

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose



桑原 義彦 (Yoshihiko KUWAHARA, Dr. Eng.)

静岡大学大学院工学研究科電気電子専攻教授

(Graduate School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Professor, Shizuoka University)

IEEE 電子情報通信学会 会員

受賞：1998, 1999年 電波功績賞 1989年 防衛装備協会賞

著書：Design of dielectric lens antennas by multi-objective optimization, Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications, (Chap.18) ISBN 978-953-7619-66-4 2010年
「MATLAB による通信情報工学」科学技術出版 2007年
「電磁解析シミュレータ IE3D によるアンテナの電磁界解析」トリケップス 2003年
ミマツデータシステム編「マイクロ波・ミリ波用アンテナと周辺技術」ミマツデータシステム(分担執筆) pp.69-113 1993年

研究専門分野：アンテナ 電波伝搬 電磁波工学

あらまし UWB (Ultra Wide Band) レーダを使ったマイクロ波イメージングには、対象物に電磁波を放射し反射像を描くアクティブイメージングと、対象物が発する電磁波を捕らえ放射像を描くパッシブイメージングがある。本稿では、第1に空港で用いられるセキュリティシステムや不振郵便物の内容物の検出を想定したアクティブイメージングについて紹介する。一般にこれらの用途には X 線装置が用いられている。X 線に対するマイクロ波の優位性は、安全であること、非金属の物体が検出できること、プライバシーの侵害が小さいことである。第2に、マイクロ波機器の開発設計をサポートするマイクロ波装置からの不要放射の可視化技術を紹介する。不要放射の可視化のため、プローブ操作とスペクトルアナライザを組み合わせたシステムが実用化されている。この種の装置に対するマイクロ波イメージングの優位性は、プローブを対象に近づける必要が無く立体回路に対応できること、微弱放射でも使用可能なことである。

1. はじめに

情報化社会の進展に伴い、多様な無線機器、パーソナルコンピュータ、デジタル信号処理を使った機器が開発されている。これらの機器で扱う周波数は年々高くなり、外形も小さくなっている。また、回路の高速化に伴い使用電力も増大している。このため回路基板からの電磁放射が起りやすくなり、他の回路基板への妨害、基板内の正帰還による発振等が発生する。これらの問題の解決は、熟練した設計技術者の経験と勘に頼っているのが現状で、開発期間の短縮化を阻む大きな課題となっている。回路基板からの電磁放射が可視化できれば、不具合原因の究明やその対策が容易になる。

本研究の第1の目的はUHFやマイクロ波帯の送受信回路・アンテナ、高速デジタル回路、CPU、DSPなどが実装された回路基板やユニットから放射されるさまざまな周波数の電磁波分布を可視化できる基礎技術を開発し、EMI (Electro Magnetic Interference) 対策が容易にできる開発環境を提供することである。磁界プローブを機械走査し、スペクトルアナライザで受信信号レベルを測定し、基板からの放射を可視化する装置が市販されている。しかし、磁界プローブの感度が低いので回路基板に磁界プローブを近接させる必要があり、3次元配置されたユニットには対応が困難である。本稿ではアレーアンテナの共相焦点を3次元走査するコンフォーカルアレー**1 技術を適用し、回路基板にプローブを近づけることなく3次元空間の電磁界分布を可視化できる技術を紹介する。可視化のアルゴリズムはUWB レーダを使った初期乳がん検診⁽¹⁾で検討されている DAS (Delay and Sum)、MIST (Microwave Imaging via Space and Time)⁽²⁾、MAMI (Multistatic Adaptive Microwave Imaging)⁽³⁾ である。

これらのマイクロ波イメージングのアルゴリズムはセキュリティ分野にも有効である。2001年9月に米国で発生したテロ事件をきっかけに、空港でのセキュリティチェックは厳しさを増している。また、地下鉄サリン事件や、世界の治安の不安定化をきっかけに、不審な荷物、郵便物に対する注意が常に喚起されている。セキュリティシステムにはX線装置が用いられること

**1 各アンテナから焦点までの伝播長差を補正する位相をアンテナ素子に与えること

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

が多いが、非金属の物体を検出し難く、被曝の問題がある。欧米の一部の空港にはミリ波イメージング装置が置かれているが、高価であることに加え、体の線が明瞭に出てしまうなどプライバシーの侵害の問題が指摘されている。

本研究の第 2 の目的は UWB レーダを使ったマイクロ波イメージングにより、セキュリティ用のイメージングシステムを実現することである。所要の解像度を UWB による高距離分解能とコンフォーカルアレーによるビームフォーミングによって実現する。マイクロ波イメージングでは、UWB パルス（インパルス）を多数の方向から照射し、対象物からの反射波を 1 つ以上のアンテナで受信する。対象物の誘電率や導電率が異なると散乱電力も変化するので、マイクロ波イメージングではプラスチックや液体の検出も可能である。インパルス応答をデジタル信号処理することは困難なので、インパルスの代わりに周波数掃引信号を用いることが多い⁽⁴⁾。照射電力は 10mW 以下と携帯電話の 1/100 以下で安全性も高い。

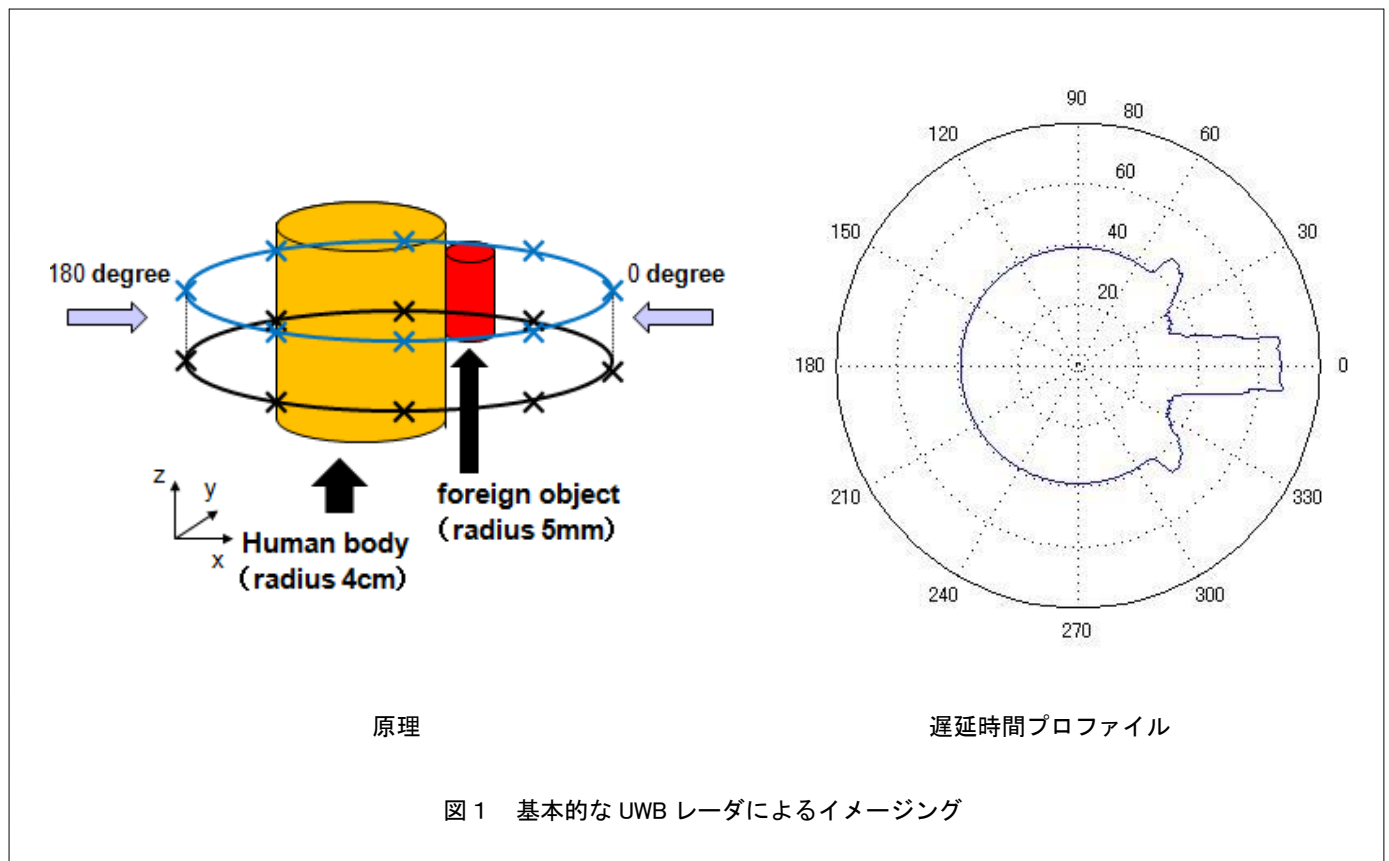
2. マイクロ波イメージングの原理

2.1 遅延プロファイルの描画

図 1 に示すように、×印の位置にある送信アンテナから対象物に短パルスを照射する。撮像対象からの反射波を同じアンテナで受信し、送受信パルス間の遅延時間を測定する。送受信方向を順次変えて遅延時間を測定し遅延時間プロファイルを描くと、対象物の物理的なプロファイルを描くことができる。図 1 の右の図は人（比誘電率 48：筋肉を想定）が身につけたメタノール（比誘電率 18.7）入りのペットボトルを想定したスケールモデルでのイメージングのシミュレーションの例である。人の胴を直径 4cm、ペットボトルを直径 5mm の円柱で模擬している。人が身につけた異物は UWB レーダの遅延プロファイル測定で十分検知できる。

