

77 GHz 帯近距離パッシブイメージング用小型レンズアンテナの特性

滝本 未来[†] 中田 淳^{††} 山田 康太^{†††} 佐藤 弘康[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 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

^{††} 中央電子株式会社 〒192-8532 東京都八王子市元本郷町 1 丁目 9 番 9 号

^{†††} マスプロ電工株式会社 〒470-0194 愛知県日進市浅田町上納 80 番地

E-mail: takimoto,sahiro@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 77GHz 帯近距離イメージング用に設計した口径 100 mm の小型レンズを作製し、受信素子として 77 GHz 帯で設計された対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi antenna, APFA) および導波管開口アンテナ (Openended Waveguide Antenna: OWG) とした場合のレンズアンテナの動作利得パターンおよび撮像距離 60 cm に対する回折パターンを実験的に求めている。その結果、APFA と OWG の動作利得はそれぞれ 32.8 dBi, 31.7 dBi が得られ、差は小さいものの、像面における電界強度は APFA の場合が OWG よりも 7.6 dB 高い結果が得られ、近距離イメージングにおいて受信アンテナのビーム幅をレンズ見込み角に設計することの重要性を確認した。

キーワード パッシブイメージング, 広帯域アンテナ, 小型, レンズアンテナ

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、液体爆発物やプラスチック爆弾等、金属探知機で検知できない不審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、人が所持している不審物の検知を実現する技術として期待されており、特に、ミリ波パッシブイメージングは人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音をパッシブに受信し、非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として、実用化が期待されている [1]。

筆者らはこれまで、空港等の水際において使用するための 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し、実用性について評価を進めてきた [2-3]。装置は金属探知機による検査を経た人の正面に配置する据え置きタイプとして設計されているが、検査官による詳細な検査等で使用可能な小型・ハンディータイプのパッシブイメージング装置の開発が望まれる。また、ハンディータイプは警察官による不審者の簡易検査 (ファーストレスポンス用途) をはじめ様々な応用が期待されている。

受信信号が熱雑音という極めて微弱なものであること、および検知可能な不審物のサイズはできるだけ小さいことが望まれるため、高感度なイメージング素子、高効率で高分解能のレンズが要求される。熱雑音電力は帯域に比例するため、イメージング素子を構成するアンテナおよび検波回路には広帯域性が要求される。また、高画質・高分解能のミリ波画像を得るため、アンテナに要求され

る性能としては、画素に対応するイメージング素子のアレーを所定の面積にできるだけ多く配列する必要があること、レンズとの効率良い整合のために E 面指向性と H 面指向性が等しい軸対称指向性を持つこと、ミリ波受信回路の高感度化のために素子間相互結合が低いことなどが挙げられる。

これらの要求を満たすアンテナとして、筆者らは効率よくレンズと整合する軸対称指向性、高分解能を得るための狭い開口幅、高感度を得るための広帯域特性を持つ対せき形フェルミアンテナ (Antipodal Fermi Antenna, APFA) の設計を FDTD 法を用いて行ってきた [4]- [7]。また、APFA を素子とするレンズアンテナの電磁界解析 [8] を行い、APFA の位相中心位置のと焦点位置の関係について検証した。

本稿では、77GHz 帯近距離イメージング用に設計したレンズ [2] の 1/5 スケールモデルを作製し、受信素子を APFA および導波管開口アンテナ (Openended Waveguide Antenna: OWG) とした場合のレンズアンテナの基本特性を実験的に検討した結果を述べる。

2. 測 定 系

2.1 光学系とアンテナ

既開発した撮像装置 [8] では、レンズ口径 $D = 500$ mm, レンズの厚さ $t = 100$ mm, 撮像距離 3 m, 像面距離 900 mm, 空間分解能 24 mm として設計されている。このレンズの 1/5 スケールモデルとして、レンズ口径 $D = 100$ mm, 厚さ $t = 20$ mm の非球面高密度ポリエチレン

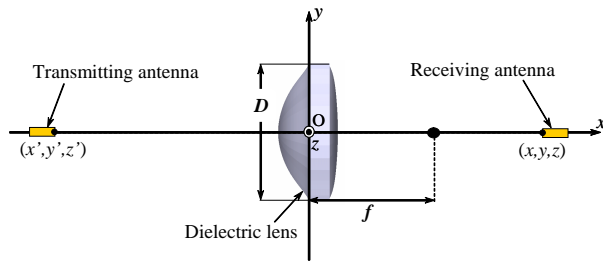


図 1 ミリ波光学系 .

