

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04520

研究課題名(和文) 複数の発振器を持つ同期系における相互干渉のメカニズム解明とその低減

研究課題名(英文) Study of mutual pulling mitigation between two oscillators in synchronous systems

研究代表者

吉村 勉 (yoshimura, tsutomu)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：00460767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：集積回路の動作に必要な不可欠な高速クロック生成に用いられる発振器の干渉ノイズの影響を理論および数値解析によって初めて明らかにした。特にPLL回路に用いられる発振器の干渉ノイズの影響について、その不安定となる条件を理論的に明らかにし、検証用テストチップの測定結果により理論の妥当性を示した。今回の研究では、単一の発振器への干渉ノイズの影響のほかに、2つの発振器の相互干渉ノイズの影響についても明らかとした。さらに自己干渉ノイズについても理論の妥当性を示した。さらに、発振器へのノイズの解析に加えて、干渉ノイズの低減についてもテストチップを用いた解析によって実効的な案を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

集積回路における発振器の性能向上の研究は広く行われているが、発振出力に相関のある干渉ノイズの研究は、技術ノウハウに関することもあり、あまり知られていない。本研究では発振器への干渉ノイズの影響を明らかにすることより、PLL回路などで常に課題であったノイズの影響を定量的に見積もることが可能となる。これにより本研究は発振器の設計技術の向上に大きく寄与すると考えられる。また、干渉ノイズ低減についても今回実効性を示すことができたことから、今後、発振器のノイズ低減手法の一つとして活用が広く期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study firstly revealed the influence of the interference noise to oscillators that are employed for the high-speed clock generation by the proposed theory and the numerical analysis. In particular, we revealed the stable condition under the influence of interference noise to oscillators in PLL by the theory and the analysis of the numerical simulation. This analysis was validated by the measured results of the evaluation circuit. This study also showed the influence of interference between two oscillators that were mutually coupled each other. Moreover, this study illustrated the influence of the self-coupling in an oscillator theoretically. We also proposed an effective method of the mitigation of interference noise between oscillators. This method was validated by the measurement of the evaluation circuit.

研究分野：アナログ集積回路設計

キーワード：発振器の位相ノイズ 位相同期回路 発振器の干渉ノイズ応答 相互干渉ノイズ 位相同期回路の非線形方程式 自己干渉ノイズ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

発振器に発振周波数に極めて近い摂動を与えてその印加信号に同期させるインジェクションロックの現象は古くから知られており、集積回路においては 1970 年代に Adler らの研究がある。また PLL 回路と併用した効果についての研究が 2004 年に発表されている。加えて、そのインジェクションの考え方をういて PLL 回路などの発振器を含む系の干渉ノイズ問題に関して、近年いくつかの研究がなされている。例えば B. Staszewski, O. Elieser, I. Bashir 氏らのグループが、内部発振回路と出力ドライバや入力回路との干渉を研究し、出力ドライバの動作タイミングを調整することでジッタ(位相ノイズ)が抑制されることを見出している。一方で、発振器に影響を与えるノイズ源の特定やその低減方法を見出すことは容易ではない。特に一般的な回路設計用 CAD ツールでは、デバイス内部ノイズによる位相ノイズの計算は可能だが、干渉ノイズの影響を取り込むには至っていない。現時点では設計者の知識・経験に頼ることが多く、対処療法的な処置が現在でも用いられている。

### 2. 研究の目的

本研究では、この現状に対し連立 Adler 方程式を新しい視点で見直すことで、実際の干渉現象の理解および解析を進めていく。これにより現象を抑制するための定量的なアプローチが可能となり、学術的にも工学的応用分野においても有益な知見が得られる。これらの知見は単に理論計算やモデルシミュレーションでの成果にとどまらず実際の抑制手法を回路化したテストチップを設計・製作・評価することで、広く工学的応用に適用できる形で公開する。

