

「万能アンテナ」の開発

氏原 秀樹^{1*}

Development of Universal Antenna

Hideki UJIHARA^{1*}

概要

周波数や用途の異なる様々なアンテナの兼用を目指して広帯域アンテナを開発している。周波数帯域だけでなくビーム幅の選択肢も広いため、新たなフィードを設置するゆとりがない古い電波望遠鏡や大型カセグレンアンテナのアップグレード、探査衛星の小型化・多機能化など様々なアンテナ光学系のフィードアンテナに適応可能である。本稿ではこれらの広帯域フィードを利用した大気中の水蒸気分布の精密観測を目指した次世代ラジオメータ、その機能に加えて VLBI 観測のできる広帯域受信機、旧来の大型アンテナのアップグレードを目指した広帯域フィードの開発、低周波側の RFI(Radio Frequency Interference)による混変調雑音を急峻な遮断特性で抑圧する OMT(直交モード変換器)の開発と将来構想について述べる。

1. はじめに

リモートセンシングや宇宙測地、電波天文をはじめとする科学観測や通信、無線送電などアンテナの用途は多岐に渡る。その目的ごとに周波数を定めアンテナを設計するので、例えば電波望遠鏡に観測バンドを追加する場合、新たなフィードアンテナ(焦点面に置くアンテナ)を搭載できる場所があるかどうか問題になる。人工衛星ではそもそも容積や重量に限りがあるので設計時に観測バンドを厳選するし、打ち上げ後の改修は無理である。このような制約を解消すべく小型・軽量でビーム幅の設計自由度が高い広帯域フィードの開発を行っている。

科学観測では感度が重要なので、主鏡面を満遍なく照らして高い開口能率が得られ、さらに交差偏波やサイドローブが低く軸対称性が良いビームが得られるフィードが望ましい。この点でコルゲートホーンが好まれている(図 1)。その名の通りホーンの内壁に動径方向に彫った多数の溝を持つため、その加工コストと、低周波では溝に応じた壁の厚みによる重量、高周波では加工精度が問題となる。

コルゲートホーンの基本モード(HE11)に似たビームは、例えば円錐ホーンの開き角を喉元から段階的に変化させて適切な位相差と振幅比の高次モードを発生させ、開口面で基本モード(TE11)に合成することでも実現できる。これはマルチモードホーン¹⁾と呼ばれ、複モードや 3 モードホーンあたりまでは目にすることがある。コルゲートホーンのような内壁の多数の溝がないので薄肉軽量に作れる。しかしモードごとに位相速度が異なるため広帯域化が難しく、コルゲートホーンより帯域は狭かった。他方、開口面コルゲートホーンやクワッドリッジホーンは比較的帯域が広いがビーム幅も広い。そのためパラボラアンテナの主焦点には使えても、カセグレンアンテナでは焦点面のフィードから見た副鏡の視直径が小さい(=焦点距離 f /口径 D が大きい)ので適さない。

2022 年 8 月 24 日受理。

¹⁾〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所

* E-mail: ujihara.hideki.2t@kyoto-u.ac.jp

帯域もビーム幅の設計自由度も広いフィードを作るため、設計原理を考えてみる。アンテナのビーム形状は開口面の電磁界分布を方位角でフーリエ変換すれば求まり、そのビーム幅(=角度分解能)はおおよそ波長 λ /口径 D となる。フィードや副鏡、主鏡の物理的な寸法は固定値だが、高次モードをうまく合成すればフィード開口面での電磁界の分布範囲を等価的に波長に比例するようにでき、広い帯域にわたってビーム形状や幅の変動を抑えられるはずである...と書くと簡単そうだが、実現は難しい。

マルチモードホーンでは基本モードに対する所望の振幅比と位相差をもつ高次モードを管内の開き角の変化部で発生させるが、その適切な角度と位置は解析的に綺麗には解けない。なので数値計算で設計するのだがモード数が増えれば検討すべき形状パラメータも増え、その組み合わせの数が膨大になる。しかもそもそもフィードの開口径は使用する最大波長に比例し、軸長もおおよそ比例するのに、計算に必要なメッシュの解像度は最小波長で決まる。よって仮に最大最小周波数 10 を目指すなら、通常のフィード(周波数比 1.2 程度)に比して 10^3 のメモリが要る。計算時間はメッシュ要素数の 3 乗に比例するので、ビームの狭い(=開口径の大きな)広帯域フィードアンテナの設計は非常に難しくなる。

