

## 高周波電力計の比較校正方法とその不確かさの評価

木下 基\*, 島岡 一博\*, 小見山 耕司\*

(平成19年5月16日受理)

## Comparison method for the calibration of microwave power meters and its uncertainty analysis

Moto KINOSHITA, Kazuhiro SHIMAOKA, Koji KOMIYAMA

## Abstract

In this paper, we describe a precise comparison method for calibrating microwave power meters. The method is demonstrated using a newly developed comparison measurement system. The calibration factor  $K_u$  of a power meter is determined from the calibration factor  $K_s$  of a standard power meter with this system at frequencies from 10 MHz to 18 GHz and a power of 1 mW. A vector correction technique for source reflection mismatch errors is used to minimize the uncertainty of the calibration. After the correction, the uncertainty of  $K_u$  is 0.0056, which is only 0.0001 higher than that of  $K_s$  at a frequency of 18 GHz. The difference between  $K_u$  determined from this comparison measurement system and  $K_u'$  determined directly from a primary standard (a calorimeter) is less than their uncertainties.

## 1. 緒論

近年、電波技術は通信、放送、探査などに多く利用され、特に携帯電話やテレビ放送などに利用される数十MHzから数GHz帯の電波には高い需要がある。また、電波を使用する際には電波法により混信や通信妨害などを防ぐために高周波放射電力に関して法的に規定され、高度な通信技術を有効に機能させるためにも、これらの規定を電波利用者全員が順守することが求められる。更に、定量的な規定の順守には、量を測る測定器、すなわち高周波電力計が確実に校正されている必要がある。

高周波電力標準に関して、我が国では産業技術総合研究所の計量標準総合センター（以下、NMIJ: National Metrology Institute of Japan）が所有するカロリメータ式電力測定装置（以下、単にカロリメータと記す）を一次標準器としたトレーサビリティ体系が構築されていて、一般的な機器においては上位の校正機関で校正された参照標準器との比較によって被校正器を校正する比較校正を行う。そして、被校正器の校正結果には、参照標

準器の持つ不確かさに比較校正の作業に伴う不確かさを上乗せした不確かさが付加される。比較校正においては、その不確かさの増大を極力抑えること、さらに各校正作業において不確かさの要因を明確にし、最終的にはそれらを合成した不確かさを定量的に求めることになる。そのような高精度の校正を行うためには校正技術に関して様々な知識が必要であるが、それらのノウハウについて記述された文献は少ない。そこで、本論文では高精度な比較校正の方法について、その実例を交えて説明する。第2節では高精度な比較校正方法として知られる取替え同時比較方法の原理を、第3節ではNMIJにおいて開発した取替え同時比較方法に基づく比較校正システムの詳細を、第4節では開発した比較校正システムによる校正の実例を、第5節ではその比較校正に伴う不確かさの評価方法について述べる。

## 2. 比較校正方法の原理

高周波電力の標準供給体系において、被校正器は主に高周波電力計（パワーメータ）を対象とし、これに校正係数などを値付けすることで標準供給を行っている<sup>1), 2)</sup>。校正係数の定義とは以下の通りである。一般に、高周波電力計に実際に入射した電力とその高周波電力計の指示値の間には、電磁波の反射や高周波エネルギーの変換効

\* 計測標準研究部門 電磁波計測科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致していません。

率などが原因で差が生じる。この差異を補正する係数が校正係数であり、高周波電力計への入射電力を $P_{iu}$ として、そのときの電力計の指示値を $P_{du}$ とすると、それらの比が校正係数 $K_u$ であり、

$$K_u = \frac{P_{du}}{P_{iu}} \quad (1)$$

で与えられる<sup>3)</sup>。比較校正では、標準電力計の校正係数を基に被校正電力計の校正係数を求める。

本節では、高周波電力計の比較校正方法の中でも代表的な方法である取替え同時比較方法を紹介する。取替え同時比較方法は精密且つ正確な校正が求められる場合に推奨され、事実、多くの計量機関で用いられている方法である<sup>4)</sup>。

