建築物壁面のテレビ電波散乱特性測定法

A Method of Measuring the Scattering Characteristics of the Wall of a Building with Respect to TV Broadcasting Waves

正会員 三 枝 健 二[†], 正会員 長谷部 望[†]
Kenji Saegusa[†] and Nozomu Hasebe[†]

Abstract Ghosting of TV broadcasting waves caused by skyscrapers in urban areas has become a serious problem. In this paper, we describe method of quickly and effectively measuring the way in which a wall scatters TV waves. The principle of this method is based on the planar near field measurement in antenna technology. A two-element endfire array measures a wall's scattering field at each affected location from the mixed field composed of the main incidence and the scattering field. This paper describes the measuring principle, equipment, and results of experiments using a conducting plate and the wall of a building on our campus. These experiments confirm the effectiveness of this method.

キーワード：建築物壁面，散乱，ゴースト障害，平面近傍界測定法，エンドファイアアレイ

1. ま え が き

近年，都市域における建築物の高層化に伴い，テレビ電波のゴースト障害が急増して大きな社会問題となっている．ゴースト障害は発生源である建築物を中心に広範囲な地域にわたって発生し，その程度は場所によって異なる．なお，郵政省より2000年までの導入を目標とした地上テレビ放送のデジタル化計画が発表されており，その変調方式には遅延波（ゴースト）に強いOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplex)の採用が有望視されている¹⁾．しかし，このデジタル化でも遅延波の強さと遅延時間に応じてビット誤り率特性は劣化する²⁾．

このゴースト障害の発生地区にわたる評価は，実測および計算により行われている^{3)~5)}．測定に関しては，各場所でゴーストの程度（基本評価DU比）を直接測定する方法，建築物モデルを用いて測定する方法が行われているが，前者は非常に手間がかかり，後者は建築物の形状およびその構造が複雑であることを考慮すると実際的ではないと考えられる．数値計算については，障害予測計算式が提案されているが，これも建築物の材質および形状に関して検討の余地があると考えられる．

そこでこれらの点を考慮し，発生地区全域にわたるゴースト障害の評価が比較的容易に行える測定法を提案す

る⁶⁾．その原理は，大開口アンテナの放射指向性測定に使用されている平面近傍界測定法⁷⁾に基づき，発生源である建築物壁面前面の散乱界分布を測定し，それを用いてゴースト障害の原因となる建築物壁面からの2次放射界を各点において求めるものである．この原理による物体の散乱特性測定法は，筆者らが数波長程度の寸法の低反射材料に対して先に提案している⁸⁾．本測定法は，建築物壁面前面の散乱界分布を直接測定することから，建築物壁面を構成しているコンクリート，ガラス等の材質およびその形状に起因する散乱特性の評価も可能であり，その結果は障害予測計算式の検討資料となり得ると考えられる．また，本測定法は，テレビ電波のゴースト障害の評価だけではなく，都市内の無線通信の伝搬特性を決定する建築物の散乱特性⁹⁾の評価にも適用可能である．

本測定を行うためには，測定面上の入射界と散乱界の混在界から散乱界の検出を行う必要がある．そこで，ここでは文献8)と異なり，プローブアンテナに容量装荷型小型ループアンテナ¹⁰⁾で構成した2素子のエンドファイアアレイを使用し，測定感度の向上，入射波と散乱波の分離，指向性の影響の軽減などを図っている．

上記測定法の実測での検証のため，まず導体平板の散乱界測定を行い，本測定の散乱界検出の有効性を確認した．そして，次に壁面散乱特性の測定例として，本学校舎壁面に対して測定を行い，壁面構成物の評価を行うと共に，壁面前面領域における壁面からの2次放射界分布を求めた．ただし，ここでは205.25 MHzの1周波についてのみ測定を行っている．本論文では，まず原理，測定系等について述べ，次に，導体平板の散乱界測定結果および本学校舎壁面の散乱特性測定結果について論じる．

1997年9月5日，電子情報通信学会通信ソサイエティ大会で発表

1997年10月6日受付，1998年3月23日最終受付，1998年5月7日採録

[†] 日本大学 理工学部 電子工学科

(〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1, TEL 0474-69-5451)

