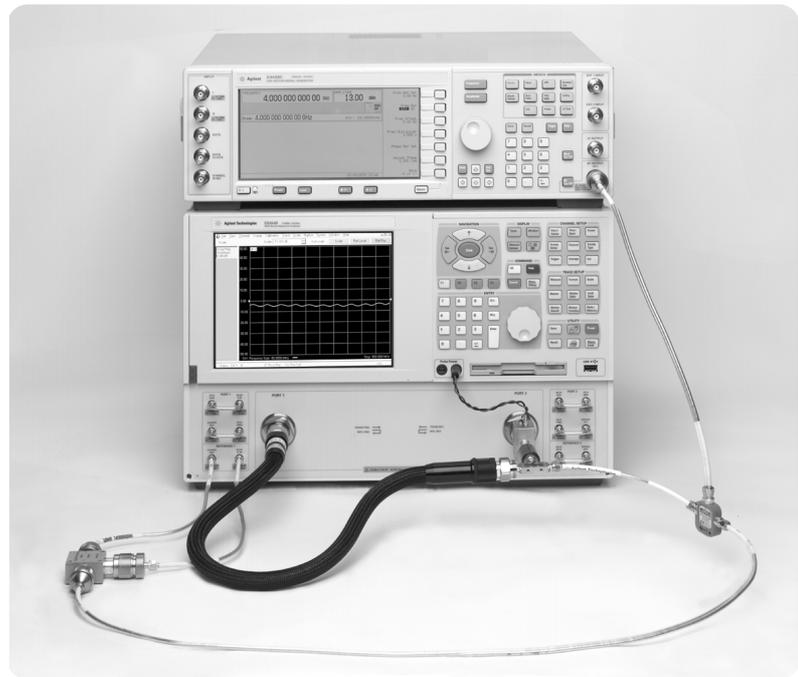


Agilentマイクロ波PNAシリーズ ネットワーク・アナライザ

Application Note 1408-2

ミキサの変換損失や群遅延を測定するための
手法とその比較



Agilent Technologies

目次

| | |
|--|----|
| はじめに..... | 2 |
| 変換損失 | 5 |
| スペクトラム・アナライザ | 5 |
| スカラ・ネットワーク・アナライザ | 8 |
| 周波数オフセット・モードを使用したベクトル・ネットワーク・アナライザ | 10 |
| 周波数オフセット誤差機能を使用したベクトル・ネットワーク・アナライザ | 12 |
| 変換損失のまとめ..... | 13 |
| 群遅延 | 14 |
| ベクトル・ネットワーク・アナライザ：ゴールデン・ミキサ方式..... | 16 |
| ベクトル・ネットワーク・アナライザ：3ミキサ方式..... | 17 |
| 周波数オフセット誤差機能を使用したベクトル・ネットワーク・アナライザ | 19 |
| 群遅延のまとめ..... | 22 |
| 参考資料 | 23 |

はじめに

このアプリケーション・ノートでは、ローパス・フィルタ内蔵コンバータの**変換損失**と**群遅延**を測定するための各種手法と測定器を比較します。

以下を使った**変換損失**の測定：

- スペクトラム・アナライザ
- スカラ・ネットワーク・アナライザ
- ベクトル・ネットワーク・アナライザの周波数オフセット・モード
- ベクトル・ネットワーク・アナライザの周波数オフセット誤差補正機能

以下を使った**群遅延**の測定：

- ベクトル・ネットワーク・アナライザ：ゴールデン・ミキサ方式
 - ベクトル・ネットワーク・アナライザ：3ミキサ方式
 - ベクトル・ネットワーク・アナライザの周波数オフセット誤差補正機能
-

ミキサ関連の専門用語

以下の専門用語が本書を通して用いられています。

- ミキサのポートは、**in (put)**、**out (put)**、**LO**という用語を用います。
- 周波数は、**入力**、**出力**、**LO**という用語を用います。ミキサがアップコンバータとダウンコンバータの両方として用いられている場合の混乱を避けるために、従来のRFやIFという用語は使用されていません。

$$f_{\text{Port}}^{\text{Freq}} = (\text{Port}) \text{に現れる周波数 (Freq)}$$

例：

$$f_{\text{in}}^{\text{LO}} = \text{inポートに現れるLO周波数}$$

$$f_{\text{out}}^{\text{入力}} = \text{outポートに現れる入力周波数}$$

測定セットアップ

各変換損失測定方式では、以下の測定セットアップが用いられます。

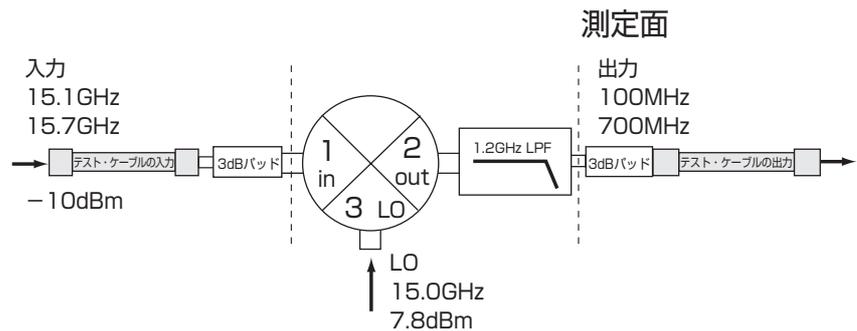


図1. 被試験ミキサのセットアップ例

各測定方式を以下について比較します。

- テスト・セットアップの複雑さ
- 測定確度
- 推奨される実装およびコスト

テスト・セットアップの複雑さ

これには、物理的なセットアップ、校正手法、時間、作業が含まれます。

測定精度

測定精度では、最も精度の高い測定結果を得るために、注意すべき事項について説明します。

エアラインを使用して、測定用の伝送経路に生じる系統誤差を分離します。被試験デバイス (DUT) 単独での変換損失または群遅延測定を、DUTとエアラインの測定と比較します。図2のように、測定セットアップにエアラインを追加します。これにより、反射された誤差信号と実際の測定信号との間の位相関係に影響が及び、異なる結果が生じることになります。理想的な環境では、唯一の変化はエアラインによる損失です。各方式の測定の差を比較することにより、各方式で生じる系統誤差に起因するリップルのレベルを推測することができます。