というわけで 3 モード目までは市販の設計ソフトに指定方向の交差偏波極小条件を加えて望ましい形状の探索を自動化し、フィードの構造は高次モード発生部とビーム幅の調整部分を分けて考え、4 モード目以降はおおよそその規則性をもとに人間が最適化することにして組み合わせの探索範囲を大幅に狭めることにした。得られた設計を始祖として段階的に帯域を広げ、ビームが崩れると逐次モードを増やして修正していき、前職の NICT 鹿島において日本とイタリアの間で光格子時計を精密に比較する VLBI 実験「Gala-V」で使う鹿島 34m アンテナ用の広帯域フィード(6.5-16GHz)をマルチモードホーンで実現した。しかしそれ以上の帯域幅(3.2-16GHz)ではフィードの長さや構造が難点だった。

そこで前述のマルチモードホーンの考え方と、加工が容易で軸長が短い反面、ビームが広い開口面コルゲートホーン、レンズによるビーム形状の補正を組み合わせることにした。このように問題を適度に分割して見通しをよくしたことで、カセグレンアンテナ用の狭いビーム幅のフィードもパラボラ用の広いビーム幅のフィードも設計できる柔軟性が得られた。その過程で、工作精度にゆとりを持たせた設計としたことが実は重要である。アンテナの空間分解能が同じなら、周波数が高い方が口径は小さくて済む。しかし工作精度や組み立て精度には限界があるので、原設計が簡素な構造であるほど、部品点数が少ないほど高周波化しやすい。

この隠れた(?)利点を活かして本研究では、課題 1：大気中の水蒸気観測と同時に VLBI 観測ができる広帯域アンテナ(16-64GHz：図 1 に初回試作のフィードを示す)、課題 2：大型電波望遠鏡用の非常に狭いビーム幅(副鏡視直径 15 度程度)の広帯域フィード(1.5-15.5GHz)の開発を目指すこととした。

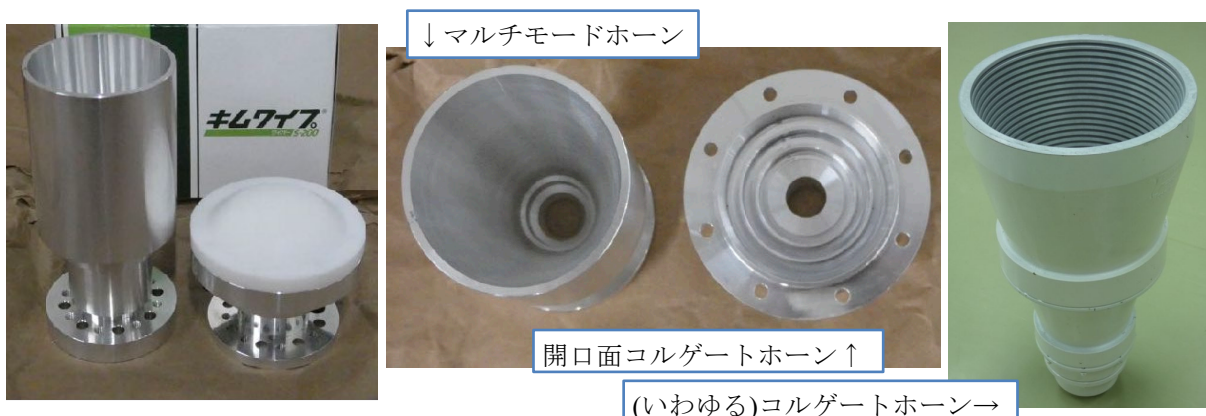


図 1.課題 1 用の広帯域フィードホーン試作品 2 種(左図、中図)と通常のコルゲートホーン(右図)

