

# 広帯域 APFA を用いた円形走査時間領域 アクティブイメージングの実験的検討

中西 研二<sup>†</sup> 佐藤 弘康<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科電気・通信専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 6 05  
E-mail: sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 広帯域にわたり高利得な対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi Antenna, APFA) を用いた円形走査時間領域アクティブイメージングを行っている。APFA は軽量, 薄型, 量産性を持つテーパスロットアンテナのひとつであり, アレー化によるリアルタイムアクティブイメージングへの適用が期待できる。APFA を用いてモノスタティックパルスレーダを構成し, 導体板や円柱導体, 誘電体柱のイメージングを行った。高精度のイメージを得るために, 合成開口法のひとつであるキルヒホッフ積分法を用いた。その結果, アンテナからの放射界が無歪条件を満たす方位角度の範囲に散乱体が置かれた場合, 指向性アンテナを用いても散乱体の形状を概ね推定できることがわかった。  
キーワード 広帯域, テーパスロットアンテナ, イメージング, 時間領域, 円形走査

## Experimental Study of Circular-Scan Time-Domain Active Imaging by Using Broadband Antipodal Fermi Antenna

Kenji NAKANISHI<sup>†</sup>, Hiroyasu SATO<sup>†</sup>, and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980 8579, Japan  
E-mail: sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Circular-scan time-domain active imaging using broadband and high gain antipodal Fermi antenna is performed. The APFA is one of tapered slot antennas (TSA) with properties of low weight, thin structure, easy to fabricate, and can be used for the real time active imaging by using APFA array. The monostatic pulse radar is developed by using single APFA and is applied to the imaging of objects such as a metal plate, metal cylinder and dielectric cylinder. In order to obtain an accurate image of the objects, the Kirchhoff integral method is used as one of the synthetic aperture method. As a result, it is found that accurate image of the objects can be obtained by using directive antennas such as APFA when the objects are placed in the angle region in which the pulse response satisfies the no distortion condition.

**Key words** broadband, tapered slot antenna, imaging, time domain, circular scan

### 1. ま え が き

近年, 通信や計測の分野において, 超広帯域の周波数を用いた通信や計測技術への期待が高まっている。広帯域を使用することにより高分解能パルスレーダが実現できるので, 銃器, 爆発物の探査などのセキュリティ, 火災, 地震などの災害時における炎, 壁を通しての人命探査など多岐にわたる。これまで我々は壁を通してリアルタイムに人や物体の形状, 位置を計測する Through wall imaging (TWI) の実現を目指し, 広帯域かつ高利得な対せき形フェルミアンテナ (APFA)[1] を用いた平面走査時間領域アクティブイメージングについて検討してきた [2]。APFA は軽量, 薄型, アレー化が容易などの特徴を持つテーパ

スロットアンテナのひとつであり, 簡易なイメージング装置の実現が期待される。

アンテナの平面走査または平面アレーを用いて高分解能のイメージを得る場合, レンズや合成開口法を用いて等価的に広い実効開口面積を持たせる方法が一般的である。文献 [2] では, APFA が単素子で 13dBi 程度の利得を持つ特性を利用して, レンズや合成開口法を用いずにイメージを得ることを試みた。一方, 円形走査または円形アレーについては物体の全周囲を囲むことにより後方散乱波だけでなく走査面内の全方向に対する散乱波を計測できるので, 高分解能を得るためには合成開口法の利用が効果的と考えられる。

