

電波天文用広帯域フロントエンドの開発 —20-50GHz 帯域用 QRA の設計および TWA アレイの試作と測定—

長谷川 豊¹ 高津 湊¹ 木村 公洋¹ 大西 利和¹ 前澤 裕之¹ 小川 英夫¹
氏原 秀樹² 中西 裕之³ 川口 則幸⁴ 三谷 友彦⁵ 宮本 聖慎⁶

1 大阪府立大学 理学系研究科 2 独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) 3 鹿児島大学理工学部
4 国立天文台 5 京都大学 6 株式会社オリエントマイクロウェーブ
E-mail: 1 {s_y.hasegawa , kimura , ogawa }@p.s.osakafu-u.ac.jp ujihara@hal.mtk.nao.ac.jp

あらまし 我々は、電波望遠鏡のフィードアンテナとして利用可能な 20-50 GHz 帯域用クアッドリッジアンテナの開発を行った。近年の技術躍進により、低雑音で広帯域な増幅器が開発されてきているが、これらを電波望遠鏡受信機系に組み込むにあたっては、その広帯域性に対応した光学設計、特にフィードアンテナが無ければ、せっかくの広帯域性も活かす事が出来ない。そこで我々は、広帯域なフィードアンテナの候補としてクアッドリッジアンテナ(QRA)に注目した。この種のアンテナは現在世界中で盛んに開発されているが、反射損失やビームパターンなどのアンテナ特性を考えると、それらをそのまま電波望遠鏡に搭載したとしても、宇宙からの信号を検出することは困難である。そこで我々は、電波望遠鏡用の QRA を新規設計・開発することにした。

今回開発した QRA には、特に H₂O メーザーの 22.3 GHz、SiO メーザーの 43.4 GHz 周辺において、リターンロス-20 dB 以下・好対称的なビームパターン等、電波望遠鏡用としてふさわしい特性を持たせる事を目標とした。これら 2 帯域は VLBI 等の国際協力観測においても頻繁に用いられる重要な観測対象であるが、両者ともに対応した既存のフィードアンテナは無かったため、受信機を 2 台用意して切り替えて観測されていた。この QRA の開発により、初めて 1 台の受信機でこれらの観測を行うことが出来るようになるかと期待される。さらに、並行して行っている TWA アレイの開発についても報告する。

キーワード 電波天文学、電波望遠鏡、広帯域、フィード、クアッドリッジ、QRA、VLBI

Development the “Front End” of Radio Telescope —Development of 20-50 GHz QRA & TWA Array for Feed Antenna -

Yutaka Hasegawa¹ Minato Kozu¹ Kimihiro Kimura¹ Toshikazu Ohnishi¹ Hiroyuki Maezawa¹ Hideo Ogawa¹
Hideki Ujihara² Hiroyuki Nakanishi³ Noriyuki Kawaguchi⁴ Tomohiko Mitani⁵ Masato Miyamoto⁶

1: Osaka Pref. Univ. – Physics Science Departure 2: NICT 3: Kagoshima Univ.

4: NAOJ 5: Kyoto Univ. 6: Orient Microwave Corp.

E-mail: 1 {s_y.hasegawa , kimura , ogawa }@p.s.osakafu-u.ac.jp 2 ujihara@hal.mtk.nao.ac.jp

Abstract We aim to use Quadruple Ridged Antenna (QRA) as broadband feed antenna for radio telescope. Lately , the performance of broadband & low-noise amplifiers have progressed steadily .When we load them in the receiver-system of radio telescope(s) , however , it cannot be used effectively because of the problem of the bandwidth of the other components . At least , an acceptably broadband feed antenna needs to be developed .

Keyword Radio Astronomy , Radio Telescope , Broadband , Feed Antenna , Quadruple Ridged Antenna , QRA , VLBI

1. イントロダクション

電波望遠鏡において、フィードアンテナは主鏡で集めた宇宙からの電波信号を受信装置まで伝搬するために不可欠な光学素子の一つである。代表的なフィードとしてはコルゲートホーンやマルチモードホーンアンテナが挙げられるが、こうした電波望遠鏡用フィードは基本的に狭帯域であった。かつては受信装置や増幅器・分光計といった「バックエンド」も狭帯域であったため、フィードの狭帯域性は軽視されていたが、近年の技術躍進に伴い、受信装置、特に増幅器の広帯域化が進み始めており、これらの広帯域装置を組み込んだ「広帯域観測装置」の需要要求も高まってきている。

2. クアッドリッジアンテナ (QRA)

図 1 は、2-18GHz 帯域用クアッドリッジアンテナ(以降、QRA)の写真である。図中の 4 枚の羽のような導体板はリッジと呼ばれ、この種のアンテナに特徴的な構造体である。QRA はクアッドリッジ導波管(以降、QRW)のリッジ間隔を徐々に広げて開口させたような進行波アンテナであるから、その電磁界的な振る舞いは QRW におけるそれに似る。例えば QRW は通常の導波管と比べてはるかに広い帯域間で基準モードを維持できる事から、QRA もまた広帯域性を持つ。(QRW における電磁界的な振る舞いや特性は、[1]に詳しい。) 図 2 は、QRA における電波伝搬の様子を表している。

