法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-16

次世代レーザー干渉計重力波天文台のための縮退光共振器姿勢制御技術の開発

SATO, Shuichi / 佐藤, 修一

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 科学研究費助成事業 研究成果報告書 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 4 (発行年 / Year) 2015-06

科学研究費助成事業

研究成果報告書



交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):共振器内のモードを操作するという手法を導入することにより,鏡の姿勢について新しい制 御信号の取得方法を開発した.縮退した共振器の姿勢制御という従来の設計のレーザー干渉計での未解決問題を抜本的 に解決する新しい制御の方式を提案し、実証実験を進めた.KAGRAのパラメータを用いた計算でも本提案の効果が確認 されたことを踏まえ,テーブルトップサイズでの実証実験のための光学系・機械系・制御系の設計・製作を行った.

研究成果の概要(英文): We have developed novel design of sensing technique for alignment control of the laser interferometer mirrors, by introducing modified Gouy phase inside cavities. We could give a drastic solution for outstanding problem known as signal degeneracy of the traditional designed degenerated cavities, and proceeded the proof-of-principal experiment. As the sensing simulation using KAGRA parameters confirmed to give similar effects, we have proceeded the experiment: the design and fabrication of the optical, mechanical and control systems.

研究分野: 重力波物理学

キーワード: 重力波

2版



1. 研究開始当初の背景

重力波を検出するためのレーザー干渉計 は、重力波とレーザー光との相互作用長とな る光路長を稼ぐために光共振器を用いる.次 世代のレーザー干渉計は Resonant sideband Extraction (RSE)というトポロジーを採用し、 4 つの光共振器がマイケルソン干渉計を介し て複雑に結合した結合共振器系を構成する. これら共振器系が長さおよび角度に関して 適切に制御され、共振状態を保つことで初め て重力波検出器として動作する.

昨今の干渉計技術においては,RF帯の位 相変調・復調を用いたWave Front Sensing (WFS)と呼ばれる波面検出法が鏡の姿勢制御 の方法として採用され,次世代干渉計設計に も用いられることになっている.このWFS という方法は,伝搬するレーザー光を共振器 で定義される空間モードに分解したときの 基本モードおよび高次モードの各モード間 の検出を行っている.したがって例えば,2 枚の鏡から成る共振器の姿勢の誤差信号を 理想的に分離して得るには,共振器のモード が縮退していないこと,つまりモード間に適 切な Gouy 位相が存在することが本質的に重 要である.

通常レーザー干渉計の光学設計では,重力 波のプローブとなる Fabry-Perot 共振器はで きるだけ長く設計される一方で、光強度を増 幅するためのリサイクリング共振器は極端 に短い構成となることが多い. たとえば KAGRA では、腕共振器の基線長 3km に対 しリサイクリング共振器の長さ 66m 程度で ある.この場合、レーザー光のモードは腕共 振器に最適化されるため, 腕共振器は幾何光 学的に十分に安定な設計となる一方で、リサ イクリング共振器はモード不安定に近い、縮 退した共振器となる.こうした縮退した共振 器ではモード間の Gouy 位相が十分でないた めに、共振器を構成する2枚の鏡に関して独 立な信号を得ることがきわめて困難となる. これはつまり、どちらの鏡が動いてもよく似 た誤差信号しか得られず、適切な制御ができ ないという結果に帰着する.

2. 研究の目的

(1) 共振器内のモードを操作するという斬 新な手法を導入することにより,鏡の姿勢に ついて新しい制御信号の取得方法を開発す る.縮退した共振器の姿勢制御という従来の 設計のレーザー干渉計での未解決問題を抜 本的に解決し,新しい制御方式を提案・実証 する.

(2) このアイデアを実際のフルスケール結 合共振器系に展開・応用し,現在建設が進め られている重力波観測装置 KAGRA への実 装を想定した設計を進める. 研究の方法

(1)実験によって実証するための光学系設計のため,適切なモード操作によって鏡の姿勢に関する誤差信号が理想的に取得できることをはじめとして,共振器の光学設計,検出系・制御系などの設計を行う.共振器が縮退する場合,得られる誤差信号の大きさは大きくなる一方で分離するための Gouy 位相角が小さくなる.対角化する際に S/N まで含めた状態で最適な信号取得の方法を開発する.

(2)テーブルトップに最小限の構成で干渉 計を構築し、本研究のアイデアである「縮退 を解く」ことによって適切な姿勢制御の誤差 信号が取得できることを実験的に実証する. 光学系はもとより、複数変調に対応したWFS 信号取得系、デジタル制御系およびアクチュ エート系を設計・製作する。WFS を用いた姿 勢制御の研究は実績も経験も豊富であるこ とから、既存の要素技術・道具立ての準備が できれば実験の遂行にあたって原理的な部 分に関しては大きな困難はない.むしろ本実 験の核心は、縮退した共振器と縮退を解いた 共振器との比較において、信号取得の質が改 善されていることを実験的に明確に示すこ とにある.

(3) 干渉計(結合共振器系)のスケールは光 学系の取り回しの容易性からテーブルトッ プ実験程度に小さくするが,共振器のモード, 変調・復調方法等はフルスケール干渉計に拡 張できるように一般的な構成に設定する.さらに光学構成を単純化することで問題の本 質的な部分にのみ集中し,短期間で効率的な 成果を挙げられるように工夫する.また,信 号取得に関して計算と一致する結果を得る ためには,設計に沿った「クリーン」な干渉 計を構築することが重要である.特にWFS は レーザービームのモードの変化を検出する 方法なので,不要なモードが干渉計に入らな いように,精密な光学設計および実験環境の 構築が重要となる.

