

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04482

研究課題名（和文）非線形振動解析法を用いた低位相雑音多相CMOS LC発振器の開発に関する研究

研究課題名（英文）Development of low phase noise multiphase CMOS LC oscillators using analysis methods of nonlinear oscillations

研究代表者

茂呂 征一郎 (Moro, Seiichiro)

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：00303363

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多相同期CMOS LC発振器の位相雑音の低減を、非線形振動論の手法を用いて実現することを目指した。ハールウェーブレット変換を用いて非線形回路の定常周期解を数値的に解析する手法を提案し、回路素子のばらつきなどを考慮した発振器の周期波形を計算することが可能となった。また、逆問題として、波形から回路パラメータを推定する手法も開発し、回路設計に活かせるようになった。非線形振動論を用いた手法として、インパルス感度関数やポアンカレ写像を用いてリミットサイクルと位相雑音の関係を調査することで、位相雑音の低減を実現する回路設計が可能となり、回路シミュレーションによってその有効性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した多相同期CMOS LC発振回路は、高周波で動作する情報通信機器内部において、発振周波数を高くすることなく時間分解能を向上させることが期待でき、発振器単体の周波数が数GHzで頭打ちとなる中で、より高性能な機器の開発に寄与できるものと期待できる。また、発振現象や同期現象は非線形問題における代表的な現象であり、これらの理論を用いることは非線形科学の発展や、社会的意義の向上にも大きな役割を果たすものであり、本研究で得られた成果は学術的、社会的に大きな意義を持つものであると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Our goal of this research is to reduce the phase noise in multi-phase CMOS LC oscillators by the methods based on the theory of nonlinear oscillation. We have proposed the numerical analysis method of the steady state periodic solution using Haar wavelet transform. By using this method, we can analyze precisely the oscillation waveforms including the parameter deviations. Also, we have proposed the parameter estimation method using Haar wavelet transform, and we can show easier way to design the circuit. Moreover, we have investigated the relationship between the limit cycle and the phase noise of the oscillators, which are based on the theory of nonlinear oscillations. From these results, the design to reduce the phase noise has been realized and we have confirmed its performance of the proposed circuits.

研究分野：電気・電子工学

キーワード：結合発振器 同期現象 多相同期 位相雑音 非線形振動論 インパルス感度関数 ポアンカレ写像

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ICT の発達に伴い、搬送波信号やクロック信号の生成のため、より高周波で低位相雑音の発振器の開発が重要な課題となっている。高周波発振器としては、コルピッツ発振器などの LC 共振型の発振器やリング発振器などが現在広く利用されている。また近年、発振器の集積化の観点から、CMOS トランジスタを用いた差動増幅器と LC 共振回路を組み合わせた van der Pol 型高周波発振器が広く利用されるようになってきている。従来、インダクタが含まれている場合、回路の集積化は困難であると考えられてきたが、近年、回路基板上に渦状の配線を施すことで構成されるスパイラルインダクタに関する研究が盛んに行われるようになり、LC 発振器の集積化が容易にできるようになってきている。この CMOS LC 発振器は元々の構造が簡単であり、また、共振器に水晶などを用いる必要もないため、小型かつ高周波の発振器を LSI 上に実装することができるという利点があると同時に、リング発振器よりも低雑音の発振器が構成できるため、RF もしくは GHz 帯の高周波・低位相雑音発振器として今後重要な役割を果たすものと期待される。

さらに、デバイスの制約により単独の発振器の発振周波数が頭打ちになる中、 N 個の発振器が $2\pi/N$ ずつ等間隔にずれるような多相信号出力が得られる回路を用いると、多位相での並列処理により低い発振周波数でも高いデータレートを実現できる。例えば 10 相同期波形では発振器の周期 T に対し 10 倍の $0.1T$ の時間分解能を持つことができる。従って位相同期ループ(PLL)の局部発振器として非常に有用であることが知られるようになった。そこで上述の CMOS LC 発振器を複数個結合させることによって生じる同期現象を用いることで、直交位相発振器や多相同期発振器を構成する試みが多く報告されている。

2. 研究の目的

本研究で対象とする多相同期 CMOS LC 発振器システムでは以下 2 つの解決すべき問題がある。より正確な解析：従来の研究では同期現象の確認だけでなく、雑音や位相誤差の解析、出現する多相同期パターンのモード解析など、様々な解析が行われているものの、いずれにおいても、回路に含まれる素子は理想的かつ線形であると仮定されており、VLSI 等に実装した場合の素子値のばらつきや、非線形性等がほとんど考慮されていないという問題点があり、これらを考慮した正確かつ詳細な解析法の提案が必要となる。

位相雑音の軽減：多くの従来の研究で、発振器同士の結合が MOS トランジスタを介して行われており、結合素子の非線形性から高調波の発生やそれに伴う位相雑音の増大が避けられないため、その軽減を図るための回路の設計が必要である。