この図を見ると、2枚の対面するリッジ間に電界強度が集中している事が分かる。この時集約されるのはリッジ間隔が広がる方向の直線偏波成分が主である。すなわち QRA は、2組計4枚のリッジを直交させる事により水平・垂直の2つの直交偏波成分を高い分離度で分離できる。この点は電波天文学において非常に魅力的な特徴である。([2]のように、この特徴を活かした Ortho-Mode Transducer を設計する事も精力的に研究されている。) また、一般的な QRA は受信した信号を2つの独立した同軸導波管変換機構にて取り出す設計になっており、その後アンプなどを直接接続することが可能である。イレブンフィード等の他種の広帯域アンテナでも同軸出力が採用されている事がほとんどだが、QRA では出力ポート数が最小限の2個であるため、IF系の構築が比較的簡単となる。

上記のように、① 広帯域性を持ち、② 直交偏波成分をアンテナ自体で分離でき、③ 出力ポート数が最小限である QRA は、電波望遠鏡のフィードとして非常に適していると考えられる。加えて、QRA はイレブンフィード等と比べると比較的ビーム幅を細く抑える事が可能である。([3][4][8]等を参照。) イレブンフィードをはじめとする広角広帯域アンテナは、その広角性のために、既存の望遠鏡に対しての採用が難しいが、上手くビーム幅を調整できた QRA であれば、光学系による補正が十分に効くと考えられ、既存の望遠鏡に対しての採用を検討できる。

このように、QRA は電波望遠鏡用のフィードとして非常に有望であるが、これまで開発されてきた QRA のほとんどは反射特性が非常に悪く、またメインビームパターンに対して交差偏波の漏れこみレベルも高かったため、市販の QRA が電波望遠鏡に搭載された実績は、現在のところ国内においては実験的な1例のみと皆無である ([10])。

また、[5][6][7][8][9]などからも分かるように、現在世界中で開発されている QRA のほとんどは、1-18GHz 帯域用などのように比較的低い周波数帯域を対象としており、40GHz を超える領域を対象とした QRA は、現時点ではほとんど開発されていない。この主な理由としては、同軸導波管変換部の実装が困難であることや、一般には需要が無いことなどが考えられる。

しかし逆に考えれば、こうした欠点を上手く克服することが出来れば、QRA ほど広帯域フィードとして有用なアンテナは無い。そこで我々は、QRA の主な欠点ある反射特性と交差偏波混入レベルの向上に特に重点を置いた電波望遠鏡搭載用高周波領域対応 QRA を新規設計・開発する事にした。

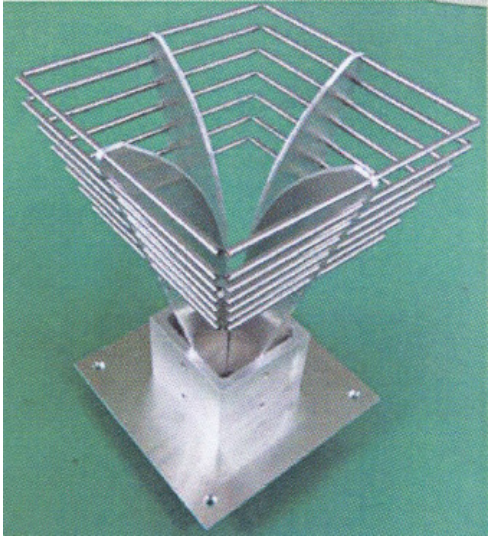


図1 : 2 - 18 GHz 帯域用 QRA の写真
(Developed by Orient Microwave Corp.)

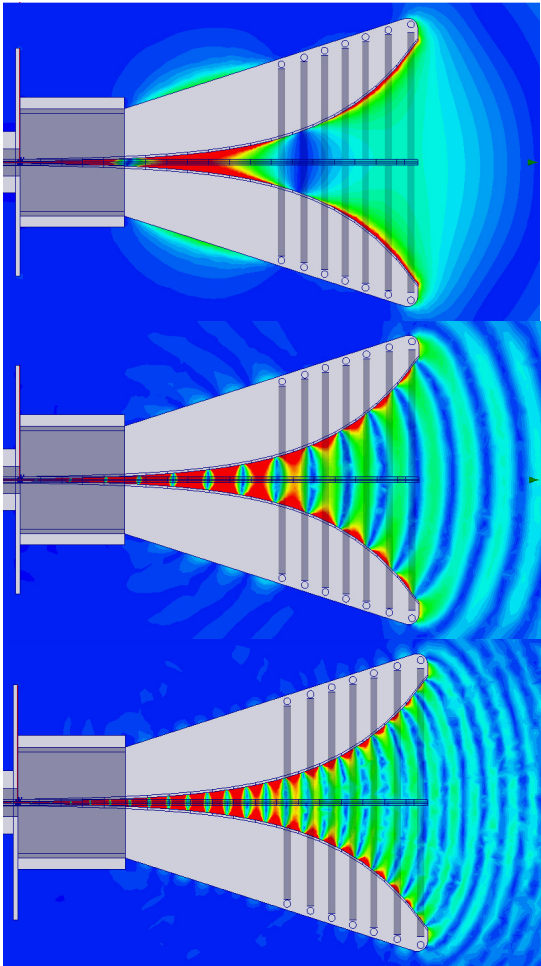


図2 : 2 - 18 GHz 帯域用 QRA の
上から 2 , 10 , 18 GHz における電波伝搬の様子
(これらのアニメーションは、解析モデルを寸法測定から構築し、HFSS で解析して作成した。)

