

重力波検出に用いるヨウ素安定化レーザーの残留振幅変調の抑制

武者研究室 1610178 加藤佑一

第1章 背景

一般相対性理論から予測される現象の1つに「重力波」がある。質量を持つ物質が運動した際、空間の歪み(重力)が波のように伝播していくという現象である。重力波の相対変位量は非常に微小であり、物質と干渉しないため観測は非常に困難である[1]。重力波を用いることで、宇宙誕生のより初期の情報の取得および宇宙重力波背景放射の検出などが期待されている[2]。現在重力波の検出では、マイケルソン干渉計を用いた方法が主流となっている。干渉計に重力波が到来すると一方の鏡までの系(腕と呼ばれる)の光路長が伸び、もう一方が縮むため、干渉の明暗が変化する。これを観測することで、重力波を検出することができる[1][2]。重力波検出器(重力波望遠鏡)には大きく分けて地上で観測を行う物と宇宙で観測を行う物がある。地上のレーザー干渉計は低周波の重力波に対しての感度が低いため、低周波の重力波は観測機器を宇宙に打ち上げて観測を行う。現在進められている計画の1つに日本の国立天文台などの研究グループが推進する DECIGO 計画がある[1]。DECIGO は正式名称 DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (0.1 ヘルツ帯干渉計型重力波天文台) であり、0.1~10 Hz の周波数帯の観測を狙う重力波検出器である。DECIGO は各衛星間の距離が 1,000 km になるように編隊飛行する 3 台のドラッグフリー衛星から構成され、重力波によって引き起こされる衛星間の距離のごく微小な変化を、レーザー干渉

計を用いて計測する。また、各衛星間の距離を 100km にした前哨計画 B-DECIGO も存在する[3]。

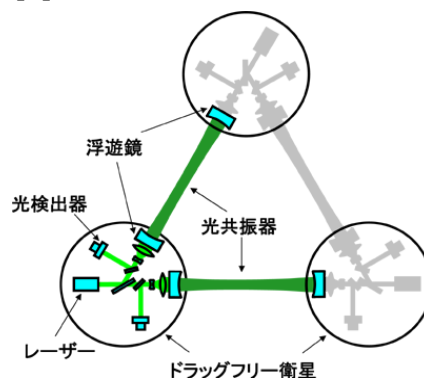


図 Y.1 DECIGO の構成[3]

本論文では、この DECIGO および B-DECIGO に用いる超高安定レーザーを作成するため、周波数の安定化を妨げる要素の1つである残留振幅変調(Residual Amplitude Modulation, RAM)の抑制を考える。

第2章 原理

ある分子にレーザー光を当てた際、その分子に固有の波長が吸収される。この様子は吸収スペクトルとして観測できる。この時の分子は熱運動をしているため、吸収される光はドップラー効果によって光と分子の相対速度ごとに異なっており、吸収スペクトルにはドップラー広がりが見られる。この広がりを除いた観測を行うために用いる方法が飽和吸収分光法である。今回の系では、飽和吸収分光法の一つである MTS(Modulation Transfer Spectroscopy)を用い、ヨウ素分子の飽和吸収線を周波数基準として取得した。ヨウ素の吸収周波数は外

乱の影響を受けづらいため、宇宙空間での長期安定化に適していると言える[4]

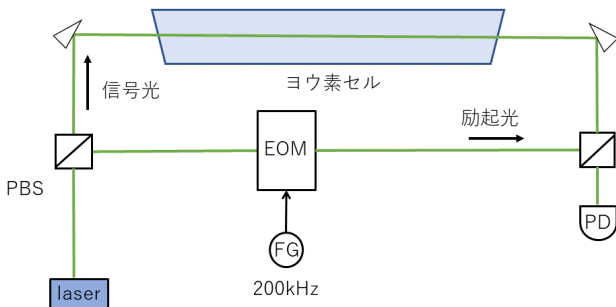


図 Y.2 MTS の実験系

この実験系において、出射したレーザーは偏光ビームスプリッタ(PBS)によって分岐される。これをそれぞれ励起光(と信号光とする)。セルの内部にはヨウ素分子 I_2 が存在しており、分子運動をしている。ここに光と信号光が対向入射した際、各光を同じ周波数として認識できるのはレーザーの入射方向に対しての速度成分がゼロの分子のみである。十分な強度の励起光を一方から入射し、対向から入射し透過させた信号光の光強度を検出すると、速度成分がゼロの分子の吸収周波数のみが飽和し、その部分のみ光強度が増加する。これにより飽和吸収線を観測できる。ここで励起光に位相変調をかけると、変調が信号光に移乗され、それを復調することで飽和吸収線が微分形で観測される。これを周波数弁別曲線と呼ぶ。周波数弁別曲線の中心(ゼロ点)を周波数基準としてロックすることで高い精度で周波数安定化を行うことができる。

