

CO₂ DIALのための高精度レーザ波長制御 Precise laser wavelength control 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 are developing precise laser wavelength control system for the CO₂ DIAL because measurement accuracy of the CO₂ DIAL depends on tuning accuracy of laser wavelength to the absorption line. In this paper, we compared with two wavelength control methods which is frequency modulation method and Pound-Drever-Hall method for a CO₂ cell and an etalon. We obtain optimum condition of modulation for minimum tuning accuracy.

1. はじめに

近年, 地球温暖化が問題となり, その主な原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, 地球温暖化に最も寄与しているとされているため, 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高精度な測定が要求される. そのため本研究では, 高精度のCO₂ DIALを実現するため最も重要な, 送信レーザの波長を決定するシーダレーザの波長制御について検討した. 周波数変調を用いた方式と Pound-Drever-Hall法の2つの周波数安定化制御方式についてシミュレーションにより精度を比較し, 最適な変調周波数と方式を求めた. なお同調素子としては ON 波長は特に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.

2. 周波数変調を用いた周波数安定化制御²

Fig.1に周波数変調を用いた(FM法)周波数安定化システムのブロック図を示す. 周波数変調されたレーザ光を吸収セルまたはエタロン素子を通し, 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周波数を安定化する.

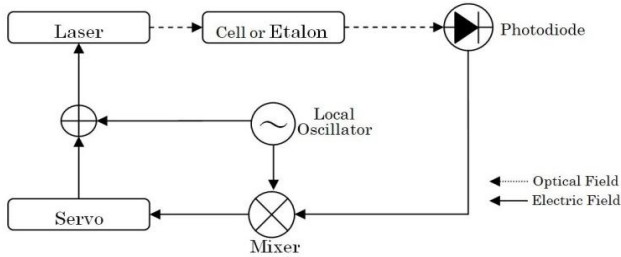


Fig.1 Block diagram of frequency stabilization system using frequency modulation method.

レーザ光の角周波数を ω_c , レーザ光の角周波数変動を $\Delta\omega_c$, 変調角周波数を ω_m , 変調角周波数の最大角周波数偏移を $\Delta\omega_m$, 透過率を $T(\omega)$, 透過率の平均値を \bar{T} とすると, エラー信号 ε_{FM} は次式で表せる.

$$\varepsilon_{FM} = \int_0^{2\pi} \omega_m (T(\omega(t)) - \bar{T}) \cos(\omega_m t) dt \quad (1)$$

$$\omega(t) = \omega_c + \Delta\omega_c + \Delta\omega_m \sin \omega_m t$$

3. Pound-Drever-Hall法による周波数安定化制御³

Fig.2にPound-Drever-Hall法(PDH法)の周波数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, 位相変調し側波帯を生成する. 吸収セルまたはエタロン素子を通した光をフォトダイオードで強度信号に変換し, 変調信号の位相を変えることにより直交成分と同相成分のヘテロダイン検波を行い, エラー信号を生成する. 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周波数を安定化する.

レーザ光の角周波数を ω , 変調角周波数を Ω , 吸収セルまたはエタロン素子の複素透過率の周波数特性を $F(\omega)$ とすると, エラー信号は次式で表せる. ここで(2)式は直交成分, (3)式は同相成分である.

$$\varepsilon_Q = \text{Re}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_I = \text{Im}[F(\omega)F^*(\omega + \Omega) - F^*(\omega)F(\omega - \Omega)] \quad (3)$$

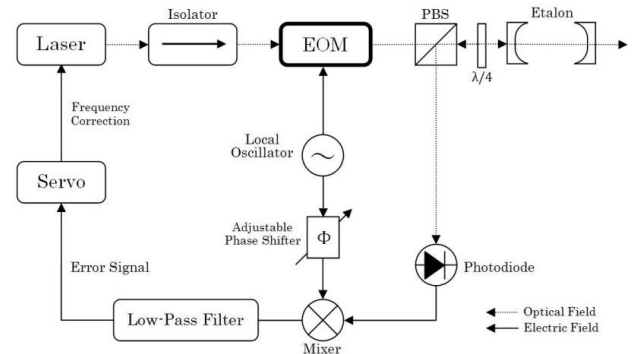


Fig.2 Block diagram of frequency stabilization system using Pound-Drever-Hall method.

4. CO₂吸収セルとエタロン素子

CO₂吸収セルの吸収特性 $T(\omega)$ (透過率)は, Table 1のパラメータを用いて次式で表せる.

$$T(\omega) = \exp(-\sigma(\omega)NL) \quad (4)$$

CO₂吸収セルの複素周波数特性 $F(\omega)$ は,

$$F(\omega) = T(\omega) \quad (5)$$

となる.

