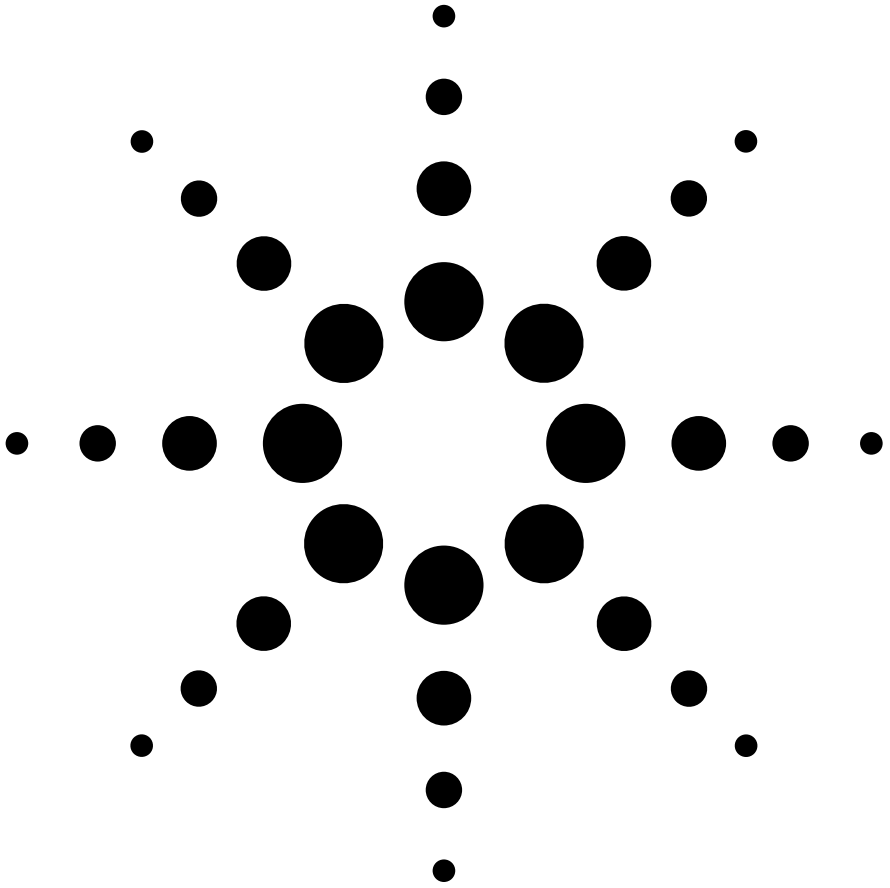
新しいベクトル評価手法を用いたミキサの特性評価の比較

White Paper



Joel Dunsmore
Jim W. Jones
Dara Sariaslani
Bob Shoulders

Agilent Technologies

要約

この記事では、RFミキサの特性を評価し、入力整合、出力整合、変換損失の振幅、位相測定および群遅延応答測定の新しい方法を紹介します。この手法は、対称的な変換損失を持つミキサや、イメージ応答をフィルタで除去可能なミキサに最適です。この手法を、新しいベクトル・パワー補正手法および従来のパワー・メータ測定と比較します。また、新しい手法の誤差解析を初めて紹介します。

この記事は、2002年9月24日に開催された欧州マイクロ波シンポジウムで発表されたものです[1]。

はじめに

多くの無線システムやRFシステムでは、振幅や群遅延応答が仕様化され、十分に制御された周波数変換器やミキサが必要です。こうしたデバイスの振幅応答測定には、常に大きな不確かさがあります。さらに、ミキサの位相や群遅延応答の特性を評価する方法がいくつかあります。

