

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

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の 2 次元 FDTD 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，電磁界解析によるアンテナの放射指向性の最適化設計に加え，電磁界解析を用いた誘電体レンズの最適化設計が望まれる。本報告では，文献 [3] で提案された小形非球面誘電体レンズの基礎特性を FDTD 法を用いて求め，さらに，FDTD 法を用いたインコヒーレント波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，パッシブイメージング，レンズ，FDTD 解析，インコヒーレント

2D FDTD Analysis of Dielectric Lens Used for Passive Millimeter-Wave Imaging

Hirotooshi 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 2D FDTD 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 by using the electromagnetic field analysis are desired. In this report, a fundamental characteristics of non-spherical dielectric lens proposed in [3] is obtained by using 2D FDTD analysis. Furthermore, a method of incoherent wave analysis used for FDTD method is proposed and the validity of the method is evaluated.

Key words Millimeter-wave, Passive imaging, Lens, FDTD analysis, Incoherent

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。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 [1], [2]。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

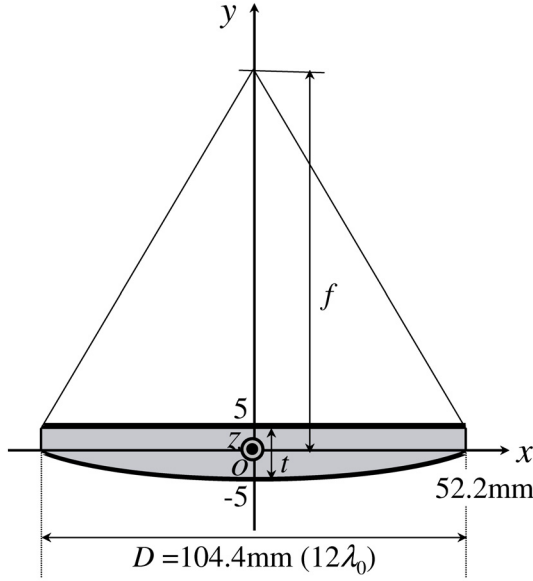


図1 誘電体レンズの構造

設計には一般に光線追跡法が用いられており、文献[3]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[3]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、2次元FDTD解析を行った結果を述べる。

2. 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[3]。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[3]、その厚さが

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

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1.2mm、ポリエーテルエミド) が貼り付けてある[3]。

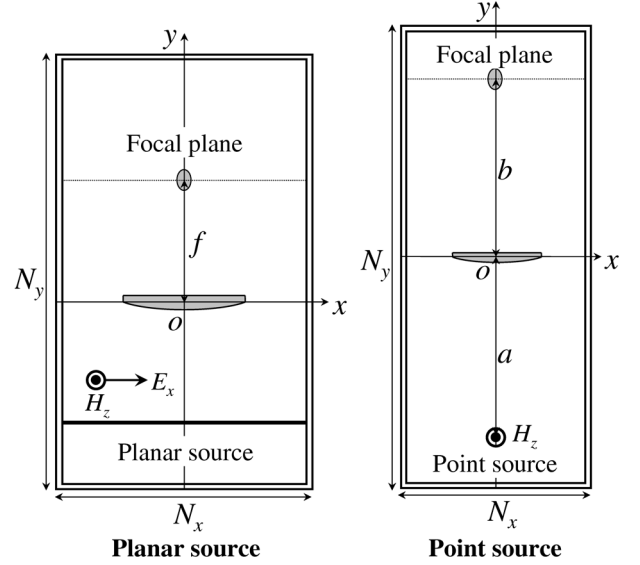


図2 解析モデルA (平面波垂直入射及び点波源)

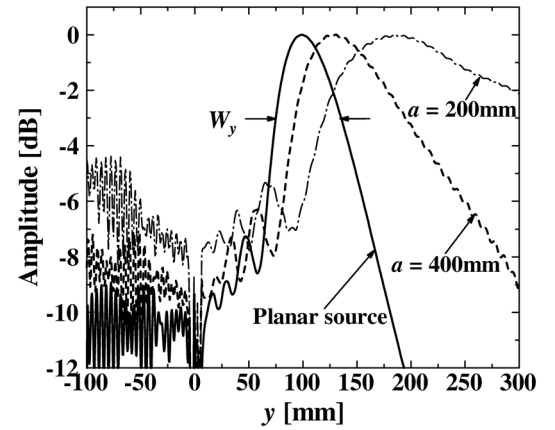


図3 光軸 (y 軸) 上の電界 E_x の分布 (a) 平面波入射の場合, (b) 点波源 $A(x_s, y_s) = (0, -400\text{mm})$ の場合, (c) 点波源 $B(x_s, y_s) = (0, -200\text{mm})$ の場合, 35GHz

