JCSS
Japan Calibration
Service System

JCSS
不確かさの見積もりに関するガイド
【パワーセンサ】

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 8 版
（JCG211S21-08）

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. はじめに……3
2. 校正係数……3
3. 比較校正方法の説明……5
4. 主な不確かさの要因……7
5. 反射に関する不確かさ(最大の不確かさ要因)……8
6. 不確かさの算出……10
7. 拡張不確かさ……11
8. 結果報告……11
9. 参考文献……11

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
【パワーセンサ】

1. はじめに

このガイドでは高周波電力計について次の2つ比較校正方法での不確かさの見積もり方法を紹介する。

① 取替え比較方法 ： もっとも簡単、信号源に少し工夫すれば不確かさ評価が楽

② 取替え同時比較方法 ： もっとも高精度な校正方法の一つ、パワースプリッタの評価さえできれば小さな不確かさで広帯域な校正に有効

入射電力の定義

高周波電力計は入射電力を測定する機器であるため、最初に測定量である入射電力の定義を行う。特性インピーダンス Z_0 が決まっている一様な伝送線路 L （7 mm 同軸や 3.5 mm 同軸等）上に仮想的に決められた基準面（通常コネクタの外導体の接触面や導波管フランジの接続面）に、負荷が接続されているとする。この時、負荷側に向かって基準面を単位時間に通過するエネルギーを負荷への入射電力(P_{in})という。入射電力は伝送線路 L 上での負荷と信号源の両方の反射係数（それぞれ Γ_L、Γ_g）に依存し、特性インピーダンス Z_0 に対する信号源の出力電力(P_g)を用いて（式 1）で求められる。特に無反射負荷（$\Gamma_L = 0$）への入射電力は、特性インピーダンス Z_0 に対する信号源の出力電力(P_g)と等しくなる。

$$P_{\mathrm{in}} = \frac{P_{\mathrm{g}}}{|1-\Gamma_{\mathrm{g}}\Gamma_{\mathrm{L}}|^2} \qquad （式 1）$$

この負荷を高周波電力計と読み替える。この時、高周波電力計はこの入射電力（高周波電力計のコネクタの外導体の接触面を単位時間当たり通過するエネルギー、単位はワット[W]）を測定する。

JCSS においては国家標準(NMIJ)から発行される校正証明書は**校正係数**（指示値÷入射電力）で発行されているため、このガイドでは校正係数の不確かさの見積もり方法を紹介する。校正係数の説明については 2.を参照のこと。

参考 1-1： 本ガイドでは詳しくは述べないが、信号発生器の出力電力 P_g を測定する際には、上記の議論により反射係数 Γ_L が 0 の高周波電力計で測定するのが良いことがわかる。なぜなら、高周波電力計は入射電力 P_{in} を測定する機器であり、一方（式 1)より反射係数 Γ_L が 0 の時、P_{in} は P_g と等しくなるからである。しかし、一般には Γ_Lも Γ_gも 0 ではないため、P_g を正しく測定するためには（式 1）の分母が既知であるか、不確かさの要因として取り扱われる必要が生じる。

2. 校正係数

校正係数とは「高周波電力計の指示値を入射電力で割った値」で定義される。高周波電力計の校正では、標準器の校正係数を用いて被校正機器の校正係数を決定する方法が一般的に用いられ

