

## サブスレッショルド特性を利用するウェイクアップ受信機用ミキサの初期的検討

A Low-Power Mixer using Subthreshold MOSFETs for Wake-up Receiver

石田 繁巳 鈴木 誠 森川 博之  
Shigemi Ishida Makoto Suzuki Hiroyuki Morikawa

東京大学先端科学技術研究センター / Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

## 1 はじめに

無線通信において受信待機電力の削減は大きな課題となっている。これに向けて、筆者らは、低消費電力のウェイクアップ受信機を用いて受信待機電力を削減するウェイクアップ型通信 [1] の実現を目指している。

ウェイクアップ型通信では、これまでの受信機の設計にとらわれることなく、新たな回路方式によって低消費電力なウェイクアップ受信機を実現することが求められている。これは、ウェイクアップ受信機が低ビットレートの通信を行うためである。低ビットレートの通信では通信性能劣化の影響は小さく、これまでの無線通信で利用されてこなかった通信性能の低い回路方式を利用できる可能性がある。このような通信性能の低い回路方式の利用可能性を検証できれば、ウェイクアップ受信機の消費電力を大幅に削減することができる。

これに向けて、ダイオード接続 MOSFET による多段式ダイオード検波回路を用いたウェイクアップ受信機の研究を進めてきた。しかしながら、ダイオード検波回路の受信感度には限界があるため、ダイオード検波方式のウェイクアップ受信機の通信距離は数 m 程度にとどまる。

本稿では、ウェイクアップ受信機の新たな回路方式の 1 つとして、サブスレッショルド動作 MOSFET を用いるダイレクトコンバージョン受信機について検討を行う。周波数変換時に利得の得られるダイレクトコンバージョン方式をサブスレッショルド動作 MOSFET を用いて実現できれば、ダイオード検波方式よりも受信感度の高い受信機を低消費電力で実現できると期待される。サブスレッショルド動作 MOSFET を用いてウェイクアップ受信機の受信感度向上が可能であることを検証するため、ミキサの変換利得および消費電力の評価を行う。

## 2 ウェイクアップ受信機用サブスレッショルド MOSFET ミキサ

サブスレッショルド動作 MOSFET を用いたダイレクトコンバージョン受信機の実現に向けては、ミキサ出力における直流オフセットの低減が課題となる。直流オフセットは主に 2 つの原因で発生する。1 つ目は、2 次相互変調歪である。ミキサに 2 次の非線形性がある場合、近接した周波数の入力信号は直流付近へと周波数変換され、変動を含む直流オフセット出力となる。2 つ目は、自己混合である。自己混合は、局部発振信号のリークが無線信号とともにミキサに入力されることによって、局部発振信号自身をミキシングしてしまう現象である。同一周波数の信号をミキシングするために直流オフセットが出力される。

直流オフセットの低減に向けて、サブスレッショルド動作 MOSFET の非線形性により生じる 3 次高調波を用いてミキシングを行う。図 1 にサブスレッショルド動作 MOSFET の 3 次高調波を用いる非線形ミキサの概要を示す。中心周波数  $f_{RF}$  の無線信号と周波数  $f_{LO} = f_{RF}/2$  の局部発振信号を、ソース接地サブスレッショルド動作 MOSFET のゲート・ソース間に入力する。ソース接地 MOSFET の小信号ドレイン電流は、小信号ゲート・ソース間電圧  $v_{gs}$  を用いて

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{g_m'}{2!} v_{gs}^2 + \frac{g_m''}{3!} v_{gs}^3 + \dots \quad (1)$$

( $g_m$ : MOSFET の相互コンダクタンス)

と表される。このため、第 3 項で表される 3 次高調波により周波数  $f_{RF} - 2f_{LO}$  の信号が生じる。この周波数成分のみを低域通過フィルタや差動回路を用いて取り出すことで、ミキシングを実現できる。

3 次高調波を利用してミキシングを行うことで、直流オフセットは以下のように低減される。2 次相互変調歪により発生する直流オフセットについては、2 つの MOSFET に無線信号を差動入力し、電流の差分を出力として取り出す差動回路を構成することで軽減することができる。また、3 次高調波を利用するミキサでは異なる 2 つの周波数のミキシングによ

