

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO の周波数安定化光源の開発

電子工学専攻 植田研究室 中村 真大

1. 背景

重力波とは光速で伝搬する時空のひずみであり、超新星爆発や連星中性子星の合体など、激しい天体現象によって発生する。重力波が直接検出されれば一般相対性理論の実証となるだけでなく、重力波を観測手段とした「重力波天文学」が誕生するだろう。そして宇宙重力波望遠鏡 DECIGO (DECI-hertz Interferometer Gravitational-wave Observatory) は、3 基の人工衛星間の距離変化を 10^{-22} の精度で計測し、1 Hz 帯の重力波検出を目指す計画である。その DECIGO の前哨計画として、重力波観測小型衛星 DECIGO Pathfinder (略称 DPF, 2014 年以降打上げ予定) の開発が進められている。我々は DPF の光源開発を行っており、その要求性能は波長 1030 nm で出力 100 mW、フーリエ周波数 1 Hz 帯における強度・周波数安定度がそれぞれ $\Delta I/I < 10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\Delta f \leq 1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。この 1 Hz 帯における周波数安定度は、高安定な実験室環境で実現された世界最高レベルの周波数安定度と同等であり、それを人工衛星上で実現することは難しい要求である^[1]。よって本研究では 515 nm 飽和吸収を利用したレーザー周波数安定化による、DPF 光源の要求達成を第一目標とした。ヨウ素の波長 515 nm 吸収線は、従来から光周波数基準として用いられたヨウ素の 532 nm 吸収線よりも吸収線幅が狭く^[2]、より高い光周波数確度が期待できる。

一方、レーザー強度安定化については、光源への励起電流帰還と、AOM の回折効率変調を用いた検証を行った。

2. 周波数安定化の実験系

我々は Fig.1 の周波数安定化系を構築した。光源は半導体励起 非平面型モノリシック Yb:NPRO レーザー(Yb-NPRO)を用いて出力 120 mW、波長 1030nm,の単一モード光を得た。この光源はレーザー結晶へ圧電素子により歪みを加えることで、レーザー周波数を $\pm 100 \text{ MHz}$ で微調整できる。また LD 電流と結晶温度の制御で、レーザーの強度と周波数を制御することができる。

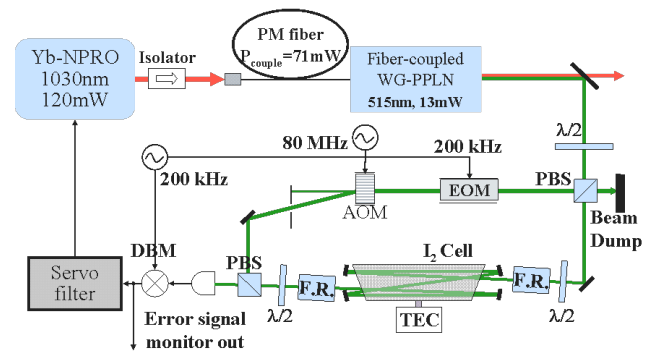


Fig.1 周波数安定化の実験系

PM fiber: Polarization Maintained fiber, **PBS:** Polarization Beam Splitter, **TEC:** Temperature Electric Controller, **FR:** Faraday Rotator, **DBM:** Double Balanced Mixer

Yb-NPRO から得た光を偏波保持ファイバーへ 71 mW (結合効率 59.2%)で入射し、導波路型 PPMgOLN を用いて出力 13 mW(21.1%)の高効率な第 2 高調波変換を行った。この波長 515 nm の第 2 高調波を励起光と検出光に分け、全長 40 cm, 内部蒸気圧 1.39 Pa の I₂セルへ同軸対向に入射させ飽和吸収分光を行った。励起光には電気光学変調器(EOM)を用いて位相変調を加え、飽和吸収信号をロックイン検出した。つまり、検出

光に EOM 変調周波数 200 kHz 帯の強度雑音が重畳していた場合は、その強度雑音が周波数雑音へ結合してしまう。そこで音響光学変調器 (AOM) により励起光の周波数を 80 MHz シフトさせ、光の干渉による強度雑音を低減させた。また、I₂ セルの両端で光を 4 回反射させ吸収作用長を約 5 倍に延長し、周波数弁別曲線の S/N 比を向上させた。このとき励起光の偏光を $\lambda/2$ 板と FR を用いて調整し、I₂ セルの両端面でのフレネル反射による光の損失を低減させた。

