

Multimode Horn Antenna with Square Aperture Loading Grooves for Dual Polarization

Reiko OMI, Ryo WAKABAYASHI, Hiroyuki DEGUCHI*, Mikio TSUJI

(Received April 15, 2020)

This paper proposes three square-aperture horn antennas loaded with grooves in order to shape a circular beam. In a design method for these antennas, the modal coefficients realizing the specified radiation pattern are first determined based on the quadratic programming method. Then the dimension of the horn are optimized so that these modal coefficients can be obtained at the horn aperture plane. The first antenna realizes a circular beam and low cross polarization in the range of 10GHz-10.5GHz by controlling the TE₁₀ mode and the higher-order TE₁₂ and TM₁₂ modes. This horn has a 90°-rotational symmetry with four grooves. The second antenna realizes the same characteristics in the range of 9.5GHz-10.5GHz by considering the next higher-order TE₃₀ mode in addition of the before-mentioned three modes. The third antenna realizes the same characteristics in the range of 9.5GHz-11GHz by considering the next higher-order TE₃₂ and TM₃₂ mode. Finally, this paper verifies effectiveness of the proposed antennas by measuring their radiation pattern and VSWR.

Key words : groove, square aperture, circular beam, quadratic program

キーワード : グループ, 正方形開口, 円形ビーム, 二次計画法

直交偏波共用グループ装荷正方形開口多モードホーンアンテナ

近江 怜子, 若林 遼, 出口 博之, 辻 幹男

1. はじめに

円形ビームかつ低交差偏波特性をもつホーンアンテナとして, ホーン内部にコルゲート溝を設けた円形開口コルゲートホーン, ステップやテーパを用いた円形開口ホーンが報告されている¹⁻⁴⁾. しかし, 前者は構造が複雑で切削による製造が困難であり, 後者は高次モードの発生のためのステップおよびモードの位相制御のためのテーパにより軸長が長くなる点が問題となっていた. また, 同様の特性を得るために, 方形開口のホーンアンテナを用いた場合に

もこれらの問題が生じていた⁵⁻⁷⁾.

そこで, 本論文では, 軸長の短縮に有効なアンテナとして, アンテナの開口端の壁面に4つのグループを装荷した円形ビームを放射する正方形開口のホーンアンテナを提案し, 開口の大きさが異なる3つの設計例を示している. 最初に示すアンテナは, 所望の放射パターンを実現するのに必要な励振モード係数を二次計画法^{8, 9)}を基に算出し, ホーンの開口面でそれらが得られるように最適化を行うことで形状寸法を決定している. 2つ目のアンテナは, グル

*Department of Electronics, Doshisha University, Kyoto
Telephone:+81-774-65-6371, FAX: +81-774-65-6824, E-mail: hdeguchi@mail.doshisha.ac.jp

ーブを2段にすることにより開口を大きくして、より高次のモードを制御しようというものである。これについては、所望の放射パターンを実現するのに必要な励振モード係数を算出し、ホーンの開口面でそれらが得られるように最適化を行った後、より所望の放射パターンに近づけるため、放射パターンを評価した最適化も行いホーンの寸法を決定した。3つ目のアンテナは、2つ目のアンテナを開口面に向けてテーパをのぼした構造になっている。これによりさらに高次のモードを発生させている。この場合にも、励振モード係数を算出し、ホーンの開口面でそれらが得られるように最適化を行った後、放射パターンを評価した最適化も行いホーンの寸法を決定した。設計した全てのホーンは試作を行い、測定結果と数値計算結果の比較検討し、提案するホーンの妥当性を検証している。

2. モード係数

2.1 3モードを考慮した合成モード係数

本設計手法では、ホーン開口面において円形ビームかつ低交差偏波の特性が得られる励振モード係数をもとにホーン形状を決定する。まずは、正方形開口において基本のTE₁₀モードと次に発生する高次のTE₁₂とTM₁₂モードを用いることにより所望の放射パターンを実現させる。Fig. 1に示した正方形一辺の長ささと各モード遮断周波数の関係をもとに、中心周波数10GHzにおいてこれら3モードだけが開口面で伝搬モードとなるように正方形一辺の長さは42.9mmとしている。

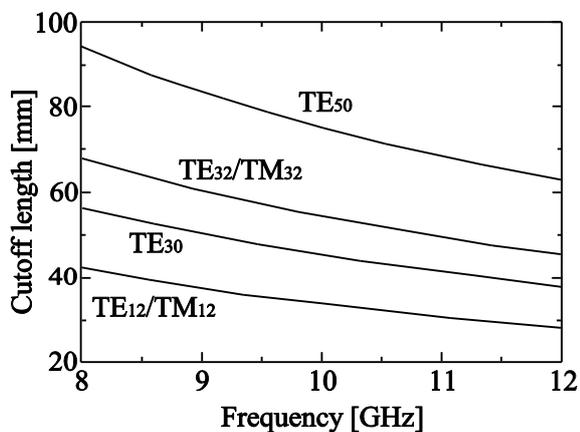


Fig. 1. Cutoff frequency for the higher-order 6 modes of a square waveguide.

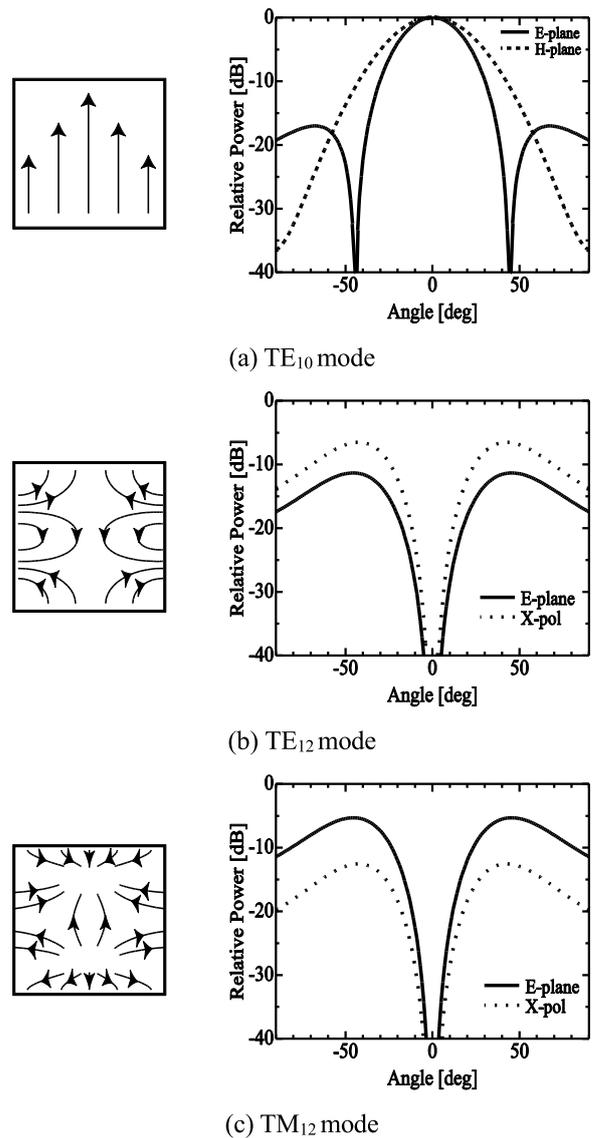


Fig. 2. Electric-field line (left) and radiation pattern of each mode (right).