取替え同時比較方法では図1に示すように、電力分岐回路の一端(図中のポート3; 以下この端子をテストポートと呼ぶ)で標準電力計(以下, STD: standard)と被校正電力計(以下, DUT: Device Under Test)を取替えて測定し、それぞれの測定毎にもう一方の出力端子に接続したリファレンス電力計と指示値の比を求める。まず、テストポートにSTDを接続した場合を考える。このときのSTDとリファレンス電力計の指示値を $P_{ds}$ ,  $P_{ms}$ , リファレンス電力計の校正係数を $K_m$ , STDおよびリファレンス電力計の複素反射係数を $\Gamma_s$ および $\Gamma_m$ , 電力分岐回路のSパラメータ $S_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ; 各ポート番号は図1に示す通り)<sup>5)</sup>、とすれば、STDの校正係数 $K_s$ は、

$$K_s = K_m \frac{P_{ds}}{P_{ms}} \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right|^2 \left| \frac{1 - \Gamma_{ge3} \Gamma_s}{1 - \Gamma_{ge2} \Gamma_m} \right|^2 \quad (2)$$

と書ける<sup>6)</sup>。ここで $\Gamma_{ge2}$ と $\Gamma_{ge3}$ は、 $S_{ij}$ を用いて、

$$\Gamma_{ge2} = S_{22} - \frac{S_{32} S_{21}}{S_{31}} \quad (3)$$

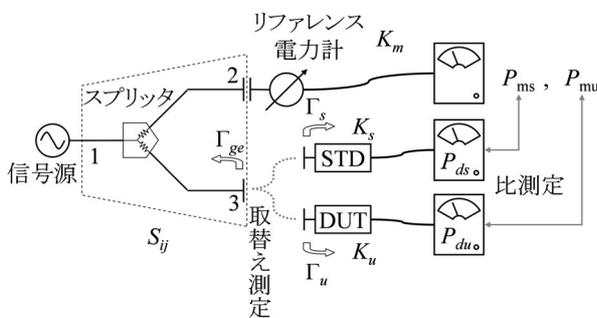


図1 取替え同時比較方法

$$\Gamma_{ge3} = S_{33} - \frac{S_{23} S_{31}}{S_{21}} \quad (4)$$

であり<sup>6)-8)</sup>、これらの値はネットワークアナライザなどで測定が可能である。

次にテストポートにDUTを接続した場合を考える。前述の場合と同様に、このときのDUTとリファレンス電力計の指示値を $P_{du}$ ,  $P_{mu}$ , DUTの複素反射係数を $\Gamma_u$ とすると、DUTの校正係数 $K_u$ は、

$$K_u = K_m \frac{P_{du}}{P_{mu}} \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right|^2 \left| \frac{1 - \Gamma_{ge3} \Gamma_u}{1 - \Gamma_{ge2} \Gamma_m} \right|^2 \quad (5)$$

となる。以上のテストポートにSTDを接続した場合とDUTを接続した場合の2回の測定から、つまり(2)式と(5)式から、

$$K_u = K_s \frac{P_{du}/P_{mu}}{P_{ds}/P_{ms}} \left| \frac{1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u}{1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s} \right|^2 \quad (6)$$

が得られ、この式からDUTの校正係数が得られる。ここで、簡単のため $\Gamma_{ge3} = \Gamma_{ge}$ とした。(6)式の標準器の校正係数 $K_s$ は上位の標準機関で校正を受けることにより既知であり、 $\Gamma_{ge}$ と $\Gamma_s$ は事前に測定可能な量であるから、実際の校正作業としては $P_{ds}/P_{ms}$ および $P_{du}/P_{mu}$ の電力比と $\Gamma_u$ を測定すれば、DUTの校正係数 $K_u$ を知ることができる。