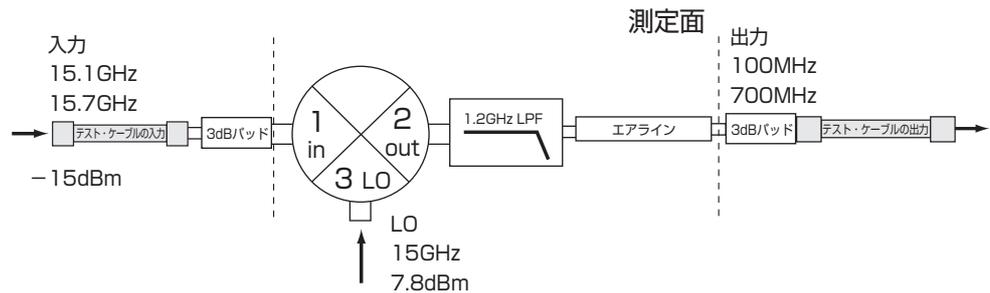


図2. エアラインを追加した被試験ミキサのセットアップ例

推奨される実装およびコスト

さまざまなメーカーのさまざまな測定器があるため、簡単な分類によってコストを一般化することは困難です。この最後のセクションは、他の方法と比較した相対的な価格を確認することが目的で、必要な追加測定器、オペレータのトレーニング、テスト用アクセサリ、追加オプションなどのコストも確認することができます。

変換損失

変換損失は、周波数コンバータの伝送性能を定量化するのに用いられる極めて重要な測定です。

$$\text{a) 変換損失}_{\text{dB}} = 10 \log \frac{|f_{\text{in}}^{\text{入力}}|_{\text{mW}}}{|f_{\text{out}}^{\text{出力}}|_{\text{mW}}}$$

$$\text{b) 変換損失}_{\text{dB}} = |f_{\text{in}}^{\text{入力}}|_{\text{dBm}} - |f_{\text{out}}^{\text{出力}}|_{\text{dBm}}$$

図3. a) リニア・パワーとb) 対数パワーの変換損失の計算式。変換損失は常に正の数で表されます。

リニア (mW) と対数 (dB) のいずれかで表されるかに関わらず、変換損失は入力パワー f_{in} と出力パワー f_{out} の比です。ただし、コンバータの入力周波数はコンバータの出力周波数と異なるため、測定がかなり大変です。変換損失は、局部発振器 (LO) のパワー・レベルに大きく依存します。

変換損失

スペクトラム・アナライザ

変換損失を測定するための一般的な手法は、スペクトラム・アナライザを用いる方法です。標準的なスペクトラム・アナライザを使用すれば、絶対パワーを複数の周波数で同時に測定することができます。これは、周波数やパワー・レベルが未知の信号を測定する場合に最適です。

テスト・セットアップの複雑さ

スペクトラム・アナライザのセットアップや使用は非常に簡単です。コンバータの出力を、アナライザの入力に接続します。ミキサのすべての出力信号が即座に表示されます。これらの信号には、和と差の両方のミキシング成分、入力信号、LO信号、すべてのスプリアス・ミキシング成分が含まれます。

この測定は、15分程でセットアップできます。入力信号用の外部信号源とLO信号用の別の信号源が必要です。単一の入力周波数、または特定の帯域幅にわたって掃引して、測定を行うことができます。

測定には、少なくとも次の2通りの方法があります。

- 最も簡単な方法は、入力信号源の待ち時間を増やして1回のスペクトラム・アナライザの掃引より長くなるようにして、ほとんどのスペクトラム・アナライザが備えている最大値ホールド機能を使用する方法です。図4は、Agilent PSAシリーズ・スペクトラム・アナライザを使った絶対パワー測定の結果を示したものです。この測定の場合、ポイント当たり50msの待ち時間が用いられていたため、1回の掃引を完了するのに約23秒を要しています。
- もう1つの方法は、信号源とスペクトラム・アナライザをリモートから(ユーザ記述のプログラムによって)制御する方法です。プログラムによって、信号源とスペクトラム・アナライザのCW周波数を設定し、信号源にトリガをかけ、正しい周波数でパワー測定を実行します。データは、そのポイントだけで測定され、周波数をインクリメントして、次のデータを測定していきます。保存されたデータは、後でプリントしたり、プロットすることができます。LOが内蔵されたコンバータは、特別な考慮をしなくても、この方法を用いてテストすることができます。



図4. 図1に示されているセットアップを使用したミキサの出力パワー測定

スペクトラム・アナライザは、変換損失ではなく、パワーを測定するため、変換損失は外部で計算する必要があります。図3の式を用いるには、コンバータへの入力パワーを基準として測定する必要があります。最良の方法は、**テスト・ケーブルの入力**をスペクトラム・アナライザの入力に直接接続し、その応答を保存し、測定応答から変換損失を取り除くことです。

よくやる間違いは、**テスト・ケーブルの入力**と**テスト・ケーブルの出力**をスルー接続してしまうことです。このような接続をすると、出力テスト・ケーブルの応答分まで入力パワーから削除されてしまいます。なお、出力パワーは出力テスト・ケーブルの影響で小さくなっています。ケーブルの損失を確実に取り除くには、ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)を使って、**出力テスト・ケーブルの挿入損失**を評価する必要があります。図5は、一般的な変換損失の式に、この補正係数を追加したものです。ケーブルの挿入損失が負であるため、変換損失に加算する必要があります。ことに注意してください。

$$\text{変換損失}_{\text{dB}} = [|f_{\text{in}}^{\text{入力}}|_{\text{dBm}} - |f_{\text{out}}^{\text{出力}}|_{\text{dBm}}] + S_{21}^{\text{出力}} \text{校正出力}$$

図5. スペクトラム・アナライザの変換損失の補正係数

この補正した変換損失計算式を使用すれば、スプレッドシートを使って、応答を計算することができます。なお、データの保存、インポート、測定データの計算には、かなりの時間とリソースが必要です。

測定精度

テスト・ケーブルの影響に加えて、ミキサとテスト・システムの不整合により、測定に振幅/位相リップルが生じます。前述のエアライン方式を使用すれば、同じ測定器で行われた2つの変換損失測定の差を確認できます。図6では、こうした不整合誤差に起因する1.5dBを超えるリップルがSAのトレースに見られます。さらに、SAの絶対振幅精度は±0.62dBと仕様化されています(<3GHzの測定の場合)。このため、全体の不確かさは、 $1.5+0.62=2.12\text{dB}$ となります。