[†] Department of Electronic Engineering, College of Science and Technology, Nihon University

(7-24-1, Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan)

2. 原 理

2.1 入射波と散乱波の分離

本測定では、入射波と壁面からの散乱波の混在する界から入射波と散乱波を分離する必要がある。図1において多重回折波を含めた入射波は $|\theta| \leq 90^\circ$ 、建築物壁面からの散乱波は $|\theta| \geq 90^\circ$ の角度範囲から到来する。したがって、プローブアンテナの指向特性が $|\theta| \leq 90^\circ$ の範囲において感度を有せず、 $|\theta| \geq 90^\circ$ の範囲において一定感度（無指向性）であれば、散乱波のみをプローブアンテナの指向性の影響を受けずに検出し得る。

測定に際し、プローブアンテナを設置することによって本来そこに生じていた界を極力乱さないようにするためには、アンテナは小型であることが望ましい。その点を考慮し、ここでは単純な構成で、かつ半無指向性パターンに近いカーゴイド特性を有する2素子 $\lambda/4$ 間隔エンドファイアアレイ(λ :波長)を採用することとした。また、その素子アンテナには、水平面内無指向性であることを考慮し、微小ループアンテナを採用した。

2素子エンドファイアアレイを用いて任意入射角の主入射波を抑圧するためには、入射角に応じて2素子のアンテナからの出力を適当な振幅比および位相差を与えて合成しなければならない。すなわち、入射波前方に設置したアンテナとその後方に設置したアンテナの複素受信電界は、素子間相互結合および両アンテナ特性の差によって異なるからである。そこで本論文では、あらかじめ周囲からの反射波が存在しない理想的な環境において、2素子配列したときの各素子の受信特性(振幅、位相)を測定し、各入射角に応じたアレイ構成のための係数を求めておく。散乱界測定では、2素子のアンテナの複素振幅をそれぞれ測定し、先ほどの係数を用いて計算機内でアレイを構成し、散乱界を得ることとした⁸⁾。図2の点線に入射角 $\theta_i=0^\circ$ の場合のパターン計算例を示す。±90°方向で3 dB程度感度が低下しているが、 $|\theta| \geq 90^\circ$ の半空間ではほぼ無指向性となっていることがわかる。しかし、 $|\theta| \leq 90^\circ$ の半空間においてもこのアンテナは感度を有するため、ヌル方向以外から入射する多重回折波を受信してしまうことになる。これは、後述するように、本測定系のC/Nを劣化させる。ただし、本来ゴースト現象は、これらの多重回折波も含めた入射波による、壁面での反射で引き起こされることを考えると、提案する測定法はこれらの影響すべてを包含した情報を提供できると考えられる。なお、他の建築物からの1回反射のレベルは、建築物寸法50×50 m、完全反射、かつ反射レベルの最大方向に観測点が存在する場合でも、波源から観測点までの距離が6 km以上、また、波源から観測点とその反射波を生じる建築物までの伝搬距離差が1 km以上であれば、直接伝搬する波と比較し-10 dB以下であることが判明している¹¹⁾。

図1 測定座標系とそのセットアップ
Coordinate and experimental setup.

図2 プローブアンテナパターン ($\theta_i=0^\circ$)
Receiving pattern of probe antenna ($\theta_i=0^\circ$).

2.2 散乱界の導出

アンテナの平面近傍界測定法においては、アンテナ開口面に平行に設定した走査平面上の放射界の複素振幅を測定し、使用したプローブアンテナの指向特性の影響を考慮して放射指向性(遠方界)が求められる⁷⁾。本測定法では、散乱波測定側には無指向性のプローブアンテナを使用しているため、直接ホイゲンス・フレネルの原理より、測定した壁面からの散乱界 $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$ の複素振幅を用いて近傍界を含めたゴースト障害の被評価点上における散乱界 $\mathbf{E}^r$ を求める(図1)。

