

Class-C VCO を用いたクロック発生器の位相雑音特性の解析

Phase-noise analysis of class-C VCO

浅田 大樹 原 翔一 岡田 健一 松澤 昭
Hiroki Asada Shoichi Hara Kenichi Okada Akira Matsuzawa

東京工業大学 大学院理工学研究科 電子物理学専攻
Department of Physical Electronics, Tokyo Institute of Technology

1 はじめに

Class-C VCO の FoM は消費電流を大きくすることによって改善され、ある電流において最小となり、更に電流を大きくすると徐々に劣化する。そのため Class-C VCO の設計では FoM と消費電力の間にトレードオフが生じる。本研究では低消費電力で高性能な VCO の設計を目的に、FoM の劣化の原因をシミュレーションの結果を元に解析した。

2 電圧制御発振器の FoM

Class-C VCO の FoM は次式で表される [1, 2, 3].

$$\text{FoM} = 10 \log \left(\frac{k_B T (1 + \gamma) R_t}{N Q_t^2 A_t^2} \cdot \frac{f_0^2}{\Delta f^2} \right) - 20 \log \left(\frac{f_0}{\Delta f} \right) + 10 \log \left(\frac{P_{DC}}{1 \text{mW}} \right) \quad (1)$$

ただし k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度、 γ は MOS の雑音定数、 R_t はタンクのインピーダンス、 N は共振器数 (差動では 2)、 Q_t はタンクの Q 値、 A_t は出力振幅、 Δf はオフセット周波数、 f_0 は発振周波数、 P_{DC} は消費電力である。ここで $P_{DC} = V_{DD} I_{bias}$ であり、 $A_t = R_t I_{bias} \leq (V_{DD} + V_{OD})/2$ となる。オーバードライブ電圧 $V_{OD} = 0$ の条件で、以下の式が導かれる。

$$\text{FoM} = 10 \log \left(\frac{k_B T (1 + \gamma)}{Q^2 \cdot 1 \text{mW}} \right) \quad (2)$$

すなわち FoM は Q 値のみで決まる関数となる。

3 シミュレーション結果および考察

シミュレーションの結果を図 2 から図 4 に示す。 Q_t は 12.9 であった。図 2 では低消費電流では FoM が理論値から乖離することが確認できる。その原因は図 3 からクロスカプルの雑音の増加にあることが分かる。そして低消費電流においては出力電力が減少しているにもかかわらず g_m が大きくなっていることが図 4 より得られた。これはトランジスタが弱反転領域で動作し、電流が指数関数的に変化することによる。MOS FET の雑音は $i_n^2/\text{Hz} = 4kT\gamma g_m$ で与えられるため、 g_m の増加が FoM の劣化の原因になっていると考えられる。

4 まとめ

Class-C VCO の消費電流を小さくするとクロスカプルの g_m が大きくなり雑音が増加するため FoM が劣化することを示した。

謝辞

本研究の一部は、総務省委託研究『電波資源拡大のための研究開発』、半導体理工学研究センター、NEDO、並びに東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通し、日本ケイデンス株式会社およびアジレント・テクノロジー株式会社の協力で行われたものである。

参考文献

- [1] P. Kinget, "Integrated GHz voltage controlled oscillators," pp. 353-381, Kluwer Academic Publishers, 1999.
[2] A. Mazzanti, and P. Andreani, "Class-C Harmonic CMOS VCOs, With a General Result on Phase Noise," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, no. 12, pp. 2716-2729, Dec. 2008.

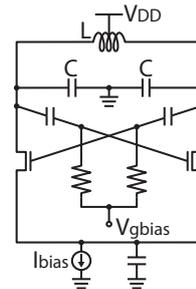


図 1 Class-C VCO の回路図

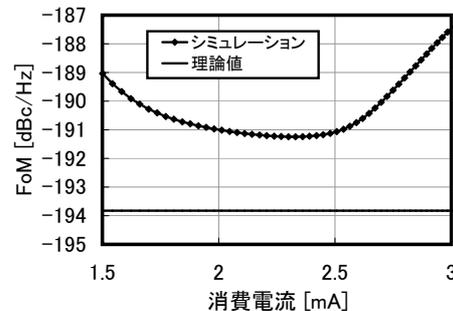


図 2 Class-C VCO の FoM

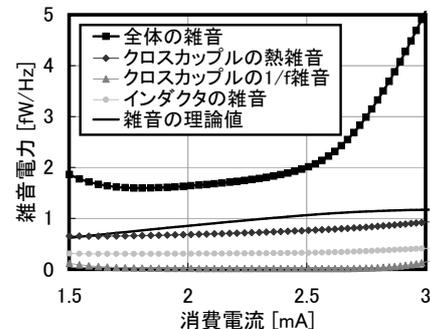


図 3 雑音電力の寄与

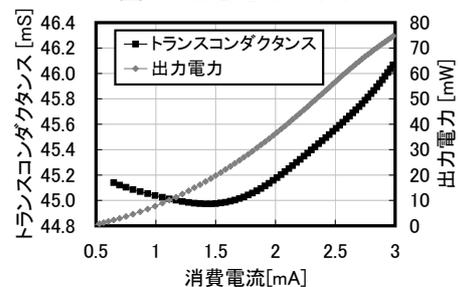


図 4 クロスカプルトランジスタの g_m と出力電力

- [3] P. Andreani, X. Wang, L. Vandi, and A. Fard, "A Study of Phase Noise in Colpitts and LC-Tank CMOS Oscillators," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 40, no. 5, pp. 1107-1118, May 2005.