2.2 DAS

図 2 に DAS アルゴリズムを用いたイメージング原理を示す。アレーアンテナを撮像対象に対向させ、各アンテナから順次パルスを送信し、散乱応答を同じア



マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

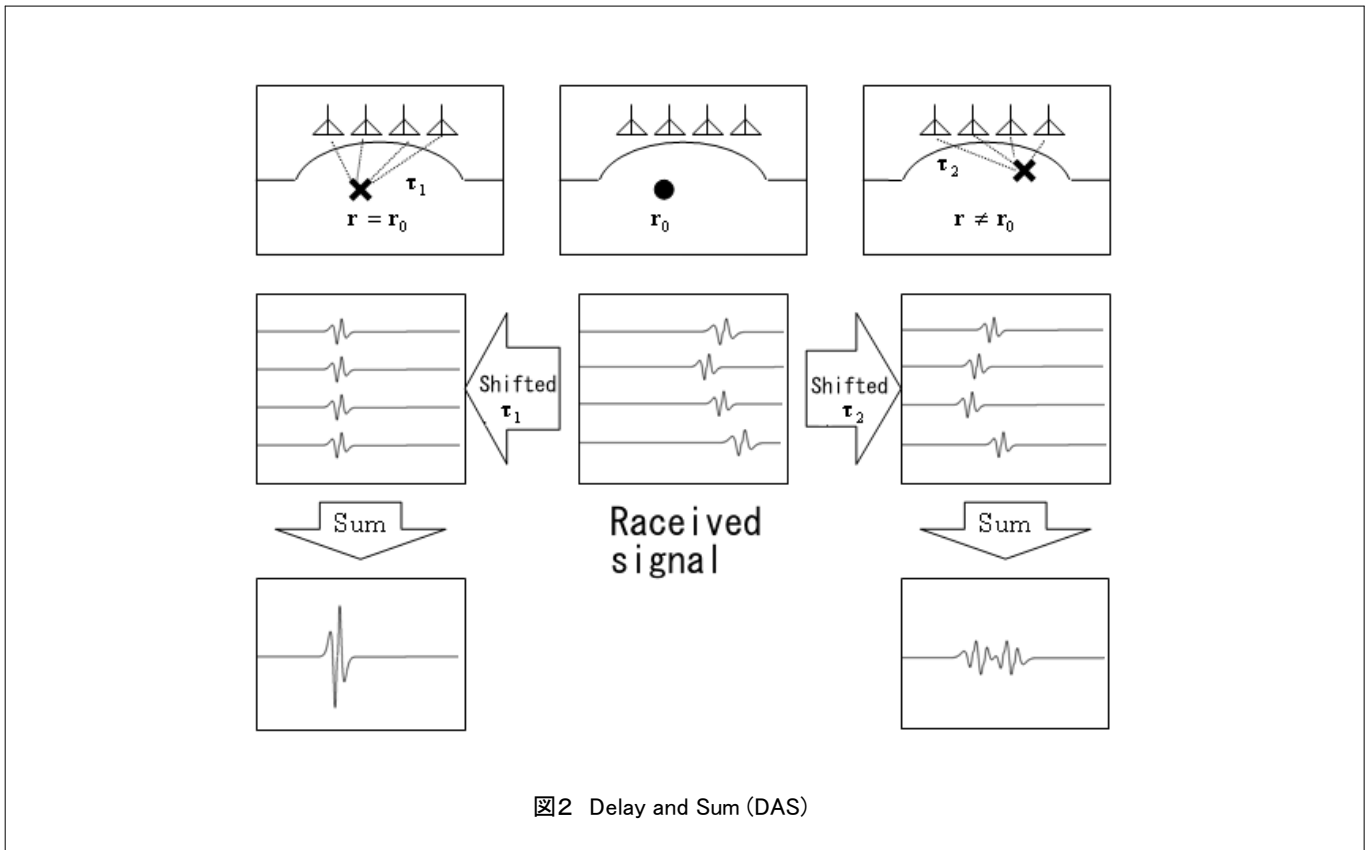


図2 Delay and Sum (DAS)

ンテナで受信する。イメージング範囲の任意の1点に焦点を設定し、アンテナからの距離に対応した伝搬遅延を算出し、応答を時間シフトする。アクティブイメージングの場合、伝播遅延は各アンテナと設定ピクセル間の往復、パッシブイメージングの場合、片道の伝播時間となる。伝搬時間は撮像部位の平均的な伝播速度から推定する。その焦点の近傍に散乱源（パッシブイメージングの場合は放射源）があるなら、各アンテナの受信応答のタイミングが一致し、総和をとると大きな出力が得られる。その焦点に散乱源（放射源）がないなら、受信応答の総和をとっても、大きな出力は得られない。焦点を撮像空間内で順次設定し、受信応答の総和を計算し、受信応答電力の分布図を作成する。

2.3 MIST

MIST ビームフォーミングを用いたイメージングアルゴリズムを図3に示す。 $x_i[l]$ ($i=1, \dots, J$, $l=1, \dots, L$) は i 番目のアンテナで受信された受信信号で、 l は離散時間番号を表す。 M は素子数、 L は時間サンプル数である。

最初に、各アンテナで受信した時系列の受信信号を、

撮像空間内の任意の点で設定した焦点とアンテナ間距離に応じて時間シフトする。次に、方形窓を掛けることによって設定した焦点での伝搬遅延より前にあるクラッタをより除く。そして、離散フーリエ変換(DFT)により時系列信号を周波数領域に変換し、次の(1)式の重みを乗じて周波数ごとに総和をとる。

$$w_i[l] = \frac{I(\omega_l) \hat{S}_{ii}(r_0, \omega_l) e^{j\omega_l \tau_0 T_s}}{|I(\omega_l) \hat{S}_{ii}(r_0, \omega_l)| \left(1 + |I(\omega_l)| \sum_{i=1}^M \hat{S}_{ii}(r_0, \omega_l) \right)} \quad (1)$$

ここで $I(\omega_l)$ は周波数 ω_l ($l=1, \dots, L$) における送信信号のスペクトル、 $\hat{S}_{ii}(r_0, \omega_l)$ は i 番目のアンテナの、ピクセル位置 r_0 での時間シフトを施した受信応答、 $\tau_0 = (N-1)/2$ はビームフォーマの平均伝搬遅延である。さらに離散フーリエ逆変換(IDFT)により再び時系列信号に戻し、 τ_0 を中心とし、送信パルス幅と同じ幅の窓関数を乗じて得たアレー出力信号の電力を求める。以上の操作を撮像空間内で焦点を順次設定して繰り返す。MIST ビームフォーミングは広帯域信号と撮像空

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

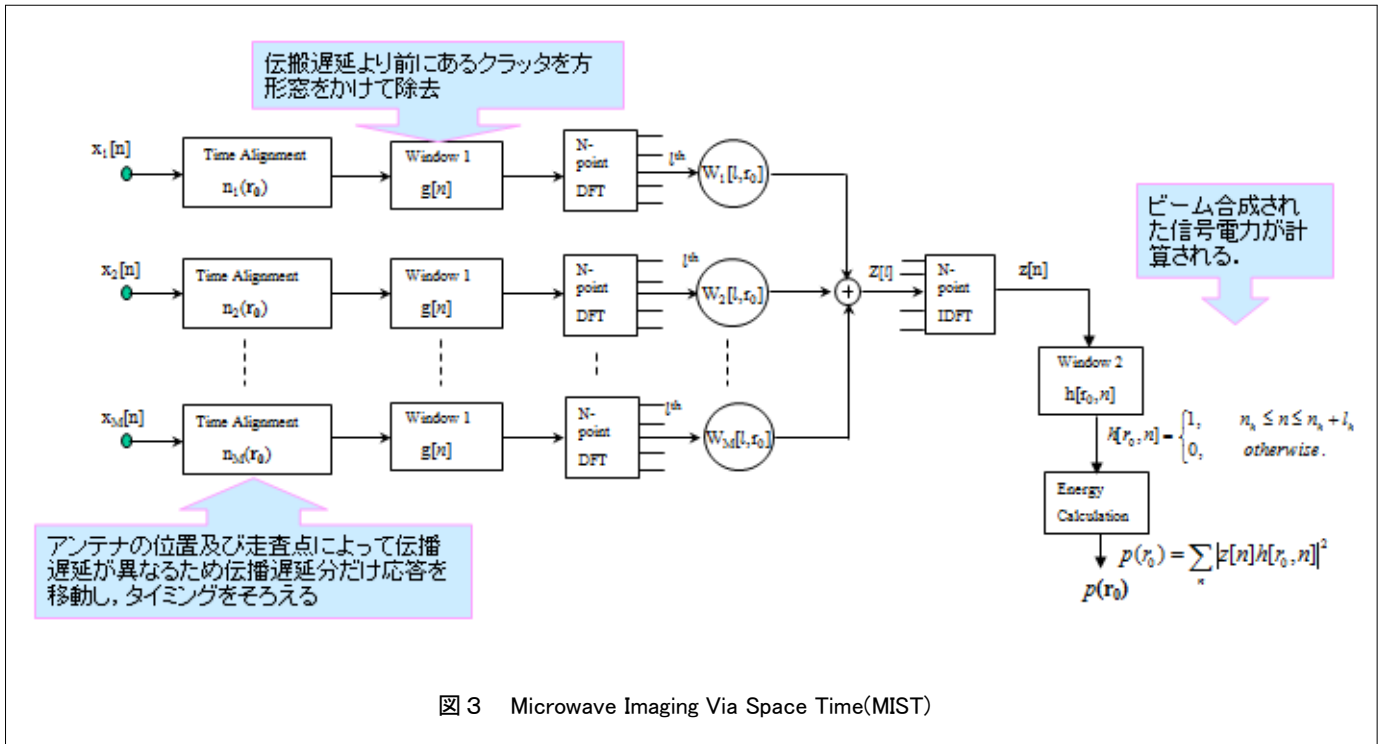


図3 Microwave Imaging Via Space Time(MIST)

