

Simulation of a horn antenna using NEC2++ NEC2++ によるホーン・アンテナのシミュレーション 武安義幸 / JA6XKQ

EME や衛星通信などの宇宙通信では低雑音受信システムを必要とし、その性能改善は終りのない永遠のテーマであろう。性能改善を確実なものにするために、受信システムの構成要素ごとに特性を定性的かつ定量的に捉えることは論をまたない。機材に限りのあるアマチュアは、定量的に捉える手段（＝市販の測定器ではない）に苦心するところである。自然界のコールド・スカイを用いる手法 [1] やフリーウエアの利用は、アマチュアにはコスト、入手性、そしてパフォーマンスが非常に魅力的である。コールド・スカイを用いた等価雑音温度の校正については稿を改め、本稿ではフリーウエアである NEC2++ [2] によるホーン・アンテナの輻射パターンのシミュレーションについて報告する。

ホーン・アンテナ

コールド・スカイを用いた等価雑音温度の校正では、コールド・スカイ以外からの雑音、すなわち、主に大地雑音を避けるためにバックとサイド・ローブ特性が良好なアンテナを必要とする。そのようなアンテナとしてはホーン・アンテナが定番である。

アマチュアに馴染みのあるホーン・アンテナとして、通称 IMU ホーンと呼ばれる、W2IMU R. H. Turrin によるデュアル・モード・ホーンが有名である。[3] IMU ホーンをパラボラ・アンテナの一次フィードとした場合のアンテナ等価雑音をシミュレーションする際に、IMU ホーンの輻射パターンをシミュレーションした。[4] それによると、サイドとバック・ローブ特性は -20dB から -30dB 程度であり、大地雑音温度の影響が無視できないであろうと判断し、さらに輻射パターンが良好なホーン・アンテナの設計例を検索してみた。

輻射パターンが良好なホーン・アンテナには、コルゲート・ホーン、多段コニカル・ホーンなどがある。[5] コルゲード・ホーンは、ホーン内面に溝（コルゲート）を設けたもので、その良好な特性はひじょうに魅力的であるが、工作の複雑さはアマチュアでは賄えない。一方、多段コニカル・ホーンは、ホーンの円錐（コニカル）を多段にしたもので、形状が大型になるものの、工作は容易である。多段コニカル・ホーンで最もシンプルかつ高性能なものとして P. D. Potter による通称ポッター・ホーンがある。[6] ポッター・ホーンの使用例は文献 [1] に見られる。本稿では多段コニカル・ホーンの例として、文献 [7] に示されている 3 セクション・コニカル・ホーンを、周波数でスケール変換して特性をシミュレーションした。

輻射パターンを求めるだけなら、アンテナ特性の周波数相似の原理を適用すれば、すなわち中心周波数で正規化すればスケール変換する必要はない。しかし、製作にあたっての実寸法との関係を明らかにする目的から、スケール変換してのシミュレーションとする。

なお、ホーン・アンテナの設計手法自体には本稿では言及しない。文献 [5] が参考となる。

3 セクション・コニカル・ホーン

文献 [7] に示されている 3 セクション・コニカル・ホーンの寸法定義を 図-1 に示す。表-1 は、文献におけるオリジナルの実寸法であり、設計中心周波数は 230 GHz である。

本稿では、設計中心周波数を 12.5 GHz とする。アマチュア無線の周波数帯ではないが、一連の実験で使用する LNA として、Ku 帯（ $12.25\text{ GHz} \sim 12.75\text{ GHz}$ ）の市販品を流用するためである。

230 GHz で定義された 表-1 の寸法を 12.5 GHz にスケール変換するには、単純には $230/12.5$ 倍すれば良い。しかし、ホーン末端の入力部半径 R_0 は、Ku 帯の標準方形導波管 WR-75 から円形導波管に変換するので、方

形/円形変換アダプタの寸法に合致させるのが合理的である。

方形/円形変換アダプタの設計方式には種々あるようだが、ここでは構造が単純で自作も可能な文献 [8] に従った。設計の詳細は文献 [8] を参照し、ここでは計算結果の $R_0 = 11.165 \text{ mm}$ を用いる。ちなみに、入力部半径 R_0 は、230/12.5 倍の周波数比での単純計算では 11.408 mm となる。

