称号及び氏名	博士(理学)　山﨑　康正
学位授与の日付	2024 年 3 月 31 日
論　文　名	Study of an optical system with wide frequency coverage for radio astronomical applications (電波天文学への応用に向けた広帯域光学系の研究)
論文審査委員	主査　大西　利和 副査　久保田　佳基 副査　三浦　大助 副査　前澤　裕之

論文要旨

Study of an optical system with wide frequency coverage for radio astronomical applications

(電波天文学への応用に向けた広帯域光学系の研究)

Yasumasa Yamasaki 山﨑康正

【研究背景】

新しいサイエンスを開拓する上で、同時に受信可能な周波数帯域を広げること (広帯域化)は装置への強い要求の一つである。大幅な効率向上だけでなく、受信機数を減らすことによるメンテナンス性の向上や大気による系統誤差の低減など、メリットは大きい。世界最高性能を誇る ALMA のロードマップにおいて、広帯域化は 2030 年台へ向けた開発項目の一つとして掲げられており、国際的に開発が進められている。私は広帯域受信の利点を活かした次の 2 つのサイエンス (1)銀河面を広域に渡って分布する分子雲の物理量導出 (2)星形成極初期の観測による星形成の駆動機構の解明を目的として、開発研究を行った。さらに広帯域化に伴って生じる問題点を取り上げ、原因となる導波管の電磁界分布を定量化する方法を開発した。

【210 – 375 GHz 帯 コルゲートホーンの開発】

1.85m 電波望遠鏡を運用する中で、銀河面に存在する ^{12}CO, ^{13}CO, C^{18}O (J = 2–1)のサーベイ観測を実施してきた。異なる遷移によって放射される CO 輝線の比や、複数の同位体輝線の比をとることで、物理量が導出可能であることから、230 GHz 帯の CO (J = 2–1)、345 GHz 帯の CO (J = 3–2)を同時観測するための広帯域受信機 (図 1)を開発した (Masui et al. 2021)。私は特にフィードホーンを開発した。

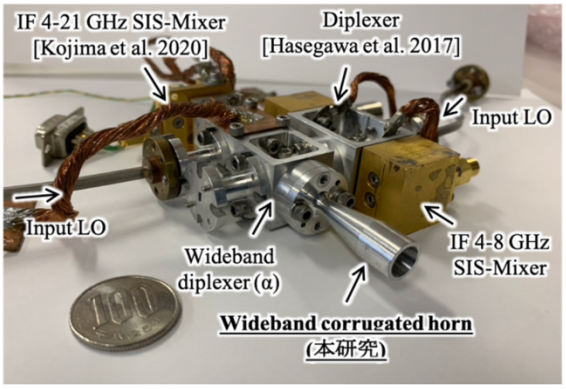

図 1. 1.85m 鏡 新受信機。

円形導波管を給電部としたフィードホーンを放射側から考える。円形導波管の基本モード TE_{11} を開口側から放射すると、非対称で高交差偏波強度なビームとなるため、非効率である。1/4 波長の溝深さを持った円形導波管は、対称で無交差偏波な HE_{11} を基本モードとする。これをフィードとしたコルゲートホーンを採用した。設計において重要なのは、導波管とのインピーダンスマッチングと伝播モードの変換の両立である。基本的にはモード変換部と呼ばれる導波管側の 5 つ程度の溝において、深さを 1/2～1/4 波長まで緩やかに変化させることで可能となる。ところが要求される比帯域 56 %をカバーするためには導波管直径を小さくして TE_{11} のカットオフ周波数を下げる必要がある。導波管直径が小さい領域では同時に管内波長が急激に変化してしまうため、インピーダンスマッチングが崩れるので、深さだけでなくリッジ幅/ピッチ比を緩やかに変化させることでインピーダンスマッチングとモード変換の両立が広帯域に可能となる (Zhang 1993)。しかし、Zhang の設計では、導波管側の溝の深さ/幅比が 10 を超えるため、210 – 375 GHz (波長 0.8

