

# 折り返し型ギルバート乗算回路の周波数特性劣化

小島 光

**あらまし** 以前から検討している折り返し型ギルバート乗算回路について、非線形な動作をする乗算回路について小信号等価回路に手を加え解析を行った。また PMOS の各端子間にキャパシタを付加し、各回路について小信号解析を行った。

**キーワード** ギルバート乗算回路, 小信号解析, 非線形回路

## 1. はじめに

以前設計した従来型との比較のために設計した折り返し型ギルバート乗算回路 (図 1) ではサイズの大きな PMOS を使用している。したがって、ゲート面積が増大し寄生容量が大きくなることが考えられる。今週はこの寄生容量について、具体的にどの部分が最も周波数特性劣化の原因として大きいのかを検討した。

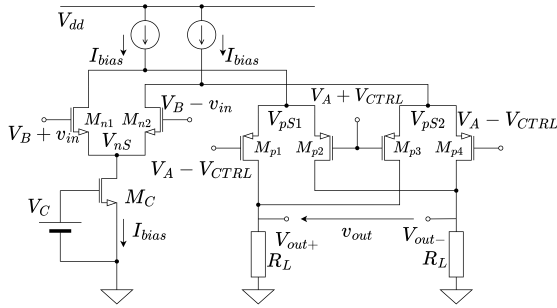


図 1 検討している折り返し型ギルバート乗算回路

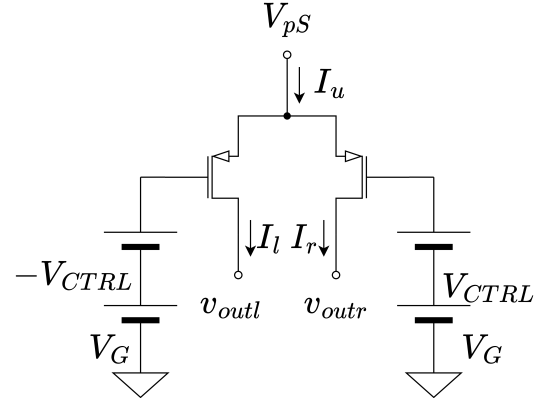


図 2 PMOS 差動対

一般に MOSFET のドレイン電流は 2 乗則に従い

$$I_D = K(V_{GS} - V_{th})^2 \quad (2)$$

である。では、図 2 において  $V_{CTRL} = 0$  のとき、ゲートソース間電圧は  $V_{GS} = V_{pS} - V_G$  なので、トランスコンダクタンスは

$$\begin{aligned} g_{mp} &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\partial}{\partial V_{GS}} K(V_{GS} - V_{th})^2 \\ &= 2K(V_{GS} - V_{th}) \\ &= 2K(V_{pS} - V_G - V_{th}) \end{aligned} \quad (3)$$

と計算できる。次に  $V_{CTRL} \neq 0$  の時、 $V_{GS} = V_{pS} - (V_G - V_{CTRL})$  なので左右のトランスコンダクタンスをそれぞれ  $g_{mpl}, g_{mpr}$  とすると

## 2. 動作点の変動

図 1 では PMOSFET のゲートに直流で  $\pm V_{CTRL}$  なる電圧を印加する。これはつまり、PMOSFET に流れるバイアス電流が  $V_{CTRL}$  により変動することを意味している。小信号解析では入力信号が小振幅であるとき、MOSFET のトランスコンダクタンス  $g_m$  が一定であるという近似を前提として小信号等価回路を作成する。しかし、トランスコンダクタンス  $g_m$  は実際には一定でなく、ドレイン電流  $I_D$  と定数係数  $K$  を用いて

$$g_m = 2\sqrt{KI_D} \quad (1)$$

と表される。即ち  $V_{CTRL}$  により PMOSFET に流れるドレイン電流が変化すると、それに伴いトランスコンダクタンスが変化することになる。このままでは小信号解析を行うことができないので、小信号解析の前に  $V_{CTRL}$  とトランスコンダクタンスの関係を明らかにする。

まずは片方の PMOS 差動対について考えるが、今回のような対応する接点の電圧と電流の符号が反転するような回路において、対応する半分のみの回路をを考えればもう半分については符号を入れ替えばよいので、片側の PMOS 差動対のみについて解析すれば事足りる。したがって、図 1 において左側の PMOS 差動対を取り出し、図 2 のような回路について考える。

$$\begin{aligned}
g_{mpl} &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\partial}{\partial V_{GS}} K(V_{GS} - V_{th})^2 \\
&= 2K(V_{GS} - V_{th}) \\
&= 2K(V_{pS} - V_G + V_{CTRL} - V_{th}) \\
&= g_{mp} + 2KV_{CTRL} \equiv g_{mp} + \Delta g_m \quad (4)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_{mpr} &= \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\partial}{\partial V_{GS}} K(V_{GS} - V_{th})^2 \\
&= 2K(V_{GS} - V_{th}) \\
&= 2K(V_{pS} - V_G - V_{CTRL} - V_{th}) \\
&= g_{mp} - 2KV_{CTRL} \equiv g_{mp} - \Delta g_m \quad (5)
\end{aligned}$$

$$\Delta g_m = 2KV_{CTRL} \quad (6)$$

と表すことができた。従って  $V_{CTRL}$  が差動で印加されたとき、トランスコンダクタンスは  $V_{CTRL}$  に比例した変化分を持つことが示せた。