$\Gamma_{ge}$ は等価信号源反射係数と呼ばれている。通常、高周波の電力測定においては信号源側と電力計側の間の多重反射の影響を補正するため、両者の反射係数を知る必要があるが、実際に信号源の反射係数を測定することは簡単ではない。しかし、取替え同時比較方法を用いる場合には(4)式の等価信号源反射係数が式に現われ、実際の信号源の反射係数は必要ない。ここで(6)式中の $|1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2 / |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2 \equiv M$ とする。 $M$ はテストポートに接続されたDTUおよびSTDと分岐回路との間の多重反射の補正係数を意味し、この反射補正には主に2通りの取り扱いがある。1つ目は $1 \gg |\Gamma_{ge} \Gamma_u|, |\Gamma_{ge} \Gamma_s|$ とみなし、補正係数 $M \approx 1$ と近似してその不確かさを $(2|\Gamma_{ge}|^2 |\Gamma_u|^2 + 2|\Gamma_{ge}|^2 |\Gamma_s|^2)^{0.5}$ とする方法である。これは、 $\Gamma_{ge}, \Gamma_u, \Gamma_s$ の値をベクトル量として測定することが困難な場合に有効である。2つ目は $\Gamma_{ge}, \Gamma_u, \Gamma_s$ をベクトル量として、それらの不確かさを含めて測定し、 $M$ のベクトル計算により反射補正する方法である。前者のような近似を行わないため、後者のほうが校正作業は複雑であるが精度は高い。次節で紹介する7 mm同軸比較校正システムでは後者の方法を用いて校正に伴う不確かさの増大を抑制している。

3. 7mm同軸比較校正システム

本節では、NMIJで開発した7 mm同軸比較校正システムについて述べる。本システムはN型もしくはPC-7コネクタ(10 MHz - 18 GHz)の高周波電力計を対象に取替同時比較方法に基づいて比較校正を行う。図2に7 mm同軸比較校正システムの開蓋写真を示す。本システムでは、信号源からの信号をパワースプリッタで二分割し、一方をリファレンス電力計に、他方をテストポートに伝送している。図中に示すとおり、それぞれのポート番号は、ポート1を信号の入力ポート(シグナルポート)、ポート2をリファレンス電力計の接続ポート(リファレンスポート)、ポート3をSTDとDUTの測定ポート(テストポート)と定義した。比較校正の手順としては、テストポートにSTDおよびDUTを接続し、それぞれの測定においてリファレンス電力計の指示値との電力比を測定する。テストポートの直前に挿入した6 dB減衰器は(4)式の $S_{33}$ を小さくする役目を果たす。また、今回開発した装置の特徴は、周波数が4 GHz以上の領域において、パワースプリッタとテストポートの間にアイソレータを挿入した点である。アイソレータは使用する周波数帯域によって4-8 GHz用と8-18 GHz用の20 dBアイソレーションのものを各3個ずつ挿入した。4 GHz以下の帯域はセミリジッドケーブルで直結し、計3種類の伝送路をスイッチで切り替えて使用する。このようにした理由は、通常(4)式の通り $\Gamma_{ge}$ の算出には3ポートのSパラメータを測定する必要があるにも関わらず、アイソレータを使用すると(4)式は、 $S_{23}$ を0とみなすことができ、

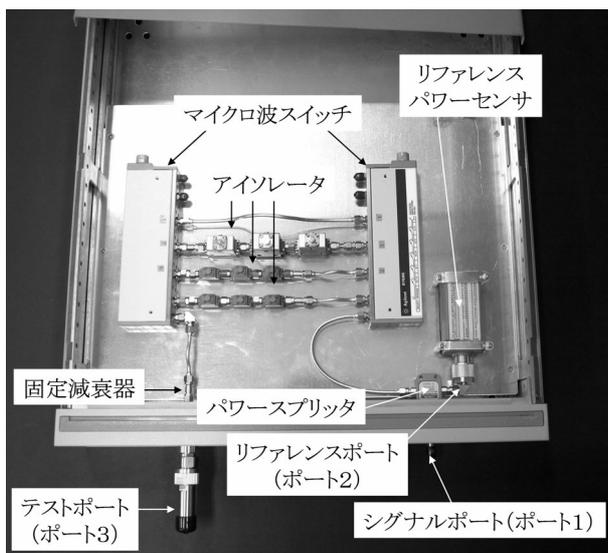


図2 7mm同軸比較校正システム

$$\Gamma_{ge} \approx S_{33} \quad (7)$$

のように近似できるためである。これは $\Gamma_{ge}$ を求めるために実質的にテストポートから信号源側を見たときの反射係数を測定するだけで良いことを示している。このようなアイソレータを使用した構造は $\Gamma_{ge}$ の評価をせずに1ポート反射係数の測定で済ませたい場合において非常に効果的である。但し、今回は初期評価のため全周波数帯域において3ポートのSパラメータを測定した。3ポートのS