また, エタロン素子の透過率特性 $T(\omega)$ は, Table 2のパラメータを用いて次式で表せる.

$$T(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\omega}{\omega_{fsr}} \cos\theta\right)} \quad (6)$$

エタロン素子の複素周波数特性 $F(\omega)$ は,

$$F(\omega) = \frac{r \left[\exp\left(j \frac{\omega}{\omega_{fsr}}\right) - 1 \right]}{1 - r^2 \exp\left(j \frac{\omega}{\omega_{fsr}}\right)} \quad (7)$$

で表せる.

Table 1 Parameters of a CO₂ absorption cell

Sign	Explanation	Value
$\sigma(\omega)$	Absorption cross section	
L	Length of cell	80[cm]
N	Number density of CO ₂	1.415[number/ℓ]

Table 2 Parameters of an etalon

Sign	Explanation	Value
F	Finesse	10
ω_{fsr}	Free Spectral Range	10[GHz]
θ	Angle of incidence	0[rad]
r	Reflectivity	0.731335

5. シミュレーション

Table 1,2のパラメータの値と(5),(7)式を用いて, 2つの制御方式をCO₂吸収セル, エタロン素子それぞれに適用して, エラー信号のシミュレーションを行い, 変調周波数を変化させたときの周波数同調精度(Δf)を求めた. なお吸収線は実際のCO₂ DIALに用いる中心波長1.57201797 μ mのラインを用いた.

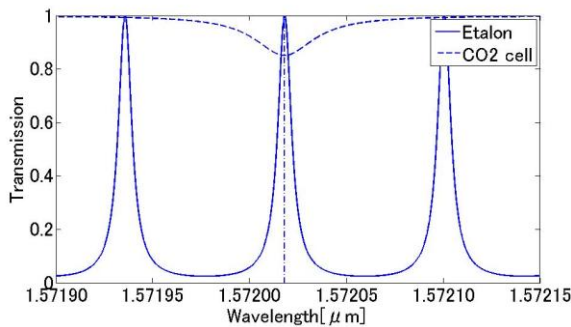


Fig.3 Transmission characteristics of CO₂ cell and etalon.

Fig.3にCO₂吸収セルとエタロン素子の透過率特性を, Fig.4に変調周波数に対する各素子, 各方式における, エラー信号にノイズが0.1%乗った時の Δf のシ

ミュレーション結果を示す. またTable 3にFig.4より Δf が最小となる最適変調周波数と Δf を示す. OFF波長に用いるエタロン素子はどちらの方式でも十分同調精度が得られることがわかる. またON波長に用いるCO₂吸収セルでは, FM法に比べPDH法のほうが3倍以上同調精度が良くなることがわかった.

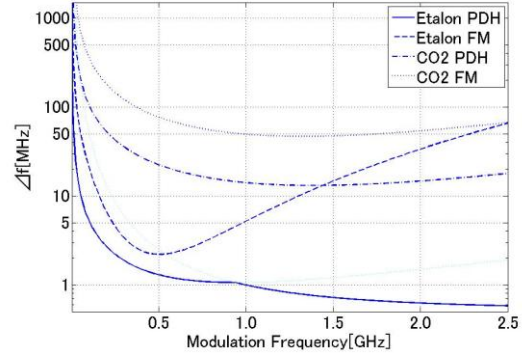


Fig.4 Frequency turning accuracy dependence of modulation frequency for each methods and elements.

Table 3 Optimum modulation frequency and minimum Δf

	Etalon		CO ₂ cell	
	PDH	FM	PDH	FM
Modulation Frequency [GHz]	5.00	0.50	1.39	1.33
Minimum Δf [MHz]	0.53	2.20	13.1	46.7

6. まとめ

FM法とPDH法の2つの波長制御方式を比較した結果, エタロン, CO₂吸収セル共にPDH法を用いたほうが同調精度が良いことがわかった. ON波長に用いるCO₂吸収セルでは, PDH法を用いると13MHzの高い同調精度が得られるが, さらに精度を上げるためには, サチュレーション分光法を用いるなどして吸収特性を狭くする必要がある².

またCO₂の測定精度を上げるためには正確な気温の測定も重要になる. 気温を固定し気圧を変化させたとき, 吸収線のウイングに気圧に対して鈍感な波長が存在する. この3つ目の波長を用いることにより気温測定が可能になる⁴. そのためにはオフセットロックが必要となる. 今後は実際の実験により同調精度を検証していく.

参考文献

- [1] D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, T. Sakai, Development of a 1.6 μ m 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] NEW FOCUS, "Application Note 7 FM Spectroscopy With Tunable Diode Lasers", "Application Note 15 Introduction to Laser Frequency Stabilization", 2001.
- [3] Eric D. Black, "An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization", American Association of Physics Teachers, 2000.
- [4] 堂面拓郎他, 第28回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, D-3, p36-39