230 GHz で定義された 表-1 の寸法を 12.5 GHz に変換するにあたっては、上記の入力部半径 R_0 を基準とした倍率、すなわち、 $11.165/0.62$ 倍で各部の寸法を拡大する。12.5 GHz での寸法を 表-2 に示す。

NEC2++ シミュレータ

IMU ホーンの輻射パターンをシミュレーションした際には、シミュレータとして NEC2DX を用いた。[4] IMU ホーンの計算モデルは 500 セグメント以下なので、5,000 セグメントまで計算可能な nec2dx5000 プログラムを使用した。本稿の 3 セクション・コニカル・ホーンは IMU ホーンと比較して、長さが約 12 倍、開口部直径が約 4.4 倍である。長さの比による単純計算だけでも、3 セクション・コニカル・ホーンの計算モデルは 5,000 セグメントを越

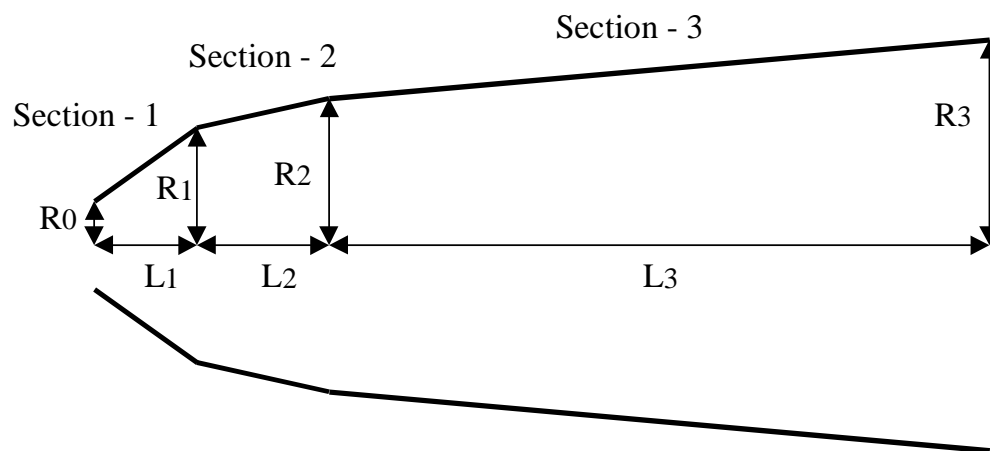


図-1 : 3 セクション・コニカル・ホーンの断面と寸法定義

えることは明白であり、nec2dx5000 では計算不可能である。

そこで、計算モデルのセグメント数に事実上の制限のない(制限はコンピュータの実装メモリ容量) NEC2++ [2] をシミュレータとして用いることにした。

NEC2++ は、FORTRAN 言語で開発されたオリジナルの NEC2 から C 言語へ移植した NEC2C [9] を、更に C++ 言語へ移植したものである。C++ 言語の特長を生かして、計算モデルのセグメント数の制限を取り払っている。また、数値演算ライブラリの LAPACK を採用して計算速度を向上させているのも特長である。計算時間は計算モデルのセグメント数に対して指数関数的に増大するので、本稿のような計算モデルでは重要な特長である。

設計を参照した文献 [7] では、シミュレーションに解析的解法を採用することで、計算モデル規模と計算時間の問題を回避している。しかし、解析的解法では製作で生じる寸法誤差、例えばホーン断面が真円とならない等を評価することが不可能なので、NEC2 と同様に計算モデルをセグメントに細分化して計算を行なう市販プログラムの HFSS を用いて、寸法誤差による特性変化を評価している。そこでは、12 GB のメモリを必要としたとあるので、

	表-1 (@ 230 GHz)	表-2 (@ 12.5 GHz)
寸法パラメータ	長さ (mm)	長さ (mm)
R0	0.62	11.165
R1	1.486	26.760
R2	1.812	32.630
R3	3.652	65.765
L1	1.479	26.634
L2	1.212	21.826
L3	24.0	432.194

