

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 科学研究費助成事業

## 研究成果報告書



平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820131

研究課題名(和文) カオスを用いた 型AD変換器の動作解析とその応用

研究課題名(英文) Analysis and application of delta sigma modulator using chaos

研究代表者

井岡 恵理 (Ioka, Eri)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：50583564

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000 円

研究成果の概要(和文)：AD変換機として用いられる モジュレータの動作解析手法として、カオス解析を用いて時系列データから出力状態を推測可能であることを示す。まず、積分器にリークを持つモジュレータのリークの変化による積分器出力の周期性の変化と、量子化器出力が対応することを示した。これにより積分器の出力からモジュレータの出力状態が評価可能であることを示した。さらに、積分器の時系列データの最大リアプノフ指数を求めることで、モジュレータの出力状態を定量的に評価する手法を提案し、この評価手法の使用を容易にするためにGUIアプリケーションソフトを試作した。よって、FFTを用いない新たな動作解析手法を提案できたと考える。

研究成果の概要(英文)：The FFT analysis is usually used as evaluation way of the performance of delta sigma modulator. We focused on that the output sequence of the delta sigma modulator becomes chaos when it performs normally. Hence, we studied a new performance analysis method using Lyapunov exponent for the delta sigma modulator. First, we illustrated two-parameter bifurcation diagram on parameter region of integrator leaks, and compared that result with FFT analysis to represent the integrator output sequence can optimize the performance of the modulator. Second, we applied the Lyapunov exponent to output sequence of double loop chaotic delta sigma modulator by using Sano and Sawada's algorithm. This result shows that the Lyapunov exponent becomes positive when the normal performance of the chaotic delta sigma modulator is observed from both the bifurcation diagram and FFT analysis. Moreover, we could confirm unstable period points in the chaos appear as weak tones at the shaping noise.

研究分野：非線形システム

キーワード：変調器 カオス変調器 リアプノフ指数 ノイズ特性

## 1. 研究開始当初の背景

デルタシグマ変調器はAD変換器として幅広い分野で用いられている。特徴として、ノイズシェーピングとオーバーサンプリング技術によって高精度な変換が可能であることが挙げられる。しかし、その構成から入力信号が直流や無信号な場合において、出力が周期的動作を起こすリミットサイクル発振が必ず発生してしまう。

このリミットサイクル発振はアイドルトーンと呼ばれる不要信号として信号帯域中に現れる。生体信号などの小振幅の信号を入力とするデルタシグマ変調器ではこのリミットサイクルを抑制する手法が必要とされている。この抑制手法の一つとしてカオスモジュレータがある。

また、これらの変調器(モジュレータ)の出力(ノイズシェーピング)を解析するためにはFFTを用いることが一般的である。我々はデルタシグマ変調器の正常動作時の出力がカオスの特徴を有することに着目し、新しい出力評価の方法の検討を行う。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はFFTを用いないモジュレータの新たな出力評価の検討および、カオスモジュレータの出力のS/Nの改善について大きく3つに分類される。

(1)モジュレータの量子化器出力は積分器の出力の周期性に依存するため、積分器の出力の周期点のパラメータに対する変化によって、モジュレータの動作状態が評価可能であることを明らかにすることを目的とする。対象のモジュレータには2次カオスモジュレータを用いる(図1)。

カオスモジュレータはリミットサイクル発振を抑制できる反面、入力のダイナミックレンジの減少とSN比の劣化という問題点がある。これらはカオスモジュレータの伝達関数より示唆されていることであるが、伝達関数は本来線形システムを考えるための物であり、カオスモジュレータは非線形性を有している。したがって我々はカオスモジュレータのノイズ特性と、回路パラメータにおける出力状態の変化を調査する。

(2)モジュレータの出力状態を積分器の時系列出力データのリアプノフ指数を用いて評価可能であることを明らかにする。これによりFFTによる目視での判定から、時系列データから算出した数値による判断を用いて出力状態を評価することとする。また、積分器の出力データを用いて簡単に評価をおこなえるように、GUIアプリケーションも開発を行う。

(3)カオスモジュレータの欠点である信号帯域付近のSN比の劣化を防ぐための新たなカオスモジュレータの構成についても検討を行う。

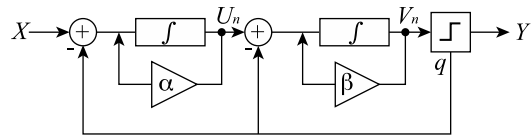


図1 . 2次カオスモジュレータ

## 3. 研究の方法

(1)について、まずはカオスモジュレータの数値モデルを用いて分岐解析を行い、パラメータ空間での周期点の振る舞いについて分類を行う。量子化器の出力は前段の積分器の出力(図1中の $V_n$ )に依存しているため、 $V_n$ の周期点の性質に着目し分岐解析を行う。さらにその結果を基にして、細分化したパラメータ領域でのパラメータ値を用いたモジュレータの出力のFFTスペクトラムを測定し、周期点の遷移とモジュレータ出力の変化について比較を行う。

