

賢いネットワークアナライザに負けない賢い測定の知識 —正しい測定をするために—

Measurement examples and common mistakes with Network Analyzers — Tips to obtain correct measurement data —

柳本 吉之[‡]

Yoshiyuki YANAGIMOTO[‡]

株式会社関東電子応用開発

概要

電子測定器はどんどん「賢く」なっていており、内部でどんな処理がなされているかユーザーにはわからなくなってきました。ユーザーは測定器のボタンを押して出てきた答えが正しい測定値だと信じるしかありません。測定器は確かに正確ではありますが、つなぎ方を間違えれば、間違っつなげたものを正確に測定して表示します。「賢い機能」は実際の測定値に多くの演算処理を施したものを表示しますので、ユーザーは基本的な測定の間違いに気づきにくくなります。間違いに気づかずに、表示されたデータを信じて次のステップに入ってしまうことも起こりえます。本講演ではネットワークアナライザを例にとり、正しい測定をするためのちょっとしたノウハウや気づきをお伝えできればという思いでお話いたします。

Abstract

Electronic measurement instruments are becoming so “smart” that users can get a set of processed data without knowing how the data is processed inside. Users often tend to believe that the data displayed on a measurement instrument is accurate. Yes, measurement instruments are accurate but it is just accurately measuring what is connected to the front connectors. You may be either so impressed or overwhelmed by many “smart” functions that you feel what you are doing is highly sophisticated measurements. However, the highly sophisticated data processing would just result in a set of useless data if the way you connect your device is not appropriate. Moreover, such “smart” functions make it rather difficult to find mistakes in measurement setups and connections. Vector Network Analyzers will be the example of the “smart” instruments in this seminar and you will find an insight and a hint to make your measurements accurate.

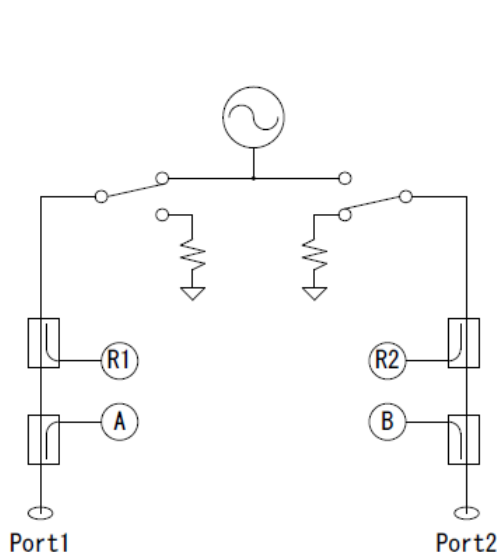


図1 ネットワークアナライの内部構成

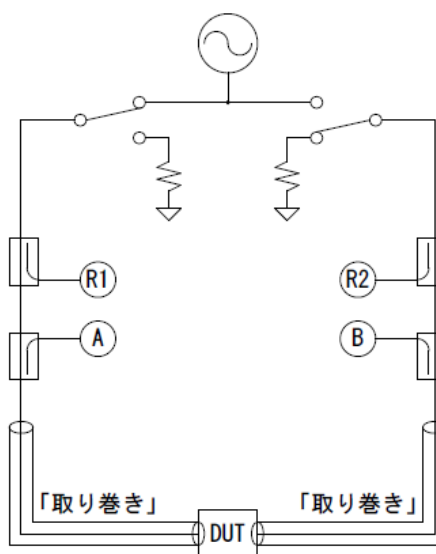


図2 被測定物 (DUT) だけが測定されるわけではない

1. はじめに

ネットワークアナライザには多くの機能が搭載されています。生の測定値がそのまま出てくるのではなく、生の測定データに誤差校正を加え、出てきたデータをさらに演算処理して、ユーザーが難しい計算をしなくても答えが出てくるようになっています。だから、ユーザーは何も考えなくていいのでしょうか？ここで何も考えないユーザーとしっかりデータの意味を理解しているユーザーにはその後の運命が大きく異なります。

生のデータを見れば、何か変なことが起こっているとわかるような状況でも、校正され演算処理されたデータを見ると、正しいデータが得られたと錯覚してしまうことが多くあります。そのデータを信じて論文発表したり、設計に使ったりすると、後で痛い目に会います。

