

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小形誘電体レンズアンテナの設計を行っている。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，小形非球面誘電体レンズの基礎特性を実験的に求め，3次元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3次元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 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 [1], [2], [3]。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，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 [4], [5]。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。一方，レンズの設計には一般に光線追跡法が用いられており，例えば文献 [6] では，ミリ波パッシブイメージングシステムの小

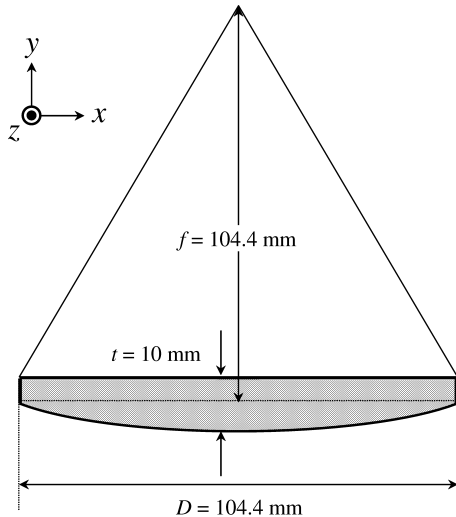


図1 誘電体レンズの構造.

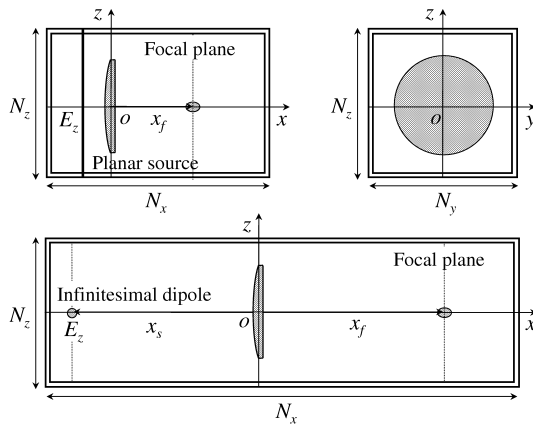


図2 解析モデル A (平面波垂直入射及び微小ダイポールモデル).

形化を図るために、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っており、アレーアンテナと高感度な結合を得るためには、電磁界解析を用いたレンズ設計が必要であると考えられる。

本報告では、文献[6]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、実験及び3次元FDTD解析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3次元FDTD法による熱雑音電力の解析法を提案し、その妥当性を検証する。

2. レンズの解析

2.1 構造

解析に用いた誘電体レンズの構造を図1に示す[6]。設計周波数を35GHz ($\lambda_0 = 8.57\text{mm}$)とし、レンズのパラ

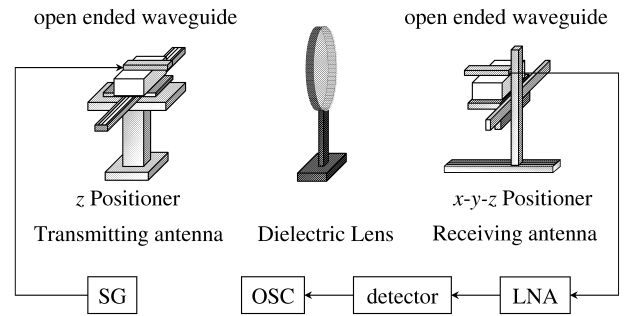


図3 測定系.

メータは比誘電率 $\epsilon_r = 9.73$ (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[6]、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、高次項による曲面形状の変化は波長に対して十分に小さいので、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1.2mm、ポリエーテルエミド)が貼り付けてある[6]。

2.2 解析モデル

前述のレンズに対して3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、及び微小ダイポールを波源に用いた。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 E_z 成分とし、解析においてセルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.25\text{mm}$ 、吸収境界条件として8層PMLを用い、タイムステップ数は50000、励振はガウスパルスとした。レンズから波源までの距離を x_s 、レンズから像面までの距離を x_f とした。

2.3 測定系

測定系を図3に示す。信号発生器から35GHzのRF信号を出力し、送信アンテナとして導波管開放端を用いた。レンズの像面において、送信アンテナと同じ導波管開放端を受信アンテナとして走査し、低雑音増幅器、SBD検波器を用いて電界強度の分布を測定した。