そこで本報告では, 比較的狭いビーム幅を持つ APFA を用

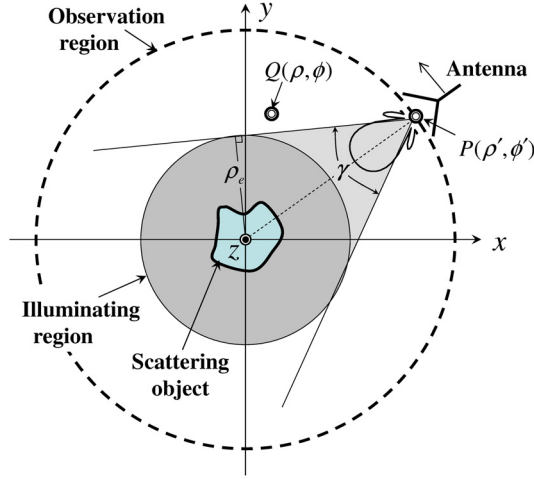


図1 円筒走査時間領域アクティブイメージングの原理

いてモノスタティックパルスレーダを構成し、APFAの周波数領域、及び時間領域特性におけるアンテナ特性を明らかにするとともに、合成開口法のひとつであるキルヒホッフ積分法 [4] を用いて円筒走査アクティブイメージングを行った結果について報告する。

## 2. 原 理

図1に示す座標系において、原点周辺に散乱体が置かれているものとする。点  $P(\rho', \phi')$  はアンテナの位置、点  $Q(\rho, \phi)$  は観測領域内部の任意の位置を表す。半径  $\rho'$  の円に沿ってアンテナを走査し、パルス応答を測定することにより散乱体の形状推定を行う。ここで、点  $Q$  に散乱体があれば、距離  $2PQ$  に対応する遅延時間  $t=2PQ/c$  を経て散乱波パルス  $f(\phi', t)$  が観測され、点  $Q$  における散乱波を全方位にわたり重ね合わせることにより、イメージング関数

$$u(\rho, \phi) = \int_0^{2\pi} f(\phi', \frac{2PQ}{c}) d\phi' \quad (1)$$

を用いて散乱体の形状を推定することができる [4]。ここで、 $PQ = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi')}$  である。指向性をもつアンテナを用いた場合は、放射パターンのビーム幅  $\gamma$  が見込む領域をほぼ一様な振幅で照射できること、及び角度  $\gamma$  の範囲内でパルスの歪みが小さいことが望まれる。照射領域の半径  $\rho_e$  と観測領域の半径  $\rho'$  の間には  $\rho_e = \rho' \sin(\gamma/2)$  の関係がある。

後方散乱波のみを利用する場合、即ち点  $Q$  が  $OP$  上に位置する場合は  $PQ = \rho' - \rho$  となり、イメージング関数  $u_b(\rho, \phi')$  は

$$u_b(\rho, \phi') = f(\phi', \frac{2PQ}{c}) \quad (2)$$

で与えられ、式 (1) の積分処理が不要である。

## 3. APFAの構造と基礎特性

APFAの構造と寸法をそれぞれ図2及び表1に示す。図2において、アンテナの  $E$  面が  $XZ$  面、 $H$  面が  $XY$  面である。アンテナの  $H$  面が図1の  $xy$  面と一致する場合について検討するため、2つのAPFAを用いて  $H$  面の複素放射パターンを

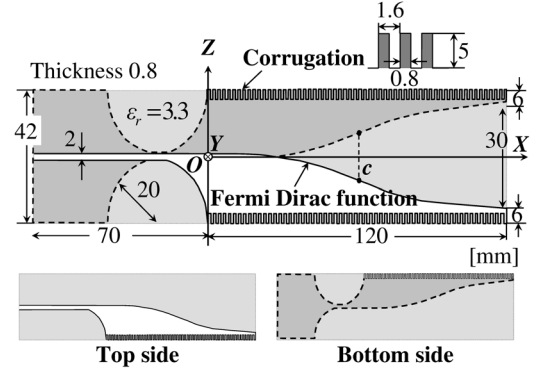


図2 APFAの構造

表1 構造パラメータ.

