

Simulation of Offset Reflector Antennas using NEC2++

Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

NEC2++ を用いたオフセット型反射アンテナのシミュレーション

武安義幸 / JA6XKQ

OpenSCAD を用いてオフセット型反射アンテナのモデルを容易に生成することが可能となったので [1]、NEC2++ でその特性をシミュレーションする。

はじめに

アマチュアにとっては大型な直径 100 波長の対称型カセグレン・アンテナのシミュレーションを行った。[2] 反射効率を考慮すると直径 15 波長程度のサブ・リフレクタを採用したいところであるが、サブ・リフレクタに起因する遮蔽損失とのせめぎ合いとなってくる。それでは、サブ・リフレクタによる遮蔽の無いオフセット型の特性をシミュレーションで確認してみたい。

オフセット型反射アンテナの設計手順

数値例とともに設計手順が示されている文献 [3] を参照する。設計パラメータの定義をカセグレン型については 図-1 と 図-2 に、グレゴリアン型については 図-3 と 図-4 にそれぞれ示す。

設計条件として下記のパラメータを仮定する。

- 1 メイン・リフレクタの直径 D は 100 波長で、-10 dB の照射テーパとする。
- 2 アンテナ全体の形状は、130 波長(高さ) × 100 波長(幅) × 100 波長(奥行き)とする。
- 3 メインとサブのリフレクタ間には少なくとも 10 波長の間隔 dc を設ける。
- 4 フィードからサブ・リフレクタ端を見込む角度 e は 12 度とする。

サブ・リフレクタの直径 V_s は、第 1 ~ 3 項の関係から、 $130 \cdot 100 \cdot 10 = 20$ 波長以下となる。反射板として機能するには 10 波長以上が必要なので、ここでは $V_s = 15$ 波長とする。また、第 2 項の奥行き仮定から、 $L = 95$ 波長とする。

ステップ -1: メイン・リフレクタのオフセット位置 do を求める。

$$d_o = \left(\frac{D}{2}\right) \frac{2d_c + D + V_s}{D + \sigma V_s} \dots(1)$$

ここで、 σ はカセグレン型では -1、グレゴリアン型では +1 とする。

ステップ 2: メイン・リフレクタの焦点距離 F を求める。

$$F = \frac{L + \sqrt{L^2 + \left(1 + \sigma \frac{V_s}{D}\right) \left\{ \left(d_o - \frac{D}{2}\right)^2 + \sigma \frac{V_s}{D} \left(d_o - \sigma \frac{D}{2}\right)^2 \right\}}}{2 \left(1 + \sigma \frac{V_s}{D}\right)} \dots(2)$$

