JCSS
Japan Calibration
Service System

JCSS

不確かさの見積もりに関するガイド

【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）】

登録に係る区分： 電気（高周波）及び電磁界
校正手法の区分の呼称： 高周波測定器等

第 3 版
（JCG211S31-03）

改正：2026 年 4 月 1 日

独立行政法人製品評価技術基盤機構
適合性評価推進センター 認定センター

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

目　次

1. 序文 4
2. 文書化 4
3. 参照標準器 5
4. モデル及び目盛定め 6
5. 不確かさの評価 7
6. ポート測定の不確かさの評価、U_{VRC} 8
7. 2 ポート測定の不確かさの評価 12
8. 不確かさの計算 15
9. 実験による検証 16
10. 参考文献 16
11. 附属書 A：ベクトルネットワークアナライザの不確かさバジェット表の例 19

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

JCSS
不確かさの見積もりに関するガイド
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

（Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA) [EURAMET/cg-12/v.01]の和訳）

このガイドでは高周波インピーダンスに関係のある EURAMET のベクトルネットワークアナライザの不確かさの見積もり方法の和訳を紹介する。なお、和訳文書を参照する際には次の点を考慮すること。

①3.1 のタイトルで目盛定めキットとあるのは、Calibration Kit を意味している。JIS Z8103：2000（計測用語）における gauging(目盛定め)の定義では「基準によって、測定器の目盛を定めること。備考：新たしく目盛を入れるときは目盛定めといい、既にある目盛の補正を求めるときは、校正という。」となっており、和訳にあたっては「目盛定め」としている。

②3.2 のタイトルで 1 組のビードレスエアラインとあるのは、「トレーサビリティを確保するために校正されたデバイス(群)」（JCSS ではトレーサビリティを要求）を意味している。

③3.4 のタイトルでトレーサビリティキットとあるのは、Verification Kit を意味している。

④附属書 A のバジェット表では、相関がある要因については単純和としている。

⑤測定の不確かさを検証する場合には、評価結果に“使用したトレーサビリティキット”の不確かさの影響が及ばないよう、“トレーサビリティキット”の不確かさは、検証する不確かさに比べ十分（例えば 4 分の 1 など）小さくなければならない。また、トレーサビリティについては ISO などの定義の見直しにより改定される予定である。
[EURAMET/cg-12/v.01]は VIM2 の概念に基づいて記載されている。VIM2 と VIM3 におけるトレーサビリティの考え方については、本文書の参考情報でも掲載している「VNA トレーサビリティの今後 [第 5 回高周波クラブ発表資料]」を参照のこと。

“This document is a translation of <EURAMET/cg-12/v.01> © EURAMET e.V. Conditions for copying and translating may be obtained from the EURAMET Secretariat: secretariat@euramet.org“

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

1. 序文

1.1 この文書は、VNAの重要な特性の評価方法に関して、VNAを使用する試験所に助言を与える手段として作成した。この文書は、VNAの評価に関して実施する測定手順について記述する。この文書に示す原理は、VNAが使用可能な任意の周波数範囲及び任意の伝送路に適用するが、不確かさの評価に関して示す手法のいくつかは、周波数が500 MHz超の同軸線路にしか適用できない。この手順が適用されるのは、接触面が、該当するIEC規格60457 [1]又はIEEE規格287 [2]に適合するコネクタを有する、次のような同軸線路での測定である:

線路径	コネクタ
14 mm	GR900 (又は同等品)
7 mm	Type-N (精密Nコネクタ)
7 mm	PC 7 (又は同等品)
3.5 mm	PC 3.5

1.2 導波管伝送路など、これ以外のタイプのコネクタの場合は、手順を変更しなければならないことがある。

1.3 VNA の目盛定めは、定義上は、位相と振幅の両方を網羅しなければならないが、この文書では、不確かさは振幅の量だけに適用する。今後の版において、位相の不確かさも追加する予定である。

2. 文書化

2.1 試験所は、VNA の目盛定め及び使用法を記述した手順書に関して、認定の通常の要求事項に適合すること、手順書には少なくとも次の事項を記載すること:

- 機器の概要;
- 参照標準及び補助機器のリスト;
- 操作方法(製造業者の文書を明記);
- 目盛定め方法(この文書を明記);
- 不確かさの解析法及び不確かさバジェット表;
- コネクタを使用する場合の注意事項;
- 環境条件に関する要求事項;
- その他の注意事項。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

3. 参照標準器

次のように、いくつかの標準器が必要となる:

3.1 目盛定めキット

3.1.1 各コネクタのタイプ別に、少なくとも一つの目盛り合わせに使用する目盛定めキットが必要となる。通常は、製造業者の提供する目盛定めキットで十分である。使用する目盛定めキットについては、手順書に明記し、一意に識別できるようにしなければならない。各キットは、コネクタのオスメスごとに一つずつ、ビードレスの標準エアラインの内部導体をサポートすることができる短絡標準を含んでいることが望ましい。

3.2 1 組のビードレスエアライン

3.2.1 コネクタのタイプ別に、少なくとも一本の両端部に適切な寸法の接点を備えたビードレス標準エアラインが必要となる。エアラインの公称の長さは、75 mm から 300 mm の間とすることが望ましい。物理寸法は、測定結果が国家標準までのトレーサビリティのある方法を用いて算出した推定不確かさと合わせて記録することが望ましい。関連寸法は、次のとおりである。

a) 外部導体の接合面間の長さ

b) 内部導体の長さ[オスメスのないコネクタの場合、これは端から端までを測定したものとすること。メス接点測定の場合の基準面は、その端部とすること。オス接点の場合の基準面は、内部導体の公称径の端とすること]

c) 内部導体の平均外径

d) 外部導体の平均内径。

3.2.2 VNA 製造業者の検証キットの一部として提供されるビードレスエアラインの寸法が適切に証明されている場合、すなわち国家標準までのトレーサビリティが確立されている場合は、その検証キットを用いてもよい。

3.2.3 物理長さ及び内径と外径の比を用いれば、エアラインの公称特性インピーダンス及びエアラインによって導入される位相偏移の両方を決定することができる。幾何寸法から特性インピーダンスを求めるには、次の式を用いて行うことが望ましい:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'_0}{C'_0}} = \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}} \cdot \left[\frac{\ln(b/a)}{2 \cdot \pi}\right] = \frac{\mu_0 \cdot c_0 \cdot \ln(b/a)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} = 59.93916 \cdot \ln(b/a) \qquad (1)$$

