

## 3-2 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

### 3-2 Evaluation of Uncertainty of Horn Antenna Calibration in the Frequency range from 1 GHz to 18 GHz

坂齊 誠 増沢博司 藤井勝巳 鈴木 晃 小池国正 山中幸雄  
 SAKASAI Makoto, MASUZAWA Hiroshi, FUJII Katsumi, SUZUKI Akira,  
 KOIKE Kunimasa, and YAMANAKA Yukio

#### 要旨

NICT では電波法に基づき高周波電力計等及びアンテナの較正を行っているが、今回 1GHz～18GHz 帯のホーンアンテナの三アンテナ法の較正における測定の不確かさを評価した。較正対象アンテナは、1GHz～18GHz 帯の角錐型標準ホーンアンテナである。これまでは、マイクロ波レシーバを主体としたアンテナ較正システムであったが、大きなダイナミックレンジが得られるネットワークアナライザを使用した較正システムに変更した。14 項目の誤差要因について不確かさの検討を行った結果、拡張不確かさ(包含係数  $k=2$ )は、1GHz～5.85GHz 帯で  $\pm 0.7\text{dB}$ 、5.85GHz～18GHz 帯は  $\pm 1.1\text{dB}$  であった。

NICT performs an EMI antenna calibration based on the Radio Law. Recently, the uncertainty of the EMI antenna measurement was evaluated with the three antenna method at frequency coverage from 1 to 18 GHz. The type of antenna under calibration is a pyramidal standard gain horn antenna. The main measurement device of the traditional antenna calibration system was a signal generator with a high-power amplifier and a microwave receiver. However, it was changed to a network analyzer providing a high dynamic range. The study about the error factor of 14 items revealed that the expanded uncertainty ( $k=2$ ) were  $\pm 0.7\text{dB}$  (1 to 5.85 GHz) and  $\pm 1.1\text{dB}$  (5.85 to 18 GHz).

#### [キーワード]

標準ホーンアンテナ, 較正, 不確かさ, アンテナ利得, 三アンテナ法, 不整合  
 Standard Horn antenna, Calibration, Uncertainty, Antenna gain,  
 Three-antenna method, Mismatch

## 1 はじめに

NICT では、電波法に基づき 9 kHz～30 MHz 帯のループアンテナ、30 MHz～1,000 MHz 帯のダイポールアンテナ及び 1 GHz～18 GHz 帯のホーンアンテナの較正を実施している。ホーンアンテナは平成 5 年に、三アンテナ法による 1 GHz～5 GHz 帯の較正システムを開発<sup>[1]</sup>し、較正を実施してきた。その後、平成 10 年には同様な手法で 5 GHz～18 GHz 帯を追加し、不確かさの評価も行ってきた。これまでの較正システムの測定系は、マイクロ波レシーバを主体としたアンテナ測定シ

ステムで、方向性結合器及び受信用ダウンコンバータを外付けする方法のため、長い同軸ケーブルの損失を補正できる利点がある一方、IF バンド幅が固定のため S/N の確保が難しく、ダイナミックレンジが狭いなどの欠点もあった。今回、測定系をネットワークアナライザに更新(測定スピードが速く、レシーバのダイナミックレンジが約 140 dB と、これまでと比べて約 50 dB ほど改善)した。現在 1 GHz～18 GHz 帯のホーンアンテナの較正は、アンテナ較正の標準となる標準ホーンアンテナ(角錐型)の較正を行っている。近年、国家間の相互承認などで不確かさの表示が不可欠と

なってきた。さらに、将来の ISO/IEC 17025 認定取得を目指し、ホーンアンテナの較正における測定の不確かさについて評価した。なお、1 GHz～18 GHz の広い周波数帯では低い周波数帯と高い周波数帯により不確かさの程度が異なるので、周波数帯を 1 GHz～5.85 GHz 帯と 5.85 GHz～18 GHz 帯に分け不確かさを評価した。ただし、今回の不確かさ評価は、被較正アンテナを標準ホーンアンテナに限定している。

## 2 較正システム

ホーンアンテナの較正は、NICT の 6 面大型電波暗室 (内径寸法 14 m (幅) × 18 m (奥行) × 6.4 m (高さ)) 内で、電波暗室の長辺の中央に送受信アンテナを約 14.6 m 離して (高さは床面より 3.5 m) 対向させ、三アンテナ法で三つのアンテナのゲインを同時に求めるものである。較正システムを図 1 に示す。送受信系には、広ダイナミックレンジのネットワークアナライザを使用している。信号の S/N を確保するため、低損失の同軸ケーブルを使用し、高調波及びレベル変動の原因となる増幅器は使用していない。アンテナは、発泡ポリスチロール製のブロック上にベークライト製のアンテナ調整用台 (角度、仰角、上下可変機能付) を置きその上面に設置する。

送受信アンテナの軸合わせは、送受信アンテナ間の中央にレーザ発生器を固定し、レーザのビー

ムによりアンテナ調整器の水平度、垂直度を求め設置位置を確定する。アンテナ調整用台は、アンテナの角度、仰角、上下方向の微調整ができる構造となっている。アンテナ間の同軸ケーブルは、電波の反射の影響を軽減するため、電波暗室内の壁面に沿ってアンテナ後方まで設置した。ネットワークアナライザは、電波暗室外の測定前室に GP-IB で PC と接続して設置し、三アンテナ法の測定ソフトにより短時間に効率的に較正を実施できるようにしてある。なお、較正されるアンテナに接続するケーブルの先端には、6 dB のパッドを接続し、送受信系のインピーダンス不整合誤差の軽減を図っている。較正システムに使用している標準ホーンアンテナは、1 GHz～18 GHz 帯を次の 8 バンドでカバーしている。

バンド 1 は 1 GHz～1.15 GHz、バンド 2 は 1.15 GHz～1.7 GHz、バンド 3 は 1.7 GHz～2.6 GHz、バンド 4 は 2.6 GHz～3.95 GHz、バンド 5 は 3.95 GHz～5.85 GHz、バンド 6 は 5.85 GHz～8.2 GHz、バンド 7 は 8.2 GHz～12.4 GHz、バンド 8 は 12.4 GHz～18 GHz である。

今回の不確かさの評価は、1 GHz～5.85 GHz (バンド 1～バンド 5 (以下、「バンド L」という。)) と 5.85 GHz～18 GHz (バンド 6～バンド 8 (以下、「バンド H」という。)) の二つの周波数帯に分類し不確かさの評価を行った。