ここで実測では、入射波は平面波と見なせ、また建築物壁面は波長と比較して大であることから、このときの反射波は平面波が半無限媒質へ入射する場合の反射波と同様に考えることができる。したがって、 $\mathbf{E}^s, \mathbf{H}^s$ はそれに準じて入射角に応じた方向を向き、 $|\mathbf{E}| = Z_0 |\mathbf{H}|$ (Z_0 : 自由空間の固有インピーダンス)の関係となると考えられる。ここではプローブアンテナに yz 面に配置したループアンテナを用いているため、散乱界 $\mathbf{H}^s$ の H_z^s が測定され、 $\mathbf{E}^s$ はこの関係を用いて近似して求める。よって、 $\mathbf{E}^r$ は次のように求められる。

$$\mathbf{E}^r = \frac{1}{4\pi} \int_s \left\{ -j\omega\mu H_z^s \mathbf{y} + \left(jk + \frac{1}{r} \right) \cdot (-E_y^s \mathbf{x} \times \hat{\mathbf{r}} + E_z^s \hat{\mathbf{r}}) \right\} \frac{e^{-jk r}}{r} ds \quad (1)$$

ただし

$$\hat{r} = r/r, E_y^s = -H_z^s Z_0 \cos \theta_i, E_z^s = H_z^s Z_0 \sin \theta_i$$

なお、上述の散乱界測定範囲は原理的には無限大を必要とするが、本測定では後述の4章で行った計算シミュレーションに基づき、建築物寸法の上下、左右の外側に $\pm\lambda$ 程度広げた範囲とし、その中で散乱界検出のための採用データの範囲は建築物壁面を入射角に沿って投影した範囲とする。すなわち、建築物壁面を走査面に垂直に投影した面を、角度 θ_i で入射した場合、壁面-走査面間距離 d で定まる $d \tan \theta_i$ 分入射角と逆方向にシフトする。なお、測定範囲を散乱界検出の採用データ範囲と比較し大きくとったのは、建築物壁面前面から外れた領域での散乱界の変化を確認するためである。また、建築物壁面に凹凸がある場合でも、走査面を壁面と平行に平面として設定し、同様に測定を行う。なお、建築物壁面が周期的な構造であり、かつ、入射波が一様である場合、壁面全体の測定データは、1周期の部分のみの測定を行い、そのデータを周期的に繰り返すことにより得られ、測定時間の短縮を図ることが可能である。

3. 測定系

本研究では測定対象周波数をVHF帯90~103, 170~220 MHzの2周波帯に限定し、本文ではその中で第10チャンネルの映像搬送波205.25 MHzを代表させて測定を行うこととした。この周波数を代表させたのは、波長が約1.5 mと扱い易いためである。

図1に測定系を示している。測定対象から約1 mの位置に、測定対象と平行となるように走査面を設定する。約1 mとした理由は、壁面との相互結合によるプローブアンテナの特性変化の影響を考慮したからである(付録1)。

次に、アレイ軸がこの面と垂直となるように2素子のループアンテナを $\lambda/4$ 間隔で設置する。プローブアンテナには、測定器への同軸線路とのインピーダンス整合をとった容量装荷型小型ループアンテナ¹⁰⁾を使用し、同面積のインピーダンス整合を考慮していない通常のシールドループアンテナ¹²⁾と比較し約25 dB利得改善を達成している(付録2)。このアンテナを用いて構成したプローブアンテナパターン測定例($\theta_i=0^\circ$)を図2実線で示している。点線の計算値と良好に一致していることがわかる。なお、 $\theta_i=15^\circ$ の場合のパターンは、ヌル点が 15° 方向に生じるが図2とほぼ同様の指向性となる。

プローブアンテナの各素子で受信された界の複素振幅は、受信機により測定される。この受信機は、本測定用の特別製作であり、その仕様を表1に示す。スイッチにより測定周波数を選択でき、1チャンネル(基準入力)の振幅測定、2チャンネルの複素振幅測定が可能である。測定精度は、あらかじめ用意した校正曲線を用いることにより、HPのベクトルボルトメータ8405 Aとほぼ同様の性能を得ている。大きさは $30 \times 10 \times 22$ cm、重量は2.2 kgと小

表1 受信機の仕様
Specifications of receiver.

3 channel power meter
2 channel phase meter
Frequency: 103.25, 205.25 MHz
Power range: -80~-20 dBm
Phase range: 360°
Power accuracy: ± 1 dB
Phase accuracy: $\pm 3^\circ$ (with calibration curve)
Input impedance: 50 Ω

図3 壁面測定風景
Picture of the experiment.

