

称号及び氏名 博士(理学) 増井 翔

学位授与の日付 2023年3月31日

論文名 Development of wideband heterodyne receiver system for next-generation radio telescopes
(次世代電波望遠鏡に向けた広帯域ヘテロダイン受信機の開発)

論文審査委員 主査 大西 利和
副査 久保田 佳基
副査 野口 悟

論文要旨

Development of wideband heterodyne receiver system
for next-generation radio telescopes

(次世代電波望遠鏡に向けた広帯域ヘテロダイン受信機の開発)

増井 翔

1. 研究の背景と目的

国際協力により実現した大型電波干渉計 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) による高解像度・高感度観測は、電波天文学に新たな知見と更なる課題をもたらしてきた。例えば、惑星の形成過程の多様性が明らかになり、星・惑星形成に革命的な知見をおよぼしてきた。最近、様々な分子の分布の多様性も観測されつつあり、原始惑星系円盤の物理的・化学的進化が明らかになりつつある。しかし、従来の比較的狭帯域受信機での観測では、これらの多くの分子輝線検出に多大な観測時間が必要であり、その改善が様々な分野でも望まれ始めている。こうした観点から、ALMA の次世代受信機を含めた天文観測装置ではより、効率的な受信機の実現が求められている。

効率化の手段の一つとして、一度に観測できる周波数帯域の広帯域化があげられる。受信可能周波数帯域(RF[Radio Frequency]帯域)の広帯域化や RF 帯域の中で一度に観測できる中間周波数帯域(IF[Intermediate Frequency]帯域)の広帯域化が必要である。現在の受信機雑音性能を維持したまま広帯域化を達成することができれば、輝線スペクトル観測において、複数回の観測で得ていた輝線を一度の観測で得ることができ、観測時間の大幅な短縮に繋がる。また、IF の広帯域化は、連続波の観測では感度向上にも直結し、短い時間で精度の高い観測を実現できる。効率化のもう一つの手段に、受信機が多素子化が挙げられる。一般に、多くの受信機は 1 素子で構成されており、広範囲の観測には多大な観測時間が必要である。多素子化を実現できれば、一度の観測で素子数に応じた範囲の大きさを観測可能となり、観測時間の大幅な短縮に繋がる。

以上より広帯域や多素子な受信機開発は電波望遠鏡の効率化に繋がるため、次世代受信機開発として世界的にも進められている。このような背景のもと、私はこれまで RF 帯と IF 帯を広帯域にした受信機の開発や望遠鏡への搭載、RF 回路の初段に挿入される広帯域偏波分離器の開発、そして多素子化に向けた新規マイクロ波回路の基礎開発を進めてきた。

2. 研究内容

2-1. 230, 345 GHz 帯の同時観測受信機の開発

私は星形成過程の解明に重要な 220–230 GHz, 330–345 GHz に存在する ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O の

回転遷移 ($J = 2-1, 3-2$)、計 6 輝線を同時に受信する広帯域受信機の開発を行ってきた。周波数的に大きく離れた帯域を同時に観測するには、1 つの Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS) mixer では帯域が足りず、周波数で分離してから、SIS mixer に電波を導入する必要がある。周波数分離の手法として、我々は近年開発の進んでいる導波管型ダイプレクサを採用し、210–375 GHz 帯の信号を 4 つの帯域に分離する導波管型マルチプレクサを開発することとした。設計では、広帯域な導波管の開発を困難にしている、「高次の伝搬モードの発生」や「カットオフ周波数に近い帯域における管内波長などの強い周波数依存性」に注意して進めた。設計したマルチプレクサを、高周波ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて測定した結果、一部測定結果からずれる部分があったものの、天文観測への応用が期待できる特性を得た。製造した回路を用いて、広帯域コルゲートホーン (Yamasaki et al. 2021) と SIS mixer を接続した受信機システムとしての評価を進めた。その際、受信機システムに従来の帯域幅より広い IF 帯域 (4–21 GHz) を出力可能な SIS mixer (Kojima et al. 2020) を 330–345 GHz のチャンネルに応用し、345 GHz 帯の CO 同位体 3 輝線 ($J = 3-2$) を一つの SIS mixer で受信可能な構成とした(図 1 (a))。さらに、開発の都合上、4 帯域に分離する回路ではなく、3 帯域に分離する回路構成として実験した。受信機の性能評価では、Y-factor 法を用いた雑音温度測定を行い、220 GHz では 70–100K 程度、230 GHz 帯では 100 K 程度、330–345 GHz 帯では 100–200 K 程度の雑音温度が得られた。

