

衛星間測位用超高安定レーザー光源の開発 Development of a stabilized laser light source in a satellite-to-satellite laser interferometer

佐藤 孝、前原進也*、二文字俊哉*、大河 正志、伊東 宏之**、吉野 泰造**、國森 裕生**、
細川 瑞彦**、長野 重夫**、川村 静児**

T. Sato, S. Maehara*, T. Nimonji*, M. Ohkawa, H. Ito**, T. Yoshino**, H. Kunimori**,
M. Hosokawa**, S. Nagano**, S. Kawamura**

新潟大学工学部 *新潟大学大学院自然科学研究科 **情報通信研究機構 ***国立天文台
Faculty of Engineering Niigata University, *Graduate School of Science and Technology
Niigata University, ** National Institute of Information and Communications Technology,
*** National Astronomical Observatory
E-mail:tsato@eng.niigata-u.ac.jp

Abstract:

Currently in the initial stages of development, the endeavor aims to use satellite-to-satellite tracking laser interferometer-based optical technique, to document fluctuations in earth's gravitational field indicating other critical changes in the environment. This system must be able to measure infinitesimal changes in the relative velocity of the two satellites, using a laser light source, which oscillates at frequency stability better than 10^{-12} in the square root of the Allan variance. The constraints placed upon the system will ultimately require that the interferometer's light-source be small, lightweight, extremely efficient, durable, and possess high frequency-stability. Present-day technology of a laser diode possesses all of these characteristics, except the last and most critical one; frequency stability. So, our ongoing efforts are all focused on the search for a method of stabilizing the oscillation frequency of the satellite-to-satellite laser-diode light source. We used a Rubidium absorption line as a frequency reference of the frequency stabilization system in order to improve its frequency stability. We have measured the frequency, to determine its degree of stability, by comparing the "femtosecond optical comb generator"- and laser diode-frequencies.

1. はじめに

近年、地球の重力を観測することにより、全く新しい応用分野が開かれることが期待されている。その応用として進んでいるのが、氷床量の変動や陸水分布変動などのグローバルな環境変動を長期的に監視するために、人工衛星を用いて地球重力場を精密に観測する研究である。この研究では、低高度の同一軌道上に2つの衛星を打ち上げ、それらの相対速度を連続的に精密計測することで、地球温暖化がもたらす海水面の上昇や地下水の質量分布の変動などを時間変化する重力場として検出できるとしている。(1)

現在、NASA(米国)とDLR(ドイツ)の共同計画(GRACE)により電波による精密衛星間測位が開始されている。日本においても、光波を用いることでより高精度な計測の実現が期待され、小型で安価な衛星を用いた重力監査システムの構築に向け、現在地上シミュレータによる基礎技術開発の研究が進められている。

衛星間測位に用いる光源には、消費電力が少なく、小型・軽量であり、長期間にわたってレーザーの周波数が安定していることが必要であり、この条件に適した光源の1つとして半導体レーザーが考えられる。そこで我々は、これまで行われてきた半導体レーザーの周波数安定化技術(2)・(3)を用いて、より高安定な光源としての応用を目指し研究を進めている。

半導体レーザーは、小型・軽量、安価、長寿命、高発光効率など、他のレーザーにはない多くの特徴を持っており、現在では、光通信、光記録、光計測などの分野で光源として広く用いられている。また、半導体レーザーは動作特性上、注入電流や温度により発振周波数が変化するので、変調可能であると共に雰囲気温度の影響を受けやすい欠点もある。このため、我々はレーザー温度を精密に制御し、Rb原子の吸収線やファブリ・ペローエタロンを周波数基準として用いて注入電流を制御することで周波数安

定化を行っている。

光源の周波数安定度としては、平均化時間 1[s] ~ 100[s]においてアラン分散の平方根値で、 10^{-13} 程度が要求されている。この安定度の実現には、基準周波数とレーザー発振周波数との差を誤差信号として検出し、レーザーの注入電流に負帰還制御を行うと同時に、外部に設置した反射鏡により出力光をレーザー共振器内に帰還させる方法を用いる。光帰還は、共振器のQ値の向上によりモードが安定化し、周波数変動が抑制され、発振スペクトル幅が狭窄化され、安定度向上に寄与すると考えられる⁽⁴⁾。

制御されたレーザーの周波数安定度は、2つの安定化されたレーザー光を干渉させた周波数の差であるビート信号を用いて、そのビート信号の変動を測定することで評価を行うが、最終的には近年開発された光コムジェネレーターを用いてより精度の高い評価を行う。

