

対せき形フェルミアンテナアレーの基礎特性

村上 仁康[†] 佐藤 弘康[†] 澤谷 邦男[†] 水野 皓司^{††}

[†] 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

^{††} 東北大学電気通信研究所 〒980 8577 仙台市青葉区片平 2 1 1

E-mail: {mura, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp, koji@riec.tohoku.ac.jp

あらまし 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81素子対せき形フェルミアンテナアレー (Antipodal Fermi Antenna Array, APFAA) の設計を行っている。まずはじめに、3素子E面アレーにおいて素子間隔を制御することにより軸対称なアレー素子パターンが得られることについて述べ、得られた素子間隔を9素子E面アレーおよび81素子アレーに適用した。その結果、何れのアレーについても、素子間隔 1.4λ においてビーム幅 60° 程度の軸対称アレー素子パターンが得られた。軸対称特性の帯域は40%程度である。さらに、コルゲート構造の効果によって広帯域にわたり素子間相互結合が15dB~20dB程度減少することも明らかとなった。キーワード パッシブイメージング、広帯域アンテナ、アレーアンテナ、素子間相互結合

Fundamental Characteristics of Antipodal Fermi Antenna Array

Yoshiyasu MURAKAMI[†], Hiroyasu SATO[†], Kunio SAWAYA[†],

and Koji MIZUNO^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba-ku, Sendai 980 8579, Japan

^{††} Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

Aoba-ku, Sendai 980 8677, Japan

E-mail: {mura, sahiro, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp, koji@riec.tohoku.ac.jp

Abstract Design of 81-element antipodal Fermi antenna array (APFAA) used for real time passive millimeter-wave (PMMW) imaging is presented. First, affect of the array spacing of 3-element E-plane APFA array is studied to obtain on axially symmetric array element pattern and the resulting array spacing is applied to the array of 9 elements and 81 elements. As a result, the axially symmetric array element pattern with the beam width of about 60° are obtained for each 3, 9, and 81 element array when the array spacing is 1.4λ . The band width with symmetrical pattern is about 40%. Furthermore, it is demonstrated that lower mutual coupling is obtained by the presence of corrugation by levels of 15dB-20dB.

Key words Passive imaging, Broadband antenna, Array antenna, Mutual coupling

1. ま え が き

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[1],[2]。要求されるアレーアンテナの特性は、広帯域で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を広帯域にわたり実現可能な開口幅の狭いフェルミアンテナの設計をFDTD法を用いて行ってきた[3]-[6]。しかしながら、それらの検討は単素子が主であった[7]。

