

## 電波天文用広帯域フィードシステムの基礎開発

氏原秀樹<sup>†</sup>, 川口則幸<sup>‡</sup>, 武士侯健<sup>‡</sup>, 本間希樹<sup>‡</sup>, 木村公洋<sup>†††</sup>, 松本浩平<sup>†††</sup>,  
小川英夫<sup>†††</sup>, 中川亜紀治<sup>‡‡</sup>, 山下一芳<sup>‡</sup>, 貴島政親<sup>‡</sup>, 大野剛志<sup>††</sup>, 三谷友彦<sup>‡‡‡</sup>

<sup>†</sup>情報通信研究機構 光・時空標準グループ 〒314-0012 茨城県鹿嶋市平井 893-1

<sup>‡</sup>国立天文台・<sup>‡‡</sup>総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

<sup>†††</sup>大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学専攻 〒599-8531 堺市中区学園町 1-1

<sup>††</sup>日本通信機厚木工場 〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4005

<sup>††††</sup>鹿児島大学理工学部 〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35

<sup>‡‡‡</sup>京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: <sup>†</sup>ujihara@nict.go.jp, <sup>‡</sup>kawagu.nori@nao.ac.jp

あらまし これまでに開発した国立天文台 VERA20m 電波望遠鏡用 6.7GHz 多モードホーンを 8.4GHz でも使用可能とする広帯域ポーラライザが開発され、これと組み合わせた VERA 用多モードホーンのビームパターンの測定を行った。また、VSOP-2/ASTRO-G 衛星用 8.4GHz 帯多モードホーンが 6.7GHz の観測も出来るように喉元形状の変更の提案を行った。電波干渉計の国際的な次期大型計画である SKA と測地 VLBI の国際プロジェクトの VLBI2010 に向けた広帯域フィードの基礎開発として、Tapered Slot Antenna(TSA)タイプの小型試作アンテナのビーム形状の測定と HFSS でのシミュレーション結果の比較を行った。

キーワード SKA, VLBI, テーパーロットアンテナ, 多モードホーン

## Development of Wideband Feed System for Radio Astronomy

Hideki UJIHARA<sup>†</sup>, Noriyuki KAWAGUCHI<sup>‡</sup>, Takeru BUSHIMATA<sup>‡</sup>, Mareki HOMMA<sup>‡</sup>, Kimihiro KIMURA<sup>†††</sup>,  
Kouhei MATSUMOTO<sup>†††</sup>, Hideo OGAWA<sup>†††</sup>, Akiji NAKAGAWA<sup>‡‡</sup>, Takeshi OHNO<sup>††</sup>

Kazuhisa YAMASHITA<sup>‡</sup>, Masachika KIJIMA<sup>‡</sup>, Tomohiko MITANI<sup>‡‡‡</sup>

<sup>†</sup>Space-Time Standards Group, National Institute of Information and Communications Technology

893-1 Hirai, Kashima, Ibaragi, 314-0012 Japan

<sup>‡</sup>National Astronomical Observatory in Japan / <sup>‡‡</sup>The Graduated University of Advanced Study  
2-21-1, osawa, mitaka, Tokyo, 181-8588 Japan

<sup>†††</sup>Graduate School of Science, OSAKA Prefecture University, 1-1 Gakuen-cho, Nakaku, Sakai, Osaka, 599-8531 Japan

<sup>‡‡</sup>Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima, 890-8580 Japan

<sup>††</sup>Japan Communication Equipment Co., Ltd. ATSUGI FACTORY, 4005 Nakatsu, Aikawa, Aikou-gun, Kanagawa, 243-0303, Japan

<sup>‡‡‡</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University. Gokasho, Uji City, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: <sup>†</sup>ujihara@nict.go.jp, <sup>‡</sup>kawagu.nori@nao.ac.jp

**Abstract** Wideband polarizer was developed for both of 6.7/8GHz band coverage. Beam patterns of multimode horns, developed for 6.7GHz band of VERA 20m radio telescopes, were measured with the polarizer, also the shape of waveguide end of 8GHz band multimode horn for VSOP-2/ASTRO-G satellite to receive 6.7GHz band with this polarizer. Tapered Slot Antennas(TSA) were tested for the international projects of wideband radio interferometer, SKA for astronomy. and VLBI 2010 for geodesy. Beam patterns of a TSA was measured and simulated with HFSS.

