

マルチビーム開口面アンテナの高性能化に関する研究

出口博之

同志社大学工学部電子工学科

〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3

あらまし 広角まで一様で高い利得をもつマルチビーム開口面アンテナを得るため、最適化手法を基にした誘電体レンズ、ならびに誘電体ドームに関する設計法を提案している。誘電体レンズアンテナについては、 30° までのマルチビーム特性を考慮した設計例を示している。また、誘電体ドームアンテナについては、誘電体レンズに比べると利得低下が見られるものの、 70° までの広角度範囲にわたりほぼ一様な利得を実現した設計例を示している。本法の妥当性は、数値解析および試作した誘電体レンズアンテナ、ならびに誘電体ドームアンテナの Ka 帯での放射パターンの測定評価によって検証している。

1. まえがき

誘電体レンズアンテナが、最近のミリ波通信の研究やミリ波レーダの開発を背景に再び注目されてきている。レンズアンテナには、誘電体材料を用いる形式とそれ以外のレンズ素子を用いる形式がある^{1,2,3)}。前者のレンズでマルチビームを構成する場合、離焦点での特性劣化を抑えることが重要となる^{4,5)}。一方、後者のレンズはアレーアンテナのように多数の素子から構成されるものが多く、中でも拘束レンズは前者の誘電体レンズに比べて広範囲にわたり良好な放射特性が実現できている⁶⁻⁹⁾ しながら拘束レンズ方式は、レンズに膨大な数の移相器を配列しなければならないという欠点がある。そこで、拘束レンズ形式のマルチビーム特性と誘電体レンズの単純な構造を併せもつ形式が望ましいことになるが、このようないわゆる誘電体ドーム形式は着想のみにとどまり具体的な設計や放射特性までは明らかではない¹⁰⁾。

そこで本論文では、広角まで一様で高い利得をもつマルチビーム開口面アンテナを得るため、最適化手法を基にした誘電体レンズ、ならびに誘電体ドームに関する設計法を提案している。誘電体厚みを変数とした例に曲面修整レンズがあるが焦点系のレンズに関するものに限られており⁵⁾、提案する方法は全てのビームを考慮したものである。また、従来の拘束レンズ^{6,7)} の設計ではレンズ素子として理想的な移相器を考えているが、本法では誘電体厚みを直接考慮して幾何光学および開口面法を基にして最適化設計している点が異なっている。本法によれば、誘電体レンズアンテナについては、 30°

までの良好なマルチビーム特性が実現でき、また、誘電体ドームアンテナについては、誘電体レンズに比べると利得低下が見られるものの、最大約 70° の広角度範囲にわたりほぼ一様な利得が実現できることを、数値解析および試作したアンテナの Ka 帯での放射パターンの測定評価によって示している。

2. 誘電体レンズアンテナ

2.1. 設計法

単焦点レンズや双焦点レンズでは、1点あるいは2点の焦点から光線をトレースしたとき、開口面上で光路長が一定になるよう設計されている。それゆえ焦点以外の点から光線をトレースすると、光路長が一定とならないため、一定値からのずれが位相誤差となって利得の低下を招く。そこで、このような光路長の一定値からのずれを各ビームについて最小となるようレンズ形状を決めれば利得の改善が図れることになる。いま、Fig. 1 に示すように、レンズ第1面の中心の点 P_0 を与え、レンズ両面の点 (図中の \circ) の ρ 座標を固定して、 z 座標を変数としてレンズ形状を設計していく。すなわち、 $\rho_k (k = 0, 1, \dots, K)$ および z_0 を与え、 $z_k (k = 1, 2, \dots, K)$ および厚み $t_k (k = 0, 1, \dots, K)$ を設計変数にとる。これらの点を基に内挿してレンズ曲面を表し、さらに法線ベクトルを差分によって求める。一方、複数のビームを得るため、同図のよう点 $F_n (n = 0, 1, \dots, N)$ に1次放射器の位相中心をおく。レンズ形状および各ビームの位相中心が決まれば、点 F_n から M 本の光線をレンズに入射させ、 n 番目のビームに対応する開口面までの光路長 $L_{n,m} (m = 1, 2, \dots, M)$