そこで本研究では CMOS LC 発振器をスパイラルインダクタで環状に結合したシステムについて、詳細な電磁気的特性を加味し、本システムを非線形ダイナミカルシステムとして捉え非線形振動論に基づく手法を用い、更に ISF による解析技術を組み合わせることにより、低位相雑音を実現する多相同期発振器の最適なパラメータや回路構造を検討し、より位相雑音を低下させた CMOS LC 発振器を開発する。具体的には、振動の各周期ごとのスナップショットをとるポアンカレ写像を考える。回路にインパルスを入力しゆらぎを与えると、発振器に安定な周期振動が起こる場合、ポアンカレ写像は 1 つの点に収束するが、位相雑音等の影響によるゆらぎが発生すると 1 点に収束しなくなる。インパルス感度関数(ISF)とポアンカレ写像における周期点の安定性との相関を調べることで、このゆらぎが減少するためのパラメータを見つけることができると考えられる。この結果から位相雑音の少ない回路設計を解析的に行うことが可能になり、課題の解決につながる。従来、発振器の位相雑音は、発振器を線形時間不変システムと近似して解析されてきたが、発振器は本来非線形回路であり、線形近似を行う手法では精度に問題があった。この問題を解消するため ISF を用いた位相雑音解析法が提案されたが、これは回路から導出された ISF のフーリエ係数を用いて位相雑音を推定するものであり、精度良く位相雑音が計算される。よって、本研究で提案する ISF と非線形振動論を組み合わせる手法は、適切なモデル化によって回路の非線形性やパラメータのばらつきなどを考慮することも可能であるので、課題の解決をも同時に実現することができる。以上より、本提案手法は、これまでになかった新たな解析・開発手法であり、低位相雑音の多相同期発振器の設計をより正確に行うことを可能にし、情報通信機器に含まれる PLL 回路の性能の改善により、今後の ICT 機器の発展において大きな役割をはたすものと確信する。

3. 研究の方法

本研究では以下の 4 点のテーマについて研究を行った。

電磁界解析ソフトウェアを用いて、スパイラルインダクタの電気的及び磁気的特性を詳細に解析し、内部抵抗や非線形性、素子値のばらつきなど、理想的なシステムとの相違点を詳細に調査する。

上記の結果をもとに、多相同期 CMOS LC 発振器の非線形ダイナミカルシステムとしての数値モデルを設計する。

設計された数理モデルを ISF を用いて解析し，波形，ポアンカレ写像，パラメータ分岐などを調査し，位相雑音を低減するための最適な回路パラメータ(CMOS の特性等)を導く．設計した発振器の回路実装を行い，実験によってシステムの有効性を確認する．

4．研究成果

本研究では，多相同期 CMOS LC 発振器の位相雑音の低減を，非線形振動論の手法を用いて実現することを目指した．ハールウェーブレット変換を用いて非線形回路の定常周期解を数値的に解析する手法を提案した．電磁界解析ソフトウェアで詳細に調査した素子特性や回路素子のばらつきなどを考慮した発振器の周期波形を計算することが可能となり，研究方法 を実現した．また，逆問題として，波形から回路パラメータを推定する手法も開発し，回路設計に活かせるようになり，研究方法 の一助とすることができた．非線形振動論を用いた手法として，インパルス感度関数やポアンカレ写像を用いてリミットサイクルと位相雑音の関係を調査することで，位相雑音の低減を実現する回路設計が可能となり（研究方法 ），回路シミュレーションによってその有効性を示すことができた（研究方法 ）．以上より，当初の研究計画を概ね達成することができたと考えられる．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 佐野響, 前川拓海, 茂呂征一郎	4. 巻 122
2. 論文標題 ハールウェーブレット微分演算子行列を用いた2階偏微分方程式の数値解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山本 峻太、高松 航平、中林 達哉、茂呂 征一郎	4. 巻 J104-A
2. 論文標題 ハールウェーブレット変換を用いた自律系非線形回路における不安定周期解の解析法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子電子情報通信学会論文誌A 基礎・境界	6. 最初と最後の頁 214 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transfunj.2020JAP1028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Moro Seiichiro, Takamatsu Kohei	4. 巻 11
2. 論文標題 A method to find periodic solutions in nonautonomous nonlinear circuits using Haar wavelet transform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 561 ~ 570
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.11.561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shitanaka Haruto, Morinaga Yudai, Moro Seiichiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerical analysis of nonlinear circuits with non-polynomial nonlinearity using Haar wavelet transform	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 116 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.11.116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Sakaguchi Kazuya, Moro Seiichiro
2. 発表標題 Parameter estimation of nonlinear circuits using Haar wavelet transform
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川拓海, 茂呂征一郎
2. 発表標題 ハールウェーブレット変換を用いた2階偏微分方程式の数値解析
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阪口和哉, 茂呂征一郎
2. 発表標題 ハールウェーブレット変換を用いた非線形回路のパラメータ推定
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shitanaka Haruto, Moro Seiichiro
2. 発表標題 Numerical analysis of nonlinear circuits with non-polynomial nonlinearity using Haar wavelet transform
3. 学会等名 The 42nd Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------