

# ネットワークアナライザによる S パラメータ測定入門

## The Introduction of S-parameter measurements by a vector network analyzers

桜井 昭寛<sup>1</sup> 加藤 友祐<sup>2</sup> 鈴木 和喜<sup>3</sup> 堀部 雅弘<sup>4</sup>  
 Akihiro SAKURAI<sup>1</sup> Yusuke KATO<sup>2</sup> Kazuyoshi SUZUKI<sup>3</sup> and Masahiro HORIBE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>キーサイト・テクノロジー合同会社 <sup>2</sup>ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

<sup>3</sup>アンリツカンパニー株式会社 <sup>4</sup>国立研究開発法人産業技術総合研究所

### 概要

日々発展する電子機器・製品には、デバイス・回路およびシステムの設計や測定、さらには使用される誘電率などの材料特性の計測など、最終製品から素材に至るあらゆる段階でベクトルネットワークアナライザによる S パラメータ測定が求められる。S パラメータの基本原則、ベクトルネットワークアナライザの測定原理、使用上の注意に、さらに測定の不確かさに関して解説する。

### Abstract

Accurate high frequency measurements impact to the research and development (R&D) of leading edge electronic products, i.e. devices, circuits and systems. It is required in R&D ranging from materials to final products. Major and fundamental techniques of this type of measurements used in R&D stage must be scattering parameter (S-parameter) measurement by a vector network analyzers. This workshop will the present basic principle of the S-parameters, the measurement principle of the vector network analyzer, instructions and directions for use and the latest measurement uncertainty analysis in VNA.

### 1. はじめに

高周波分野における研究開発において、設計、製造そして計測のすべてが不可欠な技術である。近年、高周波のデバイスや回路のモデリングを測定結果より行う手法も用いられており、正確な測定への要求が高まっている。特に、高周波分野では、デバイス、回路だけでなく、材料の特性評価においてもベクトルネットワークアナライザ(以下、VNA)が用いられており、VNA は高周波分野の産業活動における重要なツールとなっている。近年では、VNA による非線形測定やノイズ測定など、さまざまな使用ができるようになってきている。

本ワークショップでは、VNA の基本測定機能である S パラメータ測定を中心に基本技術から最新動向まで解説する。内容としては、はじめに高周波計測の基本、エチケットとも言えるコネクタケアについて解説する。その後、動作原理と VNA の校正方法を説明した後、近年、要望が高くなっている VNA の不確かさ解析について、最新の情報を含めて紹介する。

### 2. ネットワークアナライザ測定のエチケット- コネクタケア -

VNA は内部のハードウェア特性が完璧でないため、校正によりベクトル誤差補正をおこなって、コネクタ接合面において誤差を補正して、VNA 内部の特性

の影響を除去して完璧に近い状態を実現します。その誤差補正(校正)のプロセスの前に、VNA へのテストポート・ケーブルやテストポートアダプタの接続、そして校正キット(標準器)をそのテストポートアダプタに接続して、ベクトル量を測定することになります。それらのコネクタ接続には注意点があるほか、適切な接続を実現するためのツールがある。さらに、同軸コネクタといっても、使用する周波数帯域や、コネクタの接続再現性などに大きく影響を与える等級分けもされている。さらには、寸法面での互換性から接続が可能な異種間コネクタもあるが、測定の確度・精度が低下するため、使用にあたって

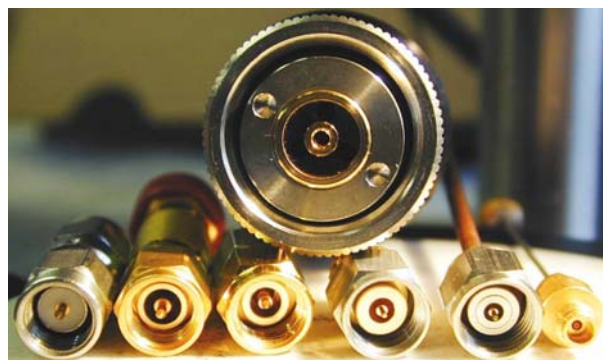


図1 同軸コネクタの種類

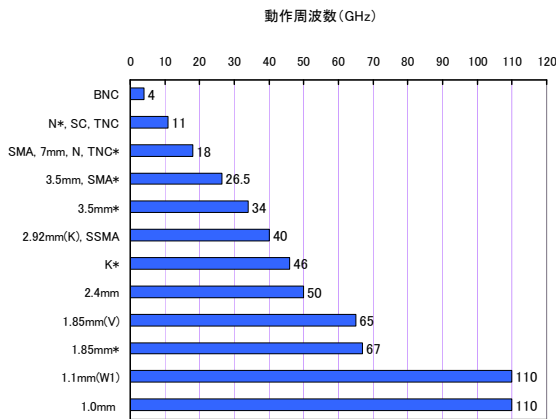


図2 動作周波数

注意する必要がある。特に、3.5mm と 2.92mm、K、や 2.4mm と 1.85mm コネクタは、区別することが難しい。実際には両コネクタの接続面を良く見比べて、サイズの違いや外導体の金属壁の厚さを識別できるように慣れておくことが必要である。

