

連続時間アナログフィルタのデジタル 自動調整法の一提案

ECT-12-038

靳光磊 (ジン コウライ) 陳昊 高川 張雲鵬
小林 春夫 高井伸和 新津葵一 (群馬大学)

Supported by STARC

Outline

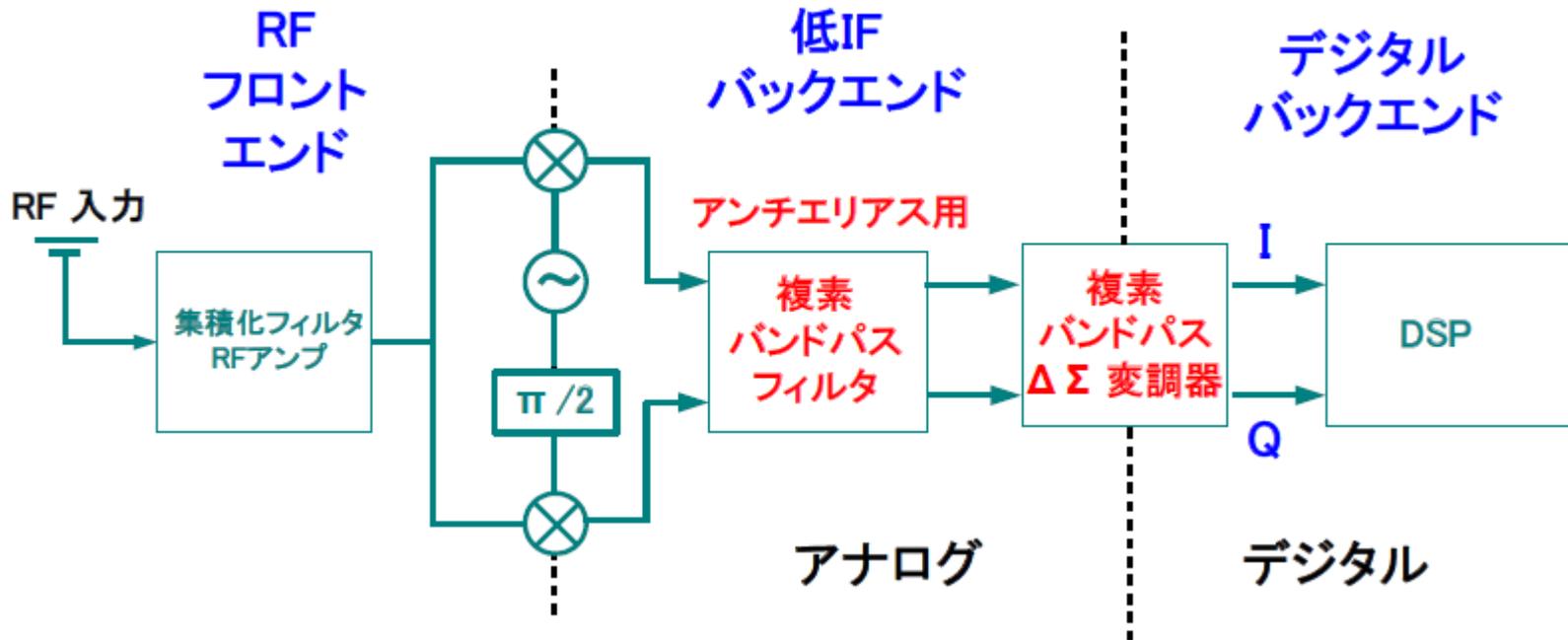
- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- 中心周波数のデジタル調整
- Q値のデジタル調整
- まとめ

Outline

- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- 中心周波数のデジタル調整
- Q値のデジタル調整
- まとめ

研究背景

携帯電話、無線LAN、Bluetooth等
IF受信機



Gm-Cバンドパスフィルタ特性の連続調整が必要

研究目的

- 微細CMOS用いて高周波, 低消費電力, デジタル制御できるGm-C/バンドパスフィルタを構成
- アナログバンドパスフィルタの中心周波数とQ値のデジタル調整を実現

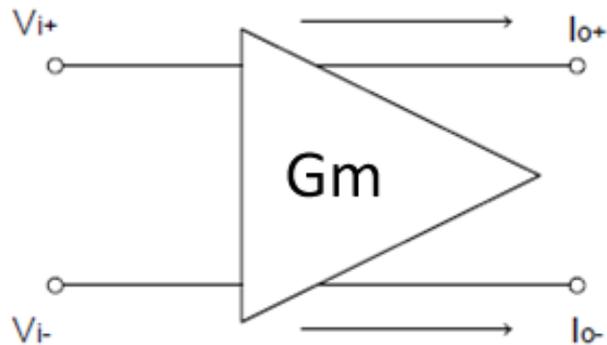
Outline

- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- 中心周波数のデジタル調整
- Q値のデジタル調整
- まとめ