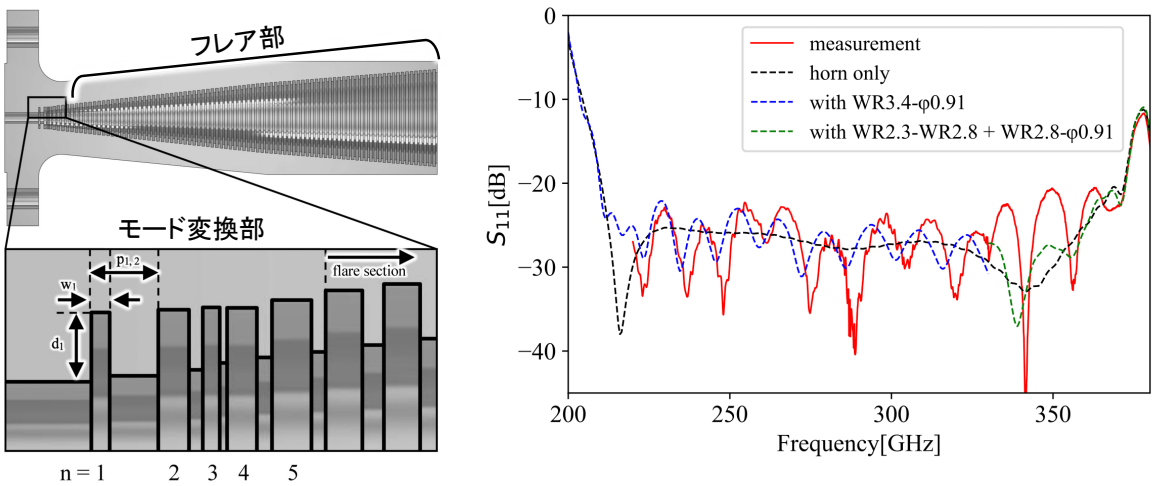

図 2. ホーンモデルの断面図 (左)。枠内はモード変換部である (左下)。反射損失の結果 (右)。点線はシミュレーション、赤実線は測定結果を表す。

– 1.4 mm)での製造は不可能である。そこで、設計の際に製造誤差と擦り合わせた現実的な条件(深さ/幅比 4 以下)のもと、実現可能な解があるかどうか探索した。モード変換部の溝深さ、幅、ピッチ、導波管直径をパラメトリック解析した結果、反射損失 20 dB 以上、交差偏波強度–25 dB を実現する解を見つけた。さらに、フレア部 (モード変換部以降)の深さに分布を持たせることによって交差偏波強度–30 dB まで改善することが分かった。製作したコルゲートホーン測定の結果、220 – 372 GHz に渡って反射損失が 20 dB 以上、交差偏波が–25 dB 以下であることを確認した (図 2 (右))。

開発したシステムを望遠鏡に設置し、CO (*J* = 2–1, 3–2)の同時観測に成功した。天体観測によるビーム測定の結果、ビームサイズは 180” (230 GHz), 134” (345 GHz)と、設計値 172” (230 GHz), 112 “ (345 GHz)よりも大きい値となった。副鏡位置のずれを 0.7 mm としてシミュレーションすると、2 %の範囲内で一致した。

【72 – 116 GHz 帯 誘電体レンズの開発】

星形成の駆動条件は、未解決問題の一つである。我々は重水素濃縮度を用いた星形成直前の段階の分子雲コアの年代測定法によって、これを探求する計画を推進している。そのためには、70 GHz 帯輝線を放射する重水素化分子 (e.g., N_2D^+)、80 GHz 帯に存在する非重水素化分子 (e.g., N_2H^+)、そして基本構成要素を反映する 100 GHz 帯の CO 輝線を効率的に観測する必要がある。それらをすべてカバー可能な 72 – 116 GHz 帯 7 ビーム受信機を開発して野辺山 45m 鏡に搭載し、高解像度で高効率な観測を目指した。私は特に誘電体レンズ (図 3)を設計し、反射防止構造がビームパターンや雑音温度といった RF 性能に与える影響を調査した。