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。

ている。

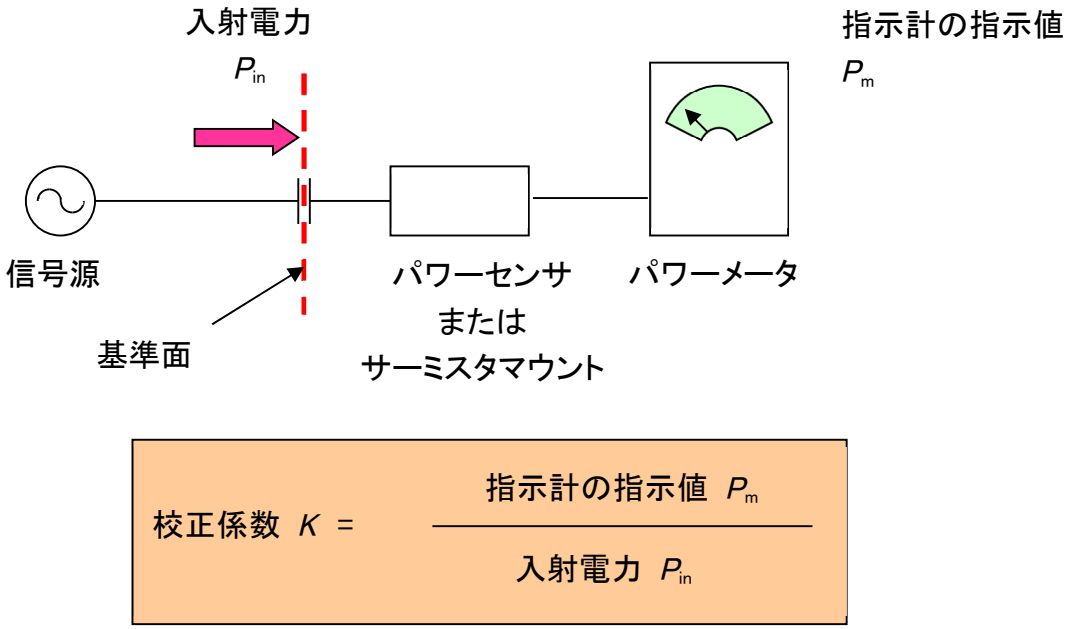


図 2.1 校正係数の定義

以下、高周波電力計を検出部と指示計に分けて話を進める。検出部は高周波信号の検出の方式により、サーミスタマウントやパワーセンサ等いくつか型がある(パワーセンサは更に、熱型、ダイオード型等に分類して議論されることもある。)。指示計はパワーメータ(本体)等と呼ばれることがある。NMIJ による jcss 校正証明書においては、検出部と指示計を対にして、図 2.1 に示された校正係数とその相対拡張不確かさが報告される。

参考 2-1: メーカ等による校正では検出部単体のみの校正係数が報告されることがある。その際、使用時にパワーメータ(本体)に内蔵された基準信号源(多くの場合 50 MHz、1 mW)で目盛り合わせを行うものについては、検出部単体に対する校正係数が 50 MHz での校正係数で規格化されている場合があるので注意する必要がある(詳細は、メーカ等に問合わせのこと)。これは高周波電力の測定値が、目盛り合わせを行う個別の指示計の基準信号源に依存している一方で、指示部と検出部を別々に校正するニーズがあるためである。この場合、正しい測定値を保証するためには組み合わせて使用する指示計の基準信号源の出力電力も校正されている必要がある。

以下簡単に規格化された校正係数 K_{rel_50} から規格化されていない校正係数 K を得る方法を示す。内蔵基準信号源(50 MHz, 1 mW と仮定)の出力電力の校正値が既知の場合、まず 50 MHz での規格化されていない校正係数 K_{50} を図 2.1 の式から算出する。これには、検出部を内蔵基準信号源に接続し、目盛りあわせを行った後、調整後の指示値(1.000 mW 等)を内蔵基準信号源の出力電力の校正値(例えば 0.998 mW)で割れば良い(参考 2-2)。一旦、50 MHz での規格化されていない校正係数 K_{50} がわかれば、これを規格化された校正係数に乗ずることにより、任意の周波数で規格化されていない校正係数 K を得ることが出来る。一方、サーミスタマウントは、内蔵基準信号源による目盛りあわせの必要が無く、指示計の個体差による不確かさの要因を少なくすることが出来るので、検

