

ベクトルネットワークアナライザ計測の基礎と応用 Basics and Application Measurements by Vector Network Analyzers

岸川 諒子

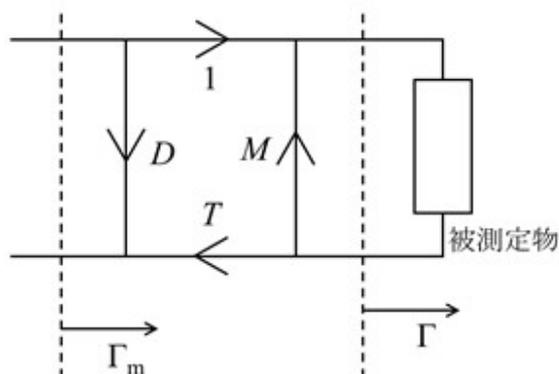
Ryoko KISHIKAWA

国立研究開発法人産業技術総合研究所

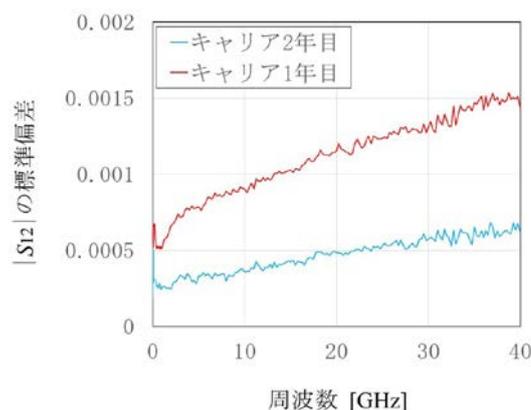
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

和文概要

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) は、回路や材料の高周波特性を測定する装置として研究開発に貢献してきた。VNA は非常に有用である一方、使いこなすには深い知識と経験が必要とされる。本講では、VNA の測定原理およびモデルを紹介し、キャリブレーションの意味と重要性を説明する。さらに、測定の精度や確度を悪化させる要因を挙げ、対策方法について述べる。これらの基礎的事項を基にして、被測定物の特性に合わせた測定のブラッシュアップ方法の例を紹介する。



1ポートベクトルネットワークアナライザのモデル



コネクタ接続の技術の比較

Abstract

Vector network analyzer (VNA) has been contributed to research and development as a measurement instrument for high-frequency characteristics of circuits and material parameters. Although the VNA is a useful measurement instrument, deep knowledge and experience are required to master it. In this presentation, we introduce its measurement principle and model. Then, we explain why calibration of VNA is necessary and it is important. Furthermore, we describe some approaches to uncertainty factors which may decrease measurement precision and accuracy. Finally, with these basics, we introduce some calibration methods that are suitable for a device under measurement.

1. はじめに

周波数資源の有効活用や自動運転技術への応用を目指し、高周波領域において電磁波を応用した研究開発が盛んに進められている。このような目的を達成するために、今日では高周波測定器の高機能化および低価格化が進み、研究開発の現場で一般化してきている。

その一方で、研究開発従事者の高周波測定技術の修得が問題になっている。直流や低周波領域の測定と比較して、高周波領域の測定には特有の難しい点がある。しかし、それを学ぶための資料や経験を積むため機会が非常に少ない。特に初学者にとっては、高周波測定が手順を追うだけの単なる作業になってしまっている場合もある。

単なる作業として高周波測定を行うと、目的に対して有用な測定結果を得ることは難しくなる。高周波現象は複雑で、その点に注意して測定システムの構築や測定を行う必要がある。注意点に気づかずに測定を行うと、誤った結果を出してしまうことも考えられる。さらなる問題として、誤っていることに気づかずに研究開発を進めてしまうことも考えられる。結果的に、研究開発がストップし、問題があることは認識しているものの、何が問題なのかがわからない迷路に入り込んでしまう可能性がある。

適切な高周波測定結果を得て、効率的に研究開発に結びつけるためには、測定装置の原理を知り、各々の手順にどのような意味があるのかを理解することが重要である。本稿では、初学者を対象として、高周波測定器として一般的なベクトルネットワークアナライザ (VNA) の紹介を行う。はじめに、VNA の回路と測定の原理を示し、測定プロセスの意味について述べる。さらに、VNA 測定において精度や確度を悪化させる要因を挙げ、改善方法を記す。これらの基礎的事項を土台にして、VNA 測定の応用について述べる。

2. ベクトルネットワークアナライザ

2.1. ベクトルネットワークアナライザで何が測れるか

VNA は周波数ドメインでの反射係数や S パラメータの測定を行う装置である。最大の特徴は、後ほど説明する定義面と呼ばれる伝送線路上の特定された地点での反射係数または S パラメータを測定できることである。付加的機能として、測定結果を様々な物理量に変換し、各々の研究開発へ展開することが可能である。高周波材料分野における誘電率や透磁率は代表例である [1]。