このように不整合誤差が大きい場合には、アッテネータを使って、テスト・システムの各種コンポーネント間の不整合誤差を減らします。

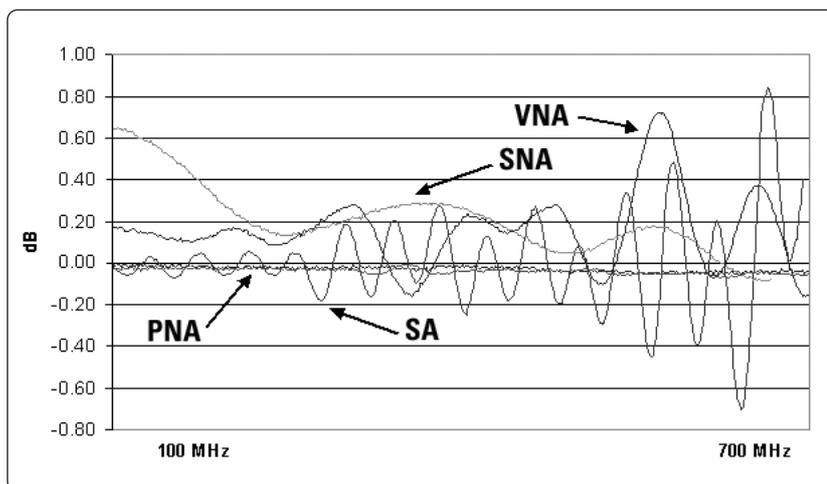


図6. 変換損失のエアライン・デルタの測定器間の比較

推奨される実装およびコスト

スペクトラム・アナライザ以外にも、外部信号源が1台か2台必要です。さらに、ケーブル、アッテネータ、フィルタなどのテスト用アクセサリも必要です。より精度の高い結果を得るためには、VNAを使ってケーブルの損失を測定し、外部PCを使って補正データを計算する必要があります。

このソリューションの実質的なコストは、データを収集し補正係数を適用するためのプログラミングや自動化に隠されている場合があります。セットアップは簡単ですが、ノーマライゼーションは時間のかかる退屈な作業であり、オペレータを十分にトレーニングする必要があります。

スカラ・ネットワーク・アナライザ

ネットワーク・アナライザは、既知のテスト信号をデバイスに印加して、その応答を測定します。ネットワーク・アナライザは、通常、結果をSパラメータ、すなわち出力(応答)と入力(テスト信号)の比(dB単位)で表示します。しかし、コンバータの入力周波数と出力周波数が異なるため、Sパラメータは意味がありません。そのため、“C”で表される新しい伝送パラメータが用いられます。Cパラメータは、Sパラメータと同じ入力/出力ポートの表記に使用されますが、周波数変換が行われたことを表しています。

Agilent 8757Dなどのスカラ・ネットワーク・アナライザ(SNA)は、外部広帯域検波器と信号分離器によって構成されています。スカラ・ネットワーク・アナライザは複素数パラメータを測定することができないので、信号の振幅だけが測定されます。変換損失の測定にはそれで十分です。

テスト・セットアップの複雑さ

SNAの初期設定は難しいかもしれません。セットアップには、外部テスト・セット・コンポーネントと複数の信号源が必要です。信号源の1つは、入力信号の周波数掃引に使用します。また、信号源とアナライザをコントロールできるようにしておく必要があります。SNAは、入力信号にトリガをかけて掃引を開始し、測定結果を検出して表示します。最新のSNAの中には信号源とテスト・セットが一体化されているものもあり、セットアップが簡単です。

8757Dなどの旧型のアナライザの問題の1つは、測定データの保存です。簡単なエクスポート機能を備えていないので、GPIBコマンドを使ってデータを直接抽出するか、プリンタにデータを出力します。

被試験ミキサのセットアップには、一般に、不整合誤差を減らすための入力と出力ポートのアッテネータ、2つの主要ミキシング成分を分離するためのミキサ出力のフィルタが含まれています。このフィルタはノーマライゼーション・プロセスを複雑にしますが、このフィルタがないと、広帯域検波器はミキサの出力における全パワーの合計を測定してしまいます。これには、 $|f_{out}^-| + |f_{out}^+| + |f_{in}^+| + |f_{out}^L|$ + その他の高次ミキシング成分が含まれています。

正確に測定するために、検波器の内部パワー校正を行います。また、基準検波器に対するテスト・ケーブルの入力損失の影響を取り除くために、RF入力に対してノーマライゼーションを行います。

例えば、600MHz帯域幅では、基準検波器と測定検波器の校正に4分かかります。

$$C_{21} = [|f_{out}^{出力}|_{dBm} - |f_{in}^{入力}|_{dBm}] + S_{21}^{出力}$$

校正出力+IFフィルタ

図7. スカラ・ネットワーク・アナライザの変換損失の補正係数

前述のノーマライゼーションの問題を解決するために、「ゴールデン・ミキサ」方式が用いられます。これは、製造段階での量産ボード・テストで用いられる手っ取り早い方法です。ゴールデン・ミキサは、被試験ミキサと同じミキサで、優れた性能を備えた標準ミキサです。被試験ミキサは、ゴールデン・ミキサに対して評価／比較されます。ケーブル、ファイバ、アッテネータ、レシーバ、経路内のそれ以外の応答は、ゴールデン・ミキサの場合も被試験ミキサの場合も同じになるようにセットアップし、唯一の違いがミキサだけになるようにします。測定結果がゴールデン・ミキサで測定した値と比較して許容範囲内であれば、許容可能な性能と判定されます。この方式では、外部計算が一切不要です。

この方式には次の2つの制約があります。

1. ゴールデン・ミキサの応答を選択することが難しい。
2. ゴールデン・ミキサに依存しないテスト・デバイスの個々の仕様を決定することが難しい。

システム設計においては、多くの要因が全体の性能に影響を与えます。ゴールデン・ミキサに依存しない仕様が設定されていれば、トラブルシューティングが容易になります。

測定確度

スペクトラム・アナライザの場合と同じように、図1と2に示されているエアラインを使用して、系統誤差を分離します。3dBアッテネータを追加しても、図6のSNAトレースの測定結果に0.6dBの振幅リップルが現れます。検波器をDCモードで使用した場合の振幅確度では、測定の不確かさに約0.5dBが追加されます。

推奨される実装およびコスト

ベクトル・ネットワーク・アナライザよりも経済的なので、多くの場合は、スカラ・ネットワーク・アナライザが使用されます。全コストには、1台または2台の外部信号源、検波器、ブリッジ、テスト用アクセサリも含まれます。自動化することにより、ユーザのトレーニング時間を短縮することができますが、外部PCが必要です。ゴールデン・ミキサ方式を用いれば、補正計算が不要になります。

SNAがその他の例と違う点の1つは、SNAの測定速度です。600MHz帯域幅の測定が、1回の掃引当たり92msで行われています。

SNAが最適なアプリケーションは、そのスピードから、高い確度を必要としない製造段階でのテストです。

周波数オフセット・モードを使用した ベクトル・ネットワーク・アナライザ

ミキサのテストのより汎用性の高いソリューションは、ベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) です。VNAには同調レシーバが用いられているため、振幅と位相の両方の測定が可能です。通常、VNAは、テスト信号と同じ周波数にレシーバを同調させ、レシーバのIFバンドパス・フィルタの通過帯域で測定ノイズを除去します。この方式では、VNAはSNAより極めて高いダイナミック・レンジを実現できます。

