

広帯域対せき形フェルミアンテナを用いた

マイクロ波イメージング

佐藤弘康 高木由紀子 我妻寿彦* 水野皓司* 澤谷邦男

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

近年、通信や計測の分野において、超広帯域の周波数を用いた様々な応用が期待されている。UWB 通信の応用としては無線 LAN、無線タグ、医用レーダ、無人航行用レーダなど多岐にわたる。計測分野では、生体内部観測、地中探査、建築物非破壊検査、地震、火災などの災害時に使用される人命探査装置などの Through Wall Imaging 技術が挙げられる。筆者らはこれまでイメージングに適したアンテナ[1], [2]として、広帯域かつ高利得な対せき形フェルミアンテナ(Antipodal Fermi Antenna, APFA)を提案し、FDTD (Finite-Difference Time-Domain: 有限差分時間領域)法[3]を用いてその設計を行った[4]。本報告では APFA の周波数特性、及び時間領域特性を詳細に検討し、イメージングへ適用した例を述べる[5]。

2. 解析モデル

対せき形フェルミアンテナの構造を図 1 に示す。このアンテナの特徴は、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を提供することができる。フェルミ関数は量子力学において電子のエネルギー準位を表す関数として知られており、

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

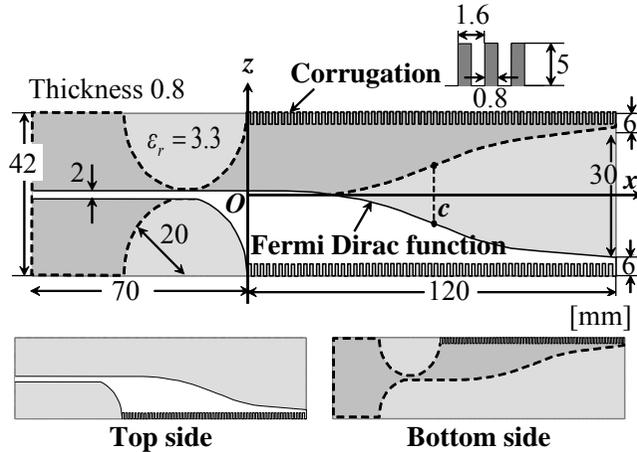


図1 対せき形フェルミアンテナの構造

で与えられる．ここで a, b, c はテーパの形状を表すパラメータである． a は $x \rightarrow \infty$ における関数の漸近値を表わし， c は関数の変曲点である．また， $f'(c) = ab/4$ であり， b は変曲点における接線の傾きを決めるパラメータとなる．ここで $f(c) = a/2$ の関係があり，また， $b(L-c) \gg 1$ であれば，開口幅は $W = 2a$ で与えられる．設計周波数を 10GHz (波長 $\lambda_0 = 30\text{mm}$) とし，開口幅を 30mm (λ_0)，アンテナ長を 120mm ($4\lambda_0$) とした．また，コルゲート構造は 7.5GHz 以上で動作する寸法で設計を行った．誘電体基板の比誘電率は 3.3 とした．

上述のように，対せき形フェルミアンテナは多数の構造パラメータを持つため数値シミュレーションによる設計が有効である．特に FDTD 法は給電にパルスを用いて応答波形のフーリエ変換により広帯域の周波数特性を一回の計算で得ることができるので，広帯域アンテナの設計に適していると考えられる．本アンテナのように，波長に対して比較的大きい構造に対して FDTD 法を適用するためには，高速かつ大容量のメモリを備えたスーパーコンピュータの使用が有効である．解析においてセルサイズは $\Delta x = 0.4\text{mm}$ ， $\Delta y = 0.2\text{mm}$ ， $\Delta z = 0.25\text{mm}$ ，吸収境界条件は 8 層の PML (Perfectly Matched Layer) を使い，解析領域はアンテナから PML までの距離がそれぞれ $40\Delta x$ ， $20\Delta y$ ， $60\Delta z$ となるように決定した．また，給電はマイクロストリップ線路端でガウスパルスを励振して行った．

3．APFA の解析及び実験結果

VSWR の周波数特性を図 2 に示す．FDTD 法による計算値と実験値は概ね一致している．6GHz から 14GHz にかけて VSWR が低くなり， $VSWR < 2$ となる比帯域は 1:2.5 であった．周波数 10GHz における E 面と H 面の放射パターンを図 3 に示す．計算

