

今どきの高周波測定技術と 測定器管理の基礎知識

～ その4 高周波減衰量における確度評価の実際 ～

携帯端末機の通話エリアは端末機の最低受信感度に左右される。一体どのくらい微小な信号を受信できるのかは、実際に微小な信号を与えてそれを受信できるか否かを試験することで確認する。ところで、その微小信号はどうやって作ればよいのだろうか。答えは、高周波電力の絶対値があらかじめ規定されている試験信号に対して正しい高周波減衰量を与えて、その信号を正確に減衰させていくことである。では、その正しい高周波減衰量はどのようにして得られるのであろうか。今回は高周波減衰量の較正について説明したいと思う。

アンリツカスタマーサポート株式会社
山崎 俊雄



ピストン減衰器の外観

はじめに

高周波減衰量は高周波電力のレベル範囲を拡大する場合に活躍する基礎電気量である。高周波電力の標準はカロリーメータで得られるので、実際には1mW(0 dBm) 付近の限られたレベル範囲でしか標準を作り出すことができない。これをハイレベル、またはローレベルに拡大するためには、どうしても正確な高周波減衰量の標準を得ておく必要がある。

正確な高周波減衰量が必要となる測定器は大きく2つある。ひとつは、固定減衰器やステップ減衰器のように、それ自体の高周波減衰量が明らかであることが必要なもの。もうひとつは、スペクトラムアナライザやレベルメータのように表示レベルの直線性を確保する必要があるものであるが、その直線性の確認にも固定減衰器やステップ減衰器が使われている。ここでは、固定減衰器とステップ減衰器の高周波減衰量の較正について、その設備と較正方法を紹介したい。

高周波減衰量の基準とは

高周波減衰量は比率をもとにした相対量なので、SI単位に直接接続することはできない。実際にはSIに接続できる電圧、電力の絶対値の比率として定義されることになる。現在、高周波減衰量の国家標準としては、以下の2つのタイプが用いられている。一つは誘導分圧器 IVD (Inductive Voltage Divider) を標準とするものと、もう一つはピストン減衰器 WBCO

(Waveguide below cutoff attenuator) を標準とするものである。

図1にIVDの構造を示す[1]。構造は至ってシンプルであり、透磁率の非常に高い磁気コアの周りに数十～数百回程度銅線を巻き付け、一定の巻き数比となるポイントに出力端子を取り付ける。入力電圧 V_0 は銅線の巻き数比に応じて正確に分割される。機械的構造が堅牢であり、かつ巻き数比で正確に分圧ができることから、古くから低周波の交流測定で多用されてきた。国家標準機関では1kHzにおける分圧比を正確に規定することで、高周波減衰量との整合を実現している。実際には分解能の異なる5つのIVDを直列に接続することで、電圧比換算で1/100000相当の測定上の分解能が得られており、10MHz～40GHzにおいて、高周波減衰量20dBで 1×10^{-5} dB、40dBで 1×10^{-4} dB、60dBで 1×10^{-3} dBの測定確度が実現されている[2]。

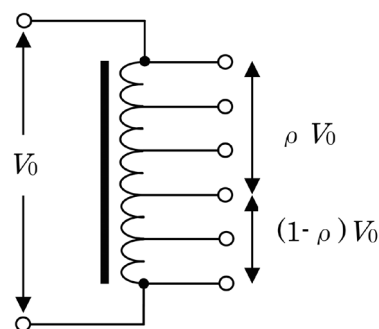


図1 IVDの構造

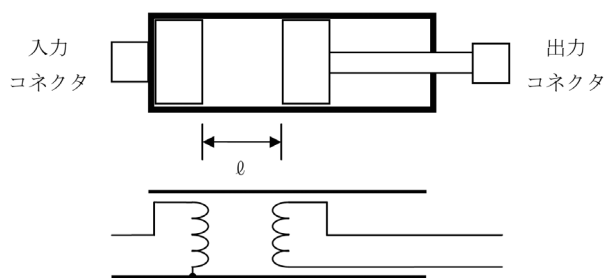


図2 WBCOの構造

図2にWBCOの構造を示す。円形導波管を遮断周波数以下で使用する場合、円形導波管内の電磁界は軸方向に指数関数で減少する。このときの減衰定数(α)は(1)式で表すことができる [3]。

$$\alpha = \frac{15.99}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi r}{1.841\lambda} \right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad \dots\dots (1)$$