(2)時系列データからモジュレータの動作状態の評価を行うためにカオスの数値化を行う。(1)と同様に積分器出力 $V_n$ 及び $U_n$ の時系列データからリアプノフ指数を求めて、最大リアプノフ指数によって、出力状態の評価を行う。実験データからリアプノフ指数を算出するために佐野・沢田のアルゴリズムを用いた。またアトラクタの再構築に必要な埋め込み次元はGP法によって算出した。

(3)カオスモジュレータの欠点である、低周波帯域の雑音のパワーの増加を抑制するために、MASH構造から着想を得たカスケード接続によってモジュレータの多段化させることでノイズにシェーピング特性を持たせ、低周波帯域の雑音を低減させることでS/Nの向上を目指す。

## 4. 研究成果

(1)積分器出力 $V_n$ の周期点の分岐解析より図2に示す分岐図を得た。分岐図をもとに周期点からカオスに遷移する領域(図3(a))のパラメータを用いて、カオスモジュレータ出力のFFT解析を行い、出力結果を色分けした分類図が図3(b)である。

図3(b)中の白い領域ではシェーピングされたノイズに弱いトーンが確認できた。また×印の領域では完全なトーンが確認できた。よって、これらの領域はリミットサイクル発振に分類した。灰色の領域ではモジュレータが正常動作している。さらに印の領域では間欠性カオスによってノイズの特性が複雑になる現象が確認できた。

この結果から、積分器出力の周期点のパラメータ依存性によってモジュレータの動作状態が推測可能であることがわかった。また周期点からカオスに遷移する際、積分器のリークが理想状態に近い点では、間欠性カオスによって図4(b)に示すようにノイズシェーピングが複雑になること、それ以外の値での遷移では、不安定化した周期点が弱いトーンとなって図4(a)に示すようにシェーピング

されたノイズ中に現れることが分かった．

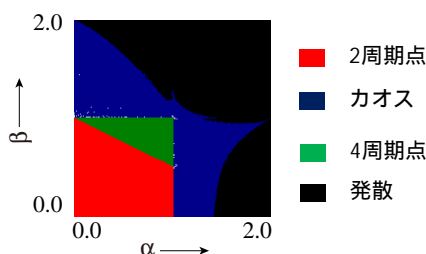
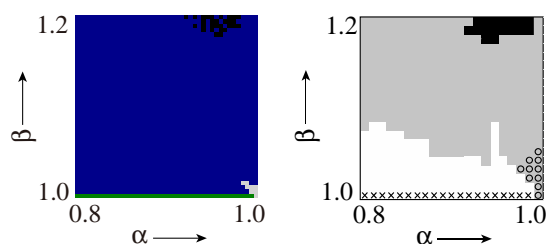
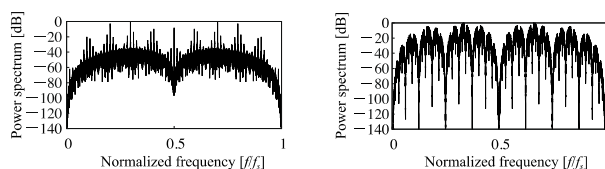


図 2 . 分岐図



(a)分岐図（拡大） (b)FFT による分類  
図 3 . FFT との比較<sup>[1]</sup>



(a)図 3(b)の白色 (b)図 3(b)の 印  
図 4 . 各領域での出力のスペクトラム<sup>[1]</sup>

(2)2 次カオスモジュレータの二つの積分器の時系列データからリアプノフ指数を算出するため、時系列データからのアトラクタの再構成を行った．このアトラクタを再構築に使用する最適な埋め込み次元の推定には GP 法を用いて推定を行いた．図 5 より埋め込み次元は 4 が妥当であることがわかった．このパラメータをもとに 2 つの積分器出力のアトラクタを再構築し、佐野・沢田の手法より最大リアプノフ指数を計算した結果を図 6 に示す．図よりモジュレータが正常動作をするパラメータ領域では最大リアプノフ指数は全て正の値を取り、積分器の出力はカオスであった．これは(1)で得られた分岐図（図 2，図 3(a)）の結果と一致する．

しかし、周期点からカオスに遷移した直後の不安定周期点によるトーン（図 4(a)）の有無は最大リアプノフ指数のみによる判別だけ困難であった．よって、時系列データの自己相関係数を計算し、リアプノフ指数による判別と併用することで、複雑な出力状態の判別を行った．結果として、不安定周期解によるトーンが発生する場合、時系列データの自己相関係数はトーンの周波数成分と対応する時間間隔で 0.5 以上の値（最大で 0.8）をとることがわかった（トーンがノイズに存在しない場合では自己相関係数は 0.2 未満である）．

これらの結果から、この二つの手法を併用

することで FFT を用いない場合でもモジュレータの出力状態を評価できることを示唆した．さらに図 7 に GUI アプリケーションの動作画面を示す．アプリケーションはマルチプラットフォーム環境での使用を想定し、Python で実装している．図 7 に示す動作環境は Linux である．アプリケーションは Python で実装されているため、Raspberry Pi 3 上でも動作可能ではある．