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。

出部単体の校正でも規格化されていない校正係数 *K* で報告が行われる。

NMIJ の校正証明書では検出部と指示計を対で校正するため、50 MHz の校正係数で規格化することは行っていない。ただし、国家標準(NMIJ)による校正時とユーザ側での使用時に目盛り合わせ用の基準信号源のレベルが変わっていないことを別の方法で(管理用標準器との比較やサーミスタマウント等での測定)確認する事が望ましい。

参考 2-2: 一般に、検出部への入射電力は内蔵基準信号源の出力電力に等しく無いが(参考 1-1)、50 MHz 付近では検出部と内蔵基準信号源の反射係数はともに十分小さく設計されている。このことから内蔵基準信号源の出力電力は検出部への入射電力にほぼ等しくなり、上記の方法で 50 MHz における規格化されていない校正係数 *K* を求める事が出来る。検出部と指示計(内蔵基準信号源)の組み合わせが変われば、規格化されていない校正係数も変化する。

3. 比較校正方法の説明

2つの比較校正方法について説明する。

3.1 取り替え比較方法

取り替え比較方法は図 3.1 に示すように、安定に信号が出力される信号源に標準電力計と被校正電力計を交互に(取り替えて)接続することにより、校正を行う方法を指す。

取り替え比較方法を使用する場合、信号源の出力端子を直接テストポートとして使用すると、信号源の反射係数が大きくなることがあるので注意が必要である。不確かさが比較的大きくてもよい場合、この方法でも校正できる。より小さな不確かさが必要な場合、信号源とテストポートのアイソレーションを十分にとること(> 60 dB)。図 3.1 にアイソレータを使用した場合の比較校正システムの例を示す。アイソレータを使用する方法は、比較的限られた周波数範囲を校正するだけで良いような場合に向いている。図中で Γ_g、Γ_S、Γ_D、は Real と Imaginary 形式で書いた複素反射係数で表される。アイソレーションが十分大きいと見なせる場合、信号源の反射係数に代えて、(必要なら変換アダプタが接続された状態での)アイソレータの反射係数を Γ_g として利用出来る。特に、反射補正を行わない場合は、アイソレータの反射係数を小さくすることで精密な測定が可能である。テストポート用精密アダプタは必要なコネクタに応じてその種類だけ準備すること。アダプタは消耗品であるため劣化した場合には交換すること。アダプタ付きアイソレータの反射係数もアダプタを交換すると変化するので、個別に測定する必要がある。図 3.1 のモデル式中に現れる絶対値の部分を補正係数として扱う場合、更に精密な測定が可能になるが、標準電圧計のトレーサビリティとは別に Γ_g、Γ_S、Γ_D のトレーサビリティを確保することが必要である。