Name of dimension	[mm]	$[\lambda_0]$ @10GHz
Length of antenna $L$	120	4
Width of aperture $W$	30	1
Width of substrate $D$	42	1.4
Thickness of substrate $h$	0.8	0.027
Length of corrugation $l_c$	5	0.167
Width of corrugation $w_c$	0.8	0.027
Pitch of corrugation $p$	1.6	0.056
Width of Slot line $w_s$	2	0.067

広帯域にわたり測定した。ベクトルネットワークアナライザ (8722ET, Agilent Technologies) を用いて帯域 2GHz - 18GHz について周波数特性を測定し、NAのタイムドメイン機能を用いて時間領域特性を求めた。帯域制限されたパルス応答は一般にパースト波となるが、パルスのピーク時間を明確にするためヒルベルト変換を用いて包絡線を求めた。

$E_\theta$  成分に対する放射パターンの周波数特性を図3に示す。図には振幅が -3dB となる等高線を示してある。10GHzにおけるビーム幅は 45度であり、広帯域にわたりほぼ一定のビーム幅を持つことがわかる。図3の  $\phi=0, 30, 60$ deg における群遅延の周波数特性を図4に示す。方位角が  $\phi < 30$ deg の範囲では周波数に対して概ね一定の群遅延となっている。

パルス応答の放射パターンを図5に示す。6ns付近でパルスのピークが観測されており、広角の領域ではサイドローブによる波面が観測された。図4の  $\phi=0, 30, 60$ deg におけるパルス応答波形を図6に示す。方位角  $\phi$  が大きくなるにつれて振幅が減少しているが、 $\phi < 30$ deg の範囲ではパルス波形の歪みが小さい。 $\phi=60$ deg におけるパルスは歪みが大きく、ピークとなる時間も  $\phi=0$  に対してずれている。これは図4の群遅延特性からも明らかである。どの方位角についても 7ns から 10ns にかけてリングングが観測されているが、これはコルゲート構造の長さが  $l_c > 0.13\lambda$  において動作することがわかっており [5]、この条件を満足しない 2GHz-7.5GHz の周波数帯域を含んだためと考えられる。

以上の結果から、 $\phi=30$ deg 程度までは、概ね無歪条件を満足していると考えられるため、図1の  $\gamma$  を  $\gamma=60$ deg 程度に選択すれば高い分解能のイメージが得られると予想される。ここで照射

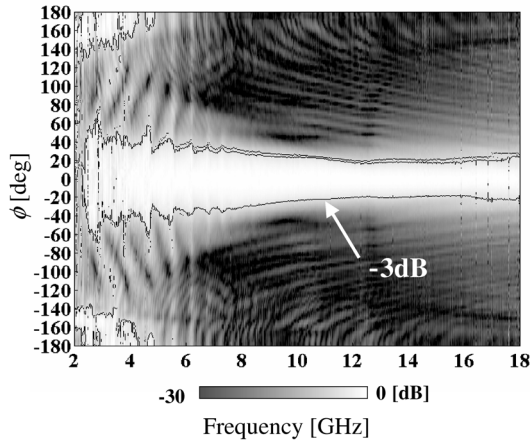


図3 放射パターンの周波数特性 (H面,  $E_\theta$ )

