

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

井上 大聡[†] 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: ino@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし ミリ波パッシブイメージング用誘電体レンズアンテナの解析を行っている。高感度，高分解能のイメージングを実現するためには，アンテナの放射指向性の最適化設計に加え，誘電体レンズの最適化設計が望まれ，電磁界解析による設計が行われてきた。本報告では，文献[1]で提案された小形非球面誘電体レンズの基礎特性を実験的に求め，FDTD法との比較を行った結果について述べる。さらに，パッシブイメージングを想定したFDTD法を用いた熱雑音電力の解析の一手法を提案し，その妥当性について評価している。

キーワード ミリ波，イメージング，レンズ，FDTD，熱雑音

Design of Compact Dielectric Lens Antenna Used for Millimeter-Wave Imaging

Hirotoishi INOUE[†], 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: ino@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Analysis of dielectric lens used for millimeter-wave passive imaging is performed. In order to realize a high-sensitivity and high-resolution imaging, not only the design of optimum antenna radiation pattern but also the optimum design of dielectric lens are desired and have performed by using the electromagnetic field analysis. In this report, a fundamental characteristics of non-spherical dielectric lens proposed in [1] is obtained by experiment. Furthermore, a method of thermal noise power analysis used for FDTD method is proposed and the validity of the method is evaluated.

Key words Millimeter-wave, Imaging, Lens, FDTD, Thermal Noise

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・増幅して像を得る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[2],[3],[4]．応用分野としては，人体，植物などの生体情報の取得，銃器，爆発物の探査などのセキュリティ，火災，地震などの災害時における炎，壁を通しての人命探査など多岐にわたる．受信信号が熱雑音という極めて微弱なものであるため，低雑

音増幅器，高感度検波器に加え，高効率のレンズアンテナが要求される．さらに像をリアルタイムで得るためには，レンズの像面にイメージング素子アレーを配置する必要があり，像の空間分解能を向上させるためにはアンテナ素子の小形化が望まれている．

筆者らはこれまで，高感度に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フェルミアンテナの設計を行ってきた[5],[6]．多数の構造パラメータを有するフェルミアンテナの設計には電磁界解析が有効である．レンズの

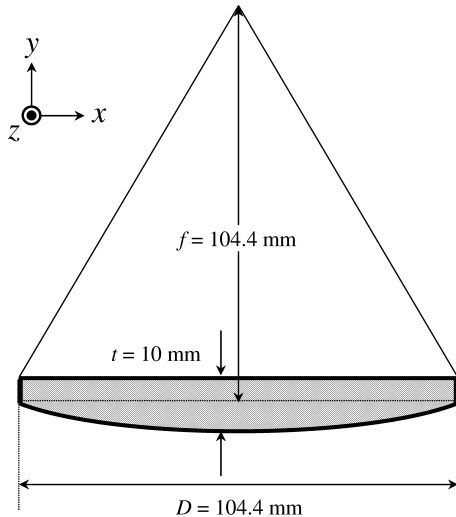


図1 誘電体レンズの構造 .

設計には一般に光線追跡法が用いられており、文献[1]では、ミリ波パッシブイメージングシステムの小型化を図るため、35GHz帯において10波長の口径を有するアルミナレンズが光線追跡法を用いて設計され、ホーンアンテナと高感度RF受信回路を組み合わせたシステムによるパッシブイメージングに適用されている。しかしながら、アンテナは波長程度の大きさを持ち、アレーアンテナと高感度な結合を得るためのレンズ設計は電磁界解析が重要と考えられる。

本報告では、文献[1]で設計された10波長小形非球面誘電体レンズの基礎特性を得ること、及びパッシブイメージング用高感度レンズアンテナを設計するための基礎資料を得ることを目的として、実験を行い、2次元FDTD解析との比較を行った結果を述べる。さらに、パッシブイメージングを想定したFDTD法を用いた熱雑音電力の解析の一手法を提案し、その妥当性について述べる。