2. 広帯域アンテナの開発

VLBI(超長基線干渉計)では原子時計を位相基準として遠く離れた複数のアンテナで同じ電波源からの電波を受信し、その相関処理により各アンテナ位置の精密測定や天体の高解像度観測を行う。測地 VLBI では分解できずに点源に見えるほど遠方の活動銀河核を用いる。従来は S/X(2.2GHz 帯/8GHz 帯)の 2 バンドを用い、その受信帯域も数 10-数 100MHz 程度であった。各アンテナで受信した白色雑音的な放射の遅延時間差からアンテナ位置を求める観測なので、受信帯域が広いほど感度が向上する。そこで次世代測地 VLBI の VLBI2010/VGOS²⁾では当時開発されていたビーム幅の広い広帯域フィード(1-14GHz)を搭載したアンテナを新設し、数 GHz 帯域幅による宇宙測地の高精度化を計画した。電波天文では高感度・多波長観測を目指し、かつ多数のアンテナを合わせて合計 1 平方 km の大集光力を目指す SKA(Square Kilometre Array)計画³⁾がある。これも既存のビームの広い広帯域フィードに合わせた光学系のアンテナを新設する。ゆえに Gala-V で開発したビーム幅の狭い広帯域フィード⁴⁾は従来のカセグレンアンテナ用として世界初で、しかも交換前の 5GHz 帯コルゲートホーンより小さく作れた。

VGOS や SKA アンテナでは焦点面に置けるフィードは 1 個だけであり、複数のフィードを置いて同時に多点観測することは想定されていないが、大型電波望遠鏡で一般的なカセグレン光学系は良像範囲が広くて焦点面に多数のフィードを並べられる利点がある。コンパクトな広帯域フィードがあれば多波長同時観測の実現だけでなく掃天観測などの効率も向上できる。

2.1 広帯域 VLBI 観測兼用次世代マイクロ波ラジオメータの開発

大気中の水蒸気観測に使う市販のラジオメータの受信機は、通常は常温である。KUMODeS⁵⁾では 22GHz 帯の水蒸気と 50GHz 帯の酸素の放射をそれぞれのフィードに前置した周波数選択膜で分けて受信するが、22GHz 帯は初段 LNA(低雑音アンプ)を冷却して受信機雑音を下げて高感度化を図った。

これらを課題 1 では 1 本の 16-64GHz の広帯域フィードにまとめたことで周波数選択膜に起因する視差調整が不要になった。冷却容器も小型化できるだけでなく 30GHz 帯の雲中の水滴も観測でき、他の周波数では電波天文観測や人工衛星の軌道決定、通信なども行える。

ただし現時点では全帯域を 1 個で受信できる冷却可能な LNA がないため、広帯域フィードに繋いだ広帯域 OMT(直交偏波分離器)で直交する直線 2 偏波をわけ、矩形導波管で低域側 LNA(公称仕様 16-28GHz あるいは 19-32GHz)に、1.85mm コネクタで高域側 LNA(26-62GHz)に輸入している(図 2, 3)。

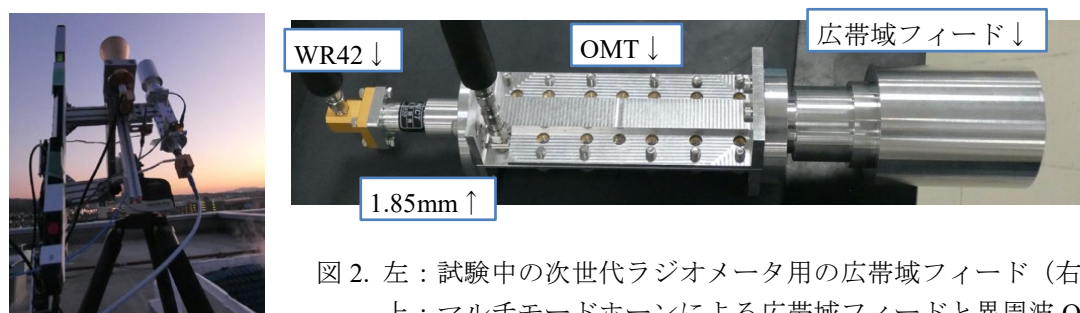


図 2. 左：試験中の次世代ラジオメータ用の広帯域フィード（右側）
上：マルチモードホーンによる広帯域フィードと異周波 OMT

この OMT の高域側ポートは将来の冷却広帯域 LNA を期待して同軸接続で設計したため、導波管内部のプリント基板アンテナから grounded coplanar 線路を介して当該偏波を取り出している。当初は性能が不安定だったが NICT ミリ波棟のネットワークアナライザで 67GHz までの伝送特性の測定を行い、LNA の固定金具を作成して改善を図った(図 4)。この OMT をつけた広帯域フィードのビームパターンは軸対称に近く、管内のプリント基板のパターンの非対称による変形は小さい(図 5)。

ここに用いた grounded coplanar 線路はアンプを直接実装できて量産しやすい反面、導波管に比べれば伝送損失が大きいため、線路脇のビア径とピッチを極力小さくした改良版を設計中である。しかしクワッドリッジ導波管型 OMT も製作の目処が立ったため、同時に設計中である(2.3 節)。