このようなミスをなくすためには、基本に立ち返り、測定が本当に正しく行われているのかを確認することが必要です。特に高周波での測定には、多くの「気づかい」が必要であると心掛けなければなりません。また、ワークアナライザの基本動作と、高周波における信号の流れを理解する必要があります。

2. ネットワークアナライザの基本構成

最近のネットワークアナライザは図1のような構成になっています。一つの信号源と4つのレシーバーというのが2ポートネットワークアナライザの最も基本的な構成です。信号源は測定用信号を発生します。このとき、どちらのポートから発生するかはスイッチで切り替えます。

ポート1から信号を発生する場合、R1レシーバーはポートから出力している信号をモニターします。Aレシーバーはポート1に反射され戻ってきた信号を測定します。Bレシーバーは被測定物を通してポート2に到達した信号を測定します。

ポート2から信号を発生するときは、スイッチを切り替え、同様に行います。

例えば、R1はポート1からの出力信号の一部を少しだけ「盗み取る」ことで、出力信号の状態を知ります。それゆえ、R1が受け取る信号は本来出力している信号よりもずっと小さなものです。Bレシーバーも入ってきた信号をすべて受け取るわけではありません。そういったハードウェア構成上の都合は製品出荷前に校正されます。つまり、R1レシーバーが受け取った信号の何倍かが実は本当にポート1に出力された信号だということを、装置に覚えこませて、いかにもR1が出力信号そのものを受け取っているか

のように表示させます。他のレシーバーでも同じことを行います。これらは、製造出荷時に行われるため、ユーザーには見えません。ユーザーがネットワークアナライザを受け取った時点では、内部のハードウェアの都合は見え、R1,R2,A,Bそれぞれのレシーバーはすべての信号を正しく測定しているように表示されます。

使用時にR1,R2,A,Bの生のデータを見ることはあまりありません。ユーザーは主にSパラメータを測定します。ただし、Sパラメータは以下のように、R1,R2,A,Bから計算されます。

$$S11=A/R1, S21=B/R1, S12=A/R2, S22=B/R2$$

よって、R1,R2,A,Bが「大元の」信号ということになり、Sパラメータはそれらより計算された副次的な情報です。

これらのSパラメータも校正されたあとで表示されます。上記でR1,R2,A,Bが厳密に正しく校正されていれば、Sパラメータは割り算だけなので、校正の必要はないのですが、内部のカプラーからフロントパネルまでのケーブルやコネクタが誤差を与えますので、フロントパネルに校正標準器をとりつけ、値を覚えこませます。これで、ネットワークアナライザはフロントパネルのコネクタ端面において、とても正確な測定値を表示するようになります。

3. 使用時の校正

ネットワークアナライザのポートと被測定物が直接つながることはありません。必ず、間に何かが入ります(図2)。ケーブルやプローブはもちろん、測定したい部品が基板に載っているといった場合など、ネットワークアナライザが被測定物だけを測定するというケースは極めて稀です。よって、ネットワークアナライザは被測定物を取り巻いているすべてをひっくるめて測定してしまいます。それらの「取り巻き」の影響を取り除くのが校正(User Calibration)です。省略してCAL(キャル)と呼ぶことが多いです。

CALとは、既知の標準をつないで、測定値がその既知の値になるように内部で演算処理することです。CALには多くの種類があり、種類が多すぎてわからなくなります。測定の状況によって、どのような方式を使うのが最も誤差を軽減できるかが場合によって異なるために、いろんなCALの方式が生まれました。

一般的なケーブルとコネクタで被測定物をつなぐ場合は、校正キットが市販されていますので、最も簡単です。例えば、N型、SMA、3.5mm、2.4mm、1.85mm、1mmといった標準的なコネクタには必ず校正キットが市販されています。しかし、世の中はそんなに甘く

ないことが多いです。被測定物が基板の上にはんだ付けされている、使っているコネクタに対応した校正標準が存在しない、手持ちの校正標準器はメスコネクタだけ測定したい対象物はオスコネクタだ、など、すんなりと校正できないケースも多くあります。このような時こそ、ネットワークアナライザの動作をよく理解した上で、必要な測定確度を得るために、どのような校正をするのが適切なのかを考えなければなりません。

4. 「賢い」機能

校正は被測定物の周りの「取り巻き」の影響を取り除くものです。言い方を変えれば、ネットワークアナライザは被測定物と「取り巻き」の両方を合わせたものを測定するわけですが、もし「取り巻き」がなかったらどうなっているのだろう、という推定値を計算で示していると言えます。これも一つの「賢い機能」なのですが、実際に測定した値を用いて、「もし x x x」ならこうなっているはずだ、という値を表示する「賢い機能」は他にも多くありますので、少し紹介します。

