

2-5-4 外挿法を用いたマイクロ波帯用 EMI アンテナの校正

藤井勝巳 酒井孝次郎 杉山 功 瀬端好一 西山 巖

マイクロ波帯の放射妨害波測定で利用されている広帯域アンテナのひとつであるダブル・リッジド・ガイド・アンテナの動作利得を、送受信アンテナ間の S_{21} の距離特性を外挿した結果から決定する 2 種類の校正方法について検討する。この方法によって得られた動作利得は、送受信アンテナ間距離の違いによって生じる不確かさを考慮する必要がないという特長がある。実際にダブル・リッジド・ガイド・アンテナ 2 機種 of 校正を、グラウンドプレーンを有する小型 5 面電波暗室にて行い、大型の 6 面電波暗室における校正結果と比較したところ、両者の校正結果は、ほぼ全ての周波数において ± 1.0 dB 以内で一致することを示し、外挿法の有効性を確認した。

1 まえがき

電気・電子機器に内蔵されたコンピュータの動作周波数の高速化に伴い、それらの機器から空間に放射される妨害波の測定 (EMI 測定) の必要性が高まっており、国際無線障害特別委員会 (CISPR) による、周波数 1 GHz を超える周波数帯の放射雑音の許容値と測定法の国際規格化を受けて [1]、我が国でも 1 ~ 6 GHz の周波数帯について VCCI 協会による規制が 2010 年 10 月から開始された [2]。規格の中で、測定には、直線偏波のアンテナを使うことが定められており、図 1 に示すダブル・リッジド・ガイド・アンテナ (DRGA : Double-ridged guide antenna) や対数周期ダイポールアンテナ (LPDA : Log-periodic dipole array antenna) が広く用いられている。これらのアンテナは、1 ~ 18 GHz の周波数帯を 1 個のアンテナで測定が可能な広帯域アンテナであり、EMI 測定に適したアンテナである。

EMI 測定を行うためには、アンテナの特性を表すパラメータのひとつであるアンテナ係数や動作利得が不可欠である。これらを決定する方法としては、3.2 で述べるように 3 アンテナ法や置換法と呼ばれる校正法が用いられ、6 面電波暗室における送受信アンテナ間の伝搬特性の測定を行うことでアンテナ係数や動作利得を決定することができる。

ただし、DRGA や LPDA のような大きさを持ったアンテナを校正する場合、3 アンテナ法では、送信アンテナのどの部分から、受信アンテナのどの部分までの距離をアンテナ間距離とするかによって校正結果が異なってしまう。また、置換法では、特に標準アンテナ (STD : Standard antenna) の形状が、被校正アンテナ (AUC : Antenna under calibration) の形状と異

なる場合には、STD と AUC とのどの部分を一致させるかによって校正結果が異なってしまう。

このような問題を解決するためには、アンテナの大きさが無視できる程に送受信アンテナ間距離を大きく確保すれば良い。だが、そのようなアンテナ間距離を確保できるだけの大きな電波暗室を用意するのは難しい。また、屋外の測定場 (オープンサイト) において校正する方法も提案されているが [3][4]、EMI 測定を行う電波暗室と同じ大きさの電波暗室で校正ができれば都合が良い。

アンテナの構造が比較的簡単な場合には、短い送受信アンテナ間距離で測定した結果を、理論計算や数値シミュレーションで得た値を使って補正する方法がある [5][6]。さらに、見かけ上の放射点 (位相中心) を求め、アンテナ間距離を補正する方法が提案されている [7]-[9]。しかしながら、これらの方法では理論計算や数値シミュレーションの妥当性が問題となる。特にアンテナの構造が複雑になるほど、寸法を正確に測定し、データとして入力することが困難であったり、数値シミュレーションでは、モデル化やセグメントへの分割数によって結果に違いが生じたりする。また、図 1 (c) のアンテナのように、エレメント構造が見えないために寸法測定が困難なアンテナでは数値シミュレーションができない。さらに、位相中心を実測によって求めようとした場合には、十分なアンテナ間距離を確保して測定する必要があり、結局、大型の電波暗室が必要となる。

本報告では、妨害波測定で使用するのと同じ小型の電波暗室で、アンテナの動作利得を決定する方法について検討する。具体的には、送受信アンテナ間の S パラメータ S_{21} を複数の距離で測定し、得られた距離特性を外挿することによって、アンテナ間距離が無限大

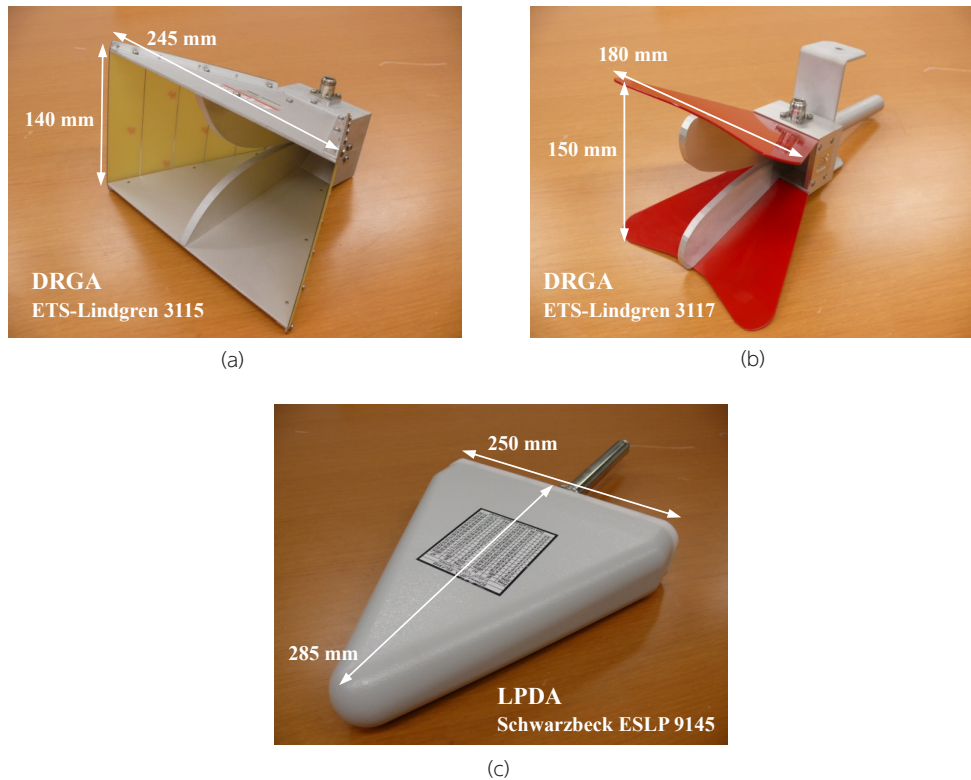


図1 マイクロ波帯用アンテナ

となるとき、その値を推定することで、動作利得を決定する [10]。

2 動作利得とアンテナ係数

アンテナの「利得」とは、アンテナから特定の方向に放射される電波の電力密度と、基準として考えるアンテナから放射される電力密度の比として定義されている [11]。基準アンテナとして等方性アンテナを考えた場合を「絶対利得」、その他のアンテナを基準とした場合の利得を「相対利得」と呼ぶ。相対利得の基準アンテナとしては半波長ダイポールを用いることが多い。また、アンテナの全方向に放射されるエネルギーを基準にした場合の利得を「指向性利得」、アンテナと給電線路との間の不整合を考慮した利得を「動作利得」と呼ぶ。