4. 研究成果

(1)信号取得法:現在神岡で建設中のKAGRA 光学系について,実際のパラメータを元に WFSを用いた姿勢制御信号を計算した。KAGRA では腕共振器におけるビームのウエストが 共振器内部にある設計のため,リサイクリン グ共振器内部でのGouy位相の進みは通常の 設計の干渉計に比べて更に極端に小さい.リ サイクリング共振器のGouy位相を操作しな い縮退した共振器の場合と,Gouy位相を操 作して縮退を解いた場合の共振器について 期待される取得信号の計算を行った.

ここではフルの RSE 干渉計を3枚鏡の結 合共振器に簡単化し、フロント・エンドおよ びリサイクリング鏡の3枚についての信号 分離度をみるのが目的である。変調は2周波 を用いて共振器の長さと姿勢の制御に用い る。信号取得ポートは反射側ポートに加えて リサイクリング共振器内からも一部の光を 取り出して利用するものとする.復調位相お よび干渉計ポートからWFSまでのGouy位 相は該当する必要な信号が最大になるよう に、かつ混入信号が小さくなるように調整し た.

Sig. Port. Ref. 1 Pick Ref. 2	, Deg,	En 2. 0. -3	.d 0 3 .5	Fro -0. 1 -4	ont 02 7	Ra -0. -1 4	ec 07 15 1
Sig. Port. Pick Ref. 1 Ref. 2	, Non-de	g.	Er 0.6 -3 0.0	ıd 58 .9 99	Fro 0.0 4.9 -0.(nt 12 5 06	Rec 0.01 0.08 1.3

これによるとリサイクリング共振器が縮 退している場合,エンド鏡の信号は比較的独 立した状態で取り出せるが,フロントとリサ イクリング鏡の2枚は反射ポートの信号を みてもピックオフポートの信号をみても縮 退しており、それぞれを独立に取り出すこと は困難であることがわかる. 一方でリサイク リング共振器の縮退をなんらかの方法で解 いた場合,期待される信号のマトリクスによ ると、エンド鏡の信号を独立に取得すること ができる状況は共通であるが、リサイクリン グ鏡の情報がピックオフポートからほぼ独 立に取り出せることが大きな違いである.フ ロント鏡の情報は独立に取り出すことはで きないが、他2枚の鏡の情報が独立であるこ とからマトリクスは容易に対角化できる.

以上のことから, KAGRA においてもリサ イクリング共振器の縮退は鏡の姿勢制御信 号の取得に大きな影響を与えることが確認 された.一方でリサイクリング共振器の縮退 を解くことができれば、比較的良好(独立) な誤差信号が期待されることも確かめられ た.

(2) 光学系設計

重力波に用いられるレーザー干渉計は、そ の共振器の大きさに応じて適切な鏡の曲率 と制御に用いる変調の周波数が決定される. 従って同じ設計のまま干渉計のサイズだけ をスケールしてテーブルトップの大きさに することは不可能である.ここでは縮退/非 縮退の共振器における姿勢制御信号の比較 という点に焦点を絞り、市販されている離散 的な値の曲率半径(と反射率)の鏡、および 現実的な範囲の変調周波数をもちいること によってテーブルトップサイズの光学系を 設計した.



(3) 機械系設計

小規模な実験ではあるが3枚の鏡はそれ ぞれ長さ方向および姿勢(ピッチ・ヨー)の 併せて3自由度を計測・制御する必要がある. このためそれぞれの鏡には3自由度を独立 にアクチュエートする機構が必要となる.こ こでは3軸のピエゾ素子が一体化され,長さ 方向および傾き方向に自由度を持つ市販の ピエゾアクチュエータを採用した.0.5 イン チ規格の鏡を固定するためにアタッチメン ト治具を設計し取り付けた.この機構を用い て光共振器を構成し,フィードバック制御系 を閉じることで共振状態に制御することに 成功した.



(4)制御系設計

結合共振器の制御のために2つの周波数 の位相変調を用いる方式を採用する.これに 対応して光検出器も2周波対応の共振型と し、1つの検出器から二つの周波数に対応し た RF 信号(と DC)を同時に得られる構成と した.光学設計との調整から、変調周波数は 17.25Mhz と 40MHz の2種類とし、これらに対 応した長さ方向を計測する光検出器、姿勢を 検出する WFS、およびミキサー復調回路も併 せて新規設計した.



5. 主な発表論文等 (研究代表者、研究分担者及び連携研究者に は下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

- <u>佐藤修一</u>, DECIGO ワーキンググルー プ," スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(63):pre-DECIGOの設計",23pDJ-5, 日本物理学会,2015年3月23日,早稲 田大学(東京都新宿区)
- ② <u>佐藤修一</u>, DECIGO ワーキンググルー プ," スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(58):ドラッグフリー", 21aSB-7, 日本物理学会, 2014年9月21日, 佐賀 大学(佐賀県佐賀市)
- ③ <u>佐藤修一</u>, DECIGO ワーキンググルー プ," スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(53):ドラッグフリー制御", 28aTL-4,日本物理学会,2014年3月28 日,東海大学(神奈川県平塚市)
- ④ <u>佐藤修一</u>, DECIGO ワーキンググルー プ,"スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(48):ドラッグフリー制御", 23aSR-12,日本物理学会,2013年9月 23日,高知大学(高知県高知市)
- 6. 研究組織
- (1)研究代表者
 佐藤 修一 (SATO, Shuichi)
 法政大学・理工学部・教授
 研究者番号:30425409