高精度コネクタとしては、スロットレスコネクタがあり、スロットありコネクタよりも構造が複雑で繊細な為、取り扱いには特に注意が必要となる。特に SMA (オス) -3.5mm (スロットレスのメス) の組み合わせの場合に、破損しやすい。SMA をテストポートケーブルにして、その先端で 3.5mm 校正キットを使用して校正する場合に起こる。そのため、できる限り 3.5mm コネクタと SMA コネクタを直接つなげないことを推奨する。

マイクロ波コネクタの中心導体は小さなビーズと呼ばれる絶縁体部品で支えられているが、この中心導体は製造上の問題や接続時の取り扱いに問題があると、中心位置からのずれ (Off-Center) を生じる事がある。この場合、相手側メスコネクタ中心導体のフィンガーの一部が開き気味になり、特定周波数で共振を起こしたり反射特性が著しく劣化したりすることがある。

また、同軸コネクタを適正に取り扱うための重要で必要不可欠なのが、トルクレンチです。トルクレンチとは、レンチの先端が規定トルク以上になると、折れ曲がる構造になっている。コネクタを接合するときに、レンチを使用するりゆうとして、手締めだとあまりトルクがかからず接続が不完全になり、測定再現性が劣化するためです。そのため、レンチを使用するが、トルクレンチではなく、モンキーレンチや固定のレンチを使って、目いっぱい締め付けることは、これはコネクタが破損する原因になります。

接続時コネクタ本体を回転させるのは厳禁



図3 コネクタ接続方法

高周波コネクタは、加工精度が非常に高いものが多く、トルクを適正トルク以上かけると、堅牢性に劣るコネクタ (外部導体金属壁厚の薄い 2.92mm など) では、締め付けすぎにより“中心導体同士が物理的に押し合い”状態になり、場合によっては破損します。また、締め付けトルクが弱いと接続の不良によりコネクタ接合部にギャップが発生して、コネクタの整合性を劣化させリップルが発生します。高精度な測定をいつも実現できるようにするためには、高周波コネクタがとてもデリケートな部品であるということを認識して、取り扱うことを心がける必要があります。

### 3. SパラメータとVNA計測の原理

#### 3.1 Sパラメータ

まずは反射係数及び伝送係数について述べる。反射係数及び伝送係数は以下で表される。

$$\text{反射係数} = \frac{\text{反射波}}{\text{入射波}}$$

$$\text{伝送係数} = \frac{\text{伝送波}}{\text{入射波}}$$

Sパラメータとは DUT(Device Under Test)の入出力特性を表すパラメータである。

図4のように2つのポートを持つDUTの各ポートに port1 及び port2 と名前をつける。このとき port1 側の反射係数が S11 であり、port2 側の反射係数が S22 である。また、port1 から port2 への伝送係数が S21 であり、port2 から port1 への伝送係数が S12 である。よって、Sパラメータはポートの定義によって呼び方が変わる。

また、Sパラメータを表現するために必要となる入射波と反射 (又は伝送) 波が振幅と位相の情報を

持っているため、Sパラメータも振幅と位相の情報を持つ。

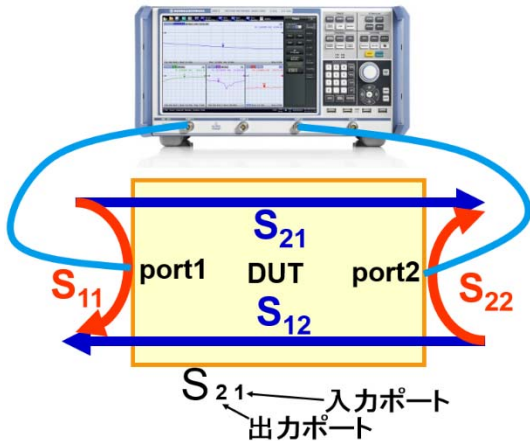


図4 Sパラメータ

### 3.2 ベクトルネットワークアナライザとは

ベクトルネットワークアナライザとは以下の特徴を持つ測定器である。

- (a) 信号源と受信機両方を持つ。
- (b) Sパラメータの測定ができる。
- (c) 周波数掃引しながら測定を行う。

もう少し詳しく述べると、ネットワークアナライザ内部の信号源出力をDUTへ入力し、DUTからの反射波及び伝送波をネットワークアナライザ内部の受信機で受信し、このときの信号源出力情報と受信機受信情報からSパラメータを計算する。更にこの測定を周波数掃引しながら行うというのがネットワークアナライザの特徴である。