**Keyword** SKA, VLBI, Tapered Slot Antenna, Multimode Horn

### 1. 広帯域フィードの開発

電波干渉計の国際的な次期大型計画である Square Kilometer Array (SKA)は100MHz から35GHzまでの広い受信周波数帯をもち、約3000台のアンテナから構成され、2020年の本格稼働を目指す。現在、低周波0.1-1GHz、中周波1-10GHzを現実的な帯域として観測

機器の開発が進行中である。また、測地においても国際計画であるVLBI2010では2-14GHzへの広帯域化が求められている。これら個々のアンテナ光学系に搭載する広帯域受信システムは広帯域の給電フィード、低雑音受信器、広帯域デジタルサンブラから構成される。

各機器の開発は情報通信研究機構、国立天文台ほか

各大学，企業コンソシアムで分担して行われており，高速サンプラと広帯域フィードによる RF ダイレクト受信機を実現し，VLBI2010 及び SKA 中周波域と将来的には SKA 高周波数部への技術参入を目指している．本年度もテーパスロットアンテナ(TSA)で広帯域フィードを試作し，その特性評価試験を行った．

### 1.1. テーパスロットアンテナ(TSA)の試作と測定

TSAは並行する導体間の距離を徐々に広げてアンテナ開口とする進行波型のアンテナである．素子単体では片方の直線偏波しか受信できないが，複数を組み合わせることで両偏波対応やアレイ化を狙っている．製作単価が低廉であり，多数の素子を必要とする SKA に適している．また，アンプへの接続回路と一体で製作できるので，受信機システム全体のコスト低減にも寄与できる．広帯域にわたってリターンロスを低減し，ビーム幅や形状を一定にすることが研究課題である．

今年度は図 1.2 に示すよう形状の TSA を試作した．基板の比誘電率は 4.5,厚みは 0.5mm であり，昨年度のものより高誘電率で薄い．外形は  $L \times W = 200\text{mm} \times 80\text{mm}$  で基部には受信用のアンプや付帯回路を載せるために広くグラウンド面を取ってあるが，今回の測定ではアンプは載せず，放射素子への給電線にそのまま SMA コネクタを設置した．

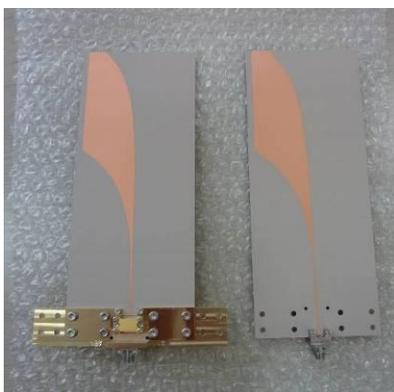


図 1. 試作 TSA の外観

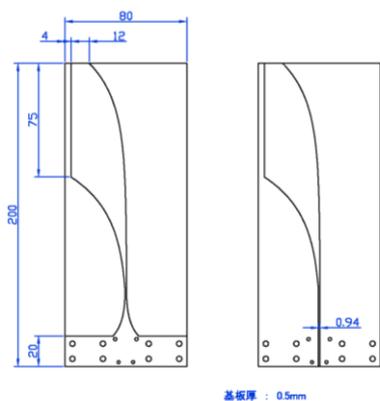


図 2. 試作 TSA の寸法図

### 1.2. HFSS によるシミュレーション

放射特性のシミュレーションを HFSS で行い，METLAB で近傍界測定の結果と比較した．製作とシミュレーションは日通機が担当した．ビームパターンの測定は 4.2GHz から 12GHz までを METLAB の近傍界測定装置で行った．図 3 に計算モデルの形状，図 4 に HFSS による電場分布を示す．