型軽量であり、可搬に優れている。なお、受信機の基準信号は、測定環境周辺に設置した八木・宇田アンテナより得ている。

プローブアンテナ壁面走査装置によりプローブアンテナを移動させ、測定データは10 cm (0.068 λ)毎にコンピュータに取り込まれる。ここでは、被測定対象を本学校の屋上への出入口がある壁面とした。これにより、プローブアンテナ壁面走査装置が単純な構成ですみ、かつ、測定の実施が容易となっている。そのプローブアンテナ壁面走査装置は、そこに分布する電磁界を極力乱さないように木材を用いて製作しており、走査範囲は構造上の制約から横方向約12 m、上下方向約2 mとした。本測定系において、その範囲の測定に要する時間は20分程度である。図3に壁面測定風景を示す。図中、はしごの右側に壁面走査系が見える。なお、窓拭き用のゴンドラを有しているビルディングの場合には、ゴンドラにプローブアンテナを設置することにより、壁面走査は可能であると考えている。

4. 数値シミュレーションによる誤差評価

ここでは、仮定した壁面上の散乱界分布より走査面上の界分布を求め、ノイズ等を考慮して測定界分布を模擬する。次に、それを用いて壁面からの2次放射界分布を決定する散乱指向性(水平方向)を求め評価する。まず、壁面は本測定壁面の扉、はしごがない平面(9.2^m×4.05^m)の状態、壁面上の散乱界分布は一様とした。また、これから

の走査面上の界分布は、後述の測定結果を参照し、壁面を導体平板と見なし物理光学近似¹³⁾により求めた。

ここで、プローブアンテナパターンの実測結果において、主入射波方向近傍(図2では $|\theta| \leq 20^\circ$)のレベルは抑圧できなかった残留主入射波 S_i とノイズ S_N の和 S_0 を示している。測定値は、この S_0 と壁面からの散乱界の合成となる。 S_0 の最大レベルが -25 dBであることから、走査面上の壁面散乱界レベル $S_s = 0 \sim -15$ dBであるとき、このシステムの C/N に相当する S_s/S_0 は $25 \sim 10$ dB取れると判断される。 S_0 のモデルとして、図2の結果とほぼ一致するように、 S_i の振幅を -25 dB、 S_N に関しては振幅を最大 -25 dBと制限し、振幅、位相を独立に乱数を用いて発生させた。

上述の設定に基づき、 S_i , S_N のレベルを固定して、走査面上の振幅 S_s および入射角 θ_i を変化したときの散乱指向性を求めた。またこの際、計算に採用する走査面上の範囲は建築物壁面を入射角に沿って投影した範囲 L を基準とし、その両側を拡張した。計算結果の一例として、図4に計算に採用する走査面上の範囲を $L \pm \lambda$, $L \pm \lambda/2$, L と変化したときの $\theta_i = 30^\circ$, $S_s = -15$ dB($S_s/S_0 = 10$ dB)での検出散乱指向性およびその真値を示した。 $L \pm \lambda$ の結果は、左第2副ローブで約3 dBの誤差を生じている。また、この結果では顕著でないが、 S_s/S_0 が充分大きくとれていない場合には主ビームの広がりも見られる。この原因は、壁面を離れた領域での残留主入射およびノイズによるレベル上昇に起因していると考えられる。 $L \pm \lambda/2$ の場合、第4副ローブで約4 dBの差が、 L のみの範囲を用いた検出結果は、第4副ローブまで1 dBの差で収まっている。このように C/N に相当する S_s/S_0 が充分大きくとれていない場合には、計算に採用する走査面上の範囲を制限する必要がある。この結果に基づき、2.2節で述べた散乱界検出のための採用データの範囲を決定した。

また、上記の計算では、プローブアンテナのパターンを考慮していないが、入射角が大きくなるほど壁面側のパターンは半無指向性より尖鋭となる。しかし、入射角 30° 以下ならば $\pm 90^\circ$ 方向で4 dB程度しか感度は低下しておらず、 $|\theta| \geq 90^\circ$ の半空間でほぼ無指向性であるといえる。

図4 壁面散乱指向性 ($\theta_i = 30^\circ$)
Scattering pattern of wall ($\theta_i = 30^\circ$).