表-1 / 表-2 : 3 セクション・コニカル・ホーンの寸法

NEC2C++ でも同程度のメモリを必要と考えてコンピュータを準備した。

コンピュータの仕様は以下のとおり。

CPU	:	Intel (R) Core (TM) 2 Duo E8500 3.16 GHz
メモリ	:	16 GB
OS	:	Debian 6.0.2 Squeeze

NEC2++ の最新バージョン 1.5.0 をコンパイルするには、最新バージョンのコンパイラ gcc と g++ を必要とするので、OS も最新バージョンとすることでプログラム開発環境整備で生じる付随的な問題(バージョン間の依存問題)を回避した。

NEC2++ のバグ

NEC2++ でシミュレーションを始めてみると、Surface Patch で記述された計算モデル [4] [10] を処理できないというバグがあることが判明した。nec2dx5000 では処理可能な計算モデルが NEC2++ では処理できないので、固有のバグと判断した。バグ・レポートを検索してみたが、既知ではないようである。オリジナルまで遡って、NEC2、NEC2C、そして NEC2++ のソースコードを調べたところ、NEC2C への移植の段階で、計算モデルを記述した入力ファイルの構文解釈にバグを生じていることが確認できた。NEC2 系プログラムの使用者の多くは、線状アンテナや Wire Segment で記述された面モデルを用いているようで、Surface Patch の使用が少ないためにバグが顕在化していないように思われる。そもそも、計算モデルを Surface Patch で記述するのが閉じた面に限定されることや、Patch は完全導体に限定される(導電率を指定できない)等の制約があることから [10]、Surface Patch の使用が好まれないようでもある。

バグの修整は、計算モデルを記述した入力ファイルを解釈する c_geometry.cpp において、Surface Patch を示す SP に続く SC を判定するフラグの立

て方を間違えて GH としているので、それを SC と正す。

NEC2 では Surface Patch の形状として、任意形状、長方形、三角形、そして四辺形が指定可能である。しかし、NEC2++ では、四辺形以外ではエラーを生じて処理が中断してしまった。上記の SP/SC 判定に関連するバグ以外にもバグが潜在しているようである。

目的とする計算モデルは、Surface Patch の四辺形を用いることで一応の計算結果を得られるので、SP/SC 判定に関するバグ以外は深く検討していない。

モデル・ジェネレータ

図-1 に示すホーン寸法パラメータ (R0、R1、R2、R3、L1、L2、L3) を指定すると、Surface Patch を用いて計算モデルを自動的に生成するプログラム(モデル・ジェネレータ)を作成した。

Surface Patch の大きさ、すなわち、計算モデルを如何に細かくセグメントに分割するかが理論値からの計算誤差となるため、モデル・ジェネレータではセグメントの細かさを指定できるようにした。セグメントの細かさは波長を単位として、例えば「1/5 波長」という具合に指定した。このセグメントの細かさは、ホーン先端での円周方向での長さを基準としている。モデルの記述は、ホーンの円周方向を放射状に分割しているため、ホーン先端よりも直径の小さい末端部分では、セグメントはホーン先端よりも更に細かいものとなる。ホーンモデルの記述については、円周方向に放射状に分割する(セグメント・サイズが先端と末端で異なる)か、あるいは、ホーン先端と末端でセグメント・サイズを同一として分割数を調整するかの二つの方法がある。今回は、モデル・ジェネレータのプログラムが簡単である前者とした。しかし、モデルのセグメント総数が増えるという欠点があるので、再考すべきであろう。

NEC2 のマニュアル [10] によると、Surface Patch でモデルを記述する際には、一平方波長あたり少なくとも 25 の Surface Patch を用いるべきとある。

したがって、Surface Patch の一辺の長さを 1/5 波長以下で変えて、計算結果に与えるセグメントの細かさの影響を確認した。

Surface Patch で記述したモデル形状を、ビューワーである Xnecview [11] で確認している様子を 図-2 に示す。このビューワーはモデル・サイズに対する制限がないので、今回のような大規模モデルには重宝するツールである。

