

注入同期Nd:YAGレーザーを用いたコヒーレント加算の研究

電子工学専攻 植田研究室 金谷 剛

はじめに

重力波は理論的にはアインシュタインの一般相対性理論によって存在が予言された、質量のあるものが加速度運動をした時に発生する時空間の揺らぎを伝播する波である。連星パルサーの軌道周期の変化から重力波の存在は間接的に確認されたが、物質との相互作用が非常に小さいため、直接検出には至っていない。

レーザー干渉計型重力波検出器の基本はマイケルソン干渉計で、重力波による2点間の距離の変化を測定して重力波を検出する。マイケルソン干渉計の応答関数は平坦なため観測帯域が広い。ここでレーザー干渉計型重力波検出器(マイケルソン型干渉計)の原理を簡単に説明する。レーザーからの光をビームスプリッター(BS)によって直交する2つの光に分け、それぞれの光をミラーによってはね返し、ビームスプリッターで再び重ね合わせてその2つの光をフォトディテクター(PD)で受光する。このときそれぞれの光路の差(位相の差)によってできる光の干渉(光の強度変化)がPDによって検出される。重力波は横波であり、伸縮の変位が十字方向で変化する。レーザー干渉計に垂直に重力波が入射すると、マイケルソン干渉計の腕の一方は伸び、もう一方は縮むという効果をおよぼすため、最高の感度が得られる。

日本の重力波検出器TAMA300(図1)では連星中性子星の合体と超新星爆発によって発生する重力波の測定を目標としており、フーリエ周波数300Hz、帯域幅300Hzで最高感度が達成できるように設計されている。最高感度は

$$h = 3 \times 10^{-21}$$

を目標としている。TAMA300では、この微小な変化を検出するために、マイケルソン型干渉計のそれぞれの腕でファブリペロ共振器を作り、その中でレーザーを往復させることで実効的な光路長を長くすることで、干渉計の感度を上げている。

干渉計の感度は、レーザーのパワーで決まるショット雑音によって制限されるため、光源となるレーザーには高い出力が必要である。そのため、レーザー干渉計型重力波検出器の研究は、始めは数WクラスのAr⁺レーザー(λ = 514.5nm)を単一波長、単一モードに安定化して使用していた。しかし、効率が悪く、気体レーザーのため雑音が大きという欠点があるため、現在では半導体レーザー(LD)励起のNd:YAGレーザー(λ = 1064nm)が使われている。このレーザーは固体レーザーであり、固有の雑音が小さい、LDの発振波長が励起効率の高い波長と一致し効率高い、という利点がある。特にモノリシック型LD励起Nd:YAGレーザー(NPRO Non-Planar Ring Oscillator)の開発によりレーザー安定化のレベルは飛躍的に向上した。NPROはレーザー結晶自体が共振器を構成しているため機械的に非常に安定で、温度安定化をするだけで線幅数kHzの周波数安定度を持ち、出力は1W程度である。次の段階では、NPROを種光とした注入同期レーザーや光アンプにより、10~20Wの出力を得る。光アンプ(MOPA Master-Oscillator-Power-Amplifier)では、アンプのゲインに比例して自然放出による強度雑音が増加する。注入同期レーザーは、安定な単一モード発振しているレーザー(主レーザー)出力を、より高出力なレーザー(従レーザー)に注入して、主レーザーの周波数安定度とモー