3. ヨウ素 515nm 飽和吸収線の評価と選定

まずレーザー周波数安定化に際して、ヨウ素 515nm 飽和吸収線の吸収線幅の測定を行った。その実験図は Fig.1 で示した実験系のうち、AOM の 1 次回折光の回折効率を変調することで、励起光へ強度変調を加えた。そして飽和吸収信号をロックインアンプで復調することで飽和吸収信号を検出した。(Fig.2) その結果、ヨウ素の飽和吸収の線幅は 780 kHz だとわかった。測定条件はレーザーの波長が 515.075853 nm、ヨウ素セルの温度が -5 °C であった。

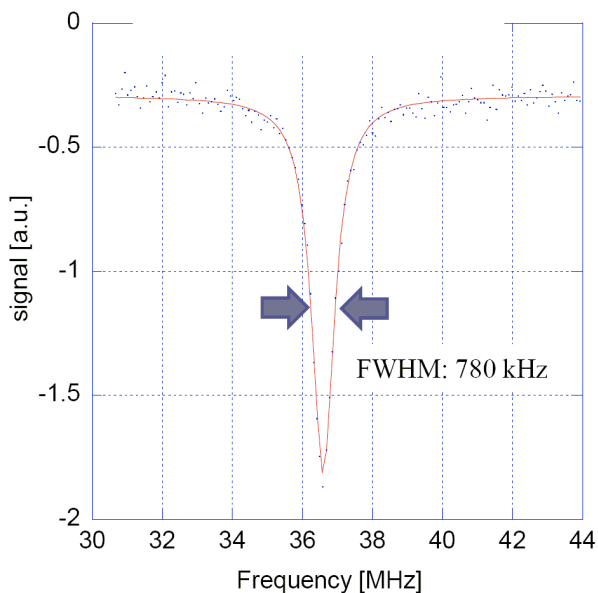


Fig.2 ヨウ素の飽和吸収線幅

一方で、ヨウ素の 515nm 吸収には多くの微細構造が存在する。それぞれの吸収は、由来となるエネルギー準位が異なるために吸収の強度や線幅がそれぞれ異なっている。つまり、それらの吸収線の中でも周波数安定化に適した吸収を選び出すことで、周波数安定度を向上させることができる。こうして測定した周波数弁別信号から、それぞれのデータの傾きをデータ処理により求め、周波数安定化に適した吸収線の選定を行った。その結果を Fig.3 に示す。

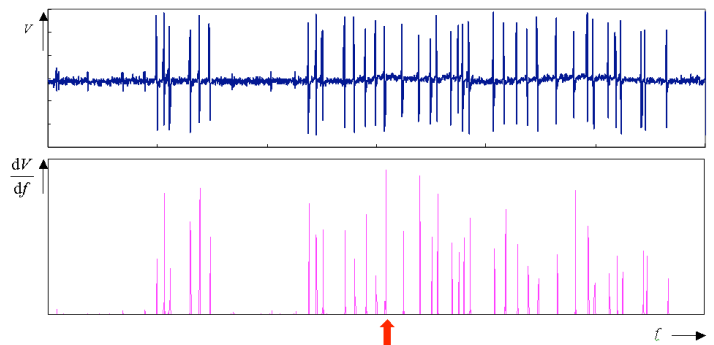


Fig.3 光周波数弁別信号とその微分信号

このデータは、上が光周波数弁別信号を、下がその微分信号を表している。そして、横軸が光周波数、縦軸がそれぞれの信号強度を表している。つまり微分信号の強度が最大で、周波数弁別ゲインが最大となる波長 515.0153 nm の飽和吸収線が周波数安定化に適しているとわかった。今後の実験では、この飽和吸収線を利用して周波数安定化を行った。

4. 無制御時における光源の周波数雑音

この次に、無制御時における NPRO の周波数雑音の見積もりを行った。その測定方法は、まずレーザーの周波数安定化を、フィードバック・ゲインが弱い状態で行い、その error signal をスペアナ

で測定する。ただしこのとき周波数雑音のレベルが、周波数弁別信号の雑音に由来する周波数雑音より大きく、かつ飽和吸収線の線幅より小さい範囲に収まっている必要がある。そのような状態に収めるようフィードバック・ゲインを制限する必要がある。こうして測定した周波数雑音スペクトルに対して、フィードバック・ゲイン G によって抑圧された補正として $(G+1)$ 倍にした。こうすることで、無制御時における NPRO の周波数雑音スペクトルを測定した (Fig.4)。

