

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03920

研究課題名（和文）電波補償光学のための超伝導回路を用いた相関型偏波カメラの開発

研究課題名（英文）Correlation Polarimeter Camera with Superconducting Circuits for Radio Adaptive Optics

研究代表者

永井 誠（Nagai, Makoto）

国立天文台・先端技術センター・特任研究員

研究者番号：50522877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間全体を通じて、相関型偏波計の必要な構成要素の全てについて個別の検討を行うことができ、相関型偏波計のピクセルの基本設計が完成した。逆位相合波器をおいた両直線偏波用平面アンテナ、相関型偏波計のための遅延回路、遅延回路とMKID共振器を繋ぐハイパスフィルタなどの新しい構成要素について、いずれも電磁界シミュレーションで必要な特性が得られている。得られた設計について、国際会議・査読論文にて発表した。偏波計の試作まで進めることは叶わなかったが、設計へのフィードバックが望まれる構成要素は明らかになり、これらの試作を始めようとしている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波・サブミリ波帯の電磁波の波面を画像として撮影できるカメラが実現すれば、電波望遠鏡の受信機ビームや光学素子の特性を測定して評価することが、従来よりもずっと高速にできるようになる。これによって、学術的には電波望遠鏡の高性能化・高機能化が見込め、次世代電波望遠鏡の実現を技術的に後押しする。また社会的にも、この波長帯の電磁波のさまざまな応用の可能性を押し上げられると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Throughout the research period, all the necessary components of the correlation polarimeter were studied individually, and the basic design of the pixel for the correlation polarimeter was completed. New components such as a plane antenna for both linear polarizations with an anti-phase combiner, a delay circuit for the correlation polarimeter, and a high-pass filter connecting the delay circuit and the MKID resonator have all obtained the necessary characteristics through electromagnetic field simulations. The obtained designs were presented in an international conference and a peer-reviewed paper. Although it was not possible to fabricate a prototype polarimeter, we have identified the components for which feedback to the design is desired. We are about to start the fabrication of test components and prototyping of the correlation polarimeter.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波望遠鏡 超伝導検出器 偏波カメラ 鏡面測定法 コプレーナ導波路 結合器 平面アンテナ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電波天文学の観測装置である電波望遠鏡は、高感度化・高周波化・高角分解能化が進んできた。ALMA のような高感度・高角分解能の装置が稼働しているなかで、次世代の電波望遠鏡にはそれと相補的な、高い掃天能力が求められている。そのため、ミリ波・サブミリ波の波長領域を観測対象とし、広視野化・多ビーム化が可能な、大口径単一鏡の計画が世界的に検討されている。ただし、電波望遠鏡の主鏡面は、重力や温度変化、風・対流の影響によって変形を起こすため、大口径の望遠鏡を作っても十分な観測性能を達成するのは容易ではない。望遠鏡の集光力を最大限に活かすには、主鏡を含めた望遠鏡光学系が集光した焦点面での波面を理想的に保つことが必要である。そこで、主鏡の形状の変化に応じて適切にフィードバックを行うことが考えられる。究極的には、可視赤外線望遠鏡で行われている補償光学のように実時間で波面補償できる機構が理想である。このような電波補償光学が可能になれば、ミリ波・サブミリ波単一鏡の観測効率を大いに高められると期待される。

補償光学を行うには、波面計測、形状可変鏡、フィードバック制御が必要である。このうち、波面計測法については、ミリ波・サブミリ波帯で十分高速に波面の分布を計測する技術は未だ確立されていない。電波望遠鏡でこのような実時間の波面計測を可能にする手法として、申請者らは電波点回折干渉計を提案している。電波点回折干渉計は、可視赤外線を用いられる点回折干渉計を、電波領域で使用出来るように装置を変更したものである。点回折干渉計については、効率を上げる手法が提案されており、電波点回折干渉計でも同様の原理で約 1/50 波長の波面計測精度が見込まれる。鏡面測定に 200~GHz 程度のミリ波を用いれば、観測周波数 1~THz 程度までに必要な鏡面精度を達成できる。

2. 研究の目的

望遠鏡の光学系を通ってきたビーム波面は、主鏡をはじめとする鏡面形状の情報を含んでいる。これを試験波とし、ピンホールによる回折で生じる理想的な球面波を参照波として、干渉縞を取得することができる。これが点回折干渉計である。ここで、試験波と参照波の位相差が異なる複数の干渉縞を用いて波面の情報を取り出す、位相シフト干渉法を用いる。電波点回折干渉計では、偏波ビーム分離器にはワイヤグリッドを、干渉縞の位相差を変えるためには遅延回路を入れた導波回路を用いる。

