

2-5-3 ホーンアンテナの較正

西山 巖 酒井孝次郎 杉山 功 瀬端好一 藤井勝巳

NICT で実施しているアンテナ較正業務のうち、周波数 1～18 GHz で用いる標準ホーンアンテナのアンテナ利得の較正法について述べる。較正方法は3アンテナ法を採用しており、その概要と、これまでに実施してきた較正結果について記載する。また、3アンテナ法による較正の不確かさの詳細についても記述する。

1 はじめに

NICT では電波法第二十四条の二の定めに従い、無線設備点検用測定器の較正業務を実施している。電波法に規定された測定器は周波数計、スペクトル分析器、電界強度測定器、高周波電力計、電圧電流計及び標準信号発生器の6種で、アンテナに関する直接の規定はないが、電界強度測定器の較正を行うには正しい電界が必要であり、アンテナの較正が不可欠である。NICT で較正を行っている主なアンテナは、9 kHz～30 MHz のループアンテナ、30～1,000 MHz のダイポールアンテナ、1～40 GHz のホーンアンテナであり、本稿では1～18 GHz のホーンアンテナの較正について述べる。ホーンアンテナの較正は、平成5年から1～5 GHz の角錐型標準ホーンアンテナを対象として業務を開始し [1]、平成10年からはその周波数の範囲を18 GHz まで拡大するとともに、不確かさについても詳細な解析が行われている [2]。さらに、平成21年からは、40 GHz まで較正範囲を拡張した。ここでは現在実施しているホーンアンテナ較正のうち、18 GHz までの較正について概要を述べ、現較正システムにおける不確かさの詳細を報告する。

2 較正原理

アンテナの較正方法としては、①標準アンテナと被較正アンテナを置換して較正值を求める参照法、②被較正アンテナの位置の電界強度を送信レベルから決定して較正值を求める標準電界法、③3つのアンテナの組合せから各々のアンテナ利得を決定する3アンテナ法、等が一般に用いられている。このうち3アンテナ法は3つのアンテナが送受信に使用できるものであればどのようなアンテナでも較正できる利点があり、自由空間と見なすことができる電波暗室が使用できれば、比較的簡単に十分な精度が得られるため、ホーンアン

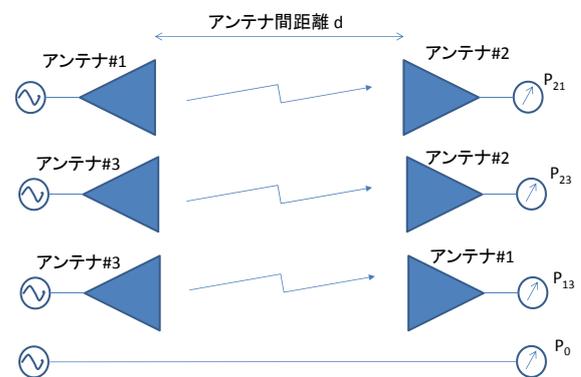


図1 3アンテナ法の概略

テナの較正に採用している。

3アンテナ法はフリスの伝達公式 [3] に基づく手法である。図1のように距離 d だけ離れた2つのアンテナを組合せて測定を行うとき、アンテナの組合せが #1, #2 の場合の受信電力を P_{21} 、アンテナの組合せが #3, #2 の場合の受信電力を P_{23} 、アンテナの組合せが #3, #1 の場合の受信電力を P_{13} 、アンテナを介さず送受を直接接続したときの受信電力を P_0 とし、伝送経路の整合がとれていれば、各アンテナの利得 G_1 , G_2 , G_3 は次のとおり求められる。

$$G_1 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{21}P_{13}}{P_{23}P_0}} \quad (1)$$

$$G_2 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{21}P_{23}}{P_{13}P_0}} \quad (2)$$

$$G_3 = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{13}P_{23}}{P_{21}P_0}} \quad (3)$$

ただし、 λ は使用する信号の波長であり、また、アンテナ間距離 d は3つのアンテナの組合せにおいて同一で、アンテナの位相中心間の距離である時、より正確なアンテナ利得が求められる。

一般に、アンテナ利得はデシベル値が使用され、受信電力の測定もデシベル値で行うので、例えば、アン

2 較正技術の研究開発

テナ #1 のアンテナ利得 G_1^{dB} は次のようになる。単位は dBi である。

$$G_1^{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + \frac{1}{2} (P_{21}^{dB} + P_{13}^{dB} - P_{23}^{dB} - P_0^{dB}) \quad (4)$$