これまでの方法では、3ペアのミキサに対して3種類の測定を行うことによって群遅延測定を行うというものでした[2]。これらの測定に基づいて、すべての応答に関する3つの線形方程式を解くことにより、振幅や位相応答を計算することができます。この方法では、アップ／ダウン・コンバージョンが用いられますが、不要な側波帯の再変換を防ぐために、ミキサ・ペア間にIFフィルタが必要です。この手法のもう1つの重要な側面は、ミキサのうちの最低1つの応答が対称的、すなわち、アップ・コンバージョン・モードでの変換損失や群遅延がダウン・コンバージョン・モードでのそれらと同じになると仮定している点です。一部のミキサについては、このように考えて問題はありません。

これまでの方法の問題点は、ミキサ・ペアとフィルタの間を再接続して、3セットの測定を行わなければならないという点です。接続する度に、ランダム誤差（コネクタの再現性）や系統誤差（例えば、フィルタとミキサ・ペアとの間やミキサとテスト機器との間の不整合）が生じる可能性があります。一般に、ミキサはリターン・ロスが低いので、こうした不整合が非常に深刻な問題になることがあります。これまではミキサとフィルタの間にパッド（減衰）を追加してこの効果を低減することが提案されて来ましたが、これでは、アッテネータとフィルタとの間にさらなる不整合が生じ、測定信号のレベルをが下がり、ノイズの多い測定となります。

新しい方法の概要

以下に示す新しい方法のうちの一方では、他のミキサを用いなくても、ミキサの振幅、位相、遅延応答を評価することができます。ミキサの入力および出力整合も測定できます。もう一方の方法では、ベクトル・ネットワーク・アナライザを正しい手順で校正することにより、入力および出力整合を補正したミキサの振幅応答の評価が可能です。これらの新しい方法を、パワー・メータを使用する従来の方法と比較します。

最初の方法については、2002年マイクロ波理論／技術シンポジウム[3]で初めて言及されましたが、テスト・ミキサのLO信号を利用できなくても問題はありません。唯一の要件は、必要なIF出力信号の応答と不要な側波帯を分離できるフィルタです。この方法は、これまでの方法と同様に、対称的なミキサ応答を仮定しており、この仮定のもとでの誤差はすべて、最終結果における誤差になります。また、この方法では、入出力における不整合誤差をなくすための情報も得られます。[4] さらに、複数のミキサを接続する必要がないので、コネクタの再現性による測定誤差もありません。

パワー・メータを使ってベクトル・ネットワーク・アナライザを校正するもう1つの方法は、信号源とパワー・メータ間、信号源とレシーバ間、被試験ミキサとネットワーク・アナライザの信号源／レシーバ間の不整合など、システム内のあらゆる不整合を補正するという点が斬新です。この方法により、周波数変換器の最先端の振幅測定が実現されるものと確信しています。さらに、この方法は、LOリーケージに対する感度が低いので、イメージ信号を除去するためのフィルタは不要です。

特性評価方法の詳細

対称的な校正法

最初の新しい方法は、ベクトル・ネットワーク・アナライザ（VNA）が必要です。最初に、アナライザを、RF周波数レンジで、リターン・ロス測定（S11）用に校正します。これにより、「完全な」（ごくわずかな残留誤差しかない）ネットワーク・アナライザが実現します。図1に示すように、特性評価するミキサをこのポートに接続し、その後にIFフィルタを接続します。度量衡グレードのオープン／ショート／ロードの測定を行い（他の1ポート校正法も行いますが）、保存します。テスト・ポートで測定される信号は、ミキサの入力ポートからの反射、変換された信号のペア、IFフィルタから反射され入力信号に再変換された不要な信号、IFフィルタを通過した望ましいIF信号で、1ポート校正に用いられているさまざまな校正標準で反射された信号の複合信号であるということに注意してください。

ミキサ／フィルタの組み合わせの「1ポート」誤差モデルの計算には、3種類の測定Γ_O、Γ_S、Γ_Lで十分です。すなわち、Γ_O、Γ_S、Γ_Lの値は、1ポート校正の誤差項を計算するための公式の入力として用いることができます。

