

## 90 °Hybrid 付 APFA を用いた自己相関イメージングレーダ

工藤 健裕<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: {kudo, ishihara,ino, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

## Autocorrelation Imaging Radar Using APFA with 90 °Hybrid Coupler

Takehiro KUDO<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: {kudo, ishihara,ino, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

### 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を検知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の開発が活発に行われている。

イメージング方式には、送信波を照射して物体からの散乱波を用いるアクティブ方式と物体が放射する熱雑音を検出するパッシブ方式がある。アクティブ型では広帯域を用いる FMCW レーダ方式、及び広帯域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、様々な環境下で使用に耐える装置が期待できる。

広帯域を利用するアクティブイメージングレーダは、原理的に送信パルスと受信パルスの到達時間差を利用して位置を同定し、受信パルスの到達時間におけるパルス振幅により画像を得るものである。しかしながら、例えば人が衣服下に危険物を隠し持っている場合、危険物からの散乱波と、人体表面からの散乱波を空間および時間的に分離する必要があるが、散乱波は干渉や多重反射等の複雑な伝搬過程を経て受信されるため、危険物からの散乱成分のみを分離することは容易ではない。また、人

体に向けて電磁波を照射することに対する抵抗感も無視できない。

本報告では、誘電体レンズと 90 °Hybrid、対せき形フェルミアンテナを用いて自己相関イメージングレーダを構成し、6-18 GHz の広帯域のマイクロ波を用いて危険物を模擬した散乱体を撮像した結果を述べる。

### 2. アンテナ構造と 90 °Hybrid の基本特性

#### 2.1 APFA の構造

イメージングで用いた APFA の構造を図 1 に示す。また、構造パラメータを表 1 に示す。設計中心周波数を 10 GHz とし、周波数帯域 6 - 18 GHz に対して設計を行っ

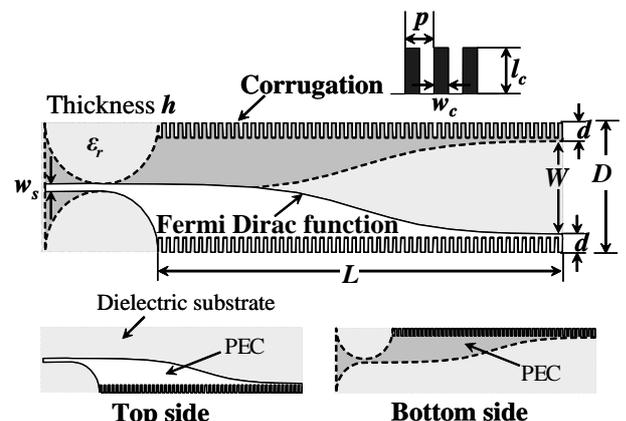


図 1 APFA の構造

表 1 構造パラメータ.

Unit	[mm]	$[\lambda_0]$ @10 GHz
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	0.026
Length of corrugation $l_c$	5	0.17
Width of corrugation $w_c$	0.8	0.026
Pitch of corrugation $p$	1.6	0.053
Width of Slot line $w_s$	2	0.067

た.  $xz$  面が  $E$  面,  $xy$  面が  $H$  面である. マイクロストリップ線路からテーパバランを介して平行線路に変換し, テーパ部に給電している. テーパ形状はフェルミ関数

$$f(x) = \frac{a}{1 + e^{-b(x-c)}} \quad (1)$$

で与える. ここで,  $a, b, c$  はテーパ形状を決定するパラメータである.  $a$  は開口幅  $W$  の半分 ( $W = 2a$ ) であり,  $c$  はフェルミ関数の変曲点の  $x$  座標,  $b$  は変曲点位置における接線の傾きを与えるパラメータである.

なお, 設計中心周波数 10 GHz において動作利得は 14 dBi 程度, 帯域 6 - 18 GHz において VSWR は 2 以下となるように設計した.

