

2-4 高周波減衰器の校正

藤井勝巳 酒井孝次郎 杉山 功 瀬端好一 西山 巖

無線機から発射する電波の質を測定する測定器として、スペクトラム・アナライザに代表される受信機が用いられる。これらの受信機が電波の強さに応じて適切に結果を表示する能力を示すパラメータのひとつであるリニアリティの確認には、同軸ケーブルや導波管を通過する電波の強さを減衰させることができる高周波減衰器が用いられている。また、標準信号発生器の出力電力の評価にも高周波減衰器が用いられている。そこで、NICT では、受信機や信号発生器の校正を行うための装置として、高周波減衰器の校正サービスを行っているが、本稿では、特に、周波数 10 MHz ~ 18 GHz で使用する高周波減衰器の校正法について述べ、校正結果に付随する不確かさの考え方について解説する。

1 まえがき

高周波減衰器は、自身を通過した電波を所望の量だけ減衰させることができる装置である。情報通信研究機構 (NICT) では、スペクトラム・アナライザなどの受信性能を示すパラメータのひとつである、受信電力 (電圧) の表示の「リニアリティ (線形性)」を評価するために不可欠な装置である、高周波減衰器の校正値を提供している。すなわち、図 1 に示すように高周波電力計で絶対値を測定し、高周波減衰器の減衰量を変化させれば、受信機が示す受信電力・電圧の値がリニアリティを維持して正しく表示されているかを評価することや、同じ回路構成にて、信号発生器内部の減衰器を評価することも可能である。

本稿では、NICT が実施している校正サービスの中でも、とくに JCSS 登録を行っている周波数 10 MHz

~ 18 GHz 高周波減衰器の校正について、減衰量の定義と校正法、また、校正の不確かさの見積り方について解説する。

2 高周波減衰量の定義

2.1 減衰量

高周波減衰量は、図 2 に示すように、信号源の反射係数 Γ_G 及び受信機の反射係数 Γ_L が、いずれも 0 のとき ($\Gamma_G = \Gamma_L = 0$)、(a) 信号源と受信機を直接接続したときの受信電力 P_0 と、(b) 減衰器を挿入したときの受信電力 P_1 の比で定義される量である (ただし、 $P_0 > P_1$)。すなわち、高周波減衰量は、高周波電力の相対量であり無次元量であり次式で定義される。

$$A = \frac{P_0}{P_1} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} \quad (1)$$

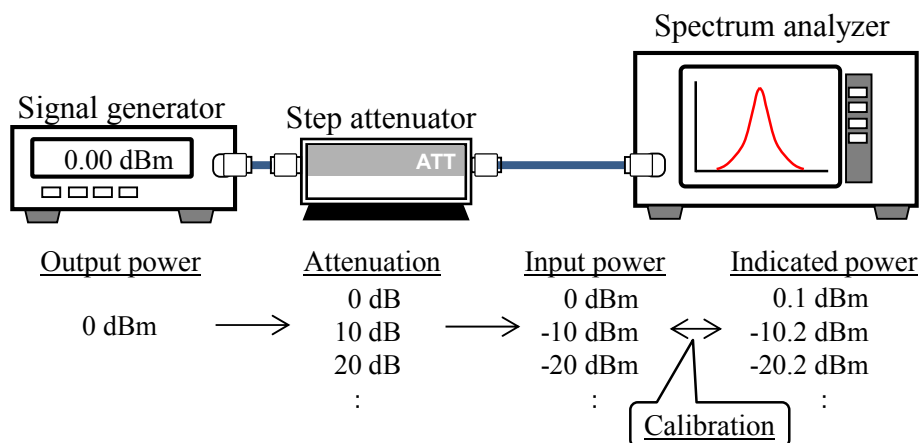


図 1 高周波減衰器を用いたスペクトラム・アナライザの校正

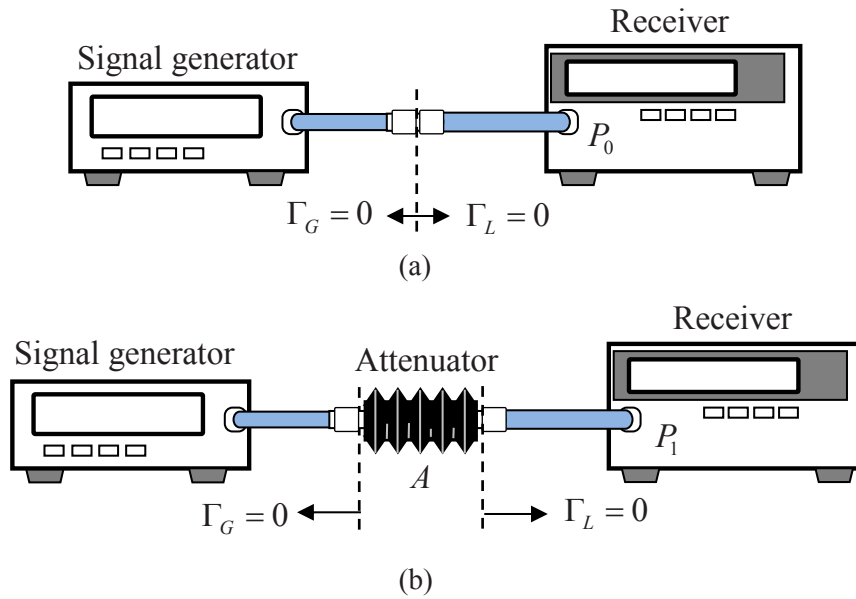


図2 高周波減衰量の定義

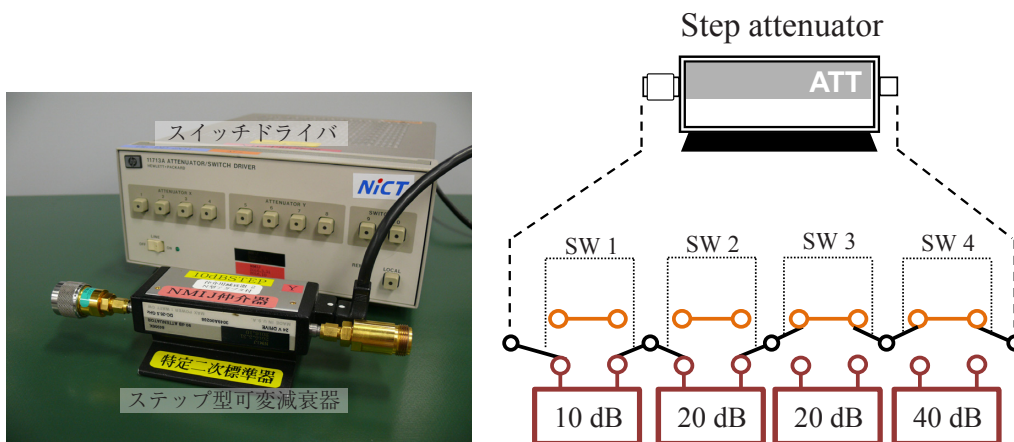


図3 ステップ型可変減衰器の外観及び内部構造

また、通常は dB を用いて表される。

$$A^{dB} = 10 \log_{10} \left. \frac{P_0}{P_1} \right|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} \quad [dB] \quad (2)$$

