

[共同研究成果]

対せき形フェルミアンテナアレーの3次元FDTD解析

佐藤弘康 村上仁康 澤谷邦男 水野皓司*

東北大学大学院工学研究科

*東北大学電気通信研究所

1. はじめに

物体はその絶対温度に比例する電力の熱雑音を放射しており、そのミリ波成分を広帯域にわたって受信し、これを検波・増幅してミリ波動画像を得るリアルタイムミリ波パッシブイメージングの実用化が期待されている(図1)。パッシブイメージングの有力な応用として、衣服下の危険物所持の判別等、セキュリティ応用が主に挙げられる。

パッシブイメージングの受信素子として要求されるアレーアンテナの特性は、広帯域かつ集積化が容易であることに加え、素子数がミリ波画像の画素に対応するため、所定の面積にできるだけ多くのアンテナを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。筆者らはこれまで、所望のビーム幅で軸対称な放射パターンが広帯域にわたり得られる対せき形フェルミアンテナの設計を、FDTD(Finite-Difference Time-Domain:有限差分時間領域)法[1]を用いて行ってきた[2],[3]。しかしながら、有限の周期構造を持つアレーアンテナの特性を得るためには大規模な電磁界解析が必要である。

以上の背景を踏まえ、本報告では、リアルタイムミリ波パッシブイメージングの受信素子に用いる目的で、FDTD法を用いた対せき形フェルミアンテナアレー(Antipodal Fermi Antenna Array, APFAA)の設計を行った結果を述べる[4]。

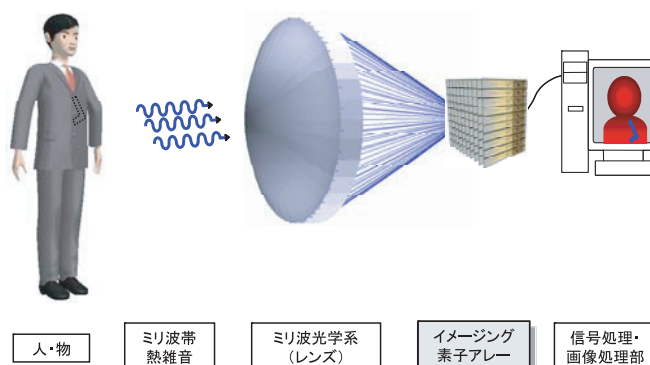


図1 ミリ波パッシブイメージングの概念図

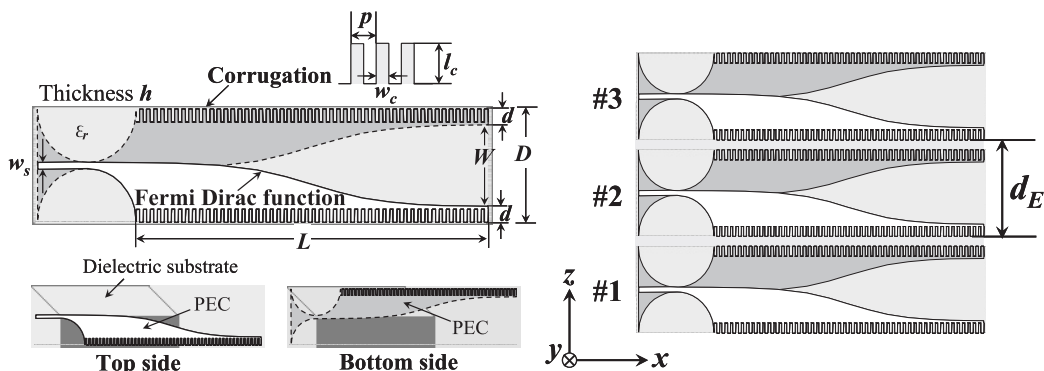


図2 対せき形フェルミアンテナの構造および3素子E面アレー

2. APFA アレーの設計

2. 1 対せき形フェルミアンテナ (APFA) の構造

対せき形フェルミアンテナ (APFA) の構造を図2に示す。アンテナの特徴は、マイクロストリップ線路からテーパバランによりテーパスロット部に広帯域にわたり変換する対せき構造を持つこと、フェルミディラック関数(以下フェルミ関数)で表されるテーパ形状、及び誘電体基板の外側に歯形周期構造であるコルゲート構造を持つことである。フェルミ関数テーパとコルゲート構造を適切に設計することにより、E面とH面の放射パターンが等しい、軸対称指向性を得ることができ[1], [2]、イメージングに適したアンテナ特性を得ることができる。

