

ヨウ素安定化光源の短期周波数安定度向上とデジタル制御

武者研究室 大塚俊介

1. はじめに

重力波は超巨大質量の非対称運動や、質量変化によって発生する空間の歪みである。空間の歪みの伝搬であることから、電磁波で捉えることのできなかった物理現象を観測する新しい道具として注目されている。この重力波の特徴として、四重極変位で伝搬することや、距離の相対変位量が微小であることが挙げられる。距離の相対変位量は $dL/L < 10^{-23}$ と非常に小さな値であるために検出が困難であった。この重力波を観測する手法として主流になっているのが、直交座標系であるレーザーを用いたマイケルソン干渉計である。マイケルソン干渉計が一つの光源からの光を二つの光路に分けたのちに鏡で反射させて再び合波、干渉させる干渉計である。重力波が干渉計を通過すると、光路の一方が伸びてもう一方が縮むために得られる干渉強度が変化する。この強度変化によって重力波を検出する。本研究室では、重力波検出器に用いるレーザー光源の開発を行っており、今回、周波数安定化光源の短期的な周波数安定度の向上とデジタル制御に関する研究を行った。

2. 重力波検出計画 DECIGO

2.1 重力波検出機

現在、世界各国で重力波検出を行う計画が進められており、稼働しているものはアメリカの adv.LIGO や欧州の VIRGO が挙げられる。これらの重力波検出器はすでに重力波を検出しており、重力波天文学を進展させている。重力波検出器は干渉計の腕の長さや防振系によって異なる周波数特性を有しているため、複数の重力波検出器を用いて観測することによって、広帯域の重力波観測が可能になる。また、重力波がそれぞれの重力波検出器へ到達する時間差を利用することで重力波の発生方向を特定することが可能であるため、重力波の同時観測がなされている。日本では大型低温重力波検出器 KAGRA が完成し、運転中である。この KAGRA は神岡鉱山の地下に存在し、地面振動を抑える他、ミラーを極低温に冷やすことによって熱雑音を低減している。これにより、低周波数域の感度を向上させている。日本では KAGRA 以外にも重力波検出計画が進められている。

2.2 宇宙重力波検出器 DECIGO

現在日本で進められているもう一つの計画が宇宙で重力波を検出する計画である DECIGO だ。DECIGO は DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory の略称であり、0.1~10Hz の帯域に存在する重力波をター

ゲットとした重力波検出計画である。低周波数域の重力波の検出感度限界は検出器の基線長と地面振動でリミットされてしまうため、長基線長を確保しつつ地面振動の無い宇宙空間で重力波を検出する計画である。宇宙での重力波検出計画は他に LISA が存在する。

図1は DECIGO の概略図となっており、3機の人工衛星を一辺 1000 km の正三角形の頂点に配置して編隊飛行させる。基線長 1000 km の F・P マイケルソン干渉計を3台構築し、重力波の検出を狙う。本研究室では DECIGO に用いるレーザー光源の開発を行っている。光源の周波数雑音の要求値は $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ であり、非常に低い周波数雑音となっている。この目標値を達成するために我々はヨウ素を周波数基準とした安定化光源を開発している。本研究では、このヨウ素安定化光源の短期周波数安定度の向上と、周波数安定化用サーボ回路のデジタル化に関して報告を行う。

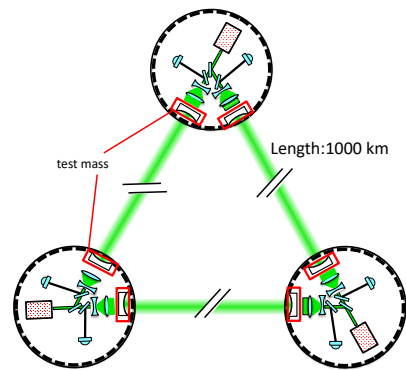


図1 DECIGO の概略図

3. ヨウ素安定化光源の短期安定度向上

3.1 実験原理

本研究室では、DECIGO 用光源としてヨウ素安定化光源を開発している[1]。周波数安定化光源の実験系を図2に示す。マスター光源として Fiber DFB レーザーを使用し、第2高調波発生によって得られる 515 nm のビームを使用してヨウ素分子の 515 nm に存在する飽和吸収線を周波数基準として周波数の安定化を行っている。

