

半導体レーザーにおける共通カオス信号入力同期実験

Experiment on common-chaotic-signal induced synchronization in semiconductor lasers

内田 淳史^{*}、大和田 功^{**}、奥村 悠^{*}、吉森 茂^{**}、吉村 和之^{***}、
 ディビス ピーター^{***}
 Atsushi Uchida^{*}, Isao Oowada^{**}, Haruka Okumura^{*}, Shigeru Yoshimori^{**},
 Kazuyuki Yoshimura^{***}, Peter Davis^{***}

We experimentally observe synchronization of two semiconductor lasers commonly driven by a chaotic semiconductor laser subject to optical feedback. Under condition that the relaxation oscillation frequency is matched between the two response lasers, but mismatched between the drive and the two response lasers, we show that it is possible to observe strongly correlated synchronization between the two response lasers even when the correlation between the drive and response lasers is low. We also introduce separate optical feedback to the two response lasers. The maximum correlation between the two response lasers is obtained when the phase of the feedback light is matched between the two response lasers, while the minimum correlation is observed when the difference in the optical phase is π .

Keywords: Chaos, Laser, Synchronization, Security, Information technology

1.はじめに

近年、急速な通信システムの発達により多くの情報を伝搬する機会が増えており、ユーザ間の情報を守る

^{*} 埼玉大学 大学院理工学研究科 数理電子情報部門
 Department of Information and Computer Sciences, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570, Japan

^{**} 拓殖大学 工学部電子システム工学科
 Department of Electronics and Computer Systems, Takushoku University, 815-1 Tatemachi, Hachioji, Tokyo, 193-0985, Japan

^{***} 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所
 NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation, 2-4 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0237, Japan

高い情報セキュリティは必要不可欠となりつつある。従来の情報セキュリティ技術は計算量複雑性に基づく暗号方式が主流であるが、近年新たなセキュリティ方式の1つとして、情報理論的に安全なセキュリティ方式が提案されている¹⁾。これは盗聴者を含むすべてのユーザが関連のある乱数列を共有する状況から安全な暗号鍵を生成する方式である。またこの枠組みにおいて、最適な相関乱数の性質がこれまでに明らかにされている²⁾。

情報理論的に安全なセキュリティ方式の要素技術として、共通カオス信号入力同期が重要となる³⁾。共通カオス信号入力同期とは、駆動用レーザー(Drive)からのカオス信号が2つの同期用レーザー(Response)に一方方向に注入される場合において、Response間のカオス波形は高い相関を示すが Drive と Response 間のカオス波形は低い相関を示す現象のことである。さらに戻り光により各々の Response 出力が独自にカオス的変動している場合において、戻り光の位相を変化させること

(原稿受付日：平成21年5月29日)

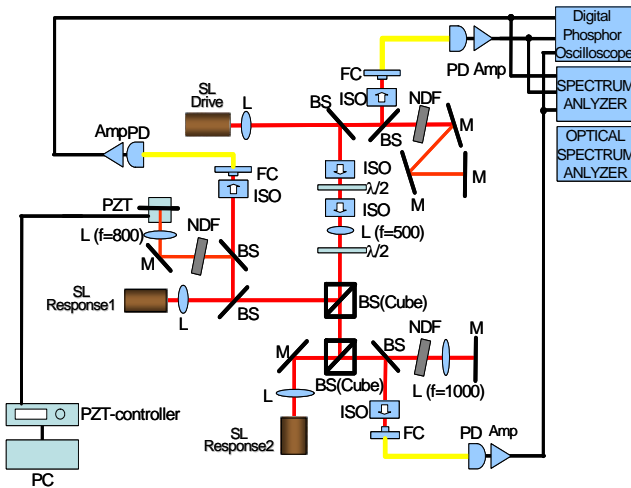


Fig. 1 Experimental setup for synchronization induced by a common chaotic signal in semiconductor lasers with optical feedback.