2. 地上シミュレータと光源に要求される安定度

昨年度の報告⁽⁵⁾でも述べたが、地球重力場計測における地上シミュレータ実験は、図1に示す2台の衛星（双子衛星）が地上450kmを周回し、衛星間距離が約50kmとなるシステムを想定して行われている。このような周回軌道をもつ2つの衛星のうち、一方を光源とし、もう一方で反射させた光を干渉させることで相対速度変化が得られる。現段階では、最大相対速度は0.1 m/sになると予想されており、発生した相対速度変化によりレーザー光が受けるドップラーシフト量を f_D [Hz]とすると、

$$f_D = \frac{2|v_1 - v_2|}{c} f_0 \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 v_1, v_2 [m/s] は2つの衛星の速度、 c [m/s] は光速、 f_0 [Hz] は光源周波数を表している。ここで式(1)に $|v_1 - v_2| = 0.1$ m/s、 $c = 3.0 \times 10^8$ m/s、 $f_0 = 3.0 \times 10^{14}$ Hzを代入すると $f_D = 2.0 \times 10^5$ Hzが得られる。この条件の下で、相対速度変化 $|v_1 - v_2|$ を10 nm/sの精度で測定することが要求されている。

目標とする測定を実現するためのレーザー光源の周波数安定度を考える。光の干渉を用いて相対速度を測定した場合に得られる速度誤差を v とすると、

$$v = \frac{L}{2T} \times \frac{f}{f_0} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、 f は光源の周波数変動による f_0 （発振周波数の基準とする周波数）との差、 L は衛星間の往復距離で、 $L = 1 \times 10^5$ mである。(2)式より、衛星間の相対速度の感度として10 nm/sを得るためには、安定度の評価法としてアラン分散の平方根を用いた場合、平均化時間 $T = 1$ s のとき、

$$\frac{f}{f_0} = \frac{2T}{L} \times v = 2 \times 10^{-13} \quad (3)$$

が得られる。よって、必要とされる平均化時間 T (1 s ~ 100 s) において、 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 程度の f/f_0 (周波数安定度) が要求されることになる。

3. 周波数安定化の原理と周波数基準

3.1 周波数安定化の原理

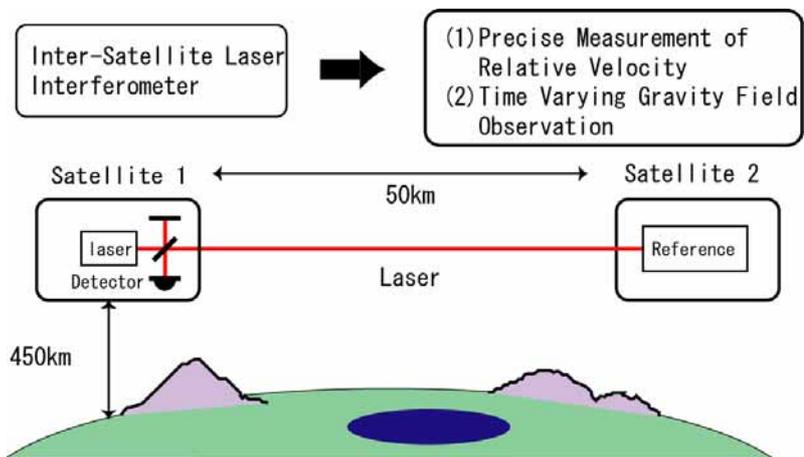


図1 レーザー光干渉計を用いた衛星間相対速度観測システム
Fig.1 Relative velocity measuring system for the twin satellite using a laser interferometer

レーザーの周波数安定化の際に必要な周波数基準として、比較的簡単にかつ信頼性の高い周波数基準を与える原子の吸収線がよく用いられる⁽²⁾。本研究では、近赤外半導体レーザーの波長帯域にあるRb原子の吸収線の1つであるD₂線（波長：780 nm）を基準とするため、Rbをガラス容器（Rbセル）に封入して用いている。

半導体レーザーの発振周波数をD₂吸収線付近に合わせ、レーザー光をRbセルに透過させる。そして、半導体レーザーの電流を変化させて発振周波数を掃引すると、図2(a)に示したような吸収波形が得られる。実際は12本の吸収線を含んでいるが、ドップラー広がりの影響により4本の広がった吸収波形となっている。また、周波数掃引に伴って光出力強度が変化するため、波形は右下がりになっている。