上述のレンズに対して図2に示すモデルを用いて2次元FDTD法を用いた解析を行った。入射波源はTM波 (E_x, E_y, H_z) とし、平面波入射、及び点波源を用いる。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。

3. 基礎特性

3.1 焦点位置と焦点深度

解析モデルを図2に示す。厚さ10mmのレンズの中心を原点に取り、平面波入射モデルを用いて焦点距離を求め、点波源モデルを用いて像面距離を求めた。ここで、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。

最大値で規格化した周波数35GHzにおける光軸 (y 軸)

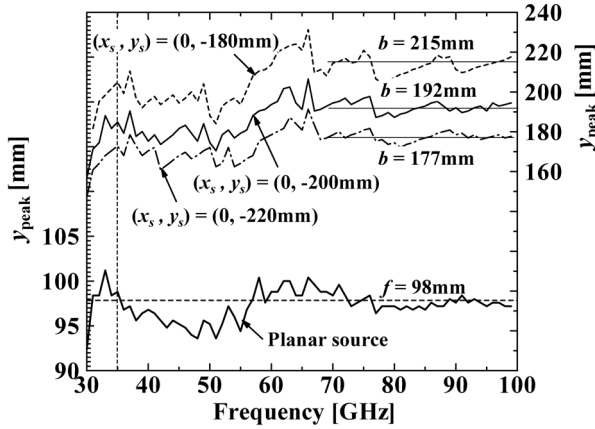


図4 焦点位置の周波数特性

上の電界 E_x の振幅分布を図3に示す．この図には $a = 400\text{mm}$ と 200mm の位置に点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．焦点深度が深いため，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．

焦点距離の周波数特性を図4に示す．周波数の増加に伴い，振動しながら一定値 $f = 98\text{mm}$ 程度に収束している． $f = 98\text{mm}$ とし，点波源を $(x_s, y_s) = (0, -180\text{mm})$ ， $(x_s, y_s) = (0, -200\text{mm})$ ， $(x_s, y_s) = (0, -220\text{mm})$ に置いたときの像面距離 b をレンズ公式 $1/a + 1/b = 1/f$ を用いて求めると，それぞれ $b = 215\text{mm}$ ， 192mm ， 177mm が得られ，これらの値に収束する解析結果が得られている．

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．これらはすべて円形開口の場合について定義されるものであるので，本報告では2次元 FDTD 解析結果と比較する回折パターンとして，スリット開口に対する回折パターンを用いた．波長 λ より十分大きな幅 w のスリット開口に平面波が入射したとき，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 E は次式で与えられる．

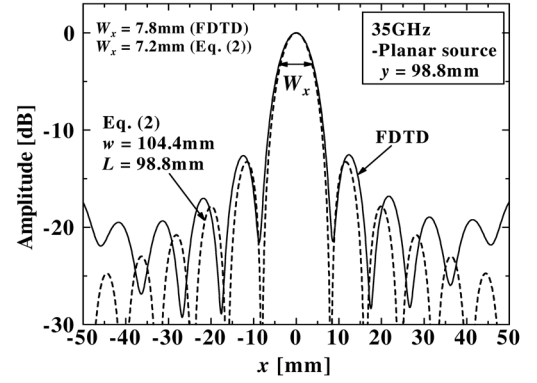
$$E(x) = \frac{w \sin(wX)}{wX}, \quad X = \frac{\pi x}{\lambda L} \quad (2)$$

このとき，電界強度が零となる位置は

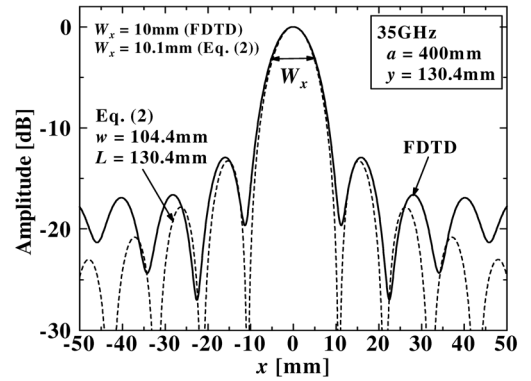
$$x_0 = \frac{m\lambda L}{w}, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