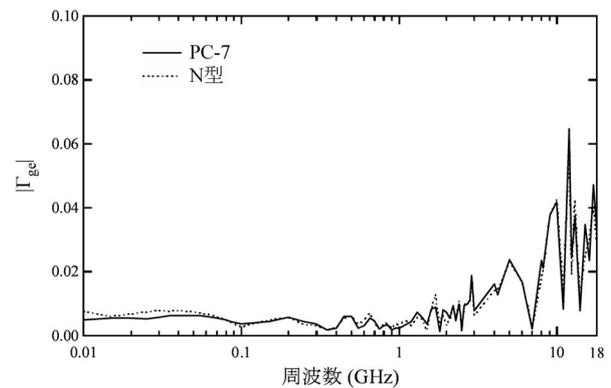
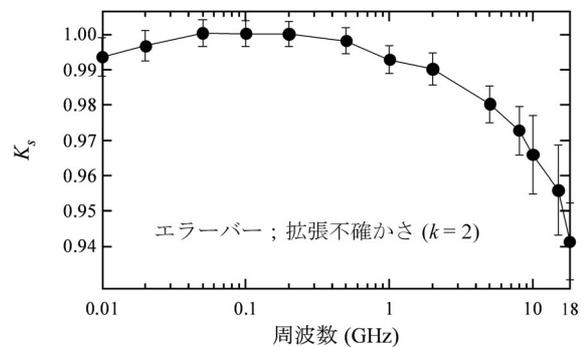
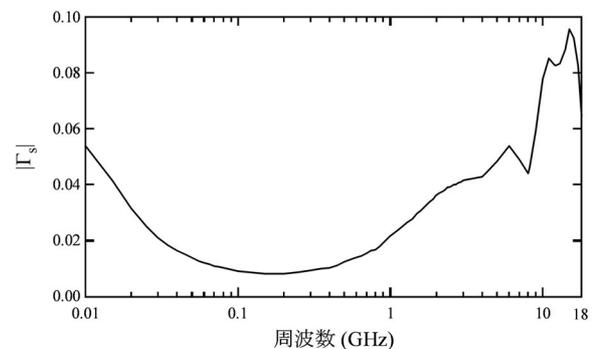


図3 同軸比較校正装置の等価信号源反射係数の絶対値



(a) STDの校正係数



(b) STDの反射係数の絶対値

図4 STDの特性

パラメータから求めた等価信号源反射係数の絶対値 $|\Gamma_{ge}|$ を図3に示す。テストポートのコネクタはDUTに応じて変換アダプタでN型とPC-7を選択することができ、図中の実線はPC-7の場合、点線はN型の場合の等価信号源反射係数の絶対値を示している。本装置を構成する回路は安定性を高めるために1つの筐体内に組み込んだ。また、測定中の環境温度が $23 \pm 1$ 、相対湿度が $50 \pm 20\%$ の範囲内に納まっていることを確認するために、テストポート付近に自動温度・湿度記録計を設置した。

STDには、NMIJが所有する特定標準器であるカロリメータで校正済みのサーミスタマウント型の電力計を使用した。STDの校正係数とその不確かさ(包含係数 $k=2$ )を図4(a)に示す。STDは我が国の特定標準器で直接校正したもので、その不確かさは現在実現できる最小のレベルである。さらにSTDの反射係数の絶対値 $|\Gamma_s|$ を図4(b)に示す。

#### 4. 校正の実例

本節ではN型のサーミスタマウントをDUTとして行った校正の実例を示す。第2節で述べた通り $\Gamma_{ge}$ ,  $\Gamma_s$ ,  $K_s$ は個々のDUTの特性に依存しないため、校正の都度測定する必要は無い(但し、定期的に再測定を行って値が変化していないことを確認する作業は必要である)。従って各々の校正作業においては、DUTの反射係数 $\Gamma_u$ と取替え同時比較による電力比を測定すれば良い。

