

## Feed Radiation Pattern from Subreflector Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

### サブリフレクタからの放射パターン 武安義幸 / JA6XKQ

プライム・フォーカスでのフィード・ホーン・アンテナのシミュレーションを継続している。[1] パラボラ・アンテナを要素ごとに分割して検討を進め、最終的にはアンテナ総合での特性を設計し評価することが目的であるので、フィード・ホーン・アンテナから検討要素を一つ進める。マルチ・リフレクタとして、フィード・ホーン・アンテナのシミュレーションにサブリフレクタを追加し、サブリフレクタからの放射パターンを図示してみた。そこには、ホーン・アンテナ単体での特性とは違った知見が得られた。

## はじめに

アマチュアのマルチ・リフレクタ・アンテナ、例えばカセグレン・アンテナの設計と言えば、光線の幾何学的なトレースを用いてサブリフレクタの双曲面パラメータを決定する程度であろう。アンテナ総合での各種特性を考慮して設計パラメータを合理的に決定するツールとして、W1GHZ のスプレッドシート Cassegrain\_design.xls がある。[2] このツールから得た設計パラメータで、どのような放射パターンで、ゲインは幾らで、G/T が如何なるものか知りたいところである。

モーメント法 (Method of Moment: MoM) の NEC2 を用いて、W1GHZ 自身は 1998 年から 1999 年にサブリフレクタの検討を行なっている。[3] 当時は PC の CPU 性能とメモリ容量の制限から、直径 5.6 波長の平板リフレクタをシミュレーションするに留まっている。当時の 500 MHz CPU & 128 MB RAM と現状を比べると、ホーン・アンテナと双曲面リフレクタを NEC2++ で試さない理由はないであろう。

反射板を取扱うシミュレーション手法としては、メモリ容量と計算時間の観点において優位性を持つ PO : Physical Optics [4] が一般的である。文献 [4] ではフィード・ホーンとして解析的な輻射パターンが例題と使用されている。しかし、ここでは任意なフィード・ホーンの輻射パターンを解析したいことが、MoM の NEC2++ を用いたもう一つの理由である。いずれは、文献 [4] の PO コードに NEC2++ によるフ

ィード・ホーンのシミュレーション結果を統合して、アンテナ総合の特性を評価したいところである。

シミュレーションを担う NEC2++ にはメモリ使用のソフトウェアとしての制限は無いので [5]、ホーン・アンテナのモデル・ジェネレータに双曲面生成のルーチンを追加するだけである。

## モデル・ジェネレータ

GNU Octave で記述したホーン・アンテナのモデル生成プログラムに双曲面生成のルーチンを追加した。ホーン・アンテナとサブ・リフレクタの関係を、図-1 に示す。

図中の寸法パラメータについて、前述の Cassegrain\_design.xls 等のツールで得られた値をモデル・ジェネレータに与える。モデル・ジェネレータは、与えられたパラメータを用いて、双曲面を四角形 ( Quadrilateral ) の Surface Patch で近似する。Surface Patch を用いてモデルを生成するにあたっては、パッチ総数 (=メモリ使用量) とシミュレーション精度の観点から、Surface Patch のセグメント・サイズを変更できるようにした。

Surface Patch で曲面を近似することは、コニカル・ホーン・アンテナと同様である。しかし、注意を要する点は、Surface Patch の表裏の定義である。Surface Patch は、「反射する表面」と「反射しない裏面」を持つ。[6] したがって、ホーン・アンテナでは「反射する表面」をホーンの内側に向くように、双曲面のサブリフレクタでは「反射する表面」を凸面側に向くように配置しなくてはならない。NEC2++ を使い始めた当初、この Surface Patch の定義を理解していなかったため、モデル・ジェネレータでの記述を試行錯誤した経緯がある。[7]

Surface Patch の表裏の定義を、図-2 に示す。[6] 直交座標系 XYZ に頂点 1~4 を持つ四角形の Surface Patch が配置されている。 $\hat{t}_1$  と  $\hat{t}_2$  はパッチ上の直交する単位ベクトルで、 $\hat{t}_1$  は四角形の辺 12 と平行である。 $\hat{n}$  は単位法線ベクトルで、「反射する表面」の向きを示している。頂点 1~4 の配置順番を右回り(時計回り)に見て、パッチを右ネジの頭と見なし、右回りに回した時にネジが進む方向を示したものが単位法線ベクトル、すなわち「反射する表面」となる。

Surface Patch の表裏が正しいかの判定は、ビューワで見るのが簡単だろう。

XnecView [8] は、「反射する表面」を明るい水色で、「反射しない裏面」を暗い緑色で表示するので判定が簡単にできる。図-1 は生成したモデルを XnecView を用いて Y 軸方向から表示したもので、サブリフレクタが明るい水色で表示されているので、「反射する表面」がフィードのホーン・アンテナと対向している様子が解る。一方、ホーン・アンテナの外側が暗い緑色で表示されているので、「反射しない裏面」が外側であり、「反射する表面」がホーンの内側になっていることが解る。故に、モデルは正しく生成されている。