Fiber DFB レーザーからの 1030 nm のレーザーを手製の Yb-Doped Fiber Amplifier(YDFA)で増幅した後、インライン型アイソレーターを通過し非線形結晶に入射される。この非線形結晶である Periodically -Poled Lithium Niobate(PPLN)の第二高調波発生により、波長を 1030 nm から 515 nm に変換する。変換された光を空間系に射出し、偏光ビームスプリッターによって s 偏光と p 偏光に分ける。s 偏光を励起光、p 偏光を信号光とする。励起光には電気光学変調子(Electro-optical Modulator, EOM)を用

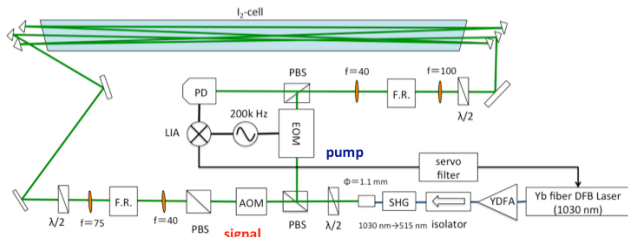


図2 ヨウ素安定化光源の実験系

いて位相変調を加えた後に二枚のレンズを用いてビーム径を拡大させてヨウ素を封入したガラスセルに入射させる。ガラスセルの窓はブリュスター角になっているため、波長板を用いて偏光の調整を行う。信号光は音響光学素子 (Acoust-Optic modulator, AOM) を用いて 80 MHz の周波数シフトを与えた後にビーム径を拡大させてヨウ素封入セルに入射させる。励起光と信号光の2つのビームをヨウ素分子封入セルに同軸に対向入射させることによって飽和吸収分光を行うことができる。また、励起光にのみ位相変調を加えているが、四光波混合によって励起光から信号光に位相変調が変調移乗する (Modulation Transfer Spectroscopy, MTS)。その後、信号光を受光し、復調することによって周波数弁別信号 (図3) を得ることができる。

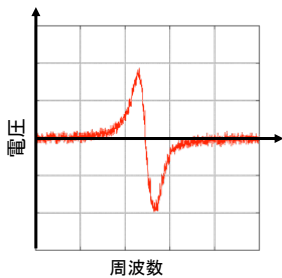


図3 周波数弁別信号

周波数弁別信号は飽和吸収線の微分信号であり、周波数変化を電圧変化として取得することができる。したがって、電圧を一定にするようにマスター光源に対してフィードバックを行うことで周波数を安定化させることができる。

In-loop での周波数雑音では目標値である $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ を達成している (図4)が、in-loop での測定は信号への追従度を表しているため、絶対評価である out-of-loop 評価を行う必要がある。

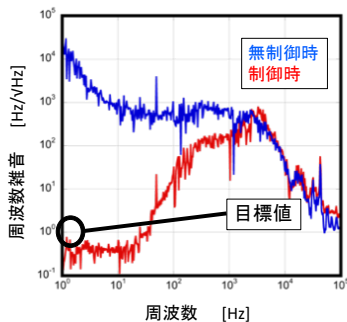


図4 in-loop での周波数雑音スペクトル

out-of-loop 評価においては周波数安定化光源を二台用意し、そのビート周波数の美位相雑音スペクトルから周波数雑音スペクトルを計算している (図5)。ビート周波数の周波数雑音スペクトルとして $24 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10\text{Hz}$ を達成しているが、目標である $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ を達成することはできていない。目標への追従度では目標値を達成しているため、周波数弁別信号の S/N の向上が必要である。今回、周波数弁別信号の S/N を向上させるためにヨウ素を分光する際の条件の最適化を行った。

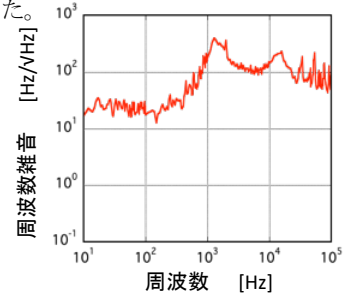


図5 ビート周波数の周波数雑音スペクトル

3.2 分光条件の最適化

前段にて、周波数弁別信号の S/N によって周波数雑音がリミットしていることに関して言及したが、この周波数弁別信号の S/N は以下の要因によってきまる。

まず、周波数弁別信号の大きさは吸収線の選択、分子封入セルの気圧、相互作用長、分光に用いるビームの強度によって左右される。雑音に関しては光源の強度雑音や干渉雑音、原理的な限界であるショット雑音のいずれかによって支配されている。

