

# 自己相関関数応答と送受 APFA アレーのスイッチングを用いた マイクロ波イメージングの高速化

石原 昌<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・通信工学専攻 〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6 6 05  
E-mail: {ishihara, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 広帯域送受対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi Antenna, APFA) アレーを用いたアクティブイメージングについて述べている。低コストアクティブイメージングを実現するために、散乱波の振幅のみでイメージングが可能な自己相関関数応答 (Auto Correlation Function (ACF) Response) を用いた。この手法では ACF 応答にスプリアスが発生するが、送受 APFA の素子間相互結合を利用して ACF 応答のスプリアス成分が低減されることを理論的および実験的に示している。また、撮像時間の短縮を図るために送受 APFA をそれぞれ 8 素子アレー化し、RF スイッチを用いて散乱体のマイクロ波アクティブイメージングを行っている。さらにレンズを用いたイメージングを行っている。

キーワード 広帯域, 対せき形フェルミアンテナ, 自己相関関数応答, スwitching, 高速化

## Speed-up of Microwave Imaging using Auto Correlation Function Response and Switching of Tx/Rx APFA Array

Masashi ISHIHARA<sup>†</sup>, Hiroyasu SATO<sup>†</sup>, and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical and Communication Engineering,  
Graduate School of Engineering, Tohoku University  
6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980 8579 Japan  
E-mail: {ishihara, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Microwave active imaging is performed by using broadband Tx/Rx APFA (Antipodal Fermi Antenna) array. Auto correlation function (ACF) response, which utilizes only the magnitude of scattered field, is employed to realize low cost active imaging. It is shown theoretically and experimentally that a mutual coupling of Tx and Rx APFAs yield the reduction of the spurious response appearing in ACF response. Based on the imaging method using ACF response, microwave active imaging of scattering objects is performed by using antenna array composed of eight Tx APFAs and eight Rx APFAs and RF switches to reduce the measurement time. Active imaging using APFA array with lens is also carried out for long range object.

**Key words** Broad-band, Antipodal Fermi Antenna, Auto Correlation Function response, Switching, Speed-up

### 1. ま え が き

近年、テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており、危険物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている。マイクロ波、ミリ波を用いたイメージングは人が所持している危険物の検知を実現する技術として期待されており、近年諸外国において装置開発が活発に行われている。イメージング方式には、発信器を用いるアクティブ型、及び物体が放射する熱雑音

を検出するパッシブ型がある。アクティブ型では広帯域のパルスレーダ方式が盛んに研究されており、上述のセキュリティ用途の他、火災や地震等の災害時における炎、壁を通しての人命救助等、様々な悪環境下で使用に耐える装置が期待できる。

筆者らは、これまで低コストのアクティブイメージング装置の実現を目標に、広帯域かつ高利得な特性を有する対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi Antenna, APFA) [1] を開発し、APFA の平面走査、または円形走

査による散乱導体のアクティブイメージング・位置推定に応用した [2]-[5] .

しかしながら，散乱波の複素振幅を測定する方法では，全アレー素子において広帯域 RF ミキサ，広帯域 90 °ハイブリッド等が必要となり，システムが高価になる欠点がある．一方，パルスの送受信を行う方法では，受信回路部において高速な AD 変換器が必要となり，低コスト化の実現は容易ではない．

そこで，低コストのアクティブイメージング装置を実現するために，広帯域にわたるパワースペクトルを逆フーリエ変換することにより得られる自己相関関数 (Auto Correlation Function, ACF) 応答を用いたアクティブイメージング法を提案した [6] .ただし，この手法は振幅情報のみを用いる利点を持つが，ACF 応答にスプリアス成分が含まれることが欠点として挙げられる．また，本手法を含むアクティブ方式の課題として，イメージングの高速化が挙げられる．例えば，文献 [2] では合成開口法の 1 つとしてキルヒホッフ積分を用いる信号処理を行い物体のイメージを取得しているが，イメージをリアルタイムに得るためには高速な計算機が必要となる欠点があった．

本報告では，まず ACF 応答の際に問題となるスプリアス応答について考察した結果を述べる．また，ACF 応答と送受 APFA アレーのスイッチングを用いたパルスレーダを構成し，マイクロ波イメージングの高速化を図った結果を述べる．さらに応用例として，ベニヤ板を通した散乱体の近距離イメージング，誘電体レンズを用いたイメージングを行った結果を示す．