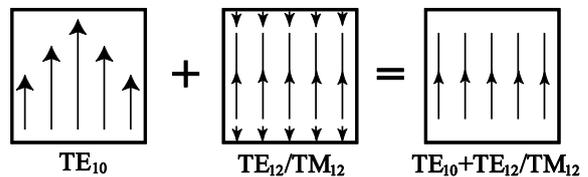


Fig. 3. Electric-field distribution by mode synthesis.

このときの開口面での各モードの電気力線と放射パターンを示したのがFig. 2であり、同図(a)から交差偏波の発生しない基本TE₁₀モードだけでは、E面とH面の分布が異なり、円形ビームにならないことがわかる。そこで、同図(b)と(c)に示した次の高次のTE₁₂および

TM₁₂モードも用いることにすると、交差偏波成分は存在するものの、これらを基本TE₁₀モードと合成することにより円形ビームを実現させることができる。また、TE₁₂モードとTM₁₂モードにおいて発生する交差偏波成分は、Fig. 3に示すように3つのモードを適当な比で合成することにより交差偏波の低減が可能となる。

2.2 二次計画法

これまでに述べたようにTE₁₀、TE₁₂およびTM₁₂モードを適切な比率で合成することによって所望の放射パターンを得られる。Fig. 2の各モードの指向性関数 $f_{x,i}(\theta)$ を用いて合成した指向性関数 F は未知係数を x_i とすると、以下の式で表される。

$$F(\theta) = \sum_i x_i f_{x,i}(\theta) \quad (1)$$

これより、利得 $g(\theta)$ は次のようになる。

$$g(\theta) = \frac{4\pi|F(\theta)|^2}{P_t}, \quad P_t = \sum_i x_i^2 \quad (2)$$

ここで、 P_t はトータル電力を表す。次に円形ビームにする制約条件として、

$$F_{E-plane}(20^\circ) = F_{H-plane}(20^\circ) = 1 \quad (3)$$

$$F_{E-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (4)$$

$$F_{H-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (5)$$

を与え、主偏波成分のピーク値から-30dB以下となるよう交差偏波成分に対する制約条件、

$$-\sqrt{0.001} \leq F_{Xpol}(\theta) \leq \sqrt{0.001} \quad (0 \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (6)$$

を与える。ここで、 $F_{E-plane}$ 、 $F_{H-plane}$ 及び F_{Xpol} はそれぞれ主偏波成分のE面、H面及び交差偏波成分の指向性関数を表し、 θ はホーンアンテナ軸方向を0°としたときの放射角を表す。以上を制約条件として、二次形式で表される評価関数 P_t を最小にする問題とし、二次計画法により未知係数 x_i の解を算出する。このとき、多モードホーンを単位電力で励振したときのモード係数 X_i は、 $X_i = x_i / \sqrt{P_t}$ によって得られることになる。二次計画法により得られた値をTable 1に示し、これらをアンテナ開口面で励振した場合に得られる放射パターンの結果をFig. 4に示す。良好な放射特性が得られることがわかる。なお、交差偏波成分は-40dB

Table 1. Coefficients of 3 propagating modes.

mode	Amplitude [dB]	Phase [deg]
TE ₁₀	-0.96	0
TE ₁₂	-14.0	180
TM ₁₂	-8.01	0

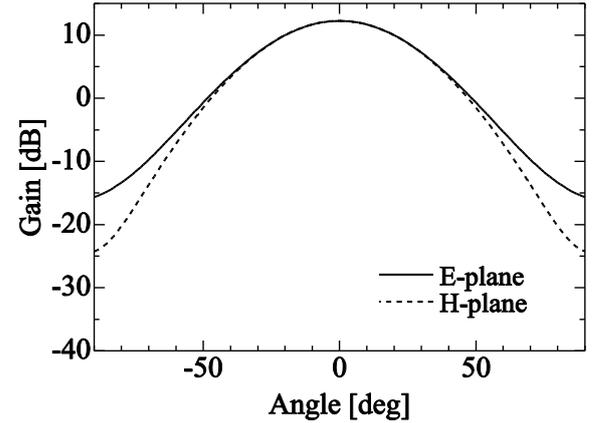


Fig. 4. Radiation pattern of the 3-mode synthesis obtained by the quadratic program.

以下となり、この図には示されていない。

2.3 4モードを考慮した合成モード係数

より広帯域にするために、さらに開口面を大きくし、基本TE₁₀モードと高次のTE₁₂、TM₁₂モードに加えて、次の高次TE₃₀モードも伝搬モードとして考慮し、二次計画法により各モードの励振係数を算出する。この場合、Fig. 1よりTE₃₀モードが伝搬可能な開口の大きさとして正方形一辺の長さ50mmに選んでいる。円形ビームのための制約条件として

$$F_{E-plane}(25^\circ) = F_{H-plane}(25^\circ) = 1 \quad (7)$$

$$F_{E-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 25^\circ) \quad (8)$$

$$F_{H-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 25^\circ) \quad (9)$$

を与え、交差偏波成分については(6)式と同じ条件を用いて二次計画法により各モードの励振係数を求めるとTable 2を得る。この結果を用いて放射パターンを求めたのがFig. 5であり、円形ビームが得られていることがわかる。なお、交差偏波成分は-40dB以下となった。

Table 2. Coefficients of 4 propagating modes.

mode	Amplitude [dB]	Phase [deg]
TE ₁₀	-1.3	0
TE ₁₂	-13.1	180
TM ₁₂	-7.1	0
TE ₃₀	-20.3	180

2.4 6モードを考慮した合成モード係数

基本TE₁₀モードと高次のTE₁₂, TM₁₂, TE₃₀モードに加えて、次の高次TE₃₂モードとTM₃₂モードも制御する場合の各モードの励振係数を二次計画法により算出する。TE₃₂モードおよびTM₃₂モードは交差偏波成分を持つが、TE₁₂モードおよびTM₁₂モードの場合と同様に適当な比で合成することにより交差偏波成分の低減が可能となる。ここではFig. 1の遮断特性をもとにTE₃₂モードとTM₃₂モードが伝搬する正方形開口の一边の長さを67.5mmとしている。このとき、円形ビームのための制約条件

$$F_{E-plane}(18^\circ) = F_{H-plane}(18^\circ) = 1 \quad (10)$$

$$F_{E-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 18^\circ) \quad (11)$$

$$F_{H-plane}(\theta) \geq 1 \quad (0 \leq \theta \leq 18^\circ) \quad (12)$$

を与え、交差偏波成分のための制約条件として(6)式を用いて二次計画法を適用するとTable 3で与えられる各モードの励振係数を得る。これらを開口面で励振した場合の放射パターンの結果はFig. 6であり、この場合にも円形ビームが得られ、交差偏波成分は-40dB以下となった。

