

Optimizing Design of Feed Horn Antenna by Particle Swarm Optimization Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

粒子群最適化アルゴリズムによる フィード・ホーン・アンテナの最適化設計 武安義幸 / JA6XKQ

フィード・ホーン・アンテナとして定番の W2IMU ホーンの性能を越えるべく、コンピュータ・シミュレーションによる最適化設計を試した。粒子群最適化アルゴリズム (Particle Swarm Optimization : PSO) を用いて、W2IMU ホーンを凌駕する性能が見えてきた。

はじめに

F 値が 0.5 以上のプライム・フォーカスのパラボラ・アンテナでは、フィード・アンテナとして W2IMU ホーンが定番であり、多くの採用例が発表されている。定番である理由は、

- パラボラ反射板への照射効率が高い
- サイドローブが低い
- 簡単な設計法が確立しており、再現性が高い
- 工作が比較的容易

等であろう。[1]

特長である「照射効率が高く、サイドローブが低い」性能は TE_{11} と TM_{11} モードを用いたことによるもので、この設計手法によるアンテナはデュアル・モード・ホーンと呼ばれている。W2IMU ホーンの特長は単純なホーンに比較してのものであり、その性能には改善の余地がある。

改善の手法としては、 TE_{11} と TM_{11} モードよりさらに高次のモードも使うもので、マルチ・モード・ホーンと呼ばれる。[2] 設計手法としては、マルチ・モードの励起量を解析的に求めるもの [3] [4] と、最適解探索アルゴリズムを用いるもの [5] に大

別される。本稿では後者の最適解探索アルゴリズムを用い、マルチ・モード・ホーン
の最適化設計を試みた。

JA6XKQ ホーンとなるか？

試行した最適化の結果を 図-1 ~ 図-3 に示す。図-4 ~ 図-6 は比較する
W2IMU ホーンの特性である。

図-2 と 図-6 の放射パターンの比較から、JA6XKQ ホーン(仮称)のサイドローブ
が低く押さえられていることが判る。また、JA6XKQ ホーンでは、メインローブの H/
V 偏波特性が対称形であることも特徴である。これらの特徴は、後述する最適化
において、「メインローブの H/V 対称性」および「擬似 G/T 特性」(図-3、図-6)に
着目して最適解を探索した結果を示している。図-3 と 図-6 に示す G/T は擬似
的な数値で単位 (dB/K) はない。プロット上の数値が高いほど G/T が優れてい
るという相対的な優劣のみを示す。

図-1 に示す外観の寸法(波長で正規化)は下記のとおり。寸法の定義は 図-7 に
よる。

R0 = 0.466	
R1 = 0.688	L1 = 0.680
R2 = 1.013	L2 = 0.235
R3 = 0.616	L3 = 0.603
R4 = 0.663	L4 = 0.231
R5 = 0.986	L5 = 0.503
R6 = 0.777	L6 = 0.196

ホーンの形状

図-1 と 図-4 に Xnecview [6] で表示した外観を示す。ホーン根元の同軸 / 導波
管変換部を除き、図-1 は 6 セクションの、図-4 は 2 セクションの円錐から構成さ
れる。

図-1 を見ると、「果たして製作可能か？」との疑問が出てくる。現状ではコンピュー

タ・シミュレーションのみで、製作と実測による性能確認には至っていない。ここでは、多段セクションによるマルチ・モード・ホーンの数値実験として報告する。

まずは、図-4 の W2IMU ホーンを基本として理解する。ホーン根元の同軸 / 導波管変換部は TE_{11} を発生し、次のテーパ部(第一セクション)で高次モードが発生する。次に続く円筒部(第二セクション)で TE_{11} と TM_{11} モードの位相関係を調整し、開口部で両モードの位相関係が適切となることでサイドローブが低くなる(キャンセルされる)。

テーパ部で発生する高次モードは TM_{11} モードだけではないので(ただし、高次モードの発生量はテーパのフレア角度で調整可能)、第二セクションだけでは調整代(設計パラメータ数)として不足する。2 セクションの W2IMU ホーンは、マルチ・モードの最低次数であるデュアル・モードを利用するための必要最小限な最適形状であると理解される。

この理解を単純に拡張すると、マルチ・モードを利用して特性をコントロールするには、基本形である 2 セクション型を多段にするアイデアに必然的に考えが至る。

多段セクション・ホーンの寸法定義を 図-7 に示す。

最適化手法

設計パラメータを増やして調整が自由になったのは良いが、どのように寸法パラメータを決定するのか？

モード解析法 (Modal Analysis) [3] [4] によるシミュレーションには、これまで馴染みがない。所有するシミュレーション・ツールは NEC2++ であり、ほぼ任意形状のアンテナを解析することは可能である。求められるアンテナ特性を生成する寸法パラメータを導出することはできないが、寸法パラメータを与えればアンテナ特性を計算できる。したがって、とり得る手法は、NEC2++ へ試行錯誤的に寸法パラメータを与え、得られた結果から特性が良くなりそうな寸法パラメータの方向性を見出し、試行錯誤を繰返すことで最適解へ到達する手法となる。