まず、ベクトルネットワークアナライザでDUTの反射係数 $\Gamma_u$ を測定した。その絶対値 $|\Gamma_u|$ を図5に示す。

次に前節で紹介した7 mm同軸比較校正システムを用いて取替え同時比較を行った。まず、テストポートにDUTを接続した状態で信号源の発振周波数を10 MHzから18 GHzまで掃引した。このとき全周波数に亘ってテストポートでの出力がほぼ一定(1 mW)になるように信号源の出

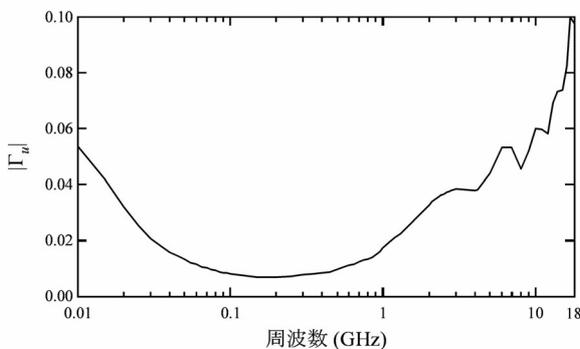


図5 DUTの反射係数の絶対値

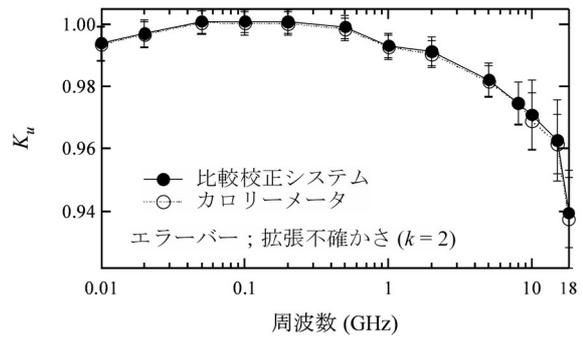


図6 DUTの校正結果

力レベルを調整した。掃引した全周波数点でDUTとリファレンス電力計の指示値の比を測定した後、DUTとSTDを取替え、STDに対しても同様の測定を行った。このDUTとSTDに対する測定を一組として6回を行い、それらの平均値から最終結果を求めた。

以上の測定によって得られた値から、(6)式を用いてDUTの校正係数を算出した結果を図6に示す。また参考のため、NMIJ所有の7 mm同軸カロリメータで直接校正したDUTの校正係数を同時に示す。黒丸に実線のプロットが比較校正システムによるもの、白抜き丸に点線のプロットがカロリメータによるものである。図から両結果は包含係数 $k=2$ の拡張不確かさを示すエラーバーの範囲内で程良く一致していることがわかる。定量的には両者の差は最大でも互いの拡張不確かさの5分の1以内に収まっている。

この不確かさの求め方の詳細は第5節で述べる。

#### 5. 不確かさの評価

前節で求めた校正係数の合成標準不確かさ $u_c(K_u)$ は、

$$u_c^2(K_u) = \left( \frac{\partial K_u}{\partial K_s} u(K_s) \right)^2 + \left( \frac{\partial K_u}{\partial R_u} u(R_u) \right)^2 + \left( \frac{\partial K_u}{\partial R_s} u(R_s) \right)^2 + \left( \frac{\partial K_u}{\partial M} u(M) \right)^2 + s^2(K_u) \quad (8)$$

で与えられる<sup>9)</sup>。ここで、 $R_u = P_u / P_{mu}$ ,  $R_s = P_s / P_{ms}$ ,  $M = |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2 / |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2$ であり、 $u(K_s)$ ,  $u(R_u)$ ,  $u(R_s)$ ,  $u(M)$ はそれぞれ $K_s$ ,  $P_u$ ,  $P_s$ ,  $M$ の標準不確かさ、 $s(K_u)$ は $K_u$ の繰り返し測定に関する平均の実験標準偏差である。 $u(K_s)$ は上位標準器の校正証明書記載の値(ここではカロリメータによる校正結果の不確かさ)を用いた $u(R_u)$ ,  $u(R_s)$ は、一様分布であることを仮定して、電力計の指示値において安定して測定できる最小桁を3の平方根で除