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

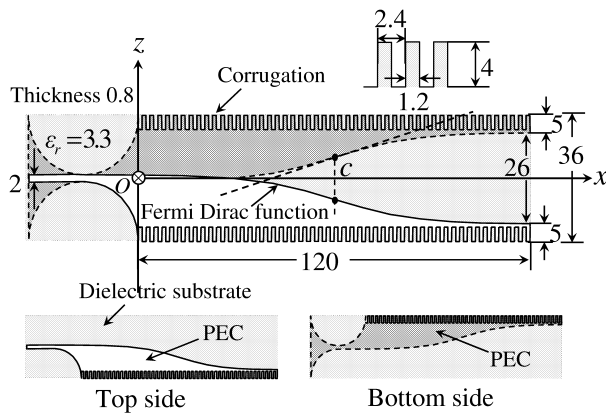


図1 APFAの構造

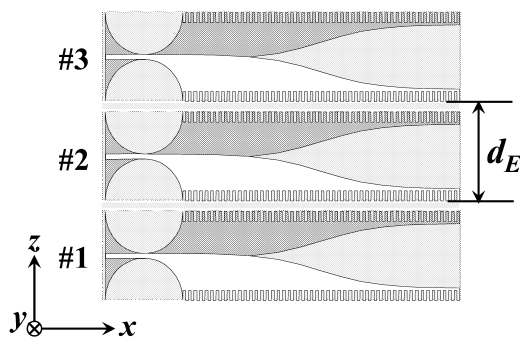


図2 3素子E面APFAアレーの構造

Array, APFAA) の設計を行った結果を述べる。

2. APFAアレーの設計

2.1 構造

APFAの構造及び寸法を図1に示す。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

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

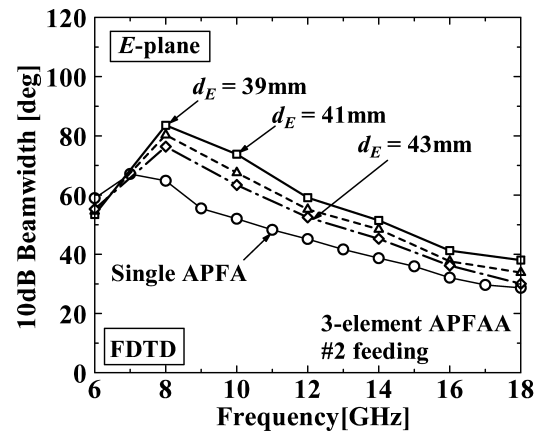
で与える。ここで、 a, b, c はテーパ形状を決定するパラメータである。 a は開口幅 W の半分程度($W \simeq 2a$)であり、 c はフェルミ関数の変曲点の x 座標、 b は変曲点位置における接線の傾きを与えるパラメータである。このAPFAは文献[4]における基準モデルの構造を10GHz帯にスケールしたものである。

図2にAPFAを z 方向に素子間隔 d_E で3素子配列した3素子E面APFAアレーを示す。

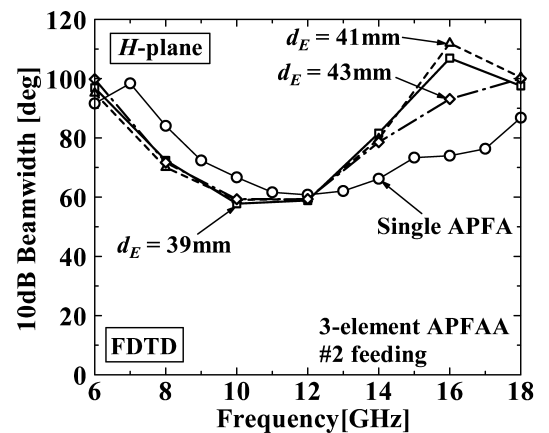
FDTD解析において、セルサイズは $\Delta x = 1.2\text{mm}$ 、 $\Delta y = 0.4\text{mm}$ 、 $\Delta z = 0.5\text{mm}$ であり、タイムステップ数は30,000とした。吸収境界条件として8層のPMLを用いた。励振はマイクロストリップ線路の特性インピーダンス 50Ω を内部抵抗としたガウスパルスを与えて行った。

2.2 3素子E面APFAアレー [7]

素子間隔 d_E を変化させた場合の3素子アレーの10dB



(a) E面



(b) H面

図3 10dBビーム幅の周波数特性(3素子E面APFAアレーの計算値)

ビーム幅の計算結果を図3に示す。また、比較のために単素子APFAの結果を併して示す。E面ビーム幅では、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。設計周波数10GHzにおいて、E面ビーム幅は単素子が 53° であり、 $d_E = 39\text{mm}$ 、 41mm 、 43mm のときそれぞれ 74° 、 68° 、 63° であった。H面においては、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面アレーのH面ビーム幅は変化しないこと、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を利用し、軸対称アレー素子パターンを得ることができる事がわかった。

$d_E = 43\text{mm}$ のときの10dBビーム幅の周波数特性を図4に、また10GHzにおけるアレー素子パターンを図5に、実験結果と共にそれぞれ示す。なお、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