で 2 つの Response 間の時間波形の相関変化を観測することが重要となる。

そこで本研究では半導体レーザーにおける共通カオス信号入力同期を実験的に達成することを目的とする。また同期用レーザーに戻り光を付加し、戻り光の位相を変化させた場合の相関の変化を観測する。

2. オープンループでのカオス同期

2.1 実験装置図

共通カオス信号入力同期の実験装置図を Fig. 1 に示す。本研究では 3 つの分布帰還型(DFB)半導体レーザー(波長 1547 nm)を使用した³⁾。駆動用に使われている 1 つのレーザーを Drive と呼び、他の 2 つの同期用レーザーをそれぞれ Response1、Response2 と呼ぶことにする。Drive に反射鏡(M)を用い、戻り光を付加することでカオスを発生させた。Drive と反射鏡との距離は 0.60m に設定にした。また、戻り光量は可変減光フィルタ(NDF)を用いることで調節した。Drive からの光はビームスプリッタ(BS)によって分割され、一方は Response に伝送される。このとき 2 つの光アイソレータ(ISO)と 2 つの $\lambda/2$ 板を用いることで一方向結合を達成させている。伝送された光はキューブビームスプリッタ(BS(Cube))によって、それぞれ Response1 および 2 に注入される。ここでレーザーの温度を変化させて、

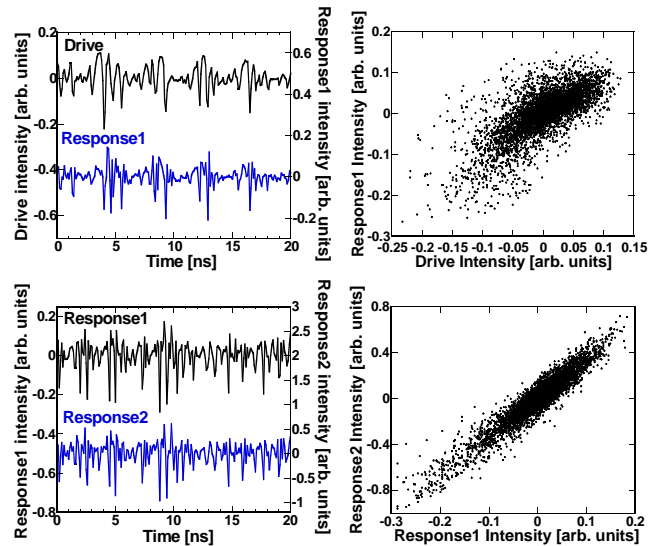


Fig. 2 Experimental result of temporal waveforms and corresponding correlation plots for (a), (b) Drive and Response 1, (c), (d) Response 1 and Response 2.

全てのレーザーの波長を一致させる(インジェクションロッキング⁴⁾)。さらに Response1 および 2 の光出力はそれぞれの反射鏡からの戻り光を有し、自分自身でカオスを発生させる。このときピエゾステージ(PZT)を Response1 の反射鏡の下に取り付けることで nm オーダでの距離の微小変化を可能にしている。各々のレーザー出力はビームスプリッタとファイバコリメータ(FC)を通して検出を行った。ファイバコリメータに入ったレーザー光はファイバ内を伝搬し光検出器(PD)により電気信号に変換され、電気信号増幅器(Amp)で増幅される。さらにオシロスコープによりレーザー出力の時間波形が観測される。

2.2 実験結果

はじめに Response 1 および Response 2 の戻り光量を調節することで、戻り光を有さない場合(オープンループと呼ぶ)における共通カオス信号入力同期実験を行った。Drive の緩和発振周波数は 1.5 GHz、Response 1、2 の緩和発振周波数は共に 1.9 GHz に設定した。Drive に戻り光を付加することでカオスを発生させた。このときの Drive の光波長は 1547.376 nm となった。Drive のカオス光を Response 1 および Response 2 に注入することで、インジェクションロッキングを達成

させた。Response1 および 2 の光波長はそれぞれ 1547.326 nm と 1547.328 nm と設定し、Drive 光をそれぞれ注入したところ、Drive-Response 間の波長が一致した(インジェクションロッキングが達成された)。この時の Drive-Response1 間の時間波形と相関図を Fig. 2(a)と Fig. 2(b)に、Response1-2 間の時間波形と相関図を Fig. 2(c)と Fig. 2(d)に示す。Drive と Response1 間の時間波形を見ると形が異なっており、この時の相互相関関数(相関値)は 0.711 となった。一方、Response1-2 間の時間波形は共に同じ振動をしており、相関値は 0.947 を示した。