ここに、b はエアラインの外部導体内径を、a はエアラインの内部導体外径を示す。定数 μ_0 と ε_0 は物理定数である。誘電体である空気では、$\mu_r = 1$ と $\varepsilon_r = 1.000645$ を標準値とすることができる。したがって、幾何寸法の不確かさが完全に特性インピーダンスの不確かさを決定する。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

例えば、7 mm のビードレスエアライン(インピーダンス 50 Ω)について、製造業者が外径の不確かさは 0.05 %、内径の不確かさは 0.1 %と宣言しているとする。計算にこれらの値を用いて最大偏差を求めると、このエアラインの特性インピーダンスについて約 0.17 %という偏差が得られる。

3.3 校正されたステップ減衰器又は校正された固定減衰器のセット

3.3.1 VNA の直線性を検証する目的でこれらの国家標準にトレーサブルな RF 減衰器を使用する。測定周波数で 90 dB まで、又はそれ以上のステップを生成するためには、国家標準までのトレーサビリティをもつ校正された一組の固定減衰器(例えば、3、6、10、20、30、30 dB の減衰器)を使用すればよい。ただし、一般に、プログラマブル型の可変減衰器を使用した場合は特に、より繰り返し性のよい測定が可能となる。可変減衰器は通常、複数の周波数で校正する必要はないが、この周波数で、国家標準までのトレーサビリティは必要となる。その目的は、フル2ポート目盛定めされた S_{21} 及び S_{12} 測定を実施することによって、VNA の両チャネルの直線性を確認することである。測定は通常、認定範囲の一つの周波数で実施する。周波数は、減衰器の繰り返し性の良い周波数範囲の下端近くにすることが望ましく、これは通常、45 MHz から 18 GHz の周波数帯の VNA で 1000 MHz 以下である。減衰器は、認定を想定した全ダイナミックレンジを網羅するものであること。

3.4 トレーサビリティキット

3.4.1 このキットの目的は、国家標準までの切れ目のないトレーサビリティを示すことである。このキットの内容は、認定機関の同意を受けたものでなければならない。認定を受ける所定の周波数範囲のコネクタタイプの一つでは、追加コンポーネントを追加した、製造業者の検証キットに類似したキットが必要となる。この追加コンポーネントは、最低一つの固定減衰器と広帯域ミスマッチとを含み、どちらも認定周波数範囲内のいくつかの周波数で測定する。次のコネクタタイプ(同一周波数範囲)では、適切なトレーサビリティがあれば、VNA 製造業者の検証キットに類似したキットで十分である。

4. モデル及び目盛定め

4.1 さまざまな数学的モデル及び関連する目盛定め測定を利用して、VNA が完全に動作仕様(いわゆる VNA の目盛定め)を満たすようにする。認定内容にもっとも適した方法は、試験所が決定する。目盛定めの各タイプの数学的モデルがどのように正しく VNA ソフトウェアに反映されているかは、VNA の使用者に明らかにされていない場合が多い。したがって、目盛定め項目と測定自体の不完全さの影響は不明である。

4.2 試験所はつねに、VNA の目盛定め及び操作の独自の手順に従うようにすることが望ましい。この手順は通常、特に周波数ポイントに関して、下記に概説した評価手順とは異なる。下記の評価手順は使用者の通常の方法に対しても有効だという完全な信頼を得るには、評価手順は両方のやり方に従って実施しなければならないことを意味する。評価は、統一の取れた測定結果に至らなければならない。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

4.3 コネクタについては、通常の注意事項を守るようにすること。すなわち、最初に、使用するすべてのコネクタを点検し、清掃する。次に、関連するすべてのコネクタが、要求されている検査基準を満たしていることを確認する。コネクタの繰り返し性を改善するために、常にトルクレンチを使用することが望ましい。トルクレンチの正しい設定は、個々のコネクタによって異なる。

5. 不確かさの評価

5.1 不確かさの評価には、考えられる全てのモデルを試すのではなく、ブラックボックスアプローチを採用する。そうしたアプローチが特定の VNA 設備に適切であることを確認するためには、解析が必要となる。

5.2 評価は、次の考え方に基づいている。VNA が正確に目盛定めされ、目盛定めに使用する装置とそのポートの間に理想的な、損失のない伝送線路が挿入されていれば、VNA は、位相偏移はあるが、目盛定め中に挿入される S パラメータについて測定した値が同一になるはずである。目盛定めが完全でなければ、残留誤差が存在する。これは、(測定ポートに存在する)残留ベクトルと目盛定め装置の位相偏移特性との位相関係の変化によって明らかとなる。

5.3 例えば、(OSL 法を用いた目盛定め手順の一部として)方向性を求めるときに理想的では無い 50 Ω 負荷を用いると、ゼロではない反射を補正するための方向性項として不正確なベクトルが取りこまれる。エアラインなしで再測定すると結果はゼロ反射となり、エアライン付で再測定すると、エアラインの固定長によって切り離された 2 つのベクトル(“方向性”と“理想的負荷”)の相互作用を示す。周波数掃引により、これが測定量において連続的に変化する位相、いわゆるリップルを引き起こす。このリップルの周期 Δf は、使用するエアラインの長さに依存する。すなわち、エアラインの長さを L とすると、$\Delta f = c / 2L$ である(例えば、10 cm では 1500 MHz)。

5.4 関係するベクトルの振幅(すなわち、負荷の反射及び方向性)がリップルの周期性に関してゆっくりと変化するだけであれば、リップルの振幅から情報を得ることができる。周波数について高分解能掃引が必要な場合には、長いエアラインでは多数のリップルを発生することができる。

