

宇宙重力波検出器 DPF のための周波数安定化光源

武者研究室 末正有

[背景・目的]

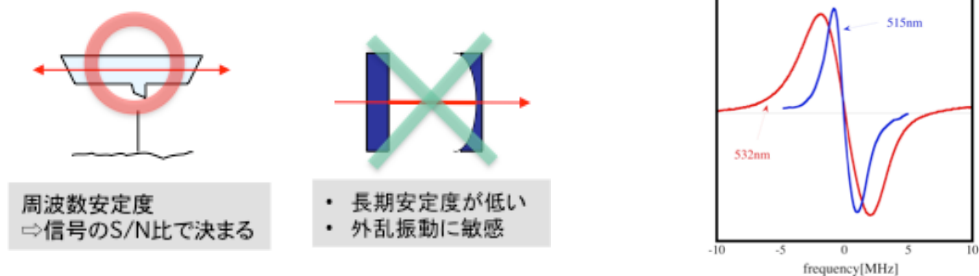
現在世界の様々な国で重力波を直接検出する計画が行なわれている。重力波の直接検出はこれまでに例がなく直接検出が実現すると宇宙初期の解明、相対性理論の実証につながるといわれている。日本では重力波を直接検出するための二つの計画があり、地上型では KAGRA、宇宙型では DECIGO がある。宇宙での検出計画はこれまでに前例がなく、様々な技術実証が必要なため DECIGO の前哨衛星として DEDIGO Pathfinder (DPF) が計画されている。DPF の光源は高い要求値が求められ、その値は波長 $1 \mu\text{m}$ 帯で周波数安定度が 1Hz で $0.5 (\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}})$ 、強度安定度が $1 \times 10^{-8} (1/\sqrt{\text{Hz}})$ 、出力は $0.02 (\text{W})$ である。本研究ではその安定度を達成することを目標に、光源に fiber DFB laser を用いて周波数安定化を行い DPF に搭載する条件を満たすブロードモードモデル (BBM) の開発を行なった。

[原理・実験]

(周波数弁別曲線取得)

周波数基準には原子・分子の吸収線の中心周波数を用いたものとファブリーペロー共振器の共振周波数を用いたものがある。本研究では周波数基準に 515 nm 帯のヨウ素分子の飽和吸収線を用いた。ヨウ素分子の吸収線は光共振器と比べ長期安定度が高く、周辺電界、磁界、温度、気体圧力の変動等の外乱に強いため衛星搭載により適していると考えられる。

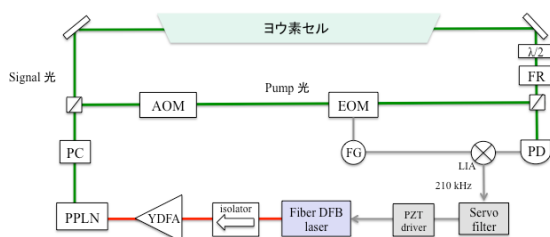
また従来はヨウ素安定化 Nd:YAG laser (波長 1064 nm 、ヨウ素の 532 nm の吸収) を用いていたが、より安定度を高めるために 532 nm ではなく SN 比の高い 515 nm 帯の周波数基準を用いた。(図 2)



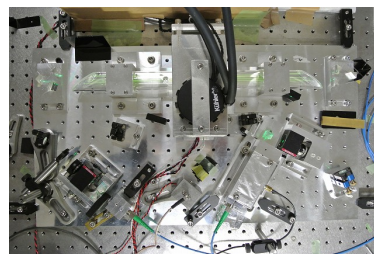
(図 1) 原子・分子とファブリーペロー共振器の周波数基準 (図 2) ヨウ素の飽和吸収の微分曲線

光源は波長 1030 nm の Yb 添加 fiber DFB laser であり増幅器 YDFA を用いてパワーを 20mW から 250mW に増幅した。さらにその第二高調波である波長 515 nm を WG-PPLN を用いて発生させ最終的に 515nm、46mW の光を周波数安定化に用いた。

実験系全体を図 3・4 に示す。機械的安定性を高めるためにレーザーから信号取得部直前まではすべてファイバーオプティクスで行なった。大きさは縦 300 mm x 横 550 mm であり 400 mm のセルの中にはヨウ素分子が封入されている。セルの両端から光を同軸に入射し（飽和吸収分光）ミラーを用いてセル内に光を 5 回折り返すことによって飽和吸収信号を取得した。さらに信号取得の際には電気光学素子（EOM）により Pump 光のみに位相変調、ロックインアンプにより復調（Pound-Drever-Hall 法）を行い、さらに変調移乘法を行なってオフセットの少ない弁別曲線を取得した。



(図 3) 実験系概略図



(図 4) 実際の実験系全体図

(制御系統)