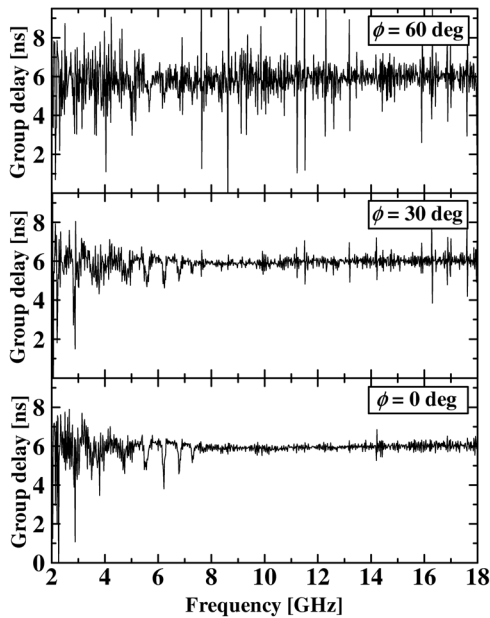


図4 方位角  $\phi$  に対する群遅延の周波数特性

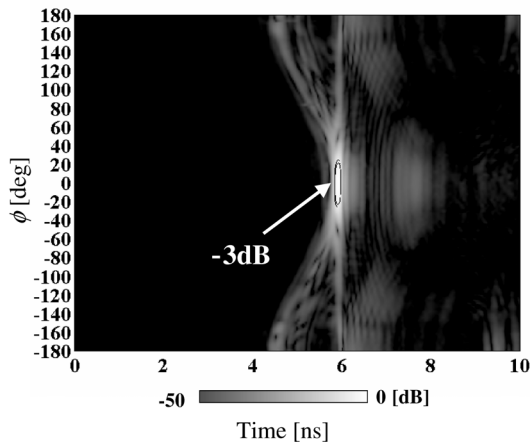


図5 パルス応答の放射パターン (H面,  $E_\theta$ )

領域の半径  $\rho_e$  と観測領域の半径  $\rho'$  の間に  $\rho' = \rho_e / \sin(\gamma/2) = 2\rho_e$  の関係があり、次節において観測半径を決める目安として利用

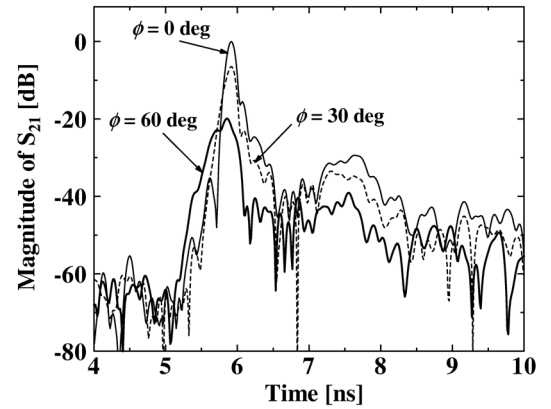


図6 方位角  $\phi$  に対するパルス応答

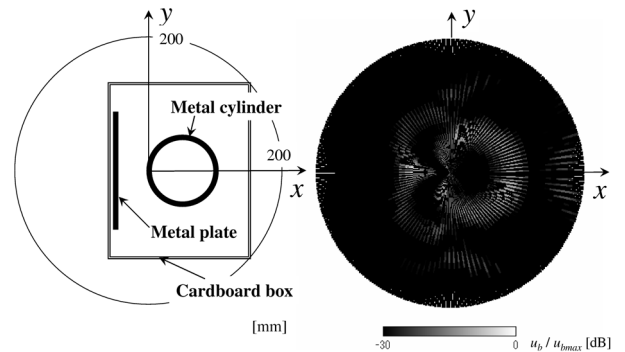


図7 後方散乱波のみによるイメージング結果 ( $\rho' = 400$  mm)