2. レンズの解析

2.1 レンズの構造

解析に用いた誘電体レンズの構造を図1に示す[1]。設計周波数を35GHz ($\lambda_0 = 8.57\text{mm}$)とし、レンズの比誘電率は $\epsilon_r = 9.73$ (アルミナ)、直径 $D = 104.4\text{mm}$ ($12.2\lambda_0$)、焦点距離 $f = 104.4\text{mm}$ ($12.2\lambda_0$)、厚さ $t = 10\text{mm}$ ($1.17\lambda_0$)である。レンズ曲面は収差が小さくなるように光線追跡ソフトZEMAXを用いて設計されており[1]、その曲面が

$$f(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)c^2r^2}} \quad (1)$$

で与えられる非球面形状を持つ。ここで、 $K = -1.2377$ 、 $c = 4.608$ である。最適化された曲面は高次項を有するが、本報告では無視できるものとした。また、レンズの表面には周波数35GHzに対する整合膜 ($\epsilon_r = 3.02$, 厚さ

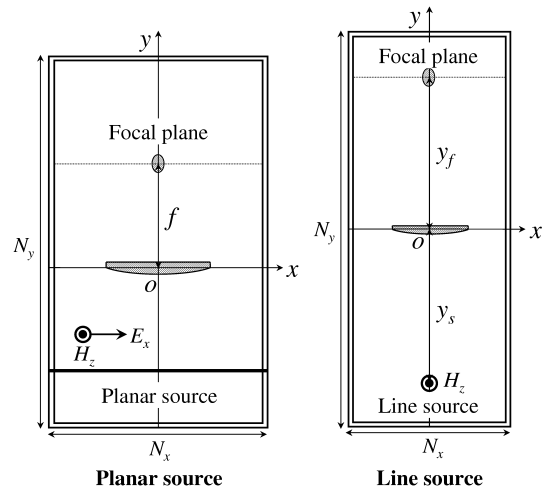


図2 解析モデル A (平面波垂直入射及び線波源) .

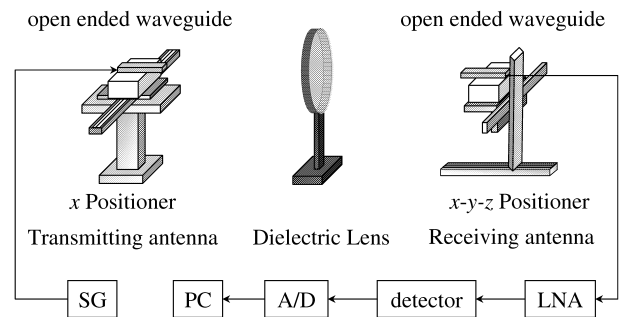


図3 測定系 .

1.2mm, ポリエーテルエミド) が貼り付けてある[1]。

2.2 解析モデル

前述のレンズに対して2次元FDTD法を用いた解析を行った。解析モデルを図2に示す。レンズの中心を原点に取り、平面波入射、及び線波源を用いた。平面波入射モデルを用いて焦点距離を求め、線波源モデルを用いて像面距離を求めた。入射波源はTM波 (E_x, E_y, H_z)とし、解析において、セルサイズは $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{mm}$ で、吸収境界条件として4層PMLを用い、タイムステップ数を20000、励振はガウスパルスとした。

2.3 測定系

2次元FDTD法の有用性を検証するため、図3に示す測定系で測定を行った。信号発生器から35GHzのRF信号を出力させ、導波管開放端から送信する。レンズを伝搬した信号を収束点を含む像面において、受信アンテナを走査させ受信する。受信アンテナには送信アンテナと同じ導波管開放端を用いた。受信信号は低雑音増幅回路により増幅され、高感度検波器で直流に変換される。これをデジタル信号に変換し、PCにおいて受信信号の電界強度を測定した。

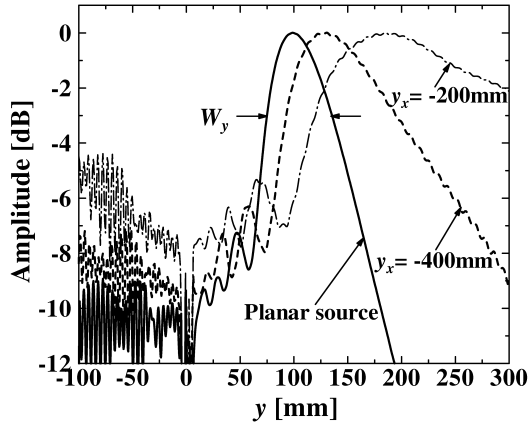


図4 光軸 (y 軸) 上の電界 E_x の分布 (a) 平面波入射の場合, (b) 線波源 $A(x_s, y_s)=(0, -400\text{mm})$ の場合, (c) 線波源 $B(x_s, y_s)=(0, -200\text{mm})$ の場合, 35GHz.