## 2.2 90° Hybrid の基本特性

90° Hybrid の動作原理を図 2 に示す. Port1 に入力された RF 信号は Hybrid 回路内部で等分配され, Port2,3 から 90° の位相差をもって出力される. その際, Port4 は電気的には接続されているが導体は分離しているため出力は現れない. 90° Hybrid は上下/左右対称な構造をしている為, Port2 へ信号を入力した場合, Port1,4 に出力が現れ, Port3 は絶縁される. 従来, イメージング実験には送受信それぞれにアンテナを用意していたが, アンテナの素子間相互結合による影響で放射パターンがチルトしてしまう問題があった. 90° Hybrid を使用することで, 送受 RF 信号を分離でき, アンテナ 1 素子で測定が可能となる.

図 3 に実際に使用した市販の 90° Hybrid (Agilent 87310B) の反射損失, 挿入損失を示す. 帯域 6 - 18 GHz において, 反射損失は 17dB, 挿入損失は 4dB 程度となっている.

次に図 4 に示すようなベクトルネットワークアナライザ (VNA) による Pulse 応答の測定系を構成し, Port3 端部を Load, Open, Short した場合の  $S_{41}$ , すなわち入出力 (Port 1,4) 間結合の周波数特性, Pulse 応答特性を測定した. 周波数応答を図 5 に, Pulse 応答特性を図 6 に示す. Port3 を Open, Short とすることで特に 12GHz 付近において, Load の場合に比べ, Open の場合は Port1,4 間の結合が最大で 12dB 程度大きくなっている事が分か

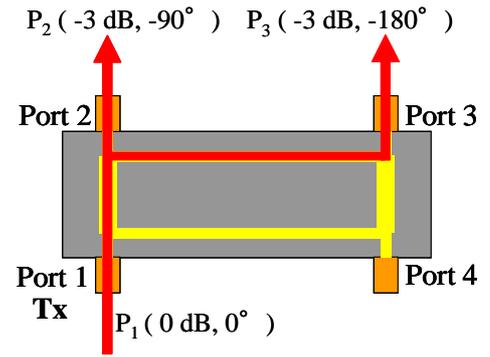
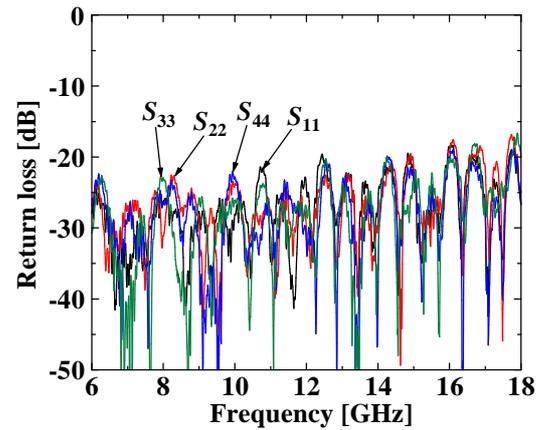
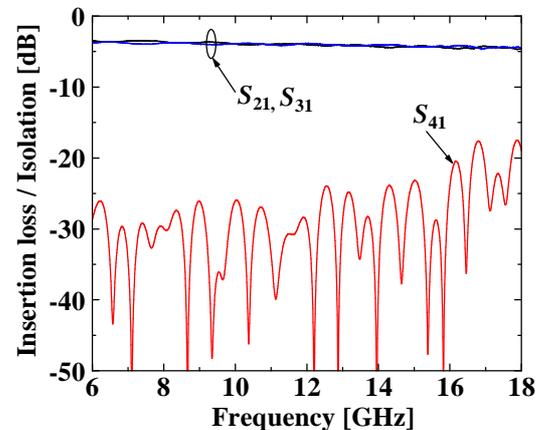


図 2 90° Hybrid Coupler



(a) 反射損失



(b) 挿入損失

図 3 基本特性

る. そのときの Pulse 応答特性を見てみると, Port3 を Open とした場合で最も単峰性な Pulse が得られている. この Port1,4 間の結合 Pulse と散乱体からの反射 Pulse の相関をとる手法が ACF 応答であり, 本研究ではこの Port 間の結合をいかに大きく取るかが重要となるが, それは高々 -8dB 程度である.

本報告では Port3 を Load, Open, Short とした 3 通りのパターンについてイメージングを行う.