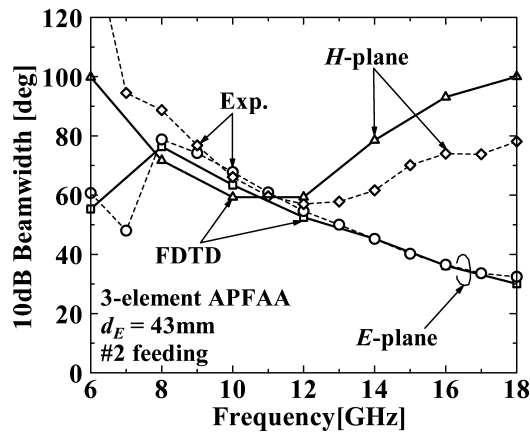


図4 10dB ビーム幅の周波数特性 (3 素子 E 面 APFA アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)

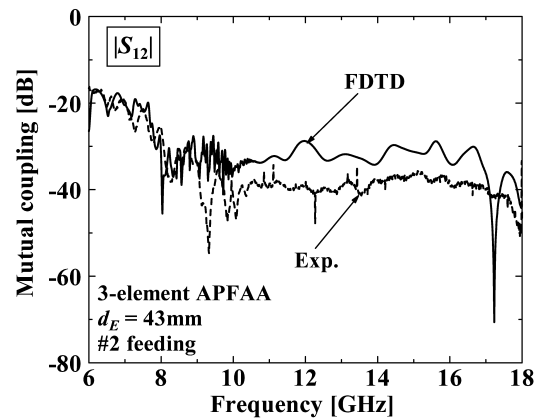
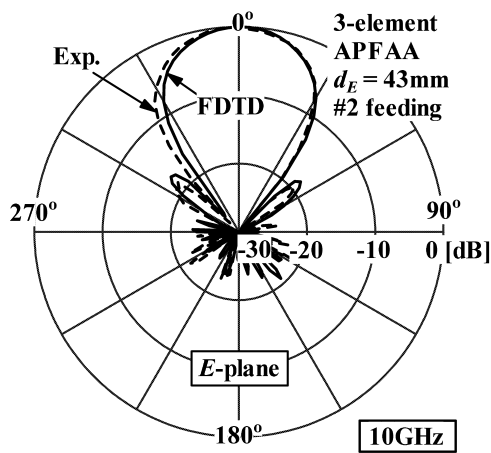
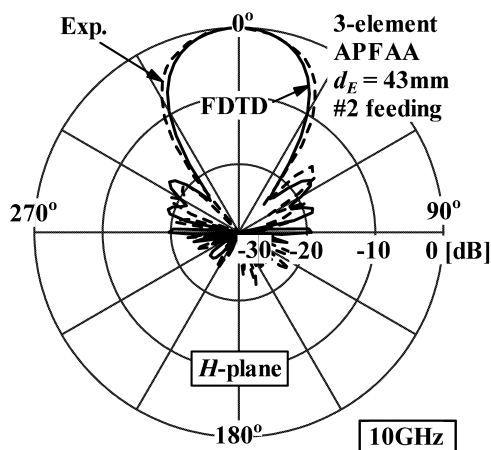


図6 素子間相互結合の周波数特性 (3 素子 E 面 APFA アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)



(a) E 面



(b) H 面

図5 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 アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)

は誘電体にギャップがある．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 8~12GHz(帯域 40%)においてビーム幅は約 60° 程度の軸対称なアレー素子パターン

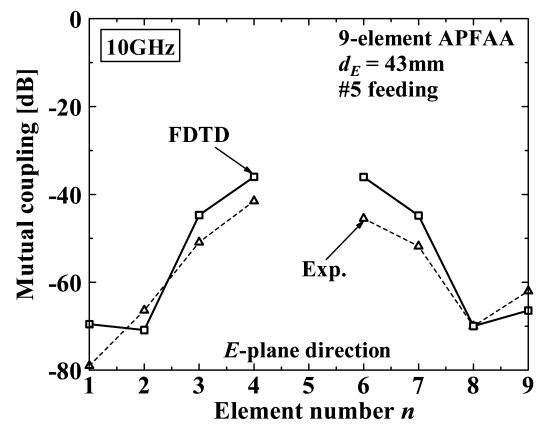


図7 素子間相互結合分布 (9 素子 E 面 APFA アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)