減衰器を校正して減衰量を測定する場合を考えると、実際には、信号源の反射係数 Γ_G 及び受信機の反射係数 Γ_L が 0 ではないために正確な値を得ることができない。この問題については、後述するように、校正結果に付随する「不確かさ」として取り扱う。

2.2 インクリメンタル減衰量

図2に示した減衰器は、一定の減衰量を有するため、一般に「固定減衰器」と呼ばれている。これに対して、減衰器を変えることが可能な「可変減衰器」と呼ばれる減衰器も市販化されており、着脱・交換せずに複数の減衰量を与えられる利便性を有することから、広く利用されている。図3に示すのは、減衰量を離散的に

変化させることができる減衰器の外観及び内部構造の例であり「ステップ型可変減衰器」と呼ばれる。スイッチによってリレーを切り替えることで減衰量を変化させることができ、1 dB, 10 dB 刻みで可変できる減衰器が広く用いられている。その他、連続的に減衰量を可変できる減衰器も市販されている。

可変減衰器は、図4に示すように、信号源と受信機の間で接続されたままの状態、(a) 減衰量を変化させる前(減衰量 A_b)の受信電力 P_b と、(b) 変化させた後(減衰量 A_e)の受信電力 P_e との比(ただし、 $A_e > A_b$)を測定することになるが、その減衰量の比は、次式で与えられ、通常の減衰量と区別して「インクリメンタル減衰量」と呼ばれている。

$$A_i = \frac{A_e}{A_b} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} = \frac{P_b}{P_e} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} \quad (3)$$

減衰量と同様、通常、dB を用いて表される。

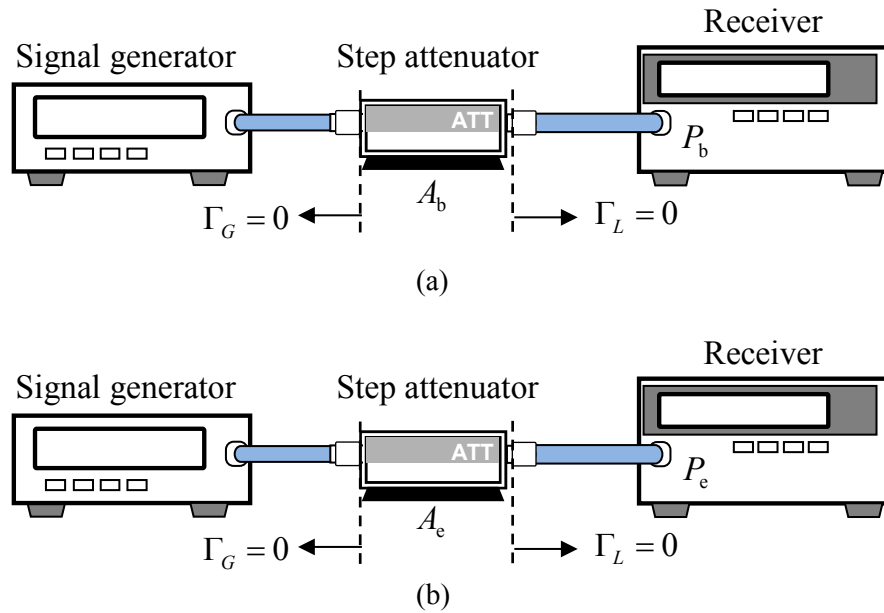


図4 インクリメンタル減衰量の定義

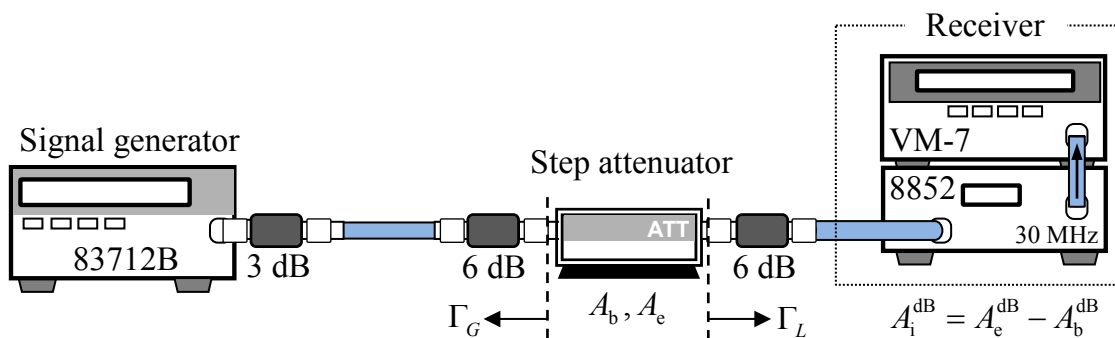


図5 高周波減衰器校正装置

$$A_i^{\text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{A_e}{A_b} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} = 10 \log_{10} \frac{P_b}{P_e} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

なお、インクリメンタル減衰量は、とくに混乱が生じない場合には「減衰量」と呼んでいる。可変減衰器のインクリメンタル減衰量を測定する場合も、実際には、信号源の反射係数 Γ_G 及び受信機の反射係数 Γ_L が 0 ではないために正確な値を得ることができない。この問題については、後述するように、校正結果に付随する「不確かさ」として取り扱う。

3 校正方法

ここでは、図 1 に示すように、受信機のリニアリティの評価を行う際に使用するステップ型可変減衰器の校正（インクリメンタル減衰量の決定）について述べる。ステップ型可変減衰器の校正は、NICT が維持・管理している特定二次標準器（以下、標準器と略す。）のインクリメンタル減衰量を用いて、高周波減衰器校正装

置の指示値を校正することで行われる。

校正装置としては、図 5 に示すように、信号発生器（Hewlett-Packard 社製、83712B）、受信装置（TEGAM 社製、VM-7 及び 8852）を使用している。「VM-7」は周波数 30 MHz の信号に限って信号強度を精密に測定することが可能な減衰器を内蔵した受信機、「8852」は入力信号を 30 MHz に周波数変換するための周波数変換器である。可変減衰器の入出力端子と接続する 2 本の同軸ケーブルの先には、反射を抑制するために減衰量が 6 dB の固定減衰器（Weinchel 社製 44-6）が、それぞれ取り付けられている。