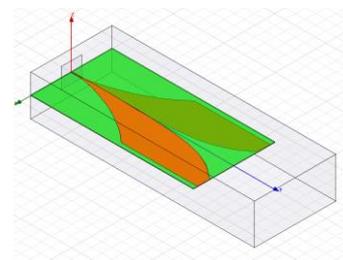


図 3. 計算モデル．

モデルを含む直方体の外側を放射境界とした．

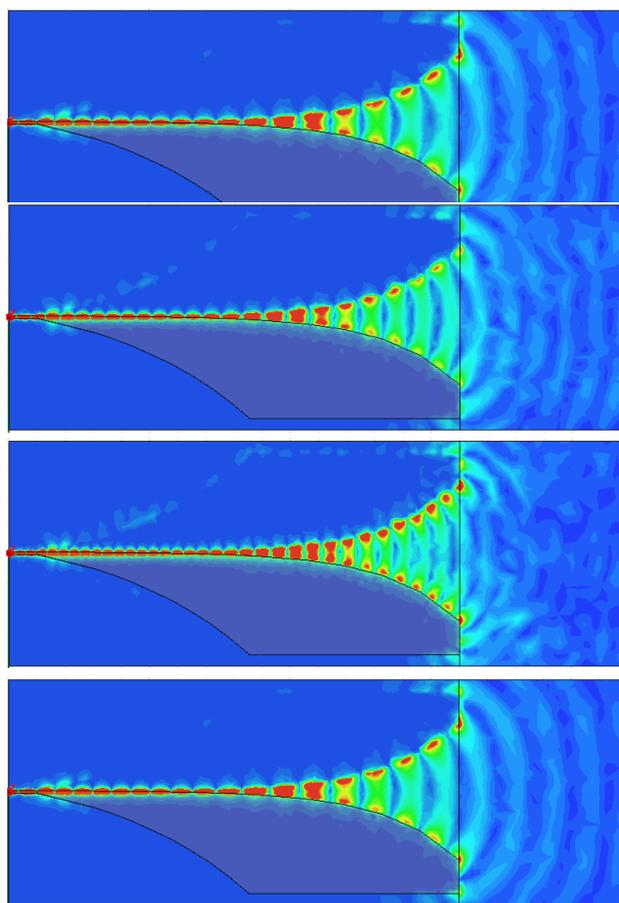


図 4. HFSS による電場分布

上から 4.2GHz, 6.7GHz, 10GHz, 12GHz

素子サイズが波長と同程度であるため，特に低周波側ではビームが広い．これまでのホーンの測定結果に比べると近傍界測定では誤差が大きい，遠方界変換後のビーム形状は定性的にはシミュレーションとよく一致している(図 4)．

