

直交変復調による残留強度変調の抑制

武者研究室 大石 晃裕

1 研究背景

レーザーの周波数安定化は、周波数安定度の高い周波数基準に、レーザーの周波数を一致させる能動制御により実現される。周波数安定化レーザーは、周波数や時間、距離の基準として応用される。本研究室では、特に、宇宙重力波検出のためのレーザー干渉計用光源および衛星測位システムの周波数基準としての利用を見据え、ヨウ素周波数安定化レーザーの開発を行っている。宇宙重力波検出器の光源としては、ハイパワーかつ、短期の周波数安定度が高いことが求められる。他方、衛星測位システムの周波数基準用の光源としては、長期安定動作および、長期周波数安定度が要求される。現在は、特に、衛星測位システムの周波数基準としての応用のため、長期周波数安定度の向上を主軸に置いて、ヨウ素安定化レーザーの開発を行っている。

2 研究の目的

ヨウ素安定化レーザーの長期安定度を制限する要因の一つとして残留強度変調 (RAM) がある。RAM とは、電気光学変調器 (EOM) による位相変調が、入射偏光と結晶軸のずれなどが原因となり、強度変調にカップリングする現象である。従来は、結晶温度と印加 DC 電圧のフィードバック制御により RAM の抑制を行っていた。この方法は、制御パラメータが複雑で、ロックが外れやすく、長期安定動作に課題があった。そこで、本研究では、RAM を、逆位相の強度変調で打ち消すフィードバック制御により抑制する手法を用いた。この方法は、RAM の発生自体を抑制する従来の方法とは異なり、発生した RAM を補償する制御である。複雑なパラメータはなく、長時間のロックが期待される。

3 原理

3.1 残留強度変調

電場の印加により結晶中の屈折率が変化する現象は電気光学効果と呼ばれ、電気光学効果を示す結晶を電気光学結晶と呼ぶ。EOM は、印加電場の 1 乗に比例した屈折率変化 (Pockels 効果) を用いて、ビームに位相変調をかけることができる。

EOM の結晶軸は温度変化により、時々刻々と変化していき、そのためビームの偏光方向と結晶軸は完全には一致しない。複屈折が生じている結晶では、通常屈折率方向と異常屈折率方向で位相シフト量が異なることにより偏光が回転する。EOM の後に偏光子となる素子があると、通過するビームの強度が変化し、RAM が発生する。

EOM で位相変調を加えたビームには、変調周波数 Ω と等しい周波数で強度変調がかかり、出射ビームの光強度は次式で表される。

$$\begin{cases} I(t) = I_{DC} + I_{RF} \sin(\Omega t) \\ I_{RF} = 4aJ_1(\Delta\beta)[aJ_0(\Delta\beta)E_0 \cos \Phi_x \\ \quad + \sin \Phi_x + bE_0 \cos \Phi_y] \end{cases} \quad (1)$$

ビームの偏光と EOM の結晶軸のずれを表す a, b は、温度変化に依存するため、RAM の抑制には、温度一定制御や結晶温度および印加 DC 電圧のフィードバック制御などが行われてきた。

3.2 直交復調

検出する実信号を $A(t) \cos\{\omega t + \theta(t)\}$ とするとき、解析信号は

$$\begin{aligned} s(t) &= A(t)e^{i\{\omega t + \theta(t)\}} \\ &= A \cos(\omega t + \theta) + iA \sin(\omega t + \theta) \\ &\equiv I(t) + iQ(t) \end{aligned} \quad (2)$$

である。 I は同相成分, Q は直交成分と呼ばれる。 Q は I のヒルベルト変換であり, 位相を $\pi/2$ だけ遅らせた関数である。 振幅 A と位相 θ は同相成分 I と直交成分 Q を用いて次のように表される。

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2} \\ \theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{Q(t)}{I(t)} \right) - \omega t \end{cases} \quad (3)$$