設計中心周波数を10GHzとし、APFAをz方向に素子間隔 d_E で配列した3素子E面APFAアレーについてFDTD解析結果と実験結果を比較した。FDTD解析において、セルサイズは $\Delta x=1.2\text{mm}$, $\Delta y=0.4\text{mm}$, $\Delta z=0.5\text{mm}$, タイムステップ数は30,000とした。吸収境界条件には8層のPML (Perfectly Matched Layer)を用いた。励振はマイクロストリップ線路の特性インピーダンス 50Ω を内部抵抗としたガウスパルスを与えて行った。

2. 2 APFAの数値解析及び実験結果

素子間隔 d_E を変化させた場合について、放射パターンの10dBビーム幅を広帯域にわたり計算した結果を図3に示す。単素子APFAの結果と共に、素子間隔 $d_E=39\text{mm}$, 41mm , 43mm の3種類について示している。E面において、単素子に比べてビーム幅が増加し、素子間隔 d_E が小さいほど顕著に増加した。設計中心周波数10GHzにおいて、E面10dBビーム幅は単素子が 53° , $d_E=39\text{mm}$, 41mm , 43mm のときはそれぞれ 74° , 68° , 63° であった。H面については、広帯域にわたり単素子に比べてビーム幅が減少し、特に12GHz以下において顕著であった。ビーム幅は $d_E=39\text{mm}$, 41mm , 43mm のどの場合に

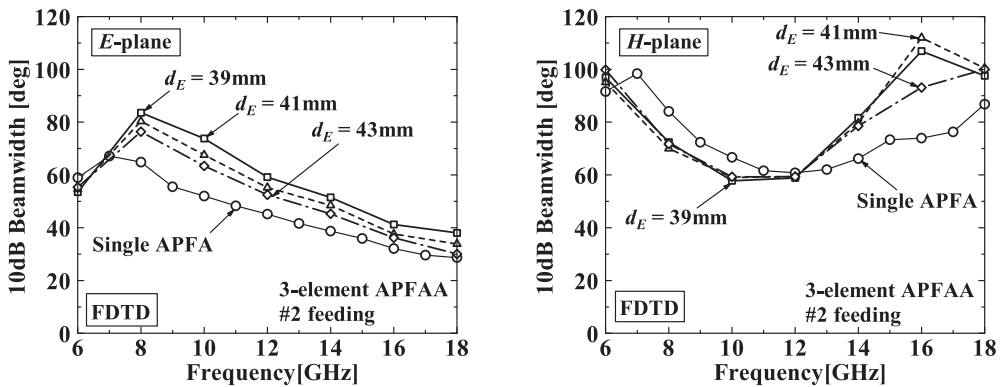


図3 3素子E面APFAアレーの10dBビーム幅の周波数特性 ($d_E=43\text{mm}$)

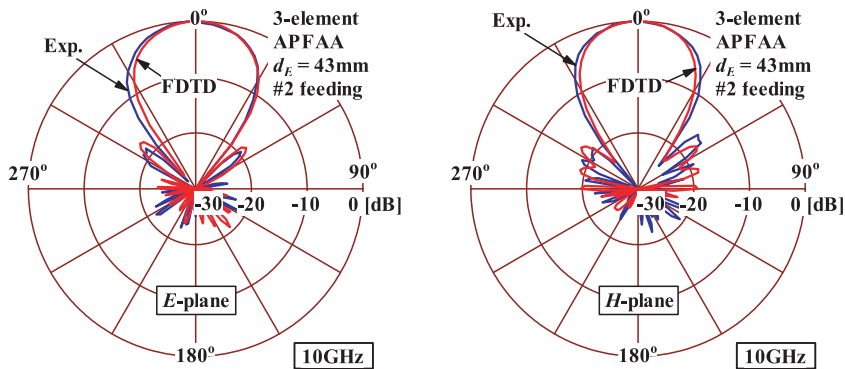


図4 10GHzにおける中央素子(#2)のアレー素子パターン
(3素子E面APFAアレー, $d_E=43\text{mm}$)

についても16GHz付近を除いてほぼ等しい値を示している。10GHzにおけるH面のビーム幅は、単素子が 68° 、アレー化した場合は 59° であった。以上の結果から、3素子E面アレー化時にH面ビーム幅が変化しないこと、及び素子間隔 d_E の調整によりE面ビーム幅を制御できることが明らかとなった。