3. 3モードを考慮したホーン的设计

3.1 ホーン構造と最適化条件

設計するホーンの形状をFig. 7に示す。喉元はテーパにより開口を広げ、その外側にグループを装荷した構造になっている。方形の場合、円形ホーンに用いるグループのように壁面で一周するグループを装荷すればグループ内側の角が特異点となることから、各辺にグループを1つずつ装荷したものとなっている。このような構造にすることで、グループ内は単なる導

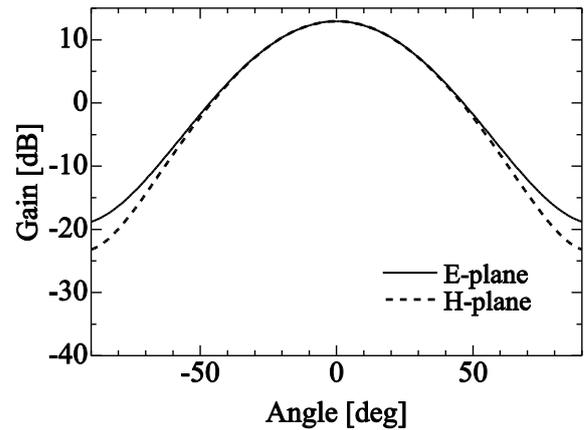


Fig. 5. Radiation pattern of the 4-mode synthesis obtained by the quadratic program.

Table 3. Coefficients of 6 propagating modes.

mode	Amplitude [dB]	Phase [deg]
TE ₁₀	-1.17	0
TE ₁₂	-13.9	180
TM ₁₂	-7.88	180
TE ₃₀	-20.0	180
TE ₃₂	-18.0	180
TM ₃₂	-21.6	180

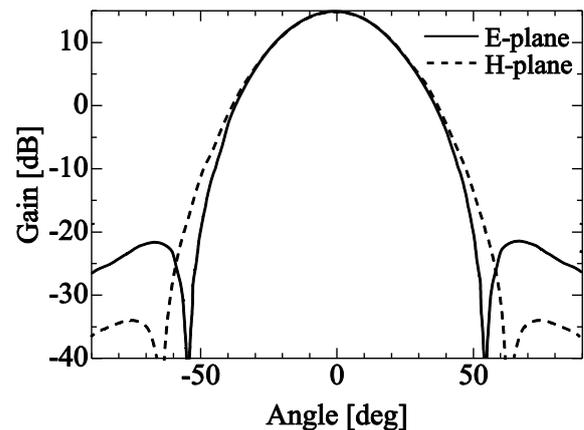


Fig. 6. Radiation pattern of the 4-mode synthesis obtained by the quadratic program.

波管構造となり、グループを1周させて電磁界の発散する端点が存在する場合と比べて高次モードの制御が容易となる。ホーン各寸法はTable 1で求めた各モードの励振係数がホーンの開口面で得られるように、

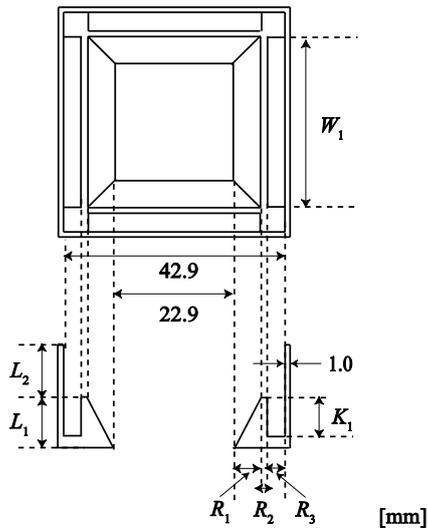


Fig. 7. Antenna structure for the 3 modes and its designed parameters.

Table 4. Optimized sizes for the 3 modes.

parameter	[mm]	parameter	[mm]
W_1	33.3	R_1	5.2
L_1	10.1	R_2	1.2
L_2	10.0	R_3	3.6
K_1	7.8		

図中の寸法 K_1 , W_1 , L_1 , L_2 , R_1 , R_2 , R_3 を変数として最適化することで決定する。なお、解析には ANSYS 社製の電磁界シミュレータ HFSS を用いている。設計周波数は 10GHz で、喉元形状は 22.9mm×22.9mm の正方形 (Xバンド標準導波管の長辺と同寸法)、開口形状も 42.9mm×42.9mm の正方形としている。

3.2 最適化結果

最適化により得られたホーンの寸法を Table 4 に示す。このときのホーンの軸長は 20.1mm となった。最適化後の開口面におけるモードの振幅の周波数特性を Fig. 8 に示し、 TE_{10} モードを基準とした位相の周波数特性を Fig. 9 に示す。中心周波数 10GHz において、振幅は Table 1 の結果とほぼ同じ値を得ることができ、位相の誤差は目標値の 30° 以内に収めることができた。設計した正方形開口ホーンを実際に試作し、測定を行った。Fig. 10 に試作したホーンの概観を示す。放射

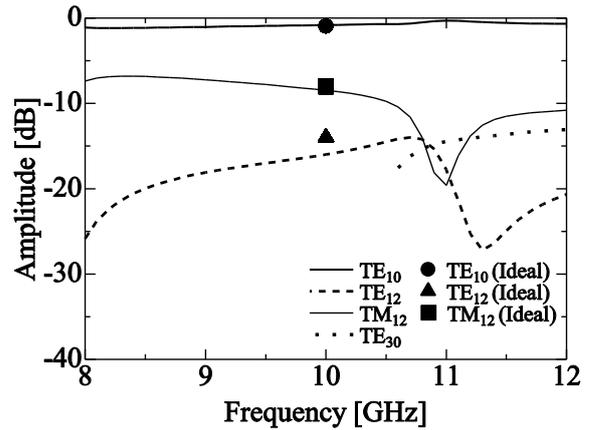


Fig. 8. Frequency characteristics of the modal amplitude.