すなわち, 実信号 I を検出すれば, ヒルベルト変換により信号 Q が得られ, 式 (3) を用いて, 振幅 A と位相 θ が求まる。

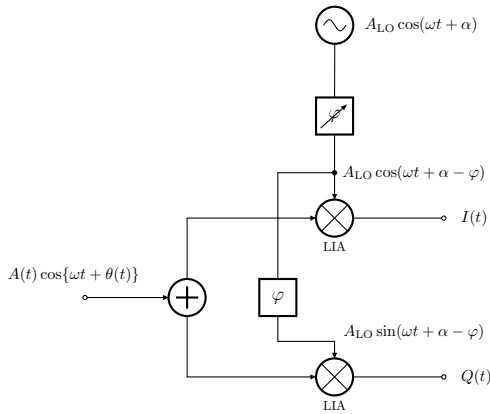


図1 二相ロックイン検出による直交復調

実際の系では, 二相でロックイン検出を行う。すなわち, 2つの位相検波器を用いて, 入力する同期信号の位相を $\pi/2$ だけずらす。フェーズシフターにより $\varphi = \alpha$ とした際に出力される信号は, 同相成分 I と直交成分 Q であり,

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{1}{2} A_{LO} A(t) \cos \theta(t) \\ Q(t) &= \frac{1}{2} A_{LO} A(t) \sin \theta(t) \end{aligned} \quad (4)$$

で表される2つのDC信号となる。また, 式(3)を用いれば, 検出信号の振幅, 位相も得られる。

3.3 直交変調

RAMを打ち消す制御信号を生成するため, 直交復調により得られた2つのDC信号からRAM信号と逆位相の信号を作る必要がある。そのために, ここでは, 2つのDC信号 I, Q から任意の正弦波が生成できることを示す。

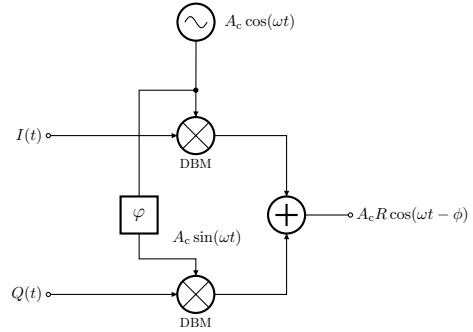


図2 直交変調

変調信号を $A_c \cos(\omega t)$ とする。DC信号 I, Q と変調信号を掛けた後, 2つの信号を足し合わせて得られる出力信号は,

$$\begin{aligned} V_{out} &= I(t)A_c \cos(\omega t) + Q(t)A_c \sin(\omega t) \\ &= A_c \sqrt{I^2 + Q^2} \\ &= A_c R \left[\frac{I}{\sqrt{I^2 + Q^2}} \cos(\omega t) + \frac{Q}{\sqrt{I^2 + Q^2}} \sin(\omega t) \right] \\ &= A_c R \{ \cos \phi \cos(\omega t) + \sin \phi \sin(\omega t) \} \\ &= A_c R \cos(\omega t - \phi) \\ \begin{cases} R(t) = \sqrt{I(t)^2 + Q(t)^2} \\ \phi(t) = \tan^{-1} \left(\frac{Q(t)}{I(t)} \right) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, Q にかけて合わせる変調信号はフェーズシフターにより $\pi/2$ だけ位相を遅らせたものである。