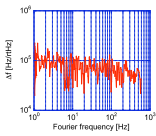


Fig4. 無制御時における NPRO の周波数雑音スペクトル

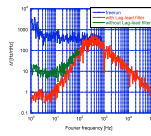
よって無制御時における 1 Hz 帯の周波数雑音は 2×10^5 Hz/rtHz と、目標とする 1 Hz/rtHz よりも約 5.3 桁大きいということがわかった。つまり、必要とされるフィードバック・ゲインは 1 Hz 帯において少なくとも $5.3 \times 20 = 106$ dB である。

5. レーザ一周波数安定化

レーザ一周波数安定化では、光周波数基準が安定であることに加えて、サーボのフィードバック利得が十分に大きいことも必要である。Fig.5 にサーボ利得を変化させたときの周波数誤差信号スペクトルを示した。without Lag-lead filter の系では、

1 Hz 帯で 60 dB の電圧利得が得られる 1 次積分のサーボ回路を接続した。with Lag-lead filter の場合は、更に 60 dB の利得を持つ 2 次の積分フィルタを加え、サーボの追従性を高めた。このとき、フィードバック系全体の位相特性を調整することで、制御の安定条件を満たすようにサーボ・フィルタを設計した。

その結果、誤差信号評価において DPF 光源の要求値を達成していること、つまりサーボ回路の性能が十分であることが確認できた。



★ DPF requirement

Fi

g.5 周波数誤差信号スペクトル

次に周波数安定度を制限するのは、周波数基準の安定度である。

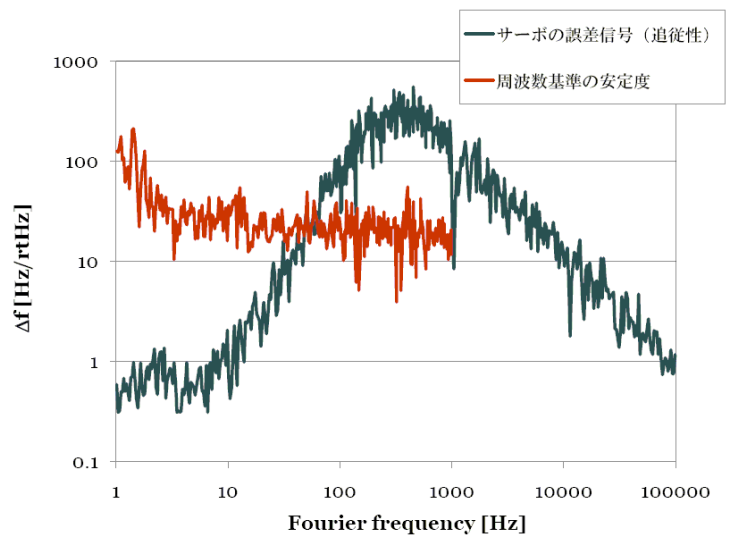


Fig.6 周波数安定化時の周波数雑音スペクトル

Fig.6で示したのは2種類の判定法で求めた、レーザー周波数安定化後の周波数雑音スペクトルである。図中の青線は、負帰還制御時に測定した制御の誤差信号である。赤線は、周波数弁別に使用した周波数基準信号へ重畳している電圧雑音を示している。負帰還制御時の周波数安定度の到達限界は、これらの雑音の抑圧限界を重ね合わせたものである。Fig.6より、1 Hz 帯における周波数雑音は周波数弁別信号の S/N によって制限されており、その大きさは約 200 Hz/rtHz と推定できる。

物質の共鳴線を光周波数基準として用いる場合は、信号の S/N が周波数安定度に大きな影響を及ぼす(それに対し光共振器の場合では、外乱による共鳴周波数のシフトが、周波数雑音の原因となる)。つまり、吸収の信号強度を増強、もしくは雑音を低減する必要がある。そこでレーザーの強度雑音に着目した。飽和吸収分光の計測に使用している位相変調周波数 200 kHz に同期した強度雑音は、周波数弁別信号へ雑音として残留してしまう。そこで応答の速い方式によってレーザーの強度安定化を行えば、周波数弁別信号の雑音が除去できる。その次に、光源への電流帰還を利用したレーザー強度安定化を行った。