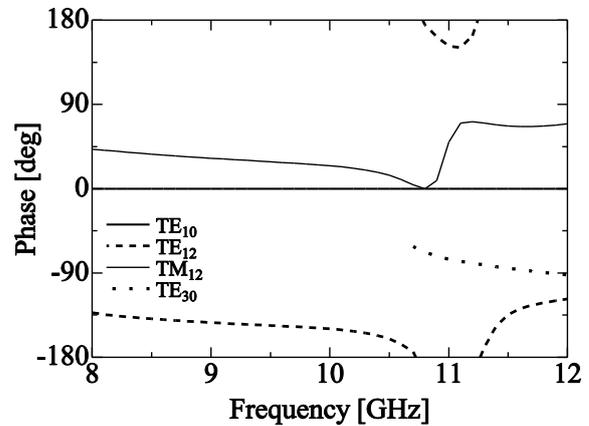


Fig. 9. Frequency characteristics of the modal phase.

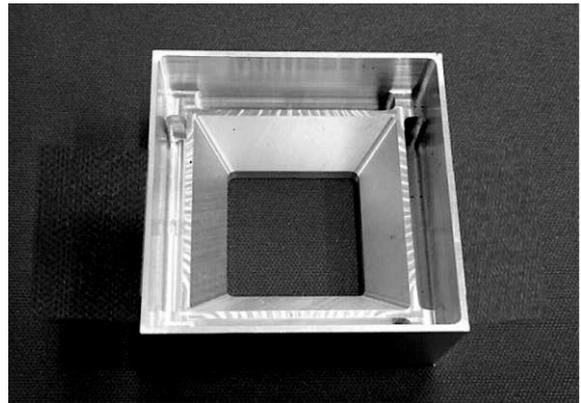


Fig. 10. Photograph of the fabricated horn.

パターンの解析値と測定値の比較を行った結果を Fig. 11 に示し、また Fig. 12 に主偏波成分の -10dB ビーム幅と主偏波成分のピーク値で規格化した交差偏波成分

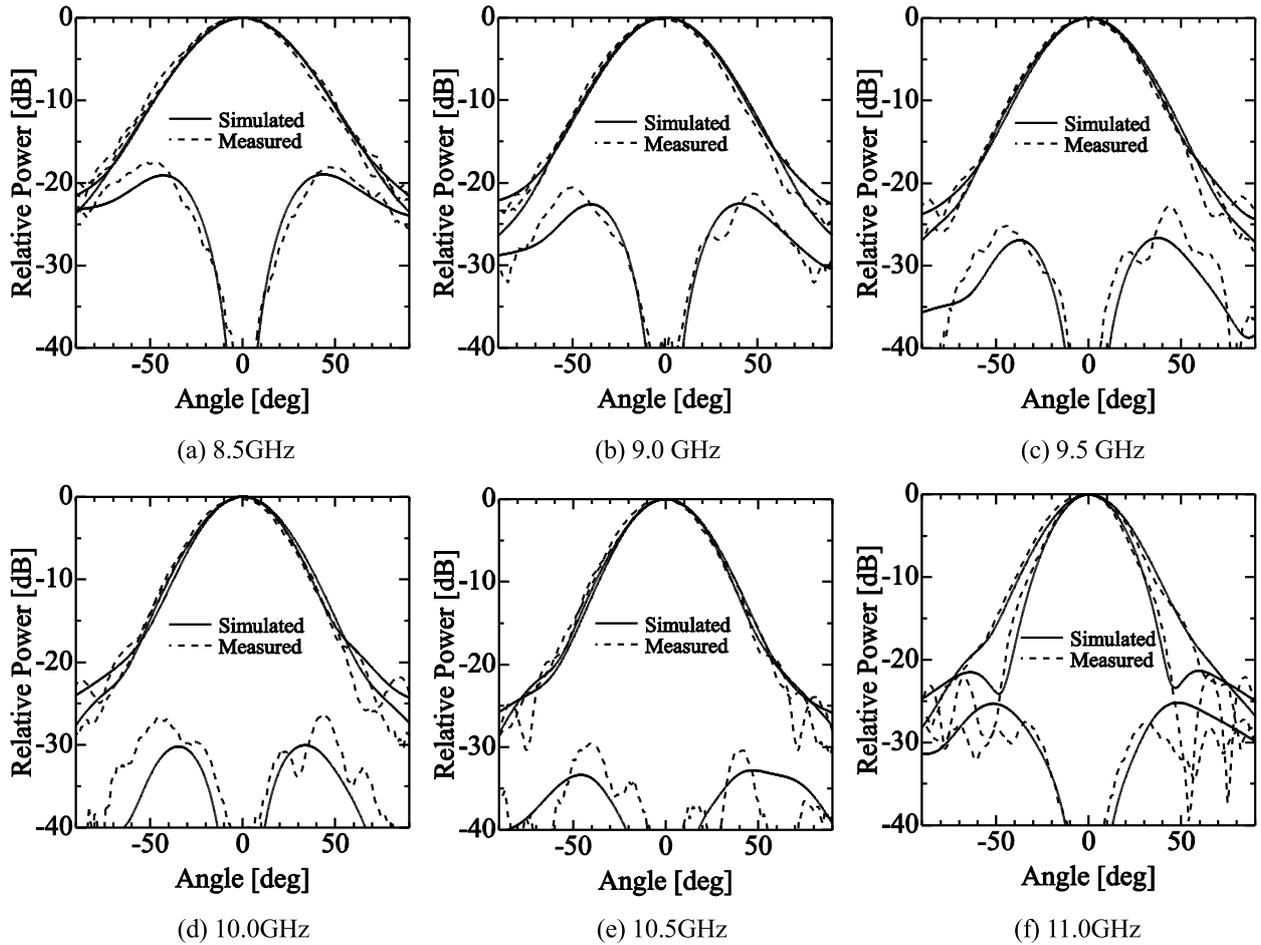


Fig. 11. Simulated and measured radiation pattern.

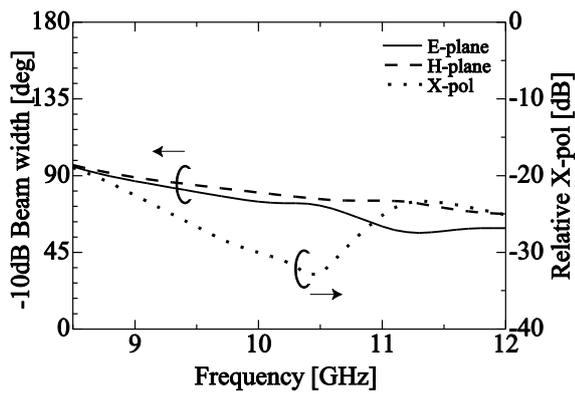


Fig. 12. -10dB beam width and peak of X-pol.