3 較正システム

較正システムのブロックを図2に示す。較正に使用する大型電波暗室は、シールド面の内寸で奥行き

28.5 m、幅 17.0 m、高さ 11.7 m の広さがある。アンテナは発泡ポリブロックの上にベークライト製のアンテナ固定台を置き、その上に設置している。アンテナ固定台は高さ、方位角、仰角の微調機能を有しており、アンテナを対向させて設置する時の調整が容易にできるようになっている。また、1～18 GHz をカバーする角錐型標準ホーンアンテナは8バンド(バンド #1～8)に分かれているが、どのバンドのアンテナを使用する場合でもアンテナの開口面が同一位置になるよ

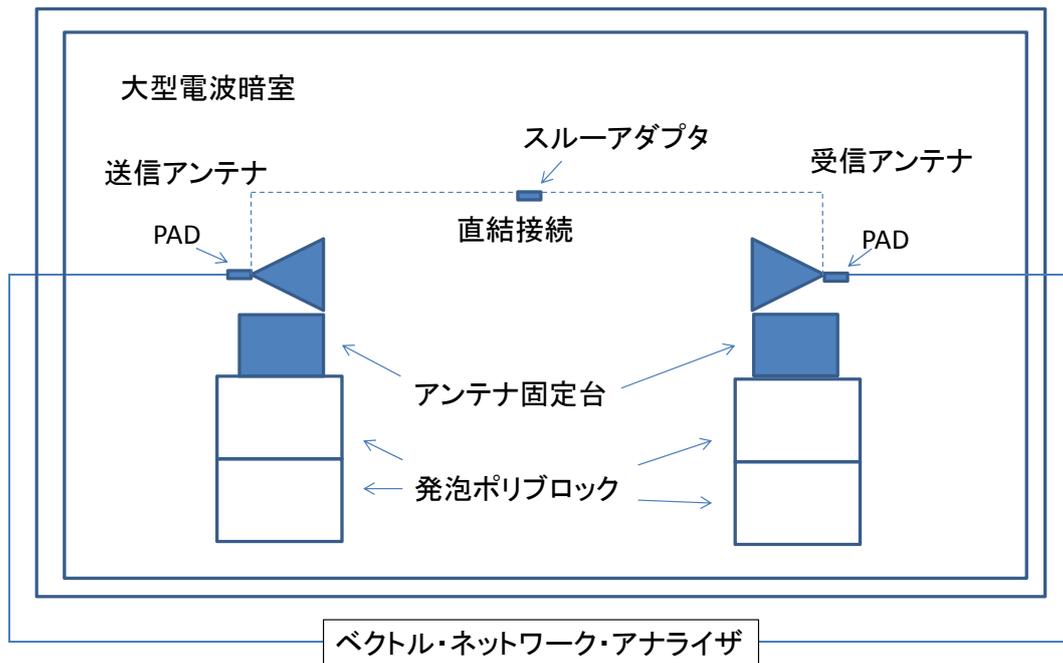


図2 測定システムブロック図

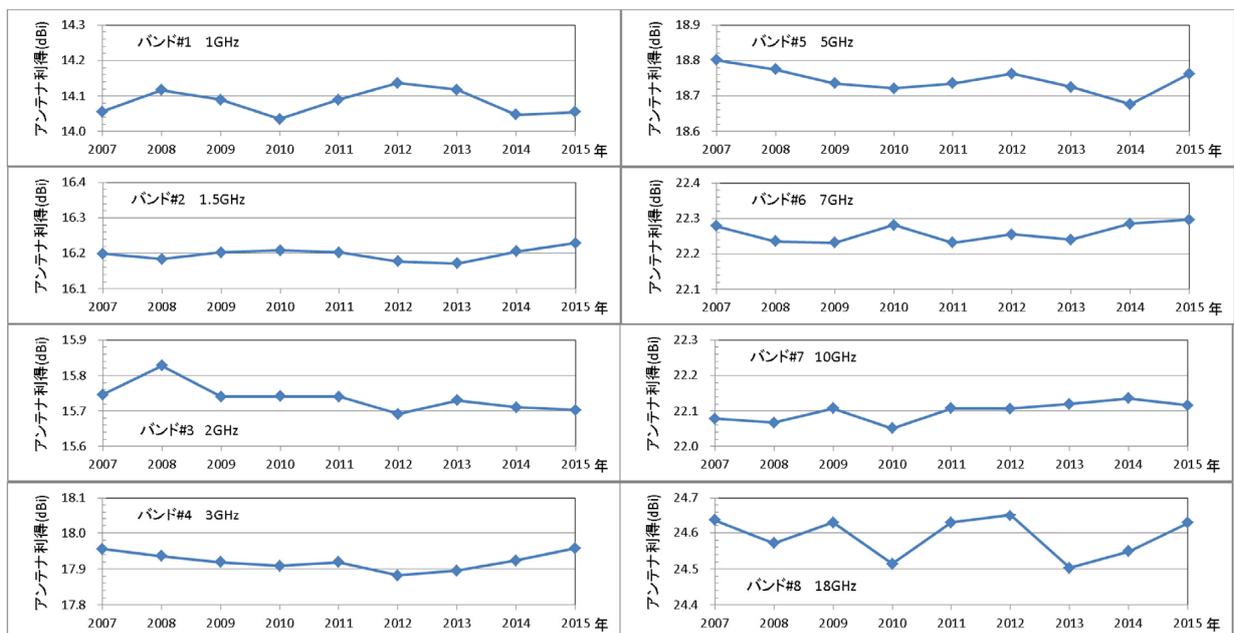


図3 較正結果の推移

うに工夫されている。送受信系にはベクトル・ネットワーク・アナライザを用いており、ここから低損失の同軸ケーブルでアンテナに接続する。アンテナ側のケーブル端には6 dB 固定減衰器を接続し、不整合による多重反射の影響を低減するよう留意している。

4 較正結果

ホーンアンテナのアンテナ利得較正結果の例として、毎年較正を実施したものの推移を図3に示す。図で、横軸は測定した年を、縦軸は較正結果であるアンテナ利得 (dBi) を示しており、各バンドにおける代表周波数を例として示している。最も変動幅の大きい18 GHz でもその最大偏差は0.15 dBであった。また、図4は3年分(2013～2015年)のバンド #8 (12～18 GHz) の較正結果であり、どの周波数においても、変動幅は0.1 dB 以内に収まっている。

5 不確かさ