3. レンズの基礎特性

3.1 焦点位置と焦点深度

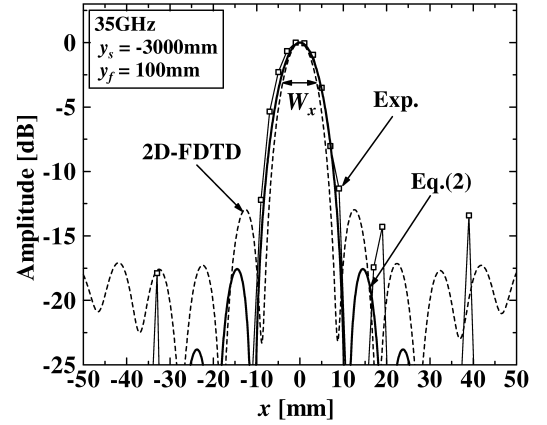
像面における x 軸方向 (横方向) の 3dB 幅を W_x , 光軸における y 軸方向 (縦方向) の 3dB 幅を W_y とする. W_x はビーム幅の評価に, W_y は焦点深度の評価にそれぞれ用いる. 平面波を入射した場合の光軸 (y 軸) 上の電界 E_x の振幅分布を図4に示す. 最大値で規格化した周波数 35GHz における値を示している. この図には $y_s = -400\text{mm}$ と -200mm の位置に線波源を置いた場合の解析結果も併せて示す. 焦点距離 $y_{peak} = 98.8\text{mm}$ ($11.3\lambda_0$), 焦点深度 $W_y = 60.2\text{mm}$ ($7\lambda_0$) が得られた. 焦点深度が深いので, 受信アンテナは y 方向の比較的広い範囲に配置できるものと考えられる.

3.2 回折パターン

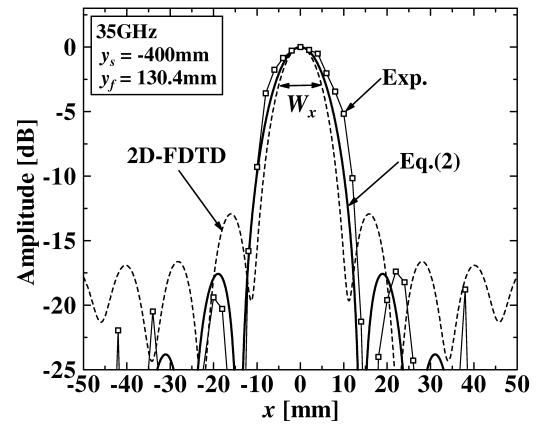
一般に, 回折パターンとしてエアリーパターン, 第1暗線間距離としてエアリーディスク, 及び2物点間の電力落ち込み量が74%となるレイリーの分解能が空間分解能の評価基準に用いられる. 本報告では実験と比較する回折パターンとして, 円形開口に対する回折パターンを用いた. 開口から十分離れた距離 $L(\gg D^2/\lambda)$ における, フランホーファー回折による像面での回折パターン P は次式で与えられる.

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

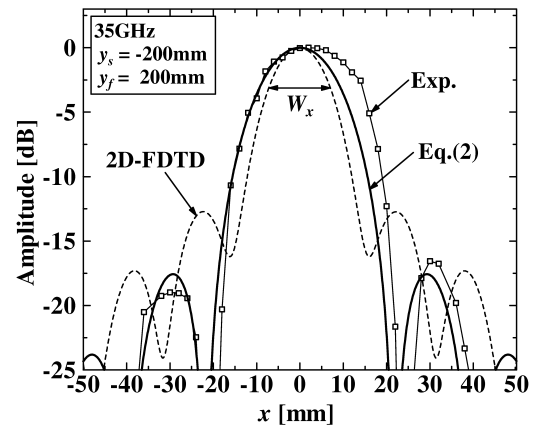
送信アンテナの位置を光軸上において, $y_s = -3000\text{mm}$, -400mm , -200mm と変化させた場合の各像面距離における回折パターンを図5に示す. 各モデルに対する像面距離はそれぞれ $y_{peak} = 98.8\text{mm}$, 130.4mm , 185mm であったが, ここではそれぞれ $y_f = 100\text{mm}$, 130.4mm , 200mm において回折パターンを求めた. 比較対象として (2) 式と併せて2次元FDTD法による解析結果も示す.