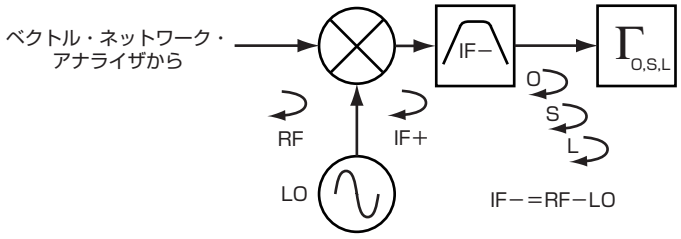


図1. ミキサの特性評価。オープン、ショート、ロード応答の3種類の測定が行われます。

1ポート誤差モデルには、方向性、ソース・マッチ、反射トラッキングの3つの項があります。反射トラッキングの項は、ミキサの双方向伝送（振幅と位相）を表し、T1*T2となります。ミキサが本質的に対称的（つまり、T1＝T2）である場合には、この項の平方根を計算し、ミキサの片方向挿入損失を求めます。1ポート誤差モデルがすでにソース・マッチの影響を抽出しているので、データを取り込んだ校正済みVNAには入力整合の影響が含まれています。したがって、この項は、ミキサの実際の双方向変換損失として用いることができます。このデータが、ネットワーク・アナライザに取り込まれ、VNAの実効不整合、トラッキング、方向性が除去されます。

実際には、VNAの1ポート校正機能を用いて、以前に測定されたΓ_O、Γ_S、Γ_L応答を1ポート校正の校正標準としてVNAにダウンロードすることにより、ミキサの1ポート誤差モデルを抽出することが可能です。ただし、標準のデータがミキサのRFレンジでのデータに対して、基準はIFレンジで適用されるため、校正基準モデルに適切な周波数が用いられるように、ダウンロードする前にアナライザの周波数をリセットする必要があることを忘れないでください。さらに、RFがLO周波数未満の場合には、応答がIFの「逆方向」掃引と一致するように、ダウンロードする前にデータを逆転させる必要があります。方向性、ソース・マッチ、トラッキングの公式については、多くの参考資料に掲載されています[5]。

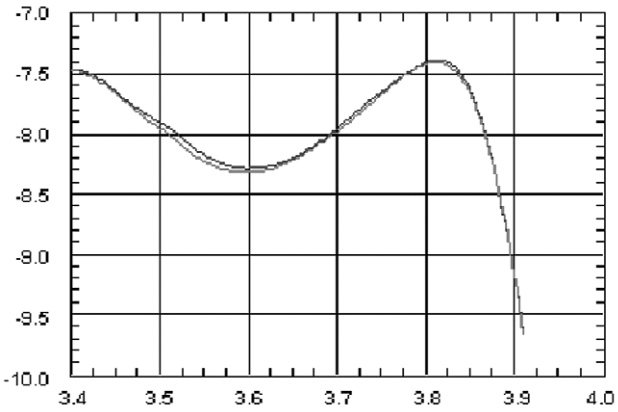


図2. 最初の新しい方法、アップ／ダウン・コンバージョンを用いた場合の変換損失

図2は、RFミキサを評価した結果です。フィルターミキサーフィルタの組み合わせが作成し、1回はアップコンバータとして、もう1回はダウンコンバータとして、2回にわたって評価しました。[3]の中でDunsmoreが述べているように、このミキサは、校正用ミキサとしてテスト・システムに用いることも可能です。

パワー・メータ校正済みVNA

ミキサの振幅応答を評価するための別の方法としては、パワー・メータを使ってベクトル・ネットワーク・アナライザを評価した後で、そのベクトル・ネットワーク・アナライザを使ってミキサを評価するという方法があります。パワー・メータを使用するというのは目新しいことではありませんが[6]、これまでの方法は、不整合やパワー・レベルの変動に敏感でした。新しい方法では、1ポート誤差補正を用いて、VNAのソース・マッチの評価やパワー・メータのリターン・ロス測定が行われます。信号源の出力レベルは、パワー・メータによって測定され、ソース・マッチの相互作用が補正されます。この校正はVNAの基準チャネルに転送されるので、信号源出力の連続測定を行い、信号源レベルの変動を補正することができます。