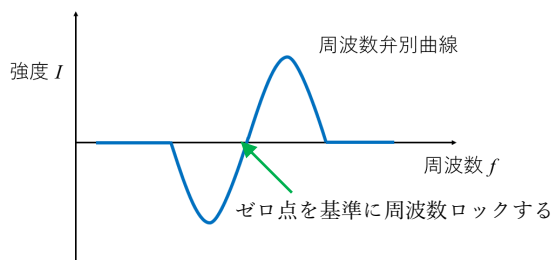


図 Y.3 周波数弁別曲線

電気光学変調器 (Electro-Optic Modulator: EOM)は電気光学効果を用いて結晶の屈折率を変化させ、変調を加える光学機器である。EOMを使用してレーザーに位相変調をかける際、何らかの原因により複屈折が発生し、それがPBSなどの偏光に関する素子を通過した場合、復調した際に振幅変調となってしまう。これを**残留振幅変調 (Residual Amplitude Modulation: RAM)**と呼ぶ。RAMの発生原因は複数存在し、結晶構造の不均一性、入射する偏光の不均一性、入力電圧の不均一性などがある。RAMが発生すると周波数弁別曲線にオフセットがかかる。RAMは絶えず変動しているため、オフセットの位置もそれによって変動してしまう。これによって周波数ロックを行うゼロ点の位置が変化してしまい、周波数安定度が低下してしまう[5]。本論文では、RAMの変動を抑制することにより周波数安定性を高める方法について実験・考察を行っている。

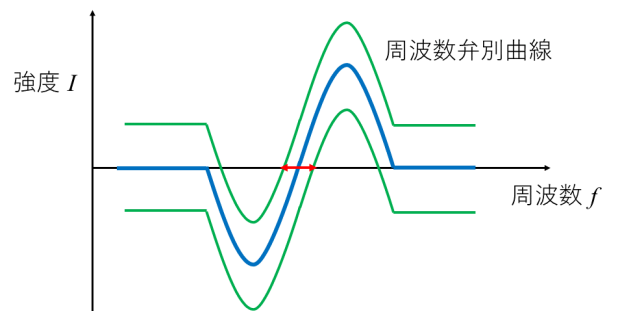


図 Y.4 RAM による周波数弁別曲線への影響

第3章 実験・結果

以前、本研究室では温度を一定に保つPassive制御でRAMを抑制することを試みていた。結果、一定の効果は認められたが、DECIGOに求められる周波数安定度を達成するには不十分であった。それを解決

するため、EOM に RAM の値に応じて DC 電圧を印加する、RAM の値に応じて EOM 結晶の温度を変化させるなどの Active 制御法が考案されたが、DC 電圧印加は制御できる電圧の領域が狭い、温度変化は時定数が大きいという欠点があり、うまくいかなかった。そこで、DC 電圧の印加と温度の制御を同時に行うことで互いの欠点を補い、RAM を制御する Active 制御法が考案された。先の図 Y.2 にその制御回路を追加したのが次に示す図 Y.5 である。

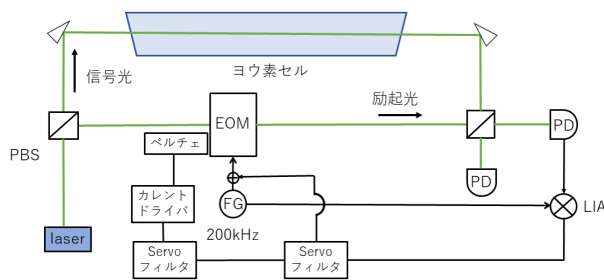


図 Y.5 RAM 制御回路を組み込んだ MTS 実験系

この系のうち、200kHz 信号は EOM を動作させるためには電圧が不足しているため、LC 電圧回路で増幅した。それによって DC 電圧の印加が出来なくなったため、さらに共振回路を追加した。その構成を次の図 Y.6 に示す。

