

515nm 高安定高出力光源

1933103 濱口太一

主任指導教員：武者満 指導教員：中川賢一

1. はじめに

日本の重力波検出計画 DECIGO では、宇宙空間で腕の長さ 1000 km の F.P.マイケルソン干渉計を人工衛星の編隊飛行によって構築し、地上では検出の難しい低周波域 1 Hz 帯に感度を持たせている。本研究では DECIGO 搭載用レーザー光源の開発を行っている。レーザー光源には波長 515 nm で 1 Hz 帯での高い周波数・強度安定度と高出力化が要求されている。本研究ではヨウ素の遷移する周波数を分光して安定化基準とする周波数安定化と、さらにファイバー増幅によって高出力化も行なっている。本稿では残留強度変調 (RAM) の抑制による周波数安定度向上への取り組みと、コヒーレント結合による高出力化への取り組みを報告する。

2. ヨウ素安定化レーザー

2.1 残留強度変調 (RAM) の抑制

図 1 に周波数安定化レーザーの概要図を示す。本研究ではヨウ素の 515 nm 帯にある超微細構造を分光するためにドップラーフリー分光を行い、変調復調法によって信号を取得している。この信号を周波数弁別曲線という(図 2: 青線)。この周波数の中心にレーザー周波数が追従するようにフィードバック制御することで周波数安定化している。このような精密な分光では電気光学変調子 (EOM) で発生する残留強度変調 (RAM) が問題となる [1]。RAM が復調されると分子分光で得られる基準周波数の信号のオフセットのゆらぎとして現れ(図 2: 赤線)、基準がゆらぐことで周波数安定度が悪化する。本研究では EOM 結晶の温度と、印加する DC 電圧をアクチュエーターとして、RAM の抑制を行なった。

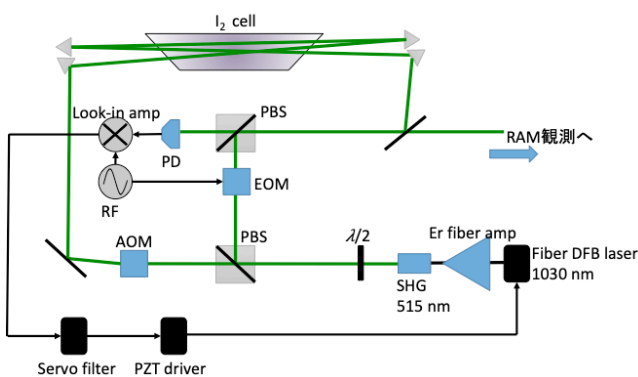


図 1. ヨウ素周波数安定化レーザーの概要図

2.2 RAM の温度制御

RAM の温度制御系を図 3 として示す。図 1 のヨウ素周波数安定化レーザーの EOM からの光を一部ピックアップしてフォトディテクター (PD) で受光してロックインアンプ (LIA) で復調、RAM の変動をモニターする

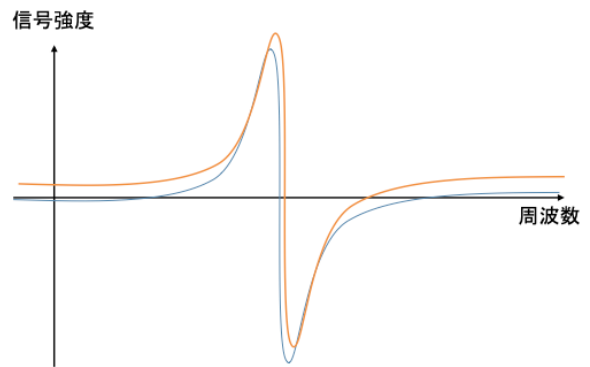


図 2. 周波数弁別曲線の概要図 (赤線は RAM の影響を受けた場合)

信号を得て、EOM についてペルチェ素子に流す電流をアクチュエーターとしてフィードバック制御することによって RAM を抑制する。RAM を抑制した後前後の RAM の信号を図 4 その時の長期安定度をアラン分散として評価したグラフを図 5 に示す。

