

平成 21 年 5 月 15 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760249

研究課題名（和文） RF 帯 N 相同期 CMOS-LC 発振器の開発に関する研究研究課題名（英文） Study on N -Phase Synchronization with RF CMOS LC Oscillators

研究代表者

茂呂 征一郎 (MORO SEIICHIRO)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00303363

研究成果の概要：

本研究では、CMOS をアクティブ素子とした高周波 LC 発振器の相互結合システムにおいて、各発振器の位相が互いにずれて同期する N 相同期現象を発生させることができ、またその理論的な証明を行うことができた。本研究の成果は、情報通信機器の局所発振器やクロックの高速化への応用が期待でき、今後の情報通信機器の小型化・高速化に寄与できるものと確信している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：発振器，同期現象，多相同期，CMOS-LC 発振器，結合発振系

1. 研究開始当初の背景

近年、通信技術や計算機技術の発達とともに、搬送波信号やクロックの生成のため、より高周波数で低雑音の発振器の開発が重要な課題となっている。さらに、多位相の信号出力が得られる場合、位相シフトキーイングやクロック分割などの際に非常に便利なツールとなると考えられ、このような多相出力の発振器の開発が最近盛んに行なわれるようになってきている。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オシレータなどが考えられる。また近年、発振回路の集積化の観点から、CMOS トラン

ジスタと LC タンク回路を組み合わせた van der Pol 型高周波発振器が注目を浴びている。従来、回路に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、基板上に渦状の配線をすることで構成する“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、結果として、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。CMOS-LC 発振器は元々の構造が簡単であるため、このような発振器を用いることで、小型かつ高周波の発振器を LSI 上に構成することができると考えられる。このような発振器はコルピッツ型の発振器より

も構造が簡単であるのと同時に、リングオシレータよりも低雑音の発振器が構成できるため、この CMOS-LC 発振器は RF もしくは GHz 帯の高周波・低雑音発振器として今後重要な役割を果たすものと考えられる。これまでにこのような CMOS-LC 発振器を用いた多相発振器に関する研究がいくつか行われてきているが、所望の位相を得るための回路素子値の細かいチューニングが必要であることや、位相雑音の軽減等の諸問題が大きな課題として残っている。

一方、自然界の諸現象のモデル化等の見地から、非線形現象に関して古くから多くの研究が行なわれてきた。特に近年、生物の神経回路網をモデル化したニューラルネットワークや、高次元非線形システムにみられるカオス現象等が非常に注目を集めており、物理学、化学、生物学、数学、経済学等の分野で幅広く研究が行なわれている。電気電子回路の分野においては、実際に非線形なシステムを構築するのが容易であり、現象を簡単に観測することができるため、様々な分野の中でも特に盛んに研究が行なわれてきた。その非線形現象の中でも結合発振器の相互同期現象は最も代表的な現象の一つである。この現象は自然界の至るところに見られる現象であり、自然現象のモデル化という点で非常に重要な意味を持つ以外に、電気通信等の分野において広く応用されており、この現象に関する研究は極めて重要な価値を持っている。したがってこの現象に関しては古くから非常に多くの研究がなされてきた。以上のことをふまえ、申請者はこれまでに抵抗結合による発振系に見られる様々な同期現象について報告してきた。申請者はこれまでに、同じ特性をもつ複数の発振器を 1 つの抵抗で星形に結合した回路に見られる同期現象について報告してきた。これらの回路では、各発振器の位相がずれて同期するような現象が得られる。特に LC van der Pol 発振器を結合した系では、結合抵抗によって消費される電力を最小にしようとするため、系の非線形性が強く、発振器の数 (N とする) が素数である場合、安定な N 相同期現象が見られることを報告してきた。本システムでは非線形負性コンダクタンスとしてオペアンプを利用しており、低周波での動作 (kHz オーダー) を想定しているが、 N 相同期現象が起こる原理は周波数の高低に関わらないと考えられるため、構成要素として高周波発振器を用いることで高周波の多相出力発振器を構成できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上記の高周波 CMOS-LC 発振器の結合系を考えることで、高周波 N 相同期発振器を構成することを目的とする。本システムでは、発振器を結合するだけで回路素子

値のチューニングはほぼ必要とすることなく高い精度で N 相同期出力、即ち多相出力を得ることができると考えられる。 N 相同期発振器を得る発想は単純なものであるものの、本研究の遂行のため、以下の点について研究を行う必要がある。

- ① 従来の星形結合系に用いた発振器と CMOS-LC 発振器では構造が異なるため、単純に同じような構造を得ることは難しく、いかにして N 相同期を得られる構造を作るか。
- ② 結合した際に、発振器の各パラメータのミスマッチによる影響がどのように同期現象に影響するか。
- ③ 雑音への影響がどのように及ぶか。

3. 研究の方法

本研究では、以下の点について研究を行った。

- ① N 相同期するための回路の結合構造に関する検討。
- ② 回路シミュレーションによる回路の動作の確認。
- ③ 回路に発生する雑音の解析。
- ④ 回路の素子値のばらつきによる、同期現象への影響の調査。
- ⑤ 本システムのチップ化の可能性の検討。

