

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01938

研究課題名（和文）原始重力波の直接観測に向けた波形干渉を用いたレーザー干渉計の実験実証

研究課題名（英文）Experimental demonstration of a new laser interferometer concept with offline synthesis for direct detection of primordial gravitational waves

研究代表者

和泉 究（Izumi, Kiwamu）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：20816657

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では back-linked Fabry-Perot 干渉計と呼ぶ新しい重力波レーザー干渉計の実験実証を行った。本レーザー干渉計の最も重要な機能は、記録されたデータからレーザー周波数雑音を除去することである。われわれは、当初目標にしていた地上・大気中での実験室環境においてレーザー雑音の除去比2桁を確認に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、将来人類が挑戦するであろう宇宙誕生の瞬間を直接観測する上で重要となる。宇宙誕生の瞬間を観測するには、宇宙空間に重力波レーザー干渉計を構成する必要があると考えられている。本研究により、そのレーザー干渉計の達成方法の1つである、back-linked干渉計が、実際に機能することを初めて実験的に示すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：A demonstration experiment for the new interferometer topology, back-linked Fabry-Perot interferometer, was carried out in this research theme. The most important function of this particular interferometer is that it is able to remove laser frequency noises out of the recorded data series. We succeeded in removing laser noises by two orders of magnitude which was our target value in the original proposal.

研究分野：重力波天文学

キーワード：レーザー干渉計 重力波天文学 微小計測 信号処理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙物理学の究極課題の 1 つは、宇宙誕生直後に起きた加速度インフレーションによって生成された原始重力波の直接観測を達成することで、宇宙創世時の情報を獲得することである。そのためには、宇宙空間にレーザー干渉計を構築することが求められる。従来のファブリ・ペロー干渉計を使った構想では、100 km 隔てた複数の人工衛星をナノメートルよりも良い精度で超精密編隊飛行が必要となる点および、レーザー周波数雑音の影響低減が容易ではないという 2 つの技術課題を克服する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者が考案する「波形干渉を用いた新しいレーザー干渉計方式」(その後バックリンク干渉計と名付けた)を実験実証することで、上述の 2 つの技術課題を一挙に解決し、これまで実現の目処がたっていなかった初期宇宙で発生したとされる原始重力波の直接観測の実現性を向上させることである。

3. 研究の方法

地上テーブルトップ実験によるバックリンク干渉計の動作機能を確認する。特に、本干渉計に固有の事後信号処理によるレーザー周波数雑音の除去機能を実証確認する。実証実験のために、新規にレーザー光学系を設計・構築し、2 台のレーザー光源を用いて複数の人工衛星からなるバックリンク干渉計を模擬する。レーザー光源には、関連光学系部品の入手性を考慮し、地上の重力波実験で使用される波長 1064 nm の狭線幅 Nd:YAG 固体レーザーを新規調達する。

周波数雑音の除去機能に対しては、レーザー光源に人為的に周波数雑音を付加し、事後信号処理を通じて付加した雑音を除去できるか実験的に実証する。除去性能の目標として、ただし、周波数除去比は信号校正の精度に依存すると考えられており、申請者が地上検出器の校正で達成した精度 (C. Cahillane, ..., K. Izumi, et al., Phys. Rev. D 2017) を指標に、数パーセントの除去比達成を初期目標とする。

従来とは異なり、波形干渉方式(バックリンク干渉計)では 4 つの異なる信号を一度記録したのちに、それらを線形フィルタおよび信号の線形結合という比較的簡単な信号処理を用いて周波数雑音を除去する。この事後信号処理の部分を波形干渉と呼んでいる。本方式は独立のレーザーを 2 つ用いても雑音除去が成立する。したがって、各共振器にそれぞれ独立のレーザー光を共振させることが可能となり、周波数雑音の除去を行いながら、同時に初期衛星配置への要求を完全に解消する画期的な干渉計方式と考えられる。

4. 研究成果

(1)編隊飛行の要求を緩和し、かつレーザー周波数雑音への要求を低減する今回の新手法を投稿論文としてまとめた (K. Izumi and M.-K. Fujimoto, PTEP 2021)。その新規性と有用性が認められ、投稿論文誌 PTEP の Editor 's choice に選出されるとともに、内容が物理学会誌に紹介された。

(2)バックリンク干渉計を予定どおりテーブルトップ実験として実装を完了し、アクティブ制御を用いて想定される干渉状態を安定維持できることを確認した。

(3)バックリンク干渉計機能の最も重要であるレーザー周波数雑音除去機能に対しては、当初目標としていた信号振幅で 2 桁の除去性能を確認できた (図 1 参照)。これにより、バックリンク干渉計が将来の宇宙重力波干渉計として適用できることを示した。本成果をまとめた投稿論文を現在準備している。