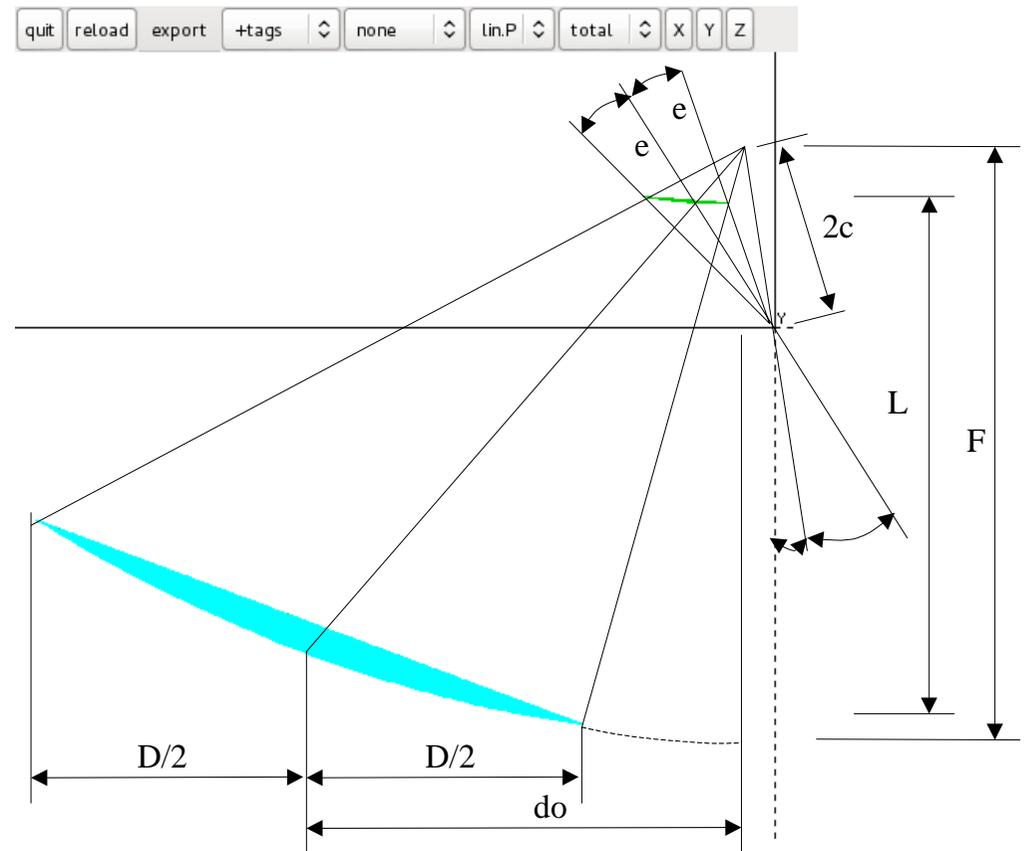


図-1 : 設計パラメータの定義 (Y 軸投影) - カセグレン型

ステップ 3: サブ・リフレクタのチルト角度 θ_e を求める。

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{8d_o F}{D^2} \tan^2\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \left[1 + \left(\frac{4F}{D}\right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{d_o}{2F}\right)^2 \right\} \tan^2\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \right] \dots(3)$$

ステップ 4: サブ・リフレクタの離心率 e を求める。

$$e = \frac{1 - \sigma \sqrt{\frac{\tan(\beta/2)}{\tan\left\{\frac{(\beta - \theta_o)/2\right\}}}}}{1 + \sigma \sqrt{\frac{\tan(\beta/2)}{\tan\left\{\frac{(\beta - \theta_o)/2\right\}}}}} \dots(4)$$

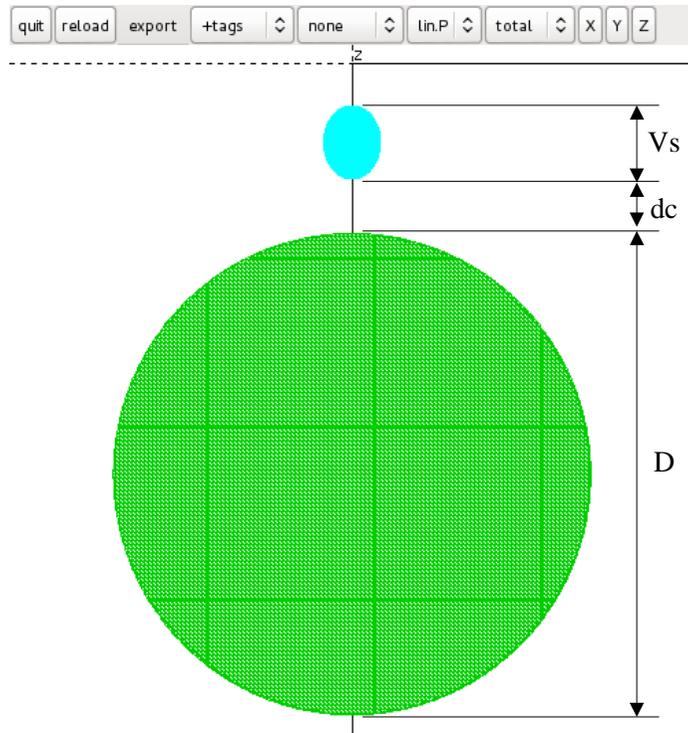


図-2 : 設計パラメータの定義 (Z 軸投影) - カセグレン型

カセグレン型では $e > 1$ の双曲面、グレゴリアン型では $0 < e < 1$ の楕円面となる。ここで、 θ_o は、メイン・リフレクタの母体であるパラボラの焦点からメイン・リフレクタの中心を見た角度で、次式で与えられる。