性能評価後、本受信機を大阪府立大学 1.85m 電波望遠鏡へ搭載し、W51 領域において CO 同位体 6 輝線の同時観測及びマッピングに成功した(図 1 (b)) [1]。広帯域 IF 出力を持った SIS mixer を観測に応用した例は、世界的に見ても初めての観測であり、また ALMA において最も良く使用されている Band 6 と Band 7 の同時観測は観測効率の向上に繋がるため、本開発は ALMA 等の次世代受信機の開発に大きく貢献できる可能性がある。

2-2. 210–365 GHz 帯 広帯域円偏波分離器の開発

上記の 230, 345 GHz 帯同時観測受信機は、片偏波での観測であった。次の発展として、私は両偏波観測を実現するために、広帯域な偏波分離器の開発を進めている。偏波分離器

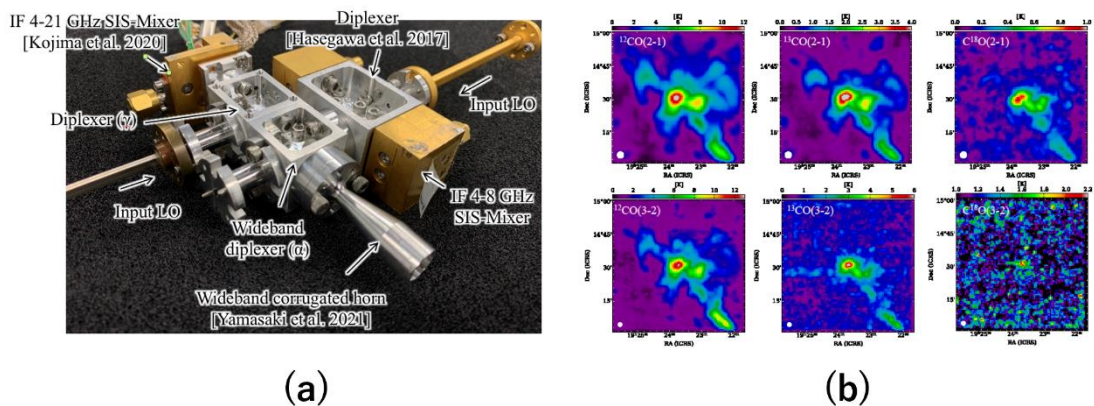


図 1 (a)広帯域同時観測受信機、(b)W51 における CO 同位体 6 輝線のマップ

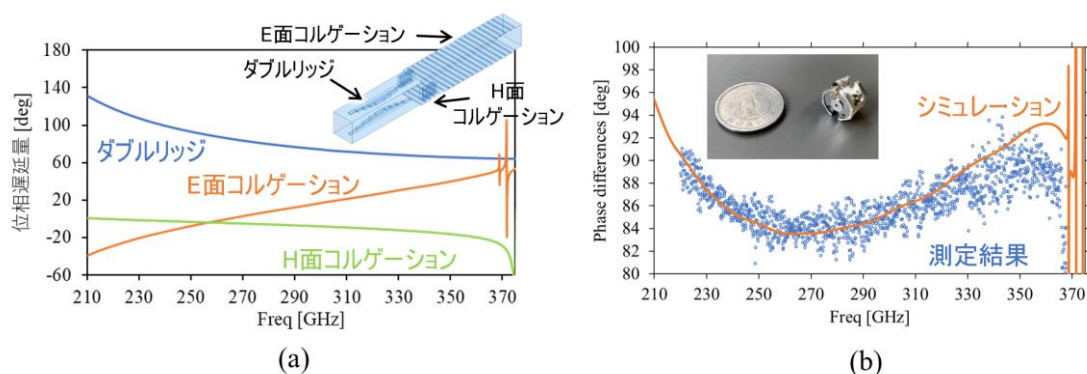


図 2 (a) それぞれの位相遅延器単体での位相遅延量と組み合わせた解析モデル、
 (b) 位相遅延器全体のシミュレーション結果と測定結果

には、直交偏波分離器と円偏波分離器の 2 種類があり、私は位相遅延器と直交偏波分離器から構成される円偏波分離器を開発することで、円偏波が主流である Very Long Baseline Interferometry (VLBI) のミリ波サブミリ波帯での観測への貢献も目指している。これまでのミリ波サブミリ波帯の位相遅延器の設計では、位相遅延量の周波数依存性が大きく比帯域 30% 程度の回路しか実現されていなかった (Chung et al. 2013)。