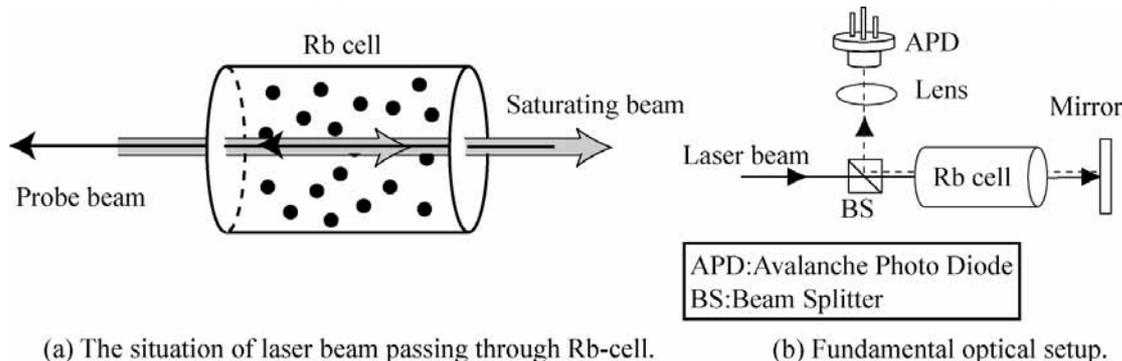
この吸収波形を周波数に関して一次微分した波形を図2(b)に示す。図2(b)の波形は、吸収の最も大きい点Pでゼロとなり、その前後で正負反転する特徴を持つ。図2(c)は、図2(b)における点Pの部分を拡大したものである。ここで図2(c)のように、レーザー光がゼロ点から f [Hz] 離れた周波数で発振しているとすると、 V [V]の信号が得られる。これは、発振周波数と安定化点の周波数差を表す信号であるので誤差信号と呼ぶ。この誤差信号を用いて制御信号を作り、半導体レーザーの注入電流にフィードバックすることで、ゼロ点から離れたレーザーの周波数をゼロ点に戻す制御を行う。ここで、安定化点における接線の傾き G_d は、

$$G_d = \frac{V}{f} \quad [\text{V/Hz}] \quad (4)$$

で与えられ、周波数弁別利得と呼ばれる。 G_d が大きければ周波数差 f が小さくても大きな V を得ることができ、安定度の向上が期待できるため、 G_d を大きくすることが安定化の一つの目標となる。

3.2 飽和吸収分光法

原子スペクトルが超微細構造によって分岐する場合、その分岐エネルギーは数十 MHz ~ 数 GHz 程度である。通常、気体原子に分光を行うと、そのスペクトルは原子の熱運動により数百 MHz ~ 数 GHz のドップラー幅と呼ばれる不均一幅を持つ。つまり、超微細構造によって分岐した原子スペクトルは、ドップラー幅に埋もれてしまう。これを回避する一つの手段として、飽和吸収分光法が挙げられる。



(a) The situation of laser beam passing through Rb-cell.

(b) Fundamental optical setup.

図3 飽和吸収分光

Fig. 3 Saturated absorption spectroscopy

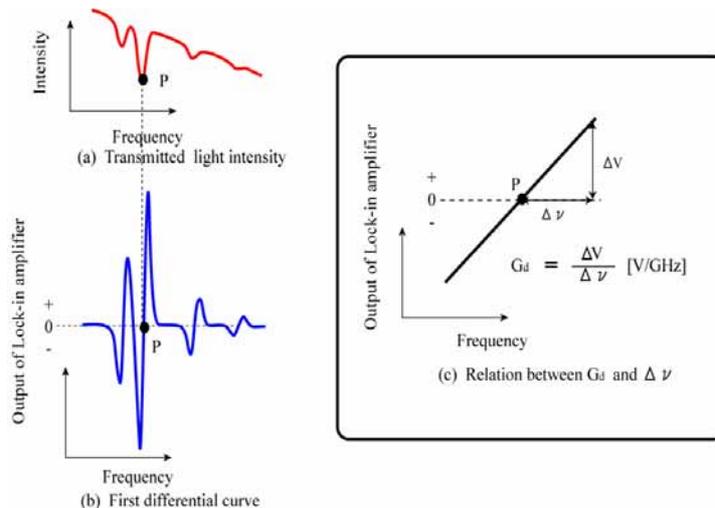


図2 周波数安定化の原理

Fig.2 Principle of frequency stabilization

飽和吸収観測用の光学系を図 3 に示す。飽和吸収を起こさせる光を飽和光(Saturating beam)、観測用の光をプローブ光(Probe beam)と呼ぶ。周波数を掃引しながらプローブ光を受光した結果、飽和光による影響を受けたプローブ光による吸収波形が得られる。