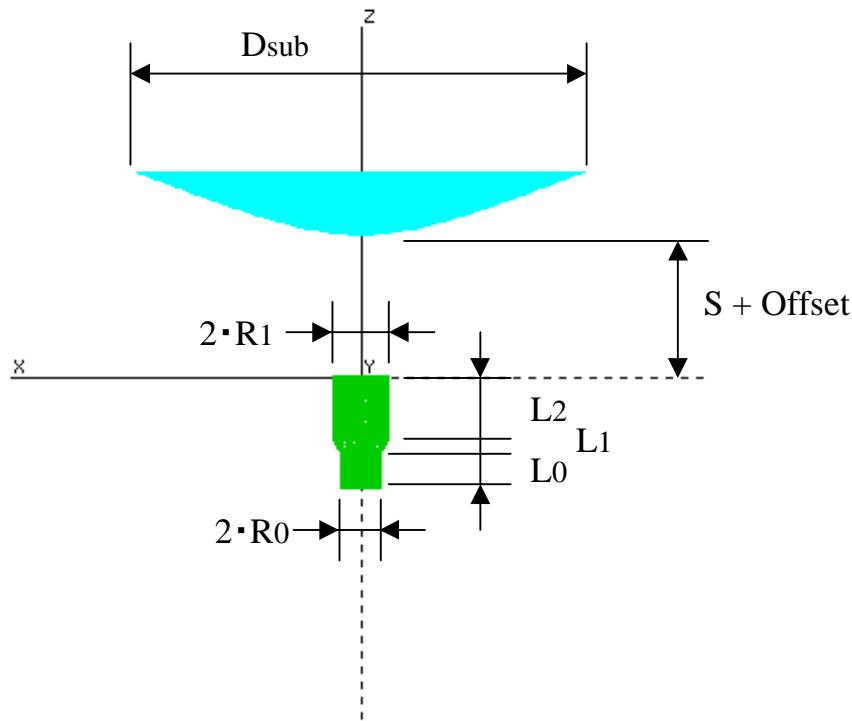


図-1 : フィード・ホーン・アンテナとサブリフレクタの関係

## 計算例

シミュレーションの結果を実測値と比較検討したいので、計算例として JA4BLC 又 賀 OM のカセグレン・アンテナの設計パラメータ [9] を借用する。如何なるフィード・アンテナが適しているのかを検討する目的から、 $F = 0.5$  タイプと  $F = 0.7$  タイプの二種類をシミュレーションする。周波数は 10.43 GHz とする。

フィード・アンテナである W2IMU ホーンの寸法パラメータは 表-1 のとおり。寸法パラメータの算出には W1GHZ のプログラム HDL\_ANT.exe を用いた。[10]

サブリフレクタは双曲面であり、そのパラメータ定義を 図-3 に示す。カセグレン・アンテナ総合での配置は、メインリフレクタの焦点とサブリフレクタの一方の焦点を一致させ、フィード・ホーン・アンテナの位相中心 ( Phase Center ) とサブリフレクタのもう一方の焦点を一致させる。サブリフレクタの寸法パラメータを 表-2 に示す。

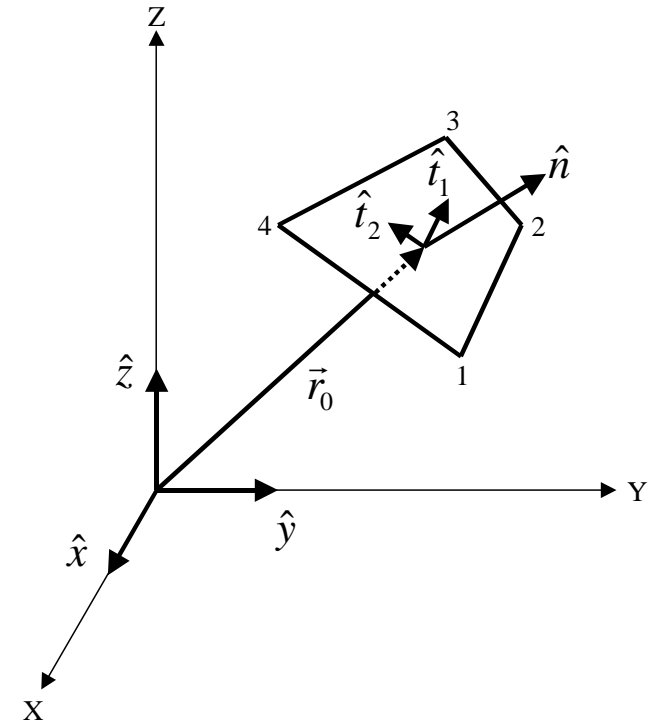


図-2 : Quadrilateral Surface Patch の表裏の定義

カセグレン・アンテナの設計としては「フィード・ホーン・アンテナの位相中心 ( Phase Center ) とサブリフレクタのもう一方の焦点を一致させる」訳であるが、「位相中心」も「焦点」も物理的な位置(寸法)が見える(実測できる)訳ではないので、アンテナを工作する際に実測可能な寸法へこれらを置換してシミュレーションのパラメータを設定した。すなわち、フィード・ホーン開口先端とサブリフレクタ頂点の相対位置関係を示すパラメータとして、図-1 に示す S + Offset を定義した。S は、サブリフレクタの焦点と頂点の間隔(設計値)である。そして、Offset はフィード・ホーン開口先端位置の調整量である。

## シミュレーション結果 - ホーン単体のラジエーション・パターン

まず、基本となるホーン単体のラジエーション・パターンを示す。図-4 は、F = 0.55 タイプの W2IMU ホーン、図-5 は F = 0.7 タイプの W2IMU ホーンのラジエーション・パターンである。

ここで F 値はプライム・フォーカスの場合の値であり、フィードがメイン・リフレクタを見込む角度は、F = 0.55 で 98 度、F = 0.7 で 79 度となる。ラジエーション・パターンからメイン・リフレクタ端でのイルミネーションは、それぞれ -9.8 dB と -9.0 dB である。

サブリフレクタの目的は、これらフィード・ホーンのラジエーションをメインリフレクタへの放射角度に合致するようにブロードに広げることである。

Dimension (mm)	Type : F = 0.55	Type : F = 0.7
R0	13.5	10.41
L0	23.6	23.6
R1	19.0	23.39
L1	9.53	22.48
L2	42.2	80.36