5.5 500 MHz 以下の低周波数では、利用可能なエアラインが理想的なものではなくなる(寸法から計算した 50 Ω 特性から外れてくる。)。しかも、きわめて長いエアライン(30 cm 超)が必要となり、一つの完全なリップル周期を得ることがほぼ不可能となる。

5.6 下記の評価は、関係する全ての S パラメータで実施し、場合によっては、他のコネクタタイプ(すなわち、使用する同軸系でコネクタごと)実施すること。下記の説明では、不確かさの原因に関して代表値を示している。その値は、付録に示した例で使用している。

5.7 認定の全周波数範囲にわたる測定に対して、手順書に従って VNA の目盛定めを行う。信頼できる測定データを得るには、例えば、リップル1周期当たり約 10 点となるように十分な周波数点数を使用する。既知の基準を測定して、目盛定めが有効であることを確認する。VNA のポートは、目盛定め中に目盛定め品目を接続するコネクタの種類とあわせる。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

6. ポート測定の不確かさの評価、U_{VRC}

6.1.1 S_{11} 及び S_{22} の測定の場合、次のようにして、大きなエラー項だけを用いて、VNA のエラーモデルを表すことができる(式 2):

$$U_{\mathrm{VRC}} = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R_{\mathrm{VRC}} \qquad (2)$$

ここで

Γ	測定された電圧反射係数
D	測定された実効方向性
T	トラッキング及び非線形性の推定される総合的な影響
M	測定された実効テストポートマッチ
R_{VRC}	全ランダム要因を表す

備考:特に明記していない限り、記号は振幅又は量を表す。

6.1.2 上記の式は、全エラー項の定義モデルを意図したものではない。各項の値は、補正として使用しない。すなわち、各項は想定値としてゼロをもつが、一つ一つに関連する不確かさが現れる。測定によって不確かさの妥当な推定値が得られない場合、これらの値は測定データ及びそれが可能であれば、製品仕様のような他の資料を典拠とすることが望ましい。ランダム要因は、少なくとも次のものを含む。

システム繰り返し性(分解能及び雑音)

コネクタ繰り返し性

ケーブル曲げの影響

環境条件の影響

実効方向性のような用語の中の実効というのは、基準の目盛定めキットを用いて関連ポートの全目盛定めを実施した後の残留方向性を表すために用いている。

6.1.3 上記の不確かさ要因に関するデータを得ようとするときは、次の手順を用いることができる(簡易化するために、測定はポート x で行うものとしており、x は 1 又は 2 である。)。場合によっては、両ポートで下記の手順を実施すること。

6.2 振幅の不確かさ

6.2.1 残留方向性の測定

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

6.2.1.1 トレーサビリティのとれたビードレスエアラインを測定ポートに接続し、終端に適切な“整合”負荷(0.1 から 0.2 までの電圧反射係数*(VRC)*をもつ負荷がもっともよい)を取り付ける。S_{11} を測定し、VNA 画面に周波数対'リニアの' 振幅を表示する。'オートスケール' 又は適切な軸の目盛りがわかるような別の手段を利用する。

6.2.1.2 画面には、負荷自体の *VRC* 点の上に識別可能な正弦波形の'リップル' が重なるように示すことが望ましい(P.18 の図 1 参照)。リップルの振幅から、周波数の関数としての実効方向性、*D* を計算する(式 3):

$$D = \frac{\text{最大リップル振幅}}{2} \qquad (3)$$

6.2.1.3 最大リップル振幅は、終端部負荷の *VRC* の周波数特性によって引き起こされる傾きに影響されたとしても、隣り合った山と谷から求めることが望ましい。点は、周波数による実効方向性の変動をある程度表示し、通常は、高周波になるにつれて方向性が悪くなることを示す。5 に示したように、エアラインの長さに比例した、より大きな識別能、すなわち、より多くのリップルが得られ、300 mm のエアラインでは 500 MHz 毎のリップルが、100 mm のエアラインでは 1500 MHz ごとのリップルが得られる。エアラインの長さは、結果が有効となる最低周波数を限定し、300 mm のエアラインを用いて 1 GHz 未満の周波数で実効方向性の妥当な推定を行うことができるようにすることが望ましい。*D* の値を割り当てる場合は、周波数範囲を例えば、1 GHz から 8 GHz、8 GHz から 12 GHz、12 GHz から 18 GHz の 3 帯域をさらに細分化しないようにすることを推奨する。

6.2.1.4 広帯域 50 Ω を使用する目盛定めの場合は、この負荷を代替値として使用することができ、同じ式を適用する。目盛定めされた 50 Ω 以外のものを使用すると、その反射係数が実効方向性と同程度になることがあるので、問題となることがある。備考：その VRC の振幅が *D* よりも小さい場合、リップル振幅は 2|Γ|となり、2*D* とはならないことがある。

6.2.1.5 実効方向性の値の中で、ランダム変動について十分な推定が行えるように、別のエアラインを使って手順を繰り返して整合性を確認し、いずれのケースでも同じエアラインを用いて手順を数回(新たに目盛定めを実施する場合と実施しない場合の両方で)、繰り返すこと。

低い周波数では、DC 値又は目盛定め負荷インピーダンス(50 Ω を基準に)のきわめて低い周波数値(例えば、1 kHz)を実効方向性の推定に使用することができる。ここの評価では、この値の最大値で、約 1 GHz でのリップル法で得られた値を使用するように提案する。

6.2.1.6 リップルの振幅は、エアラインの特性インピーダンスの値の正確さに直接左右される。その公称値からの偏差及び不確かさは、リップルの最終値に含めること、その結果が実効方向性である (例えば、二乗和平方根による)。実効方向性は、一般に 0.002 から 0.02 (−54 dB から−34 dB)の範囲にあること。例では、下限周波数の下限として 0.01、上限周波数として 0.015 の値を使用している。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