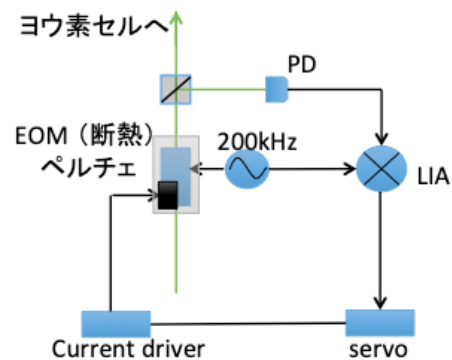


図 3. RAM の温度制御の概要図

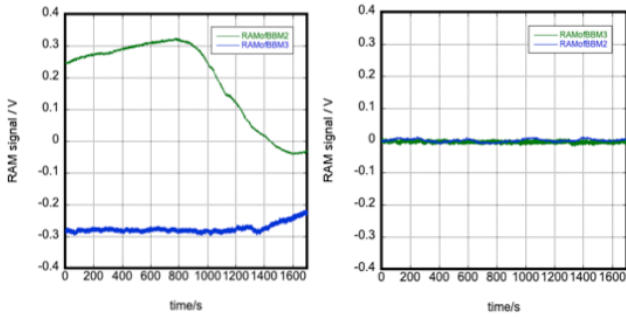


図 4. RAM 信号の抑制前後の時間変動

図 4 左図では RAM が数 V レベルで変動していたのに対して右図の制御跡では数十 mV レベルまで抑制されていることがわかる。これは周波数に換算すると数 KHz あった周波数ゆらぎが数百 Hz まで抑制できたことに相当する。

さらに RAM を抑制するために図 5 で示すように温度だけでなく印加する DC 電圧をアクチュエーターとしたシステムを考案した。

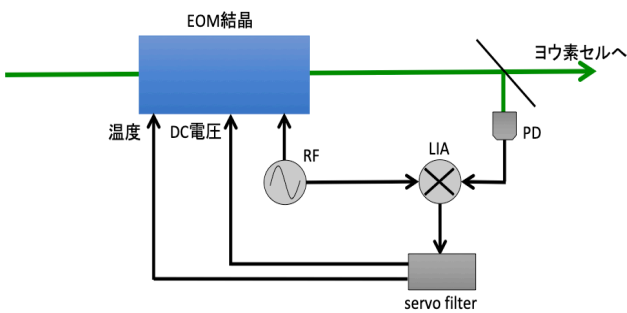


図 5. RAM の温度と印加 DC 電圧による制御システム

ここでは DC 電圧による制御のダイナミックレンジが狭いために温度による制御でそれを補うようになっている。別の言い方をすれば、DC 電圧による制御信号を誤差信号として温度制御を行っている。図 6 に温度のみの制御と温度と DC 両方の制御を行なった場合の RAM の変動を示している。

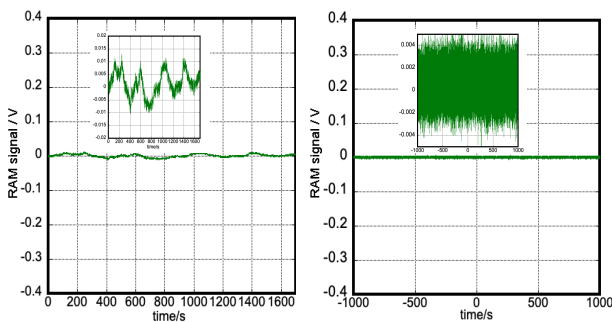


図 6. 制御前後の RAM の変動

(左図：温度のみ、右図：温度と印加 DC 電圧による制御)

図 6 での RAM 信号の電圧ゆらぎを周波数ゆらぎに温度のみの制御だと数百 Hz ほどあったゆらぎが数十 Hz に抑制できた。

総合すると無制御時では数 kHz レベルでゆらいでいた RAM の周波数安定度への寄与を、結晶温度と印加 DC 電圧による制御によって数十 Hz レベルまで抑制することができた。