信号発生器から出力された周波数 10 MHz ～ 18 GHz の信号は、固定減衰器が付いた同軸ケーブルの間に接続された可変減衰器を通過する。通過した信号は、受信装置に入力する。具体的には、信号は、飽和の防止と整合のために挿入された 3 dB の固定減衰器（Weinchel 社製 44-3）を通過した後、「8852」に入力し周波数 30 MHz に変換され、「VM-7」によって周波

2 較正技術の研究開発

数 30 MHz の信号としての減衰量が測定される。周波数変換を行って中間周波数（いまは 30 MHz）の信号強度の増減を用いて減衰器の減衰量を校正する方法は「中間周波置換法」と呼ばれている [1]。

受信装置が示す減衰量の値の妥当性は、上位校正機関で校正された標準器と呼ばれる可変減衰器を測定することで確認することになるが、NICT では、図 6 に示すトレーサビリティ体系によって、国家標準とのトレーサビリティを確保し、定期的に可変減衰器の減衰量を測定することによって、校正装置による校正結果が正しいことを保証している。

校正装置が正常に動作することが確認できている状態において、具体的な手順は次のとおりである [2]。

- (1) 被校正器を固定減衰器が取り付けられた同軸ケーブルに接続し、被校正器の設定を 0 dB とする（手順 1）。このとき、受信装置に表示される値 A_b^{dB} を読む。
- (2) 被校正器の設定を校正したい減衰量（例えば、30 dB）とし、再び受信装置に表示される値 A_e^{dB} を読む。
- (3) 次式を用いて、インクリメンタル減衰量を決定する。

$$A_i^{\text{dB}} = A_e^{\text{dB}} - A_b^{\text{dB}} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

実際の校正作業では、(1) で測定した値が、0 dB と表示されるように受信装置を操作し、(2) で測定して表示された値が、そのままインクリメンタル減衰量と

なるようにして測定を行う。繰返し測定を 5 回行うことで、可変減衰器内部の切替スイッチの再現性による影響を低減している。

4 校正結果

表 1 に示すのは、現在、NICT で行っている校正点の一覧である。NICT が維持管理している標準器（可変減衰器）は、産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ）によって校正されており、(a) に示す NMIJ によって発行された校正証明書に記載された校正点（周波数、インクリメンタル減衰量）において、校正を行っている。また、無線設備の試験や、放射妨害波測定、アンテナの校正では、(a) の校正点以外の任意の周波数においても、受信機の性能を評価したい場合があるため、(b) に示すように、校正証明書に記載された校正値を周波数方向に内挿し [3]、任意の周波数で校正できるように校正点を拡張し、JCSS 登録を受けて供給を行っている。

表 2 は、減衰量 30, 60, 90 dB の場合について、校正装置が表示した値と上位校正機関による校正值、両者の差を示した結果である。差をグラフ化した結果を図 7 にも示す。この結果を見ると、まず、30 dB, 60 dB の場合と比べて 90 dB では、測定値と上位校正

表 1 校正範囲 (10 MHz ~ 18 GHz)
(a)

周波数	減衰器	減衰量 (公称値)
10 MHz, 30 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, 5 GHz, 10 GHz	ステップ型可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB
18 GHz	ステップ型可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB
30 MHz	ステップ型可変減衰器	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dB

(b)

周波数	減衰器	減衰量 (公称値)
10 MHz 超 ~ 10 GHz 未満	ステップ型可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB
10 GHz 超 ~ 18 GHz 未満	ステップ型可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB

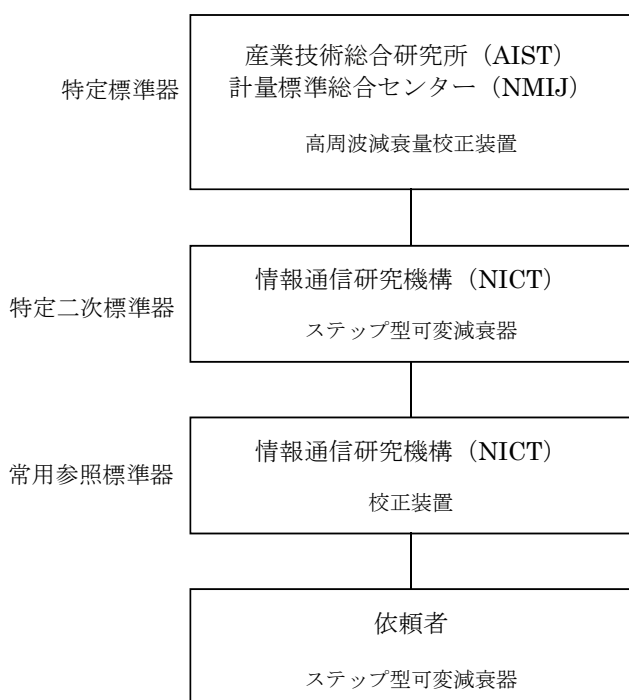


図 6 トレーサビリティ体系図

表 2 NICT の減衰量校正装置を評価した結果 (30 dB, 60 dB, 90 dB の場合)

周波数	減衰量 公称値	校正装置 による測定値	上位校正機関 による校正値	差
10 MHz	30 dB	30.069 dB	30.084 dB	-0.015 dB
	60 dB	60.192 dB	60.186 dB	0.006 dB
	90 dB	89.970 dB	90.118 dB	-0.148 dB
30 MHz	30 dB	30.086 dB	30.082 dB	0.004 dB
	60 dB	60.189 dB	60.187 dB	0.002 dB
	90 dB	90.109 dB	90.114 dB	-0.005 dB
100 MHz	30 dB	30.085 dB	30.083 dB	0.002 dB
	60 dB	60.187 dB	60.185 dB	0.002 dB
	90 dB	90.095 dB	90.106 dB	-0.011 dB
500 MHz	30 dB	30.093 dB	30.083 dB	0.010 dB
	60 dB	60.198 dB	60.184 dB	0.014 dB
	90 dB	90.085 dB	90.099 dB	-0.014 dB
1 GHz	30 dB	30.082 dB	30.079 dB	0.003 dB
	60 dB	60.185 dB	60.173 dB	0.012 dB
	90 dB	90.060 dB	90.069 dB	-0.009 dB
5 GHz	30 dB	30.069 dB	30.073 dB	-0.004 dB
	60 dB	60.163 dB	60.175 dB	-0.012 dB
	90 dB	90.003 dB	90.056 dB	-0.053 dB
10 GHz	30 dB	30.064 dB	30.059 dB	0.005 dB
	60 dB	60.205 dB	60.187 dB	0.018 dB
	90 dB	90.079 dB	90.093 dB	-0.014 dB
18 GHz	30 dB	30.061 dB	30.100 dB	-0.039 dB
	60 dB	60.213 dB	60.259 dB	-0.046 dB