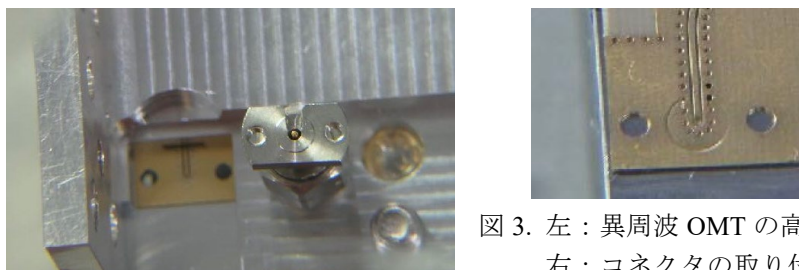


図 3. 左：異周波 OMT の高周波ポートと 1.85mm コネクタ
右：コネクタの取り付け跡

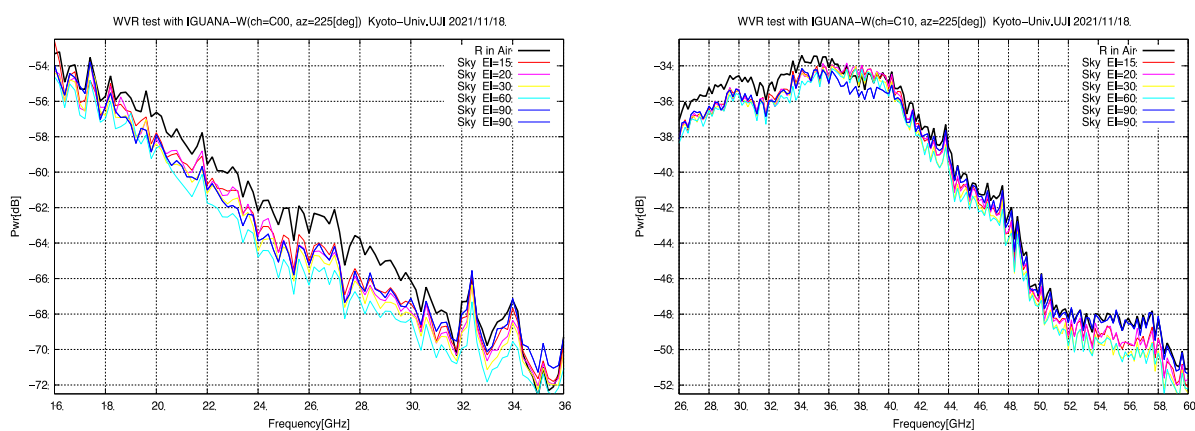


図 4. それぞれのポートで測定した電波吸収体(黒：常温)や様々な仰角での大気放射からの受信電力
ここから電波吸収体の熱放射を基準に、大気放射の強度、水蒸気の密度を求めていく