## 2. ACF 応答

本研究では，従来手法のパルス応答  $f(t)$  ではなく，ACF 応答  $C(t)$  によりイメージングを行う． $C(t)$  は  $f(t)$  の畳み込み積分，またはパワースペクトルの逆フーリエ変換により，次のように定義される．

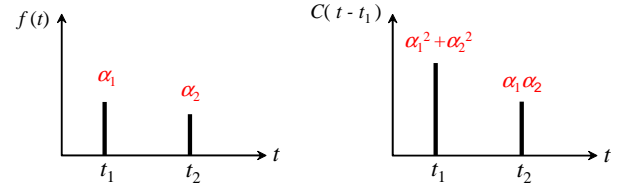
$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)f(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 e^{j\omega t} d\omega \quad (1)$$

散乱体によるパルス応答を，

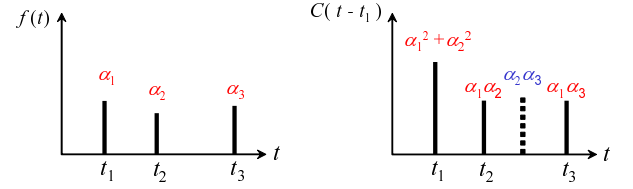
$$f(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - t_l) \quad (2)$$

とする．ここで  $\alpha_l$  と  $t_l$  は，それぞれの散乱パルスの振幅と遅延時間を表し， $L$  は散乱体の個数，または多重反射の数に相当する．式 (2) を式 (1) に代入することにより，ACF 応答  $C(t)$  は

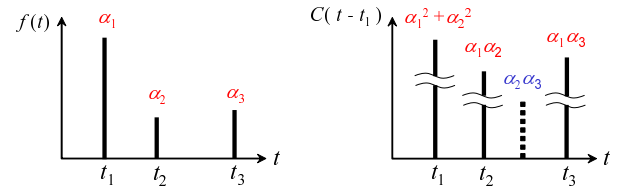
$$C(t) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \alpha_i \alpha_j \delta(t - t_j + t_i)$$



(a)  $L=2$  の場合のパルス応答と ACF 応答



(b)  $L=3$  の場合のパルス応答と ACF 応答



(c)  $\alpha_1$  を大きくした場合のパルス応答と ACF 応答 ( $L=3$ )

図 1 パルス応答と ACF 応答．

$$\begin{aligned} &= \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 \right) \delta(t) \\ &+ \alpha_1 \sum_{j=2}^L \alpha_j \delta(t - t_j + t_1) \\ &+ \alpha_i \sum_{i=2}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L \alpha_j \delta(t - t_j + t_i) \end{aligned} \quad (3)$$

と展開される．第 1 項と第 2 項は実際の遅延時間に対応する実応答であり，第 3 項は実際の遅延時間に対応しない応答である．第 3 項をスプリアス応答と呼ぶことにする． $\alpha_1$  が第 2 項に含まれることから， $t_1$  に対応するパルスの振幅  $\alpha_1$  が他のパルスの振幅と同程度の場合，ACF 応答ではスプリアス応答が実応答と同程度になり，実応答とスプリアス応答の見分けが困難となるが， $\alpha_1$  が他のパルスより大きければ，実応答の振幅をスプリアス応答の振幅に対して大きくすることができ，見分けが可能となる．

ここで，散乱体の個数に対するスプリアス応答の振幅と数について具体的な例を示す．スプリアス応答の個数の最大値  $N_F$  は，

$$N_F = (L - 1)(L - 2)/2 \quad (4)$$

で与えられる．散乱体が 1 つ ( $L=2$ ) の場合，

$$\begin{aligned} C(t - t_1) &= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) \delta(t - t_1) \\ &+ \alpha_1 \alpha_2 \delta(t - t_2) \end{aligned}$$

$$+ 0 \quad (5)$$

が得られ、スプリアス応答は発生しない．一方、散乱体が2つ ( $L=3$ ) の場合、

$$\begin{aligned} C(t-t_1) &= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2)\delta(t-t_1) \\ &+ \alpha_1\alpha_2\delta(t-t_2) + \alpha_1\alpha_3\delta(t-t_3) \\ &+ \alpha_2\alpha_3\delta(t-t_3+t_2-t_1) \end{aligned} \quad (6)$$