6.2.2 実効テストポートマッチの測定

6.2.2.1 この手順は、エアラインを終端させるために“整合”負荷の代わりに短絡を用いる点を除いて、6.2.1 と同一である。

6.2.2.2 この場合、VNA 画面(適切な目盛りにした後、再びリニアの振幅モードで)には、直線の損失が周波数に応じて規則正しく増加するが、これになるようにして、一般に周波数に応じて振幅が(必ずしも単調に増加するとは限らないが)増加するリップルがあることを示すことが望ましい(P.19 の図2参照【原文では Fig. 1となっているが、間違いと思われる】)。リップルの振幅から、周波数の関数としての'実効テストポートマッチ’、Mを計算する(式 4):

$$M = \frac{\text{最大リップル振幅}}{2} \qquad (4)$$

6.2.2.3 この結果は、測定が両方の影響を受けるために、得られるリップルも実効方向性 D の影響をうける。
全周波数範囲に該当する M については、近似値しか求めることができない。ただし、テストポートマッチによる不確かさは Γ^2 を乗じることで得られるので、その作用は、Γ の比較的大きな値を測定したときにだけ明らかとなる。D の値は、実効テストポートマッチ M の推定不確かさを示す。

6.2.2.4 実効テストポートマッチは、一般に 0.005～0.02 (−46 dB～−34 dB)の範囲にあること。例では、下限周波数で 0.01、上限周波数で 0.02 の値を使用している。

6.2.3 直線性の測定

6.2.3.1 直線性による不確かさは、7.2.1【原文では 7.2.1 となっているが、7.3.1 の間違いと思われる】に示す手順に従って求める。

典型的な値(0.002 dB/dB)を基準にすると、0.2 の *VRC* の不確かさに及ぼす直線性の影響は 0.0006 程度となる。この推定値は、0.2 の VRC が基準レベルより 14 dB 低いパワーレベルに等しいという事実を前提としている。一様分布を仮定している。

6.2.4 トラッキング

6.2.4.1 入射信号と反射信号の間の不完全なトラッキングに起因する反射測定時の総合的な不確かさへの影響は、比較的小さいとみなされる。実験推定値は、高水準反射装置の繰り返し性から求めればよい。通常は、一様分布の半区間として 0.001 の相対的不確かさなど、この要因について製造業者の値を用いればそれで十分である。

6.2.5 システム繰り返し性

6.2.5.1 システム繰り返し性は、同一の目盛定め内の繰り返し性と、目盛定め間の繰り返し性に分ける

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

ことができる。目盛定めする装置を再接続することなく、同一の目盛定めを用いた一連の読みの標準偏差を求めるために、試験を実施すること。この試験は、システムの分解能及び雑音による基本繰り返し性の尺度を示し、いくつかの周波数で反射係数の値を変えて実施し、使用する内部平均数を記録することが望ましい。再目盛定め後の典型的な繰り返し性についても試験を実施すること、この試験も、反射係数の値及び周波数をいくつか変えて実施すること。

6.2.5.2 予想される典型的な値は、0.001 から 0.01 の間である。例では、0.010 の値(k = 2 とするガウス分布)を使用している。

6.2.6 コネクタの繰り返し性

6.2.6.1 再目盛定めを実施するときの 6.2.5 に記載した試験は、テストポート及び目盛定め標準のコネクタの影響を含んでおり、その影響を分けることはむずかしい。一般に、校正対象品目がコネクタの繰り返し性の主要因であるが、校正対象品で繰返し測定がいつも実行できるとは限らない。一つの方法として、再目盛定めを行わずに“典型的な”被測定物を 120 °刻みで回転させ接続しなおして測定を行い、その結果の標準偏差を、コネクタの繰り返し性の代表的な数値を推定するための基本的な方法がある。コネクタの種類及び周波数範囲ごとに、それぞれ別個の評価が必要となる。この評価に使用する装置が多くなればなるほど、不確かさの推定値がより信頼できるものとなるので、このデータを継続的に追加してゆくことを推奨する。

6.2.6.2 標準試験所で使用する高品質コネクタの場合、0.010 以下の値(k = 2 とするガウス分布)が予測される。

6.2.7 ケーブルのたわみ

6.2.7.1 ケーブルを使用して校正対象品を接続する場合、目盛定めした後にケーブルが移動すれば、誤差が生じる可能性がある。ケーブルの位置だけを、例えば 90°の角度で曲げる (これができるのはフレキシブルケーブルのみ)等、あらかじめ決めたとおりに変化させたときの読みの変化を求めるためには、一連の繰返し測定を実施すること。測定を後日繰り返すことができるように、ケーブル位置の変化のさせ方を記述し、記録することが重要である。

不確かさの代表的な指標が割り当てられるように、いくつかの典型的ケーブル位置で評価すること。

測定は、認定された周波数範囲で実施すること。

6.2.7.2 典型的な値として、0.004(k = 2 とするガウス分布)が得られた。

6.2.8 環境条件

6.2.8.1 理想的には、18 ℃ ～ 25 ℃、相対湿度 20 % ～ 60 %のような典型的な試験所条件で VNA を動作させること、こういう状態になっていれば、製造業者の仕様をこの不確かさを推定するための基礎として利用することができる。

測定時に評価を行わなければならない被校正物の要因以外でもっとも敏感なデバイスは、おそらく目盛定め手順で使用するエアラインであるが、上記の条件でエアラインを使用するのであれ

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

ば、その影響は無視することができる。
周囲温度に急激な変化があると、場合によっては結果に影響し、目盛定め実施したときと、装置を校正するときの間に著しい変化がある場合は特にそうであり、環境条件による不確かさの評価を行うときは、この点に配慮すること。

6.2.8.2 例では、0.002 の値を使用する(一様分布の半区間)。

6.3 位相の不確かさ

今後、改定の予定である。

6.4 実効負荷マッチ、Γ_L

6.4.1 2ポート動作(Open-Short-Load-Through 目盛定め:いわゆる 12 ターム目盛定め)の目盛定め中に、他のテストポートの反射係数を決定する。この場合、反射係数は目盛定めされるVNAの最初の反射測定値である。反射係数(いわゆる“ロードマッチ”)自体は、0.2 程度となる。目盛定め後、実効負荷マッチΓ_Lを、附属書の例 1 に示す不確かさの推定値によって表すことができる。