較正值は式(4)で求めるため、標準不確かさ U は、アンテナ間距離の不確かさ U_d 、受信電力測定の不確かさ U_R 、直結電力測定の不確かさ U_{R0} の合成として次式で求められる。

$$U(\text{dB}) = \sqrt{\{u_d(\text{dB})\}^2 + \frac{3}{2}\{u_R(\text{dB})\}^2 + \frac{1}{2}\{u_{R0}(\text{dB})\}^2} \quad (5)$$

なお、受信電力測定の不確かさについては測定の最悪値で計算し、各アンテナの組合せごとの不確かさは求めている。また、(4)式には波長 λ が含まれているが、使用するベクトル・ネットワーク・アナライザ(アジレント・テクノロジー社 E8362B) の周波数安定度は ± 1 ppm で、他の不確かさ要因と比較して十分小さいので、波長の不確かさについては無視している。以下、各不確かさの要因について検討する。

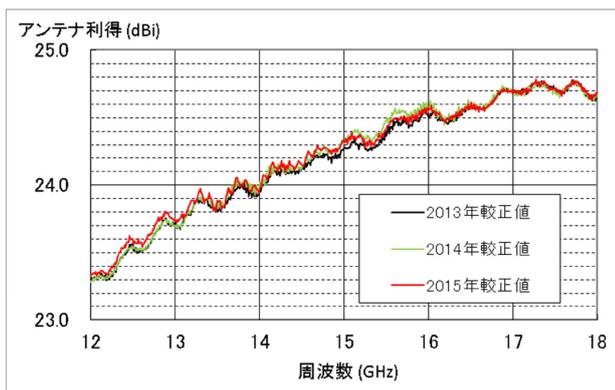


図4 バンド #8 較正データ

5.1 アンテナ間距離の不確かさ U_d

アンテナ間距離の不確かさの要因としては、距離測定の不確かさとアンテナ位相中心の不確かさの2つを検討する。

(1) アンテナ間距離測定の不確かさ u_{d1}

アンテナ間距離は、アンテナ設置後に、レーザー距離計を用いて実測しており、その測定精度は1 cm 以下である。不確かさ u_{d1} は次式で計算され、測定時のアンテナ間距離 d は約15 m で実施しているので、不確かさは0.003 dB であり、矩形分布となる。

$$u_{d1}(\text{dB}) = \left| 10 \log_{10} \left(1 - \frac{\Delta d}{d} \right) \right| \quad (6)$$