利得 G_a 、指向性利得 G_d 、動作利得 G_w の関係は、放射効率 η 、反射損 M を用いて、次式で与えられる。相互の関係を図2に示す。

$$G_w = G_a \frac{1}{M} = \eta G_d \frac{1}{M} \quad (1)$$

ここで、反射損 M は、

$$M = \frac{1}{1 - |\Gamma_{in}|^2} \quad (2)$$

さらに、 Γ_{in} はアンテナの反射係数、

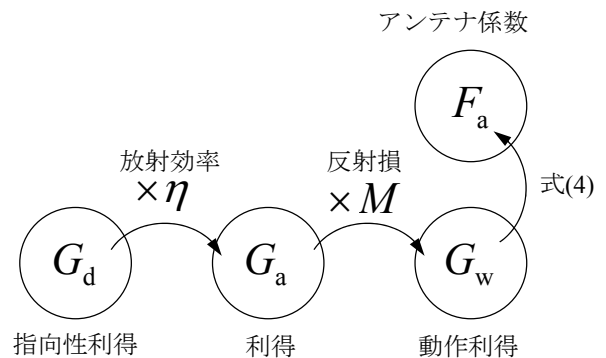


図2 利得とアンテナ係数の関係

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3)$$

で与えられる量である。また、 Z_{in} はアンテナの入力インピーダンス、 Z_0 はアンテナへの給電線路の特性インピーダンス (実数) である。アンテナに損失がなく (放射効率 100%)、インピーダンス整合がとれている場合 ($\Gamma_{in}=0$) には、動作利得、利得、指向性利得は、すべて同じ等しい値となる。

本稿では、実際の EMI 測定では $Z_0=50 \Omega$ の同軸ケーブルや測定器類を接続して測定することが多いことから、 $Z_0=50 \Omega$ のときの動作利得 (等方性アンテナを基準アンテナとした場合の動作利得) を決定する方法について述べる。

なお、 $Z_0=50 \Omega$ のとき、動作利得とアンテナ係数

F_a との関係は次式で表される [11]-[13]。

$$F_a = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \sqrt{\frac{120}{G_w Z_0}} \quad (4)$$

通常、動作利得やアンテナ係数は dB で表記するので、両辺の常用対数を取って 20 倍すれば、以下の関係式が得られる。

$$F_a [\text{dB}(1/\text{m})] = G_w [\text{dBi}] + 20 \log_{10} f_{\text{GHz}} + 30.22 \quad (5)$$

ここで、 f_{GHz} は GHz で表示した周波数の値である。アンテナ係数を使えば 1 GHz 以下の EMI 測定と同様に、以下の式を用いて、受信電圧 V から受信電界強度 E を決定できる。

$$E [\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})] = F_a [\text{dB}(1/\text{m})] + V [\text{dB}_\mu] \quad (6)$$

3 遠方界における校正

送受信アンテナ間距離が十分大きい場合の校正法については、文献 [14] に紹介されている。近年では、測定器としてベクトル・ネットワーク・アナライザ (以下、VNA) が用いられ、送受信アンテナ間の S_{21} を測定することによって校正が行われることも多い。本稿では S_{21} を測定する場合を想定して数式を表現し説明を行う。従来のように、信号発生器と受信機を用いて校正を行う場合には、次式を代入すればよい。

$$|S_{21}| = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_0} \Big|_{\Gamma_G = \Gamma_L = 0} \quad (7)$$

ただし、 P_0 は直結したときの受信電力、 P_1 は送受信アンテナを接続し、電波を伝搬させたときの受信電力であり、信号発生器の反射 Γ_G 及び受信機の反射 Γ_L が 0 で、ケーブルを直結するために用いたアダプタの特性 (損失) を補正した場合にのみ成り立つ。

3.1 置換法

置換法は、アンテナ校正法として一般に広く用いられている方法であり、動作利得 G_w (STD) が既知の STD と、これから動作利得を求めたい AUC とを、置き換えて比較測定する方法である。STD の動作利得は、校正機関によって校正され、「校正証明書」や「校正成績書」として入手する。VNA を用いたときの校正手順は、図 3 に示すように、送信アンテナから十分離れた場所に STD を設置して S_{21} (STD) を測定し、AUC に置き換えて S_{21} (AUC) を測定する。両者を比較することで AUC の動作利得 G_w (AUC) は決定できる。

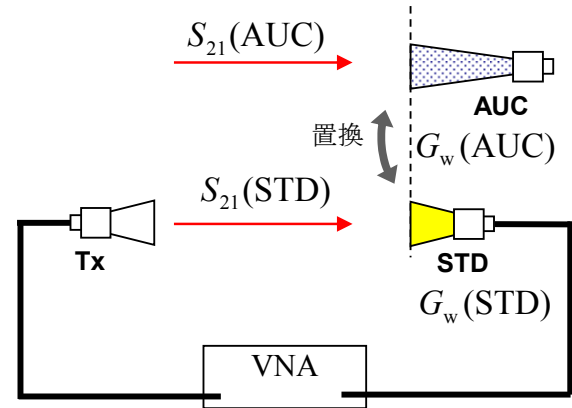


図 3 置換法

$$G_w (\text{AUC}) = G_w (\text{STD}) \frac{|S_{21} (\text{AUC})|^2}{|S_{21} (\text{STD})|^2} \quad (8)$$

測定は、通常 dB 値で行う。この場合には、簡単な加減算で求めることができる。

$$G_w^{\text{dB}} (\text{AUC}) = G_w^{\text{dB}} (\text{STD}) + S_{21}^{\text{dB}} (\text{AUC}) - S_{21}^{\text{dB}} (\text{STD}) \quad [\text{dBi}] \quad (9)$$

図 3 では、STD と AUC の開口面が一致するように置き換えを行っているが、形状が異なるアンテナを置き換える場合には、2つのアンテナのどの位置が一致するように配置すれば良いかが問題となる。また、STD と AUC が同一形状のアンテナであっても、アンテナ間距離が十分であるかどうかは不明であり、校正結果に不確かさが生じる。いわゆる遠方界条件として、 $2D^2/\lambda$ (アンテナ開口寸法 D 、波長 λ) が広く知られているが、例えば、アンテナの開口面の大きさ D が同じであっても、送受信アンテナ間距離方向の大きさが異なれば、必要となるアンテナ間距離は異なる等、必要なアンテナ間距離は、アンテナの形状と要求される不確かさの程度に依存する。