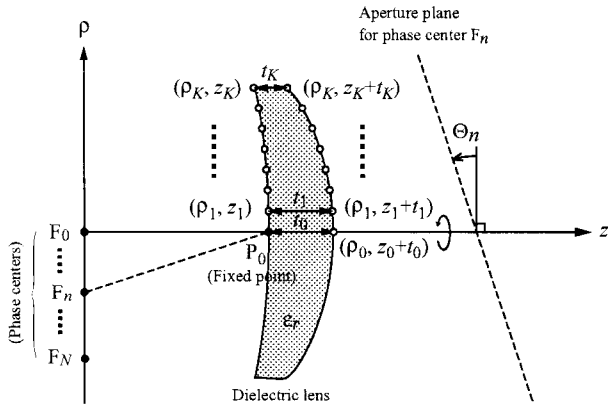


Fig. 1. Design parameters of the proposed lens.

を求めることができる。このとき、ビームの方向 θ_n の角度だけ傾けた同図のような面が開口面となる。光路長 $L_{n,m}$ の一定値からのずれの rms 値 $\epsilon_n (n = 1, 2, \dots, N)$ を定義して位相に換算すれば、平面波からのずれとなる位相誤差が得られる。したがって、 ϵ_n を全てのビームについて求め、これらの2乗和が最小となるように最適化を行えば、レンズ形状を表す $(2K + 1)$ 個の変数を決定することができる。最終的に3次元レンズ形状は、このようにして得られた2次元形状を z 軸で回転させた形状となり、角度 θ_N までの放射方向においてマルチビーム特性をもつ誘電体レンズが得られることになる。

2.2. 設計例

周波数 $f = 20$ GHz, 開口径 $D = 10\lambda = 150$ mm, $F/D = 1.3$ (F は焦点距離), 比誘電率 $\epsilon_r = 2.25$ としてレンズを設計した。Fig. 2 は本法により得られたレンズ形状を示したもので、最適化において設計変数とした点は、レンズ内面で7点、外面で8点であり(同図中の○参照)、レンズの端で厚みが十分薄くなるように最適化を繰り返している。また、1次放射器の位置は -30° から 30° まで等間隔に15点とし、簡単のため平面上に配置している。1次パターンは、後述する実験で用いる20 GHz 帯の標準ホーンアンテナを想定して、 $\cos^{30}(\theta)$ としている。このとき、照度分布による利得低下とスピルオーバーによる損失の和が最小になる条件に比較的近い -13 dB のエッジレベルに選んでいる。

2.3. 実験

提案するレンズの放射特性を実験により評価するため、Fig. 2 に示した形状のレンズをポリエチレンを使って実際に製作した。レンズ表面は切削の都合により十分細かいピッチの階段形状で近似しており、製作したレ

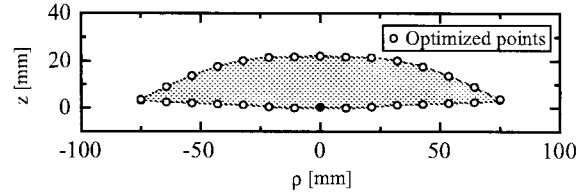


Fig. 2. Cross-sectional view of the designed lens.