した値を採用した．また， $u(M)$ は，本文末の付録を参考にすると，

$$u^2(M) = 4|\Gamma_s - \Gamma_u|^2 u^2(|\Gamma_{ge}|) + 4|\Gamma_{ge}|^2 \{u^2(|\Gamma_s|) + u^2(|\Gamma_u|)\} \quad (9)$$

と展開できる． $u(|\Gamma_{ge}|)$ ， $u(|\Gamma_s|)$ ， $u(|\Gamma_u|)$ は $|\Gamma_{ge}|$ ， $|\Gamma_s|$ ， $|\Gamma_u|$ の標準不確かさであり，さらに $u(|\Gamma_{ge}|)$ を(4)式を参考にして展開すると，

$$u^2(|\Gamma_{ge}|) = |u(S_{33})|^2 + \left| \frac{S_{23}}{S_{21}} \right|^2 |u(S_{31})|^2 + \left| \frac{S_{31}}{S_{21}} \right|^2 |u(S_{23})|^2 + \left| \frac{S_{23}S_{31}}{S_{21}^2} \right|^2 |u(S_{21})|^2 \quad (10)$$

となる． $u(S_{33})$ ， $u(S_{31})$ ， $u(S_{21})$ ， $u(|\Gamma_s|)$ ， $u(|\Gamma_u|)$ はすべて測定に用いたネットワークアナライザの不確かさから見積もった．

以上のようにそれぞれの不確かさの成分見積もりを(8)式に代入して計算を行うことで，各校正係数に対する不確かさが得られる．表1に周波数18 GHzにおける各不確かさ成分をまとめたバジェット表を示す．表からわかる通り， $K_u$ の不確かさの大部分は $K_s$ の不確かさによるものである．今回紹介した比較校正システムによる比較校正に伴う不確かさの増大は周波数が18 GHzのときに最大で，0.0055から0.0056になる程度で，これは参照標準器の不確かさに対して僅か1.8%の増加である．ここで，周波数10 MHzから18 GHzにおけるSTDからDUTへの不確かさの伝播結果を図7に示す．黒丸に実線のプロットは $K_u$ の相対拡張不確かさ（包含係数 $k=2$ ），白抜き四角に点線のプロットは $K_u$ と $K_s$ の相対拡張不確かさの差つまり比

表1 不確かさバジェット

N型, 周波数 18 GHz

入力量 $x_i$	不確かさの要因	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $c_i = \partial K_u / \partial x_i$	$ c_i  u(x_i)$	
$K_s$	STDの不確かさ	0.0055	0.997	0.0055	
$P_s / P_{ms}$	指示計の最小桁	$5.8 \times 10^{-5}$	-11.9	$6.9 \times 10^{-4}$	
$P_u / P_{mu}$	指示計の最小桁	$5.8 \times 10^{-5}$	11.9	$6.9 \times 10^{-4}$	
M	$\Gamma_{ge}$	VNA*の不確かさ	0.0035	0.0617	$2.2 \times 10^{-4}$
	$\Gamma_s$	VNAの不確かさ	0.0033	0.0524	$1.7 \times 10^{-4}$
	$\Gamma_u$	VNAの不確かさ	0.0035	0.0524	$1.8 \times 10^{-4}$
SDOM**	再現性	$5.2 \times 10^{-4}$	1	$5.2 \times 10^{-4}$	
		合成標準不確かさ $u(K_u)$	0.0056		
		拡張不確かさ ( $k=2$ )	0.0112		