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。

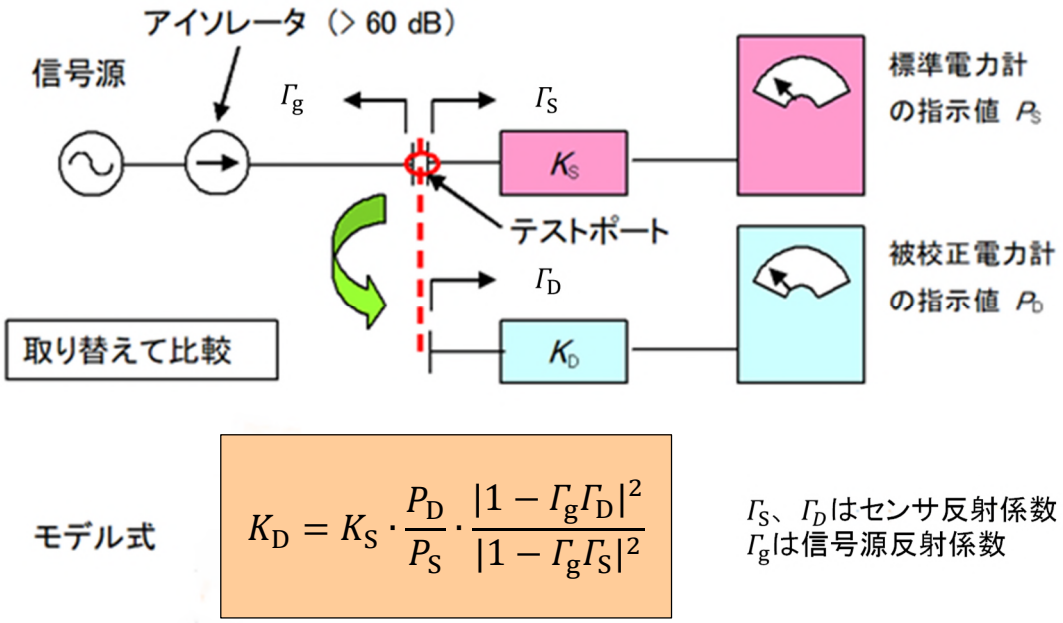


図 3.1 取り替え比較方法の例

3.2 取り替え同時比較方法

取り替え同時比較方法においては、方向性結合器又はパワースプリッタを用いること(ディバイダ、T 分岐は不確かさが大きくなるので望ましくない。)(参考 3-1)。方向性結合器又はパワースプリッタは必要なコネクタに応じてその種類だけ準備すること。アダプタを用いて拡張する場合は、後に述べる等価信号源反射係数 Γ_{gE} の評価をコネクタの種類ごとに行うこと。方向性結合器又はパワースプリッタは消耗品であるため劣化した場合には交換すること。

図 3.2 にパワースプリッタを使用した場合の比較校正システムの例を示す。パワースプリッタを使用する方法は、広帯域にわたる周波数範囲を校正することが必要な場合に向いている。図中で Γ_g、Γ_S、Γ_D、は Real と Imaginary 形式で書いた複素反射係数で表される。

(参考 3-1): Γ_{gE} は**等価信号源反射係数**と呼ばれる量で、実際の信号源反射係数とは異なる。理想的なパワースプリッタでは $\Gamma_{gE} = 0$ となるが、信号源の反射係数とテストポートと逆側に接続したモニタ電力計の反射係数が 0 の場合、テストポートの実際の反射係数は 0.25 となる。主な用途は比測定、レベリングループの分岐などであり、その際各出力ポートへ接続されたデバイスへの入射電力比を1に近くできる(反射の入射電力比への影響を小さくできる。実際の反射係数は大きい)。一方、理想パワーディバイダでは $\Gamma_{gE} = 0.5$、先の接続に対し実際の反射係数は 0 である。主な用途は電力分配であるが、出力ポートへ接続されたデバイスへ入射電力比はデバイスの反射係数に依存し易い(4.で使用している $M \fallingdotseq 1$ の近似が使えない)。したがって、デバイスとパワーディバイダ間の整合損は小さいが、校正用途には向かない。

T 分岐では $\Gamma_{gE} = -1$、パワー測定については T 分岐の大きさが波長に比べて十分小さい時にのみ使用可(大体 100 MHz くらいまで)。ただし、高周波電圧の校正には適している。