電波点回折干渉計の検出器は、直交 2 偏波の信号について干渉波強度を測るものである。これは、相関型の偏波計に該当する。本研究では、大規模アレイ実現に向け、集積が容易な新しいタイプの相関型偏波計を開発する。提案するのは、平面アンテナと超伝導回路から成り、マイクロ波力学インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detector; MKID)という超伝導検出器を用いた相関型偏波計である。

3. 研究の方法

本研究では、相関型偏波計を 超伝導検出器 MKID と超伝導回路を用いて設計・製作する。金属鏡などの光学系で集光されたミリ波を、シリコンのレンズレットにより、シリコン基板上の平面アンテナと結合させる。平面アンテナには、直線両偏波を分離して検出できる両偏波用のダブルスロットアンテナを用いる。平面アンテナで取り出された縦偏波と横偏波の信号は、コプレーナ導波路によって基板上を伝送され、90 度ハイブリッドカップラ (ブランチラインカップラ) で混合される。1 つのカップラから位相差が 180 度異なる 2 つの信号が得られるので、導波路長を調整し 2 個のカップラを用いて、4 通りの位相差で結合させた信号が得られる。結合された信号はそれぞれ MKID に導かれ、信号の電力に応じて MKID の共振周波数が変化する。全ての MKID 共振スペクトルは、共通の給電線を通して多素子 MKID 読み出し回路によって記録される。MKID の共振周波数を 4 GHz 帯に設定することで、既存の読み出しシステムをそのまま使用できる。

作成した検出器は、野辺山 45m 望遠鏡搭載用 MKID カメラのクライオスタットで冷却する。この MKID カメラのクライオスタットと検出器を固定するためのホルダは既に完成しており、野辺山 45m 望遠鏡搭載用の検出器の冷却に用いられている。多素子 MKID 読み出し回路や制御系も野辺山 45m 望遠鏡搭載用 MKID カメラと共通で、動作中である。本研究で開発する検出器が作成できれば、これを冷却し、既知の偏波特性を持つミリ波をクライオスタット窓から入射することで、すぐにも検出器特性の評価が可能である。

両偏波用ダブルスロットアンテナとブランチラインカップラを採用することにより、基本的に超

伝導体膜 1 層で実現可能になる。このため、製作工程は最も単純になり、多素子化の障壁も低い。既存の両偏波用ダブルスロットアンテナでは偏波分離特性が十分でないが、エアブリッジの追加などで改善すると見込まれる。MKID 中心線の超伝導体にアルミニウムを用いることにより、90 GHz 以上に感度を持たせることができる。まずは製作と性能評価が容易で大気窓に当たる 100 GHz 帯用の検出器を開発する。

4 . 研究成果

研究期間全体を通じて、相関型偏波計の必要な構成要素の全てについて個別の検討を行うことができ、相関型偏波計のピクセルの基本設計が完成した。逆位相合波器をおいた両直線偏波用平面アンテナ、相関型偏波計のための遅延回路、遅延回路と MKID 共振器を繋ぐハイパスフィルタなどの新しい構成要素について、いずれも電磁界シミュレーションで必要な特性が得られている。得られた設計について、国際会議・査読論文にて発表した。偏波計の試作まで進めることは叶わなかったが、設計へのフィードバックが望まれる構成要素は明らかになり、これらの試作を始めようとしている。

相関型偏波計の偏波特性評価のためには、直線偏波を生成する電波源が必要となる。このために、回転するワイヤグリッドと黒体放射源を組み合わせた電波源を製作した。この電波源を用いて野辺山 MKID カメラの直線偏波に対する応答を実際に確認することができ、相関型偏波計の偏波特性の測定の準備は整った。

相関型偏波計の開発の動機となった開口能率についても理解が進んだ。また、この相関型偏波計を用いれば提案されていた電波点回折干渉計以外の構成でも波面計測が可能となることが見出された。