3. 設計

3.1 設計目標

2. でも挙げたように、電波望遠鏡のフィードとして QRA を用いるためには、まず反射特性の向上が最優先課題となる。交差偏波の混入レベルは光学設計によりある程度の補正が効くが、反射特性はアンテナに固有のものであるから、これを可能な限り向上させなければならない。次に帯域についてだが、今回は 20-50GHz 間を狙うことにした。電波天文学においては、VLBI をはじめとした多くのプロジェクトにて H₂O メーザーの 22.3 GHz および SiO メーザーの 43.4 GHz が観測されており、この両者を 1 台で受信できる QRA を設計する事が有用であると考えた結果である。またこの使用用途を考慮し、今回開発する QRA では 20 - 50 GHz 間の全領域に渡っての良特性を目指すのではなく、特に 22.3 GHz , 43.4 GHz 周辺でのアンテナ特性に特化させること優先的に狙うことにした。この理由として、メーザーの観測には特性の良いフィードが必要であったことや、この周波数領域における連続波観測の需要があまりない事を挙げておく。その他光学系の観点からビーム幅などの目標値を算出した。これらをまとめて具体的に表すと、以下のような目標値設定となる。

- ① 22.3 GHz , 43.4 GHz の周辺領域において、リターンロス-20 dB 以下。
- ② ビーム幅として、フレア角 11° にてメインビームゲインが-12 dB 落ち。
- ③ E 面・H 面パターンが対称的であること。
- ④ 交差偏波混入のピークがフレア角 11° より外側にある事。

3.2 設計手法

設計は Ansys 社の 3 次元電磁界有限要素解析ソフト HFSS を用いて行った。解析モデルについて少し解説すると、素材をアルミニウムとした QRA 本体部の周囲を、空気を素材に指定した箱で覆い、その箱を解析空間に指定した。また同軸導波管変換部を解析モデル中に構築するなど、出来る限り実際に測定する環境に近い解析モデルの構築を心掛けた。

解析条件の設定についても少し述べておくと、まずメッシュを生成する試験周波数は、QRA の広帯域性を考慮したうえで、我々が最も重要視する 22.3 GHz , 43.4 GHz の 2 点を指定し、その 2 周波数に対して生成したメッシュを用いて 21-24GHz 間、41-45 GHz 間の周波数領域を Frequency Sweep 解析した。このように Sweep 領域を比帯域 10%程度と狭くして Frequency Sweep のために生じる誤差を抑えるなど、解析の方法によって生じると考えられる誤差はできるだけ抑えるように心掛けた。

4. 設計した 20-50GHz QRA の特徴

各種論文で紹介されている QRA や、市販の物のトレースに頼ってはいは、3.1 に挙げた設計目標を達成することは到底適わないと思われる。そこで我々は、解析モデルに様々な工夫を凝らし、設計目標の達成に尽力した。図 3 は、今回我々が設計した QRA の解析モデル図であり、図 4 は、それを開口面から見た図である。この図から分かるように、本 QRA では 4 枚のリッジが方形導波管の対角線上に位置している。[1][2]でも触れられているが、QRW では方形導波管中心・対角線上・円形の 3 パターンのリッジの付き方が考えられ、その中でも一番交差偏波特性に優れるのは、方形導波管の対角線上にリッジが位置している場合である。これを採用する事によって交差偏波特性の向上をまずは狙った。

また図 4 中の寸法は、2 組のリッジ間隔が開口部において異なる事を示している。加えて解析モデルではリッジのカーブ部分を Exponential 関数で表現しているが、その係数をずらすことで 2 組のリッジ間隔の増加具合を僅かに変えている。これらの結果、メインビームパターンの E 面・H 面対称性は少し崩れてしまうものの、2 つの同軸導波管変換部の高さ方向のズレに起因するインピーダンスミスマッチングを上手く解消することに成功し、シミュレーション上ではあるが、反射特性を大きく向上できた。

次の図 5 は、バックキャビティ部の図である。バックキャビティ部は、QRA の特性を大きく左右する重要な部分であり、この部分の工夫は[7]等のようにいくつも報告されている。我々は、図 5 中央にあるような半球状の突起をバックキャビティ部に取り付ける事にした。この工夫を我々は「プラスフィア」と呼んでいる。このプラスフィアは反射特性・ビームパターンの両方に大きな変化をもたらす事が分かり、マシンパワーで(強引に)最適化した結果特に 43.4 GHz 周辺領域にて大きな反射特性向上効果が得られた。リッジ底部から半球の表面までの距離が連続的に変化していることにより、より広い周波数領域にて共振モードが得られるのではないかと考えている。

5. 設計結果

図 6, 7 は、それぞれ 22.3GHz 周辺、43.4GHz 周辺でのリターンロスの解析結果である。特に欲しい領域では 2 つのポートともにリターンロス-20dB 以下を達成できている事が分かる。図 8 は、22.3GHz , 43.4GHz における遠方界ビームパターンの解析結果を縦軸 EL, 横軸 Az としてそれぞれ -60° ~+60° までの範囲を 2D プロットしたものである。また図 9,10 は Az = 0° または