OTA回路とGm-C 積分器

入力電圧

出力電流

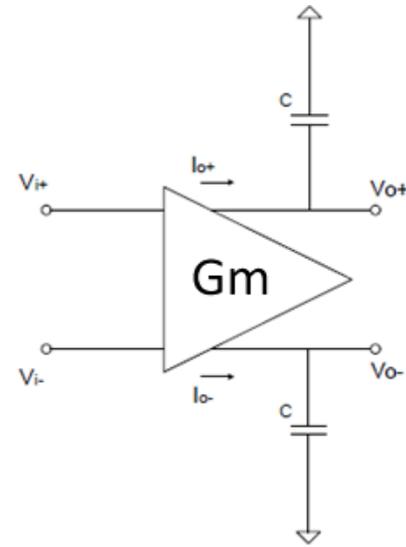


OTA回路

$$I_o = I_{o+} - I_{o-} = gm(V_{i+} - V_{i-})$$



Gm-Cバンドパスフィルタの基本コンポーネント



Gm-C 積分器

$$V_{o+} = \frac{I_{o+}}{sC} = \frac{gm}{2sC} (V_{i+} - V_{i-})$$

$$V_{o-} = \frac{I_{o-}}{sC} = -\frac{gm}{2sC} (V_{i+} - V_{i-})$$

$$V_o = V_{o+} - V_{o-} = \frac{gm}{sC} V_i$$

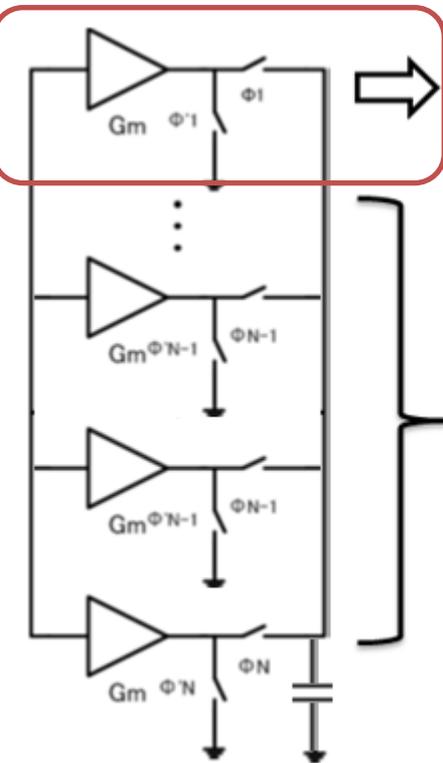
PWM用いたGm-C 積分器の小数部分調整

Gm-C積分器ノイズ特性はキャパシタで決まる



Cを固定し、Gm値を調整

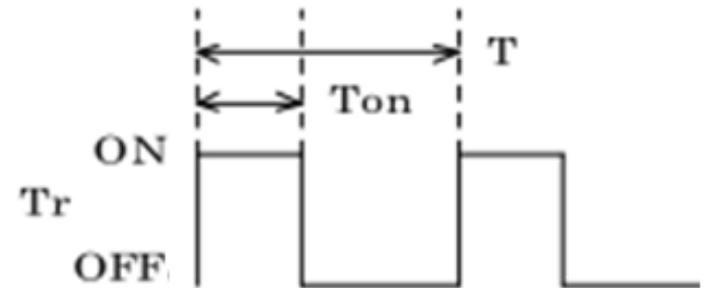
微細CMOSで実現, 低電圧, デジタル制御できる



Factional part tuning



Integral part tuning



$$\frac{I_{out}}{V_{in}} = D \cdot Gm$$

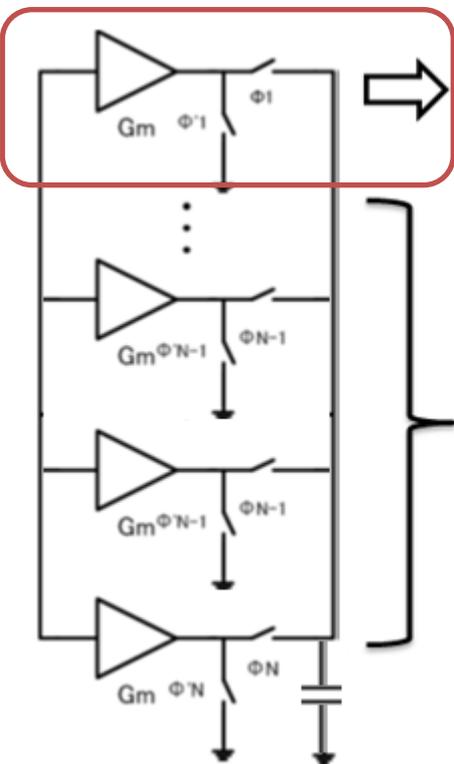
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