値と実験値は良く一致しており，H 面のビーム幅が E 面のビーム幅に比べてわずかに広がる結果が得られた．

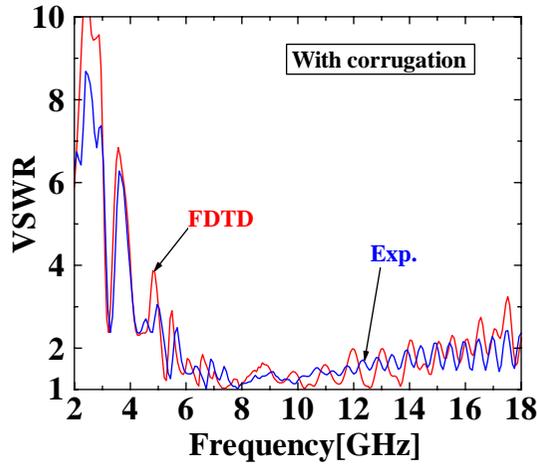


図2 VSWRの周波数特性

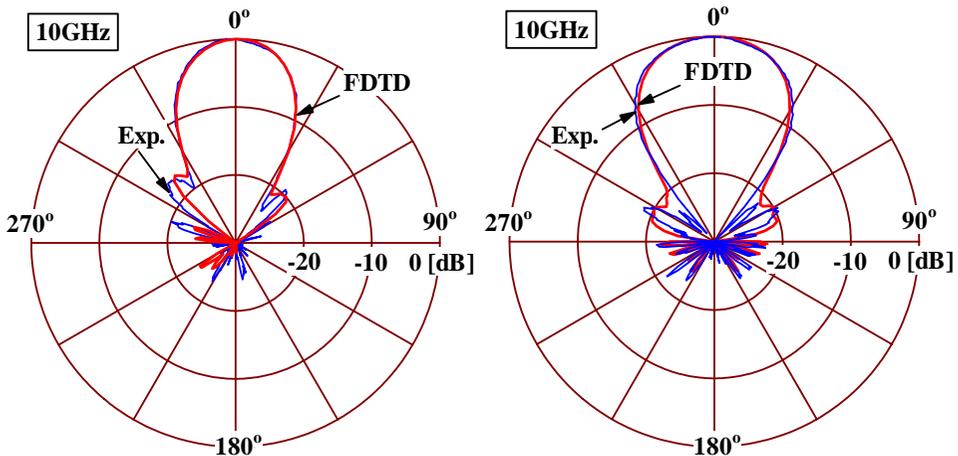


図3 周波数 10GHz における放射パターン

次に2つのAPFAを対向させ，ネットワークアナライザを用いて透過係数 (S_{21}) を測定した．素子間距離 $d=0, 0.5, 1m$ に対する S_{21} の振幅と群遅延の周波数特性を図3に示す．コルゲート構造が動作する $7.5GHz$ 以上の帯域においてほぼ一様な振幅が得られ，群遅延は周波数に対してほぼ一定の値を持つ結果が得られた．次に，NAのタイムドメイン機能を用いてパルス応答を求めた．周波数帯域 $2 \sim 18GHz$ を含むパルス応答を図4に示す．入射パルスと比べると，わずかな歪が観測されているが，これはコ

ルゲート構造が動作しない2~7.5GHzの周波数成分を含んだためと考えられる。各応答波形のピーク値の遅延時間は $d=0, 0.5\text{m}, 1\text{m}$ の場合に対してそれぞれ $\tau=1.97\text{ ns}, 3.65\text{ ns}, 5.33\text{ ns}$ であった。これらの値から、 $c(\tau(0.5\text{m})-\tau(0))=c(\tau(1\text{m})-\tau(0.5\text{m}))=504\text{mm}$ が得られ、パルスの遅延時間にほぼ比例した距離が観測された。