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。

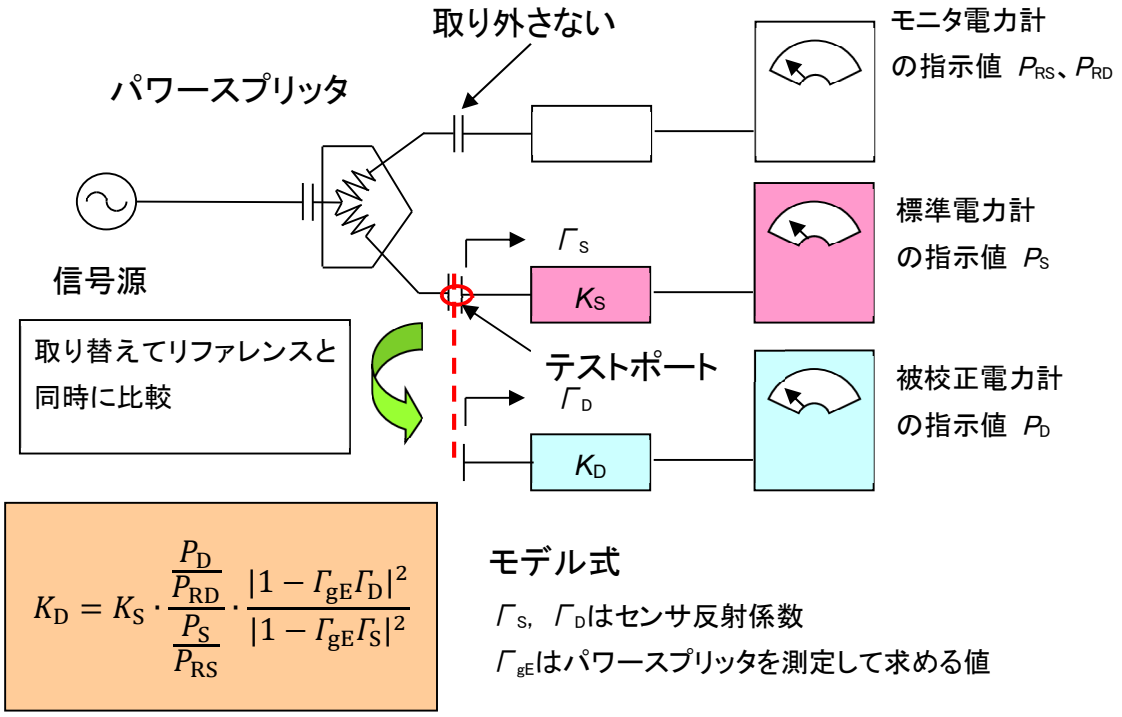


図　3.2　取り替え同時比較方法の例

4.　主な不確かさの要因

主な不確かさの要因とその代表的な値を例示する。

4.1　標準器の不確かさ:　→0.4 %から 1.5 %

4.2　反射に関する不確かさ:　→2 %から 4 %（ベクトル反射補正を行わない場合）
詳細は 5.を参照のこと。

4.3　繰り返し測定のばらつきに関する不確かさ:　→0.1 %以下（正しいコネクタの取扱いが必要）
コネクタ着脱による再現性を見る場合には接続方向を変えて繰り返し測定を行うこと。

4.4　指示計の読みに関する不確かさ:　→0.1 %以下

4.5　測定環境の変化に関する不確かさ:　→個別に評価の必要あり

4.6　信号源の高調波、スプリアスに関する不確かさ:
→不要信号レベルが － 40 dBc 以下とすれば熱型センサの場合約 0.01 %（ただし、ダイオード型の場合最大 2 %以上）

4.7　信号源のレベル安定性に関する不確かさ:
→取り替え比較の場合、約 0.1 %から 0.5 %（信号源の安定度に依存する。レベリングされた信号源を使用すること。）
→取り替え同時比較方法の場合、考えなくて良い（リファレンスの値で規格化されているため）
ただし、公称校正入射電力値の数%程度以内で出力信号が安定していること。

4.8　必要なら更に要因を追加

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。

5.　反射に関する不確かさ（最大の不確かさ要因）

5.1　取り替え比較方法

Γ_S、Γ_Dをセンサ反射係数、Γ_gをアイソレータ付きテストポートの複素反射係数として、図 3.1 で示した校正係数のモデル式は（式 5.1）のように近似することができる。ただし、$|\Gamma_g\Gamma_S| \ll 1$かつ$|\Gamma_g\Gamma_D| \ll 1$であること。

$$K_D = K_S \cdot \frac{P_D}{P_S} \cdot \frac{|1-\Gamma_g\Gamma_D|^2}{|1-\Gamma_g\Gamma_S|^2}$$

$$\approx K_S \cdot \frac{P_D}{P_S} \cdot \{1 \pm 2(|\Gamma_g\Gamma_S| + |\Gamma_g\Gamma_D|)\} \quad \rightarrow K_D \approx K_S \cdot \frac{P_D}{P_S} \qquad （式 5.1）$$