式(5)より, I, Q を変化させることで, R, ϕ を自在に変化させることができ, 任意の振幅, 位相の信号を生成できることが分かる。

4 実験方法と結果

4.1 実験系と制御系

RAM制御のため, 図3, 4に示すような実験系および制御系を組んだ。

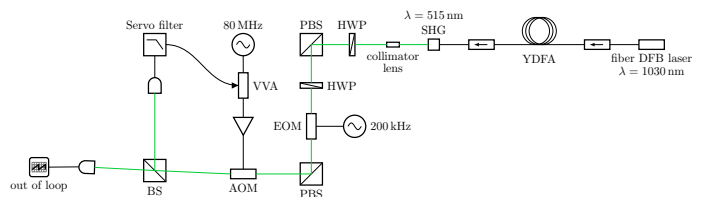


図3 実験系

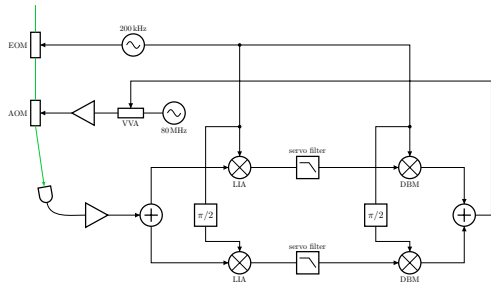


図4 制御系

制御系は、誤差信号取得部、サーボ部、制御信号生成部、アクチュエータ部からなる。誤差信号取得部では二相ロックインアンプによる直交復調、制御信号生成部では、DBM による直交変調を行った。アクチュエータ部では、電圧可変アッテネーターに制御信号を入力し、AOM の駆動パワーに変調をかけることで、強度変調をかけた。

4.2 回路の設計、作製および実装

RAM 抑制のための、制御回路を設計した。初めに、無制御時の、制御信号 I_{ctr} , Q_{ctr} に対する誤差信号 I_{err} , Q_{err} の周波数応答 (オープンループ伝達特性) を測定した。得られたオープンループ伝達特性から、制御系の等価回路を設計した。

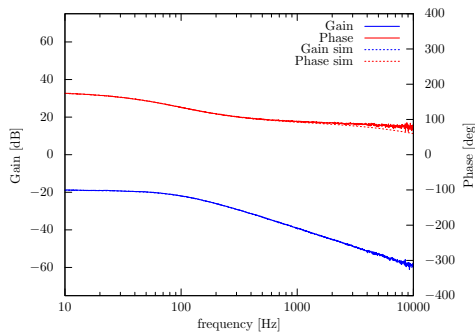


図5 無制御時のオープンループ伝達特性 (同相成分)

無制御時のオープンループ伝達特性をもとに、サーボフィルターを設計した。まず、反転増幅回路のみを用いた簡易的なサーボフィルターを用いてロックを行い、再びオープンループ伝達特性を測定した (図6)。その結果を踏まえ、より強固なロックを実現するため、反転増幅回路とラグリードフィル

ターを用いたサーボフィルターを設計した (図7)。

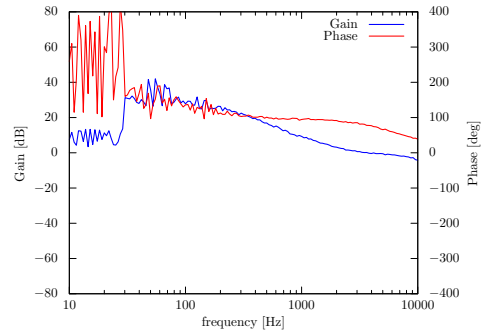


図6 同相成分のオープンループ伝達特性 (反転増幅回路)

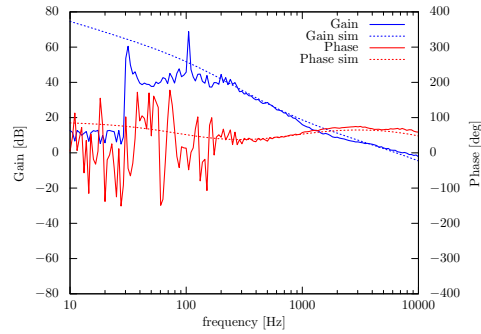


図7 同相成分のオープンループ伝達特性 (ラグリードフィルター)

5 RAM 抑制の評価

制御により、RAM がどの程度低減されたかを in loop と out of loop で評価した。評価は、短時間の時系列データ、ノイズスペクトル、長時間の時系列データを用いて行った。

図8は、同相成分のサーボフィルターのゲインを上げていき、次に、直交成分のサーボフィルターのゲインを上げたときの誤差信号の時間変化をプロットしたものである。

0 ~ 5s にかけて、同相成分のゲインが上がるに連れ、 I_{err} は 0V に近づくが、完全に 0V とはならない。これは、RAM と、制御信号の位相が合っていないことが原因であり、 Q_{err} の増加としても現れている。その後、10 ~ 13s にかけて、直交成分のゲイ

