

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03606

研究課題名（和文）光AC結合信号検出によるレーザー干渉計の低ショット雑音化

研究課題名（英文）Optical AC signal detection of laser interferometer for reducing shot noise

研究代表者

大前 宣昭（Ohmae, Noriaki）

福岡大学・理学部・准教授

研究者番号：60615160

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー干渉計型重力波検出器で用いるレーザーの高出力化に伴い、光受光部の光パワーが増大し、限界に達しつつある。本研究では、重力波の信号が交流信号であることに着目し、光AC結合技術のレーザー干渉計への導入を提案した。光共振器のフィルタに着目し、3種類の光共振器を製作し、マイケルソン干渉計と組み合わせた動作に成功した。光AC結合技術の実証のために、重力波の疑似信号をマイケルソン干渉計に注入し、光検出器の直流での受光量に対する信号感度を評価し、従来の光検出方法と比べて、直流での受光量に対し、5倍高感度に信号検出できることを実証し、本研究提案の手法の優位性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高感度なレーザー干渉計による重力波の直接検出によって、ブラックホールや連星中性子星の合体などが観測され、宇宙を見る新しい手法が確立し、レーザー干渉計のさらなる高感度化による宇宙への理解が期待されている。本研究では、レーザー干渉計型重力波検出器の今度の高感度化において今後課題となる、レーザーパワーの増大による受光素子の限界、を突破するために、光共振器の性質を利用した光AC結合による光干渉信号の検出手法を提案した。本研究において、その原理を実証するための実際の実験装置の詳細な構成や条件を見出し、実際に実験室サイズの光干渉計を構築し、本手法の原理の優位性を実験的に実証した。

研究成果の概要（英文）：A laser interferometer for gravitational wave detection uses a high-power laser. Therefore, the optical power of the optical receiver increases and is reaching its limit. In this research, we focused on the fact that gravitational wave signals are AC signals, and proposed the optical AC coupling technique to laser interferometers. Focusing on optical filtering by optical cavities, we developed three types of optical cavities and successfully operated them in combination with a Michelson interferometer. To demonstrate the AC coupling technique, we injected a gravitational wave pseudo signal into a Michelson interferometer, evaluated the signal sensitivity. We demonstrated that signals can be detected with five times higher sensitivity than the traditional detection scheme, which shows the superiority of the method proposed in this research.

研究分野：光精密計測

キーワード：レーザー干渉計 光共振器 光ショット雑音

## 1. 研究開始当初の背景

2015年のアメリカのLIGO(Laser interferometer gravitational wave observatory)による重力波の初検出以降、高感度なマイケルソン型のレーザー干渉計を用いた重力波望遠鏡による重力波の検出が続いている。重力波の信号の解析により、ブラックホールや中性子星の合体などに対する理解が進んでおり、世界中の重力波望遠鏡のさらなる高感度化や、異なる周波数帯の重力波観測のための低周波に特化した宇宙重力波望遠鏡、宇宙背景重力波などをターゲットとした高周波重力波検出器の研究開発が進められている。

レーザー干渉計型の重力波望遠鏡では、地面振動や熱揺らぎ等の雑音を十分に低減すると、最終的には光の量子効果による雑音(光ショット雑音、輻射圧雑音)によって検出できる感度の限界が決まる。光ショット雑音の低減による光干渉計の高感度化のために、現在高感度化が進行中の日本のKAGRAやアメリカのAdvanced LIGO、ヨーロッパのAdvanced Virgoでは、最終的に150~200 Wの高出力単一周波数レーザーを用いることになっている。このようなレーザー干渉計では、光検出部で干渉縞が暗くなるダークフリンジ付近で光干渉計を動作させる。しかし、光干渉計の非対称性などにより、光検出器での受光量は増大し、最終的には1 W程度に達する。光検出器には半導体フォトダイオード以外の選択肢が現状はないが、通常のフォトダイオードの仕様では、数 mW 以下の受光量での使用が推奨されており、100 mW 以上の受光量で使用する現状では、非線形応答、受光面積の拡大による高速応答性能の低下、劣化・損傷といった懸念があり、根本的な問題を抱えた状況にある。