で与えられ，第 m 暗線を与える．本報告では(2)式と電磁界の解析結果を比較する．

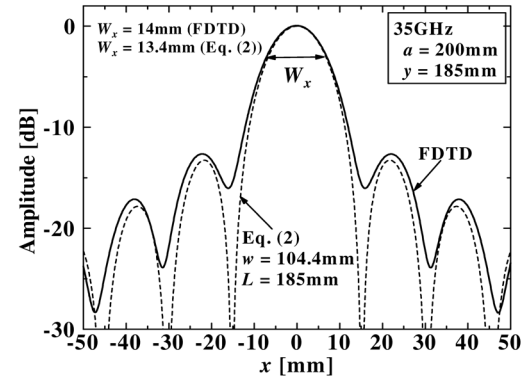
平面波入射及び点波源 A, B を励振したときのそれぞれの像面距離における回折パターンを図5に示す．横方向



(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) 点波源 $A(x_s, y_s) = (0, -400\text{mm})$ の場合，(c) 点波源 $B(x_s, y_s) = (0, -200\text{mm})$ の場合

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，解析結果はどの像面距離についても(2)式と概ね一致した．回折パターンの第 m 次回折波の位置，振幅は光軸から離れるにつれて差が大きいが，これはレンズ端部における回折によるものと考えられる．

点波源と原点の距離 a に対するビーム幅 W_x ，焦点深度 W_y を図6に示す． a が増加するにつれて W_x ， W_y 共に減少しており， W_x は $a \rightarrow \infty$ の極限において平面波入射で得られた $W_x = 7.7\text{mm}$ に収束するものと考えられる．

平面波入射におけるビーム幅 W_x ，焦点深度 W_y の周波数特性を図7に示す．周波数が上がるにつれて W_x ， W_y

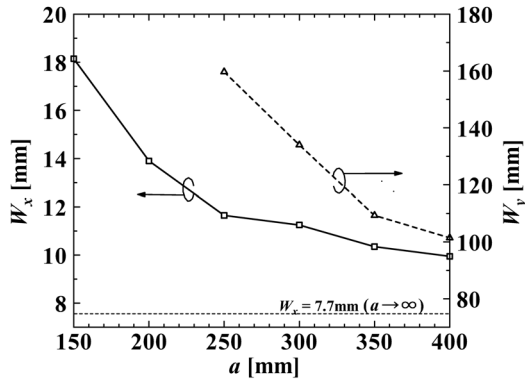


図 6 点波源距離 a に対するビーム幅 W_x 及び焦点深度 W_y

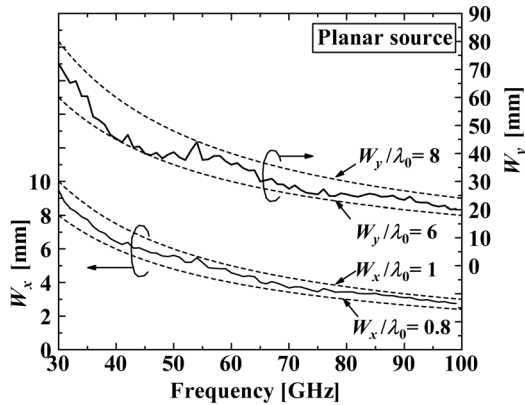


図 7 ビーム幅 W_x 及び焦点深度 W_y の周波数特性 (平面波入射)

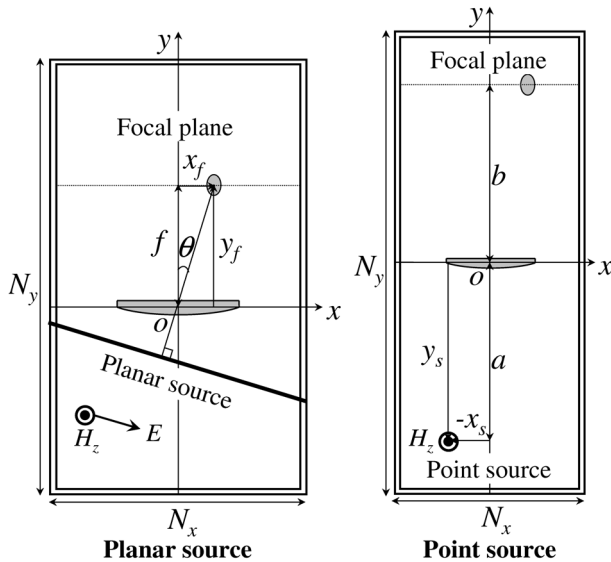
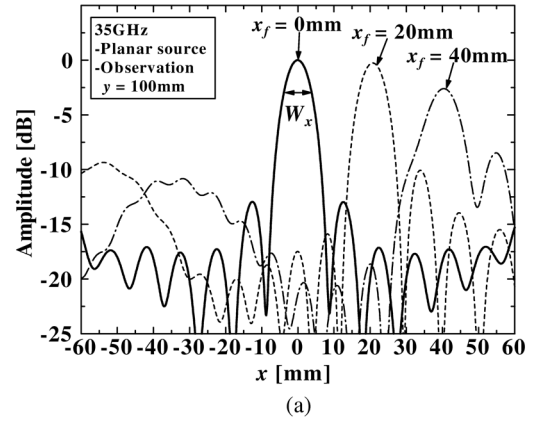