### 3.3 動作原理

ネットワークアナライザの基本的なブロック図を図2に示す。

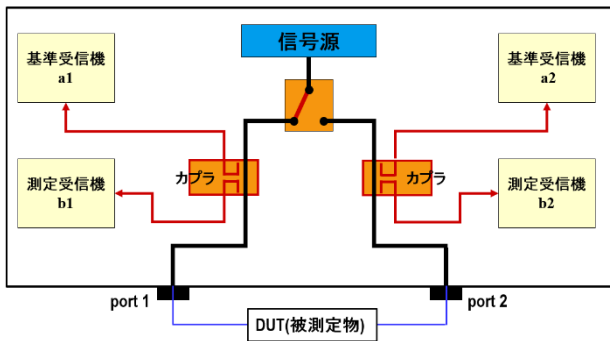


図5 ネットワークアナライザのブロック図

信号源からの出力はネットワークアナライザのportから出力されるが、その一部がコブラを経由して基準受信機(a1及びa2)で受信される。DUTからの

反射波及び伝送波は測定受信機(b1及びb2)で受信される。これらのa1,a2,b1,b2からSパラメータを計算する。

例えば、図5のようにスイッチがport1側の時は $S_{11}=b_1/a_1$ であり、 $S_{21}=b_2/a_1$ となる。またスイッチがport2側の時は $S_{22}=b_2/a_2$ であり、 $S_{12}=b_1/a_2$ となる。

### 3.4 マルチポートのSパラメータ

ここまでは2ポートDUTについて述べてきたが、2ポート以上のマルチポートDUTが増えている。マルチポートDUTのSパラメータ測定には例えば以下のようなマルチポートネットワークアナライザが便利である。最大24ポートのリフレクトメータ(方向性結合器、基準受信機、測定受信機で構成される)を備えたネットワークアナライザのため高速に測定でき、設定も簡単である。

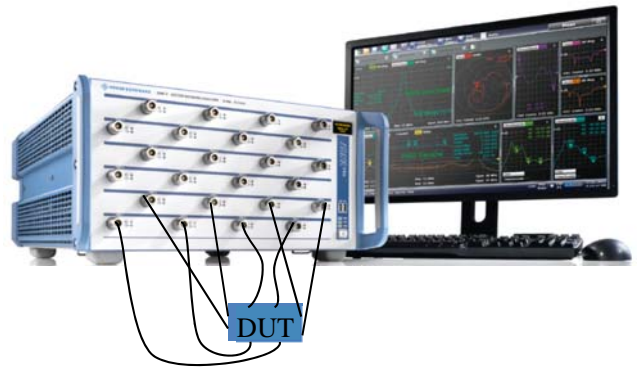


図6 マルチポート差動デバイスの測定例

## 4 ベクトルネットワークアナライザの校正技術

VNAを使用した測定では、校正が必要となります。この校正は使用する伝送媒体やDUT(被測定物)等により様々な校正手法と校正の種類があります。本稿では様々な校正手法とその特徴に関して説明します。

### 4.1 校正とは

VNAで行う校正とは一般的に測定の基準面、つまり伝送と反射特性を測定するための、振幅0dBと位相0度(180度)を定めることです。これにより接続されたDUTの特性が基準に対してどう変化したかを測定することが可能となります。つまりこの基準面の精度が悪いと、正確な測定が出来なくなります。

### 4.2 伝送媒体

校正の手法を説明する前に、伝送媒体の種類に関して代表的なものを以下に示します。

- ① 同軸
- ② 導波管
- ③ マイクロストリップライン
- ④ CPW (Coplaner Waveguide)

上記のように様々な伝送媒体が存在し、信号の伝達時の特性が違います。故に各伝送媒体にあった校正手法を選択することが重要です。

### 4.3 同軸での校正

同軸の伝送媒体では、SOLT (Short-Open-Load-Thru) 校正が最も一般的に使用されています。この校正手法では、インピーダンスの基準は使用する Load (終端器) の性能に頼っており、その精密さが要求されます。同時に反射の基準である Open と Short もその特性化 (反射面までの遅延時間 (電気長) やリアクタンス成分) が重要となります。



図7：手動校正キット

同軸での校正には図7のような手動の校正キットを一般的に使用します。キット内には校正に使用する Open、Short、Load、Thru 等の基準デバイスが同梱されています。またこれら校正デバイスの特性化データ (Calibration Coefficient) がフロッピーディスクまたは USB メモリ等で供給されています。

また最近ではこれら校正用基準デバイスを筐体に収めて電子的に切替えて自動で校正を行う、自動校正キット (電子校正キット) も多く使用されています。(図8)