が得られ、スプリアス応答が発生する．スプリアス応答の振幅には  $\alpha_1$  が含まれていないため、 $\alpha_1 \gg \alpha_2, \alpha_3$  が満たされればスプリアス応答の振幅を相対的に小さくすることができる．散乱波の個数が増加するにつれてスプリアス応答の数が増加するが、 $\alpha_1 \gg \alpha_i$  ( $i = 2, 3, \dots$ ) が満たされればスプリアス応答の振幅を小さくすることができる．なお、ここではインパルス応答を用いて考察をしたが、実際には帯域が限られているために、スプリアス成分は実応答に重畳されることになる．しかしながら、この場合でも  $\alpha_1$  を大きくするほどスプリアス成分を抑制することができる． $t_1$  の遅延時間に対応する振幅  $\alpha_1$  のパルス応答は、送受アンテナ間の直接結合に対応するパルス応答なので、素子間相互結合を強めることにより  $\alpha_1$  を大きくすることができる．

### 3. ACF 応答を用いた平面走査アクティブイメージング

#### 3.1 APFA の構造と実験系

実験に用いた APFA の構造を図2に示す．設計周波数を10GHzとする．またイメージングに用いた実験系を図3に示す． $H$  面 ( $xy$  面) に配列した2つの APFA により送受アンテナを構成した．送信アンテナに接続した信号発生器を用いて6 - 18GHzの周波数を掃引し、受信アンテナに接続したSBD検波器を用いて二乗検波された広帯域パワースペクトルにハニング窓を乗じ、逆フーリエ変換することにより ACF 応答  $C(t)$  を求めた．ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いてパルス応答を用いるイメージング法が一般的であるが、本実験系では位相検出を必要としないためシステムの簡略化・低コスト化が期待できる．

#### 3.2 平面走査アクティブイメージング

$H$  面配列送受 APFA を2次元平面走査することにより、ベニヤ板を通したアクティブイメージングを行った．散乱体とその配置図を図4に示す．導体柱で支持されたベニヤ板の後方に導体柱で支持された導体定規と木材柱が置かれている．観測面は  $y = 0$  の  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の領域とし、送受 APFA の  $x$  方向および  $z$  方向のデータ取得間隔を  $\Delta x = \Delta z = 10\text{mm}$  として計  $101 \times 101$  点の観測点における ACF 応答を測定した．