原子によるドップラー効果を考えるため、熱運動している原子のレーザー光に平行な速度成分を v_z とする。簡単のため、図 4 (a) に示すような 2 準位系について考える。レーザー光の周波数が ν の場合、飽和光とプローブ光により励起される原子はそれぞれ次式を満たす速度成分を持つものに限られる。

$$\text{飽和光} \quad v_z = (\nu - \nu_0) / k$$

$$\text{プローブ光} \quad v_z' = -(\nu' - \nu_0) / k = -v_z$$

ここで、 $k = 2\pi / \lambda$ 、 ν_0 は原子の自然共鳴周波数である。

レーザー光の周波数が $\nu < \nu_0$ (または $\nu > \nu_0$) のとき、飽和光は負(正)の速度成分をもつ原子群を、プローブ光は正(負)の速度成分をもつ原子群をそれぞれ励起する。これらの吸収は互いに影響を及ぼさない。

$\nu = \nu_0$ となると、飽和光、プローブ光共にドップラー効果による影響を受けない速度成分 $v_z = 0$ の原子群を励起する。このとき飽和光はこの原子群に対して飽和を起こしているため、プローブ光による吸収量は減少する。

以上のことから、レーザー光を周波数掃引しながらプローブ光の透過光強度を観測すると、ドップラー広がりを中心付近に飽和吸収信号の一つである反転ラムディップと呼ばれる鋭い信号が得られる。この様子を図 5 に示す。飽和吸収は均一広がり範囲内でのみ起こるため、原子が熱運動していても不均一広がりには行き渡らない。飽和光とプローブ光による吸収が共に自然幅程度の半値全幅を持つため、反転ラムディップの半値全幅は近似的に自然幅の 2 倍である。

図 4 (b) の 3 準位系では 2 つの反転ラムディップの間にこれと同程度の広がりを持つ鋭い信号が得られる(図 5 (b))。これはクロスオーバー共鳴と呼ばれる飽和吸収分光信号である。 $^{85}\text{Rb-D}_2$ 線の超微細構造から反転ラムディップとクロスオーバー共鳴の総数を計算すると 12 本になる。しかし、これらは非常に狭い間隔で並んでいるため 1 つずつ観測することは難しい。そのため本実験で実際に観測される飽和吸収分光信号は、図 6 に示すように、いくつかの反転ラムディップとクロスオーバー共鳴が重なったものになっている。このようにして得られた飽和吸収分光信号は通常吸収の吸収幅に比べて十分狭い。この信号を用いて安定化を行えば半導体レーザーの安定度は向上する。

