

## 電波天文用広帯域フィードシステムの基礎開発(II)

氏原 秀樹<sup>†</sup> 木村 公洋 小川 英夫<sup>‡</sup> 貴島 政親<sup>††</sup>

山下 一芳 武士俣 健 川口 則幸<sup>†††</sup> 中川 亜紀治<sup>‡‡</sup> 三谷 友彦<sup>‡‡‡</sup>

<sup>†</sup> 情報通信研究機構 時空標準研究室/鹿嶋宇宙技術センター 〒105-0123 茨城県鹿嶋市平井 893-1

<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> 広島大学理学研究科 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1

<sup>†††</sup> 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒105-0123 東京都三鷹市大沢 2-21-1

<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 〒105-0123 京都府宇治市五ヶ庄 1-2-3

E-mail: <sup>†</sup> ujihara@nict.go.jp

あらまし SKA や VLBI2010 への応用を目指して広帯域フィードシステムの開発を行っている。進行波型アンテナを基本素子として水平垂直両偏波受信対応のアレイフィードを試作し、ビーム形状の測定を行った。

キーワード 広帯域フィード, SKA, VLBI2010

## Development of Wideband Feed System for Radio Astronomy (II)

Hideki UJIHARA<sup>†</sup> Kimihiro KIMURA Hideo OGAWA<sup>‡</sup> Masachika KIJIMA<sup>††</sup>

Kazuyoshi YAMASHITA Takeru BUSHIMATA Noriyuki KAWAGUCHI<sup>†††</sup>

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

<sup>††</sup> Graduate School of Science, HIROSHIMA University, 1-3-1, Kagamiyama, Higashihirosima, Hiroshima, 739-8526 Japan

<sup>†††</sup> Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory, 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588 Japan

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

**Abstract** We have been developing wideband feed for the next generation international projects VLBI2010 in geodesy and SKA in astronomy. Our arrayed feed receives dual linear polarization, their beam patterns were measured in METLAB.

**Keyword** Wideband, feed, SKA, VLBI2010

### 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の SKA (Square Kilometer Array) では、約 3000 台のアンテナから構成され、2020 年の本格稼働を目指している。現実的な帯域としては低周波では 0.1-1GHz、中周波では 1-10GHz を目標に観測機器を開発中である。また、測地 VLBI においては 2GHz 帯と 8GHz 帯が利用されているが、次世代の VLBI2010 では遅延時間決定精度向上のために 2GHz-14GHz へ広帯域化される。これら及び既存のアンテナへの搭載を目標とした広帯域フィードの開発について述べる。

### 2. Tapered Slot Antenna(TSA)の問題点

昨年度まではテーパスロットアンテナ(TSA)で広帯域フィードを試作し、その特性評価を行った。その形状は、文献[1]図2のように放射素子を誘電体基板の両面に基板の長手方向を軸とする回転対称で配置し、放射素子の根本にテーパバラン[2]と称する滑らかに形状が変化する線路を介してマイクロストリップ線路をつないで低雑音増幅器(LNA)を配置する構造であった。これが初期の検討案であったが、この形状は線路インピーダンスの計算が難しく、放射素子部で電場のねじれが発生するため、設計の見通しが悪く交差偏波発生量も高くなる問題があった。また、テーパバランは形

状と寸法から「バラ」としての機能を有さないのは明らかである。放射素子へは平衡モードで給電したいのだが、このバラと称する部分の寸法は使用波長に比べて極めて短いため、非平衡モードが放射素子へ容易に流れ込める。すなわち平衡・非平衡モードの変換を行う機能がなくバラと呼ぶのは不適切である。また、極めて短いマイクロストリップ線路を介して LNA が接続されているため、その出力が放射素子に漏れこみやすい。一般に LNA は 10-20dB の程度の増幅率であるため発振する可能性が高い。これらの構造に起因する本質的問題があるため、本年度は TSA に替えて進行波型アンテナ(TWA)を基本素子とし、直線両偏波での受信を可能としつつビーム幅を制御するために 4 素子以上のアレイによる広帯域フィードの開発を目指した。