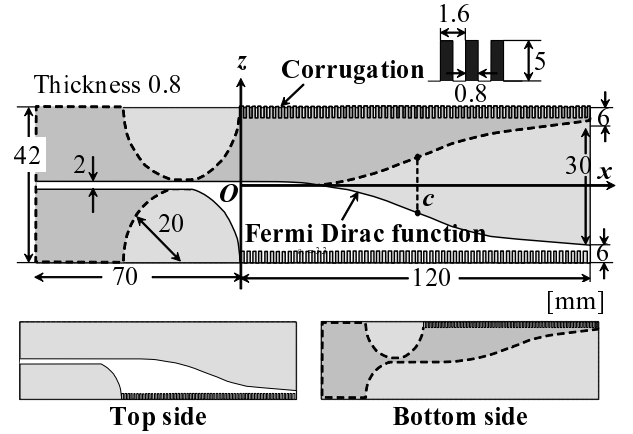


図2 APFA の構造．

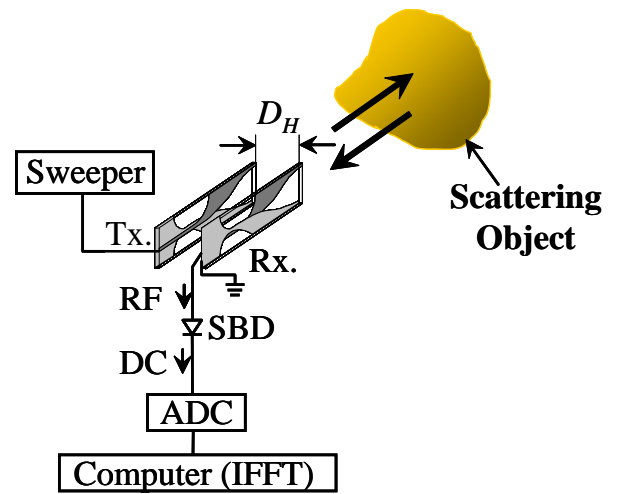


図3 実験系．

一例として、観測点  $P_2(x = 330\text{mm}, y = 0, z = 520\text{mm})$  における ACF 応答波形を図5に示す．ここで、(a), (b) はそれぞれ送受アンテナ間距離  $D_H = 40, 10\text{mm}$  に対応している．なお、比較のため VNA のタイムドメイン機能を用いて求めたパルス応答  $f(t)$  を併せて示す．また、応答振幅は最大値で規格化している．

パルス応答  $f(t)$  の波形から、 $t = t_1 = 2.01\text{ns}$  において素子間相互結合に対応するパルス、 $t = t_2 = 3.35\text{ns}$  においてベニヤ板からの散乱波に対応するパルス、 $t = t_3 = 5.32\text{ns}$  において導体定規からの散乱波に対応するパルスが観測された． $C(t-t_1)$  についてもほぼ等しい遅延時間のパルスが観測されているが、 $D_H = 40\text{mm}$  の場合、パルス応答  $f(t)$  とかなり異なっている．また、 $4\text{ns}$  付近にはスプリアス応答が観測されている．一方、 $D_H = 10\text{mm}$  の場合にはこのスプリアス応答は小さくなり、 $C(t-t_1)$  が  $f(t)$  の波形と概ね一致する結果が得られた．

$t = t_3$  における  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の ACF 分布を図5に示す． $D_H = 40\text{mm}$  の場合、ベニヤ板の背後に隠れている導体定規、導体柱のイメージが概ね得られているものの、散

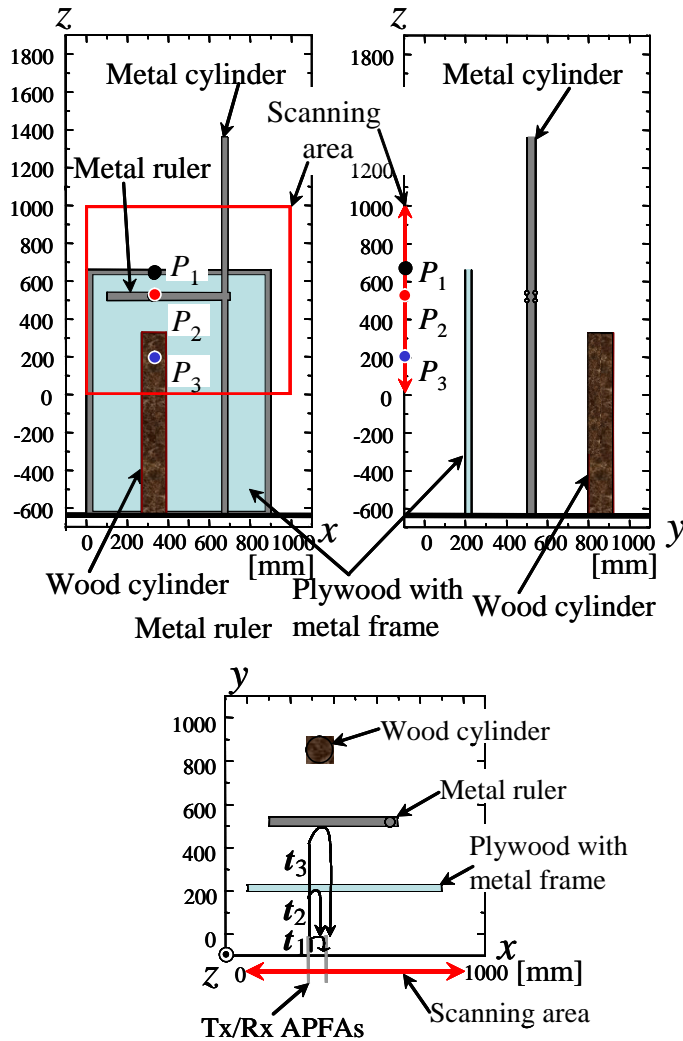


図4 イメージングに用いた散乱体と配置。

乱体周囲においてスプリアス成分が重畳されたイメージが観測されており鮮明とは言えない。一方、 $D_H = 10\text{mm}$  の場合はそのスプリアス成分が低減され、かなり鮮明なイメージを得られていることが分かる。以上の結果から、送受アンテナの間隔を小さくして素子間相互結合を増加させ、スプリアス応答を低減できることが示された。