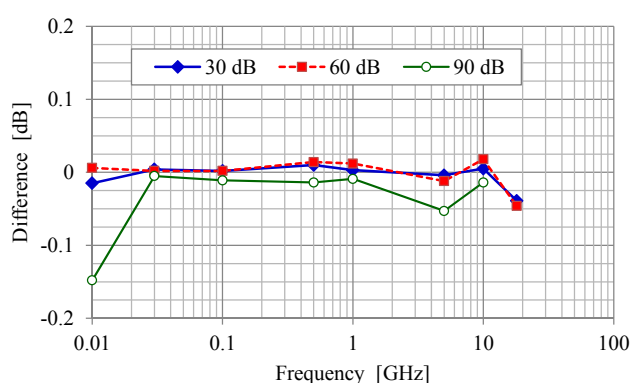


図 7 特定二次標準器を用いて NICT の減衰量校正装置を評価した結果

値との差が大きくなるのが分かる。この原因は、受信装置の周波数変換部が有するリニアリティが不十分であるためと思われる。また、10 MHz では、-0.148 dB にも達しているが、これは受信装置内部の基準信号源 (10 MHz) の信号が漏洩している可能性が考えられる。

次に、周波数 18 GHz では、10 GHz 以下と比べて

差が大きくなる傾向が見られた。これは、校正装置と減衰器が持つ反射によって生じる不整合によるものである。実際に、不整合による影響を求めた結果は、5.1 (4) にて示すが、周波数が高くなるにつれて不整合の影響が大きくなる様子が確認できる。

5 不確かさ

校正結果には不確かさが伴う。その大きさは、以下に述べる複数の要因によって生じる不確かさ (単位は dB) を、次式を用いて合成することにより推定できる。

$$u(A_i^{\text{dB}}) = \sqrt{\sum_{n=1}^N \{ |c_n| \cdot u(x_n) \}^2} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

ここで、

$u(A_i^{\text{dB}})$: 被校正器の標準不確かさ

$|c_n|$: n 番目の不確かさ要因が $u(A_i^{\text{dB}})$ に寄与する程度を示す感度係数の絶対値 (今回の校正の場合には、すべて 1 である)

$u(x_n^{\text{dB}})$: 項目 n 番の不確かさ要因の標準不確かさ

N : 不確かさの項目数 (10 項目)

である。この結果は、標準不確かさと呼ばれる。通常、不確かさは、信頼の水準約 95 % を持つと推定される拡張不確かさで表されるため、包含係数 $k = 1.96$ を掛けて、拡張不確かさを求める。ただし、包含係数は、便宜上、 $k = 2$ として扱う。

以下、不確かさ要因となる項目について説明する。不確かさ要因は、5.1 で述べる「上位校正機関 (産業技術総合研究所) にて標準器として校正された可変減衰器を使って、校正装置を校正したときの不確かさ」と、5.2 で述べる「校正装置を使って被校正器を校正したときの不確かさ」に分けられる。

5.1 校正装置を校正した時の不確かさ

図 6 に示すように、NICT が維持管理している標準器 (可変減衰器) は、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) によって校正されており、NMIJ によって発行された校正証明書に記載された校正値と不確かさを基準として校正装置を校正する。このとき、次に述べる 7 つの不確かさ要因が、校正装置の校正結果に不確かさを与える。

- (1) 上位校正機関における標準器の校正の不確かさ

上位校正機関である NMIJ から発行された校正証明書に書かれた不確かさの値である。NMIJ でも可変減衰器の校正を行っているので校正結果には不確かさが存在する。

校正証明書に書かれた不確かさの値は、包含係数を $k = 2$ として求めた信頼の水準約 95 % の拡張不確かさであることが校正証明書に記載されていることから、校正証明書に書かれた不確かさの値を、包含係数 $k = 2$ で割って標準不確かさとする。

- (2) デジタル分解能

受信装置に表示される値の表示分解能は 0.001 dB である。したがって、0.001 dB よりも細かい値は知ることができず、不確かな値となる。例えば、30.004 dB と表示されたとき、減衰量の真の値は、図 8 に示すように、30.003 5 dB から 30.004 5 dB の範囲内、すなわち、30.004 dB \pm 0.000 5 dB の範囲内に存在すると考えられる。存在する可能性はこの範囲内において一様である。そこで、デジタル表示分解能を持つ不確かさは、標準不確かさとして 0.002 9 dB (=0.005 / $\sqrt{3}$ dB) であると見積もり計上する。

- (3) 測定のばらつき (20 回)

標準器を使って校正装置を校正する際、

20 回の測定を行って評価する。20 回測定し、その平均値を校正結果とすることによって、標準器内部のスイッチの切替え時に生じる減衰量のばらつきを低減する。20 回の測定の平均値を校正結果として用いていることから、20 回の測定値の実験標準偏差を、20 の平方根で割った値を不確かさとして計上する。平均値の標準偏差は、実験標準偏差を測定回数の平方根で割った値に等しい [4]。

- (4) 不整合

校正装置の信号発生器と受信装置の反射係数が $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$ ではないために、標準器との間の不整合によって生じる校正結果のかたよりを、不確かさとして計上する。インクリメンタル減衰量の S パラメータによる表現は式 (A.12) であるが、 $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$ ではない場合には、式 (A.11) となるため両式の違いが不整合の影響と言える。いま、式 (A.12) を式 (A.11) に代入すると、

$$L_i^{\text{dB}} = A_i^{\text{dB}} - 10 \log_{10} \frac{|(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|(1 - S_{11c}\Gamma_G)(1 - S_{22c}\Gamma_L) - S_{21c}S_{12c}\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad \text{[dB]} \quad (7)$$

を得る。ここで右辺第二項の分母と分子を入れ替えて符号を反転させ、

$$M_i^{\text{dB}} = +10 \log_{10} \frac{|(1 - S_{11c}\Gamma_G)(1 - S_{22c}\Gamma_L) - S_{21c}S_{12c}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad \text{[dB]} \quad (8)$$

を定義し、不確かさについて考えることにする。まず、式 (8) を、自然対数 \ln を使って表す。

$$\begin{aligned} M_i^{\text{dB}} &= \frac{20}{\ln 10} \ln \left| \frac{(1 - S_{11c}\Gamma_G)(1 - S_{22c}\Gamma_L) - S_{21c}S_{12c}\Gamma_G\Gamma_L}{(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L} \right| \\ &= 8.686 \cdot \ln \left| \frac{(1 - S_{11c}\Gamma_G)(1 - S_{22c}\Gamma_L) - S_{21c}S_{12c}\Gamma_G\Gamma_L}{(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L} \right| \quad \text{[dB]} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 x が 1 より十分小さいときに、 $\ln(1+x) \approx x$ という近似が成立つことを利用すると、

$$M_i^{\text{dB}} \approx 8.686 \cdot \{ |\Gamma_G|^2 |S_{11b} - S_{11c}|^2 + |\Gamma_L|^2 |S_{22b} - S_{22c}|^2 + |\Gamma_G|^2 |\Gamma_L|^2 |S_{21b}^2 - S_{21c}^2|^2 \} \quad \text{[dB]} \quad (10)$$

