

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO Pathfinder 用光源の開発

植田研究室 堀内慎也

1.はじめに

現在日本で進められている重力波検出計画の一つとして、宇宙空間で重力波検出器を建設するDECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory)計画が進められている。これは一辺 1000 kmの正三角形のレーザー干渉計で微小な空間変位を検出する装置であり、この検出感度を実現するために高出力かつ高安定な光源が要求される。

DECIGO計画ではDECIGO Pathfinder計画(DPF)とPre DECIGO計画の2回の前哨計画を行い、本計画に向けて技術検証を積み重ねる予定である。我々のグループはこれらの計画の光源開発を行っている。レーザーに対する要求値は出力 10 W、波長 0.5 μm であり、周波数、強度安定度はDECIGOの検出帯域である 1 Hz においてそれぞれ $5 \times 10^{-1} \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ 、 $1 \times 10^{-8} / \text{Hz}^{1/2}$ である。

DECIGO / DPF用光源には周波数安定化にヨウ素分子の飽和吸収を周波数基準として用いている。従来は532nm帯の吸収を用いた安定化Nd:YAGレーザー(波長1064nm)が開発されているが、DECIGOの要求値を満たすためには安定度が足りない。そこで532nm帯に比べ吸収線幅の狭い515nm帯の吸収が使えるYb添加YAGレーザー(Yb:NPRO)を光源に用いて、より高い周波数安定化を行っている。現在は衛星搭載化するため人工衛星に搭載するためのプロトタイプであるブレッドボードモデル(BBM)の開発を行っており、小型化、機械的安定性の向上させ、制御の自動化システムの構築を行っている。

2.BBM の作製

周波数安定化はヨウ素の吸収線を基準線として用いその基準線に光源の周波数を合わせることで行う。光源には半導体励起モノリシック Yb:YAG レーザー (Yb:NPRO)²⁾を使い、そこから得られる波長 1030 nm の光を導波路型 PPMgOLN を用いて第 2 高調波を発生させた。ピエゾ素子よりレーザー結晶に歪みを与えることで周波数掃引を行い、こうして得られる波長 515 nm の光をヨウ素セルに対し検出光と励起光の 2 つに分けて同軸対向入射させた。励起光には電気光変調器 (EOM) を用いて位相変調を加えて、モジュレーショントランスファー法により飽和吸収信号を取得した。

BBMのサイズは400 mm×400 mmでヨウ素が入られたガラスセルは対角線上に配置し、セルを透過するパス数を4パスにすることでヨウ素との作用長を増やした。ブレッドボードからの光軸の高さを出来る限り下げ、セルに直接光を入射するミラーは全て固定するため専用のマウントを作製し直接接着を行う事で機械的安定性を向上させた。クランプフォークを使わないミラーマウントを作製し、光学系の省スペース化に対しても柔軟に対応しアライメントを行った。

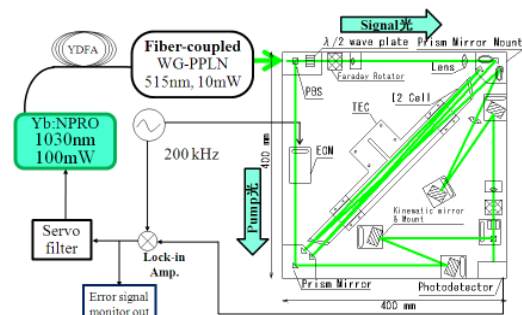


Fig.1 周波数安定化光学系

ブレッドボードは 25 mm 間隔にネジ穴が施されており、この間隔に対してもアライメントを行うことができるが、より細かくアライメントを行うため長さ 20 mm 程度の溝を取り付けネジで固定した。ブレッドボードの1つのネジ穴に対しても十分にミラーの位置を調節できるように設計した。



Fig.2 オプティクスマウント写真

ヨウ素セル端面におけるミラーの固定はプリズムミラーを使用しその側面とマウントを接着しアライメントを行った。はじめに接着させない状態でミラーを配置し、光がヨウ素セルを4パス通過できることを確認する。それが終わったらミラーを接着する。接着方法は、マイクロメーターを取り付けた治具を用意し、Fig.4 の上面を抑えつけた。マイクロメーターによってこの抑えつける強度を適当に調整することで、抑えつける時に生じてしまう仰角の調整も行った。押さえつけが終わったら、その状態のまま側面に接着剤を塗布する。

