

### 重力波検出のための結合共振器の制御

蔭井, 飛大 / Kagei, Takahiro

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

60

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2019-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022066>

# 重力波検出のための結合共振器の制御

## Length and alignment control of coupled cavity for gravitational wave detection

蔭井飛大

Takahiro Kagei

指導教員 佐藤修一教授

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

The gravitational wave detectors are based on a Michelson interferometer with Fabry-Perot cavities in its arms and recycling part to have longer optical path length and recycling gain respectively.

The position and alignment of each mirrors can be easily disturbed with external excitation, therefore, each optical components have to be controlled appropriately around the operational points.

However, it is known that “signal degeneration” occur when extracting mirror’s alignment signals for laser interferometer with conventional optical layout of coupled cavity Solving this degeneracy is essential for stable operation of the interferometer.

The aim of this study is to demonstrate solving degeneracy of coupled cavity system of the laser interferometer in terms of an alignment sensing signal.

In this thesis, control system of coupled cavities have been built and demonstrated for length and alignment sensing and control.

**Key Words** : gravitational wave, coupled cavities, control, Signal degeneration

### 1. 研究の目的と意義

#### (1)重力波検出器と共振器の関係<sup>[1]</sup>

重力波は、光速で伝播する時空の歪みである。重力波を検出することは、一般相対論の検証や従来の電波波とは異なる、新たな宇宙の観測方法につながる。これは、天文学を大きく発展させる可能性を秘めている。

重力波によって空間が歪むと物体間の固有距離が変化する。これを利用して、重力波の直接検出には2枚の鏡間の距離の変化量を計測するという方法がある。重力波は潮汐力的に距離を変化させるため、Michelson干渉計を用いて検出できる。しかし、単純なマイケルソン干渉計では、基線長の長さから重力波の検出は困難である。そのため、実際の重力波検出器には、図1のような干渉計が用いられている。

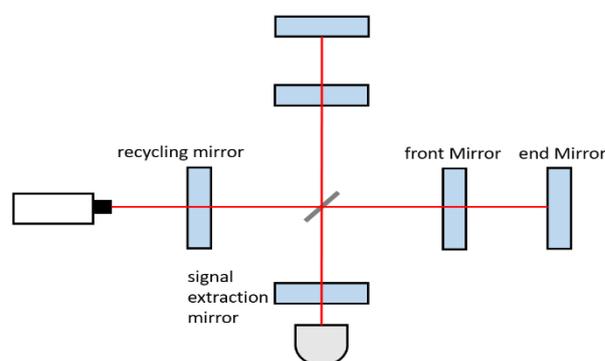


図1. 現在主流のレーザー干渉計(RSE干渉計)

図1のように、単純なMichelson干渉計と比較して、干渉計の腕をfront mirror(FM)とend mirror(EM)のように、2枚の鏡を平行に並べることで構成される、Fabry-Perot(FP)共振器にする。これにより、光が鏡間を多重反射することで、実効的に基線長を長くしている。

さらに実際の重力波検出器には、図1のように、レーザー光源側とPhoto detector(PD)側に鏡を追加して、新たにrecycling cavityを構成する。このように、複数のFP共

振器を組み合わせて構成される共振器を結合共振器という。recycling cavity を入れることで、干渉計から出てきた光を再び干渉計に入射することが出来る。これにより、レーザー側の共振器では入射光の強度、PD側の共振器では重力波の信号を増幅し、単純なFP共振器の干渉計と比べて、検出器の感度は高まる。また、重力波の信号は微小であるため、干渉計を超高感度で運用する必要がある。そのため、向かい合う鏡の距離や姿勢を最適動作点に制御することで、安定して光を共振させなければならない。