図1の実験系での分光パラメータとして、吸収線の選択、分子封入セルの温度、相互作用長などがあるが、これらのパラメータは最適な値としており[1]、それぞれ、P29(43-0) a_{20} 、1 Pa、120 cm となっている。今回は分光の際のヨウ素セルに入射するビームの強度に関する実験を行った。

ビーム強度は、分光時にセルに入射する励起光と信号光のビーム強度であり、それぞれを変化させて S/N を計算する。S/N の信号に相当するものとしては取得する周波数弁別信号の大きさ V_{p-p} である。また、雑音は周波数弁別信号の 10 Hz での雑音である。10Hz で測定を行う理由としては、位相雑音スペクトルを測定する測定器の測定限界が 10Hz であるためである。雑音の測定方法としては、図3のような共鳴点での測定が必要となるが、ヨウ素分子と共鳴している際には光源の雑音が支配的となってしまう、周波数弁別信号の雑音値を測定することができない。そのため、ヨウ素分子とビームが共鳴していない非共鳴点での雑音値を近似として使用した。結果を図6に示す。

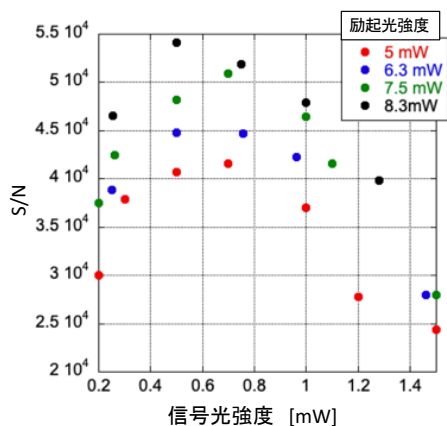


図6 分光に用いるビームの強度と S/N

ヨウ素セルに入射する信号光の強度を上げていくと周波数弁別信号の大きさと雑音値のどちらも増加するような傾向を得た。信号光を強くすることによる周波数弁別信号の大きさの増加は線形的であったが、雑音の増加が非線形であったために図6のような曲線を描いている。信号光を強くすることでPDでの受光量が増えるとともに光源由来の雑音もしくは干渉雑音が増加していることが考えられる。また、ヨウ素セルに入射する励起光の強度を増加させた場合には雑音の増加が見られずに、周波数弁別信号の大きさの増加が見られた。位相変調は励起光に加えているため、信号光への位相変調の変調移乗が多くなり、周波数弁別信号の大きさが増加したものと考えられる。

次に、得られた S/N から周波数雑音を予測した。周波数弁別信号を用いて周波数安定化をおこなう際には周波数弁別信号の傾きを実際には使用している。そのため、得られた S/N を使用する飽和吸収線の半値全幅で割ることによって周波数雑音を予想することができる。計算した結果を図7に示す。

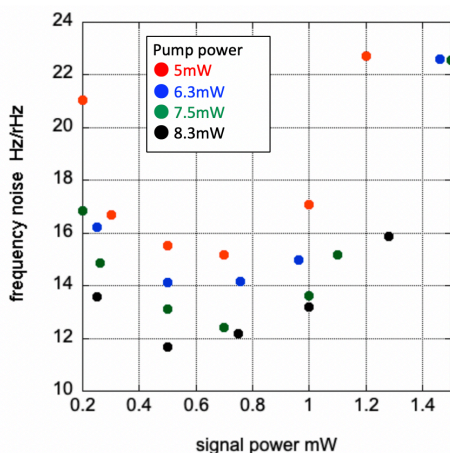


図7 分光に用いるビームの強度と予想される周波数雑音

図7では、パワーブロードニングの影響が少ないと仮定して半値全幅を 632 Hz として計算を行なっている。予想される周波数雑音をもっとも低い場合で 11.6 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @10 Hz であった。10 Hz で雑音値を測定しているが、雑音測定では 1 Hz まで平坦な特性を得ることができていたため、予想される周波数雑音は 1 Hz と 10 Hz では同じ値である。

次に、二台の周波数安定化光源のビーム強度を先ほどの周波数雑音をもっとも低いとされる条件で周波数安定化し、ビート周波数からビート周波数の位相雑音スペクトルを測定し、周波数雑音スペクトルを計算した。測結果を図8に示す。分光時のビーム強度を最適化することによって、ビート周波数の周波数雑音として 16 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @10 Hz を達成し、8 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 向上させることができた。この値はビート周波数であるため、マスター光源の周波数雑音としては 11.4 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @10 Hz であり、予想していた結果とほぼ等しい値となった。このことから、非共鳴時の雑音値を利用し、簡易に周波数雑音の予測が可能であることがわかった。