3.2 3 アンテナ法

3 アンテナ法は、動作利得が未知のアンテナを 3 個用いて、3 通りの組合せで送受信アンテナ間の S_{21} を測定し、3 個のアンテナの動作利得を同時に決定する方法である。図 4 に示すように、3 個のアンテナのうち 2 個を送受信アンテナとして用い S_{21} を測定する。得られた 3 つの測定値から、例えばアンテナ #1 の動作利得は、以下の式を用いて決定できる。

$$G_w (1) = \frac{4\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{|S_{21}(2,1)|^2 |S_{21}(3,1)|^2}{|S_{21}(3,2)|^2}} \quad (10)$$

ただし、 $S_{21}(j, i)$ とは、アンテナ # i からアンテナ # j へ電波を伝搬させたときの S_{21} である。

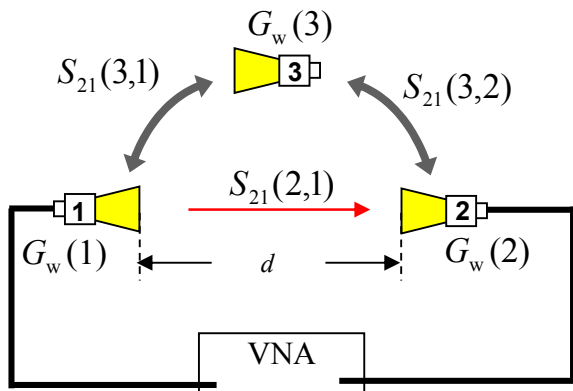


図4 3アンテナ法

測定は、通常 dB 値で行う。この場合には、簡単な加減算で求めることができる。

$$G_w^{dB}(1) = 16.22 + 10 \log_{10} f_{GHz} + 10 \log_{10} d + \frac{1}{2} \{ S_{21}^{dB}(2,1) + S_{21}^{dB}(3,1) - S_{21}^{dB}(3,2) \} \quad (11)$$

なお、

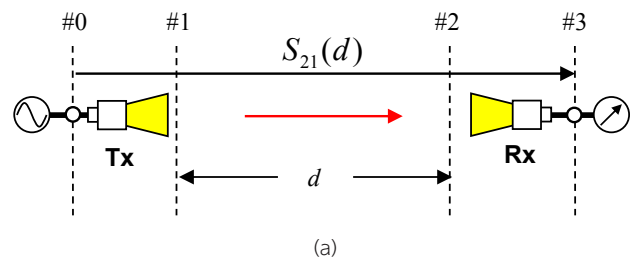
$$10 \log_{10} (4\pi/\lambda) = 10 \log_{10} (4\pi/c \cdot 10^9) + 10 \log_{10} f_{GHz} = 16.22 + 10 \log_{10} f_{GHz} \quad (12)$$

の関係を用いた。 c は光速である。式(11)の右辺第3項をみると、送受信アンテナ間の距離 d を入力する必要があることがわかる。図4では、送受信アンテナの開口面間の距離を d として図示しているが、送信アンテナのどの部分から、受信アンテナのどの部分までの距離を d として与えれば良いかは不明である。測定作業の便宜上、開口面間の距離を d とした場合には、動作利得の値にかたよりが生じることになり、校正結果の不確かさの要因となる。

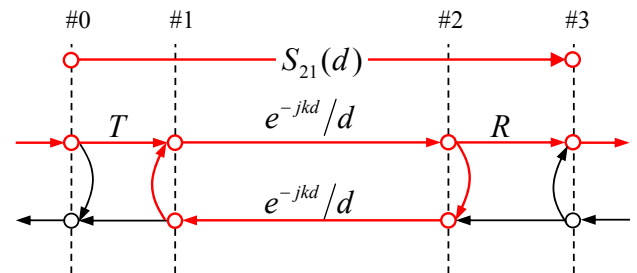
4 外挿法による伝搬特性の推定

これまで述べたように、伝搬方向に大きさを持ったアンテナの校正を行う場合には、アンテナ間距離 d の扱いによって、正しい結果が得られなくなる。この問題を解決する方法のひとつとして、比較的短いアンテナ間距離で測定した S_{21} の距離特性から、無限に離れた距離における伝搬特性を、距離特性を外挿することで推定する方法が提案されており[10]、世界の国家計量標準機関で用いられている。

いま、図5(a)に示すように、比較的近い距離に送受信アンテナを対向させて配置し S_{21} を測定することを考える。送信アンテナのコネクタをポート#0、送信アンテナの開口面に設定した平面をポート#1、受信アンテナの開口面に設定した平面をポート#2、受信アンテナのコネクタをポート#3とする。このとき、



(a)



(b)

図5 アンテナ間の伝搬モデル

ポート#0からポート#3の間の特性が、VNAで S_{21} として測定される。なお、ポート#1、ポート#2はアンテナの開口面上でなくても良く、例えばアンテナ距離基準点として記入した印の間を距離 d と定めても良い。図5(b)は、ポート#0からポート#3への信号の流れを、シグナル・フロー・グラフを用いて表す。T、Rは、それぞれ、送信アンテナ、受信アンテナの特性を表している。いま、アンテナ間の多重反射を考慮すると、 S_{21} は次式で書き表せる[10]。

$$S_{21}(d) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-j(2m+1)kd}}{d^{2m+1}} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} d^{-n} = \frac{e^{-jkd}}{d} \left(A_{00} + \frac{A_{01}}{d} + \frac{A_{02}}{d^2} + \dots \right) + \frac{e^{-j3kd}}{d^3} \left(A_{10} + \frac{A_{11}}{d} + \frac{A_{12}}{d^2} + \dots \right) + \dots \quad (13)$$

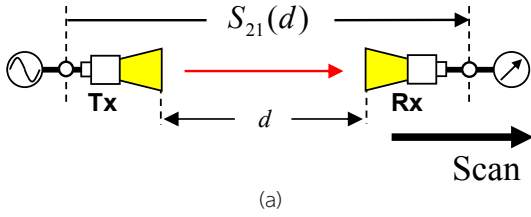
ここで、空間の伝搬特性(ポート#1~ポート#2間)が距離 d に反比例することに着目し、式(13)の両辺に d を掛けて自乗すると、

$$|S_{21}(d) \cdot d|^2 = A_0 + A_1 \left(\frac{1}{d} \right) + A_2 \left(\frac{1}{d} \right)^2 + A_3 \left(\frac{1}{d} \right)^3 + \dots \quad (14)$$