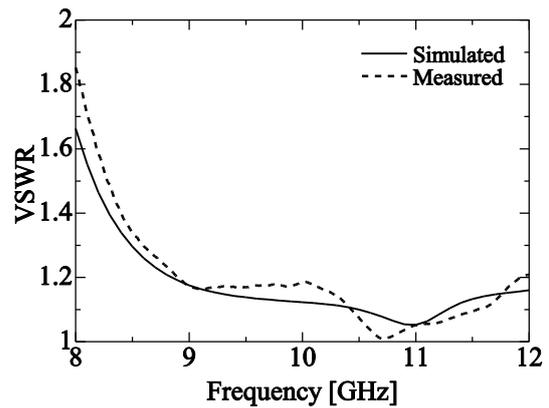


Fig. 13. Frequency characteristic of VSWR.

のピーク値を示す。図より解析値と測定値は概ね一致しており、10GHz-10.5GHzにおいては円形ビームが実現され、-30dB以下の低交差偏波特性となっていることが確かめられる。次に、Fig. 13にVSWRの解析結果

と測定結果の比較を示す。両者は良く一致しており、10GHz-10.5GHzにおいて1.2以下の良好なVSWR値が得られた。

4. 4モードを考慮したホーン的设计

4.1 ホーン構造と最適化条件

设计するホーンの形状をFig. 14に示す. より多くの高次モードを制御するため, 前節で提案したホーンにグループ装荷部分をもう一段加えた構造となっている. 各寸法は, まずTable 2に示した励振モード係数が開口面で得られるように形状の最適化を行い, 次にFig. 5で得られた放射パターンと形状から得られる放射パターンの2乗誤差が最小となるように最適化を行うことで決定している. ここでは, 正方形の開口寸法の初期値を50.0mm×50.0mmに設定している.

4.2 最適化結果

最適化により得られたホーンの各寸法をTable 5に示す. このときのホーンの軸長は25.6mm, 開口の大き

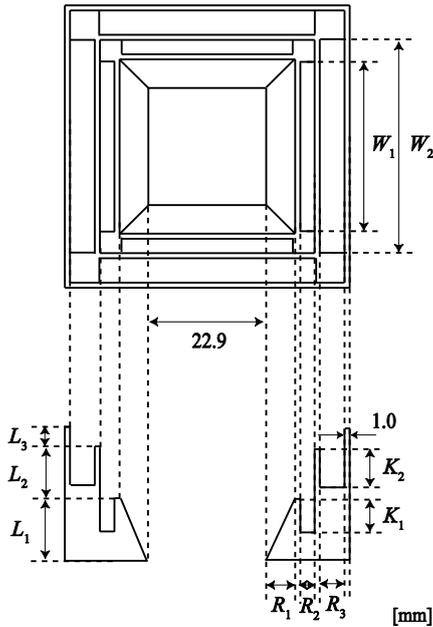


Fig. 14. Antenna structure for the 4 modes and its designed parameters.

Table 5. Optimized sizes for the 4 modes.

parameter	[mm]	parameter	[mm]
W_1	33.2	K_1	6.7
W_2	42.0	K_2	7.5
L_1	12.1	R_1	5.6
L_2	9.8	R_2	2.8
L_3	4.0	R_3	4.8

さは53.3mm×53.3mmとなった. 最適形状の開口面における各モードの振幅の周波数特性をFig. 15に示し, TE₁₀モードを基準とした位相の周波数特性をFig. 16

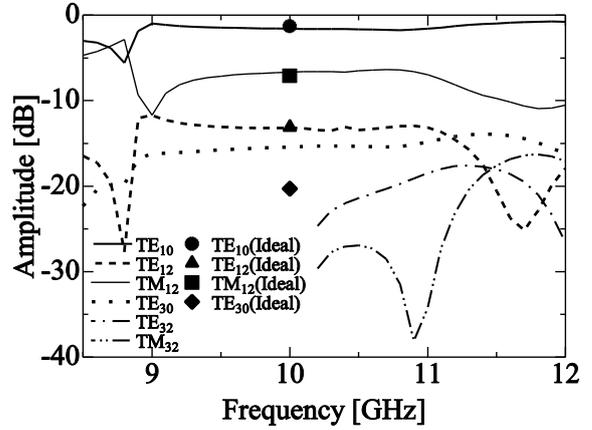


Fig. 15. Frequency characteristics of the modal amplitude.

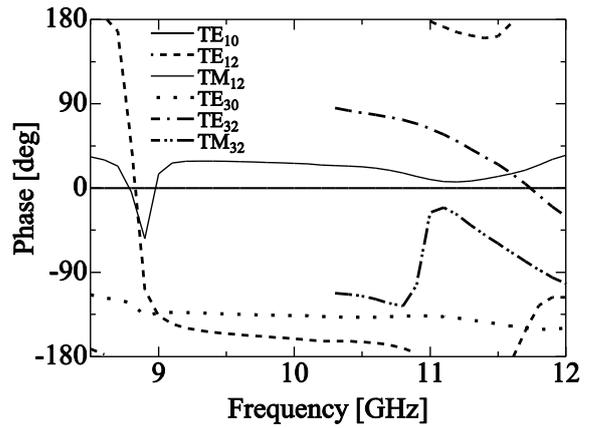


Fig. 16. Frequency characteristics of the modal phase.

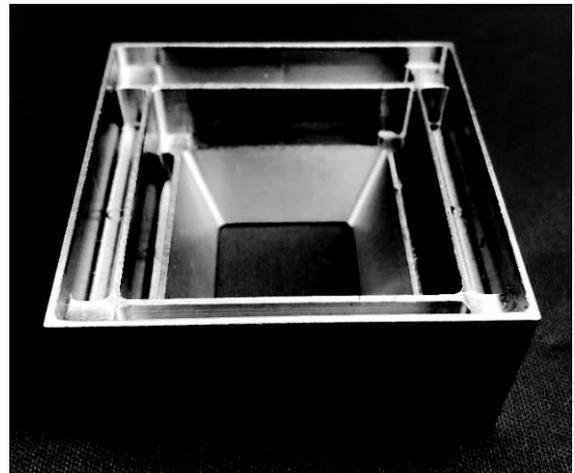


Fig. 17. Photograph of the fabricated horn.