スイッチングGm-C積分器

PWMの調整方法

$\Delta\Sigma$ 用いたGm-C 積分器の小数部分調整

微細CMOSで実現, 低電圧, デジタル制御できる

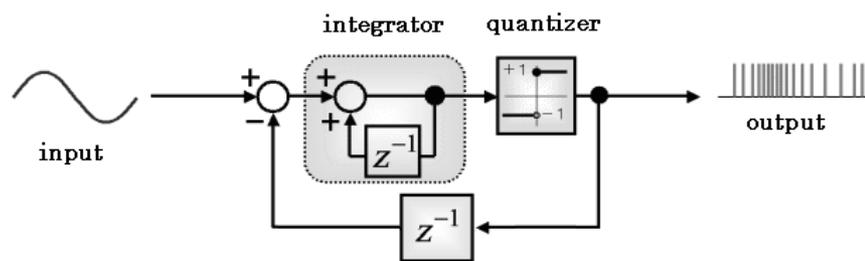


Fractional part tuning

Integral part tuning



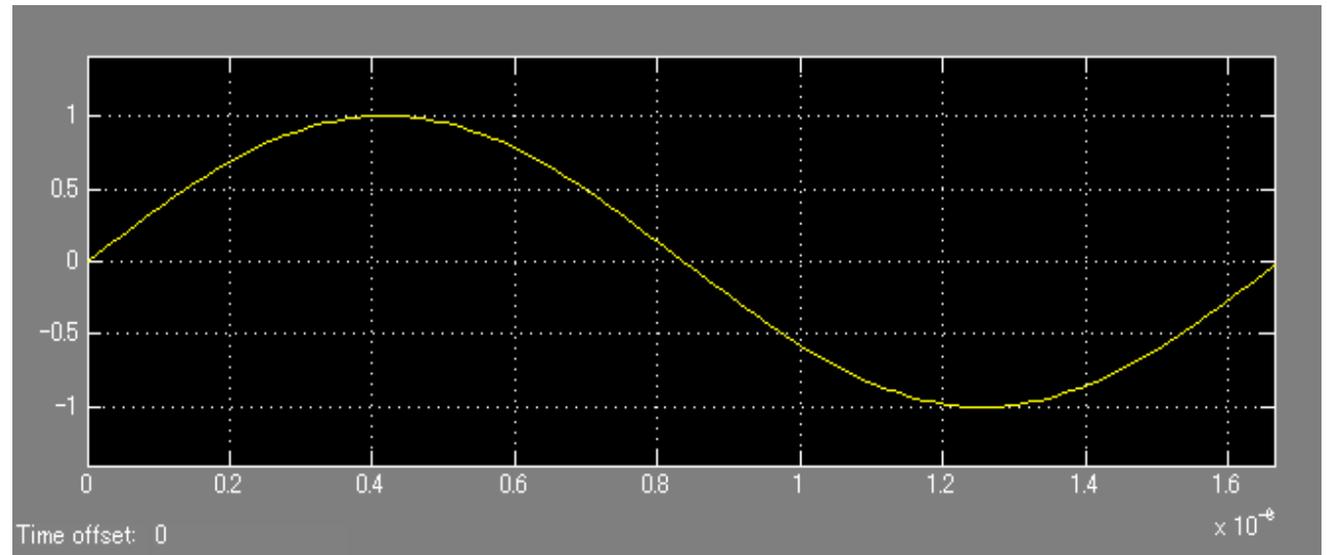
高精度を調整するために
 $\Delta\Sigma$ 変換器を使用



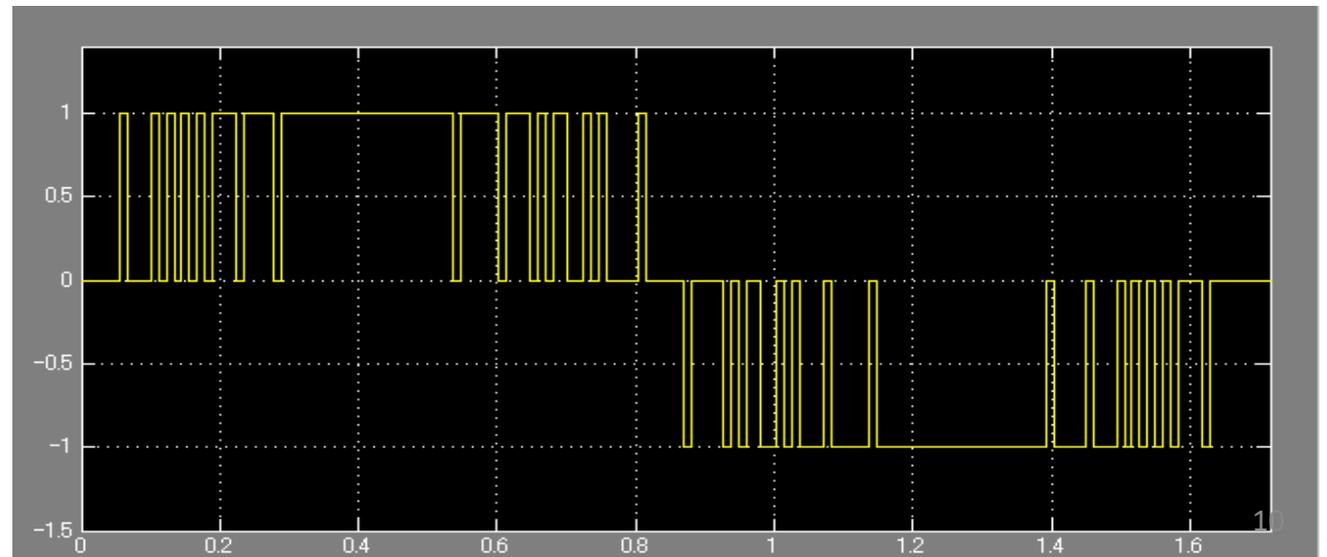
1bit $\Delta\Sigma$ 変換器

スイッチングGm-C積分器

入力信号
の一周期分

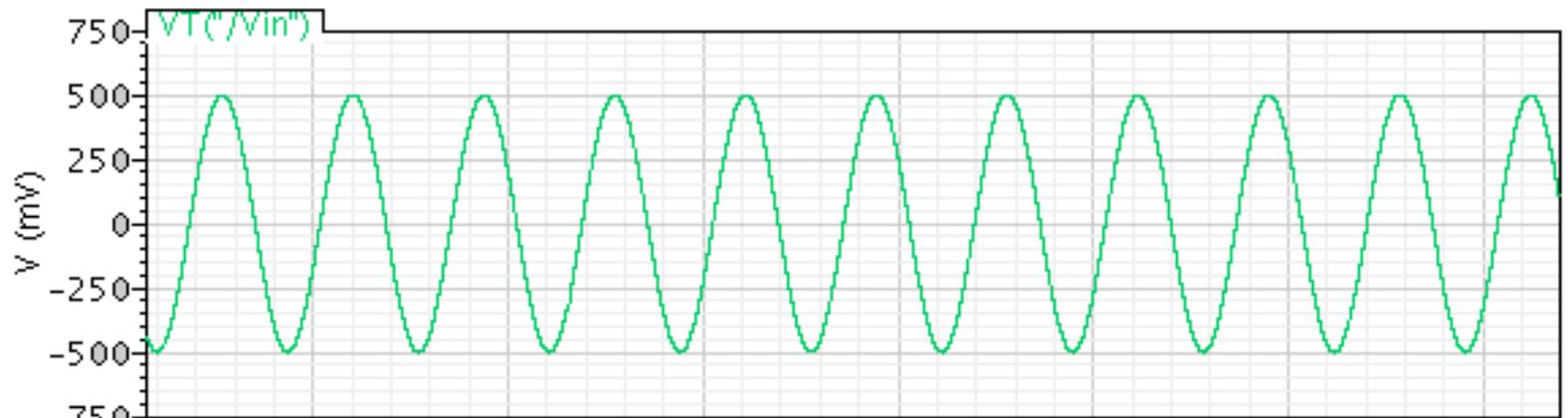


出力信号
の一周期分

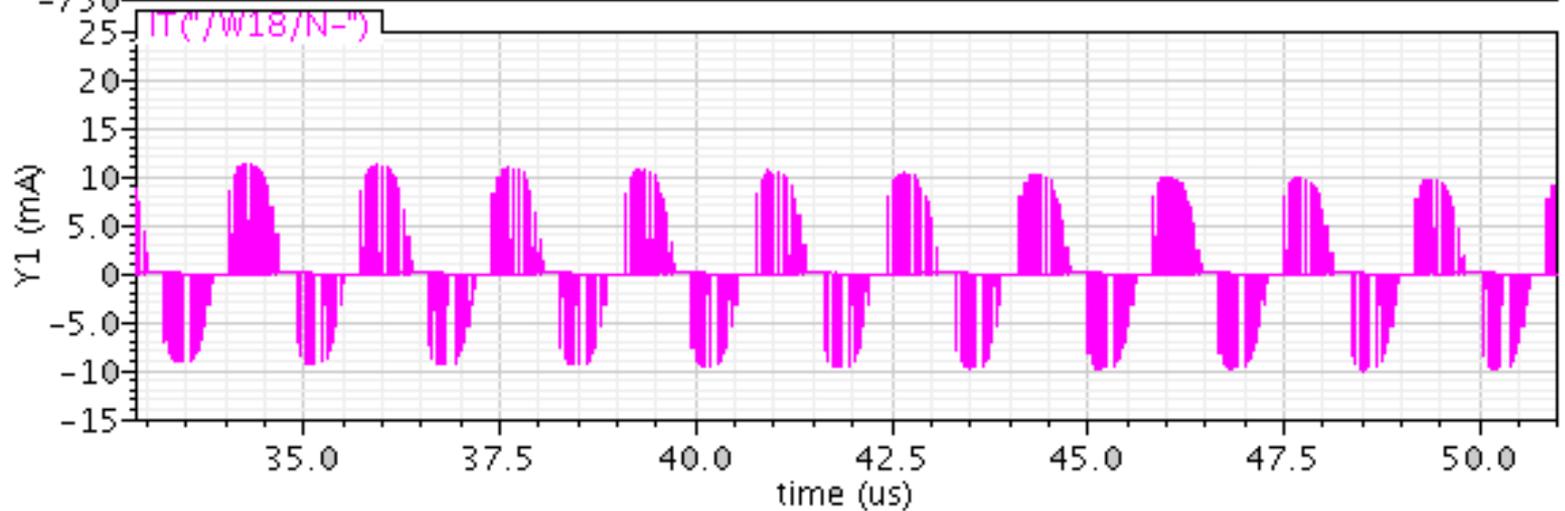


$\Delta\Sigma$ を通じた信号の波形

Gm-C積分器の入力信号



Gm-C積分器の出力電流



$\Delta\Sigma$ を用いたGm-C 積分器小数部分のシミュレーション結果