このような「行き当たりばったり」な探索を科学的に行なう手法として、シプレックス法 (Nelder-Mead Downhill Simplex Method)、遺伝的アルゴリズム (Genetic Al-

gorithm: GA)、粒子群最適化アルゴリズム (Particle Swarm Optimization: PSO) 等がある。[7] シプレックス法は局所解を、GA と PSO は大域解を探索する。

本稿に至る経緯では、まず、シプレックス法を試し、次に GA を、そして最後に PSO へと巡ってきた。シプレックス法は局所解にしか到達できず、結果は初期値に依存する。では、初期値を様々なパラメータの組合わせで試すとなると、本末転倒な話である。一方、GA と PSO はランダムな初期値から最適化の方向性を見出すものなので、本稿での目的に合致する。GA では探索領域を拡大するために「突然変異」を生成するが、「突然変異」が良い特性を示す保証はなく、確率としてランダムな寸法パラメータであり、時には NEC2++ での計算が破綻するようなケースに遭遇した。このような例外処理が面倒なため、GA による最適化を中断し、最終的に PSO に至った。また、GA の単純なルール(「遺伝子」を切って、つなぎ合わせる)を用いた「交配」と「突然変異」で生成される「子孫」のホーン形状が電磁氣的に醜態であることも、GA から PSO へ移行した心情的な理由(工学的に美しくない)である。

PSO は大域解探索なので、PSO の結果を初期値としてシプレックス法へ与え、さらなる局所解を求めた。

GA と PSO は、参考文献 [7] に例示されている MATLAB によるコードを GNU Octave へポーティングした。シプレックス法は、参考文献 [8] に例示されている PASCAL によるコードを、同様に GNU Octave へポーティングした。

PSO の実行にあたっては、その収束を速く確実なものにするために、PSO アルゴリズムのパラメータを微調整する必要があった。微調整は参考文献 [9] に従い、

- Cognitive factor $c1 = 2.0$
- Social factor $c2 = 2.0$
- Inertia factor $w = 1.0 \sim 0.0$ (試行回数に反比例)

とした。PSO は鳥や魚の群れ (Swarm) が餌へ向ったり、外敵から逃げる時の集団行動にヒントを得たアルゴリズムで、Cognitive factor は個体の、Social factor は群れ全体の夫々の最良位置への探索に対する重み付けである。Inertia factor (慣性)は、例えば餌(最良位置)へ近づく時、最初は勢いをつけて飛行 / 遊泳するが、徐々に減速しないと餌(最良位置)を通り過ぎてしまうことを防ぐための重み付け、と解釈すれば良いだろう。

なお、PSO は 粒子数 = 80、試行回数 = 120 回で実行した。

NEC2++

Surface Patch に関わるバグを修正し、セグメント数の上限を取払い、BLAS と LAPCK ライブラリを Intel MKL 対応として、大規模モデルを高速にシミュレーションできるように改善した。[10]

これらの改善の結果、W2IMU ホーン程度のサイズでは、一回のシミュレーション計算を約 0.5 秒で完了できる。

コスト関数

PSO と NEC2++ は自動車と言えばエンジンと足回りとハンドルに例えることができる。自動車で目的地に行くには、ナビゲータとドライバが必要である。目的地は何か？ それはどちらの方向なのか？ 近づいているのか、遠ざかっているのか？ 最適化におけるナビゲータとドライバがコスト関数である。

- フィード・アンテナの目的(地)は、
- パラボラ反射板への照射効率が高いこと
- メインローブの H/V 偏波特性が対称であること
- サイドローブが低いこと
- 反射板エッジからの大地熱雑音のピックアップが低いこと

である。これら複数の目的(地)を同時に満足しなくてはならない。目的からどれ位離れているかを示すものを、最適化ではコストと称する。コストが小さいほど目的に近い。

第三項と第四項は因果関係にあるが、コスト関数を検討する過程では計算を簡単にするために、「サイドローブが低いこと」を評価した。

第一項の「パラボラ反射板への照射効率が高いこと」と、第四項の「反射板エッジからの大地熱雑音のピックアップが低いこと」の両者を評価するものとして「照射

テーパー」と言われる指数がある。これは、メインローブの放射特性を反射板エッジで幾ら低減させるかを示したもので、両者のバランスから「照射テーパー = -12 dB」が適切であると一般的に言われている。そこで、フィード・ホーンが反射板エッジを見込む角度(以降、テーパー角度と称する)での放射特性が -12 dB であることを目的として、そこからの外れ具合をコストとした。

上述での「メインローブ」と「サイドローブ」の定義は「テーパー角度」を基準として、

- メインローブ = テーパー角度の二倍まで
- サイドローブ = テーパー角度の二倍以上

と定義した。

コスト関数として下記の三種類のコストを合計して評価した。

- メインローブの H/V 偏波差分の平均値
- サイドローブの平均値
- テーパー角度における -12 dB との差分

このコスト関数で最適化を試みた結果を 図-8 ~ 図-10 に示す。(注: 図-1 ~ 図-3 に示したものは、この結果を受けてコスト関数を改善したものである)

図-8 に示す外観の寸法(波長で正規化)は下記のとおり。

R0 = 0.466	
R1 = 0.636	L1 = 0.285
R2 = 0.696	L2 = 0.298
R3 = 0.873	L3 = 0.379
R4 = 0.969	L4 = 0.444
R5 = 0.472	L5 = 0.320
R6 = 0.963	L6 = 0.446