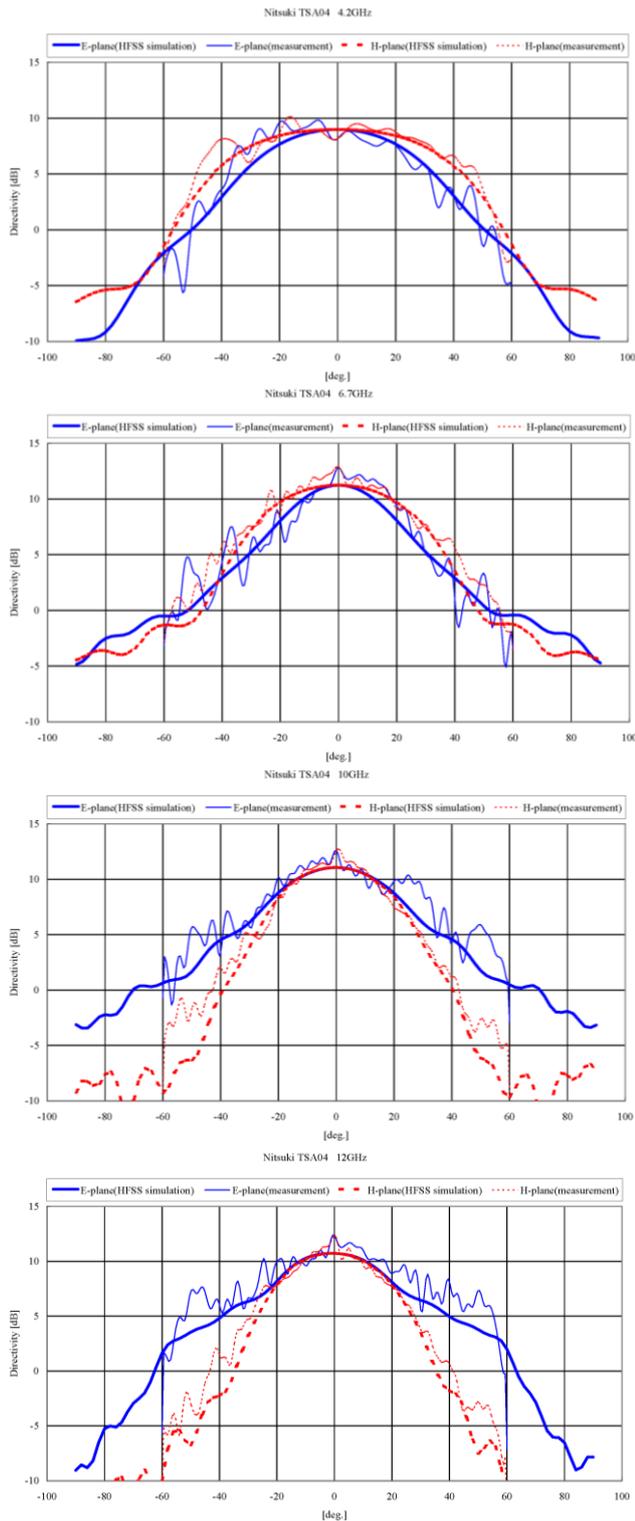


図 5. 遠方界ビームパターン。  
太線はシミュレーション．細線は測定値．  
青は E 面、赤は H 面パターン．TSA は水平に設置．  
上から 4.2GHz,6.7GHz,10.0GHz,12GHz

しかしながら、アンテナ基板を垂直に設置した場合と水平に設置した場合(図 6)のビームパターンを比較すると垂直設置のほうがシミュレーションとの一致が悪い。アンテナ基板の変形や周囲とのカップリングなどを考慮し、治具や測定環境を改善していきたい。また、低周波側では基板に平行な方向にビームが広がる傾向がある。シミュレーションでは放射素子の外部からも放射が起きている。製作した素子では給電部にはアンプなどを設置する回路のための広いグランド面があり、これと放射素子部とが結合して意図に反したアンテナを形成している可能性がある。今回の計算機モデルには反映されていないので、今後は放射素子の形状とともに、増幅回路部分の形状、放射素子との距離などを検討し、放射特性を改善していきたい。

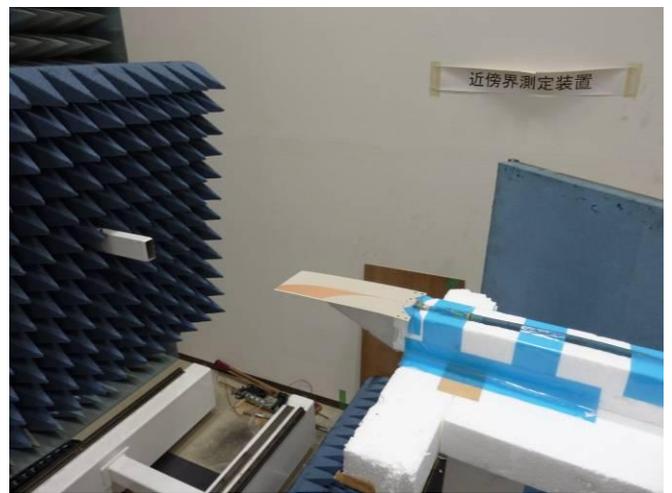


図 6. 近傍界測定の様子

### 1.3. 円偏波でのビームパターン測定

4 枚の TSA でアレイを組み、ビームを絞るとともに直線偏波から円偏波を合成した。6.7GHz 帯ではマイクロストリップ線路による 90 度ハイブリッドを利用して円偏波パターンの測定を行った。結果を図 7 に示す。寸法精度が保てず、ビームの軸が正対していない。