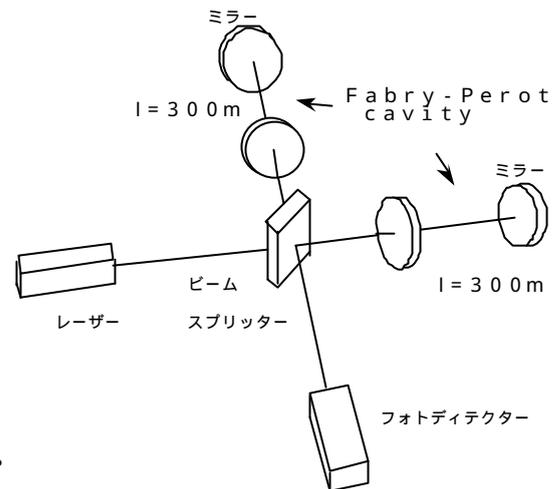


図1 TAMA300の概念図

ドを持った高出力なレーザー出力を得る。2つのレーザーの発振周波数がロッキングレンジと呼ばれる周波数差以内になれば、多モード発振している従レーザーの出力は注入された主レーザーのモードに引き込まれる（主レーザーの周波数に一番近いモードで注入波の再生増幅が始まり、ゲインが大きくなり、他のモードのゲインは抑圧される）。安定なレーザーでは、熱による熱レンズや熱複屈折により単体では10W～20Wの出力が限界である。さらなる高出力化のため、多段光アンプやコヒーレント加算の研究が行われている。コヒーレント加算では、注入同期により複数のレーザーの発振周波数を一致させ、重ね合わせるまでの光路長を制御して位相を揃えて足し合わせることで、複数のレーザー出力をコヒーレントに足し合わせることができる。空間モードの重ね合わせの困難さがあるが、周波数雑音、強度雑音共に増加はない。

注入同期レーザー2台によるコヒーレント加算の実験系

注入同期レーザーの主レーザーにはLIGHTWAVE社の Model 126-1064-500（出力500mW）を用いた。従レーザーはリング型共振器で、10WファイバークップルLDで3mmのYAGロッドを端面励起する。

主レーザーからの出力はファラデーアイソレーターを通り、EOM (Electro-Optical-Modulator)で20MHzの位相変調を受ける。その出力をBSによって2つに分け、レンズによってモードマッチングを行い、2台の従レーザーに注入する。従レーザーの出力（と反射光）の一部を取り出しPDによって検出し、DBM (Double-Balanced-Mixer)で20MHzの復調を行うことで、誤差信号が得られる。これをサーボ回路に入力し、従レーザーの2枚のミラーそれぞれに付いた大小2つのPZTに帰還する

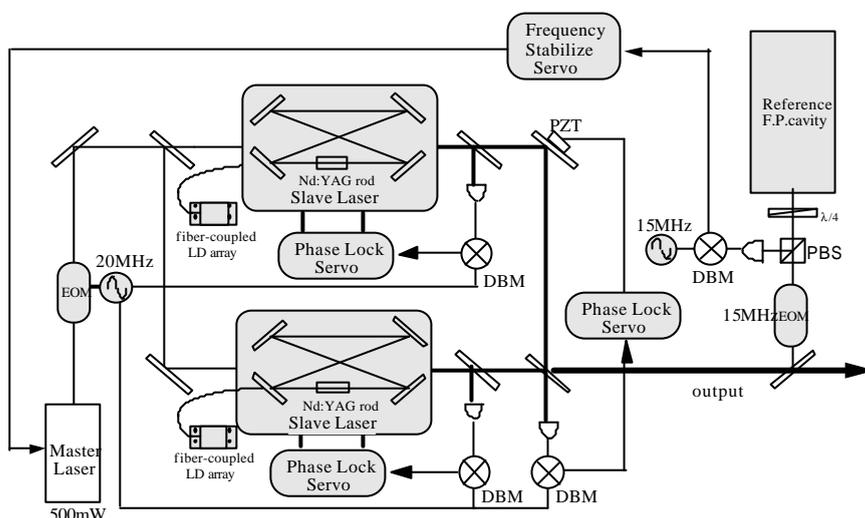


図 2 コヒーレント加算の実験系

ことで、従レーザーの共振器長を制御し、主レーザーと従レーザーの発振周波数差を注入同期のロッキングレンジ以内に保つ。得られる注入同期レーザーの出力周波数は、主レーザーと一致する。

2台の注入同期レーザーの出力を、同じ光路長を通った後にBSで足し合わせる。主レーザーの出力をBSで分けるところからこの足し合わせるところまでマッハツェンダー干渉計を構成している。BSの一方の出力をPDによって検出し、DBMにより20MHzの復調を行い誤差信号を得る。この誤差信号をサーボ回路を介して片方の光路のミラーに付けたPZTに帰還することで、PD側の出力を常に暗干渉に保ち、反対側の出力をコヒーレントに足し合わせる（コヒーレント加算）。加算した出力の一部を取り出し、EOMを通し、15MHzの位相変調を掛ける。レンズ系によりモードマッチングを行い、基準ファブリペロー共振器に入射する。反射光は偏光ビームスプリッター（PBS）とλ/4波長板による光学的なアイソレーターによりPDに入射し、DBMにより15MHzの復調を行い、誤差信号を得る（Pound-Drever法）。この誤差信号をサーボ回路を介し、主レーザーのコントロール部のPZT端子と温度端子に帰還することで主レーザーの発振周波数を制御し、基準F