$$\theta_o = -2 \tan^{-1}\left(\frac{d_o}{2F}\right) \dots(5)$$

ステップ 5: サブ・リフレクタ面に対するフィードのチルト角度 θ_f を求める。

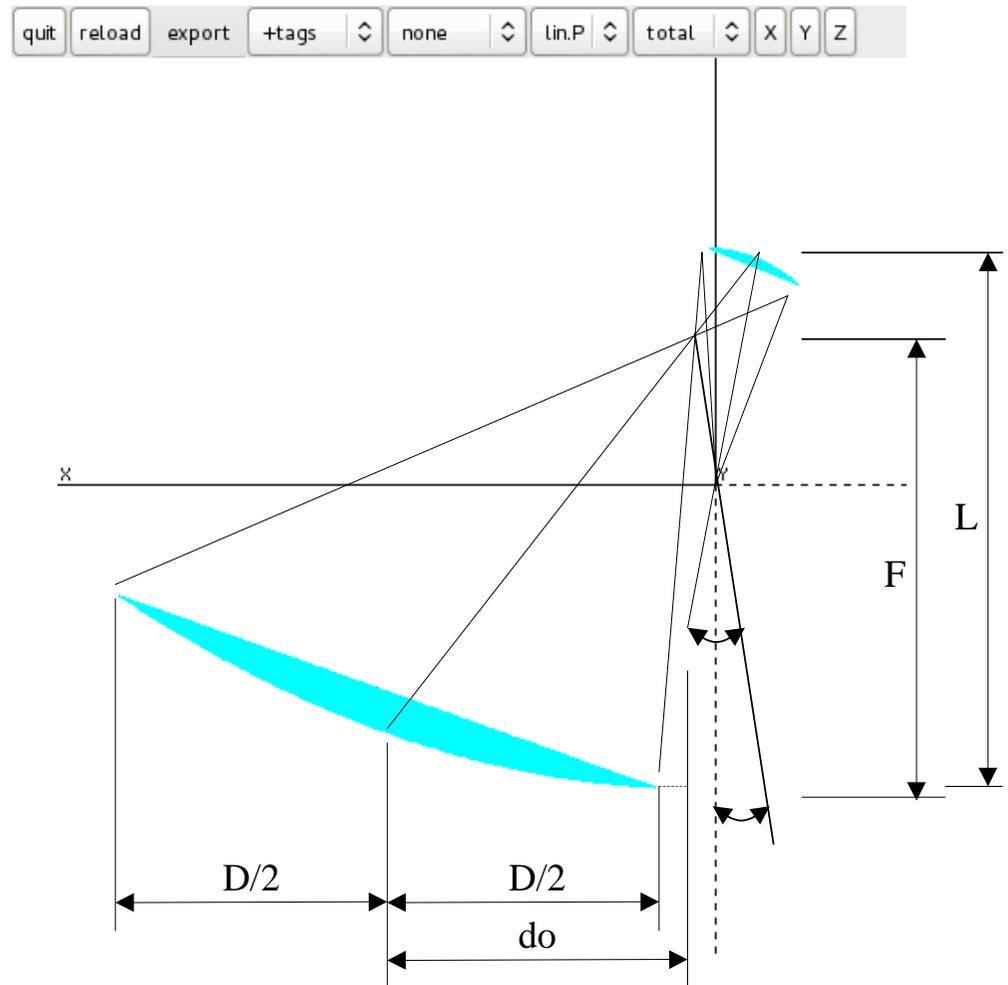


図-3 : 設計パラメータの定義 (Y 軸投影) - グレゴリアン型

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{e+1}{e-1} \right) \tan \left(\frac{\beta}{2} \right) \right\} \dots(6)$$

ステップ 6: サブ・リフレクタの焦点間距離 $2c$ を求める。

$$2c = \frac{-2\sigma e V_s}{(e^2 - 1) \left\{ \frac{\sin \theta_L}{e \cos(\theta_L - \beta) + 1} - \frac{\sin \theta_U}{e \cos(\theta_U - \beta) + 1} \right\}} \dots(7)$$