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とが考えられる．以上の結果から，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した．

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6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．

2.3 9素子 E 面 APFA アレー

前節では，3素子 E 面 APFA アレーにおいて，素子間隔を制御することにより軸対称なアレー素子パターンを得る設計指針を述べ，実験的に妥当性を確認し，素子間隔 $d_E=43\text{mm}$ において10dBビーム幅60°程度の軸対称なアレー素子パターンを得た．しかしながら，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考え

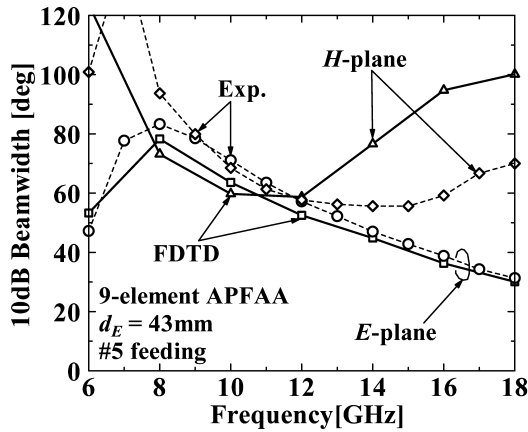
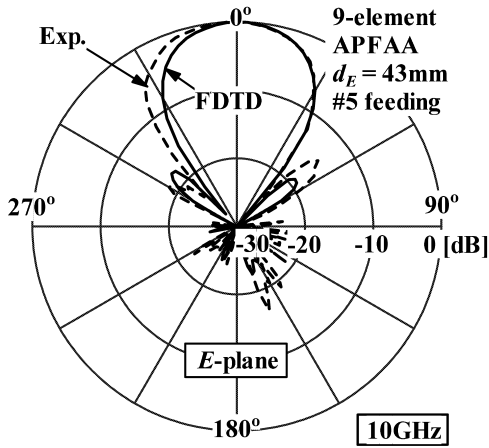
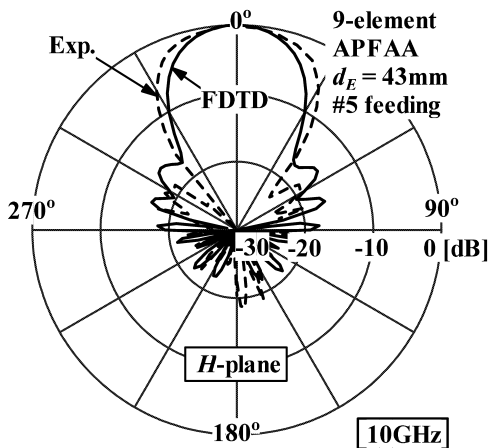


図8 10dB ビーム幅の周波数特性 (9 素子 E 面 APFAA アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)



(a) E 面



(b) H 面

図9 10GHzにおける中央素子(#5)のアレー素子パターン(9素子 E 面 APFAA アレーの計算値と実験値, $d_E=43\text{mm}$)

られるので, 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ができるとは言えない. そこで E 面アレーの素子数を 3素子から 9素子に増やし, 解析と実験を行った. FDTD 解析におけるセルサイズ等の

各パラメータは 3素子 E 面 APFA アレーの解析と同じである. 素子間隔は $d_E=43\text{mm}$ とし, 3素子の実験とは異なり誘電体基板 1枚に 9素子アレーを製作した.

9素子 E 面アレーの中央素子#5を励振したときの, 10GHzにおける素子間相互結合を図7に示す. 計算結果と実験結果は, 隣接素子との結合において多少の差が見られたが概ね一致した. 隣接素子への結合は 10GHzにおいて -36dB (計算値)であった.