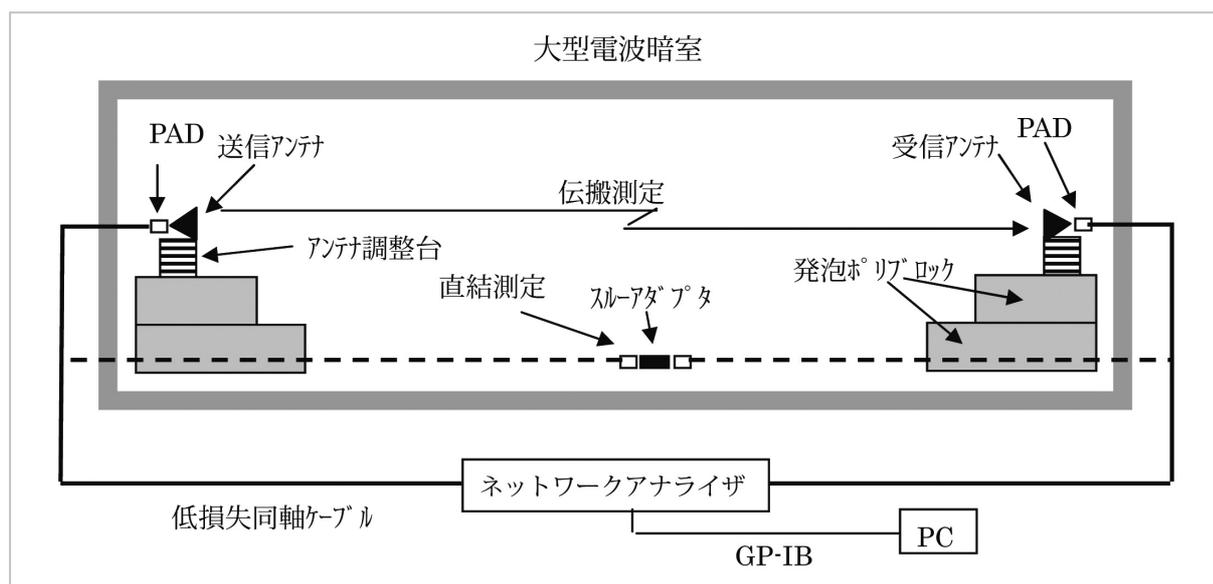


図1 較正システムのブロック図

### 3 較正原理及び測定方法

アンテナ較正には、(1)被較正アンテナと標準アンテナを置換する参照法、(2)被較正アンテナの位置の電界強度を決定する標準電界法、(3)三つのアンテナを組み合わせて較正する三アンテナ法がある。(1)、(2)はアンテナの指向性が同一でないと誤差が大きくなる欠点があるが、(3)は三つのアンテナが同一である必要がなく、送受信に使用できるアンテナであればどのようなアンテナの較正もできる利点がある。

三アンテナ法によるアンテナゲイン<sup>[2]</sup>の測定は、Friisの伝達公式<sup>[3]</sup>に基づく方法であり、送受信ケーブルを直結したときのレベル  $P_0$  と、アンテナを対向し三つのアンテナ(#1、#2、#3)の3種類の組合せにより電波を発射したときの受信レベル  $P_{ij}$  ( $i, j=1\sim 3, i \neq j$ ) を測定する。

今、受信アンテナに# $i$ 、送信アンテナに# $j$ を使用した時の受信電力を  $P_{ij}$  ( $i, j=1\sim 3, i \neq j$ ) とすると、#1、#2、#3のアンテナゲインは、次式で求められる。

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

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

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

ただし、 $d$  は送受信アンテナのアンテナ間距離であり、3組の測定において同一距離とする。較正結果の判定は、被較正アンテナではない NICT 所有の二つの標準ホーンアンテナの過去の較正結果と比較して妥当かどうか判断する。

### 4 測定の不確かさの要因

不確かさに関する ISO ガイド<sup>[4]</sup>によると、測定の不確かさの要因には、①測定量の定義、②環境条件、③読み取りの個人差、④機器の分解能又は識別限界、⑤定数やパラメータの不正確さ、⑥測定法や手順に組み入れた近似・仮定や⑦測定量の繰り返し観測に現れる差異など多くの要因があ

り、複雑に影響を及ぼし合っている。

本システムでは、電波暗室内で三アンテナ法により直結測定と伝搬測定を行いアンテナゲインを較正するので、三アンテナ法測定の誤差が不確かさの要因となる。この三アンテナ法の測定誤差の主な要因は、測定系に起因する誤差、アンテナの設置に起因する誤差、三アンテナ法の測定の誤差に分類できる。

#### 4.1.1 測定系に起因する誤差

測定系に起因する誤差としては、信号の S/N による誤差、同軸ケーブルの配置(曲げ)による誤差、測定系の安定度(測定値の時間的変動及び測定中の温度変化による変動)誤差、測定系の非直線性の誤差(レベル確度)等が考えられる。

#### 4.1.2 アンテナの設置に起因する誤差

アンテナの設置に起因する誤差としては、送受信アンテナを対向させたときのアンテナ間距離の誤差、アンテナ間距離における遠方界条件の誤差、伝搬損失測定のパラッキの誤差、アンテナの軸合わせの水平/垂直及び角度方向のズレによる誤差がある。

#### 4.1.3 三アンテナ法の測定における誤差

三アンテナ法測定における誤差としては、伝搬測定において電波暗室が完全な自由空間でないために壁面及び天井・床等からの反射による誤差や、被較正ホーンアンテナの放射中心の不確定による誤差、被較正アンテナ、同軸ケーブル、PAD、信号源及び受信機側の不整合に起因する誤差がある。

### 4.2 測定系に起因する誤差

#### 4.2.1 信号の S/N に起因する誤差

三アンテナ法は、送受信アンテナの同軸ケーブルを直結する直結測定と、アンテナを接続し電波を発射して行う伝搬測定があるが、伝搬測定は伝搬損失があるため直結測定に比較し 20~40 dB ほど受信レベルが低下する。また、周波数帯が高いほど同軸ケーブル損失も増すため更に受信レベルが低下する。S/N の測定は 8 バンドの全周波数帯で行った。その結果の一例を図 2 に示す。測定の結果、バンド L (1 GHz~5.85 GHz 帯) の S/N が 50.14 dB で S/N に起因する誤差  $L_a$  は 0.027 dB であり、バンド H (5.85 GHz~18 GHz 帯) の S/N が 37.9 dB で S/N に起因する誤差は