なお、アンテナの組合せごとの距離の変動は1 mm 以下で、測定精度より十分小さいので無視している。

(2) アンテナの位相中心の不確かさ u_{d2}

ホーンアンテナの位相中心は、遠方界で点波源と見なせる点であり、3アンテナ法のアンテナ間距離をアンテナ位相中心間の距離とすることで正確な利得較正が可能となる。しかし、アンテナの位相中心の推定には多くの労力を要し、業務として実施するのは難しい。そこで、較正業務においては図5のように、ホーンの角錐部の物理的な長さ L の中間点に位相中心があるものと見なし、アンテナ間距離を決定している。実際の位相中心の位置は、開口面から最奥部分まで可能性があるため、アンテナ間距離は $d-L$ から $d+L$ の範囲の不確かさを持つこととなる。これによる不確かさは式(6)で $\Delta d=L$ として計算され、バンドごとのアンテナのサイズから、0.08～0.13 dB と求められ、これも矩形分布である。

5.2 受信電力測定の不確かさ U_R

受信電力測定の不確かさの要因としては、大きく分けて、測定系に起因する不確かさ、アンテナ設置に起因する不確かさ、測定に起因する不確かさの3つに分類される。



図5 位相中心とアンテナ間距離

5.2.1 測定系に起因する不確かさ

測定系による不確かさとして、ケーブルの曲げによる不確かさ、測定器の安定性に起因する不確かさ、測定器の非直線性の不確かさ、測定器の表示分解能の不確かさについて検討した。確率分布は各要因共に矩形分布であり、除数 $\sqrt{3}$ で標準不確かさが求められる。

(1) 同軸ケーブルの曲げによる不確かさ u_{R1}

ケーブルは十分に余裕をもって引き直しを行っているが、ホーンアンテナに接続する部分ではケーブルの曲げは避けられない。この影響を確認するために、実際にケーブルの曲げ伸ばしで生じるレベル変動を観測した。結果としては最も周波数の高いところでも 0.03 dB 以下であった。

(2) 測定器の安定性による不確かさ u_{R2}, u_{R3}

測定に用いているベクトルネットワークアナライザは、測定前に十分予熱を行う等留意しているが、時間変動及び周囲温度変動により若干のレベル変動が生じる。実際に測定器の安定性を確認したところ、時間変動は 0.05 dB 以下であり、空調環境下で使用するため温度変化による安定性は 0.03 dB 以下であった。

(3) 測定器の非直線性による不確かさ u_{R4}

測定器の非直線性は国家標準にトレーサブルな減衰器を用いて確認したところ、0.05 dB 以下であった。

(4) 測定器の表示分解能による不確かさ u_{R5}

測定器の読み取り桁は 0.01 dB であり、この 1/2 桁の 0.005 dB を不確かさに見込む。

5.2.2 アンテナ設置に起因する不確かさ

アンテナ設置に起因する不確かさの項目として、遠方界条件の不確かさ、軸合せによる不確かさを検討した。軸合せの不確かさとしてはさらに、水平方向、垂直方向、方位角方向、仰角方向及び偏波角の各々で検討した。確率分布は各要因共に矩形分布であり、除数 $\sqrt{3}$ で標準不確かさが求められる。

(1) 遠方界条件の不確かさ u_{R6}

アンテナ間距離が有限の場合、被較正アンテナの開口面上に到来する波面の振幅分布が一様でないと測定誤差を生じるので、これを遠方界条件の不確かさとして検討する。使用する電波の波長 λ と、アンテナ開口面の最大寸法 D (角錐ホーンでは開口面の対角線の長さ)とすると、誤差が 0.05 dB 以下となる開口面間のアンテナ間距離 R は

$$R \geq \frac{2(D+D)^2}{\lambda} \tag{7}$$

として求められる。測定時のアンテナ間距離で、この条件を満足するのはバンド #1、#3、#5 のみである。この遠方界条件の影響による不確かさの概算値は次式で求められる [4]。

$$u_{R6}(dB) = 12.8 \cdot \left\{ \frac{(D+D)^2}{8R\lambda} \right\} \tag{8}$$

(2) アンテナの軸合せによる不確かさ $u_{R7}, u_{R8}, u_{R9}, u_{R10}, u_{R11}$

測定時のアンテナの軸合せは、対向するアンテナの中間点にレーザー発生器を置き、レーザー光の示す垂直面及び水平面とアンテナ固定台の中心線が一致するよう設置している。アンテナ固定台にはバンドごとのアンテナのサイズに合わせてスリットが開けられており、ここにアンテナに固定されているベーク板を差し込むことでアンテナが固定される。経験的に軸合せの誤差は殆ど生じていないが、上下左右方向に 1 cm、方位角・仰角・偏波角では 1° の誤差を見積った。これを別途測定したアンテナパターンに基づいて信号強度に換算し、不確かさの入力値とした。