6.4.2 例 3～5 では、0.02 の値(k = 2)を使用する。

7. 2 ポート測定の不確かさの評価

7.1 反射 U_{VRC}

7.1.1 2 ポート装置(デバイス)の $\Gamma = S_{11}$ 及び $\Gamma = S_{22}$ の測定では、1 ポートの測定の場合と同様の不確かさモデルを使用することができるが、式 5 に従って、試験対象デバイスの実効ロードマッチ Γ_L(他のテストポート)及び公称減衰量 S_{21} も考慮する:

$$U_{\mathrm{VRC}} = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R_{\mathrm{VRC}} + S_{21}^2\Gamma \qquad (5)$$

ここで、Γ は、測定電圧反射係数(式 2 に定義したもの)。
備考:減衰量が小さい場合(例えば 3 dB)では、項($2\cdot\Gamma\cdot M\cdot\Gamma_L\cdot S_{12}^2$)を加算するのが良い。

7.1.2 3 dB 減衰器では(S_{21} =1/ $\sqrt{2}$)、そのため Γ_Lによる影響が 0.5 の補正係数分減少する。

7.2 伝送 U_{TM}

7.2.1 S_{12} 及び S_{21} の測定の場合、対数表示をとるものとして(単位 dB)、次のように大きなエラー項だけを用いて VNA のエラーモデルを表すことができる(式 6):

$$U_{\mathrm{TM}} = L + M_{\mathrm{TM}} + I + R_{\mathrm{dB}} \qquad (6)$$

ここで

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

L 直線性からの測定システム偏差;

M_{TM} ミスマッチによる計算エラー項、式 7 参照;

I 推定又は測定クロストーク;dA、式 8 参照;

R_{dB} 全ランダム要因を表す。

7.2.2 反射の測定の場合と同じように、上の式は定義エラーモデルではなく、主要項がどれほど不確かさの要因になっているかを示している。影響力は、可能な限り測定結果を基に求めることが望ましい。ランダム要因は、反射測定の場合と類似の原因に起因する:

システム繰り返し性(分解能及び雑音)

コネクタの繰り返し性

ケーブルたわみの作用

環境条件の作用

したがって、6.2.6～6.2.8 に記載したものと同じように評価すればよい。

7.3.1 直線性の測定

7.3.1.1 VNA は、S_{21} 測定の認定手順に従って目盛定めすること。手順は、減衰器のゼロ設定に関して国家標準までのトレーサビリティが確立されている周波数で、ステップ減衰器又は一組の校正減衰器(3.3)の測定で構成される。これ以外の減衰器は回路に含めないで、信号源レベルは、測定手順に指定されたレベルに設定すること。これは、検出器のレベルが通常の測定の場合とほぼ同じになるようにするためである。結果は、認定が要求されている範囲全体で 5 dB ステップ以下で求めることを推奨するが、可能であれば、例えば、認定範囲が 0 から 70 dB で、0 から 80 dB の範囲で結果を求めるようになっている場合は、この範囲よりも 10 dB 超で結果を求めることを推奨する。変量影響を最小限にすることが重要なので、結果は、とりわけ高レベルの減衰量で、十分な数の繰返し測定から得ることが望ましい。内部平均指標は必ず、減衰ステップに関して妥当なものとすること。

7.3.1.2 VNA の直線性誤差を補正することは一般的なやり方ではないので、上記の測定によって得られた結果は、この要因に起因する不確かさの推定値を Δ dB/dB の形で示す。VNA の結果と標準減衰器に基づいた校正値の差の図が、直線性の不確かさに関して信頼できる数字を推定するための推奨方法である。直線性は、0 dB から 50 dB までの結果から評価すること、この範囲を超えると、不完全なアイソレーションの影響が誤差要因となるからである(7.3.3 参照)。

7.3.1.3 直線性の典型的な値は 0.002 dB/dB 程度である(k = 2 とするガウス分布)。

7.3.2 ミスマッチ

7.3.2.1 参考文献[3]の式 24 によって、測定対象品目の残留ソース負荷反射係数及び入出力反射係

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

数に起因するミスマッチによる不確かさがある。単位は dB である。

$$M_{\mathrm{TM}} = 20\log_{10}\frac{1+(|MS_{11}|+|\Gamma_{\mathrm{L}}S_{22}|+|M\Gamma_{\mathrm{L}}S_{11}S_{22}|+|M\Gamma_{\mathrm{L}}S_{21}S_{12}|)}{1-|M||\Gamma_{\mathrm{L}}|} \qquad (7)$$

クロストークとトラッキングを式から省略している
ここで

M は実効テストポートマッチ

Γ_L は実効負荷マッチ

S_{11}、S_{22}、S_{12}、S_{11} は DUT の S パラメータ。

備考：わかりやすくするために数量に付けた絶対値記号は、振幅に基づく計算を行うべきことを明らかにするために示した。

7.3.2.2 これは、不確かさバジェット表の主要因となることが多い。

7.3.3 アイソレーション(クロストーク)

7.3.3.1 目盛定め後の 2 つのポート間の不完全なアイソレーション(クロストーク)の作用は、製造業者の仕様の数値に従って決めてよいが、50 dB 以上の読みでの直線性試験結果を用いて確認すること。アイソレーションの不確かさは測定された減衰量の一次関数ではなく、減衰量の各測定値で計算することができる。*A* が減衰量の値、*I* がクロストークだとすると、参考文献[4]に従って不確かさ *dA* は(式 8)となる：

$$dA = \pm 20 \cdot \log\left[1+10^{-\frac{(I-A)}{20}}\right]\mathrm{dB} \qquad (8)$$

7.3.3.2 ただし、不確かさは、測定減衰量を、例えば 5 dB 毎に分けた一次関数として表すほうが簡便である。*I* = 90 dB とすると、*dA*(*A* での不確かさ)は次のようになる：

A_a	dA_a
65 dB	0.48 dB
70 dB	0.83 dB
75 dB	1.42 dB
80 dB	2.39 dB

7.3.3.3 アイソレーションの作用は周波数によって変化するので、製造業者の仕様の数値の妥当性を確認するために、認定範囲のさまざまな周波数で、適切なアイソレーションが得られる減衰器を用いて測定を行うこと。例では、一様分布の半区間として 90 dB のクロストークを仮定してい