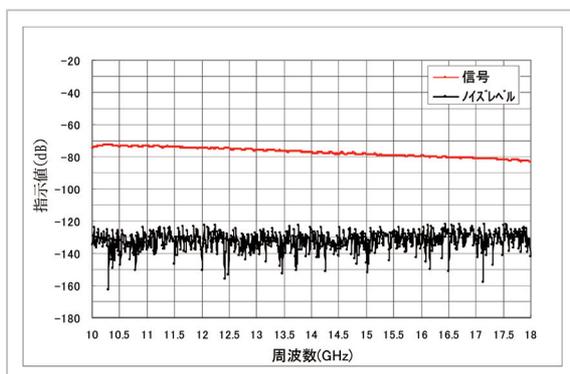


図2 信号のS/Nに起因する誤差(バンド8)

0.11 dBであった。

この  $L_a$  は、測定器固有のタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.2.2 同軸ケーブルの曲げによる誤差

同軸ケーブルは、電波暗室外の測定室にあるネットワークアナライザから電波暗室内の壁面に沿って対向したアンテナに接続する。ネットワークアナライザからアンテナまでの間は曲げが半径 50 cm 以上になるような配置にしているが、アンテナの同軸導波管変換器のコネクタから床に垂直にケーブルを下げるため、アンテナのコネクタ側で半径 10 cm 程度の曲げが生じる。このため、水平な位置で半径が 10 cm となるようにアンテナを配置しケーブルの曲げの影響を測定した。その結果の一例を図 3 に示すが、誤差  $L_b$  はバンド L では 0.01 dB 以内、バンド H では 0.025 dB 以内であった。この誤差は、受信レベルに直接影響を与えるが、式 (1) ~ (3) に示すとおり、受信電力に対し、アンテナのゲインは受信電力の平方根に比例するため、デシベル値で得られた誤差を 1/2 倍し、さらに三つのアンテナにも同様に生じるので

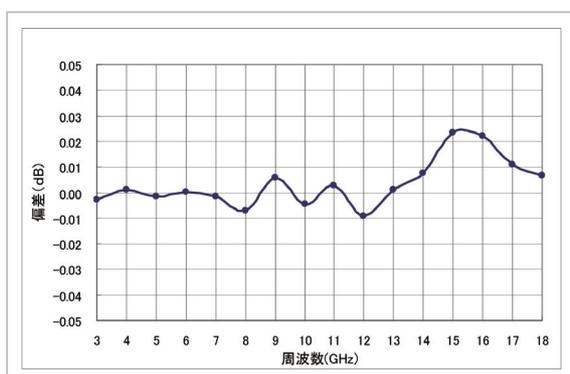


図3 同軸ケーブルの曲げによる誤差

3 倍して算出した。同軸ケーブルの曲げによる誤差は、タイプ A の誤差で正規分布として不確かさを算出する。

実際の測定時には、ケーブルの曲げが半径 10 cm 以下に曲げにならないように注意することが必要である。

#### 4.2.3 測定系の安定度に関する不確かさ

##### 4.2.3.1 測定系の時間的変動の誤差

三アンテナ法の測定は、直結測定及び三つのアンテナを交換して行う伝搬測定のため、測定所要時間は 15 分以内である。測定系の安定度の測定は、ネットワークアナライザに使用する同軸ケーブルと減衰量が 6 dB の PAD を 2 個接続し、送受信アンテナの代わりに、実際の伝搬損失に相当する固定減衰器を接続して行った。ネットワークアナライザは 5 時間の余熱後に 25 分間のレベル変化を測定した。その結果 0.02 dB 以内の変動であったが、安全を見越してバンド L 及びバンド H とも、測定系の時間的変動の誤差  $L_c$  を 0.05 dB とした。測定系の時間的変動の誤差は測定器固有の誤差であるため、タイプ B の誤差で矩形分布として不確かさを算出する。

##### 4.2.3.2 測定系の温度変動誤差

大型電波暗室及び測定室の空調を入れ 20℃ 付近に達した後の温度変化をレコーダ記録から読み取ると、三アンテナ法の測定所要時間の 15 分間の温度変化は 0.2℃ であった。測定系の温度変動は外気温の低い 12 月に行い、測定器を十分余熱した後直結測定の状態で大規模電波暗室及び測定室の空調を入れてからその温度上昇による指示値の変化を測定した。その結果、温度変化を  $\pm 1^\circ\text{C}$  と大きめに見積もっても温度変化の誤差  $L_d$  はバンド L 及びバンド H とも最大 0.03 dB であった。測定系の温度変動誤差は、測定器固有の誤差のタイプ B の誤差で矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.2.4 受信系の非直線性の誤差

受信系の非直線性の測定は、ネットワークアナライザのポート 1 (信号源) とポート 2 (受信側) 間に値が既知の標準減衰器を挿入しその減衰量を変えて行った。減衰量を 10 dB ずつ変化したときのネットワークアナライザの指示値と、標準減衰器の正確な減衰量の値により直線性を求める。使用した標準減衰器は、NMIJ (独立行政法人産業技術

総合研究所)で定期的に較正された仲介用減衰器である。受信系の非直線性の誤差  $L_e$  は、バンド L が 0.04 dB で、バンド H が 0.05 dB であった。受信系の非直線性の誤差はタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

### 4.3 アンテナの設置に起因する誤差

#### 4.3.1 アンテナ間距離設定の誤差

三アンテナ法によるアンテナゲインの測定では、式(1)～(3)から分かるように、アンテナ間距離  $d$  を正確に求めることが重要である。本システムでは、内径の奥行きが 18 m の大型電波暗室を使用しているが、アンテナ固定方法など操作性も考慮すると開口面間の最適な距離は約 14.6 m である。送受信アンテナ間の開口面間の距離の測定にはレーザー距離計を用いているので、アンテナ間距離は  $\pm 1$  cm 以内の精度で設定可能である。アンテナ間距離 14.6 m で  $\pm 1$  cm の設定誤差内で設定できれば、式(1)～(3)によりアンテナゲインの誤差  $L_f$  はバンド L 及びバンド H で共に  $\pm 0.003$  dB である。アンテナ間距離設定の誤差はタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.3.2 遠方界条件の誤差

