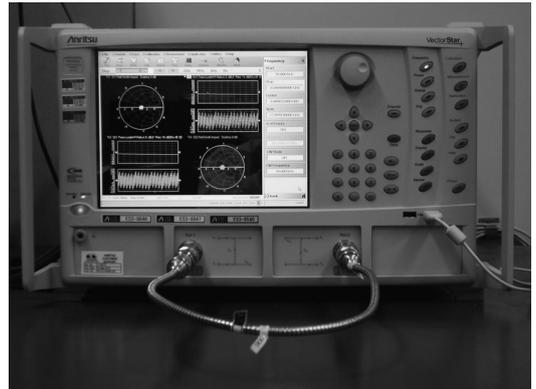


今どきの高周波測定技術と測定器管理の基礎知識

～ その5 高周波インピーダンス較正の実際 ～

高周波電力や高周波減衰量を測定する場合、その測定値は一定の高周波インピーダンスの下で行うことが求められる。無線通信装置の場合、その多くは 50Ω が規格値となっている。つまり、測定対象となる無線通信装置の高周波インピーダンスをあらかじめ測定して把握しておかなければ高周波電力は測定できないということになる。ならば、高周波インピーダンスに対しても正確な標準を用意して、その測定方法を確立しておく必要がある。今回は高周波インピーダンスの較正について話を進めたい。



ベクトルネットワークアナライザの概観

アンリツカスタマーサポート株式会社
山崎 俊雄

はじめに

高周波回路の結合では、モジュール毎の高周波インピーダンスの違いによりその結合面で伝送信号の反射が生じることがある。実際にパワーメータで高周波電力を測定する場合は、信号発生器とパワーメータの高周波インピーダンスが一致していないと正しく高周波電力を測定することができない。そこで、信号発生器、パワーメータそれぞれにおいてあらかじめ高周波インピーダンスを測定することが必要になる。実際にパワーメータの高周波インピーダンスはベクトルネットワークアナライザ (VNA) などを利用して測定されるが、次なる興味はこれらの高周波インピーダンスの測定結果がどのくらい正しく表示されているのか、ということである。

今回は、高周波インピーダンス測定の確度評価について考察する。まず、SI 単位に接続する高周波インピーダンスの基準の獲得方法について簡単に触れる。高周波インピーダンス測定は VNA を用いることが一般的になっており、通常は VNA を正しく「目盛合わせ」することで、高精度な高周波インピーダンス測定が可能となる。この「目盛合わせ」の手順についても概説する。最後に、高周波インピーダンスの較正に欠かせない「較正キット」の管理方法について説明する。

高周波インピーダンスの定義

高周波インピーダンスは高周波伝送路の機械的形状によって確定される [1]。同軸線路の場合、外導体の内径と中心導体の外径の比率、および外導体と中心導体の間に充填される媒質の比誘電率によって一義的に決定される。

一般的に比誘電率が完全に均一となる媒質を人工的に作り出すことは難しく、比誘電率が比較的均一で最も安価に得られる素材は「空気」ということになる。そこで考案されたのが図 1 に示すような構造を持った同軸線路であり、このような同軸線路はエアラインと呼ばれている。



図 1 エアラインの構造

エアラインの特性インピーダンスの定義式を(1)式に示す。(1)式を見てお分かりのように、特性インピーダンスは機械的寸法のみによって確定する。従って、高周波インピーダンスの基準は精密な機械的寸法の計測によって作られており、SI単位へのトレーサビリティは「長さ」によって結合することになる。

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{d_2}{d_1} \cong \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad \dots (1)$$

- 但し
- ϵ : 媒質の誘電率
 - ϵ_r : 媒質の比誘電率
 - μ : 媒質の透磁率
 - d_1 : 中心導体の外径
 - d_2 : 外導体の内径