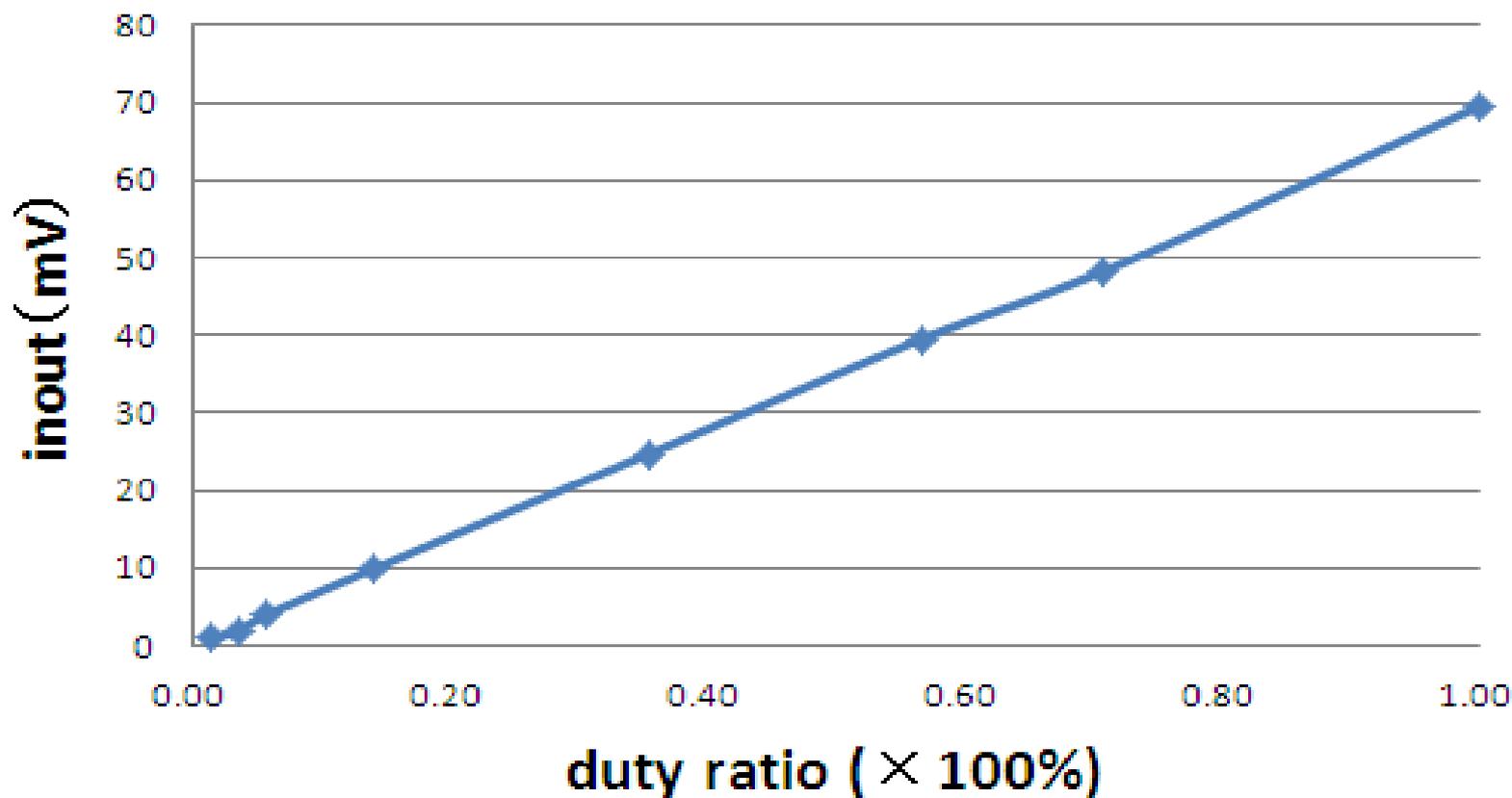
シミュレーション
パラメータ

$$V_{in} = 500mV$$

$$f = 598kHz$$

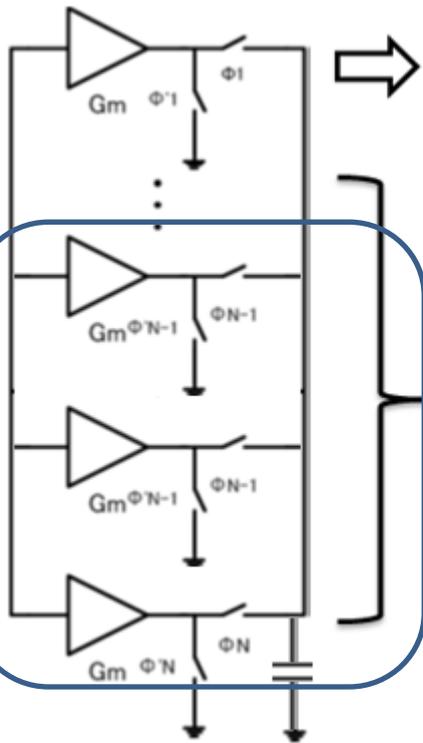
$$C = 1pF$$

$$1/Gm = 2 \times 10^6 S$$



Switched Gm-C 積分器の整数部分調整

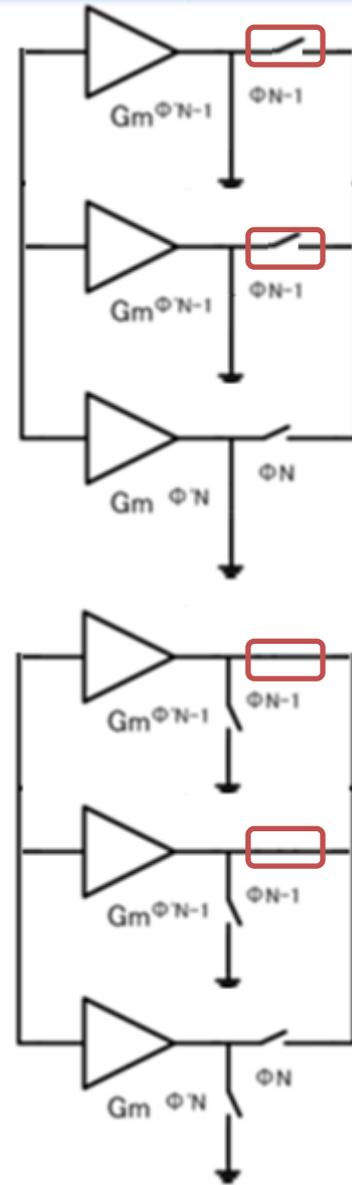
微細CMOSで実現, 低電圧, デジタル制御できる



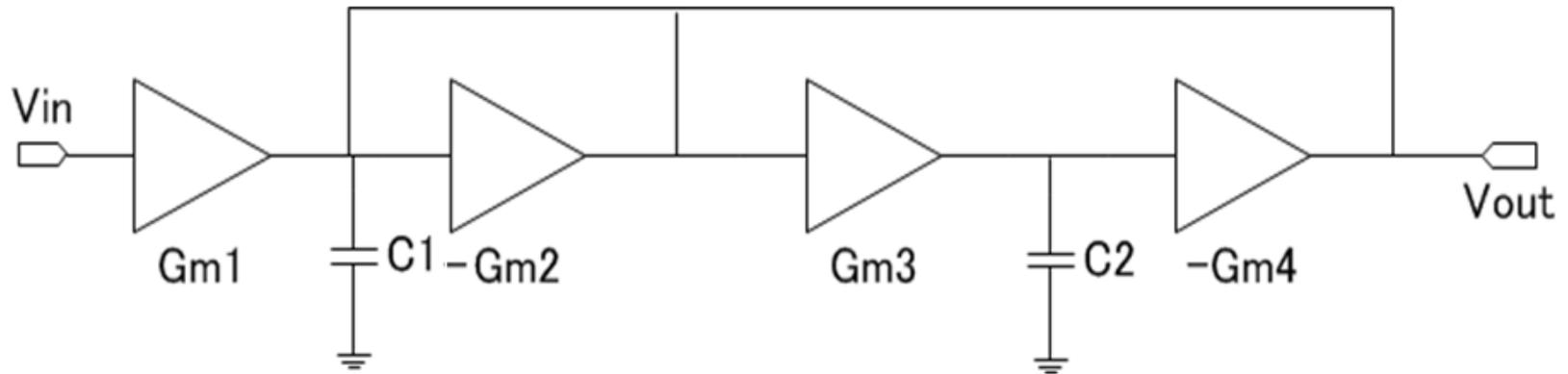
スイッチングGm-C積分器

Fractional part tuning

Integral part tuning



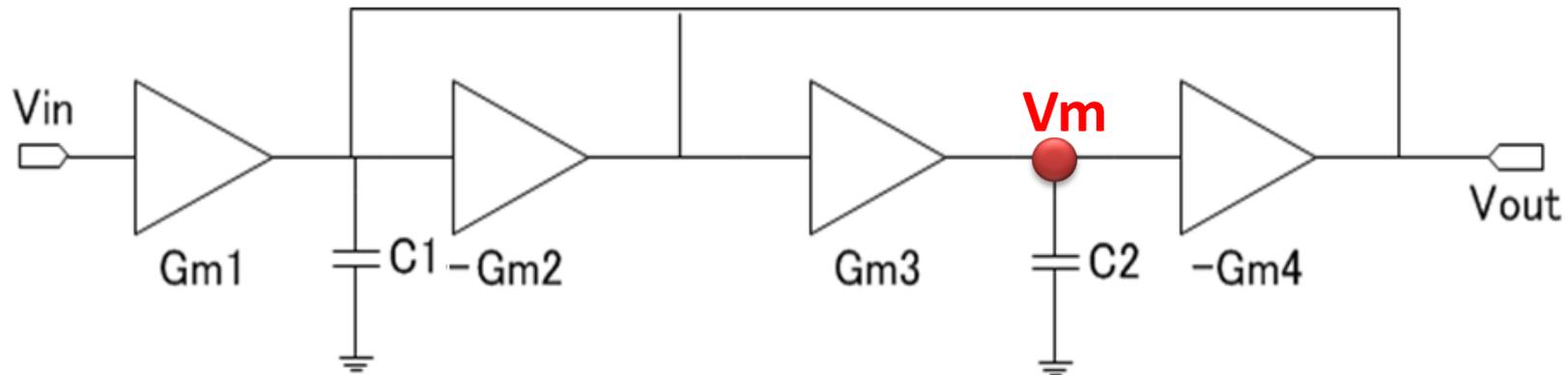
Gm-C二次バンドパスフィルタ



$$H(s) = \frac{Gm_1 C_2 s}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 Gm_2 + Gm_3 Gm_4} \quad \Rightarrow \quad