従来のオペアンプを用いた LC 発振器の結合系と、本研究で用いる CMOS-LC 発振器では、当然のことながら、発振器の構造が異なっている。オペアンプを用いたシステムでは星形結合系を容易に構成することができたが、CMOS-LC 発振器の場合、全く同じように結合させることが困難な場合があると考えられ、同様の N 相同期現象を得るためにどのような結合構造をとるべきかを検討することをまず第一に行わなければならない。従来型において N 相同期は、結合抵抗によって消費される電力を最小にしようとする同期することで起こっており、リアクタンス素子を介して結合抵抗に接続することが、位相がずれて同期するための条件と考えられる。本研究では高周波発振器を用いることを想定しており、結合を抵抗によるものだけでなく、伝送線路等も考慮に入れて回路モデルを設計する必要があると考えられる。また、設計した結合発振器に見られる同期現象を確認するため、汎用の回路シミュレーションソフトを用いてシミュレーションを行い、 N 相同期現象が見られるモデルを確立する。また、高周波発振器では雑音の影響が動作に大きく影響するため、雑音がシステムにいかに関与するかを、回路シミュレーションソフトのモンテカルロシミュレーション等を用いて詳しく解析する。本システムでは、各発振器の周波数引込み効果により雑音の軽減が期待できるが、具体的にどの程度の軽減が見られるかを詳細に調べる必要がある。また、原則

的には同じ特性を持つ発振器を結合したシステムを構築することになるが、実際には、特に高周波発振器を考える場合、素子値のばらつき等の影響が、同期現象に大きく影響を及ぼすことは間違いなく、こういった問題をどのように解決していくかを探ることも重要な課題である。一般に全く同じ特性の発振器を結合した場合、高精度で N 相同期現象が見られるが、パラメータのばらつきがある場合、厳密な N 相同期ではなく、位相にある程度の偏りができてしまう。また、発振周波数に大きな差が出てしまう場合、同期現象そのものが見られない可能性も出てきてしまう。こういった可能性について、どのようなパラメータがどのように現象に影響を及ぼすかを回路実験並びにシミュレーションによって確認する必要がある。また、本研究の最終的な目標である、本システムのチップ化の可能性について検討を行う。従来、インダクタを含む回路はチップ化に不向きであると考えられてきたが、ジャイレータとキャパシタの組合せによる等価回路の構築の他、基板上に渦状の配線を行うことでインダクタを構成するスパイラルインダクタを用いることで、LC発振器のチップ化も可能になってきている。しかしながら、これらの回路は基板上の占有面積を多くとるため、これらの発振器の結合系を考える場合、いかなる配置で回路を構成するかが重要な問題となる。

4. 研究成果

(1) 相互インダクタで環状結合されたCMOS-LC発振器の提案 (1)

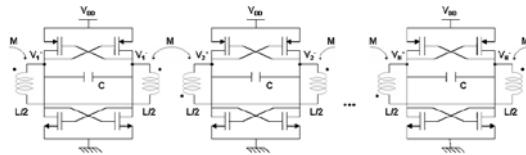


図1 提案回路 (1)

図1に示されるように、発振器を相互インダクタで環状に結合した回路を提案し、回路に見られる同期現象を回路シミュレータによるシミュレーションによって確認した。発振器の数(N)が素数の場合に N 相同期が安定に見られることを確認したが、システムの対称性の影響で、 N が素数でない場合は多相発振を見ることはできなかった。トランジスタの特性を変えることで、システムの非線形性を非対称にすることで N 相同期が見られるようになるが、偶数高調波が発生し、波形の品質に問題が生じる。

(2) 相互インダクタで環状結合されたCMOS-LC発振器の提案 (2)

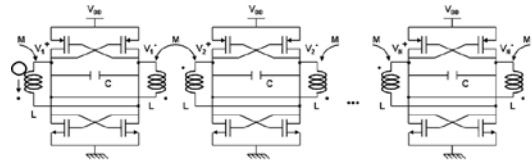


図2 提案回路 (2)

(1)での問題点を克服すべく、図2のような回路を提案した。本システムにおいても発振器が相互インダクタにより環状に結合されているが、相互インダクタの極性を一部だけ変更することにより、システムの対称性を崩している。回路シミュレータによるシミュレーションにより、図3のように発振器の数にかかわらず安定に $2N$ 相同期が得られることを確認した。

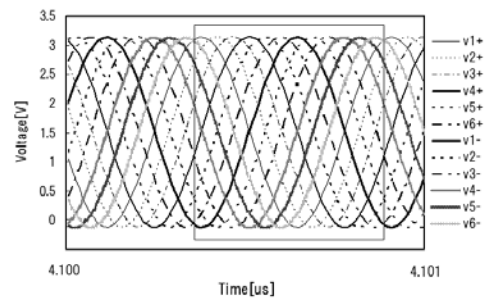


図3 提案回路 (2)において $N=6$ の場合に見られる12相同期現象

(3) 提案回路 (2) の理論解析

図2で提案された回路について、図4のよ

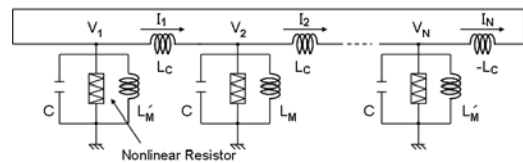


図4 提案回路 (2) の等価回路

うな等価回路を考え、非線形振動回路の解析に広く用いられるモード解析を用いて、理論的な解析を行った。結果として、(2)で示したような $2N$ 相同期が安定に存在していること、それ以外のモードも存在すること等を厳密に解析することができた。また、各モードの発振周波数も本解析により見積もることが可能であると共に、素子のばらつき等に対するロバスト性も確認することができた。