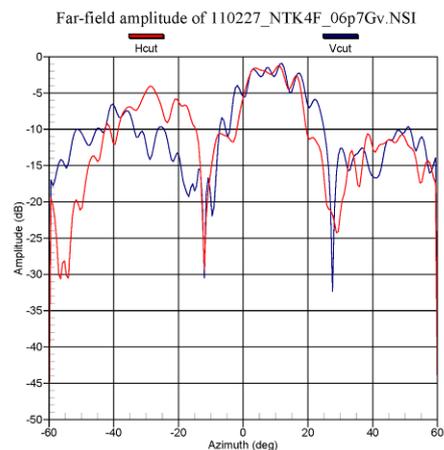


図 7.円偏波でのビームパターン(6.7GHz)

## 2. 広帯域ポーラライザと多モードホーン

大阪府大の松本らにより、6.7GHz帯と8GHz帯で共用できるポーラライザが開発された。二つのバンド間の天文観測に使わない周波数に共振を持つことで、両側の帯域で使用可能としたものである。この帯域特性を図8に示す。外寸は現在VERA20mアンテナや上海25mで使われている6.7GHz帯のポーラライザと互換性がある。

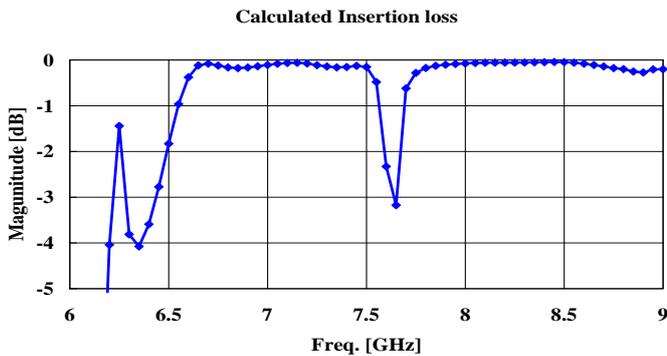
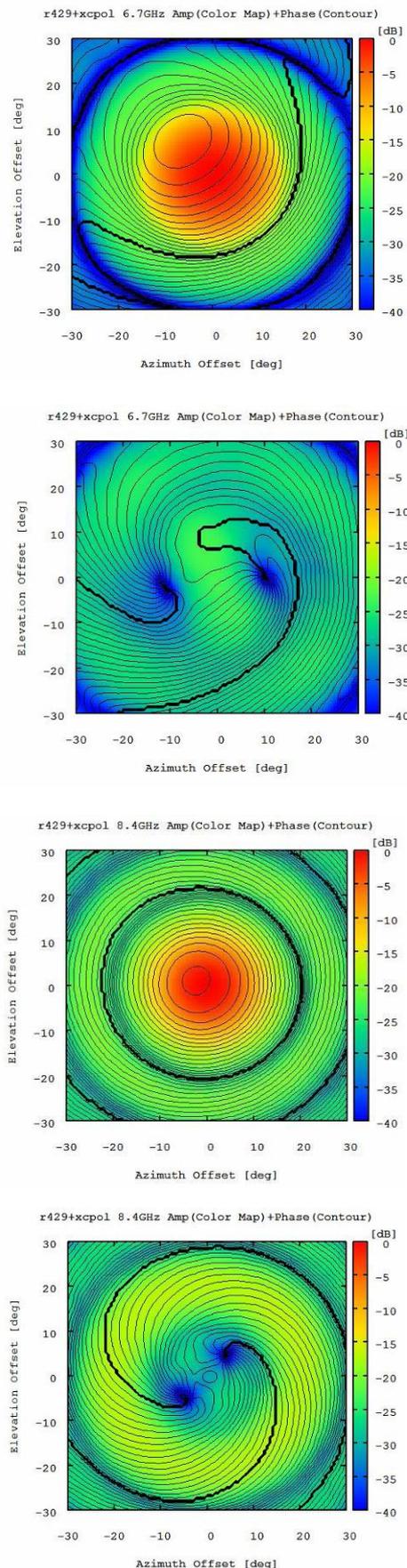


図 8. 広帯域ポーラライザの挿入損失.