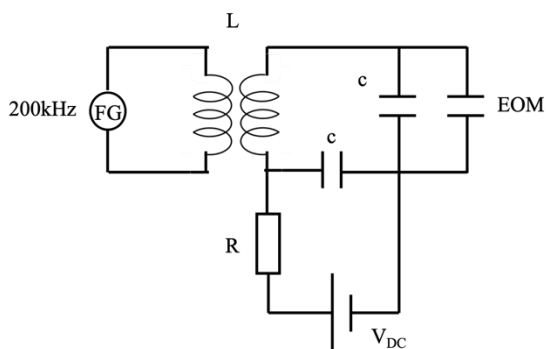


図 Y.6 EOM の共振回路

次の図 Y.7 は実際の EOM 結晶の写真と断面の図解である。

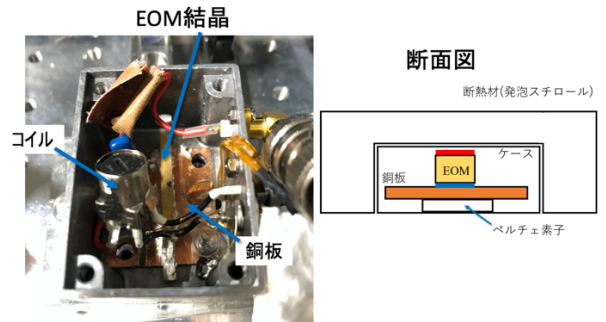


図 Y.7 EOM 結晶と断面図

また、次の図 Y.8 は RAM 制御のために MTS に追加した制御回路の実際の写真である。

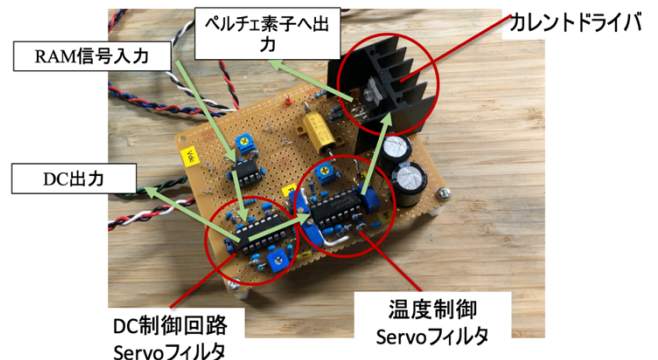


図 Y.8 RAM 制御回路

図 Y.5 の実験系で RAM の抑制を行った結果が次の図 Y.9 である。

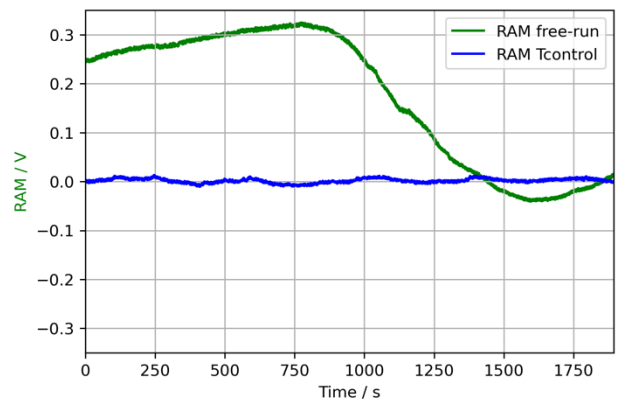


図 Y.9 RAM の時間変化

図 Y.9 にて緑色の線は RAM 非制御時、青色の線は RAM 温度制御時の RAM の時間変化である。

RAM 非制御時は RAM の値が基準であるゼロ点から大きく離れてしまっており、変動も 0.4 V 程度と大きい。それに対して RAM 温度制御時は、RAM の値が基準であるゼロ点に近く、変動も 0.025V 程度と大きく減少しており、温度制御により RAM の変動を抑制できていると言える。これは先に述べた周波数弁別曲線の傾きから周波数揺らぎに換算すると、非制御時は数 kHz 相当であるのに対し、温度制御時は数百 Hz 程度に改善されている。

次に、温度制御回路を動作させた状態でさらに DC 制御回路を動作させた場合の測定を行った。

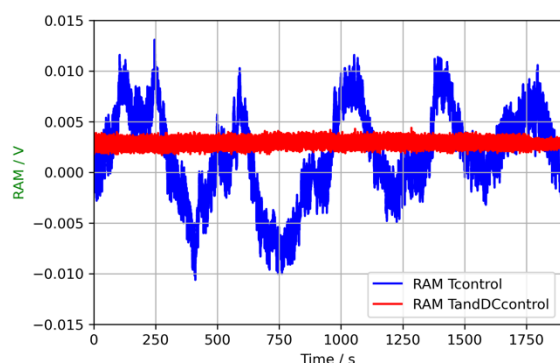


図 Y.10 RAM の時間変化

図 Y.10 にて青色の線が温度のみの制御時、赤色の線が温度と DC を同時に制御した時の RAM の時間変化である。温度・DC 制御時の RAM の変動幅が 0.025V 程度から 0.0022V 程度まで減少していることがわかる。温度制御で抑えきれない高速の変動を抑えることができていると考えられる。温度・DC 制御時には若干のオフセットが乗ってしまっているが、これは Servo 回路の PID 制御を適切に調整することで改善可能だと考えられる。周波数弁別曲線の傾きから周波数揺らぎに換算すると、温度制御時の周波数揺らぎは数百 Hz 程度であるのに

対し、温度・DC 制御時の周波数揺らぎは数十 Hz 程度に改善されている。

第 4 章 まとめ・今後の展望

- ・宇宙重力波望遠鏡 DECIGO に搭載するための超高安定レーザーの開発のため、RAM の制御を試みた。
- ・RAM 変動抑制のための制御回路の一部作成・調整を行い、温度と DC の Active 制御を行った。
- ・RAM の変動による周波数雑音を数 kHz から数十 Hz レベルに抑えた。

今後の課題

- ・アラン分散による周波数安定度の評価

参考文献

[1]重力波とは | 国立天文台 重力波プロジェクト推進室

https://gwpo.nao.ac.jp/about_gw/

[2]重力波プロジェクト推進室 - 重力波とは

http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/aboutGW_j.html

[3] DECIGO - DECIGO とは

<https://decigo.jp/wdecigo.html>

[4]非線形レーザー分光学

Marc D. Levenson, Satoru S. Kano オーム社, 昭和 63 年発行

[5] ヨウ素安定化レーザーの残留強度変調抑制

大塚 俊介, 電気通信大学, 平成 29 年度卒業論文