De-embedding:

これは、校正とほぼ同じ効力を持ちます。被測定物と「取り巻き」のうち、「取り巻き」の情報を別途入手できる場合に、「取り巻き」の S パラメータをあらかじめネットワークアナライザに教えておけば、ネットワークアナライザは測定値から「取り巻き」の分を差し引いて、被測定物の値だけを表示します。図 3 S1 と S2 を別途測定やシミュレーションで求めて置き、DUT の測定中には S1 と S2 を差し引いた値を表示させる機能です。

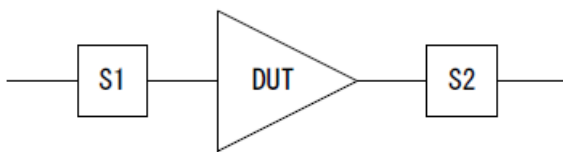


図 3 embedding/de-embedding

Embedding:

これは De-Embedding の逆です。測定されたものに、もし、「取り巻き」が付けばこうなるはずだ、という推定値を表示します。フィクスチャーシミュレーターと呼ばれることもあります。図 3 で DUT のみを測定して（当然 CAL によって不要な「取り巻き」は取り除かれます）、DUT の左右に S1 と S2 が付いたらどんな値になるかを計算して表示します。

マッチング回路をあらかじめシミュレーターで計

算しておき、測定したアンプなどのデバイスにそのマッチング回路をつけるとどうなるだろうか、という簡単なシミュレーションを測定器が行うわけです。

また、デバイスを単体で使うことはないの、その周りに取り付けられたフィクスチャーを含んだ特性を計算で求めたいといったときにも役に立ちます。

TDR/TDT:

時間波形を表示します。S パラメータは被測定物の入出力特性を周波数軸上で表現したのですが、それを逆フーリエ変換すると時間軸上の入出力特性に変換できます。S パラメータを逆フーリエ変換すると、被測定物にインパルスが入力されたときの反応を見ることができます。それを積分すると、ステップレスポンスが得られます。図 4 のように、本来測定しているのは周波数軸での S パラメータなのですが、逆フーリエ変換を施すことで、ステップレスポンスを見ることができます。

もし、この被測定物にステップ入力が入ったら、こんな出力がでるはずだ、という簡単なシミュレーションを測定器がやってくれているわけです。

さらには、単純なステップ信号ではなく、疑似ランダム信号が入ったときに、出力のアイパターンを計算する機能など、より複雑なシミュレーションをやってくれる機種もあります。

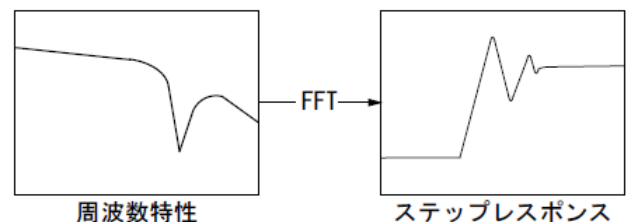


図 4 周波数軸から時間軸への変換

Time Gating:

図 5 のように、デバイスの入り口と出口でインピーダンスマッチングが悪くと、図 5 のように、多重反射が起こります。入射された信号の一部は外へ出ますが、一部は出口で反射してまたデバイスの内部に戻ります。それが、また、入り口で反射して、もとの入射信号に重畳して、出口に出てきます。その状態で S パラメータを測定すると、図 6 の最初のグラフのように、反射の周期に相当する周波数にディップがでるなどの現象が現れます。

多重反射の影響を取り除いた、デバイスの通過特性のみを求めるために、ゲーティングという機能があります。図 6 のように、測定された S パラメータ

を逆フーリエ変換して、得られたインパルスレスポンスのうち、往復の反射によって遅れて出てくる信号を切り捨て、メインのレスポンスのみを切り取り（「ゲート」をかけると言います）、その部分だけを再度フーリエ変換で周波数特性に戻すという操作で、本来のデバイスの特性を得ることができます。