ンズの写真を Fig. 3 に示している。1次放射器には Ka 帯の標準ゲイン角すいホーン(開口寸法 51.5×37.0 mm) を用い、位相中心をホーン開口面から 20 mm の位置におき、H面上でマルチビームが得られる配置で実験を行っている。Fig. 4 は、周波数 20 GHz, 遠方界領域にお

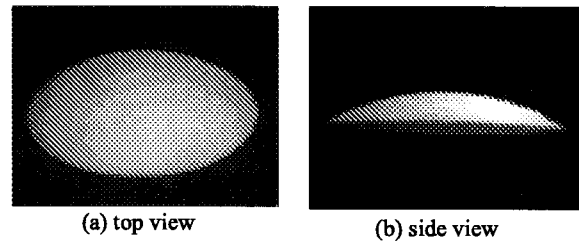


Fig. 3. Photograph of fabricated lens.

ける放射パターンの測定値(実線)と計算値(破線)を比較したもので、 F_0, F_1, F_2, F_3 は、ビームを $\theta_{in} = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ に向けたときの1次放射器の位相中心の位置を示している。計算においては、レンズ周辺から外側にかけて1次放射器からのスピルオーバーが生じるので、スピルオーバー電力を考慮している。同図において、実験では若干のビーム方向のずれが生じたものの、いずれの方向のビームについても測定値と計算値はよく一致していることが確認できる。

3. 誘電体ドームアンテナ

3.1. 設計法

誘電体ドームアンテナは、軸対称で肉厚を変化させたレドームに似た形状で、その中心に1次給電アレーにおいて構成される。通常、1次パターンの走査範囲には限界があるが、誘電体ドームの屈折の効果によって広角までビームを走査しようというものである。

Fig. 5(a) は z 軸に関して対称な2次元ドーム形状を示したもので、ドーム内面形状を $\mathbf{r} = r_a(\psi)\mathbf{u}_r$ で与え (\mathbf{u}_r は単位ベクトル)、誘電体厚み $t_i (i = 1, 2, \dots, N_t)$ を設計変数にとる。ドーム外面を形成する $(2N_t - 1)$

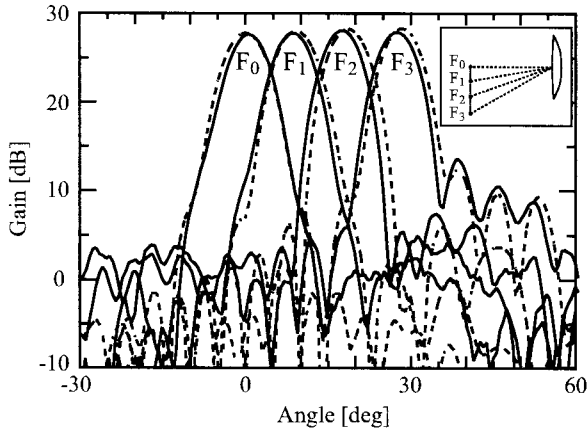


Fig. 4. Comparison between measured radiation patterns and predicted ones.

個の離散点から3次スプライン関数によって補間して厚み $t(\psi)$ を定義し、連続的なドーム外面形状 $\mathbf{r} = (r_a(\psi) + t(\psi))\mathbf{u}_r$ を定める。ただし、この段階では1次給電アレーを長さ L の連続波源とみなすことにする。

さて、ドーム形状および1次放射系が与えられれば、各ビームの利得の評価を行うことができる。まず、Fig. 5(b)のように1次アレーの両端の点Pおよび点Qからドーム内面の点 (r, ψ) に向けて光線をトレースして、ドーム内面、そして外面の境界面で屈折した後の光線方向 $\theta_p(\psi)$, $\theta_q(\psi)$ を求める。したがって、逆にドームを出る光線方向 $\theta = \Theta$ を与えれば、光線の入射する点 $(r(\psi_p), \psi_p(\Theta))$, $(r(\psi_q), \psi_q(\Theta))$ が決まることになる。そして、1次アレーの最大走査角を簡易的に考慮するため、点Pおよび点Qからの放射角度 α_p および α_q に対して、 $-\alpha_{max} \leq \alpha_p, \alpha_q \leq \alpha_{max}$ のように制限を設けている。