周波数オフセット機能 (多くの最新VNAに搭載されているオプション) を用いれば、測定レシーバを信号源の信号と関係なく、一定のオフセットで、測定レシーバを同調させることができます。

テスト・セットアップの複雑さ

VNAの内蔵テスト・セットにより、ミキサのテスト・セットアップは、一般に、SNAより簡単です。VNAを周波数オフセット・モードで使用する場合の基本セットアップとして、以下の2通りがあります。

1. 同調レシーバは、絶対パワー測定を行います。スペクトラム・アナライザと同様に、パワー対周波数を表示することができます。入力周波数の基準信号と出力周波数の出力信号の比も表示できます。
2. 基準ミキサと呼ばれる2番目のミキサを、VNAの基準信号経路内に配置します。可能であれば、内部基準信号経路へのアクセスを可能にする外部ジャンパによってこれを行います。これにより、被試験ミキサと同じLO信号源を共有して、基準信号を被試験ミキサと同じ出力周波数に同調して変換することができます。これは複雑な相対位相測定に適しています。これについては、群遅延のセクションで詳細に説明します。

不整合反射を最小限に抑えるために、3dBアッテネータを使用します。また、必要なミキシング成分を分離するために、出力にIFフィルタを使用します。レシーバは必要な周波数に同調されますが、他のミキシング成分が極めて大きくなり、それらの反射がミキサ内で再変換され、さらに誤差が生じる可能性があります。

VNAには入力用の信号源が内蔵されていますが、外部LO信号源が必要であることには変わりはありません。これらの2つの測定器の10MHzタイムベースを同時にロックして、発振器のドリフトを防ぎます。

絶対パワー測定が行われるので、パワー・メータを使って、信号源とレシーバを校正する必要があります。ほとんどのVNAでは、これは、最初に信号源出力をレベリングすることによって実現されます。これは、テスト・ケーブルの入力端で行われます。テスト・ケーブルの入力はテスト・ケーブルの出力に接続され、レシーバは出力端で校正されます。次に、テスト・ケーブルの入力端で信号源出力がレベリングされます。これによって測定面がテスト・ケーブルの終端に移動するので、個別のケーブル特性テストや補正係数が不要になります。これは、これまでの方法に比べて大幅な時間の節約が可能です。

周波数オフセット・モードを内蔵したベクトル・ネットワーク・アナライザは、容易さの程度には差がありますが、このプロセスを実行できます。アナライザの中には、このプロセスを順次説明するものもあれば、特定の手順に従わなければならないものもあります。校正に要する5分を含め、この測定のセットアップには約25分かかります。レベリング自体にかかった時間は401ポイントの場合で45秒でした。

最新のVNAの場合は、通常、テストする入力、LO、出力の周波数レンジを図示するグラフィック・ユーザ画面を使用できます。また、多くの場合、VNAは外部信号源を制御することができます。

測定精度

同ジエアライン方式を用いて、誤差信号を比較します。アッテネータとフィルタを使用することにより、誤差による影響を減らすことができますが、図6のVNAトレースからも分かるように、残りの誤差レベルは依然として0.7dBを上回っています。スペクトラム・アナライザと比べて若干の改善が見られますが、スカラ・ネットワーク・アナライザとは大きな差はありません。パワー・メータとセンサの絶対精度は、校正後にVNAに転送されます。VNAの仕様精度は $\pm 0.04\text{dB}$ です。

推奨される実装およびコスト

低価格VNAの価格は年々安くなっていますが、周波数オフセット・モードを備えた狭帯域VNAは、より投資価値があります。なぜなら、安価なVNAでは、位相コヒーレント基準を作成し、信号源やレシーバをオフセットするために別のハードウェアが必要になるからです。必要なテスト用アクセサリはSNAと類似しています。VNAは測定のより多くの部分を制御し、測定後に補正を行う必要がないため、セットアップはSNAよりも簡単です。ほとんどのインタフェースは非常に直観的です。VNAの主な利点は、スペクトラム・アナライザより速い速度と、SNAより広いダイナミック・レンジです。また、ベクトル誤差補正により、Sパラメータやアイソレーションなどの変換損失測定以外の精度も向上します。

周波数オフセット誤差機能を使用した ベクトル・ネットワーク・アナライザ

一般に、VNAがSNAより優れている点は、位相測定機能です。位相測定から、群遅延などのパラメータを計算できます。位相を測定すれば、ベクトル誤差補正が可能になるというメリットもあります。校正プロセスを通して、I/Q誤差信号を測定し、測定から数学的に除去できます。これは、確度の高い測定を実現するためには欠かせない重要な利点の1つです。ただし、測定される誤差信号の周波数がアナライザの入力ポートと出力ポートで異なるため、周波数オフセット測定に直接使用することはできません。従来のVNAでは、ベクトル誤差補正手法を異なる周波数に適用することはできませんでした。マイクロ波PNAシリーズ・ネットワーク・アナライザは、こうした従来の適用限界を、別の誤差モデルを実装することによって克服しています。この誤差モデルについては [1] Agilent Application Note 1408-1で詳しく説明しています。このモデルにより、マイクロ波PNAによる周波数オフセット・デバイス測定にベクトル誤差補正手法を適用することができます。

テスト・セットアップの複雑さ

テスト・セットアップは、一般的な周波数オフセットVNAと同じです。ベクトル誤差補正により、これまでのセットアップに用いられているアッテネータが不要になり、システムの有効パワーと全体のダイナミック・レンジが向上します。ミキサの出力には、やはりフィルタが必要です。PNAには、ガイド付きスカラ・ミキサ校正はもちろん、周波数オフセット測定のセットアップを管理するための周波数コンバータ・アプリケーションが内蔵されています。この2段階の校正は、整合補正パワー校正と従来の2ポート校正を組み合わせたものです。測定セットアップは、単一のグラフィック画面から簡単に行えます。もう1つの利点は、ミキサ構成や機器ステートの保存機能です。これにより、繰り返し測定が簡単に行えます。

校正では、PNAがユーザに対して、 C_{21} 変換損失測定に周波数オフセット誤差補正を適用するのに必要な測定をすべて行えるようにガイドします。さらに、この校正は、標準的な S_{11} および S_{22} 反射測定に対しても有効です。整合パワー・メータとAgilent ECalを使った2ポート校正を完了するのに3分しかかかりませんでした。15分足らずで、校正を含めた測定をセットアップし、実行することができます。