3. レンズの基礎特性

3.1 焦点位置と焦点深度

光軸における x 軸方向の3dB幅を W_x 、像面における z 軸方向の3dB幅を W_z とする。 W_x は焦点深度の評価

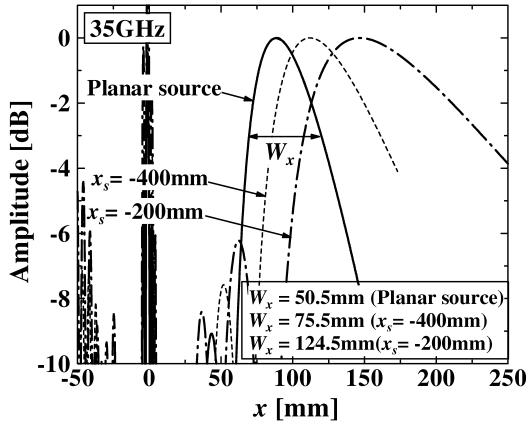


図4 光軸 (y 軸) 上の電界 E_z の分布 (a) 平面波入射の場合、(b) 微小ダイポール A ($x_s = -400\text{mm}$) の場合、(c) 微小ダイポール B ($x_s = -200\text{mm}$) の場合、35GHz。

に、 W_z はビーム幅の評価にそれぞれ用いた。平面波を入射した場合の光軸 (x 軸) 上の電界 E_z の振幅分布を図4に示す。振幅は周波数 35GHz における値を示しており、結像点の最大値で規格化した。この図には $x_s = -400\text{mm}$ と -200mm の位置に微小ダイポールを配置した場合の解析結果も併せて示した。平面波を入射した場合、焦点距離 $x_{peak} = 89.3\text{mm}$ ($10.4\lambda_0$)、焦点深度 $W_x = 50.5\text{mm}$ ($5.9\lambda_0$) が得られた。平面波入射、 $x_s = -400\text{mm}$ 及び -200mm の各モデルに対して像面距離 $x_{peak} = 89.3\text{mm}$ 、 112mm 、 147mm が得られた。焦点深度が深いので、受信アンテナを x 方向の比較的広い範囲に配置できるものと考えられる。

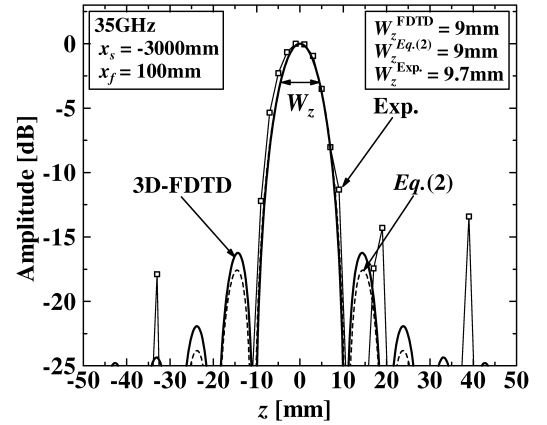
3.2 回折パターン

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として広く用いられている。本報告では実験結果と比較する回折パターンとして、3次元 FDTD 法を用いた解析及び円形開口に対するフランホーファ回折パターンの理論値を用いた。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。

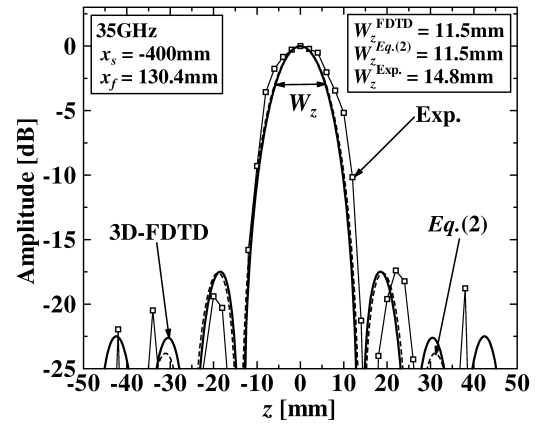
$$P(z) = \left(\frac{\pi D^2}{2} \right)^2 \left[\frac{J_1(R)}{R} \right]^2, \quad R = \frac{\pi D z}{\lambda b} \quad (2)$$

送信アンテナの位置を光軸上において、 $x_s = -3000\text{mm}$ 、 -400mm 、 -200mm と変化させた場合の像面距離 $y_f = 100\text{mm}$ 、 130.4mm 、 200mm において3次元 FDTD 法により求めた回折パターンを(2)式による解析結果と共に図5に示す。