### 3. Traveling Wave Antena(TWA)による検討

導体による伝送線路が自由空間へとなめらかに広がり、線路上の波動が空中に放射されるアンテナを広く進行波型アンテナ(Traveling Wave Antena)という。前項の TSA はスロットアンテナと称されるが、形状と寸法によっては進行波アンテナでもある。ホーンアンテナも進行波型アンテナだが、ここでは基板の片側に形成したコプレーナ線路から基板の片面に配置した放射素子へ電磁波を導き、空間へ放射するタイプを検討した。前項の TSA の導体パターンを片面のみに設けた構造であり、インピーダンスはコプレーナ線路で近似できるので、インピーダンスの計算が容易になり設計見通しが良くなった。

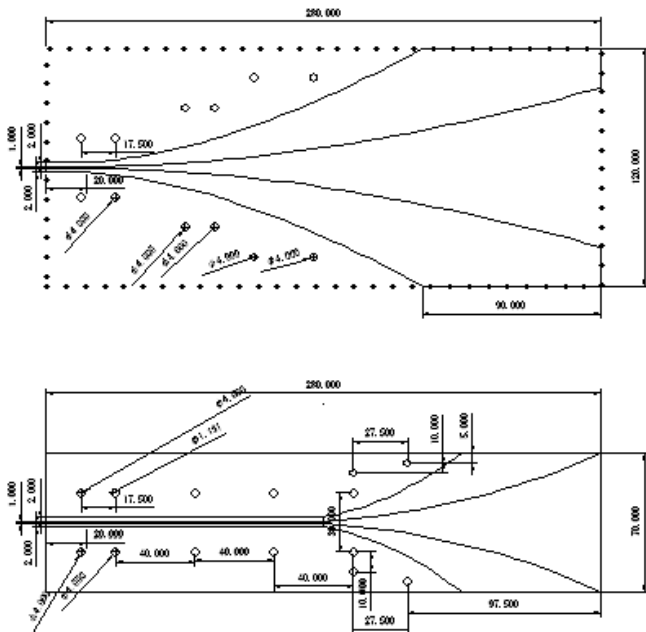


図 1.本年度に試作した TWA 素子の形状

### 4. シミュレーション

COMSOL Ver 4.2 により、電磁界の伝搬シミュレーションを行った。基板の比誘電率が高くなると波長が短くなるとともに伝送線路からの漏れが少なくなることが確認できた。放射波源の大きさについては、基板と平行方向では波長に寄らず開口部導体の大きさになるが、基板と垂直方向では比誘電率が高くなるほど点波源に近くなる。TSA も含めて、このような放射素子では遠方界ビームサイズを波長に寄らず一定に保つことはできないが、基板の比誘電率を選択することで波源形状を変えることができることがわかった。この放射素子をアレイとした場合、放射素子同士のカップリングのために単素子の場合とは特性が変わるが、アレイの場合のシミュレーションはメモリ量が不足するために本年度は十分に行えなかった。シミュレーションでは空間を差分化するが、そのメッシュサイズは波長に比べて十分に小さくしなければならない。本論での広帯域アンテナでは波長が帯域端で 10 倍も異なるため最適メッシュサイズも 10 倍異なる。バンド端での 3 次元でのメッシュの数の比では 1000 倍である。モデルの周囲に配置する波動の吸収領域、PML(Perfect Matching Layer)の厚みも 10 倍異なるため、低周波側では必要十分な厚みの PML であっても高周波側では吸収が強くなりすぎて内部電磁界が倍精度浮動小数で表現できる下限を割り込んでしまい、演算結果が不正になる場合もある。つまり、低周波側では計算可能なモデルでも高周波側では計算できなくなることが容易に起きるので本質的にシミュレーションが難しい。

また、COMSOL は HFSS と異なり、汎用の偏微分方程式ソルバにすぎない。RF モジュールの追加で使い勝手は向上するが、プログラムそのものが RF 領域の問題に最適化されるわけではなく、現バージョンではポートの扱いに難点がある。今回の計算では Lumped Port モデルを利用したが、シミュレーションではポートの片側だけに電力を出すことができないため、ポートの裏側の線路にも電力が流れ、伝送線路端から放射してしまう。これはポート周辺の構造モデルを注意深く作り込まないと遠方界ビーム形状や電力の計算に誤差をもたらすことを意味するが、ポートモデルを複雑化するとメモリ消費量が増える。このような問題を抱えつつも、アンテナに接続する同軸ケーブルやジグの影響を受けない実験が可能であるので定性的な特性の把握には有益であるが、アンテナ形状によっては計算時間と測定時間が同程度かかることもあり、試作コストは節約できても時間の節約にはならない場合もある。