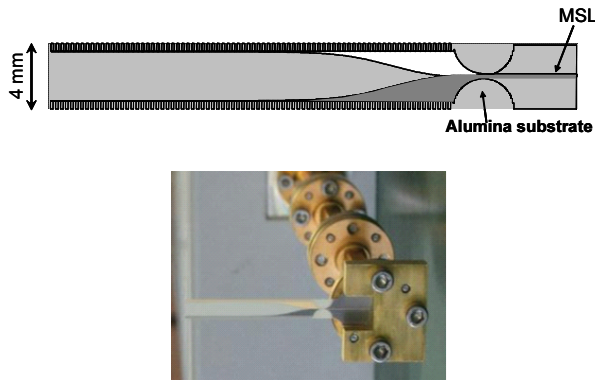


図 2 APFA の構造と写真

レンズを作製した．レンズの材質は比誘電率が $\epsilon_r = 2.34$ の高密度ポリエチレンである．

ハンディタイプ撮像装置の実際の使用形態を想定すると， $1/5$ のスケール値で得られる構造パラメータの妥当性を検証する必要があるが，装置の重量や大きさの点では妥当な値と考えられる． $1/5$ のスケール値から，撮像距離 60 cm 程度に立つ人が衣服下に所持する不審物の幅 $\Delta X' = 24$ mm を検出可能な構造パラメータが得られる．

ミリ波イメージングの光学系の構成を図 1 に示す．レンズの口径 D ，厚さ t の中心を座標系の原点 O とする．物体面の位置 (x', y', z') に送信アンテナを配置し，像面の位置 (x, y, z) に受信アンテナを配置する．レンズの焦点距離は $f = 144$ mm であり，撮像距離を $x' = -610$ mm，像面距離を $x = 190$ mm として像面で収差が小さくなるようにレイトレーシング法を用いて設計している．

受信用の 77 GHz 帯 APFA の構造と写真を図 2 に示す．APFA は厚さ $100 \mu\text{m}$ のアルミナ基板上に成膜された金をエッチングして作製されており，アンテナの開口幅は 77 GHz 帯の波長 4 mm としている．また，アンテナの放射パターンは中心周波数 76.5 GHz における 10 dB ビーム幅がレンズの見込み角 34° に一致するように設計されている [2]- [3]．MSL-導波管変換器 [9] を用いて WR-12 導波管に変換している．

2.2 測定系

図 3 に測定系を示す．(a) は遠方界におけるパターン測定用，(b) は近距離における測定用であり，いずれも，信

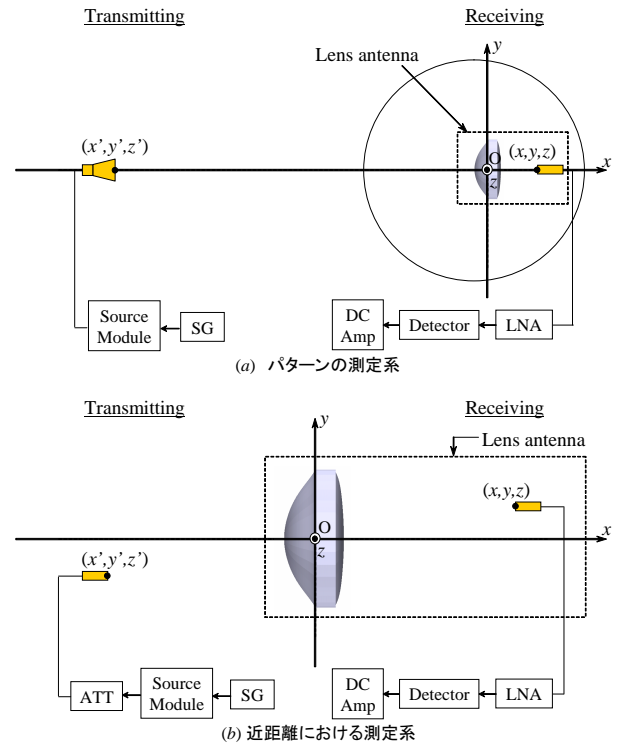


図 3 測定系 .