シミュレーションして判明したことであるが、NEC2++ へのインプット・ファイルにおいてモデルをホーン末端から記述した場合、正しい輻射パターンの計算結果が得られなかった。一方、モデルをホーン先端の開放側から記述すると正しい結果が得られた。両者においては、座標系の定義はホーン末端を $(x, y, z = 0, 0, 0)$ とした同一定義である。NEC2 での Surface Patch の

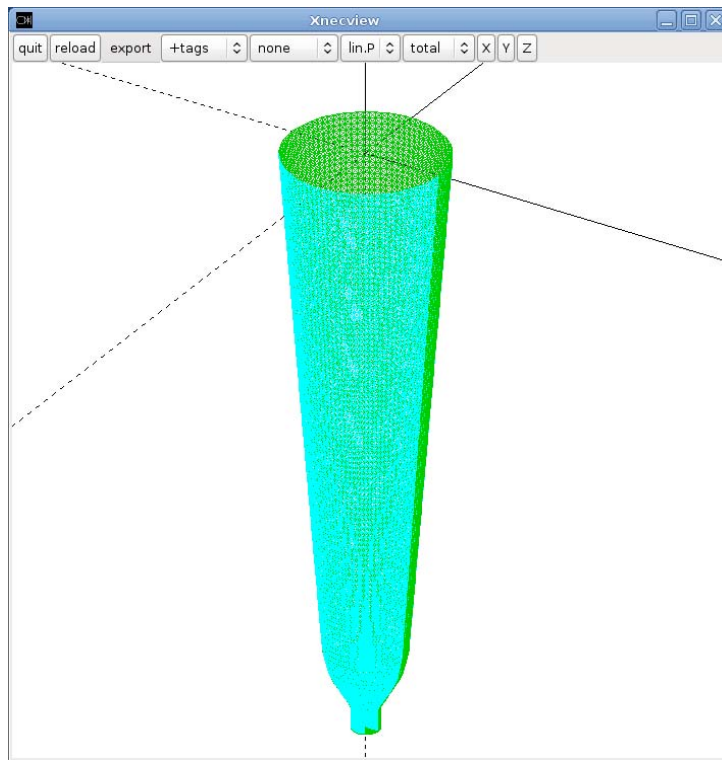


図-2 : Xnecview によるモデルの表示

定義によるものであろうと推定するが、両者で相異なる正確な理由は追求していない。

輻射パターンのシミュレーション結果

表-2 に寸法を示す 3 セクション・コニカル・ホーンの輻射パターンのシミュレーション結果を 図-3 および 図-4.1 ~ 図-4.3 に示す。

図-3 は周波数が 12.5 GHz で、セグメント・サイズを 1/4 波長から 1/7 波長まで変えて、セグメント・サイズがシミュレーションに与える影響を確認した。