しかし、目標である 1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz を達成できていないため、さらなる S/N の向上が必要である。そこで、雑音源の特定を行なった。

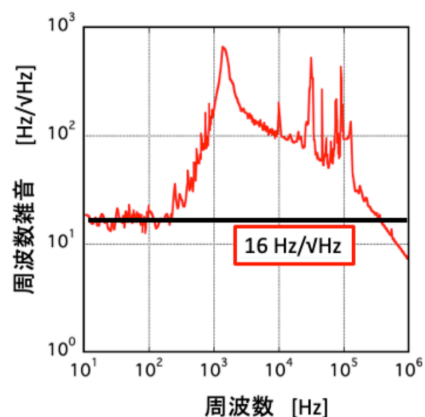


図8 分光時の強度を最適化後の周波数雑音スペクトル

3.3 雑音源の特定

周波数弁別信号の雑音源として、光源の強度雑音や干渉雑音が挙げられる。まずは、光源の強度雑音に関しての実験を行った。

現在マスター光源には FiberDFB レーザーを利用していった。しかし、FiberDFB レーザーは位相変調周波数である 200 kHz 付近に緩和発振を有しているため光源の交換が検討されており、交換後の光源として本研究室で作成された外部共振器型半導体レーザー(ECLD)が挙げられていた(図9)。これまで、1030 nm での相対強度雑音のみを測定していたため、515 nm での相対強度雑音を測定した。結果を図10に示す。

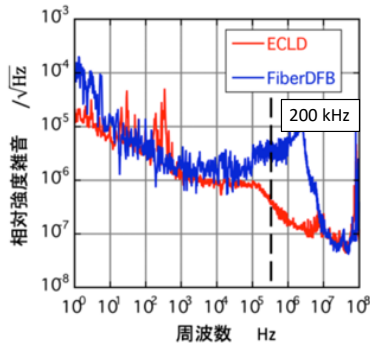


図9 相対強度雑音の比較@1030nm

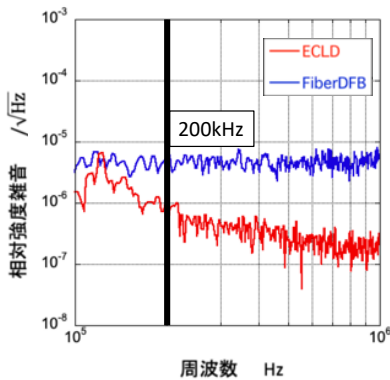


図10 相対強度雑音の比較 @515 nm

1030 nm 光から SHG により 515 nm に変換した後も変調周波数 200 kHz にて FiberDFB レーザーよりも低い雑音を得ることができた。次に、復調後の雑音値の比較を行った。ヨウ素の分光は行わない状態で、FiberDFB レーザーのビームを受光して 200 kHz で復調した際の雑音値、同相雑音を除去する差動受光法を用いた際の FiberDFB レーザーの 200 kHz で復調後の雑音、ECLD のビームを受光して 200 kHz で復調した際の雑音値の3つを比較した。結果を図 11 に示す。

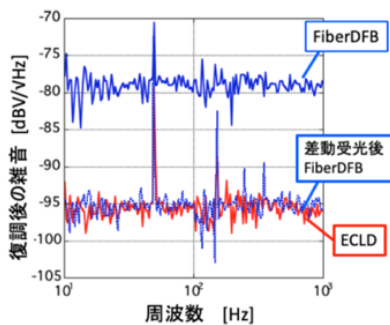


図11 復調後の雑音値の比較

ECLD の雑音値が FiberDFB レーザーよりも 15dB 以上低い結果が得られた。また、差動受光法を用いた FiberDFB レーザーと同じ雑音レベルであったが、ECLD のビームを受光する際に差動受光法を使用しても雑音値が変化しなかったことから、受光系もしくは復調系によるリミットが存在すると考えられる。この実験で PD に入射す

るビーム強度は、3.3 章でのビーム強度を最適化した際の PD の受光値と等しくなるように ND フィルタを用いて減光した。この実験で得られた雑音値は分光の実験で得られていた雑音値よりも低い値であった。そのため、周波数弁別信号の雑音を支配している要因が他にあると考え、分光系の途中で雑音が発生していることを考え、ヨウ素安定化光源のビームをピックアップして雑音を測定した。結果として、ヨウ素セル中にて雑音が増加していることがわかった(図 12)。