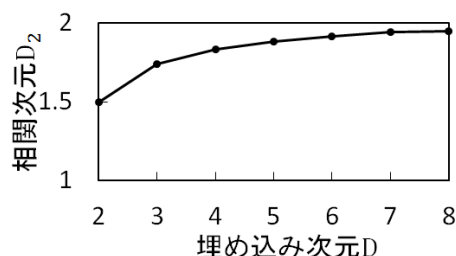


図 5 . GP 法による埋め込み次元の推定

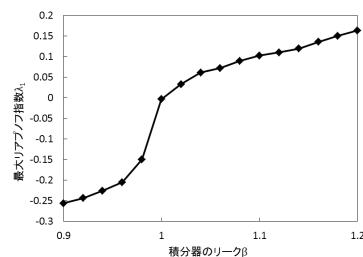


図 6 . 最大リアプノフ指数( =0.9)

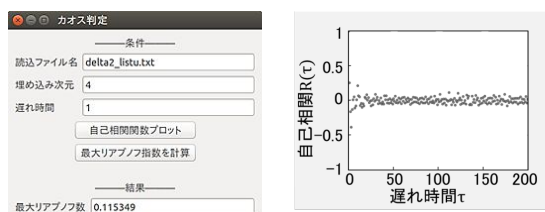


図 7 . GUI アプリケーション実行画面

(3)カオスモジュレータの欠点として入力ダイナミックレンジの減少と信号付近の雑音のパワーの上昇が挙げられる．我々は信号付近の雑音のパワーを低減するために、MASH 構造に着想を得たカスケード構造のカオスモジュレータ (CCDSM) の検討を行った．図 8 にそのモジュレーションの構成を示す．特徴として 1 段目のノイズと入力信号を足し合わせ、2 段目の量子化器 Q2 の出力を  $z^{-m}$  遅延させる．そして、 $Q1+Q2z^{-m}$  とすることで出力の量子化ノイズに  $(1-z)^{-1}$  の微分特性を持たせることに成功した．これにより図 9 に示すように低域の雑音を約 40dB 低減することを可能にした．

この CCDSM を分周分数に用いることで Fractional-N PLL で発生するスプリアスノイズの低減が可能であると考えられる．

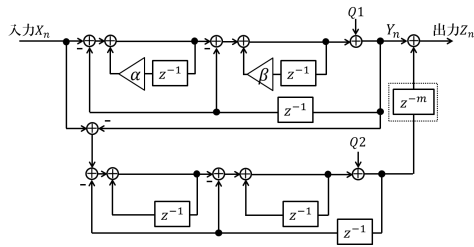


図 8. カスケード・カオスマジュレータ (CCDSM)

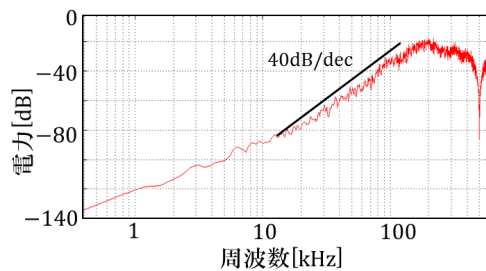


図 9. CCDSM の出力スペクトラム

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

[1] E. Ioka, N. Watanabe, R. Makishima, and Y. Matsuya, "Noise Characteristic of the Chaotic Double Loop Delta Sigma Modulator," *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol.26, no. 11, 2016. (査読あり)  
DOI: 10.1142/S0218127416501789

〔学会発表〕(計 3 件)

[2] N. Watanabe, R. Makishima, and E. Ioka, "Chaotic delta sigma modulator with pseudo MASH structure for using low frequency sensor" NCSP '16, pp.291 - 294, March, 2016, Honolulu, (USA). (査読あり)

[3] E. Ioka, R. Makishima, and Y. Matsuya, "The effect of integrator leakages on idle tone of double loop delta sigma modulator," NOLTA2014, pp.468-471, Sep., 2014, Luzern(Switzerland). (査読あり)

[4] 井岡恵理, 牧嶋亮, 松谷康之, "積分器リークを考慮した 1 次 A/D 変換の研究," IEICE 技術研究報告 NLP, vol.114, no.145, pp.33-36, July, 2014, 函館市中央図書館(北海道・函館市). (査読なし)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

井岡 恵理 (IOKA, Eri)

青山学院大学理工学部電気電子工学科・助教

研究者番号: 5 0 5 8 3 5 6 4

### (2)研究分担者

井岡 恵理 (IOKA, Eri)

青山学院大学理工学部電気電子工学科・助教

研究者番号: 5 0 5 8 3 5 6 4

### (3)連携研究者

井岡 恵理 (IOKA, Eri)

青山学院大学理工学部電気電子工学科・助教

研究者番号: 5 0 5 8 3 5 6 4

### (4)研究協力者

松谷 康之 (MATSUYA, Yasuyuki)

北島 博之 (KITAJIMA, Hiroyuki)

稲垣 雄志 (INAGAKI, Youji)

牧嶋 亮 (MAKISHIMA, Ryo)

渡邊 のぞみ (WATANABE, Nozomi)