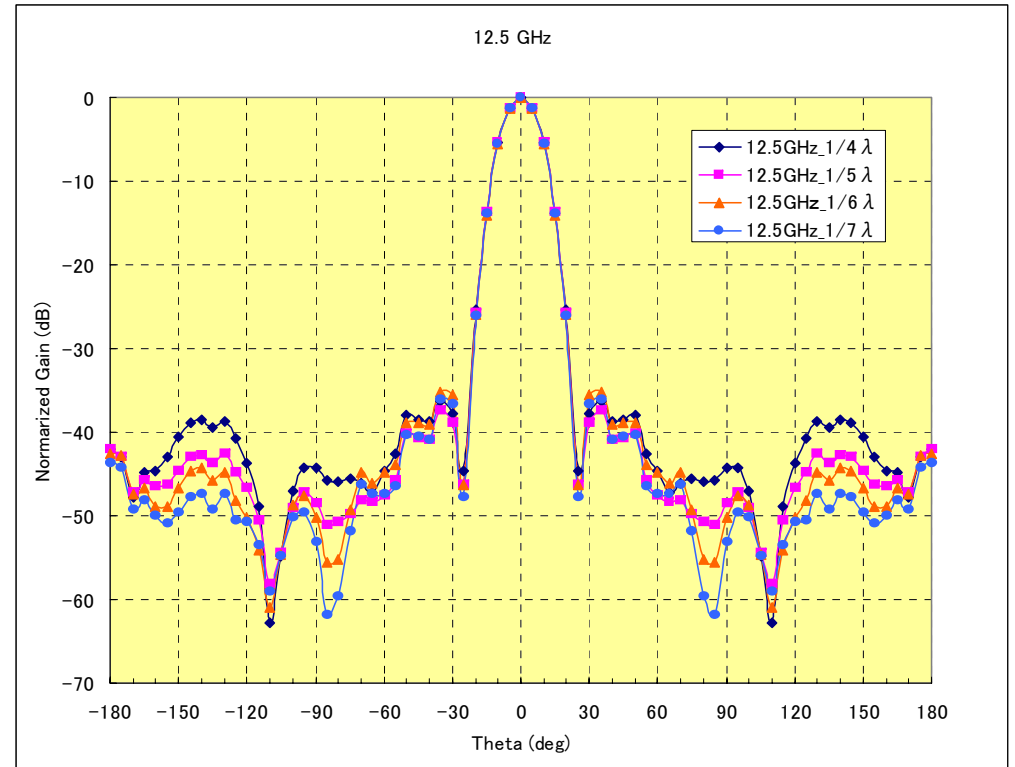


図-3 : 12.5 GHz での輻射パターン

図-4.1 ~ 図-4.3 はセグメント・サイズが $1/6$ 波長で、周波数を 11.4 GHz、12.5 GHz および 13.6 GHz と変えて、輻射パターンの周波数特性をシミュレーションした。各周波数は、文献 [7] での 210 GHz、230 GHz および 250 GHz に対応する。図-4.1 ~ 図-4.3 においては、16 GB のオン・メモリで計算できる上限の $1/6$ 波長にセグメント・サイズを限定した。

考察

セグメント・サイズがシミュレーションに与える影響を確認した 図-3 では、メイン・ローブの特性にはその影響が小さいことが解る。また、バック・ローブにもその影響は小さい。一方、サイド・ローブはセグメント・サイズで変化してい

る。NEC2 のマニュアル [10] によると、セグメント・サイズ、すなわち Surface Patch の一辺の長さを $1/5$ 波長以下にすべきとあるが、対象モデルと計算目的に応じて更に細かいセグメント・サイズを必要とすることが 図-3 から見てとれる。

今回のシミュレーション目的は、ホーン・アンテナのバックとサイド・ローブの輻射パターンが小さいことを確認することである。図-3 によれば、それらの輻射パターンがおおよそ -40 dB 以下と十分に低レベルであることを確認できているので、 $1/5$ から $1/6$ 波長のセグメント・サイズでも所期の目的は達成している。