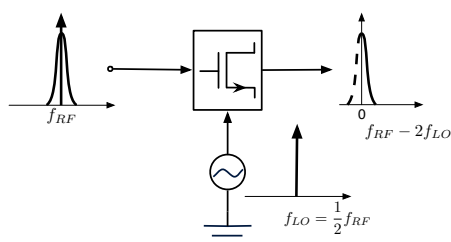


図 1 3 次高調波を利用するサブスレッショルド MOSFET ミキサの概要

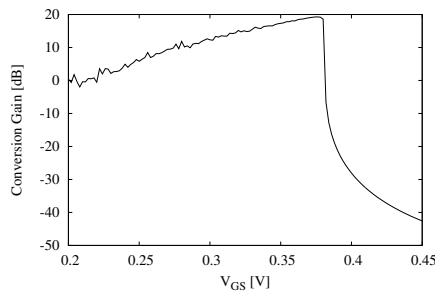


図 2 ゲート・ソース間バイアス電圧に対する変換利得

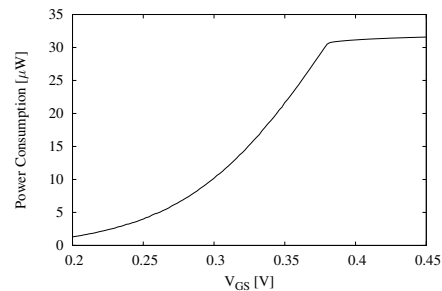


図 3 ゲート・ソース間バイアス電圧に対するミキサの消費電力

てベースバンド出力を得るため、同一周波数をミキシングしても直流オフセットは生じない。

## 3 初期的評価

サブスレッショルド動作 MOSFET を用いたダイレクトコンバージョン用ミキサの有効性を確認する初期的評価として、ゲート・ソース間バイアス電圧に対する変換利得の変化と、ミキサの消費電力評価を行った。サブスレッショルド領域で動作する NMOS のゲート・ソース間に無線信号と局部発振 (LO) 信号を印加した場合の変換利得と消費電力を、Cadence 社の回路シミュレータ Spectre を用いて評価した。負荷としてはドレインに固定値の純抵抗を接続した。2.4 GHz 帯を用いたウェイクアップ型通信を想定し、無線信号として周波数  $f_{RF} = 2.4$  GHz の信号を、LO 信号として  $f_{LO} = 1.2$  GHz の信号を入力した。MOSFET のモデルは PSP 103.1 のグローバルモデルを用いた [2]。0.18  $\mu$ m CMOS プロセスにおけるサブスレッショルド動作 NMOS を想定し、ゲート幅は 5  $\mu$ m、ゲート長は 20  $\mu$ m とした。また、電源電圧は 0.18  $\mu$ m CMOS プロセスで一般的な 1.8 V とした。

図 2 に、MOSFET のゲート・ソース間バイアス電圧に対する変換利得を示す。ゲート・ソース間バイアス電圧  $V_{GS}$  の増加とともに変換利得が増加し、 $V_{GS} = 0.37$  V のときに約 19 dB の最大変換利得が得られることが分かる。 $V_{GS}$  がさらに増加してスレッショルド電圧を超えると、変換利得は急激に減少する。これは、MOSFET の動作領域がサブスレッショルド領域から線形領域に入り、MOSFET の線形性が高まって 3 次高調波が減少するためと考えられる。大きな変換利得を得るためには、バラツキの影響を受けやすいサブスレッショルド動作 MOSFET を適切にバイアスする仕組みが必要となる。

図 3 に、ゲート・ソース間バイアス電圧を変化させた場合のミキサの消費電力を示す。消費電力は、ミキサ用のサブスレッショルド動作 MOSFET に印加している電源電圧と電流から算出した。図より、ミキサの変換利得が最大となる  $V_{GS} = 0.37$  V においては、約 28.6  $\mu$ W の電力で動作することが分かる。また、図 2 の結果と合わせると、 $V_{GS}$  がスレッショルド電圧よりも小さい範囲においては消費電力と変換利得がトレードオフの関係にあることが分かる。なお、本評価は単一の MOSFET での消費電力を算出したため、差動回路を用いる実際のミキサでは約 2 倍の消費電力となると考えている。

## 4 おわりに

本稿では、ウェイクアップ受信機の新たな回路方式の 1 つとして、サブスレッショルド動作 MOSFET を用いるダイレクトコンバージョン用ミキサを示し、その有効性をシミュレーションによって検証した。現在、サブスレッショルド動作 MOSFET を用いるダイレクトコンバージョン用ミキサの回路設計を進めている。

## 謝辞

本研究の一部は、戦略的創造研究推進事業 (CREST) および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じ、ケイデンス株式会社の協力で行われた。

## 参考文献

- [1] S. Ishida et al., "Evaluation of a wake-up wireless module with bloom-filter-based ID matching," APSITT2010, pp.1-6, Jun. 2010.
- [2] G. Gildenblat et al., "PSP: An advanced surface-potential-based MOSFET model for circuit simulation," IEEE Trans. Electron Devices, vol.53, no.9, pp.1979-1993, Sep. 2006.