（式 5.1）を計算して不確かさの要因 $u(M)$の標準不確かさを求める（U 分布を仮定）。なお、Γ_gのアイソレータ付きテストポートの反射係数の測定は図 5.1 を参照のこと。

$$u(M) = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{2}}|\Gamma_g\Gamma_S|\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{2}}|\Gamma_g\Gamma_D|\right)^2} \qquad （式 5.2）$$

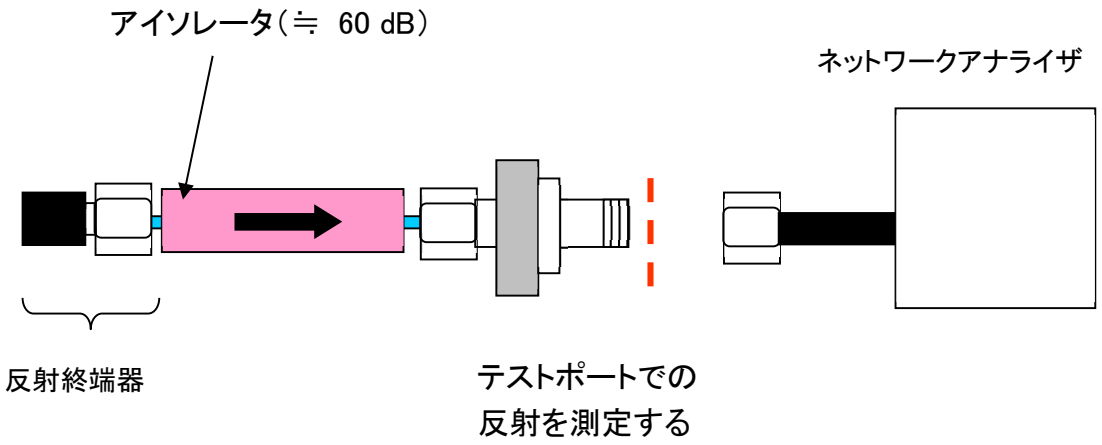


図 5.1 アイソレータの反射係数の測定

5.2　取り替え同時比較方法

Γ_S、Γ_Dをセンサ反射係数、Γ_{gE}をパワースプリッタの等価信号源反射係数として、図 3.2 で示した校正係数のモデル式は（式 5.3）のように近似することができる。ただし、$|\Gamma_{gE}\Gamma_S| \ll 1$かつ$|\Gamma_{gE}\Gamma_D| \ll 1$であること。

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。

$$K_{\mathrm{D}} = K_{\mathrm{S}} \cdot \frac{P_{\mathrm{D}}/P_{\mathrm{RD}}}{P_{\mathrm{S}}/P_{\mathrm{RS}}} \cdot \frac{\left|1-\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{D}}\right|^2}{\left|1-\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{S}}\right|^2}$$

$$\approx K_{\mathrm{S}} \cdot \frac{P_{\mathrm{D}}/P_{\mathrm{RD}}}{P_{\mathrm{S}}/P_{\mathrm{RS}}} \cdot \{1 \pm 2(|\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{S}}| + |\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{D}}|)\}$$

$$\rightarrow K_{\mathrm{D}} \approx K_{\mathrm{S}} \cdot \frac{\frac{P_{\mathrm{D}}}{P_{\mathrm{RD}}}}{\frac{P_{\mathrm{S}}}{P_{\mathrm{RS}}}} \qquad \text{（式 5.3）}$$