ホーン・アンテナをパラボラ・アンテナのフィードとして用いる場合、パラボラ・

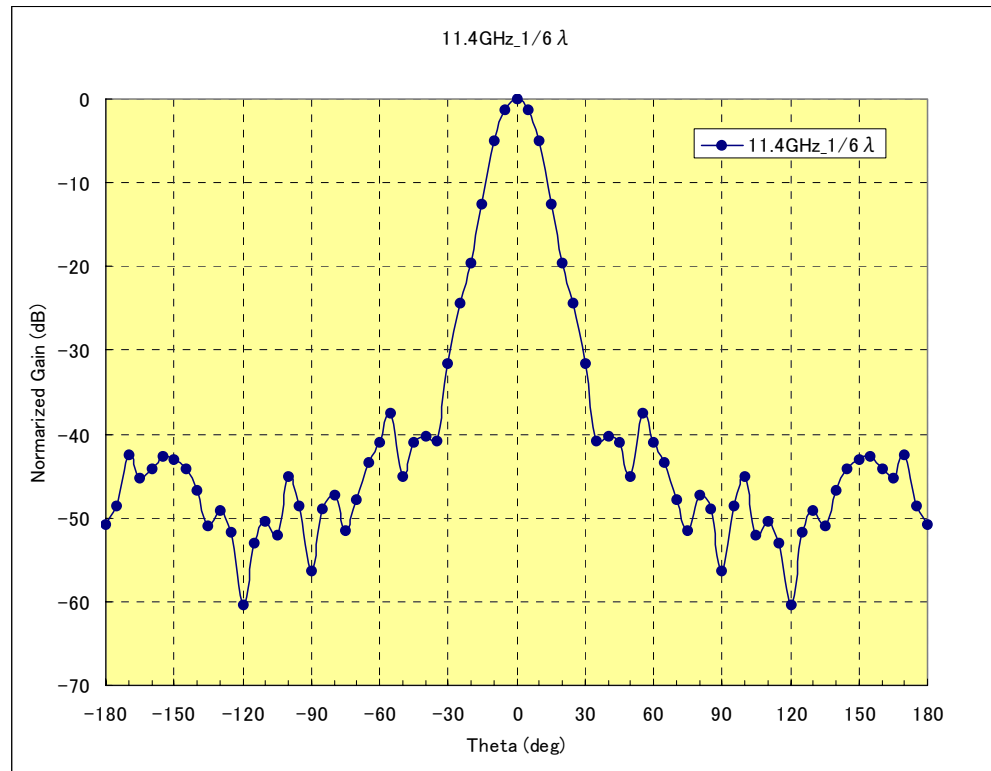


図-4.1 : 11.4 GHz での輻射パターン

(C) 2011, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

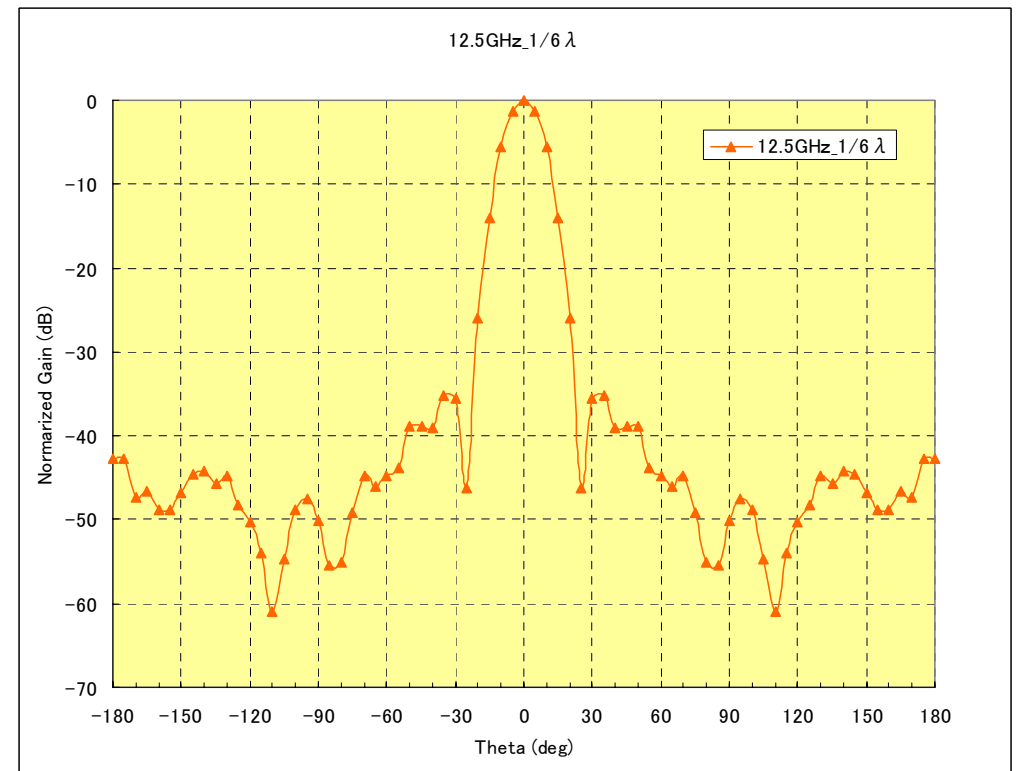


図-4.2 : 12.5 GHz での輻射パターン

(C) 2011, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

アンテナの設計パラメータに応じてフィードのメイン・ローブ電力半値角と $-10 \sim -14$ dB 角を設定し、それに合致するホーン・アンテナを設計する。その設計に NEC2++ を用いる際には、図-3 から判断して、1/5 波長のセグメント・サイズでホーン・アンテナの設計パラメータ ($R0 \sim R3$, $L1 \sim L3$) の初期探索を行なうことが、計算時間短縮と計算精度の観点から有効であると判断される。初期探索で設計パラメータを確定し、その後にセグメント・サイズを細かくして計算精度を上げれば良い。