実用面の利便性を考慮し、エアラインの両端には同軸コネクタが装着されており、N型、PC-7型、PC-3.5型、K型、V型など各種のコネクタに対応したタイプが製作されている。エアラインの長さ(L)は、使用する周波数帯によって異なるが、一般的に使用する周波数帯が低い場合にはエアラインの長さが著しく長くなる。しかし、卓上での使用を考慮した場合、あまり長いものは実用性を欠くので、長くても30cmまでであることが多い。写真1に実際のエアラインの例を示す。

現在のところ、高周波インピーダンスに対して国家標準へのトレーサビリティを確保する方法は2つある。一つはエアラインの機械的寸法を較正する方法、



写真1 エアラインの例 (N型: 全長 30cm)

もう一つは1開口素子または2開口素子に対してSパラメータを較正する方法である。

VNAの目盛り合わせ

実際に高周波インピーダンスの測定方法は種々考案されているが、同軸線路の場合、現在ではVNAを用いて反射特性(S_{11})を測定する方法が一般的となっている。VNAは、そのままでは測定偏差が大きいので、較正キットを用いて「目盛り合わせ」を行うが、このときの「目盛り合わせ」による補正の原理について少し考察してみたい。

VNAによる反射測定の構造を図2に、またその構造におけるシグナルフローグラフを図3に示す。

図3において、 D は方向性結合器の方向性を、 M_s は測定端と被測定器(EUT)とのミスマッチによって生じる多重反射波の影響分を、 T_r はEUTからの反射波の減衰や位相回転による影響分を、そして Γ_d はEUTの反射そのものを示している。図2の構造で、入射波の振幅 a と反射波の振幅 b を正確に測定することができれば、反射率は b/a で求められる。ここで D と M_s が0で、 T_r が1であることが理想であるが、現実にはそのようにはならず、 b/a の測定結果は D 、 M_s 、 T_r の理想的な状態からのずれの影響を受けることになる。

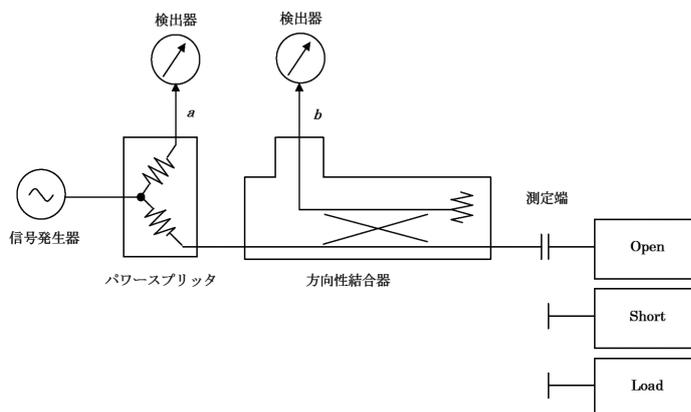


図2 VNAによる反射測定の構造 (1-Port測定)

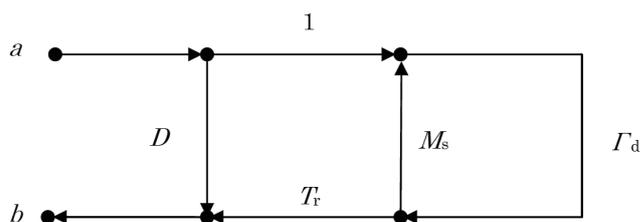


図3 VNAの反射測定におけるシグナルフローグラフ

そこで、 D 、 M_s 、 T_r の影響を何らかの方法で検出してそれを補正值として把握しておき、実際にEUTの反射を測定するときには、その補正值を加えて正しい反射量を求めることが必要になる。図3において b/a は以下の式で表すことができる。

$$\frac{b}{a} = \Gamma_m = D + \frac{T_r \cdot \Gamma_d}{1 - M_s \cdot \Gamma_d} \quad \dots (2)$$