最近では、時間ドメインの測定も盛んになってきている。周波数ドメインではわからなかったミスマッチの位置が特定可能になり、パルス入力への応答

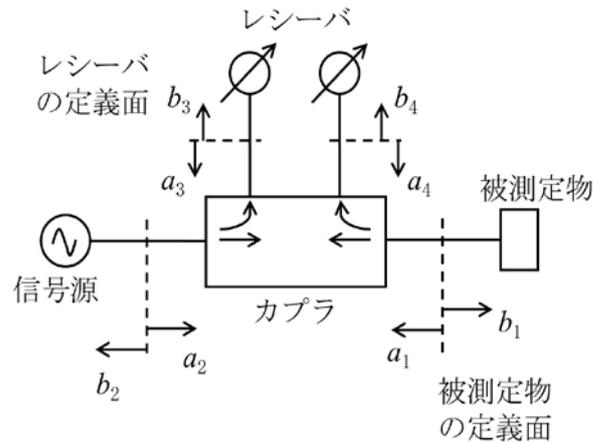


図1 1ポートVNA回路の概略

を測定することもできる。他にも、高周波非線形応答の測定や、多ポート化、小型・軽量化等が急速に進んでいる [2]-[4]。

2.2. 測定原理とモデル化

ここでは、VNA の最も基本的な測定である周波数ドメインでの 1 ポート反射測定の原理とモデル化について述べる。2 ポート以上の測定や時間ドメイン測定等の応用測定に関しては、他の文献を参照されたい [5]-[12]。VNA の内部回路は非常に複雑である。しかし、その複雑な内部回路から主要な機能を抽出することで、VNA をモデル化することができる。

図1が、1ポートVNAの回路から主要な機能を抜き出した概略図である。信号源から伝播した高周波信号は、カプラにより一部の信号は分岐してレシーバで検出され、残りは被測定物へと伝播する。入射信号の一部は反射するが、この反射信号はカプラにより分岐されてもう一つのレシーバで検出される。被測定物の反射係数 Γ は波振幅 b_1 に対する a_1 の比であるが、VNA で検出される反射係数 Γ_m は波振幅 b_3 に対する b_4 の比である。ここで重要なポイントは、 Γ と Γ_m は一致しないことである [5]-[12]。

Γ と Γ_m の間の関係式は、信号源、2 個のレシーバ、測定用ポートの計 4 ポートの間をブラックボックスと考え、そのブラックボックスを S パラメータで表すことで得られる。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

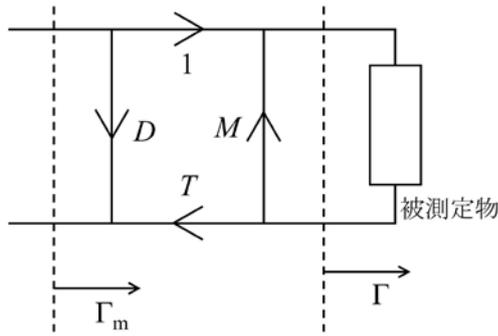


図2 1ポートVNAのモデル

ここから、以下の Γ と Γ_m の関係式が得られる。

$$\Gamma_m = D + \frac{T\Gamma}{1 - M\Gamma} \quad (2)$$

ここで、 D 、 M 、 T はブラックボックスのSパラメータの関数で、ディレクティビティ、マッチング、トラッキングと呼ばれる。式(2)の等価回路モデルが図2である。注目すべきは、式(1)の中では16個のSパラメータが存在するが、 Γ と Γ_m の関係を導くためには3個のパラメータがわかればよいという点である。

被測定物の特性 Γ とレシーバで得られる Γ_m が一致しない原因は、VNAは高い周波数の電磁波が伝播した結果を測定しているからである。例えば、10GHzの電磁波は、自由空間での波長が約30mmである。被測定物とレシーバの間には一般的に100mmオーダーの物理的な距離があり、それらの間で電磁波は減衰と位相回転を起こす。この影響を表すのが、 D 、 M 、 T である。

したがって、回路の長さに対して波長の長さが同程度または短くなる高周波領域の電磁波の解析では、どの位置での状態を表す物理量かを明記する必要がある。これを定義面と呼び、図1では破線で示している。図1の波振幅は、各ポートの定義面における値である。

2.3. キャリブレーションと測定の手順

1ポートのVNAで測定される反射係数 Γ_m と被測定物の反射係数 Γ は、式(2)で関係付けられていることがわかった。この式には、 D 、 M 、 T の3個の未知のパラメータが存在し、これらの値が決まると、被測定物の Γ_m から Γ を算出することができる。そこで、3個の未知パラメータを決定するプロセスが、VNAのキャリブレーションである。

3個のパラメータを決定するためには、特性が既知である3個のキャリブレーション用デバイスが必要になる。各々の反射係数を Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 とし、その測

定値を Γ_{m1} 、 Γ_{m2} 、 Γ_{m3} として式(2)を解くと、 D 、 M 、 T に関して以下の式が導出される。

$$D = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Gamma_1 & \Gamma_1\Gamma_{m1} & \Gamma_1 \\ \Gamma_2 & \Gamma_2\Gamma_{m2} & \Gamma_2 \\ \Gamma_3 & \Gamma_3\Gamma_{m3} & \Gamma_3 \end{vmatrix}$$

$$M = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & \Gamma_{m1} & \Gamma_1 \\ 1 & \Gamma_{m2} & \Gamma_2 \\ 1 & \Gamma_{m3} & \Gamma_3 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 1 & \Gamma_1\Gamma_{m1} & \Gamma_{m1} \\ 1 & \Gamma_2\Gamma_{m2} & \Gamma_{m2} \\ 1 & \Gamma_3\Gamma_{m3} & \Gamma_{m3} \end{vmatrix} + DM$$

$$\Delta \equiv \begin{vmatrix} 1 & \Gamma_1\Gamma_{m1} & \Gamma_1 \\ 1 & \Gamma_2\Gamma_{m2} & \Gamma_2 \\ 1 & \Gamma_3\Gamma_{m3} & \Gamma_3 \end{vmatrix}$$