周波数オフセット誤差補正を適用した変換損失測定は直接表示されるので、外部計算は不要です。1.5sの掃引時間は、3つのネットワーク・アナライザの中で最も遅いものですが、スペクトラム・アナライザよりもはるかに高速です。順方向/逆方向(ポート2の信号源のテスト信号)掃引を必要とする2ポート校正と同様に、スカラ・ミキサ校正には3回の掃引が必要です。入力周波数で2回の順方向掃引、出力周波数で1回の逆方向掃引です。

測定確度

スカラ・ミキサ校正は、変換損失測定に適した高度な校正手法です。図6を見ると、PNAトレースにはエアラインの損失しか示されていません。2つの測定は、PNAを使って行われました。一方はアッテネータを使用しましたが、もう一方はアッテネータを使用しませんでした。測定結果には顕著な違いはありません。他のすべての測定の振幅リップルが除去されるので、被試験ミキサの実際の性能をかなり正確に示しています。パワー・メータとセンサの絶対確度は、校正後にPNAに転送されます。PNAの仕様確度は $\pm 0.04\text{dB}$ です。

推奨される実装およびコスト

PNAソリューションの初期機器コストは、校正機能、ハードウェア機能、アプリケーション機能が高度なので、標準的な周波数オフセットVNAソリューションより多くかかります。コストの削減は、トレーニングに必要な時間、セットアップ時間、必要なテスト用アクセサリを減らすことで実現できます。

PNAソリューションの最適なアプリケーションは、 $1/10\text{dB}$ 程度のリップル確度が必要な高性能ミキサやコンバータのテストです。スカラ・ミキサ校正では、リニア測定と変換損失ミキサ測定のどちらか最適な方を選択して、すばやく切替えられます。

変換損失のまとめ

4種類の変換損失測定手法を比較した結果、以下の原則が明らかになりました。

- スペクトラム・アナライザが最もセットアップが簡単ですが、ケーブルの影響を取り除くためのノーマライゼーションに多くの時間と工数が必要になります。
 - ネットワーク・アナライザは、高速測定を実行できるだけでなく、すべてのケーブル損失を完全にノーマライゼーションすることができます。変換損失は、測定器に直接表示されます。
 - スペクトラム・アナライザには、高調波や未知のスプリアスを測定できるという利点があります。
 - ベクトル・ネットワーク・アナライザは、Sパラメータ測定を行うことができます。
 - 系統的な不整合誤差は、すべてのソリューションに存在します。こうした誤差信号が実際の応答に追加され、最高 1.6dB p-p の振幅リップルが生じました。マイクロ波PNAだけが、ベクトル誤差補正手法の確度を周波数オフセット測定にまで適用でき、 0.05dB の確度が実現されています。
-

群遅延

群遅延は、信号がデバイスを通るのにかかる時間の指標です。古典的には、図8に示されているように、位相を周波数で微分したものに-1符号を付けたものです。群遅延測定の結果は、アパーチャ、アベレージング、IF帯域幅などの多数の測定要因によって異なります。群遅延測定からは位相対周波数の導関数を求めることはできません。これは、ネットワーク・アナライザを使って行われる測定は離散的であり、周波数ポイント当たりの位相ポイントが1つなので、導関数を求めることのできる連続関数でないためです。その代わりに、位相の傾きが計算されます。必要な周波数の両側の2つの周波数ポイントの値が選択され、対応する位相の傾きが計算されます。傾きが計算される周波数ポイントの数がアパーチャです。デフォルトのアパーチャは、任意の2つの周波数ポイント間の最小差です。アパーチャは、Agilentのネットワーク・アナライザに備わっている「スムージング・アパーチャ」機能を使って調整することができます。群遅延測定の場合は、スムージング・アパーチャを必ず指定する必要があります。

$$\text{群遅延 } (t) = \frac{-d\phi}{d\omega} = \frac{-1}{360} \times \frac{d\phi}{df}$$

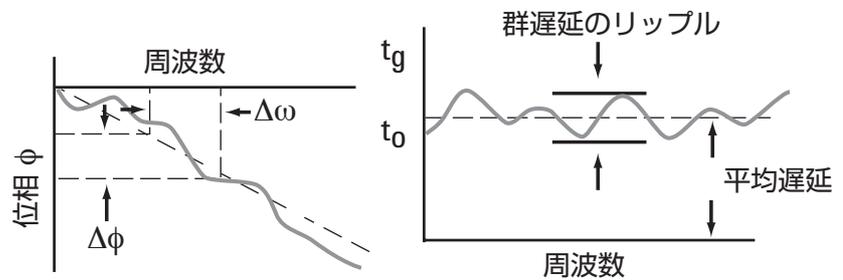


図8. 群遅延

位相は相対測定です。位相測定を行うためには、基準位相信号が必要です。さまざまな周波数における電力比が得られる変換損失と違って、周波数変換デバイスでの位相測定には、同じ周波数基準が必要になります。

位相基準を作成するには、理論上の瞬時ゼロ長(ゼロ遅延)、ゼロ損失の位相シフト信号を作成する必要があります。この理論上の理想を実現することはできないので、実際のミキサを使って近似し、システムへの影響をディエンベディングして、被試験ミキサの応答を分離できるようにする必要があります。

「ゴールデン・ミキサ」方式は、遅延や損失が未知である場合に基準ミキサをディエンベディングするための唯一の方法です。基準ミキサを含めたシステムが、ゴールデン・ミキサの応答にノーマライズされます。この場合、位相偏移はゴールデン・ミキサを基準にした測定であり、群遅延は相対的であると言われます。

絶対群遅延測定を行うには、測定後に数学的にディエンベディングすることのできる既知の遅延や損失を持つ基準ミキサが必要です。

別の方法として、校正ミキサを使ってシステムを校正することにより、基準ミキサの応答を補正する方法があります。

基準ミキサ、ゴールデン・ミキサ、校正ミキサを混同しないでください。これらのミキサは、異なる役割を果たし、異なるセットアップで用いられ、以下のように定義されます。

基準ミキサ (特性評価されていない)：周波数変換された基準信号を作成するために、ネットワーク・アナライザの基準経路に配置されるミキサです。このミキサは、基準経路応答の一部になるため、測定から切り離してノーマライズする必要があります。このミキサの応答は既知である必要はありません。

特性評価済み基準ミキサ：変換損失や群遅延特性が評価済みで、被試験ミキサと直列に配置されるミキサです。被試験ミキサの出力を入力と同じ周波数に変換するのに用いられます。出力が再変換されたら、リニアの比を求めることができます。

ゴールデン・ミキサ：被試験ミキサと同種のミキサで、良好な性能を備えているものです。基準ミキサと併用することにより、テスト・システムをノーマライズし、ゴールデン・ミキサの応答に対して**相対測定**を行います。