表-1 : W2IMU ホーン・アンテナの寸法パラメータ

## シミュレーション結果 - サブリフレクタからのラジエーション・パターン

次に、フィード・ホーンのラジエーションがサブリフレクタで如何に広がっているのかを示す。図-6 は F = 0.55 タイプ W2IMU ホーンとサブリフレクタの組み合わせ、図-7 は F = 0.7 タイプ W2IMU ホーンとサブリフレクタの組み合わせによるラジエーション・パターンである。図-8 と 図-9 に、図-6 と 図-7 の真数表示を示す。

いずれも、フィード・ホーン開口先端とサブリフレクタ頂点の相対位置関係を示すパラメータ S + Offset は 95.61mm であり、Offset が 0mm の場合を示している。すなわち、フィード・ホーン開口先端がサブリフレクタの焦点に合致している。

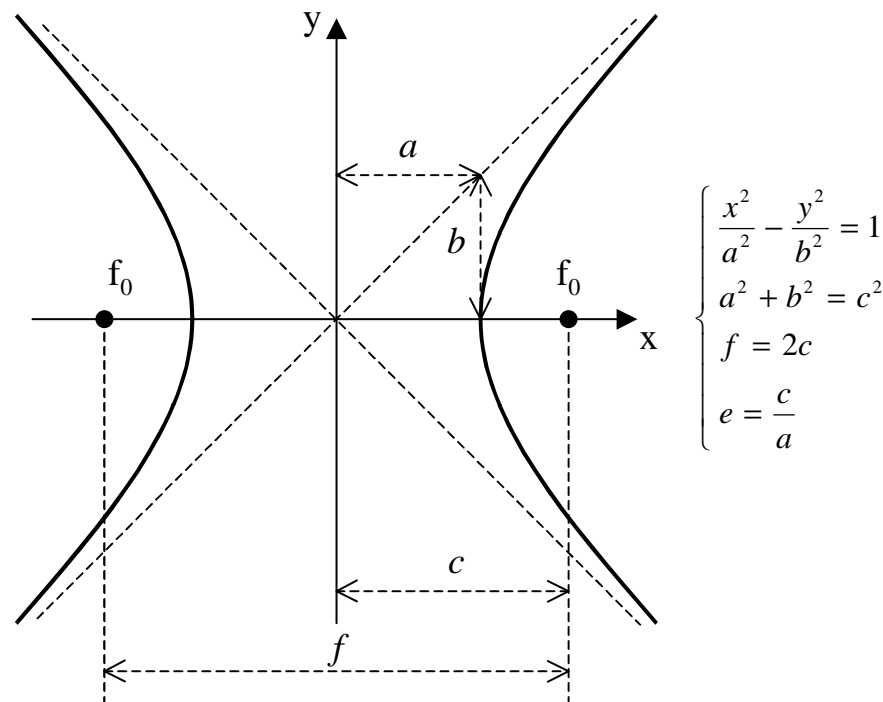


図-3 : 双曲面サブリフレクタの寸法パラメータの定義

## シミュレーション結果 - 間隔を変えた時のラジエーション・パターン

ホーン・アンテナ開口端とサブリフレクタ頂点の間隔を変えた時のラジエーション・パターンを示す。図-10 ~ 図-18 に  $F = 0.55$  タイプ、図-19 ~ 図-27 に  $F = 0.7$  タイプの場合を示す。

図においては、ホーン・アンテナ開口端とサブリフレクタ頂点の間隔を  $1/4$  波長毎に変えている。すなわち、Offset を  $-1$  波長から  $+1$  波長としている。Offset が負では間隔が狭く、正では間隔が広いことを示す。

カセグレン・アンテナの設計ではホーン・アンテナの位相中心をサブリフレクタの焦点におくことが求められる。しかし、W2IMU ホーンの位相中心が不明であるため、ホーン・アンテナの開口端とサブリフレクタ頂点の間隔を変えた時のラジエーション・パターンの変化から位相中心が焦点に合致する様子を捉えられないかと、シミュレーションを行なった。

## 考察

まず、照射テーパーについてホーン・アンテナ単体とサブリフレクタを比較する。次に、いわゆる「焦点合わせ」について、サブリフレクタからのラジエーション・パターンを考察する。

Sub-reflector Parameter	Dimension (mm)
$a$	26.825
$b$	63.339
$c$	68.785
Focal Length $f$	137.57
f0 to Vertex $S$	95.61
Diameter	300
Depth	41.96

表-2 : 双曲面サブリフレクタの寸法パラメータ

$F = 0.55$  と  $F = 0.7$  のプライム・フォーカスのパラボラ・アンテナにおいて、フィード・アンテナがメインリフレクタを見込む幾何学的な立体角(放射角度)は、それぞれ  $98$  度と  $79$  度である。図-4 と 図-5 に示すホーン・アンテナ単体のラジエーション・パターンから照射テーパーを読取ると、それぞれ  $-9.8$  dB と  $-9.0$  dB である。照射効率とスピルオーバーの観点から、照射テーパーは  $-10$  dB から  $-12$  dB 程度が適切といわれている。[11]

一方、図-6 と 図-7 に示すサブリフレクタからのラジエーション・パターンにおいて照射テーパーが  $-10$  dB の角度を読取ると、それぞれ  $176$  度と  $164$  度である。なお、サブリフレクタからのラジエーション・パターンにおいては、図の下側半分がメインリフレクタへの照射であり、上側半分はサブリフレクタから反射されずにサブリフレクタの後方へ漏れ出た(回折した)様子を示している。

サブリフレクタの目的は、フィード・ホーン・アンテナのラジエーションをメインリフレクタへの放射角度に合致するようにブロードにすることである。この観点から上記の放射角度を検証すると、 $F = 0.25$  のメインリフレクタに必要とする  $180$  度の放射角度に対して若干不足するものの、サブリフレクタが概ね良好にラジエーション・パターンを変換していることが見てとれる。