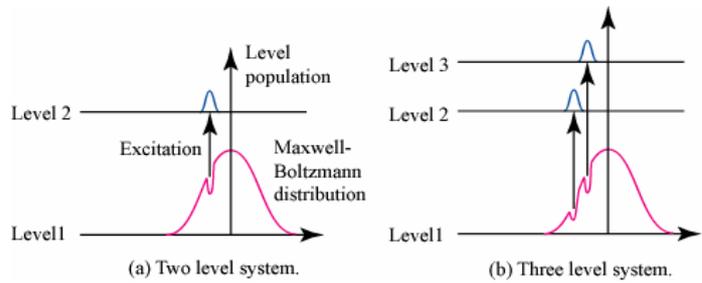


図 4 2 準位系と 3 準位系

Fig. 4 Two level and three level systems

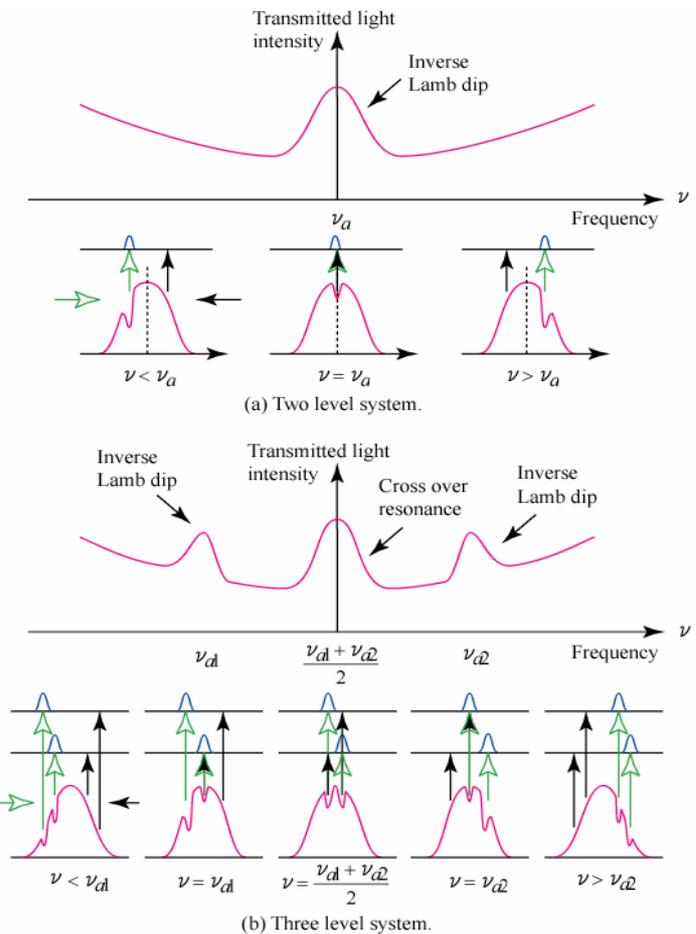


図 5 飽和吸収分光の原理

Fig. 5 Principle of saturated absorption spectroscopy

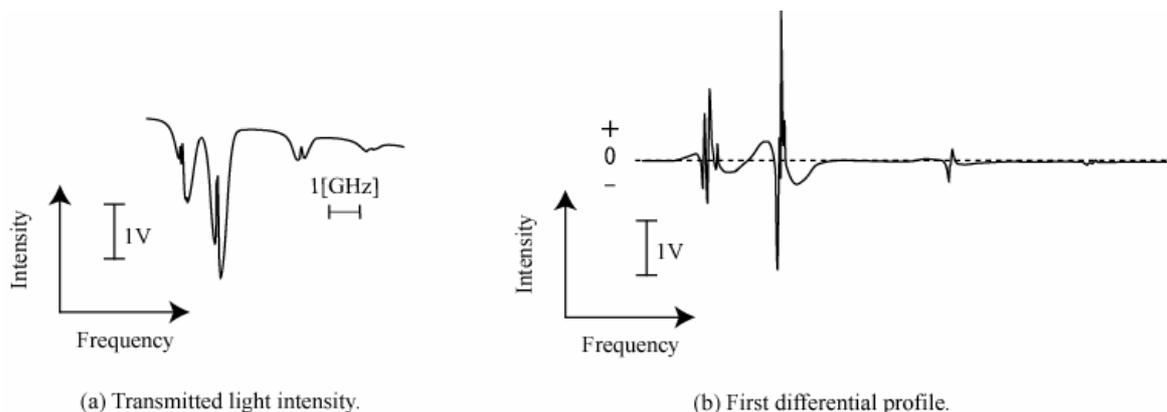


図 6 飽和吸収分光法による信号

Fig. 6 Signal output of the saturated absorption spectroscopy

3.3 ファラデー効果を用いた安定化法

上述のように、誤差信号 V 、すなわち一次微分信号は、何らかの方法で周波数の変化が光の強度変調に変換されたレーザー光を、その変調周波数で同期検波する事で得られる。半導体レーザー光の発振周波数に変調を加える最も一般的な方法が、半導体レーザーの注入電流に直接変調を加える方法である。ところが、注入電流に直接変調を加える事は、本来安定化しなければならない半導体レーザーの発振周波数に変調を加える事になる訳であり、そのために発振スペクトル幅が広がるという欠点を有している。そこでこの節では、基準周波数として用いる Rb 原子吸収線の磁気光学効果を利用し、レーザーの注入電流には直接変調を加える事なく、観測するレーザー光の光強度にその周波数に対応する変調を加え、安定化のための制御信号を得る方法について検討を加えた。以下に本研究で用いた磁気光学効果であるファラデー効果を用いた安定化法について述べる。

ファラデー効果とは、磁界中で異方性を示す物質中を直線偏光の光が通過した時、透過後の光が楕円偏光となり、かつ偏光面が回転する現象である。この現象は、アルカリ原子に磁界を印加した場合にも生じる。図 7 に示すように、レーザー光を直線偏光板によって直線偏光とし、レーザー光の進行方向と同じ方向に直流磁界を加え、その磁界よりも振幅の小さい交流磁界を重畳し変調を加えた Rb セルを通過させると、レーザー光はファラデー効果により楕円偏光となり偏光面が回転する。交流磁界の周波数でこの偏光面の回転角が変調されており、直線偏光板の透過特性を利用して光強度に変換し、ロックインアンプにより変調周波数で同期検波することで図 8(b) に示す制御信号を得て安定化を行うことができる。