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

る。

7.3.4 システム繰り返し性、分解能

7.3.4.1 分解能は、比較的大きな信号の再現精度に関係する。すなわち、低い減衰量での検査を意味する。基本的に、この点については 6.2.5 に記述してある。

7.3.5 システム繰り返し性、雑音フロア

7.3.5.1 雑音要因は伝送測定に比較的大きな影響を及ぼすので、このパラメータについて評価を行うこと。システム雑音による影響は、VNA は再目盛定めしないで、可変減衰器を使ってさまざまな減衰量を測定することで評価できる。不確かさは、繰返し測定の標準偏差から求め、さまざまな内部平均設定で評価すること。雑音要因は検出器に届く信号のレベルに依存するので、ソースレベル及び減衰器の設定に依存することになることから、こうした値を記録することが重要となる。雑音要因は、主に、周波数が高くなるにつれて検出器の有効信号レベルが低くなるために、周波数によって著しく変化する。したがって、雑音の作用は、動作範囲のさまざまな周波数で評価しなければならない。

7.4 伝送測定値の位相の不確かさ

今後の版に含めるかどうかについては、現在検討中である。

8. 不確かさの計算

8.1 不確かさ要因は、EA 勧告に従って合成し、$k = 2$ の包含係数に基づいて拡張不確かさを示すこと(信頼水準は約 95 %)。次の点を考慮すること:

- 要因の多くは無相関とみなすことができるが、実効方向性と実効テストポートマッチは、VNA の目盛定めプロセスで共通の要素であることから、ある程度互いに関連している可能性がある。こうした要因の相関係数の評価に関して指針を示すことは、この文書の範囲外であり、そうした評価に関する参考文献を見つけることができなかった。したがって、信頼できる情報がない場合は、+1 の相関係数を仮定することを推奨する。これは通常の方法で他の要因と(自乗和平方根)合成する前に、方向性とテストポートマッチの不確かさを加え合わせるということを意味する。

- 方向性及びテストポートマッチのような 2 つのベクトルの相対位相に依存する要因は、U 字形の確率分布をとる。こうした要因の標準不確かさは、限界値を $\sqrt{2}$ で除して求める。ただし、伝送測定のとき、7.2.1【原文では 7.2.2 となっているが、間違いと思われる】に示す式を用いて計算した不確かさ要因は3つの U 字形分布の要因であり、この要因は一様確率分布が仮定されるとも考えられる。測定データから導き出された不確かさには、正規分布を仮定することができる(タイプ A 評価)。環境条件と製造業者のデータの作用については、正規分布だという証拠がない限り、一様分布を仮定することを推奨する。より小さな要因の確率分布形の選択は、一般に拡張不確かさへの影響がほとんどないので、その要因

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

の確率分布が何に当たるかを詳細に調べる必要はない。

9. 実験による検証

3.4 で述べたトレーサビリティキットは、国家標準に至るトレーサビリティを確立する手段である。目盛定めネットワークアナライザの測定結果が、認定試験所で得られる結果と同等であることを実験によって検証するときは、このトレーサビリティキットを使用することが望ましい。前章までで計算した不確かさは、少なくとも、いわゆる 12 ターム目盛定めの場合、不確かさ要因の許容推定値を示すが、一定のシステム不確かさ要因を見落としている可能性がある。VNA で測定を実施するとき、こうして計算した不確かさは不確かさの追加要因である。

まれなケースだが、測定値と目盛定めデータの間の整合性が不十分な(すなわち、2 組のデータの差が合成(平方和の根)不確かさより大きい)場合は、この不整合の原因を探るための調査が必要となる。適切な説明がつくようになるまで、観測された差だけ不確かさを増やすこと。

10. 参考文献

[1] IEC 60457 Series of standards, “Rigid coaxial lines and their associated connectors”, International Electrotechnical Commission, Geneva, (1974 and later)

[2] IEEE Standard 287, “Precision coaxial connectors”, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA, (1968, revised in 1988)

[3] e.g. H. Bayer, “An error analysis for the RF-Attenuation measuring equip-ment of the PTB applying the power method”, Metrologia 11 (1975), pp.43-51

[4] F. Warner, “Microwave Attenuation Measurements”, IEE Monograph 19, Peter Peregrims (UK), (1977)