照射テーパーだけを見ると、 $F=0.55$  タイプのホーン・アンテナとサブリフレクタの組み合わせのほうが  $F=0.7$  タイプよりも良好にメインリフレクタを照射しているように思えるが、果たしていずれがフィード・アンテナとしてより良くマッチしているのだろうか？ 図-6 と 図-7 を比較すると、図-7 の  $F=0.7$  タイプのほうがメインリフレクタの中央部への照射が強く、サブリフレクタ後方への漏れが少ないことが読取れる。この違いを強調するために、図-8 と 図-9 に真数で表示してみた。違いは一目瞭然であるが、カセグレン・アンテナ総合としてゲインが高いのがいずれであるかは判断できない。カセグレン・アンテナ総合での特性評価が必要である。

上記の 図-6 ~ 図-9 は、ホーン・アンテナの開口端をサブリフレクタの焦点に合致させたもので、ホーン・アンテナの位相中心とサブリフレクタの焦点は合致していない。言わば、「焦点ボケ」の状態である。W2IMU ホーン・アンテナの位相中心はシミュレーションで計算していないので、ホーン・アンテナとサブリフレクタの相対位置を変えることで「焦点ボケ/焦点合わせ」の具合を、図-10 ~ 図-18 および 図-19 ~ 図-27 で検証する。これらの特性の違いを定量的に、例えば照射効率を用いて評価すべきであるが、フィード・アンテナ、サブリフレクタおよびメインリフレクタ間の全ての相互作用にカセグレン・アンテナ総合での特性が依存するので、その



一部のみを評価することにシミュレーションの過程で疑問を持ったため、ここでは定性的な検証にとどめる。

フィード・アンテナとサブリフレクタの関係において「焦点ボケ/焦点合わせ」を表現すると、照射効率を言い換えた「メインリフレクタへ強く照射し、サブリフレクタからの後方漏れを小さく」となるだろう。F = 0.55 タイプと F = 0.7 タイプのいずれにおいても、フィード・ホーンがサブリフレクタに近づく「メインリフレクタへの照射が強くなり」、かつ「サブリフレクタから後方への漏れが小さくなる」ことが見てとれる。さらに、その変化の具合に、周期的な強弱があるように見える。また、F = 0.55 タイプと F = 0.7 タイプを比較すると、F = 0.7 タイプのほうが、変化の具合が顕著である。

上記の定性的な観察から、W2IMU ホーン・アンテナの位相中心は開口端よりも内側にあると推定される。

## まとめ

パラボラ・アンテナの設計と評価について、シミュレーションをホーン・アンテナ単体からサブリフレクタへ一歩進めた。反射板のモデル生成と NEC2++ でのシミュレーション手法を確立することができた。ホーン・アンテナのラジエーションが、サブリフレクタにより広がる様子をラジエーション・パターンとして示した。しかし、ホーン・アンテナとサブリフレクタだけでは、カセグレン・アンテナ総合での設計と評価の指針とすることは難しいとの結論を得た。メインリフレクタを含めてのアンテナ総合でのシミュレーションはモデル規模が格段に大きくなるが、モデル生成とシミュレーションに、今回の経験と成果を生かせるものと期待する。

カセグレン・アンテナの設計パラメータと実測データを提供して頂き、さらに今回のシミュレーション結果について助言を頂いた JA4BLC 又賀 OM に深謝申し上げます。

／／  
☆

初版 : 2015年9月6日  
第二版 : 2015年9月12日 誤記訂正

## 参考文献

- [1] 武安義幸, 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,” 2014.  
[http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppPSO\\_1.pdf](http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppPSO_1.pdf)
- [2] Paul Wade, W1GHZ, “CASSEGRAIN ANTENNA DESIGN CALCULATOR,” 2004.  
[http://www.w1ghz.org/antbook/conf/Cassegrain\\_design.xls](http://www.w1ghz.org/antbook/conf/Cassegrain_design.xls)
- [3] Paul Wade, W1GHZ, “The W1GHZ Online Microwave Antenna Book – Chapter 6, Feeds for Parabolic Dish Antennas, Section 6.7 Other feeds,” 1998–1999.  
<http://www.w1ghz.org/antbook/chap6-7.pdf>
- [4] Diaz, Leo, and Thomas A. Milligan, “Antenna Engineering Using Physical Optics: Practical CAD Techniques and Software,” Artech House, Inc., 1996.
- [5] 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](http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppMKL_2.pdf)
- [6] Burke, B. J., and Poggio, A. J., “NUMERICAL ELECTROMAGNETICS CODE (NEC9 – METHOD OF MOMENTS, PART III: USER’S GUIDE,” 1981.
- [7] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ によるホーン・アンテナのシミュレーション,” 2011.  
<http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2pp3SecHorn.pdf>
- [8] Pieter-Tjerk de Boer, PA3FWM, “Xnecview – A program for visualizing NEC2 input and output data.”  
<http://wwwhome.cs.utwente.nl/~ptdeboer/ham/xnecview/>
- [9] 又賀義郎, JA4BLC, “カセグレン給電の実験その 1 (10GHz),” マイクロウェーブ プロGRESS レポート, 2012.  
[http://www.microwavemeeting.org/2012progressreport\\_web.pdf](http://www.microwavemeeting.org/2012progressreport_web.pdf)
- [10] Paul Wade, W1GHZ, “HDL\_ANT.exe,” 2003.