このようにして点Pおよび点Qから $\theta = \Theta$ 方向に向かう光線の軌跡がわかれば、Fig. 6に示すようにして Θ 方向に対する開口の長さ $L'(\Theta)$ を幾何光学的に見積もることができる。さらに、1次アレーの長さ L およびドーム内面座標 $(r(\psi_p), \psi_p(\Theta))$, $(r(\psi_q), \psi_q(\Theta))$ の間を各々 N_r 等分し、各点を通る N_r 本の光線をトレースすれば、幾何光学の電力保存則より ξ 軸上の開口における電力密度 $|E_\xi|^2$ も決定できる (Fig. 6中の点線で示した光線群)。等価開口径 $L'(\Theta)$ を用いれば、 Θ 方向にビームを向けたときの2次元ドームの開口能率 $\eta_\xi(\Theta)$ も求められる。ただし、素子の励振位相は開口面分布における位相が一様分布となるよう選ぶものとする。そして、評価関数として、1次アレーの長さ L で規格化した能率

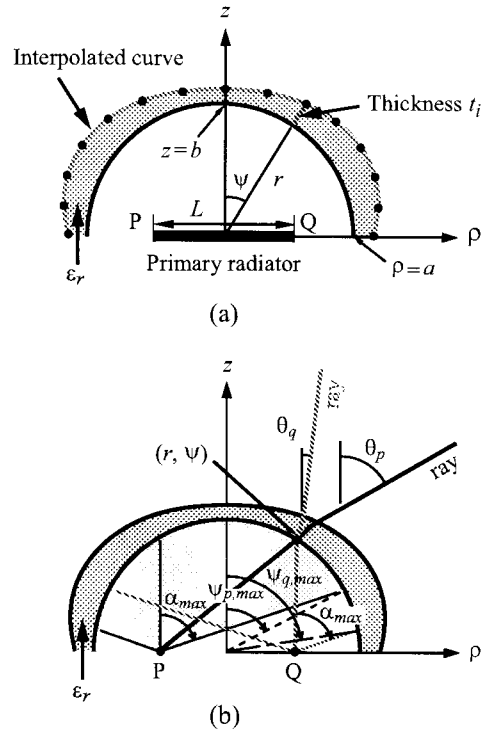


Fig. 5. Two-dimensional model in dielectric dome. (a) Definition of dome surfaces and (b) effective primary pattern range and GO rays from points P and Q.

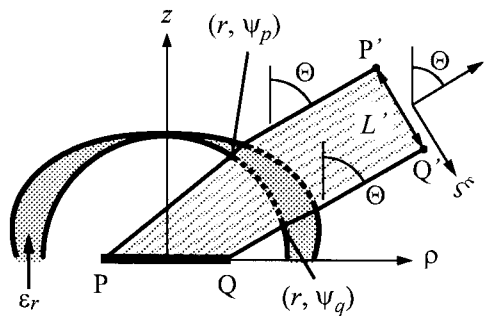


Fig. 6. Two-dimensional dome model to evaluate effective aperture diameter under the GO approximation.

$\eta(\Theta)$ を求め、所定の角度範囲内の Θ_j ($j = 1, 2, \dots, M$) に対する開口能率 $\eta(\Theta_j)$ が一様で極力高くなるよう最適化を行い、2次元ドーム形状を決定する。

次に、波動的な解析を設計に取り入れるるために、具体的な素子の特性を考慮する。そのため、まず、ドーム形状については、上述した設計で得られた2次元形状を、 z 軸の周りに回転させた3次元構造を初期形状とする。ドームの3次元形状が与えられれば、ドーム内面に入射

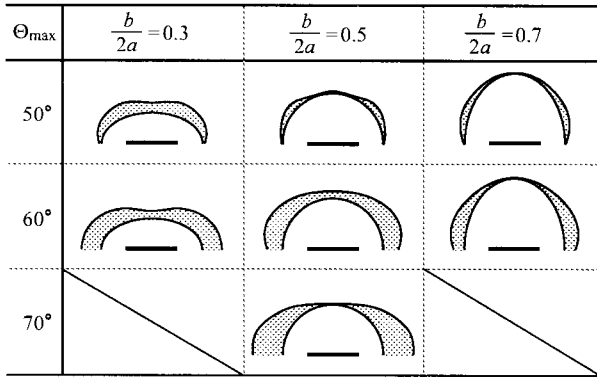


Fig. 7. Examples of two-dimensional models obtained by using the GO approximation as a function of dome height.