校正ミキサ：変換損失、遅延、入力整合、出力整合特性が評価済みのミキサで、特性評価済みのスルー標準器としてテスト・システムの校正に用いられます。

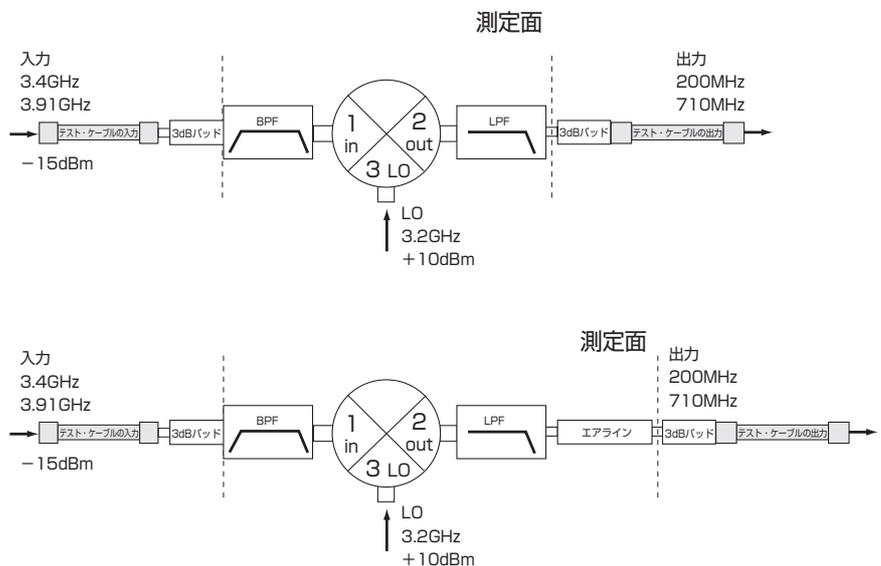


図9. エアライン・デルタを比較するためのコンバータのセットアップ

ベクトル・ネットワーク・アナライザ：3ミキサ方式

3ミキサ方式は、特性評価済み基準ミキサの変換損失／遅延性能の評価に用いることも可能です。この方式は3種類のアップ／ダウンコンバータ測定を組み合わせ、各ミキサの性能を分離します。このアップ／ダウンコンバータ手法では、使用される各ミキサがレシプロカルであること、両方のミキサが整合していることが必要です。

- レシプロカル・ミキサは、ダウンコンバージョン応答と同じアップコンバージョン応答を持っています。レシプロシティについては、[1] Agilent Application Note 1408-1で詳しく説明しています。
- 互いに整合しているミキサは、同じ変換損失応答を持っています。

ミキサは単独で測定することができないので、上記条件はこの方法の重要な要件です。両方のミキサを直列にして測定するので、応答は両方のミキサの関数になります。

この方式の利点の1つは、周波数オフセットVNAが不要なことです。図11からは、最初のミキサの入力が中間周波数にダウンコンバートされていることが分かります。和のミキシング成分がIFフィルタによって除去されます。2つのミキサは共通のLOを共有するため、2つ目のミキサへの入力はアップコンバートされ、最初のミキサの元の入力周波数に戻されます。その後、全変換損失または遅延に関して、標準的な S_{21} 比が求められます。フィルタ効果が取り除かれた後は、応答の半分が各ミキサに起因すると考えられます。3つ目のミキサをセットアップに追加することにより、3種類の組み合わせ(A-B、A-C、B-C)で測定を行うことができます。これにより、整合の要件がなくなり、1つのミキサさえレシプロカルであればよいということになります(これは、この例のBは、ある測定ではアップコンバータとして用いられ、別の測定ではダウンコンバータとして用いられるためです)。3つの測定に対する連立方程式を解いて各ミキサの応答を求めることができます。これらの計算は、手作業で行うか、外部PCのソフトウェア・パッケージを使って行います。さらに、同じノーマライゼーション手法と校正手法を用いて、ケーブルの損失を取り除きます。この特性評価済み基準ミキサの評価が済んだら、このミキサを使って、他の非整合、非レシプロカル・ミキサをアップ／ダウンコンバータ手法を用いて測定することができます。

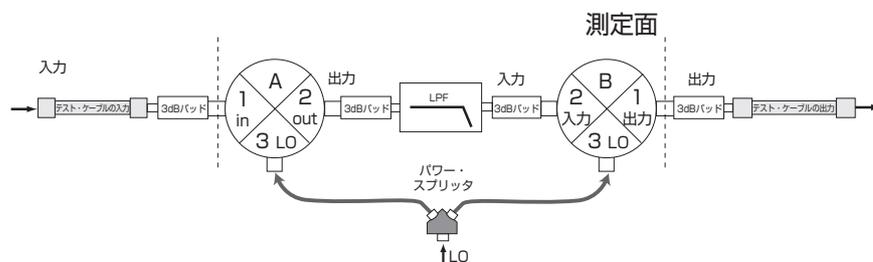


図11. アップ／ダウンコンバージョン手法による2つの直列のミキサの測定

テスト・セットアップの複雑さ

3ミキサ方式の概要からも分かるように、被試験ミキサを測定するシステム内に配置する前に、行わなければならない測定や計算はいくつもあります。ソフトウェア・ガイド付きプログラムを使用した場合、ミキサの特性評価には約30分かかります。特性評価プロセスが済んだら、被試験ミキサを測定経路内に配置するだけで、特性評価済み基準ミキサの応答が除去されます。新しい測定毎に特性評価済み基準ミキサを評価するには、かなりの時間を要します。

測定精度

群遅延測定の系統誤差を減らすことは、変換損失の場合よりもはるかに重要です。アップ/ダウン手法の利点の1つは、アナライザの信号源とレシーバの周波数が同じであるため、従来のベクトル誤差補正を用いることができます(ただし、他の誤差要因は依然として存在しています)。この方式では、被試験ミキサ、IFフィルタ、特性評価済み基準ミキサの間の不整合に起因する追加誤差も生じます。したがって、これらの例ではアッテネータを用いました。これらの誤差信号は測定器のテストセットではなく、セットアップに起因するため、ベクトル誤差補正によって取り除くことはできません。実際に、こうした誤差信号は、基準ミキサの評価中にも現れるため、特性評価の品質を低下させることになります。このため、基準ミキサの正確な性能にさらに誤差が追加されるため、全体の応答から数学的に除去する必要があります。こうした誤差が、与えられた測定でどのように相互作用するかを定量化することは非常に困難です。この場合もやはり、最良の方法は、エアライン・デルタ測定によって、このサンプル測定の誤差寄与を確認することです。図12の3ミキサ方式のトレースから、群遅延差がわかります。