(a)



(b)



(c)

図5 像面における回折パターン (a) 平面波入射の場合, (b) 線波源 $A(x_s, y_s)=(0, -400\text{mm})$ の場合, (c) 線波源 $B(x_s, y_s)=(0, -200\text{mm})$ の場合.

x 軸方向のビーム幅 W_x , 第1暗線の位置, 1次回折波の振幅レベルについて, 実験結果は $y_s = -400\text{mm}$, -200mm において (2) 式と概ね一致した. $y_s = -3000\text{mm}$ における高次回折波, $y_s = -200\text{mm}$ における主ビームに見られた誤差は, レンズ端部における回折の影響や測定環境によるところが大きいと考えられる. 2次元FDTD法についてはスリット開口からの回折パターンであり, 完全に一致しないものの, 光軸付近においては概ね一致しており,

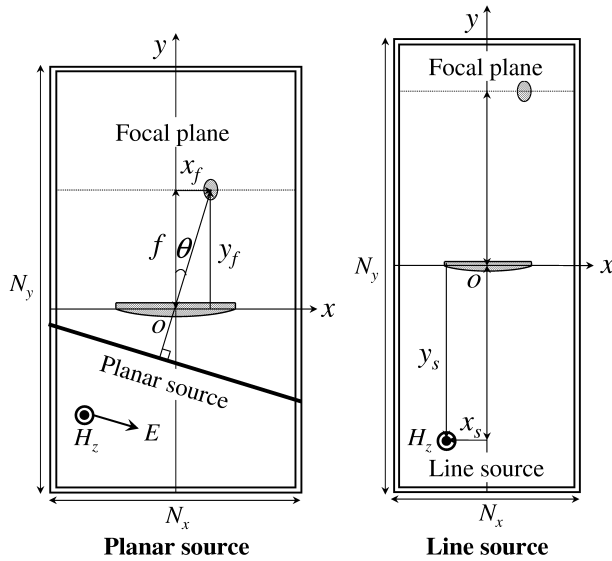


図 6 解析モデル B (平面波斜め入射及び線波源) .

有用性が確認された．波源が遠方の場合においては特に有用である．

3.3 収 差

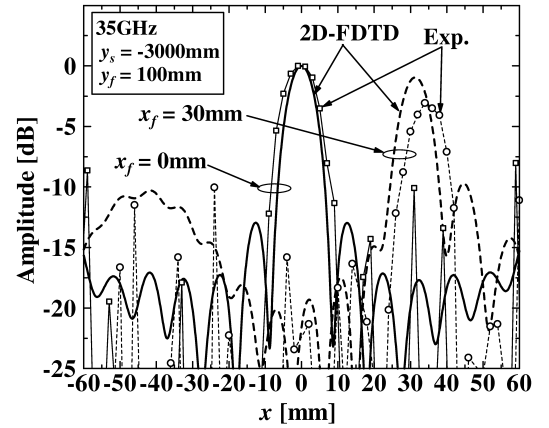
収差を議論するため，光軸からずれた位置の波源励振を考える．解析モデルを図 6 に示す．平面波入射の解析を行うため， $y_f=100\text{mm}$ における結像点 x_f と原点 O を結ぶ直線に垂直な平面波を，レンズに一樣に照射するように与えた．このとき $x_f = 30\text{mm}$ となる入射角 θ は 16.7° である．一方，線波源モデルについては $y_s = -400\text{mm}$ ， -200mm とし，幾何光学的に光軸から $x_f=0\text{mm}$ ， 30mm となる位置を波源とした．2次元 FDTD 解析の結果と併せてこれを図 7 に示す．

開口近似が異なるためビーム幅やサイドローブの振幅が異なるなど，一概に単純比較は出来ないものの，平面波入射及び線波源の解析結果のどちらについても妥当な結像点が得られたと考えられる．主ビームについては，波源が遠方の場合において振幅が 3dB 落ち込んだものの，近距離においてはほぼ一定であった．ビーム幅については波源の距離によらずほぼ一定であった．