3. コヒーレント結合

3.1 レーザー高出力化

本研究では高出力化のために YDFA(Yb doped Fiber Amplifier)で 1030 nm のマスターレーザーを 10 W まで増幅し、第二次高調波発生(SHG)によって 515 nm で 1 W の出力を得ている(図 7)。さらに高出力化するにはファイバー増幅器の利得を大きくすることが考えられるが、SHG 結晶へ入射する光パワーが大きくなればそれだけ結晶へのダメージや安定度の悪化が懸念される。そこで SHG 変換後のレーザーを複数用意し、コヒーレント結合によって安定度の劣化を抑えつつ、高出力化することを目指した。

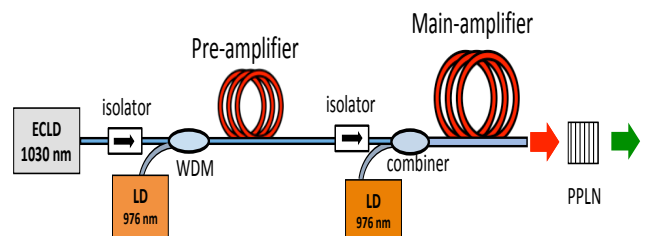


図 7. ファイバー増幅システムの概要図

3.2 コヒーレント結合

コヒーレント結合ならば、雑音の劣化が少なく増幅することが期待でき、結合効率 94% という報告もある [2]。ここでは図 8 のように位相制御するフィードバックループを構築し、コヒーレント結合を行なった。2 つのレーザーがビームスプリッター(BS)に入射され干渉を起こすと 2 つの出射ポートからの光はそれぞれ 90° 位相がずれて出てくるので、ある位相条件では 2 つの振幅が完全に重なり合う明干渉と打ち消しあう暗干渉となる。図 8 の系では片方の光の一部を PD で観測し、常に暗干渉となるようにピエゾ素子をアクチュエーターとしてフィードバック制御することによってもう一方のポートからは明干渉する高出力な光を得ることができる。コヒーレント結合前後の PD で

の受光強度と復調信号の時間変動を図 9、ビームプロファイルを図 10 に示した。図 9 では受光強度の変化の微分形として復調信号を取り出せていることがわかる。これはモニターポートが暗干渉となるときの制御点がちょうど 0 点とクロスするので、このフィードバックループでの誤差信号として用いることができる。図 9 の左図では位相が変動して明暗が分かれていたのに対して制御後の右図では暗干渉に常になっている。図 10 のビームプロファイルからも明暗がくっきりと分かれている様子が見える。明干渉の出力は 0.175 W、結合効率は 85% である。

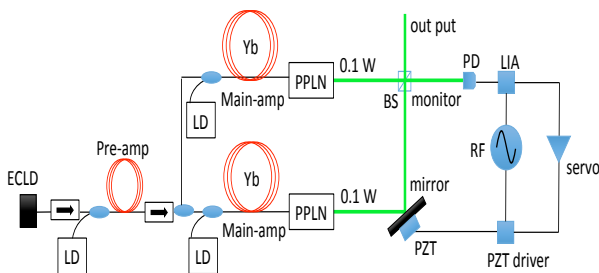


図 8. コヒーレント結合システムの概要図

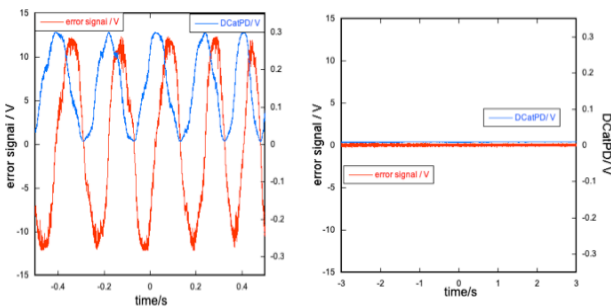


図 9. コヒーレント結合での受光パワーと復調信号の時間変動 (右図：無制御時、左図：制御時)

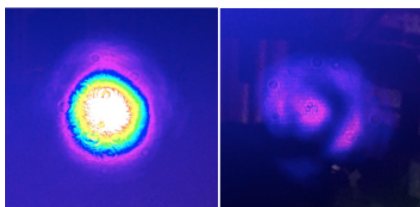


図 10. コヒーレント結合での明干渉と暗干渉のビームプロファイル (右図：暗干渉、左図：明干渉)