NEC2 によるホーン・アンテナのシミュレーションにおいて、セグメント・サイズの大小がサイドおよびバック・ローブの計算に与える影響は、文献 [3] で指摘されている。今回のシミュレーションでも、その指摘を確認できた。

図-5 は、文献 [7] に示されている輻射パターンのシミュレーションと実測

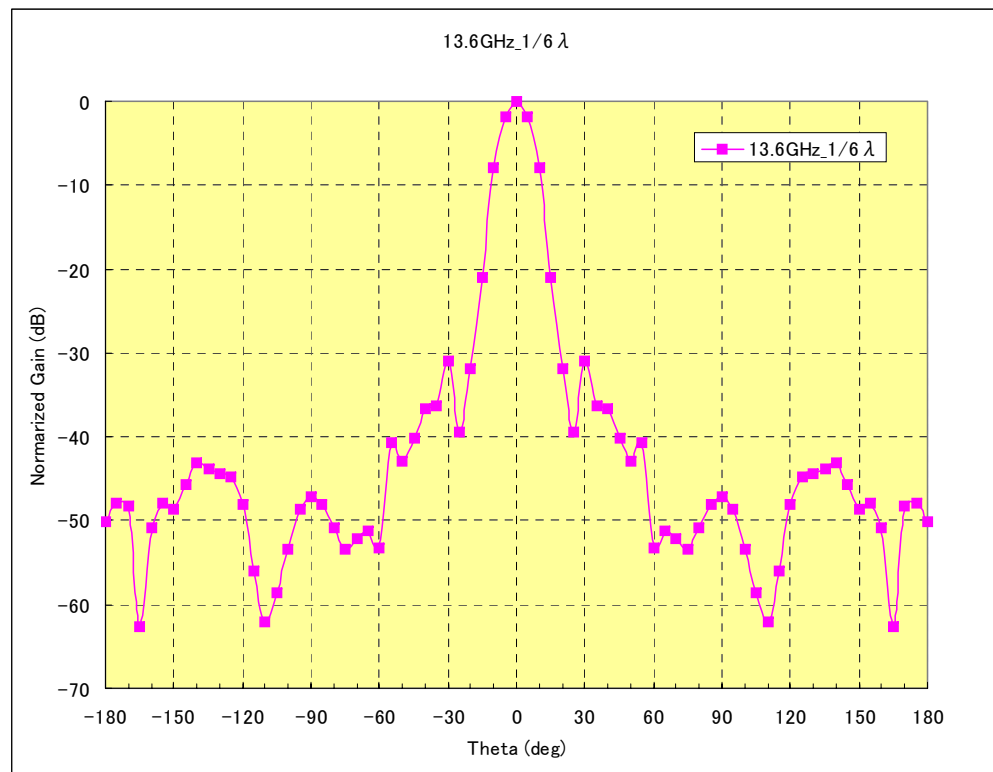


図-4.3 : 13.6 GHz での輻射パターン

値である。図-4.1 ~ 図-4.3 と 図-5 の比較から、メイン・ローブの周波数特性について良好なシミュレーション結果が見てとれる。

まとめ

Surface Patch で記述した大規模計算モデルの 3 セクション・コニカル・ホーンを、モデル・サイズに制限のない NEC2++ を用いてシミュレーションした。結果は、解析的解法を用いるシミュレーションや市販のシミュレータと同等であるとの結論を得た。