(4) 雑音に対する検討

主に提案回路 (2) について、FFT による

解析や、位相雑音、位相誤差について、数値計算ソフトを用いて解析を行った。いずれについても、従来海外のグループ等で提案されている多相同期発振器システムよりも良好な結果を得られているが、モデルの差異などから、厳密な比較が難しく、これらは今後の課題として残っている。

(5) 本システムのチップ化の可能性についての検討

本システムの VLSI 回路等への実装の可能性について検討し、特にインダクタの実装について、スパイラルインダクタを用いることによる、専有面積が大きくなる可能性があることや、Q 値の低さによる影響などが懸念材料として挙げられることがわかった。これらの問題の解決については今後の大きな課題となる。

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 12 件)

- ① Toshihiro Kawanari and Seiichiro Moro, Multi-phase oscillation in RF CMOS LC oscillators coupled by mutual inductors, J. Circuits, Systems, and Computers, vol.17, 2009, 採録決定, 査読有
- ② 大石 真徳, 茂呂 征一郎, 松本 忠, ハールウェーブレットを用いる適応的な解像度の選択による回路解析法, 電子情報通信学会技術研究報告 (非線形問題), vol.108, pp.119-124, 2008, 査読無
- ③ Toshihiro Kawanari and Seiichiro Moro, 2N-phase oscillation in RF CMOS LC oscillators coupled by mutual inductors, Tech. Rep. IEICE (NLP), vol.108, pp.29-34, 2008, 査読無
- ④ Toshihiro Kawanari and Seiichiro Moro, Multi-phase synchronization phenomena in RF CMOS LC oscillators coupled by mutual inductors, Proc. of International Workshop on Vision, Communication and Circuits (IWVCC08), pp.31-34, 2008, 査読有
- ⑤ Tadashi Matsumoto, Masahiro Osogami, and Seiichiro Moro, On particular solutions for state equation of autonomous continuous Petri nets, Proc. of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA08), pp.668-671, 2008, 査読有
- ⑥ Masanori Oishi, Seiichiro Moro, and Tadashi Matsumoto, A method for circuit analysis using Haar wavelet transform with adaptive resolution, Proc. of International Sym-

posium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA08), pp.369-372, 2008, 査読有

⑦ 松本 忠, 恐神 正博, 茂呂 征一郎, 時間なし連続ペトリネットの状態方程式の解について, 電子情報通信学会技術研究報告 (コンカレント工学), vol.108, pp.53-58, 2008, 査読無

⑧ 茂呂 征一郎, 松本 忠, ひずみ波交流を用いた星形結合発振器の同期現象の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 (非線形問題), vol.107, pp.17-20, 2007, 査読無

⑨ 川成 俊寛, 茂呂 征一郎, CMOS LC発振器の相互インダクタ結合による多相発振, 電子情報通信学会技術研究報告 (非線形問題), vol.107, pp.11-16, 2007, 査読無

⑩ 松本 忠, 恐神 正博, 茂呂 征一郎, P/T ペトリネットの可到達判定の代数的試みについて, 電子情報通信学会技術研究報告 (回路とシステム), vol.107, pp.27-30, 2007, 査読無

⑪ Seiichiro Moro and Tadashi Matsumoto, Analysis of synchronization phenomena in star-coupled Wien-bridge oscillators using distorted waves, Proc. of European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD07), pp.831-833, 2007, 査読有

⑫ Toshihiro Kawanari and Seiichiro Moro, Multi-phase oscillation in CMOS LC oscillators coupled by mutual inductors, Proc. of IEEE International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES07), pp.26-29, 2007, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 川成 俊寛, 相互インダクタンスにより結合された高周波 CMOS LC 発振回路における多相同期現象, 平成 20 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2008 年 9 月 13 日, 富山大学
- ② 茂呂 征一郎, 星形結合ウィーンブリッジ発振器の同期現象のひずみ波交流を用いた解析, 平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2007 年 9 月 9 日, 福井工業大学
- ③ 松本 忠, 電磁結合回路の教示のための回路論的考察, 平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2007 年 9 月 9 日, 福井工業大学
- ④ 恐神 正博, P/T ペトリネットの初等的 T インバリアントの導出法の比較, 検討, 平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2007 年 9 月 9 日, 福井工業大学
- ⑤ 松本 忠, P/T ペトリネットの可到達性の代数的解析の試み, 平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2007 年 9 月 9 日, 福井工業大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

茂呂 征一郎 (MORO SEICHIRO)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00303363