

Pre-DECIGO 用光源 Yb-Fiber DFB レーザーの高周波域強度安定化

武者研究室 下奥あゆ美

1 序論

国内では2015年11月 KAGRA が完成したことで、国外ではアメリカの重力波検出研究グループ LIGO が世界で初めて重力波を検出したことにより重力波天文学が注目を浴びつつある。本研究室では主に周波数安定化レーザーに関する研究を行っているが重力波のように微小な変位量を観測する手段にも周波数安定化レーザーが用いられている。本研究室で構築してきたヨウ素安定化 Yb Fiber DFB レーザー周波数安定化の実験系は図1の通りである。

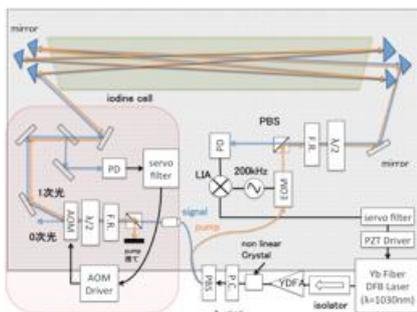


図1 周波数安定化実験系

今回の研究ではレーザーの周波数安定度に関わる2つの実験を行った。光源であるレーザーを周波数安定化する過程においては電気光学変調素子 EOM(Electro Optical Modulator)を用いて 200 kHz で位相変調を行うことにより Lock-in 検出を行い、弁別曲線を得ている。レーザーの周波数安定度は弁別曲線の SN 比で決まるため、1つ目の実験として 200 kHz での強度雑音抑制を行った。また、飽和吸収分光を行う際、対向入射させるレーザーの周波数は周波数安定化の実験系に組み込まれている音響光学素子 AOM(Acousto-Optic Modulator)の発振周波数だけずれるため、AOM の発振周波数の安定度がレーザーの

周波数安定度に影響を与える。そこで2つ目の実験として現在用いている AOM Driver 中の発振器の特性評価を行った。

2 原理

2.1 重力波検出器 Pre-DECIGO

重力波とは、宇宙空間において超新星爆発やビッグバンなど、巨大な質量変化が起きる際に生じる空間の歪みが横波として光速で伝搬する現象である。これは A.

Einstein の一般相対性理論の中で予言されている現象で、その性質の一つである物質との相互作用が電磁波と比較して小さいことから検出されればより高密度状態の初期宇宙など、重力波天文学や宇宙論の理解が深まるといわれている。国内での重力波検出計画としては地上型重力波検出 KAGRA が知られているが今後の計画として宇宙型重力波検出器 DECIGO(DECi-hertz Interferometer Gravitational Observatory) があげられる。

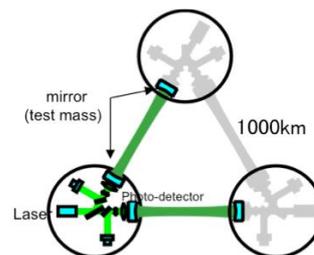


図2 DECIGO 計画

DECIGO は夾角 60 度、基線長 1000 km の3つの Fabry-Perot マイケルソン干渉計で構成されており、Fabry-Perot 共振器を組み込むことで基線長を実効的に稼いでいる。表題にある Pre-DECIGO は DECIGO の前哨計画であり、基線長は 100 km と DECIGO 計画の 10 分の 1 だが干渉計の光源に求められる周波数安定度、強度安定度

はどちらもそれぞれ $1 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$, $10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}}$ Hz と同じである。

2.2 強度安定化の進め方

図 1 に示したレーザーの周波数安定化の実験系において強度安定化に用いる実験系は以下の図 3 の通りである。

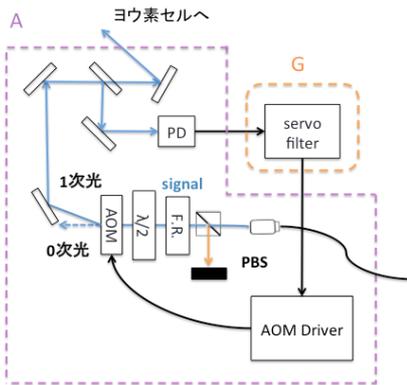


図 3 強度安定化実験系

強度安定化の進め方は以下の通りである。まず、系の A の部分に相当する AOM の伝達関数を測定し、得られた Gain と Phase の情報から等価回路を作成する。次に目標とする帯域 200 kHz で 20 dB の Gain を得るためには A の伝達関数に対して Gain をどれくらいにして制御帯域をどれくらいにすればいいかを考えながら servo filter を作成した。そして設計した servo filter を系に組み込み、最終的に強度雑音をどれくらい抑制できたかを相対強度雑音により評価した。