5.2.3 測定に起因する不確かさ

測定に起因する不確かさとして、信号対雑音比による不確かさ、電波暗室内の周囲からの反射による不確かさ、不整合による不確かさ、測定時のバラツキの各項目について検討した。

(1) 信号対雑音比 (S/N) による不確かさ u_{R12}

S/N は高い周波数帯で悪化する傾向となるが、最も高い 18 GHz においても約 50 dB が確保できている。不確かさは次式で計算され、正規分布であるとして見積もった。

$$u_{R12}(dB) = \left| 20 \log_{10} \left\{ 1 - 10^{\left(\frac{-SN}{20} \right)} \right\} \right| \tag{9}$$

(2) 電波暗室内の周囲からの反射による不確かさ u_{R13}

3 アンテナ法は、本来自由空間における直接波のみを考えており、周囲からの反射波が存在すると誤差を生じることとなる。この影響を確認するため、アンテナ間距離を変えて定在波の様子を観測したところ、最も高い周波数のバンド #8 での影響が最も大きかったが、その量は 0.09 dB であった。

(3) 不整合による不確かさ u_{R14}

不整合による不確かさでは、図 6 のとおり各アンテ

ナの反射係数 Γ_{Ai} 、送信ケーブル端における反射係数 Γ_T 、受信ケーブル端における反射係数 Γ_R 等を実測し、次式にて計算した [5]。

$$u_{R14}(dB) \approx 8.686 \cdot \sqrt{\frac{|\Gamma_T|^2 (|S_{D11}|^2 + |\Gamma_{Ai}|^2)}{|\Gamma_R|^2 (|S_{D22}|^2 + |\Gamma_{Aj}|^2) + |\Gamma_T|^2 |\Gamma_R|^2}} \quad (10)$$

ただし S_{D11} 、 S_{D22} ：スルーアダプタの S パラメータ S_{11} 、 S_{22} であり、各バンドの最悪値により不確かさとしている。不整合による不確かさの確率分布は U 分布であり、除数は $\sqrt{2}$ である。

(4) 測定のばらつきによる不確かさ u_{R15}

通常、測定は 3 回行っており、この実験標準偏差から、ばらつきを評価した。平均値の標準偏差は、実験標準偏差を測定回数の平方根 ($\sqrt{3}$) で割ることで決定した。

5.3 直結電力測定の不確かさ U_{R0}

5.2.1 項で述べた測定系の不確かさにスルーアダプタによる減衰量の不確かさを合成して、直結電力測定の不確かさとした。スルーアダプタの減衰量はネットワーク・アナライザによる実測から 1 ~ 18 GHz で 0.1 dB 以下と確認できたので、不確かさとしては 0.1 dB の矩形分布とした。

5.4 不確かさバジェット

表 1 に不確かさバジェットを示す。S/N、不整合及びバラツキについては、各バンドにおける最悪値を用いている。最終的に得られた拡張不確かさは、バンド #1 で 0.3 dB、バンド #8 で 0.8 dB であった。周波数が増えるに従い不確かさも大きくなる傾向がみられ、バンド #7、#8 で不確かさを大きくしている最大の要因は、バジェット表からも明らかのように、不整合の