ここで相互相関関数(相関値)とは同期精度を定量的に示す指標であり、以下の式を用いて計算を行った。

$$C = \frac{\langle (V_1(t) - \overline{V_1(t)}) (V_2(t) - \overline{V_2(t)}) \rangle}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 V_1, V_2 は2つの時間波形、 $\overline{V_1}, \overline{V_2}$ は時間波形の平均値、 σ_1, σ_2 は時間波形の標準偏差と定義する。 C の値が1のとき相関が一番高く、0のとき相関が一番低いことを意味する。

以上の結果より Drive と各々の Response 間の相関値は低く、Response 間の相関値は高くなることから、共通カオス信号入力による同期を実験的に観測した。

3. クローズドループでのカオス同期

3.1 実験結果

次に、各々の Response に戻り光を有した場合(クローズドループと呼ぶ)における共通カオス信号入力同期を行った。また Response の戻り光の位相を変化させることで相関値の変化を観測した。まず Drive、Response1、2 の緩和発振周波数をそれぞれ 2.5 GHz、2.0 GHz、2.0 GHz に設定した。Response1 および 2 に戻り光を付加することでカオスを発生させた。この時 Response1 および 2 への戻り光量は最大に設定している。そして Drive からのカオス光を注入することでインジェクションロッキングを達成させた。ピエゾステージを微小に変化させることで Response1 の外部

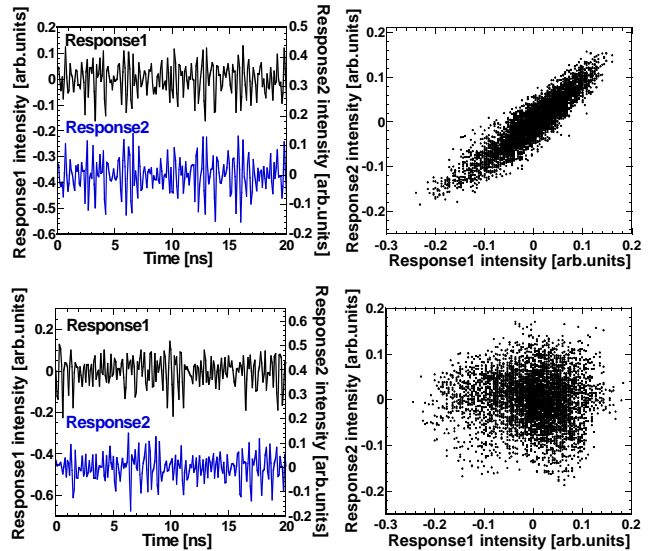


Fig. 3 Experimental result of temporal waveforms and corresponding correlation plots for (a), (b) Response1 and Response2 ($\phi_{R1}=\phi_{R2}$), (c), (d) Response1 and Response2 ($\phi_{R1} \neq \phi_{R2}$).

鏡の距離を 0.1 μm ずつ変化させ、Response1-2 間の戻り光の位相が一致した場合($\phi_{R1}=\phi_{R2}$)と、 π (半波長分) ずれた場合($\phi_{R1} \neq \phi_{R2}$)の時間波形と相関図をオシロスコープにて観測した。

Response1-2 間の戻り光の位相が一致した時の時間波形と相関図をそれぞれ Fig. 3(a)と Fig. 3(b)に示す。また戻り光の位相が π ずれたときの時間波形と相関図をそれぞれ Fig. 3(c)と Fig. 3(d)に示す。戻り光の位相が一致したときの時間波形を見ると、非常に良く似た振動をしていることが分かる。このときの相関値は 0.903 と高い相関を観測した。一方、戻り光の位相が π ずれたときの時間波形を見ると異なる振動をしており、相関値も 0.015 と低い相関を観測した。以上より、2つの Response 間の時間波形の相関値は、戻り光の位相差によって大きく変化することが明らかとなった。

3.2 相関値の周期的変化

Response1 のピエゾステージの距離を 0.1 μm 刻みで変化させることで、戻り光の位相差を連続的に変化させた。その時のレーザ出力の時間波形における相関の変化を調査した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)は Response1-2 間の戻り光の位相差に対する