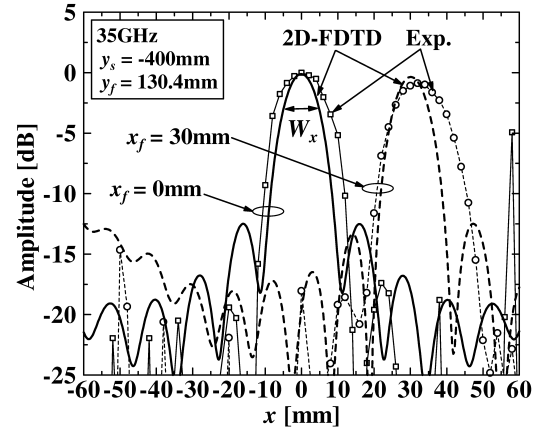
4. 熱雑音電力の FDTD 解析

ミリ波パッシブイメージング装置は対象物から放射されるミリ波帯の熱雑音を画像化する装置である．受信される熱雑音電力は帯域幅に比例し，帯域幅は受信アンテナや低雑音増幅器を含む受信回路の帯域幅で決まる．したがって，受信熱雑音電力の変化を評価する必要がある．本報告では，2次元 FDTD 法を用いて，帯域幅に対する熱雑音電力の解析を行った結果を述べる．

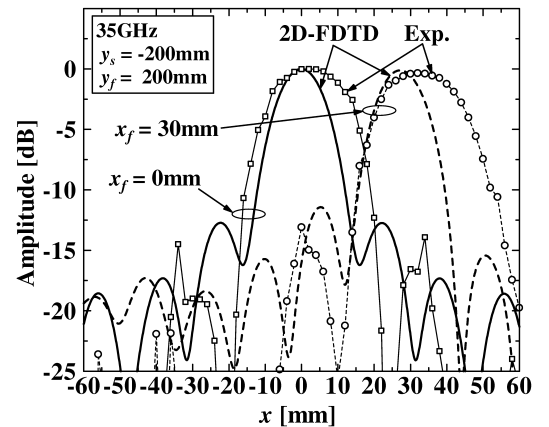
解析には図 6 で示した線波源の解析モデルを用い， $x_s = -15\text{mm}$ とした． y 軸について対称な位置に $\Delta X = 2|x_s|$



(a)



(b)



(c)

図 7 像面近傍における回折パターン (a) 平面波斜め入射 ($\theta = 0^\circ, 16.7^\circ$) の場合，(b) $y_s = -400\text{mm}$ における線波源 ($x_f=0, 30\text{mm}$) の場合，(c) $y_s = -200\text{mm}$ における線波源 ($x_f=0, 30\text{mm}$) の場合．

の距離を隔てて置かれた 2 つの波源を想定し，FDTD 法で求めた像面の電界強度から電力スペクトル

$$p^{\text{FDTD}}(f, x) = |E^{\text{FDTD}}(f, x)|^2 + |E^{\text{FDTD}}(f, -x)|^2 \quad (3)$$

を求め，周波数領域で積分し受信電力

$$P^{\text{FDTD}}(x) = \int_{f_c-B/2}^{f_c+B/2} p^{\text{FDTD}}(f, x) df \quad (4)$$

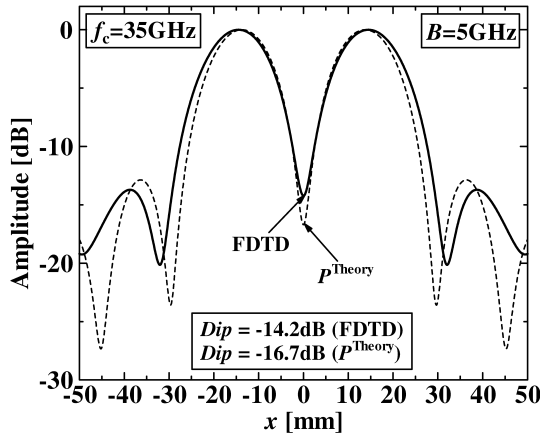


図 8 像面 ($y_f=200\text{mm}$) における電力分布 .

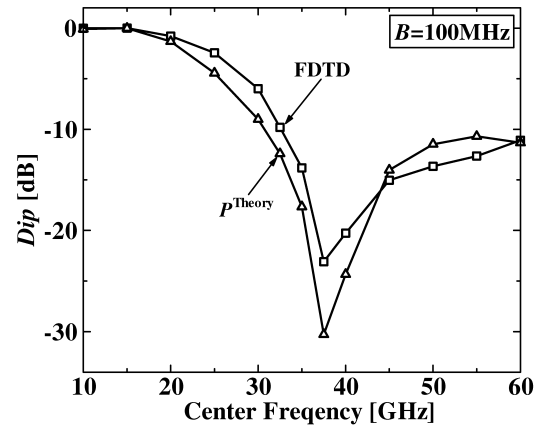


図 10 中心周波数に対する落ち込み量 .