そこで異なる複数種類の位相遅延器を組み合わせることで周波数依存性を打ち消し、広帯域な特性の実現を目指した。電磁界解析において、ダブルリッジ構造と E 面コルゲーション、H 面のコルゲーションの 3 つの特性が周波数特性を打ち消す組み合わせであることを確認し (図 2 (a))、製造した結果、解析結果に良く一致した結果が得られた (図 2 (b)) [2]。

直交偏波分離器については、国立天文台で既に開発されている広帯域な Double-ridge 型のもを参考に設計した (Gonzalez & Kaneko, 2021)。現在、設計した直交偏波分離器単体の測定まで完了しており、位相遅延器を組み合わせた円偏波分離器全体としての測定を進めている。ブラックホール観測を進めている Event Horizon Telescope (EHT) の次計画 (ngEHT) では、230, 345 GHz 帯の両偏波観測が目標とされており (Blackburn et al. 2019)、本開発は ngEHT もしくは将来のブラックホール観測に大きく貢献できる可能性がある。

2-3. 周波数コンバータを用いたアイソレータの基礎実験

広帯域化の他の効率化の方法である受信機の多素子化を妨げている要因の一つに、ダウンコンバート後のマイクロ波回路のサイズが大きいことが挙げられる。マイクロ波帯は、波長が長く、回路の大きさが非常に大きくなる傾向にあるため、受信機の多素子化を実現するには、回路の小型化が必要である。マイクロ波回路の中でも小型化が難しい回路の一つに冷却アイソレータがある。電波天文学において冷却アイソレータは、周波数コンバータと冷却アンプの間に挿入される回路で、回路間の反射による周波数帯域での定在波の低減や受動回路の動作の安定化のために使用される。このアイソレータはフェライトや磁石を用いた原理で動作しており、回路が非常に大きくなり、複数並べることが難しい。そこ