ここで、 θ_U と θ_L はメイン・リフレクタの母体であるパラボラの焦点からメイン・リフレクタの上端と下端を見た角度で、それぞれ次式で与えられる。

$$\theta_U = -2 \tan^{-1} \left(\frac{d_o + \frac{D}{2}}{2F} \right) \dots(8)$$

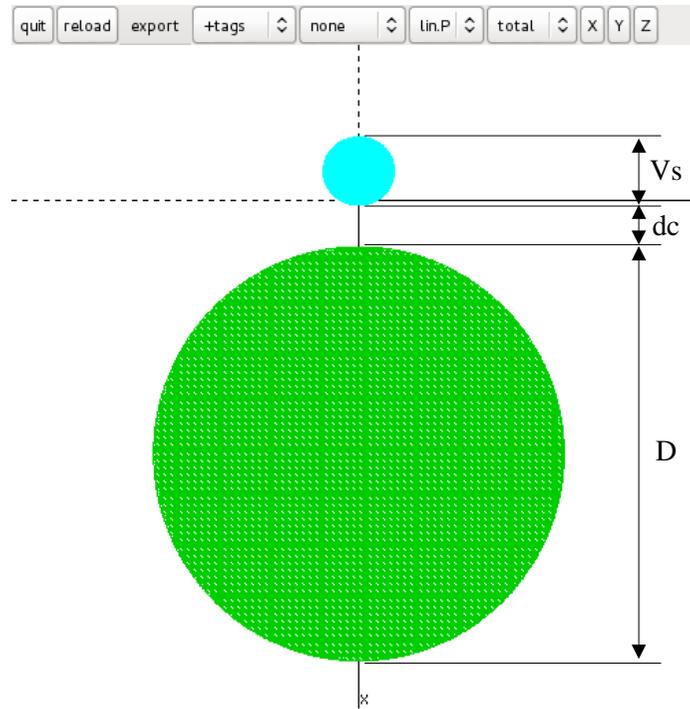


図-4 : 設計パラメータの定義 (Z軸投影) - グレゴリアン型

$$\theta_L = -2 \tan^{-1} \left(\frac{d_o - \frac{D}{2}}{2F} \right) \dots(9)$$

ステップ 7: フィードからサブ・リフレクタを見込んだ角度 e を求める。

$$\theta_e = -\sigma \left[2 \tan^{-1} \left\{ \left(\frac{1-e}{1+e} \right) \tan \left(\frac{\theta_U - \beta}{2} \right) \right\} - \alpha \right] \dots(10)$$

当初、 e を 12 度と仮定したが、ここまで求めた各パラメータから e が正確に求められる。

ステップ 8: メイン・リフレクタの母体であるパラボラの曲面を求める。

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4F} \dots(11)$$

ステップ 9: サブ・リフレクタの母体である双曲面(カセグレン型)、または、楕円面(グレゴリアン型)を求める。

双曲面(カセグレン型)

$$z = \sqrt{\left(\frac{b}{a} x \right)^2 + \left(\frac{b}{a} y \right)^2} + b^2 \dots(12)$$

楕円面(グレゴリアン型)

$$z = \sqrt{-\left(\frac{b}{a} x \right)^2 - \left(\frac{b}{a} y \right)^2} + b^2 \dots(15)$$

ここで、

$$a = \frac{c}{e} \dots(13)$$

$$b = \sqrt{c^2 - a^2} \dots(14)$$

オフセット型反射アンテナの設計パラメータ

前述のステップ 1 ~ ステップ 7 で求めた設計パラメータを表-1 にまとめる。

シミュレーション・モデル

表-1 に示す設計パラメータから生成したカセグレン型およびグレゴリアン型のシミュレーション・モデルを、図-5 と 図-6 にそれぞれ示す。モデルの生成には OpenSCAD を用いた。[1]

Parameter	Cassegrain	Gregorian
D	100	100
dc	10	10
Vs	15	15
do	79.41	58.70
	-1	+1
L	95	95
F	107.25	82.84
	10.11 deg	5.44 deg
o	40.63 deg	39.02 deg
e	2.52	0.49
	23.15 deg	-15.87 deg
u	62.21 deg	66.54 deg
L	15.62 deg	6.01 deg
c	16.86	13.39
e	11.89 deg	11.95 deg
a	6.69	27.25
b	15.48	30.37