但し、 r : 円形導波管の半径
 λ : 使用波長

このとき、 $\lambda \gg r$ であれば α は(2)式のように近似できる。

$$\alpha \cong \frac{15.99}{r} \quad (\text{dB/m}) \quad \dots\dots (2)$$

このように α は r のみに依存し、周波数には無関係になる。図2における ℓ の変化量を $\Delta \ell$ とすれば、減衰量(A)は(3)式のようになる。

$$A = \alpha \cdot \Delta \ell \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots (3)$$

$\Delta \ell$ および r は「長さ」を確定する必要があることから、SIへの結合は「長さ」を仲介することになる。現在、国家標準装置では40GHz以上の高周波減衰量較正において、後述する中間周波置換型較正装置の中で30MHzのWBCOを使用している [4]。

高周波減衰量の定義 [5]

高周波減衰量の較正方法を考える前に、ここで高周波減衰量の定義を確認しておきたい。まず、図3(a)のように信号発生器に負荷が接続されている場合を考える。接続面を境にして、信号発生器側の反射係数を Γ_g 、

負荷側の反射係数を Γ_L とする。伝送線路の損失がゼロであり、また Γ_g と Γ_L がゼロであれば信号発生器の出力電力 P_1 はすべて負荷に供給される。

次に、信号発生器と負荷の間に減衰器を挿入する場合を考える。図3(b)のように信号発生器の出力電力が P_1 、負荷に供給される電力が P_2 であったとき、減衰器の減衰量(A_0)は次の式で表すことができる。

$$A_0 = -10 \text{Log}_{10} \frac{P_2}{P_1} = -20 \text{Log}_{10} |S_{21}| \quad \dots\dots (4)$$

実際には Γ_g と Γ_L はゼロではなく、挿入した減衰器の入力端の反射(S_{11})と出力端の反射(S_{22})もゼロではないので、それらの影響も考慮したとき、この場合の減衰量(A_1)の式は次のように表すことができる。

$$A_1 = -20 \text{Log}_{10} \left| \frac{S_{21}(1 - \Gamma_g \Gamma_L)}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_g)(1 - S_{22} \Gamma_L)} \right| \quad \dots\dots (5)$$

但し、ここで Γ_1 は以下のようになる。

$$\Gamma_1 = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_L}{1 - S_{22} \Gamma_L} \quad \dots\dots (6)$$

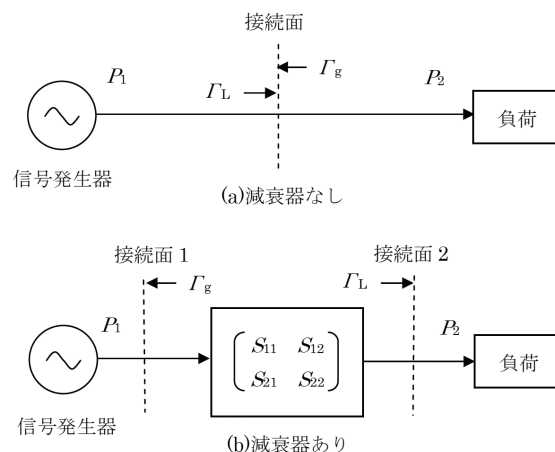


図3 固定減衰器の減衰量測定のプロック図

さて、これをステップ減衰器に適用した場合はどのようなになるであろう。ステップ減衰器の場合の接続状況を図4に示す。ステップ減衰器は「減衰量なし(スルー)」の場合と「減衰量あり」の場合があり、それぞれに対して入力端と出力端の反射係数、および電力の減衰量が異なっている。この場合の減衰量(A_2)は次の式で表すことができる。

$$A_2 = -20 \log_{10} \left| \frac{S_{21b}(1 - \Gamma_{la} \Gamma_g)(1 - S_{22a} \Gamma_L)}{S_{21a}(1 - \Gamma_{lb} \Gamma_g)(1 - S_{22b} \Gamma_L)} \right| \dots\dots (7)$$

但し、ここで Γ_{la} 、 Γ_{lb} は以下のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{la} &= S_{11a} + \frac{S_{12a} S_{21a} \Gamma_L}{1 - S_{22a} \Gamma_L} \\ \Gamma_{lb} &= S_{11b} + \frac{S_{12b} S_{21b} \Gamma_L}{1 - S_{22b} \Gamma_L} \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