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

図

図1

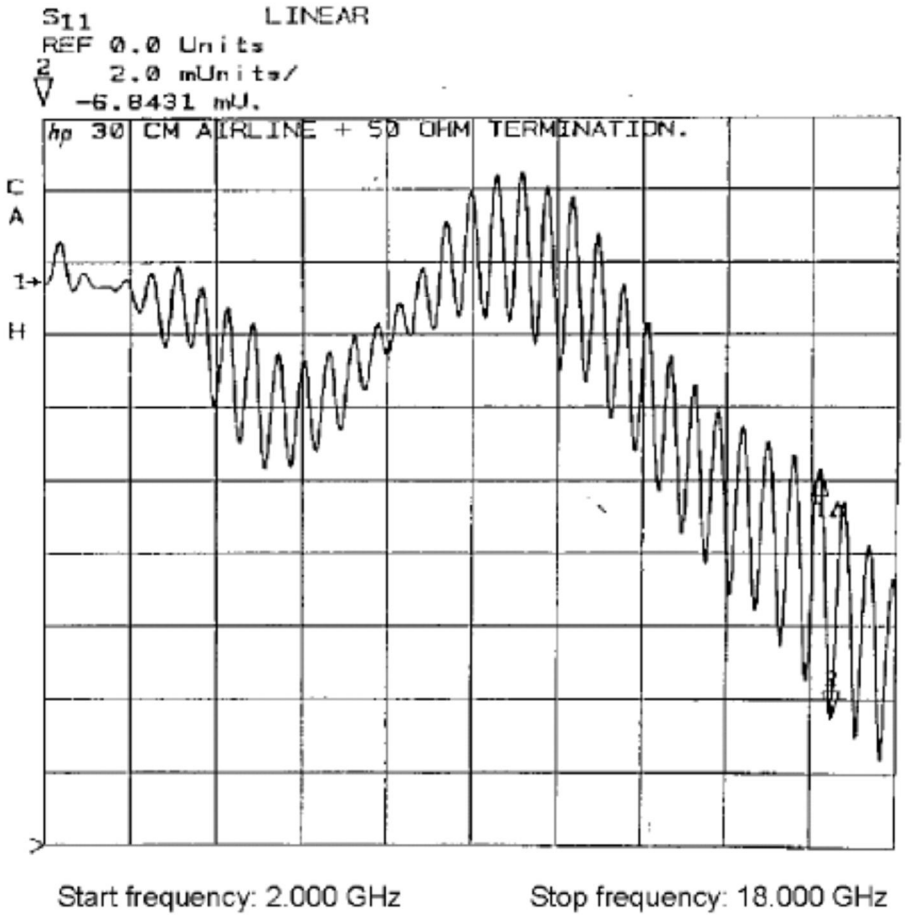


図1：不完全な 50 Ω負荷が 30 cm エアラインに接続されている。エアラインの他の側は、ポート1に付属している。この図は、どの様な典型的な応答が周波数の関数としてS_{11} を測って得られるかを示す。リップルから実効方向性が決定される。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

図2

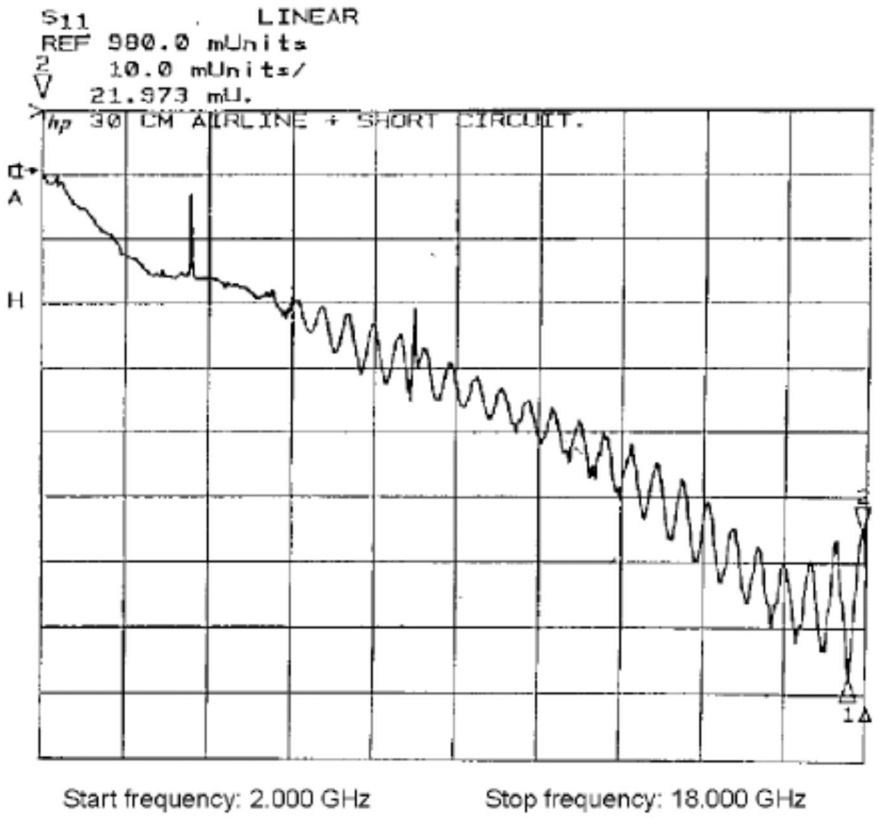


図2：短絡が 30 cm エアラインに接続されている。エアラインの他の側は、ポート1に付属している。この図は、どの様な典型的な応答が周波数の関数としてS_{11} を測って得られるかを示す。リップルから実効マッチングが決定される。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

11. 附属書 A:ベクトルネットワークアナライザの不確かさバジェット表の例

A1 一般

A1.1 この文書に示す不確かさバジェット表は、必須要求事項を示唆する意図で示しているのではない。このバジェット表は、この文書に示す方法に従って導き出した不確かさを文書にまとめる一般的なアプローチに関して、どういうことが期待されるかについての手引を示すためのものである。ここに挙げた例は、代表的な VNA の機能を完全に網羅してはいない。

A1.2 代表的な例は、次の事項に関して示している:

- 1 ポート測定における低周波数、低反射係数;
- 1 ポート測定における高周波数、高反射係数;
- 2 ポート測定における低周波数、中反射係数;
- 低周波数、低損失伝送測定;
- 高周波数、高損失伝送測定。

A1.3 VNA 本体に関するすべての値は、上記の手順に従って得たものと仮定する。繰り返し性及びケーブルのたわみのようなランダムな不確かさは、上記のような実際の測定で得られたものと仮定し、これは周波数が高くなれば、値も大きくなる。

直線性、実効方向性、実効テストポートマッチ及びクロストークの下記の値は、すべての例で有効である:

直線性の偏差	= 0.002 dB/dB
実効方向性	= 0.010、周波数が高い場合は 0.015 に増す
実効テストポートマッチ	= 0.010、周波数が高い場合は 0.020 に増す
クロストーク	= 90 dB

A1.4 例において、要因については、本体文書の該当する章を参照する。例 1 の場合だけは、エアラインの寸法による不確かさを記載した。

備考:反射係数は、伝送係数と同様に無次元数量である(ただし、伝送係数は、対数尺度を用いた減衰量として表すことがある:dB)。反射及び伝送のランダム要因の値は表示していない。

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

A2 例 1 低周波数における式 2 による 1 ポート反射測定(電圧反射係数 VRC の振幅)