する素子の放射パターンを求めることができる。そこで、幾何光学近似（屈折の法則および電力保存則）を用いて誘電体の影響を考慮すれば、ドーム全体の外面曲面上の電界分布を計算することができる。このようにして得られたドーム外面上の電界分布を2次波源とみなし、開口面法を用いて軸対称ドーム表面に沿って積分することで放射電界が計算できることになる¹¹⁾。ドーム曲面が決まれば、最適化の評価関数が定義できる。アレー給電ドームアンテナの利得は各素子からのドームによる2次パターンを合成することで計算できる。

3.2. 2次元ドームの数値計算例

先に述べた設計では、ドーム内面形状を固定しているので、ここでは、まずドーム内面の高さを変えた場合について幾何光学を基にした概略設計を行い、開口面法を基にした詳細設計で用いる初期形状について検討を加える。計算条件は、後述する実験で用いる誘電体を想定して比誘電率 $\epsilon_r = 2.25$ とし、また、周波数に依らない幾何光学的な評価として、ドーム直径 $2a$ で規格化した1次アレー長 $\frac{L}{2a} = 0.5$ とし、ドームの高さ $\frac{b}{2a} = 0.3, 0.5, 0.7$ と変化させた場合について計算を行う。Fig. 7は幾何光学近似のもとで所定の角度範囲内で一様に極力高いエネルギーが得られるように設計した誘電体ドーム形状を示したもので、最大走査角 $\Theta_{\max} = 50, 60, 70$ [°] について設計した結果である。ただし、設計変数 $N_t = 10$ 、光線の数 $N_r = 10$ 、ビーム走査角のサンプル点数 $M = 10$ 、1次アレーの最大走査角 $\alpha_{\max} = 60^\circ$ である。同図より、 $\frac{b}{2a} = 0.3$ とドームが低い場合、 60° より広い角度範囲では幾何光学的な一様利得の解が得られていない。ドームを高くして設計すれば、 $\frac{b}{2a} = 0.5$ では 70° まで、

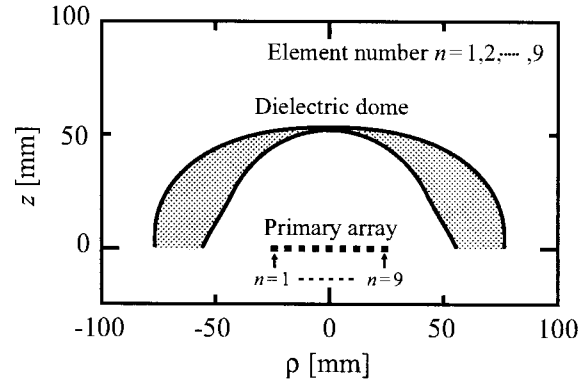


Fig. 8. Designed dielectric dome and elements consisting of a primary array.