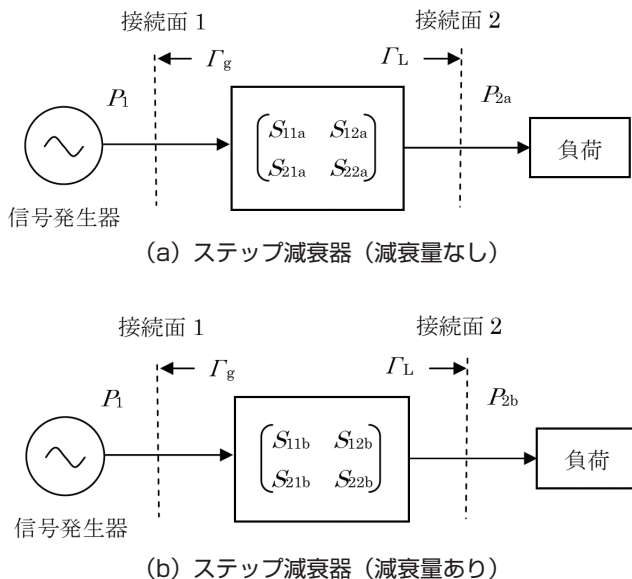


図4 ステップ減衰器の減衰量測定のプロック図

(7)式を見れば、高周波減衰量の測定ではそれぞれの接合面の整合状態を良好に維持することが必要であることが分かる。しかし、全ての接続面での反射の影響を見積もることは困難な場合があり、あらかじめステップ減衰器の入力端と出力端に整合器（Pad）を装着する等の対策が行われることが多くなっている。

高周波減衰量の較正方法

ここでは高周波減衰量を与えるために一般的に使用されている固定減衰器とステップ減衰器の減衰量の較正について、比較的高精度な較正が実現できるといわれている方法を2つほどご紹介する。

◆ 直接置換法

まずひとつ目は直接置換法と呼ばれる方法である。直接置換法のプロック図を図5に示す。標準器の可変減衰器と被較正ステップ減衰器（EUT）とを直列に接続する。その減衰量の較正手順は以下の通りである。

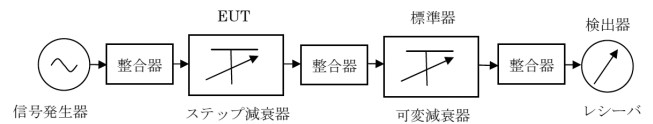


図5 直接置換法のプロック図

例えば、EUTのステップ減衰器は10dBステップで最大50dBまで減衰量が可変でき、標準器の可変減衰器は0dBから50dBまでの減衰量を連続可変できるものであるとする。まず、EUTの減衰量を0dB、標準器の減衰量を50dBに設定し、このときの検出器の指示値を L_0 とする。次にEUTの減衰量を10dBとし、標準器の減衰量を40dBとして検出器の指示値を読み取る。指示値は L_{10} となるが、これを L_0 と同一となるように標準器の減衰量を僅かに加減する。このときの加減幅がEUTの減衰量の10dBにおける較正值になる。さらにEUTを20dB、標準器を30dBに設定し、同様の作業を繰り返して、50dBまでの減衰量を較正することができる。

この方法は比較的簡便な装置で実現できることが特徴である。しかし、標準器は連続可変可能なタイプが必要であること、較正できる周波数範囲は標準器の較正值がある周波数に限られること、減衰量が大きい場合には検出器に入力するレベルが小さくなりノイズの影響を受け易くなること、信号発生器の出力レベルの安定度の影響を受け易くなることなどの問題がある。

◆ 中間周波置換法

直接置換法では減衰量の較正は、較正できる周波数は標準器の較正值がある周波数に限られるという問題があった。この問題を解消するためには、標準器の較正值がある周波数を中間周波数として、周波数変換をすればよいことは容易に想像できる。これを実現したのが中間周波置換法と呼ばれる方法である。中間周波置換法のプロック図を図6に示す。

図5の標準器（可変減衰器）の直前にミキサを挿入し、ローカル発振器は信号発生器の周波数と中間周波数の和の周波数の信号を供給する。

較正方法は直接置換法と同様であり、EUTの減衰

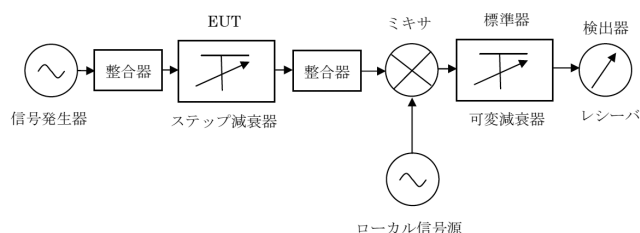
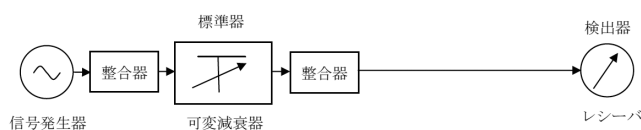


