

原子干渉計のためのデジタル制御による

周波数安定化レーザーの開発

中川研究室 高木耕介

1 序論

1.1 研究背景

中川研究室では ^{87}Rb 原子を使った原子干渉による重力加速度計の開発を研究テーマの一つとしている。

原子干渉を用いた重力加速度計は落下する原子にパルス光を3回照射し、ドップラー効果による共鳴周波数シフトを打ち消すような周波数掃引レートを決定することで重力値を求める。そのため、機械式の重力加速度計に比べて高い精度での測定や長期間の測定を可能にできると期待されている。

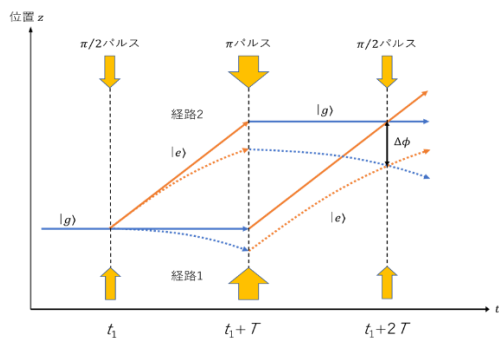


図1 原子干渉計の原理

干渉計の測定精度はパルス光の精度によって決まる。したがって、重力を高精度に測定するためには、周波数を精密に制御したレーザー光が必要である。

1.2 研究目的

現在我々の研究室には原子干渉を用いた重力加速度計が1台存在し、研究棟廊下に持ち出しての重力加速度測定を試みようとしている。しかし、人の手で移動させるにはやや大きい、測定までに必要な操作が多いといった問題が残っている。そこで今回は、現在アナログ回路を用いて手動で行っている、原子冷却や干渉に用いるレーザーの周波数基準となる光源(Master Laser)の周波数ロックと安定化をデジタル制御によって自動化する。これにより原子干渉計の操作の簡易化を目指す。

周波数安定化は変調移行分光法を用いて ^{85}Rb 原子の $5^2\text{S}_{1/2}\text{F}=3 \rightarrow 5^2\text{P}_{3/2}\text{F}'=4$ 吸収線で行う。波長では780.24 nm、周波数では384.23 GHzである。先行研究ではこの吸収線で周波数揺らぎ100 kHz以下を目標にアナログ制御によって安定化を行っており、結果として周波数揺らぎを40.71 kHzまでに抑えられている。

2 原理

2.1 変調移行分光法

変調移行分光法とは、位相変調したポンプ光で原子を飽和吸収させ、その透過光強

度を観測する分光法である(図2)。

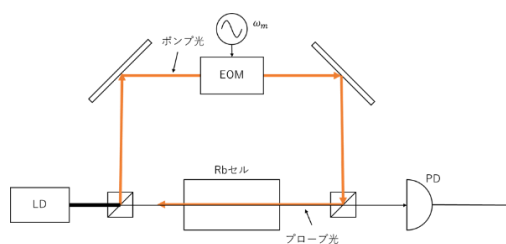


図2 変調移行分光装置

EOM に角周波数 ω_m の変調信号を印加すると EOM 通過後のポンプ光の電場にはサイドバンドが生じる。このサイドバンドは原子の分極を介してプローブ光に移行するため、PD では変調された透過光が観測される。PD からの信号と変調信号をミキサーで掛け合わせてローパスフィルターを通すと、共鳴周波数からのずれに応じた大きさの電圧(誤差信号)が得られる(図3)。

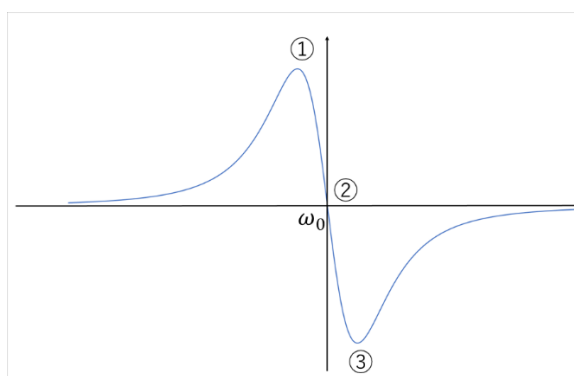


図3 変調移行分光によって得られる誤差信号の概形

3 実験

3.1 実験装置

実験装置を図4に示す。光学系は既存のものを用いた。変調移行分光法によって

^{85}Rb 原子の $F = 3 \rightarrow F' = 4$ の共鳴周波数とレーザー周波数のずれを誤差信号として得る。この誤差信号をデジタル制御デバイスに入力し、PI 制御によってレーザー周波数を安定化する。デジタル制御デバイスからは LD Driver にも信号を送ることができ、これによってレーザーの周波数掃引を行うことができるようになっている。