次に、被試験ミキサの出力周波数で1ポート校正を実施し、VNAのポート1をポート2に接続します。VNAのポート2のロード・マッチ、レシーバ応答を測定します。この応答は、基準チャネルの基準にもなります。ミキサの出力整合を補正する必要がある場合には、さらにポート2で1ポート校正を行うことも可能です。最後に、ポート1とポート2の間にミキサを接続します。図3は、ベクトル補正済みパワー・メータで校正されたVNAを使った測定を示したものです。この測定では、振幅応答しか測定できませんが、ミキサの周波数応答の一部に、非対称特性が見られます。しかし、アップ・コンバージョンとダウン・コンバージョンの平均は、図2の応答とほぼ等しくなるので、最初の方法によってミキサの「往復」変換損失を評価できることがわかります。

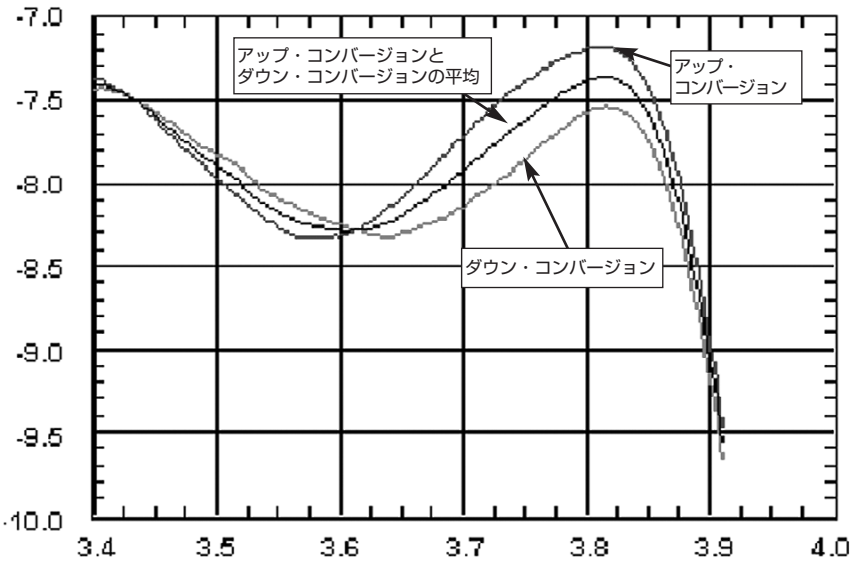


図3. 整合補正とパワー補正済みVNAを用いた場合の変換損失

テスト方法の誤差の評価

テスト方法の誤差を評価することにより、それらの相互作用を理解することができます。誤差の要因は、パワー・メータの直線性、イメージ信号、校正キットの残留誤差、VNAのダイナミック確度の限界などさまざまです。最初の方法の誤差解析により、「往復」変換損失の誤差は以下のように表されます。

$$\Delta(T1{*}T1) = \frac{r1 \bullet r2}{(1 - m1 \bullet D)^2 \bullet (1 - d2 \bullet M)^2}$$

ここで、r1、m1はポート1の補正に用いられた校正キットの残留トラッキングとソース・マッチ、r2、d2はフィルタの出力での校正キットの残留トラッキングと方向性、DとMはミキサの入力および出力整合、T1、T2は順方向と逆方向の変換利得をそれぞれ表します。最初の特性評価方法には、被試験ミキサの非対称的な誤差要因もあります。対称性は、2つ目の方法を用いて確認することができますが、振幅応答に関してのみ確認可能です。図4は、非対称が独立した信号の加減算によるものと仮定した場合に、振幅の非対称性から位相の非対称性を予測するための考え方を示したものです。この種の誤差により1dBの振幅誤差に対して6.6度の位相のずれが生じることが、解析によって分かります。したがって、約±0.2dBの非対称動作では、図3の結果は1.3度の位相誤差になると予想されます。これは仮定による予測誤差ということを認識しておく必要があります。