測定距離が有限の場合、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。対向アンテナを点波源とし、供試アンテナの最大開口寸法を  $D$  とすれば、測定誤差を 0.05 dB 以下になるときのアンテナ間距離  $d$  は次式で表せる [5]。

$$d \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4)$$

対向するアンテナがホーンアンテナの場合は、供試アンテナの最大径を  $D_1$  及び  $D_2$  とすれば、アンテナ間距離は式(5)となる。

$$d \geq \frac{2(D_1 + D_2)^2}{\lambda} \quad (5)$$

バンド 1～バンド 8 までの標準ホーンアンテナの測定誤差を 0.05 dB 以下に抑えるためには、バンド L での必要最短アンテナ間距離は 14.3 m で、大型電波暗室での測定可能アンテナ間距離 14.6 m を満足している。このときの遠方界条件の誤差  $L_g$  は  $\pm 0.048$  dB である。一方、バンド H は、必要最短アンテナ間距離が 18.2 m であり、

大型暗室を用いた測定では十分なアンテナ間距離を確保できない。大型電波暗室の斜め方向にアンテナを設置すれば確保できるが、同軸ケーブルが長くなり S/N が低下する等の別の問題が生じる。このため遠方界条件を満たさないことによる誤差を不確かさに含めることにした。アンテナ間距離 14.6 m で測定したときの誤差  $L_g$  を算出すると 0.078 dB であった [5]。これはタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.3.3 測定のバラツキの誤差

三アンテナ法の測定では、三つのアンテナの組合せにより伝搬損を 3 回測定するため、これまでの経験上からも測定のバラツキの誤差は大きい値であった。測定のバラツキの評価は、大型電波暗室内で実際のアンテナ較正と同じ条件とし、バンド L とバンド H で周波数を掃引して伝搬損を 22 回測定し、その標準偏差を求めた。その結果の例を図 4 及び図 5 に示す。測定のバラツキは受信レベルに直接影響を与えるので、同軸の曲げによる不確かさと同様、デシベル値で得られた誤差を

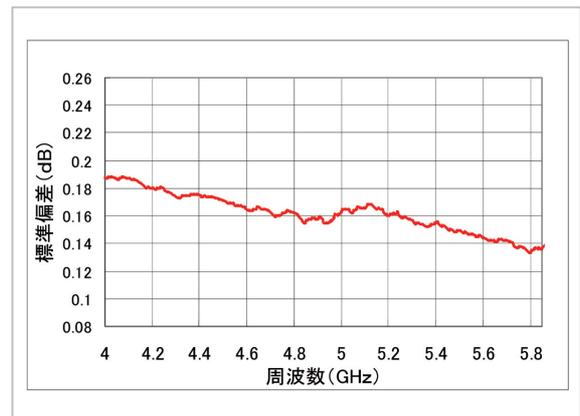


図4 測定のバラツキ(1～5バンド)



図5 測定のバラツキ(6～8バンド)

1/2 倍し、さらに三つのアンテナにも同様に生じるので 3 倍して算出した。その結果、バンド L が  $\pm 0.29$  dB、バンド H が  $\pm 0.42$  dB であった。

測定のバラツキはタイプ A の評価であり、正規分布として不確かさを算出する。

#### 4.3.4 軸合わせの誤差

##### 4.3.4.1 水平方向の設定誤差

アンテナの軸合わせは、電波暗室内で対向させたアンテナ間の中央にレーザー発生器を設置し、レーザー光がアンテナの開口面の底面につけたマークに合うようにアンテナ固定台の位置を合わせる。この発生器は水準器が内蔵されていて自動的に水平及び垂直を補正し X-Y 軸のレーザー光を発生する。水平方向の設定誤差の測定は、受信アンテナ位置を水平方向に 1 cm ずつ最大  $\pm 4$  cm 変化して受信レベルを測定した。その結果を図 6 に示す。アンテナの水平方向の軸の合わせは  $\pm 1$  cm 以内で設定可能である。アンテナが  $\pm 1$  cm 左右にずれたときの誤差はバンド L が 0.05 dB、バンド H が 0.17 dB であった。測定のバラツキは受信レベルに直接影響を与えるが、アンテナゲインは受信レベルの平方根に比例することから、軸合わせの誤差は、誤差(デシベル換算)を 1/2 倍し、3 回測定することを考慮し 3 倍とした。その結果、水平方向の軸の設定誤差  $L_i$  は、バンド L が  $\pm 0.027$  dB、バンド H が  $\pm 0.087$  dB であった。水平方向の設定誤差は、測定器固有の誤差のためタイプ B の評価であり、矩形分布として不確かさを算出する。

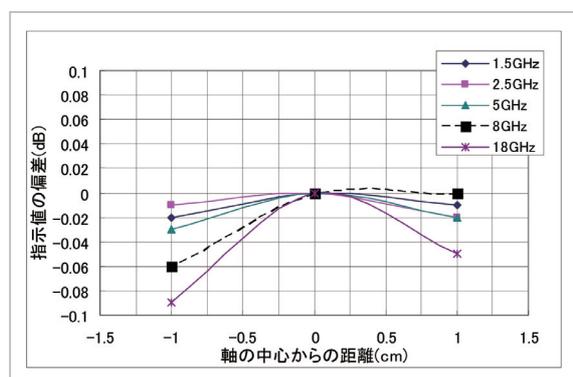


図6 アンテナの水平軸合わせ測定結果の一例

##### 4.3.4.2 垂直方向の設定誤差

垂直方向の設定誤差の測定では、レーザー発生器でアンテナの開口面に垂直方向にレーザービームを

照射し、受信アンテナ高を中心から 1 cm ずつ最大  $\pm 4$  cm 上下に変化して受信レベルを読み取った。その結果を図 7 に示す。アンテナの垂直方向の軸の設定は  $\pm 1$  cm の範囲で十分設定可能であるため、 $\pm 1$  cm だけアンテナがずれたときの誤差を求めると、バンド L が  $\pm 0.09$  dB、バンド H が 0.24 dB であった。水平軸合わせの誤差と同様に誤差(デシベル換算)を 3/2 倍した。その結果、垂直方向の軸の設定誤差  $L_j$  は、バンド L が  $\pm 0.09$  dB、バンド H が  $\pm 0.24$  dB であった。垂直方向の設定誤差はタイプ B の評価であり、矩形分布として不確かさを算出する。