号発生器から 12GHz 帯の信号を出力し，ソースモジュールで 60 ~ 90GHz に周波数を変換した後に，アッテネータで減衰させて送信アンテナから送信し，受信後は低雑音増幅器，SBD 検波器，直流アンプを通過させて電界強度を測定する構成である．

本稿で行う実験は，使用する周波数が 77 GHz 帯 (波長 $\lambda = 4$ mm) であることなどから，送受信アンテナの位置を高精度に制御・設定する必要がある．そこで，測定系 (b) は送受信系を同じ土台上に設置してあり，送受信アンテナともにそれぞれが 3 軸シリンダーによる制御が可能となるようにシステムを開発した．一方，測定系 (a) では，送信アンテナは z 軸方向のみシリンダーで制御可能であり，受信アンテナは 3 軸シリンダーによる制御が可能なシステムを構築した．

3. 測定結果

3.1 動作利得パターン

まず，受信アンテナとして APFA 及び OWG の放射パターンを測定した．ただし，送信アンテナとしてホーンアンテナを用い，送受信アンテナ間の距離は 3350mm とした．その結果を図 4 に示す．測定による APFA および OWG の 10 dB ビーム幅はそれぞれ 30.8° ， 84.0° であった．なお，FDTD 法による計算結果では APFA の 10 dB ビーム幅は 37.5° であった．APFA のビーム幅が実験結果と計算結果で 6.7° ずれているが，開口分布測定法を用いた実験結果 [9] では概ね一致しており，主に受信系の改

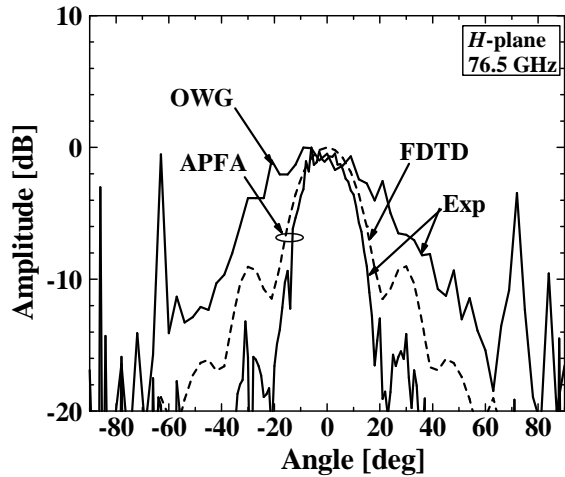


図4 APFA および OWG 単体での放射パターン.

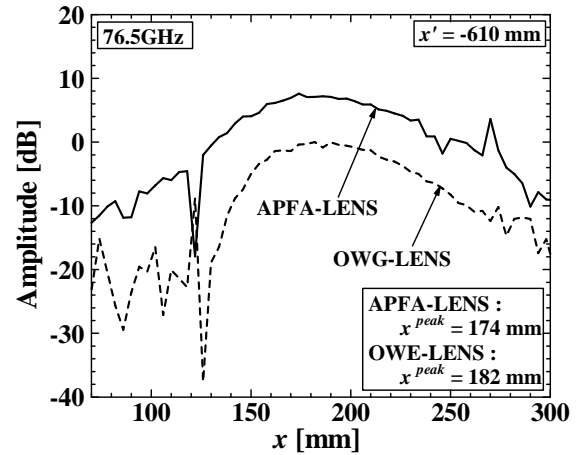


図6 光軸上電界強度分布.