（式 5.3）における$\{1 \pm 2(|\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{S}}| + |\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{D}}|)\}$項は *M* と書き直し、入力推定値 1 として反射に関する不確かさとして見積もる。

（式 5.3）を計算して不確かさの要因 u(*M*)の標準不確かさを求める（U 分布を仮定）。なお、Γ_{gE} のパワースプリッタの等価信号源反射係数の測定は図 5.2 を参照のこと。

$$u(M) = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{2}}|\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{S}}|\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{2}}|\Gamma_{\mathrm{gE}}\Gamma_{\mathrm{D}}|\right)^2} \qquad \text{（式 5.4）}$$

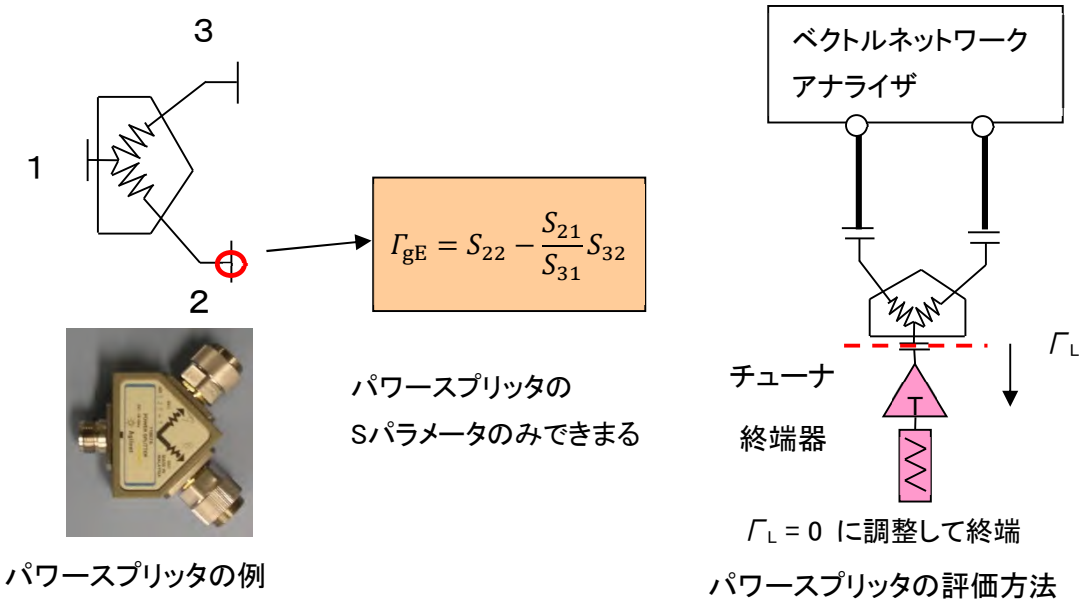


図 5.2 パワースプリッタの等価信号源反射係数の測定

例として、$|\Gamma_{\mathrm{S}}| = |\Gamma_{\mathrm{D}}| = 0.050$、$|\Gamma_{\mathrm{gE}}| = 0.100$ の場合、（式 5.2）を計算すると次のようになる。

$$\sqrt{2|0.100 \times 0.050|^2 + 2|0.100 \times 0.050|^2} = 0.010$$

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. 不確かさの算出

主な不確かさ要因の値を全て求めて標準不確かさに直し、必要に応じて感度係数を掛けてそれらの二乗和で合成標準不確かさを求める必要がある。以下取り替え同時比較方法の場合について不確かさの算出例を示す。

取り替え同時比較校正方法の不確かさ伝播の式は(式 6)のように表される。

$$u_c^2(K_D) = \left(\frac{R_D}{R_S}\cdot M\right)^2 u^2(K_S) + \left(K_S\cdot\frac{M}{R_S}\right)^2 u^2(R_D) + \left(-K_S\cdot\frac{R_D}{R_S^2}\cdot M\right)^2 u^2(R_S) + \left(K_S\cdot\frac{R_D}{R_S}\right)^2 u^2(M) + s^2(K_R) \qquad (式\ 6.1)$$