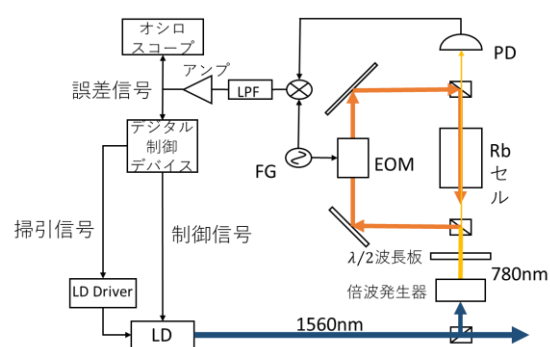


図4 実験装置

LPF 後のアンプは誤差信号が小さく、さらにオフセットが乗っていたため加えた。可変抵抗の抵抗値を調整することでオフセットを打ち消すことができるようになっている。

実際に観測した誤差信号を図5に示す。誤差信号の特性は-5.36 mV/MHzであった。

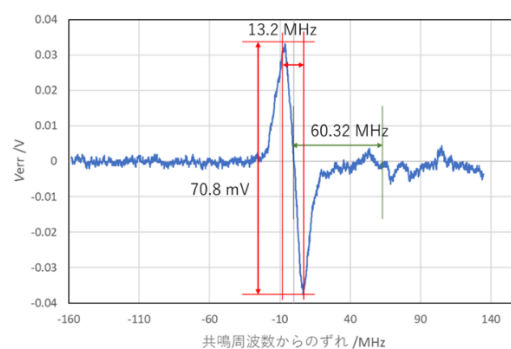


図5 誤差信号

3.2 周波数ロックと安定化用プログラム

ム

周波数ロックと安定化を自動で行うためのプログラムを作成した。プログラムの流れを図6に示す。

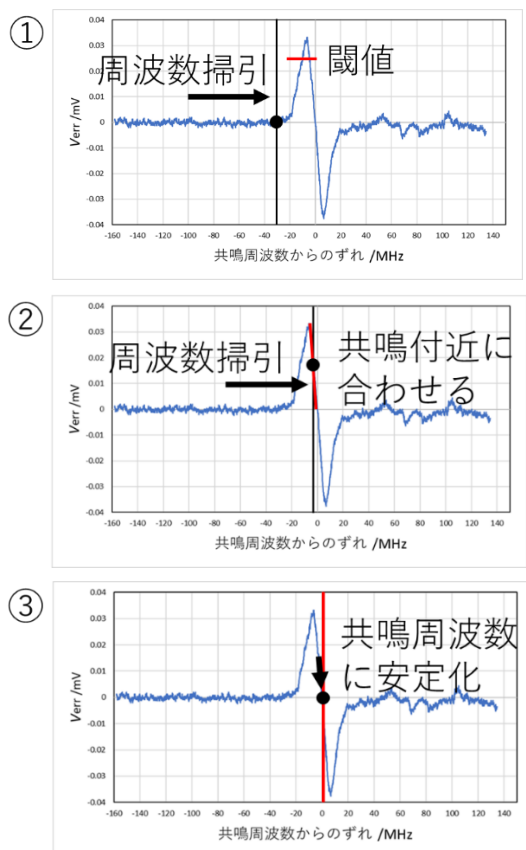


図6 周波数ロックおよび安定化用プログラム

プログラムを実行するとまず、 $F = 3 \rightarrow F' = 4$ の吸収を見つけるために、誤差信号電圧が誤差信号のピークの約0.8倍に設定した閾値を超えるまで掃引信号を少しずつ上げ、周波数掃引を行う(図6①)。ただし信号に乗った雑音の影響を避けるため、ロック点を見つけるまでの間は時間的に連続した2点の平均値を誤差信号電圧として判

定に使う。誤差信号電圧が閾値を超えたら、次は後方差分 D を取りながらさらに周波数掃引を行う。 $D < 0$ となる点は共鳴周波数付近であるから、掃引を止めてレーザーの周波数をロックする(図6②)。最後にレーザーに制御信号を出力し、周波数安定化を行う。制御は先に比例ゲインだけを設定値まで徐々に大きくし、そのあとに積分ゲインも同様に目標値まで大きくしていく。