$\frac{b}{2a} = 0.7$ では図には省略したが 68° までが幾何光学的な解が得られている。これにより、後述する設計例ではドーム初期形状として用いる2次元モデルが容易に決まる解の中で、最も角度範囲の広い 70° に対して設計していくことにする。

3.3. 3次元ドームの設計例

周波数 $f = 20$ GHz、マルチビームの角度範囲 $0^\circ \sim 70^\circ$ 、ドーム開口径 $D = 150$ mm $= 10\lambda$ (λ は自由空間波長) とし、誘電体としてポリエチレン (比誘電率 $\epsilon_r = 2.25$) を想定して設計する。まず、概略設計において、1次アレー長 $L = 48$ mm、1次アレーの最大走査角 $\alpha_{\max} = 60^\circ$ を与えて最適化を行うと、 $a = 48$ mm、 $b = 52$ mm となる。

次に、3次元ドームに対して開口面法を基に詳細設計を行う。素子アンテナとして方形パッチアンテナを用い、これらをH面に9素子配列して1次アレーを構成することにする。最適化においては、アレー中央の素子、アレー両端の点Pおよび点Qにおける素子を考え、それら3素子のドームによる2次パターンを合成して得られる利得が一様となるようにドーム形状を修整する。このとき、ドーム内面に入射する一次パターンは簡単のため無限地板におけるパッチアンテナの放射パターンを用いている。Fig. 8は設計した誘電体ドームの断面形状および1次給電アレーの各素子位置を示している。ビーム走査角のサンプル点数は $M = 13$ である。なお、各素子の励振位相は、利得最大の条件より素子のドームによる2次放射電界の共役値に設定している。

3.4. 実験

提案する誘電体ドームの放射特性を実験により評価するため、Fig. 8に示した形状をポリエチレンブロック

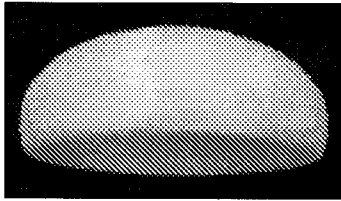


Fig. 9. External view of fabricated dielectric dome.

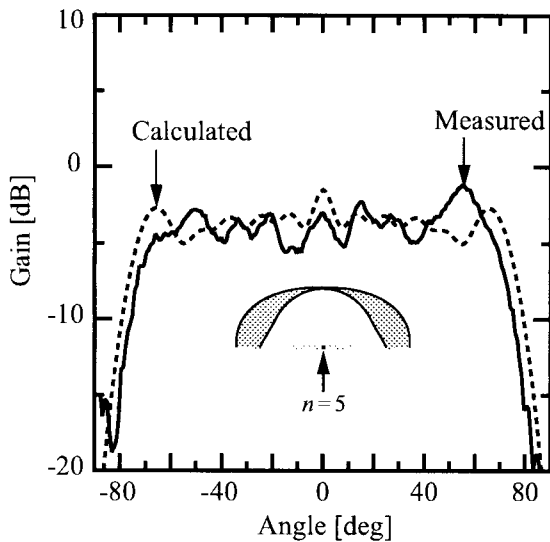


Fig. 10. Comparison between measured element pattern and calculated one in the dielectric-dome.

を3次元切削器 (Roland CAMM-3 PNC-3000) により切削することで試作した。Fig. 9は誘電体ドームの外観を示したものである。また、1次給電アレーの素子には20 GHz帯の背面給電方式の方形パッチアンテナを用い、H面上に9素子配列している。

Fig. 10は、周波数20 GHz、アレー中心の1素子のみを励振したときの遠方放射パターンの測定値と計算値との比較を示したもので、リップルの正確な位置は若干異なるものの、両者は比較的一致している。また、Fig. 11はビームの方向を $\Theta = 0, 20, 40, 60, 70$ [°]として得られた結果を示しており、比較のため、開口面法を用いて計算した結果も示している。アレーの合成パターンについては、簡単のため、素子間の相互結合を無視し、1素子のみを給電したときの放射パターンの振幅および位相を全素子測定した後、利得が最大になるような励振位相を与えることから求めている。同図において、特に $\Theta = 0$ °のビームに見られる利得の差異は、計算では誘電体ドームによる反射波の影響を無視しているため、誘電体ドームと地板との多重反射の影響が考慮できて