以上、壁面からの2次放射界分布を決定する散乱指向性の計算シミュレーションより、適用限界は走査面上の散乱界振幅 $S_s \geq -15$ dB($S_s/S_0 \geq 10$ dB), $\theta_i \leq 30^\circ$ で第4副ローブ(散乱界の最大値に対して約 -25 dB)までの検出誤差 ± 2 dB程度と判断している。

5. 導体平板の散乱界測定

散乱界検出の有効性を確認すべく、既知試料(導体平板, 1×1 m 図1のように設置, $\theta_i = 15^\circ$)の散乱界測定を行った。試料-走査面間距離を1 mと設定したときの y 軸上の散乱界測定結果および計算結果(H_x 成分)を図5に示す。図5の振幅は入射波で正規化しており、横軸は図1と合わせて見やすいように逆に示してある。なお、測定場所は本学校舎の屋上であり、導体平板後方(図1, $-z$ 軸方向)には屋上への出入口を有する壁面が存在する。そこで、その後方壁面で生じる散乱界を抑圧し、導体平板の散乱界のみを検出するため、導体平板を含めた測定系を z 軸方向に $\lambda/4$ 前後に移動させ、その2カ所の測定値を適当な位相差を与えて合成することにより、後方壁面からの散乱波を抑圧した¹⁴⁾。一方、導体平板散乱界の数値計算には、導体平板をワイヤグリッド化(14×14 セグメント)し、モーメント法¹⁵⁾を使用して行った。図の測定結果より、振幅が -15 dBより大きいレベルでは計算値との良好な一致が見て取れる。これに対し、 -15 dB付近では、後方壁面からの散乱波および主入射波の抑圧できなかった成分とノイズによるレベル変動 ± 2.5 dB程度が生じている。これは前述のように、図2の実測結果より $S_s/S_0 = 10$ dBと判断され、この値より、 -15 dBのレベルに対して最大 $+2.5$ dB, -3.3 dBの変動が現れることがわかり、実測値とも一致する。したがって、前述の議論で指摘した測定

図5 導体板の散乱界分布
Measured scattering field distribution of conducting plate.

図 6 測定壁面外観
Exterior of measured wall.

図 7 壁面散乱界分布
Measured scattering field distribution of wall.

図 8 壁面散乱界分布 (計算値)
Calculated scattering field distribution of wall.

精度で散乱波の検出が期待できることを、この導体平板の実測でも確認できたと考えられる。

6. 壁面散乱特性測定

建築物壁面のモデルとして本学校舎屋上に突出した屋上出入口壁面を選んだ。この壁面は、テレビ放送波送信塔より約 29 km の位置にあり、 $\theta_i=15^\circ$ となる。壁面外観および周囲環境の写真を図 6、図 3 に示す。この実施例においては上述の壁面を一種のビルディングに見立てているため、写真中に認められる壁面上部に位置するレーダアンテナ、別のアンテナ、はしごの突き出し部、避雷針および後方の低い壁等については、考慮に入れないこととする。もちろん、これらからの散乱効果を含めた散乱界を検出するためには測定範囲を充分大きく取る必要がある。壁自体はコンクリートで作られており、面上には出入口の扉(コンクリート面に対して約 23 cm 奥まっている)の他に、金属製のはしご(コンクリート面より約 19 cm の位置)がある。また、扉のガラスには金属の網線が入っている。壁面-走査面間距離は 95 cm であり、散乱界の測定範囲は装置設置上および構造上の制約から図 6 の点線で囲む領域とした。