10dB ビーム幅の周波数特性を図8に, また 10GHzにおけるアレー素子パターンを図9にそれぞれ示す. 計算結果と実験結果は概ね一致した. 計算結果において, 8~12GHzで軸対称なアレー素子パターンが得られており, 10GHzにおけるビーム幅は E 面が 64° , H 面が 60° であった. これらの放射特性は 3素子 E 面アレーの特性とほぼ一致しており, 3素子 E 面アレーを用いた設計指針が 9素子 E 面アレーに対しても適用できるものと考えられる.

3. 81素子 APFA アレー

3素子 E 面アレー, 及び 9素子 E 面アレーは, E 面方向のみにアレーを構成した 1次元アレーであった. 本節では FDTD 法による解析を 2次元アレーに拡張し, 図10に示す 81素子 APFA アレーの FDTD 解析を行った. アンテナ番号を $\#m-n$ とする. 素子間隔は, 3素子及び 9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. タイムステップ数を 50,000 とし, その他の解析パラメータは 3素子及び 9素子アレーの解析と同様である.

3.1 素子間相互結合

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11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_{mn-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を設け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

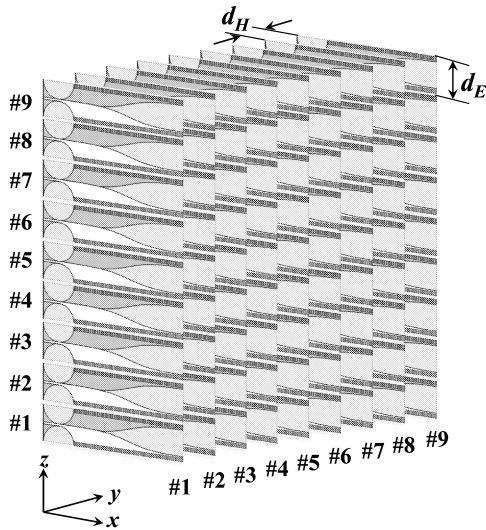
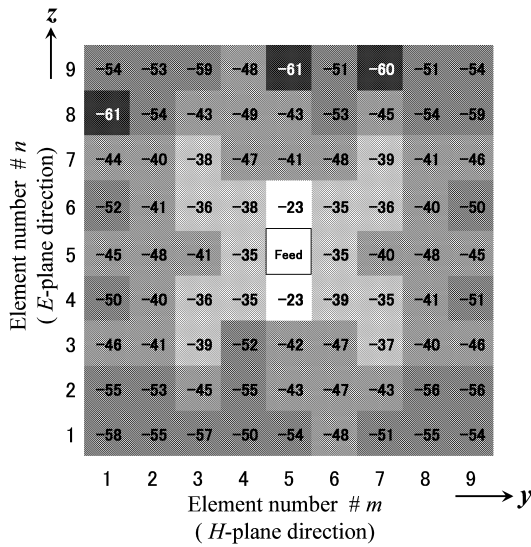
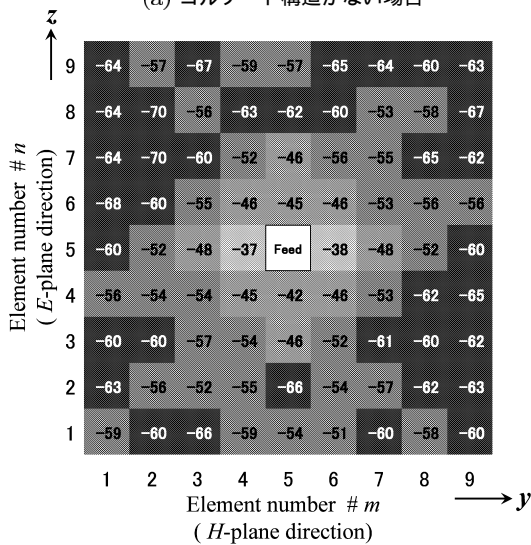


