

光ヘテロダインによる白色カオスの 光周波数差に対するエントロピーの評価

Evaluation of entropy of white chaos generated by optical heterodyne for different optical frequency detuning

埼玉大¹, °吉屋 圭悟¹, 内田 淳史¹

Saitama Univ.¹, °Keigo Yoshiya¹, Atsushi Uchida¹

E-mails: k.yoshiya.432@ms.saitama-u.ac.jp, auchida@mail.saitama-u.ac.jp

はじめに: 乱数は情報セキュリティの分野で用いられており、大容量通信において高速な乱数生成が必要とされている。そこで Gb/s を超える物理乱数生成方式として、半導体レーザカオスをを用いた方式が提案されている[1]。この方式の提案以降、生成ビット間のバイアスや相関を取り除くための後処理方式の提案により乱数生成速度の高速化が進展しており、現在では 1.2 Tb/s の生成速度が達成されている[2]。しかしこれらの多くの手法では、後処理として複雑な論理演算が用いられており、擬似乱数的な効果が含まれている。また物理源のエントロピー生成率を超過した速度で乱数が生成されているため、物理乱数としての性質に疑問が呈されている[3]。このように生成速度のみの評価が行われている一方で、エントロピー生成率の実験的な評価は多く行われていない[4]。

そこで本研究では、光ヘテロダインを用いて生成される白色カオスを実験的に生成し、光周波数差の変化に対する白色カオスのエントロピーを評価することで、乱数源としての白色カオスの性質の調査を行うことを目的とする。

方法と結果: 白色カオスとは、白色ノイズのように平坦なスペクトルを有するカオス信号のことである[5]。白色カオス生成のモデル図を Fig. 1 に示す。異なる外部共振器長を有する半導体レーザによりレーザカオスを発生させる。これらのカオス波形をファイバコプラで干渉させ、2つのレーザの光周波数差 Δf に等しい振動成分を有する光ヘテロダイン振動を取り出す。この光ヘテロダイン振動をバランスレシーバに入力し、入力波形の差分信号を増幅することで白色カオスを生成する。白色カオスの周波数スペクトルにおいて、低周波成分から Δf に対応した周波数成分まで平坦な帯域が拡大される。本研究では、 Δf を変化させて白色カオス波形を実験により生成し、エントロピーを定量的に評価する。

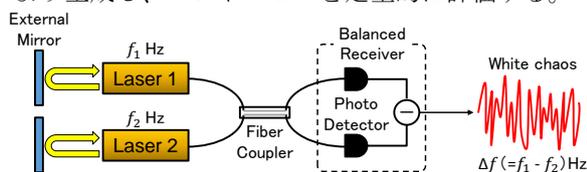


Fig.1 Method for generating white chaos.

生成された白色カオス波形をオシロスコープにより 100 GS/s のサンプリング速度および 8 ビット分解能で取得し、その波形を用いてエントロピーを算出する。算出には NIST Special Publication 800-90B (NIST 検定) と呼ばれる物理乱数用の新たな統計検定を用いた[6]。NIST 検定は取得した 8 ビットデー

タに対して全 10 項目のエントロピー推定を行う統計検定である。まず NIST 検定によるエントロピー推定の基礎特性を調査するため、メルセンヌ・ツイスタにより白色ガウス乱数を生成し、ヒストグラムの標準偏差に対するエントロピーの変化を観測した。その結果、標準偏差が大きいほど高いエントロピーが得られることが分かった。

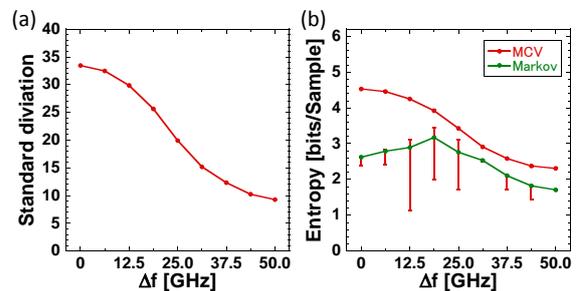


Fig. 2 (a) Standard deviation and (b) entropy as a function of frequency difference in two lasers.

次に光周波数差 Δf を変化させた場合の白色カオスの時間波形を取得した。Fig. 2(a)に示すように Δf を増加させるにつれて標準偏差が単調減少した。また Δf に対するエントロピーの変化を Fig. 2(b)に示す。NIST 検定のうち Most Common Value (MCV) 推定と Markov 推定の結果を示す。MCV 推定(赤線)はヒストグラムのみから算出しているため、Fig. 2(a)のように標準偏差が小さくなるにつれ減少する。一方で、サンプリング点間の遷移確率を評価する Markov 推定(緑線)では、 $\Delta f = 18.8$ GHz においてエントロピーが最大値となった。これは Δf を大きくすることで振動が高速化し、サンプリング点間の相関が減少したためである。一方で、 Δf をさらに大きくするとエントロピーが低減することが分かった。

まとめ: 本研究では、光ヘテロダインを用いて生成される白色カオスを実験的に生成し、光周波数差の変化に対する白色カオスのエントロピーを評価した。2つのレーザ間の光周波数差 Δf を中程度に設定することで、高いエントロピーを有する白色カオスを生成できることが分かった。

参考文献

- [1] A. Uchida, et al., Nat. Photon., **2**, 728 (2008).
- [2] R. Sakuraba, et al., Opt. Exp., **23**, 1470 (2015).
- [3] J. D. Hart, et al., APL Photon., **2**, 090901 (2017).
- [4] S. Sunada, et al., Chaos, **22**, 047513 (2012).
- [5] A. Wang, et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, **21**, 1800710 (2015).
- [6] E. Barker, et al., NIST Special Publication 800-90B (2016).