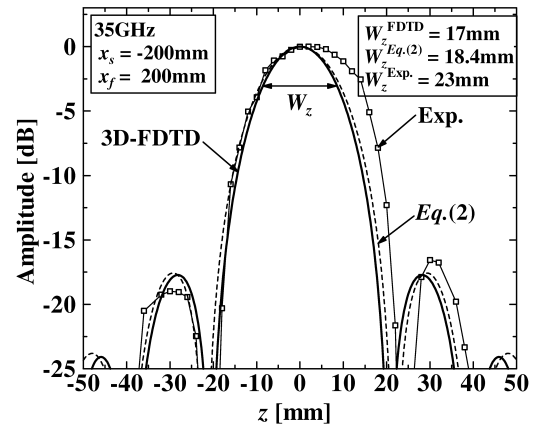
3次元 FDTD 法と(2)式は z 軸方向のビーム幅 W_z 、第1暗線の位置、1次回折波の振幅レベルについて、波源の距離によらず概ね一致した。実験結果は $y_s = -3000\text{mm}$ 、-



(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) 微小ダイポール A ($x_s = -400\text{mm}$) の場合、(c) 微小ダイポール B ($x_s = -200\text{mm}$) の場合、

400mm において、ビーム幅 W_z 、第1暗線の位置が3次元 FDTD 法及び(2)式と概ね一致した。一方、 $y_s = -200\text{mm}$ においては、ビーム幅 W_z に6mmの広がりが観測されたものの、1次回折波の振幅レベルについては概ね一致した。

3.3 収差

収差の影響を検討するために、光軸からずれた位置の波源励振を考えた。解析モデルを図6に示す。光軸から波

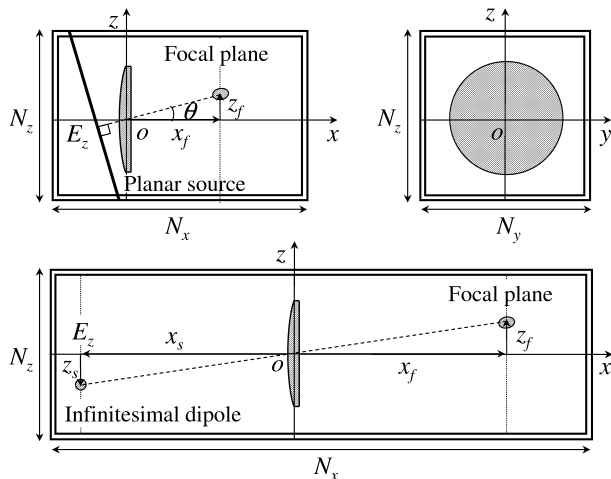


図6 解析モデル B (平面波斜め入射及び波源が光軸からずれた微小ダイポールモデルの場合)。

源までの距離を z_s , 光軸から結像点までの距離を z_f とする . 平面波入射の解析を行うため , $x_f = 100\text{mm}$ における結像点と原点 O を結ぶ直線に垂直な平面波を , レンズを一樣に照射するように与えた . このとき $z_f = 10\text{mm}$, 30mm となる入射角 θ はそれぞれ 5.7° , 16.7° である . 一方 , 微小ダイポールモデルについては $x_s = -400\text{mm}$, -200mm とし , 幾何光学的に光軸から $x_f = 10\text{mm}$, 30mm となる位置を波源とした . 3次元 FDTD 解析の結果と併せて回折パターンを図7に示す .

3次元 FDTD 法については平面波入射及び微小ダイポールモデル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 . 実験結果については $x_s = -3000\text{mm}$ の場合において主ビームの振幅レベルに 3dB の減少が観測された . また , z_f の増加に伴うビーム幅の軸対称性の劣化 , 1次回折波の振幅の増加が観測された . $x_s = -200\text{mm}$ の場合においては , 回折パターンと同様に主ビーム幅 W_z に 6mm 程度の広がり観測された . 以上の結果から , 3次元 FDTD 法を用いた電磁界解析の有用性が示された .

$z_f = 0, 30\text{mm}$ となる平面波入射の場合の像面における電界強度分布 $|E_z|$ を図8に示す . $z_f = 0\text{mm}$ の場合 , 主ビーム , 明線 , 暗線が同心円状に観測された . 一方 , $z_f = 30\text{mm}$ の場合 , 主ビームの z 方向への変位に伴い , 明線が広がり , 暗線と区別しにくくなっており , 電界強度に収差が生じていることが分かる . これは図7で示した主ビームの広がり , 及び1次回折波の振幅の増加による影響と考えられる .