次項、図 4a,4b に計算結果の一部を示す。

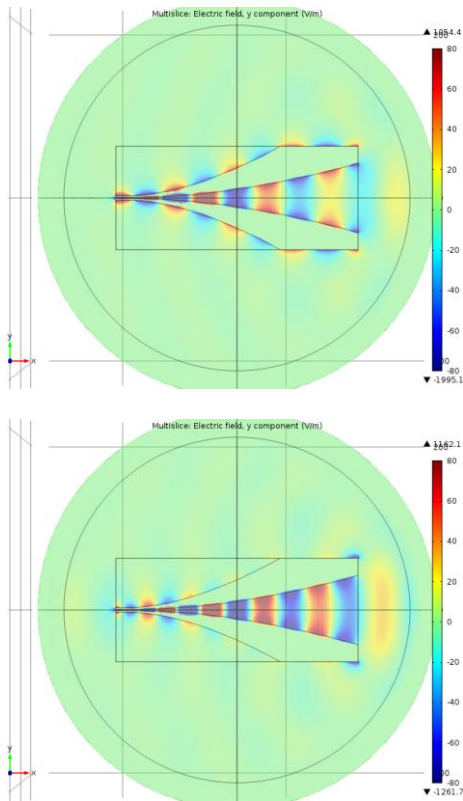


図 4a. 基板に平行な面内の基板に平行な電磁界成分.  
 基板の比誘電率は上段:2.2, 下段:10. 周波数は 4GHz.

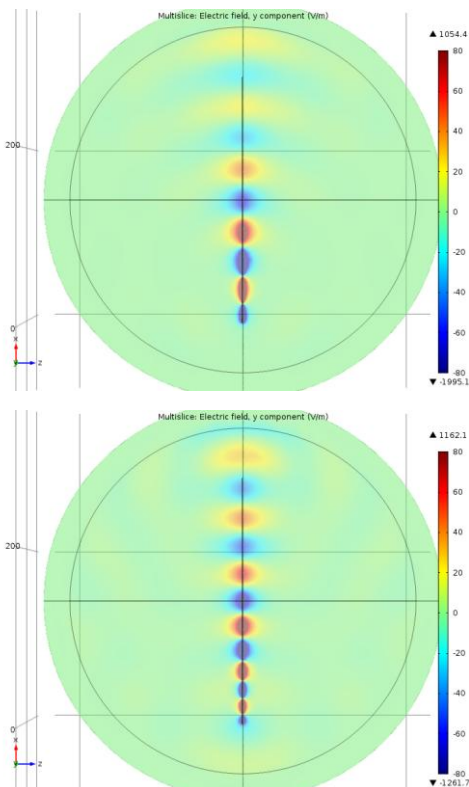


図 4b. 基板垂直面内の基板に平行な電磁界成分.  
 基板の比誘電率は上段:2.2, 下段:10. 周波数は 4GHz.

## 5. 試作した素子の測定

近傍界測定装置により, 遠方界ビーム形状の測定を行った. 4 素子アレイの外観とビーム形状の測定結果を図 5a,5b に示す. 素子サイズは 120mmx280mmx1mm で比誘電率は 2.2 である. 素子間隔に起因する回折ローブが見えている. 測定にはバランをを用いていないが, 放射の対称性は良く, 非平衡モードの影響は少ないと言える. 素子に給電する同軸ケーブルは非平衡の伝送路と言われているが, 電磁気学の教科書では平衡モードで内部電磁界の解析解が求められている. これは同軸ケーブルの外皮を流れる電流や地面などの外部導体の影響の有無による. これらのモードは端子を介して混じり合うことができるが, 所望しない非平衡モードが十分に減衰するように測定・動作環境を構築できればバランは不要である.

次に開口内部に小型素子を追加した 8 素子アレイの外観とビーム形状の結果を図 5c,5d に示す. 小型素子のサイズは 70mmx280mmx1mm で比誘電率は 2.2 である. ビームは中央にまとまってきたが, 素子間の電力配分のアンバランスに起因すると思われるヌルが見える. 今後, 計算機シミュレーションで対策を講じたい.