## (2)共振器の制御と課題

現状の重力波検出において、6枚の鏡から構成される、共振器を共振状態に保たなければならない(Resonant sideband Extraction)の場合は共振状態ではないが、それに近い状態で制御する必要がある。しかし、実際は地面の揺れなどの外乱によって、鏡が変位してしまい、共振器の理想の動作点からは外れてしまう。そのため、それぞれの鏡の位置や姿勢を制御する必要がある。鏡の位置や姿勢のズレの信号は、共振器からの反射光から検出しているが、この鏡の姿勢のズレの信号を取り出す際に、信号の縮退と呼ばれるものが発生しており、現在主流の重力波検出器で感度を下げる要因になっている。

これは、複数のFP共振器で構成されている結合共振器において、それぞれの共振器長が大きく異なる場合に発生し、それぞれの鏡のアラインメントの信号が取り出しづらくなるというものである。実際の重力波検出器では、FM-EM間の共振器長と比べて、FM-RM間の共振器長が極端に短いため、図2のように<sup>[1]</sup>FM-RM間の鏡の姿勢の信号が取り出しづらくなるという問題が発生している。

この問題を解決する方法のひとつに、FM-RM間にレンズを置くことでguoy位相を大きくする方法が提唱されているが、いまだ実験されていない。これを実験し、実証することは、重力波検出器をはじめ、光共振器を扱う分野にとって大きなメリットとなる。

本研究では、FM-EM-RMの3枚の鏡で構成されている結合共振器を用いて、FM-RM間の信号が縮退する場合の光学系を組み、FM-RM間にレンズを入れた状態で鏡の位置や姿勢の制御実験を行い、信号の縮退を解決することを最終的な目標とする。

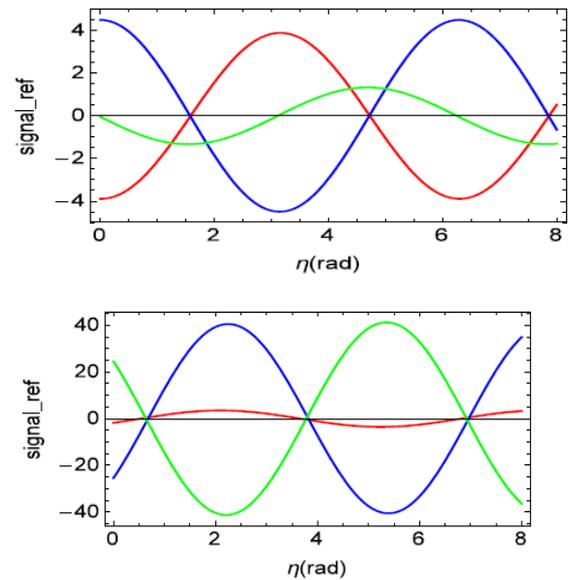


図2. 角度方向の制御に必要な信号. 上が信号の縮退を考慮しない場合、下がKAGRAのパラメータを用いた場合のグラフである。縦軸が信号の大きさで、横軸は共振器からQPDを伝搬する時のGouy位相の変化である。それぞれの曲線が3枚の鏡の傾きの微小変化に対する信号の大きさを表す。上のグラフでは、QPDの位置をguoy位相が4.5[rad]になるようにすれば、RMの信号を十分取り出せるが、下のグラフでは、guoy位相を3.9[rad]にしても、RMの信号がほとんど取り出せないことが分かる。

## 2. 制御の原理

本研究では、図3のように、FMとEMで構成される共振器(arm cavity)と、FMとRMで構成される共振器(recycling cavity)を合わせた3枚の鏡で構成されている結合共振器の長さ方向(各鏡の位置)と角度方向(各鏡のアラインメント)の制御を行い、結合共振器を安定して共振状態に保つ。制御の手法としては下に記すような二つの制御の手法を用いる。