\* VNA: Vector Network Analyzer

\*\* Standard Deviation Of The Mean

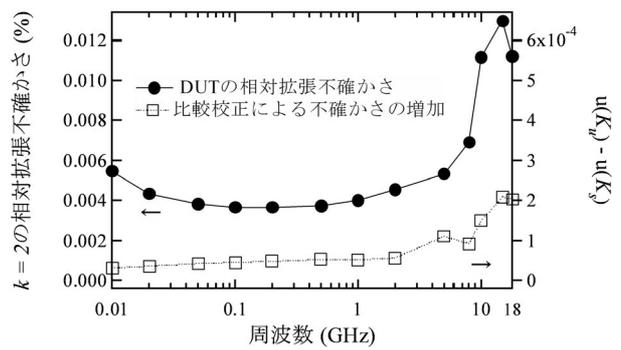


図7 比較校正による不確かさの伝播

較校正によって増加した不確かさを示している．図7に示すように，本システムを用いると上位標準器の不確かさをほとんど変えることなく被校正器に伝えられることがわかる．

一方，第2節で述べた $(2|\Gamma_{ge}|^2|\Gamma_u|^2 + 2|\Gamma_{ge}|^2|\Gamma_s|^2)^{0.5}$ を計算すると， $M \approx 1$ とする方法ではこの近似による不確かさは最大で0.009程度になる．表1のパジェット表の各項目と比較すると，これが支配的な不確かさの要因になることがわかる．このことから，等価信号源反射係数とSTDおよびDUTの反射係数をベクトル量として測定して反射補正を行うことの重要性を認識することができる．

## 6. 総括

高精度で代表的な校正方法として取替え同時比較方法を説明し，その原理に基づいて開発した7 mm同軸高周波電力計に対する比較校正システムを紹介した．本装置のテストポートはPC-7-N型アダプタで切り替えが可能であり，それぞれにおいて装置の等価信号源反射係数を測定した．本システムでは，校正の際に等価信号源反射係数と標準電力計および被校正電力計の反射係数による補正を行うことで，比較校正に伴う不確かさの増大を極めて小さくし，高い精度で校正を行うことが可能である．代表的な被校正電力計であるサーミスタマウントに対して本システムによる校正を行ったところ，直接カロリメータを用いて校正した結果と不確かさの範囲内で良く一致した．また，比較校正による不確かさの増大は，校正に用いた標準器の不確かさに比べて十分小さいことが確かめられた．

## 付 録

ここでは, (9)式を導出する. まず, 反射係数 $\Gamma_{ge}$ ,  $\Gamma_s$ ,  $\Gamma_u$ の実測値を $\Gamma_{geM}$ ,  $\Gamma_{sM}$ ,  $\Gamma_{uM}$ と定義し, それらの知ることの出来ない真の値を $\Gamma_{geA}$ ,  $\Gamma_{sA}$ ,  $\Gamma_{uA}$ と定義する. これらを用いると,  $M = |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_u|^2 / |1 - \Gamma_{ge} \Gamma_s|^2$ の実測値と真の値との差 ( $M$ )は,

$$\Delta(M) = \left| \frac{1 - \Gamma_{geM} \Gamma_{uM}}{1 - \Gamma_{geM} \Gamma_{sM}} \right|^2 - \left| \frac{1 - \Gamma_{geA} \Gamma_{uA}}{1 - \Gamma_{geA} \Gamma_{sA}} \right|^2 \quad (A.1)$$

である. ここで, それぞれの反射係数の絶対値が1より十分小さいものと仮定すると, (A.1)式は,

$$\Delta(M) \approx |1 + \Gamma_{geM} (\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM})|^2 - |1 + \Gamma_{geA} (\Gamma_{sA} - \Gamma_{uA})|^2 \quad (A.2)$$

と近似することができる. これをさらに展開し, 反射係数に関する4次以上の項を無視すれば,

$$\begin{aligned} \Delta(M)_{\text{Max}} \approx & 1 + \Gamma_{geM} (\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM}) + \Gamma_{geM}^* (\Gamma_{sM}^* - \Gamma_{uM}^*) \\ & - 1 - \Gamma_{geA} (\Gamma_{sA} - \Gamma_{uA}) - \Gamma_{geA}^* (\Gamma_{sA}^* - \Gamma_{uA}^*) \end{aligned} \quad (A.3)$$