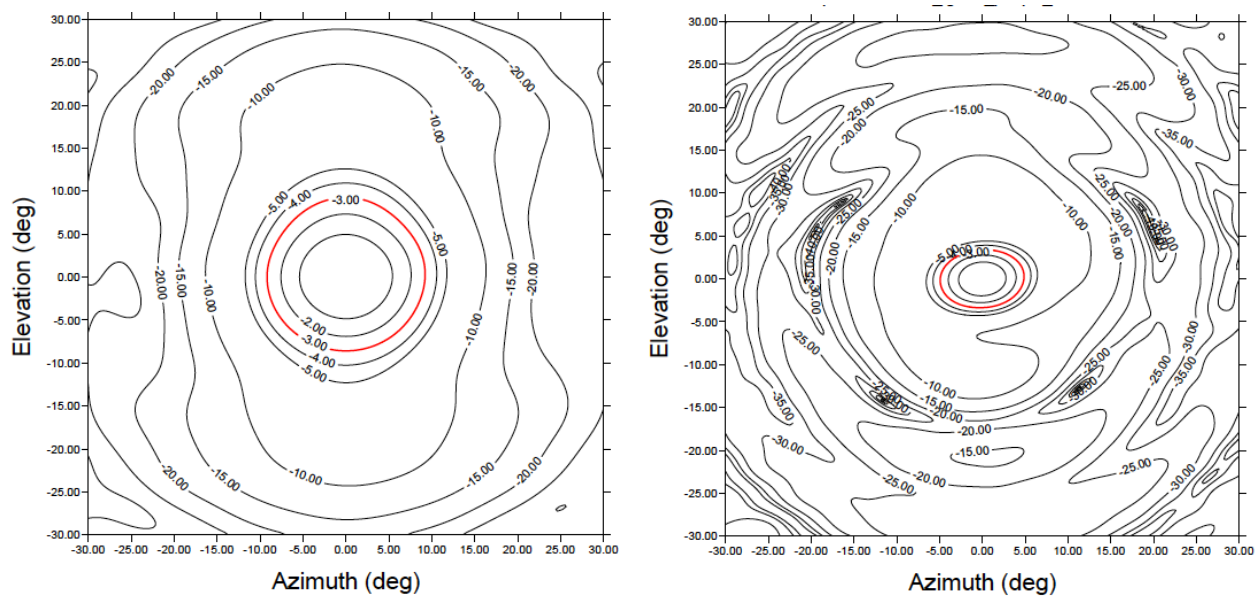
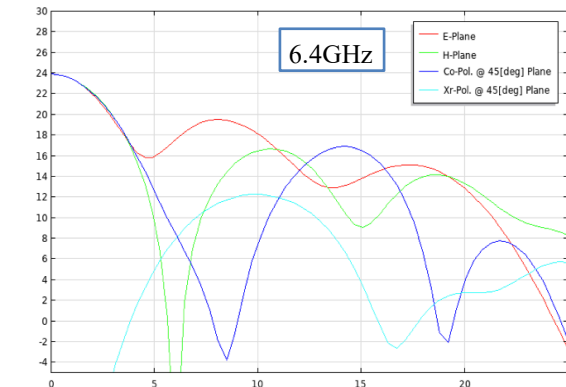
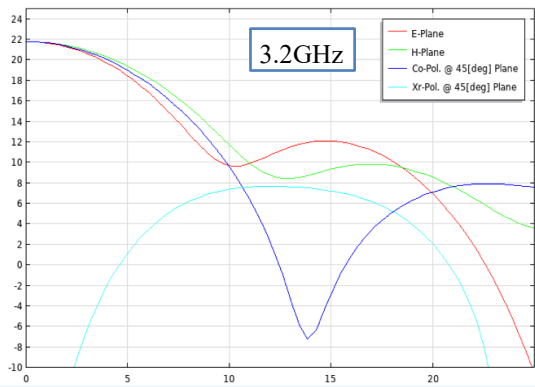


図 5. METLAB で測定した広帯域フィードの高周波側ポート側のビームパターン(左:22GHz,右:43GHz)

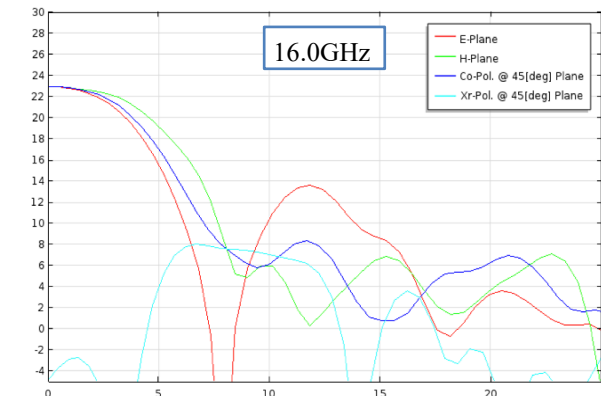
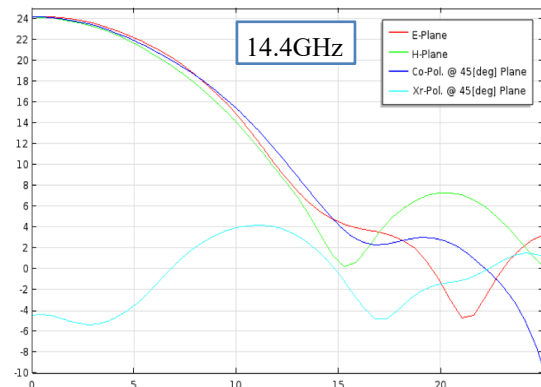
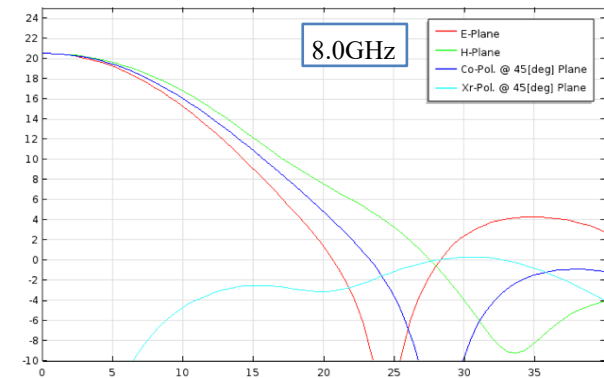
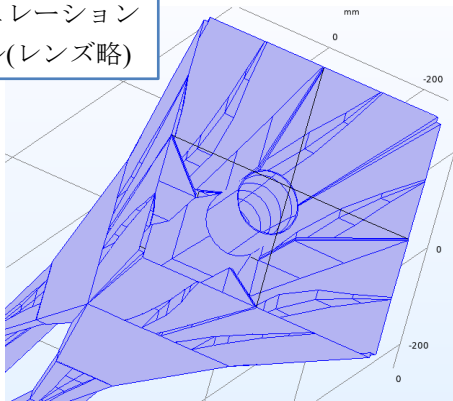
2.2 大型カセグレンアンテナ用広帯域フィード

