

# フローティングゲートMOSFETを用いた結合リングオシレータ における確率共鳴現象

SA-2-5

Stochastic Resonance in CMOS Ring Oscillators Coupled by Floating Gates

渡辺明香<sup>1</sup>      梶田伸吾<sup>1</sup>      藤坂尚登<sup>1</sup>      森末道忠<sup>1</sup>  
Asuka Watanabe      Shingo Kajita      Hisato Fujisaka      Mititada Morisue

広島市立大学 情報科学部<sup>1</sup>  
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

## 1 はじめに

我々はリングオシレータの簡単な数式モデルを作成し、結合リングオシレータに外部からノイズを付加した周波数変調信号を与え、確率共鳴によって変調信号成分を強調する処理を試みた [1].

本稿では、フローティングゲート (FG) MOSFET で構成した結合リングオシレータの外部信号への同期, 相互同期, 確率共鳴の原理および HSPICE によるシミュレーション結果を示す.

## 2 結合リングオシレータの同期現象

インバータを  $N$  (奇数) 個用いた  $N$  相リングオシレータには、電圧のキンク・ソリトン波が伝搬する [1][2]. FG-MOSFET から成る多入力インバータを用いてオシレータを複数個結合させ、外部から発振周波数の  $N$  倍の正弦波を入力すると、回路全体が同期し、かつ外部信号に同期してキンク・ソリトンが伝搬する.

### 2.1 同期現象

図 1(a) に示したインバータにおいて、出力電圧  $v_n$  の時間変化は、 $v_n$  と  $v_{n-1}$  の大小関係により次式のように表せる。これを  $f(v_n, v_{n-1})$  とおく.

$$\frac{dv_n}{dt} \propto \begin{cases} \frac{1}{2}(v_n - v_{n-1})^2 + 2V_0 v_{n-1} & v_n \geq v_{n-1} \\ -\frac{1}{2}(v_n - v_{n-1})^2 + 2V_0 v_{n-1} & v_n < v_{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\equiv f(v_n, v_{n-1})$$

FG-MOSFET を用いて図 1(b) の様に外部入力端子を付加して信号  $v_{ex}$  を与えた場合、(1) 式は  $v_{ex}$  を考慮して以下のように近似できる.

$$\frac{dv_n}{dt} = f(v_n, v_{n-1} + v_{ex}) \approx f(v_n, v_{n-1}) + \frac{\partial f}{\partial v_{n-1}} v_{ex} \quad (2)$$

ただし、外部入力端子のコンデンサ容量は、同期現象を考える際には重要ではないので省略している.

$v_n$  の 1 周期  $T = NT_0$  後の外部信号とのずれは、同期状態からのずれ  $\tau$  を用いて以下のように近似できる。これを  $g(\tau)$  とおく.

$$\frac{d\Delta v_n}{dt} \propto \frac{\Delta v}{NT_0} \propto \int_0^{NT_0} \frac{\partial f}{\partial v_{n-1}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0}(t+\tau)\right) dt \quad (3)$$

$$\equiv g(\tau)$$

$v_{ex}$  が同期状態より  $\tau$  進んでいる場合、 $g(\tau)$  が正值なので、 $v_n$  の変化が速くなる。また、 $v_{ex}$  が同期状態より  $\tau$

