用意されているマッチング回路の回路定数を決めるだけで簡単に付加回路が定義できます。図9は用意されているマッチング回路の一覧です。より複雑な回路を付加する場合Touchstone形式の2ポート Sパラメータ (.s2p) を用いて付加回路を定義できます。

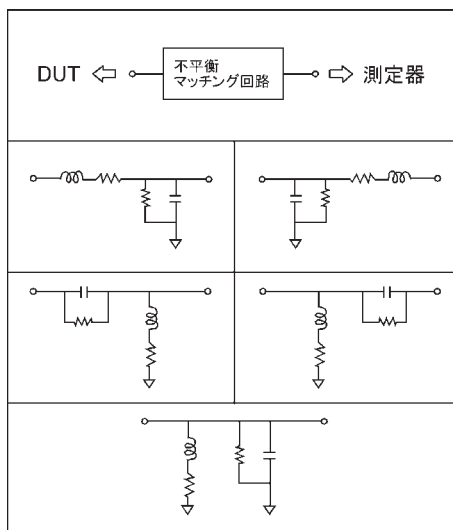


図9 不平衡マッチング回路モデル

平衡測定においては、図10に示されるように上記不平衡ポート毎の付加回路に加えて差動(平衡)ポート間に回路を付加することができます。付加回路は回路の定数を定めることで定義できます。また、Touchstone形式の2ポート Sパラメータ (.s2p) を使うことも可能です。

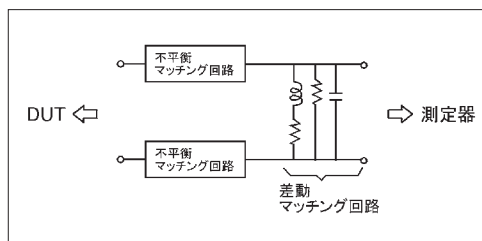


図10 差動マッチング回路モデル

図11はマッチング回路付加機能の効果の一例で、平衡-不平衡型のSAWフィルタの通過帯域における差動ポート特性(S_{DD11})を評価したものです。このフィルタは56 nHを差動ポート間に付加して使用するよう設計されていますが、フィクスタチャ・シミュレータを用いて指定の回路を付加することによってポート・マッチングが改善されていることがわかります。

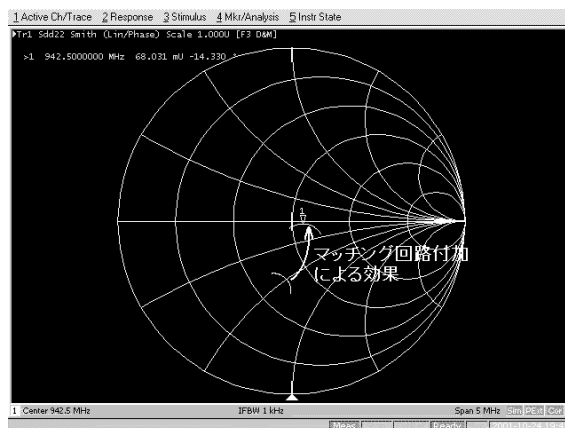


図11 マッチング回路付加による効果

まとめ

ENAシリーズ ネットワーク・アナライザに内蔵されているフィクスチャ・シミュレータは、Sパラメータ測定データの後処理をするための非常に強力かつ使い易いツールです。フィクスチャ・シミュレータは通常外部コンピュータを必要とするような複雑なデータ処理を測定器内部で実現します。この方法には従来の外部コンピュータを使う場合と比べて2つの大きな利点があります。まず、データの処理が全て測定器の内部で実行されるので処理時間が格段に短縮されます。次に、シミュレータがネットワーク・アナライザの機能の一部として共通のユーザ・インタフェースを用いて組み込まれているため、高い操作性が実現されています。

製造ラインにおいてはフィクスチャ・シミュレータはENAシリーズの高速測定とあいまって、従来の測定器では測定時間の制限から実現できなかったようなテストを可能にします。例えば、ミックス・モードSパラメータを用いたテストは時間がかかり過ぎるために製造ラインでは実施できない場合がしばしばありました。ENAシリーズを用いてより完全なテストを実施することは、歩留まりの向上、ひいては製造コストの削減につながります。開発環境においてはフィクスチャ・シミュレータの高い操作性が開発効率を向上します。RFエンジニアはENAシリーズを使うことによってSパラメータ測定データを元に各種の有用なシミュレーションを通常のSパラメータ測定と同じ感覚で実行できます。

参考文献

- 1) De-embedding and Embedding S-Parameter Network Using a Vector Network Analyzer, Agilent Application Note 1364-1
- 2) Multiport and Balanced Device Measurement Application Note Series – An Introduction to Multiport and Balanced Device Measurements, Agilent Application Note 1373-1
- 3) Multiport and Balanced Device Measurement Application Note Series – Concepts in Balanced Device Measurements, Agilent Application Note 1373-2
- 4) Bockelman, D.R., Eissenstadt, W.R., “*Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters: Theory and Simulation*” IEEE Transactions On Microwave Theory and Techniques, Vol. 43, No. 7, July 1995

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/find/tm

- 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 2006

アジレント・テクノロジー株式会社



Agilent Technologies

May 10, 2006
5988-4923JA
0000-00DEP