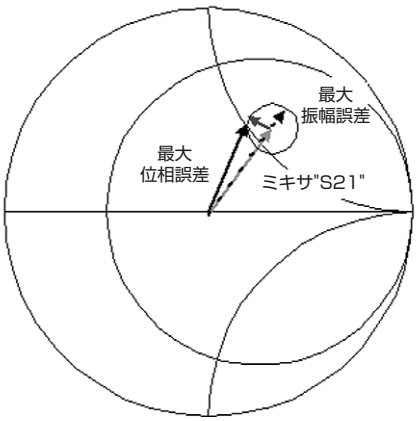


図4. 位相誤差で表された振幅誤差

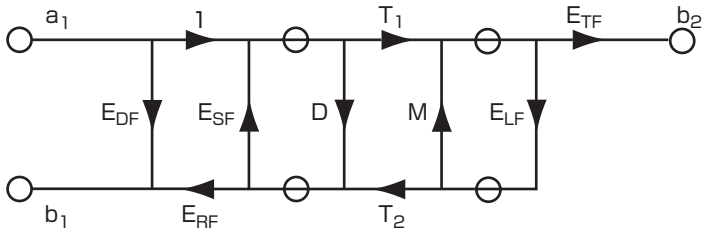


図5. ミキサ測定の誤差モデル。Dはミキサの入力整合、Mはミキサの出力整合を、T1は順方向変換利得、T2は逆方向変換利得、EDF、ESF、ERFはポート1の方向性、ソース・マッチ、反射トラッキング誤差をそれぞれ表します。また、ELFはポート2のロード・マッチ、ETFはb2レシーバのトラッキング誤差を表します。

図5は、パワー・メータで補正されたVNAを使って出力パワー（b2）を測定する場合の、ミキサ測定の誤差モデルを示したものです。入力パワーは、基準チャネル上で補正／測定することが可能で、a2で表されています。校正手順で、システムのソース・マッチがパワー・メータの整合と相互作用して、小さな誤差が生じます。また、b2レシーバを校正するために信号源をアナライザのポート2に接続した場合には、小さなポート不整合が生じる可能性があります。一般的には、こうした誤差は小さいものですが、不整合の結果としての最終的なシステム誤差の一因となります。ミキサは通常十分に整合がとれていないため、最終的には、ミキサの入力整合（D）や出力整合（M）による大きな不整合が生じる場合があります。ミキサ測定のベクトル補正の重要性は、テスト・システムの整合が人為的に損なわれている例を通して実証することができます。図6は、パワー・メータを使った測定（従来の方法）と整合補正されたVNAを使った測定を示したものです。パワー・メータの方が変換損失が小さくなっている（上側のトレース）理由の1つは、ミキサである程度のフィルタリングが行われているにも関わらず、ミキサからのその他のスプリアス信号が測定されているためです。