### 3. 研究の方法

本研究では以下に示す項目について段階的に干渉現象の理解とその低減に向けてのアプローチを検討した。

- ・高集積・高密度設計による発振器間の干渉の理論的メカニズムの解明
- ・干渉問題に対する低減への定量的なガイドラインおよび新手法の提案

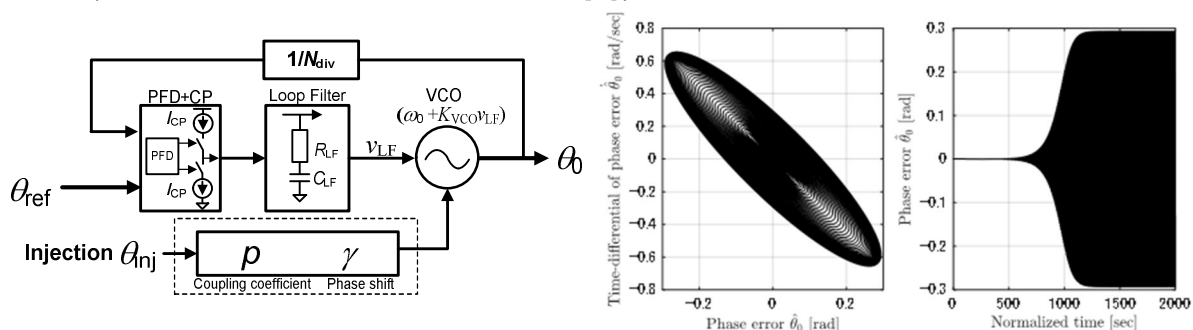
本研究の進め方としては、まずステップ I における相互干渉の理論解の導出とその解釈の点にある。今まで明らかになっていなかった完全同期系における近似解とその導出条件により、定量的に現象をとらえることが可能となる。また合わせてその抑制に関する定量的な指針を導くことを目的として進める。またステップ II においては、従来行われてきた干渉の低減手法に対して従来の観点とは別の新しい抑制手法を検討し、その実効性について検討する。提案手法の回路化とそのブラッシュアップ、さらに汎用性を持たせた干渉抑制機構への検討を行い、テストチップの設計・製作・評価を含めた成果報告を行うこととした。

研究の進め方としては、(1)理論・解析の検討、(2)数値解析を主とした妥当性の検討、(3)検証用テストチップによる実効性の検証、の3段階で行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 初年度(2019年度)の成果

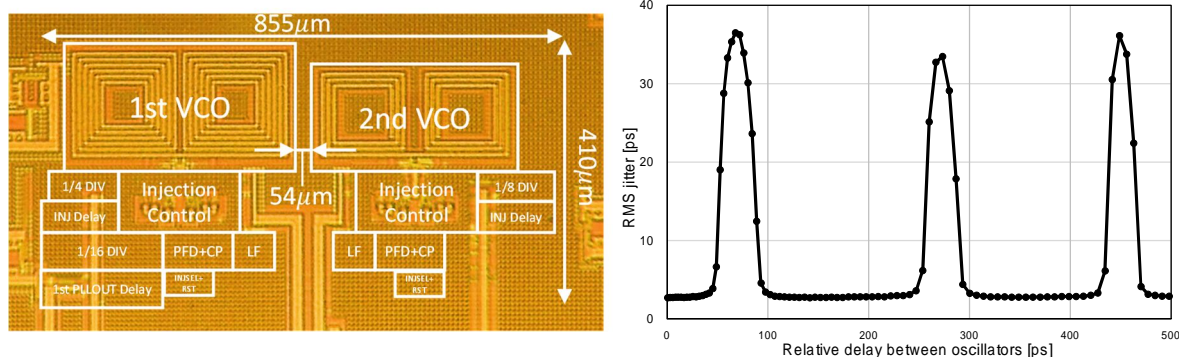
複数の発振器間の相互干渉のメカニズム解明が本年度の主たる目的であったが、それに関して今回新たに干渉系の非線形運動方程式の数値解析を行った。その結果、今まで明らかでなかった同期系での発振器の干渉現象について、非線形運動方程式の解の振舞いにより検証することが可能となった。さらに非線形運動方程式の線形モデル近似を導出し、線形モデルシミュレーションにより、非線形方程式と同様の振舞いの予測に成功した。当初の計画で目標とした完全同期系における PLL ロックはずれの可能性の提示、干渉ノイズ印加タイミング依存、線形モデルシミュレーションの妥当性の検証のいずれにおいても今年度の解析によって明らかにすることが出来た(図1:数値解析シミュレーションの結果[1])。



(図1:(左)干渉ノイズ解析モデル (右)出力位相誤差の数値解析結果)