P 共振器に安定化を行う。

結合効率

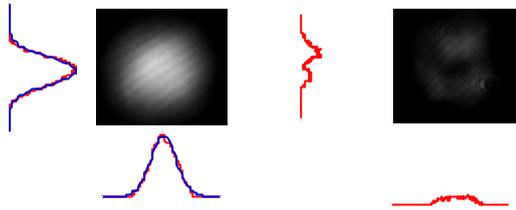


図 3 加算ビームの CCD イメージ

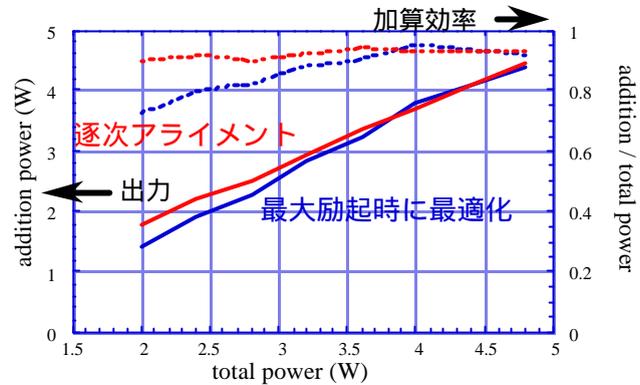


図 4 結合効率

出力を合わせるビームスプリッター入射前で注入同期レーザー 1 台あたり 2 . 4 W の出力で加算を行い、最大加算出力 4 . 4 W を得た。この時の結合効率は 9 3 % である。加算する光路を最大励起時に最適化したアライメントでは、低い出力時には熱によるモード変化のため、結合効率が悪くなる。測定点でその都度加算光路のアライメントを行うことで、全出力で 9 0 % 以上の結合効率が得られた。(図 4)

コヒーレント加算時の諸雑音の測定

強度雑音の測定

次の 3 つの条件で強度雑音の測定を行った。

- 1 主レーザー単体
- 2 注入同期レーザー 1 台だけの出力
- 3 注入同期レーザー 2 台加算後の出力

およそ 9 0 0 k H z に緩和振動が見られ、緩和振動周波数以下の低周波数域では、注入同期により強度雑音が増加している。特に 1 k H z で強度雑音のピークが見られるが、注入同期の負帰還系の伝達関数には 1 k H z 付近のピークは見られないため、このピークの原因はわからない。緩和振動周波数以上の周波数域では、逆に主レーザーよりも注入同期後の方が強度雑音は低くなっている。これは、従レーザー共振器がローパスフィルターとして働くためと思われる。測定した全周波数 (1 0 ~ 1 0 0 M H z) で注入同期レーザー 1 台と、2 台加算時の強度雑音は一致しており、コヒーレント加算を制御している P Z T による強度雑音の増加は見られない。1 0 M H z 以上の周波数域 (重力波検出器の位相変調周波数域) では、1 . 2 . 3 . とショット雑音限界に達している。

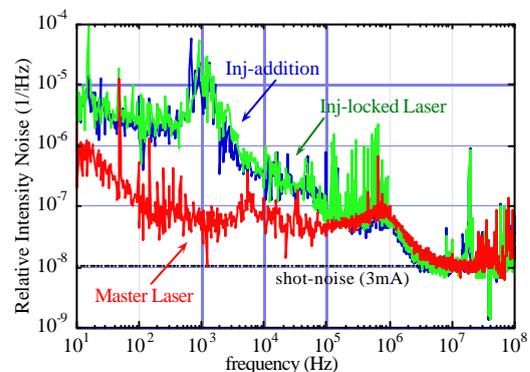


図 5 相対強度雑音

位相雑音の測定

注入同期制御ループの位相雑音が、周波数雑音に与える影響を調べるために、位相雑音の測定を行った。

- 1 同期を維持するための制御ループの誤差信号
- 2 レーザー単体でコヒーレント加算を行ったときのマツハツェンダー（MZ）干渉計の制御ループの誤差信号
- 3 注入同期レーザー 2 台でコヒーレント加算を行ったときのMZ干渉計の制御ループの誤差信号