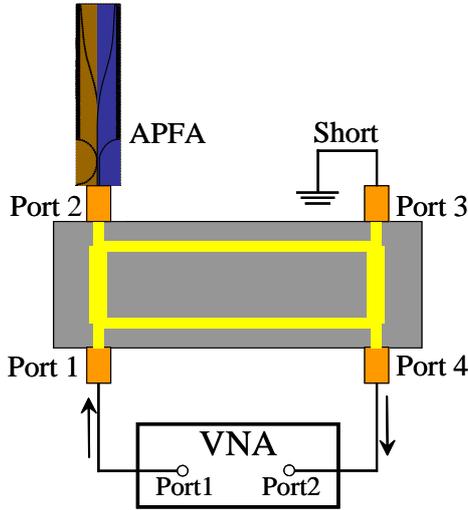


図 4 90°Hybrid 付アンテナと Pulse 応答の測定系

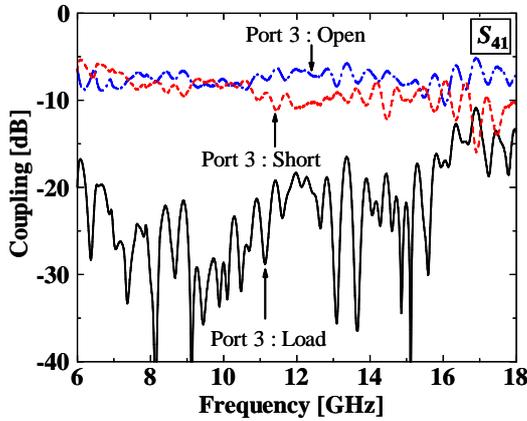


図 5 Port1,4 間結合の周波数特性

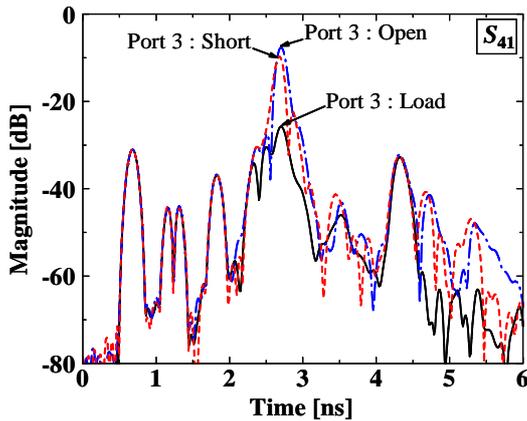


図 6 Port1,4 間結合の Pulse 応答特性

### 3. 自己相関イメージングレーダ

#### 3.1 ACF 応答の適用法

本研究では、イメージングを従来手法の Pulse 応答  $f(t)$  によるものではなく、ACF 応答  $C(t)$  により行う。  $C(t)$  は  $f(t)$  の畳み込み、またはパワースペクトルの逆フーリエ変換として以下のように定義される。