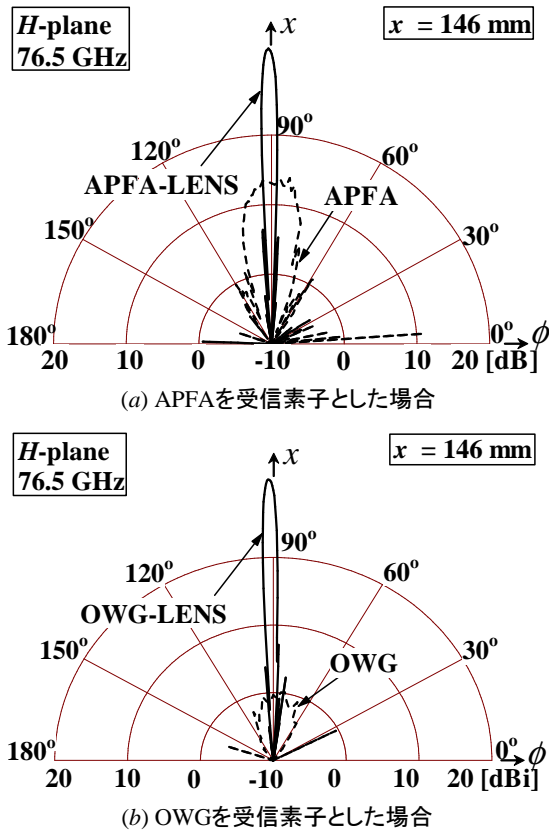


図5 動作利得パターン.

善が必要と考えられる.

次に、APFA および OWG の前面にレンズを設け、レンズ前面の中心点にあたる $(x, y, z) = (-10\text{mm}, 0, 0)$ を回転中心としてレンズアンテナの動作利得パターンを測定した。ただし、受信アンテナは $(x, y, z) = (144\text{mm}, 0, 0)$ に配置し、回転中心と送信アンテナの距離は 3350mm である。動作利得の算出には、フリスの伝達公式を用いて、基準アンテナであるホーンアンテナとの相対値から算出しており、ホーンアンテナの指向性利得は 23.3dBi とした。測定結果を図5に示す。図中の破線はそれぞれの受

信アンテナ単体の測定結果である。APFA-LENS および OWG-LENS の動作利得はそれぞれ 32.8dBi , 31.7dBi であり、ほぼ同程度の値が得られた。

3.2 光軸上の電界強度分布

送信アンテナを $x' = -610\text{mm}$ に置いたときの光軸上の電界強度を測定した結果を図6に示す。ただし、振幅は OWG-LENS の場合の最大値で規格化してある。電界強度が最大となる位置 x^{peak} は、レイトレーシング法による設計値 $x = 190\text{mm}$ より多少短く、APFA-LENS 及び OWG-LENS でそれぞれ $x = 174\text{mm}$, $x = 182\text{mm}$ であった。この付近で APFA-LENS の振幅が 7.6dB 大きく、APFA-LENS の方が感度において有利であることが確認された。

今回使用した APFA は、撮像距離が $x' = -610\text{mm}$ のときのレンズの見込み角 34° にビーム幅が合うよう設計されている。一方、OWG はビーム幅がレンズの見込み角よりも広いため受信電圧が低くなる。以上の理由から、レンズの見込み角が大きい遠方においては動作利得はほぼ同程度であったが、送信アンテナの位置が近距離である $x' = -610\text{mm}$ の場合は APFA-LENS の方が OWG-LENS よりも大きな受信電圧を得ることができたものと考えられる。

3.3 回折パターン

像面における z 軸方向の 3dB 幅を W_z とし、ビーム幅の評価に用いる。また本報告では、実験結果と比較するための理論値として円形開口に対するフランホーファ回折パターンの理論式を用いた。円形開口から十分離れた距離 $L (\gg D^2/\lambda)$ におけるフランホーファ回折による像面での回折パターンは次式で与えられる。

$$P(r) = \left(\frac{\pi D^2}{2}\right)^2 \left[\frac{J_1(R)}{R}\right]^2, \quad R = \frac{\pi D z}{\lambda b} \quad (1)$$

$(x', y', z') = (-610\text{mm}, 0, 0)$ に送信アンテナを固定し、像面 $(x, y) = (x^{peak}, 0)$ において、受信アンテナを z 軸方