[http://www.w1ghz.org/software/hdl\\_3b4.zip](http://www.w1ghz.org/software/hdl_3b4.zip)

[11] Paul Wade, W1GHZ, "Multiple Reflector Dish Antennas," 2004.  
[http://www.w1ghz.org/antbook/conf/Multiple\\_reflector\\_antennas.pdf](http://www.w1ghz.org/antbook/conf/Multiple_reflector_antennas.pdf)

quit reload export none slice log total X Y Z

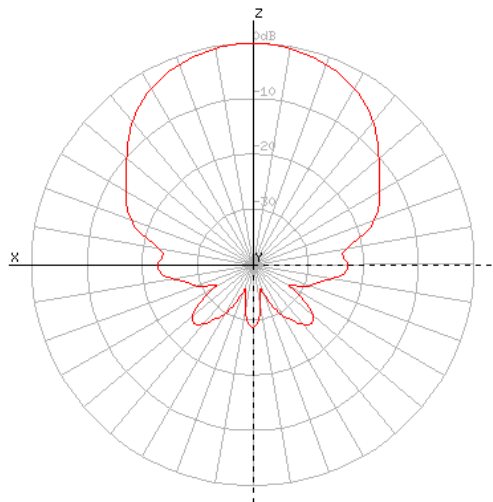


図-4 : F = 0.55 タイプ  
W2IMU ホーンのラジエーション・パターン

quit reload export none slice log total X Y Z

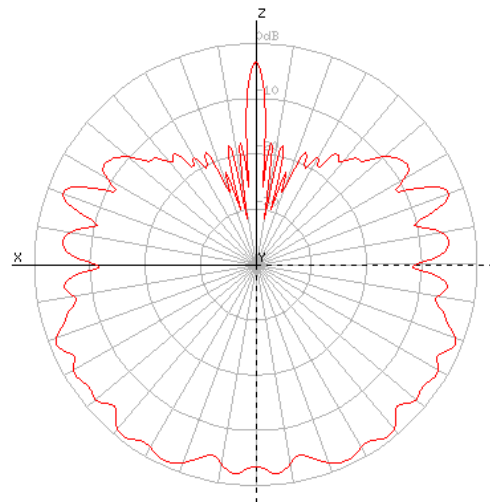


図-6 : サブリフレクタ  
からのラジエーション・パ  
ターン ( F = 0.55タイ  
プ)、S = 95.61 mm、  
Offset = 0 波長

f = 10450 MHz maxgain = 10.58 dBi vgain = -15.52 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

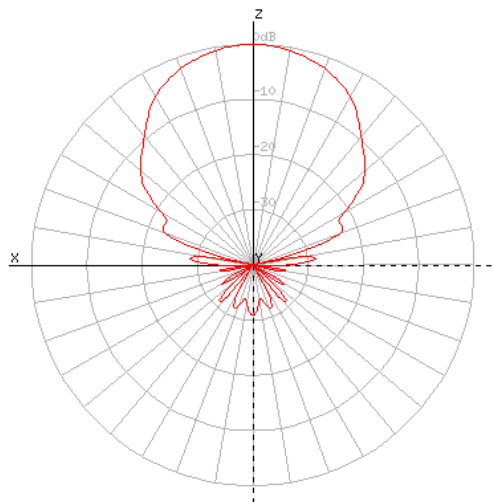


図-5 : F = 0.7 タイプ  
W2IMU ホーンのラジエー  
ション・パターン

f = 10450 MHz maxgain = 4.85 dBi vgain = -5.46 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

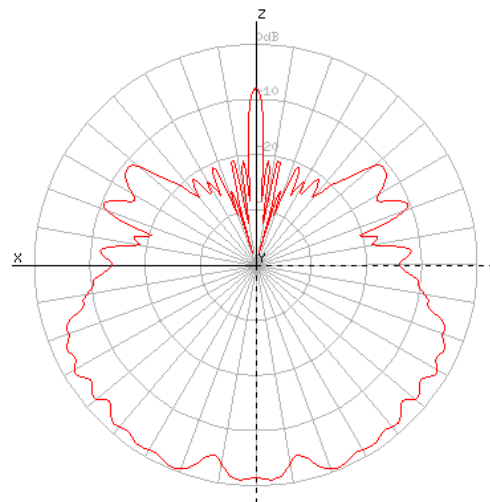


図-7 : サブリフレクタか  
らのラジエーション・パ  
ターン ( F = 0.7タイプ)、  
S = 95.61 mm、Offset = 0  
波長

f = 10450 MHz maxgain = 12.19 dBi vgain = -24.98 dBi

f = 10450 MHz maxgain = 5.86 dBi vgain = -9.15 dBi

quit reload export none slice lin.P total X Y Z

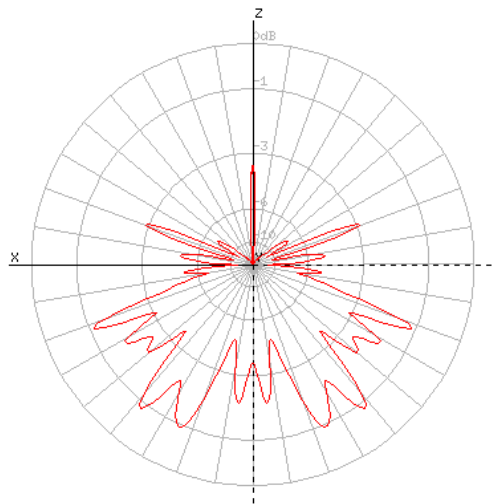


図-8 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
—真数表示

quit reload export none slice log total X Y Z

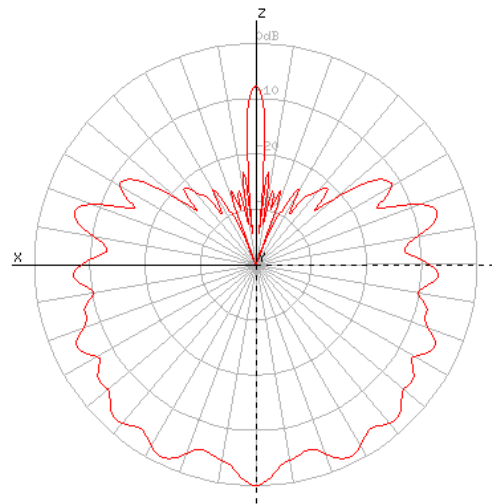


図-10 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
—Offset = -1 波長

f = 10450 MHz maxgain = 4.85 dBi vgain = -5.46 dBi  
quit reload export none slice lin.P total X Y Z