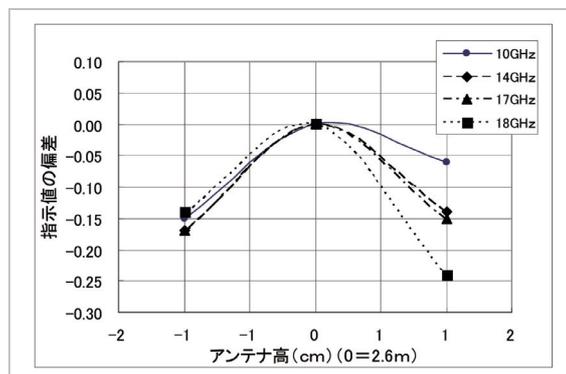


図7 アンテナの軸合わせ測定結果の一例

##### 4.3.4.3 角度方向の設定誤差

アンテナの軸はレーザー発生器のビームにより送受信ホーンアンテナの外形が中心となるようにアンテナ設置台を固定する。その際各アンテナは専用のスリットに差込み固定するため、角度方向設定は  $\pm 1^\circ$  以内で可能である。この角度方向のずれの評価は先にアンテナの指向特性を測定しその特性から正対した時 ( $0^\circ$ ) と、 $\pm 1^\circ \sim 3^\circ$  のときのレベル差で求めた。その結果バンド L で  $\pm 0.04$  dB、バンド H で  $\pm 0.24$  dB であった。角度方向の設定誤差も受信レベルに直接影響を与えるので、誤差(デシベル値)を 3/2 倍した結果、角度方向の軸の設定誤差  $L_k$  は、バンド L が  $\pm 0.02$  dB、バンド H で  $\pm 0.12$  dB であった。角度方向の設定誤差はタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.4 三アンテナ法測定の誤差

##### 4.4.1 電波暗室内の周囲反射の誤差

自由空間での三アンテナ法は、送信アンテナか

ら放射された電波が受信アンテナに到達する直接波のみを対象としているため、それ以外の電波暗室内の床・天井・壁面・アンテナ設置台等からの反射波が直接波と重畳し定在波となり誤差が生じる。この反射の影響を測定するため、対向させた受信アンテナタワーを約 50 cm 変化して受信レベルを測定した。図 8 に 18 GHz 測定結果を示す。その結果、バンド L が ±0.05 dB で、バンド H が ±0.09 dB であった。この場合も誤差(デシベル値)を 3/2 倍した。その結果、電波暗室周囲からの反射の誤差 LI はバンド L で ±0.07 dB、バンド H で ±0.14 dB であった。電波暗室内の周囲反射の誤差は各種再現性データに相当するためタイプ A であり、正規分布として不確かさを算出する。

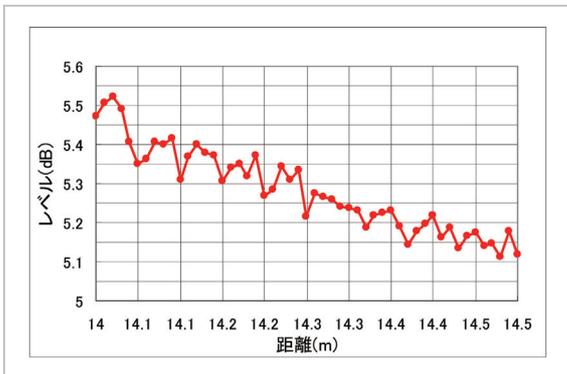


図8 伝搬特性

#### 4.4.2 アンテナの放射中心の誤差

三アンテナ法は、対向したアンテナで電波が放射・受信している放射中心間の距離の関数としてゲインを算出する。しかし一般的には、計測が容易なホーンの開口面間の距離で定義する。このため、給電部とアンテナ開口面間にある放射中心の存在する範囲を考慮して不確かさを推定する。図 9 に示すように、三アンテナ法では送信アンテナの開口から受信アンテナの開口までの距離を R、

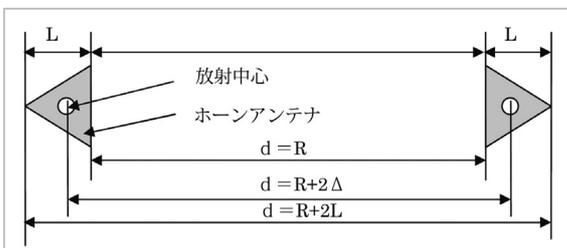


図9 三アンテナ法測定の距離及び放射中心

ホーンの開口面から給電点間の距離を L とする。本来、アンテナ間距離 d としては、送信アンテナの放射中心から受信アンテナの放射中心までの距離  $d=R+2\Delta$  が入るべきであるが放射中心の位置が不明であるため、放射中心が存在する範囲を考えて、不確かさとして計上する。

放射中心は、通常、アンテナの開口面から、給電部(ホーンの頂点)の間にあるため、d は、 $R \leq d \leq R+2L$  の範囲になる。このとき、最悪のケースとして、いま、開口面に放射中心があると仮定して、 $d=R$  として計算したが、真の放射中心は、アンテナの一番後方において、 $d=R+2L$  とするのが妥当であったと仮定する。式(1)に  $d=R+2L$  を代入すると、アンテナ#1 のゲイン  $G_1$  は、

$$G_1 = \frac{4\pi(R+2L)}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{21}P_{13}}{P_{23}P_0}} \quad (6)$$

$$= \frac{4\pi R}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{21}P_{13}}{P_{23}P_0}} \left\{ \frac{R+2L}{R} \right\}$$

となり、中カッコ内の項の分だけ誤差が生じる結果となる。これが、放射中心が不明確であることによって生じる不確かさの最悪値である。この誤差の項だけを取り出すと次式を得る。

$$\Delta G = 10 \log_{10} \left( 1 + \frac{2L}{R} \right) \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

この項をみると、アンテナ間距離 R が大きくなればなるほど、アンテナの長さ L が無視できるようになり、式(7)は 0 に収束する。すなわち、アンテナ間距離 R が、アンテナの寸法 L に対して、十分に大きければ放射中心によって生じる誤差は小さくなるのが分かる。そこで、必要な距離を検討するために、式(7)を計算した結果を図 10 に示す。横軸はアンテナ開口面間の距離 R、縦軸は式(7)に示す  $\Delta G$  である。