VNAキャリブレーションのプロセスでは、実際に3個のデバイスを接続してデータが取得され、式(3)に基づいて D 、 M 、 T の計算が行われている。

最も一般的な1ポートVNAのキャリブレーション方法が、3個の既知のデバイスとしてオープン・ショート・ロード終端器を用いるOSLである。オープン終端器の反射係数 Γ は1、ショート終端器は-1、ロード終端器は0であるため、式(2)と(3)が Γ について簡単に解けるというメリットと、各々の終端器が比較的实现しやすいというメリットがあるため、広く用いられている。

まとめると、VNAは被測定物の定義面での反射係数やSパラメータを測定できる装置である一方、VNA内のレシーバで検出される値は、装置内での信号の減衰および位相変化により定義面での値と異なっている。その間の関係式を決定し、補正する作業がキャリブレーションである。これが、VNAのキャリブレーションが重要な理由である。

3. ベクトルネットワークアナライザ測定で注意すべきポイント

3.1. 注意して測定しなければならない理由

VNA測定に注意が必要な理由は、測定を行う定義面と信号を検出するレシーバの距離が離れているためである。高周波領域では、電磁波の波長が被測定物の定義面とレシーバの間の距離より短くなり、その間を伝播する間に電磁波の減衰と位相回転が起こる。キャリブレーションにより、これらの影響を適切に補正しなければ、得られた結果は意味がないものになってしまう。この波長の問題は、直流や低周波領域においては深刻ではなく、高周波領域で顕著な問題である。

この高周波領域における短い波長の問題は、 Γ と Γ_m の間の関係以外の点でも測定に深刻な影響を及ぼ

す。3.2 に示すように、VNA と被測定物の接続やケーブルの使用等でも問題となる。さらに、寄生成分を生じさせるため、測定システムの構築にも注意しなければならない。

このような VNA 測定の課題に対し、万能な解決方法は存在しない。高周波現象を理解し、問題が起こった場合の対処方法の引き出しを多く持ち、実際に目の前で起こっている課題に向き合っていくことが重要である。

3.2. 測定の精度と確度を悪化させる要因

以下に、VNA 測定結果の精度と確度を悪化させる可能性がある代表的な 11 個の要因について紹介する [13][14]。VNA との接続には、同軸コネクタ、導波管フランジ、プローブ等様々な構造があるが、ここでは同軸コネクタを想定して説明する。しかし、多くの部分で、他の接続構造に対しても同様に考えることができるはずである。

現代の計測学によると、各要因を完全に除去、測定で真の値を得ることは原理的に不可能とされる [15]-[17]。しかし、影響を小さく抑える工夫は可能である。方法としては、オペレータの技術向上やより高機能なものに置き換えるパターンがある。両方法を融合することで、より精度や確度が高い測定結果を得ることが可能になる。

(a) コネクタの種類

同軸コネクタには様々な種類があるが、各々の特徴を理解した上で、目的に合わせて選択しなければならない。

最初に考えるべきは使用周波数帯域である。同軸線路は、TEM モードのみが伝播できるカットオフ周波数以下の帯域で用いられる [8][18]-[21]。そのため、測定したい周波数帯が、カットオフ周波数より小さくなるようにコネクタ径を選択する。現在、外部導体の内径が 14 mm のものから 1 mm のものが市販されているが、一般的に大きい径のコネクタの方が堅牢である。周波数帯域や測定スペースの問題がない場合は、大きな径を選択する方がよい。

次に考える点は、コネクタのグレードである。同軸コネクタには、国家計量標準に用いられる校正グレードのものから単純な接続用の汎用グレード、その中間の精密グレードがある [18]-[20]。校正および精密グレードでは、接続部分のミスマッチを小さくし、接続のばらつきを小さく抑えるために、汎用グレードよりも高い嵌合精度で設計・加工されている。さらに、部品の壁を厚くすることで、コネクタの寿命も長い。したがって、測定のテストポートには、

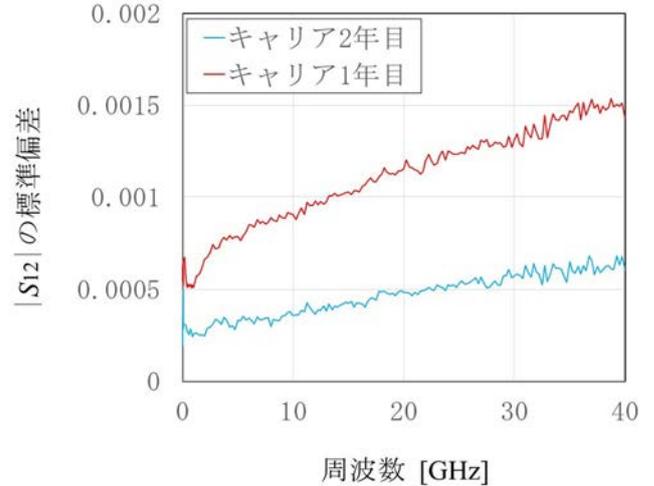


図3 オペレータによるコネクタ接続のばらつきの比較例

なるべく校正グレードのコネクタを使うことが望ましい。一方、テストポート以外で、接続したままの部分では、汎用コネクタが使われることも多い。

原則的に、同一種のコネクタ同士を接続することになっているが、機械的互換性 (mechanically compatible) と呼ばれるコネクタ間では、それらが異種であっても接続が可能である [19][21]。例えば、3.5 mm コネクタと SMA コネクタの接続が有名である。この組み合わせは物理的な接続は可能であるが、接続面での反射が大きくなる。さらに、SMA コネクタの加工精度が悪いため、3.5 mm コネクタの接続面が劣化する可能性がある。校正グレードと汎用グレードのコネクタを接続することは極力避け、間に精密グレードのアダプタを挿入する等の配慮が必要である。機械的互換の接続を行う際は、以上の可能性を考慮した上で行ってほしい。