6. レーザー強度安定化

重力波検出のような極限の精密計測では、干渉計のレーザー強度雑音がさまざまな悪影響を及ぼす。スペクトル上では、重力波の観測帯域 1 Hz 帯だけでなく、飽和吸収分光の変調周波数 200 kHz 帯の強度雑音も問題となる。

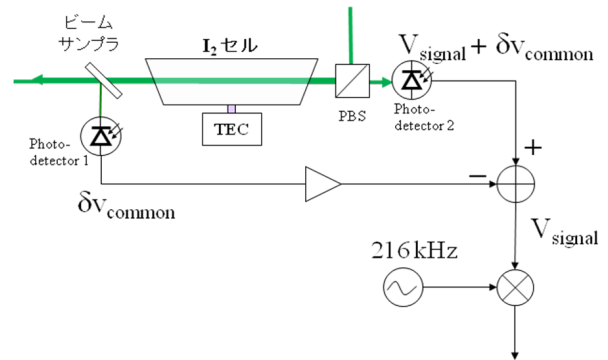


Fig.7 同相雑音除去の実験系

レーザー強度安定化はその応答速度の違いによって分類ができる。

応答の速い制御

- EOM による強度変調 (MHz オーダー)
- 電気信号の減算処理による雑音除去 (使用する IC の帯域次第)

応答の遅い制御

- AOM 強度変調 (100 kHz 程度まで)
- 光源の励起電流変調 (光源の帯域次第、本実験では 1 kHz まで)

Fig.7に示す実験では、レーザー強度雑音の影響を信号処理的に除去し、レーザー周波数安定度を向上させた。こうして周波数弁別信号の雑音レベルが抑圧されたことを Fig.8 で示す。

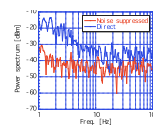


Fig.8 同相雑音除去時の周波数弁別信号の強度雑音スペクトル

Fig.8 の縦軸は周波数弁別信号の雑音レベルを表している。周波数弁別信号の雑音レベルが 10 dB 抑圧された。つまり 200kHz 帯の強度安定化を行うことで、周波数安定度が向上することを確認できた。

この他にも光源への励起電流帰還を用いたレーザー強度安定化も行った。これは重力波の観測帯域である 1 Hz 帯におけるレーザー強度雑音を低減させる狙いがある。DPF 光源では 8 桁以下の相対強度安定度が要求されているため、その達成を目標にして実験を進めた。

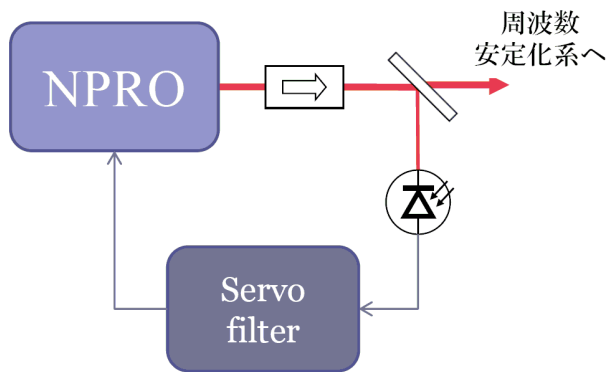


Fig.9 電流帰還による強度安定化系

Fig.9 に示すのが光源への電流帰還をもちいた強度安定化の実験系である。ビームサンプラーで取得したレーザーの強度雑音信号を、光源へフィードバック制御することによって、強度安定化を行っている。