H(s) = \frac{K \omega_0 s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4}{C_1 C_2}} \quad Q = \sqrt{\frac{C_1 Gm_3 Gm_4}{C_2 Gm_2^2}} \quad K = \sqrt{\frac{C_2 Gm_1^2}{C_1 Gm_3 Gm_4}}$$

二次ローパスフィルタ



フィルタのもう一つのノードを見れば

$$H''(s) = \frac{V_m}{V_{in}} = \frac{Gm_1 Gm_3}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 Gm_2 + Gm_3 Gm_4}$$



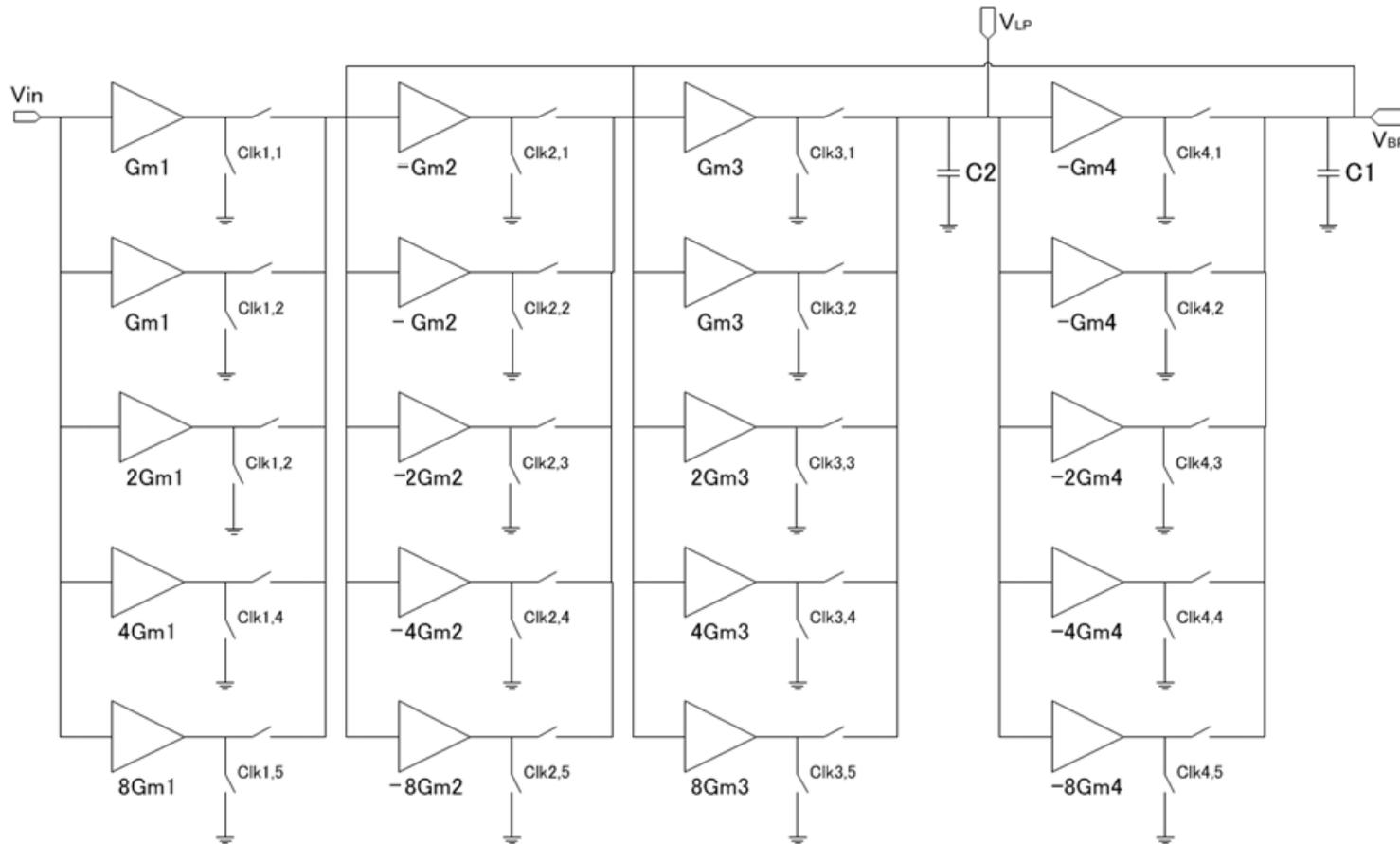
$$H(s) = \frac{K \omega_0}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4}{C_1 C_2}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 Gm_3 Gm_4}{C_2 Gm_2^2}}$$