(b) コネクタ接続の技術

コネクタの接続によるばらつきは、高周波測定の精度を悪化させる深刻な問題である。同じデバイスを何度もテストポートに接続した場合、各々のデータは一致しない。これが接続のばらつきである。図3は、高周波測定のキャリアが2年目の研究員と1年目の研究員のコネクタ接続のばらつきを比較したグラフである。テストポートの直接接続を6回繰り返した場合の $|S_{12}|$ の標準偏差を示している。キャリアが長い研究員の方が、1/2程度度のばらつきで接続できていることがわかる。

コネクタ接続のばらつきを小さくするには、接続訓練の積み重ねと、適切なトルクレンチの使用がある。トルクレンチを用いても、使い方が適切ではないとあまり意味が無い。トルクレンチを持つ場所、トルクレンチとレンチの角度、トルクを傾ける方向、トルクレンチがどの程度折れるまでトルクをかけるかには特に注意が必要である。トルクレンチの適切な使用法は絵や写真付きでメーカーから資料が提供されているので、参考にしてほしい[19]-[22]。また、長年同一のトルクレンチを使い続けると、緩んでいる場合がある。その場合は、規定トルクでコネクタを接続することができなくなるので、トルク調整が必要である。

(c) コネクタの中のゴミ・汚れ・破損

コネクタの中に小さなゴミや汚れがついている場合は、誤った値が測定される可能性がある。コネクタを接続する前には必ずルーペで中を覗き、異物や異常がないかを確認する必要がある。特に、ウイスカやスポンジのくずがコネクタ内に入り込みやすいので、見つけた場合はブロアで吹き飛ばせばよい。汚れの除去は、メーカーの専用リペアキットを用いることが望ましい[20]-[22]。リペアキットは使い方を誤ると内部の誘電体ビーズが劣化する可能性があるため、必ず説明書どおりの作業を行わなくてはならない。

傷がある場合は、接続を行わない方がよい。定義面に突起となっている傷がある被測定物をテストポートに接続すると、そのテストポートの接触面に傷がつき、そのテストポートを通じて連鎖的に他の被測定物へも傷を拡大させる可能性がある。傷がへこんでいるように見える場合も、念のために接続を行わないようにしたい。

破損に関しては、メス側のコネクタの内部導体に注意が必要である。スロットレスの内部導体では、フィンガーコンタクトの脱落や折れがないかを確認しなければならない。スロットがある内部導体では、スロットの一部分が広がる不具合がしばしば見られる。また、内部導体を保持するビーズの破損により、内部導体の位置が外部導体の中心軸からずれていることもある。これらの破損は接続相手の内部導体も破損させる可能性が高いので、絶対に接続を行わないようにすべきである。

これらに関する例は、メーカーから資料が提供されている[20][22]。実際のゴミや汚れ、破損の

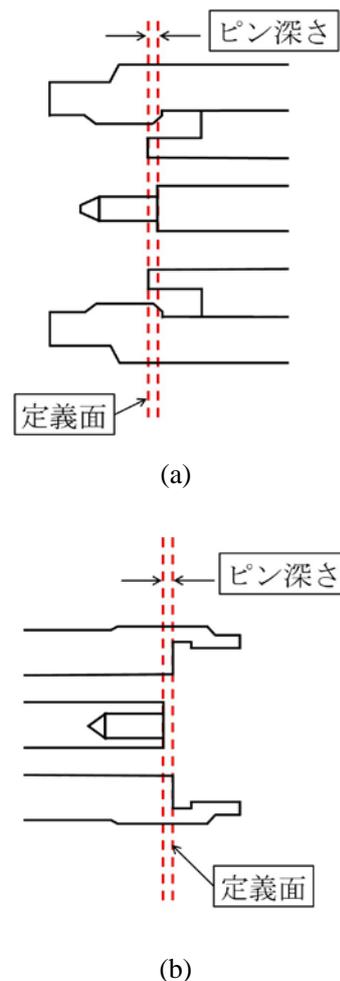


図4 3.5 mm 同軸コネクタの定義面とピン深さの定義

(a)オス側、(b)メス側、共に定義面に対して内部導体の接触面が内側にある場合

実例を見ることで、自らのコネクタや線路の状態を判断できるようになるだろう。

(d) コネクタピン深さ

同軸コネクタのピン深さとは、定義面と内部導体の接触面との距離と決められている(図4)。同軸コネクタの場合の定義面は、外部導体が接続相手と接触する面である[18]。理想的なピン深さは0 μm であるが、実際には差が存在する。

定義面と比較して、内部導体の接触面が外側に出ている場合は、接続を行うべきではない。接続相手の内部導体を壊す可能性が高いからである。他方、定義面と比較して、内部導体の接触面が内側にある場合は、接続による破損は起こらない。しかし、ピン深さの部分は内部導

体の外径が小さくなっており、接続部分における不要な反射が大きくなる。

多くの場合、キャリブレーションキットにピン深さを調べる装置がついている[21]。接続前にピン深さが仕様を満たしているかを確認するべきである。

(e) キャリブレーション用デバイス

経年変化や衝撃によりキャリブレーション用のデバイスが劣化していた場合、式 (3) の D 、 M 、 T の算出に問題が生じる。その場合、作業手順に問題はなくとも、得られるデータは意味がないものになってしまう。