表-1 : オフセット型反射アンテナの設計パラメータ

フィード・ホーン・アンテナには、設計パラメータに示すように、サブ・リフレクタを見込む約 12 度の角度で -10 dB の照射テーパとなる特性を必要とする。本来であれば、そのような特性のフィード・ホーン・アンテナを準備すべきであるが、オフセット型反射アンテナのシミュレーションをまずは試してみたいという目的から、特性に近い既存の “ 3 セクション・コニカル・ホーン ” [4] を用いる。 “ 3 セクション・コニカル・ホーン ” の照射テーパ特性は、約 13 度で -10 dB である。

図-5 および 図-6 に示すシミュレーション・モデルにおいて、サブ・リフレクタの焦点を座標原点としている。基本的には、フィード・ホーン・アンテナの位相中心 (Phase Center) をその座標原点 (サブ・リフレクタの焦点) に置く。しかし、図-5 および 図-6 では、総合でのゲインが最大となるようにフィード・ホーンを配置した様子を示している。結果として、フィード・ホーンの開口面が、座標原点よりもサブ・リフレクタに近づいたものとなっている。図-5 のカセグレン型で 120 mm、図-6 のグレゴリアン型で 75 mm 近づいている。

シミュレーション・モデルは、Surface Patch で構成されている。シミュレーション・モデルの

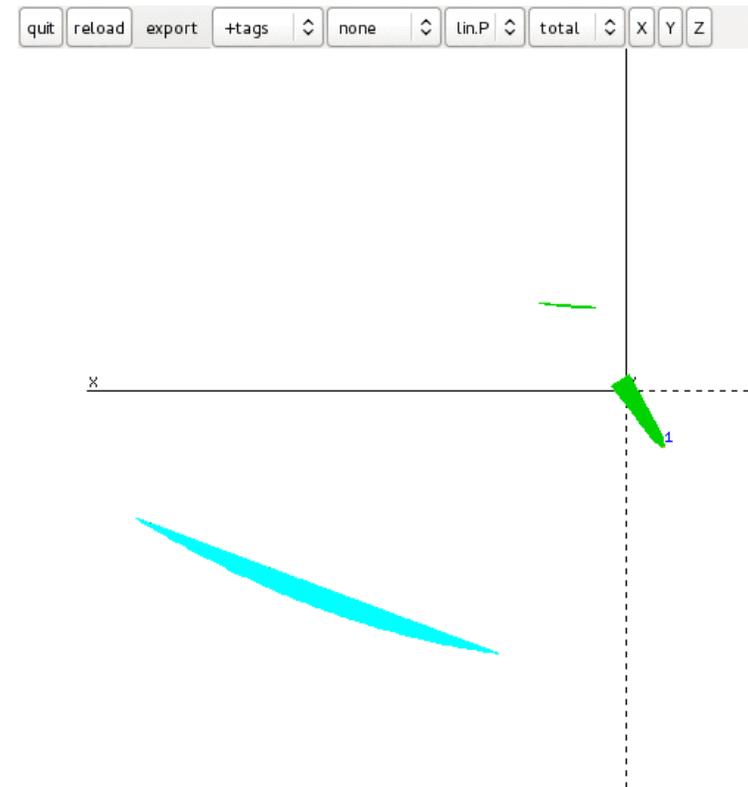


図-5 : オフセット型カセグレン・アンテナのモデル

構成要素を 表-2 にまとめる。表-2 において Number はパッチの概略数を示す。シミュレーション結果がパッチのサイズに依存することが解っているので、パッチのサイズはできるだけ小さくしてモデルのメッシュを細かく刻みたい。しかし、計算時間を短縮するために、PC の RAM メモリ (144 GB) 内に収まるようにパッチ総数 (パッチ・サイズ) を調整した。

