

CO₂ DIALのためのレーザ波長ロックシステムの開発 Development of laser wavelength locking system for the CO₂ DIAL

茂木 俊, 阿保 真, 長澤親生, 柴田泰邦
Suguru Motegi, Makoto Abo, Chikao Nagasawa and Yasukuni Shibata
首都大学東京システムデザイン研究科
Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

Abstract

We have developed a direct detection 1.6 μm differential absorption lidar (DIAL) system to perform high-accuracy range-resolved measurements of vertical CO₂ concentration profiles in the atmosphere. The measurement accuracy of the CO₂ DIAL depends on tuning accuracy and stability of laser wavelength to the absorption line. We have developed laser wavelength locking system for the CO₂ DIAL using frequency modulation method for off-line and the Pound-Drever-Hall method for on-line. We also developed the offset lock system for the measurement of temperature profiles with the CO₂ concentration profiles simultaneously for improvement of the CO₂ density measurement accuracy.

1. はじめに

地球温暖化問題の主な要因として温室効果ガスの影響が指摘されている。特にCO₂の増加は人為的要因が強く、CO₂の吸収・排出源を把握することは温暖化対策を考える上で重要である。しかし、現状では限られた地上観測データとわずかな鉛直分布データしか得られないため、濃度の鉛直分布を高精度に測定することが重要になっている¹。

CO₂の濃度は、その変動幅が少ないため1%以下の高精度な測定が要求される。そこで本研究では、高精度のCO₂計測を実現するために開発した3波長CO₂ DIALにおけるレーザ波長ロックシステムについて報告する。

2. 3波長CO₂ DIAL

高精度のCO₂ DIAL実現には、CO₂吸収線の温度依存性が大きな誤差要因となるため、気温情報が必要となる。そのためにFig.1に示す従来のON,OFFの2波長に気圧依存性が少ない第3の波長(λ_T)を加えた3波長測定を行い気温と密度の同時観測を行う²。3波長DIALではシーダ光の波長を光スイッチで切り替えてメインのOPG (Optical Parametric Generator) にインジェクションシーディングを行うことにより1パルス毎の高速波長切り替えを実現している。

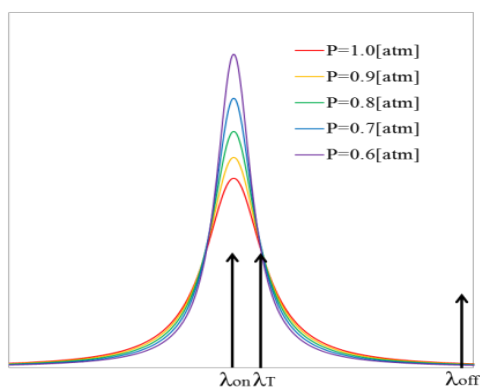


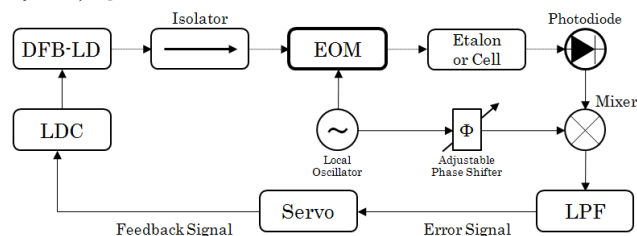
Fig.1 Three Selected wavelengths (λ_{on} , λ_T , λ_{off}) for density and temperature measurements.

シーダ光源は市販のDFB型レーザダイオードを用い、同調素子としてON波長は絶対波長が重要なためCO₂吸収セルを、OFF波長はエタロン素子を用いる。また気温測定のための波長はON波長を基準にしたオフセットロックを利用する。

3. 波長制御法

OFF波長は従来、LDの温度制御のみを行っていたが、安定度を得るためにエタロンと構成が容易な周波数変調法(FM法)を用いて波長制御を行う³。周波数変調されたレーザ光をエタロン素子に通しフォトダイオードで強度信号に変換する。この強度信号を変調信号で同期検波することでエラー信号が生成される。このエラー信号をフィードバックすることによりレーザの波長を安定化する。

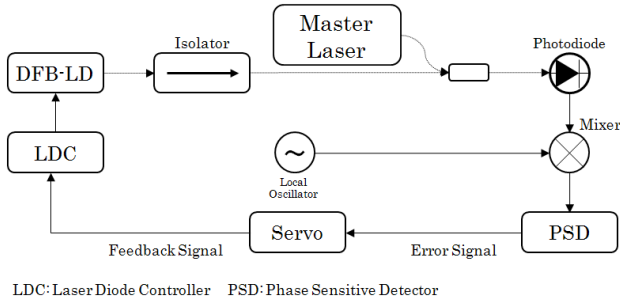
一方ON波長は同調精度の要求が高いため、より精度の高いPound-Drever-Hall法(PDH法)を用いる⁴。すでにシミュレーションにより、FB法の精度2.20MHzに比べ、PDH法では0.53MHzの精度が得られることを示している⁵。Fig.2にPDH法の波長安定化システムのブロック図を示す。レーザ光を電気光学変調器(EOM: Electro-Optic Modulator)により位相変調し、CO₂セルを通しフォトダイオードで強度信号に変換する。これを直交成分でヘテロダイン検波を行うことでエラー信号を生成しレーザの波長を吸収線のピークにロックする。



LDC: Laser Diode Controller EOM: Electro-Optic Modulator LPF: Low-Pass Filter
Fig.2 Block diagram of frequency stabilization system using Pound-Drever-Hall method.