課題 2 は副鏡の視直径が 15 度程度のアンテナ光学系に搭載し、最大最小周波数比 10 を目指しているため前人未踏である。様々な構造を試したが、ビーム幅が細いため鹿島 34m 用広帯域フィードの初期案を発展させた。外側ホーンの形状が複雑な反面、例えば 6.5GHz を境に上下の周波数帯で最適な LNA を選べる利点がある同軸ホーンとなっている。構造の複雑さと周波数範囲の広さから当時のメモリ量や計算速度では検討不能だったが、現在の計算機（メモリは 8 倍の 1TB、CPU は 8 倍速い）で再検討したところサイドローブが低減し、メインローブのビーム形状も改善でき、実現の見通しが得られている(図 6)。外側ホーンの各偏波で 2 個使う導波管ポートの波面が内部でうまく合成できるよう、ホーン内部のリッジで制御できたためと考えている。



外側ホーンで作るビームの計算例

シミュレーション
モデル(レンズ略)



内側ホーンで作るビームの計算例

図 6. 最大最小周波数比=10 を目指した広帯域フィードとシミュレーション結果

2.3 遮断特性の急峻な OMT(直交モード変換器)の開発

前述(2.1 節)のとおり OMT は、受信であればフィードから入ってきた直交 2 偏波を分離し、それぞれの初段アンプに伝送する。円偏波と直線偏波を変換するのに必要な 90 度の位相差あるいは 1/4 波長の遅延を広い周波数にわたって低損失で正確に実現するのがアナログ回路では困難なので、直線 2 偏波受信としている。円偏波での観測が必要な場合は A/D 変換後に計算機内で合成する。

受信アンテナの感度には初段アンプの内部雑音や初段アンプの前の損失が大きく影響するので、初段アンプに前置される OMT も低損失である方が好ましい。Gala-V ではクワッドリッジ導波管による OMT で直線 2 偏波受信とし、同軸端子(SMA)で初段アンプを接続していた。OMT 内部は主にワイヤ放電加工機で加工したが、課題 1 での検討の結果 1.85mm の端子と最小径のワイヤを使えば上限 64GHz 程度でも製作できる目処が立った。導波管入力 LNA を直接つなぐことはできないが、前述の grounded coplanar 線路を利用した OMT より高周波での伝送損失を大幅に減らせる。

広帯域アンテナ周辺の RFI(Radio Frequency Interference)は、飽和に至らない強さでも初段アンプの混変調雑音を招くので、広帯域アンテナの設置場所によっては対策が必要である。そこで内部構造による急峻なハイパスフィルタ特性を持つ OMT を設計しているが、リッジの角や端子との接続部の不整合、ホーン部分での反射を組み合わせるとノッチフィルタ特性を持たせることもできる。例えば NICT 小金井本部の 2.4m アンテナでは、3.5GHz 以下の周辺の通信波に加えて近傍の衛星双方向実験用アンテナの通信波(14GHz 付近)を抑圧できるかもしれない(図 7)。課題 1 の広帯域観測用 OMT では搭載アンテナの受信機の局部発信器(16.8GHz)から漏れ込みを遮断したい。2 つのポートで特性が揃う必要はないが、可能なら 24GHz 帯のミリ波レーダや 28GHz の 5G 通信の抑圧もできるかもしれない(図 8)。