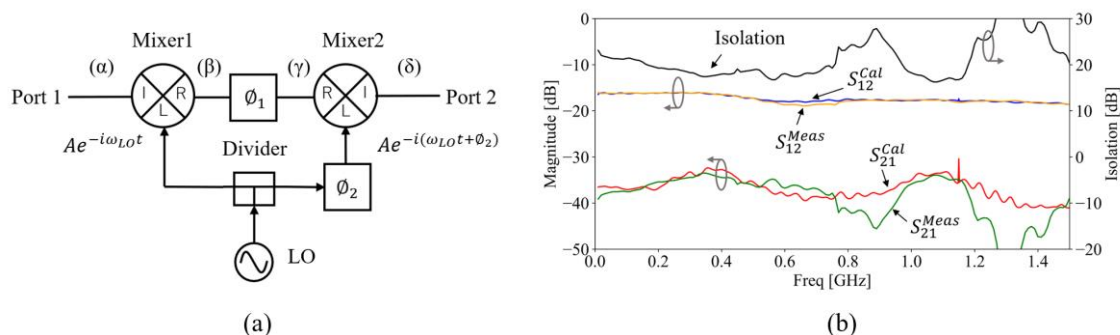


図 3 (a) 周波数コンバータを用いたアイソレータの概念図、
(b) 市販のコンポーネントを用いた系での測定結果

では、小型化のアイデアとして周波数コンバータのアップ・ダウンコンバージョンを利用した新たなアイソレータを提案している [3]。本回路は、二つの周波数コンバータとその間の位相遅延 ϕ_1 を $45+180m$ 度、そして二つの周波数コンバータに入力する LO 信号に位相差 ϕ_2 を $45+180n$ 度にする事で動作する (m, n は整数) (図 3 (a))。それにより、ダウンコンバート時に、一方向にはアップコンバートされた二つのサイドバンドが同位相で合成され、もう一方には逆位相で合成される回路を実現することができる。本回路に SIS mixer を用いることができれば、超小型かつ変換利得のあるアイソレータが実現でき、天文装置だけでなく量子コンピュータなどの他分野への応用も期待できる。本アイソレータが原理的に成り立つかを検証するために、市販のコンポーネントを用いた測定系を用いて実験した結果、0.01–1.50 GHz おいて約 17dB のアイソレーションという結果が得られた (図 3 (b)) [3]。加えて、理論計算の結果とも一致し、本構成がアイソレータとして動作することを理論的、実験的に証明することが出来た。また、図 3 の構成の位相差を $90+180m$ 度にし、周波数コンバータとして SIS mixer を用いた系での実験より、アイソレータの実現に重要なサイドバンドの打ち消しが確認できており [4]、今後、SIS mixer を用いたアイソレータの実現が期待できる。

3. まとめ

本研究では、次世代の電波望遠鏡に向けた広帯域同時観測受信機、広帯域円偏波分離器および周波数コンバータを用いた広帯域アイソレータの開発や基礎実験を行った。広帯域受信機においては、導波管型マルチプレクサを開発することで、周波数的に離れた 230 GHz 帯と 345 GHz 帯の同時観測を可能とし、現在、両円偏波化に向けて円偏波分離器の開発を進めている。多素子化に向けて、周波数コンバータを用いたアイソレータを提案しており、市販のコンポーネントを用いて 0.01–1.50 GHz という広い帯域においてアイソレータとして動作していることを確認できた。本構成に、SIS mixer を応用することで、正利得かつ広帯域なオンチップアイソレータの実現が期待できる。

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: Receiver development and the first light of simultaneous observations in 230 GHz and 345 GHz bands with an SIS-mixer with 4–21 GHz IF output,” Sho Masui, Yasumasa Yamasaki, Hideo Ogawa, Hiroshi Kondo, Koki Yokoyama, Takeru Matsumoto, Taisei Minami, Masanari Okawa, Ryotaro Konishi, Sana Kawashita, Ayu Konishi, Yuka Nakao, Shimpei Nishimoto, Sho Yoneyama, Shota Ueda, Yutaka Hasegawa, Shinji Fujita, Atsushi Nishimura, Takafumi Kojima, Kazunori Uemizu, Keiko Kaneko, Ryo Sakai, Alvaro Gonzalez, Yoshinori Uzawa, Toshikazu Onishi, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 73, Issue 4, Pages 1100–1115, August 2021, <https://doi.org/10.1093/pasj/psab046>.
- [2] “210–365 GHz 90° Differential Phase Shifter for Wideband Circular Polarizer,” S. Masui, Y. Hasegawa, H. Ogawa, T. Kojima and T. Onishi, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 527-534, Sept. 2022, [doi: 10.1109/TTHZ.2022.3191851](https://doi.org/10.1109/TTHZ.2022.3191851).
- [3] “A Novel Microwave Non-Reciprocal Isolator based on Frequency Mixers,” Sho Masui, Takafumi Kojima, Yoshinori Uzawa, and Toshikazu Onishi, *IEEE Transactions on Microwave and Wireless Components Letters*, accepted for publication, Feb. 2023, doi: 10.1109/LMWT.2023.3253124.
- [4] “Proof-of-concept Experiment on a Wideband Microwave Gyrator with two Superconductor–Insulator–Superconductor-based Mixers,” Sho Masui, Takafumi Kojima, Yoshinori Uzawa, Kazumasa Makise, Hideo Ogawa, and Toshikazu Onishi, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, accepted for publication, Mar. 2023.