と表すことができる。この近似式は、標準器 (可変減

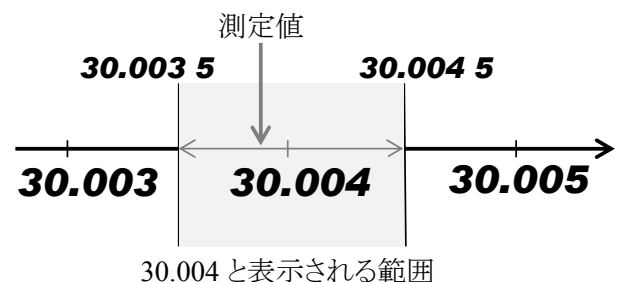


図 8 デジタル分解能の不確かさ

衰器)のSパラメータは振幅だけでなく位相の情報も必要であるが、信号発生器及び受信装置の反射係数については、振幅情報のみで求められる式である。信号発生器の反射係数の測定は、一般には難しいため式(10)は不整合不確かさを評価するための近似式として広く用いられている[1][5]。不確かさの確率密度分布は、信号発生器及び受信装置の反射係数の位相が不明であるから、 $0^\circ \sim 360^\circ$ の任意の値を取るとしてU分布とする。

図9に示すのは、標準器と校正装置との間の不整合による影響を求めた結果である。反射係数はベクトル・ネットワーク・アナライザを用いて実際に測定を行った。信号発生器の反射係数は、信号を出力しているとき(ON)と、していないとき(OFF)とで異なるため、周波数20 GHzで信号を出力させた状態で、10 MHz～18 GHzの反射係数を測定して計算に用いている。図9をみると、60 dB、90 dBのときの値がほぼ一致していることが分かる。これは減衰量が大きいために、減衰器の反射係数が一定値に収束したためである。また、周波数10 GHz付近から影響が大きくなり、最大で約0.05 dBにまで達することが分かる。この結果は、表2の18 GHzにおいて生じている差(-0.046 dB)と一致する。

(5) 上位校正機関との測定環境の違いによる変動

標準器として用いている可変減衰器は、使用する環境の温度が変化する場合、内部の抵抗体の抵抗値が変化し減衰量が変動してしまう可能性がある。標準器の校正は、 $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で温度管理された部屋で実施した旨の記載があるが、一方、NICTの校正を実施する部屋(校正室)は、 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ で管理している。そのため、標準器を校正した条件よりも緩い条件で校正を実施していることになるため、その影響の程度について、不確かさを与える項目として挙げている。この影響を明らかにするために、実際に温度を変化させて測定した結果、 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲であれば、温度の違いによる影響は、測定のばらつき以下で十分小さかった。

(6) 経時変化

経時変化とは、標準器が有するインクリメンタル減衰量が、時間の経過に伴い変動していく程度を評価している。過去9年間、受信装置を校正した結果を用いて検討を行ったところ、徐々に減衰量が大きくなっていくといった一定の傾向は認められなかったが、1年ごとの変動分の最大値を不確かさとして計上することにした。確率分布は、真の値が存在する可能性はこの範囲内において一様である考え、一様分布として

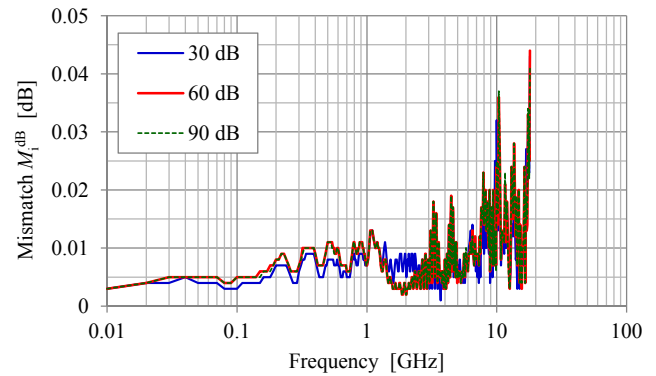
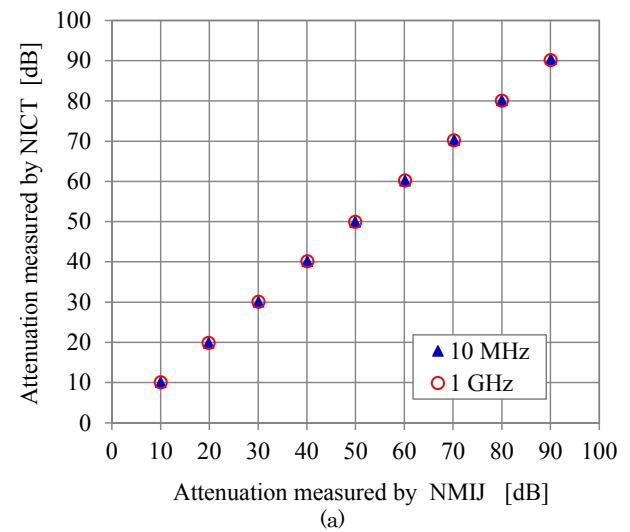
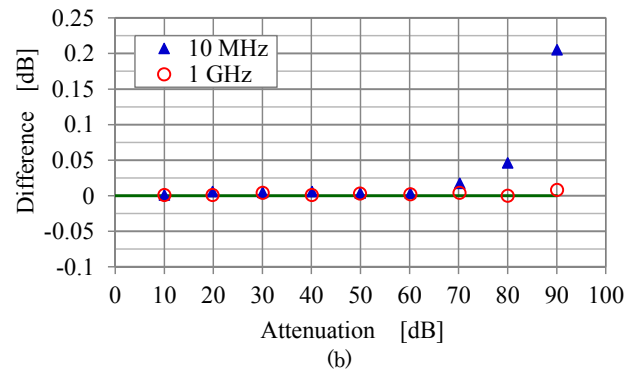


図9 不整合による影響の大きさ



(a)



(b)

図10 受信装置のリニアリティ

取り扱っている。

(7) 受信装置のリニアリティ

標準器を使って校正装置を校正した結果の値と標準器の校正証明書に記載された値との差を使って受信装置のリニアリティを評価する。一例として、周波数10 MHz及び1 GHzにおけるリニアリティ評価の例を、図10を用いて示す。図10(a)の縦軸は校正装置によるインクリメンタル減衰量の測定値、横軸は上位校正機関での校正値(校正証明書に記載された値)であ