EL = 0° の線で切り出したグラフ（いわゆる HV-Cut パターン）であり、実線がメインビーム、点線が交差偏波を表す。E面・H面においては、交差偏波がかなり低く抑えられている事が分かる。次の図 11 は、交差偏波レベルが一番強くなる $\phi = 45^\circ$ (EL=Az) のビームパターンのグラフであり、同様に実線がメインビーム、点線が交差偏波を表している。この図から、22.3GHz,43.4GHz とともに交差偏波のピークがフレア角 12° よりも外側にあることが分かり、フレア角 11° 程度までを主に用いる光学設計を行えば、

疑似的に交差偏波特性の良いフィードとして扱う事が出来る。ただしメインビーム幅のフレア角 11° にて -12° 落ちという目標は達成できなかったもので、実際にこうした狭いフレア角での光学設計を行えるかは十分に検討する必要がある。こうした光学設計は、Ticra 社の物理光学手法計算ソフト Grasp を用いて行う予定である。

次の図 12 は、20-50GHz 間でのリターンロスのグラフである。本 QRA は 22.3GHz,43.4GHz の周辺のみで最適化した設計であったが、ここまで極端な差が出てしまうと、もはや広帯域フィードというよりは、「ダブルレンジフィード」だとか、そういった別の呼び方をした方が良いように思えた。最後の図 13 は、20-50GHz 間での交差偏波分離度(ポート間アイソレーション)、すなわち 2つの直交偏波成分をどれだけ分離できるかを表したグラフである。この図から、本 QRA はシミュレーションの段階では非常に高いレベルで直交偏波成分を分離でき、偏波分離観測における成果が期待できると考えられる。

図 3 :
20 - 50 QRA の
解析モデル図

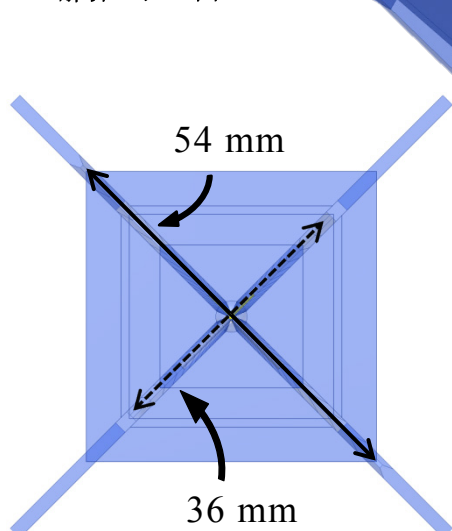


図 4 :
解析モデルを
上から見た図

図 5 : 20 -50 QRA の
バックキャビティ
部分の拡大図

図中右の半球が
プラスフィア。

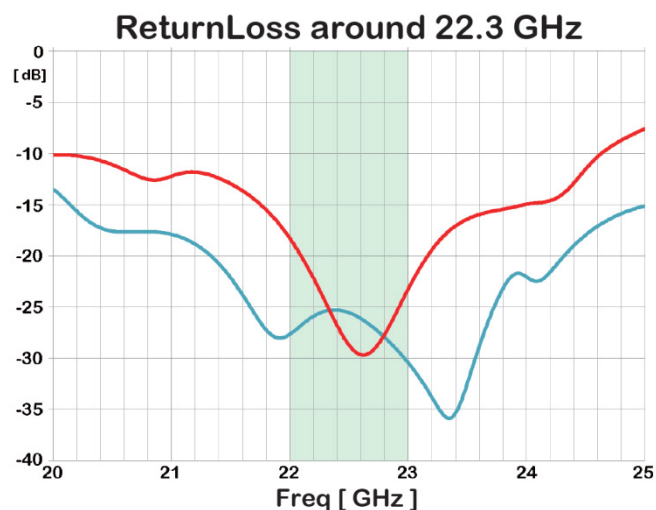
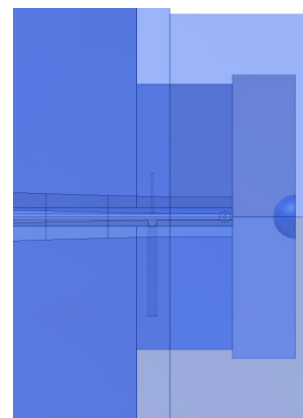


図 6 : 20 - 50 QRA の反射特性解析結果 @ 22.3 GHz
(赤 : フロントポート 青 : リアポート)

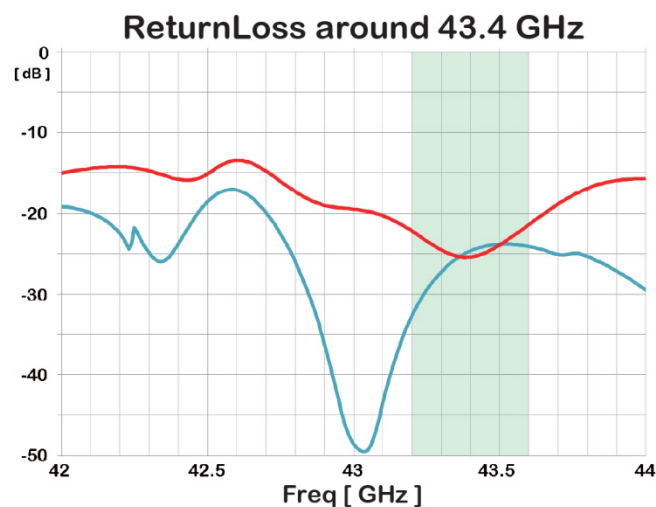


図 7 : 20 - 50 QRA の反射特性解析結果 @ 43.4 GHz
(赤 : フロントポート 青 : リアポート)