間の周波数依存性を考慮した時空間ビームフォーミングである。

2.4 MAMI

DAS や MIST では、電波源のパルス幅を短く（使用する帯域を広く）しないと近接した複数の電波源を分離することができない。使用する帯域を広くしなくても複数の近接した散乱源や放射源を分離するため、アダプティブアンテナのヌルステアリング⁽⁵⁾を導入し、指定した焦点以外の受信電力を最小化するように指向性合成して散乱電力や放射電力分布図を作成する手法が MAMI である。また、MAMI は最大化問題を解いて、時系列の受信信号の相関行列から未知のステアリングベクトル^{**2}を推定している。これにより撮像空間が不均質であってもステアリングベクトルを推定することができる。

M 素子のアレーアンテナで受信した信号ベクトル $\mathbf{s}(t)$ は次のようにあらわされる。

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{a}_s \mathbf{s}(t) + \mathbf{e}_s(t) \quad (2)$$

\mathbf{a}_s はステアリングベクトルで、図 2 の時間整列、距離減衰補正をした信号を扱うものとすれば概ね $\mathbf{1}_{M \times 1}$ に

等しい。 $\mathbf{e}_s(t)$ は雑音や反射などの不要信号、 $\mathbf{s}(t)$ は電波源あるいは散乱体からの信号である。真の \mathbf{a}_s はロバスト Capon 法⁽⁶⁾を用いると次の式から求められる。

$$\max_{\tilde{\sigma}^2, \mathbf{a}_s} \tilde{\sigma}^2 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{R}_s - \tilde{\sigma}^2 \mathbf{a}_s \mathbf{a}_s^T \geq 0, \|\mathbf{a}_s - \bar{\mathbf{a}}\|^2 \leq \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} s^2(t)$ は電波源の平均電力（N はスナップショット数）、 ε はユーザパラメータ、 $\bar{\mathbf{a}} = \mathbf{1}_{M \times 1}$ で、 \mathbf{R}_s は、

$$\mathbf{R}_s = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} \mathbf{s}(t) \mathbf{s}^T(t) \quad (4)$$

で表される共分散行列である。スケージングのアンビグニティを避けるため $\|\mathbf{a}_s\| = M$ のノルム制約を課すと、アダプティブアンテナのウェイトは次の式で求められる。

$$\mathbf{w} = \frac{\|\mathbf{a}_s\|}{\sqrt{M}} \frac{(\mathbf{R}_s + \mathbf{I}/\nu)^{-1} \bar{\mathbf{a}}}{\bar{\mathbf{a}}^T (\mathbf{R}_s + \mathbf{I}/\nu)^{-1} \mathbf{R}_s (\mathbf{R}_s + \mathbf{I}/\nu)^{-1} \bar{\mathbf{a}}} \quad (5)$$

**2 アレーアンテナの各素子の方向依存特性

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

ここで ν はラグランジュの未定係数である。焦点 \mathbf{r}_0 での受信電力は

$$p(\mathbf{r}_0) = \sum_{t=0}^{N-1} (\mathbf{w}^T \mathbf{s}(t)) \quad (6)$$

である。ピクセルを移動しながら(3)~(6)の処理を繰り返し、受信電力分布図を作成する。

3. 計算機シミュレーション

本研究では、(1)人が身に着けた異物、(2)箱の中にある異物、(3)プリント基板からの不要放射の可視化についてシミュレーションしている。本稿では紙面の制約から(2)、(3)の結果について紹介する。いずれのシミュレーションにおいても、対象物からの後方散乱波または放射波は FDTD 法⁽⁷⁾ によって求めている。

3.1 箱の中の異物の可視化

(1) シミュレーション条件

図4にシミュレーションモデル、シミュレーション条件を表1、撮像物の比誘電率を表2に示す。小包の場合、内容物はスタイロパックや気泡シートに包まれ、段ボール箱に入れられることが多い。これらの梱包材

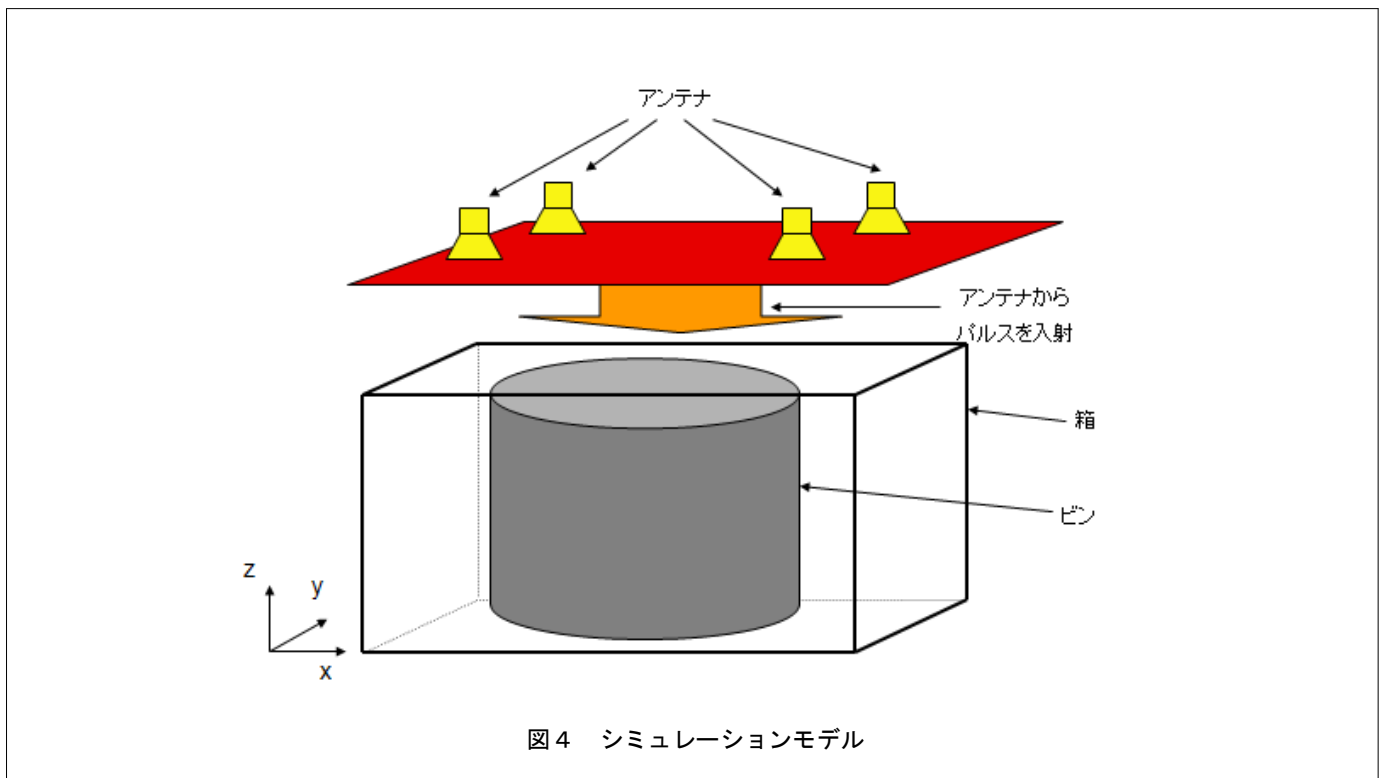
は比誘電率が1に近い。箱からの不要反射を除去するため、平均化処理によるアーチファクト除去を行う。危険物のうち比較的比誘電率が低い物質がガソリン($\epsilon_r=2$)である。また、比較の対象としてエチルアルコール($\epsilon_r=24$)を考える。

(2) FDTD による伝搬シミュレーション

図5は各アンテナで受信される後方散乱応答を示す。撮像対象はガソリンである。図5(a)は箱内部を空気とした時、図5(b)は比誘電率1.2の誘電体で満たした時の応答である。この場合誘電体中の伝搬速度は遅くなる。