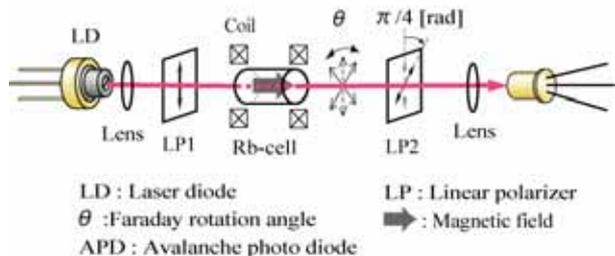


図 7 ファラデー効果を用いた光学系

Fig. 7 Optical setup using the Faraday effect

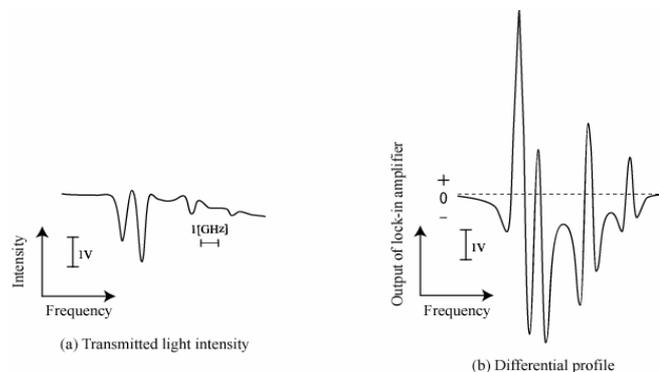


図 8 ファラデー効果を用いた際の信号

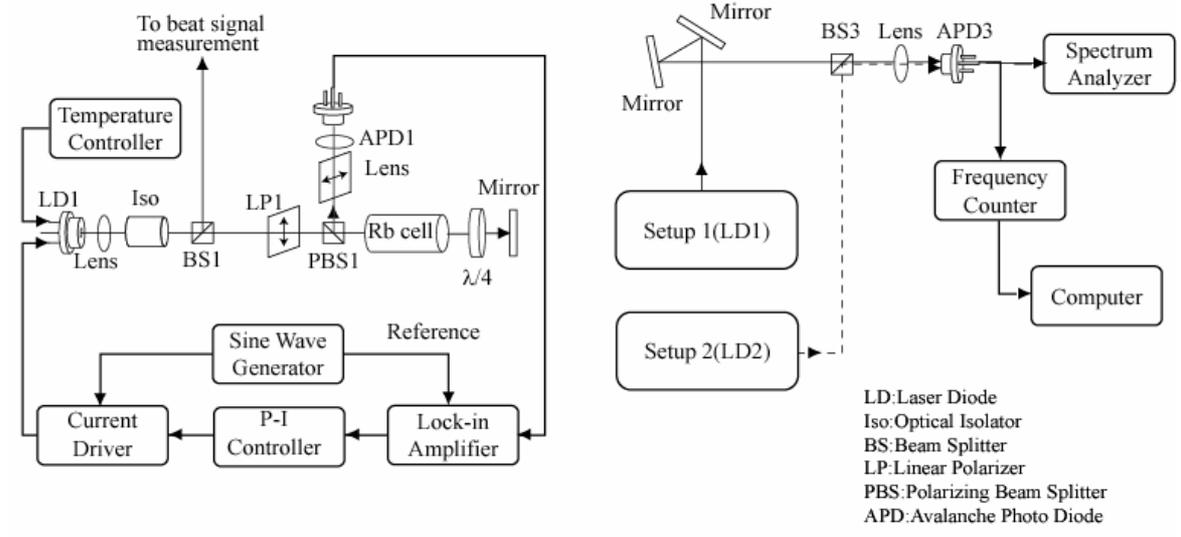
Fig. 8 Signal output of the Faraday effect

4. 実験方法と実験結果

4.1 飽和吸収分光法を用いた安定化

図 9 に今回の実験に用いた実験系を示す。半導体レーザー LD1 は飽和吸収分光の系により安定化され

る。同様に安定化された LD2 からのレーザー光は BS で LD1 からの光と 1 つになり、APD3 で受光され、LD1 と LD2 の周波数の差であるビート信号がスペクトラムアナライザーで観測されると共に、周波数カウンターを通してコンピュータに取り込まれて周波数安定度が評価される。



(a) Experimental setup for frequency stabilization for LD1 (setup1). (b) Experimental setup for beat signal measurement.

図 9 飽和吸収分光の実験系

Fig. 9 Saturated absorption spectroscopy setup.