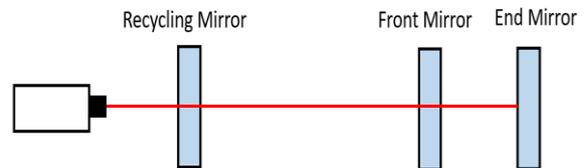


図3. 結合共振器

### (1) Pound-Drever Hall 法

長さ方向の制御には、Pound-Drever-Hall(PDH)法という手法を用いる。PDH法はレーザー光に位相変調をかけ、共振器からの反射光をPDで検出し、PDからの信号を復調することで、図4のような長さ制御に必要な信号を取り出す手法である。この信号には、元のレーザー光(carrier)と、変調によって生じるレーザー光(sideband)の

積の信号が含まれている. carrier が共振器内に入射する状態(共振状態), sideband が共振器内に入らない状態(反共振)にすることで, 長さ方向の制御信号を取り出すことができる. 結合共振器の場合は arm cavity と recycling

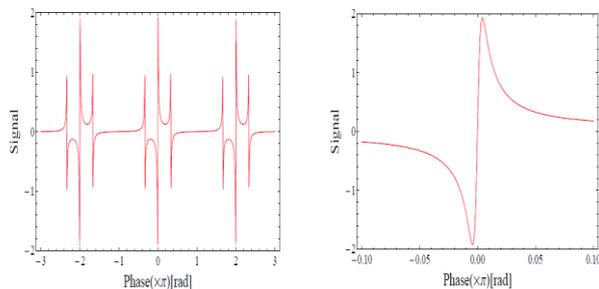


図 4. 長さ方向の制御に必要な信号. 縦軸は信号の大きさを表しており, 横軸は光の位相の変化(共振器長の変化)を表している. 共振器長が共振点付近(横軸 0 付近)にいる状態で, 共振器長が変化すると, 線形の信号が得られる.

cavity の 2 つの FP 光共振器の長さ方向の制御信号を取り出す必要がある.

本研究では, 結合共振器からの反射光のほかに, recycling cavity 間から信号を取り出すことで, 1 周波の位相変調で長さ方向の制御を行う.

## (2) Wavefront Sensing

角度方向の制御には WFS(Wavefront Sensing)という方法を用いる. WFS はレーザー光に位相変調をかけ, 共振器で反射したレーザー光を QPD(quadrant photo detector)で検出し, 復調することで図 2 のようなアライメント制御に必要な信号を取り出す方法である.

レーザー光をガウシアンビームとして考えたとき, レーザー光と同じ固有モード(TEM00 モード)を持つ共振器がミスアライメントを持つと, 共振器からの反射光に別のモードの光(TEM01(10)モード)が発生する. 長さ制御と同様に carrier を共振, sideband を反共振状態にすることで, carrier (sideband)の TEM00 モードと sideband(carrier)の TEM10(TEM01)モードの積の信号を検出できる. よって, 姿勢制御の信号は, carrier(sideband)の TEM00 モードと sideband(carrier)の TEM10(TEM01)モードの位相差の情報から得ることができる. ここで重要なのが共振器間を伝搬するときの guoy 位相は変化させることができる点である. TEM00 モードと TEM10(TEM01)モードの間には Guoy 位相と呼ばれる位相差が存在する. この位相差はガウシアンビームの波面が平面波の時は 0 に近づき, 平面波の部分から遠ざかるほど  $\pi/2$  に近づく. よって, 共振器からの反射光をレンズに通すことで, TEM00 モードと高次モードの光の位相差である Guoy 位相を変化させることができ

る.

これはレンズの中心を通る光はレンズを通しても光路長は変わらないが, レンズの中心を通らない光はレンズを通ると傾きが変わることと等しい. よって, TEM00 モードと TEM10 (TEM01)モードの位相差を 0 にすれば, 信号の大きさは 0 となり, 位相差を  $\pi/2$  にすれば, 信号は最大になる.

上記の方法で角度制御用信号を取得することができるが, TEM00 モードと TEM10(TEM01)モードの積は, 通常の PD で取得することは出来ない. よって, QPD を用いて, 位相変調したレーザーを検出して復調し, 上下左右の信号を加減することで, 制御に必要な信号を取得する.