シミュレーション結果

NEC++ でのシミュレーション結果を、図-7 ~ 図-10 に示す。シミュレーションの周波数は 10.45 GHz。

シミュレーションに要したメモリは約 130 GB で、計算時間は約 4 時間 20 分であった。

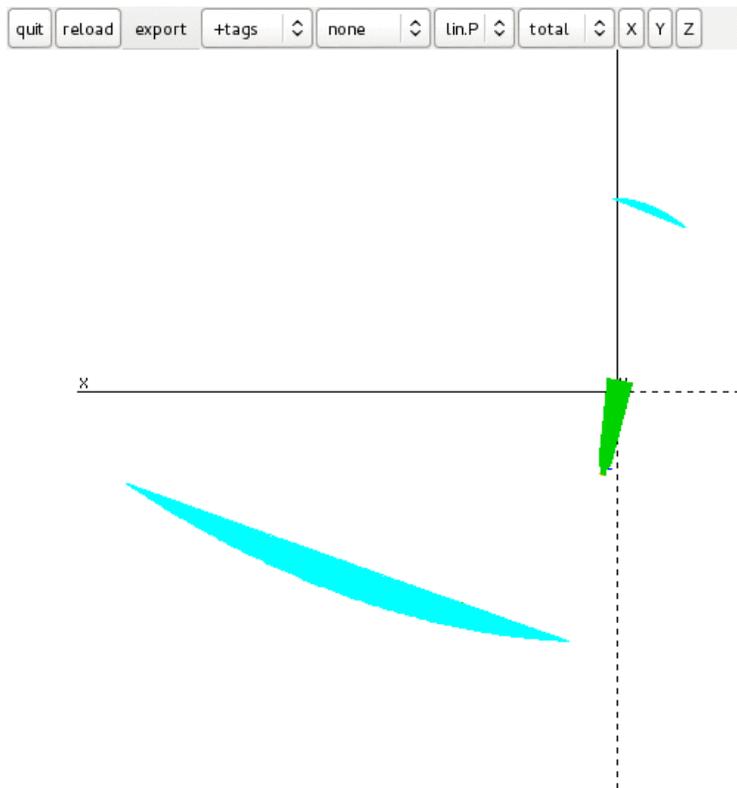


図-6 : オフセット型グレゴリアン・アンテナのモデル

考察

メイン・リフレクタの直径が 100 波長の場合、開口面積から推定されるゲインは約 48 dBi であり、シミュレーション結果のゲインは概ね妥当と判断される。また、輻射パターンにチルトがないことと、その形状から判断して、シミュレーション・モデルに致命的な間違いは無いようである。

対称型カセグレン・アンテナのシミュレーション結果 [2] とゲイン等の数値を直接比較するのは、シミュレーション・モデルでの Surface Patch の形状、サイズ、メッシュ数が相異なるので早計である。対称型カセグレン・アンテナについても OpenSCAD を用いてモデル生成してみると、オフセット型については Surface Patch のサイズとメッシュ数の影響を検証することが必要である。

オフセット型反射アンテナの設計パラメータには、“サブ・リフレクタ面に対するフィードのチルト角度”と“サブ・リフレクタのチルト角度”なるパラメータが存在する。これらは、プライム・フォーカスのオフセット型反射アンテナには存在しないパラメータである。これらのチルト角度は“水口の条件 (Mizuguchi Condition)”と呼ばれるもので、交差偏波を抑圧する手法である。[3] 交差偏波の発生具合については本シミュレーションでは検証していないので、今後の課題である。

本シミュレーションの所期の目的は“サブ・リフレクタの反射効率と遮蔽損失のせめぎ合いの検証”であった。しかし、本稿ではモデル生成の有効性を確認したのみで、ようやく検証の緒に就いたばかりである。

Sub System	Surface Patch	Cassegrain	Gregorian
Feed Horn	Shape	Quadrilateral	Quadrilateral
	Size	0.2	0.2
	Number	5,000	5,000
Sub Reflector	Shape	Triangular	Triangular
	Size	0.13	0.18
	Number	15,400	12,600
Main Reflector	Shape	Triangular	Triangular
	Size	0.82	0.79
	Number	22,900	24,600