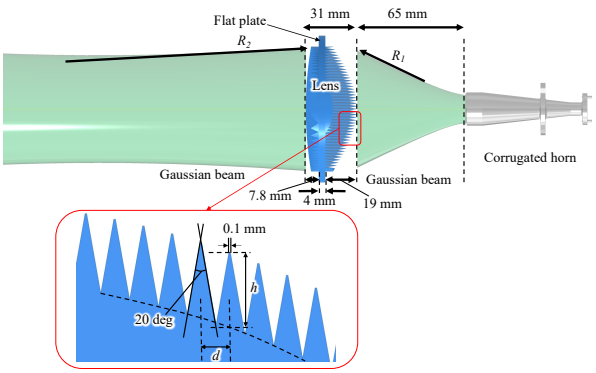

図 3. レンズモデルの断面図。

誘電体層は電波望遠鏡の冷却受信機におい

て真空窓やレンズとして使用される。誘電体を通過する際の吸収や反射が性能を低下させる。レンズ設計において重要なのは、受信ビームとホーンからの送信ビームのカップリングのほかに、表面での反射を抑えるための構造 (AR)の設計である。Tapia et al. 2018 は平面板における AR を体系的に調査した。さらに、Speirs et al. 2020 は我々と同様の 100 GHz 帯において三角形状の AR で 25 dB 以上の反射損失を達成した。良好な性能と製造を考慮して、同様の構造をベースとした。広い間隔の AR は高次の回折モードを発生させ、高周波側の特性劣化の原因となる可能性があるため、RF 特性に注意して設計する必要があるが、レンズのような曲面上に施した AR の RF 性能を詳細に調査した例はなかった。そこで、複数の AR 構造を比較した。

周期的パターンを直線状と同心円状にした時のビームを比較した結果、後者では直交する偏波方向の屈折率の違いからビームが非対称となり、交差偏波レベルが急激に上昇することが明らかになった (図 4)。したがって、基本構造を頂角 20 deg の三角形、パターンを直線状に固定し、周期間隔が異なる 2 種類のレンズを用意した (レンズ S1:間隔 1.2 mm, レンズ S2:間隔 1.7 mm)。それらの測定結果を比較したところ、 透過特性と雑音温度、開口能率において顕著な差は見られなかった。懸念事項であった、S2 における回折による高周波側の劣化も見られなかったため、僅かに開口能率の高い S2 を搭載用に選択した。要因として、S2 の AR の方が反射抑制の効果が高く反射波の影響が少ない、または製造誤差などが考えられる。一方で、S1 と S2 の差は観測効率において影響はない。

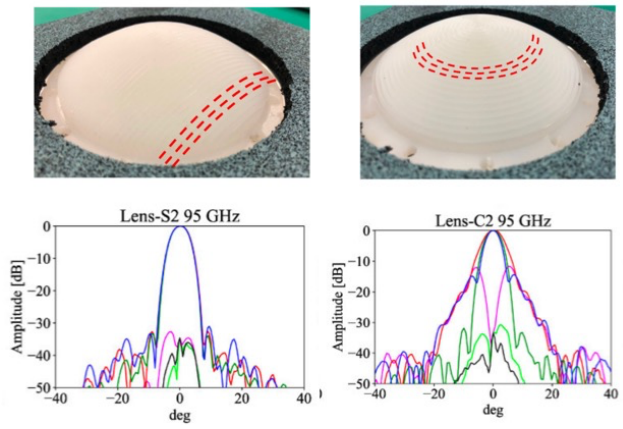

図 4. 直線状と同心円状の AR のビームパターン測定結果の比較。

【放射場からフィード内部の電磁界を推定する手法の開発】

広帯域受信機の実用化がセンチ波帯で始まっており、広帯域化に伴う問題が報告されている。比帯域 60%の受信機を搭載する大型電波干渉計 MeerKAT のビーム測定によって、高周波側でビームサイズの数%の指向誤差が生じることが分かった (Villiers and Cotton 2022)。その原因がフィードと直交偏波分離器の間の導波管で生じる高次モードであることが報告された (Villiers, Venter, and Peens-Hough 2021)。干渉計を用いたイメージングにおいて指向誤差はダイナミックレンジを制限するため、フィード内部での電磁界を精確に理解し、定量化することは重要である。しかし、導波管の電磁界を直接測定することは困難なため、測定可能量である放射パターンから推定する方法を考案した。