を得る。ここで、第1項の定数 A_0 は、図5(b)より送受信アンテナの特性T及びRの自乗の積に等しく距離に依らない項であることが分かる。

$$\lim_{d \rightarrow \infty} |S_{21}(d) \cdot d|^2 = A_0 = |T|^2 |R|^2 \quad (15)$$

定数 A_0 はアンテナ間距離 d を無限大にすることで決定することができるが、実際には、アンテナ間距離 d を無限大とすることは不可能なので、有限のアンテナ間距離で測定した結果から A_0 を求めることを考える。複数のアンテナ間距離 d における測定値 $S_{21}(d)$



(a)

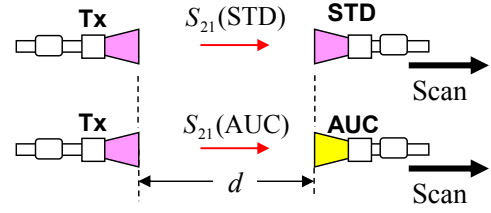
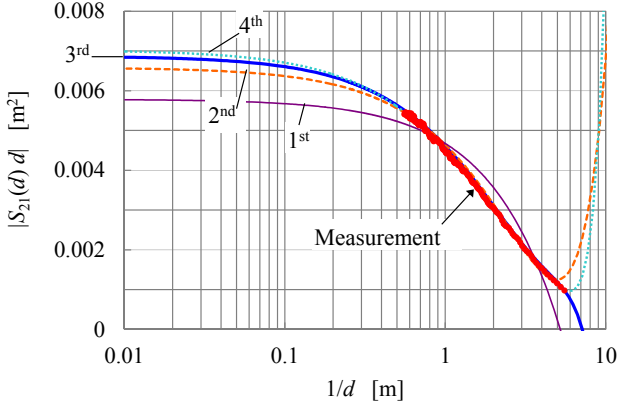
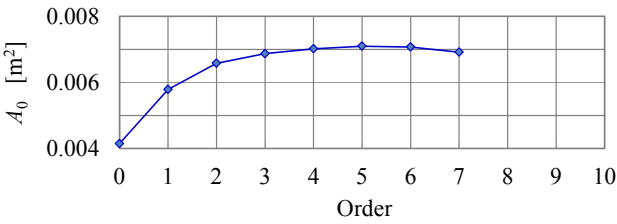


図7 外挿法を用いた置換法



(b)



(c)

図6 S_{21} の距離特性と回帰曲線の次数による A_0 の違い

に対して、

$$f\left(\frac{1}{d}\right) = A_0 + A_1\left(\frac{1}{d}\right) + A_2\left(\frac{1}{d}\right)^2 + A_3\left(\frac{1}{d}\right)^3 + \dots \quad (16)$$

を回帰式とした最小自乗法を適用する。

図6(b)は実際に測定した結果の例である。図1(a)に示すアンテナ(ETS-Lindgren社製:3115)を、送信アンテナ及び受信アンテナとして使用し、周波数3GHzにおいて、開口面間距離 d を変化させながら測定を行った。縦軸が $|S_{21}(d) \cdot d|^2$ 、横軸が $(1/d)$ であり、点でプロットした測定値に、式(16)の多項式を、次数を変えて当てはめた結果を示している。横軸は右に行くほどアンテナ間距離が近く、左に行くほど遠くなる。したがって、アンテナ間距離無限大のときの値 A_0 を求めることは、回帰曲線の切片を求めることに等しい。

図6(b)を見ると、いずれの回帰曲線も左に行くほど(距離が大きくなるほど)一定値に収束していることが分かる。

ここで、回帰モデル式として何次の多項式を用いればよいか問題となる。これは対象とするアンテナの

形状や周波数測定、測定データを取得したアンテナ間距離(アンテナ間距離が近いほど高次の項を必要とする)によって異なるが、文献[10]に述べられているF検定や、AIC[15]を用いて決定することができる。また、校正の不確かさが最小になるように最適な次数を選択すればよい[16][17]。図6(c)は、回帰曲線の次数を増やすことによって A_0 が収束する様子を示している。その結果、図6(b)に示される距離特性を示す送受信アンテナの場合には、3次の多項式を用いれば十分であることが分かる。なお、次数を増やしすぎると回帰曲線の挙動がおかしくなり、 A_0 が正しく得られなくなるので注意する必要がある。

4.1 外挿法を用いた置換法

送信アンテナとSTDの S_{21} の距離特性と、送信アンテナとAUCの S_{21} の距離特性を測定し(図7)、結果を外挿して、 $A_0(\text{STD})$ と $A_0(\text{AUC})$ をそれぞれ推定すれば、被校正アンテナの動作利得は、次式から求めることができる。

$$G_w(\text{AUC}) = G_w(\text{STD}) \frac{A_0(\text{AUC})}{A_0(\text{STD})} \quad (17)$$

ただし、

$$A_0 = \lim_{d \rightarrow \infty} |S_{21}(d) \cdot d|^2$$

である。dBで扱う場合には、

$$G_w^{\text{dB}}(\text{AUC}) = G_w^{\text{dB}}(\text{STD}) + A_0^{\text{dB}}(\text{AUC}) - A_0^{\text{dB}}(\text{STD}) \quad [\text{dBi}] \quad (18)$$

ただし、

$$A_0^{\text{dB}} = 20 \log_{10} A_0$$

である。送信アンテナから無限に離れた場所で、STD、AUCを置換していることと等価なので、3.1で示したアンテナを置換する位置の違いによる影響は生じない。

4.2 外挿法を用いた3アンテナ法

文献[10]では、1つのアンテナが円偏波のアンテナについても適用可能な3アンテナ法(generalized three-antenna method)について述べられているが、3個のアンテナ全てが直線偏波のアンテナであること

2 較正技術の研究開発

が明らかである場合には、偏波面が同じになるようにアンテナを配置した場合の測定のみを行い(図8)、次式から動作利得を決定することができる。

$$G_w(1) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{A_0(2,1)A_0(3,1)}{A_0(3,2)}} \quad (19-1)$$

$$G_w(2) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{A_0(2,1)A_0(3,2)}{A_0(3,1)}} \quad (19-2)$$

$$G_w(3) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{A_0(3,1)A_0(3,2)}{A_0(2,1)}} \quad (19-3)$$

ただし、

$$A_0(j,i) = \lim_{d \rightarrow \infty} |S_{21}(j,i) \cdot d|^2, \quad (j,i) = (2,1), (3,1), (3,2)$$

である。dB で表す場合には、

$$G_w^{dB}(1) = 16.22 + 10 \log_{10} f_{GHz} + \frac{1}{2} \{ A_0^{dB}(2,1) + A_0^{dB}(3,1) - A_0^{dB}(3,2) \} \quad [dBi] \quad (20-1)$$

$$G_w^{dB}(2) = 16.22 + 10 \log_{10} f_{GHz} + \frac{1}{2} \{ A_0^{dB}(2,1) - A_0^{dB}(3,1) + A_0^{dB}(3,2) \} \quad [dBi] \quad (20-2)$$