図 10 81 素子 APFA アレーの構造

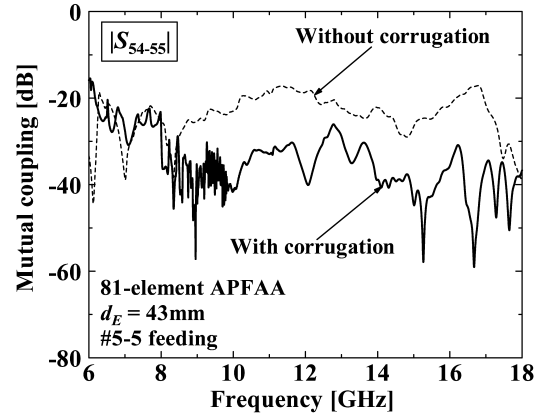


(a) コルゲート構造がない場合

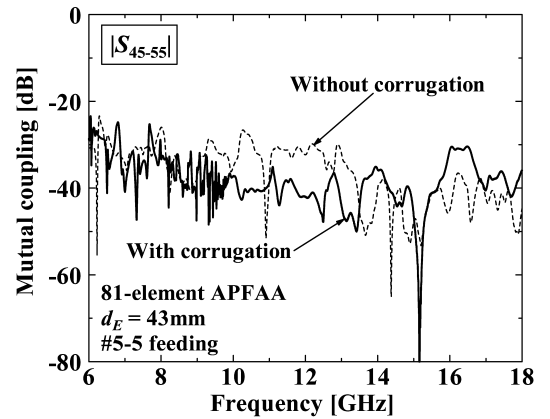


(b) コルゲート構造がある場合

図 11 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, $d_E=d_H=43\text{mm}$)



(a) $|S_{54-55}|$ (E 面アレー方向)



(b) $|S_{45-55}|$
(H 面アレー方向)

図 12 中央素子 (#5-5) を励振したときの素子間相互結合の周波数特性

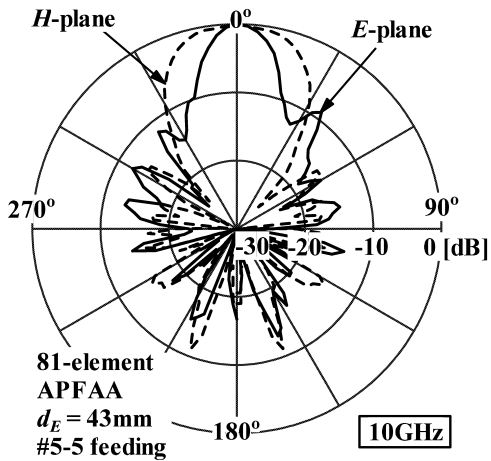
なった。

給電素子の E 面方向隣接素子 #5-4, 及び H 面方向隣接素子 #4-5 との結合量 S_{54-55} , S_{45-55} の周波数特性を図 12 に示す. E 面方向の隣接素子への結合は, コルゲート構造を設けることにより 15dB 程度の改善効果が見られ, 改善効果の広帯域性が得られた. 一方, H 面方向についてはコルゲート構造の有無に関わらず広帯域にわたり -30dB 以下の低い結合量が得られ, $d_H=43\text{mm}$ の素子間隔における改善効果は小さい.

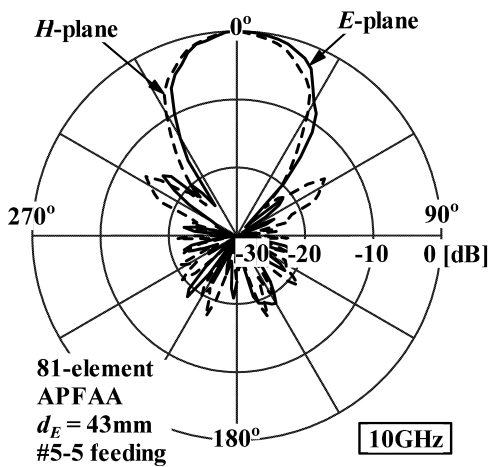
3.2 放射特性

中央素子 #5-5 を励振した場合の, 周波数 10GHz におけるアレー素子パターンを図 13 に示す. コルゲート構造がない場合, 軸対称性のないアレー素子パターンが得られ, E 面において -10dB を超える大きなサイドローブが確認された. 一方, コルゲート構造がある場合は, サイドローブレベルが低く, ほぼ軸対称のアレー素子パターンが得られた.