(2)式では未知のパラメータが D 、 M_s 、 T_r の3つあるので、 Γ_d が既知のデバイスを3つ接続してそれぞれに対して測定値(Γ_m)を数値で求めれば、実際に D 、 M_s 、 T_r の3つの補正值を計算で求めることができる。 Γ_d が既知のデバイスとしては、通常Open($\Gamma_d = 1$)、Short($\Gamma_d = -1$)、Load($\Gamma_d = 0$)が用いられている。一般的に、このような補正計算はVNAの内部で自動的に実施されており、これがOSL(Open-Short-Load)法によるVNAの反射測定における目盛り合わせ作業ということになる。Open、Short、Loadは1セットで「較正キット」と呼ばれている。写真2に実際の較正キットの例を示す。



写真2 較正キットの例 (N型-FemaleとN型-Male : 上から Open, Short, Load)

高周波インピーダンスの較正方法

さて、OSL法で用いるOpen、Short、Loadは、それぞれの反射特性が完全に1、-1、0である訳ではない。また、VNAの側にも目盛り合わせだけでは補正しきれない残留要素がある。この結果、目盛り合わせを実施した後も僅かながら D 、 M_s 、 T_r の残留分が存在する。ここでは、これらの残留分をそれぞれ δ (残

留方向性)、 μ_s (残留ソースマッチ)、 τ_r (残留反射トラッキング)と表すことにする。さて、この δ 、 μ_s 、 τ_r を知るためにはどうしたらよいであろうか。方法はいくつか考えられるが、代表的な2つの方法を以下に紹介する。

リップル法

エアラインにLoadを接続して反対側を測定端に接続する。周波数を掃引すると δ により b の位相が回転してリップルを観測することができる。このリップルの振幅から δ の大きさを求めることができる。

また、エアラインにShortを接続して反対側を測定端に接続する。周波数を掃引すると、 μ_s により b の位相が回転して同様にリップルを観測することができる。このリップルの振幅から μ_s の大きさを求めることができる。このとき、 τ_r の影響がなければ μ_s の影響以外の b の振幅の変動はないはずであるが、実際には τ_r のために b の振幅に μ_s の影響以外の変動が見られるようになる。 μ_s の影響を差し引いた変動分を求めることで、 τ_r の大きさを求めることができる。

ここで、もしエアラインが「長さ」の測定によって正確に高周波インピーダンスを較正されたものであれば、特性インピーダンスに対してどのくらいの残留成分があるのかを客観的に測定することができる。この残留分が「目盛り合わせ」の限界点であり、VNAの測定不確かさとして取り扱うことになる。

3-known法 [2]

未知の残留分のパラメータが δ 、 μ_s 、 τ_r の3つあるので、 Γ_d が既知のデバイスを3つ接続してそれぞれに対して Γ_m を求めれば、実際に δ 、 μ_s 、 τ_r の3つの値を計算で求めることができる。もし、この3つのデバイスが高周波インピーダンスの標準によって較正されたものであれば、3つの較正值を利用することでVNAの目盛り合わせの不完全さを知ることが出来る。その不完全さを補正すれば、結果としてより正確な測定値が求められる。

ただし、この場合の3つのデバイスに対する較正值は複素数であることが必要であり、振幅と位相を含んだSパラメータによる較正結果を得ていることが必要になる。また、測定結果の評価も複素数で行うことが必要になるので、補正計算がかなり複雑になるという欠点がある。

高周波インピーダンス較正の注意点

実際に VNA の目盛りあわせを行うのは Open、Short、Load の 3 つのデバイスであるが、ここで、ついで D 、 M_s 、 T_r の目盛り合わせと δ 、 μ_s 、 τ_r の評価を同じ Open、Short、Load で同時に行ってしまう、という誘惑に駆られてしまいそうになる。実際に、Open、Short、Load の 3 つのデバイスに対して標準による S パラメータの較正を施しておけば、それも可能になるのは事実である。

しかし、較正キットとしての Open、Short、Load の 3 つのデバイスは目盛り合わせの道具として日常的に頻繁に使用するものであり、常にコネクタの磨耗や破損のリスクにさらされている。企業内で維持管理する参照標準のレベルを考えると、目盛り合わせの道具と参照標準を兼用することはあまり好ましいとは言えないだろう。