しかし、ここで問題となったのは制御時間が短いことである。ファイバーレーザーの位相揺らぎが大きくて PZT 素子で制御できるダイナミックレンジを外れてしまうことが原因だった。また、もう一つ問題になったのは後に強度安定化する際の制御帯域が、コヒーレ

ント結合の制御帯域に制限されてしまい、強度安定化が十分に行えないことである。そこで、2つの問題を解決するために図 11 に示すような 2つの PZT 素子付きミラーによるコヒーレント結合システムを考案した。このシステムで使用する PZT 素子は応答が素早く制御帯域を稼ぐもの (PZT1)、長い伸縮長を持ち広いダイナミックレンジを確保できるもの (PZT2) となっており、それぞれに役割が違う。制御回路では PZT1 の制御信号がダイナミックレンジを外れないように、遅い応答成分を、ダイナミックレンジの広い PZT 2 が受け持つ仕組みになっている[A]。

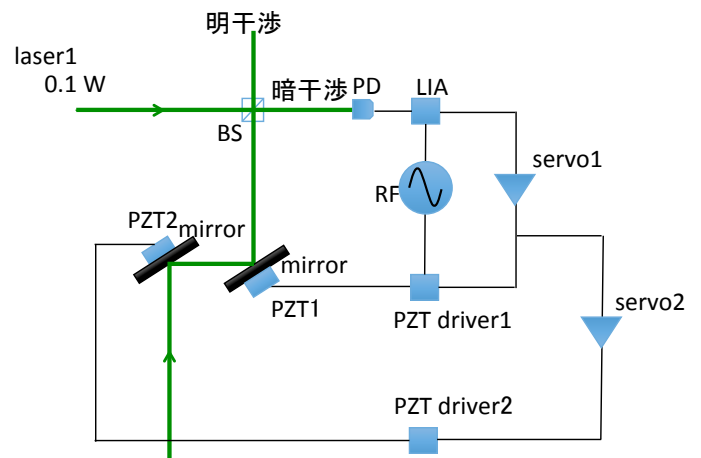


図 11. 2つの PZT によるコヒーレント結合システム

図 11 でコヒーレント結合制御した場合の、誤差信号、PZT1、PZT2 それぞれの制御信号を無制御時から、制御するまでのタイムシーケンス図として示したのが図 12 である。時間領域は無制御、PZT 1 のみによる制御、PZT 1、2 による制御の 3 つに分かれている。無制御時では誤差信号が激しく変動しているのに対して、PZT 1 による制御によって変動が収束していることがわかる。これは常にモニターポートが暗干渉であることに相当する (コヒーレント結合制御がされている)。しかし PZT1 の制御信号がダイナミックレンジを外れるとともにこの制御が外れてしまっている。そこで、この変動を受け持つように PZT 2 の制御を同時に行うことで、長時間制御できていることを示している。

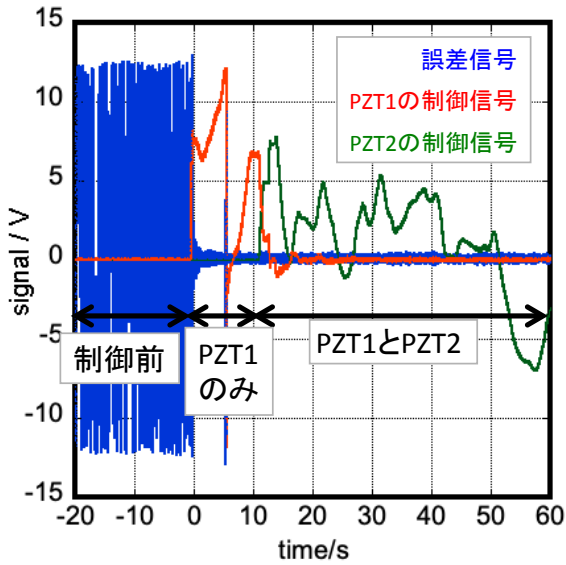


図 12. 2つのPZTによるコヒーレント結合システム制御時のタイムシーケンス図

3.3 コヒーレント結合光の強度安定化

前述のように DECIGO 用光源では高出力化と同時に安定度も必要となる。この項ではコヒーレント結合した高出力な光の強度安定度評価と強度安定化を行った。コヒーレント結合前後の相対強度雑音(RIN)評価を図 12 に示す。図 12 から結合前後で強度雑音の劣化は少ないことがわかった。