Gala-V 実験⁹⁾の当初は 3.2GHz 以下だけを切れば十分と思っていたが、システム雑音を測定したところ想定よりも高かった。電波環境は時代とともに変化していくので、課題 1 の実証実験に並行して OMT による混変調雑音の低下を目指している。

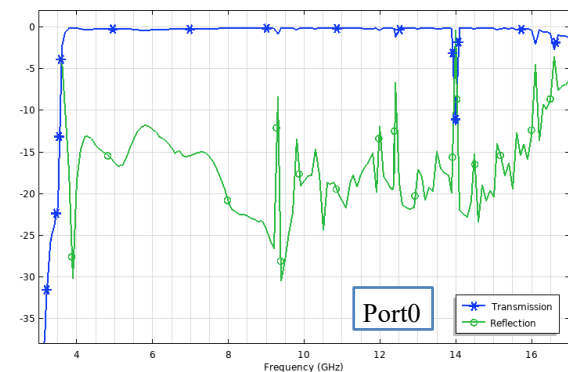


図 7. 左 : Gala-V 用クワッドリッジ導波管型 OMT(3.2-16GHz)

右 : RFI 抑圧のためのシミュレーション例(4-16GHz, 青:伝送損失[dB], 緑:反射損失[dB])

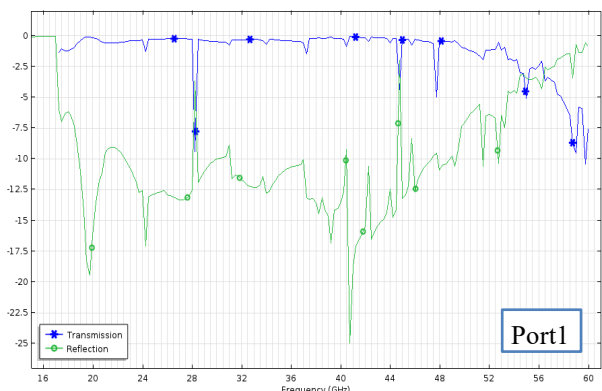
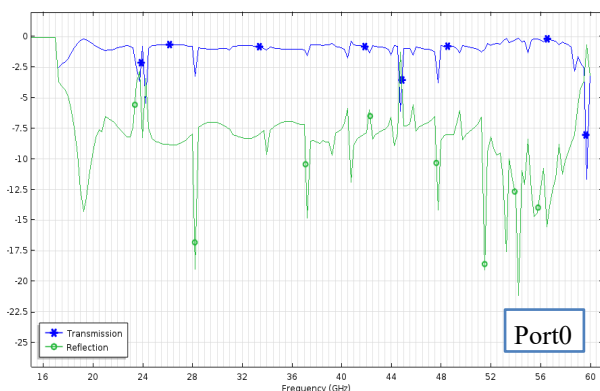


図 8. 課題 1 用 OMT のシミュレーション例(16-60GHz, 青:伝送損失[dB], 緑:反射損失[dB])

3. まとめと今後

様々な用途に使える広帯域アンテナと、それと組み合わせて使う急峻な遮断特性を持つ OMT の開発について述べた。紙面の都合でビーム整形用のレンズ形状と、パラボラ主焦点や SKA を目指したビーム幅の広いフィード、アンテナ光学系の話は割愛した。

課題 1 の広帯域フィードは軽量な 90cm カセグレンアンテナに搭載し、高空間分解能の可搬局として実証実験を行う予定である。VLBI 観測方向と同一視線上の水蒸気の精密測定による VLBI 観測の誤差低減が目標だが、まずは従来のマイクロ波放射計では不可能な地平線ギリギリの低仰角までの観測を NICT 鹿島で行う。臨海工業地帯のそばなので海と陸、工場の煙突の煙の水蒸気分布の観測実験を行う。水蒸気ラジオメータとしては大気モデルへの貢献⁷⁾や火山の水蒸気噴出量の測定などへの応用も考えている。GNSS を利用した観測と違い、見たい方向のデータが得られる。課題 2 の超広帯域フィードは実際の設置場所の状況に応じて形状を最適化していきたい。