このポーラライザと組み合わせたVERA用6.7GHz多モードホーンのビーム形状を近傍界測定装置で測定した結果を図9に、VSOP-2/ASTRO-G衛星用8GHzホーンでの測定結果を図10に示す。VERA用の6.7GHz帯多モードホーンは旧型が2モード、新型が4モードであるが、当初から8GHz帯での使用を考慮して8GHzでの交差偏波も低く押さえた設計としていた。逆にVSOP-2/ASTRO-G用の8GHz帯多モードホーンはポーラライザへの入力導波管に合わせて6.7GHzが遮断されていたが、図11のように6.7GHzに合わせた喉元形状に修正すれば6.7GHzでも使用可能となっている。

近傍界測定機で測定した遠方界の主偏波パターンの強度は軸対称であるが、位相パターンがずれている。また、交差偏波のパターンは二つ目玉で渦を巻いている。これらはHFSSでのシミュレーション結果からポーラライザの製作誤差と多モードホーン、ポーラライザの位相誤差による複合的なものと考えられる。ポーラライザによる位相と振幅の制御が完全であれば、円偏波の場合、主偏波だけでなく交差偏波成分の強度も軸対称になる。通常のストレートホーンの場合、直線偏波であれば主偏波は中心を通る直線に対称であり、交差偏波は直交する4方向に交差偏波の強度ピークを持つなど、交差偏波レベルは高くても対称性が高い。

図 9. 広帯域ポーラライザと組み合わせたVERA用6.7GHz帯4モードホーンの円偏波ビームパターン。右図の上から順に6.7GHz(主偏波、交差偏波)、8.4GHz(主偏波、交差偏波)。



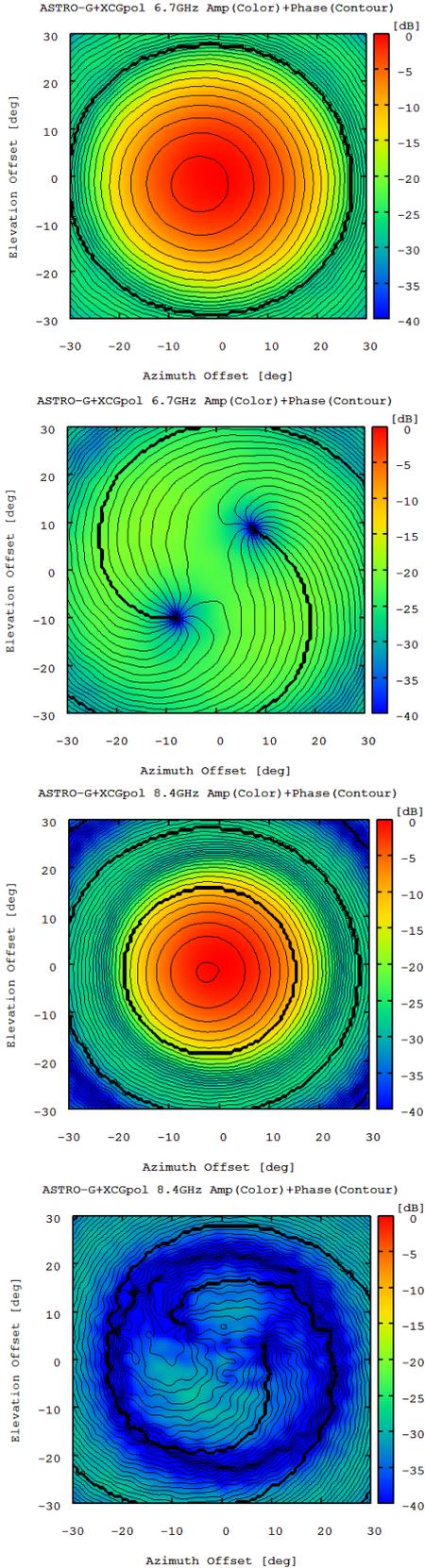


図 10. 広帯域ポーラライザと組み合わせた VSOP-2/ASTRO-G 衛星用 8GHz 帯 4 モードホーンの円偏波ビームパターン.上から順に 6.7GHz(主偏波, 交差偏波),8GHz(主偏波, 交差偏波).