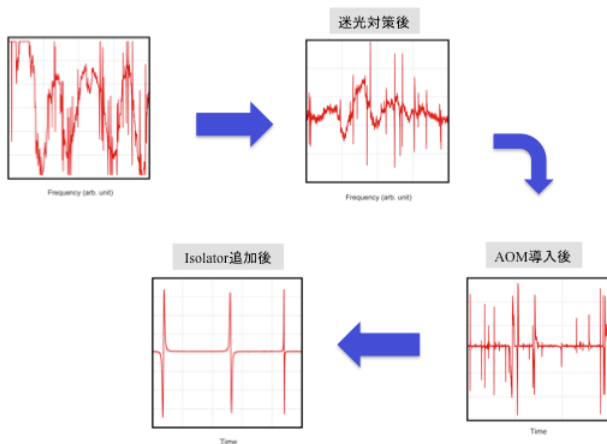
信号取得部から得られた電気信号をサーボ回路に通した後、光源部に負帰還制御を行い周波数安定化を行う。

まず始めに制御用のサーボ回路を作成するため実験系全体の伝達関数を測定した。得られた伝達関数からサーボ回路以外の伝達特性を特定し、回路シミュレーターを用いてシミュレーション、伝達関数実測を繰り返して低周波域での高利得、制御帯域での位相余裕が 30° を目指すサーボ回路を設計した。さらに設計したサーボ回路を光源取得部のあとに設置し周波数安定化を行い、誤差信号の周波数雑音スペクトルを測定し評価を行った。

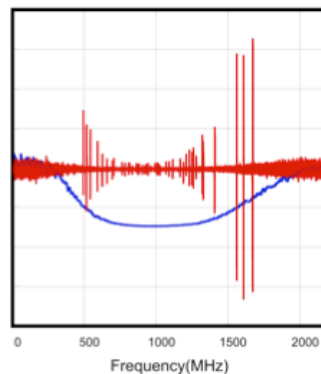
[結果]

ヨウ素の飽和吸収信号の弁別曲線の取得に成功した。また迷光対策・光干渉対策として実験系にピンホールや絞り、アイソレーター、AOM、FR、 $\lambda/2$ 板を導入してより再現性が高く SN 比の良い弁別曲線を得た。さらに得られた線形吸収の中には約 50 本の飽

和吸収信号があることが分かり、その中から最も SN 比の良い信号 を選択し (P29(43-0)) それを周波数安定化の基準とした。

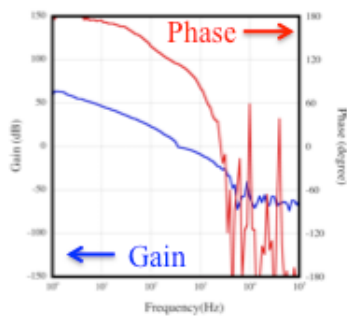


(図 5) 弁別曲線改善の流れ

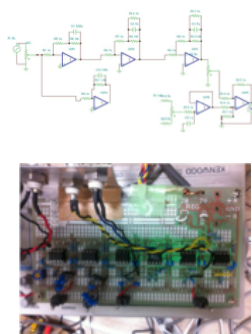


(図 6) 線形吸収と飽和吸収

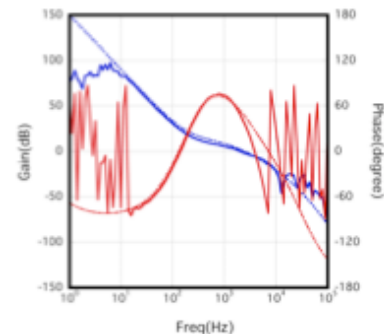
周波数の同調を行なった後実験系全体のオープンループ伝達関数の測定を行い、サーボ回路を最適化した。図 9 に示す通り最適化の結果 1 Hz で Gain (利得) 150 dB 、帯域 2 kHz で位相余裕 30° 以上を達成することが出来、周波数安定化を行なうことが出来た。



(図 7) 伝達特性実測結果

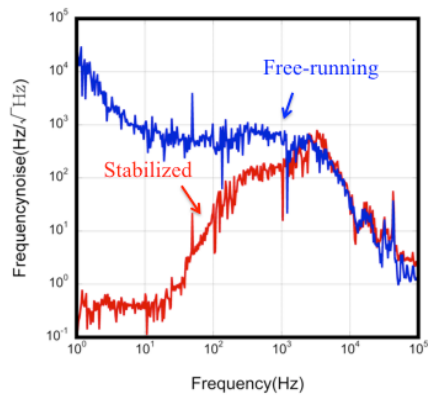


(図 8) 実際に作成したサーボ回路



(図 9) 実測値とシミュレーション結果

さらに誤差信号の周波数雑音スペクトルを測定し図 10 に示す通りその結果が DPF の目標値 $0.5 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を上回る $0.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を満たしていることがわかった。



(図 10) 誤差信号の周波数雑音スペクトル

[まとめ]

衛星搭載用ヨウ素安定化光源を開発した

- BBM のセットアップを完了させた ⇒ SNR のよい周波数弁別曲線を得た
- 制御系統（サーボ回路など）の作成・最適化 ⇒ 制御利得 150 dB、帯域 2 kHz
- 周波数安定化に成功 ⇒ 1 Hz で 0.4 Hz/√Hz を達成（誤差信号評価）

[展望]

- 周波数基準の周波数雑音スペクトルの評価
- 周波数安定度の向上
- 熱・被爆・振動試験→衛星搭載条件のクリア
- 最速 3 年後に打ち上げ