$$K = \sqrt{\frac{Gm_1^2 Gm_3}{C_1 C_2 Gm_4}}$$

Switched二次 Gm-Cフィルタ



$$Gm_1 = N_1 gm$$

$$Gm_2 = N_2 gm$$

$$Gm_3 = N_3 gm$$

$$Gm_4 = N_4 gm$$

$$C_1 = M_1 C$$

$$C_2 = M_2 C$$

$$\omega_0 = \frac{N_3 N_4}{\sqrt{M_1 M_2}} \cdot \frac{gm}{C}$$

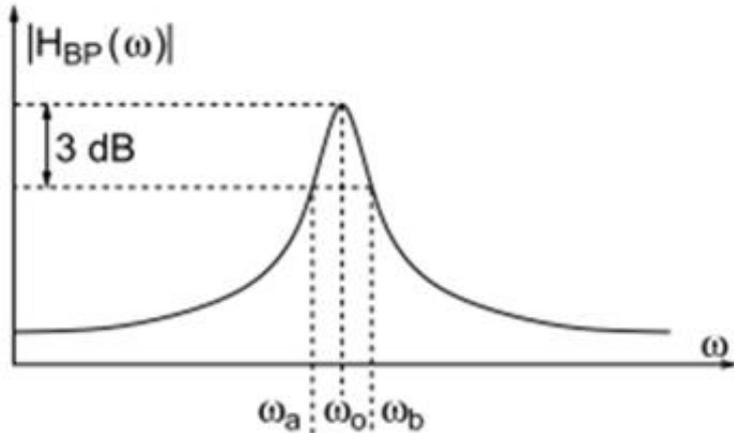
$$Q = \sqrt{\frac{M_1 N_3 N_4}{M_2 N_2^2}}$$

$$K = \sqrt{\frac{M_2 N_1^2}{M_1 N_3 N_4}}$$

Outline

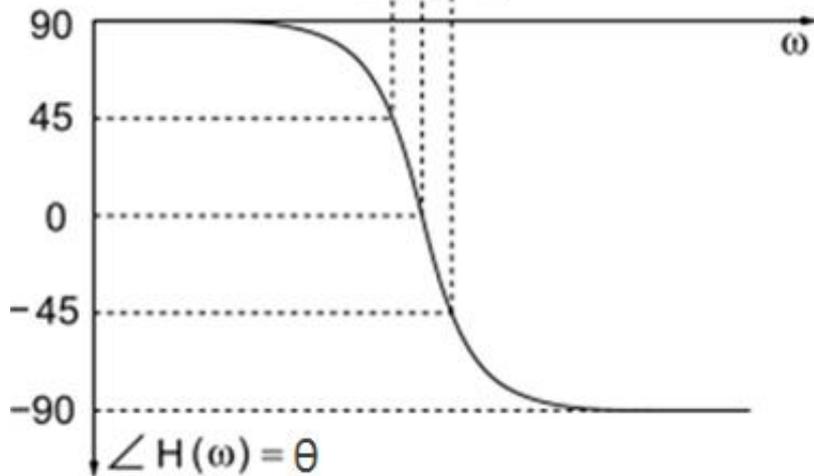
- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- **中心周波数のデジタル調整**
- Q値のデジタル調整
- まとめ

2次バンドパスフィルタの周波数特性



振幅特性

$$H(s) = \frac{Gm_1 C_2 s}{s^2 C_1 C_2 + s C_2 Gm_2 + Gm_3 Gm_4}$$



位相特性

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega_i \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega_i^2)}$$

中心周波数 ω_0 で $\theta = 0$ を利用

提案する中心周波数自動調整のアルゴリズム

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega\omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4}{C_1 C_2}}$$