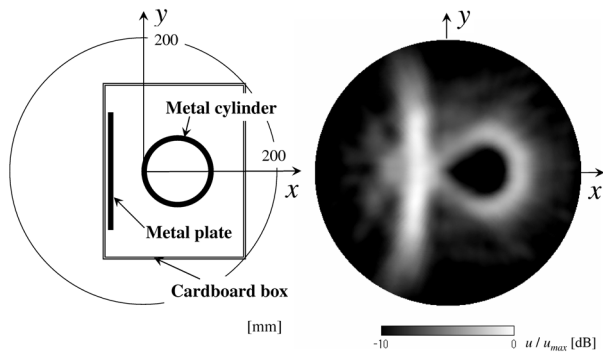
した。

#### 4. イメージング実験

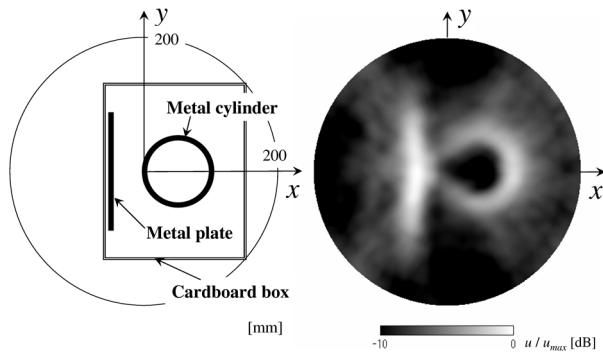
散乱体を回転台に設置し、刻み角  $\Delta\phi' = 6\text{deg}$  で APFA の反射係数  $S_{11}$  の周波数特性を測定し、NA のタイムドメイン機能を用いてパルス応答を求めた。図7に示すように、散乱体として半径 47.75mm の円筒導体を回転中心に接する位置に置き、中心から 50mm の位置に幅 161mm の導体板を配置し、これらをダンボールで囲んだモデルについてイメージングを行った。

最初に式(2)を用いた後方散乱波のみによるイメージングを行った。照射領域の半径を  $\rho_e = 200\text{mm}$  に設定し、観測半径  $\rho' = 400\text{mm}$  としたときの、 $\rho < 200\text{mm}$  におけるイメージング関数を図7に示す。ただし、イメージング関数は最大値で規格化した。円筒導体のイメージは概ね得られているが、導体板はほとんど認識できていない。導体板は垂直に入射する場合を除いて後方散乱が小さいためと考えられる。

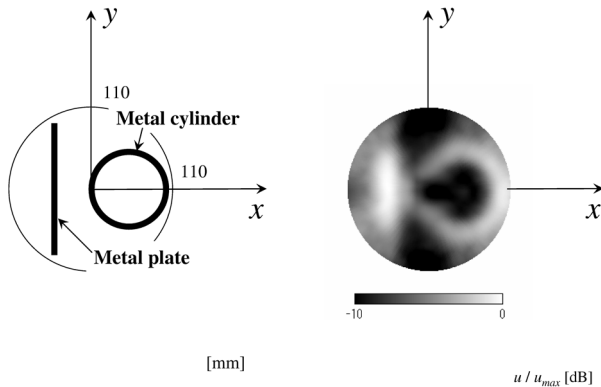
次に式(1)を用いたイメージングを行った。観測半径を  $\rho' = 400\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$  としたときの、 $\rho < 200\text{mm}$  におけるイメージング関数を図8(a), (b)に示す。このときの照射領域の半径はそれぞれ  $\rho_e = 200\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$  となる。観測半径  $\rho' = 400\text{mm}$  の場合、円筒導体、導体板共に形状推定が概ね可能であった。観測半径  $\rho' = 200\text{mm}$  の場合も概ね形状推定が可能であるが、散乱体が照射領域内部に位置するためと考えられる。また、 $\rho' = 400\text{mm}$  に比べ、照射領域の外側 ( $100\text{mm} < \rho < 200\text{mm}$ ) における振幅が大きくなった。



(a)  $\rho' = 400$  mm



(b)  $\rho' = 200$  mm



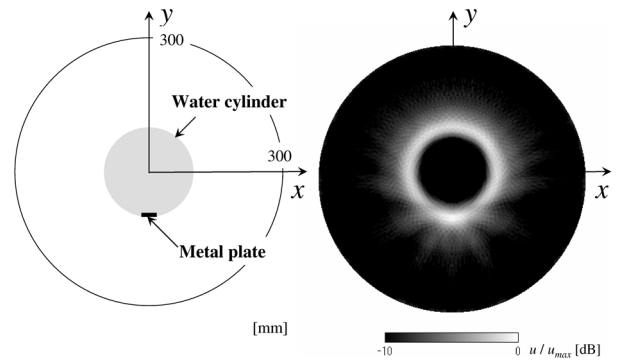
(c)  $\rho' = 110$  mm (ダンボールなし)