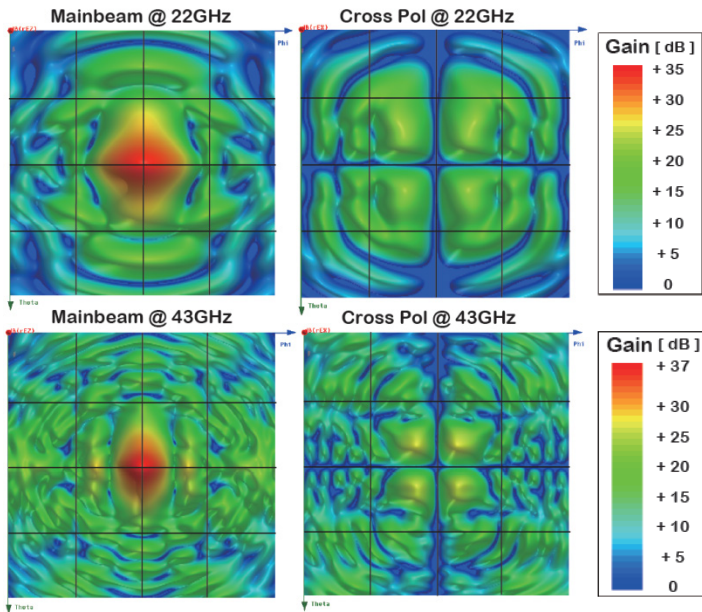


図 8 : 20 - 50 QRA の遠方界放射ビームパターンの解析結果

左がメインビームで、右が交差偏波
 上が 22.3 GHz で下が 43.4 GHz のもの。
 QRA の放射ビームパターンは、他の広帯域アンテナ
 と比べると、キレイな方ではないかと思う。

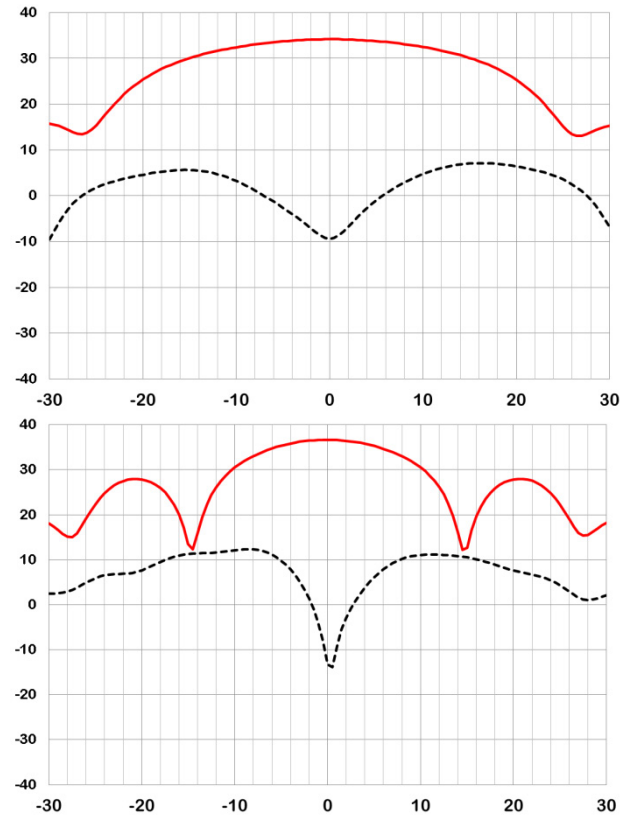


図 10 : V 面 Cut のビームパターングラフ
 (上 : 22.3 , 下 : 43.4 GHz , フレア角 $-30^\circ \sim 30^\circ$)