4.2 ファラデー効果を用いた安定化

図 10 にファラデー効果を用いた光学系を示す。LD1 で発振されたレーザー光をレンズによりコリメートした後、直線偏光板 LP1 を通し直線偏光の光とする。このレーザー光は光の進行方向に直流磁界が印加されている Rb セルを通過し、受光側から見て時計回りに 45° 傾けた直線偏光板を通過し、レンズで集光して APD1 で受光される。

Rb セルには直流磁界の他に交流磁界を印加することで透過光強度信号に微小変調を加えている。この変調されたレーザー光を APD で検出しロックインアンプにより同期検波することで、外部周波数基準からの周波数差を与える誤差信号が得られる。

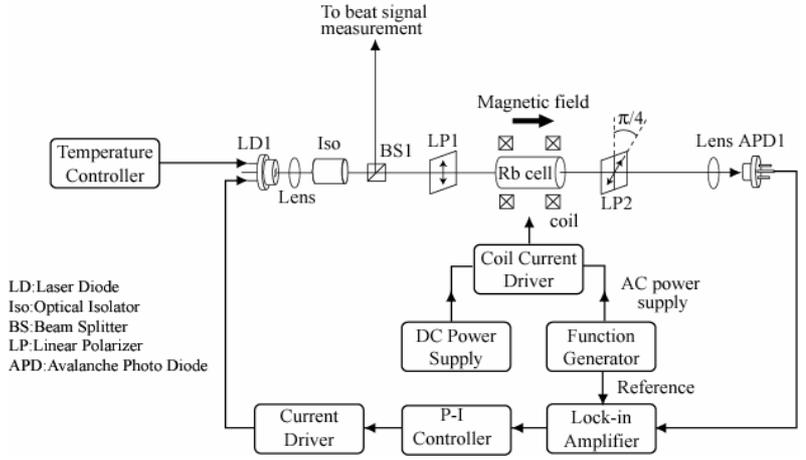


図 10 ファラデー効果を用いた安定化の実験系

Fig. 10 Experimental setup of frequency stabilization using Faraday effect

4.3 実験結果

図 11 にそれぞれの外部周波数基準による安定化の安定度を示す。飽和吸収分光法とファラデー効果を用いた安定化の比較を中心にまとめている。ファラデー効果を用いた安定化の安定度に比べ Rb の飽和吸収分光法を用いた安定度の方が短期、長期ともに良くなっていることがわかる。

最も良い安定度は、飽和吸収分光法を用いた安定化レーザー間のビート信号で得られ、アラン分散の平方根で 7×10^{-12} 程度の値 (平均化時間約 10 秒) が得られている。この値はほぼ同じ実験系を用いた独立した系のレーザー間の周波数差であるビート信号から求められたものであるから、単独の系の安定度より少し大きな値となっている。