気温測定のための波長は同調精度の要求が高いため吸収線のピークが利用できないため、オフセットロック⁶による波長安定化システムを用いる。Fig.3にオ

フセットロックによる波長安定化システムのブロック図を示す。PDH法により安定化されたマスターレーザとロックしたい波長のレーザ光をミキシングすることで差周波を生成する。その差周波をダウンコンバートし、位相検波器(PSD: Phase Sensitive Detector)を用いてエラー信号を生成することによりレーザの波長を任意のオフセット周波数でロックすることができる。



LDC: Laser Diode Controller PSD: Phase Sensitive Detector
Fig.3 Block diagram of frequency stabilization system using offset locking method.

4. 波長精度の評価実験

波長の精度は、一般に周波数変動で表される。MHz以下の周波数安定化精度を評価するには絶対波長の基準が必要であるが、これを直接測定する測定器はない。そこでPDH法の波長ロックシステムを構築しその周波数変動を、エラー信号を用いた計測と差周波を用いた計測について比較した。

エラー信号を基にした周波数変動の測定は、事前にDFBレーザの電流の変化による周波数の変化量を測定した。エラー信号の変動を計測し、これを周波数変動に換算した。また差周波を用いた測定は2つのDFBレーザの光ミキシングを行いそのビート信号のピーク周波数変動をスペクトラムアナライザで計測した。

今回実験に用いたパラメータをTable 1に、Fig.4とFig.5にそれぞれエラー信号を基に計測した周波数変動と差周波を基に計測した周波数変動を波長ロックシステム動作させた場合とフリーランの状態について示す。波長ロック時のエラー信号から求めた周波数の最大変動幅は21.5MHzであったが、差周波から測定した値は18.6MHz、であった。差周波から得たデータは基準レーザの揺らぎを含んでいるためその揺らぎが同等であるとすると実際の周波数揺らぎは13MHzとなり、エラー信号で計測した値より小さくなる。このためエラー信号から得られた周波数変動幅は実際の変動幅と異なると言える。この差は電気ノイズに起因するものと考えられる。

Table 1. Locking system parameters of the frequency fluctuation measurement

Laser frequency	1.57201797[μm]
Modulation frequency	93.0[MHz]
Phase of the modulation frequency	90[degree]
Frequency variation of DFB-LD due to current	6.0[pm/mA]
Finess of Etalon	10
Free Spectral Range of Etalon	10.13[GHz]

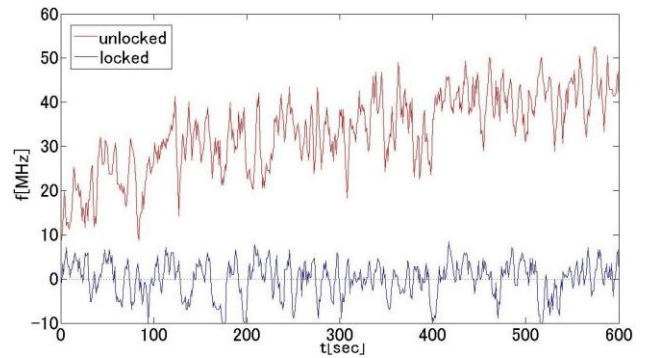


Fig.4 Frequency fluctuations converted from error signal.

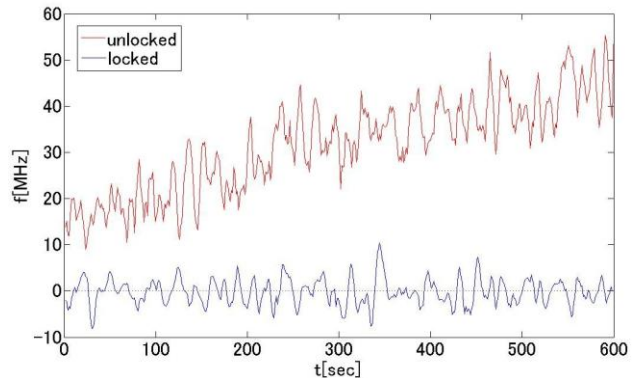


Fig.5 Frequency fluctuation measured from beat frequency of two lasers.

5. まとめ

今回の実験で、差周波を用いたほうがより正確に周波数変動を計測できることがわかった。またエラー信号には多くのノイズが乗っていることもわかり、このノイズが波長制御の精度を劣化させていると考えられる。今後はエラー信号のノイズを低減させ精度の向上を行う。

謝辞

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」により行われた。

参考文献

- [1] D. Sakaizawa, et al. "Development of at a 1.6 μm differential absorption lidar with a quasi phase matching OPO and photon-counting detector for the vertical CO2 profile", Applied Optics, 48(4), 748, 2009.
- [2] Chikao Nagasawa et al. "A DIRECT DETECTION 1.6 μm DIAL WITH THREE WAVELENGTHS FOR HIGH ACCURATE MEASUREMENTS OF VERTICAL CO2 PROFILES IN THE TROPOSPHERE", 26th International Laser Radar Conference, 2012.
- [3] NEW FOCUS, "Application Note 7 FM Spectroscopy With Tunable Diode Lasers", "Application Note 15 Introduction to Laser Frequency Stabilization", 2001.
- [4] Eric D. Black. "An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization", American Association of Physics Teachers. 2000.
- [5] 茂木俊他, 第29回レーザセンシングシンポジウム, 2011
- [6] Kenji Numata, et al. "Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide", APPLIED OPTICS, Vol.50, No.7, 2011.