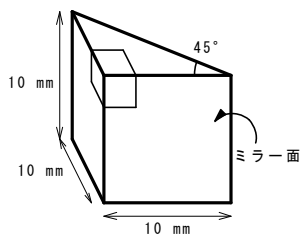


Fig.3 プリズムミラー

接着剤を塗布した後も固定ミラーの向きが変化してしまいアライメントを調整するためにミラーを取り外して再び接着する操作を数回に渡って行った。これは接着剤が乾くこと

で、接着剤が伸縮し設置した位置から大きく外れてしまうことが原因であった。この対処として治具を使って固定して接着剤を塗布した後にすぐに治具を取り外して次のミラーのアライメントを行うのではなく、ミラーを接着するために治具を24時間一つのミラーを押さえつけ、治具を取り外してもアライメントが崩れないことを確認して一つずつミラーを接着した。



Fig.4 プリズムミラーを固定する治具の様子

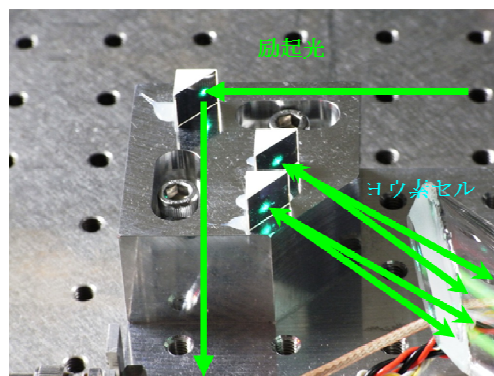


Fig.5 マウントに接着させたミラー

Fig.6 はミラーを固定させた様子である。この用に固定させてしまうと、これ以外のオプティクスを使うことでしかアライメントを調整することができなくなるが、一度光を通過させると固定ミラーによってアライメントが崩れるということは起きずに実験を行うことができた。主にアライメントが崩れる原因としてはブレッドボードまでの入射光学系におけるキネマティックミラーによるアライメン

ト崩ればかりであり、これによって信号が取得できないことは多々あった。ミラーの接着を済ませヨウ素セルに対し光を対向入射させた様子が Fig.7 である。

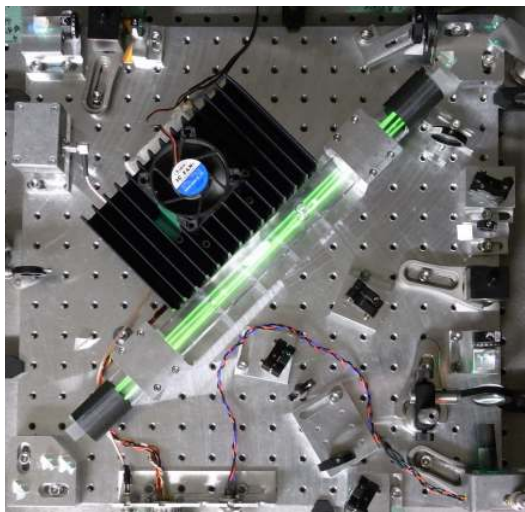


Fig.6 BBM 全体図

信号取得のため個々の迷光を取り払い SN 比の向上に努めた。迷光が発生する部分としては、ヨウ素セル入射のためのエキスパンダー用レンズ、EOM、ヨウ素セル端面である。これらの迷光を一つずつ取り除き、信号取得を行った。