図 8 観測半径を変化させたときのイメージング結果

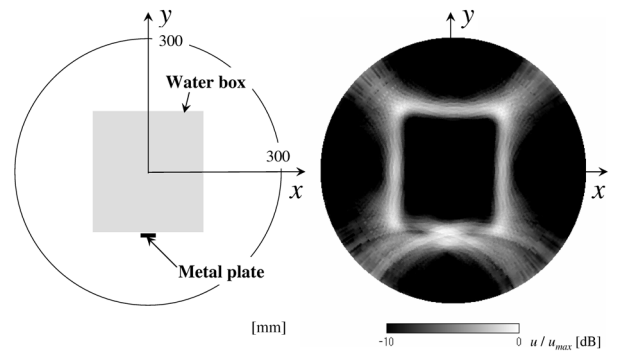
さらに観測半径を散乱体に近づけて推定が可能であるか調べるため、ダンボールを外し、観測半径  $\rho' = 110$  mm としたときの近距離イメージングを行った。  $\rho < 110$  mm におけるイメージング関数を図 8(c) に示す。このときの照射領域の半径は  $\rho_e = 55$  mm となる。照射領域の外側であっても円筒導体の形状が認識できているが、導体板の形状は不鮮明であった。

以上の結果から、キルヒホッフ積分法による形状推定の特徴として、導体板のように散乱断面の角度依存性が強い散乱体についてはその効果が大いだが、円筒導体のように角度依存性が弱い散乱体については後方散乱波のみ用いてもイメージングが可能と考えられる。

最後に誘電体表面に置かれた導体板のイメージングを行った。図 9 に示すように、発砲容器を用いて水の円柱及び直方体を作成し、その表面に幅 42 mm の定規を垂直に配置した。観測半径を  $\rho' = 400$  mm としたときの、  $\rho < 300$  mm におけるイメージン



(a) 円柱発砲容器 (半径 92.5 mm) と導体定規 (幅 42 mm) の場合



(b) 直方体発砲容器 (273 mm × 308 mm) と幅 42 mm の導体定規の場合

図 9 誘電体表面に置かれた導体板のイメージング結果 ( $\rho' = 400$  mm)

グ関数をそれぞれ図 9(a), (b) に示す。両者共に水の表面を鮮明に推定できている。定規の形状推定については不鮮明ではあるものの、その存在を認識することができている。

## 5. まとめ

円形走査時間領域アクティブイメージングの実験的検討を行った。指向性アンテナのひとつとして APFA を使用し、キルヒホッフ積分法を用いたときの形状推定について詳細に検討した。その結果、パルス応答が無歪条件を満たす方位角度の範囲に散乱体を配置すれば、指向性アンテナを用いても散乱体の形状を概ね推定できることがわかった。

## 文 献

- [1] Y. Takagi, H. Sato, Y. Wagatsuma, K. Sawaya and K. Mizuno, "Study of high gain and broadband antipodal Fermi antenna with corrugation," International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 69-72, Sendai, Japan, 2004.
- [2] H. Sato, Y. Takagi, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, "Time Domain Characteristics of Broadband Antipodal Fermi Antenna And Its Application To Through-wall Imaging," International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 338-390, Seoul, Korea, 2005.
- [3] 中西 研二, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, "広帯域 APFA を用いた円筒走査時間領域アクティブイメージング," 2005 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-147, 2005.
- [4] 佐藤 源之, "地中レーダによる地下イメージング," 信学論 (C), vol. J85-C, no. 7, pp. 520-530, 2002.
- [5] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 我妻 嘉彦, 水野 皓司, "コルゲート構造付フェルミアンテナの広帯域 FDTD 解析," 信学論 (B), vol. J88-B, no. 9, pp. 1682-1692, Sep. 2005.