要因	推定値 dB	*VRC* = 0.2の 場合の不確かさ	分布	除数	標準不確かさ dB
エアラインの反射 (3.2.3)	0.0017	0.0017	一様	√3	0.0010
リップル(実効*D*) (6.1.1)	0.010	0.010	U字形	√2	0.0071
実効方向性(計算)		0.0101	U字形	√2	0.0071
実効テストポートマッチ (6.2.2)	0.01	0.0004	U字形	√2	
相関量の合計		0.0105	U字形	√2	0.0074
トラッキング(6.2.4)	0.001	0.0002	一様	√3	0.00011
直線性(6.2.3.1)	0.002 dB/dB	0.00064	一様	√3	0.0004
システム繰り返し性 (6.2.5)	0.010	0.002	ガウス	2	0.001
ケーブルのたわみ (6.2.7)	0.004	0.0008	ガウス	2	0.0004
環境条件(6.2.8)	0.002	0.0004	一様	√3	0.0002
コネクタの繰り返し性 (6.2.6)	0.010	0.010	ガウス	2	0.005
合成標準不確かさ					0.0090
拡張不確かさ(*k* = 2)					0.018

A3 例 2 高周波数における式 2 による 1 ポート反射測定(電圧反射係数の振幅)

要因	推定値 dB	*VRC* = 0.8の 場合の不確かさ	分布	除数	標準不確かさ dB
実効方向性(6.2.1)	0.015	0.015	U字形	√2	
実効テストポートマッチ(6.2.2)	0.02	0.0128	U字形	√2	
相関量の合計		0.0278	U字形	√2	0.0197
トラッキング(6.2.4)	0.001	0.0008	一様	√3	0.0005
直線性(6.2.3.1)	0.002 dB/dB	0.00036	一様	√3	0.0002
システム繰り返し性(6.2.5)	0.010	0.008	ガウス	2	0.004
ケーブルのたわみ(6.2.7)	0.008	0.0064	ガウス	2	0.0032
環境条件(6.2.8)	0.002	0.0016	一様	√3	0.0009
コネクタの繰り返し性 (6.2.6)	0.02	0.02	ガウス	2	0.01
合成標準不確かさ					0.0227
拡張不確かさ(*k* = 2)					0.045

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

A4 例 3 2 ポート装置での反射測定(電圧反射係数の振幅)、式 5 による計算

A4.1 S_{11}、S_{22} がともに 0.05 以下で 3 dB 減衰器を使用

要因	推定値 dB	3 dB でかつS_{11}=0.05 の場合の不確かさ	分布	除数	標準不確かさ dB
実効方向性(6.2.1)	0.01	0.01	U字形	√2	
実効テストポートマッチ(6.2.2)	0.01	0.000025	U字形	√2	
相関量の合計		0.010025	U字形	√2	0.0071
トラッキング(6.2.4)	0.001	0.000025	一様	√3	0.0000
直線性(6.2.3.1)	0.002 dB/dB	0.0003	一様	√3	0.0002
システム繰り返し性 (6.2.5)	0.010	0.000025	ガウス	2	0.0000
ケーブルのたわみ(6.2.7)	0.004	0.0001	ガウス	2	0.0000
環境条件(6.2.8)	0.002	0.000005	一様	√3	0.0000
コネクタの繰り返し性 (6.2.6)	0.010	0.010	ガウス	2	0.0050
実効負荷マッチ (6.4)	0.018	0.009	U字形	√2	0.0064
合成標準不確かさ					0.0108
拡張不確かさ(k = 2)					0.022

A5 例 4 伝送測定(減衰量の振幅)、式 6 による計算

A5.1 S_{11}、S_{22} がともに 0.05 以下で 20 dB 減衰器を使用

要因	推定値 dB	20 dBの場合の不確かさ	分布	除数	標準不確かさ dB
直線性(7.3.1)	0.002 dB/dB	0.040	ガウス	2	0.020
テストポートマッチ(M*S_{11})	0.01 U	0.0005			
負荷マッチ(Γ_L*S_{22})	0.02 U	0.001			
テストポート ＊ 負荷マッチ (M*Γ_L)	0.0002 U	0.0002			
計算されたミスマッチ(7.3.2)		0.0148	ガウス	√2	0.0104
クロストーク(7.3.3)	90	0.0027	一様	√3	0.0016
システム繰り返し性(7.3.4)	0.002	0.002	ガウス	2	0.0010
雑音(7.3.5)	0.004	0.004	ガウス	2	0.0020
ケーブルのたわみ(6.2.7)	0.010	0.010	ガウス	2	0.0050
環境条件(6.2.8)	0.002	0.002	一様	√3	0.0012
コネクタの繰り返し性(6.2.6)	0.02	0.02	ガウス	2	0.0100
合成標準不確かさ					0.0254
拡張不確かさ(k = 2)					0.051

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

A6 例 5 伝送測定(減衰量の振幅)、式 6 による計算

A6.1 S_{11}、S_{22} がともに 0.05 以下で 70 dB 減衰器を使用

要因	推定値 dB	70 dBの場合の不確かさ	分布	除数	標準不確かさ dB
直線性(7.3.1)	0.002 dB/dB	0.140	ガウス	2	0.070
テストポートマッチ(M*S_{11})	0.01 U	0.0005			
負荷マッチ(Γ_L*S_{22})	0.02 U	0.001			
テストポート * 負荷マッチ (M*Γ_L)	0.0002 U	0.0002			
計算されたミスマッチ(7.3.2)		0.0148	ガウス	√2	0.0104
クロストーク(7.3.3)	90	0.8686	一様	√3	0.5015
システム繰り返し性(7.3.4)	0.002	0.002	ガウス	2	0.001
雑音(7.3.5)	0.04	0.04	ガウス	2	0.02
ケーブルのたわみ(6.2.7)	0.010	0.010	ガウス	2	0.005
環境条件(6.2.8)	0.002	0.002	一様	√3	0.0012
コネクタの繰り返し性(6.2.6)	0.02	0.02	ガウス	2	0.01
合成標準不確かさ					0.5070
拡張不確かさ(k = 2)					1.01

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。

主な改正事項

・組織改編に伴う名称の変更

以上

このファイルを複写したファイルや、このファイルから印刷した紙媒体は非管理文書です。