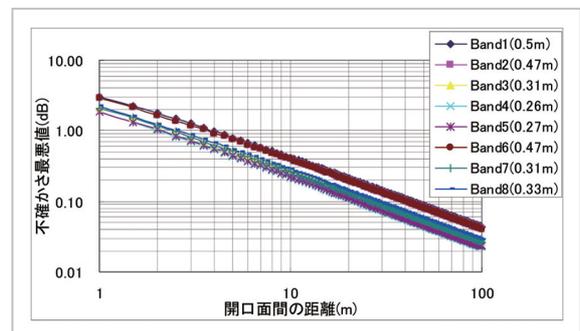


図10 放射中心の算出結果

これをみると、例えば、 $R=10\text{ m}$  のときには、アンテナの長さ  $L$  が  $25\text{ cm}$  (ダブルリッジガイドアンテナ (DRGA) の長さ) であっても、最悪で  $0.2\text{ dB}$  程の不確かさを与えることが分かる。実際には、アンテナ間距離を変化させ電界強度距離特性を測定し、その特性から回帰直線を求め、その延長上から開口面内の放射中心を求める過去の手法[1]を用いて放射中心を推定した。推定した結果から、放射中心の誤差は、バンド L が  $\pm 0.29\text{ dB}$ 、バンド H が  $\pm 0.28\text{ dB}$  であったが、図 10 から得られる最悪値よりも小さく、妥当な結果である。これはタイプ B の誤差であり、矩形分布として不確かさを算出する。

#### 4.4.3 不整合に起因する誤差

三アンテナ法によって、アンテナ #1、#2、#3 の利得  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  は式 (1) ~ 式 (3) で求まるが、いま、三つのアンテナ (アンテナ #1、#2、#3) のうち、#1 と #2 を用いて送受信アンテナ間の伝送損を測定する場合を考える。このときの概略図を図 11 に示す。(a) は、二つのアンテナを接続して受信電力  $P_{21}$  を測定している状態である。(b) は、アダプタを使用して直接接続の状態、受信電力  $P_0$  を測定している様子を示している。図 11 (a) のときに得られる受信電力  $P_{21}$  は、アンテナ端や SG 端での不整合、PAD やケーブルでの損失を考えると以下ようになる。

$$P_{21} = \left| \frac{C_{T21}}{1 - C_{T11}\Gamma_g} \right|^2 \left| \frac{S_{A21}^{(21)}}{(1 - S_{A11}^{(21)}\Gamma_T)(1 - S_{A22}^{(21)}\Gamma_R) - S_{A21}^{(21)}S_{A12}^{(21)}\Gamma_T\Gamma_R} \right|^2 \left| \frac{C_{R21}}{1 - C_{R22}\Gamma_L} \right|^2 P_g \quad (8)$$

また、図 11 (b) のときに得られる受信電力  $P_0$  は、

$$P_0 = \left| \frac{C_{T21}}{1 - C_{T11}\Gamma_g} \right|^2 \left| \frac{S_{D21}}{(1 - S_{D11}\Gamma_T)(1 - S_{D22}\Gamma_R) - S_{D21}S_{D12}\Gamma_T\Gamma_R} \right|^2 \left| \frac{C_{R21}}{1 - C_{R22}\Gamma_L} \right|^2 P_g \quad (9)$$

となる。ここで各記号の意味は次のとおりである。

- $P_g$  : 信号源の出力電力
- $\Gamma_g$  : 信号源の出力反射係数
- $\Gamma_L$  : 受信機の入力反射係数
- $\Gamma_T$  : 送信アンテナ接続コネクタから信号源側をみたときの反射係数
- $\Gamma_R$  : 受信アンテナ接続コネクタから受信機側をみたときの反射係数
- $[C_T]$  : 送信側のケーブルと PAD を合わせた S マトリックス
- $[C_R]$  : 受信側のケーブルと PAD を合わせた S マトリックス