[会議録]

- (ア) “Design of a Radio Frequency Waveguide Diplexer for Dual-band Simultaneous Observation at 210-375 GHz,” Sho Masui, Shota Ueda, Yasumasa Yamasaki, Koki Yokoyama, Nozomi Okada, Toshikazu Onishi, Hideo Ogawa, Yutaka Hasegawa, Kimihiro Kimura, Takafumi Kojima, Alvaro Gonzalez, in *Proc. 30th Int. Symp. on Space THz Technol.*, ed. A. Karpov (Red Hook: Curran Associates, Inc.), 73, 2019.
- (イ) “Development of a wideband waveguide diplexer for simultaneous observation at 210-375 GHz,” Sho Masui, Taisei Minami, Masanari Okawa, Yasumasa Yamasaki, Koki Yokoyama, Shota Ueda, Yutaka Hasegawa, Atsushi Nishimura, Toshikazu Onishi, Hideo Ogawa, Takafumi Kojima, Alvaro Gonzalez, *Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X*, 114534F (13 December 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2561355>.

学位論文審査結果の要旨

学位論文題目

Development of wideband heterodyne receiver system
for next-generation radio telescopes
(次世代電波望遠鏡に向けた広帯域ヘテロダイン受信機の開発)

提出者氏名 増井 翔

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歴史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り、アルマ望遠鏡の次期アップデート計画の最優先事項としてあげられている。また、受信素子の多素子化も観測効率を飛躍的に向上させることが可能であるが、システム全体が肥大化する傾向にあることから、そのコンパクト化が必須な状況であり、基礎研究が進みつつある。

申請者は、導波管立体回路を広帯域化することにより、RF帯（受信周波数帯）としては210-375 GHz、IF帯（中間周波数帯）としては4-21 GHz、をカバーする受信機の開発に貢献した。このRF帯はアルマ望遠鏡では2つの受信周波数帯（Band 6, 7）をカバーしていることになる。また、IF帯域は、これまで一般的だった4-8GHzから大幅に広帯域化することに成功した。この際、周波数分離器の主要コンポーネントであるBranch Line CouplerとHigh Pass Filterでの「高次の伝搬モードの発生」や「カットオフ周波数に近い帯域における管内波長などの強い周波数依存性」に着目して広帯域化を実現した。受信機は、1.85m電波望遠鏡に搭載され、天体からのCO同位体6輝線の同時観測及びマッピングに成功した。申請者はさらに、偏波分離器の広帯域化にも取り組んだ。広い帯域における周波数依存を最小限にするため、位相遅延の周波数依存が反対の性質を持つPhase shifterを組み合わせた90度位相遅延器を実現し、これまでの比帯域30%程度を54%に広げること成功した。これと、本研究で開発した広帯域直交偏波分離器とを組み合わせることにより、VLBI観測で用いられる円偏波観測の広帯域化にも応用することができる。また、多素子受信機のコンパクト化・集積化を実現するために、それを制限しているアイソレータの小型化・広帯域化の基礎研究を行った。2つのミキサと2つの位相遅延回路、局部発信器から構成されている回路を新たに提案し、市販のコンポーネントを用いて、本原理の実験的な実証に成功した。単純な構造で、かつ、広帯域に動作させることが期待されており、将来の多素子集積化に道を拓いた。

以上のように本研究は、電波望遠鏡の受信機性能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
野口 悟