(3) 撮像対象の誘電率による違い

箱内部を空気とした時の各アルゴリズムを使った場合のイメージングの結果を図6(a)に示す。DAS 及び MIST はガソリン、アルコールともよくイメージングされている。MAMI はスプリアスが発生しイメージングできていない。これはユーザパラメータ ϵ が不適切でラグランジュの未定乗数 ν が適切に求められなかったためと考えられる。



マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

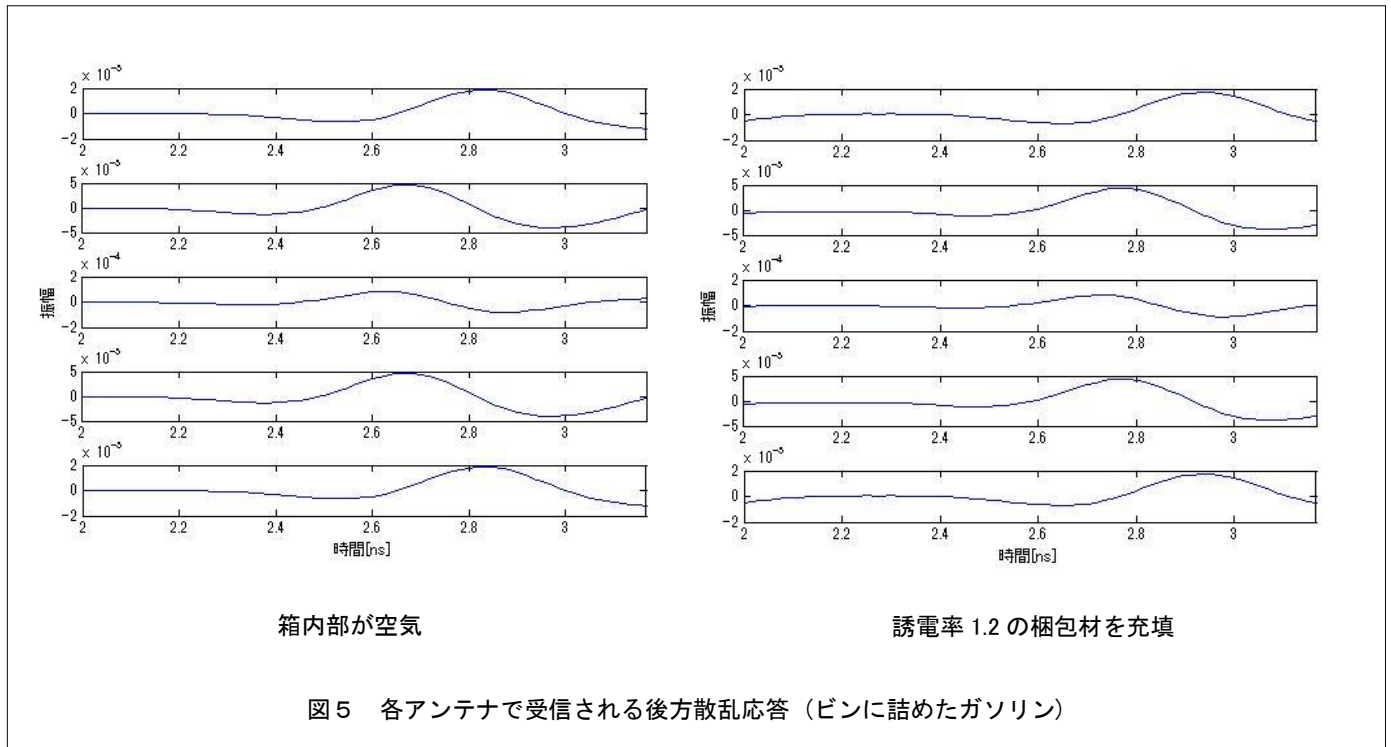
Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

表 1 シミュレーション条件

FDTD セル	1mm
アンテナ開口	4cm×4cm
アンテナ素子数	5×5(25 素子)
送信パルス	ガウシアンパルス
撮像サイズ	8cm×8cm×8cm
瓶のサイズ	半径 1cm 高さ 2cm 厚さ 2mm
箱とアンテナ面との距離	15mm
箱と瓶との距離	5mm
周波数帯域	4-9GHz

表 2 各物質の比誘電率
(導電率は全て 0)

Type	誘電率
空気	1
箱	1.2
ガラス瓶	7
ガソリン	2
エチルアルコール	24



(4) 梱包材の影響

箱内部を比誘電率 1.2 の梱包材で充填し、各アルゴリズムを使った場合のイメージングの結果を図 6 (b) に示す。図 6 (a) に比較しスプリアスは目立つようになるが、異物があることはわかる。また、梱包材の比誘電率を 1.2 として伝搬遅延を考慮した場合のイメージングの結果を図 6 (c) に示す。比誘電率が梱包材と一致すると画像がクリアになるので、比誘電率を変化させながらイメージングを試みることは有効と思われる。

(5) 帯域の影響

UWB パルスをそのままデジタル化して信号処理することはできないので、実際には周波数掃引信号により撮像する。図 6 (d) は周波数帯域を 4-6.5GHz にした場合のイメージングの結果である。DAS は周囲に偽像が発生するが、MIST は影響をあまり受けない。