ンを上げることで I_{err} , Q_{err} が同時に 0 V に収束した。これは、直交成分が変調に加わることによって、RAM と制御信号の振幅および位相が完全に揃ったことを表す。

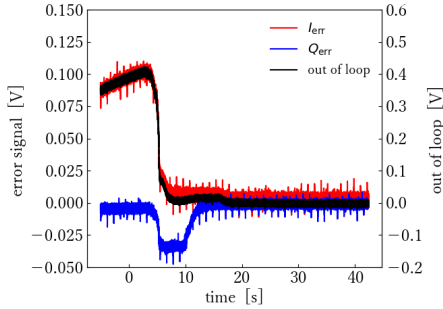


図 8 ロックされる様子

続いて、無制御時、反転増幅のみによる制御時、ラグリードフィルタによる制御時のノイズスペクトルの測定結果を図 9, 10 に示す。図 9 は in loop の復調信号、図 10 は out of loop の復調信号のノイズスペクトルである。ラグリードフィルタを入れることにより、in loop においては、低域のノイズが低減されることが読み取れる。out of loop では、低域のノイズの大幅な低減は見られなかった。

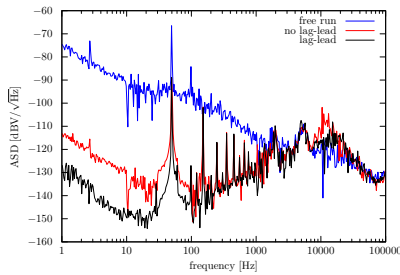


図 9 in loop のノイズスペクトル

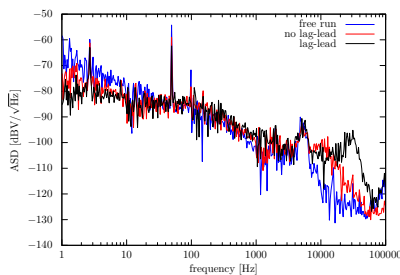


図 10 out of loop のノイズスペクトル

制御の長期的な安定度を評価するために、復調信号の長時間測定を行った。測定結果は、無制御時の、温度に対する復調信号の揺れの振幅が 1 となるように規格化した。ロックをかけた状態での、復調信号の時系列データは図 11 に示す。復調信号の変動は、in loop では、0.5% 以下、out of loop では、12% 以下に低減された。

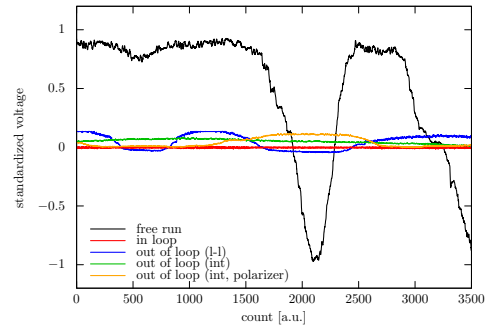


図 11 復調信号の長時間時系列データ

6 今後の展望

図 11 に示したデータからは、in loop に対し、out of loop が十分に制御されていないことが読み取れる。PBS 通過後にわずかに残った楕円偏光成分に乗った RAM が、BS の反射率の偏光依存性の影響を受け、in loop と out of loop で異なる偏光になることが原因であると考察した。この課題を解決するため、EOM の温度一定制御を同時に行い、結晶軸の揺れを抑えることで、室温変化に起因する偏光ゆらぎの影響を低減することを考えている。

参考文献

- [1] Frédéric du Burck, Olivier Lopez, A. El Basri, “Narrow-Band Correction of the Residual Amplitude Modulation in Frequency-Modulation Spectroscopy”, IEEE Transactions of Instrumentation and measurement, vol.52, 2003/4.
- [2] Klaus Döringshoff, “Optical frequency references based on hyperfine transitions in molecular iodine”, pp.87 – 92, 2018/03/16.