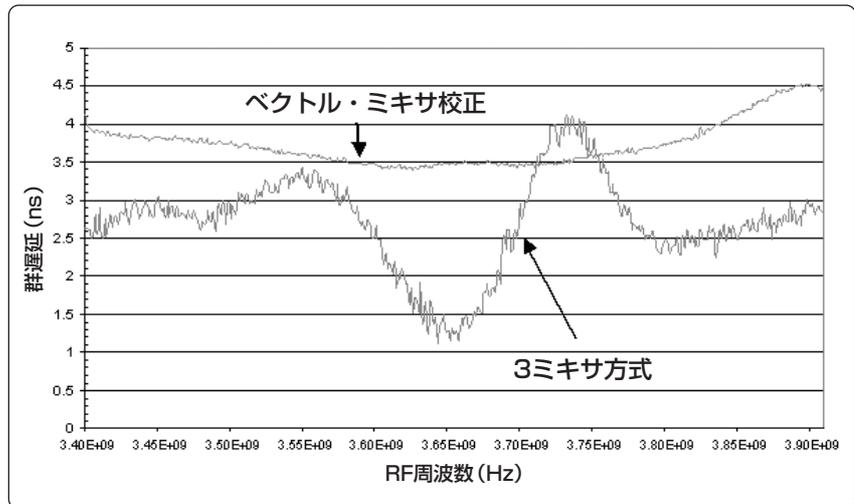


図12. 群遅延手法の測定の比較

推奨される実装およびコスト

3ミキサ方式、すなわちアップ/ダウンコンバータ手法の主な利点は、周波数オフセット機能付きVNAが不要であるということです。特性評価済み基準ミキサを使用した場合には、位相偏移や群遅延の絶対測定を行うことができるので、ゴールデン・ミキサ方式も不要になります。

周波数オフセット誤差機能を使用した ベクトル・ネットワーク・アナライザ

PNAベクトル・ミキサ校正では、アップ/ダウンコンバータ手法で採用されている直列法ではなく、並列法を用いて位相基準が作成されます。ガイド付きベクトル・ミキサ校正は、ミキサを特性評価することから始まりますが、このミキサは特性評価済み基準ミキサではなく、ネットワーク・アナライザの校正プロセスに用いられる校正ミキサです。このプロセスは単一のミキサしか必要ないので、3ミキサ方式よりもセットアップや実行が簡単です。ミキサの入力インピーダンス、出力インピーダンス、変換損失、遅延を完全に特性評価するために、一連の反射測定が行われます。この情報により、このミキサを校正標準器として使用することができます。

テスト・セットアップの複雑さ

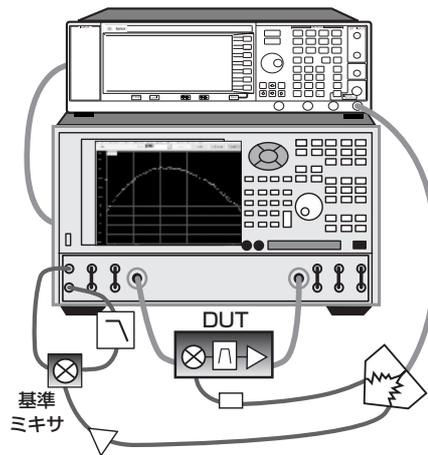


図13. ベクトル・ミキサ校正を使用したPNAによる群遅延測定のセットアップ

ベクトル・ミキサ校正の測定セットアップは、図10の相対位相の測定セットアップと非常によく似ています。どちらも、ネットワーク・アナライザの基準経路内に基準ミキサを配置することによって、並列法を用いて基準信号を作成しますが、アナライザの設定や校正手法に違いがあります。

ミキサのテスト・パラメータの設定には、単一の画面が用いられます。マイクロ波 PNA シリーズ・ネットワーク・アナライザには、ベクトル・ミキサ校正がガイド付き校正ウィザードとして内蔵されています。ベクトル・ミキサ校正は次の3ステップから成るプロセスです。

1. 標準的な2ポート校正が、被試験ミキサの入力と出力周波数で実行されます。
2. 校正ミキサが特性評価され、後でスルー標準器として用いられます。この革新的な特性評価手法は、3ミキサ方式の適用限界のほとんどを解消します。単一のミキサ、IFフィルタ、一連の反射測定が必要です。反射測定が用いられるため、校正ミキサが独自の基準信号を再変換する働きをします。この方式の場合、校正ミキサはレシプロカルでなければなりません。こうした一連の反射測定や計算を行うことによって、複素入力整合、出力整合、変換損失、遅延が求められます。この方式については、[1] Agilent Application Note 1408-1 “Mixer Transmission Measurements Using The Frequency Converter Application” の付録Cで詳しく説明しています。校正ミキサの選択方法の詳細については、[2] Agilent Application Note 1408-3をご覧ください。
3. 校正ミキサは、スルーラインとして測定されます。ミキサとテスト・システム間の不整合が補正された応答が、前のステップの応答と比較されます。これら2つの測定の差は、基準経路、基準ミキサ、配線によって追加された周波数応答に起因する誤差です。校正ミキサの応答が正確に分っているので、基準ミキサの応答がPNAアプリケーションによって数学的に取り除かれます。これにより、基準ミキサから独立した測定基準面が確立されます。

特性評価ステップを含む全プロセスは、15分足らずで実行することができます。さらに、校正ミキサの特性評価ファイルを保存し、後で呼出すことができるので、その都度ステップ2を実行する必要はありません。この校正では伝送経路内の誤差が測定され、数学的に取り除かれるため、テスト・セットアップにアッテネータは不要です。

測定確度

図12の3ミキサ方式の校正トレースとベクトル・ミキサ方式の校正トレースを比較すると、群遅延リップルに著しい違いが認められます。これは、ベクトル・ミキサ校正ではアップ/ダウンコンバータのセットアップの2つのミキサの間の不整合に起因する誤差を捕捉できないからです。

ベクトル・ミキサ校正を使用している場合、不確かさをさらに減少させる特別なケースとして、以下の手法を用いることができます。

- 250MHz未満の周波数を測定する場合、ポート2カプラのロールオフによってS/N比が減少するため、ダイナミック・レンジが減少します。このS/N比を上げるには、ポート2ジャンパを反転させてカプラをバイパスします(図14を参照)。こうすることにより、ダイナミック・レンジも同量分だけ逆方向で減少しますが、順方向測定しか行われないので問題はありません。