これも、もし、両端での反射がなかったらこうなるはずだ、という推定値を計算で示していることになります。

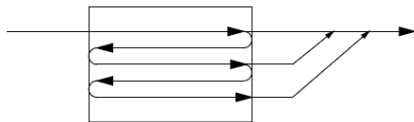


図5 多重反射があるデバイス



図6 多重反射を取り除いた周波数特性

差動：

差動信号が入ったときにどうなるかを計算で示します。4ポートのネットワークアナライザを用いることが多いですが、ネットワークアナライザの信号源は多くの場合1つです。1つしか信号がないのに、差動信号（2つの逆位相の信号）が入力されたらどうなるかが「測定」できます。

例えば、差動入力、差動出力のデバイスの場合、図7のように、それぞれの差動信号をばらばらのシングルエンド信号で測定します。差動の+側だけに信号を入れて、差動の-側は終端します。それでSパラメータを測定します。次いで、差動の-側に信号を入れて、差動の+側を終端します。それで、Sパラメータを測ります。このような測定データを元に、もし、差動の+側に+の信号、差動の-側にその逆位相の信号が入ったときに、出力にどんな差動信号がでるかが計算できます。差動入力がコモンモードに変換される現象も計算でわかります。

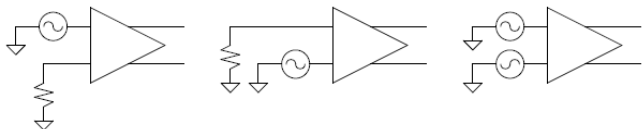


図7 差動モードへの変換

インピーダンス：

Sパラメータはインピーダンスに変換できます。図8のように、1ポートのみを使ってS11を測定し、

インピーダンスを求めることができます。S11はつないだインピーダンスZによる反射係数で、 $S11 = (Z - Z_0) / (Z + Z_0)$ で表され、インピーダンスZは $Z = Z_0 \times (S11 - 1) / (S11 + 1)$ の式でS11から計算で得ることができます。

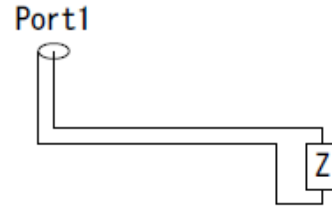


図8 1ポートSパラでインピーダンス測定

2ポートで被測定物をグランドにつなぐと、シャントスルーという方法でインピーダンスを求めることができます。被測定物を図9のようにつなぎ、所定の補正をすると、 $S21 = z / (z + 25)$ となり、 $Z = 25 \times S21 / (1 - S21)$ が得られます。

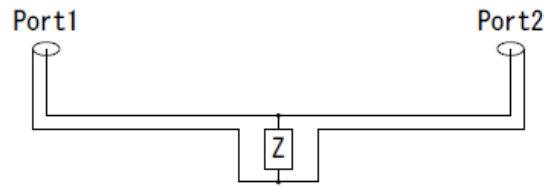


図9 シャントスルーによるインピーダンス測定

被測定物を信号線に直列に入れるシリーズスルー法は図10のような接続をします。このとき、 $S21 = 100 / (100 + z)$ となり、 $Z = 100 \times (1 - S21) / S21$ が得られます。

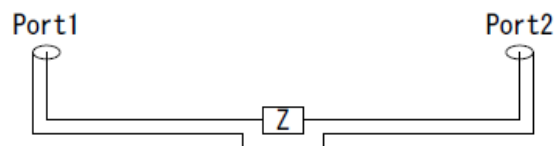


図10 シリーズスルーによるインピーダンス測定

以上のインピーダンス測定も、インピーダンスそのものを直接測定しているわけではなく、測定されているのはSパラメータで、インピーダンスはそこから計算で求めています。

このとき、それぞれの測定法にとって、得意分野と不得意分野があります。S11から得るインピーダンスは50Ω近辺の値は正確に測定できますが、小さいインピーダンスや大きいインピーダンスは誤差が大きくなります。シャントスルー法は小さいインピーダンス、シリーズスルー法は大きいインピーダンスの

測定に適しています。

5. 測定ミスあれこれ

ネットワークアナライザの「賢い機能」を紹介しましたが、いずれの場合も、表示される「測定値」はネットワークアナライザが本当に測定した値ではありません。測定したデータに大量の演算処理を施した値が表示されているわけです。CPUの高速化が進み、あるときから、演算処理にかかる時間が測定そのもののスピードより短くできるようになりました。演算結果がリアルタイムに表示されると、ユーザーは表示されているデータが、あたかも直接に測定したデータであるかのような錯覚に陥ります。