10GHzにおけるアレー素子パターンを図4に示す。FDTD解析においてアンテナの素子間には誘電体があるが、実験では誘電体がないことをここで述べておく。実験結果と計算結果は、H面ビーム幅が高周波帯において異なっていることを除き、概ね一致している。周波数が8~12GHz(帯域40%)においてビーム幅約 60° 程度の軸対称なアレー素子パターンが得られた。高周波帯における不一致の原因として、解析におけるアンテナの厚さ h のセル分割数、及び基板製作における厚さの確かさが高周波になるにつれて不十分であるこ

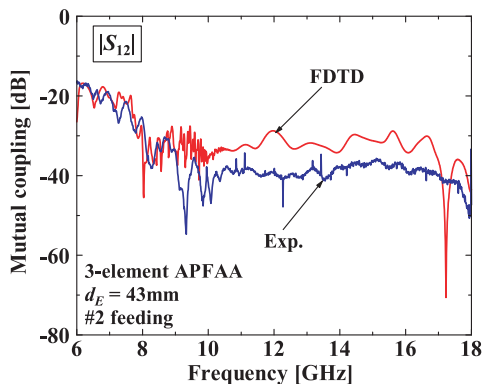


図5 素子間相互結合の周波数特性

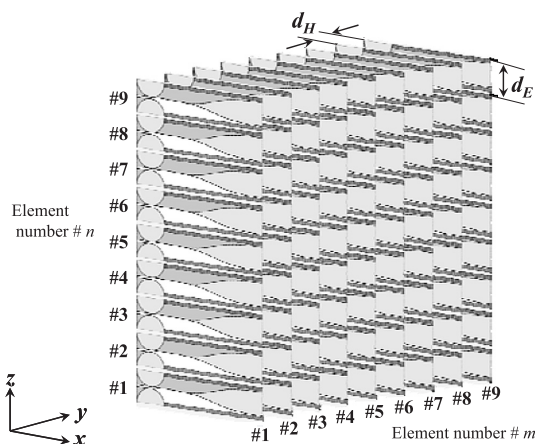


図6 81素子 APFA アレーの構造

とが考えられる。

中央素子#2を励振したときの隣接素子#1との素子間相互結合 $|S_{12}|$ の周波数特性を図5に示す。計算結果は8GHzから広帯域にわたり-30dB以下の小さい結合が得られた。実験結果は計算結果よりも10dB程度小さい値が得られていることを除き、概ね一致している。高周波帯における結合レベルに差が生じた原因としては、素子間の誘電体の有無が考えられる。以上の結果から、3素子E面アレーについて、アレー素子パターンの軸対称性を得る設計指針の妥当性を実験的に確認できた。

3. 81素子 APFA アレーの数値解析

有限アレーの特性は素子数によって大幅に変化することが一般であり、3素子で得られた設計が必ずしも多素子アレーに対して適用することはできない。そこで本節ではFDTD法による解析を2次元アレーに拡張し、図6に示した81素子APFAアレーのFDTD解析を行った結果を述べる。E面アレーをz方向、H面アレーをy方向に構成し、各方向に9素子ずつ等間隔に配列して81素子アレーを構成している。ここで(y, z)方向のアンテナ番号を#m-nとする。素子間隔は、3素子E面アレーにおいて約60°の軸対称なアレー素子パターンが得られた $d_E=d_H=43\text{mm}$ とした。FDTD法におけるセルサイズは、より大規模なモデルを解析するにあたり $\Delta z=1\text{mm}$ とした。タイムステップ数は50,000とし、その他の解析パラメータは3素子アレーの解析と同様である。

81素子APFAアレーの中央素子#5-5を励振したときの10GHzにおける素子間相互結合分布を図7に示す。図中に示す数値は、給電素子である#5-5から素子#m-nへの透過係数 S_{m-55} の振幅を表している。コルゲート構造がある場合、ない場合に比べてアレー素子