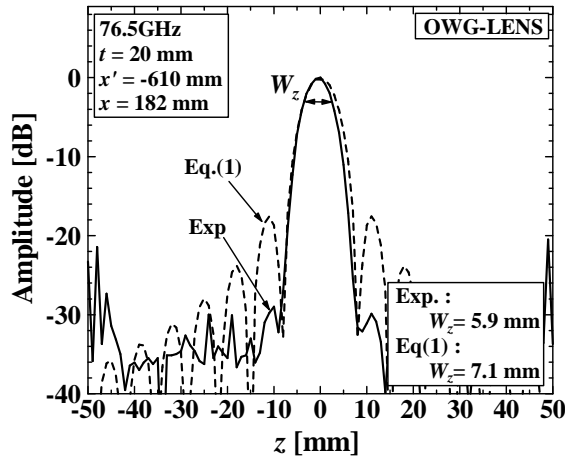


図7 波源が光軸上にある場合の OWG-LENS の回折パターン .

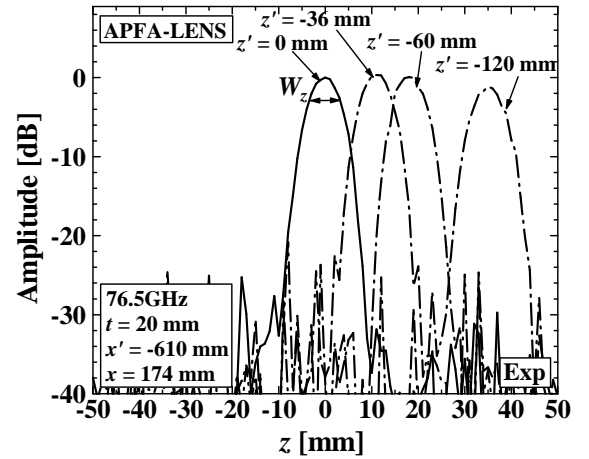


図10 波源を光軸上からずらした場合の APFA-LENS の回折パターン .

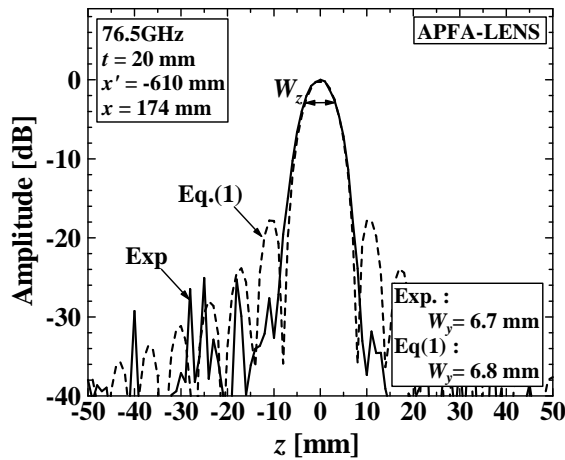


図8 波源が光軸上にある場合の APFA-LENS の回折パターン .

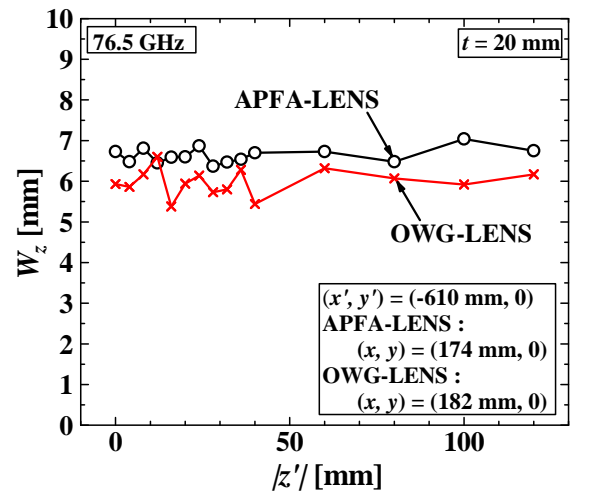


図11 波源の移動量 $|z'|$ に対する 3dB 幅 .