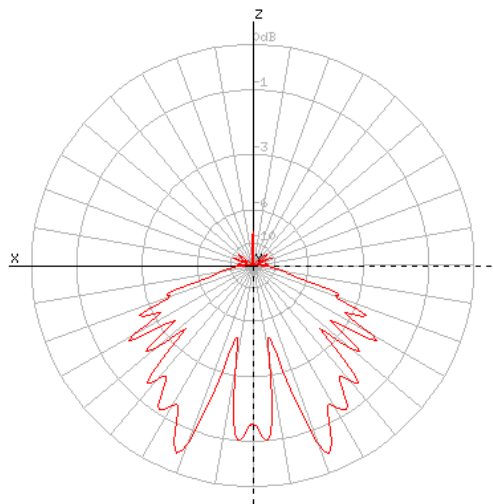


図-9 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
—真数表示

f = 10450 MHz maxgain = 6.54 dBi vgain = -1.48 dBi  
quit reload export none slice log total X Y Z

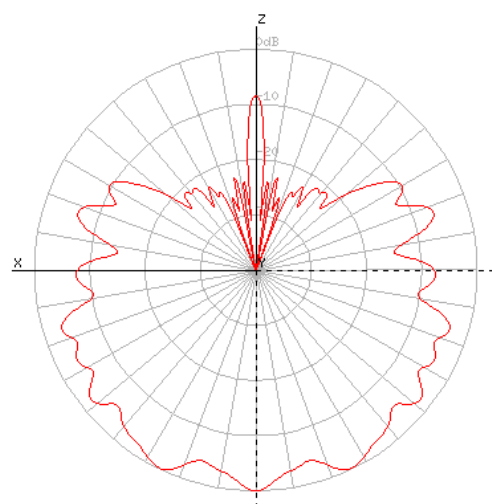


図-11 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
—Offset = -3/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.86 dBi vgain = -9.15 dBi

f = 10450 MHz maxgain = 6.32 dBi vgain = -5.88 dBi



quit reload export none slice log total X Y Z

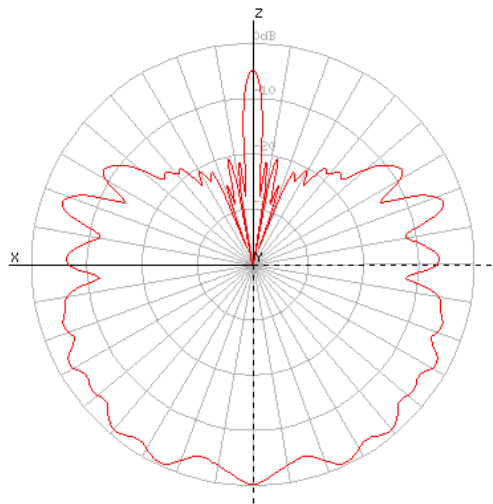


図-12 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = -2/4 波長

quit reload export none slice log total X Y Z

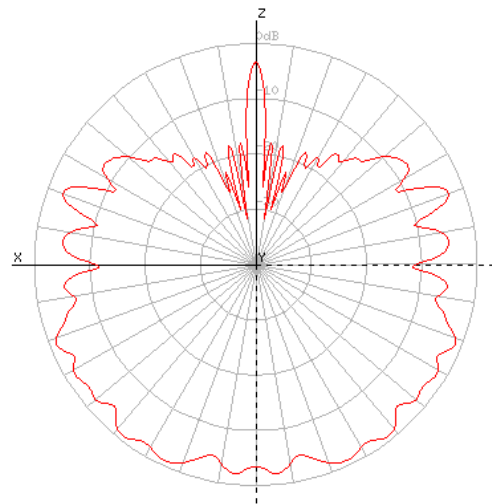


図-14 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = 0 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.12 dBi vgain = -7.31 dBi  
 quit reload export none slice log total X Y Z

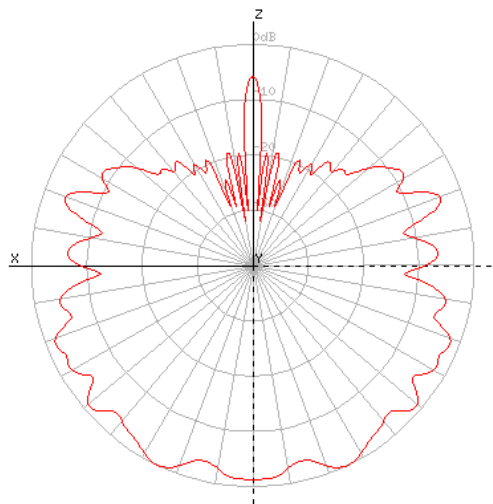


図-13 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = -1/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 4.85 dBi vgain = -5.46 dBi  
 quit reload export none slice log total X Y Z