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

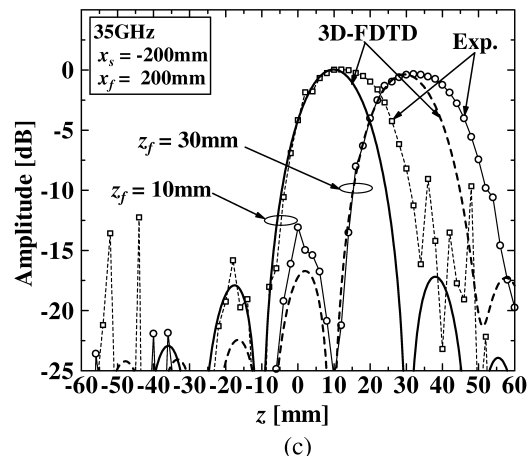
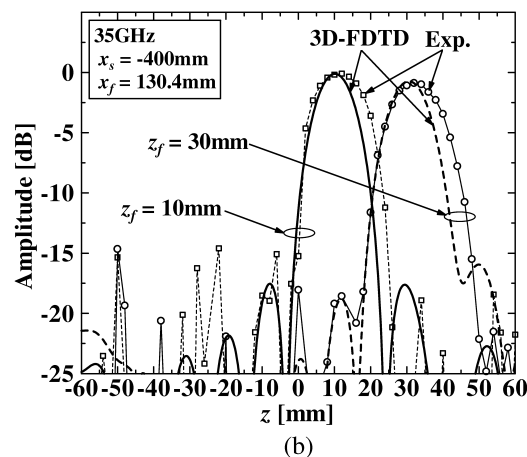
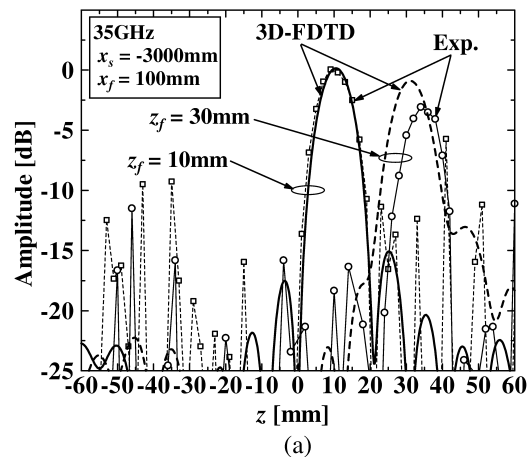


図7 像面近傍における回折パターン . (a) 平面波斜め入射 ($\theta = 5.7^\circ, 16.7^\circ$) の場合 , (b) $x_s = -400\text{mm}$ に置かれた線波源 ($z_f = 10, 30\text{mm}$) の場合 , (c) $x_s = -200\text{mm}$ に置かれた線波源 ($z_f = 10, 30\text{mm}$) の場合 .

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 , 3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で示した微小ダイポールモデルを用い , $z_s = -25\text{mm}$ とした . z 軸について対称な位置に $S = 2|x_s|$

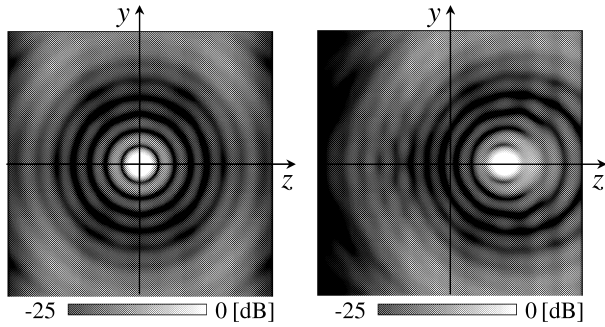


図 8 平面波入射の場合の電界強度分布 $|E_z|$ (左: $z_f = 0\text{mm}$ の場合, 右: $z_f = 30\text{mm}$ の場合) .

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

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

を求め, 周波数領域で積分し受信電力密度

$$P^{\text{FDTD}}(z) = \frac{1}{B} \int_{f_c - B/2}^{f_c + B/2} p^{\text{FDTD}}(f, z) df \quad (4)$$

を求めた結果を図 9 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

$$E^{\text{Theory}}(f, z) = \frac{\pi D^2}{2} \left[\frac{J_1(R)}{R} \right], R = \frac{\pi D z}{\lambda b}, \lambda = \frac{c}{f} \quad (5)$$

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. 空間分解能の評価を行うために, $z = 0$ における振幅の落ち込み量を Dip とする. 落ち込み量が十分に得られない場合, 2 物点の判別が出来ないことが予想される.