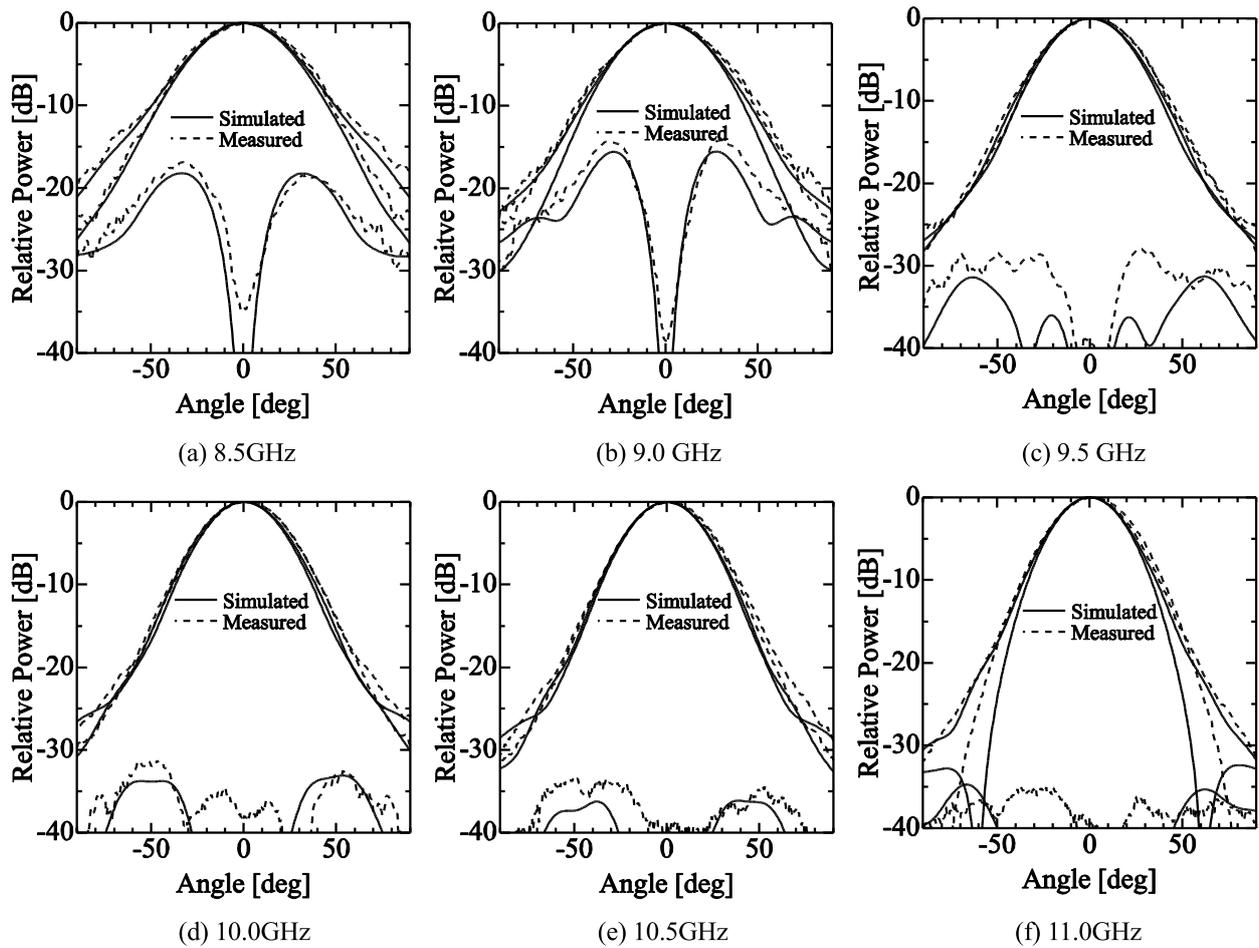


Fig. 18. Simulated and measured radiation pattern.

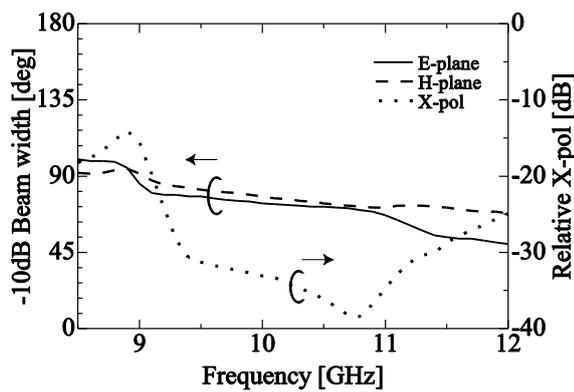


Fig. 19. -10dB beam width and peak of X-pol.

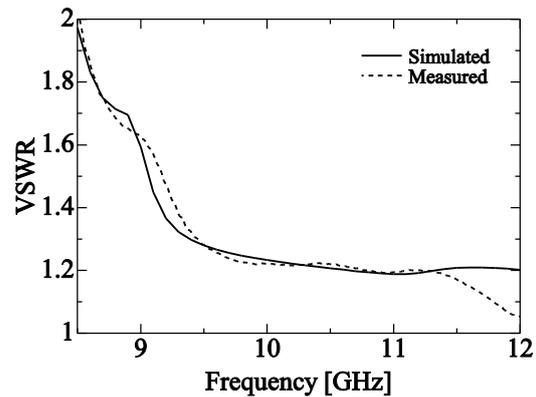


Fig. 20. Frequency characteristic of VSWR.

に示す。図より中心周波数10GHzにおいて、Table 2とほぼ同じ振幅値を得ることができ、位相については目標値との誤差は 50° 以内に収めることができています。Fig. 17に試作したアンテナの概観を示す。Fig. 18は放射パターンの測定値と解析値の比較を行ったもので、両者は概ね一致しており、9.5GHz-10.5GHzにおい

て円形ビームかつ低交差偏波特性が実現できていることがわかる。また、これらの結果をもとに主偏波成分の10dBビーム幅ならびに主偏波成分のピーク値で規格化した交差偏波成分のピーク値の周波数特性をFig. 19に、またVSWRの周波数特性をFig. 20に示す。

測定値と解析値は良く一致しており, 9.5GHz-10.5GHz におけるVSWRの値は1.3以下の良好な結果が得られた.

5. 6モードを考慮したホーン的设计

5.1 ホーン構造と最適化条件

设计するホーンの形状をFig. 20 に示す. 前節で提案したホーンが開口面に向けてテーパをのびた構造となっている. 各寸法は, 4モードの場合と同様の方法で最適化を行い決定した. ここでの正方形の開口寸法の初期値は设计周波数においてTE₃₂/TM₃₂モードが伝搬モードとなる67.5mm×67.5mmに設定している.

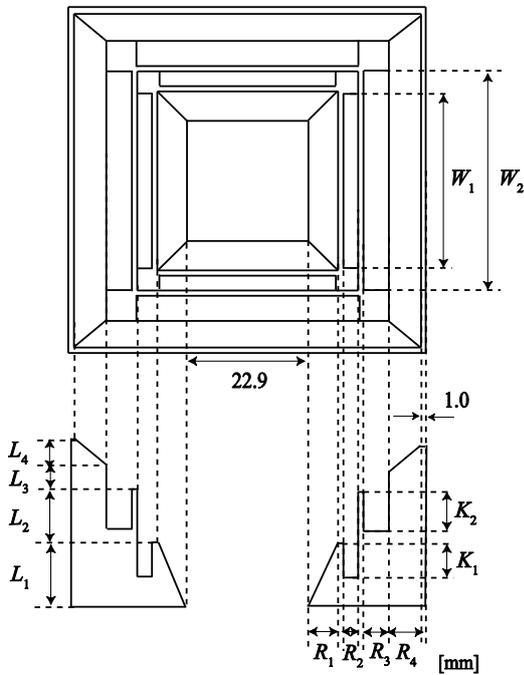


Fig. 21. Antenna structure for the 6 modes and its designed parameters.