そこで、標準へのトレーサビリティの取り方を図 4 のようにすることが考えられている。VNA の普段の目盛り合わせの作業に使用する較正キットとは別に、国家標準へのトレーサビリティを確保する参照標準を確保すること、そして目盛り合わせを行った後にこの δ 、 μ_s 、 τ_r を評価した結果の妥当性を確認するための検証用デバイスを用意しておくこと。この 2 つを満たすことができ、はじめてリスクを管理しながら十分な測定精度で高周波インピーダンスの較正ができるようになる。

検証用デバイスの具体例としては標準ミスマッチ (エアライン) や固定減衰器などが考えられる。

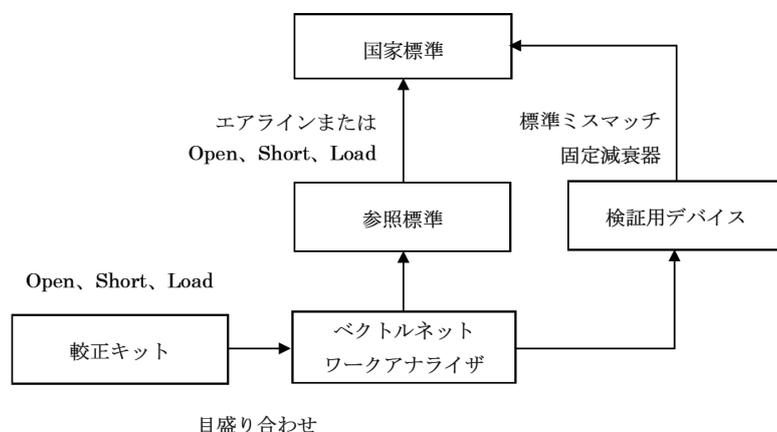


図 4 高周波インピーダンスのトレーサビリティ体系の例

まとめ

ここまで 5 回に渡り、高周波測定に係る基礎測定器に対する較正の概要について説明してきた。測定器の較正における注目点は大きく 2 つある。

ひとつは、これまでの説明で触れてきた技術的背景を基点とした測定器への較正方法そのものへの理解を高めることである。測定という「行為」を意味のあるものとして活用するためには、測定器が指し示す数値に対して論理的な確証を与えなければならない。その確証を与えるストーリーは、SI に遡る標準との比較、モデル式を構築した解析、測定の偏りの補正、さまざまな測定の不確かさ要因を考慮すること、などから成り立っている。これを一つひとつ丁寧に紐解くことこそが正確な測定値を得るためには不可欠であることを忘れてはならない。

もうひとつは、国家標準を頂点とする計量計測のトレーサビリティを確立し、それを社会的なインフラ維持の品質システムに取り込むという点である。同じ対象物を測定する場合、測定器による測定結果は世界中の何処で誰が行っても同じ結果となることが望ましい。これを実現するためには SI を頂点とする国際単位系に結合した国家標準を各国が保持し、それらに国内の事業者が計量計測のトレーサビリティを確保することが必要である。

様々な情報端末機が、国境を越えて自由自在に使用できるのは、情報端末機に対する各国の検査基準の同等性が保たれているからこそ実現できる。しかし、昨今は安価だが性能の検証が十分に行われないうまま市場に流通する製品も多いと聞く。消費者の選択肢が多様化する中で、信頼できる測定結果に基づいた製品の供給がますます重要になっていると言えよう。

無線局の登録検査から、情報端末機の評価まで、高周波測定器の活躍の場は益々広がりを見せている。高周波測定器の適正な管理が、未来の無線情報通信環境の整備には不可欠なることを信じて止まない。

参考文献

- [1]大森俊一、横島一郎、中根央;「高周波・マイクロ波測定」1992年、pp.38～pp.39、コロナ社
- [2]堀部雅弘;「エアラインを用いた VNA 評価の課題と新しい残留不確かさ評価方法」、NMIJ 高周波クラブ第 7 回会合資料、2009年 7月