(6) アンテナアレイ規模の影響

図 6 (e) はアンテナアレイの開口面積を半分にした時のイメージングの結果である。DAS と MIST は撮像

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

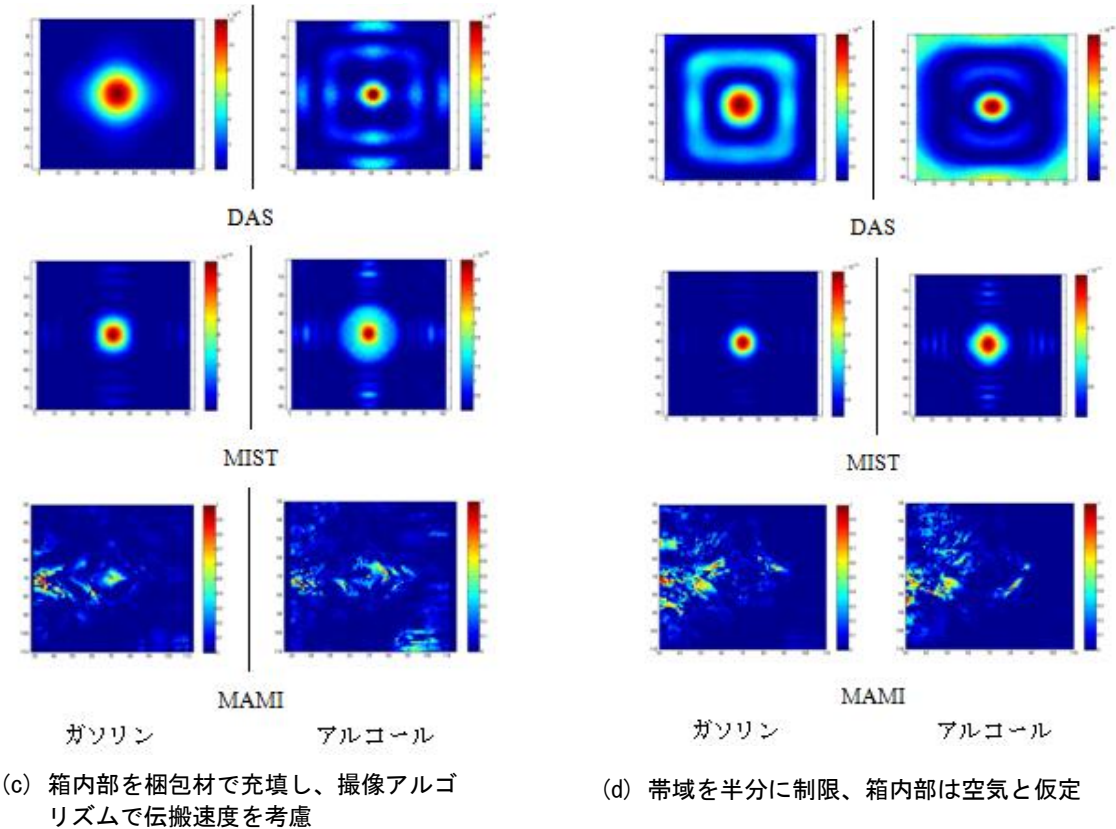
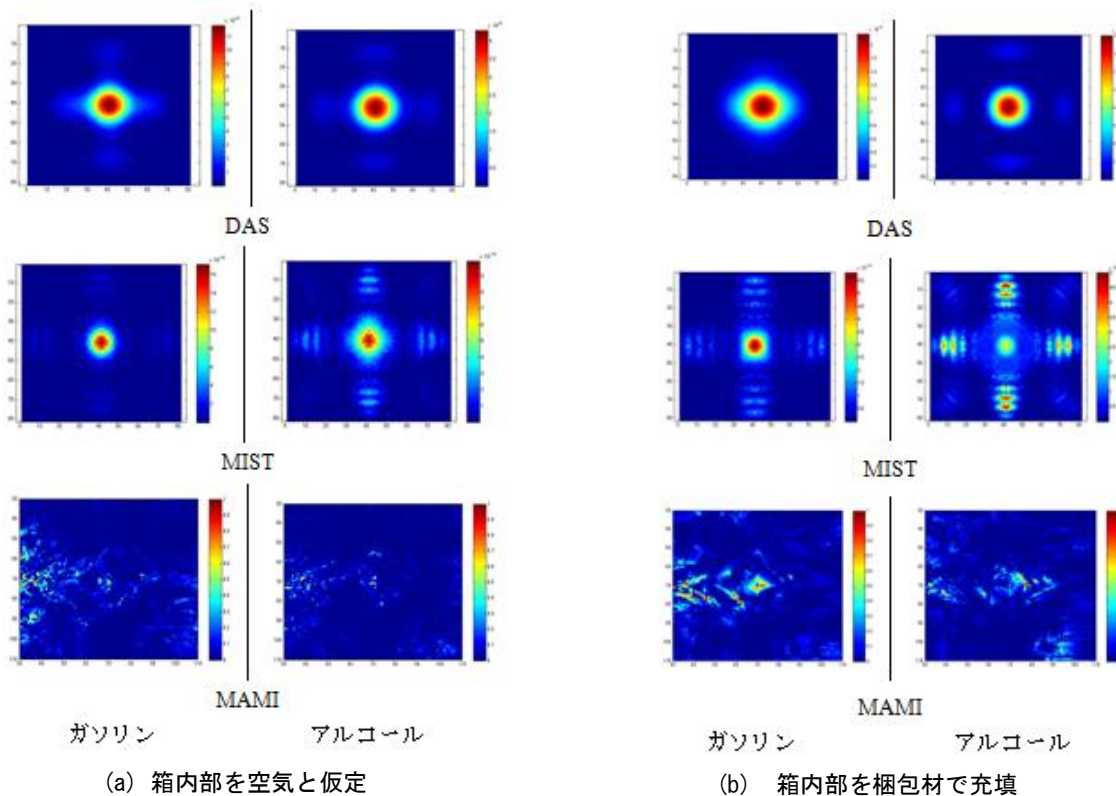
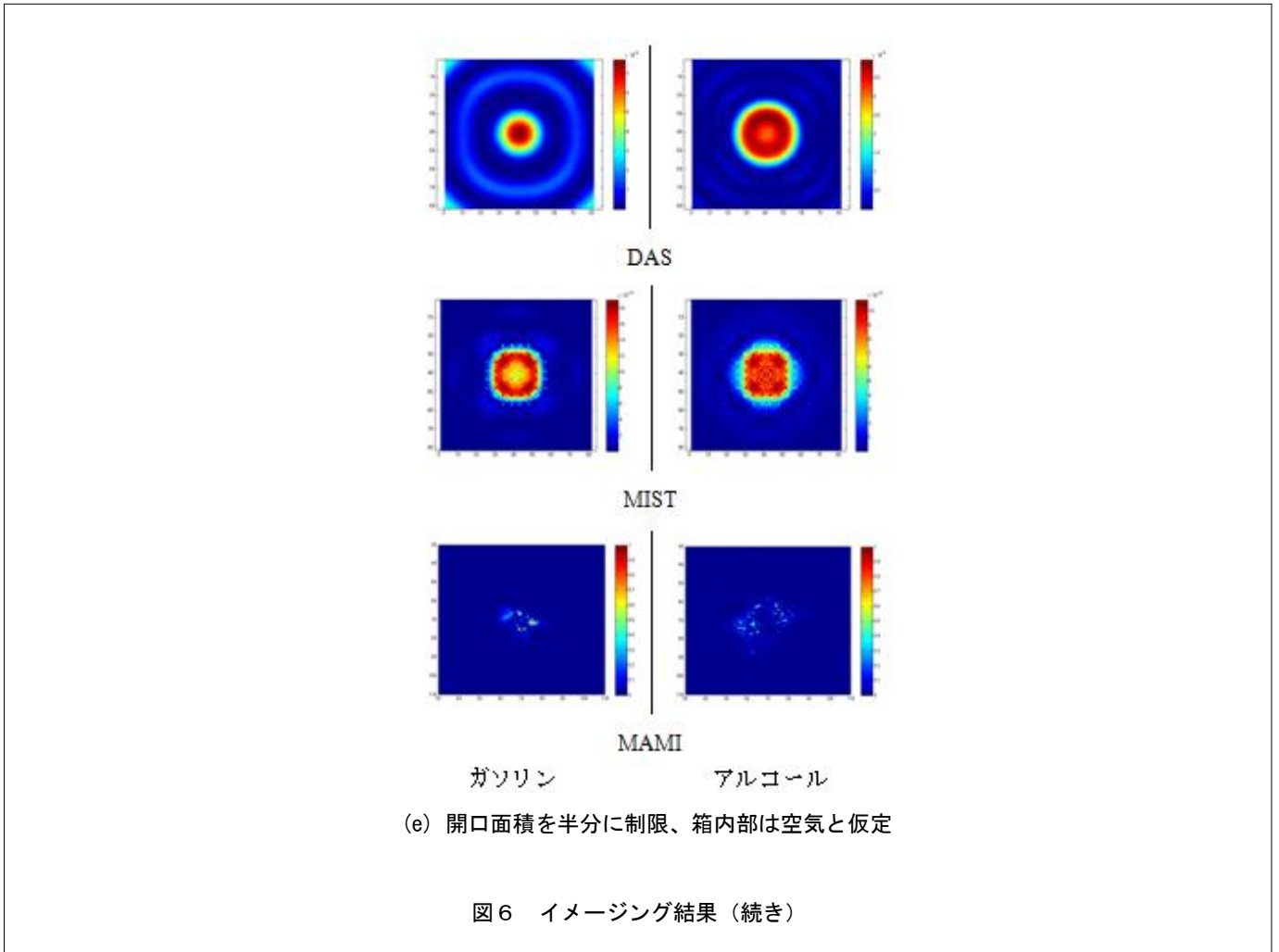


図6 イメージング結果 (続く)

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose



対象が大きく見える。MAMIは瓶がある付近に輝点が集まるようになる。

これらのシミュレーション結果により、帯域が確保されれば DAS で十分なイメージングが可能であることがわかる。

3.2 プリント基板からの不要放射のイメージング

図7に示すように、マイクロストリップ線路を伝播する信号からの不要放射を上部においた平面アレーで受信するモデルを考える。白色雑音を模擬するため、図7に示すパルス波をストリップ線路に入力した。平面アレーの各素子の受信信号はFDTD法の格子点で観測される電磁界を使用した。そのほかのシミュレーション条件を表3に示す。ストリップ線路の折れ曲がり部分から放射する電磁波を2.2~2.4節で説明した

3つのアルゴリズムを使ってイメージングした。結果を図8に示す。折れ曲がり線路が単独にある場合、提案する3つの手法のいずれでも折れ曲がり部分からの放射を、位置誤差10mm程度でイメージングできる。しかし、折れ曲がり部分が近接する場合、MAMIだけが分離してイメージング可能である。

4. 実験

4.1 人が身につけた異物のイメージング

(1) 実験システム

簡単なファントムを用い、人が身につけた異物をUWBレーダの遅延プロファイル処理によってイメージングする実験を行った。図9に実験システムを示す。人体は直径3.6cm、高さ15cmのポリエチレン容器に、筋肉に相当する比誘電率48に調整したジアセチン溶

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

液を満たして模擬した。異物は直径 7.2mm、高さ 8.3cm のプラスチック製の試験管に、メチルアルコール（比誘電率 20）と日本酒（比誘電率 58）のいずれかを満たして模擬した。比誘電率は Ajilent 社製の誘電率測定システム 85070E とベクトルネットワークアナライザ E5071C を用いて測定した。（ ）に示した値は 6GHz での誘電率である。

ファントムをターンテーブルに置き、ターンテーブ

ルの中心から 6.4cm 離して図 9 の広帯域スロットを使った UWB アンテナを置く。このアンテナは 3~13GHz にわたって VSWR は 2 以下である。アンテナにベクトルネットワークアナライザを接続し 3~13GHz にわたって 200MHz おきに周波数掃引して反射損失を測定する。測定結果を逆フーリエ変換してレーダの時間応答に変換する。ターンテーブルを 4° ずつ回転させるとともにアンテナの高さを変えて周波数掃引して測定する。

