

J4 地球環境の観測を目指した衛星間測位のための光源開発

— 半導体レーザーの発振周波数安定化 —

前原 進也 佐藤 孝 大河 正志 吉野 泰造 国森 裕生

細川 瑞彦 伊東 宏之 長野 重夫 川村 静児

新潟大学大学院自然科学研究科 新潟大学工学部 通信総合研究所 国立天文台

S. Maehara T. Sato M. Ohkawa T. Yoshino H. Kunimori

M. Hosokawa H. Ito S. Nagano S. Kawamura

Graduate School of Science and Technology, Niigata Univ. Faculty of Engineering, Niigata Univ.

Communications Research Laboratory National Astronomical Observatory

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地球環境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、地球温暖化を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。

現在、NASA（米国）とDLR（ドイツ）の共同計画（GRACE）によりマイクロ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、レーザー光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。そこで本研究室で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、注入電流と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、本研究室で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ー・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。

2. 地上シミュレータ

地球重力場計測における地上シミュレータ実験は、2台の衛星が地上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検出す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0.1m/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 Δf とすると、

$$\Delta f = \frac{2\Delta v}{c} f_0 \quad (1)$$

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

3. 地上シミュレータ実験系

図1にシミュレータ実験系を示す。光源としてはNPRO（Non-Planar Ring Oscillator）と呼ばれる半導体レーザー励起モノリシック型Nd:YAGレーザー（波長：1.06 μ m）を使用している。NPROから出たレーザー光はアイソレータ（FI）を通過し、ビームスプリッター（BS3）で2つに分けられ、偏向ビームスプリッター（PBS1,PBS2）を通過し、音響光学偏向器（AOD1,2）で周波数変調される。AODでは周波数変調と同時に透過光の偏向角も変化するため球面鏡を用いて偏向角の変化を打ち消す。AOD2には衛星間で発生するドップラーシフトを想定した信号を加える。干渉光はSi-PINフォトダイオード（PD）で検出され、得られた信号はAOD1にフィードバックされる。このフィードバック信号によりミラー変位量が得られる。

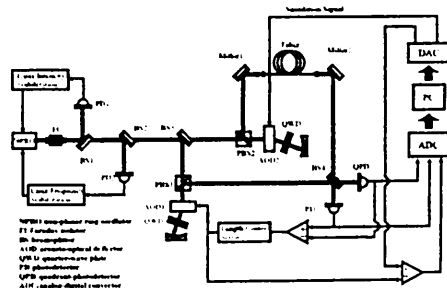


図1. シミュレータ実験系

3. 半導体レーザーの周波数安定度

衛星へ搭載する光源としてレーザー光を適用する際には発振周波数が安定している必要があり、その光源の1つとして半導体レーザーが考えられている。目標とする周波数安定度において、光の干渉を用いて距離を測定した場合に得られる速度誤差を Δv とすると、

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

で与えられる。ただし、 L は衛星間における往復距離で、 $L = 1 \times 10^5$ である。(2)式より、衛星間の相対速度の感度として10nm/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 $T = 1$ のとき、

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

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

4. 周波数安定化の原理

周波数安定化の際に必要な周波数基準として、原子の吸収線がよく用いられる。本研究では、Rb原子の吸収線の1つである D_2 線(波長:780nm)を基準としている。Rb原子には、質量数85および87の2種類の同位体があり、その存在比は、7.2:2.8で、これをガラス容器(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、バイアス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本の吸収線となっている。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。ここで、吸収の最も大きい点を安定化点 P とする。図2(c)は、図2(b)における点 P の部分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点 P から Δv 離れた周波数で発振しているとすると、 ΔV 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、バイアス電流にフィードバックすることで、点 P から離れたレーザーの周波数を点 P に戻すことで安定化を行う。ここで、安定化点における接線の傾きを G_d とすると、 G_d は

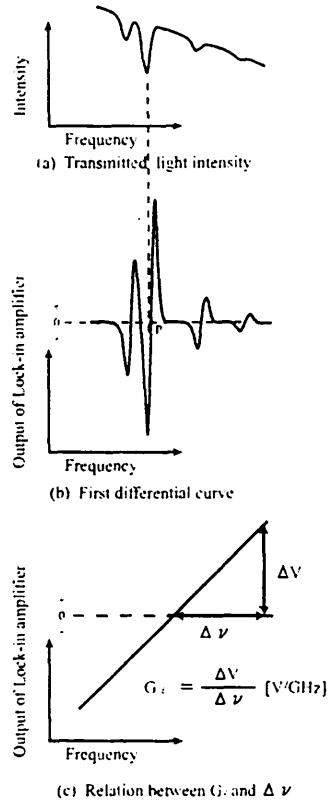


図2. 周波数安定化の原理

$$G_d = \frac{\Delta V}{\Delta \nu} \quad [V / GHz] \quad (4)$$

で与えられ、周波数弁別利得と呼ぶ。この G_d が大きければ周波数差 Δv が小さくても大きな誤差信号 ΔV を得ることができ、安定度の向上が期待できる。

5. 今後の課題

これまで電氣的負帰還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、 10^{-10} 程度の安定度が得られている。今後は、光帰還法を用いることで周波数雑音が抑圧され発振スペクトル幅が狭窄化されることが安定度向上に寄与するため、2つの制御法を組み合わせ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、通信総合研究所の施設を使用させて頂いている。ここに謝意を表する。

参考文献

津田 敏隆(研究代表者):「精密衛星測位による地球環境監視技術の開発」実施計画