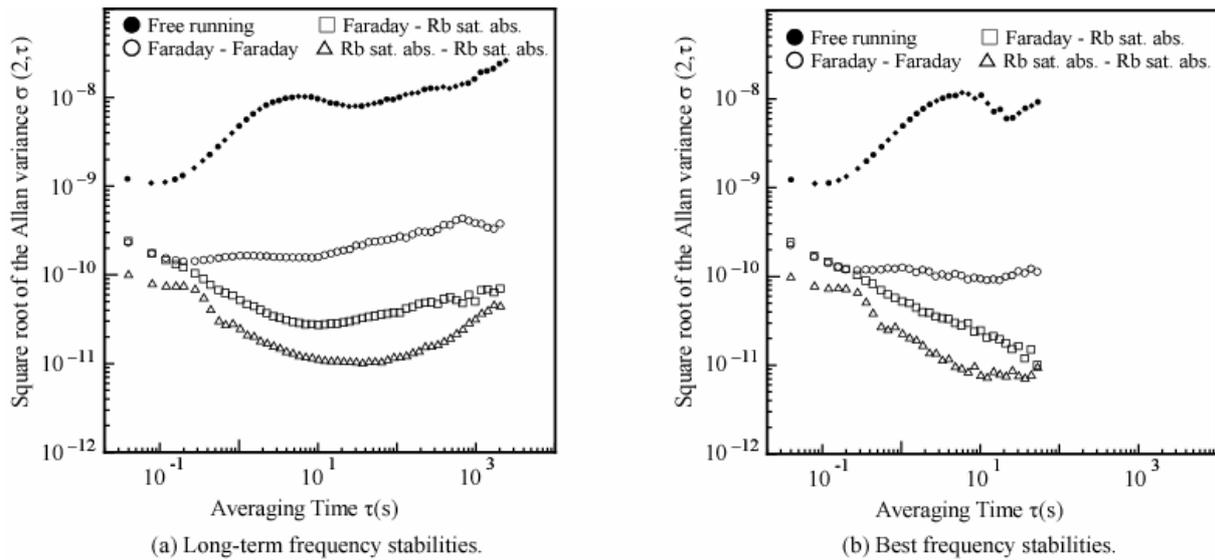


図 11 周波数安定度
Fig. 11 Frequency stability

近年、フェムト秒パルスレーザー光コムシステムが開発され、可視光領域の非常に広い範囲に「絶対基準」と言うべき周波数基準を提供することが可能となった。本研究では、情報通信研究機構に設置されている光コムシステムにより作り出される周波数基準を用いた評価を行っている⁽⁵⁾。異なった実験日の結果で実験データは異なるが、電気的フィードバック制御法による安定化で図 12 に示すように、光コムを用いることで、同様の方法で安定化された 2 台のレーザー間のビート信号を用いた評価より良い安定度が得られることがこれまで確認できている。

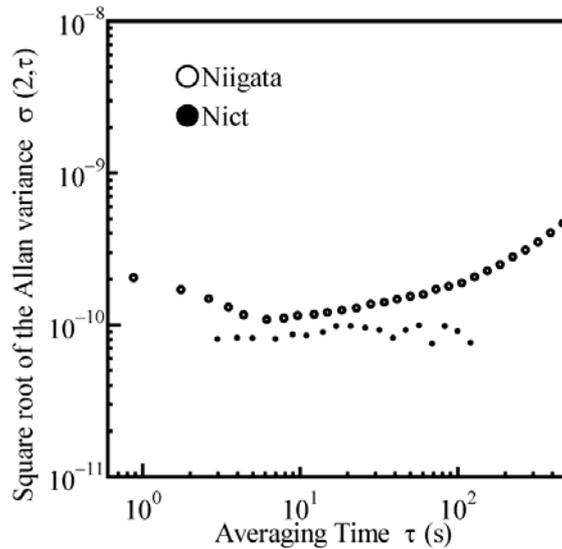


図 12 光コムジェネレータによる周波数安定度
Fig.12 Frequency stability in optical comb generator

6. まとめと今後の課題

これまで電気的フィードバック制御法により半導体レーザーの発振周波数の安定化を行っており、現段階では、 7×10^{-12} 程度の安定度が得られている。安定度の評価は、光の周波数領域では絶対基準を得ることが難しいため、通常は同じ方法で安定化された 2 つの独立したシステム間の周波数差等を検出して行われる。

今後、光コムと飽和吸収分光法を用いた半導体レーザーの安定化の系を同時に 2 つ用いて、光コムで測定される安定度とレーザー同士でのビート信号による安定度を同時に測定し、信頼できる評価を行って行きたい。

更に安定度を向上させるには、光フィードバック系を用いた発振幅の狭窄化が必要である。昨年度報告したように、ダブル光フィードバック系⁽⁶⁾を用いることで線幅を狭窄化した状態で半導体レーザーの発振周波数安定化ができることが確認されているので、今後は、電気的フィードバック制御法にダブル光フィードバック法を用いることで周波数雑音を抑圧し、発振スペクトル幅を狭窄化することで安定度の向上を目指す。

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費の援助により行われている。ここに謝意を表す。

参考文献

- [1] 津田 敏隆 (研究代表者): 「精密衛星測位による地球環境監査技術の開発」実施計画.
- [2] 佐藤 孝: 「半導体レーザーの原子の吸収線を用いた波長安定化」レーザー研究, Vol.18, No.10, pp.782-788, 1990.
- [3] 中野博之、渡部直紀、佐藤孝、大河正志、丸山武男、榛葉實: 「ゼーマン効果を用いた半導体レーザーの周波数安定化における制御信号の改善」電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-CI, No.2, pp.55-63, 1997.
- [4] 杉山和彦: 「モード同期レーザーによる光周波数計測」光学, Vol.31, No.12, pp.870-876, 2002.
- [5] 佐藤 孝、前原進也、二文字俊哉、大河 正志、伊東 宏之、吉野 泰造、國森 裕生、細川 瑞彦、長野 重夫、川村 静児: 「衛星間測位用超高安定レーザー光源の開発」平成 15 年度東京大学地震研究所研究集会「精密衛星測位: 衛星重力観測による地球のダイナミクス研究へのブレーク・スルー」プロシーディングス - 3 .
- [6] F. Rogister, D. W. Sukow, A. Gavrielides, P. Megret, O. Deparis, and M. Blondel: “Experimental demonstration of suppression of low-frequency fluctuations and stabilization of an external-cavity laser diode”, OPTICS LETTERS, Vol.25, No.11, pp.808-810, 1 June, 2000.