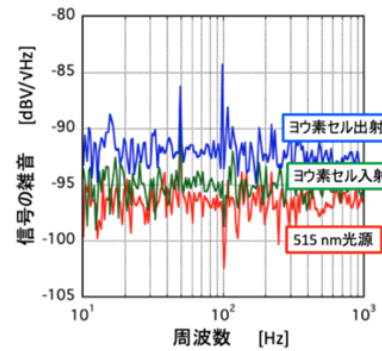


図12 ヨウ素セルでの雑音増加

この雑音はヨウ素分子と非共鳴時には見られなかったことから、この雑音はヨウ素分子の吸収放出に起因していることが考えられる。今後、この雑音を低減することが必要となる。また、分光時のビーム径の拡大による取得線幅の狭窄化などにより周波数雑音を低減することが可能であると予想されるため、様々な手法で周波数雑音の低減を行う予定である。

4. デジタル化

ヨウ素安定化光源の周波数安定化では、現在アナログのサーボフィルタを用いているが、周波数安定化の全自動化と利便性の面からオールデジタル化を目指している。今回はサーボフィルタのデジタル化を目標に実験を行なった。

4.1 サーボフィルタ

現在周波数安定化に用いているサーボフィルタを図 13 に示す。

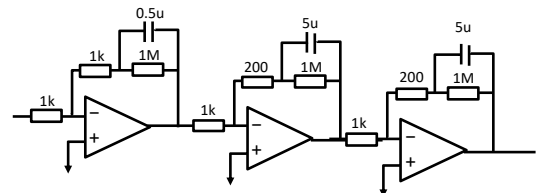


図13 周波数安定化に用いているサーボフィルタ

この回路は多段のラグリード回路で構成されており、低域に利得が存在する回路になっている。この回路のブロック図は図 14 のようになっている。

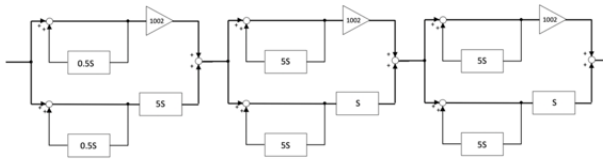


図 14 サーボフィルタのブロック図

図 14 のようなブロック図の回路を FPGA によって作成することが望ましいが、FPGA を用いたサーボフィルタの実装が初めてであったために、まずは、簡単な PID 制御回路を用いた実験を行った。

4.2 FPGA を用いた PID 制御

使用した FPGA は Xilinx Zynq 7010 SOC Xilinx Zynq 7010 SOC で ADC は 125MS/s, 14bit を搭載した CPU 付きのハードウェアである。この FPGA に PID 制御コードを実装し、アナログ回路で等価回路を作成して比較を行った。実験結果を図 15 に示す。実験では、一次の完全積分回路を実装している。

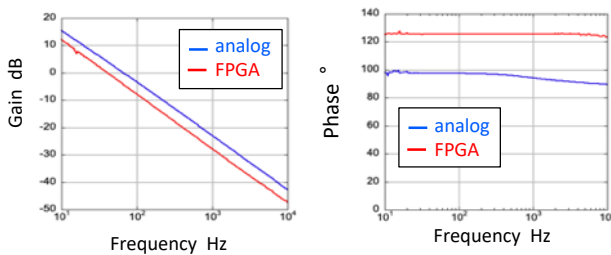


図 15 FPGA とアナログ回路での周波数特性の比較

図 15 より、FPGA で一次の完全積分回路の特性を得ることができていることがわかる。利得に関しては、アナログ回路よりも低い値となっているが、直線的な特性を得ることができているため、利得を調整することで使用可能と判断した。また、位相に関してはオフセットが見られるが、このオフセットは測定系によって発生しているものである。位相変化に関してはアナログ回路よりも FPGA の方が位相変化が小さい結果が得られた。この結果に関しては検討中ではあるが、アナログ回路よりも良い特性が得られたため、位相に関しても使用できると考えられる。

4.3 FPGA を用いた周波数安定化

現在のヨウ素安定化光源での制御機器は図 16 のように接続されている。現在使用しているアナログのサーボフィルタを FPGA とアナログ回路の二種類の完全積分回路に置き換えて周波数安定化を行なった。結果を図 17 に示す。