図 8 解析モデル B (平面波斜め入射及び点波源)

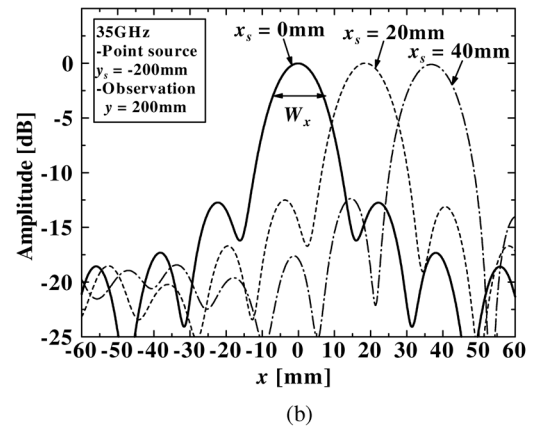
共に減少しており、これらは $f \rightarrow \infty$ の極限において零となる。どの周波数についても W_x は $0.9\lambda_0$ 程度、 W_y は $7\lambda_0$ 程度の値であった。

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 8 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



(a)



(b)

図 9 像面近傍における回折パターン (a) 平面波斜め入射 ($\theta = 0^\circ, 11.3^\circ, 21.8^\circ$) の場合、(b) $y_s = -200\text{mm}$ における点波源 ($x_s = 0, 20\text{mm}, 40\text{mm}$) の場合

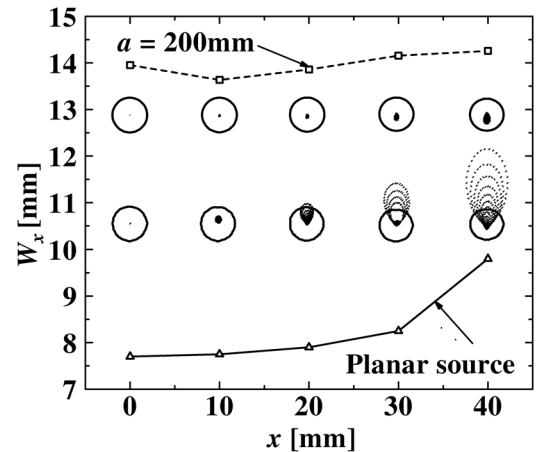


図 10 平面波斜め入射及び点波源励振に対する結像点の x 座標を変化したときのビーム幅 W_x 、及び光線追跡法により得られた収差 (エアリーディスクの半径: 平面波 10.4mm , 点波源 21mm)

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 $x_f = 20\text{mm}, 40\text{mm}$ となる入射角 θ はそれぞれ $11.3^\circ, 21.8^\circ$ である。一方、点波源モデルについては $y_s = -200\text{mm}$ に固定し、光軸から $x_s = 0\text{mm}, 20\text{mm}, 40\text{mm}$ 離して励振した。平面波モデル、点波源モデルに対する像面距離はそれぞれ $y_{peak} = 98.8\text{mm}, y_{peak} = 185\text{mm}$