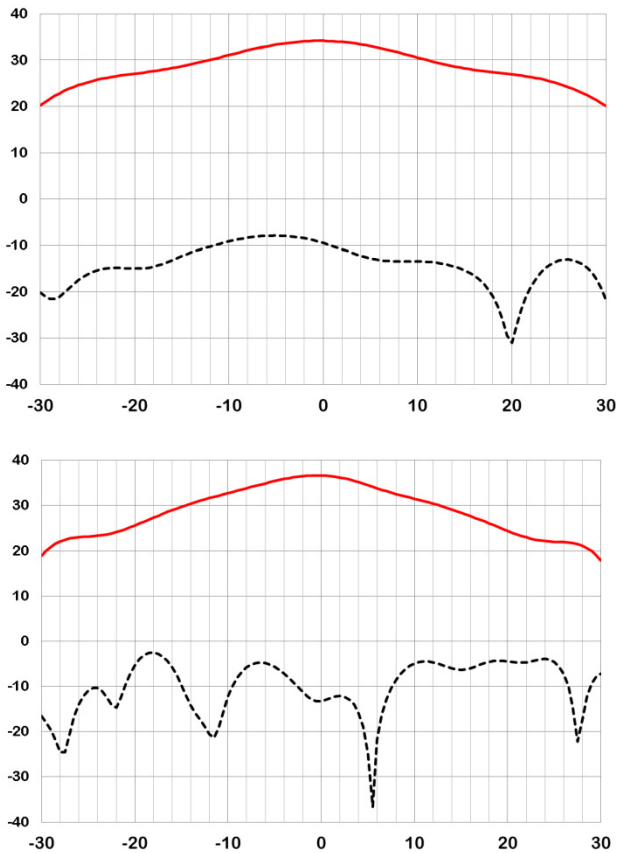


図 9 : H 面 Cut のビームパターングラフ
 (上 : 22.3 , 下 : 43.4 GHz , フレア角 $-30^\circ \sim 30^\circ$)

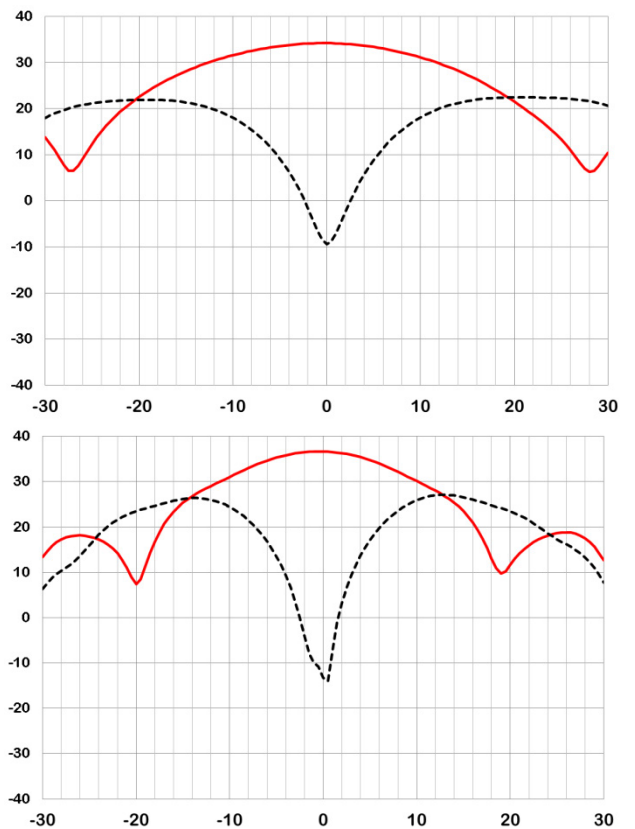


図 10 : $\phi = 45^\circ$ 面のビームパターングラフ
 (上 : 22.3 , 下 : 43.4 GHz , フレア角 $-30^\circ \sim 30^\circ$)