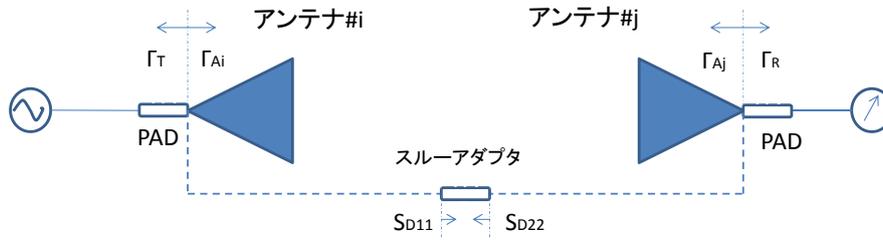


図 6 不整合の測定点

表 1 3 アンテナ法によるホーンアンテナ較正の不確かさバジェット

不確かさ要因	確率分布	不確かさ(dB)							
		Band#1	Band#2	Band#3	Band#4	Band#5	Band#6	Band#7	Band#8
アンテナ間距離の不確かさ u_i (合成)		0.072	0.066	0.043	0.057	0.039	0.070	0.048	0.051
(1)アンテナ間距離測定の不確かさ u_{i1}	矩形	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
(2)アンテナ位相中心の不確かさ u_{i2}	矩形	0.125	0.115	0.075	0.099	0.068	0.121	0.083	0.089
受信電力測定の不確かさ u_r (合成)		0.075	0.109	0.106	0.102	0.104	0.169	0.283	0.301
(1)同軸ケーブルの曲げによる不確かさ u_{r1}	矩形	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.025
(2)測定器の時間変動による不確かさ u_{r2}	矩形	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
(3)測定器の温度変動による不確かさ u_{r3}	矩形	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
(4)受信機の非直線性による不確かさ u_{r4}	矩形	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.050	0.050	0.050
(5)受信機表示分解能による不確かさ u_{r5}	矩形	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
(6)遠方界条件による不確かさ u_{r6}	矩形	0.045	0.106	0.049	0.067	0.031	0.181	0.092	0.080
(7)アンテナ軸合せ 水平方向 (± 1 cm) u_{r7}	矩形	0.020	0.020	0.020	0.020	0.030	0.040	0.040	0.083
(8)アンテナ軸合せ 垂直方向 (± 1 cm) u_{r8}	矩形	0.040	0.040	0.040	0.040	0.080	0.050	0.070	0.030
(9)アンテナ軸合せ 方位角方向 ($\pm 1^\circ$) u_{r9}	矩形	0.010	0.020	0.020	0.030	0.030	0.090	0.120	0.180
(10)アンテナ軸合せ 仰角方向 ($\pm 1^\circ$) u_{r10}	矩形	0.010	0.010	0.020	0.020	0.030	0.060	0.060	0.150
(11)アンテナ軸合せ 偏波角 ($\pm 1^\circ$) u_{r11}	矩形	0.010	0.020	0.010	0.030	0.020	0.030	0.050	0.020
(12)信号対雑音比(S/N)による不確かさ u_{r12}	正規	0.002	0.002	0.004	0.006	0.009	0.008	0.030	0.028
(13)電波暗室内周囲の反射による不確かさ u_{r13}	矩形	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.050	0.050	0.090
(14)不整合による不確かさ u_{r14}	U	0.050	0.081	0.113	0.082	0.078	0.112	0.342	0.335
(15)測定のパラツキ u_{r15}	正規	0.043	0.067	0.049	0.071	0.075	0.092	0.137	0.131
直結電力測定の不確かさ U_{R0} (合成)		0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.073	0.073	0.074
(1)スルーアダプタの不確かさ u_{R01}	矩形	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
合成標準不確かさ dB		0.128	0.157	0.146	0.146	0.143	0.224	0.354	0.376
拡張不確かさ(k=2) dB		0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5	0.8	0.8

2 較正技術の研究開発

影響である。また、バンド #6 では、アンテナの位相中心及び遠方界条件のようにアンテナの形状に起因するものが不確かさを大きくしている。

6 おわりに

1～18 GHz 帯で実施している標準ホーンアンテナの較正について述べた。3 アンテナ法によるホーンアンテナ較正の拡張不確かさは、1 GHz 帯のバンド #1 で 0.3 dB、8～18 GHz のバンド #7、#8 で 0.8 dB となった(表 1)。これまで実施してきた較正結果を見ても、この不確かさと合致する安定した結果が得られている。なお、1～18 GHz のホーンアンテナの較正については、これまで実施してきた標準ホーンアンテナに加えて、ダブルリジッド・ガイドアンテナの較正も開始しており、将来的にはダブルリジッド・ガイドアンテナ中心に較正業務を行っていきたいと考えている。

【参考文献】

- 1 増沢 博司, 張間 勝茂, 森川 容雄, 手島 輝夫, "1～5 GHz 帯電界強度測定器較正システムの開発," 通信総合研究所季報, vol.39, no.2, pp.73-81, June 1993.
- 2 坂斎 誠, 増沢 博司, 藤井 勝巳, 鈴木 晃, 小池 国正, 山中 幸雄, "1～18 GHz 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, March 2006.
- 3 虫明 康人, "アンテナ・電波伝搬," 電子情報学会編, コロナ社, Feb. 1961.
- 4 アンテナ工学ハンドブック, 電子通信学会編, オーム社, p.440, Oct. 1980.
- 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.



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



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



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



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