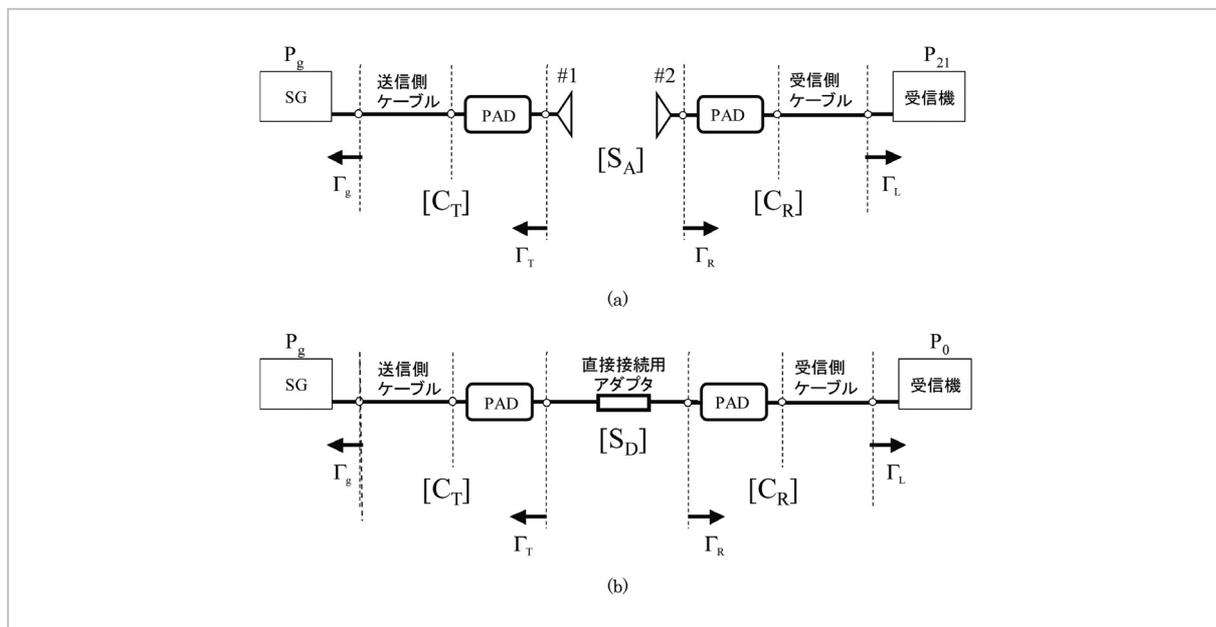


図 11 三アンテナ法の測定系

た S マトリックス

[S<sub>D</sub>] : 直接接続用アダプタの S マトリックス

[S<sup>(ij)</sup><sub>A</sub>] : 二つのアンテナ (#i → #j) 間の S マトリックス

他のアンテナの組合せの場合についても同様に受信電力を求め、式(1)に代入すると、

$$G_1 = \frac{4\pi d}{\lambda} \frac{|S_{A21}^{(13)} S_{A21}^{(21)}|}{|S_{A21}^{(23)}|} \times \left\{ \frac{1}{|S_{D21}|} \frac{|(1-S_{A11}^{(23)}\Gamma_T)(1-S_{A22}^{(23)}\Gamma_R) - S_{A21}^{(23)}S_{A12}^{(23)}\Gamma_T\Gamma_R|}{|(1-S_{A11}^{(13)}\Gamma_T)(1-S_{A22}^{(13)}\Gamma_R) - S_{A21}^{(13)}S_{A12}^{(13)}\Gamma_T\Gamma_R|} \times \left( \frac{|(1-S_{D11}\Gamma_T)(1-S_{D22}\Gamma_R) - S_{D21}S_{D12}\Gamma_T\Gamma_R|}{|(1-S_{A11}^{(21)}\Gamma_T)(1-S_{A22}^{(21)}\Gamma_R) - S_{A21}^{(21)}S_{A12}^{(21)}\Gamma_T\Gamma_R|} \right) \right\} \quad (10)$$

を得る。式(10)において中カッコ内の項は、較正結果に不確かさを与える項である。ここで五つの近似を与える。

- ・アンテナを接続して測定を行ったとき、S<sub>A21</sub>, S<sub>A12</sub> は 1 に比べて十分小さい値であり、アンテナ間の多重反射は無視できる。
  - ・S<sub>A11</sub><sup>(13)</sup> = S<sub>A11</sub><sup>(23)</sup> (受信アンテナが変わっても送信アンテナ#3 の S<sub>A11</sub> が変わらない)
  - ・S<sub>A22</sub><sup>(21)</sup> = S<sub>A22</sub><sup>(23)</sup> (送信アンテナが変わっても受信アンテナ#2 の S<sub>A22</sub> が変わらない)
  - ・スルーアダプタの S<sub>D11</sub>, S<sub>D22</sub> は非常に小さい値である。
  - ・スルーアダプタの S<sub>D21</sub>, S<sub>D12</sub> は 1 と見なせる。
- このとき、式(10)は、次のように近似できる。

$$G_1 \approx \frac{4\pi d}{\lambda} \frac{|S_{A21}^{(13)} S_{A21}^{(21)}|}{|S_{A21}^{(23)}|} \left\{ \frac{|(1-S_{D11}\Gamma_T)(1-S_{D22}\Gamma_R)(1-\Gamma_T\Gamma_R)|}{|(1-S_{A11}^{(21)}\Gamma_T)(1-S_{A22}^{(21)}\Gamma_R)|} \right\} \quad (11)$$

ただし、

- (1-S<sub>A11</sub><sup>(21)</sup>Γ<sub>T</sub>) : アンテナ#1 と送信側ケーブルの接続部での多重反射
- (1-S<sub>A22</sub><sup>(21)</sup>Γ<sub>R</sub>) : アンテナ#2 と受信側ケーブルの接続部での多重反射
- (1-S<sub>D11</sub>Γ<sub>T</sub>) : アダプタと送信側ケーブルの接続部での多重反射
- (1-S<sub>D11</sub>Γ<sub>R</sub>) : アダプタと受信側ケーブルの接続部での多重反射
- (1-Γ<sub>T</sub>Γ<sub>R</sub>) : 送信側ケーブル～アダプタ～受信側ケーブル間での多重反射

である。

式(11)で、中カッコ内の項はそれぞれ U 分布する不確かさを持つので、それぞれの反射係数の大きさを実測すれば、不整合による不確かさは求まる。不整合による不確かさを計算した一例を図12に示す。ただし、周波数ごとに計算した結果である。これはタイプ B の誤差であり、U 分布として不確かさを算出する。

実際の不整合による不確かさ U<sub>mismatch</sub> の計算は、それぞれのバンド内の最悪値を用いて U 分布として次式を用いて求めた。

$$U_{mismatch} = \sqrt{|\Gamma_T|^2(|S_{D11}|^2 + |S_{A11}^{(21)}|^2) + |\Gamma_R|^2(|S_{D22}|^2 + |S_{A22}^{(21)}|^2) + |\Gamma_T|^2|\Gamma_R|^2} \quad (12)$$

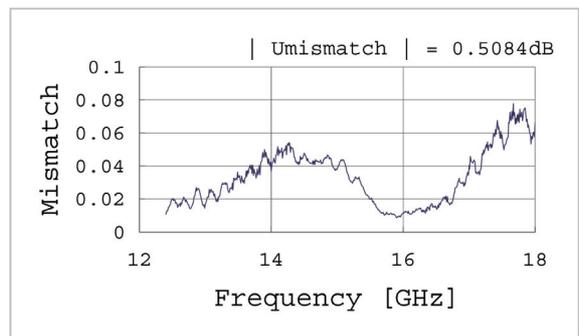


図12 不整合による誤差 (バンド 8)

## 5 不確かさのバジェット

1 GHz~18 GHz 帯のホーンアンテナの較正に限定して、三アンテナ法によるアンテナ較正における不確かさの評価を行った。被較正アンテナは 1 GHz~18 GHz を 8 バンドでカバーしているため、周波数帯を 5.85 GHz を境にバンド L とバンド H に分類した。表 1 に不確かさのバジェットを示す。この結果から拡張不確かさ (包含係数 k=2) は、バンド L で ±0.7 dB、バンド H で ±1.1 dB であった。

## 6 おわりに

今回、被較正アンテナを 1 GHz~18 GHz 帯の角錐型標準ホーンアンテナに限定し、14 項目の誤差要因について不確かさの検討を行った。その結果、拡張不確かさ (包含係数 k=2) は、バンド L (1 GHz~5.85 GHz) で ±0.7 dB、バンド H (5.85