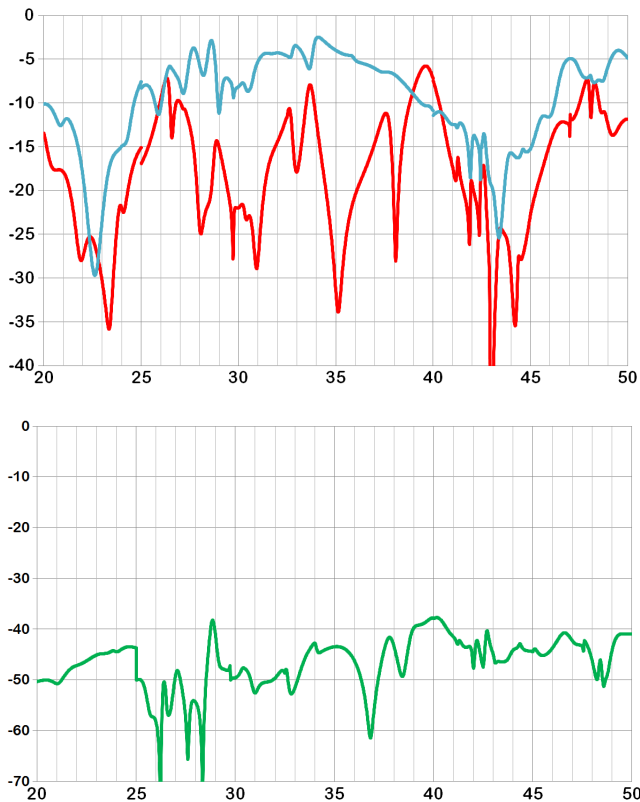


図 12 (上) : 全帯域における反射特性解析結果
 図 13 (下) : 全帯域におけるポート間アイソレーションの解析結果

6. TWA 開発の進捗報告

総開口面積 1 平方 km, の広帯域アレイの実現を目指す電波天文学の国際プロジェクト SKA(Square Kilometer Array)や測地 VLBI の次期計画 VLBI2010 において比帯域 1:10 程度の広帯域フィードの開発がすすめられている。また、広帯域 VLBI では位相校正信号を輻射するアンテナも広帯域化が必要である。これらの実現のため、昨年度に引き続き TWA(Traveling Wave Antenna)のアレイによる広帯域フィードの試作を行った (図 14)。昨年度はビームの中心に意図せぬヌルが発生した[文献 10]が、計算機シミュレーションによれば基板を回り込む電流同士のカップリングで発生した逆相の波源が原因と思われる (図 15)。今年度はアレイの構成を変え、ヌルの発生パターンが変わることを確認した (図 16,17)。しかしながら、基板の固定精度が不十分でビームの対称性が崩れてしまった。基板に切り込みを入れて噛み合わせて素子間隔を狭くしてサイドローブを抑制することを目指していたが、アレイ構成の自由度を優先して噛み合わせ部分を接着とせず、またテフロン基板の厚みが 1mm で、しかも比誘電率が 2.2 の柔らかい基板を用いたために先端部分が垂れやすくなったからである。支持構造を改善してビームの対称性の改善を図りつつ、ビーム幅が周

波数によらない構造を目指していきたい。ビーム形状の制御には素子数を増やすことが必要だが、今年度までは基礎実験であり素子数が両偏波の素子の合計で 8 素子に制限されていた。来年度以降は電力合成器の個数を増やして、より多素子の TWA アレイを構築し、ビーム形状の制御実験を行う予定である。

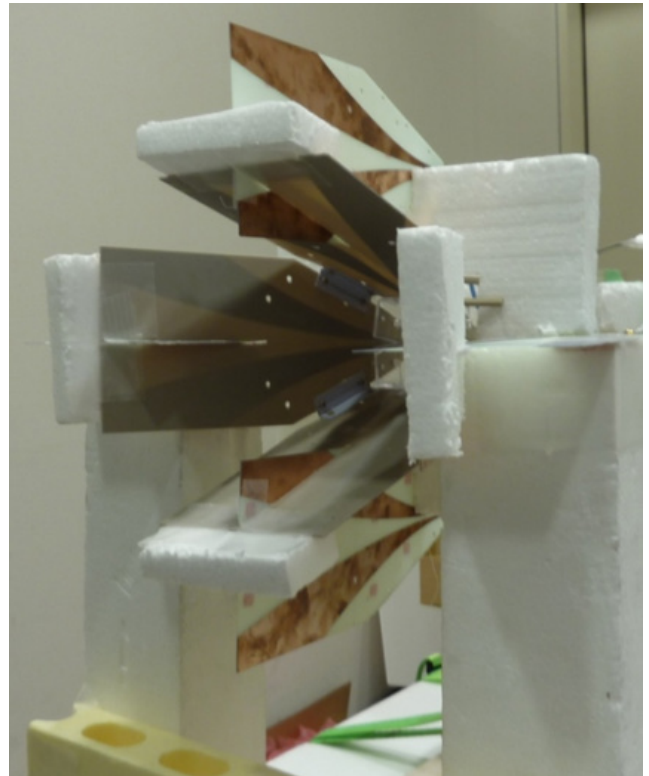


図 14 : 2012 年度に製作した 8 素子 TWA アレイ

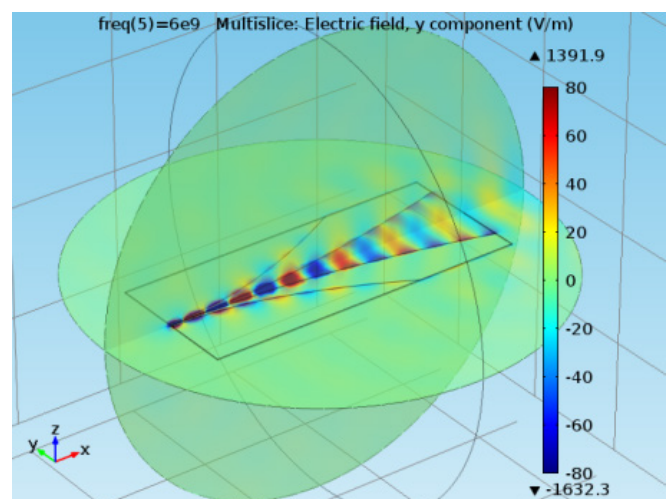


図 15: COMSOL による TWA の電磁界分布
 (比誘電率 : 2.2, 基板寸法 : $L \times W \times t$
 $= 280 \times 120 \times 1$ [mm] , 計算周波数 : 6GHz)

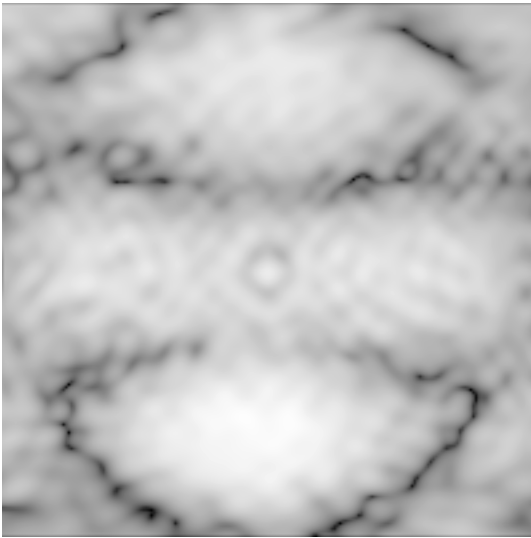


図 3. 8 素子 TWA アレイのビームパターン
(垂直偏波,測定周波数: 2GHz,100x100 度)