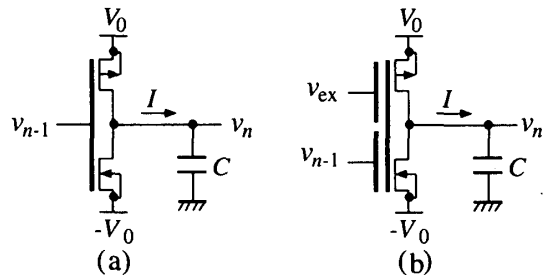


図 1 インバータと外部入力端子を付加したインバータ

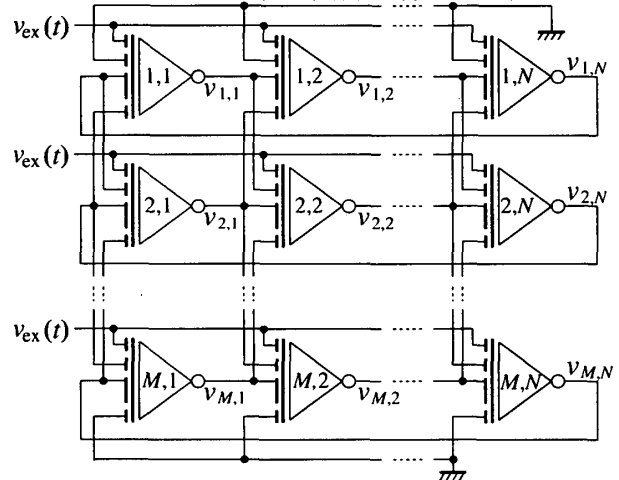


図 2 結合リングオシレータ

後れている場合、 $g(\tau)$  は負の値になり、 $v_n$  の変化が遅くなる。以上の過程により  $v_n$  と  $v_{ex}$  は同期する.

また、リングオシレータを  $M$  (整数) 個相互結合させると、外部信号に同期する過程と同じ原理でオシレータ同士相互が同期して発振する.

### 2.2 シミュレーション

汎用回路シミュレータ HSPICE により、図 2 に示す結合リングオシレータの動作シミュレーションを行った。MOSFET の種々の特性パラメータは  $0.5\mu\text{m}$  プロセスルールに基づくものである.

外部信号は、以下の式で与える.

$$v_{ex}(t) = V_o + V_a \sin\left(\frac{2\pi}{T_M} t\right), T_M \approx \frac{1}{N} T \quad (4)$$

$V_o$  はオフセット電圧、 $V_a$  は入力正弦波の振幅であり、 $T_M \approx T_0$  とする.

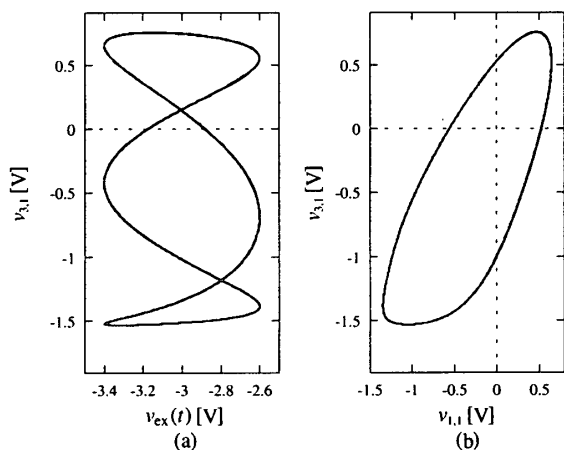


図3 3相リングオシレータ ( $M=5$ )

3相リングオシレータを5個結合させた回路のシミュレーション結果について、図3に、縦軸を $v_{3,1}$ として(a)に $v_{ex}$ を、(b)に $v_{1,1}$ を横軸として示す。図3より、 $v_{3,1}$ と $v_{ex}(t)$ 、 $v_{3,1}$ と $v_{1,1}$ は同期していることが確認できる。

### 3 リングオシレータの確率共鳴現象

#### 3.1 リングオシレータの定常同期点

(3)式より次式を得る。

$$\frac{d\Delta v}{dt} \propto \frac{d\tau}{dt} \propto \sin\left(\frac{2\pi\tau}{T_0}\right) \quad (5)$$

また、

$$\frac{d\tau}{dt} = -\sin\left(\frac{2\pi\tau}{T_0}\right) = -\frac{\partial U}{\partial t} \quad (6)$$

と置くと $U$ は、

$$U(\tau) = -\frac{T_0}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi\tau}{T_0}\right) + Const. \quad (7)$$