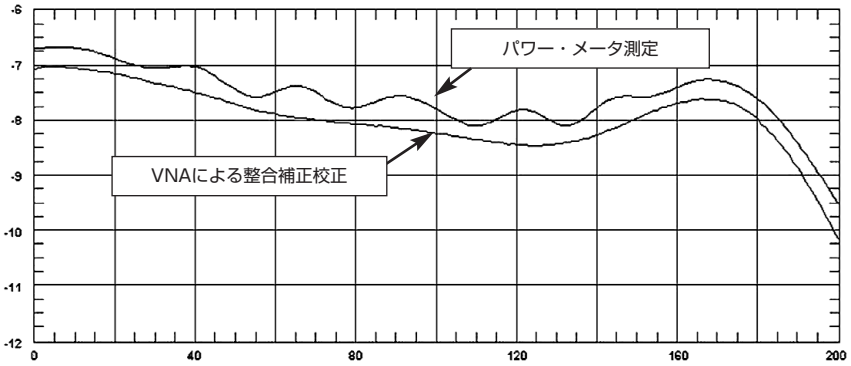


図6. 補正付きのパワー校正されたVNA（下側のトレース）およびパワー・メータで測定されたミキサ

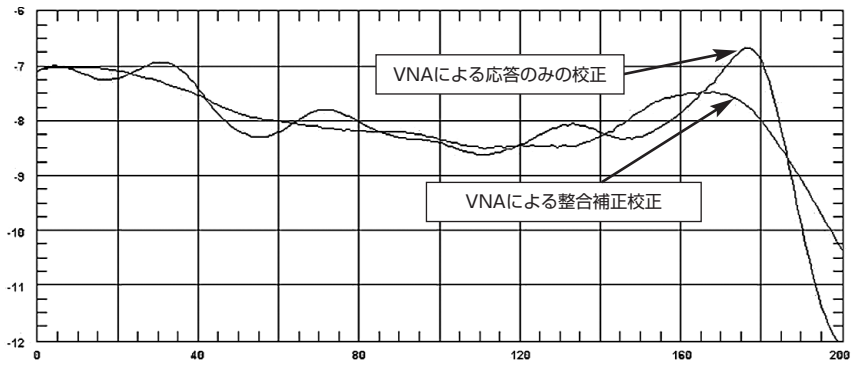


図7. 十分に整合がとれていない（−5dB）テスト・システムのパワー・メータで補正されたVNAによる振幅測定。整合補正されていない場合（リップルのあるトレース）と整合補正されている場合（平坦なトレース）。

図7は、[5]に記載されているレスポンス校正を用いた、十分に整合がとれていない（−5dB）テスト・システム上のミキサ測定（リップルのあるトレース）を示したものです。このプロットには、同じテスト・システムでの同じミキサの場合も示されていますが、これは整合補正されています。十分に整合がとれていないシステムを誤差補正した場合も、十分に整合がとれているシステムとほとんど同じ結果（0.07dB以内）になるため、この手法が有効であることが裏付けられます。

信号の再ミキシングや誤差補正に用いられた校正キットの残留誤差など、その他の誤差は同じです。このテスト・ミキサのこうしたその他の誤差の影響は、ごくわずかです。このミキサには、入力および出力の周波数フィルタリング機能が内蔵されていました。こうしたフィルタリング機能がない場合の効果を評価するために、さらなる研究が続けられています。

まとめ

最新技術を用いたミキサの詳細な特性評価を紹介しました。反射測定を利用した新しい特性評価方法を、対称的なミキサであると仮定して、ベクトル補正されたパワー測定を用いる新しいVNA測定方法と比較しました。校正用ミキサの不確かさは、VNAの校正に用いられた校正標準の反射トラッキング誤差とミキサの特性評価の不確かさの合計にほぼ相当します。

参考資料

[1] Joel Dunsmore, *Comparison of Mixer Characterization using New Vector Characterization Techniques*, 32nd European Microwave Conference Proceedings, Vol 1, September 24, 2002, pp 163-166.

[2] C.J. Clark, A.A. Moultrop, M.S. Muha, C.P. Silva, *Network Analyzer Measurement of Frequency-Translating Devices*, Microwave Journal, Nov. 1996, pp 114-126.

[3] Joel Dunsmore, *Novel Method for Vector Mixer Characterization and Mixer Test System Vector Error Correction*, 2002 IEEE_MTT-S International Microwave Symposium Digest, Vol 3, pp 1833-1836

[4] United States Patent 6,448,786 *Stimulus/response System and Method of Vector Characterization of Frequency Translation Devices*, September 10, 2002.

[5] Agilent 8753E Network Analyzer User's Guide, manual number 08753-90367, Chapter 3.

[6] Agilent 8753E Network Analyzer User's Guide, manual number 08753-90367, Chapter 6.

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。

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
(12:00〜13:00も受付中)
※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)

E-mail:contact_japan@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。
ご発注の際はご確認ください。

Copyright 2002
アジレント・テクノロジー株式会社

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、製品の測定確度の維持をお手伝いします。

Agilent Technologies

November 5, 2002
5988-7827JA
0000-00DEP