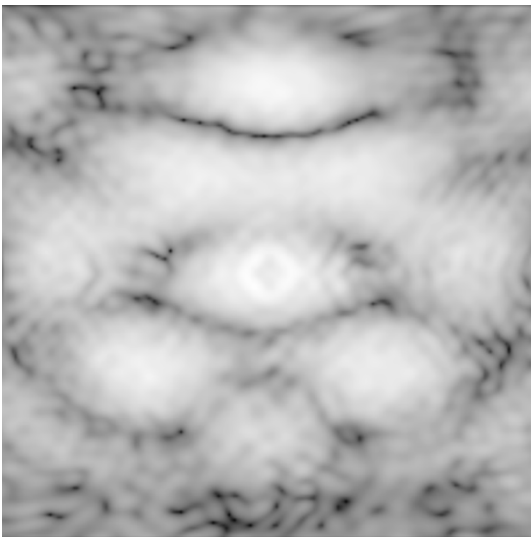


図 4. 8 素子 TWA アレイのビームパターン
(垂直偏波,測定周波数: 4GHz,100x100 度)

7. まとめと今後

我々は、電波望遠鏡のフィードアンテナとして利用可能な 20-50 GHz 帯域用クアドリッジアンテナ (QRA) の開発を行った。近年の技術躍進により、低雑音で広帯域な増幅器が開発されてきているが、これらを電波望遠鏡の受信機システムに組み込む際には、増幅器の広帯域性に対応した広帯域フィードアンテナが無ければ、その広帯域性も活かす事が出来ない。我々はその広帯域フィードの候補として、① 広帯域性を持ち、② 直交偏波成分をアンテナ自体で分離でき、③ 出力ポート数が最小限である QRA に注目し、その欠点のほとんどを光学系によって上手く補正することが出来ると考えた。そこで、光学系では補正できない反射損失などに焦点を絞って非常に高性能な QRA を設計・製作することにした。

設計した QRA は、シミュレーション上ではリターンロス-20dB 以下を 22.3GHz,43.4GHz の周辺領域にて達成し、交差偏波混入レベルもピーク値で-10dB 以下を達成した。これらの値は QRA としてはかなり良い値であり、また 40GHz を超える領域における QRA の実用化という観点においても本開発は画期的であるといえる。現在は、設計した QRA の試作・測定評価を進めている。この結果を踏まえた上で、次に行うべき開発を順次進め、ゆくゆくは望遠鏡への搭載を目指す。

8. 問合せ先

大阪府立大学 理学系研究科 宇宙物理学研究室
〒599-8531 大阪府堺市中区学園町 1 番 1 号
A13 棟 (理学部棟) 2F

E-mail : ogawa@p.s.osakafu-u.ac.jp
s.y.hasegawa@p.s.osakafu-u.ac.jp
ujihara@hal.mtk.nao.ac.jp

文 献

- [1] Weimin Sun 他、” Analysis and Design of Quadruple-Ridged Waveguides ”, IEEE Transactions on microwave theory and techniques , Vol.42 No.12 , December 1994
- [2] Gordon M. Coutts “ Wideband Diagonal Quadruple-Ridge Orthomode Transducer for Circular Polarization Detection ” IEEE Transactions on antennas and propagation , VOL.59 No.6 , June 2011
- [3] Jain Yang 他、 “ Cryogenic 2-13 GHz Eleven Feed for Reflector Antennas in Future Wideband Radio Telescopes ” , IEEE Transactions on antennas and propagation , VOL.59 No.6 , June 2011
- [4] 氏原秀樹 他、”電波望遠鏡用広帯域フィードシステムの基礎開発”、電子情報通信学会技術報告、SPS2009-11 (2010-3)
- [5] Vicente Rodriguez , “Recent improvements on dual-ridged horn antennas” , Interference Technology.com , EMC DIRECTORY & DESIGN GUIDE 2006
- [6] Vicente Rodriguez , “New broadband EMC double - ridge guide horn antenna” , www.rfdesign.com , Circle 39 or visit freeproductinfo.net/rfd , May 2004
- [7] Vicente Rodriguez , “On the Radiation Patterns of Common EMC Antennas” , Interference Technology .com , EMC DIRECTORY & DESIGN GUIDE 2011
- [8] Christian Bruns 他、”Analysis and Simulation of a 1-18 GHz Broadband Double-Ridged horn Antenna” , IEEE Transactions on electromagnetic compatibility , Vol.45 , No.1 , February 2003
- [9] Zhongxiang Shen 他、 ”A New Dual-Polarized Broadband Horn Antenna ” , IEEE Antennas and wireless propagation letters , Vol.4 , 2005
- [10] 石井敦利 他「クワッドリッジホーンアンテナ(広帯域フィード)を用いた電波望遠鏡の測地 VLBI における性能評価」 IVS TDC Symposium 2009 , http://www2.nict.go.jp/aeri/sts/stmg/ivstdc/siryou/2009/ivstdc_sympo/TDCSympo090218ishii.pdf
- [11] 電波天文用広帯域フィードの開発(II), 氏原秀樹ほか, 信学技報 WPT2011-36(2012-03) , pp57-60