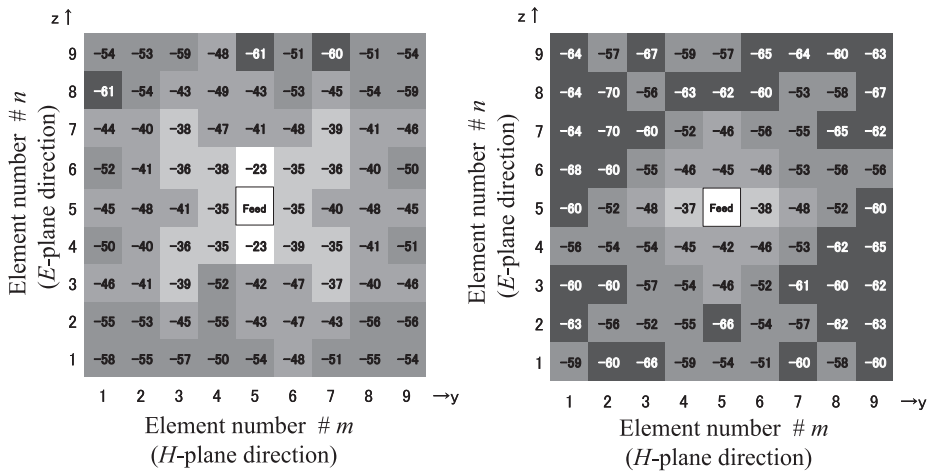
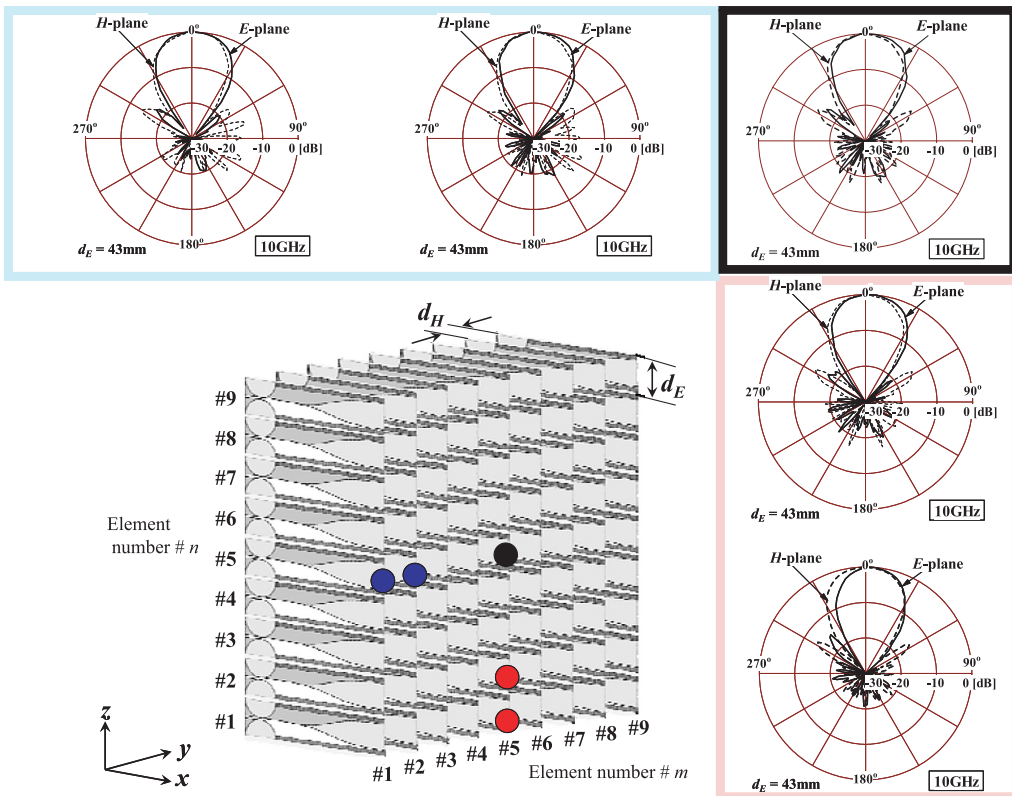


図7 10GHzにおける素子間相互結合分布
(81素子APFAアレーの計算値, $d_E=d_H=43\text{mm}$)