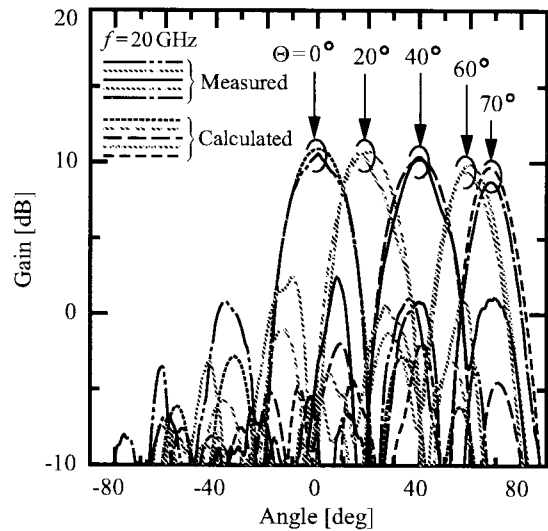


Fig. 11. Measured and calculated radiation patterns of the dielectric-dome antenna.

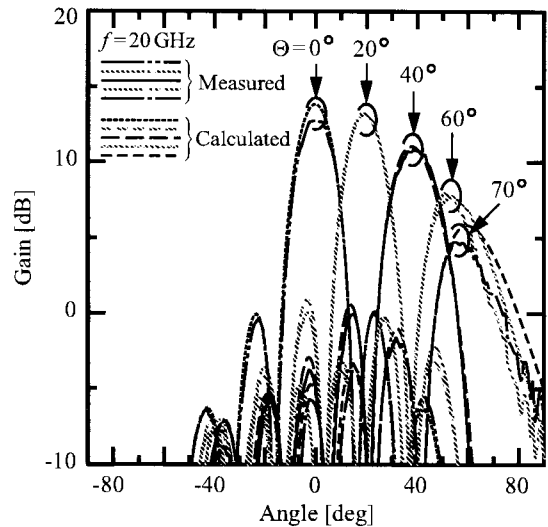


Fig. 12. Measured and calculated radiation patterns of the primary array without the dielectric-dome.

いないことが主たる要因と考えられる。しかしながら測定値と計算値は全体的には比較的一致しており、広角方向において良好な特性が得られ、本法の妥当性が確認できる。

さらに、誘電体ドームの効果を実験的に調べるため、誘電体ドームをつけない状態でも測定を行っており、Fig. 12に測定値と計算値との比較を示している。広角にビームを向けたときの利得低下はFig. 11に比べて非常に大きくなっており、誘電体ドームの有効性を検証することができた。

4. まとめ

広角まで一様で高い利得をもつマルチビーム開口面アンテナ実現のために、軸対称誘電体レンズ、ならびに誘電体ドームの最適化設計法を提案した。本法により設計した誘電体レンズアンテナは、 30° までの良好なマルチビーム特性が得られ、また、誘電体ドームアンテナについては、誘電体レンズに比べると利得低下が見られるものの、 70° までの広角度範囲にわたりほぼ一様な利得が実現できることを数値解析および Ka 帯での実験によって確認し、本法の妥当性を検証している。