表-2 : シミュレーション・モデルの構成要素

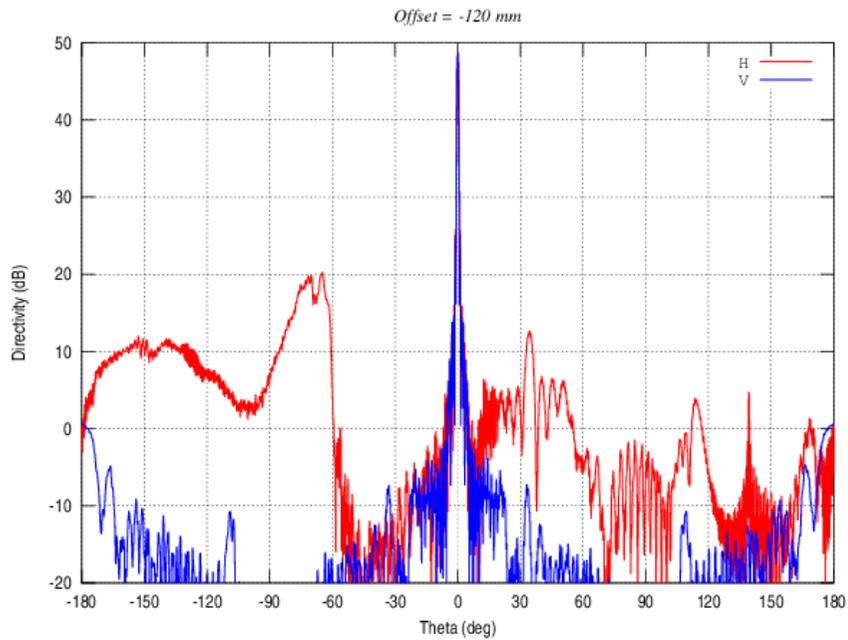


図-7 : オフセット型カセグレン・アンテナの輻射パターン (± 180 deg.)

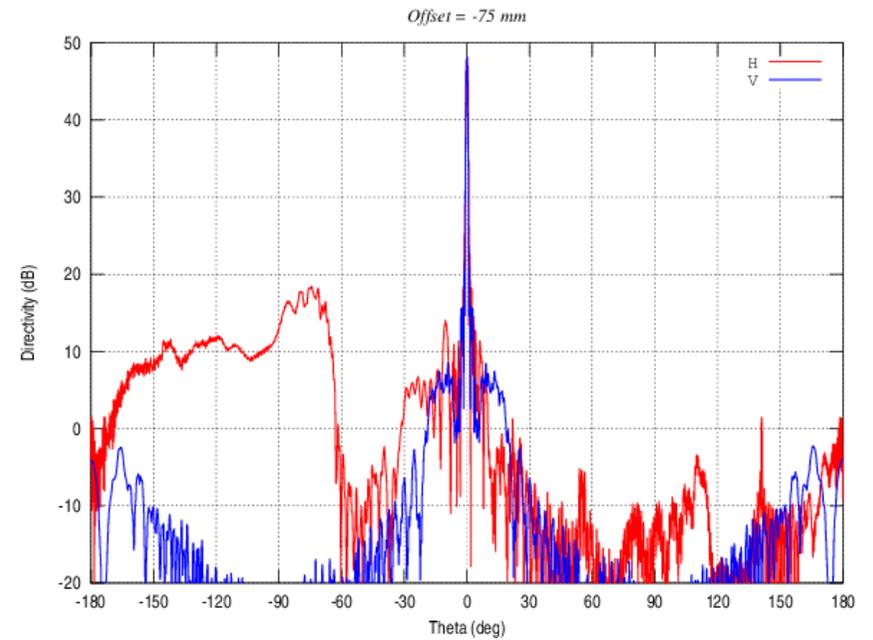


図-9 : オフセット型グレゴリアン・アンテナの輻射パターン (± 180 deg.)