伝送線路、アンテナ、自由空間からなる線形なシステム (図 5 (左))を仮定すると、放射パターンはフィード内部での伝播モードの線型結合によって決まる。つまり、それらを関係付ける行列を求め、擬似逆行列を計算することで、放射パターンからフィード内部でのモード係数を取り出すことが出来る。我々は 15 – 29 GHz 帯 Axially-corrugated horn を用いてシミュレーションを行ったところ、振幅と位相をそれぞれ 10^{-6} (振幅の最大値に対して)、10^{-3} 度 の精度で推定可能なこ

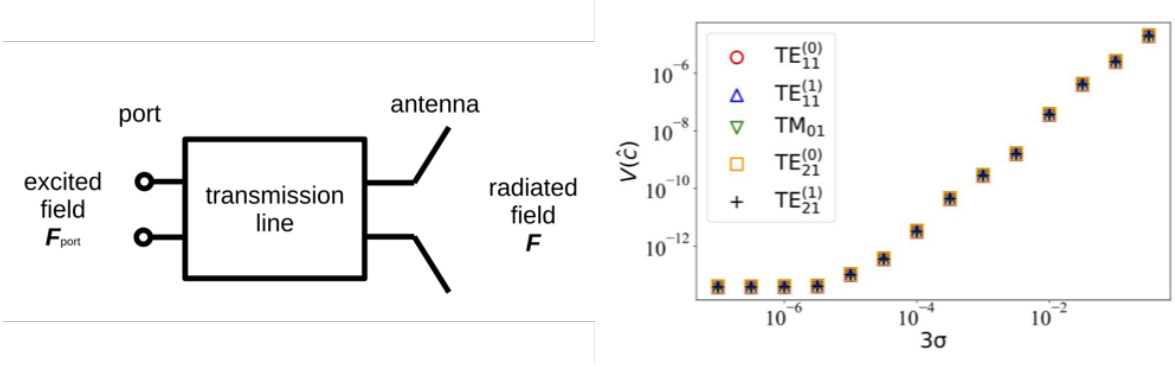

図 5. アンテナシステムの概念図 (左)。Port で電磁場を励起し、アンテナから放射する。放射場に正規分布に従うノイズを付与した際の Port におけるモードの決定精度 (右)。

とを確認した。測定を想定して、放射パターンにエラーを付与した場合の推定精度の解析を行ったところ、放射振幅パターンの最大値に対して 0.01%以下のランダムエラーを付与した時に、計算エラーが見えることが分かった (図 5 (右))。これはビーム測定において予想されるエラーよりも小さいため、実測に応用可能であることを意味する。

【まとめ】

近年の電波天文学において、広帯域受信機の需要は高まる中で、次の開発を行った。

- 210 – 375 GHz 帯 広帯域コルゲートホーン

導波管とのインピーダンスとモード変換の両立する溝構造と分布が重要である。溝の深さ/幅比を大きくすることで原理的に比帯域 60 %は可能だが、高周波帯での応用は製造の観点から難しかった。本波長帯で製造精度が保証できるアスペクト比 4 以下で、広帯域な設計解を見つけた。モード変換部を反射についてパラメトリック解析し、フレア部の深さに分布を持たせることで交差偏波特性を向上させることが出来た。測定の結果、反射損失 20 dB、交差偏波–25 dB を達成した。コルゲートホーンと光学系を望遠鏡に搭載して、ビームの評価したところ、副鏡の位置変位によって測定結果を概ね説明出来た。