ただし、

$$R_S = \frac{P_S}{P_{RS}}, R_D = \frac{P_D}{P_{RD}} \qquad (式\ 6.2)$$

図 3.2 のセットアップを用いた校正の場合、K_S、R_D、R_S および M の入力推定値が全て 1 なので感度係数は 1 あるいは−1 になり、単純な二乗和で合成標準不確かさを求めることができる。ここで、$|\Gamma_{gE}| = 0.100$、$|\Gamma_S| = |\Gamma_D| = 0.050$、$u(K_S) = 0.010$ として計算した取り替え同時比較方法の不確かさバジェット表の例を(表 6)に示す(現行の JCSS の CMC の計算においては、DUT の反射を考慮しないので、$|\Gamma_D| = 0$ とおいて計算しなおすこと。)。

入力量	不確かさの要因	単位	タイプ	分布	標準不確かさ $u(Xi)$	感度係数 $c(Xi)$	$\|c(Xi)\|u(Xi)$	自由度
K_S	標準器の不確かさ	なし	B	正規	0.010	1	0.010	50
R_D	パワー比の分解能	なし	B	一様	0.001/√3	1	0.00058	∞
R_S	パワー比の分解能	なし	B	一様	0.001/√3	−1	0.00058	∞
M	反射	なし	B	U	0.010	1	0.010	∞
K_D	コネクタ着脱による再現性	なし	A	正規	0.001/√5	1	0.00045	4
								201
合成標準不確かさ					$u_c(K_D) = \sqrt{\sum_i u^2(X_i)c^2(X_i)}$		0.014	
拡張不確かさ (包含係数 $k = 2$)					$U(K_D) = k\cdot u_c(K_D)$		0.028	

表 6 不確かさバジェット表(取り替え同時比較方法の例)

標準器の不確かさの自由度については、校正証明書に記載されていればその値を用いる。もし、校正証明書に信頼の水準が約 95 %でかつ包含係数が 2 と記載されている場合は自由度を 50 としてよい。それ以外の場合、GUM の付属書 G 表 G.2 を用いて自由度を推定する。コネクタの着脱による再現性の自由度は、着脱回数 − 1 とする。表 6 における反射の自由度については、反射係数の不確かさが問題とならない場合には、∞としてよい。

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。

7. 拡張不確かさ

校正証明書に記載する拡張不確かさは信頼の水準約 95 %に対応する区間とし、包含係数(k)を決定すること。上記の例の場合、有効自由度は十分に大きいため、信頼の水準約 95%に対応する区間の包含係数は k = 2 を採用する。よって、校正証明書に記載する拡張不確かさは次のとおりとなる。

$$U(K_D) = k \cdot u_c(K_D) = 2 \times 0.014 = 0.028$$

8. 結果報告

校正証明書に記載される校正結果の例を次に示す。

校正結果

周波数 [GHz]	校正係数	不確かさ (k = 2) [%]	有効自由度
1	0.999	2.8	201
8	0.985	3.0	201
12	0.973	3.5	201

ただし、校正係数は指示値を校正値で除したもの
指示値はパワーメータ、パワーセンサによる測定電力
校正値は標準器による測定電力
不確かさは包含係数 k = 2 を用いた相対拡張不確かさで表され、信頼の水準約 95 %を持つと推定される区間を与える。

校正実施条件

1) 校正電力レベル : 1 mW
2) 温度 : 23 ℃±1 ℃
相対湿度 : 50 %±20 %

9. 参考文献

NMIJ 第3回高周波クラブ会合資料 「比較校正方法の実演と不確かさバジェットの作成」
独立行政法人産業技術総合研究所 島岡 一博、木下 基

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。