図-9 の放射パターンを見ると、確かにコスト関数にしたがって最適化を図った結果がうかがえる。

- メインローブの H/V 偏波の対称性はテーパー角度(F=0.55 で49 度)ま

で良好である

- しかし、テーパ角度からその二倍までの対称性は乱れている
- サイドローブ(バックローブ)は低く押さえられている
- テーパー角度における -12 dB 低減は良好である
- コスト関数に含まれていない部分であるが、メインローブの肩の落ち具合がなだらかであり、マルチ・モード特有の急峻な落ち具合となっていない

上記の分析で、第二項と第五項はマルチ・モードに関わる部分である。しかし、コスト関数で直接的にマルチ・モードの関与を評価していないし、分析的ではなく試行錯誤的な最適化手法では改善が期待できない。

6 セクションまで形状を複雑化して寸法パラメータを増やしたメリットが生かされていないように思われる。

コスト関数の改善

マルチ・モードに関わる部分を直接的に評価するコスト関数があれば良いが、定量的なものが思いつかない。NEC2++ の計算結果には Surface Patch 上の電流分布が含まれるので、それを使えば高次モードの励起状況を判定できるかとも考えるが、定性的にも定量的にもコスト関数に落とし込むまでに至っていない。

そこで、フィード・アンテナの目的に立ち返ると、

- パラボラ反射板への照射効率が高いこと
- メインローブの H/V 偏波特性が対称であること
- サイドローブが低いこと
- 反射板エッジからの大地熱雑音のピックアップが低いこと

である。しかし、試したコスト関数はこれらを適切に評価していないと反省される。「照射効率が高いこと」ならば、直接的に照射効率を計算すべきである。「サイドローブを低くして、反射板エッジからの大地熱雑音のピックアップが低いこと」ならば、直接的にアンテナ等価雑音温度を計算すべきである。これら二つのポイントを言い換えると「G/T の最適化」となる。手抜きでコスト関数を考えてきたが、結局は G/T というアンテナ・システムの一般的な評価法に帰着した。G/T を最適化する

には、必然的にマルチ・モードが適切に励起されるはずである。「テーパ角度における -12 dB 低減」は G/T 最適化の目安であって、目標ではないかもしれない。G/T を最適化した結果は、-11 dB かもしれないし、-13 dB かもしれない。

この反省に基づいてコスト関数を改善する。「G/T の最適化」は、フィードとパラボラ反射板総合でのパラボラ・アンテナとしての“G/T”であることは言うまでもない。しかし、パラボラ・アンテナ総合での放射パターンを計算して“G/T”を導出することは、さすがに計算負荷が重過ぎる。したがって、フィード・アンテナ単体の特性を用いて「擬似 G/T」を評価するコスト関数を検討する。

“G/T”のうち利得“G”は「照射効率」に比例するので、フィード・アンテナの「照射効率」を直接的に計算する。また、“G/T”のうちアンテナ等価雑音温度“T”は、パラボラ・アンテナを天頂に向けた時、フィード・アンテナが見込む反射板の等価雑音温度(=天空の雑音温度)と反射板のエッジ越しに見込む大地の等価雑音温度をフィード・アンテナの放射パターンで積分した値で置換する。この「擬似 G/T」はフィード・アンテナ特性の絶対値の比較はできないが、相対的な優劣の比較は可能である。

照射効率の計算には、参考文献 [11] に例示されている BASIC のコードを GNU Octave へポーティングした。擬似的な等価雑音温度の計算は、照射効率の計算の過程で天空の雑音温度 $T_{\text{sky}} = 30 \text{ K}$ 、大地の雑音温度 $T_{\text{gnd}} = 300 \text{ K}$ と仮定し、パラボラ反射板を見込む角度の放射パターンに T_{sky} を、反射板エッジから水平までの放射パターンに T_{gnd} を、水平から天頂までの放射パターンに T_{sky} をそれぞれ掛け合わせて積分して算出した。これらの“G”と“T”から「擬似 G/T」を求めた。目的から外れたコストを評価するので、数値としては上述の“G”と“T”から求める“T/G”をコストとする。なお、“G/T”評価と計算手法については、文献 [12] が参考となる。

下記の二種類の合計を改善したコストとする。

- メインローブの H/V 偏波差分の平均値
- 擬似“T/G”

改善したコスト関数による最適化の結果が最初に示した 図-1 ~ 図-3 である。その形状は、テーパ部のフレア角度が負(広がりではなく絞り)という、マルチ・モードの励起と調整を示したものとなった。

まとめ

オープン・ソースとして発表されているシミュレーション・ツールやプログラム・ソースコードを利用して、粒子群最適化アルゴリズム (Particle Swarm Optimization : PSO) によるフィード・アンテナの最適化設計を試みた。

その結果は、マルチ・モードの励起と調整を示唆する独特な形状となり、メインローブの良好な H/V 偏波対称性と、高い照射効率と低いアンテナ等価雑音を両立させた良好な G/T 特性を示した。

現状はシミュレーションのみであり、製作と実測による性能確認が今後の課題である。また、独特な形状から工作に関わる課題を解決しなくてはならない。シミュレーションに関してもコスト関数を改善することで、さらなる特性最適化が期待される。

//
☆

参考文献

[1] Paul Wade, W1GHZ, "The W1GHZ Online Microwave Antenna Book – Chapter 6, Feeds for Parabolic Dish Antennas," 1998–1999.

http://www.w1ghz.org/antbook/ch6_5-1.pdf

[2] A. David Olver, et al, "MICROWAVE HORNS and FEEDS," IEE, The Institution of Electrical Engineers, 1994.