参考文献

- 1) A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Olver, P. Knight, *The handbook of antenna design*, pp. 293–315, Peter Peregrinus, London, 1986.
- 2) C. J. Sletten, *Reflector and lens Antennas*, pp. 261–323, Artech House, London, 1988.
- 3) Y. T. Lo and S. W. Lee, *Antenna handbook, vol. II. Antenna theory*, pp. 16-1–16-59, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- 4) A. L. Peebles, “A dielectric bifocal lens for multibeam antenna applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 5, May 1988.
- 5) 但馬 陽介, 山田 吉英, “広角ビーム走査用曲面修整誘電体レンズアンテナの設計,” 信学論 (A), vol. J88-A, no. 2, pp. 286–296, 2005.
- 6) H. Steyscal, A. Hessel, and J. Shmoys, “On the gain-versus-scan tradeoffs and the phase gradient synthesis for a cylindrical dome antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-27, pp. 825–831, 1979.
- 7) 佐藤 眞一, 真野 清司, 片木 孝至, “筒状拘束レンズ付フェイズドアレーによる広角利得走査,” 信学論, vol. J64-B, No.5, pp.465-466, May. 1981.
- 8) 前田 忠彦, 沢谷 邦男, 安達 三郎, 虫明 康人, “素子間相互結合を含めた導体球円弧状配列ドームアンテナの走査特性,” 信学論, vol. J70-B, No.3, pp.366-373, Mar. 1987.
- 9) P. S. Hall and S. J. Vetterlein, “Review of radio frequency beamforming techniques for scanned and multiple beam antennas,” *IEE Proceedings*, vol. 137, Pt. H, no. 5, Oct. 1990.
- 10) P. A. Valentino, C. Rothenberg and J. J. Stangel, “Design and fabrication of homogeneous dielectric lenses for dome antennas,” *IEEE AP Symposium Digest*, pp. 580–583, 1980.
- 11) D. T. Paris, “Computer-aided radome analysis,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-18, pp. 7–15, 1970.

本研究に関わる論文・研究報告

- 浦田 洋嗣, 大平 昌敬, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “だ円ビーム扇形ホーンにおける側面テーパ形状の最適化,” 電子情報通信学会技研報告, MW2004-21, pp. 29–34, May 2004.
- M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, H. Shigesawa, “Multi-band single-layer frequency selective surface designed by combination of genetic algorithm and geometry-refinement technique,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 11, pp. 2925–2931, Nov. 2004.
- 河原 弘幸, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “曲面修整により位相誤差を最小化したマルチビーム誘電体レンズアンテナ,” 2004 電気関係学会関西支部連合大会, G8-38, Nov. 2004.
- 河原 弘幸, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “広角ビーム走査を実現する誘電体軸対称ドームの設計,” 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-05-11, pp. 59–64, Jan. 2005.
- 河原 弘幸, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “広角ビーム走査のための誘電体ドームの簡易設計,” 2005 年電子情報通信学会総合大会, B-1-176, Mar. 2005.
- 出口 博之, 河原 弘幸, 辻 幹男, 繁沢 宏, “マルチビーム特性を考慮した誘電体レンズアンテナの幾何光学的最適化設計,” 同志社大学理工学研究所報告, vol. 46, no. 2, pp. 56–62, July 2005.
- 木村 哲雄, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “2周波数共用ミリ波多モードホーンアンテナの近傍界測定による検証,” 2005 年電気関係学会関西支部連合大会, G8-32, Nov. 2005.
- M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji and H. Shigesawa, “Novel waveguide filters with multiple attenuation poles using dual-behavior resonance of frequency-selective surfaces,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 11, pp. 3320–3326, Nov. 2005.
- 河原 弘幸, 出口 博之, 辻 幹男, 繁沢 宏, “広角マルチビーム特性を考慮したリニアアレー給電軸対称誘電体ドームの設計法,” 電子情報通信学会論文誌 (C), vol. J88-C, no. 12, pp. 1074–1081, Dec. 2005.
- 渡辺 浩章, 出口 博之, 辻 幹男, “円形カバレッジのための多段チョーク多モードホーン設計,” 2006 年電子情報通信学会総合大会, B-1-55, Mar. 2006.
- H. Deguchi and M. Tsuji, “Radiation-pattern synthesis based on quadratic programming for multimode circular horns,” *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Aug. 2006.
- 出口 博之, 渡辺 浩章, 辻 幹男, “2 段同軸キャビティを装荷した小型多モードホーン,” 2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-53, Sep. 2006.
- 大森 康平, 出口 博之, 辻 幹男, “同軸キャビティ装荷多モードホーンアンテナの最適化,” 2006 電気関係学会関西支部連合大会, G8-22, Nov. 2006 (発表予定) .