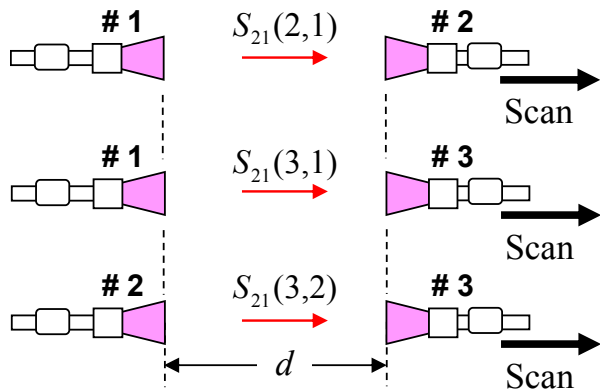


図8 外挿法を用いた3アンテナ法

$$G_w^{dB}(3) = 16.22 + 10 \log_{10} f_{GHz} + \frac{1}{2} \{ -A_0^{dB}(2,1) + A_0^{dB}(3,1) + A_0^{dB}(3,2) \} \quad [dBi] \quad (20-3)$$

ただし、

$$A_0^{dB}(j,i) = 20 \log_{10} A_0(j,i) \quad (j,i) = (2,1), (3,1), (3,2)$$

となる。一連の式(19)、同じく式(20)を見ると明らかのように、距離 d に関する項がなく、3.2 で述べたアンテナ間距離の問題は生じないことが分かる。

5 校正結果

「外挿法を用いた置換法」及び「外挿法を用いた3アンテナ法」の妥当性を示すために校正を行った結果を示す。使用したアンテナは、図1に示した2種類のDRGA(ETS-Lindgren社製:3115及び3117)であり、動作周波数範囲が1~18GHzである。

校正は図9に示すように、グランドプレーンに電波吸収体を敷いていない5面電波暗室(内寸:長さ8m×幅6m×高さ5.5m)にて行った。アンテナは送信アンテナ・受信アンテナとも水平偏波で、高さ $h = 2$ mに設置し、アンテナ開口面間距離 $d = 6$ cm~

表1 アンテナ掃引距離
(文献[10]にて推奨される開口面間距離)

周波数 GHz	掃引開始距離 m	掃引終了距離 m
1	0.06	0.6
3	0.18	1.8
6	0.36	3.6
9	0.54	4.0 (5.4)
12	0.72	4.0 (7.2)
15	0.90	4.0 (9.0)
18	1.08	4.0 (10.8)

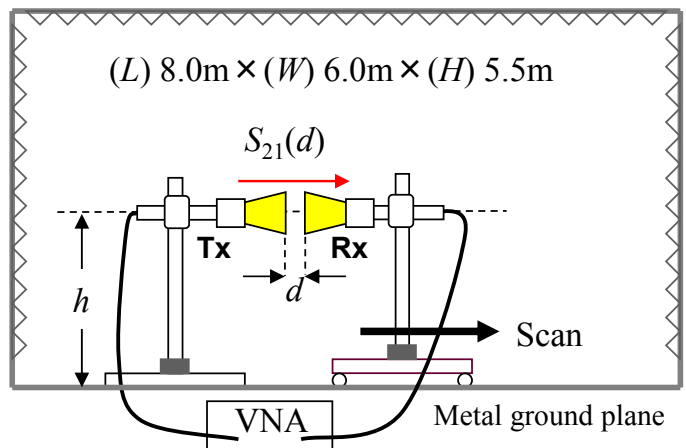
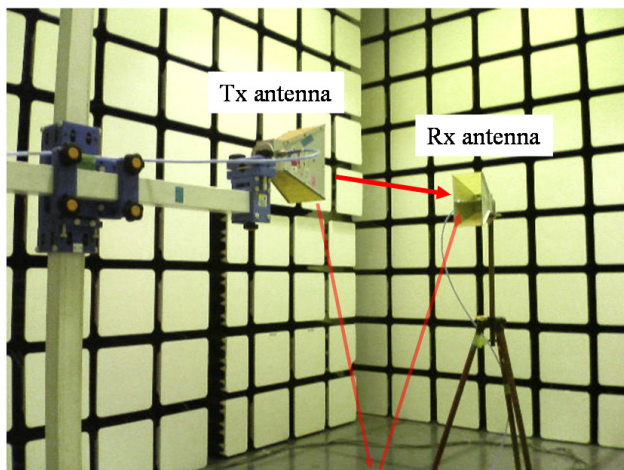


図9 5面電波暗室におけるアンテナ校正

4 m の範囲を、1 cm 刻みでアンテナポジションを用いて移動させた。また S_{21} の測定には SOLT 校正を行ったベクトル・ネットワーク・アナライザ (VNA) を使用した。

アンテナを掃引距離の範囲は、文献 [10] によれば、アンテナ開口径を a としたとき、 $0.2 (a^2/\lambda) \sim 2 (a^2/\lambda)$ が推奨されている。そこで、本報告で扱う 2 種類の DRGA の開口径を $a=30$ cm と見なして、アンテナ開口面間の距離を表 1 の範囲で掃引させることにした。ただし、最長距離は 4 m までに制限した。表中、括弧の中に記してあるのは、文献 [10] にて推奨されるアンテナ間距離である。周波数 6 GHz までは推奨され

たアンテナ間距離を満足しているが、それより高い周波数では不足している。回帰モデル式には、すべての場合において、

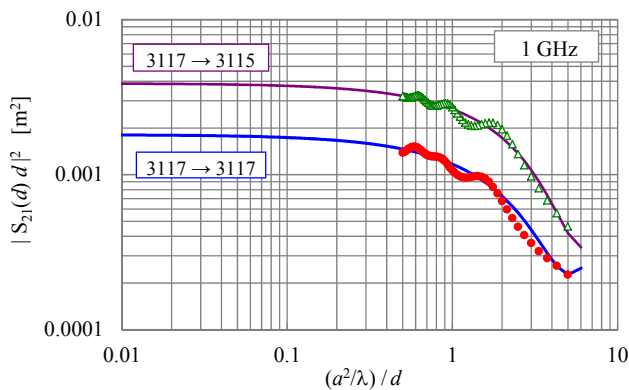
$$f\left(\frac{1}{d}\right) = A_0 + A_1\left(\frac{1}{d}\right) + A_2\left(\frac{1}{d}\right)^2 + A_3\left(\frac{1}{d}\right)^3 \quad (21)$$