図14. PNAシリーズのフロント・パネル：ポート2とジャンパ

注記

10MHz～250MHzの出力周波数を測定する場合は、ポート2カプラを反転させることによって、S/N比の大幅な改善が可能です。

- この場合、被試験ミキサと基準ミキサのLO経路を分離することが重要です。被試験ミキサのLO-出力間の分離(f_{out}^{LO})が不十分な場合は、基準LOポートの不整合信号がパワー・スプリッタによって被試験ミキサのLOポートに反射されます。これにより、校正中には見られなかった補正不可能な誤差が生じます。この問題を解決するには、基準ミキサのLO経路にアイソレータか緩衝増幅器を配置します。

これら2つのオプションの方式はいずれも、図12に示されている測定結果を得るために使用されていません。確度を高めるための詳細については、[2] Agilent Application Note 1408-3を参照してください。

推奨される実装およびコスト

マイクロ波PNAシリーズ・ネットワーク・アナライザとオプションの周波数コンバータ・アプリケーションは、LOを備えた高性能ミキサやコンバータの位相の直線性や群遅延を測定するのに最適です。

主な利点の1つとして、ガイド付きユーザ・インタフェースがあります。これまでミキサの測定を経験した人だけが信頼性の高いセットアップや校正を行いましたが、このガイドを利用すれば初心者でも信頼性の高い測定が可能になります。

PNA周波数コンバータ・アプリケーションの測定器に要するコストは、高度な機能を備えているため、標準的なネットワーク・アナライザよりも高くなりますが、テスト時間や、複数の特性評価済み基準ミキサやアッテネータなどのテスト用アクセサリの追加コストが減少すると同時に、被試験ミキサの真の性能が明らかになります。

群遅延のまとめ

群遅延は、位相情報から計算されますが、ベクトル・ネットワーク・アナライザを使用しないと最良の結果が得られないので難しい測定です。このセクションで説明した方式を使用すれば、相対測定と絶対測定の両方の測定が可能です。

絶対測定では、測定結果をゴールデン・ミキサから分離できるので、多くの利点があります。これにより、測定結果の変換が容易になり、他の測定器との比較が簡単になります。

絶対群遅延測定は、正確な基準ミキサ測定または校正ミキサ測定が可能な場合にだけ行うことができます。この測定は、群遅延の測定全体の確度に直接影響を与えます。残念ながら、基準測定を応答から取り除く方法は、測定の確度を左右する問題の1つにしか過ぎません。系統誤差は、取り除かれるか、最小限に抑えられなければ、結果に大きな影響を及ぼします。ベクトル誤差補正は、こうした影響を取り除く最も効果的な方法です。

参考資料

本書は、Agilent MW PNAシリーズのWebサイト (www.agilent.co.jp/find/pnaj) のライブラリ情報に掲載されています

- [1] 『周波数コンバータ測定オプションを使用したミキサの伝送測定』
Agilent Application Note 1408-1、カタログ番号5988-8642JA
- [2] 『PNAシリーズ 周波数コンバータ測定オプションを用いた測定／校正精度の向上』 Agilent Application Note 1408-3、カタログ番号5988-9642JA

追加参考資料

Mixer Measurements Using Network and Spectrum Analysis; L Dunleavy, T. Weller, E. Grimes, J. Culver; 48 th ARFTG Conference; Clearwater, Florida, USA; 1996年12月5～6日

Webリソース

Agilent PNAシリーズに関する追加カタログ／製品情報については、以下のWebサイトをご覧ください。

www.agilent.co.jp/find/pnaj

Agilent電子校正 (ECal) モジュールの詳細については、以下のWebサイトをご覧ください。

www.agilent.co.jp/find/ecal-j



電子計測UPDATE

www.agilent.com/find/emailupdates-Japan

Agilentからの最新情報を記載した電子メールを無料でお送りします。

Agilent電子計測ソフトウェアおよびコネクティビティ

Agilentの電子計測ソフトウェアおよびコネクティビティ製品、ソリューション、デベロッパ・ネットワークは、PC標準に基づくツールによって測定器とコンピュータとの接続時間を短縮し、本来の仕事に集中することを可能にします。詳細についてはwww.agilent.co.jp/find/jpconnectivityを参照してください。

本書に記載されている製品仕様および説明は、予告なしに変更されることがあります。

サポート、サービス、およびアシスタンス

アジレント・テクノロジーが、サービスおよびサポートにおいてお約束できることは明確です。リスクを最小限に抑え、さまざまな問題の解決を図りながら、お客様の利益を最大限に高めることにあります。アジレント・テクノロジーは、お客様が納得できる計測機能の提供、お客様のニーズに応じたサポート体制の確立に努めています。アジレント・テクノロジーの多種多様なサポート・リソースとサービスを利用すれば、用途に合ったアジレント・テクノロジーの製品を選択し、製品を十分に活用することができます。アジレント・テクノロジーのすべての測定器およびシステムには、グローバル保証が付いています。製品の製造終了後、最低5年間はサポートを提供します。アジレント・テクノロジーのサポート政策全体を貫く2つの理念が、「アジレント・テクノロジーのプロミス」と「お客様のアドバンテージ」です。

アジレント・テクノロジーのプロミス

お客様が新たに製品の購入をお考えの時、アジレント・テクノロジーの経験豊富なテスト・エンジニアが現実的な性能や実用的な製品の推奨を含む製品情報をお届けします。お客様がアジレント・テクノロジーの製品をお使いになる時、アジレント・テクノロジーは製品が約束どおりの性能を発揮することを保証します。それらは以下のようなことです。

- 機器が正しく動作するか動作確認を行います。
- 機器操作のサポートを行います。
- データシートに載っている基本的な測定に係わるアシストを提供します。
- セルフヘルプ・ツールの提供。
- 世界中のアジレント・テクノロジー・サービス・センターでサービスが受けられるグローバル保証。

お客様のアドバンテージ

お客様は、アジレント・テクノロジーが提供する多様な専門的テストおよび測定サービスを利用することができます。こうしたサービスは、お客様それぞれの技術的ニーズおよびビジネス・ニーズに応じて購入することが可能です。お客様は、設計、システム統合、プロジェクト管理、その他の専門的なサービスのほか、校正、追加料金によるアップグレード、保証期間終了後の修理、オンサイトの教育およびトレーニングなどのサービスを購入することにより、問題を効率良く解決して、市場のきびしい競争に勝ち抜くことができます。世界各地の経験豊富なアジレント・テクノロジーのエンジニアが、お客様の生産性の向上、設備投資の回収率の最大化、製品の測定精度の維持をお手伝いします。

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 9:00-12:00、13:00-19:00(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
(0426-56-7832)

FAX ■■■ 0120-421-678
(0426-56-7840)

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 2003

アジレント・テクノロジー株式会社



Agilent Technologies

December 16, 2003
5988-9619JA
0000-00DEP