- 72 – 116 GHz 帯 誘電体レンズの開発

広帯域コルゲートホーンと野辺山 45m 鏡光学系をつなぐ誘電体レンズを開発した。三角形状の構造を同心円状と直線状に施した場合を比較したところ、同心円状では直交する偏波方向の屈折率の違いから、ビームを歪めることが分かった。直線状の AR を間隔 1.2 mm と 1.7 mm の場合で比較したところ、ビーム、雑音温度に顕著な差は見られなかった。一般に広間隔では反射特性は良いが、高周波側で回折による特性劣化が懸念されたが、1.7 mm の場合で見られなかった。僅かに開口能率が高かったので、1.7 mm を搭載用に決定した。

- 広帯域受信機の時代に向けて

本研究は ALMA の開発計画に直接的に貢献出来る可能性がある。一方で、センチ波帯では広帯域受信機の試験が始まっている。広帯域化に伴って、導波管の高次モードによる指向誤差が報告されている。測定可能量であるビームパターンから高次モードの比率を振幅と位相をそれぞれ 10^{-6} (振幅の最大値に対して)、10^{-3} 度の精度で推定可能な手法を開発した。これは実測に応用出来る精度であり、広帯域受信機が標準化する時代に向けて重要なツールとなる可能性がある。

【文献リスト】

論文雑誌

1. “Development of a new wideband heterodyne receiver system for the Osaka 1.85 m mm–submm telescope: Corrugated horn and optics covering the 210–375 GHz band”, Yasumasa Yamasaki, Sho Masui, Hideo Ogawa, Hiroshi Kondo, Takeru Matsumoto, Masanari Okawa, Koki Yokoyama, Taisei Minami, Ryotaro Konishi, Sana Kawashita, Ayu Konishi, Yuka Nakao, Shimpei Nishimoto, Sho Yoneyama, Shota Ueda, Yutaka Hasegawa, Shinji Fujita, Atsushi Nishimura, Takafumi Kojima, Keiko Kaneko, Ryo Sakai, Alvaro Gonzalez, Yoshinori Uzawa, Toshikazu Onishi, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 73, Issue 4, <1116–1127> (2021)
2. “Development of seven-beam optics using dielectric lenses for a new 72–116 GHz receiver in the Nobeyama 45 m telescope”, Yasumasa Yamasaki, Yutaka Hasegawa, Sho Yoneyama, Sana Kawashita, Tsubasa Chinen, Sho Masui, Chiaki Nosohara, Heyang Sun, Shuto Dakie, Akira Kameyama, Ikko Fujitomo, Yuma Nishikawa, Hideo Ogawa, Ken’ichi Tatematsu, Atsushi Nishimura, Chieko Miyazawa, Toshikazu Takahashi, Jun Maekawa, Alvaro Gonzalez, Takafumi Kojima, Hiroaki Imada, Keiko Kaneko, Ryo Sakai, Takeshi Sakai, Toshikazu Onishi, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 75, Issue 3, <499–513> (2023)
3. “Quantification of Propagation Modes in an Astronomical Instrument from its Radiation Pattern”, Yasumasa Yamasaki, Hiroaki Imada, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, accepted, doi: 10.1109/TAP.2024.3366310, arXiv:2308.06156 (2024)

会議録

(ア) “Optical design of the 1.85-m mm-submm telescope in 210–375 GHz band”, Yasumasa Yamasaki, Sho Masui, Masanari Okawa, Koki Yokoyama, Taisei Minami, Shota Ueda, Yutaka Hasegawa, Atsushi Nishimura, Toshikazu Onishi, Hideo Ogawa, Nozomi Okada, Kimihiro Kimura, Alvaro Gonzalez, Takafumi Kojima, Keiko Kaneko, Ryo Sakai, "Optical design of the 1.85-m mm-submm telescope in 210–375 GHz band," Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114534H (Online, 2020); https://doi.org/10.1117/12.2561955