図8：自動校正キットモジュール

自動校正キットの利点は一回の接続で校正が可能ですので、校正デバイスの接続替えなどの際の人的ミスが減らし、校正の再現性が確保できることです。

### 4.4 同軸でのハイブリッド校正

近年 VNA の広帯域化が進み、70kHz から 110GHz 又は 145GHz までを同軸で広帯域に測定が可能な機器もあります。このような広帯域で正確な校正するには、一般的な SOLT 法では使用する終端器の広帯域化など非常に難しいため、60GHz 近辺の周波数で低域側 (SOLT 法) と広域側 (SSST 法) を、別々に校正し、2つの校正を合体 (Merge) することでその性能を維持する手法が取られます。図9の0.8mmコネクタ用校正キットは上記のハイブリッド校正に対応した基準デバイスが入っています。



図9：0.8mmコネクタ校正キット

### 4.5 導波管での校正

導波管は同軸とは違い、Open (開放)基準デバイスを使用することは出来ないため、同軸のような SOLT 校正はできません。その代り SSST (Short-Short-Load-Thru) 校正で SOLT と同様な校正と同じような校正を行うこととなります。

この場合、2つの Short は使用する導波管の中心周波数で 1/4 波長分オフセットをかけて取得したデータから 0度 (Open)、180度 (Short) の位置を計算で求めることとなります。故にオフセット長 (遅延時間) の正確性が校正の精度に影響を与えます。

### 4.6 基板、ウェハでの校正

伝送媒体が基板やウェハ等の場合、校正を行うためには測定するために治具 (テストフィクスチャ) やプローバを用いるために、校正キットも基板やウェハタイプのものが必要となります。

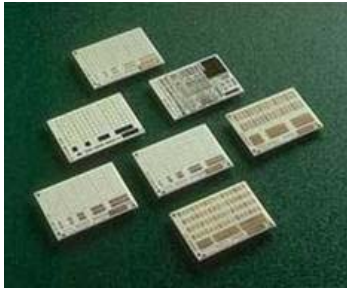


図 10：ウェハ用校正基板



図 11 マイクロストリップ用校正基板

また基板上で性能の良い終端器を製作することが難しい場合があり、その場合は T(L)RL (Thru (Line)-Reflect-Line) や LRM (Line Reflect-Matched) と言った終端器を用いない校正キットを使用する場合があります。この場合、基板のインピーダンスと Line の長さを正確に保つ必要があります。

#### 4.7 各種伝送媒体に対応した校正手法

伝送線路	校正手法			
	SOLT	LRL (TRL)	LRM (TRM)	SSLT (4ポートショート)
同軸線路	◎	○	○	×
導波管線路	×	○	△	◎
マイクロストリップライン	○	◎	○	×

図 12 伝送媒体と対応校正手法

上図は代表的な伝送媒体と対応校正手法を表にしたものです。2重丸は一般的に広く使用されている校正手法で、×は使用できない校正手法となります。

校正を行う際には、伝送媒体にあった最適な校正手法を選択して行うことで精度の高い測定が可能となります。

#### 4.8 校正標準の定数

校正キットを使用して VNA の校正を行います。使用する標準デバイスには、特有の定数を持っています。この値を正確に知っておき、校正時に補正を

行う必要があります。その為に VNA ではこの定数を手入力若しくはメーカより供給されたデータを USB 等の記憶媒体より読み込む必要があります。

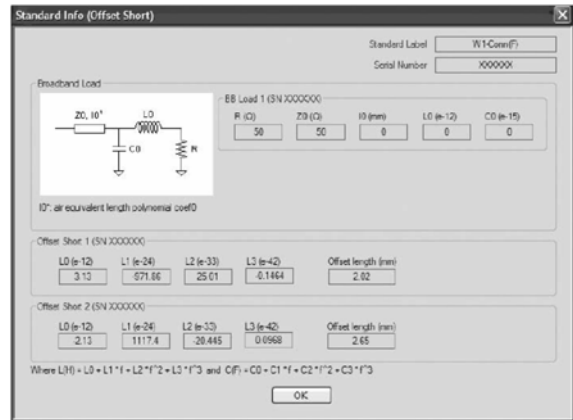


図 13 校正キット定数入力画面

図 13 は SOLT 法を使用する場合の入力画面です。

- Load：インピーダンスやインダクタンス成分
- Open：遅延時間又は電気長、浮遊容量
- Short：遅延時間又は電気長、線路インダクタンス

VNA の校正は、測定を正確に行うために必要なもので、伝送媒体にあった校正手法で、精密校正キットを利用して行うことが重要です。

また校正標準デバイスの定数 (CAL Coefficient) を正確に知ること、より精密な校正が可能となります。

### 5 ベクトルネットワークアナライザ測定の不確かさ

#### 5.1 VNA の不確かさの要素

「計測における不確かさの表現ガイド」(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 略称:GUM)[1]では、不確かさとは、「測定の結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」と定義されている。「不確かさ」は「測定値」からどの程度の範囲内に「真の値」が在り得るかを表すものである。よって、「不確かさ」のない「測定値」には、科学的には意