キャリブレーション用デバイスの劣化は外観から判断できるとは限らないので、定期的にメーカーや校正事業者で校正を行うべきである。自ら管理を行う場合は、複数個のキャリブレーションキットを保管・管理する方法がある。複数個のキャリブレーションキットが同時に同じように劣化することは、確率的に考えにくい。したがって、複数個のキャリブレーションキットを互いに比較することで、異常を検出できる場合がある。また、3.3 で紹介するベリフィケーションも、キャリブレーション用デバイスの異常を検出する有効な方法である。

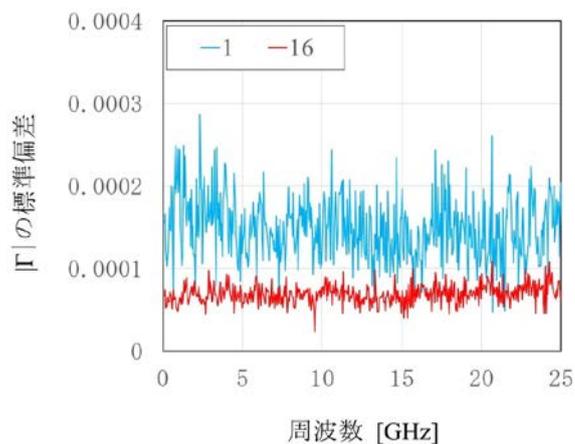
(f) VNA の設定

VNA には様々な設定パラメータが存在するため、これらを適切に選択することも重要である。主要な設定パラメータは、アベレージ、IF フィルタ帯域幅、ポートパワーである。これらの設定により、ノイズおよびダイナミックレンジが決定される[23]。

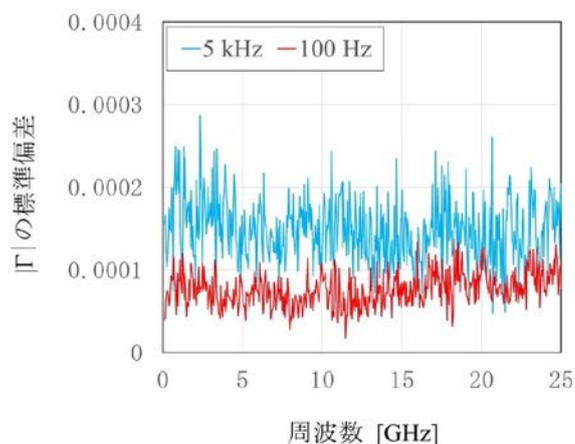
アベレージ機能を用いると、複数回のスイープの平均値を取得することができる。平均値をとることでノイズの影響が小さい、滑らかな測定データを得ることができる。一方、データを取得するために時間がかかることがデメリットである (図 5 (a))。

IF フィルタ帯域幅の設定では、ヘテロダイン検波で中間周波数に周波数変換する際の帯域幅を指定することができる。ノイズのパワーと帯域幅の間には比例関係があるため、IF フィルタの帯域幅を狭く設定するとノイズの影響が小さくなる。しかし、帯域幅を狭くすると、測定時間が長くなるデメリットがある (図 5 (b))。

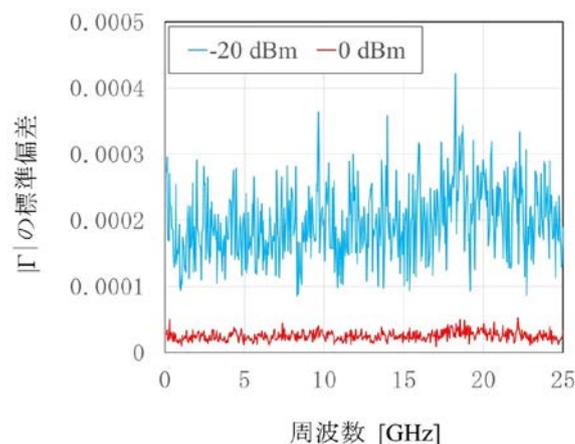
ポートパワーの設定では、入力パワーのレベルを調整することができる。一般的に、レシーバに入力するパワーが低い場合は、装置のノイ



(a)



(b)



(c)

図 5 VNA のパラメータ設定例

10 回測定の実験結果の反射係数絶対値の標準偏差を示した。(a) ショート終端器を接続、アベレージが 1 回と 16 回の比較、(b) ショート終端器を接続、IF フィルタ帯域幅が 5 kHz と 100 Hz の比較、(c) ロード終端器を接続、ポートパワーが -20 dBm と 0 dBm の比較。

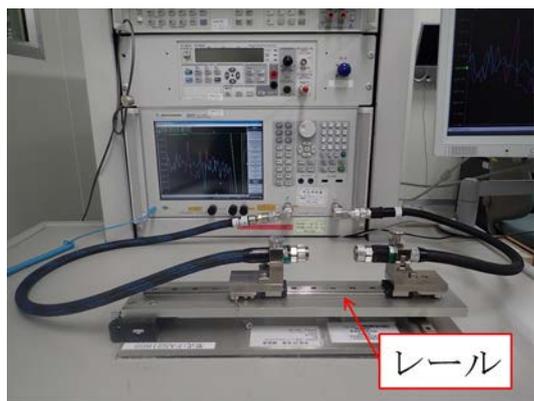


図6 ケーブルの動きを制御する機構の例

ズの影響が顕著になる。したがって、ノイズの影響を受けないレベルでポートパワーの値を設定しなければならない(図5(c))。

これらのパラメータの設定において、万能な組み合わせは存在しない。被測定物やVNA、部屋の環境に合わせて最適値を選択しなければならない。ノイズの影響が大きく、得られたデータの精度が足りない場合は、パラメータの変更を検討するべきである。