Table 6. Optimized sizes for the 6 modes.

parameter	[mm]	parameter	[mm]
W_1	31.6	K_1	6.7
W_2	40.0	K_2	9.0
L_1	11.8	R_1	5.1
L_2	10.3	R_2	3.0
L_3	3.75	R_3	5.3
L_4	5.0	R_4	6.0

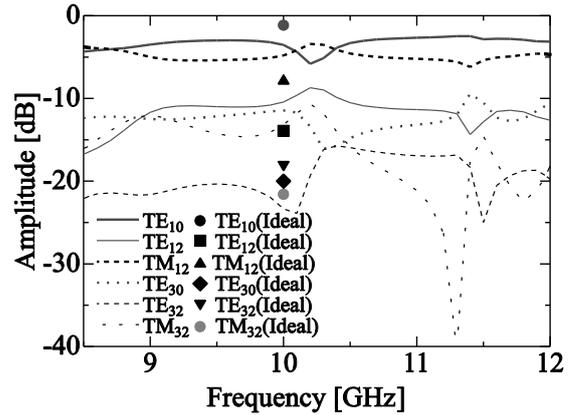


Fig. 22. Frequency characteristics of the modal amplitude.

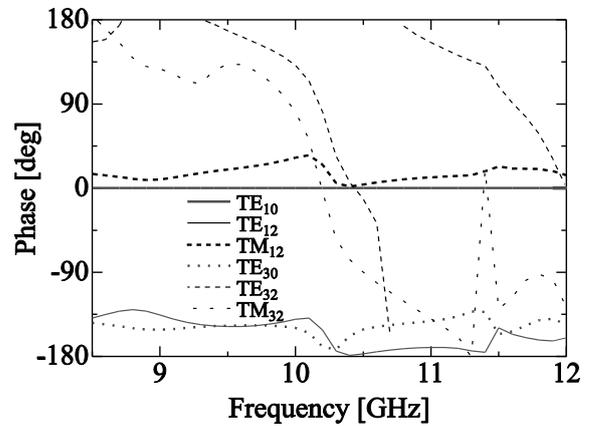


Fig. 23. Frequency characteristics of the modal phase.

5.2 最適化結果

最適化により得られたホーンの各寸法をTable 6に示す. このときのホーンの軸長は30.85mm, 開口の大きさは65.7mm×65.7mmとなり, 初期値よりも少し小さくなった. 最適形状の開口面における各モードの振幅の周波数特性をFig. 22に示し, TE₁₀モードを基準とした位相の周波数特性をFig. 23に示す. 振幅と位相ともに, 理想値とはすこし異なった値をとったが, これはTable 3で求めた各モードの励振係数が実数値であるのに対し, 放射パターンでの最適化を行う場合には各モード係数が複素数値をとることを許容しているためと考えられる. Fig. 24に試作したアンテナの概観を示す. Fig. 25は放射パターンの測定値と解析値の比較を示したものであり, 4モードを考慮したホーンアンテナよりも広帯域な9.5GHz-11GHzにおいて円

形ビームかつ低交差偏波特性が実現できている。また、これらの結果をもとに主偏波成分の10dBビーム幅ならびに主偏波成分のピーク値で規格化した交差偏波成分のピーク値の周波数特性をFig. 26に、またVSWRの周波数特性をFig. 27に示す。VSWRの測定値と解析値はよく一致し、9.5GHz-11GHzにおいては1.3以下の値を得ており、提案ホーンの有効性は明らかである。

6. 結論

本論文では、円形ビームかつ低交差偏波を有する新たなホーン構造として、グループを装荷した3種類の正方形開口のホーンアンテナを提案した。最初に TE_{10} 、 TE_{12} 、 TM_{12} の3モードを対象として、開口面におけるモード係数を二次計画法により算出し、それらにより最適化を行うことでホーンの寸法を決定した。10GHz-10.5GHzの帯域において、円形ビームかつ-30dB以下

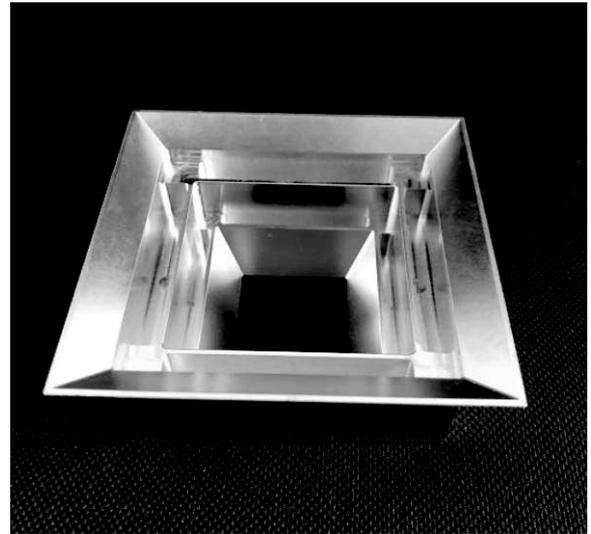


Fig. 24. Photograph of the fabricated horn.