3.実験結果

作製した BBM によって得られた弁別曲線と、それを使い周波数を安定化させたときの周波数雑音スペクトルを示す。

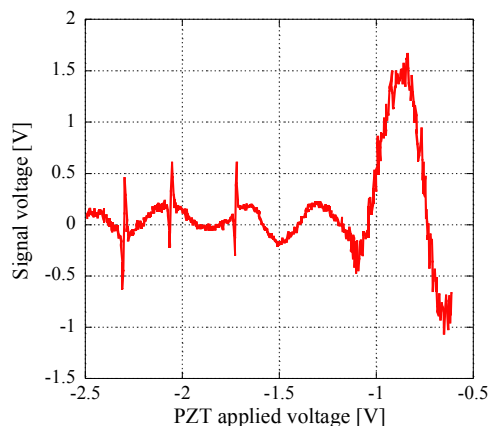


Fig.7 弁別曲線 光学系の最適化以前

ところどころに弁別曲線が現れているが、信号全体が上下に大きく動いてしまっておりこれによって周波数を安定化しても全体の揺れによって数十秒で周波数ロックが外れてしまうという不安定動作が続いた。このため迷光の除去や EOM 変調の最適化を行うことでこの 0 V における揺れを小さくした。特に EOM の変調においては印加電圧を 9 V から 10 V に変更するだけでこの揺れがおさまり、周波数安定化には十分な周波数弁別曲線を得ることができた。以下にその時に得られた。弁別曲線とその弁別曲線を使い周波数をロックしたときの誤差信号のスペクトルを示す。

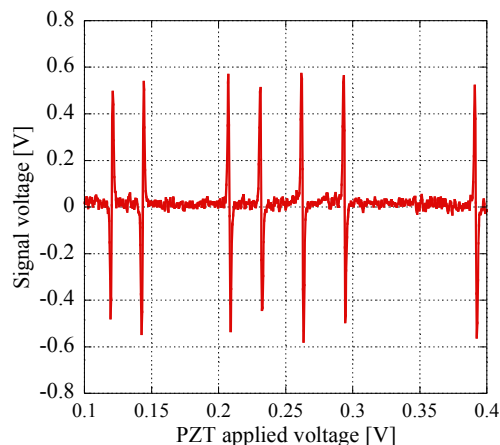


Fig.8 弁別曲線 光学系の最適化後

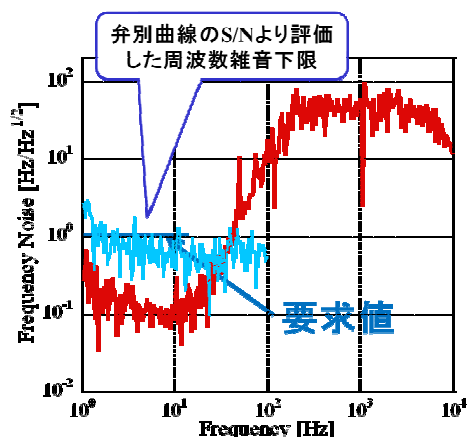


Fig.9 ロック時の周波数スペクトル

周波数弁別曲線の取得は、BBM内の迷光除去や電気周りの整理を行い0 Vにおける揺ら

ぎを抑え安定した弁別曲線を得ることができた。周波数弁別曲線の中心に周波数を掃引してピエゾ素子にフィードバックを行って周波数ロックを行った。Fig.9の赤線が誤差信号によって評価した周波数雑音スペクトルである。周波数雑音は重力波の観測帯域である1 Hz帯で $1 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ を達成することができた。また水色のグラフは弁別曲線のSN比より評価した周波数雑音の下限である。誤差信号評価は弁別曲線の中心への追従度であり、最終的には水色の線で示された周波数安定度が下限となる。この場合でも概ね1 Hz帯で $1 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ を達成することができた。これにより定盤サイズの大きさで行われていた光学系をBBMへ移行することができた。

この他さらなる機械的安定性を向上させるため作製したBBMをもとに光源からヨウ素ガラスセルまでをファイバー化したBBMの作製も行った。ファイバーで構築することにより光学系全体の搬送が用意になる。周波数雑音スペクトルの評価は誤差信号評価であり、今後外部評価を行うときに持ち運びできるように光学系を構築した。作製は途中段階であるが、外形とその写真図について以下に示す。