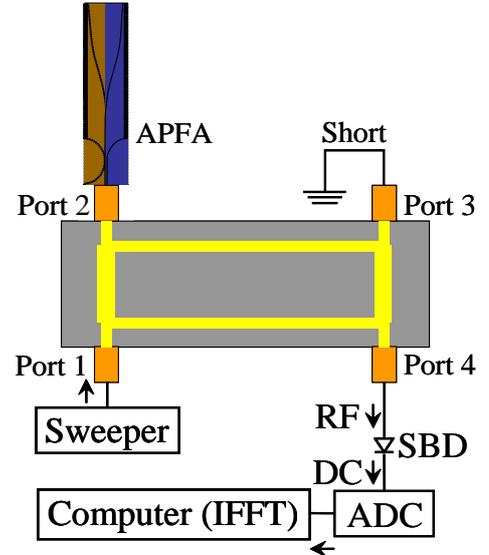


図 7 90°Hybrid 付アンテナと ACF 応答の測定系

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

実際に ACF 応答を得る測定系を図 7 に示す。図 4 に示すように、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて得られた広帯域に亘る複素透過係数  $S_{21}$  を逆フーリエ変換して Pulse 応答  $f(t)$  を求め、散乱体からの散乱波 Pulse を利用してイメージを得る方法が一般的であるが、本報告では複素透過係数を 2 乗したものの  $|S_{21}|^2$ 、すなわち振幅のみを用いてパワースペクトル  $|F(\omega)|^2$  を求め、それを逆フーリエ変換することにより得られる ACF 応答  $C(t)$  を求めイメージを得る方法を用いる。本手法は振幅のみを計測するだけで散乱波の遅延時間が得られるため、装置の低コスト化を図ることができる。例えば、図 7 に示すように周波数掃引器、同軸検波器、AD コンバータを用いた測定系が可能であり [6]、広帯域に亘る複素振幅の測定に必要な広帯域ミキサ、広帯域移相器、広帯域 RF スイッチ等が不要のため、システムの簡略化・低コスト化が期待できる。

#### 3.2 測定系

測定系を図 8 に示す。距離  $a$  だけ離れた位置に立つ人、および人が所持する危険物のアクティブイメージングを考える。イメージングレーダは、口径  $D$ 、厚さ  $H$  の誘電体レンズ、およびレンズの像面に配置されたアンテナで構成される。誘電体レンズは、 $D = 500 \text{ mm}$ 、 $H = 100 \text{ mm}$ 、比誘電率 2.34 の高密度ポリエチレンを用いた。レンズの倍率は等倍とし、 $a = 1400 \text{ mm}$ 、 $b = 1370 \text{ mm}$  とする。観測領域は像面 ( $y = 0$ ) における  $xz$  面  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  とし、物体面 ( $y = a + H + b = 2870 \text{ mm}$ ) 付近の視野  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  を撮像する。