アレー素子パターンの 10dB ビーム幅の周波数特性を図 14 に示す. コルゲート構造がない場合, E 面ビーム



(a) コルゲート構造がない場合



(b) コルゲート構造がある場合

図 13 10GHz における中央素子 (#5-5) のアレー素子パターン (9 素子 E 面 APFA アレーの計算値, $d_E=43\text{mm}$)

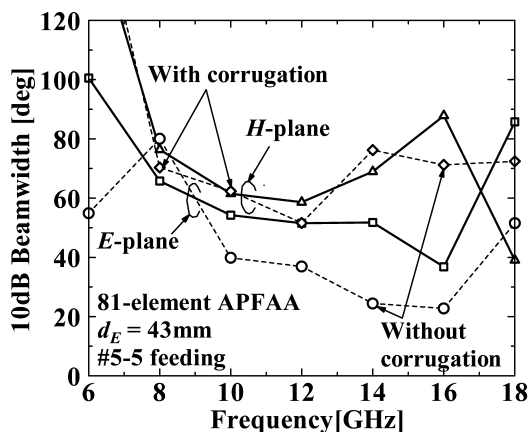


図 14 10dB ビーム幅の周波数特性

幅に強い周波数特性が観測され、ビーム幅の軸対称性が得られていない。一方、コルゲート構造がある場合、8~12GHz において概ね軸対称なアレー素子パターンが得られ、10GHz における 10dB ビーム幅は、 E 面が 54° 、 H 面が 62° であり、約 60° の軸対称なアレー素子パターン

が得られた。

以上の結果から、81 素子の放射特性は 3 素子 E 面アレー及び 9 素子 E 面アレーの特性とほぼ一致している。これは、3 素子 E 面アレーを用いたアレー素子パターンのビーム幅の設計指針が、多素子アレーに対して概ね適用できることを表している。

4. まとめ

対せき形フェルミアンテナを素子とする APFA アレーについて、3 素子 E 面アレー、9 素子 E 面アレー、及び 81 素子アレーを構成し、FDTD 解析及び実験により放射特性及び素子間相互結合特性を評価した。どのアレーモデルについても、 $d_E=43\text{mm}$ とすることにより 10dB ビーム幅が 60° 程度の軸対称アレー素子パターンが約 40% の帯域にわたって得られ、3 素子 E 面アレーの素子間隔制御を用いた放射特性の予測、及びビーム幅の設計が可能であることを示した。さらに、コルゲート構造があることにより、多素子アレーの素子間相互結合が 15dB ~ 20dB 程度改善されることも明らかとなった。以上の軸対称指向性、低い素子間相互結合は、それぞれ高分解能レンズアンテナ、及び高感度ミリ波受信回路に有効と考えられる。

文 献

- [1] K. Uehara, K. Miyashita, K. Natsume, K. Hatakeyama and K. Mizuno, "Lens-coupled imaging arrays for the millimeter- and submillimeter-wave regions," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, no. 5, pp. 806-811, May 1992.
- [2] K. Mizuno, "Millimeter wave imaging technologies (Invited)," in Proc. 2001 Asia-Pacific Microwave Conference, pp. 394-398, Taipei, Dec. 2001.
- [3] 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).
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, "FDTD Analysis of Fermi Array Antenna for Passive Millimeter Wave Imaging," 2004 Korea Japan Joint Conference Digest, pp. 959-962, Seoul, Korea, 2004.