ISBN 0 7803 1115 9

[3] Deguchi, Hiroyuki, Mikio Tsuji, and Hiroshi Shigesawa. "Synthesis of a High Efficiency Conical-Horn Antenna: Effect of the Negative Flare Angle." Microwave Conference, 2001. 31st European. IEEE, 2001.

[4] Deguchi, Hiroyuki, Mikio Tsuji, and Hiroshi Shigesawa. "A design method of multimode horn with low cross polarization for high efficiency reflector antennas." Proc. 2002 Interim International Symposium on Antennas and Propagation,

1B4. 2002.

<http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2002/pdf/00089.pdf>

[5] Leech, J., et al. "Measured performance of a 230 GHz prototype focal-plane feedhorn array made by direct drilling of smooth-walled horns." 21st Int. Symp. Space Terahertz Technology, Oxford, UK. 2010.

http://www.physics.ox.ac.uk/Users/Yassin/publications/Oxford_publications/Articles/2010/Leech2010_ISSTT.pdf

[6] Pieter-Tjerk de Boer, PA3FWM, "Xnecview – A program for visualizing NEC2 input and output data."

<http://wwwhome.cs.utwente.nl/~ptdeboer/ham/xnecview/>

[7] Haupt, Randy L., and Sue Ellen Haupt. Practical genetic algorithms. John Wiley & Sons, 2004.

[8] James W. Cooper, "Introduction to PASCAL for Scientists," John Wiley & Sons Inc, 1981.

ISBN: 0-471-08785-8

[9] Mikki, Said M., and Ahmed A. Kishk. "Particle swarm optimization: A physics-based approach." Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics 3.1 (2008): 1–103.

[10] 武安義幸, JA6XKQ, "NEC2++ アンテナファームの拡張," 2014.

http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppMKL_2.pdf

[11] B. Larkin, W7PUA, "Dipole-Reflector Parabolic Dish Feeds for f/D of 0.2–0.4," QEX, February 1996.

[12] 加藤雄大, JM1MCF, "ロング八木の解析と最適化研究," HAM Journal, No.65, 1990.

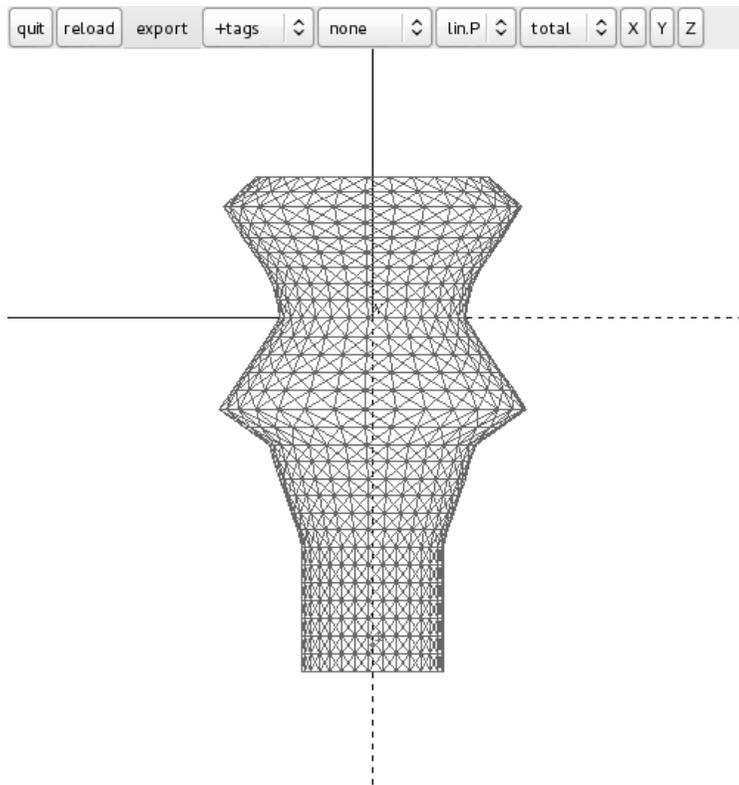


図-1 : 外観 - 擬似 G/T 最適化ホーン・アンテナ (F=0.55)