本研究では、レーザー干渉計型重力波望遠鏡における光検出部の受光量増大の問題を解決するために、光共振器のフィルタ特性を利用した「光 AC 結合」による信号取得を提案する。増大する光検出器の受光量を数 mW 程度に低減しつつ、従来では1 W以上の受光量でないと実現できない低い光ショット雑音レベルでの光干渉計の信号検出手法の原理を実験的に実証する。

## 2. 研究の目的

重力波望遠鏡では、マイケルソン干渉計の各腕の長さの差に変調を受けるように重力波信号が生成される。光から電気信号に変換する光検出部においては、従来は直流(以下、DC)で光を受光するため、受光後のDCでの大きな光電流を電氣的にフィルタで除去する必要がある。光電流に換算すると100 mA程度のDCの光電流をフォトダイオードで発生させ、その後AC結合回路によって、その中の0.001 mA以下の重力波の信号の周波数成分(AC成分)だけを抽出している。

本研究では、光共振器のフィルタ特性を利用し、DC光を光の段階で抑制しつつ、DC光に対してサイドバンド周波数に現れた信号光を効率的に受光する。光共振器のインピーダンス整合条件を制御することで、信号となる光パワーの変動に対して増幅作用を持つ検出を行う。このことにより、光の段階での「光 AC 結合」が実現し、通常1 W程度のDC受光量で実現できる信号対雑音比を、1 mW以下の少ない光量の光検出で実現できる手法の検証を目的とする。

光信号のDC検出後の電気信号でのAC結合はよく用いられるが、光の段階での「光 AC 結合」はほとんど報告例がなく、とくにレーザー干渉計では例がない。光干渉計をダークフリンジ付近で動作させることで受光量を少なくしているが、それでも残るDC光が検出器の限界に達している状況にある状況に対して、本研究で提案する「光 AC 結合」を導入することで、DC受光量を減らしかつ信号を減らさない信号検出を行う。「光 AC 結合」での信号取得により1/1000のDC受光量で同じ信号対雑音比が実現できる可能性が十分にあり、受光量が減ることで光検出回路の従来とは異なる最適化が可能になる。また、本研究で提案するレーザー干渉計型重力波望遠鏡における「光 AC 結合」による信号検出は、現在の光干渉計の構成や、近い将来導入される可能性のあるスクイーミング技術や研究段階の周波数依存スクイーミング技術などの改善策と競合することなく、共存できる、という点も大きなメリットであり、基本の物理的な原理の実証だけでなく、実際に必要となる実験装置の実証によって、将来の大型重力波望遠鏡への適用に向けた知見を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 光フィルタ用の光共振器の設計・製作

本研究では、マイケルソン干渉計で光 AC 結合での干渉信号取得を実験的に実証する。従来の直流(DC)受光と同じ受光量で重力波感度が改善することを実験的に実証することを試みる。実際の実験では、非常に微小な信号計測になるため光 AC 結合以外にも、レーザーのもつ強度雑音や位相雑音の除去、干渉信号の信号対雑音比を低下させるレーザー光の高次空間モードの除去用の光共振器が必要になることが検討段階から予想できている。

そこで、マイケルソン干渉計に入射するレーザー光の雑音除去、光 AC 結合信号検出、そして干渉信号に混入する不要な高次の空間モード除去用の3種類の光共振器をそれぞれ製作し、性能評価を行い、3種の光共振器の安定した長時間のロック動作を確認する。

#### (2) 光フィルタ用の光共振器を導入したマイケルソン干渉計の動作実証

マイケルソン干渉計に入射するレーザー光の雑音除去、光 AC 結合信号検出、干渉信号に混入する不要な高次の空間モード除去用の 3 種類の光共振器と、マイケルソン干渉計のフリンジの安定化制御という 4 つの制御を同時に実現するための、各制御自由度の誤差信号の検出方法(偏光解析 or 変調・復調法)の検討を行い、それぞれの自由度のフィードバック制御回路の製作を行い、3 種の光共振器とマイケルソン干渉計の安定したロック動作を確認する。