像面におけるアンテナ走査範囲を図 9 に示す。 $x, z$  方

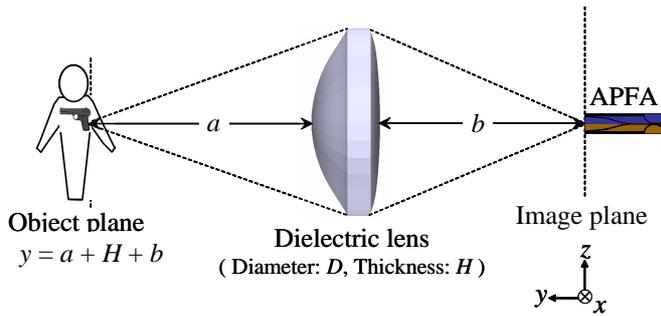


図8 測定系

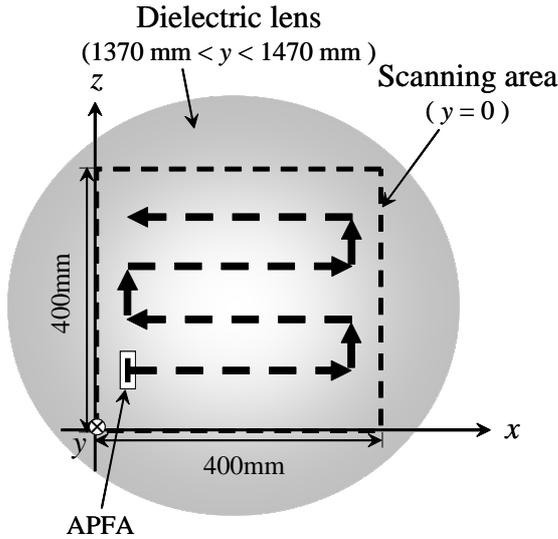


図9 像面におけるアンテナ走査範囲

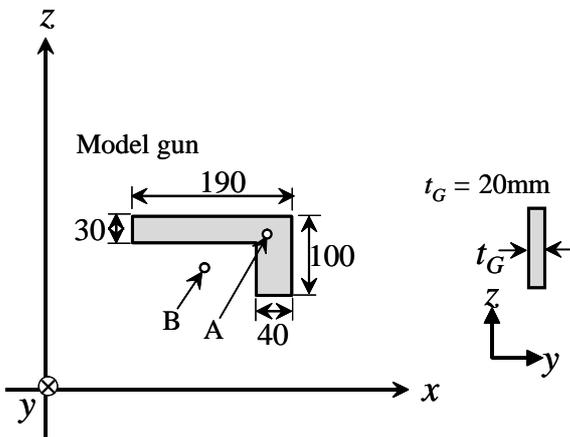
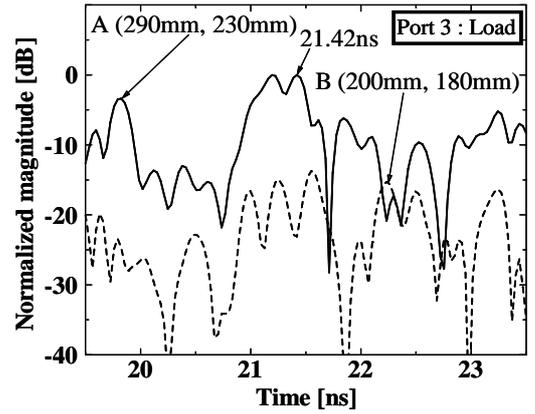


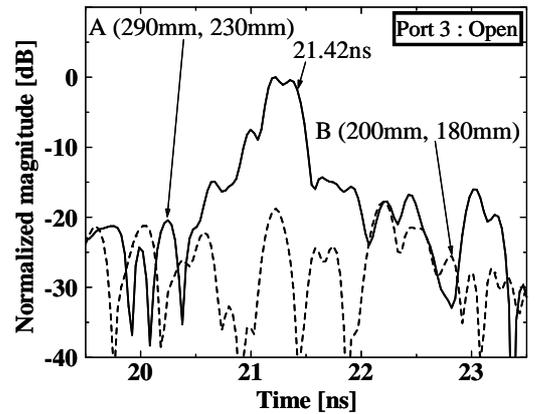
図10 モデルガンの外形

向を APFA でそれぞれ 10 mm ピッチで平面走査し、 $41 \times 41$  点の測定を行った。帯域 6-18 GHz の周波数掃引点数を 1600 とした場合、本構成を用いた撮像時間は約 20 分であった。

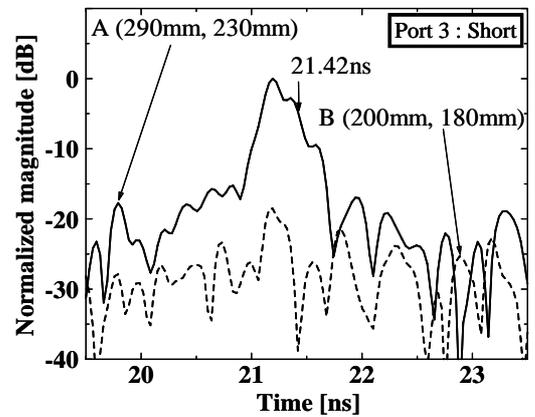
危険物を模擬する散乱体として、図 10 に示す構造のモデルガンを用いた。モデルガンは厚さ 20 mm の発泡材にアルミ箔を貼り付けて作製した。モデルガンの表面が像面から 2870 mm 程度となるように設置し、その背後には



(a) Port3 : Load の ACF 応答波形



(b) Port3 : Open の ACF 応答波形



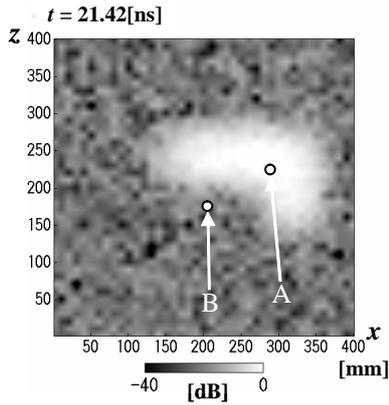
(c) Port3 : Short の ACF 応答波形

図11 A,B点における散乱体の ACF 応答波形

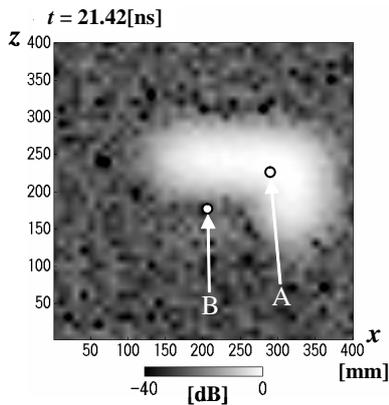
モデルガンの位置を固定させるため、発泡ブロック材をモデルガンの裏面に接触するように配置した。