の 3 次式を用いることにした。

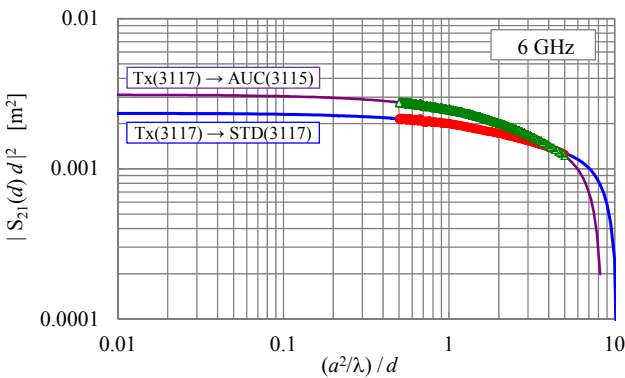
5.1 外挿法を用いた置換法による校正

STD には、大型 6 面電波暗室において、送受信アンテナの開口面間の距離を 15.1 m として式 (11) を用いて校正された DRGA 3117 を用いた。送信アンテナにも DRGA 3117 を用いた。図 10 は、周波数 1 GHz、6 GHz 及び 18 GHz における測定結果であり、横軸は $(a^2/\lambda)/d$ 、縦軸は $|S_{21}(d) \cdot d|^2$ である。距離 d はアンテナ開口面間の距離とした。図中、●印 (赤色) 及び △印 (緑色) で示しているのが測定データである。また、これらのデータを用いて得られた回帰曲線を実線で示している。距離 d が大きくなるにつれて縦軸の値 $|S_{21}(d) \cdot d|^2$ が一定値に収束し、 A_0 が得られるのがわかる。

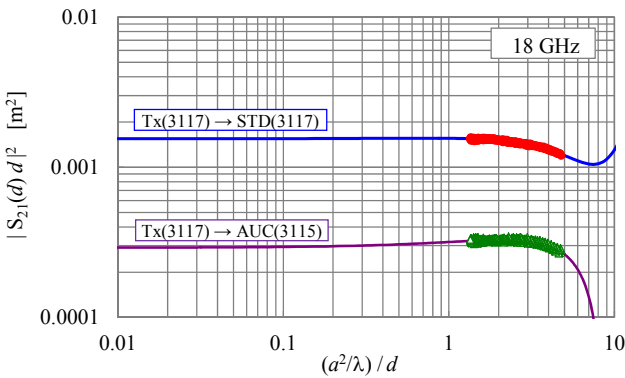
以上のように得られた各周波数の A_0 を用いて、動作利得を決定した結果を図 11 に示す。図 11 (a) は動作利得、図 11 (b) は大型 6 面電波暗室で得られた結果との差異である。



(a)

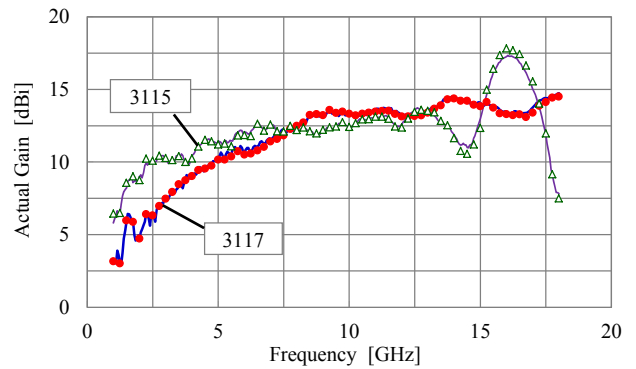


(b)

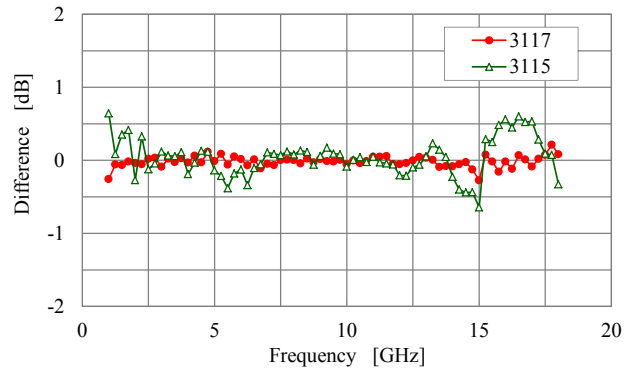


(c)

図 10 S_{21} の測定結果と A_0 の推定結果 (置換法)



(a)



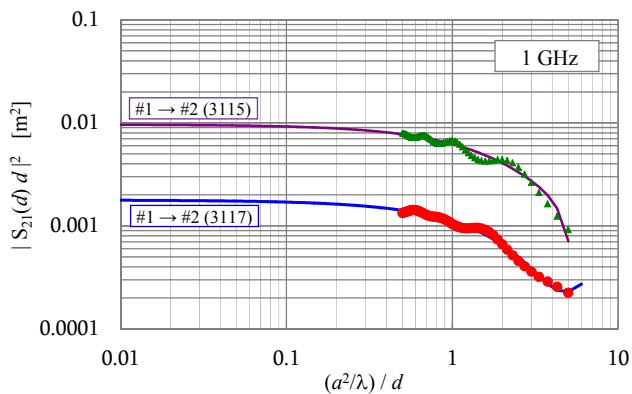
(b)

図 11 外挿法を用いた置換法による校正結果
(a) 動作利得、(b) 大型 6 面電波暗室における校正結果との差異

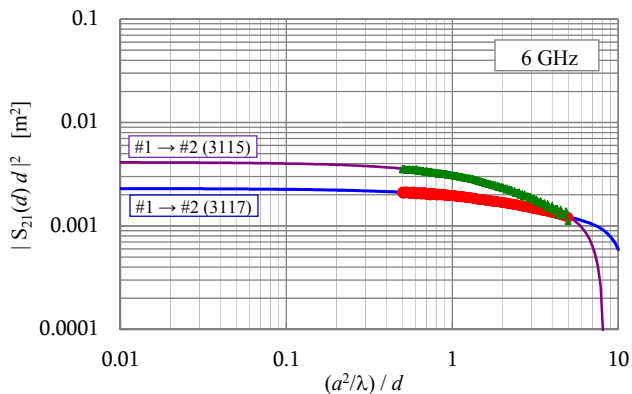
2 較正技術の研究開発

被校正アンテナ (AUC) が DRGA 3115 の場合 (Δ 印 (緑色)) は、14 GHz を超えた周波数で差異が大きくなっている。この原因は掃引距離が不十分であることに加えて、DRGA 3115 は、指向性が正面方向とは異なる方向で最大となる特徴を持ち、周囲反射波の影響が距離によって異なるために外挿による A_0 の推定が正しく行えなかったと考えられる。一方、指向性が正面方向で最大となる DRGA 3117 が AUC の場合 (\bullet 印 (赤色)) は、アンテナ掃引距離が不十分と思われる程度であっても動作利得を正しく求めることができた。

