

アラン分散によるレーザーカオスの時間構造の分析

Analysis of time-domain structures of chaotic lasers based on Allan variance.

東大情理¹, 埼玉大² ○(M1) 足助 尚樹¹, Nicolas Chauvet¹, Andre Roehm¹,

菅野円隆², 内田淳史², 堀崎遼一¹, 成瀬 誠¹

Univ. Tokyo¹, Saitama Univ.², °Naoki Asuke¹, Nicolas Chauvet¹, Andre Roehm¹,

Kazutaka Kanno², Atsushi Uchida², Ryoichi Horisaki¹, Makoto Naruse¹

E-mail: asuke-naoki256@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

はじめに

脳は安静状態においても活発に活動を行い、また、脳波の時空間構造は行うタスクに応じて変化することが知られている¹。一方で、既存の機械学習手法では、安静時（無入力時）の自発的活動の活用や、環境やタスクへの自律的適応には様々な困難がある。我々はレーザーカオスを用いた意思決定などの知的システムの研究を進めているが、その発展として、レーザーカオスの時空間構造を環境に適応して変化させるような新たな知能システムのパラダイムを検討している。

そこで本研究では、レーザーカオス時系列をアラン分散³に基づいて分析し、レーザーカオスが有する時間構造の特徴を、新たな観点から捉えることを目的とする。アラン分散とは、以下の式(1), (2)のように、連続する二つの時間幅 τ における信号の平均値の差の分散として定義される。

$$\sigma_s^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (s_k^{(\tau)} - s_{k+1}^{(\tau)})^2 \rangle \quad (1)$$

$$s_k^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} s(t) dt \quad (2)$$

従って、通常の分散と異なり、様々な時間スケールにおいて時系列の動的特性を捉えることができる。Fig. 1 にアラン分散の例を示す。アラン分散は、通常、レーザー発振や原子時計等の安定性の評価に使用されるが、レーザーカオスに対しては、様々な時間スケールにおける時系列の変動特性が表れると期待できる。従来、レーザーカオス時系列の特徴を捉えるには、複雑性の指標であるリヤプノフ指数などが知られているが、アラン分散は新たな指標を与えると期待される。

方法

レーザーカオス時系列を数値的に生成するため、戻り光を有する半導体レーザーのモデル方程式であるLang-Kobayashi 方程式を用いた⁴。Lang-Kobayashi 方程式には多くのパラメーターがあるが、そのうち、注入電流 J 、外部共振器長 L 、外部鏡反射率 r は、実験的な操作可能性が高い。そこで、アラン分散が示すこれらのパラメーターに対する依存性を調査することで、外的な環境変化を含め、将来レーザーカオスを用いたシステムを設計する際の基本指針となる知見を得ることができると考えられる。そこで本研究では、上記のパラメーターに対するアラン分散の依存性を調査した。 L は0.01 m から 1 m, 規格化電流は1.01 から 3, r は0.001 から 0.1 の間で動かした。光の戻り時間 τ_D と外部

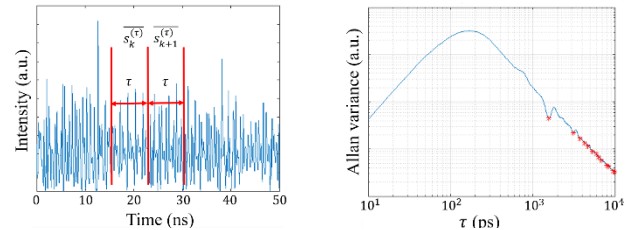


Fig. 1. (a) Example of time series of laser chaos. (b) Allan variance of the time series. Red dots correspond to local minimums.

共振器長 L の間には、光速を c として $\tau_D = 2L/c$ の関係があるため、 τ_D の範囲は、67 ps から 6.7 ns である。

結果

アラン分散は、周波数領域での最初のピークに対して鋭敏に反応し、グラフとしてプロットしたときにこのピークがアラン分散上では極小値として現れる。周波数領域で現れるピークは外部共振周波数と密接に関係しているため L に依存する。一方で、 L を変えて得られるアラン分散では、外部共振周波数の変化による極小値の変化は見られるが、アラン分散全体の概形は殆ど変化しないことが分かった。すなわち、アラン分散は、外部共振器長 L に対してはあまり依存しないと言える。一方、 J や r を変化させたときには、アラン分散の概形は大きく変化した。これに対し、従来時系列解析に用いられるフーリエ変換を行うと、ピークの位置は変わらず、ピークの高さが変化するのみであった。また、アラン分散では、フーリエ変換では捉えることができない長周期の周期性を明確に捉えている。従って、フーリエ変換では得られない時間ダイナミクス情報が、アラン分散により得られていると考えられる。

まとめ

本研究ではアラン分散に基づいてレーザーカオスの時間ダイナミクスを調査した。環境変化の依存性を分析すると同時に、アラン分散によって初めて明らかになるレーザーカオスのいくつかの側面を考察した。

謝辞

本研究の一部は JST CREST(JPMJCR17N2), JSPS 科研費 (JP20H00233) の支援を受けた。

参考文献

1. B. Sancristóbal, *et al.* Brain Topogr. (2021).
2. M. Golesorkhi, *et al.* Commun. Biol. 4, 277 (2021).
3. D. W. Allan, Proc. IEEE 54, 221 (1966).
4. A. Uchida, Optical communication with chaotic lasers: applications of nonlinear dynamics and synchronization. John Wiley & Sons (2012).