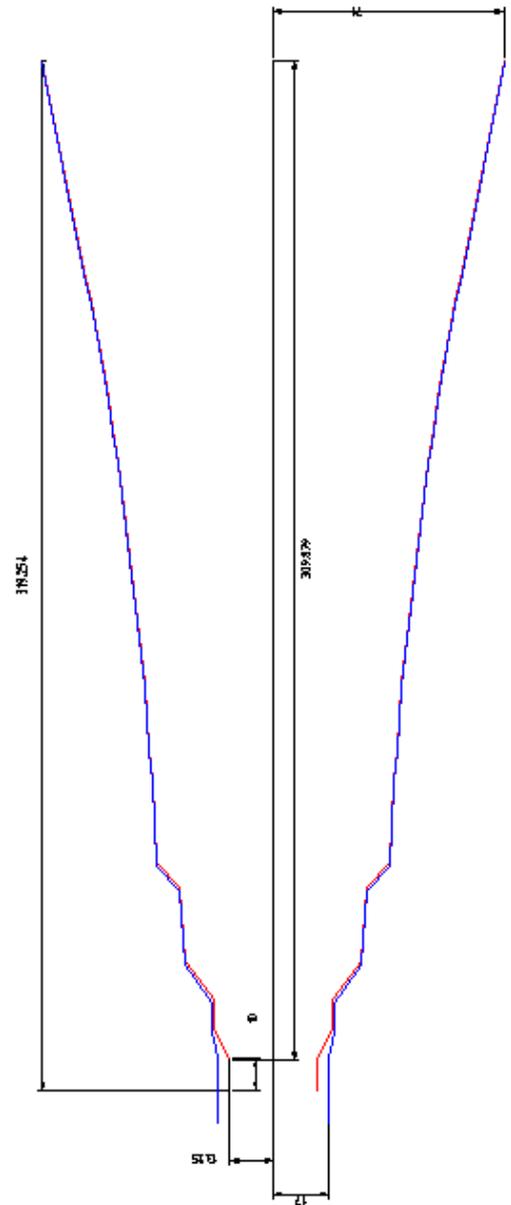


図 11. 広帯域ポーラライザに対応させた VSOP-2/ASTRO-G 衛星用 8GHz 帯 4 モードホーン(青線).赤線は 8GHz 帯専用ポーラライザに対する形状. ホーンに関しては外寸の変化は軽微であるが、ポーラライザは大きくなる.

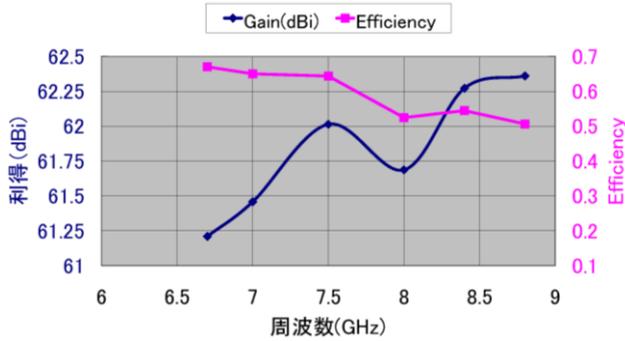
## 2.1 アンテナ開口能率

広帯域ポーラライザと多モードホーンを組み合わせた場合の開口能率を GRASP で評価した(図 12). VERA ではホーンの形状が同じため本来の 6.7GHz の性能は損なわれないが、ホーンの喉元の形状が変わる VSOP-2/ASTRO-G でも本来の 8GHz の性能を損なっていない. 追加されたバンドの能率は本来設計のバンドの能率に若干劣るが観測には十分である.