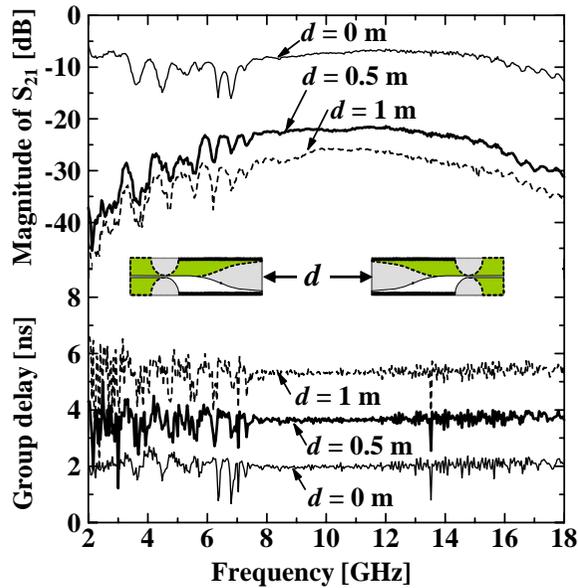


図4 透過係数 (S_{21}) の振幅と群遅延の周波数特性

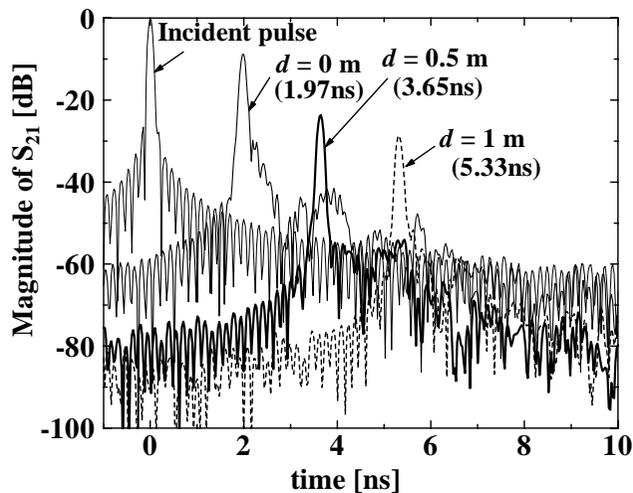


図5 透過係数 (S_{21}) のパルス応答特性

4.2 素子 APFA アレーを用いたイメージング実験

APFAをイメージングに応用することを目的として、2素子H面APFAアレーによる準モノスタティックレーダを製作した。これを図6(左)に示す。アレー素子間隔 $D_H = 37\text{mm}$ とし、前節と同様にネットワークアナライザのタイムドメイン機能を用いた。実験モデルを図6(右)に示す。アレーアンテナの前面から200mm離れた位置に、導体枠付ベニヤ板を配置し、その背後に導体柱、導体定規、木材柱を配置し、1m四方の観測領域に対してアンテナを走査し、パルス応答を測定した。

$t = 3.29\text{ ns}$, 5.16 ns , 7.53 ns におけるパルス応答の振幅分布をそれぞれ図7に示す。 $t = 3.29\text{ ns}$ の場合、主にベニヤ板の導体外枠のイメージが得られており、強い反射波が観測されている。一方、 $t = 5.16\text{ ns}$ の場合、ベニヤ板の背後に隠れた導体柱、導体定規のイメージが得られており、ベニヤ板による減衰が小さいと考えられる。さらに $t = 7.53\text{ ns}$ の場合、木材柱からの反射波も観測されている。これらのイメージの空間分解能は十分とは言えない。しかしながら、APFAの広帯域かつ高利得の特性によりレンズや合成開口法などの信号処理を用いなくても概ね形状を認識することができると思われる。