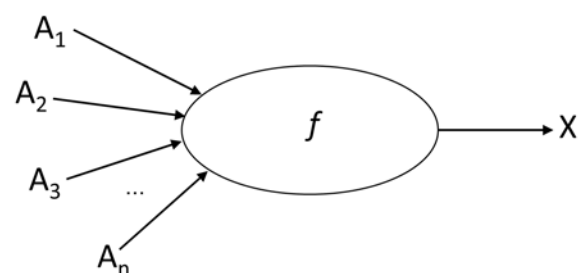


図 14 不確かさ解析モデルの概念図

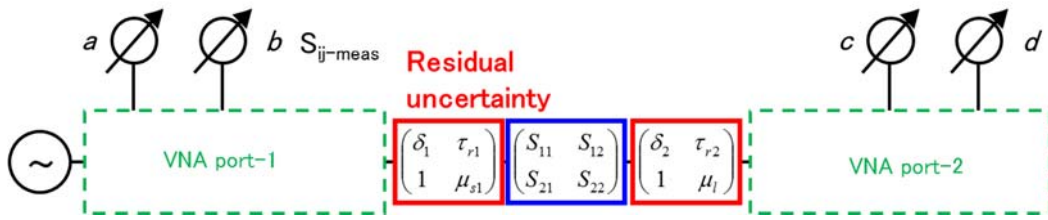


図 15 2ポート VNA 解析モデル

味がないといえる。

そして、不確かさの解析には、測定・解析モデルが前提となる。このため、VNAにおいてもこのモデルの構築が不可欠であり、測定不確かさ解析の結果にも大きく影響を与えることとなる。

ここで、測定モデルとは、測定パラメータ  $A_1, \dots, A_n$  (モデルにおける入力量) を用いて測定パラメータ  $X$  (モデルにおける出力量) を得る場合、結果  $X$  は、 $A_1, \dots, A_n$  を用いて、 $X=f(A_1, \dots, A_n)$  の関係で表すことができる (図 14)。このとき、モデル式  $f$  の背景としては測定理論や物理法則にしたがって関係式が構築され、これが測定・解析モデルとなる。たとえば、直流抵抗の測定についてモデルを例にとって説明する。一般的な直流抵抗を測定する場合、被測定物の抵抗体に電圧 ( $V$ ) を加えて電流 ( $I$ ) を流し、 $V$  と  $I$  を測定して抵抗 ( $R$ ) を計算で求める。ここで、入力量は  $I$  と  $V$  であり、出力量は  $R$  となる。そして、測定・解析モデルは入力量と出力量の関係は“オームの法則”によって  $R=V/I$  として記述できる。

次に必要な項目は、不確かさ要因の抽出と評価である。主な要因としては、(1) 校正用標準器の不確かさ、(2) 測定装置の安定性・ばらつき、(3) 測定環境 (周辺環境、測定・設定条件)、(4) 測定作業者の技量、そして (5) 被測定デバイスの特性やその安定性などである。そして、更に  $S$  パラメータ測定の不確かさについて、代表的な VNA の不確かさ要因は、(1) 校正キット内の標準器の不確かさ、(2) 測定装置の安定性 (本体・ケーブル等を含む測定システム全体の特性変動) さらには、VNA の性能劣化やコネクタの破損・汚れ・劣化も気づかない場合がある。(3) は測定環境 (周辺環境、測定・装置本体の設定条件) で、周辺温度の変動によりケーブルや VNA 内部での電磁波伝搬速度が変わり、位相や振幅の測定結果に変動が著しい。(4) は経験不足による接続の不良としてあらわれることが多い [2]。コネクタ等の取り扱いの経験や専用のトルクレンチを使用するなど、測定の知識も信頼性を保つ上では必要となる。そして (5) 被測定デバイスのコネクタ部などの性能劣化などである。

## 5.2 VNA の不確かさ解析モデル (2 ポート)

図 15 に、2 ポート VNA の不確かさ解析モデルを示す。モデルは、2 ポート VNA の順方向と逆方向のそれぞれで反射特性と伝送特性の測定時のシグナルフローをあらわしており、各パラメータは不確かさの要素である。