こうなると、ネットワークアナライザ表示される「測定値」(ほんとは演算処理結果)を見るだけでは、接続や設定が正しく行われていたかどうかわかりにくくなります。もしx x xだったら、という演算処理で正しい答えに至るのは、被測定物とネットワークアナライザが正しく接続されていることが大前提です。

よくあるミスを紹介いたします。

・コネクタの緩み

コネクタが緩んでいると測定値がおかしくなります。緩みといっても、ガタガタしていれば気づくでしょうが、手で絞めてしっかりと固定したつもりでも、高周波でグラウンドが接触していないことがあります。数GHzまでの測定ならなんとかごまかせるかもしれませんが、10GHzより高い周波数になると、しっかりとトルクレンチで締めないとグラウンドの接触が弱く、測定値にディップが出てきます。普通にS21を見ている分にはすぐに気づくのですが、「賢い機能」を用いると、気づきにくくなります。

・CALキットの不良

校正キットはしっかりと確認しないとけません。グラウンドの接触部分が汚れていたり、内部導体の穴が広がりすぎていたりすると、校正そのものが不良になります。また、校正をするときにもしっかりとトルクレンチを使わないといけません。校正でミスをする、測定がおかしいのか、その前の校正がおかしいのかを分離する作業から始めなければなりません。何か怪しいデータが出たら、校正を最初からやり直すのが近道です。それ以前の問題として、データが怪しいことに気づかないといけません。「賢い機能」に埋められると見落としがちです。

・CALキットの定義ミス

CALキットのOpenは0pFではなく、わざと少し

容量を付けています。Throughは理想の短絡ではなく、有限の電気長があります。ネットワークアナライザのCALキットに何を使っているかを教えてあげる必要があります、そのためのメニューがあります。ここを間違えるとCALが間違ってしまう。E-CALを使うとこの問題はなくなるのですが、ケーブルやコネクタの状態によって、E-CALが必ずしも使えりとは限りません。

・グラウンド

信号線の接続には多くの人が気をつかいますが、グラウンドにも気をつかわないといけません。高周波では信号線を通る電流に対して、必ずグラウンドに流れるリターン電流が存在し、それは、常に信号に寄り添うように流れます。グラウンドが途絶えていたり、信号とグラウンドが遠く離れたりすると、信号そのものが流れなくなります。

デバイスそのものは正常に動作していても、グラウンドに不備があると、デバイスが動作していないように見えてしまうことがあります。そこに、「賢い機能」がグラウンドの不良を覆い隠すとほとんど気づかなくなります。

・ドリフト

電子部品は温度によって特性が変わります。測定器の内部にも温度によって特性が変化する部品が多く入っています。それゆえ、測定器は電源を入れてから最低30分は待ってから使うのが好ましいです。電源を入れて、すぐに使い始めると最初のデータと後のデータのつじつまが合わなくなることがあります。特にCALのタイミングは重要です。測定器が冷たいうちにCALをして、測定を始めるころには内部が温まっていると、校正が正しくできません。測定器の内部温度が十分に安定してからCALをするのが望ましいです。

図11はネットワークアナライザのパワーオンからのドリフトを示します。パワーオン直後のデータで規格化し、そこからの差分を見ています。最初の30分間はドリフトが大きいですが、その後安定しているのがわかります。

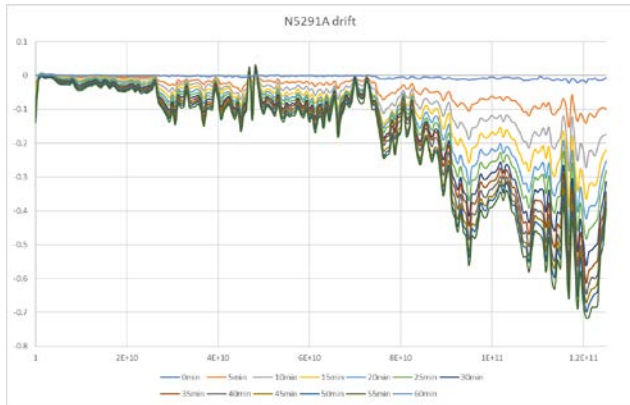


図 1.1 ネットワークアナライザの温度ドリフト

・ケーブル

ケーブルは使用周波数に適したものを使わないといけません。安価なケーブルは軽く曲げただけで大きく特性が変わります。高周波になるとケーブルも高くなりますが、必要な測定精度を知り、その要求を満たすケーブルを選ぶべきです。