#### (3) 光 AC 結合によるマイケルソン干渉計の干渉信号の取得および動作の実証

3 種の光共振器とマイケルソン干渉計の安定したロック動作の状況で、マイケルソン干渉計の片腕に設置した電気光学位相変調器を用いて、重力波の擬似信号を注入し、光 AC 結合による干渉信号の取得を確認する。

#### (4) 光 AC 結合によるマイケルソン干渉計の干渉信号の感度の評価

光 AC 結合と従来の直流の光信号検出の 2 つの状況をつくり、どちらも重力波信号を生成する光検出器の直流の受光量を同じにする条件で、マイケルソン干渉計の片腕に設置した電気光学位相変調器によって注入される重力波の擬似信号の大きさを比較する。その際、さまざまな周波数の重力波を仮定して、周波数応答の形式で評価する。

### 4. 研究成果

(1) マイケルソン干渉計に入射するレーザー光の雑音除去、光 AC 結合信号検出、干渉信号に混入する不要な高次の空間モード除去用の 3 種類の光共振器の製作および性能評価。

マイケルソン干渉計に入射するレーザー光の雑音除去用の光共振器では、共振器長 0.8m、フィネス 500 の光共振器を実現し、1MHz 以上の周波数のレーザー雑音が低減できていることを確認した。また、光共振器のエンドミラーに接着したピエゾ素子のフィードバック制御によって、長時間のロックを実現した。

光 AC 結合信号検出用の光共振器は、光共振器に使用する鏡の損失の大きさを実際に評価することによって、共振器長を適切に設計する必要があった。光共振器のフィネス 100 程度であれば、ほぼ損失なく動作することを評価できたため、最適な共振器長の光共振器を製作し、長時間のロックを実現した。

干渉信号の信号対雑音比を低下させるレーザー光の高次空間モードの除去用の光共振器については、10~100 MHz の信号を透過させるために、フリースペクトラルレンジ 10 GHz、フィネス 30 程度の光共振器を製作し、光損失が十分小さいことを確認し、長時間のロックを実現した。

以上、研究構想どおりの 3 種類の光共振器を実現した。

#### (2) 光フィルタ用の光共振器を導入したマイケルソン干渉計の動作実証。

3 種類の光共振器を組み合わせたマイケルソン干渉計の同時動作を実現した。3 つの光共振器とマイケルソン干渉計の制御に必要な信号取得方法として、変調・復調法がより適切であることが判明したが、そのための電気光学位相変調器の数を揃えるには予算が足りなかったため(導入には 200~300 万円程度必要) 偏光解析法による光共振器の制御、ミッドフリンジでのマイケルソン干渉計の動作で光 AC 結合による重力波信号の取得の検証を進めることにした。将来、感度を追究する際には、変調・復調法のほうが雑音特性やレーザーパワーの損失の観点からも好ましい。

#### (3) 光 AC 結合によるマイケルソン干渉計の干渉信号の取得および動作の実証。

光 AC 結合での干渉信号取得の実証のために、マイケルソン干渉計に電気光学位相変調器を挿入し、重力波の擬似信号を生成し、光検出器での信号の大きさを測定した。従来の直流(DC) 受光と同じ受光量で、受光量に対する重力波信号の大きさが 10 MHz-100 MHz の周波数帯で 5 倍程度改善することを確認した。

#### (3) 光 AC 結合によるマイケルソン干渉計の干渉信号の感度の評価。

使用したレーザーパワー 10 mW に対し、光 AC 結合によって、干渉計信号の直流での受光量を数 10  $\mu$ W と 1/100 以下に低減させた。その結果、光検出器の雑音レベル限界の感度が実現した。そのため、今後の戦略として、レーザーパワーを 1 W 以上に増やすこと、光検出器の高速かつ高感度化、が必要であることを見出した。光検出器については、よりも高速かつ高感度化を実現するトランスインピーダンスアンプの評価を進めた。レーザーパワーの増強については、本課題の予算規模では導入できないため、今後の展開へとつなげることとし、本研究提案での原理の検証は十分に達成したと考えており、実際の重力波検出器での受光パワーレベルでの試験の準備が整ったといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|