り、▲(青色)は10 MHz、○(赤色)は1 GHzの結果である。図10(b)に示すのは、測定点と回帰直線との差である。10 dB～90 dBの9点で得られた差の最大値を不確かさの要因として計上する。1 GHzのときはインクリメンタル減衰量が90 dBのときに、最大0.014 dBの差があるため、0.014 dBを不確かさの要因として計上する。一方、10 MHzのときには、80 dB, 90 dBの測定値の差が急激に大きくなる。そのため、周波数10 MHzにおいては、10 dB～70 dBと80 dB, 90 dBの不確かさ評価を分けて行うこととし、10 dB～70 dBの7点から得られた回帰直線からの差の最大値、80 dB, 90 dBにおいては測定値と上位校正機関による校正值との差を、それぞれ不確かさとして計上する。なお、30 MHzの場合にも、10 MHzの場合と同様の傾向が見られたため、10 dB～70 dBの不確かさと、80 dB, 90 dBの不確かさを分けて評価した。

回帰直線からの差が生じる理由としては、周波数変換装置の飽和の他、内部雑音、信号の漏れが考えられ、この不確かさの数値には、雑音や漏れの影響が含まれていると考えられる。通常、雑音や漏れについては、受信装置が有する不確かさ要因として、別途、計上することが考えられるが、重複して計上してしまうことになってしまうため、別途、計上することはない。

この回帰直線からのずれは、いつでも生じる「かたより」であると考えられるため、確率密度分布は存在しない。そこで得られた値そのものを標準不確かさとして計上することにする[6]。

5.2 被校正器を校正したときの不確かさ

標準器を用いて校正された校正装置を使って、被校正器の可変減衰器を校正するときの不確かさとしては、次の3つの項目が挙げられる。

- (8) デジタル分解能
 - (2)と同じ。
- (9) 測定の際のばらつき(5回)
 - (3)と同じ。ただし測定回数は5回としているため、実験標準偏差を、5の平方根で割った値を不確かさとして計上する。
- (10) 不整合
 - (4)と同じ。被校正器のSパラメータを、ベクトル・ネットワーク・アナライザを用いて測定し、式(10)を用いて不確かさを求め計上する。

5.3 周波数拡張の不確かさ

表1(a)に示す校正点(周波数及び減衰量)における標準器の校正值を内挿して、任意の周波数における校正值を決定する際に生じる不確かさである。内挿して校正值を決定するにあたっては、表3に示す組合せの校正点を用いて、回帰直線を用いて校正結果を決定している[7]。回帰直線を使って、任意の周波数における校正值を求めたことによる不確かさは、文献[7]にあるように、5.1(1)上位校正機関における標準器の校正の不確かさと合成し、標準不確かさとして、バジェット表に加える。標準不確かさの増加分は、表4のとおりである。

5.4 最高測定能力

以上の不確かさの要因をまとめたバジェット表の例を表5に示す。表5は、ステップ型可変減衰器の周波数10 MHz～10 GHzにおいて、インクリメンタル減衰量10 dB～90 dBを校正したときの最高測定能力である。ただし、受信装置のリニアリティが劣化する10 MHz, 30 MHzの80 dB, 90 dBの場合については別のバジェット表を用意している。不確かさは、校正点ごとに与えられる量であるが、簡便に扱うために、上記の校正範囲において、もっとも大きくなる値を、

表3 周波数を拡張する際に使用する校正点

拡張周波数範囲	減衰量	内挿に用いるNMIJによる校正值の周波数
10 MHz 超 1 GHz 未満	10, 20, 30, 40, 50, 60,	10 MHz, 30 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz (5点)
1 GHz 超 10 GHz 未満	70, 80, 90 dB	1 GHz, 5 GHz, 10 GHz (3点)
10 GHz 超 18 GHz 未満	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	5 GHz, 10 GHz, 18 GHz (3点)

表4 内挿により周波数拡張したことによる不確かさの増加

拡張周波数範囲	減衰量	NMIJによる校正值の拡張不確かさ	周波数拡張した場合の拡張不確かさ
10 MHz 超 1 GHz 未満	10, 20, 30, 40, 50, 60,	0.020 dB	0.030 dB
1 GHz 超 10 GHz 未満	70, 80, 90 dB	0.020 dB	0.044 dB
10 GHz 超 18 GHz 未満	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	0.010 dB (18 GHz)	0.042 dB

それぞれ採用して計算を行っている。

バジェット表は、標準器を使って、校正装置を評価したときの測定の不確かさと、被校正器の減衰器を測定したときの不確かさと分けて表記してある。

最高測定能力は、被校正減衰器の不整合がなく、かつ、測定のばらつきがないとみなして求める。すなわち、(10) 不整合、(9) 測定のばらつきには0を代入して決定している。実際の校正では、これらの欄に数値を入れて合成することになる。

表5は、周波数10 MHz～10 GHz、インクリメンタル減衰量10 dB～90 dB(10 MHz, 30 MHzの80 dB, 90 dBを除く)を校正した時、その校正結果には、どんなに小さくても0.087 dBの拡張不確かさが伴うことを示している。この表5を見ると、不確かさを大きくする要因が見て取れる。すなわち、表5からは、校正装置の反射によって生じる不整合と、リニアリティが不確かさを大きくしていることが分かる。今後、不確かさを小さくして信頼ある校正結果を提供するためには、校正装置の不整合とリニアリティを改善すると有効であることが分かる。表6は、表1で示した校正範囲における最高測定能力である。

6 あとがき

無線機器を試験するために使用する受信機や信号発生器の性能評価・校正を行うために必要な高周波減衰器について、NICTで採用している校正手法と、校正結果に付随する不確かさの考え方について解説した。不確かさバジェット表を用いて、不確かさが大きくなる要因を精査すると、校正装置が有する反射と、受信装置のリニアリティが、不確かさを大きくする要因となっていることが分かる。この問題を解決するには、固定減衰器の代わりにインピーダンス・チューナーを用いて反射を減らしたり、リニアリティの優れた受信装置を用意したりすることで、校正精度の向上が期待できる。

近年、スペクトラム・アナライザをはじめとする受信機の性能向上が著しく、とくに、周波数の高周波数化、受信レベルのダイナミックレンジの広範囲化が進んでいる。高周波減衰器は、受信機の性能を評価するために欠かせない基準器であり、ミリ波帯以上の周波数帯における減衰量標準を供給すること、100 dBを超えるような大きな減衰量の標準を供給することが今後の課題として挙げられる。

