

一方向結合された3つの半導体レーザーにおける遅延カオス同期実験 Experiment on lag synchronization of chaos in unidirectionally coupled three semiconductor lasers

埼玉大¹, 東大情理²

○高林 瑞穂¹, 巳鼻 孝朋¹, 菅野 円隆¹, 成瀬 誠², 内田 淳史¹

Saitama Univ.¹, Univ. Tokyo²

○Mizuho Takabayashi¹, Takatomo Mihana¹,

Kazutaka Kanno¹, Makoto Naruse², and Atsushi Uchida¹

E-mails: m.takabayashi.213@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

はじめに: 同期現象は自然界において多くの場面で観測することができる。特に、複数台の半導体レーザーで発生するカオス振動が同期する現象は大きな関心を集めている。このカオス同期現象を、情報セキュリティや人工知能の意思決定に応用する研究が行われている[1]。

また、相互に結合された2つの半導体レーザーの一方が遅延して同期する遅延カオス同期現象が報告されている[2]。ここで、先行振動するリーダーと遅れて同期するラグガードが自発的に入れ替わる自発的スイッチングという現象も確認されている[3]。このリーダーとなる確率は、二つのレーザーの周波数差や結合強度差により変化することが報告されている[4]。さらに、一方向に結合された2つの半導体レーザーにおける遅延カオス同期現象についても報告されている[5]。しかしながら、3つ以上の結合レーザー（レーザーネットワーク）におけるリーダー・ラグガード関係に関する調査は未だ行われていない。

そこで本研究では、一方向に結合された3つの半導体レーザーにおいて、レーザー間の周波数差を変化させることで、時間波形の相関変化やリーダー・ラグガード関係の調査を実験的に行うことを目的とする。

方法: 一方向に結合された3つの半導体レーザーを用いた遅延カオス同期の実験装置図をFig. 1に示す。レーザーの温度を変化させることで、光周波数差を変化させる。各周波数差における各レーザーの時間波形を取得し、実験後に短時間相互相関値 C_1, C_2, C_3 を以下のように計算する。

$$C_{1,2,3} = \frac{\langle [I_{1,2,3}(t) - \bar{I}_{1,2,3}][I_{3,1,2}(t - \tau_{3,1,2}) - \bar{I}_{3,1,2}] \rangle}{\sigma_{1,2,3}\sigma_{3,1,2}}$$

ここで、レーザー3の時間波形を遅延させた場合のレーザー3-1間の相関値を C_1 、レーザー2の時間波形を遅延させた場合のレーザー1-2間の相関値を C_2 、レーザー3の時間波形を遅延させた場合のレーザー

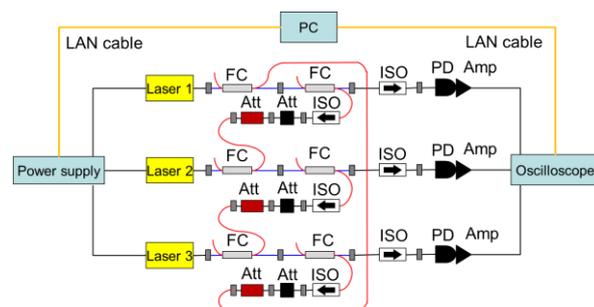


Fig. 1 Experimental setup for leader-laggard relationship in unidirectionally coupled three semiconductor lasers. FC, fiber coupler; ISO, isolator; PD, photodetector; Att, attenuator; Amp, amplifier.

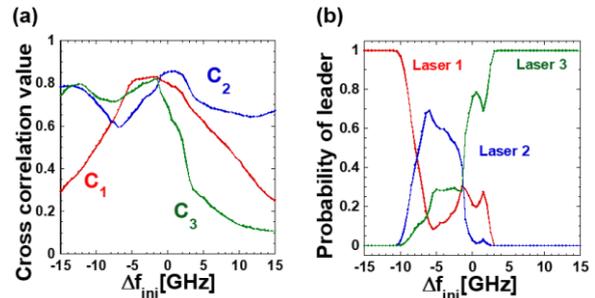


Fig. 2 (a) Average cross-correlation values as a function of the initial optical frequency detuning Δf_{ini} ; (b) Probability of being the leader laser as a function of the initial optical frequency detuning Δf_{ini} .

2-3間の相関値を C_3 と定義する。これらの大小関係からリーダーであるレーザーを判定する。リーダーの定義は、相関値が最小である相関値の添え字のレーザーである。例えば、相関値 C_1 が最小の場合、レーザー3から1への同期が最も弱いと考えられるため、レーザー1がリーダーであると解釈できる。本研究ではレーザー3の周波数を変化させることで、レーザー1, 2に対して初期光周波数差 Δf_{ini} を設定した。

$$\Delta f_{ini} = f_{ini_3} - f_{ini_{1,2}}$$

結果: 本実験にて短時間相互相関値 C_1, C_2, C_3 から算出した、初期光周波数差 Δf_{ini} に対する平均相関値をFig. 2(a)に示す。レーザー3の周波数が高い $\Delta f_{ini} > 0$ の範囲では、 C_3 が最小であるため、レーザー3 → 1 → 2の順に遅延同期していることが分かる。反対に、レーザー3の周波数が低い $\Delta f_{ini} < 0$ の範囲では、 C_1 が最小であるため、レーザー1 → 2 → 3の順に遅延同期していることが分かる。また、各レーザーがリーダーとなる確率をFig. 2(b)に示す。 $\Delta f_{ini} > 0$ の範囲では、レーザー3がリーダーとなる確率が最大であり、一方で $\Delta f_{ini} < 0$ の範囲では、レーザー1がリーダーとなる確率が最大であることが分かる。

まとめ: 本研究では、一方向に結合された3つの半導体レーザーの遅延カオス同期を観測した。レーザー間の周波数差を変化させることで、レーザー間の相関の変化やリーダー・ラグガード関係を実験的に調査した。

参考文献

- [1] M. Naruse, et al., Sci. Rep., **7**, 8772 (2017).
- [2] T. Heil, et al., Phys. Rev. E, **86**, 795 (2001).
- [3] K. Kanno, et al., Phys. Rev. E, **95**, 052212 (2017).
- [4] Y. Mitsui, et al., Proc. NOLTA 2018, **1**, 219 (2018).
- [5] M. Nixon, et al., Phys. Rev. Lett., **108**, 214101(2012).