また, 共振器の長さ制御と同様で, 基本的に反射光には 3 枚の鏡の信号が混入してしまう. よって, 本研究では recycling cavity 内から 1 つ, 結合共振器の反射光から Guoy 位相の異なる 2 つの計 3 つ信号の取り出し, 3 つの信号から 3 枚の鏡の信号を分離して取り出す.

## 3. 実験方法

本実験は, 図 5 のような光学系のもと行われる. 図 5 のように, レーザー光を EOM(Electro Optic modulator)に通すことで位相変調を行い, 共振器に入射させる. その後, PD と QPD で信号を取り出す. 取り出した信号を Mixer で復調し, PD からの信号は, デジタルシステム内のフィルタ回路に通すことで余分な周波数成分の除去と信号の増幅を行い, QPD から出力される 4 つの信号は, デジタルシステム内の matrix 回路に通すことで, 信号を加減し, 4 つの信号を 3 つの信号に変換し, フィルタ回路に通す. こうして作成した長さ方向と角度方向の制御信

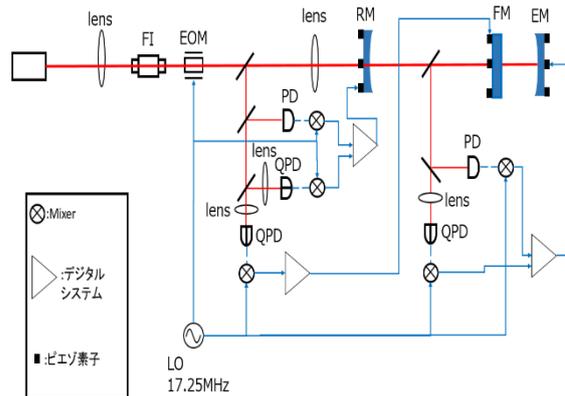


図 5. 実験に用いる光学系

号を FM, EM, RM に取り付けられているピエゾ素子に送る. PD からの信号は EM, RM の位置の制御, QPD からの信号は FM, EM, RM のアライメント制御に用いる.

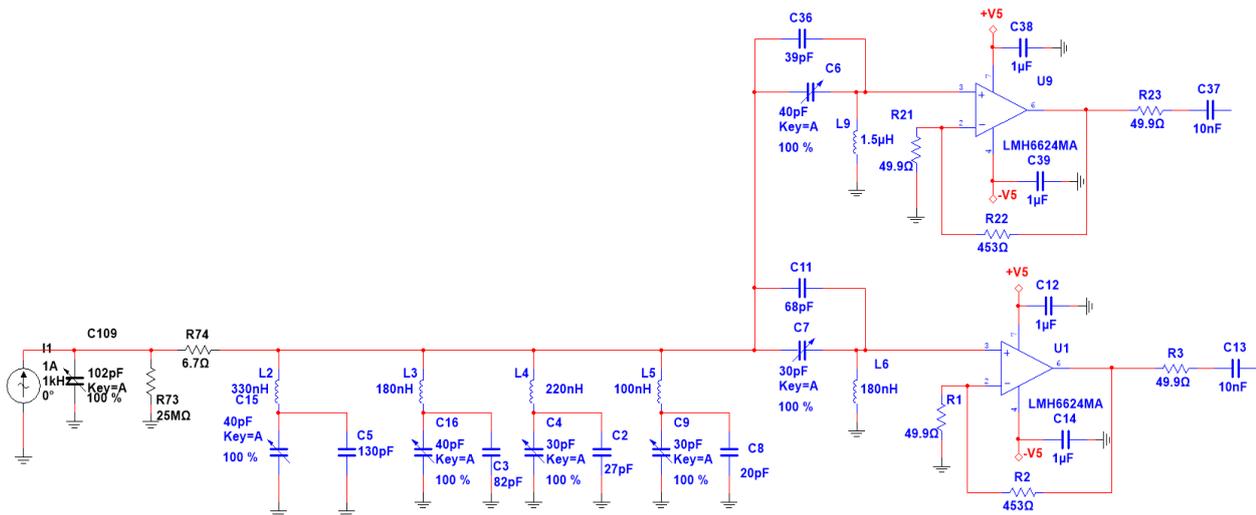


図 6. QPD の回路図. QPD の photo diode は通常の photo diode を 4 分割にした構造になっているので, 図のような信号処理系は, 回路中に同じものが 4 つ含まれている.