不確かさの要素のうち、方向性 (Directivity)、マッチング (Matching)、トラッキング (Tracking) は主に、VNA の標準器による校正により、標準器の不確かさと接続の再現性などにより発生し、それ以外には、直線性、ケーブルや被測定物の再現性による不確かさ要素を示している。このうち、標準器にかかわる不確かさについては、シグナルフローモデルからモデルを定式化できる。

$$S_{11} = \frac{\left( \frac{S_{11\text{-meas}} - \delta_1}{\tau_{r1f}\tau_{r1r}} \right) \left( 1 + \frac{S_{22\text{-meas}} - \delta_2}{\tau_{r2f}\tau_{r2r}} \right) - \mu_{l2} \left( \frac{S_{21\text{-meas}} - \text{EXT}_1}{\tau_{r1f}\tau_{f2r}} \right) \left( \frac{S_{12\text{-meas}} - \text{EXT}_2}{\tau_{r2f}\tau_{f1r}} \right)}{V}$$

$$S_{12} = \frac{\left( \frac{S_{12\text{-meas}} - \text{Iso}_2}{\tau_{r2f}\tau_{f1r}} \right) \left[ 1 + (\mu_{s1} - \mu_{l1}) \frac{S_{11\text{-meas}} - \delta_1}{\tau_{r1f}\tau_{r1r}} \right]}{V}$$

$$S_{21} = \frac{\left( \frac{S_{21\text{-meas}} - \text{Iso}_1}{\tau_{r1f}\tau_{f2r}} \right) \left[ 1 + (\mu_{s2} - \mu_{l2}) \frac{S_{22\text{-meas}} - \delta_2}{\tau_{r2f}\tau_{r2r}} \right]}{V}$$

$$S_{22} = \frac{\left( \frac{S_{22\text{-meas}} - \delta_2}{\tau_{r2f}\tau_{r2r}} \right) \left( 1 + \frac{S_{11\text{-meas}} - \delta_1}{\tau_{r1f}\tau_{r1r}} \right) - \mu_{l1} \left( \frac{S_{21\text{-meas}} - \text{EXT}_1}{\tau_{r1f}\tau_{f2r}} \right) \left( \frac{S_{12\text{-meas}} - \text{EXT}_2}{\tau_{r2f}\tau_{f1r}} \right)}{V}$$

$$\text{ただし、} V = \left( 1 + \mu_{s1} \frac{S_{11\text{-meas}} - \delta_1}{\tau_{r1f}\tau_{r1r}} \right) \left( 1 + \mu_{s2} \frac{S_{22\text{-meas}} - \delta_2}{\tau_{r2f}\tau_{r2r}} \right) - \mu_{l1}\mu_{l2} \left( \frac{S_{21\text{-meas}} - \text{Iso}_1}{\tau_{r1f}\tau_{f2r}} \right) \left( \frac{S_{12\text{-meas}} - \text{Iso}_2}{\tau_{r2f}\tau_{f1r}} \right)$$

ここで、添え字の 1, 2 はポートを表し、 $f, r$  はそれぞれ、順方向、逆方向を表す。

以上は、式中のパラメータは校正により補正值として求められるが、用いる標準器には不確かさがあるため、この補正值自体に不確かさを持つこととなる。その結果、VNA で取得する測定値にも不確かさが生じることとなる。不確かさは以下のように表現される。

$$U(S_{11}) = k \left( \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_1} \right| \cdot u(\Gamma_1) + \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_2} \right| \cdot u(\Gamma_2) + \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_3} \right| \cdot u(\Gamma_3) + \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_4} \right| \cdot u(\Gamma_4) + \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_5} \right| \cdot u(\Gamma_5) + \left| \frac{\partial S_{11}}{\partial \Gamma_6} \right| \cdot u(\Gamma_6) \right)$$

$$U(S_{21}) = k \left( \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_1} \right| \cdot u(\Gamma_1) + \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_2} \right| \cdot u(\Gamma_2) + \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_3} \right| \cdot u(\Gamma_3) + \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_4} \right| \cdot u(\Gamma_4) + \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_5} \right| \cdot u(\Gamma_5) + \left| \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma_6} \right| \cdot u(\Gamma_6) \right)$$

$$U(S_{12}) = k \left( \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_1} \right| \cdot u(\Gamma_1) + \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_2} \right| \cdot u(\Gamma_2) + \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_3} \right| \cdot u(\Gamma_3) + \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_4} \right| \cdot u(\Gamma_4) + \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_5} \right| \cdot u(\Gamma_5) + \left| \frac{\partial S_{12}}{\partial \Gamma_6} \right| \cdot u(\Gamma_6) \right)$$

$$U(S_{22}) = k \left( \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_1} \right| \cdot u(\Gamma_1) + \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_2} \right| \cdot u(\Gamma_2) + \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_3} \right| \cdot u(\Gamma_3) + \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_4} \right| \cdot u(\Gamma_4) + \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_5} \right| \cdot u(\Gamma_5) + \left| \frac{\partial S_{22}}{\partial \Gamma_6} \right| \cdot u(\Gamma_6) \right)$$