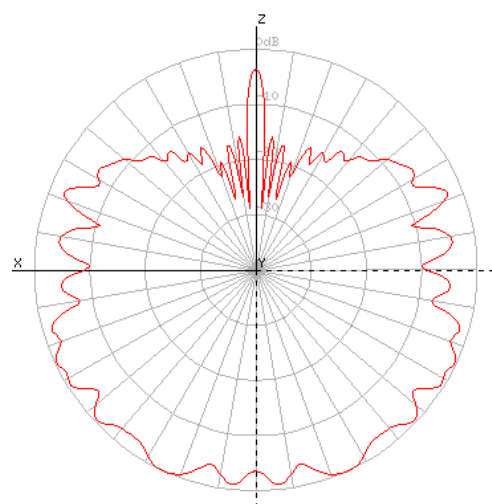


図-15 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = +1/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.47 dBi vgain = -9.5 dBi

f = 10450 MHz maxgain = 4.74 dBi vgain = -5.48 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

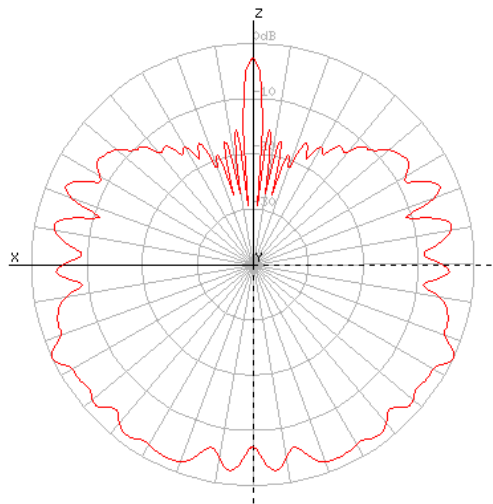


図-16 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = +2/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.11 dBi vgain = -5.1 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

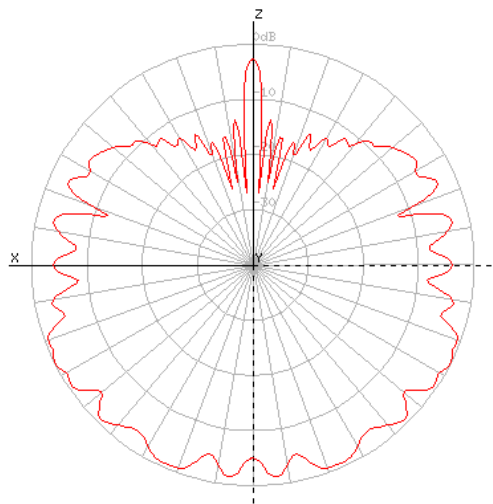


図-17 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = +3/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 4.91 dBi vgain = -10.58 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

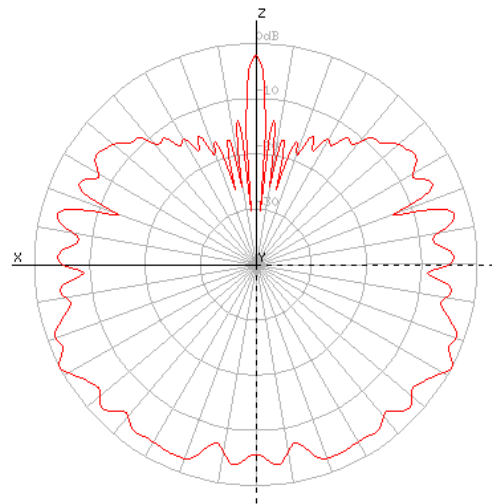


図-18 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.55タイプ )  
 -Offset = +1 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.48 dBi vgain = -15.79 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

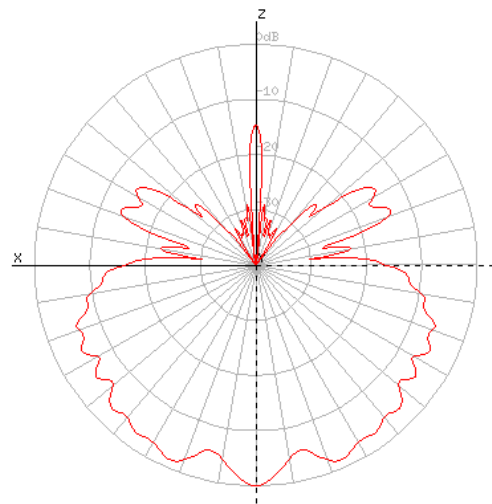


図-19 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = -1 波長

f = 10450 MHz maxgain = 7.86 dBi vgain = -4.88 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

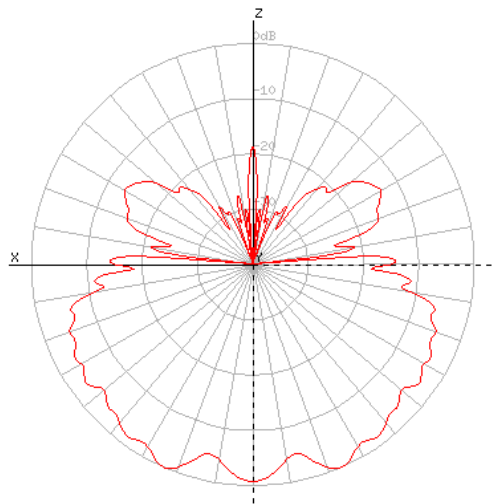


図-20 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = -3/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 7.22 dBi vgain = -10.93 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

quit reload export none slice log total X Y Z

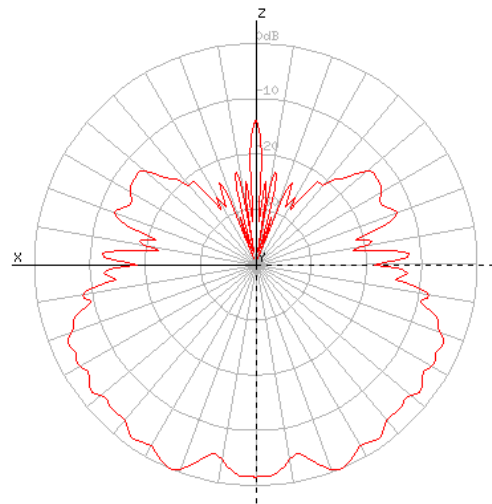


図-22 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = -1/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 6.81 dBi vgain = -12.38 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