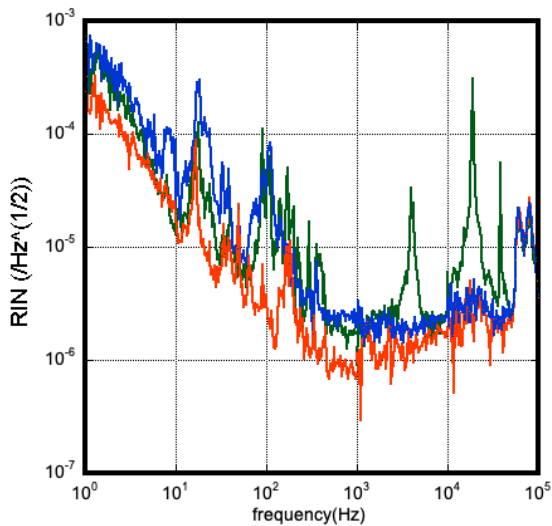


図 12. コヒーレント結合前後の RIN (赤、青：結合前 緑：結合後)

強度安定化システムと、この強度安定化システムをコヒーレント結合システムに応用したものをそれぞれ図 13、14 として示す。

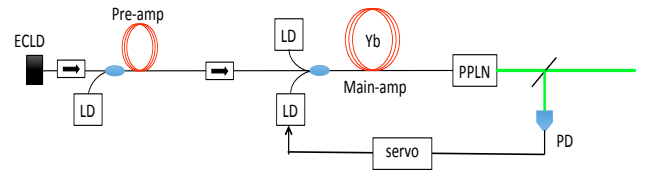


図 13. ファイバー増幅されたレーザーの強度安定化システム

図 13 では出力の一部を PD で受光して、強度ゆらぎを観測し、サーボ回路を介して Yb ファイバーアンプの励起光源の電流源へとフィードバックする仕組みになっている。

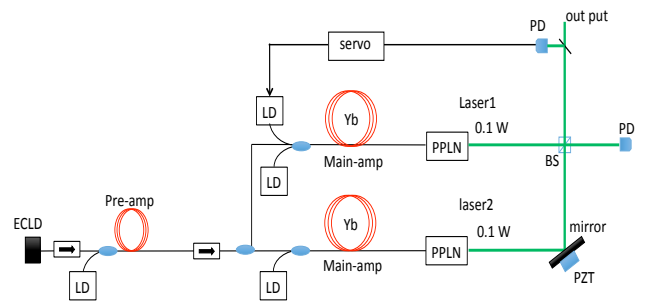


図 14. 強度安定化システムを応用したコヒーレント結合システム

これに対して図 14 ではコヒーレント結合した最終的な出力の強度ゆらぎを観測し、片方のファイバーアンプの電流源へとフィードバックしている。このシステムではファイバーアンプでの雑音、波長変換での雑音、PZT 素子付きミラーでの雑音などを一手に引き受けてただ一つのアクチュエーターによって制御することができるという利点がある。この制御システムによって制御されたレーザーの強度安定度を図 15 に示した。

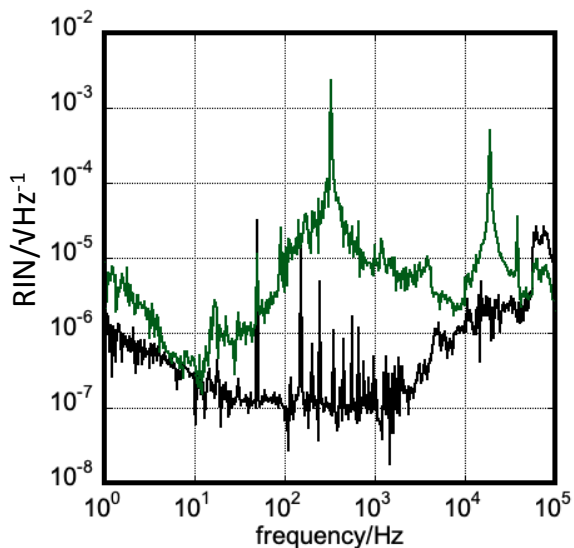


図 15.強度安定化制御時のコヒーレント結合前後の RIN (黒：コヒーレント制御前、緑：コヒーレント制御後)