ここで、 $\Gamma_1 \sim \Gamma_3$  はポート 1 側、 $\Gamma_4 \sim \Gamma_6$  はポート 2 側の校正用標準器を表す。 $u(\Gamma_k)$  は、それぞれの標準器の校正不確かさの値を表しており、 $|\partial S_{ij} / \partial \Gamma_k|$  は、 $S$  パラメータ測定値  $S_{ij}$  の  $\Gamma_k$  に対する感度係数を表している。校正キットの校正値とその不確かさを式に適用することで、不確かさを推定することができる。

### 5.3 VNA の不確かさ解析モデル(一般化)[3]

近年、VNA は 2 ポート以上のマルチポート化が進ん

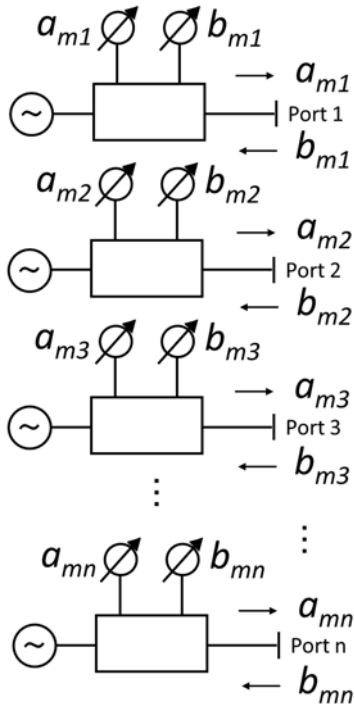


図 16 N ポート VNA 解析モデル

でおり、4 ポートだけでなく、スロットにモジュールを組み込むことでポート数を増やせる VNA も登場しており、校正のモデル、不確かさの解析モデルも多ポートに一般化する必要がある (図 16)。ここで、ポート 1 において、VNA から測定信号が出力されている場合には、以下の関係が成り立つ。

$$a_i = l_i b_{mi} - h_i a_{mi}$$

$$b_i = k_i b_{mi} - m_i a_{mi}$$

ここで、 $a_i, b_i$  は観測されるべき信号(波振幅)であり、 $a_{mi}, b_{mi}$  は、VNA で観測される信号(波振幅)である。ここで両者の間の関係は、 $l_i, h_i, k_i, m_i$  の VNA のシステム特性を現すパラメータで記述される。また、VNA から測定信号が出力されていない場合には、以下の関係が成り立つ。

$$a_i = g_i \hat{b}_{mi}$$

$$b_i = f_i \hat{b}_{mi}$$

この場合、ポートからの信号出力はないため、 $a_{mi}=0$  であり、 $g_i, f_i$  の VNA のシステム特性を現すパラメータで記述される。

多ポートの場合、ポート数だけ前述の 4 つの式を必要とし、それらをまとめることで、行列式として記述できる。

$$\mathbf{a} = \mathbf{L}\mathbf{b}_m - \mathbf{H}\mathbf{a}_m$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{K}\mathbf{b}_m - \mathbf{M}\mathbf{a}_m$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{G}\hat{\mathbf{b}}_m$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{b}}_m$$

ここで、各パラメータは行列であり、以下のとおりである。

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_{m1} \\ a_{m2} \\ a_{m3} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{pmatrix}, \quad \hat{\mathbf{b}} = \frac{\mathbf{b}}{|\mathbf{b}|}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & g_n \end{pmatrix}$$

測定時には各ポートから同時に信号を送信することがないため、測定されるため信号の行列は以下で表される。

$$\tilde{\mathbf{A}}_m = \begin{pmatrix} a_{m11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{m22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{mnn} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_m = \begin{pmatrix} b_{m11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_{m22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & b_{mnn} \end{pmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{B}}_m = \begin{pmatrix} 0 & \hat{b}_{m12} & \cdots & \hat{b}_{m1n} \\ \hat{b}_{m21} & 0 & \cdots & \hat{b}_{m2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{b}_{m1n} & \hat{b}_{m2n} & \cdots & 0 \end{pmatrix}$$

となり、前述の関係式も行列式で記述される。その結果、被測定デバイスの S パラメータ行列とすると、

観測される信号行列と VNA システムパラメータにより、以下の関係式でマルチポート VNA の会席も出るが記述される。

$$-\mathbf{S}\mathbf{G}\hat{\mathbf{B}}_m + \mathbf{F}\hat{\mathbf{B}}_m - \mathbf{S}\mathbf{L}\tilde{\mathbf{B}}_m + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{B}}_m + \mathbf{S}\mathbf{H}\tilde{\mathbf{A}}_m - \mathbf{M}\tilde{\mathbf{A}}_m = 0$$