#### 4. ACF 応答と8素子送受APFAアレーを用いたマイクロ波イメージング

##### 4.1 アレースイッチングによるイメージング

本章では高速化を図るために、送受アンテナをそれぞれ8素子とし、送信RF信号をRFスイッチで切り替えることによりイメージングを行った。8素子送受APFAアレーの構造を図6に示す。送受APFAの間隔は、スプリアス応答を抑制するために $D_H = 10\text{mm}$ とした。また、送受APFAアレー素子間隔は $D_E = 50\text{mm}$ とした。送信アンテナアレーTx.1 - Tx.8にRFスイッチを介して接続した信号発生器を用いて6 - 18GHzの周波数を計

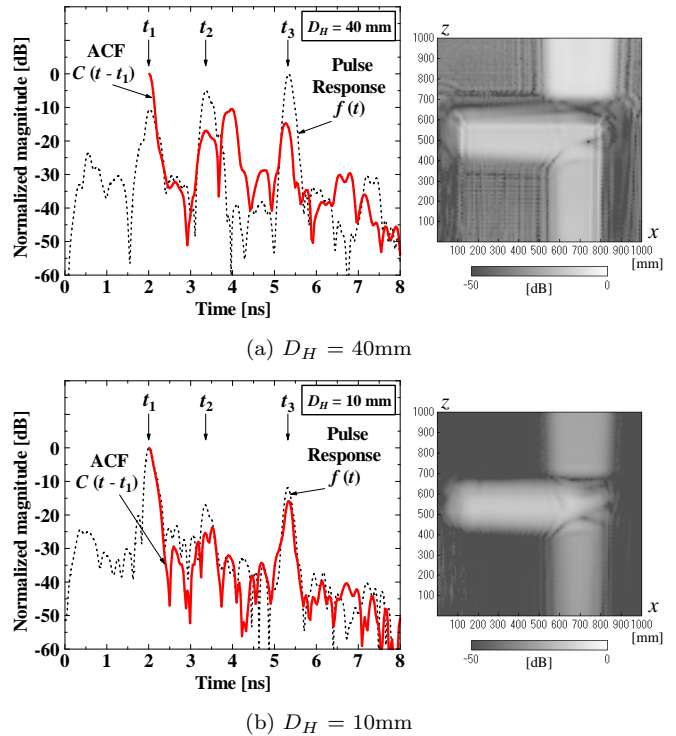


図5 観測点 $P_2(330\text{mm}, 0, 520\text{mm})$ におけるACF応答と $t_3$ におけるACF分布。

8回掃引し、受信アンテナアレーRx.1' - Rx.8'に接続した8個のSBD検波器を用いて二乗検波された広帯域パワースペクトルを8回計測し、ハニング窓を乗じたのち逆フーリエ変換して8つのACF応答 $C(t)$ を用いた。

イメージングに用いた散乱体と配置は図4と同様である。観測面領域は $1\text{m} \times 1.2\text{m} (y = 0)$ 、 $x$ 方向および $z$ 方向の8素子送受APFAアレーの走査間隔を $x$ 方向 $50\text{mm}$ 、 $z$ 方向 $40\text{mm}$ とし、データ取得間隔を $\Delta x = \Delta z = 50\text{mm}$ として計 $21 \times 3$ 点の観測点におけるACF応答を測定した。 $t = t_3$ における $1\text{m} \times 1\text{m} (y = 0)$ のACF分布を図7に示す。図5のイメージと比較して、データ取得間隔を $\Delta x = \Delta z = 10\text{mm}$ から $\Delta x = \Delta z = 50\text{mm}$ まで荒くしても導体定規・導体柱の形状が概ね確認できた。また、イメージのスプリアス成分も少ないことが分かる。