図 6 より、1 . + 2 . = 3 . になっている。加算の位相雑音に、注入同期による主レーザーと従レーザーの位相差による残差雑音がのっていることがわかる。

オープンループの伝達関数を使って、軽く位相同期を行った際の誤差信号から計算して求めたフリーラン時の位相雑音と、サーボ回路により位相同期を行った際の位相雑音を測定した。図 7 より、サーボ回路で負帰還制御を行うことで、100 Hz 以下で 10^{-6} [rad / Hz] に位相雑音を抑えることができた。

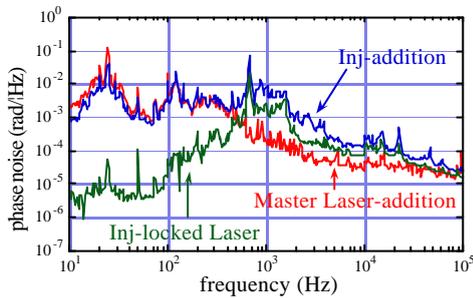


図 6 注入同期、加算制御の位相雑音

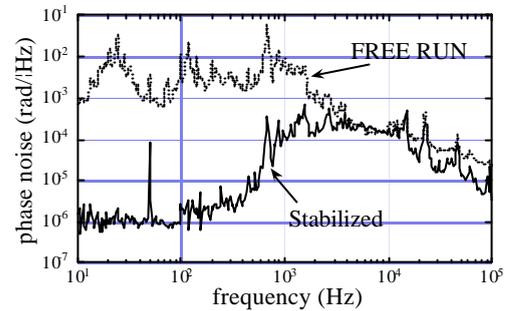


図 7 フリーラン時と位相同期時の位相雑音

基準 F P 共振器を用いた周波数雑音の測定と安定化

- 1 主レーザー単体
- 2 注入同期レーザー
- 3 注入同期レーザー 2 台によるコヒーレント加算後の出力

オープンループの伝達関数を使って、軽く F P 共振器に安定化させた際の誤差信号からフリーランを求めた。これらの測定した周波数雑音図 8 の 1 . 2 . 3 . より、注入同期、コヒーレント加算共に主レーザーと同程度の周波数雑音であり、注入同期、コヒーレント加算による位相雑音の影響は見られない。

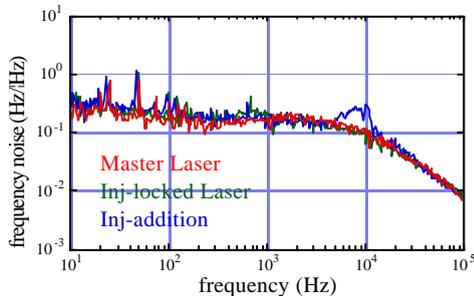


図 8 フリーラン時の周波数雑音

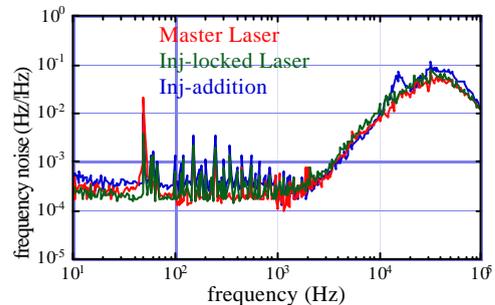


図 9 周波数安定化時の周波数雑音

基準 F P 共振器を用いた周波数安定化（図 9）により、1 kHz 以下で 2×10^{-4} [Hz / Hz] に抑えることができた。

Brewster Plate 挿入による偏光比の向上実験

現在 TAMA 300 では従レーザー共振器内に偏光選択素子を使用していない。注入同期レーザーの出力は安定な主レーザーの偏光状態と同じになる、ということと、共振器内に光学素子を入れると損失になり、出力が減少する懸念があったためである。しかし、余分な偏光成分は不安定な要因となるため、本研究の従レーザーを使って Brewster Plate 挿入による偏光比の向上の確認と、出力への影響を調べた。従レーザー共振器への Brewster