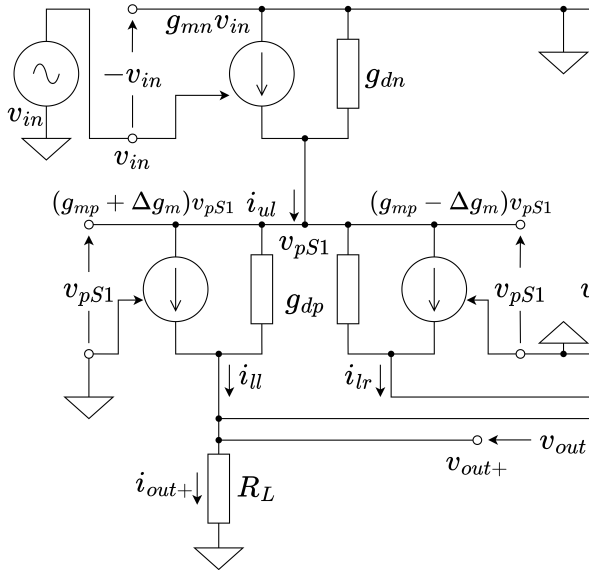


図3 小信号等価回路

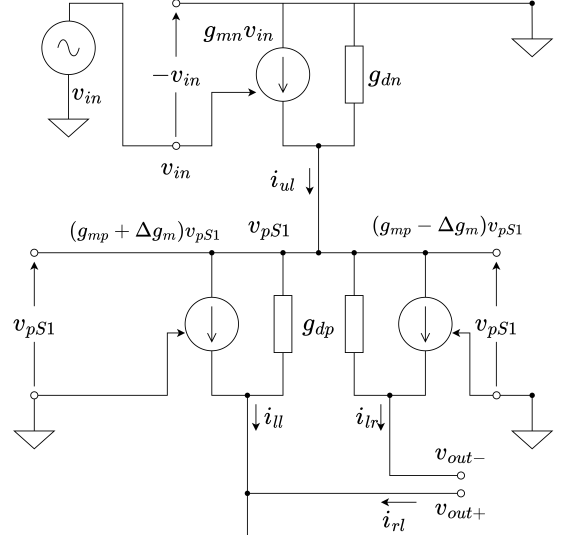


図4 寄生容量のついていない場合の小信号等価半回路

$$\begin{aligned}
&\text{KCLより} \\
&i_{ul} = i_{ll} = i_{ur} = i_{lr} \\
&i_{ul} = g_{mn}v_{in} - g_{dn}v_{pS1} = 2g_{mp}v_{pS1} + 2g_{dp}v_{pS1} \\
&i_{ul} = \frac{g_{mn}}{2g_{mp} + g_{dn} + 2g_{dp}}v_{in} \approx \frac{g_{mn}}{2g_{mp}}v_{in} \quad (7)
\end{aligned}$$

差動回路なので  $v_{out+} = v_{out-}$ ,  $i_{ll} = -i_{rl}$ ,  $i_{lr} = -i_{rl}$  となる。  
これにより

$$i_{out+} = i_{ll} + i_{rl} = i_{ll} - i_{lr} = 2\Delta g_m v_{pS1} - 2g_{dp} v_{out+} \quad (8)$$

$$\therefore i_{out-} = -g_m v_{pS1} - 2g_{dp} v_{out-} \quad (9)$$

$$(10)$$

### 3. 小信号等価解析

次に寄生容量がついていない場合と各端子間に寄生容量がついた場合の小信号等価解析を行う。解析の際には図3に示す小信号等価回路の各端子に寄生容量を負荷し、それぞれの場合において計算した。

#### 3.1 寄生容量のついていない場合

図4に左側的小信号等価回路の半回路を示す。

各部に流れる電流は

$$\begin{aligned}
i_{ul} &= g_{mn}v_{in} - g_{dn}v_{pS1} \\
i_{ll} &= (g_{mp} + \Delta g_m)v_{pS1} + g_{dp}(v_{pS1} - v_{out+}) \\
i_{lr} &= (g_{mp} - \Delta g_m)v_{pS1} + g_{dp}(v_{pS1} - v_{out-})
\end{aligned}$$

### 4. 解析結果の考察

前回、各端子間に容量がついたときの出力の式を示したが、改めてゲートソース間、ソースゲート間、ゲートドレイン間に寄生容量がついた時の  $v_{in}$  を入力とする増幅率をを以下に示す。

$$\begin{aligned}
A_{SG} &= \frac{2R_L g_{mn}}{(1 + 2R_L g_{dp})(g_{mp} + j\omega C_{GS})} \Delta g_m \\
A_{SD} &= \frac{2R_L g_{mn}}{(1 + 2R_L g_{dp})(g_{mp} + j\omega C_{SD})} \Delta g_m \\
A_{GD} &= \frac{2R_L g_{mn}}{g_{mp}(1 + 2R_L g_{dp} + j2R_L \omega C_{GD})} \Delta g_m
\end{aligned}$$

であった。ここで、前述の式 (6) を代入すると

$$A_{SG} = \frac{4KR_L g_{mn}}{(1 + 2R_L g_{dp})(g_{mp} + j\omega C_{GS})} \cdot V_{CTRL} \quad (11)$$

$$A_{SD} = \frac{4KR_L g_{mn}}{(1 + 2R_L g_{dp})(g_{mp} + j\omega C_{SD})} \cdot V_{CTRL} \quad (12)$$

$$A_{GD} = \frac{4KR_L g_{mn}}{g_{mp}(1 + 2R_L g_{dp} + j2R_L \omega C_{GD})} \cdot V_{CTRL} \quad (13)$$

したがって、各寄生容量がついた時の遮断周波数を  $f_{SG}, f_{SD}, f_{GD}$  とおくと

$$f_{SG} = \frac{g_{mp}}{2\pi C_{SG}} \quad (14)$$

$$f_{SD} = \frac{g_{mp}}{2\pi C_{SD}} \quad (15)$$

$$f_{GD} = \frac{1 + 2R_L g_{dp}}{4\pi R_L C_{GD}} \quad (16)$$

と計算できる。