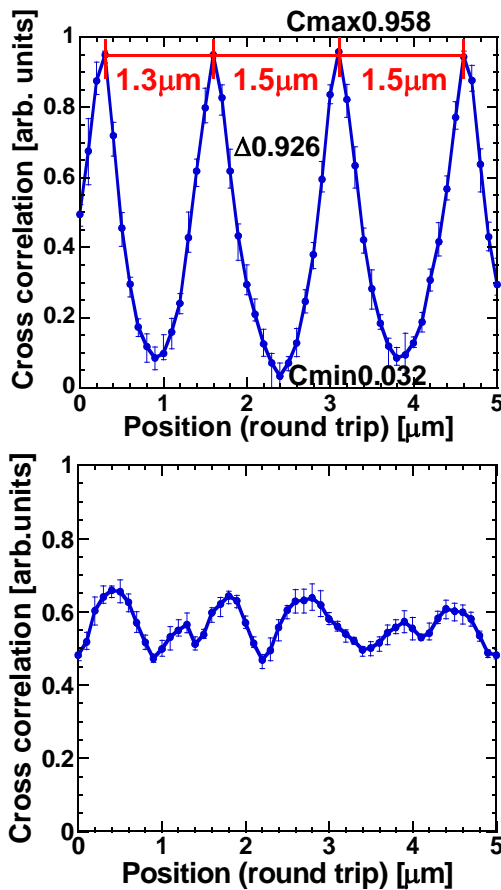


Fig. 4 Cross correlation for (a) Response 1 and 2, (b) Drive and Response 1 as a function of external cavity length.

Response 1-2 間の時間波形の相関値の変化である。戻り光の位相が一致したとき ($\phi_{R1} = \phi_{R2}$) の相関値は 0.958 と高い値を示し、戻り光の位相が一致していないとき ($\phi_{R1} \neq \phi_{R2}$) には 0.032 と低い値を示した。2 つの戻り光が同位相に近づくとつれて相関値は上昇し、反対に逆位相に近づくとつれて相関値は減少しており、相関値の周期的な変化を観測した。このときの相関値のピーク間隔は半導体レーザの発振波長である $1.55 \mu\text{m}$ とほぼ一致していることが明らかとなった。一方で、Fig. 4(b)には Drive と Response 1 間の戻り光の位相差に対する Drive-Response 1 間の時間波形の相関値を示す。Drive と Response 1 間では戻り光の位相差に関わらず相関値は 0.6 前後であり、周期的変化は観測されなかった。

4. おわりに

本研究では半導体レーザにおける共通カオス信号入力同期の実験的観測を行った。反射鏡を用いて Drive にカオスを発生させ、この光を Response 1 および 2 に注入することでカオス同期を達成した。このとき Response 1-2 間の相関は高く、Drive-Response 間の相関は低いことが観測された。

次に Response 1 および 2 に外部鏡を設置し、戻り光を付加することでカオスを発生させた。そして、ピエゾステージを用いることで 2 つの Response 間の戻り光の位相差を変化させた。Response 1-2 間では戻り光の位相が一致したときに高い相関を示し、戻り光の位相が π ずれたときには低い相関を示した。一方で Drive-Response 1 間では戻り光の位相によらず相関値は一定であることが分かった。また戻り光の位相差を連続的に変化させたところ、Response 1-2 間では光波長に対応した相関値の周期的変化が観測された。

以上の結果は、共通カオス信号入力同期を情報理論的セキュリティ方式へ適用する際に有益な知見となり得るであろう。

参考文献

- 1) U. M. Maurer, IEEE Trans. Information Theory, vol.39, pp.733-742 (1993).
- 2) J. Muramatsu, K. Yoshimura, K. Arai, and P. Davis, IEEE Trans. Information Theory, vol.52, pp.5140-5151 (2006).
- 3) T. Yamamoto, I. Oowada, H. Yip, A. Uchida, S. Yoshimori, K. Yoshimura, J. Muramatsu, S. Goto, and P. Davis, Optics Express, vol.15, pp.3974-3980 (2007).
- 4) J. Ohtsubo "Semiconductor Lasers -Stability, Instability and Chaos-", Springer-Verlag, Berlin, 2006.