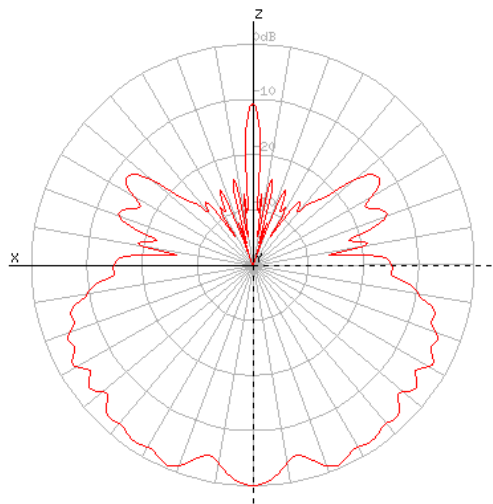


図-21 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = -2/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 6.56 dBi vgain = -6.33 dBi

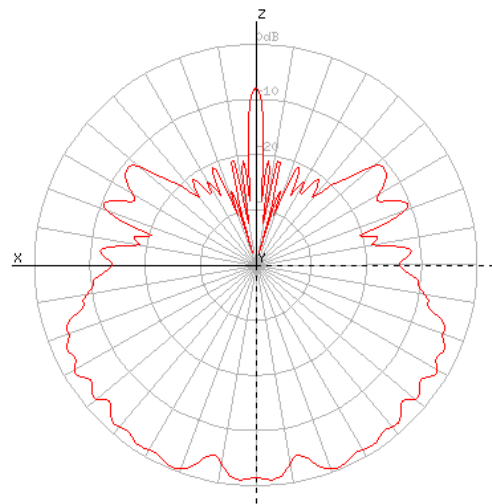


図-23 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = 0 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.86 dBi vgain = -9.15 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

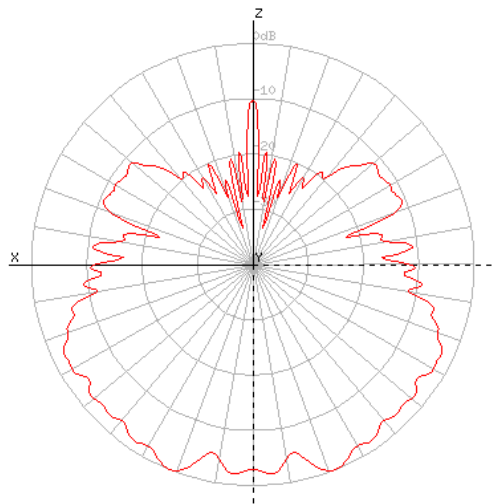


図-24 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = +1/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 6.38 dBi vgain = -10.58 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

quit reload export none slice log total X Y Z

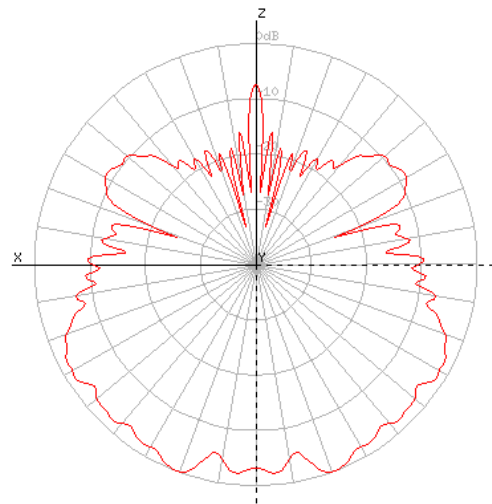


図-26 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = +3/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.94 dBi vgain = -11.5 dBi

quit reload export none slice log total X Y Z

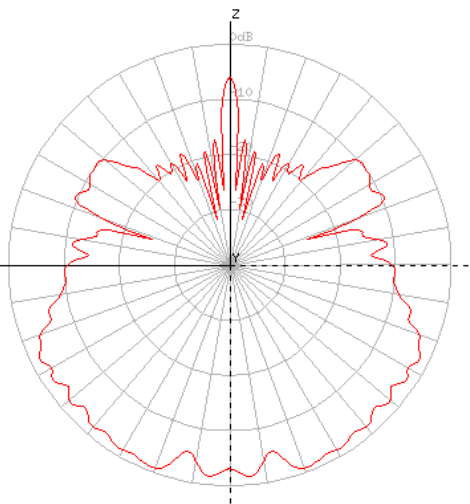


図-25 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = +2/4 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.73 dBi vgain = -7.13 dBi

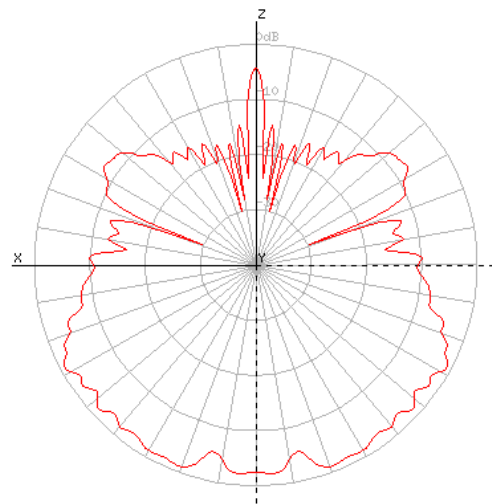


図-27 : サブリフレクタからのラジエーション・パターン ( F = 0.7タイプ )  
 -Offset = +1 波長

f = 10450 MHz maxgain = 5.49 dBi vgain = -11.2 dBi