6.1 壁面上測定散乱界分布

2.1 節のように、計算機内で 2 素子エンドファイアアレイを構成して検出した散乱界分布の振幅を図 7 に示す。底面は測定位置、縦軸は主入射波で正規化した振幅を示している。この結果を見ると、はしごとコンクリート壁面からの散乱界の干渉により、はしごの前面($y=5.9$ m)でレベルの落ち込みが、および右側のコンクリート壁面前面($y=0.62\sim 5.675$ m)でリップルが生じている。そのリップルの上側包絡線と下側包絡線の平均をとることにより、コンクリート壁面の散乱界が抽出され、これよりコンクリート壁面の反射係数がほぼ 0 dB、したがって、はしごの散乱レベルもコンクリート壁面からの散乱界を打ち消す程度であることより、その直前で 0 dB 程度の強度を生じていると読み取れる。また、扉はその寸法が波長と比較的小さく、またコンクリート壁より奥まっているため、コンクリート壁のように反射係数の値は読み取れないが、扉のガラスに入っている金属の網線の網目が波長と比較し充分小

図 9 各部位からの散乱界分布 (計算値)
Calculated scattering field distribution of each part.

いことから、導体と同様の反射をすると予想される。なお、これらの各部位の反射係数の値は、別に行った壁面前面での自由空間定在波測定結果より、コンクリート壁面で $-0.98+j0.07$ 、扉で $-0.91-j0.41$ と求まっており、また、はしごの散乱界強度も別に行った後述のモーメント法による解析から 0 dB に近いと判断される。このように、コンクリート壁面と扉が導体に近い散乱を生じていると考えられる。なお、図 7 の振幅において 0 dB 以上の値を示す領域が存在するが、これは各部位からの散乱波の干渉のみならず、波長と比較して大きな、全反射に近い平面散乱体でも、その近傍界にリップルが生じ、リップルの一部分が 0 dB 以上となることを後述の計算により確認している。

次に、上述の各壁面構成物の散乱特性の推察結果を基に、壁面および扉を導体平板と見なし、物理光学近似¹³⁾でその散乱界の計算を行った。ただし、エッジ部での散乱は考慮していない。また、はしご単体の散乱界をその影像も考慮して、別にモーメント法を用いて求めた⁶⁾。その合成結果を図 8 に示す。計算にはエッジ部での散乱を含めていない点、屋上の手すり等により入射波が完全に平面波でない点を考慮すると、図 8 は図 7 の特性を非常によく再現しているといえる。このように本測定法では、各壁面構成物の散乱特性の考察が可能であると考えられる。

ここで、測定散乱界分布の各部位からの影響を見るべく、図 9 に図 8 の $x=0$ m の散乱界分布計算結果を各部位からの散乱界に分けて表示した。図中、すべての存在を考

図 10 壁面からの散乱界分布
Scattering field distribution from wall.

慮した図 8 の結果、壁面の表面が平らですべてコンクリート壁である場合の散乱界分布、扉の存在を考慮した場合のコンクリート壁面の散乱界分布、および、はしごのみの散乱界分布を示した。まず、コンクリート壁面のみの結果を見ると、本計算ではエッジでの散乱を考慮していないが、計算対象である壁面が有限なために散乱界分布にはリップルが生じている。また、扉のみを考慮したコンクリート壁面からの散乱界分布を上記のコンクリート壁面のみの結果と比較してみると、扉の前面($y=7.295\sim 9.145$ m)で大きな変化が生じているが、それ以外の範囲では両者はほぼ同様の傾向、値を示している。このように、扉のみを考慮した場合では、まだ、はしご前面でのレベルの落ち込み、および右側のコンクリート壁面前面での比較的大きなリップルが生じていない。すなわち、図には、はしごのみの散乱界も示したが、これらからリップル等の原因はコンクリート壁面からの散乱界とはしごからの散乱界との干渉であることがわかる。

6.2 壁面からの散乱界分布

次に、この壁面より 50 m 離れた 500×500 m の領域を自由空間として、 $x=0$ m 面の散乱界強度分布 $|E^r|$ を(1)式より求めた。その計算領域は図 10(a)に示す領域で、 y'' , z'' 方向に 10 m 毎に計算を行った。その結果を図 10(b)に示す。図 10(b)の振幅は壁面の位置で測定された入射波の振幅で正規化している。なお、測定系の制限により壁面全面の測定を行っていないため、測定を行っていない箇所のデータは、測定面端部のデータが x 軸方向に一樣であるとして補間した。

本測定法における誤差は、主に残留主入射波とノイズによる。今回の被測定壁面では、走査面上の散乱界レベルが 0 dB 程度であることから、 S_s/S_0 が 25 dB 程度取れていると判断される。したがって、図 10(b)上の誤差は、最悪の場合を想定し、残留主入射波とノイズの和の振幅、位相が一定である場合を考え、その正規化レベルを -25 dB とし測定値に加えた場合でも、 ± 1 dB の範囲に収まることを確認した。

図 11 壁面からの散乱界分布 (一様分布)
Scattering field distribution from wall (uniform).