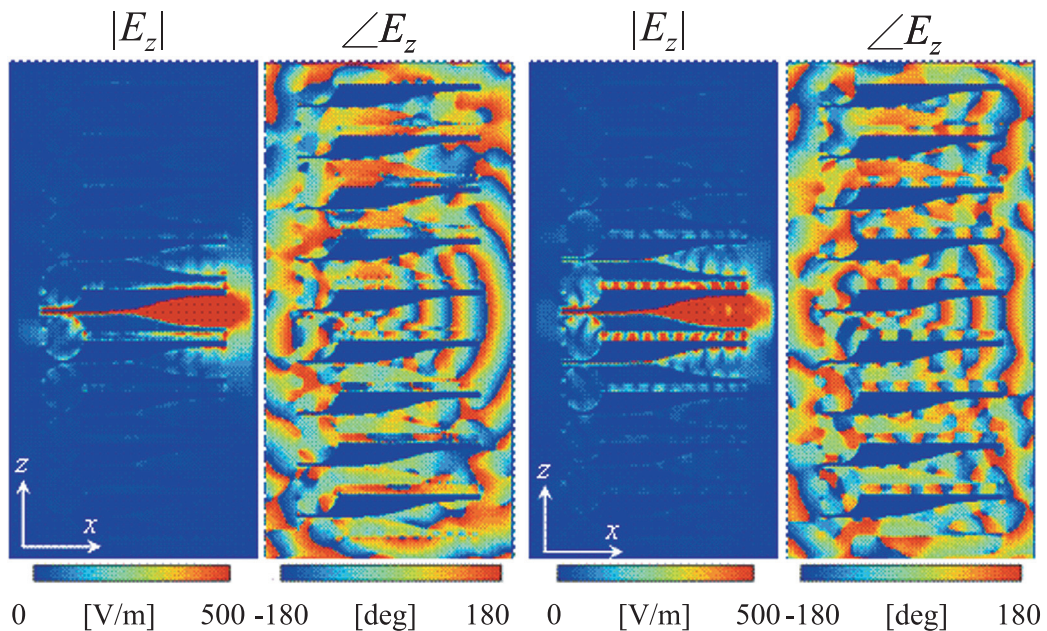


全領域にわたり 10dB 程度結合量が低下した。E 面方向は、コルゲート構造がある場合が -42dB, ない場合は -23dB であり, 約 20dB 改善した。H 面方向は、コルゲート構造の有無に対して隣接素子との結合量はあまり変わらない。対角方向は 10dB 程度改善されている。また、周囲素子との結合量は、全ての方向についてコルゲート構造があることにより減少した。以上の検討から、コルゲート構造の効果により素子間相互結合を大幅に低下させることができ、その効果は特に E 面アレー素子に対して強く現れることが明らかになった。

中央素子#5-5, および E 面方向, H 面方向の周囲素子を励振した場合の、中心周波数 10GHz におけるアレー素子パターンを図 8 に示す。E 面方向端部において軸対称性が得られていないが、その他の位置におけるアレー素子パターンはほぼ軸対称のアレー素子パターンが得られた。

4. 動作メカニズムの考察

3 素子 E 面アレーの素子間隔を制御して軸対称な指向性を有するアンテナ構造を設計し、同じ素子間隔を 81 素子 2 次元アレーに適用して数値解析を行った結果、ビーム幅はほとんど変化せず、軸対称の指向性を保つ結果が得られた。アレー動作のメカニズムを考察するため、中央素子#5-5 を励振し、その他の 80 素子を終端したときの、基板の導体面を含む複素電界の振幅と位相を求めた。これを図 9 に示す。



(a) コルゲート構造がある場合

(b) コルゲート構造がない場合

図 9 電界 E_z 分布 (振幅, 位相, 10GHz)

コルゲート構造がある場合は、ない場合に比べて結合による隣接素子、周囲素子への電界の広がり小さく、主に隣接素子のみ励振されている。また、位相分布は概ね放射状であり、隣接素子があっても位相の乱れがない。一方、コルゲート構造がない場合は隣接素子間で強い電界が観測されており、位相分布の乱れも大きい。以上の考察から、コルゲート構造があることにより素子間相互結合が低下し、給電素子と隣接素子で放射特性が決定されるものと考えられる。

5. むすび

リアルタイムパッシブイメージングに用いる目的で、対せき形フェルミアンテナアレーのFDTD解析を行った。その結果、コルゲート構造が素子間相互結合を低減できること、APFAAは比較的少数のAPFAによる設計で大規模アレーのビーム幅設計が可能であることがわかった。なお、APFAのように複雑な構造を有する有限周期アレーの電磁界解析には、大規模なメモリと高速演算処理が不可欠であり、スーパーコンピュータの利用が有利であることを付してむすびとする。

謝辞

本研究の一部は東北大学情報シナジーセンターのスーパーコンピュータを利用し、同センターとの共同研究で行われたものである。また、研究にあたっては同センターの有益なご指導と多大な協力をいただいた。

参考文献

- [1] 宇野亨, FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [2] Y. Takagi, H. Sato, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, "Study of High Gain and Broadband Antipodal Fermi Antenna With Corrugation," Proceedings of 2004 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'04), 1B2-1, pp69-72, Sendai, 2004.
- [3] 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," 2005 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'05), Vol. I, pp. 387-390, Seoul, Korea, 2005.
- [4] H. Sato, Y. Murakami, K. Sawaya, and K. Mizuno, "FDTD Analysis of 81-element Antipodal Fermi Antenna Array with Axially Symmetric Array Element Pattern," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, USA, 2008.