2.3 制御器としての AOM

本研究ではレーザーの強度雑音を抑制する制御器として AOM を用いた。レーザーの強度雑音安定化のための方法はおもに YDFA (Yb-doped Fiber Amplifier) の励起光を制御する方法と出射光を制御する方法の 2 種類ある。前者は先行研究ですすでに行われているが制御帯域が 10 kHz ほどと、200 kHz ほどの高帯域制御には向かない。

そこで今回は signal 光に元々組み込まれている AOM を用いた。AOM の原理は以下の図 4 の通りである。

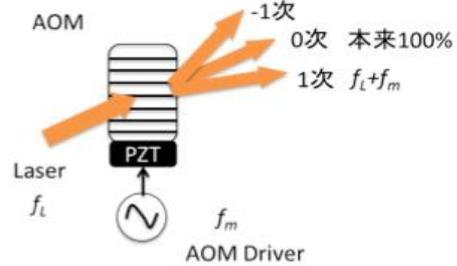


図 4 AOM の原理

AOM Driver の発振周波数が AOM 中の圧電素子であるピエゾ素子を介して伝搬する事により AOM に疎密波が伝搬し、AOM それ自身が回折格子のような役割をすることでレーザーを入射すると高次回折光が生じる。本来ならば入射するレーザー光に対して 100% 0 次光として出射するが AOM Driver における modulation 端子の電圧を変化させることにより AOM Driver から出る Power を変化させることができるため、結果として 1 次光の Power も変化させることができるのだ。そこで AOM を制御器として図 3 のように AOM に対して制御回路を組み込むことにより強度雑音の安定化を行った。

2.4 AOM 発振周波数によるロック点ずれ

飽和吸収分光を行う際、対向入射させる二つのレーザーの周波数が同じ時は下図 5 の右のように速度成分 0 の同じヨウ素分子を取り合って吸収量は速度成分 0 のヨウ素分子の共鳴周波数のところだけディップができる。

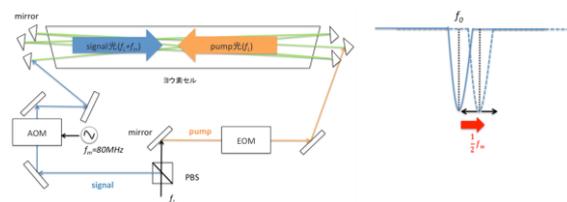


図 5 飽和吸収分光

しかしながら我々が用いている Bread Board Model では signal 光を AOM で 80 MHz で変調していて、取り合うヨウ素分子の周波数が AOM の発振周波数の半分だけずれ、このずれた分の安定度がレーザーの周波数安定度に影響を与えるため、発振器の評価を行った。

3 実験

3.1 レーザー強度安定化実験

(i) AOM の伝達関数特性

図3において AOM Driver 前の信号を In, Photo Detector 後の信号を Out として Out/In を伝達関数として FFT アナライザのサーボ解析モードで測定した。測定結果が図6の通りである。