#### 4. 研究成果

最終的に, 信号の縮退の解決法を用いた 3 枚鏡の結合共振器の鏡の位置とアラインメントの制御を行うために, 先に FP 共振器の鏡の位置とアラインメントの制御を行うための装置の作成と光学系の設計を行った. 以下に成果物をそれぞれ記す.

##### (1) アナログ回路

本実験に用いる PD, QPD, Mixer は, 制御に用いる信号を最適に取り出せるように Multisim で回路設計を行い, 作成したものを使用する. [2] PD, QPD は, 今は 1 周波位相変調を用いる予定だが, 2 つの変調周波数で位相変調をかける 2 周波位相変調の方が, 結合共振器の制御信号は取りやすい. そのため, 今後 2 周波位相変調を用いた制御実験を行うことを想定して, 研究室で実験系を組む際に, 最適な共振器長になるように, 17.25MHz と 40MHz の信号を取り出せるように設計されている. 前述の周波数の整数倍の和, 差である 22.75MHz, 34.5MHz, 57.25MHz, 80MHz の信号は最適な信号を取り出すために除去されなければならない. そのため, PD, QPD には Notch Filter を組み込んである. ここでは, 自分で作成した QPD の回路図を図 6 に記す[2]. この回路を作成し, 17.25MHz の信号出力部のテストを行ったものが図 7 である.

前回の性能テストの際には, 専用の高周波ケーブルがなかったため, 研究室内のケーブルで代用したが, 今回の性能テストでは, 本来用いる予定であったケーブルを用いている. 前回課題であった, 全体的にゲインが落ちてしまう現象は, 今回は発生しなかった. これは, 専用のケーブルを用いなかったことが原因であったと考えられる. 今回作成した QPD は, 17.25MHz 付近の信号を増幅

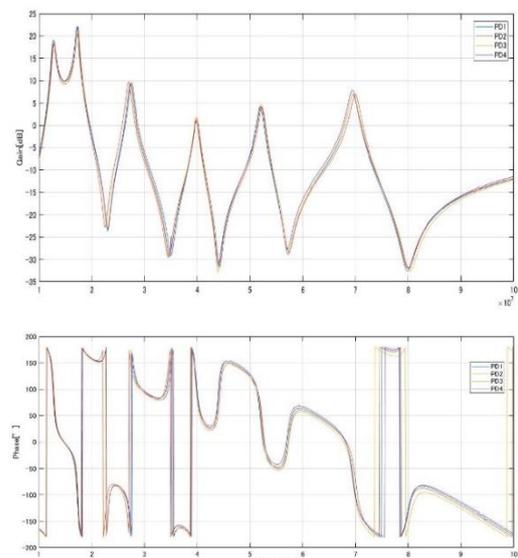


図 7. QPD の周波数特性. 上がゲイン, 下が位相を表している. QPD からは信号が 4 つ出力されるので, それぞれの信号を色で区別できるようになっている.

しており, また, 22.75MHz, 34.5MHz, 57.25MHz, 80MHz 付近の信号を減衰しているため, 角度方向の制御の実験に用いる回路として申し分ないと思われる. [3][4]

##### (2) 光学設計

FP 共振器の反射光から, それぞれの鏡のミスアラインメント信号を取り出すためには QPD の位置が重要になるので, それを踏まえて実験系を設計した. その実験系が図 8 である. FM と QPD 間を伝搬する際の guoy 位相は, FM, EM の信号がそれぞれとれるように,  $\eta_F \sim 1.0 + 2\pi[\text{rad}], \eta_E \sim 3.2[\text{rad}]$  になるように設計されている.