図 10(b)の結果を見ると、散乱指向性の主ビームに相当する入射方向と対称の方向(-15°)付近で比較的大きなレベルを示しているが、副ローブに相当する方向にも大きなレベルを生じていることがわかる。ここで、壁面が一様な面のみで構成されている場合を想定し、壁面上の散乱界分布が、振幅が一様分布(振幅 1.0)、位相が入射波に応じた変化を示すものとして求めた散乱界分布を図 11 に示す。図 10 をこの結果と比較すると、本測定壁面(面積: $9.2^w\times 4.05^h$ m)の場合、散乱波は 200 m 離れるとその最大レベルは -20 dB ($D/U=20$ dB)以下となり、面上のはしご、扉等の影響により散乱界分布が乱され、散乱指向性のビーム幅の広がりに加え、近傍の広い領域で散乱レベルが増大することが認められる。

本論文では、提案した測定法の検証に注目して検討を行った。ここではゴースト障害の詳細な評価までに至っていないが、このように壁面からの散乱界分布を求め、直接伝搬波と比較し、その遅延時間、強度、位相、偏波を考慮すれば、ゴースト障害の評価が可能と考えられる。ただし、家屋が存在する場合の都市域の散乱界分布を求めるには、さらに都市内の電波伝搬減衰、すなわち都市減衰⁵⁾の考慮が必要となる。

7. む す び

ゴースト障害の発生地区全域にわたる評価を比較的容易に行える建築物壁面散乱特性測定法を提案した。その原理は、発生源である建築物壁面前面の散乱界分布を測定し、それをを用いてゴースト障害の原因となる建築物壁面からの 2 次放射界を各点において求めるものである。本測定法の適用限界は、強電界地区において、検出プローブのヌル抑圧比 25 dB 以上で、走査面上の散乱界振幅 -15 dB 以上、 $\theta_i \leq 30^\circ$ のとき、壁面からの 2 次放射界分布を決定する散乱指向性において第 4 副ローブ(散乱界の最大値に対して約 -25 dB)までの検出誤差は ± 2 dB 程度と判断している。

本測定法の実測での検証のため、ここではまず導体平板の散乱界測定を行い、散乱界検出の有効性を確認した。そ

して、壁面散乱特性の測定例として、本学校舎壁面に対して測定を行い、それより壁面構成物の評価を行うと共に、壁面前面領域における壁面からの散乱界分布を求めた。その結果、本測定壁面の場合、散乱波は200 m 離れると最大レベル(主入射波で正規化)は-20 dB 以下となり、面上にはしご、扉等があるため、それらが散乱界分布を乱し、一様な面の散乱特性と比較するとその散乱指向性はビームが広がり、近傍の広い領域で散乱レベルが増大することが認められた。

本測定では、反射係数が大である壁面に対して行ったが、ゴースト障害防止対策のため、電波吸収体を装着した壁面等、低反射係数を有する壁面に対しては、更に広い測定のダイナミックレンジを必要とする。これは今後の課題であるが、プローブアンテナを多素子のアレイにすることにより可能であると考えている。これに加えて今後、多重回折波の考慮、高層建築物に対する測定法、建築物形状に依存する測定法について検討していきたい。

本研究は、平成7年度、平成8年度に双葉電子記念財団より研究助成を受けた。ここに謝意を表す。また、在学時に実験に協力頂いた小熊伸彦(現在、日本電気(株))、佐藤真司(現在、三菱電機(株))、および本学大学院生 武笠士郎の各氏に感謝する。