① $\theta < 0 \rightarrow \omega_0 < \omega$

中心周波数を
大きくする



Gm3, Gm4
を大きくする

② $\theta = 0 \rightarrow \omega_0 = \omega$

調整必要なし

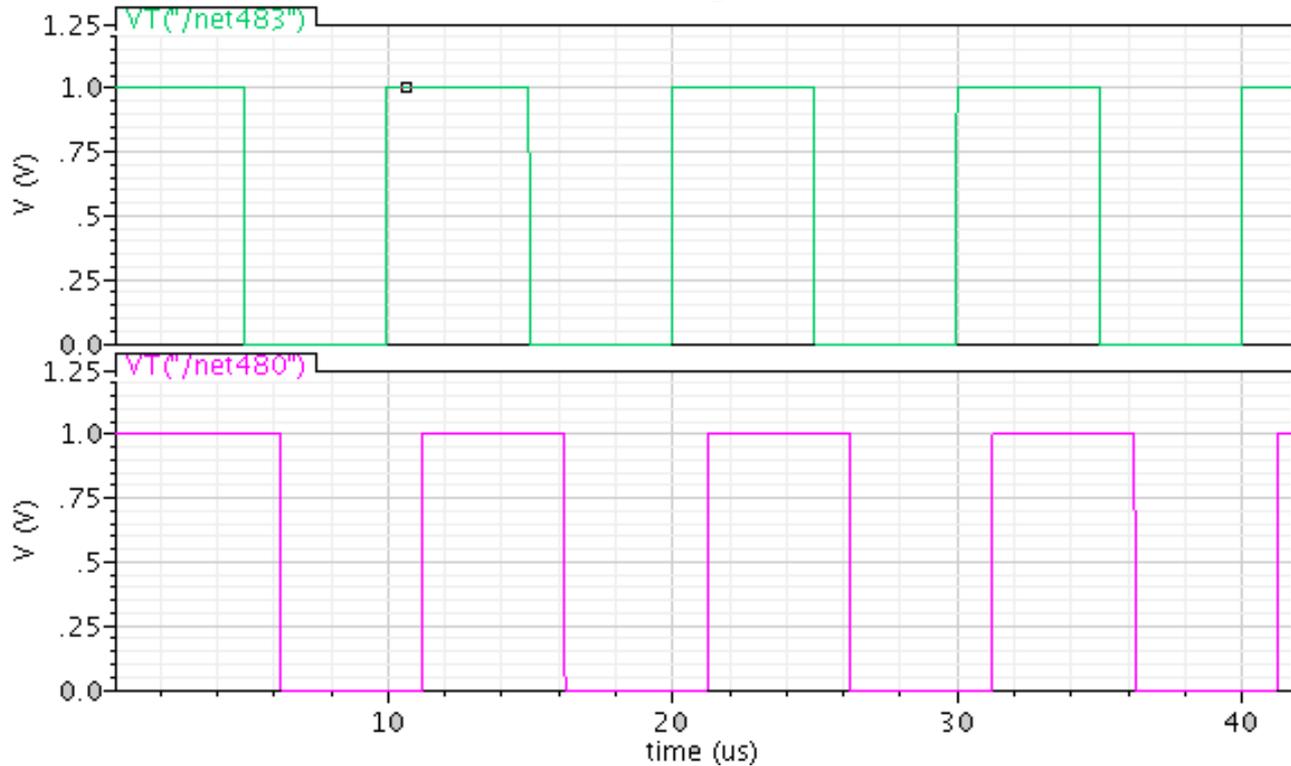
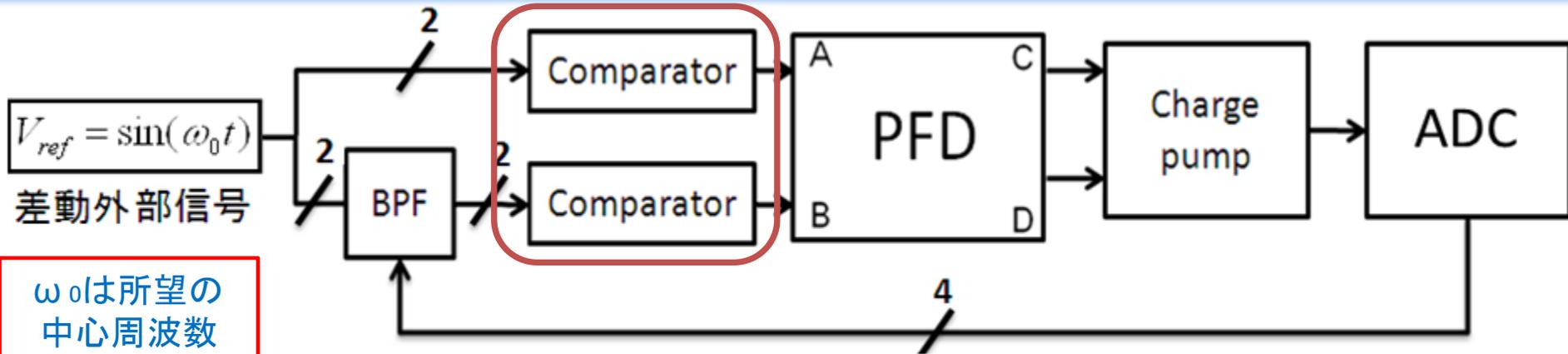
③ $\theta > 0 \rightarrow \omega_0 > \omega$

中心周波数を
小さくする



Gm3, Gm4
を小さくする

コンパレータに通した波形



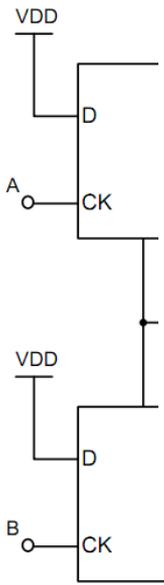
提案する中心周波数自動調整法の構成

$V_{ref} = \sin(\omega_0 t)$
差動外部

A

ω_0 は所望
中心周波

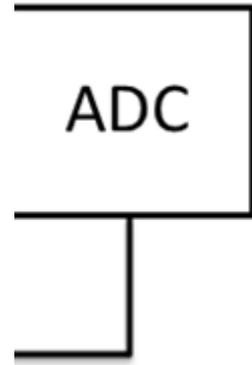
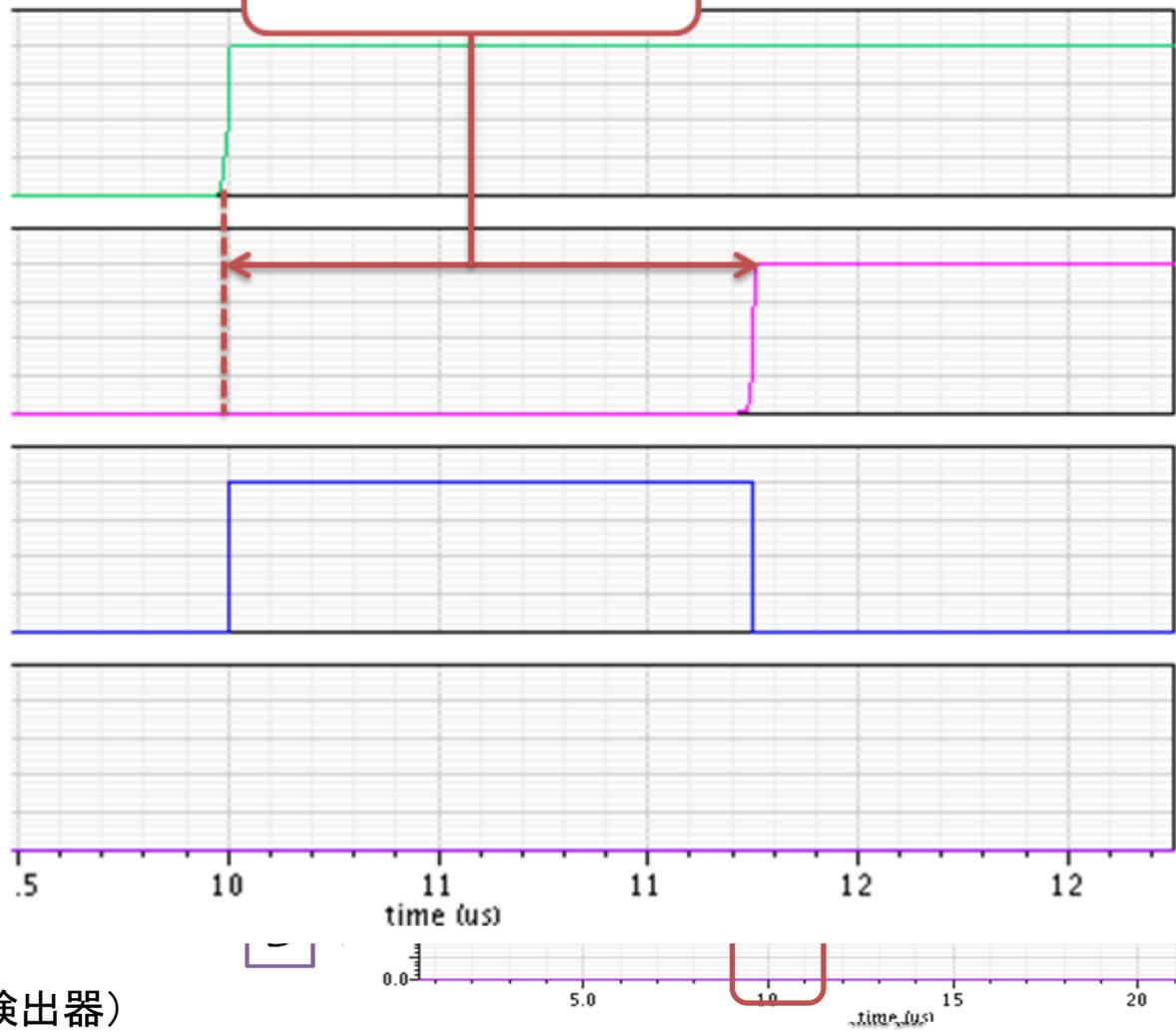
B