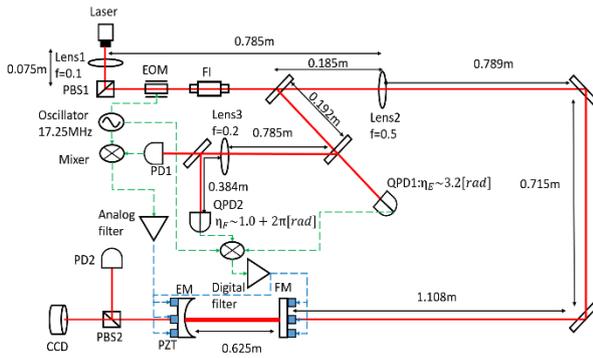


図 8. 研究で用いる光学設計. 赤線が光の経路, 緑線が電気信号, 青線が PZT に送る電気信号を表したものである. EM の位置の制御信号は PD1, EM の姿勢制御信号は, QPD1, FM の姿勢制御信号は QPD2 から取り出せるようになっている.

### (3) デジタルシステム

今回作成したデジタルシステムを図 9 に記す. このシステムは, 姿勢制御の信号を取り出すための Matrix 回路, noise を除去するための Lowpass filter 回路で構成されている.

Matrix 回路は, まず QPD から出力され, Mixer を通過して復調された 4 つの信号を加減することで, 鏡の Pitch, Yaw 方向のずれの信号を取り出す. その後, 鏡を固定するためのミラーホルダーに取り付けられている 3 つの PZT 素子を用いて制御をするため, Pitch Yaw 方向の 2 つの信号を 3 つの信号に変換している.

LowPass Filter 回路に関しては, バターワースフィルタのゲイン, cut off 周波数, 次数が変えられるようになっている.

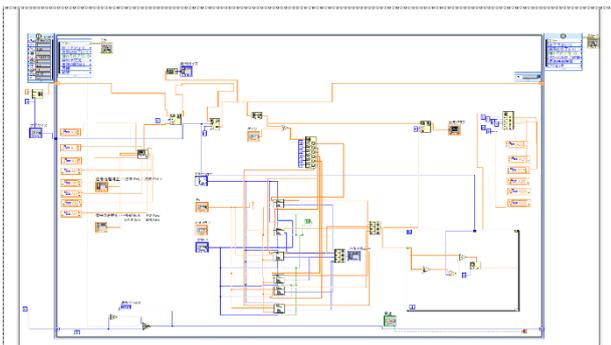


図 9. 鏡の姿勢制御のためのデジタルシステム. このシステムは, Matrix 回路と Lowpass filter で構成されている.

## 5. 今後の展望

最終的に, 3 枚鏡の結合共振器の鏡の位置とアライメントの制御を行うために, 先に FP 共振器の鏡の位置とアライメントの制御を行うための実験装置と, 光学設計は用意することができた. これにより, FP 共振器の鏡の位置と姿勢の制御ができるようになったと言えるだろう. 今後は, 実際に FP 共振器の位置と姿勢の制御を行い, 制御が上手くいった場合, 次は結合共振器の長さ制御が安定する時間を延ばすことを目標にし, 実験系の改良をしていく予定である. また, FP 共振器の位置と姿勢の制御が上手くいかなかった場合は, 制御が安定するように実験系を改良していこうと考えている.

## 6. 参考文献

- [1] 斎藤 陽平: 重力波検出のための結合共振器の制御, 卒業論文, 2015
- [2] 柳田 晃宏: 重力波検出のための結合共振器の制御, 卒業論文, 2015
- [3] LIGO Document D1101614-v4: aLIGO(QPD)
- [4] LIGO Document T1100402-v3: ISC RF Photodetector Design: LSC & WFS