の低交差偏波特性が実現できた。次に、より周波数帯域を広げるため、ホーン開口を少し広くして、 TE_{30} モ

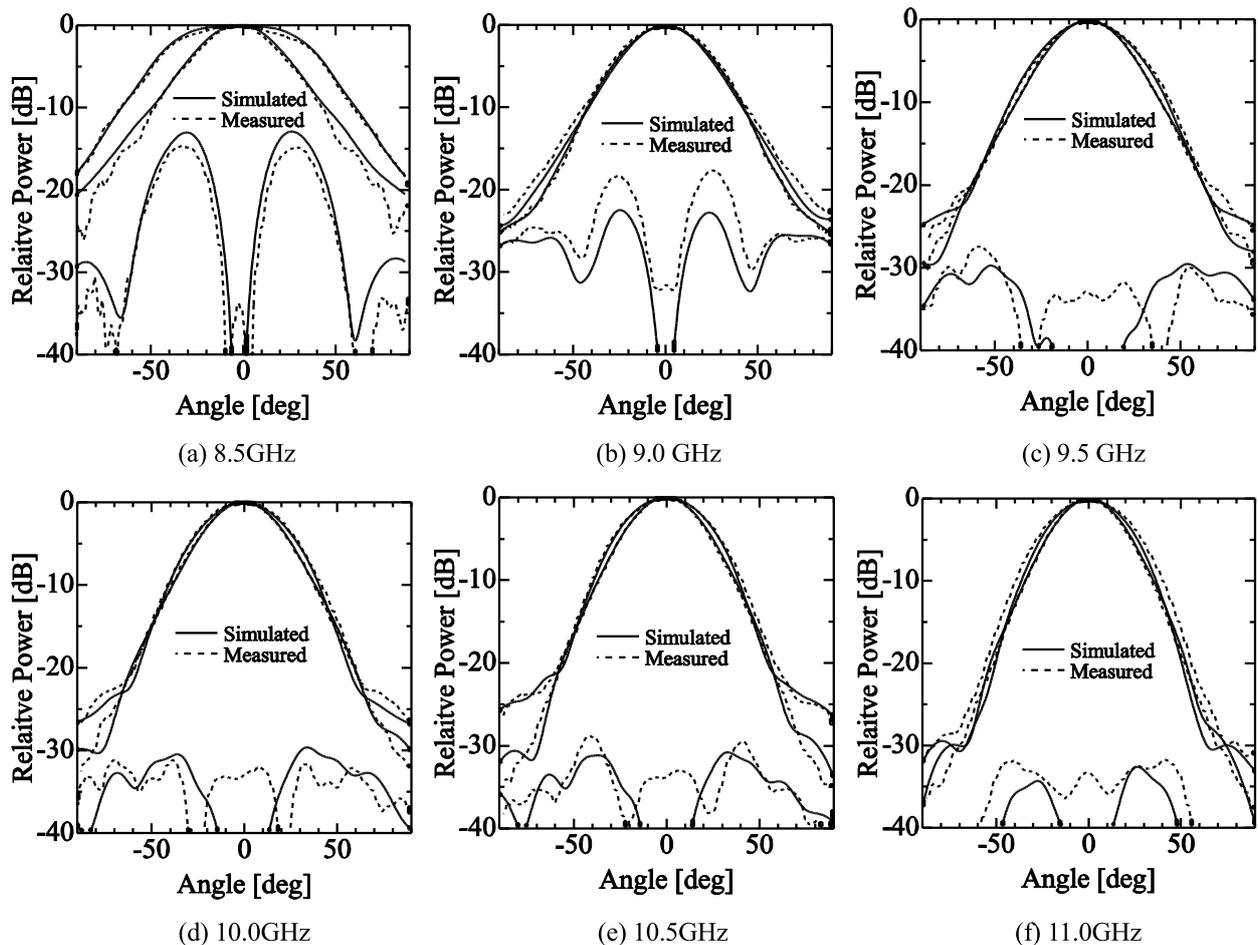


Fig. 25. Simulated and measured radiation pattern.

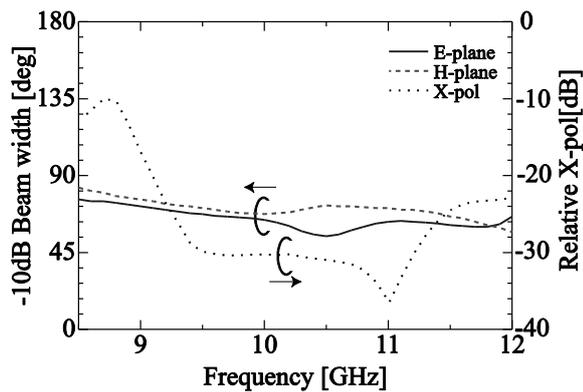


Fig. 26. -10dB beam width and peak of X-pol.

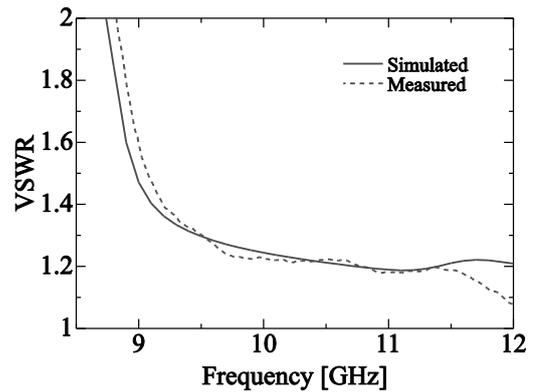


Fig. 27. Frequency characteristic of VSWR.

ードを加えた4モードを用いて、二次計画法から求めたモード係数に基づき最適化を行い、さらにこれを初期値として放射パターンで最適化を行うことによってホーンの寸法を決定した。9.5GHz-10.5GHzの帯域において、円形ビームかつ低交差偏波特性が得られた。最後にTE₃₂, TM₃₂モードを加えた6モードを用いて、4モードの場合と同様の最適化を行うことによってホーンの寸法を決定した。9.5GHz-11GHzにおいて、円形ビームかつ低交差偏波特性が得られた数値的検討、実験的検討により、提案したホーンの有効性を示した。

参考文献

- 1) P. J. B. Clarricoats and A. D. Olver, *Corrugated Horns for Microwave Horns and Feeds* (IEEE Press, New York, 1994).
- 2) H. Deguchi, M. Tsuji, and H. Shigesawa, "Compact Low Cross-Polarization Horn Antennas with Serpentine-Shaped Taper," *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, **52**[10], 2510-2516 (2004).
- 3) 出口博之, 辻幹男, 繁沢宏, "高次モード抑圧形複モードホーンアンテナ," 信学論(B), **J85-B**[5], 810-816 (2002).
- 4) T. Kobayashi, H. Deguchi, M. Tsuji, K. Omori, "Compact Multimode Horn with Coaxial Corrugation for Circular Coverage," *IEICE Trans. Electron.*, **E93-C**[1], 32-38 (2010).
- 5) S. B. Cohn, "Flare Angle Changes in a Horn as a Means of Pattern Control," *Microwave J.*, **13**[10], 41-46 (1970).
- 6) H. Urata, M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, "Multiple-Step Rectangular Horn with Two Orthogonal Sectoral Tapers for Elliptical Beam," *IEICE Trans. Electron.*, **E90-C**[2], 217-223 (2007).
- 7) S. Yamamoto, H. Deguchi, M. Tsuji, "Compact Groove-Loaded Rectangular Horn with Elliptical Beam for

Orthogonal Polarization Use," *Digest IEEE AP-S Symp.*, **3**, 3323-3326 (2011).

- 8) N. Kubo, R. Omi, H. Deguchi, M. Tsuji, "Multistep Rectangular Horn Loading Grooves for Orthogonally Polarized Elliptical Beam," *Proc. ISAP.*, **1**, 274-275 (2016).
- 9) H. Deguchi, M. Tsuji, and H. Watanabe, "Low-Sidelobe Multimode Horn Design for Circular Coverage Based on Quadratic Programming Approach," *IEICE Trans. Electron.*, **E91-C**[1], 3-8 (2008).