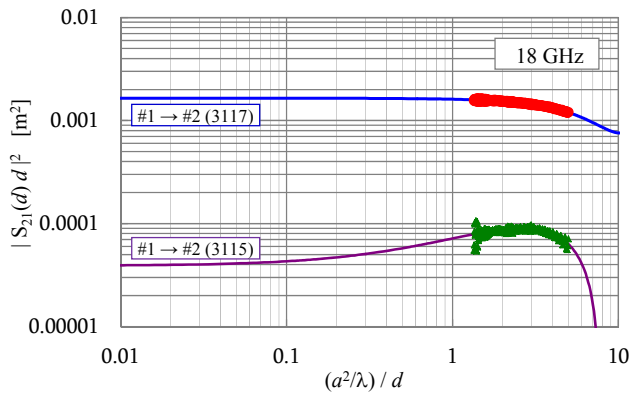
また、周波数 2 GHz 以下において、DRGA 3115 の場合には差異が比較的大きくなったが、これは、



(a)



(b)



(c)

図 12 S_{21} の測定結果と A_0 の推定結果 (3 アンテナ法)

図 10 (a) をみると明らかなように、送受信アンテナ間の多重反射、グランドプレーンからの反射波による測定値の変動が推定結果に影響を与えてしまったと考えられる。また、測定点数が少ないことも原因と思われる。しかしながら、同様の条件にもかかわらず DRGA 3117 では差異が小さかったのは、STD と AUC が同一形状のアンテナであるためそれらの影響が置換によりキャンセルされたためと思われる。

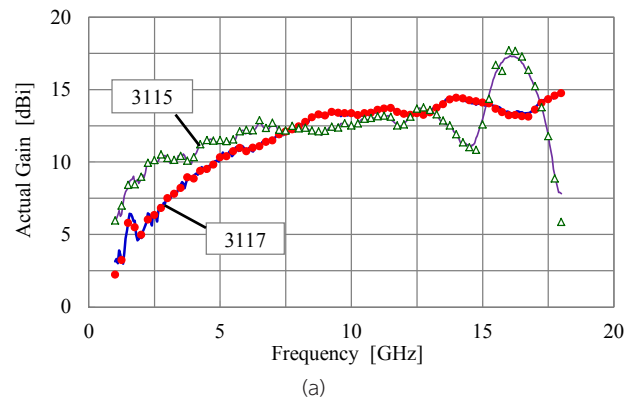
以上の結果、AUC が STD と同じ DRGA 3117 の場合には、全ての周波数において $-0.3 \sim +0.2$ dB 以内で大型 6 面電波暗室における校正結果と一致する結果が得られた。また、

DRGA 3115 の場合には、 $-0.7 \sim +0.7$ dB 以内で一致した。特に、周波数 1~6 GHz では、DRGA 3117 は $-0.3 \sim +0.1$ dB 以内、DRGA 3115 は $-0.4 \sim +0.7$ dB 以内で一致した。

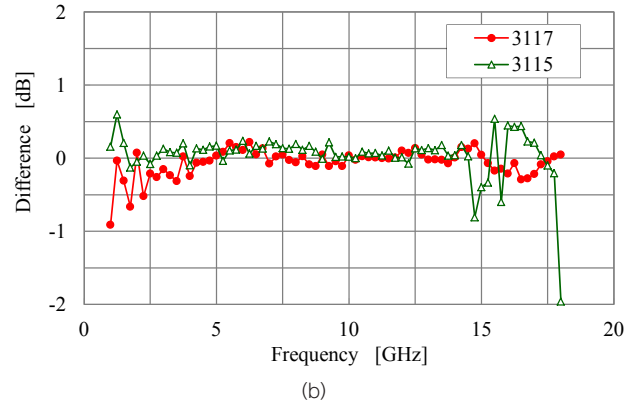
5.2 外挿法を用いた 3 アンテナ法による校正

外挿法を用いた 3 アンテナ法は、DRGA 3117 を 3 個及び DRGA 3115 を 3 個の組合せで行った。

図 12 に示すのは、周波数 1 GHz、6 GHz 及び 18 GHz における測定結果であり、横軸は $(a^2/\lambda)/d$ 、縦軸は $|S_{21}(d) \cdot d|^2$ である。得られた結果を用いて A_0



(a)



(b)

図 13 外挿法を用いた三アンテナ法による校正結果
(a) 動作利得、(b) 大型 6 面電波暗室における校正結果との差異

を求め、3個のアンテナの動作利得を求めた結果のうちアンテナ #1 の動作利得を図 13 に示す。図 13(a) の●印(赤色)及び△印(緑色)で示しているのが外挿法を用いた場合、実線は、大型 6 面電波暗室で、開口面間の距離を $d=15.1$ m として、式 (11) を用いて校正を行った結果である。大型 6 面電波暗室で校正を行った結果との差異を図 13(b) に示す。DRGA 3117 では $-0.5 \sim +0.5$ dB 以内で、DRGA 3115 では 18 GHz を除く周波数で $-0.8 \sim +0.6$ dB 以内で一致する結果が得られた。特に、周波数 1~6 GHz では、DRGA 3117 の場合 $-0.5 \sim +0.4$ dB 以内、DRGA 3115 の場合 $-0.2 \sim +0.6$ dB 以内で一致した。18 GHz で差異が大きくなった理由は、図 12(c) を見ると分かるように、1 GHz、6 GHz のときと比べて、18 GHz では掃引距離が足りないために、外挿がうまくいかず A_0 が小さく推定されてしまったためと思われる。

6 不確かさに関する考察

校正結果に付随する不確かさは、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。その値の大きさは、いくつかの要因によって生じる不確かさを、式 (22), (23) を用いて合成することにより推定できる [18]。ただし感度係数の大きさは、すべて 1 なので省略して記してある。また周波数の不確かさは、他の不確かさ要因に比べて極めて小さいことが分かっているので省略してある。

まず、外挿法を用いた置換法の不確かさは、各要因を、以下の式で合成して求める。

$$u(G_w^{\text{dB}}(\text{AUC})) = \sqrt{u(G_w^{\text{dB}}(\text{STD}))^2 + u(A_0^{\text{dB}}(\text{AUC}))^2 - u(A_0^{\text{dB}}(\text{STD}))^2} \quad (22)$$

ただし、

$u(G_w^{\text{dB}}(\text{AUC}))$: AUC の G_w の不確かさ

$u(G_w^{\text{dB}}(\text{STD}))$: STD の G_w の不確かさ

$u(A_0^{\text{dB}}(\text{AUC}))$: AUC と送信アンテナの A_0 の不確かさ

$u(A_0^{\text{dB}}(\text{STD}))$: STD と送信アンテナの A_0 の不確かさ

である。

一方、外挿法を用いた 3 アンテナ法による G_w の不確かさについては、各要因を、以下の式で合成して求める。これは、アンテナ #1~アンテナ #3 に対して共通である。

$$u(G_w^{\text{dB}}) = \frac{1}{2} \sqrt{u(A_0^{\text{dB}}(2,1))^2 + u(A_0^{\text{dB}}(3,1))^2 + u(A_0^{\text{dB}}(3,2))^2} \quad (23)$$