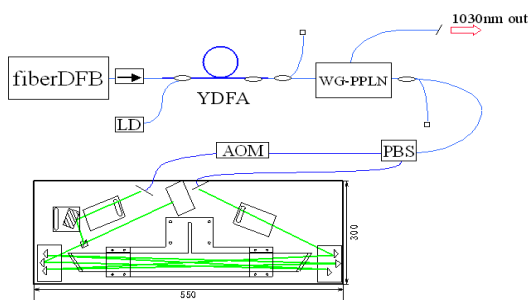


Fig.10 ファイバーBBM 構成図

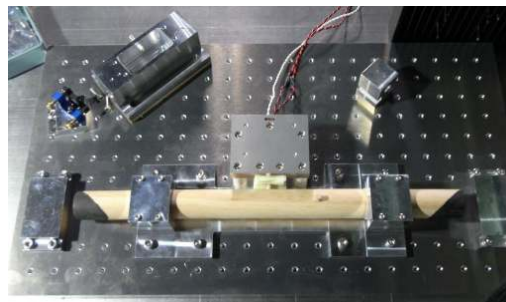


Fig.11 ファイバーBBM 写真

4.周波数自動ロック

周波数を自動でロックするためのシステムに付いても構築を行った。システム概要はFig.12に示した。

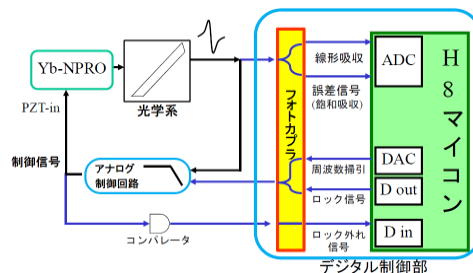


Fig.12 周波数自動ロックシステム概要

使用した電子回路はルネサステクノロジ社から販売されているH8マイコンである。マイコンで行うことは周波数掃引と弁別曲線の読み取り、周波数ロックを行うサーボ回路のゲインアップである。マイコンとサーボ回路はフォトカプラにより電的に絶縁し、デジタルノイズを遮断した。周波数掃引からロックに至る過程はFig.13に示した。はじめにこのプロセスによる周波数ロックが確認できたら、順次複数の弁別曲線の傾きを比較することでより急峻な曲線を選択するように発展させる予定であり、今回は自動でロックがかかるまでのプロセスを確認した。



Fig.13 周波数掃引プロセス概要

使用したマイコンは ADC、DAC が内蔵されておりそれぞれ分解能はマイコンの使用電圧 5 V に対して 10 bit、8bit である。DAC については周波数の掃引を行うための出力として使用するが分解能が足りず、弁別曲線を通り越して掃引が行われてしまうため、マイコン内のデジタル端子を利用して bit 数を増やした。回路は Fig.14 のようであり、図のように回路を作製し 4bit 増築した。これにより全 12bit で掃引を行った。以下にその回路とこれによって作られた掃引波形の様子を示す。

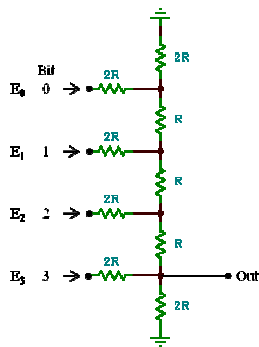


Fig.14 ラダー抵抗による bit 数増加回路

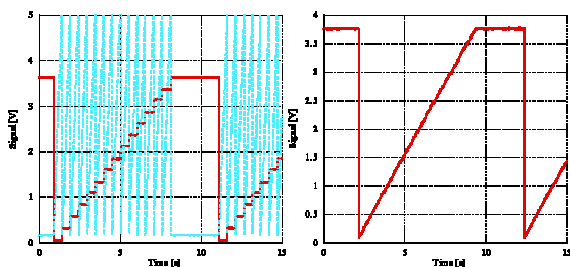


Fig.15 掃引波形

左:足し合わせる前 右:足し合わせ後

以下にこの波形を使い、自動で周波数を掃引し自動ロックが行われるまでの時系列について示す。

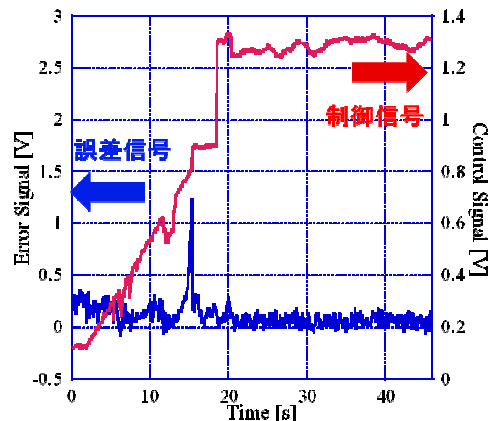


Fig.16 自動ロックに至る過程

赤線は制御信号で掃引信号とロック時の制御の様子が表れる。青線は誤差信号で掃引が開始され約 15 秒で弁別曲線にたどり着いた。するとマイコンは掃引を止め、以下 3 秒毎にアナログサーボ回路に線形 Gain、ラグ・リードフィルタ、完全積分の回路を動作させる信号を出力して低域での利得を増やし、周波数ロックを行っている。ラグ・リードフィルタは低域でのゲインを得つつ、ユニティーゲイン周波数での位相余裕を保つためのフィルタ回路である。以下にこの時の周波数雑音スペクトルを示す。自動ロックにおいても誤差信号評価で 1 Hz 帯で $1 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ を達成することができた。マイコンによる自動ロックでも十分な周波数安定化が可能であることを示すことができた。しかし手動ロック時には現れなかった 50 Hz やその倍波の様子が確認でき、今後は電気系統の改善を行う必要がある。