Plate 挿入により 2 台の注入同期レーザーの偏光比は平均して数倍程度向上し、注入同期レーザー加算後の出力では、使用前の偏光比 (p 偏光 / s 偏光) 32 (97.0%) から 150 (99.3%) 以上の偏光比が得られた。図 10 が Brewster Plate 挿入前後の注入同期レーザーの出力と効率である。

Brewster Plate 挿入により、双方向発振している従レーザー単体での出力は低下したが、注入同期の効率は上がり、注入同期の出力自体はほぼ同じに得られた。Brewster Plate 挿入による注入同期レーザーの出力減少はないことが示された。

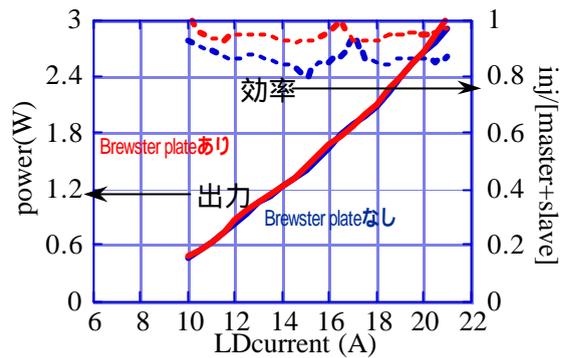


図 10 挿入前後の注入同期出力と効率

従レーザー励起用 LD 電流源制御による強度安定化

重力波検出器では、マイケルソン干渉計の非対称性から、観測帯域である 1 kHz 以下で相対強度雑音 10^{-8} [1 / Hz] が要求される。TAMA 300 では EOM と偏光子を組み合わせた光学素子を用いて、誤差信号評価で 1 kHz 以下で 10^{-8} [1 / Hz] の安定度が得られている。EOM を使った強度安定化では、制御による位相雑音の混入という問題や、将来のより高出力なレーザーの出力に耐えられる結晶がないという問題がある。一方で、注入同期の理論では、緩和振動以下の周波数領域では従レーザーの励起用 LD により強度雑音が支配される。そのため、従レーザー励起用 LD の電流制御により強度安定化が可能である。

図 11 に注入同期レーザー 1 台での強度安定化の実験図を示す。

注入同期レーザーの出力の一部を取り出し、PD で検出してサーボ回路を介し、その誤差信号を励起用 LD 電流源のコントロール端子 (制御帯域 6 kHz) にフィードバックして強度安定化を行う。もう 1 つの PD を実際の強度雑音モニターに用いる。図 12 はフリーラン時の強度雑音、誤差信号、モニター用 PD の強度雑音である。この時のショット雑音は 2×10^{-8} [1 / Hz] である。

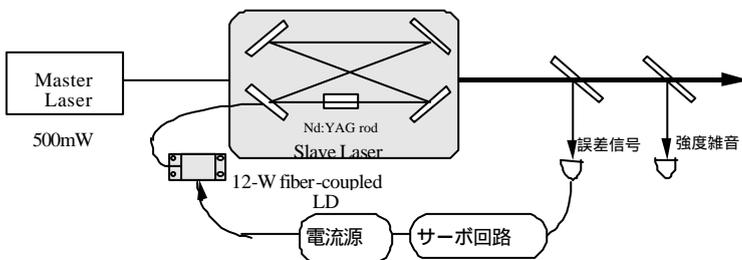


図 11 注入同期レーザー 1 台の強度安定化実験図

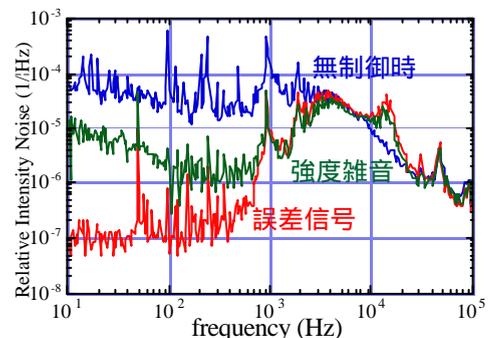


図 12 注入同期レーザーの強度安定化

図12より、誤差信号評価で、 100 Hz 以下で相対強度雑音 $1 \times 10^{-7} [1 / \text{ Hz}]$ に抑えられた。別のPDでモニターした強度雑音は誤差信号よりも増加していて、特に周波数が低くなるにつれて強度雑音が増加している。これは空気の擾乱、ビームポインティングの変動、PD入射光量を調整するためのNDフィルターでの干渉縞が揺れる等の付加的な雑音によるためであると考えられる。