これらは電波天文でよく使われるコルゲートホーンと違って動径方向に多数の溝がなく、OMT も曲線加工を極力排した単純な構造なので高周波化しやすい。特にマルチモードホーンは ASTRO-G/VSOP2 衛星 43GHz 帯ホーンを GFRP で試作した例があるが、CNF(セルロース・ナノ・ファイバ)による複合材を使えば環境に優しく、さらに軽量にできるだろう。CFRP ほどの鏡面精度は出ないかもしれないが、50-100GHz あたりくらいまでなら実現できそうに思う。CNF(図 9)は CFRP と異なり電波を透過するので、まずは主鏡を遮る副鏡の支持構造に使ってみる予定である。

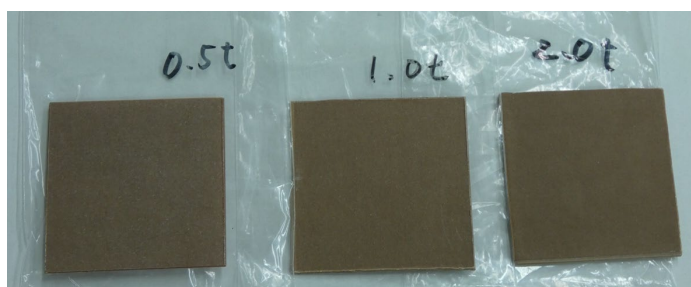


図 9. 誘電率・誘電損失測定用 CNF 薄板サンプル

本項では受信アンテナとしての開発を述べた。もちろん送信にも使えるが、まだニーズがない。そもそも現状の通信に使うバンド幅を遥かに凌駕しているし、アンテナ自体が広帯域なので技適に合格するためには入念な高調波対策が必要と思われる(地球と通信しなければ条件を緩められるかもしれないが)。ただし広帯域化のために使うリッジの間に電場が集中するので、大電力の送信には向かないと思われる。

というわけで、将来的にはリモセン衛星や外惑星の衛星を探索する小型衛星間の送受信・送受信アンテナへの応用、例えば親機へのデータ送信時に親機から必要な電力をもらうとか、永久影のなかの探索など電力事情が厳しい科学観測に提案したいと考えている。このような広帯域アンテナをソフトウェア無線機と組み合わせれば、衛星の打ち上げ後でも観測・送受信バンドを幅広く変えられるのは今までにないメリットだろう。SETI みたいに相手の送信周波数の決めようがない観測を静かな月の裏側で黙々と行うにはコストパフォーマンスが良いはずである。

謝辞

本研究は科研費 18H03828(代表：市川隆一)および 21H04524(代表：氏原秀樹)の支援および Max Planck 電波天文学研究所から計算機の借用を受け、測定は生存圏研究所 METLAB および NICT 先端 ICT デバイスラボの計測設備を利用した。

参考文献

- 1) 電子情報通信学会「知識の森」, https://ieice-hbkb.org/portal/doc_index.html
第4群(通信工学)-2編(アンテナ・伝搬)-6章, https://www.ieice-hbkb.org/files/04/04gun_02hen_06.pdf#page=3
- 2) IVS Technology VGOS System Development, <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-general.html>
- 3) Square Kilometre Array, <https://www.skatelescope.org>
- 4) Ujihara H., Takefuji K., Sekido M., Ichikawa R. (2018), “Development of Wideband Antennas.”, In: Freymueller J., Sánchez L. (eds), International Symposium on Advancing Geodesy in a Changing World, International Association of Geodesy Symposia, vol 149, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/1345_2018_41
- 5) Nagasaki T., Araki K., Ishimoto H. *et al.*, “Monitoring System for Atmospheric Water Vapor with a Ground-Based Multi-Band Radiometer”, Meteorological Application of Radio Astronomy Technologies. *J Low Temp Phys* 184, 674–679 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10909-015-1412-9>
- 6) Pizzocaro M., Sekido M., Takefuji K. Ujihara H. et al., Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry, *Nature Physics*, October 2020, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01038-6>
- 7) 京都大学防災研究所年報第30号B-1昭62. 4, ” 大気境界層の気温高度分布の測定のためのマイクロ波放射計について”, 堀口光章・光田寧

著者プロフィール



氏原 秀樹 (Hideki UJIHARA)

<略歴> 1994 年京都大学理学部卒業／2001 年総合研究大学院大学数物科学研究科博士後期課程修了(博士(学術))／同年国立天文台ポスドク／2009 年情報通信研究機構ポスドク／2021 年京大生存圏研究所ミッション専攻研究員、現在に至る。

<研究テーマと抱負>ブレイクスルー的な観測機器開発。

<趣味など>映画と音楽、写真とネコとダンスと SF。