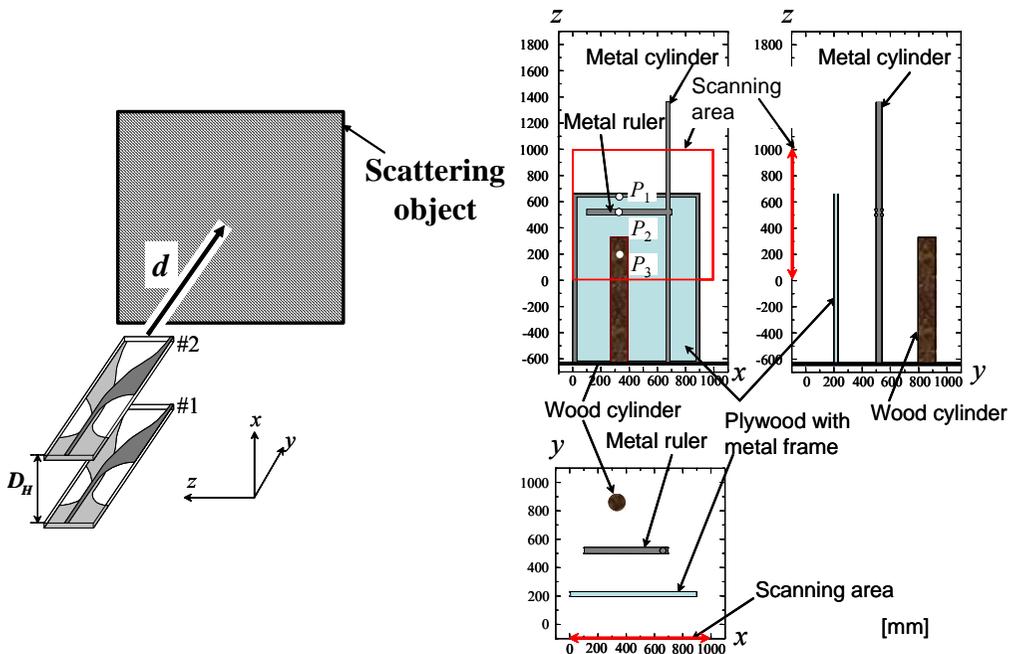
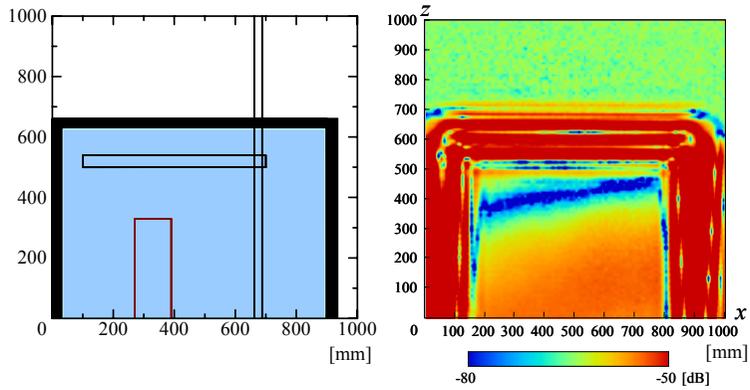
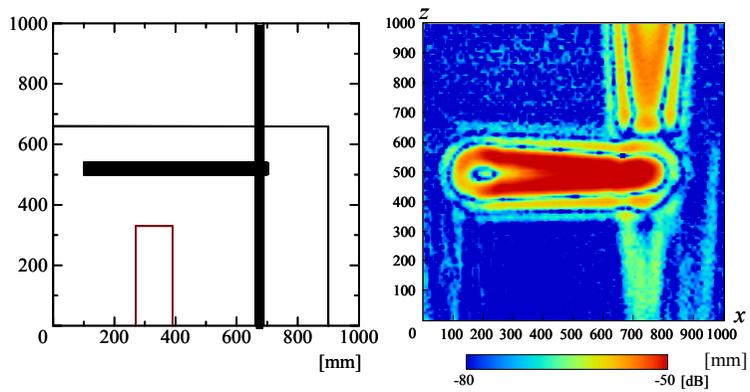


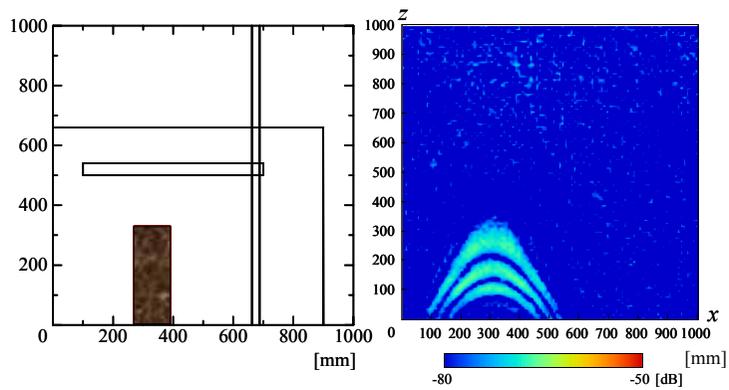
図6 2素子H面APFAアレー(左)とイメージング実験モデル(右)



(a) $t = 3.29$ ns



(b) $t = 5.16$ ns



(c) $t = 7.53$ ns

図7 $t = 3.29$ ns, 5.16 ns, 7.53 ns におけるパルス応答の振幅分布

5. むすび

スーパーコンピュータを用いて対せき形フェルミアンテナの FDTD 解析を行い、イメージング実験に応用した。本アンテナの広帯域特性、高利得特性、および軸対称指向性を有する特性により、複雑な信号処理を用いることなく比較的鮮明なイメージを得ることができた。イメージングに適したアンテナ構造を求めるために、スーパーコンピュータを用いた大規模数値解析が有効と考えられる。今後はリアルタイムイメージングを目指してアレーアンテナの数値解析を行う予定である。

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。また、装置の工作に当たり、東北大学電子・応物・情報系附属工場の小林昌博氏のご協力を頂いた。ここに深謝する。

参考文献

- [1] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 新井直人, 我妻寿彦, 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,” 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. J86-B, No. 9, pp. 1851-1859, (2003-9).
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 我妻寿彦, 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,” 電子情報通信学会論文誌(B), 採録済。
- [3] 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。
- [4] 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.
- [5] 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.