(g) ケーブル

ケーブルはなるべく自然な曲線の状態でも動かさないようにして使用したい。しかし、全く動かさないことは現実的ではないので、動かす範囲をなるべく小さくするように工夫するとよい[24]。また、ケーブルを動かした直後は、測定データが時間的に変動している可能性がある。数10秒待つと値が落ち着くこともあるので、連続スイープモードにして値を観察し、値が落ち着いた段階でデータを取得することも有効である。

ケーブルをレールに固定することで、想定しない動きや曲げが起こらないように制御したシステムの例が図6である。このようなシステムは被測定物の形状がシンプルで、レールが被測定物の接続を邪魔しない場合は、非常に有効な方法となる。

1 ポート測定の場合は被測定物を直接テストセットに接続するなど、なるべくケーブルを使用しないように工夫するとよい。被測定物の形状や測定スペースも考慮して、ケーブルの使用を見直すべきである。

(h) レシーバの直線性

レシーバは入射と反射または透過の電磁波

を検出する部分で、その直線性は重要である。直線性が悪い場合は、各波振幅の比であるSパラメータの測定結果の信頼性が低くなる。

レシーバの直線性を調べる方法は、特性が既知の可変減衰器をテストポートに接続して減衰量を変化させていった場合に、VNAで得られるデータもその変化量に応じて減衰しているかを確認すればよい。その結果、直線性に問題がある場合は、メーカーへ相談することを推奨する。

(i) ノイズ

ノイズを完全に制御し、除去することはできない。多くの場合、(f)で紹介した各種の設定パラメータを調整することで、影響を小さく抑えられる。

ノイズは、周波数に対して必ずしも一定または単調増加ではない。ある周波数点で特に顕著に現れることがある。このような特定周波数点での顕著なノイズは、VNAの内部回路が切り替わる周波数ポイントの可能性がある。それが原因の場合は、その周波数点でのみアベレージを増やしたりやIFフィルタ帯域幅を狭めたりして調整することを考えたい。最近では、デジタル応用のために広帯域測定が行われるようになってきている。そのような場合には、ノイズの周波数特性を注意して観察すべきである。

(j) 部屋の温湿度環境

測定を行う部屋の温湿度環境にも注意する必要がある。VNAだけでなく、ケーブルやキャリアレーション用デバイス等の全てのものを、なるべく均一で安定な温湿度環境に置くとよい。特に、温度依存性が高い抵抗体を含むロード終端器は気をつけなければならない。

図7は、温度安定の工夫の一例である。空調



図7 空調からの影響を低減する機構の例

の吹き出し口から出た冷気が直接ケーブルにあたらないように、シールドが設置されている。空調を高性能なものに置き換えることが難しい場合でも、温湿度の安定性を向上させることは可能である。他にも、VNA を専用のラックに収納するのも効果的である。また、大量の熱を発生させる装置を VNA の周辺に設置しないことも有効である。

(k) 長時間にわたる測定

測定が長時間にわたる場合は、データのドリフトがある。最高レベルの精密な VNA 測定を行う場合は、キャリブレーション開始から 2 時間程度で測定作業を終えることが推奨されている。

但し、作業効率の問題もあるので、現実的には 2 時間より長い時間の測定が必要な場合も多い。そのような場合は、キャリブレーションからどの程度の時間が経ってから得られたデータかをノートにメモしておき、異常があった場合に後から見直しができるようにしておくといよい。

3.3. 被測定物の測定前にできること

VNA 測定で注意すべき点を列挙し、対処方法を簡単に記した。しかし、マニュアル作業におけるミスは完全に除去することは難しい。そこで、被測定物の測定を行う前にミスを発見するベリフィケーション（検証）と呼ばれる方法を紹介する[25]。

ベリフィケーションでは、測定系をセットし、VNA のキャリブレーションを行った後に、特性が既知のデバイスを測定する。この測定結果と既知の特性を比較して一致していることを確認した上で、被測定物の測定作業に移る。さらに、余裕がある場合は、被測定物の測定後にも同じ既知のデバイスを測定する。キャリブレーション直後のデータ、被測定物測定後のデータ、事前に取得されていた特性を比較し、一致していることを確認することで、さらに信頼性の高い測定を行うことができる。

この特性が既知のデバイスは、3 個以上を独立に保管および管理しておくことが望ましい。1 個しか存在しない場合、ベリフィケーションの過程で、事前に取得しておいた結果と一致しないと、このベリフィケーション用デバイスが経年変化を起こした結果か、VNA のキャリブレーションまでの過程で間違いがあった結果かを判断することができないからである。

ベリフィケーションには市販のベリフィケーションキットを用いることも、独自のデバイスを用いることもできる。被測定物の特性と似た特性を持つベリフィケーション用デバイスを用いると解析がシン

プルになる。

4. 被測定物の特性に合わせた測定システムの構築

以上の基礎事項を基にすると、被測定物の特性に適した測定を考えることができるようになる。ここでは、様々な VNA のキャリブレーション方法とそれらの特徴を紹介し、目的に適した方法の選択が重要であることを述べる[5][6][26]-[29]。