表5 不確かさバジェット

10 MHz, 30 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, 5 GHz, 10 GHz 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB のステップ減衰器の校正結果の不確かさ (10 MHz, 30 MHz, 80 dB, 90 dB は除く)			
不確かさの要因	dB	分布	寄与 dB
標準器を用いて校正装置を校正した時の不確かさ			
(1) NMIJ における校正結果の不確かさ	0.020 ($k=2$)	正規	0.010
(2) デジタル分解能	0.0005	一様	0.0003
(3) 測定のばらつき (20 回平均値の標準偏差)	0.0008	正規	0.0008
(4) 不整合	0.033	U	0.0233
(5) 標準器の上位校正環境 (温度) との違いによる変動	0.000	一様	0.000
(6) 経時変化	0.009	一様	0.0052
(7) リニアリティ	0.0196	-	0.0196
校正装置の不確かさ u_s			0.0325
校正装置を用いて被校正減衰器を測定した時の不確かさ			
(8) デジタル分解能	0.0005	一様	0.0003
(9) 測定のばらつき (5 回平均値の標準偏差)	実測値	正規	0
(10) 不整合	実測値	U	0
DUT 測定の不確かさ u_D			0.0003
合成標準不確かさ u_c			0.0325 dB
拡張不確かさ (信頼の水準 約 95 %)			0.065 dB

2 較正技術の研究開発

【付録】 減衰量、挿入損失、置換損失、Sパラメータの関係

減衰量と似た量として、「挿入損失」と「Sパラメータ (\$S_{21}\$)」がある。以下、これらの違いについて明記しておく [1]。図 A.1 に示すのは、減衰量を測定するために、信号発生器と受信機の上に減衰器を挿入したと

きに、減衰器の入力端子をポート 1、出力端子をポート 2 として S パラメータを使って表現した図である。このとき、

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{A.1}$$

表 6 最高測定能力
(a)

周波数	減衰器	減衰量 (公称値)	拡張不確かさ		
10 MHz, 30 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, 5 GHz, 10 GHz	ステップ型 可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB	0.065 dB		
			10 MHz	80 dB	0.16 dB
				90 dB	0.48 dB
			30 MHz	80 dB	0.083 dB
	90 dB	0.19 dB			
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB	0.066 dB		
18 GHz	ステップ型 可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	0.13 dB		
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	0.13 dB		
30 MHz	ステップ型 可変減衰器	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 dB	0.018 dB		

(b)

周波数	減衰器	減衰量 (公称値)	拡張不確かさ		
10 MHz 超～ 1 GHz 未満	ステップ型 可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB	0.069 dB		
			10 MHz 超～ 30 MHz 未満	80 dB	0.17 dB
				90 dB	0.48 dB
			30 MHz 超～ 100 MHz 未満	80 dB	0.086 dB
	90 dB	0.19 dB			
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB	0.069 dB		
1 GHz 超～ 10 GHz 未満	ステップ型 可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 dB	0.076 dB		
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 dB	0.077 dB		
10 GHz 超～ 18 GHz 未満	ステップ型 可変減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	0.13 dB		
	固定減衰器	10, 20, 30, 40, 50, 60 dB	0.13 dB		

$$a_1 = a_G + b_1\Gamma_G \quad (\text{A.2})$$

$$a_2 = b_2\Gamma_L \quad (\text{A.3})$$

が成立つ。ただし、 Γ_G は信号源の反射係数、 Γ_L は受信機の反射係数である。式 (A.1) ~ (A.3) を用いて、受信機に入射する電力を求めると、

$$P_2 = |b_2|^2 = \frac{|S_{21}|^2}{|(1-S_{11}\Gamma_G)(1-S_{22}\Gamma_L)-S_{21}S_{12}\Gamma_G\Gamma_L|^2} |a_G|^2 \quad (\text{A.4})$$

を得る。

減衰器を取外して、信号源と受信機を直結したときの入射電力は、

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

を代入して、

$$P_{2_direct} = \frac{1}{|1-\Gamma_G\Gamma_L|^2} |a_G|^2 \quad (\text{A.6})$$

と表せる。ここで、減衰器を接続したときと直接接続したときの比 L は、「挿入損失 (Insertion loss)」と呼ばれる量であり、式 (A.4) 及び (A.6) から、

$$L = \frac{P_{2_direct}}{P_2} = \frac{1}{|S_{21}|^2} \frac{|(1-S_{11}\Gamma_G)(1-S_{22}\Gamma_L)-S_{21}S_{12}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|1-\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad (\text{A.7})$$

である。dB で表せば、

$$L^{dB} = 10\log_{10} \frac{|(1-S_{11}\Gamma_G)(1-S_{22}\Gamma_L)-S_{21}S_{12}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|S_{21}|^2 |1-\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad [\text{dB}] \quad (\text{A.8})$$

となる。式 (A.7) 及び (A.8) を見ると分かるとおり、挿入損失は、信号源や受信機の反射係数によって変化する値であり、減衰器固有の特性を示す量ではない。

いま、減衰量の定義は $\Gamma_G=\Gamma_L=0$ のときの値であったので、式 (A.8) に $\Gamma_G=\Gamma_L=0$ を代入することを考える。このとき、

$$A^{dB} = L^{dB}|_{\Gamma_G=\Gamma_L=0} = -10\log_{10} |S_{21}|^2 \quad [\text{dB}] \quad (\text{A.9})$$