となる。 $\tau = 0$ のとき $U(\tau)$ は極小値をとるので、 $T = NT_0$ より $N$ 個の定常状態が存在することが分かる。そこで、 $v_{ex}$ を周波数変調しノイズを加えると、 $\tau$ の変化は以下のように表せる。

$$\frac{d\tau}{dt} \propto (1 + S_a(t)) \sin\left(\frac{2\pi\tau}{T_0} + \theta_0(t) + S_p(t)\right) \quad (8)$$

$S_a(t)$ はノイズによる振幅成分、 $S_p(t)$ はノイズによる位相成分、 $\theta_0(t)$ は変調成分を表す。ノイズを注入すると、オシレータは $N$ 個の同期点間を遷移し、適度なノイズ強度のとき、 $S_p(t)$ と $\theta_0(t)$ の相互作用により確率共鳴が起こり、変調成分が強調される。

以下のように $z$ を設定し、複素数平面上にプロットすることで定常点を確認できる。但し、 $j^2 = -1$ とする。

$$z = \left\{ \frac{1}{2}(v_2 - v_3) - jv_1 \right\} e^{j\frac{2\pi}{3T_0}t} \quad (9)$$

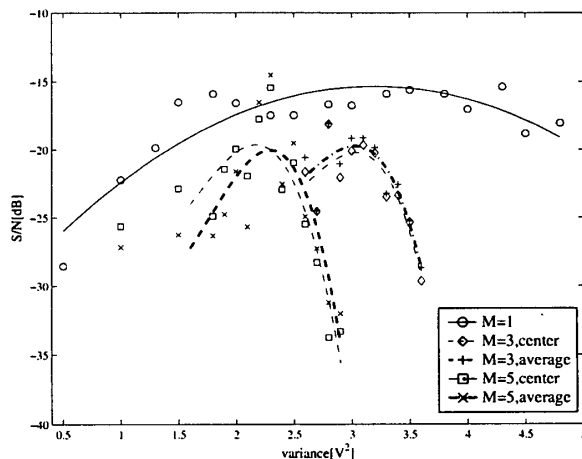


図4 3相リングオシレータの確率共鳴曲線 ( $M=1, 3, 5$ )

### 3.2 シミュレーション

3相リングオシレータにおいて、結合数 $M=1, 3, 5$ の回路について、次式のように外部信号を $v_{exm}$ として $\theta(t)$ で周波数変調し、ガウス性白色雑音 $S_m(t)$ を加えて回路に入力し、ノイズ強度を変化させてHSPICEにより動作シミュレーションを行った。

$$v_{exm} = V_o + V_a \sin\left(\frac{2\pi}{T_M}t + \theta(t)\right) + S_m(t) \quad (10)$$

$$\theta(t) = P \sin\left(\frac{2\pi}{T_{fm}}t\right), T_{fm} \approx 100T$$

但し、 $P$ は周波数変調偏移、 $T_{fm}$ は変調周期であり、 $m=1, \dots, M$ とする。ガウス雑音の平均は0とした。

シミュレーション結果から(9)式を用いて $z$ の虚軸方向の遷移に含まれる変調信号成分対雑音比(S/N)を計算した結果を図4に示す。 $M=3, 5$ の回路については、中央に位置するオシレータのS/Nおよび、全オシレータの $z$ の虚数部の平均値のS/Nを求めてプロットしている。図4より、確率共鳴現象特有の曲線を確認できる。

### 4 まとめ

FG-MOSFETを用いた結合リングオシレータに周波数変調信号を注入し白色ガウス雑音を付加したとき、変調信号成分対雑音比に確率共鳴が確認できた。得られた結果と理論解析の比較が今後の課題である。

### 参考文献

- [1] 梶田伸吾, 渡辺明香, 藤坂尚登, 森末道忠, “非線形波動伝搬回路網における確率共鳴”, 信学技報, NLP2002-134, pp.109-114, 2002.
- [2] H. Kato, “A Dynamic Formulation of Ring Oscillator as Solitary-Wave Propagator”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol.45, pp.98-101, Jan. 1998.