#### 4. 測定結果

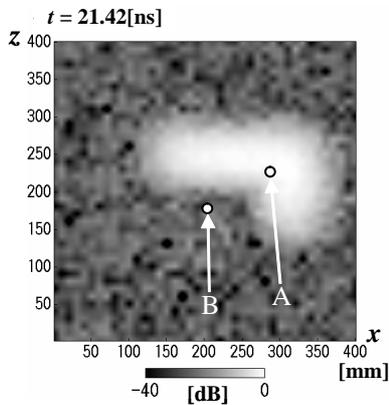
モデルガンからの散乱波強度を比較するため、モデルガン上の観測点 A、および観測点 B における ACF 応答を求めた。また、特徴的な応答時間における ACF 分布を求め、視認性について評価した。



(a) Port3 : Load の ACF 応答分布



(b) Port3 : Open の ACF 応答分布

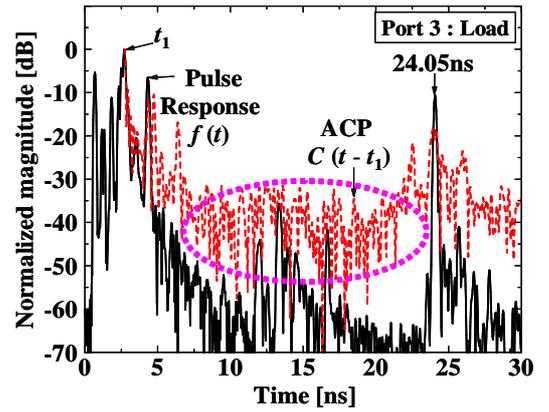


(c) Port3 : Short の ACF 応答分布

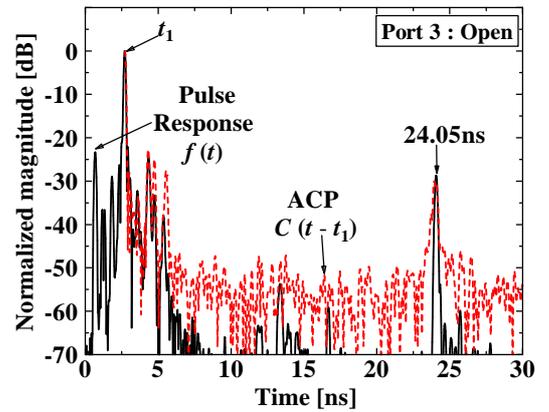
図 12  $t = 21.42$  ns の散乱体の ACF 応答分布

#### 4.1 イメージング結果

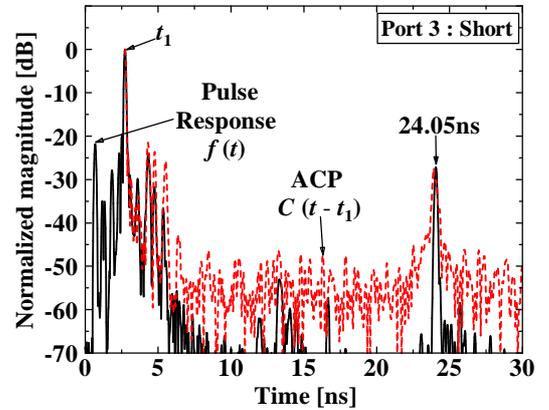
観測点 A, B における ACF 応答を図 11 に示す．振幅は点 A における振幅の最大値で規格化した．点 A における ACF 応答は遅延時間  $t = 21.42$  ns においてピークが観測されている． $t = 21.42$  ns における ACF 分布を図 12 に示す．モデルガンの形状がほぼ確認できている．Port3 が Load の場合において，モデルガンがない点 B の  $t = 21.42$  ns における振幅は -23.1 dB であり，振幅範囲 -40 dB ~ 0 dB において濃淡のある像が得られている．