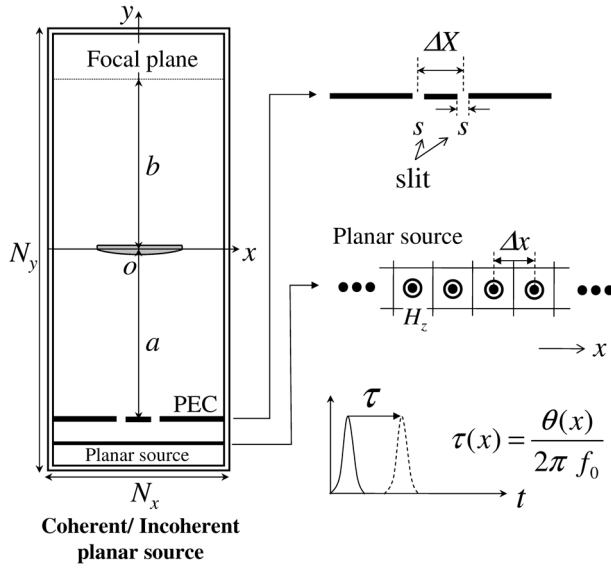


図 11 解析モデル C (コヒーレント/インコヒーレント平面波と 2 個のスリット)

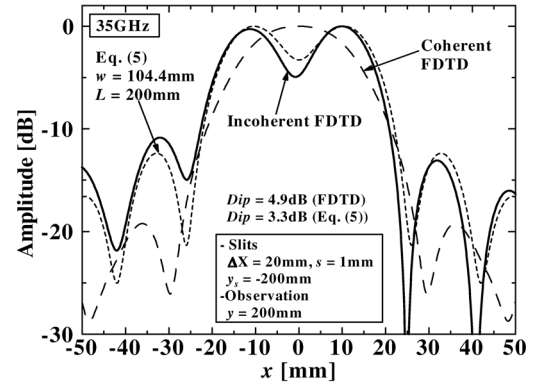
であったが、ここではそれぞれ $y=100\text{mm}$, 200mm において回折パターンを求めた。これを図 9 に示す。平面波入射及び点波源励振の解析結果のどちらについても妥当な結像点が得られた。平面波入射の場合、 x_f が増加するにつれてビーム幅の軸対称性の劣化、振幅の減少、1 次回折波の振幅の増加が観測された。一方、点波源励振の場合、 x_f が増加しても軸対称なビームが得られ、振幅も減少せず、1 次回折波の振幅はほぼ一定であった。

結像点付近の x に対するビーム幅 W_x を図 10 に示す。比較のため、光線追跡ソフト ZEMAX により得られた収差も合わせて示した。エアリーディスクの半径は平面波入射、点波源入射それぞれ 10.4mm , 21mm である。ただし、光線追跡法による結果は円形開口による像面の収差であること、及び 3dB 低下するビーム幅で定義される W_x はベッセル関数の零点に対応するエアリーディスクに比べて甘い評価基準であることに注意が必要である。

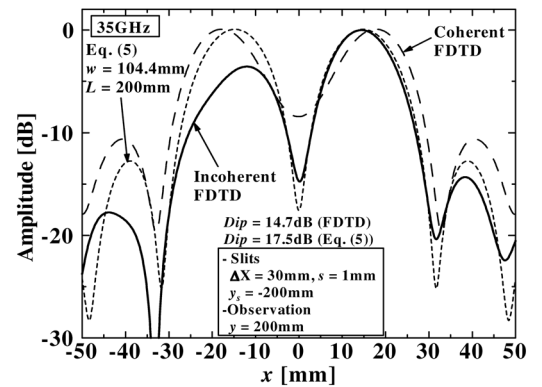
電磁界解析で得られたビーム幅 W_x の増加と、光線追跡法により得られた収差の広がり強い相関が観測された。この結果から、光線追跡における収差は、電磁界解析におけるビーム幅の広がりに対応すると考えられる。

4. インコヒーレント FDTD 解析

パッシブイメージングにおける空間分解能を議論するためには、間隔 ΔX で置かれたインコヒーレントな波を放射する 2 物点による、像面における回折パターンが 2 物点として分離できるかを評価する必要がある。しかしながら、FDTD 法において 2 つの点波源を用いた場合は波源間の位相差が一定となり、コヒーレントな波源に対する評価となってしまう。そこで、本報告では、図 11 に



(a)



(b)

図 12 像面 ($y=185\text{mm}$) における回折パターン (a) スリット間隔 $\Delta X=20\text{mm}$ の場合、(b) スリット間隔 $\Delta X=30\text{mm}$ の場合