(イ) “Study of anti-reflection layer on dielectric lens for the new 72–116 GHz 7-beam receiver of the Nobeyama 45-m telescope”, Yasumasa Yamasaki, Yutaka Hasegawa, Toshikazu Onishi, Hideo Ogawa, Atsushi Nishimura, Ken’ichi Tatematsu, Alvaro Gonzalez, Hiroaki Imada, Keiko Kaneko, Ryo Sakai, and Takafumi Kojima, 32nd IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT 2022), 217, (Baeza, Spain, 2022), https://www.isstt2022.com/_files/ugd/c3398f_16523d170aba432a93a6547157799766.pdf

(ウ) “Initial design and analysis of 15-29 GHz feed system for SKA Band 6”, Yasumasa Yamasaki, Shin’ichiro Asayama, Alice Pellegrini, Yusuke Kono, Hideyuki Kobayashi, Hiroyuki Nakanishi, Hideo Ogawa, Toshikazu Onishi, URSI GASS 2023, Sa-J04-AM2-2, (Sapporo, Japan, 2023), https://doi.org/10.46620/URSIGASS.2023.1027.XVBO7512

学位論文審査結果の要旨

学位論文題目
Study of an optical system with wide frequency coverage
for radio astronomical applications
（電波天文学への応用に向けた広帯域光学系の研究）

提出者氏名　　山﨑 康正

電波望遠鏡によるヘテロダイン受信では周波数方向に分光することにより、星間物質中の様々なガス・ダストの量や性質を明らかにする事が可能となる。アルマ望遠鏡による高解像度・高感度での電波観測は、星・惑星形成や銀河進化の解明に大きな知見をもたらしてきた。一方、新しい天文学的課題も続々と生まれており、次世代の天文観測に必要な要件が検討されてきている。特に、受信周波数帯域の向上は、同時に観測できる分子スペクトルの数やダスト放射の観測感度を大幅に向上させることが可能である。

電波の広帯域受信には、受信機の広帯域化だけではなく、天体からの電波を望遠鏡で受け、受信機に導くまでの光学系の広帯域化も必須である。申請者は、ミリ波・サブミリ波の光学系の広帯域化を推進してきた。まず、1.85m 電波望遠鏡に搭載する、210 - 375GHz の帯域を持つ超広帯域コルゲートホーンの設計・開発を目指した。ホーンは自由空間の電波を導波管に導入するための素子である。求める伝播モードを実現するホーンの溝の深さと、一番根元の導波管とのインピーダンスマッチング部の最適な溝の深さが異なるため、複数の溝を組み合わせて最適化を図ることが求められる。工作の精度による制限に加えて、ホーン全体に渡る溝の構造と分布に工夫を加えることで、220 - 372GHz に渡って反射が−20dB 以下、交差偏波が−25dB 以下のコルゲートホーンの開発に成功した。1.85m 電波望遠鏡に搭載し、試験観測を行い、設計通りの性能が発揮されていることを確認した。さらに、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 望遠鏡に搭載する広帯域（72 - 116GHz）マルチビーム受信機用の誘電体レンズを開発した。申請者は、同心円状の反射防止構造はビームを楕円にし、交差偏波レベルも非常に悪化すること、直線上の構造は、それぞれ直交する偏波にそのような問題を生じさせないことを原理的に、また、実測で明らかにした。

広帯域化に伴い、モード変換の各所で導波管伝播の高次モードが発生し、ビームに悪影響を与えることが示唆されている。申請者は，ビームパターンを測定することにより、導波管内で励起される様々なモードの比率を推定可能な手法を開発した。これは、例えば、ホーンや各種導波管の組み付け精度や、それぞれ素子の工作精度の確認などにも応用することが可能である。

以上のように本研究は、電波望遠鏡の広帯域化を飛躍的に向上させ、次世代電波望遠鏡を用いた電波天文学の発展に大きく寄与する重要な研究である。

以上により、本委員会は本論文を学位論文として十分な内容を有しているものとして判断した。

主査　　大西　利和
久保田　佳基
三浦　大助
前澤　裕之