・ケーブルの動き

CAL をとったあとは、理想的にはケーブルを動かしてはいけません。しかし、CAL キットと被測定物は大きさやコネクタの向きが異なるため、ケーブルを動かす必要が生じます。このときも、適正なケーブルを用いて、さらに CAL 後のケーブルの変形は最小になるように配慮すべきです。

ミリ波に近い周波数では、ケーブルを少しでも動かした後は、「なじむ」まで待ってから測定する方が安定します。ケーブル内部の誘電体にストレスが加わり、安定するまでに時間がかかるからです。

しつこいですが、「賢い機能」を使うと、ケーブルの動きによる誤差はほとんど気づきません。ケーブルの状態を確認するには、生の S パラメータを見るべきです。

・過大パワー

出力パワーが大きすぎると、アクティブデバイスは歪みます。アンプの特性を測定するときに、アンプが歪んでないことを確認しないといけません。パワーを少し下げると測定値が変化するようなら、パワーの入れすぎです。

・過少パワー

逆にパワーが小さすぎてもいけません。減衰の大きいところの特性がノイズフロアに埋もれてしまいます。測定したいものに応じた最適なパワーがいくらかの測定前に考えておくことが望ましいです。

・測定点数

鋭い共振のあるデバイスを測定するときは、測定点を細かくとらないといけません。測定点のすき間に共振があっても見つからないこともありえます。共振のあるデバイスとわかっているときは気を付けますが、本来あってはならない共振ができてしまうこともあります。例えば、電源パターンがたまたま共振器になってしまって、信号線とカップルしているといったケースです。こういうケースを見逃さないためにも、測定点は多めにとるのが望ましいです。

例えば、基板の $\tan \delta$ が 0.001 なら、共振としては $Q = 1000$ のものが存在するわけですので、最悪ケースでの共振を見逃さないためには、フルスパンで見ると測定点としては、1000 点は欲しいところです。十分な測定点があれば、「賢い機能」が覆っていてもトレースにヒゲが出るので、何か変だと気づくでしょう。

・掃引

ネットワークアナライザは、Linear 掃引と Log 掃引を設定することができます。デジタル信号を通すようなデバイスは、広帯域を要求されます。Linear な測定点では、低周波でのデータ点が荒くなり、低周波の周波数依存性の情報が欠落します。例えば、100kHz の次の点が 10MHz になったりします。広帯域のデバイスの場合、掃引は Log にするのが望ましいです。

・IFBW

ネットワークアナライザには IFBW があります。IFBW はレシーバーの測定バンド幅に相当します。バンド幅を狭くすれば、ノイズが下がりますが、測定に時間がかかります。いたずらに IFBW を狭くし過ぎると、測定時間が長くなり、ドリフトが生じることがあります。必要な測定精度を考えて、最適な IFBW を決める必要があります。

広い IFBW で CAL をとり、測定の際に IFBW を狭くしても意味がありません。CAL のデータに、すでに広い IFBW に相当するノイズが含まれてしまっています。IFBW を狭くして使うときは、CAL の際にも同じ IFBW を用いるべきです。

6. まとめ

ネットワークアナライザには多くの「賢い機能」がありますが、使い方を誤ると、間違ったデータを信じてその後の設計に使ってしまう危険性があります。「賢い機能」を使う前に、設定や接続や校正が正しいことを確認することが必要です。そのためには、自分

のデバイスのおおよその特性については理解しておくべきです。だいたいこれくらいの値になるはずだ、という期待値を持って測定を開始すれば、接続や設定がおかしかったときに気づくはずです。そのためには、まずは、生の S パラメータを見たほうがいいでしょう。「賢い機能」をいきなり用いると、ミスに気づきにくくなります。「賢い機能」はとても便利なのですが、ミスに気づきにくくなるという両刃の剣と心得た上で使うべきでしょう。

文 献

- [1] 戸高嘉彦、堀部雅弘，“マニュアルにない計測技術”
MWE 2016 基礎講座ダイジェスト
- [2] Keysight Technologies Application Note, “Specifying Calibration Standards and Kits for Keysight Vector Network Analyzers”
- [3] Keysight Technologies Application Note, “Applying Error Correction to Vector Network Analyzer Measurements”
- [4] Doug Rytting, “Network Analyzer Error Models and Calibration Methods”

著者紹介

柳本吉之 代表取締役 株式会社関東電子応用開発