1 ポートの VNA キャリブレーションでは、一般的にオープン・ショート・ロード終端器を使用した OSL が用いられる。また、OSL の発展として、スライディングロード終端器を用いて測定精度を向上させる OSL の発展版も用いられる。この方法では、反射係数面上において、スライディングロード終端器を用いて円を描き、フィッティングアルゴリズムで D を決定する。そのため、反射係数が小さい領域で測定の品質が向上すると考えられる。但し、スライディングロード終端器の取り扱いには高度な技術が必要とされる。

50 GHz を超える高周波帯では、ロード終端器の整合特性を確保することが難しくなってくる。したがって、ロード終端器の代わりにショート終端器のオフセット長を変化させた終端器群を用いるオフセットショートキャリブレーションが用いられる場合がある。

以上のように、一般的な 1 ポート VNA のキャリブレーションでは、主に周波数帯によりキャリブレーション方法が選択されることが多い。

1 ポート VNA キャリブレーションの応用として、被測定物の特性に合わせた方法の開発が行われている。一例が、電磁環境適合性 (EMC) 試験で用いられる擬似電源回路網 (AMN) のインピーダンス測定である[30]-[33]。EMC 国際規格の一つである CISPR 16-1-2 では、0.15 MHz から 30 MHz の周波数範囲における AMN は、インピーダンスの大きさに関しては $50 \Omega/50 \mu\text{H}$ を中心に $\pm 20\%$ 内であることを確認するよう求めている[34][35]。この測定を行う場合に、キャリブレーション用デバイスとして、 $50 \Omega/50 \mu\text{H}$ 、 $+20\%$ 、 -20% の特性を持つ 3 個のデバイスを採用する。これにより、キャリブレーションの解析が単純化される。同様に、インピーダンスの位相に関しては $50 \Omega/50 \mu\text{H}$ を中心に $\pm 11.5^\circ$ 内であることを確認しなければならない[34][35]。インピーダンスの位相を測定する場合には、 $50 \Omega/50 \mu\text{H}$ 、 $+11.5^\circ$ 、 -11.5° の特性を持つ 3 個のデバイスをキャリブレーションで用いる。このように、被測定物の特性と似たキャリブレーション用デバイスを用いることで、解析と測定の不確かさ評価が単純化される。

2 ポートの VNA キャリブレーション方法として最

も一般的なのが、オープン・ショート・ロード終端器とテストポートの直接接続で行われる OSLT である。必要になるデバイスが 1 ポートの OSL キャリブレーションと同じであり、親しみやすい。2 ポートの場合の OSLT も 1 ポートの場合の OSL と同様の問題があり、ロード終端器をスライディングロード終端器に変更する発展的な方法もある。

TRL と呼ばれる 2 ポートキャリブレーション方法もある。これは、2 ポートのエアライン、ショート終端器等の高反射終端器、テストポートの直接接続で行われる。TRL のポイントは、エアラインを使用する点である。エアラインは単純な同軸線路構造ではあるが、内部導体と外部導体が固定されていないデバイスである(図 8)。両者が固定されていないため、テストポートとの接続に高度な技術が必要になる。さらに、100 MHz より低い周波数帯域での利用には適さない。しかし、エアラインは 100 MHz 以上の周波数帯域における S パラメータの国家計量標準器としても採用されており、TRL キャリブレーションを行うと超高品質の測定が可能になる[36][37]。

TRL に似た方法として、TRM というキャリブレーションもある。この方法では、エアラインの代わりにロード終端器を用いる。テストポートとの接続が容易になるが、TRL と比較してキャリブレーションの確度は落ちる。

VNA のキャリブレーションは図 2 のような回路モデル中のパラメータを算出するプロセスであり、原則的にパラメータ数と同じ数の既知のデバイスが用いられる。しかし、パラメータ数を超える数のキャリ



図 8 エアライン

ブレーション用デバイスを用いるオーバーディターミンド (over determined : 冗長測定による決定) と呼ばれる方法が開発されている。冗長な数の式を連立させることで、 D 、 M 、 T をより高い確度で決めることを目的としている。キャリブレーション用デバイスの数が多くなるため作業効率の問題はあるが、スイッチによりテストポートとキャリブレーション用デバイスを高速で切り替えるオートキャリブレータへの実装により、広く用いられるようになってきた方法である[38]。

表 1 に各キャリブレーションの特徴をまとめる。各々の目的に合わせてキャリブレーション方法を選択してほしい。

表 1 VNA キャリブレーション方法の特徴

ポート数	キャリブレーション	特徴	確度	難易度
1	OSL	最も一般的な方法 主に 50 GHz 以下で適用		
	OSL (スライディングロード)	スライディングロードの取り扱いが難	OSL と比較して良	難
	オフセットショート	50 GHz 以上の周波数帯域で適用		
2	OSLT	最も一般的な方法 主に 50 GHz 以下で適用		
	OSLT (スライディングロード)	スライディングロードの取り扱いが難	OSLT と比較して良	難
	TRL	エアラインの取り扱いが難 高確度の測定が可能 100 MHz 以上の周波数領域で適用	OSLT と比較して良	難
	TRM	TRL の応用バージョン 100 MHz 以下の周波数領域で適用可能		

5. おわりに

本稿では、VNA の原理とモデル化、キャリブレーションの意味を説明してきた。さらに、測定の確度や精度を悪化させる要因を紹介し、対処方法について述べた。さらに、様々なキャリブレーション方法があり、目的に合わせて選択することで、測定品質が向上することを示した。