図6 中間周波置換法のブロック図

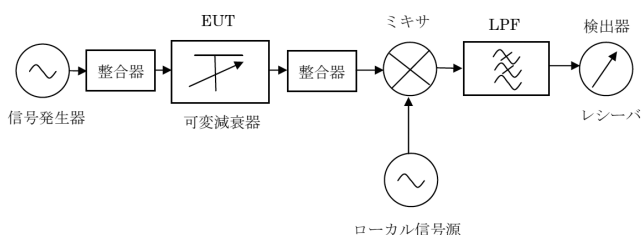
量を増加し、反対に標準器の減衰量を減少させて検出器のレベルが一定になる標準器の減衰量の差分を求める。

この方法は、標準器の較正值がない周波数における減衰量の較正が可能であるという利点がある。反面、ミキサやローカル信号発生器などを用意しなければならないという欠点がある。加えて、ミキサは十分に直線性が確保されているレベル範囲を使う必要がある。ミキサは入力レベルが高いと歪を生じる場合があり、このため信号発生器の信号レベルには使用の上限がある。一方で検出レベルの下限は検出器のノイズレベルで制限されるので、このレベルの上限と下限の間に検出レベルを設定しなければならないことが課題となる。また、EUTからの出力信号が小さい場合は、ローカル信号の漏れ信号が問題となる場合があり、ローカル信号のアイソレーションを十分確保することが必要になる。

検出器の指示値を一定にする手法は、本質的にゼロ位法と等価であり、この調整作業が実際の較正現場では負担となる場合がある。そこで、検出器の指示値を一定にすることに代えて、検出器（レシーバ）のレベル軸の目盛りを標準器で較正しておくという方法もある。この方法による構成を図7に示す。



(a) 標準器によるレシーバの目盛り校正



(b) EUTの減衰量校正

図7 簡易な中間周波置換法

このとき、検出器（レシーバ）は十分な直線性があることが要求される。また、スペクトラムアナライザなどを検出器として利用する場合は、内部のミキサへの入力レベルに十分注意をする必要がある。

高周波減衰量較正值の利用上の注意点

高周波減衰量の標準器は連続可変式であることが必要であると説明した。連続可変型でありかつ良好な直線性を得られるものは限られており、この要求を満たすものとして以前はWBCOが多用されていた。WBCOは原理的に機械的寸法によって減衰量が確定し、優れた減衰量の直線性を有している。しかし、このような減衰器は今日では市販されているものは僅かであり、一般に入手することは容易ではない。現在のステップ可変型の減衰器のほとんどはT型やπ型の抵抗減衰器であり、これらがセクションごとに従属的に接続されて減衰量を作り出す仕組みになっている。比較的ステップ幅が小さいものでも可変幅は0.1dBに留まっており、連続的に減衰量を変更できるものではない。実用面を考えたとき、標準器はステップ減衰器を使うことになるが、図5や図6のような使用方法は難しいと認識することが必要であろう。

まとめ

放送局の出力電力は数百kWにも及ぶ場合があるが、一方で携帯端末機の受信感度は-120dBm以下という場合もある。20桁以上にも及ぶ高周波電力範囲をカバーするためには、用途にあった減衰器の利用が欠かせない。高出力を減衰器に入射する場合は、減衰器の放熱にも気を使う必要がある。減衰器の温度係数で減衰量が変わってしまうからである。

実際の製品開発で減衰器を単独で使用することは少ないと思われるが、正確な高周波電力測定を行う場合には高周波減衰量が正確に把握された減衰器を使う必要があることは頭の隅に置いておくべきである。

参考文献

- [1]中村安宏：誘導分圧器の分圧比標準の高精度化、AIST Today、Vol.3 No.12、pp.29、2003年12月
- [2]Anton WIDARTA：高周波減衰量標準の開発・整備・国際比較等の状況、NMIJ高周波クラブ第10回会合資料、2011年2月
- [3]大森俊一、横島一郎、中根央：「高周波・マイクロ波測定」1992年、pp.62～pp.63、コロナ社
- [4]Anton WIDARTA：高周波減衰量標準、AIST Today、Vol.4 No.10、pp.30、2004年10月
- [5]計測技術マニュアル編集委員会：「電磁波計測技術ガイドブック」、1995年、pp.108～pp.109、安全問題研究会