が得られる。

以上のことから、減衰量について次のことが言える。

- 減衰量は、挿入損失のうち、反射係数を 0 としたときの値である。
- 減衰量とは、減衰器の S パラメータの振幅の自

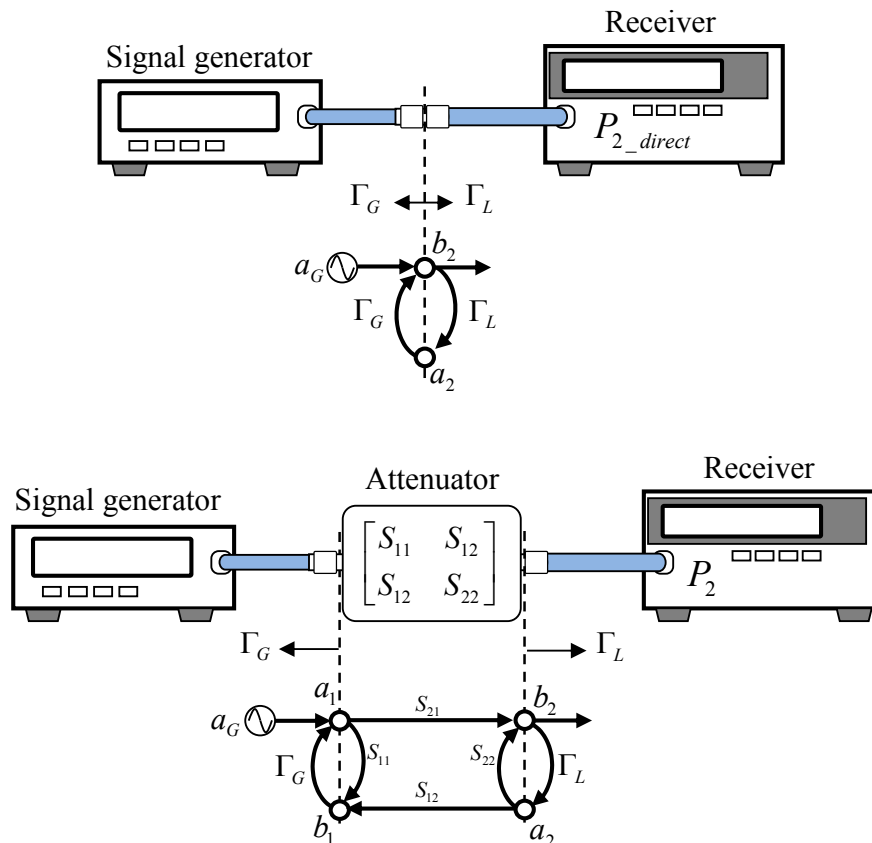


図 A.1 減衰量測定のための S パラメータを用いた表現

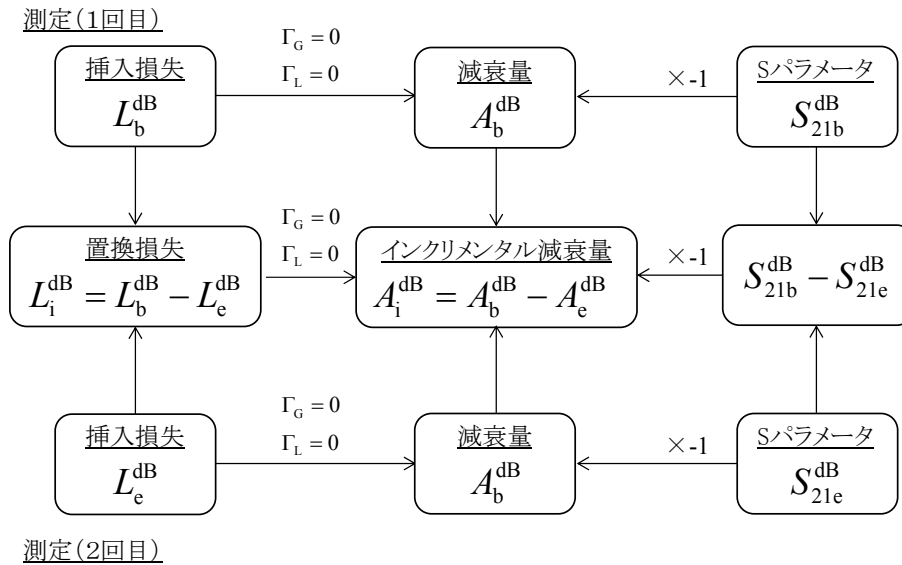


図 A.2 減衰量、挿入損失、置換損失、Sパラメータの関係

乗の逆数であり、dB 表現をしたときには、 S_{21} の振幅の自乗値に負号を与えた量に等しい。

- 減衰量とは、固定減衰器固有の値であり、信号源や受信機の性質 (反射係数) によらない。

可変減衰器を使って測定した場合にも同様にして S パラメータを使って考えることができる。いま、減衰量を変える前の状態の S パラメータを $\{S_{11b}, S_{21b}, S_{12b}, S_{22b}\}$ 、変えた後の S パラメータを $\{S_{11e}, S_{21e}, S_{12e}, S_{22e}\}$ とすれば、挿入損失の比は、式 (A.7) を用いて、

$$L_i = \frac{|S_{21b}|^2 |(1 - S_{11e}\Gamma_G)(1 - S_{22e}\Gamma_L) - S_{21e}S_{12e}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|S_{21e}|^2 |(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad (A.10)$$

dB で表せば、

$$L_i^{dB} = -10 \log_{10} \frac{|S_{21e}|^2 |(1 - S_{11e}\Gamma_G)(1 - S_{22e}\Gamma_L) - S_{21e}S_{12e}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{|S_{21b}|^2 |(1 - S_{11b}\Gamma_G)(1 - S_{22b}\Gamma_L) - S_{21b}S_{12b}\Gamma_G\Gamma_L|^2} \quad [dB] \quad (A.11)$$

を得る。この値を「置換損失 (Substitution Loss)」と呼ぶ。さらに、この式に $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$ を代入すると、

$$A_i^{dB} = L_i^{dB} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} = -10 \log_{10} \frac{|S_{21e}|^2}{|S_{21b}|^2} \quad [dB] \quad (A.12)$$

を得る。インクリメンタル減衰量の場合にも、減衰量と同様、次のことが言える。

- インクリメンタル減衰量は、置換損失のうち、反射係数を 0 としたときの値である。
- インクリメンタル減衰量とは、減衰器の S パラメータの振幅の自乗の逆数の比であり、dB 表現をしたときには、 S_{21} の振幅の自乗値の比に負号を与えた量に等しい。
- インクリメンタル減衰量とは、可変減衰器固有の値であり、信号源や受信機の性質 (反射係数) に

よらない。

以上の結果から得られた、減衰量、挿入損失、置換損失、S パラメータ (S_{21}) の関係を図 A.2 に示す。

【参考文献】

- 1 飯田仁志, “高周波減衰量標準に関する調査研究,” 計量標準報告, vol.3, no.4, pp.609-624, 産業技術総合研究所 計量標準総合センター, Feb. 2005.
- 2 JCSS 不確かさの見積りに関するガイド (30 dB 設定での同軸ステップ減衰器), 第 6 版, JCG211S11, (独) 製品評価技術基盤機構認定センター, Aug. 2007.
- 3 JCSS 校正方法と不確かさに関する表現, 内挿校正式による不確かさの見積り, 第 1 版, JCG200S21-01, July 2011.
- 4 飯塚幸三 監修, “計測における不確かさの表現ガイド,” 日本規格協会, Nov. 1996.
- 5 L. A. Harris, F. L. Warner, “Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation,” IEE Proc., vol.128, Pt. H, no.1, Feb. 1981.
- 6 尾藤洋一, 榎原研正, “既知の偏りを補正しない場合の不確かさ評価に関する一考察,” 精密工学会誌, vol.74, no.6, pp.604-610, 2008.
- 7 尾藤洋一, 細谷肇, 眞下寛治, 榎原研正, “既知の偏りを補正しない場合の不確かさ評価 (第 2 報),” 精密工学会誌, vol.76, no.9, pp.1036-1042, 2010.



藤井勝巳 (ふじい かつみ)

電磁波研究所
電磁環境研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
無線用測定器の較正、環境電磁工学



酒井孝次郎 (さかい こうじろう)

電磁波研究所
電磁環境研究室
有期研究技術員
無線用測定器の校正



杉山 功 (すぎやま つとむ)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究員
無線用測定器の校正



瀬端好一 (せばた こういち)

電磁波研究所
電磁環境研究室
主任研究員
無線用測定器の校正、測地学



西山 巖 (にしやま いわお)

電磁波研究所
電磁環境研究室
無線用測定器の校正