## 文 献

- [1] 氏原秀樹ほか, "電波望遠鏡用多モードホーンの開発", 電子情報通信学会技術報告, SPS2007-26 (2008-3)
- [2] 氏原秀樹ほか, "電波望遠鏡用多モードホーンの開発(その2)", 電子情報通信学会技術報告, SPS2008-22 (2009-3)
- [3] 氏原秀樹ほか, "SKA に向けた広帯域フィードの基礎開発と上海天文台用 6.7GHz 帯多モードホーンの開発", 電子情報通信学会技術報告, SPS2009-11 (2008-3)
- [4] 蛭子井 貫, 片木 孝至. "高効率複モードホーンアンテナ", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J65-B-II, No.5, pp.664-665, 1982
- [5] 出口博之ほか, "一般的な伝送方程式を用いたフレア形マルチモード円すいホーンの解析" 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-II, No.1, pp.33-41, 1996
- [6] 蛭子井 貫, "12/14GHz 帯トリプルモードホーン" 電子情報通信学会論文誌, Vol.J73-B-II, No.10, pp.546-553, 1990
- [7] Ichikawa, R., A. Ishii, T. Takiguchi, Y. Koyama, T. Kondo, K. Kokado, S. Kurihara, and S. Matsuzaka (2009): "Present Status and Outlook of Compact VLBI System Development for Providing over 10 km Baseline Calibration", IVS TDC-News October 2009., 30, 22-25.
- [8] Jwo-Shim Sun and Guan-Yu Chen, "The Tapered Slot Antenna", 2004 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings
- [9] P.J.Gibson, "The Vivaldi aerial," Proc.9th European Microwave Conf. pp101-105, Brighton,U.K. ,Sept. 1979.
- [10] 佐藤弘泰, 新井直人, 我妻嘉彦, 澤谷邦男, 水野皓司"コルゲート構造付ミリ波フェルミアンテナの設計", 電子情報通信学会論文誌 pp.1851-1859,2003年9月
- [11] 高木由紀子, 佐藤弘泰, 新井直人, 我妻嘉彦, 澤谷邦男, 水野皓司 "コルゲート構造付広帯域対称形フェルミアンテナの高利得化" 学技報 2003/07
- [12] S.N.Pasad and S.Mahapatra, "Anew MIC slot-line aerial" IEEE, pp.525-527,May 1983
- [13] Nobuhiro KUDO, "Analysis of Microstrip Taper Baluns by FDTD Method"

VERA\_6.7GHz-8GHz受信機アンテナ能率計算



アンテナ能率

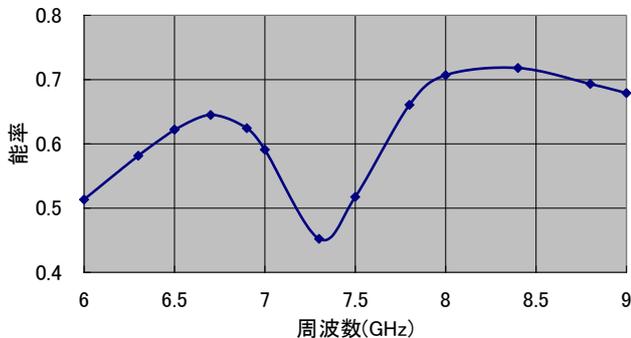


図 12. 広帯域ポーラライザ搭載時のアンテナ開口能率. 上は VERA, 下は VSOP-2/ASTOR-G 衛星の場合. VERA の場合, 8GHz 帯ではビームが細くなり, スピルオーバーは減るが能率は下がっている. 焦点位置が違うためと考えられる.

### 3. まとめと今後の予定

SKA 及び VLBI2010 に向けた広帯域フィードの基礎開発を行った. 今年度はアンブマウントのついた小型 TSA を試作し, シミュレーションと近傍界測定でビーム形状の比較を行ったが低域側では不要輻射が目立ち, 改善の必要がある. 4 素子で円偏波受信可能なアレイを作成し, ビームパターンを測定したが, 組み立て精度が不足していて, ビームが歪んでいた.

多モードホーンについては, 広帯域ポーラライザと組み合わせた場合のビーム形状の測定を行った.

今後も国内外の VLBI 観測網の整備と拡大に寄与していきたい. これらの開発にあたり, 測定設備を使用させていただいた METLAB に謝意を表します.