イメージの取得時間について比較を行う。図5の $\Delta x = \Delta z = 10\text{mm}$ に対する取得時間は約480分であり、 $\Delta x = \Delta z = 50\text{mm}$ に対する取得時間は約5400sであった。一方、図7の $\Delta x = \Delta z = 50\text{mm}$ に対する取得時間は243sであり、8素子の送受アレーのスイッチングによって約20分の1の測定時間に短縮できた。なお、8素子アレーについて、RFスイッチの切り替え時間、及び8回の周波数掃引時間の合計は約3sである。

##### 4.2 誘電体レンズを用いたイメージング

10GHzにおけるAPFAのアレー素子動作利得は12dB程度であり、3dBビーム幅は $E$ 面、 $H$ 面共に約 $30^\circ$ で

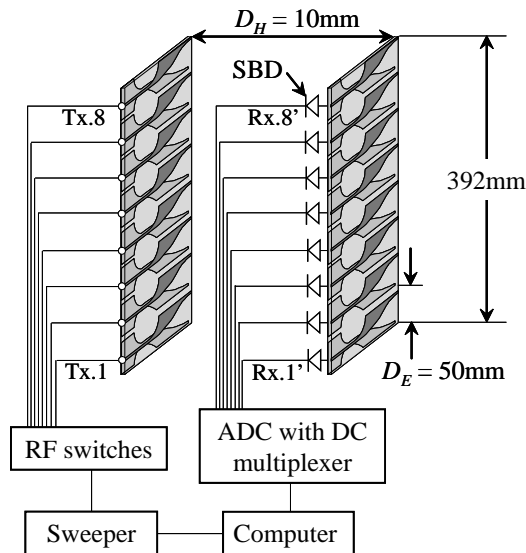


図 6 8 素子送受 APFA アレーと実験系 .

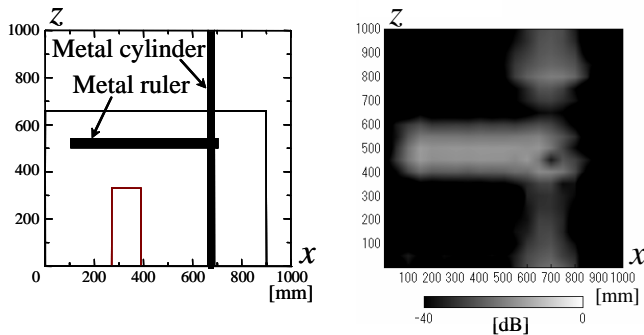


図 7  $t_3$  における ACF 分布 (8 素子送受 APFA アレー) .

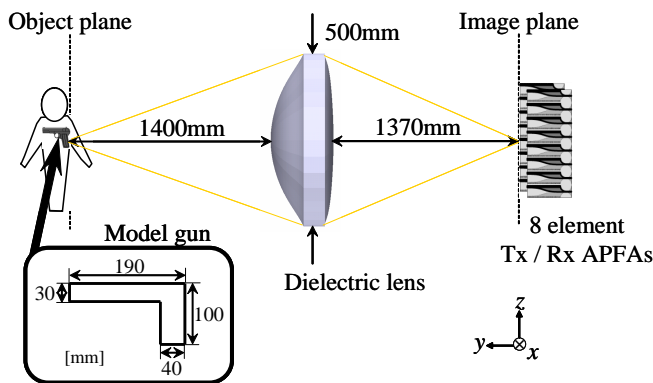


図 8 レンズを用いたイメージングの実験系と散乱体 .

ある . そのため , 散乱体までの距離が増加するにつれて受信電力が微弱となり , 遠方での空間分解能が低下する . 高感度 , 高分解能を得るためには合成開口法やレンズ等を用いて開口面積を増加させ , 高利得化を図る必要がある . そこで , 8 素子送受 APFA アレーをレンズの像面に配置して誘電体レンズアンテナを構成し , ACF 応答を用いたイメージングを行った結果について述べる .