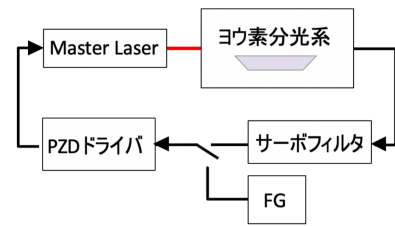


図 16 ヨウ素安定化光源の制御回路接続

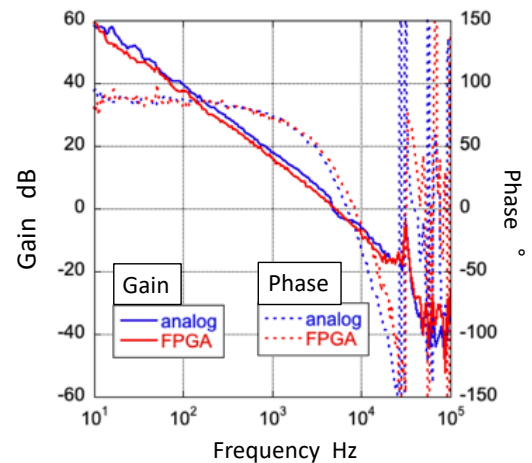


図 17 周波数安定化時の FPGA とアナログ回路での伝達関数の比較

サーボフィルタを完全積分回路に置き換えた状態で周波数安定化を行い、オープンループ伝達特性を測定したが、FPGA とアナログ回路で同一の特性を得ることができた。位相は図 15 での特性のようにアナログ回路よりも FPGA は位相変化が少なく、アナログ回路よりも良い特性を得ることができた。この時の、in-loop での周波数雑音スペクトルを図 18 に示す。

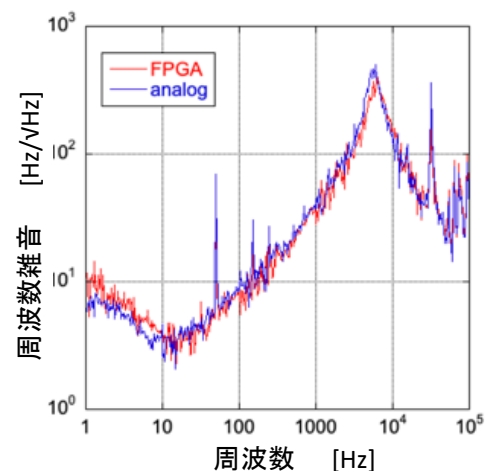


図 18 in-loop での周波数雑音スペクトル

In-loop での周波数雑音スペクトルにおいても、FPGA とアナログ回路とで、同一の特性を得ることができた。

FPGA でのサーボフィルタは実装が容易である。また、FPGA ボードさえあれば同一の性能の回路を作成可能である点から、様々な研究に使用できると考えられる。現段階では PID 回路以外の回路実装はできていないため、今後、現在使用しているサーボフィルタを FPGA に実装していく予定である。また、サーボフィルタの一部をデジタル化できたため、周波数安定化の全自動化を進める予定である。

5 まとめ

5.1 ヨウ素安定化光源の短期安定度向上

分光の条件の一つである信号光と励起光の強度を最適化することにより、周波数雑音 $11.6 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}@10\text{Hz}$ を達成した。また、光路中で発生している雑音を特定できた。

今後、発生している雑音の低減もしくは、取得線幅の狭窄化などによって周波数雑音を低減する予定である。

5.2 デジタル化

FPGA に PID 制御回路を実装し、アナログ回路との特性比較を行った。また、FPGA を用いてヨウ素安定化光源の周波数安定化を行なった。単純な構成のサーボ回路のために目標値は達成できていない。今後、現在使用しているアナログのサーボフィルタを FPGA に実装することや、周波数安定化の全自動化を目指す。

参考文献

[1] Aru Suemasa ‘Highly Stable Laser for Space Gravitational Wave Detector:DECIGO’ 電気通信大学 博士論文

発表実績

[1]大塚 俊介, 末正 有, 赤見 恵, 中森 真輝, 下奥 あゆ美, 武者 満, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会(久留米) 2018 年 10 月 24 日

[2]大塚 俊介, 濱口 太一, 中森 真輝, 末正 有, 武者 満
日本物理学会 2019 年秋季大会(山形) 2019 年 9 月 13 日

[3]大塚 俊介, 末正 有, 中森 真輝, 濱口 太一, 武者 満
第 63 回宇宙科学技術連合講演会(徳島) 2019 年 11 月 6 日