ただし、

$u(A_0^{\text{dB}}(j,i))$: アンテナ # i とアンテナ # j の A_0 の不確かさ

なお、式 (22), (23) で求められる不確かさは、標準不確かさであるため、通常は包含係数 $k=2$ を乗じて、信頼の水準約 95% の拡張不確かさにして表示する。

置換法、3 アンテナ法いずれの場合も、推定値 A_0 の不確かさが、動作利得の不確かさとして伝播する。 A_0 の不確かさ要因としては、アンテナ間距離を大きくして行う置換法や 3 アンテナ法でも同じように不確かさの要因となる項目として、VNA の性能や周囲からの不要な反射波による影響、アンテナ設置位置のずれによる影響、繰り返し性、再現性がある。この他、外挿法を用いたことによって新たに生じる不確かさを考慮する必要がある。具体的には、アンテナを移動させることによる位置ずれやケーブルの曲げ延ばしによる影響、さらには最小自乗法を用いて回帰曲線を求める A_0 を決定するために生じる不確かさは、通常の置換法や 3 アンテナ法にはない新たに考慮しなければならない項目である。 A_0 の決定に際しては、外挿に用いた多項式の次数の違いによる不確かさや、回帰曲線を求めるために使った測定点の数やアンテナ掃引距離によって生じてしまう違いも、不確かさの要因として考えなければならない。

したがって、もし外挿法を用いたことによって発生する不確かさよりも、送受信アンテナ間距離が十分大きいと見なして校正した場合に生じる不確かさの方が小さいことが明らかな場合には、外挿法を用いるメリットは無くなってしまう。例えば、置換法において STD と AUC が同一形状のアンテナの場合には、外挿法を用いるメリットは少ない。

7 おわりに

周波数 1 GHz 超の EMI 測定で用いる 2 種類の DRGA の動作利得を校正する方法について検討した。外挿法を適用した置換法及び 3 アンテナ法を用いれば、DRGA は、小型の 5 面電波暗室内で、床面が金属のままであっても校正が可能であることを実証した。

外挿法は、大きな測定サイトが無くても校正できたり、送受信アンテナのどの位置からどの位置までの距離をアンテナ間と距離するかという問題を解消できたりする優れた手法であるが、アンテナを掃引し距離特性を測定する外挿法によって生じる不確かさが大きい場合には、むしろ外挿法を用いずに校正した方が良い場合もある。今後、測定データを外挿することによって生じる不確かさを定量的に評価し、大きな電波暗室を使わなくとも DRGA を校正できる方法として提案

2 較正技術の研究開発

していく。また、LPDA 等、他のアンテナへの適用についての検討を行う予定である。

謝辞

本研究成果の一部は、総務省からの受託研究「電波資源拡大のための研究開発」の成果である。

【参考文献】

- 1 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-3: Methods of measurement of disturbances and immunity -Radiated disturbance measurements, CISPR 16-2-3, Edition 3.0, 2010.
- 2 VCCI 協会, VCCI 規定集 付則 1 技術基準, V-3/2015.04, Apr. 2015
- 3 L. H. Hemming and R. A. Heaton, "Antenna Gain Calibration on a Ground Reflection Range," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-21, no.4, pp.532-538, July. 1972.
- 4 K. Fujii, Y. Yamanaka, and A. Sugiura, "Antenna Calibration Using the 3-Antenna Method with the In-Phase Synthetic Method," IEICE Trans. on Commun. vol.E93-B, no.8, pp.2158-2164, Aug. 2010.
- 5 T. S. Chu and R. A. Sempak, "Gain of Electromagnetic Horns," Bell Syst. Tech. J. vol.44, pp.527-537, Mar. 1965.
- 6 藤井 勝巳, 石上 忍, 岩崎 俊, "モーメント法を用いた近傍界 3 アンテナ法によるダイポールアンテナの複素アンテナ係数の推定," 信学論 B-II, vol.J79-B-2, no.11, pp.754-763, Nov. 1996.
- 7 K. Harima, "Determination of gain of double-ridged guide horn antenna by considering phase center," IEICE Electronics Express, vol.7, no.2, pp.86-91, Jan. 2010.
- 8 K. Harima, "Accurate gain determination of LPDA by considering the phase center," IEICE Electron. Express, vol.7, no.23, pp.1760-1765, Dec. 2010.
- 9 K. Harima, "Numerical Simulation of Far-Field Gain Determination at Reduced Distances Using Phase Center," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no.10, pp.2001-2010, Oct. 2014.
- 10 A. C. Newell, R. C. Baird, P. F. Wacker, "Accurate Measurement of Antenna Gain and Polarization at Reduced Distances by an Extrapolation Technique," IEEE Trans. on Antennas and Propagations, AP-21, no.4, pp.418-431, Jul. 1973.
- 11 アンテナ工学ハンドブック (第 2 版), 電子情報通信学会編, オーム社, Jul. 2009.
- 12 E.B. Larsen, R. L. Ehret D. G. Camell, and G. H. Koepke, "Calibration of Antenna Factor at a Ground Screen Field Site using an Automatic Network Analyzer," IEEE 1989 National Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp.19-24, (Denver), May 1989.
- 13 S. Kaketa, K. Fujii, A. Sugiura, Y. Matsumoto, and Y. Yamanaka, "A Novel method for EMI antenna calibration on a metal ground plane," IEEE International Symposium on EMC, MO-A-P1.8, (Istanbul), May 2003.
- 14 坂齊 誠, 増沢 博司, 藤井 勝巳, 鈴木 晃, 小池 国正, 山中 幸雄, "1~18GHz 帯ホーンアンテナ較正における測定の不確かさの評価," 情報通信研究機構季報, vol.52, no.1, pp.23-33, Mar. 2006.
- 15 坂元 慶行, 石黒 真木夫, 北川 源四郎: 情報量統計学, 共立出版, Jan. 1983
- 16 飴谷 充隆, 廣瀬 雅信, 黒川 悟, "3 アンテナ外挿法を用いた V バンド標準ゲインホーンアンテナ校正システムの不確かさ評価," 信学技報, ACT2010-09, pp.7-12, Dec. 2010.
- 17 R. E. Borland, "The optimum range of separations for antenna gain measurement by extrapolation," NPL Report DES 98, Sept. 1990.
- 18 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, 1996.



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
無線用測定器の較正



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
無線用測定器の較正



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
無線用測定器の較正、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
無線用測定器の較正