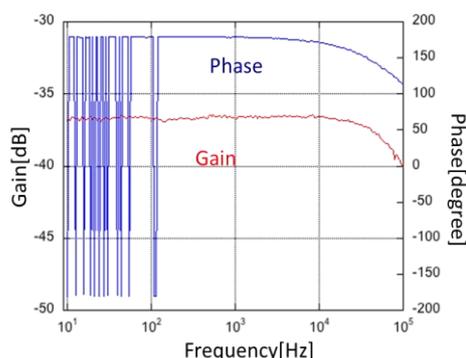


図6 AOM の伝達関数

伝達関数の DC Gain -38 dB, カットオフ周波数 100 kHz という情報をもとに図7のような AOM の等価回路を作成した。

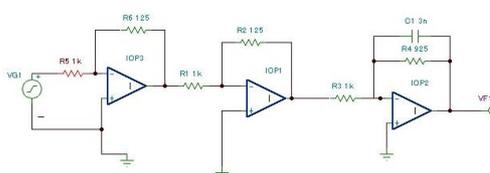


図7 AOM の等価回路

(ii) 制御回路設計

今回の実験の目標である 200 kHz で 20 dB

を得るためには制御帯域 1 MHz, Gain 約 60 dB が必要となるため、これらの要求値を元に図8のような制御回路を設計した。

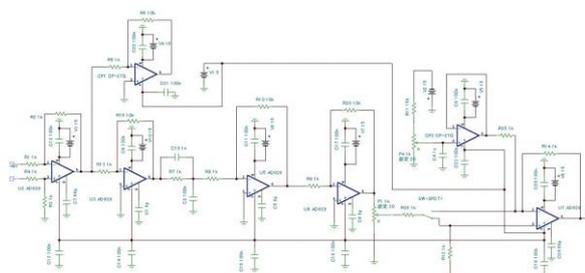


図8 設計した制御回路

今回行った実験として 200 kHz という比較的高帯域の制御を行ったため、制御回路に用いたオペアンプはより高速制御が可能な AD829 を用いた。しかし AD829 は電流帰還型オペアンプであるため、オペアンプ自体で積分回路やラグリード回路を作ることができない。そこでオペアンプ自体で DC Gain を稼ぎ、抵抗とコンデンサの受動素子を組み合わせることでフィルターを作成した。

(iii) 制御後の雑音評価

図8に示した回路を AOM Driver と Photo Detector の間に組み込み、制御した雑音信号を相対強度雑音として FFT アナライザで測定した。なお、測定した信号は以下のように校正した。

$$RIN = \frac{a}{V_{DC}} / \sqrt{Hz}$$

a ; 得られたパワースペクトル

V_{DC} ; オシロスコープで測定した電圧

相対強度雑音測定結果は図9の通りである。図9をみるとわかるように制御帯域約 300 kHz、無制御時の雑音レベルに対して制御回路を組み込むことにより、雑音は 3 dB 程度しか抑制できなかった。今後はフィ

ルター部分の素子の値を最適化することにより 200 kHz での利得を 10 dB ほど取れるように回路を改良していくつもりである。

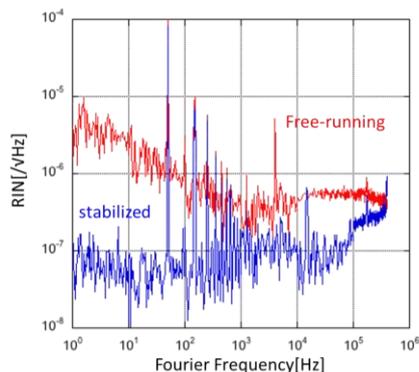


図 9 相対強度雑音測定結果

3.2 発振器の特性評価

周波数安定度に影響を与える発振器の特性評価は図 10 のように外部リファレンスとして Rb 原子時計を用いた周波数カウンタにより行い、アラン分散により評価を行った。

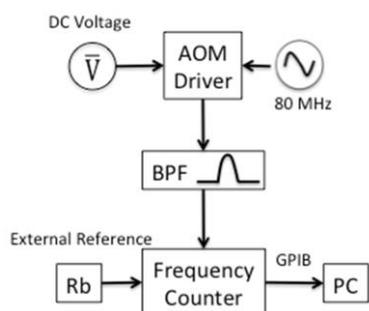


図 10 発振器特性評価実験系

得られたデータをアラン分散にした結果が図 11 の通りである。なお、現在用いている AOM Driver 中の発振器特性と比較するために SPXO の水晶発振器の特性も測定した。

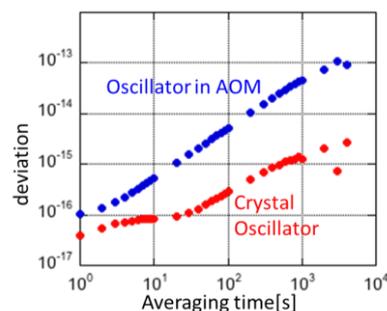


図 11 アラン分散による評価

観測帯域 1 Hz においては周波数ゆらぎはどちらの発振器も DECIGO の要求値である 10^{-16} を満たしているが長期的安定度を考慮した場合、現在用いている AOM Driver 中の発振器の安定度は SPXO よりも悪いことがわかった。最終的に DECIGO 計画では数年宇宙空間で動作するため、より長期的な安定度が必要となってくる。そしてその長期的安定度は発振器の安定度によって制限されてはいけない。現在使っている AOM Driver は発振器が固定されているため、今後は AOM Driver を新しく作成し、その中により安定度の良い発振器を組み込む必要がある。

4 まとめと展望

200 kHz におけるレーザーの強度安定化実験では無制御時の雑音に対して制御回路を組み込むことにより 3 dB 程度しか雑音を抑制できなかった。これはまだフィルターの部分の受動素子の値を最適化できていないことが原因なので今後は 200 kHz で利得を 10~20 dB にするために素子の値を最適化し、制御回路を改良するつもりである。また、発振器の特性評価では現在用いている AOM Driver 中の発振器の安定度が SPXO よりも悪いことがわかったため、今後は新しく AOM Driver を作成し、その中に安定度のよい TCXO などといった発振器を組み込む予定である。