図 5a. 4 素子 TWA アレイ

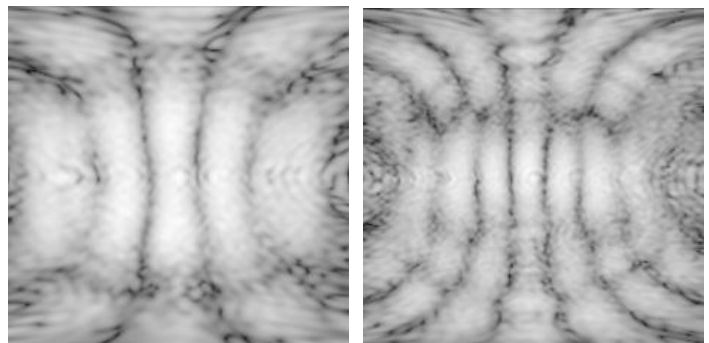


図 5b. 4 素子 TWA アレイの遠方界ビームパターン  
 左:4GHz, 右:6GHz, それぞれ 70 度 x70 度

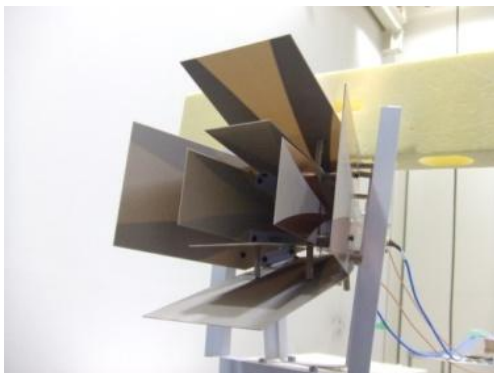


図 5c. 8 素子 TWA アレイ

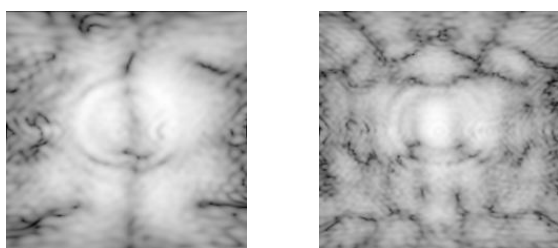


図 5d. 8 素子 TWA アレイの遠方界ビームパターン  
左:4GHz, 右:6GHz, それぞれ 60 度 x60 度

## 文 献

- [1] 氏原秀樹ほか, “電波天文用広帯域フィードの基礎開発”, 電子情報通信学会技術報告, SPS-2010-24(2011-3) pp.5-11, Mar., 2011.
- [2] Nobuhiro KUDO, “Analysis of Microstrip Taper Baluns by FDTD Method”
- [3] S.N.Pasad and S.Mahapatra, ”Anew MIC slot-line aerial” IEEE, pp.525-527, May 1983
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] Jwo-Shim Sun and Guan-Yu Chen, “The Tapered Slot Antenna”, 2004 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings
- [7] P.J.Gibson, “The Vivaldi aerial,” Proc.9th European Microwave Conf. pp101-105, Brighton,U.K. ,Sept. 1979.
- [8] 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

## 6. 今後の課題

SKA や VLBI2010 だけでなく, 国土地理院と NICT が開発した VLBI 可搬局の MARBLE[4] など広く既存のアンテナでも利用可能な広帯域フィードを開発するには, ビーム幅を制御できる設計自由度が必要である. そのためには, 複数の放射素子によるアレイが望ましいと考えるが, 素子間の電力配分ネットワークの設計とカップリングの影響評価が今後の課題である. 計算機シミュレーションと試作素子の測定により, 電波望遠鏡用広帯域フィードとしての性能最適化を進めていきたい.

実用にあたっては製作コストも問題になる. 特に多数のアンテナに使う場合, 量産しやすく保守しやすい構造が望ましい. アレイのいくつかの素子で LNA を共用する構造とすれば, コストや製作, 保守面で有利であるし, 冷却容器の負荷や重量を減らすこともできる. このような観点で見れば, 現在, VLBI2010 で利用されつつある Eleven Feed ではビーム幅の変更ができないことに加え, 内部回路の損失が大きい問題がある. これらの問題を解決した実用的なフィードを開発すべく, 今後も努力を続けたい.

## 7. 謝辞

国立天文台共同開発経費(代表:中川亜紀治)により試作を行い, 性能測定には METLAB を利用しました.