(a) Port3 : Load の Pulse,ACF 応答波形比較



(b) Port3 : Open の Pulse,ACF 応答波形比較



(c) Port3 : Short の Pulse,ACF 応答波形比較

図 13 Pulse,ACF 応答波形比較

Port3 が Open, Short の場合では,  $t = 21.42$  ns において, 点 A では最大振幅ではないが, 観測点 A, B の振幅比が最大となっており, そのときの振幅比はそれぞれ 37.9dB, 34.1dB と Load の場合に比べ, 振幅比が 10dB 以上大きく, 図 12 から濃淡差のより鮮明なイメージが得られている事が確認できる．

図 13 に VNA のタイムドメイン機能により得られる Pulse 応答  $f(t)$  と ACF 応答  $C(t-t_1)$  を比較した結果を示す．どちらの波形も最大値を 0 dB で規格化しており,

ACF 応答は  $f(t)$  の Port1,4 間結合 Pulse の遅延時間  $t_1 = 2.72$  ns だけずらしている。  $f(t)$  から、  $t_1 = 2.72$  ns で Port1,4 間結合 Pulse、 24.05 ns でモデルガンからの散乱 Pulse が観測されており、  $C(t - t_1)$  においてもほぼ等しい遅延時間で ACF のピークを観測しているが、 Port3 が Load の場合、実際の散乱体からの反射 Pulse ではないスプリアス応答が大きく観測され、散乱波応答との見分けがつかない。しかし、Port3 を Open,Short することにより、スプリアス応答は低減されている。

#### 4.2 スプリアス応答の低減

ここで、Port3 を Open,Short とした場合にスプリアス応答が低減された理由について考察する。式 (2) で表される ACF 応答の定義式について、Pulse 応答  $f(t)$  を散乱体による散乱波として、

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \delta(t - t_l) \quad (3)$$

ここで  $\alpha_l$  と  $t_l$  は、それぞれの散乱波 Pulse 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

$$\begin{aligned} C(t) &= \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \alpha_i \alpha_j \delta(t - t_j + t_i) \\ &= \left( \sum_{l=1}^L \alpha_l^2 \right) \delta(t) \\ &\quad + \alpha_1 \sum_{j=2}^L \alpha_j \delta(t - t_j + t_1) \\ &\quad + \alpha_i \sum_{i=2}^{L-1} \sum_{j=i+1}^L \alpha_j \delta(t - t_j + t_i) \end{aligned} \quad (4)$$

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 Pulse の振幅  $\alpha_1$  が他の Pulse 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 Pulse 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。

散乱体が 1 つ ( $L=2$ ) の場合、

$$\begin{aligned} C(t - t_1) &= (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) \delta(t - t_1) \\ &\quad + \alpha_1 \alpha_2 \delta(t - t_2) \\ &\quad + 0 \end{aligned} \quad (5)$$

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、或いは散乱体 1 つと反射 1 回 ( $L=3$ ) の場合、

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

となり、第 4 項にスプリアス応答が発生する。そのときのスプリアス応答時間は  $t = t_3 - t_2 + t_1$  で求めることができる。この第 4 項には  $t_1$  に対応する  $\alpha_1$  が含まれていないため、Port1,4 間結合を強めることで  $\alpha_1$  を大きくし、相対的にスプリアス応答が低減できたことが分かる。

## 5. ま と め

90 °Hybrid 付 APFA で自己相関イメージングレーダを構成し、平面走査によるイメージングを行った結果、散乱体 (モデルガン) の形状を確認することができた。また、パワースペクトルを逆フーリエ変換することで、位相が分からなくても、散乱波応答の遅延時間が得られる事を確認した。その際、Port3 端部を Open,Short する事により Port1,4 間の結合を強め、より大きな結合 Pulse を得て、スプリアス応答を低減し、振幅情報のみでイメージングできる事を示した。

## 謝 辞

本研究の一部は文部科学省安全・安心科学技術研究プロジェクトの助成を得て行われた。

## 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.