注入同期レーザー2台による加算時の強度安定化

注入同期レーザー2台を加算した時の強度安定化実験を行った。2台の注入同期レーザーそれぞれから出力の一部を取り出し、別々にフィードバックを行う方法もあるが、系を簡単にするために、2台の従レーザーの励起用LDを直列に接続し、1台の電流源で動かし、加算出力から出力の一部を取り出し電流源にフィードバックを行った(図13)。図14はフリーラン時の強度雑音、誤差信号、モニター用PDの強度雑音である。この時のショット雑音は $2 \times 10^{-8} [1 / \text{ Hz}]$ である。

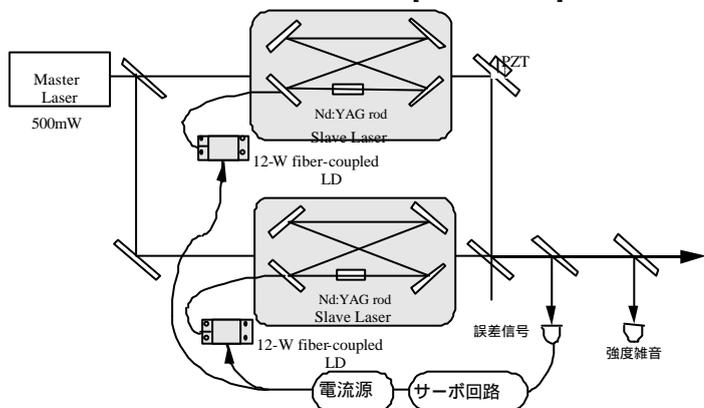


図13 加算時の強度安定化実験図

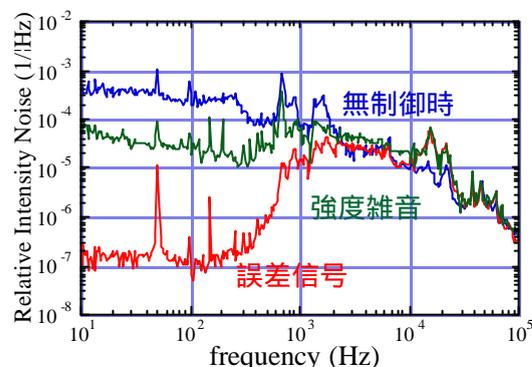


図14 加算時の強度安定化

図14より、2台のLDを直列に制御したときにも、誤差信号評価で1台の制御時と同じ 100 Hz 以下の帯域で $1 \times 10^{-7} [1 / \text{ Hz}]$ の強度安定度が得られた。別のPDでモニターした強度雑音は、1台の制御の時よりも増加している。これは空間モードの足し合わせによるビームポインティングの変動、干渉縞の揺れの影響がより大きく出たためだと思われる。

まとめ

出力 2.4 W の注入同期レーザー2台をコヒーレント加算することで、 4.4 W の加算出力(結合効率 93%)が得られた。コヒーレント加算による強度雑音、周波数雑音の増加はないことを確認した。基準FP共振器に安定化を行ない、 1 kHz 以下の帯域で $2 \times 10^{-4} [\text{ Hz} / \text{ Hz}]$ の周波数安定度が得られた。

2台の従レーザー励起用LDを直列に接続し、電流源に負帰還制御を行うことで、 100 Hz 以下の帯域で $1 \times 10^{-7} [1 / \text{ Hz}]$ の強度安定度が得られた。制御帯域を広げることでさらなる安定化が可能である。

従レーザー共振器内に偏光選択素子(Brewster Plate)を挿入し、加算ビームで $150(99.3\%)$ 以上の偏光比(p偏光/s偏光)が得られた。Brewster Plate挿入による注入同期レーザーの出力減少はないことが示された。