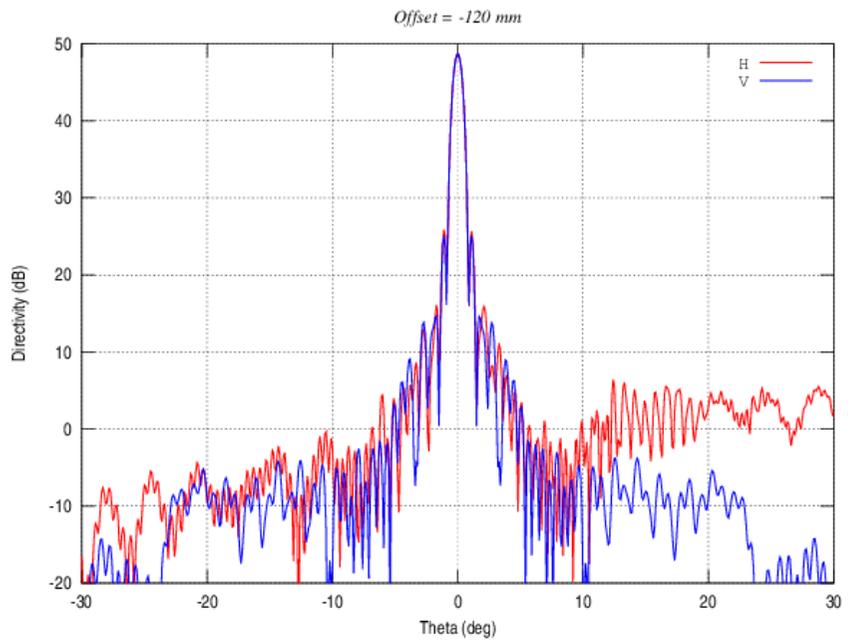


図-8 : オフセット型カセグレン・アンテナの輻射パターン (± 30 deg.)

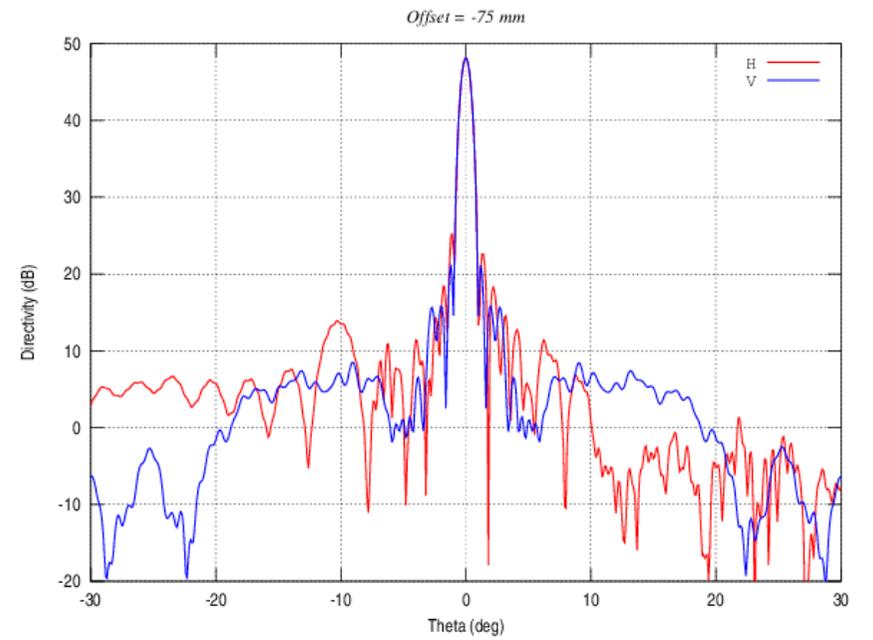


図-10 : オフセット型グレゴリアン・アンテナの輻射パターン (± 30 deg.)

まとめ

OpenSCAD を用いてオフセット型反射アンテナのモデルを容易に生成することが可能となったので、NEC2++ でその特性をシミュレーションした。生成したモデルの有効性を確認することができた。シミュレーションした特性の検証にはモデルのチューニングが課題である。

アマチュアにはサブ・リフレクタを持つオフセット型反射アンテナを製作することは容易ではない。サブ・リフレクタの無いプライム・フォーカスのオフセット型の実用例は多くあり、その最適化を行うにあたって、対称型とオフセット型のいずれをも含んで検証することは局所解に陥ることなく大局解に到達する解法だと考える。

//

参考文献

- [1] 武安義幸, JA6XKQ, “OpenSCAD による NEC2 モデル生成,” 2016.
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/OpenScad_Nec2_2.pdf
- [2] 武安義幸, JA6XKQ, “NEC2++ を用いたカセグレン・アンテナのシミュレーション,” 2015.
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Nec2ppMainRef_1.pdf
- [3] Zaw, Zaw Oo, E-P. Li, and L-W. Li. "Analysis and design on aperture antenna systems with large electrical size using multilevel fast multipole method." Journal of electromagnetic waves and applications 19.11 (2005): 1485-1500.
<http://ie-uestc.org/lwli/Publications/Journals/J-240.pdf>
- [4] 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>