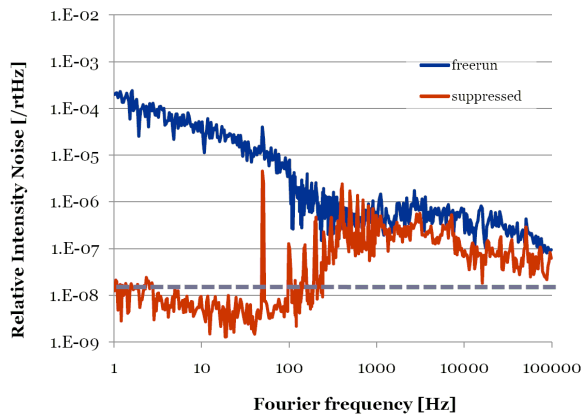


Fig.10 電流帰還による強度安定化の強度雑音スペクトル

Fig.10 から、励起電流変調によって 1 Hz 帯におけるレーザー相対強度雑音を 8 桁以下に抑圧できたことがわかる。

7. まとめ

本研究は次世代重力波検出器 DECIGO の周波数安定化光源を目標として、レーザーの強度・周波数安定化について実験を行った。DECIGO は 0.1–1 Hz 帯の低周域重力波を検出目標と定めている。DECIGO の前哨計画である DPF の光源として必要となる基本性能は、波長 1030nm で出力 100 mW のコヒーレント光である。その安定度は、相対強度安定度が $10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、周波数雑音は以下が要求されている。また、DECIGO の前哨計画である DPF の光源では波長 1030 nm、出力 100 mW、相対強度雑音 $10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、周波数雑音は 1 Hz/rtHz 以下が要求されている。

ヨウ素の波長 532 nm 飽和吸収を基準とした 1 Hz 帯の周波数安定化では、 $20 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の周波数安定度がこれまでに報告されている^[3]。その際に周波数安定度を制限したのは、吸収信号による周波数弁別の明瞭さが足りないことだった。本研究ではヨウ素安定化レーザーの強度・周波数安定度向上を目指し、弁別信号の S/N 向上と、周波数弁別ゲイン向上、レーザー強度雑音の低減というアプローチで実験を行い、以下の知見を得た。

周波数安定化について

- ・ 波長 1030 nm の Yb-NPRO を光源とした周波数安定化系を構築して、ヨウ素の波長 515 nm 飽和吸収線を観測し、周波数弁別ゲインが最大の吸収線を特定した。

本実験系においては、波長 515.02722 nm

の飽和吸収線が周波数安定化に適しているという結果が得られた。無制御状態での NPRO の 1–1 kHz 帯における周波数雑音は、 $\Delta f = 100 \text{ kHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ とわかった。

- ・ 周波数安定化ループの伝達関数と、無制御時の光源の周波数雑音を測定することで、フィードバック回路を最適化した。フィードバック回路へ ラグリード・フィルタを取り入れることで、1 Hz 帯において 120 dB のフィードバック利得を得た。これは、周波数雑音を 6 桁低減させることが可能な性能である。
- ・ 信号光の同相雑音を除去することで、周波数弁別信号の雑音を低減した。弁別信号の雑音レベルを 10 dB 抑圧できた。これは周波数雑音を 5 dB 低減したことに同義であり、200 kHz 帯での強度安定化を進めることで、周波数安定度も向上することを示す結果である。

強度安定化について

- ・ 光源の励起電流帰還によるレーザー強度安定化を行った。
レーザー相対強度雑音を 1 Hz 帯において $10^{-8}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで低減することができた。これは DPF の要求を満たす結果である。

今後の展望としては、EOM による強度安定化を追加し、レーザー周波数安定度を向上する必要があるだろう。こうして得られた知見を生かし、人工衛星に搭載できる大きさの光源についても、実装を進めている。

一方で、本実験系と同程度に周波数安定な光源とのビート計測により、この光源の安定化後の周波数雑音を直接計測する予定もある。そのために我々は、高フィネス光共振器で周波数安定化

をしたファイバー光コム of 構築を進めている。

参考文献

1. Mark Notcutt, Long-Sheng Ma, Jun Ye
Opt. Lett., Vol. 30, No. 14, **1815**, July 2005
2. Susanne Picard, Lennart Robertsson, Long-Sheng Ma, Kaj Nyholm, Mikko Merimaa, Tero E Ahola, Petr Balling, Petr Kren, and Jean-Pierre Wallerand, App. Opt. **42**, 6, 2003
3. Volker Leonhardt, Jordan B. Camp, “Space interferometry application of laser frequency stabilization with molecular iodine” Appl. Opt. **45**, 17, 2006

発表実績

1. 中村真大、松島隆敏、武者満、中川賢一、植田憲一「DECIGO/DPF 用の周波数安定化光源の開発」日本物理学会 2008 年秋季大会
2. 中村真大、堀内慎也、松島隆敏、武者満、中川賢一、植田憲一「DECIGO/DPF 用の周波数安定化光源の開発(2)」日本物理学会 2009 年 年次大会
3. 中村真大、堀内慎也、松島隆敏、武者満、中川賢一、植田憲一「DECIGO/DPF 用の周波数安定化光源の開発(3)」日本物理学会 2009 年 秋季大会