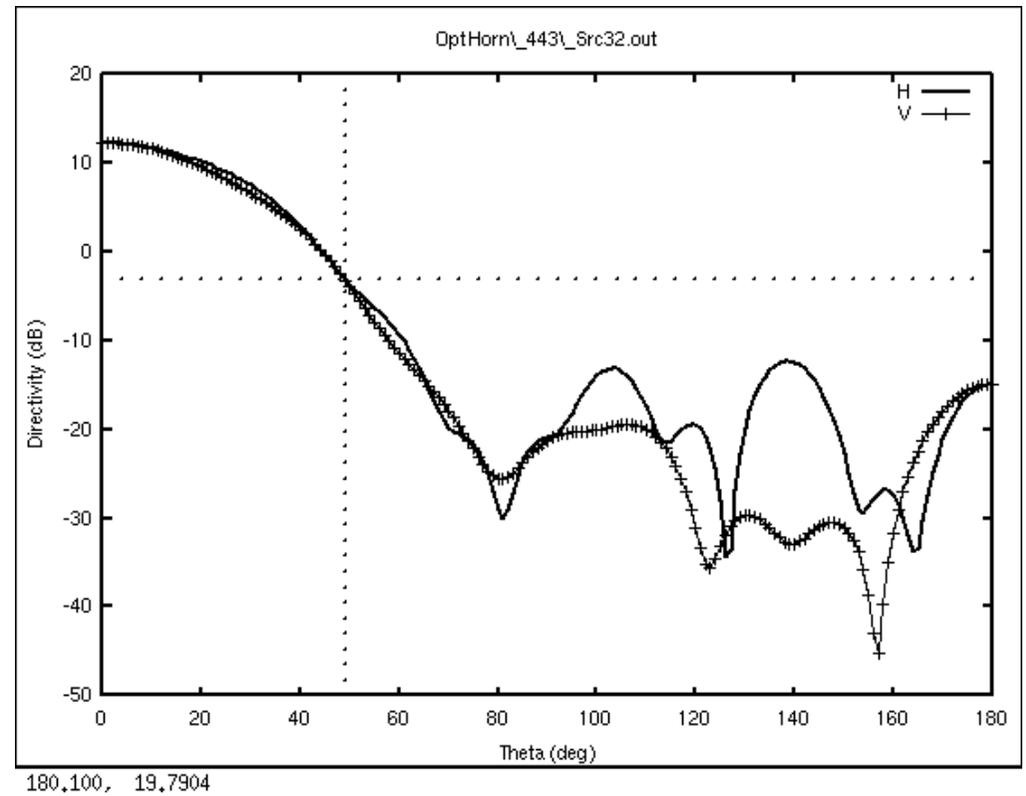
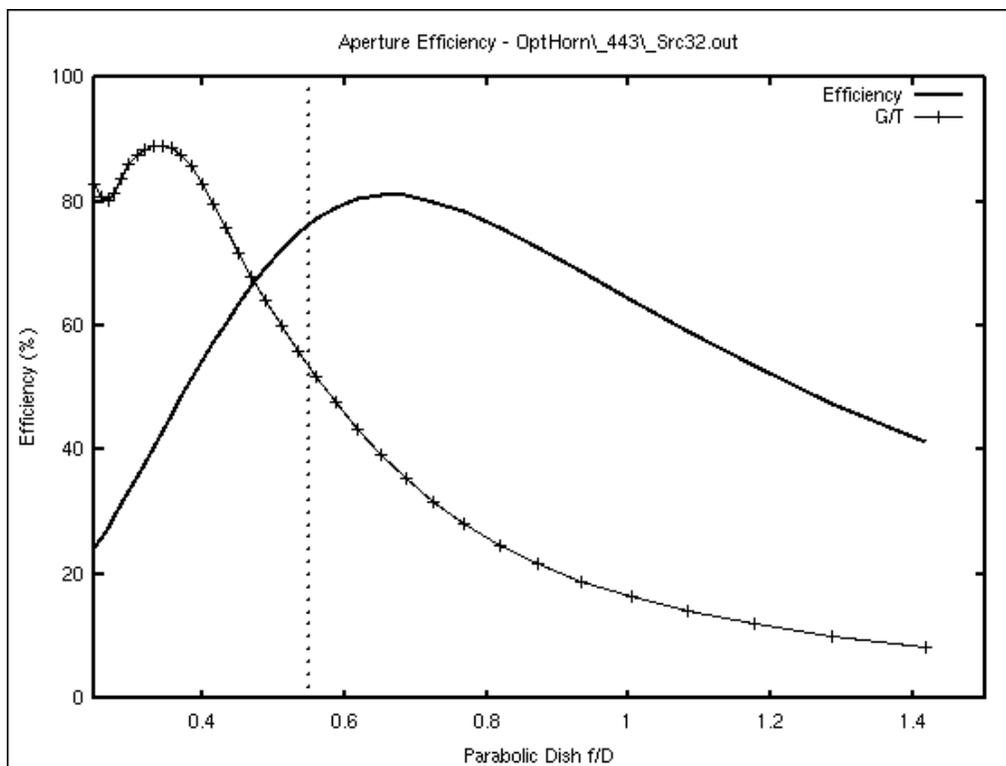


図-2 : 放射パターン - 擬似 G/T 最適化ホーン・アンテナ (F=0.55)