相関型偏波計による波面計測を実現する上で、検出器 MKID のダイナミック・レンジを十分に確保する必要があるという理論的な示唆も得た。大きなダイナミック・レンジを持つ周波数掃引方式の MKID 読み出しについても技術的な進歩が得られた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nagai, M. ; Imada, H. ; Okumura, T.	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Factorization of Antenna Efficiency of Aperture-type antenna: Beam Coupling and Two Spillovers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Antennas and Propagation	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAP.2020.3044381	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Imada, Hiroaki; Nagai, Makoto	4. 巻 28
2. 論文標題 Analytical expression of aperture efficiency affected by Seidel aberrations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 23075-23090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.392787	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 M. Nagai, Y. Murayama, T. Nitta, H. Kiuchi, Y. Sekimoto, H. Matsuo, W. Shan, M. Naruse & T. Noguchi	4. 巻 199
2. 論文標題 Resonance Spectra of Coplanar Waveguide MKIDs Obtained Using Frequency Sweeping Scheme	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 250-257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02262-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Makoto Nagai, Hiroaki Imada, Tom Nitta, Yosuke Murayama, Ryohei Noji, Masato Naruse	4. 巻 4
2. 論文標題 Correlation Polarimeter for Millimeter-Wave Wavefront Sensing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 URSI Radio Science Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46620/22-0044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Honda, Yosuke Murayama, Tomu Nitta, Makoto Nagai, Hiromu Miyazawa, Ryohei Noji, Pranshu Mandal, Nario Kuno, Hiroshi Matsuo, Yutaro Sekimoto, Naomasa Nakai	4. 巻 4
2. 論文標題 Development and Commissioning of 100 GHz Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) Camera at the Nobeyama 45 m Telescope	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 URSI Radio Science Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46620/22-0053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nagai M., Murayama Y., Nitta T., Suzuki R., Hikawa R., Miyazawa H., Noji R., Kiuchi H., Sekimoto Y., Matsuo H., Shan W., Naruse M., Noguchi T., Kuno N., Monfardini A., Macias-Perez J., Goupy J., Calvo M., Catalano A.	4. 巻 209
2. 論文標題 Configuration of Probe Tones for MKID Readout with Frequency Sweeping Scheme	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 677 ~ 685
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02865-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 1件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 永井 誠, 野地 涼平, 今田 大皓, 新田 冬夢, 村山 洋佑, 成瀬 雅人
2. 発表標題 電波点回折干渉計のための超伝導回路を用いた相関型偏波計の試作に向けた設計
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Nagai, Y. Murayama, T. Nitta, R. Suzuki, R. Hikawa, H. Miyazawa, R. Noji, H. Kiuchi, Y. Sekimoto, H. Matsuo, W. Shan, M. Naruse, T. Noguchi, N. Kuno, A. Monfardini, J. Macias-Perez, J. Goupy, M. Calvo, & A. Catalano
2. 発表標題 Configuration of Probe Tones for MKID Readout with Frequency Sweeping Scheme
3. 学会等名 The 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto Nagai
2. 発表標題 MKID Camera for Nobeyama 45-m Radio Telescope
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井 誠, 野地 涼平, 今田 大皓, 新田 冬夢, 村山 洋佑, 成瀬 雅人
2. 発表標題 電波点回折干渉計のための超伝導回路を用いた相関型偏波計の設計
3. 学会等名 第22回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永井 誠, 今田 大皓
2. 発表標題 多ビーム軸対称双反射鏡アンテナの中心ビーム開口能率
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Makoto NAGAI
2. 発表標題 Design of correlation polarimeter with superconducting circuit for Radio Point Diffraction Interferometer
3. 学会等名 21st EARX workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井 誠, 今田 大皓, 奥村 大志, 新田 冬夢, 村山 洋佑, 成瀬 雅人
2. 発表標題 電波点回折干渉計のための超伝導回路を用いた相関型偏波計の設計
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Nagai, Hiroaki, Imada, Tom Nitta, Yosuke Murayama, Ryohei Noji, Masato Naruse
2. 発表標題 Correlation Polarimeter for Millimeter-wave Wavefront Sensing
3. 学会等名 2022 URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI JRSM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto NAGAI, Hiroaki Imada
2. 発表標題 Aperture Efficiency of Multi-beam Axisymmetric Dual-reflector Antenna
3. 学会等名 23rd EARX workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Nagai, Taishi Okumura, Hiroaki Imada, Yosuke Murayama, Tom Nitta
2. 発表標題 Investigations toward Adaptive Optics for Large Single-Dish Radio Telescopes
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	新田 冬夢 (Nitta Tom)		
研究協力者	村山 洋佑 (Murayama Yosuke)		
研究協力者	今田 大皓 (Imada Hiroaki) (90792185)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	Institut Neel	Universite Grenoble Alpes	CNRS	他1機関