示すように間隔 ΔX で置かれた幅 s の 2 つのスリットの前面において、周波数 35GHz に対してランダムな位相を持つ点波源列を x 軸方向に配列し、インコヒーレントな平面波をスリットを有する導体壁に入射するインコヒーレント波解析を試みた。ランダムな位相を各点波源に与えるため、ガウスパルスに対して遅延時間

$$\tau(x) = \frac{\theta(x)}{2\pi f_0} \quad (4)$$

を与えた。ここで、 f_0 は周波数、 $\theta(x)$ は 360 度の位相値からランダムに値を抽出して位置 x の位相とする一様乱数である。

導体板の位置を $y = -200\text{mm}$ 、スリットの幅を $s = 1\text{mm}$ とし、 $\Delta X = 20\text{mm}$ ($2.3\lambda_0$), 30mm ($3.5\lambda_0$) の場合の像面 $y = 200\text{mm}$ における回折パターンを図 12 に示す。比較のため、コヒーレントな平面波を用いた場合、及び (2) 式を用いて電力分布

$$P(x) = E(x - \Delta X/2)^2 + E(x + \Delta X/2)^2 \quad (5)$$

を計算した結果を併せて示す。 $\Delta X = 20\text{mm}$ の場合、コヒーレント波解析では 2 つのスリットが分離できていないが、インコヒーレント波解析では分離できる結果が得られた。また、インコヒーレント波解析は (5) 式による理論値と概ね一致している。 $x=0$ における振幅の落ち込み

量は、インコヒーレント波解析が 4.9dB, (5) 式の理論値が 3.3dB であった。 $\Delta X = 30\text{mm}$ の場合、コヒーレント波解析, インコヒーレント波解析共に 2 つのスリットが分離できる結果が得られた。また, 両解析共に (5) 式による理論値と概ね一致している。 $x=0$ における振幅の落ち込み量は, インコヒーレント解析が 14.7dB, (5) 式の理論値が 17.5dB であり, 概ね一致する結果が得られた。

$\Delta X = 20\text{mm}$ のときの, コヒーレント波解析, インコヒーレント波解析により得られた電界 E_x 分布を図 13 に示す。コヒーレント波解析では光軸に沿う強い電界が観測されており, $y=200\text{mm}$ の像面近傍で 2 つのスリットの像が得られていない。一方, インコヒーレント波解析では光軸に沿っていない強い電界が観測されており, $y=200\text{mm}$ の像面近傍では 2 つのスリットの像を形成する 2 本のビームが観測された。

以上の結果から, FDTD 法を用いたインコヒーレント波解析法の有用性が確認できた。

この解析方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] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.

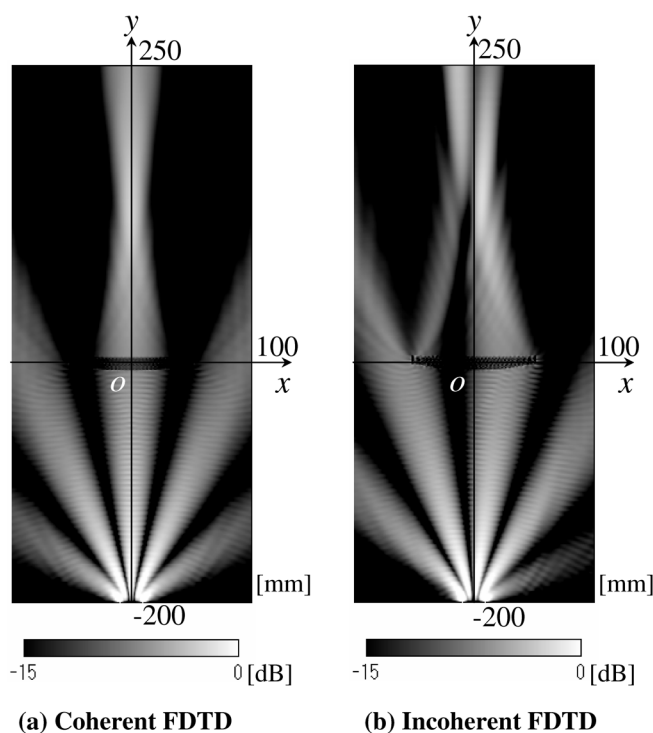


図 13 電界分布 (a) コヒーレント波解析の場合, (b) インコヒーレント波解析の場合

5. ま と め

2次元 FDTD 法を用いた誘電体レンズの電磁界解析を行った。解析で得られた回折パターンはスリット開口のフランホーファー回折パターンと概ね一致し, 解析の妥当性が示された。さらに, ランダムな位相を平面状に与えてインコヒーレントな電磁界解析を行う一手法を適用した結果, 回折パターンについて概ね妥当な結果を得た。