NEC2++ がフリーウェアであり、モデル・サイズに制限が無く、そして高速な計算能力を有する点はアマチュアにとってひじょうに魅力的である。今回は使用していないが、各種アンテナの最適化設計で計算エンジンとして用いるプログラム・インターフェースも備えていることも特徴である。

3 セクション・コニカル・ホーンのサイドおよびバック・ローブ特性が良好であることも確認できた。今後は、ホーン・アンテナの製作、アンテナ等価雑音

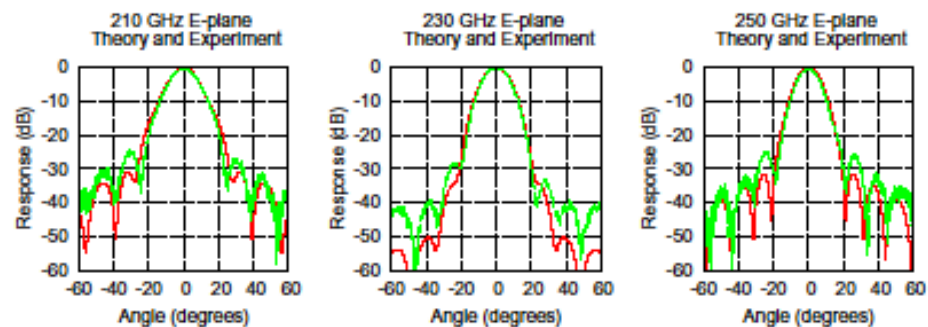


Fig. 11. A comparison of the theoretical beam patterns calculated using modal matching and the experimentally measured E-plane beam patterns for horn No.1 of the 2 horn block.

図-5 : 文献 [7] による輻射パターン

温度の計算、そして最終目的であるコールド・スカイを用いた LNA 等価雑音温度の校正へ進みたい。

//
☆

参考文献

[1] 1296 MHz Small EME Station with Good Capability (Part 3)
Sergey Zhutyaev, RW3BP
http://www.vhfdx.ru/apparatura/accurate_noise_figure_measurements_1296_mhz

[2] NEC2++
Timothy Molteno
<http://elec.otago.ac.nz/w/index.php/Necpp>

[3] Chapter 6, Feeds for Parabolic Dish Antennas
Paul Wade, W1GHZ
The W1GHZ Online Microwave Antenna Book, 1998, 1999
http://www.qsl.net/n1bwt/ch6_5-2.pdf

[4] アンテナ雑音温度 — 評価ツール
武安義幸、JA6XKQ
http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/AntNoiseTemp_2.pdf

[5] MICROWAVE HORNS and FEEDS
A. David Olver, et al
IEE, The Institution of Electrical Engineers, 1994
ISBN 0 7803 1115 9

[6] A New Horn Antenna with Suppressed Sidelobes and Equal Beam-widths
P. D. Potter

Technical Report No. 32-354, 1963
JET PROPULSION LABORATORY
http://www.archive.org/download/nasa_techdoc_19630008608/19630008608.pdf

[7] Measured performance of a 230 GHz prototype focal-plane feedhorn array made by direct drilling of smooth-walled horns
G. Yassin, et al
21ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE TERAHERTZ TECHNOLOGY, OXFORD, 23-25 MARCH, 2010
<http://www.nrao.edu/meetings/issst/papers/2010/2010114119.pdf>

[8] Simple Rectangular to Circular Microwave Waveguide Transitions
D. A. Bathker, K6BLG
http://www.ham-radio.com/sbms/techpapers/K6BLG/circ_rect.html

[9] Translation of NEC2 from FORTRAN to C and Related Software
Neoklis Kyriazis, 5B4AZ
<http://5b4az.chronos.org.uk/pages/nec2.html>

[10] NEC2 manual Part 1, Part 2 and Part 3
The unofficial Numerical Electromagnetic Code (NEC) Archives
<http://www.si-list.net/swindex.html>

[11] Xnecview
A program for visualizing NEC2 input and output data
Pieter-Tjerk de Boer, PA3FWM
<http://wwwhome.cs.utwente.nl/~ptdeboer/ham/xnecview/>