上記解析結果を研究チームが過去作成したテストチップの測定結果に照らし合わせて現象の

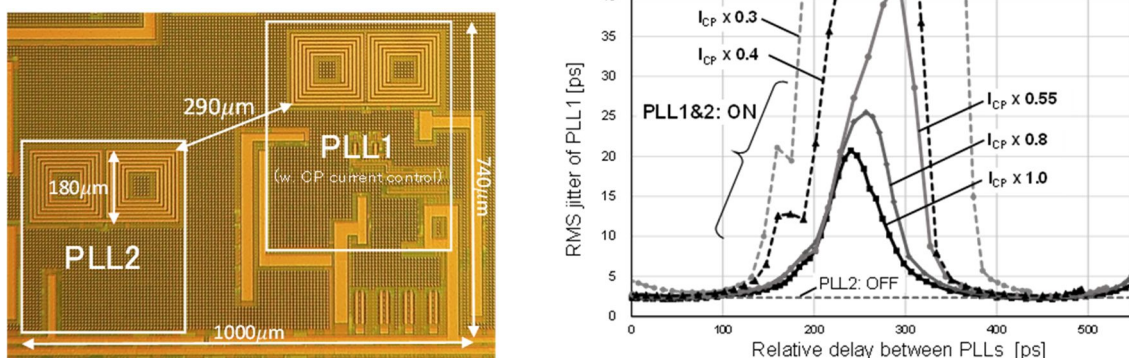
解明を試みた。その結果、相互干渉系の線形モデルによる解析により以前作成したカスコード PLL の干渉現象の位相ノイズ増大のタイミング依存を説明することが出来た(図2)[1]。



(図2：(左)カスコード PLL チップ写真 (右)干渉ノイズ測定結果)

(2) 次年度(2020年度)の成果

次のステップである干渉現象低減への手法の提案を検討した。まず前年度の干渉ノイズモデルを2つの発振器の相互干渉に適用した。その結果、その非線形運動方程式の振る舞いは、対称性を考慮すると前年度の単体の発振器の干渉ノイズ現象と同様な振る舞いとなることが判明した[2]。また、その理論および数値解析の結果を以前製作した検証用テストチップによる測定結果に照らし合わせて解釈したところ、この考えが複数発振器間の干渉現象を説明することが分かり、理論および解析の妥当性が明らかになった(図3)。

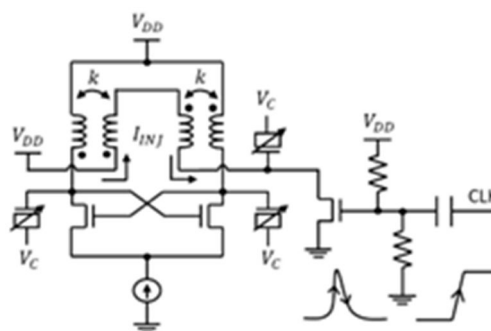


(図3：(左)2 PLL 干渉テストチップ (右)干渉ノイズ測定結果)

さらに、相互干渉ノイズについては完全同期の状態だけではなく、準同期状態についての現象についても明らかにすることができた。その結果、従来の干渉ノイズ低減手法では不十分な場合があることを数値解析によって明らかにすることができた[2]。

(3) 最終年度(2021年度)の成果

これまで得られた結果を学術誌への論文[1]および国際学会への投稿[2]につなげることで成果を広く国内外に発信し、この分野での設計技術の寄与に貢献すると同時に、研究内容のブラッシュアップを行った。具体的には、発振器への一般的な干渉ノイズ(基準信号の干渉、相互干渉、自己干渉)すべてに適用可能な理論として提示した[3]。またこの研究成果を別の分野への応用へ展開した。それは発振器の低位相ノイズ化として電磁カップリングを用いる手法で(図4)、これに関する特許出願を行った[4]。



(図4 電磁カップリングによる注入同期)

5. 参考文献

- [1] T. Yoshimura, *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 321–332, Feb. 2021.
- [2] T. Yoshimura, *Proc. IEEE Int. New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, June 2021.
- [3] T. Yoshimura, *IEEE Trans. Circuits and Systems I, Reg. Papers, Early Access*, 2022.
- [4] 吉村 勉、注入同期発振回路、特願 2022-026047

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Yoshimura Tsutomu	4. 巻 29
2. 論文標題 Study of Injection Pulling of Oscillators in Phase-Locked Loops	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems	6. 最初と最後の頁 321 ~ 332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVLSI.2020.3037895	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 Yoshimura Tsutomu	4. 巻 -
2. 論文標題 Self-Coupling and Mutual Pulling in Phase-Locked Loops	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSI.2022.3155517	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tsutomu Yoshimura
2. 発表標題 Mitigation of Mutual Pulling in Two Phase-locked Loops
3. 学会等名 2021 19th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 駒林龍二、多羅尾翔太、吉村 勉
2. 発表標題 回路シミュレーションによるPLL相互干渉モデルの妥当性検証
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 信貴政行、吉村 勉
2. 発表標題 電磁カップリングによるインジェクションロックPLLの検討
3. 学会等名 2022年 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 注入同期発振回路	発明者 吉村 勉	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-026047	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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