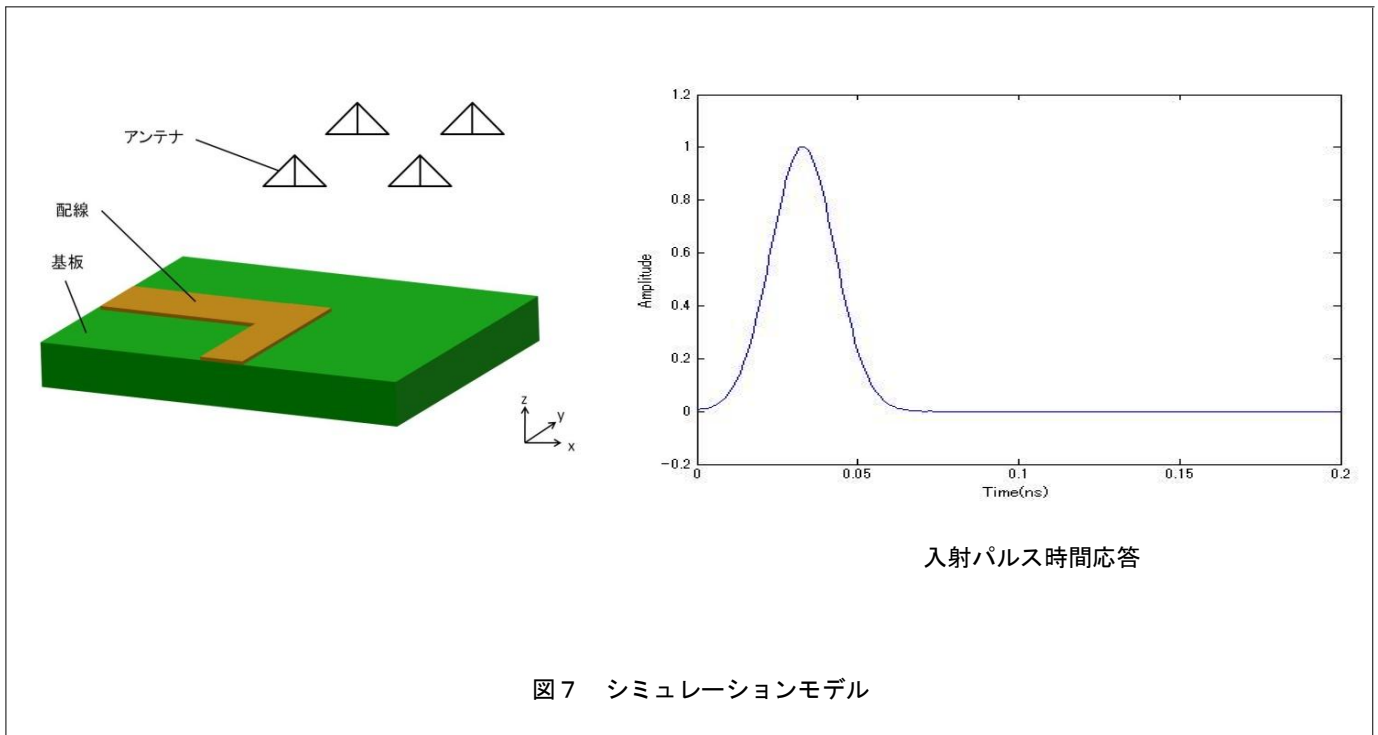


表 3 シミュレーション条件

FDTD セルサイズ	1mm × 1mm × 0.5mm
吸収境界条件	PML20 セル
入射波	ガウシアンパルス
回路基板	80mm × 80mm × 1.5mm
線路幅	4mm
アンテナと基板との距離	32mm
アンテナ間隔	10mm
アンテナ素子数	5 × 5 (25 素子)、7 × 7 (49 素子)

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

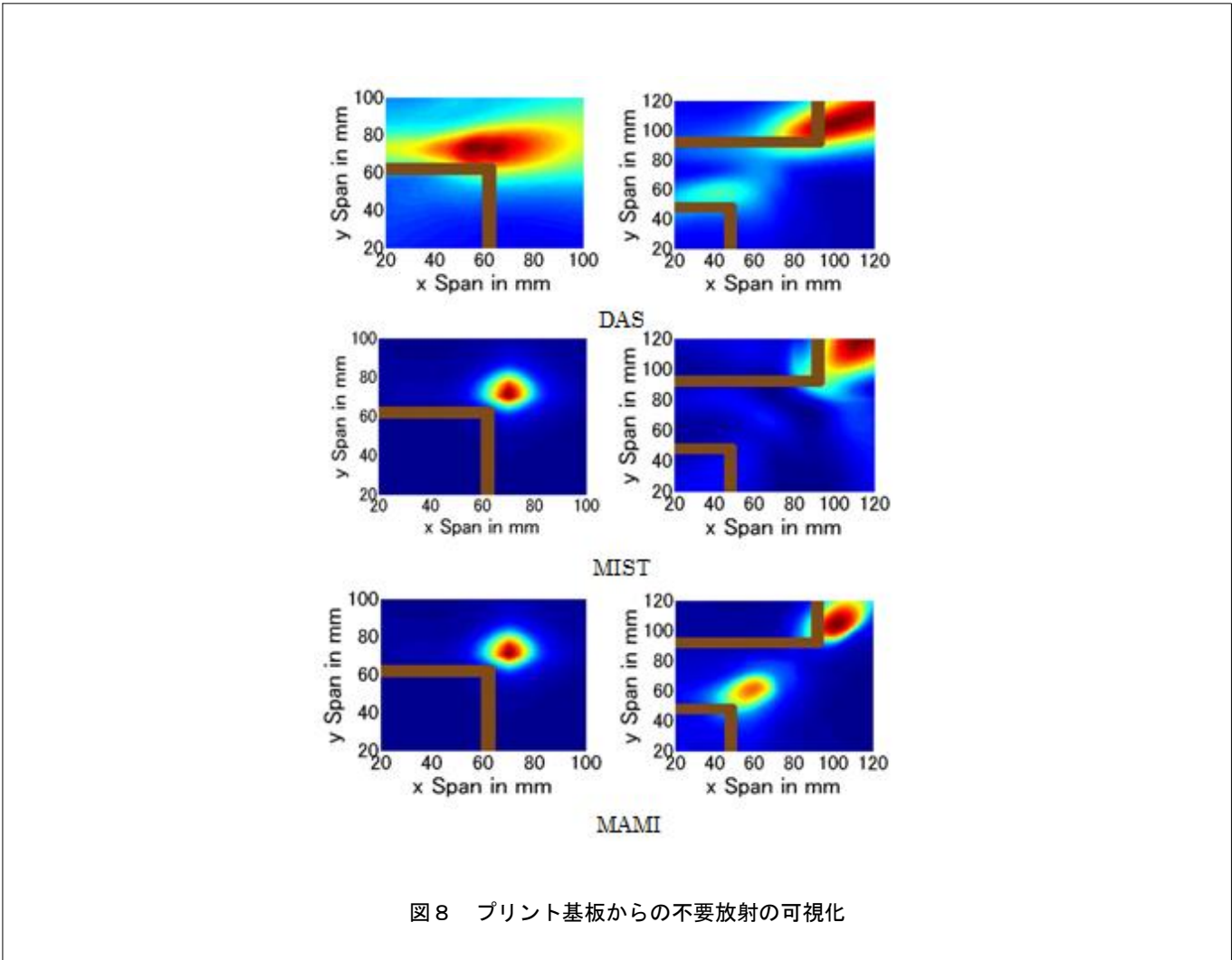


図8 プリント基板からの不要放射の可視化

(2) 実験結果

図10に遅延時間に基づく人体のプロファイルの横断面を示す。図10(a)は人体ファントムに異物を取り付けない場合の遅延時間プロファイルである。円チャートの放射軸の単位は ps である。異物がない場合、遅延時間プロファイルは円形になる。図10(b), (c)は人体ファントムに異物を取り付けたときの遅延時間プロファイルで、図10(b)はアンテナの高さを異物の高さの中心においたとき、図10(c)は異物の端から 3cm ずらして測定したときの遅延時間プロファイルである。異物がはっきりと検出できる。遅延プロファイルで異物がある場合の伝播遅延は 33ps 早くなる。これは試験管の内径 5.6mm の光速での伝播時間のほぼ 2 倍である。レーダ測定では伝播路の差は 2 倍となることに注意さ

りたい。日本酒の場合、人体と比誘電率が近くなるので、遅延時間プロファイルはメチルアルコールに比較してやや崩れている。

4.2 プリント基板からの不要放射のイメージング

(1) 実験システム

図11にプリント基板からの不要放射のイメージングの実験の様子を示す。イメージングの対象は特性インピーダンス 50Ω のマイクロストリップ線路にギャップを設けた基板である。この基板を xy ステージの上におき、水平面内の 80mm 四方を 10mm ステップで移動させる。4.1 節の実験で用いたアンテナを基板から 48mm 上方に置く。この操作により等価的に 91 素子のアレーアンテナを用いた受信を実現する。ベクトルネ

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

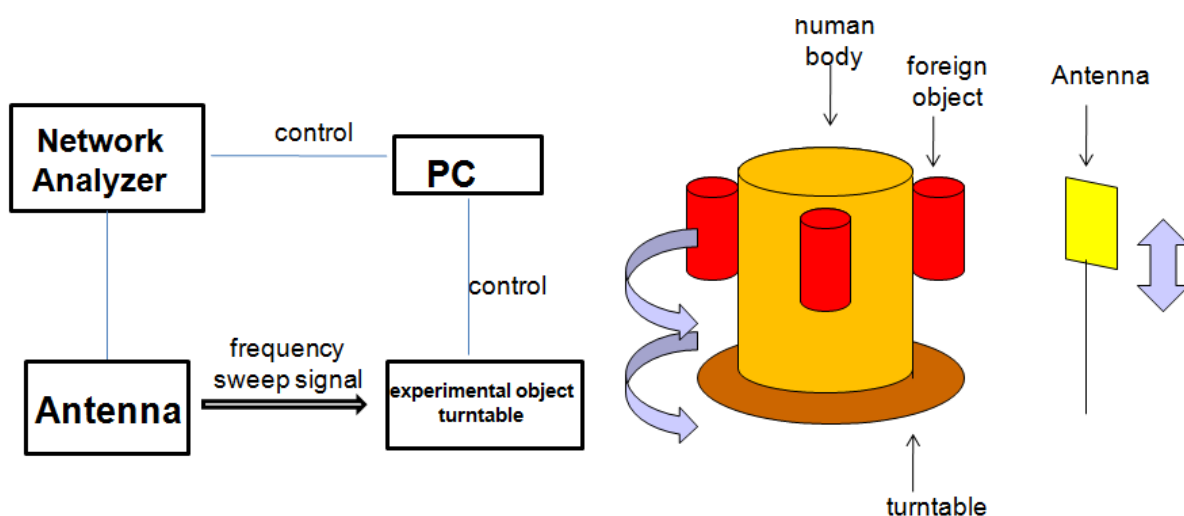
Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