表1 1GHz～18GHz帯 ホーンアンテナ較正の不確かさバジェット

分類	不確かさ項目		確率分布	形態	量	不確かさ(±dB)		較正值 (アンテナゲイン) への影響	不確かさ(±dB)		確率分布 補正	標準不確かさ(±dB)	
	項目					周波数(GHz)			周波数(GHz)			周波数(GHz)	
						1～5.85	5.85～18		1～5.85	5.85～18		1～5.85	5.85～18
測定系	信号のS/Nに起因する誤差		矩形	実測	La	0.027	0.11	1	0.027	0.11	1/3	0.009	0.037
	同軸ケーブルの曲げによる誤差		正規	実測	Lb	0.01	0.025	(Lb/2)*3	0.015	0.04	1	0.015	0.040
	測定系安定度の誤差	時間変動誤差	矩形	実測	Lc	0.05	0.05	1	0.05	0.05	1/3	0.017	0.017
		温度変動誤差	矩形	実測	Ld	0.03	0.03	1	0.03	0.03	1/3	0.010	0.010
	受信系の非直線誤差		矩形	実測	Le	0.04	0.05	1	0.04	0.05	1/3	0.013	0.017
アンテナ設置	アンテナ間距離設定の誤差		正規	理論	Lf	0.003	0.003	1	0.003	0.003	1	0.003	0.003
	遠方界条件の誤差		正規	理論	Lg	0.048	0.078	1	0.048	0.078	1	0.048	0.078
	測定のパラツキ(サイトアッテネーション)		正規	実測	Lh	0.19	0.27	(Lh/2)*3	0.29	0.41	1	0.29	0.41
	軸合せの誤差	水平方向	矩形	実測	Li	0.05	0.17	(Li/2)*3	0.08	0.26	1/3	0.027	0.087
		垂直方向	矩形	実測	Lj	0.09	0.24	(Lj/2)*3	0.14	0.36	1/3	0.047	0.12
		角度方向	矩形	実測	Lk	0.04	0.24	(Lk/2)*3	0.06	0.36	1/3	0.02	0.12
	電波暗室周囲からの反射		正規	実測	Ll	0.05	0.09	(Ll/2)*3	0.07	0.14	1	0.07	0.14
アンテナ放射中心の誤差		矩形	実測	Lm	0.29	0.28	1	0.29	0.28	1/3	0.097	0.094	
不整合に起因する誤差(仮定)		U分布	実測	Ln	0.08	0.51	1.00	0.08	0.51	1/2	0.040	0.255	

合成標準不確かさ $U_L$  バンドL (1～5.85GHz)

$$U_L = \sqrt{(0.009)^2 + (0.015)^2 + (0.017)^2 + (0.01)^2 + (0.013)^2 + (0.03)^2 + (0.048)^2 + (0.29)^2 + (0.027)^2 + (0.047)^2 + (0.02)^2 + (0.07)^2 + (0.097)^2 + (0.04)^2}$$

合成標準不確かさ $U_H$  バンドH (5.85～18GHz)

$$U_H = \sqrt{(0.037)^2 + (0.04)^2 + (0.017)^2 + (0.01)^2 + (0.017)^2 + (0.03)^2 + (0.078)^2 + (0.41)^2 + (0.087)^2 + (0.12)^2 + (0.12)^2 + (0.14)^2 + (0.094)^2 + (0.255)^2}$$

不確かさ (k=1)	拡張不確かさ (k=2)
0.33	0.66
0.56	1.12

GHz～18 GHz)で±1.1 dBであった。

今回の不確かさ評価に先立ち、測定系を今までの較正システムに使用していたマイクロ波レシーバを主体とした測定系から、ネットワークアナライザを用いた測定系に変更した。今回使用したネットワークアナライザは、ダイナミックレンジが広いこと、これまで使用していた方向性結合器、ダウンコンバータ及びパワーアンプ等は不要となり較正装置が簡素化され使いやすいものとなった。また、システムの簡素化によって、現在行われている高周波減衰器の不整合の評価法と同じ問題として考えることができるようになったため、実測値を用いて不整合による不確かさを明確に示すことができた。

また、ホーンアンテナの放射中心の誤差及び不整合による誤差に着目して検討を行った。放射中心の誤差は、これまでは対向したアンテナの開口距離を4 mほど変化し伝搬距離特性(電界強度)を測定し、その距離特性から回帰直線を求めその延長線上から開口面の内側の放射中心を推定していた。今回の方法は、アンテナの寸法から推定するので簡便な方法である。両者の結果を比較する

と、従来の推定法が妥当であることが分かった。

以下に、1 GHz～18 GHz帯のホーンアンテナの較正を行う場合の留意事項を示す。

- (1) アンテナ較正においては、放射中心の不明確さによる不確かさを軽減するため、電界強度距離特性を測定して放射中心を推定するか、あるいは、被較正アンテナの開口面と給電点との間の長さの半分の位置を放射中心と仮定し、アンテナ間距離とする。
- (2) 今回は被較正アンテナを標準ホーンアンテナに限定して評価を行ったが、標準ホーンアンテナ以外の形状及び特性の異なるアンテナ(例えばダブルリッジガイドアンテナ等)の場合は、被較正アンテナの指向特性、反射係数など事前に測定し不確かさの再評価が必要となる。
- (3) 電波暗室の電波吸収材の経年変化による特性変化が予想されるので、電波暗室のサイトアッテネーションを定期的に測定し、電波暗室の特性の確認を行う必要がある。
- (4) 測定のパラツキを減少させるため、較正システムに使用する同軸ケーブル及び整合用

PAD の取扱いには十分注意し、定期的に  
チェックすることが重要である。

現在、18 GHz～40 GHz 帯のホーンアンテナの  
較正システムを開発しているが、同様な手法で不  
確かさの評価を行う予定である。

## 謝辞

最後に、アンテナ較正及び精度向上に関して日  
ごろご指導いただく東北大学の杉浦行教授に感謝  
いたします。

## 参考文献

- 1 増沢博司, 張間勝茂, 森川容雄, 手島輝夫, “1～5GHz 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 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", 1989, IEEE International Symp. on EMC, pp.19-24, 1989-5.
- 3 虫明康人, “アンテナ・電波伝搬”, 電子情報学会編, pp.120-122, コロナ社, 昭和 36 年 2 月.
- 4 ISO 国際文書, “計測における不確かさの表現のガイド”, 監修飯塚幸三, 日本規格協会, 1996.
- 5 アンテナ工学ハンドブック, 電子通信学会編, pp.440, オーム社, 昭和 55 年 10 月 30 日.



**坂齊 誠**

無線通信部門 EMC 計測グループ研究  
員  
環境電磁工学



**増沢博司**

財団法人電波技術協会  
較正



**藤井勝巳**

無線通信部門 EMC 計測グループ研究  
員 博士 (工学)  
環境電磁工学



**鈴木 晃**

無線通信部門 EMC 計測グループ主任  
研究員  
較正



**小池国正**

財団法人テレコムエンジニアリングセ  
ンター  
較正



**山中幸雄**

無線通信部門 EMC 計測グループリー  
ダー  
EMC 測定