VNA 測定は高周波を扱うため、注意すべき事項が多く存在する。そのため、操作を誤ると、誤った結果が得られる可能性が高い。さらに、高周波現象の複雑さにより、誤った結果が出ていることに気づかず、研究開発の過程で迷路に迷い込むことも考えられる。しかし、VNA はすばらしい可能性を秘めた測定器である。例えば、現在の無線技術の発展は、VNA 無しにはありえなかったであろう。今後も VNA が研究開発に大いに活用されることは間違いない。高い精度と確度を持つ測定結果を得て、効率的に研究開発へ展開するためにも、高周波現象を学び、VNA の原理および回路モデル、不確かさを生み出す要因を知り、VNA を適切かつ効果的に利用することが重要である。

文 献

- [1] 加藤悠人, “誘電率等材料定数の測定技術と標準供給に関する調査研究,” 計量標準報告, Vol. 9, no. 1, 2014.
- [2] V. Teppati, A. Ferrero, and M. Sayed, “Modern RF and Microwave Measurement Techniques,” Cambridge University Press, 2013.
- [3] Anritsu 技術資料, “Multiport Vector Network Analyzer Measurements”
- [4] Keysight 技術資料, “Agilent Technologies ノンリニア・ベクトル・ネットワーク・アナライザを使用したハイパワー増幅器の測定”
- [5] D. Rytting, “Calibration and Error Correction Techniques for Network Analysis,” IEEE MTT/ED Seminar, 2005.
- [6] 岩崎俊, “電磁波計測 —ネットワークアナライザとアンテナ—,” コロナ社, 2007.
- [7] 横島一郎, “高周波測定技術の基礎 —S パラメータ入門—,” Realize inc., 1989.
- [8] 大森俊一, 横島一郎, 中根央, “高周波・マイクロ波測定,” コロナ社, 2004.
- [9] Keysight 技術資料, “Agilent Technologies ネットワーク・アナライザの基礎”
- [10] Anritsu 技術資料, “Understanding Vector Network Analysis”
- [11] Anritsu 技術資料, “Vector Network Analyzer Primer”
- [12] D. M. Pozar, “Microwave Engineering 4th edition,” Wiley, 2011.
- [13] Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA), EURAMET cg-12, ver 2.0, Mar. 2011.
- [14] JCSS 不確かさの見積もりに関するガイド 登録に係る区分: 電気 (高周波) 校正手法の区分 (呼称): 高周波測定器等【高周波インピーダンス (ベクトルネットワークアナライザ (VNA) の評価に関する指針)】(第1版), 製品評価技術基盤機構認定センター, 平成 22 年 6 月 1 日.
- [15] JCGM 100 :2008, “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement” .
- [16] JCGM 200 :2012, “International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)” .
- [17] 飯塚幸三, 今井秀孝, “計測における不確かさの表現ガイド —統一される信頼性表現の国際ルール—,” 日本規格協会, 1996.
- [18] IEEE Standard for Precision Coaxial Connectors (DC to 110 GHz), IEEE Std. 287, Sep. 2007.
- [19] Keysight 技術資料, “マイクロ波ミリ波同軸コネクタ”
- [20] Rohde and Schwarz 技術資料 1MA99, “ローデ・シュワルツ測定機器で使用する同軸 RF コネクタの選定 / 取り扱いガイド”
- [21] 戸高嘉彦, 堀部雅弘, “マニュアルにない計測技術—高周波計測におけるノウハウとエチケット—,” MWE2016 基礎講座.
- [22] Keysight 技術資料, “マイクロコネクタの手入れ”
- [23] Keysight 技術資料 1363-1, “Agilent ネットワーク・アナライザのダイナミック・レンジの意義と改善”
- [24] Keysight 技術資料, “Agilent PNA ミリ波ネットワーク・アナライザケーブル長が VNA のシステム性能に与える影響”
- [25] Rohde and Schwarz 技術資料, “R&S ZV-Z4xx Mechanical Verification Kits Specifications”
- [26] Keysight 技術資料 1364-1, “Agilent ベクトル・ネットワーク・アナライザを使用した S パラメータ・ネットワークのディエンベディングおよびエンベディング”
- [27] Anritsu 技術資料, “Understanding Directivity”
- [28] Anritsu 技術資料, “Understanding VNA Calibration”
- [29] Keysight 技術資料 8720-2, “Agilent Technologies TRL*校正を使用したインフィクスタ・マイクロストリップ・デバイス測定”
- [30] 岸川諒子, 堀部雅弘, “適合性判定を目的とした EMC 試験機器の校正技術,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2012.
- [31] 岸川諒子, 堀部雅弘, “VNA によるインピーダンス測定で生じる偏差の評価方法,” 電子情報通信学会総合大会, 2014.
- [32] 小曾根宏樹, 森雅文, 鈴木一成, 信太正明, “擬似電源回路網のインピーダンス校正用伸介器の開発,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014.
- [33] 岸川諒子, 堀部雅弘, “専用伸介器による擬似電源回路網のトレーサブルなインピーダンス校正,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014.
- [34] CISPR 16-1-2 First edition, “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-Ancillary equipment- Conducted disturbances” 2003.
- [35] CISPR 16-1-2 Amendment 2, “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-Ancillary equipment- Conducted disturbances” 2006.
- [36] 堀部雅弘, “高周波インピーダンス標準に関する調査研究,” 計量標準報告, Vol. 3, no. 4, 2005.
- [37] M. Horibe, K. Shimaoka, K. Fujii, A. Widarta, H. Iida, and R. Kishikawa, “Standards Research in Japan : Latest Development of Millimeter-Wave and Submillimeter-Wave Measurements,” IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, no. 7, 2013.
- [38] Keysight 技術資料, “電子校正キットとメカニカル校正キット: 校正手法と確度”