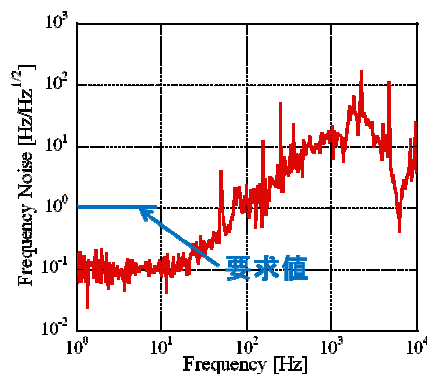


Fig.17 自動ロックによる周波数雑音スペクトル

周波数自動ロックの再現性は8割程度で、誤作動としては周波数を掃引し弁別曲線が感知できても周波数ロックが行われず低域での雑音を抑圧できない場合がある。今後は再現性を高めるため回路の最適化を進める。

5.まとめと今後の展望

本研究は宇宙重力波望遠鏡 DECIGO 計画の技術実証計画である DPF の光学系の作製を行ったものである。人工衛星搭載のため、そのプロトタイプモデルである BBM の作製とその評価を行った。これを使い DPF が要求する周波数安定度 $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ を誤差信号評価から見積もることができた。また作製した BBM をもとにさらなる機械的安定性向上に向けたファイバーでの BBM の作製を進めた。この他、周波数自動ロックシステムの開発を行った。再現性はこれから改善の余地が残されているが周波数掃引からロックにいたるまで自動で行うことができた。

今後は誤差信号評価ではなく、周波数基準との比較により安定度の評価が必要である。BBM を作製したことで光学系が搬送可能になり情報通信機構 (NICT) のフェムト秒レーザー光コムとの比較実験を行い絶対周波数安定度の評価を予定している。また BBM を使い周波数ロックができたことで BBM の次のフェーズであるエンジニアリングモデルに向けた光学系の最適化を行う。

周波数自動ロックについても再現性を高めるため回路の最適化を行いロックが外れることが無いようにシステム全体を再構築する必要がある。この他、自動ロックは予め特定の周波数に対して行うことは想定しているが宇宙での安定化に対し冗長性を保つため、複数の弁別曲線をマイコンに取り込み弁別曲線の比較をしてより線幅の狭い弁別曲線に対して

周波数ロックを行う必要がある。そのためのプログラムの開発と実験を行う予定である。

6.参考文献

1. Seiji Kawamura, *et al*, “The Japanese space gravitational antenna-DECIGO” *Journal of Physics: Conference Series* 122 (2008)
2. P. Burdack, T. Fox, M. Bode1, and I. Freitag “1 W of stable single-frequency output at $1.03 \mu\text{m}$ from a novel, monolithic, non-planar Yb:YAG ring laser operating at room temperature” 15 May 2006 / Vol. 14, No. 10 / OPTICS EXPRESS 4363
3. 中村真大 “宇宙重力波望遠鏡 DECIGO の周波数安定化光源の開発” 電通大 2009 修士論文

7.発表実績

- (1) 堀内慎也、中村真大、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」 (4) 日本物理学会 第 65 回年次大会 21aBH-10 (2010 年 3 月 21 日)
- (2) 堀内慎也、北村俊幸、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」 (5) 日本物理学会 第 66 回年次大会 13pSH-4 (2010 年 9 月 13 日)
- (3) 堀内慎也、北村俊幸、武者満、中川賢一、植田憲一 「衛星搭載用安定化レーザーの開発」 レーザー学会第 31 回年次大会 10pVII-6 (2011 年 1 月 10 日)
- (4) 堀内慎也、北村俊幸、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」 (5) 日本物理学会 第 66 回年次大会 13pSH-4 (2011 年 3 月 28 日)