〔文 献〕

- 1) 松尾：“デジタル放送技術”，東京電機大学出版局（1997）
- 2) 都竹，太田，中村：“遅延波がOFDM伝送に与える影響”，映像学誌，51,9, pp. 1493-1503 (Sep. 1997)
- 3) 清水編：“電磁波の吸収と遮蔽”，日経技術図書（1989）
- 4) 神戸：“電波障害の完全対策”，電波実験社（1991）
- 5) NHK エンジニアリングサービス編：“建築物障害予測の手引き”，日本CATV 技術協会（1989）
- 6) Kenji Saegusa and Nozomu Hasebe: “A Method for Measuring the Scattering Pattern of a Building on VHF TV Broadcasting Waves”, IEE ICAP' 93, 2, 745
- 7) 手代木，堀，大久保，伊藤，小室：“アンテナの近傍界測定システムの開発”，第70回電波研究所研究発表会予稿（1986）
- 8) 三枝，長谷部：“UHF テレビ電波を用いた材料の散乱指向性測定法”，映像学誌，51,6, pp. 917-924 (June 1997)
- 9) 佐藤，小川：“建築物壁面反射係数の評価法”，信学論，J72-B-II, 5, pp. 209-217 (May 1989)
- 10) 三枝，武笠，長谷部：“建築物壁面の電磁波散乱特性測定法”，1997年信学通信ソサイエティ大会，SB-4-5
- 11) 長谷部：“電波工学”，pp. 90-93，コロナ社（1995）
- 12) 電子情報通信学会編：“アンテナ工学ハンドブック”，pp. 62-63（1990）
- 13) 山下編：“電磁波問題解析の実際”，第4章，電子情報通信学会（1993）
- 14) 三枝，鈴木，鈴木，長谷部：“UHF テレビ電波を用いた材料の散乱指向性測定法”，1989年信学春季全国大会，B-135
- 15) R. F. Harrington: “Field Computation by Moment Methods”, R. E. Krieger Publish. (1968)
- 16) 坂口，長谷部：“容量装荷短絡平板スタブで構成した小形アンテナ”，信学論，J79-B-II, 1, pp. 42-52 (Jan. 1996)

〈付 録〉

1. 壁面-走査面間距離

壁面-走査面間距離は、近傍界測定法の観点から極力近い方が望ましい。しかし、その距離が近いほど、壁面とプローブアンテナの相互結合によるプローブアンテナの受信

図 1 容量装荷型小型ループアンテナ
Small loop antenna loaded with capacitor.

特性の変化が大となる。ここではこれに関して、プローブアンテナを1×1 m, 3×3 mの導体平板に近付けた際の入力インピーダンスの測定を行った。その結果より、プローブアンテナと導体平板の距離が約1 m以上あれば、入力インピーダンス変化による測定電界の誤差は5%以下に抑えられることが確認された。したがって、本測定周波数では、約1 mの距離があれば測定には問題がないと考えられる。

2. プローブアンテナ

素子アンテナとして、図付1に示すプリント基板で構成した方形のループアンテナを採用した(周波数205.25 MHz)。このアンテナは、筆者らの一人が先に提案した容量装荷短絡平板スタブで構成した小型アンテナ¹⁶⁾(立方形状)を、水平偏波の入射波に影響を与えないように板状に改良したものである。構造は、表面外側の方形ループに、ギャップに設けた方形導体で形成した容量を装荷したものであり、給電部はコネクタより内側に設けたループ裏面に沿わせてマイクロストリップ線路を構成し、先端で平衡給電を行ったものである。また、このアンテナは2重ループとすることにより2共振のアンテナとなり¹⁶⁾、テレビ電波2チャンネルの同時測定も可能である。

三枝 健二 1985年、日本大学理工学部電子工学科卒業。1987年、同大学大学院修士課程修了。同年、日本大学理工学部電子工学科助手。以来、各種の電磁波散乱、透過特性に関する研究に従事。正会員。

長谷部 望 1957年、日本大学工学部電気工学科卒業。1958年、東京大学生産技術研究所勤務。技官、助手を経て、1966年、講師。この間、ロケット・衛星搭載アンテナ、地上局アンテナの研究に従事。1980年、日本大学理工学部電子工学科勤務。現在、教授。アンテナ、電磁波関連および環境電磁工学の研究に従事。工学博士。正会員。