1.52079, 96.7954

図-3 : 照射効率 / 擬似G/T - 擬似 G/T 最適化 ホーン・アンテナ

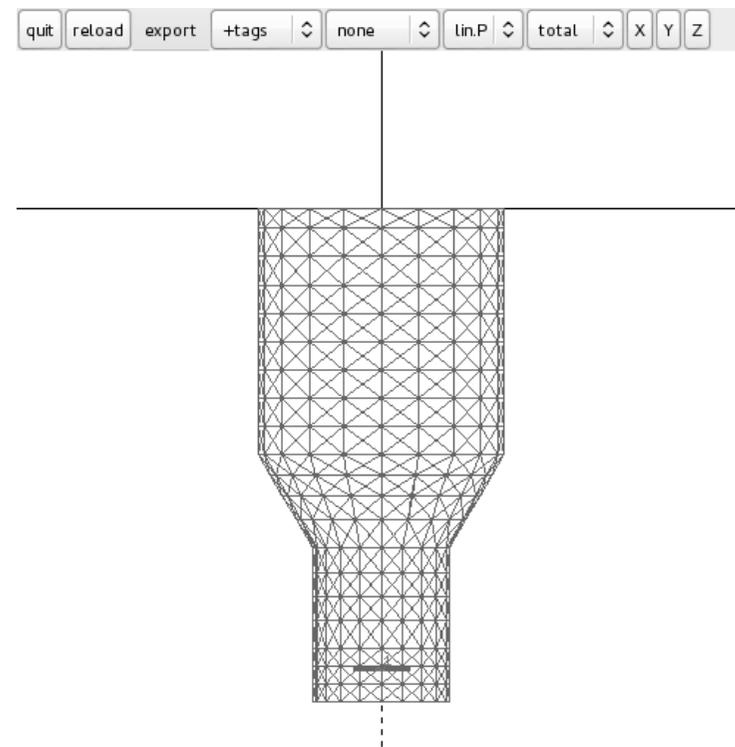
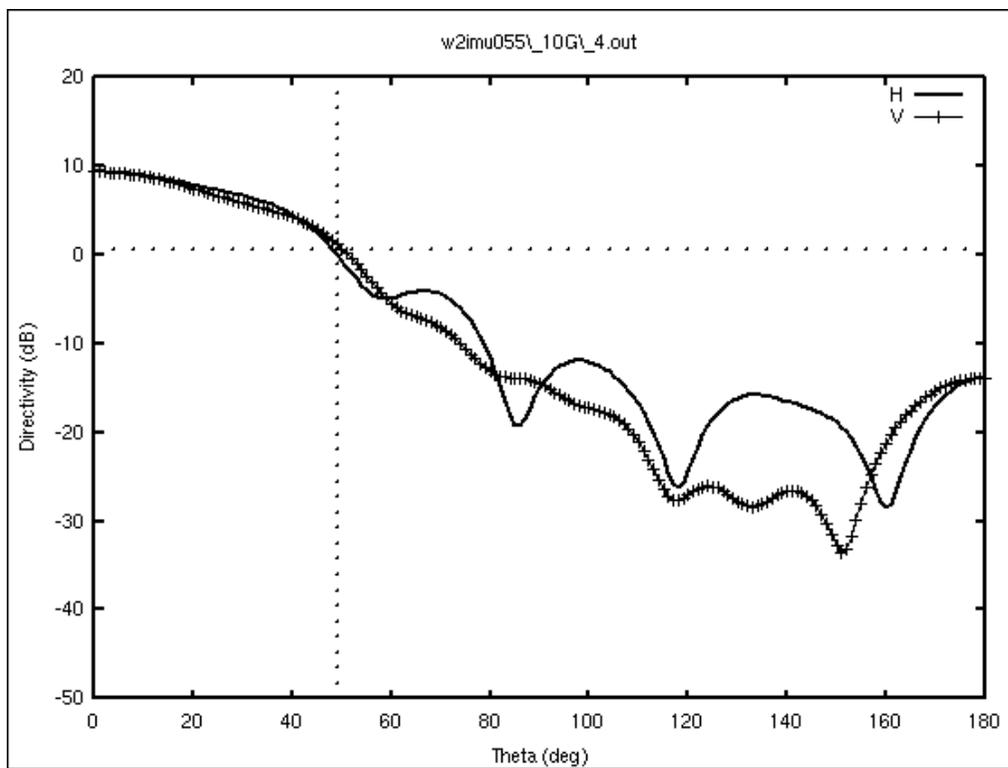
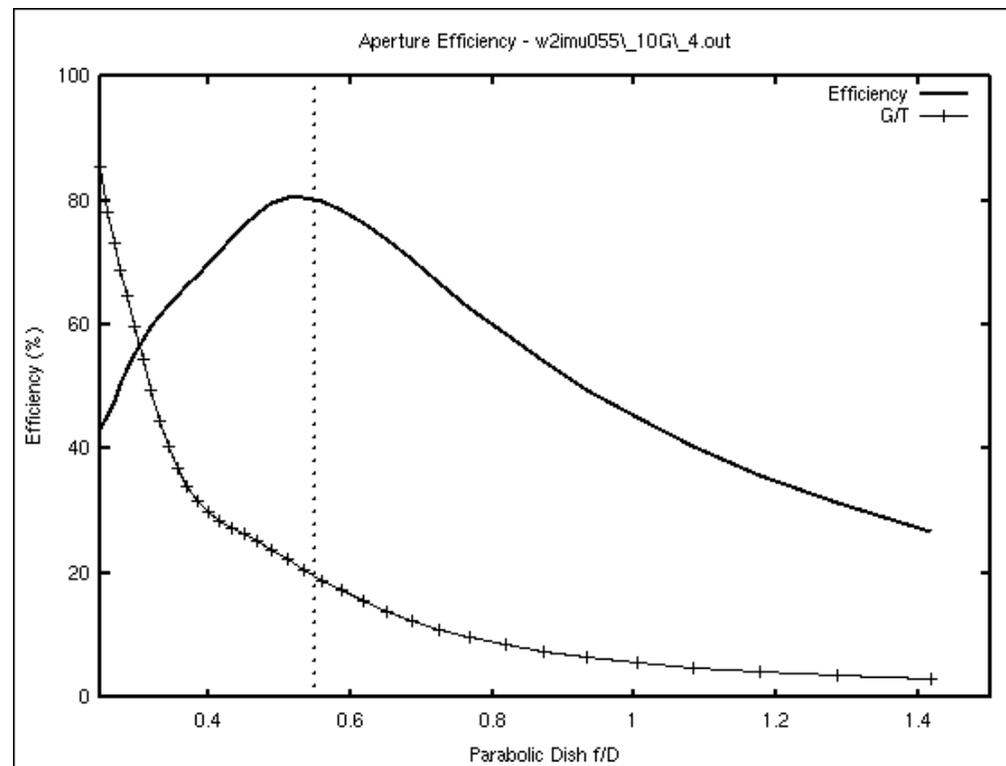