図 15 では黒線のコヒーレント結合前と同様な制御が緑線で示されるコヒーレント結合光では行えていないことがわかる。これは図 15 の緑線の発振の見られる 4 kHz 付近で強度安定化の制御帯域が制限されてしまっているからである。これはコヒーレント結合制御の帯域がここまでしかない為である。本来ならばコヒーレント結合をする際にレーザーの位相ゆらぎはそこまで応答の素早い制御を必要としないが、ここでは強度安定化を十分な帯域で行うためにコヒーレント結合の制御帯域を広げて再度強度安定化を行った。比較する結果を図 16 に示している。

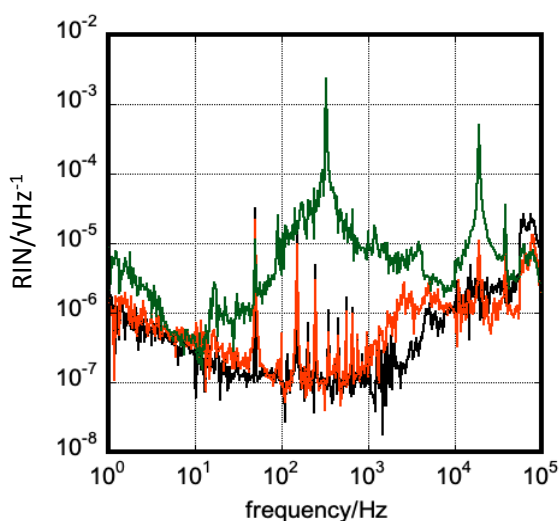


図 15.強度安定化制御時のコヒーレント結合前後の RIN (黒：コヒーレント制御前、緑：コヒーレント制御後 (低制御帯域)、赤：コヒーレント制御後 (高制御帯域))

図 15 の赤線で示される高制御帯域でのコヒーレント結合を強度安定化させた場合では、黒線での結合前の結果と同様の安定度を実現することができている。

4. まとめと課題

DECIGO 搭載用レーザー光源の安定度向上のための RAM の抑制とコヒーレント結合による高出力化を行った。

4.1 RAM の抑制

無制御時では数 kHz レベルでゆらいでいた RAM の周波数安定度への寄与を、結晶温度と印加 DC 電圧による制御によって数十 Hz レベルまで抑制することができた。レーザーの不調で RAM 以外の周波数安定度への寄与が大きく RAM 制御前後の周波数安定度評価を行うことはできなかったのが今後の課題となる。

4.2 コヒーレント結合による高出力化

コヒーレント結合の結合効率は 85%、強度雑音の劣化も少なく、足し合わせる事ができた。2つの PZT 素子付きミラーを使った工夫によって制御帯域とダイナミックレンジを確保して、長時間制御することができている。また制御帯域をさらに高めることでコヒーレント結合前と同様のパフォーマンスで強度安定化を行うことができた。今後の課題としてはこのシステムでの周波数安定度の評価と、さらに高い出力でのレーザーを足し合わせた時の挙動を調べる事が残されている。

参考文献

[1] Klaus Döringshoff “Optical frequency references based on hyperfine transitions in molecular iodine” Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultät(2018)

[2] M. Musha, T. Tanaka, K. Nakagawa, K.-I. Ueda “Intensity and frequency noise characteristics of two coherently-added injection-locked d: lasers” Appl. Phys. B-73, 209-214(2001)

発表実績

[1] 2020 年度日本物理学会春季年次大会

[2] 2020 年度日本物理学会秋季年次大会

付録

[A] コヒーレント結合の制御回路