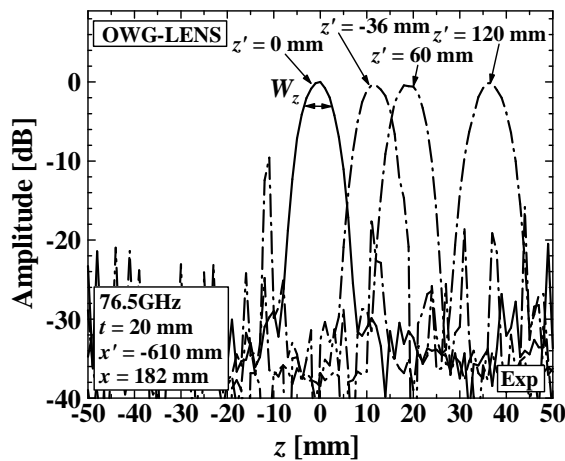


図9 波源を光軸上からずらした場合の OWG-LENS の回折パターン .

向に変化させて回折パターンを測定した結果を図7と図8にそれぞれ示す. APFA-LENS, OWG-LENS ともにサイドローブが観測されていないが, メインビームの方向と W_z は理論値とほぼ一致しており, 送受信アンテナの位置調整の精度が高いものと考えられる.

3.4 収差

収差の影響を検討する. 光軸からずれた位置に送信ア

ンテナを設置した場合の回折パターンの測定結果を図9と図10にそれぞれ示す. ただし, 振幅はそれぞれ $z' = 0$ mm における回折パターンの最大値で規格化している.

測定において, 送信アンテナの位置は幾何光学的に $z = 12$ mm, 20 mm, 40 mm で結像するように設定しており, 概ね妥当な位置に結像点が得られたと考えられる. また, $z' = -120$ mm としても OWG-LENS の場合には振幅の低下が見られず, APFA-LENS の場合にも振幅の低下は高々1 dB 程度である.

z' の移動量に対する各回折パターンの 3dB ビーム幅 W_z を評価した結果を図11に示す. APFA-LENS, OWG-LENS ともに W_z の広がりも最大でも 1.5 mm 以下であり, 収差の影響はほぼないと考えられる. 以上の結果から, 物体面における視野 240 mm×240 mm 程度の領域において, 感度の低下が小さく, かつ視野端部における分解能の低下も小さい撮像が期待できることがわかった.

4. まとめ

本報告では, APFA 及び OWG を受信素子として用い

た場合の 77 GHz 帯小型レンズアンテナの特性について実験により検証した。その結果、レンズの像面距離に応じたアンテナのビーム幅設計が重要であり、遠方に比べて像面距離が大きくなる近距離イメージングにおいてはビーム幅の狭い指向性アンテナが感度において有利であることが確認された。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省安全・安心科学技術プロジェクト(研究代表者佐藤弘康)の助成を得て行われた。

文 献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ ミリ波パッシブイメージング技術(セキュリティー分野への応用を主に), ” 計測と制御, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “ 77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発 ”, 2009 年電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 2009 .
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, “ 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置 ”, 2010 年電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2010 (発表予定).
- [4] H. Sato, K. Sawaya, N. Arai, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, “FDTD Analysis of Fermi Tapered Slot Antenna With Corrugation Structure”, China-Japan Joint Meeting on Microwaves, pp.137-140, (2002).
- [5] 佐藤 弘康, 新井 直人, 我妻 嘉彦, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計, ” 信学論 (B), vol.J86-B, no.9, pp.1851-1859, Sep. 2003.
- [6] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, “Design of Narrow-width Fermi Antenna with Circular Radiation Pattern,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 4, pp. 4312-4315, Monterey, USA, 2004.
- [7] 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.
- [8] 井上大聡, 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野 皓司, “ ミリ波イメージング用小形誘電体レンズアンテナの設計, ” 電子情報通信学会技術研究報告, AP2008-131, pp.115-120, 2008 .
- [9] 山田康太, 高橋順一, 武田政宗, 植村順, 水野皓司, 澤谷邦男, 佐藤弘康, “ 77GHz 帯対せき形フェルミアンテナの放射パターン測定 ”, 2009 年電子情報通信学会総合大会, B-1-90, 2009 .