となる. 一方, それぞれのパラメータの実測値と真の値との差を  $(\Gamma_{ge})$ ,  $(\Gamma_s)$ ,  $(\Gamma_u)$ と定義すると,

$$\begin{aligned} \Gamma_{geA} &= \Gamma_{geM} - \Delta(\Gamma_{ge}) \\ \Gamma_{sA} &= \Gamma_{sM} - \Delta(\Gamma_s) \\ \Gamma_{uA} &= \Gamma_{uM} - \Delta(\Gamma_u) \end{aligned} \quad (A.4)$$

が得られる.(A.3)式に(A.4)式を代入して,  $(\Gamma_{ge})$ ,  $(\Gamma_s)$ ,  $(\Gamma_u)$ に関して2次以上の項を無視してまとめると,

$$\begin{aligned} \Delta(M) \approx & (\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM}) \Delta(\Gamma_{ge}) + (\Gamma_{sM}^* - \Gamma_{uM}^*) \Delta^*(\Gamma_{ge}) \\ & - \Gamma_{geM} (\Delta(\Gamma_u) - \Delta(\Gamma_s)) - \Gamma_{geM}^* (\Delta^*(\Gamma_u) - \Delta^*(\Gamma_s)) \end{aligned} \quad (A.5)$$

となる. 従って,

$$\begin{aligned} |\Delta(M)| \leq & 2 |(\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM}) \Delta(\Gamma_{ge})| \\ & + 2 |\Gamma_{geM} (\Delta(\Gamma_u) - \Delta(\Gamma_s))| \\ \leq & 2 |\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM}| |\Delta(\Gamma_{ge})| \\ & + 2 |\Gamma_{geM}| |\Delta(\Gamma_u)| + 2 |\Gamma_{geM}| |\Delta(\Gamma_s)| \end{aligned} \quad (A.6)$$

が得られる. ただし,  $|\Gamma_{ge}| = (|\Gamma_{ge}|)$ ,  $|\Gamma_u| = (|\Gamma_u|)$ ,  $|\Gamma_s| = (|\Gamma_s|)$ の関係を利用した. ここで  $(\Gamma_{ge})$ ,  $(\Gamma_s)$ ,  $(\Gamma_u)$ を改めてそれぞれのパラメータの標準不確かさ $u(\Gamma_{ge})$ ,  $u(\Gamma_s)$ ,  $u(\Gamma_u)$ で置き換えて, さらに(A.6)式の右辺の各項の2乗和の平方根を改めて $u(M)$ と書いて $M$ の合成標準不確かさと定義すると<sup>9)</sup>,

$$\begin{aligned} u^2(M) = & 4 |\Gamma_{sM} - \Gamma_{uM}|^2 u^2(|\Gamma_{ge}|) \\ & + 4 |\Gamma_{geM}|^2 u^2(|\Gamma_s|) + 4 |\Gamma_{geM}|^2 u^2(|\Gamma_u|) \end{aligned} \quad (A.7)$$

となり, 実測値を表す添え字 $M$ を取ると, これが(9)式となる.

## 参考文献

- 1) 木下基: 高周波電力標準に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 4-3 (2006) 189-200.
- 2) 島岡一博: 高周波電力標準に関する調査研究, 産総研計量標準報告, 2-1 (2003) 159-174.
- 3) 森屋倂昌, 関和雄: 高周波計測 - マイクロ波通信からデバイスまで - (東京電機大学出版, 1998) 67.
- 4) M. P. Weidman: Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibrations, NIST Technical Note 1379 (1996)
- 5) 横島一郎: 高周波測定技術の基礎 - Sパラメータ入門 - (サイペック社, 1992)
- 6) A. Y. Rumfelt and L. B. Elwell: Radio Frequency Power Measurements, Proc. of the IEEE, 55-6 (1967) 837-850.
- 7) G. F. Engen: Amplitude Stabilization of a Microwave Signal Source, IRE Trans. on Microwave and Techniques, 6 (1958) 202-206.
- 8) G. F. Engen: A Method of Improving Isolation in Multi-Channel Waveguide Systems, IRE Trans. on Microwave and Techniques, 8 (1960) 460-461.
- 9) 飯塚幸三監修: 計測における不確かさの表現のガイド (日本規格協会, 1996)