ゼミ資料（2023 年 10 月 31 日）

ギルバート乗算回路における周波数特性改善方針の検討

小島 光

あらまし　以前まで検討していた折り返し型のギルバート乗算回路の問題点である周波数特性劣化の原因が PMOS であると仮定し、これを使わない新たなトポロジについて検討した。

キーワード　ギルバート乗算回路, 小信号解析, 周波数特性

1.　はじめに

フォトニックリザバコンピューティングの学習には高速な積和演算が必要であるが現状、要件を満たすような光を用いた積和演算行えていない。そこでリザバ層の出力を電気に変換しアナログ積和演算を行うことになった。ここで、リザバ層からは 7 つの出力があり、それぞれに任意の重みをかけ足し合わせる。これを電気で行うには図 1 のような各ギルバートセルで積算を行い、電流をまとめて和をとる。即ち信号振幅を足し合わせるため 7 つの信号振幅の和が必要な振幅になる。つまり各セルの出力振幅は全体の 1/7 が最大となり、S/N 比が小さくなってしまうことが問題として考えられる。この問題を改善すべく前回までは PMOS を使用する折り返し型のギルバート乗算回路 (図 2) について検討してきたが信号振幅を改善できても周波数特性が劣化してしまうことが分かった。

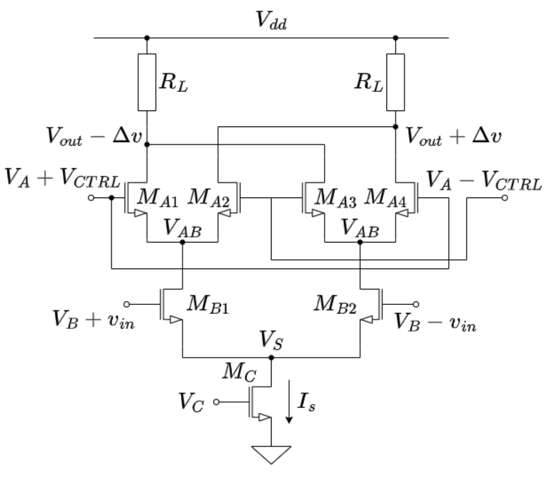

図 1　従来型のギルバートセル

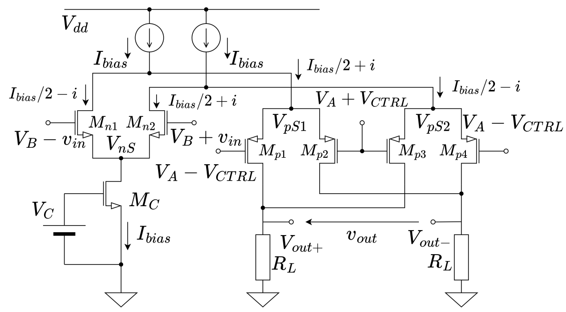

図 2　PMOS を使用した折り返し型ギルバートセル

2.　三端子間に同時に寄生容量がついた場合の小信号等価解析

周波数特性劣化の原因として PMOS についた寄生容量が考えれる。そこで三端子間に寄生容量としてキャパシタを挿入した小信号等価回路を解析することにより寄生容量の影響を検討する。図 3 に計算の際に考えた小信号等価回路を示す。各部に流

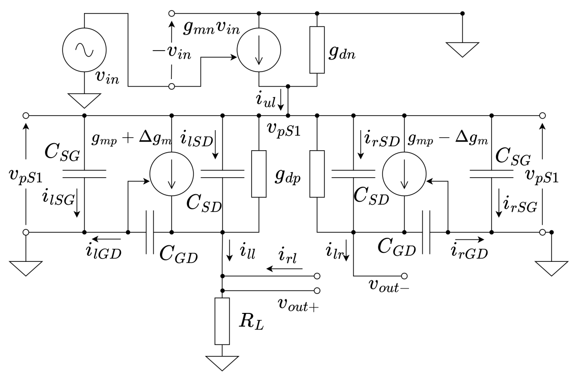

図 3　寄生容量を考慮した小信号等価回路

れる電流が各接点の電位などを用いて

$$
\begin{aligned}
i_{ul} &= g_{mn}v_{in} - g_{dn}v_{pS1} \\
i_{lSG} = i_{rSG} &= j\omega C_{GS}v_{pS1} \\
i_{lGD} &= j\omega C_{GD}v_{out+} \\
i_{rGD} &= j\omega C_{GD}v_{out-} \\
\therefore i_{lGD} + i_{rGD} &= 0 \quad (\because v_{out+} = -v_{out-}) \\
i_{ll} = (g_{mp} + \Delta g_m)v_{pS1} &+ (g_{dp} + j\omega C_{SD})(v_{pS1} - v_{out+}) - i_{lGD} \\
i_{ll} = (g_{mp} - \Delta g_m)v_{pS1} &+ (g_{dp} + j\omega C_{SD})(v_{pS1} - v_{out-}) - i_{rGD}
\end{aligned}
$$

KCL より

$$
\begin{aligned}
i_{ul} &= i_{ll} + i_{lGD} + i_{lSG} + i_{lr} + i_{rGD} + i_{rSG} \\
&= i_{ll} + i_{lr} + 2i_{lSG} \\
g_{mn}v_{in} - g_{dn}v_{pS1} &= 2\left\{g_{mp}v_{pS1} + g_{dp}v_{pS1} + j\omega(C_{SD} + C_{SG})v_{pS1}\right\} \\
v_{pS1} &= \frac{g_{mn}}{2g_{mp} + g_{dn} + 2g_{dp} + j2\omega(C_{SD} + C_{SG})}v_{in}
\end{aligned}
$$

ここで、$g_{mp} \ll g_{dp}, g_{dn}$ を仮定すると

$$
v_{pS1} \approx \frac{g_{mn}}{2\left\{g_{mp} + j\omega(C_{SD} + C_{SG})\right\}} \tag{1}
$$

となる。ここで、負荷抵抗に流れる電流は差動半回路の性質より $i_{lr} = -i_{rl}$ となるので,KCL より

$$
i_{out+} = i_{ll} + i_{rl} = i_{ll} - i_{lr}
$$

である。また、差動半回路であるので対応する電流・電圧は符号が反対で絶対値が等しいので

$$
\begin{aligned}
v_{out} &= v_{out+} - v_{out-} \\
&= R_L(i_{out+} - i_{out-}) \\
&= 2R_L i_{out+}
\end{aligned}
$$

(1) を用いると

$$
\begin{aligned}
v_{out} &= 2R_L\left[2\Delta g_m v_{pS1} - \left\{g_{dp} + j\omega(C_{SD} + C_{GD})\right\}\right] \\
&= \frac{4R_L}{1 + 2R_L\left\{g_{dp} + j\omega(C_{SD} + C_{GD})\right\}}\Delta g_m v_{pS1}
\end{aligned}
$$

ここで、前回のゼミ発表より Δg_m は定数 K を用いて

$$
\Delta g_m = 2KV_{CTRL}
$$

だったので出力は

$$
v_{out} = \frac{4KR_L g_{mn}}{\left\{1 + j2R_L\omega(C_{SD} + C_{GD})\right\}\left\{g_{mp} + j\omega(C_{SD} + C_{SG})\right\}}
$$

と求められた。

3. 負荷にインダクタを負荷した際の周波数特性

4. 新規トポロジの提案

5. おわりに