本実験では積分処理を2段にして低周波に対するゲインを高くできるようにした。カットオフ周波数は10 kHzとし、ゲインは低周波領域で0 dB、10 kHzで-6 dB、高周波領域では40 dB/dec.で減衰していくように設計した。

3.3 実験結果

まず、制御デバイスからの掃引信号にFGからの三角波を加えながら、作成したプログラムの周波数ロックを行う部分(図6①～②)の動作を検証した。

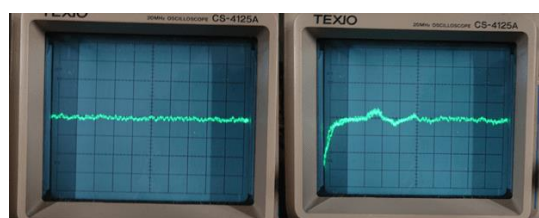


図7 周波数ロックの実行結果

プログラムは図7のように閾値を超えていないはずの周波数で止まったり(左)、ロックしたい周波数を通り過ぎたり(右)する場合があります。多くあることがわかった。

次に、LD Driverの電流値を手動で操作し、共鳴周波数がオシロスコープの中心に

見えるようにしてから周波数安定化を行う部分(図 6③)の検証をした。ただしここでは比例制御のみを行った。また、これもレーザの周波数を FG からの三角波で掃引しながら行った。図 8 にその結果を示す。

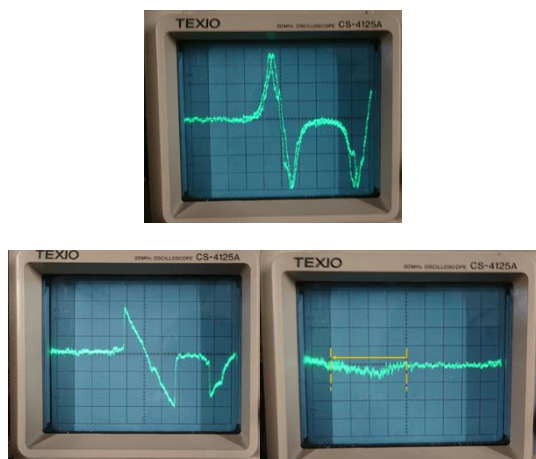


図 8 P 制御による周波数安定化の実行結果

上段: 制御前

下段左: ゲインが小さいとき

下段右: ゲインを大きくしたとき

ゲインが小さいとき(図 8.下段左)は、共鳴周波数の位置がオシロスコープの中心から動かないまま誤差信号のピーク間電圧が小さくなっていた。したがって、制御が行えていることが分かった。しかし、さらにゲインを上げていくと(図 8.下段右)、共鳴周波数の位置がオシロスコープの中心からずれていくようになった。これはレーザの周波数が大きく変化し、ロックが外れたことを意味する。また、誤差信号と同時に制御信号を観測すると、制御信号がゲインの設定値から考えられるものより大きく出力されていることもわかった。

4 まとめと今後の課題

今回、周波数ロックを自動で行うことはできなかった。これは周波数掃引を止めるまでに行われる、誤差信号の閾値や差分によるプログラムの進行判定が適当なタイミングでなされなかったためと考えられる。今後は閾値の大きさや掃引幅の調整を行う。周波数安定化に関しては、ゲインが小さいときには制御を行えるものの、ゲインを大きくするときにロックが外れてしまった。制御信号が意図したものより大きいことから、誤差信号の SN 比を改善する必要があると考えられる。また、ゲインがより緩やかに上昇するようにすることでもロックが外れにくくなる可能性がある。周波数ロックと安定化ができれば、周波数安定度の評価を行う予定である。

参考文献

- [1] 北条孟, 「原子干渉計のための周波数基準レーザの開発」, 卒業論文, 電気通信大学(2021)
- [2] Marc D. Levenson、Satoru S. Kano、宅間宏(監訳)、狩野覚、狩野秀子(訳), 「非線形レーザ分光学」, オーム社(1998)
- [3] 山本重彦、加藤尚武, 「PID 制御の基礎と応用」, 朝倉書店(2002)
- [4] 高瀬直美, 「周波数安定化 420nm 青色半導体レーザの開発」, 卒業論文, 電気通信大学(2018)