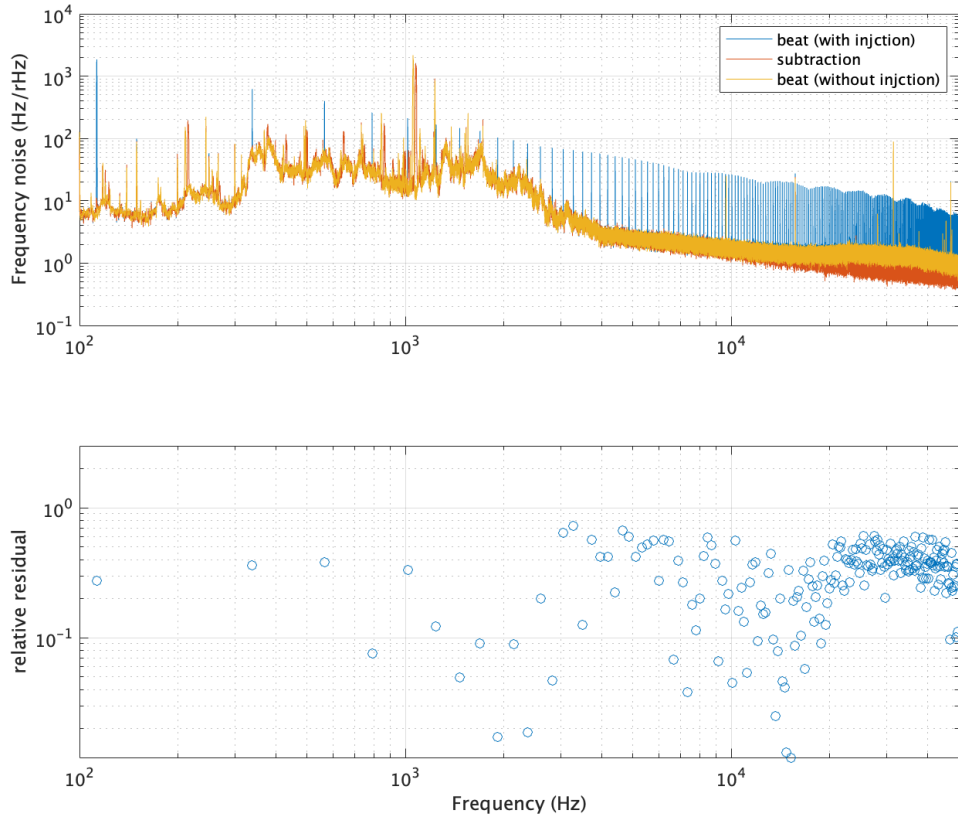


Figure 1 : (上図) 重力波チャンネル信号の振幅スペクトル雑音密度で、ヘテロダイン信号の周波数安定度 $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ として表示。青いデータが人為的に周波数雑音を付加した場合。赤が事後処理を行い、注入した人為雑音下がった状態のデータ。黄色の線はなにも人為信号を注入しない静かな状態のデータ。100 Hz 付近の雑音が2桁以上除去できていることがわかる。(下図) 人為信号を注入した周波数点における除去後の残差評価データ。1 より小さいことから雑音除去が予想通り全ての周波数点で成功していることが確認できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Izumi Kiwamu, Fujimoto Masa-Katsu	4. 巻 2021
2. 論文標題 A back-linked Fabry-Perot interferometer for space-borne gravitational wave observations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	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） 10.1093/ptep/ptab067	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 Izumi Kiwamu, Jani Karan	4. 巻 -
2. 論文標題 Detection Landscape in the deci-Hertz Gravitational-Wave Spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Handbook of Gravitational Wave Astronomy	6. 最初と最後の頁 1～14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-15-4702-7_50-1	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉本良介, 和泉究, 長野晃士, 小森健太郎
2. 発表標題 宇宙重力波望遠鏡における周波数安定化に向けたback-linked Fabry-Perot 干渉計の開発III
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本良介, 和泉究, 長野晃士, 小森健太郎
2. 発表標題 宇宙重力波望遠鏡における周波数安定化に向けたback-linked Fabry-Perot 干渉計の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本良介, 和泉究, 長野晃士, 山田亨
2. 発表標題 宇宙重力波望遠鏡における周波数安定化に向けたback-linked Fabry-Perot 干渉計の開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本良介, 和泉究, 長野晃士, 小森健太郎
2. 発表標題 宇宙重力波望遠鏡における周波数安定化に向けたback-linked Fabry-Perot 干渉計の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------