上式は、VNA のポート数によらず成り立つため、前節の 2 ポート VNA の解析も可能である。行列形式を用いることで、理論上、校正および不確かさの解析を一般化できる。そして、昨今、VNA に搭載されている CPU の性能の向上により、過去には処理が困難であった解析が測定器の中で実現できるようになった。

#### 5.4 不確かさ解析(一般化) [4]

ここで、被測定物の S パラメータは、以下で与えられる。

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}(\mathbf{A})^{-1}$$

上記の関係の偏微分から不確かさが解析されるため、

$$d\mathbf{S} = (d\mathbf{B} - \mathbf{S}d\mathbf{A})(\mathbf{A})^{-1}$$

ここで、各要素の偏微分は以下の通りである。

$$d\mathbf{B} = d\mathbf{L}\tilde{\mathbf{B}}_m - d\mathbf{H}\tilde{\mathbf{A}}_m + d\mathbf{G}\hat{\mathbf{B}}_m + \mathbf{L}d\hat{\mathbf{B}}_m - \mathbf{H}d\tilde{\mathbf{A}}_m + \mathbf{G}d\hat{\mathbf{B}}_m$$

$$d\mathbf{B} = d\mathbf{K}\tilde{\mathbf{B}}_m - d\mathbf{M}\tilde{\mathbf{A}}_m + d\mathbf{F}\hat{\mathbf{B}}_m + \mathbf{K}d\tilde{\mathbf{B}}_m - \mathbf{M}d\tilde{\mathbf{A}}_m + \mathbf{F}d\hat{\mathbf{B}}_m$$

以上が、VNA 校正に関わる不確かさの解析である。実際には、この不確かさ要素に、ノイズフロア、ケーブルの影響、接続の再現性(校正用標準器、被測定物)などについても、各ポート間の相互影響を考慮して不確かさ評価・解析を行って、測定の不確かさとして加算されることとなる。

## 6 ベクトルネットワークアナライザ測定の不確かさ評価の実例

これまで解説した理論に基づき、VNA の測定結果補正と不確かさ解析を可能とするいくつかのツールが構築されている。そのいくつかは以下の通りであ



る。

- VNA traceability tool [5]
- Dynamic Uncertainty [6]
- VNA Tool II [7]
- NIST Microwave Uncertainty Framework (Beta version)[8]

以上は、測定の信頼性を明確化するための不確かさ解析ツールであるが、その使用方法や運用方法については、適切なパラメータの設定や事前の測定・評価が必要な場合が多い。そのため、使用者の VNA 測定の知識やコネクタケアなどの危機の管理を適正に行う必要がある。言い換えれば、危機の品質の管理ができていない状態では、便利なツールがあったとしても有効活用できないことになる。

## 謝辞

本稿の作成にあたり、ご協力頂きました関係者の皆様に感謝いたします。

## 文 献

- [1] ISO/IEC Guide 98:2008, “Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”.
- [2] 堀部 雅弘, “ネットワークアナライザによる高精度測定法” MWE2008 workshop 2008 年 11 月 28 日
- [3] Modern RF and Microwave Measurement Techniques, V. Teppati, A. Ferrero and M. Sayed ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [4] A. Ferrero, “S-Parameter Multiport Uncertainty: From the theory to a useful tool,” APMC2014 workshop.
- [5] M. Horibe, M. Shida, and K. Komiyama, “VNA Traceability Tool,” 73rd ARFTG Microwave Measurement Conference Digests, June 2009.
- [6] Keysight Technologies, Dynamic Uncertainty for S-parameters - Option 015:  
[http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/S3\\_Cals/Dynamic\\_Uncertainty.htm](http://na.support.keysight.com/pna/help/latest/S3_Cals/Dynamic_Uncertainty.htm)
- [7] METAS VNA Tools:  
<http://www.metas.ch/metas/en/home/fabe/hochfrequenz/vna-tools.html>
- [8] NIST Microwave Uncertainty Framework:  
<http://www.nist.gov/ctl/rf-technology/related-software.cfm>

## 著者紹介

桜井 昭寛

キーサイト・テクノロジー合同会社

[akihiro\\_sakurai@keysight.com](mailto:akihiro_sakurai@keysight.com)

加藤 友祐

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社

[Yusuke.Kato@rohde-schwarz.com](mailto:Yusuke.Kato@rohde-schwarz.com)

鈴木 和喜

アンリツ(株) 営業推進部 課長

[Kazuyoshi.suzuki@anritsu.com](mailto:Kazuyoshi.suzuki@anritsu.com)

堀部 雅弘

国立研究開発法人産業技術総合研究所, 電磁気計測研究グループ長

[masahiro-horibe@aist.go.jp](mailto:masahiro-horibe@aist.go.jp)