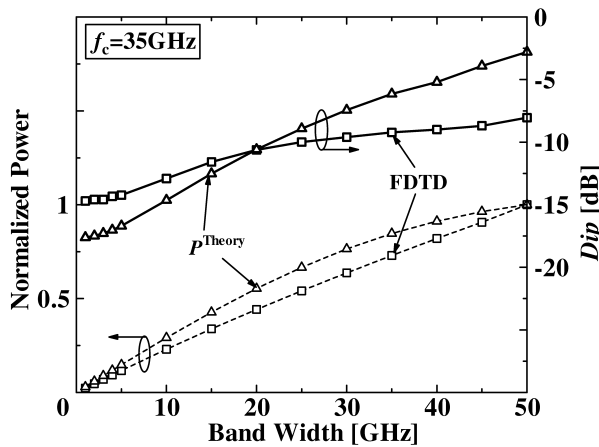


図 9 帯域幅に対する像面での最大電力と落ち込み量 .

を求めた結果を図 8 に示す . ただし , 中心周波数は $f_c = 35\text{GHz}$, 帯域幅は $B = 5\text{GHz}$ である . 比較のために , レンズ幅 D のスリット開口からのフランホーファ回折

$$E^{\text{Theory}}(f, x) = \frac{D \sin(DX)}{DX}, \quad X = \frac{\pi x}{\lambda b}, \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

を用い , (3), (4) 式と同様に電力 P^{Theory} を計算した結果も併せて示す . 両者は概ね一致した . $x = 0$ における振幅の落ち込み量は像の分解能に關係しており , FDTD 解析が -14.2dB , (5) 式が -16.7dB であった . 帯域幅に対する像面での最大電力と落ち込み量の変化を図 9 に示す . 帯域幅の増加に対し , 落ち込み量は増加する一方 , 最大電力はほぼ線形に増加し (5) 式と概ね一致した .

帯域幅を $B = 100\text{MHz}$ とした場合の中心周波数に対する落ち込み量の変化を図 10 に示す . FDTD 解析と (5) 式は概ね一致した . 落ち込み量は 37.5GHz 付近で最も大きくなり , 高周波においては -10dB 程度得られた . 一方 , 30GHz 以下の周波数においては急激に減少しており , 十分な分解能が得られないことが予想される . 以上の結果から , 2次元 FDTD 法を用いた受信熱雑音解析法の有用性が示せた .

5. まとめ

実験による誘電体レンズの解析を行った結果 , 得られた回折パターンは円形開口のフランホーファ回折パターンと概ね一致し , 実験の妥当性を示した . また 2次元 FDTD 法を用い , 結像点の一致から収差の解析における実験の妥当性を示した .

ミリ波パッシブイメージングを想定した熱雑音電力の FDTD 解析を行う一手法を適用した結果 , 開口の回折パターンから求めた電力と概ね一致し , 帯域幅の変化に対する像面での電力と落ち込み量の関係が定量的に得られた . この解析手法はパッシブイメージングの理論的検討に有用と考えられる .

文 献

- [1] 的野 春樹, 我妻 壽彦, 水野 皓司, “ ミリ波帯小型パッシブイメージング装置 , ” 2004 電子情報通信学会ソサイエティ大会 , C-2-107, 2004.
- [2] K. Uehara, K. Miyashita, K. Matsume, K. Hatakeyama, and K. Mizuno, “ Lens-coupled imaging arrays for the millimeter and submillimeter-wave regions, ” IEEE Trans. Microwave Theory Technol., vol. 40, pp.806-811, May 1992.
- [3] K. Mizuno, “ Millimeter wave imaging technologies (Invited), ” Proc. 2001 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.394-398, Taipei, Dec. 2001.
- [4] K. Mizuno, H. Matono, Y. Wagatsuma, H. Warashina, H. Sato, S. Miyanaga, and Y. Yamanaka, “ New Applications of Millimeter-Wave Incoherent Imaging, ” 2005 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, WE2C-3, Long Beach, CA, June 2005.
- [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] 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] 井上 大聡, 村上 仁康, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ 誘電体レンズアンテナの 3 次元 FDTD 解析 , ” 2007 電子情報通信学会総合大会 , B-1-161, 2007.
- [8] 井上 大聡, 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用誘電体レンズの 2 次元 FDTD 解析 , ” 信学技報 , AP2007-142, pp.117-122, Jan. 2008.