図-4 : 外観 - W2IMU ホーン・アンテナ (F=0.55)



183,742, 11,6143

図-5 : 放射パターン - W2IMU ホーン・アンテナ



1,51559, 101,468

図-6 : 照射効率 / 擬似G/T - W2IMU ホーン・アンテナ

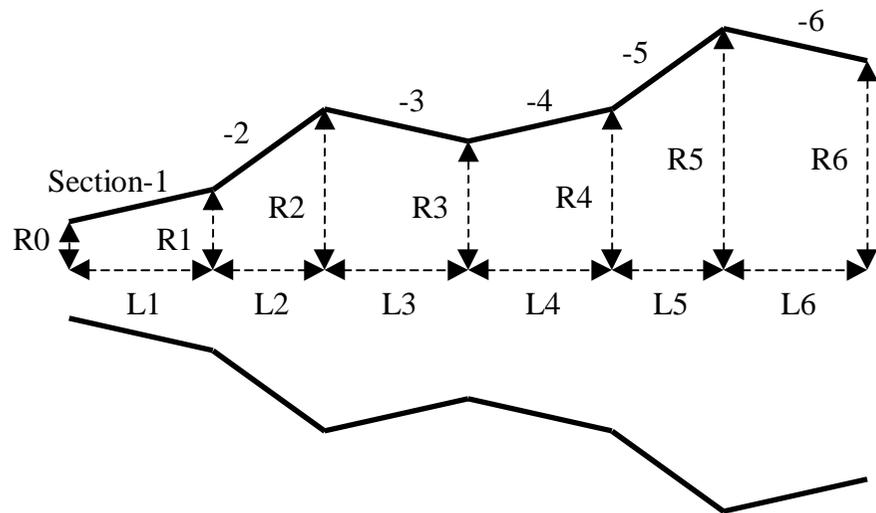


図-7 : 6 セクション・ホーンの寸法定義

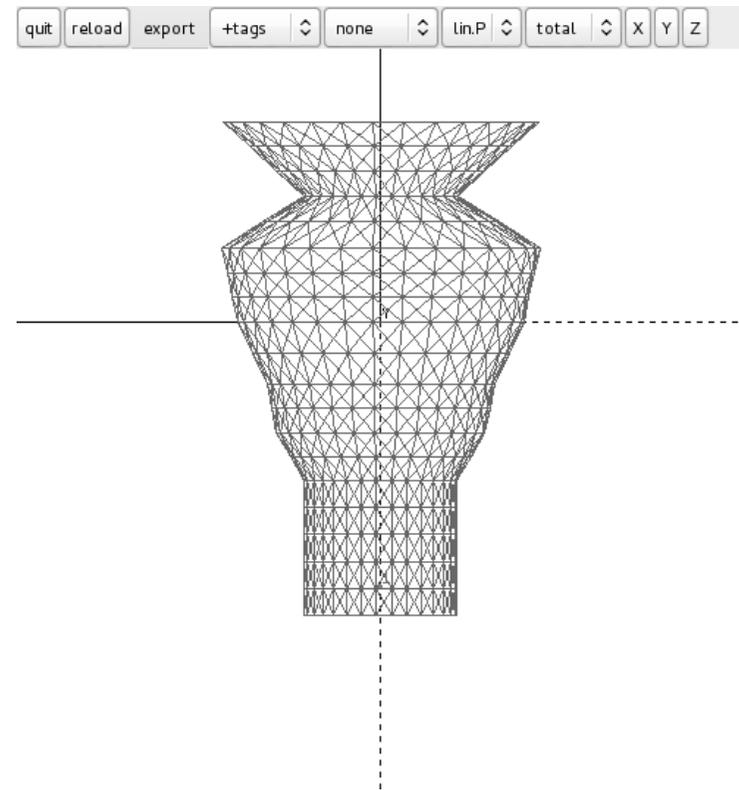