実験系を図 8 に示す . 誘電体レンズは , 直径  $500\text{mm}$  , 厚

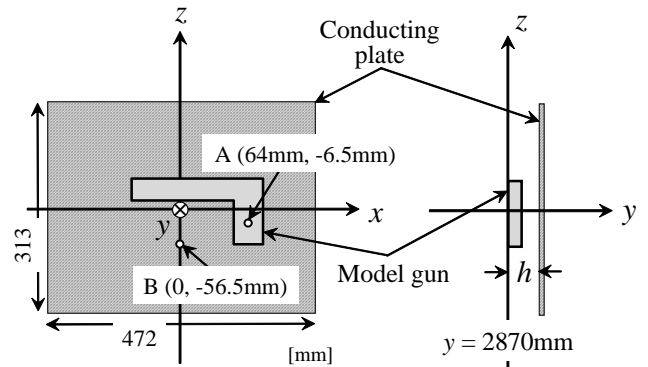


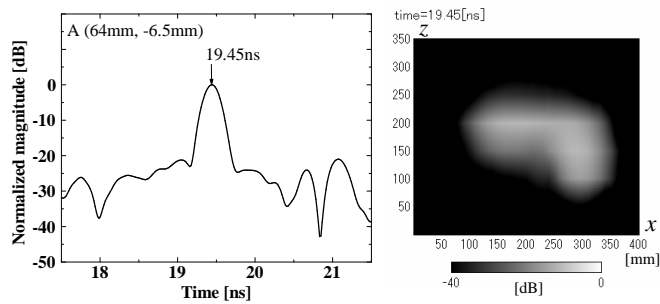
図 9 モデルガンの構造と配置 .

さ  $100\text{mm}$  , 比誘電率  $2.34$  の高密度ポリエチレンを用いた . 観測領域は像面 ( $y = 0$ ) における  $xz$  面  $400\text{mm} \times 350\text{mm}$  とし ,  $z$  方向にはアレー素子のスイッチング ,  $x$  方向にはアレーを間隔  $50\text{mm}$  で走査することにより ACF 応答を測定した . さらに , 像面内の全観測点における ACF 応答から最大振幅と遅延時間を抽出し , ACF 分布を用いて物体のイメージを得た .

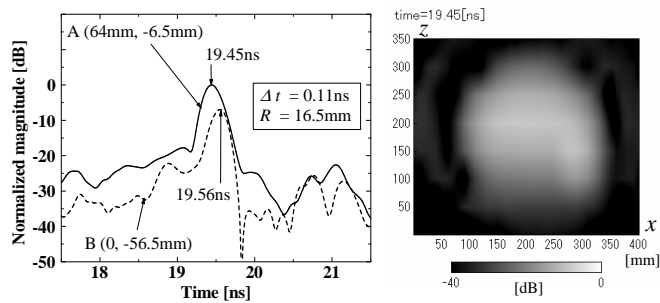
散乱体として使用したモデルガンの構造を図 9 に示す . レンズの光軸を  $xz$  面の原点を通る  $y$  軸とした . モデルガンは厚さ  $20\text{mm}$  の発泡材とアルミ箔で作製した . 人が所持している場合を評価するために , モデルガン背面に  $472\text{mm} \times 313\text{mm}$  の導体板を設け , 導体板とモデルガンの距離を  $h = 20, 40, 60\text{mm}$  と変化させたモデルについて検討した .  $h$  の変化の際は , モデルガンを  $y = 2870\text{mm}$  に固定し , 導体板を  $+y$  方向に移動させた .

導体板がない場合について , 観測点  $x = 64\text{mm}$  ,  $z = -6.5\text{mm}$  における ACF 応答 , 及び  $t = 19.45\text{ns}$  における ACF 分布を図 10(a) に示す .  $t = 19.45\text{ns}$  においてモデルガンからの散乱波応答が観測されており , モデルガンのイメージを確認することができた .