ネットワークアナライザの出力ポートを基板の入力、受信ポートをアンテナに接続し、周波数掃引して伝送測定を行う。受信データを 2.2~2.4 節の 3 つのアルゴリズムを用いてイメージング処理する。

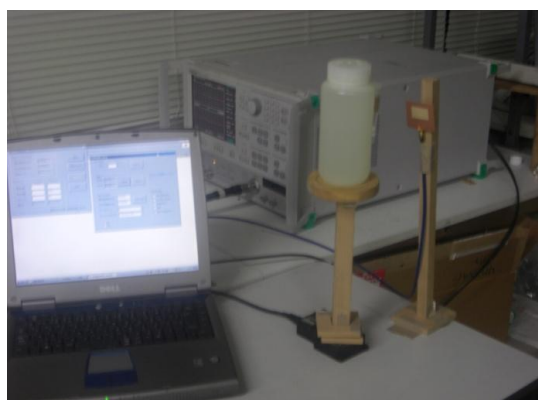
(2) 実験結果。

図 12(a) は 3~13GHz の広帯域信号を使ったイメー

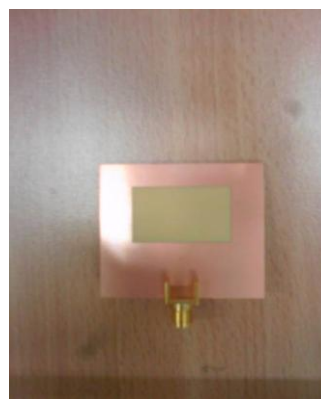
ジングの結果である。3 つのアルゴリズムいずれを使用してもギャップからの放射をよく捕らえている。図 12(b) は 3GHz の正弦波を使ったイメージングの結果である。予想通り DAS と MAMI はイメージング像がぼけるが、MAMI はギャップからの放射をよく捕らえている。



実験の概念図



実験の様子

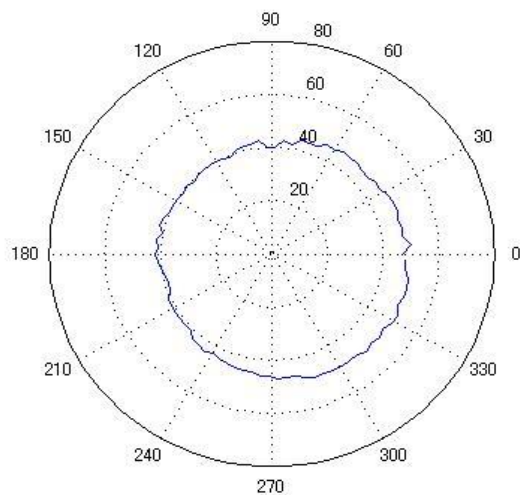


UWB アンテナ

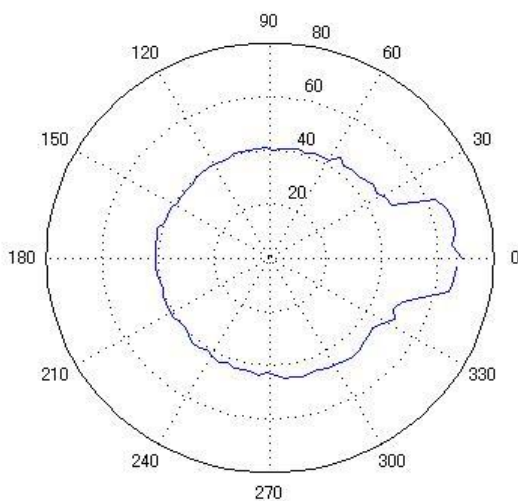
図 9 人が身につけた異物の可視化の実験

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

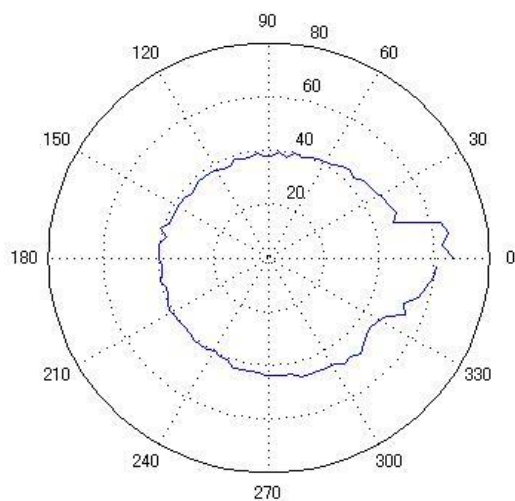
Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose



(a) 異物を取り付けないときの遅延時間プロフィール



メタノール



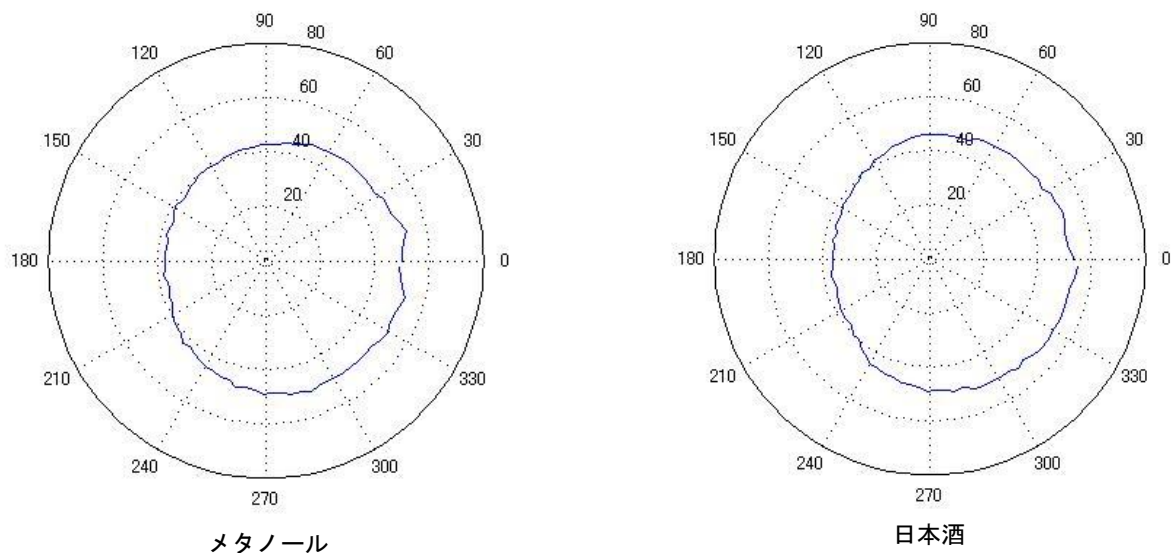
日本酒

(b) 異物がある高さにアンテナを対抗させたときの遅延時間プロフィール

図10 人体に身に着けた異物の可視化 (続く)

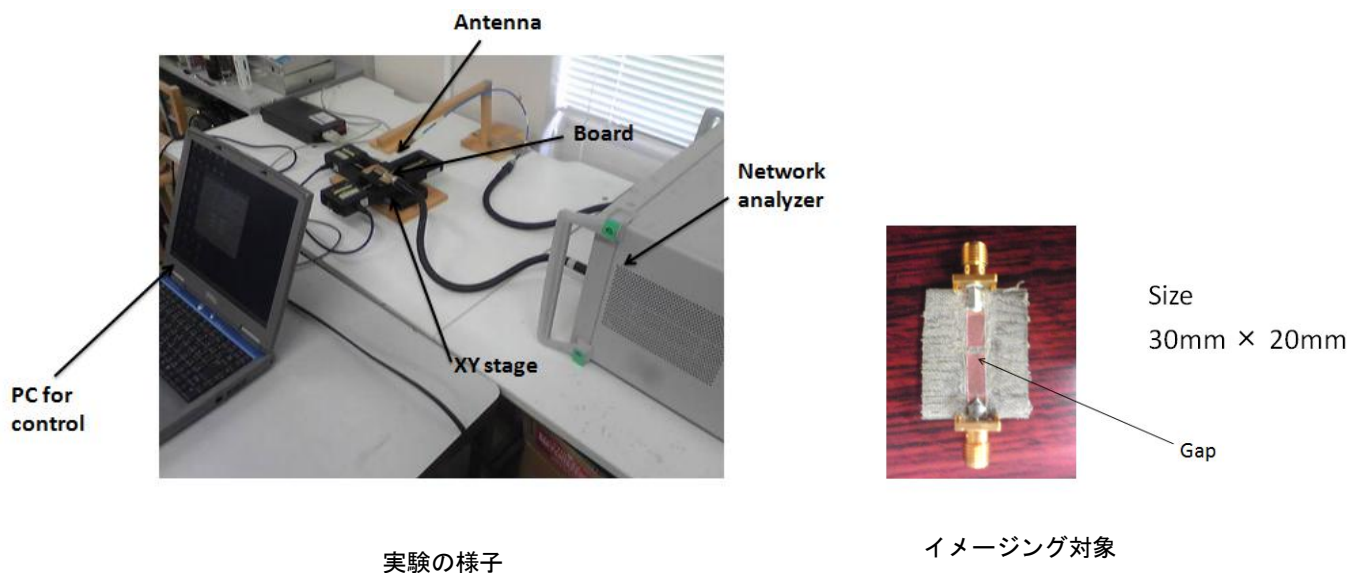
マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose



(c) 異物がない高さにアンテナを対抗させたときの遅延時間プロファイル

図10 人体に身につけた異物の可視化 (続き)



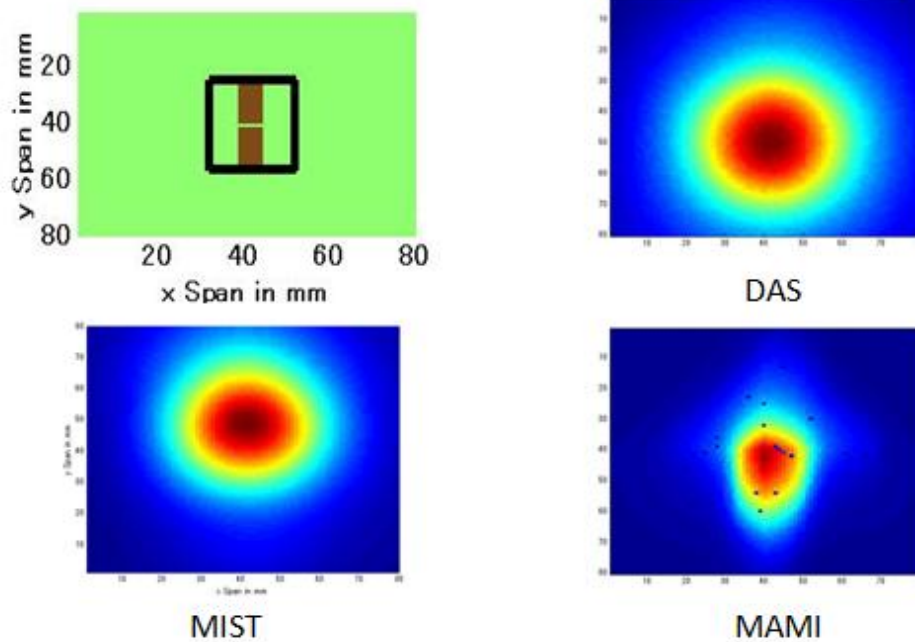
実験の様子

イメージング対象

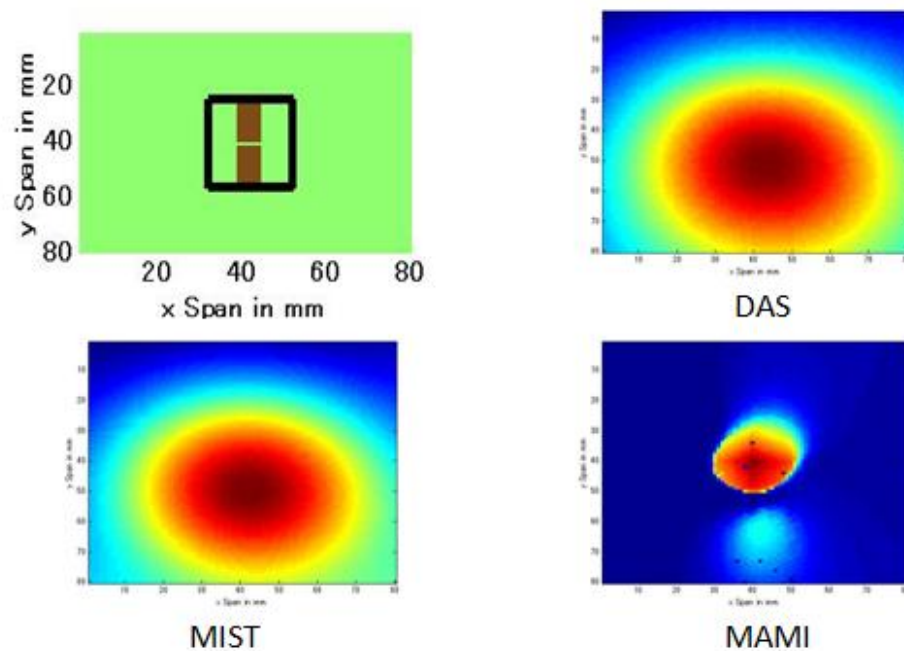
図11 プリント基板からの可視化の実験

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose



(a) 3-13GHz 掃引



(b) 3GHz

図12 イメージング結果

マルチスタティック UWB レーダによるマイクロ波イメージング

Microwave Imaging by UWB radar for the security purpose

5. 結言

計算機シミュレーションと簡単な実験によって、マイクロ波イメージングがセキュリティシステムや EMC 対策機器に有効であることを示した。UWB レーダで測定した遅延時間プロファイルの測定により、1cm 程度の段差の人体の電気特性に近い異物も効果的にイメージングできる。不振物の内容物検出ではコンフォーカルアレーが有効であり、10cc 程度の容積の異物であれば、複雑なイメージングアルゴリズムを使うことなく検出が可能である。マイクロ波機器の開発設計をサポートするためのマイクロ波装置からの不要放射の可視化では、狭帯域の信号を扱う場合 MAMI が有効である。

現在、著者らはマイクロ波マンモグラフィの研究に精力的に取り組んでいる。著者らの提案した MS(Multistatic) - MIST アルゴリズムと⁽⁸⁾、撮像部を吸引固定するコンフォーカルアレー⁽⁹⁾を特徴とするマルチスタティック UWB レーダを試作⁽¹⁰⁾し、2012 年 8 月より臨床実験を実施している。さらに、近年の電気自動車やハイブリッド自動車の普及により、大電力のインバータからの不要放射の対策のためノイズ源の可視化が自動車業界から求められている。このため、本稿で説明した 3 つのイメージングアルゴリズムに加え、電磁界の逆散乱問題の 2 つの手法で、ハーネスやマフラーなどに回り込む不要電磁放射の可視化に取り組んでいる。これらの研究状況については別の機会に報告したい。

参考文献

- (1) X. Li, E. J. Bond, B. D. VanVeen, and S. C. Hagness, "An overview of ultra-wideband microwave imaging via space-time beamforming for early-stage breast-cancer detection," *IEEE Antennas Propaga. Magazine*, Vol.47, No.1, pp. 19-34, (Feb. 2005).
- (2) S. K. Davis, E. J. Bond, X. Li, S. C. Hagness, and B. D. VanVeen "Microwave imaging via space time beamforming for early detection of breast Cancer: beamforming design in the frequency domain," *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, Vol.17, No.2, pp. 357-381, (2003).
- (3) Y. Xie, et al, Multi-Static Adaptive Microwave Imaging for Early Breast Cancer Detection, 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, pp. 285-289, (2005).
- (4) Xu Li, S. K. Davis, S. C. Hagness, D. W. vander Weide, and B. D. VanVeen, and, "Microwave imaging via space time beamforming: Experimental Investigation of Tumor Detection in Multilayer Breast Phantom," *IEEE Trans. Microwave Theory and Technique.*, Vol. 52, No.8, pp. 1856-1865, (Aug. 2004).
- (5) 菊間信義著, "アレーアンテナによる適応信号処理," 科学技術出版, (1998).
- (6) J. Li, P. Stoica, and Z. Wang, "On robust Capon beamforming and diagonal loading," *IEEE Tran. Signal Proc.* Vol.51, No.7, pp.1702-15, (July 2003).
- (7) D. M. Sullivan, "Electromagnetic Simulation, Using the FDTD Method," *IEEE Press*, New York, (2000).
- (8) 鈴木、羽多野、桑原、乳癌検出のための時空間ビームフォーミングのマルチスタティックレーダへの拡張、電子情報通信学会論文誌、Vol.J94-C(10)、pp.306-316、(2011)。
- (9) Y. Kuwahara, K. Suzuki, H. Horie, Y. Kuwahara, "Conformal Array Antenna with Aspirator for Microwave Mammography," *Proceedings of the 2010 IEEE Antennas and Propagation Society international symposium on antennas and propagation*, 234.11, (2010).
- (10) Y. Kuwahara, S. Miura, H. Sakahara, and S. Ogura, Clinical Setup of Microwave Mammography Proceeding of ISAP 2011, FrE3-1, (2011).

この研究は、平成20年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成21年度～22年度に実施されたものです。