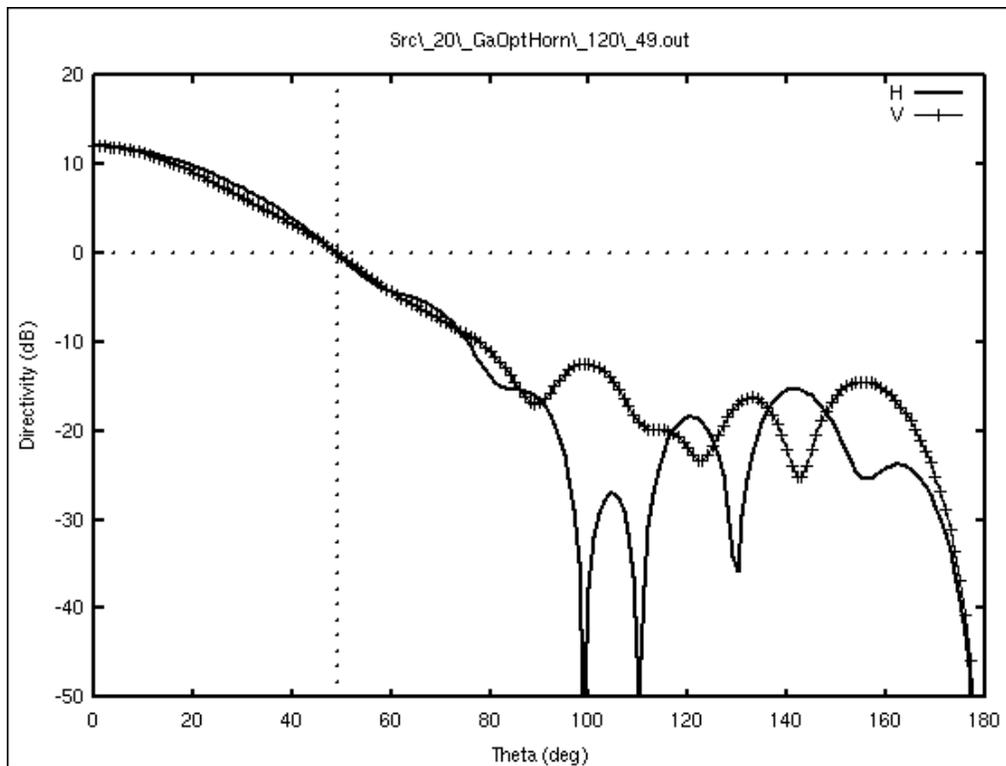
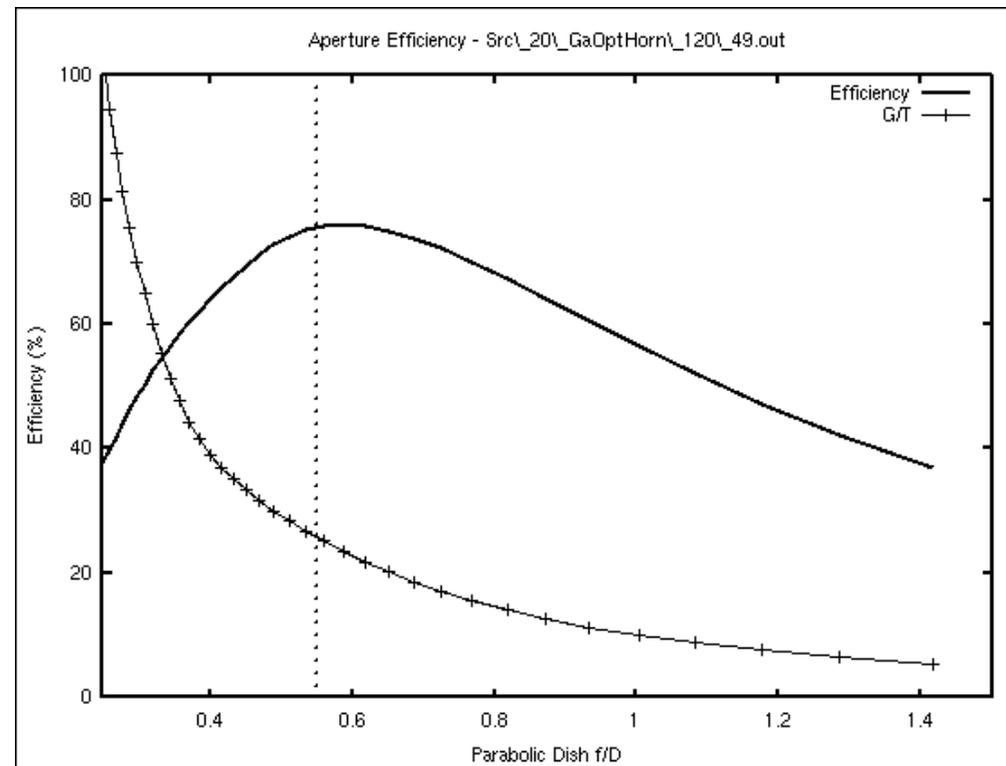


図-8 : 外観 - 照射テーパー最適化 ホーン・アンテナ (F=0.55)



180,449, 12,2222

図-9 : 放射パターン - 照射テーパー最適化 ホーン・アンテナ



1,45981, 91,5244

図-10 : 照射効率 / 擬似G/T - 照射テーパー最適化 ホーン・アンテナ