3次元 FDTD 法を用いた解析結果と (5) 式の理論値は概ね一致した. 落ち込み量は FDTD 解析, (5) 式共に -15.2dB であった. 帯域幅に対する像面における落ち込み量を図 10 に示す. 帯域幅の増加に伴い落ち込み量は減少した. 高周波における FDTD 解析と (5) 式の値のずれは (5) 式が FDTD 解析と一致しないことに起因すると考えられる.

次に, 周波数が落ち込み量に与える影響を検討する. 帯域幅を $B = 100\text{MHz}$ とし, 中心周波数を変化させた場合の落ち込み量を図 11 に示す. FDTD 解析と (5) 式は概ね一致した. 落ち込み量は 30GHz 以下において急激に減少しており, 広帯域の場合の落ち込み量の減少の原因と考えられる. 30GHz から 50GHz 付近において落ち込み量が減少したのは 1 次回折波の影響により, 図 9 のように $z = 0$ において振幅が増加したためである. またレイリーの回折限界は

$$E^{\text{Rayleigh}} = 1.22 \frac{b}{D} \lambda \quad (6)$$

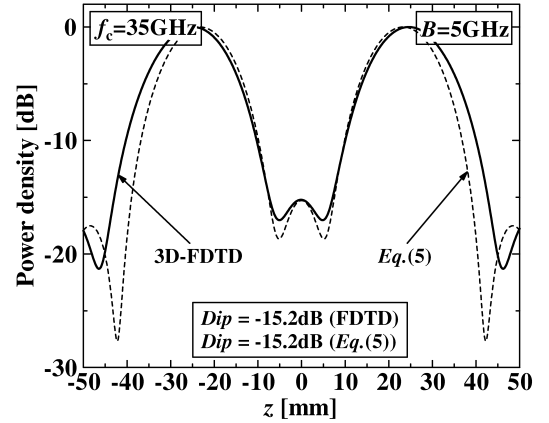


図 9 像面 ($x_f = 200\text{mm}$) における電力分布 .

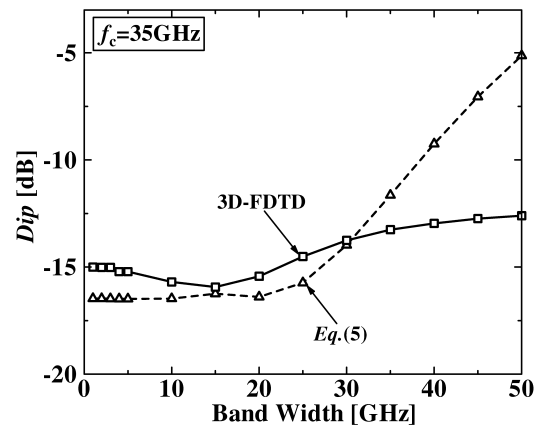


図 10 帯域幅に対する像面における落ち込み量 .

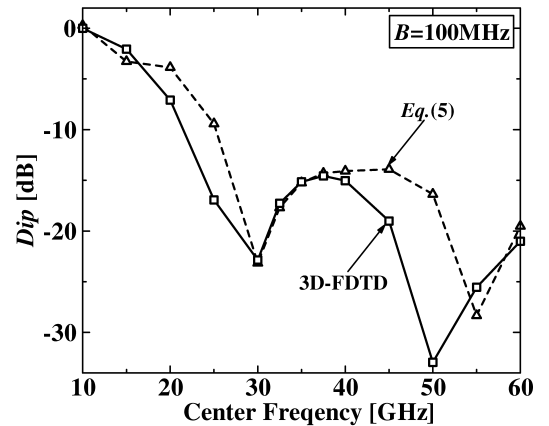


図 11 中心周波数に対する落ち込み量 .

で与えられ, $S = 50\text{mm}$ の場合に回折限界となる周波数 14GHz が分解能の指標となる 3dB となっており, 得られた解析結果と概ね一致した. このことから本解析手法の妥当性が示すことができた.

5. まとめ

実験と 3次元 FDTD 法により誘電体レンズの解析を行った. その結果, 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, 実験及び

解析の妥当性が示された。

次に、ミリ波パッシブイメージングを想定した熱雑音電力の 3次元 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において分解能の理論的検討に有用と考えられる。今後、フェルミアンテナを受信素子としたレンズアンテナの設計を行う予定である。

文 献

- [1] 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.
- [2] K. Mizuno, " Millimeter wave imaging technologies (Invited), "Proc. 2001 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.394-398, Taipei, Dec. 2001.
- [3] 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 '1 Microwave Symposium, WE2C-3, Long Beach, CA, June 2005.
- [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] 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.
- [6] 的野 春樹, 我妻 嘉彦, 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.
- [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.