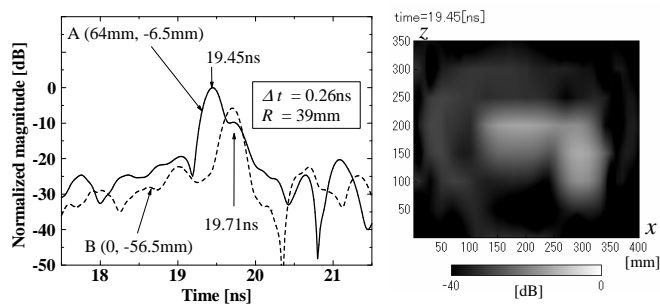
導体板がある場合について , モデルガン内の観測点  $A(x, z) = (64\text{mm}, -6.5\text{mm})$  , 及び導体板内の観測点  $B(x, z) = (0\text{mm}, -56.5\text{mm})$  における ACF 応答を比較した . 導体板とモデルガンの距離が  $h = 20, 40, 60\text{mm}$  の場合の ACF 応答 , 及び  $t = 19.45\text{ns}$  における ACF 分布を図 10(b), (c), (d) にそれぞれ示す .  $h = 20\text{mm}$  の場合 , A 点と B 点における応答ピークの遅延時間はそれぞれ  $19.45\text{ns}$  ,  $19.56\text{ns}$  である . この時間差  $\Delta t = 0.11\text{ns}$  から距離  $R = 16.5\text{mm}$  が得られ , モデルガンの厚さ  $20\text{mm}$  をほぼ分離できている . 一方 , ACF 分布ではモデルガンの形状を確認できていない .  $19.45\text{ns}$  におけるモデルガンと導体板からの応答振幅の比が  $10\text{dB}$  のため , ACF 分布において設定した  $40\text{dB}$  の振幅範囲では形状が確認できない .  $h = 40\text{mm}$  ,  $60\text{mm}$  の場合は  $19.45\text{ns}$  におけるモデルガンと導体板からの応答振幅の比がそれぞれ  $22.8\text{dB}$  ,



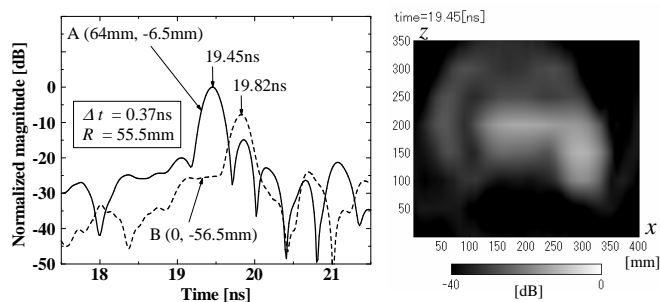
(a) 導体板無し



(b)  $h = 20\text{mm}$



(c)  $h = 40\text{mm}$



(d)  $h = 60\text{mm}$

図 10 A, B 点におけるモデルガンの ACF 応答波形と ACF 分布。

25.3dB のため、概ね形状が確認できたものと考えられる。なお、図 10 のデータ取得間隔は  $\Delta x = 10\text{mm}$ 、 $\Delta z = 50\text{mm}$  であり、このときの測定時間は 152s であった。データ取得間隔を  $\Delta x = 50\text{mm}$ 、 $\Delta z = 50\text{mm}$  と荒くした場合は 46s であり、約 1/3 に測定時間を短縮することができた。

## 5. ま と め

本報告では、まず ACF 応答を用いたイメージングの原

理、及びスプリアス応答の抑制について述べ、送受 APFA の相互結合を利用したイメージング法の有効性を示した。次に、8 素子送受 APFA アレーのスイッチングを用いたアクティブイメージングの高速化について検討し、アンテナを走査する場合の約 1/20 に測定時間を短縮することができた。また、誘電体レンズとアレーを用いたイメージングを行い、導体板の表面に置かれた散乱体（モデルガン）の像を 46s の時間で得られることを示した。

## 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] H. Sato, K. Nakanishi and K. Sawaya, "Experimental Study of Circular-Scan Time-Domain Active Imaging by Using Broadband Antipodal Fermi Antenna," 2006 IEEE AP-S International Symposium, Albuquerque, NM, pp.901-904, Jul. 2006.
- [4] 中西 研二, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, "UWB レーダ用対せき形フェルミアレーアンテナの放射特性," 平成 18 年度電気関係学会東北支部連合大会, 1B-10, 秋田, Aug. 2006.
- [5] 中西 研二, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, "広帯域対せき形フェルミアレーアンテナを用いた散乱導体の位置推定," 電子情報通信学会技術研究報告, AP2006-110, pp.1-6, 福井, Jan. 2007.
- [6] H. Sato, K. Sawaya, "Broadband Active Imaging Method Using Auto-Correlation Pulse Response," International Symposium on Antennas and Propagation, Singapore, 2006.