C

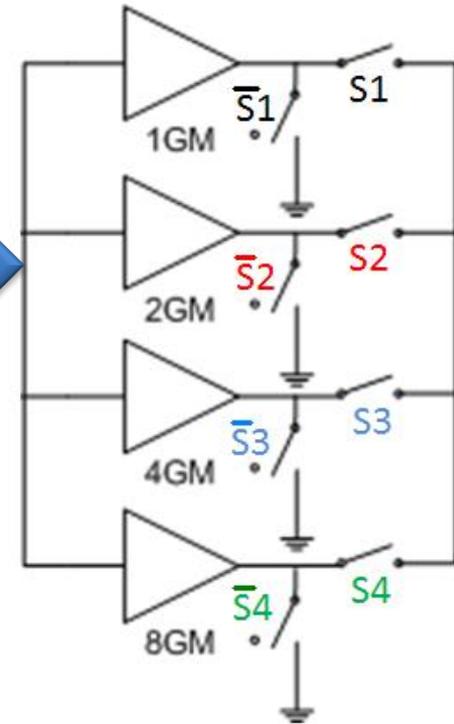
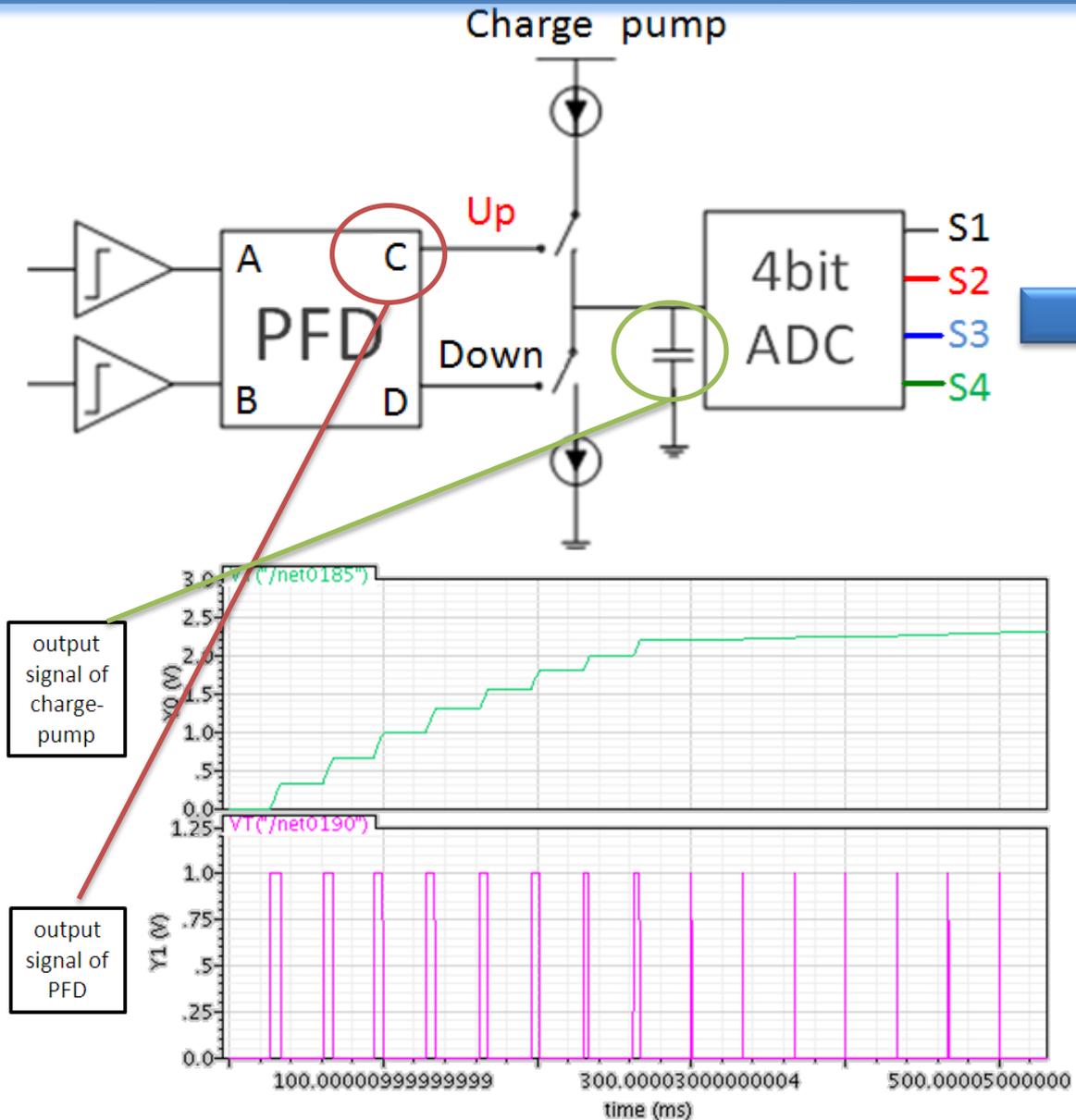
D

位相が遅れ



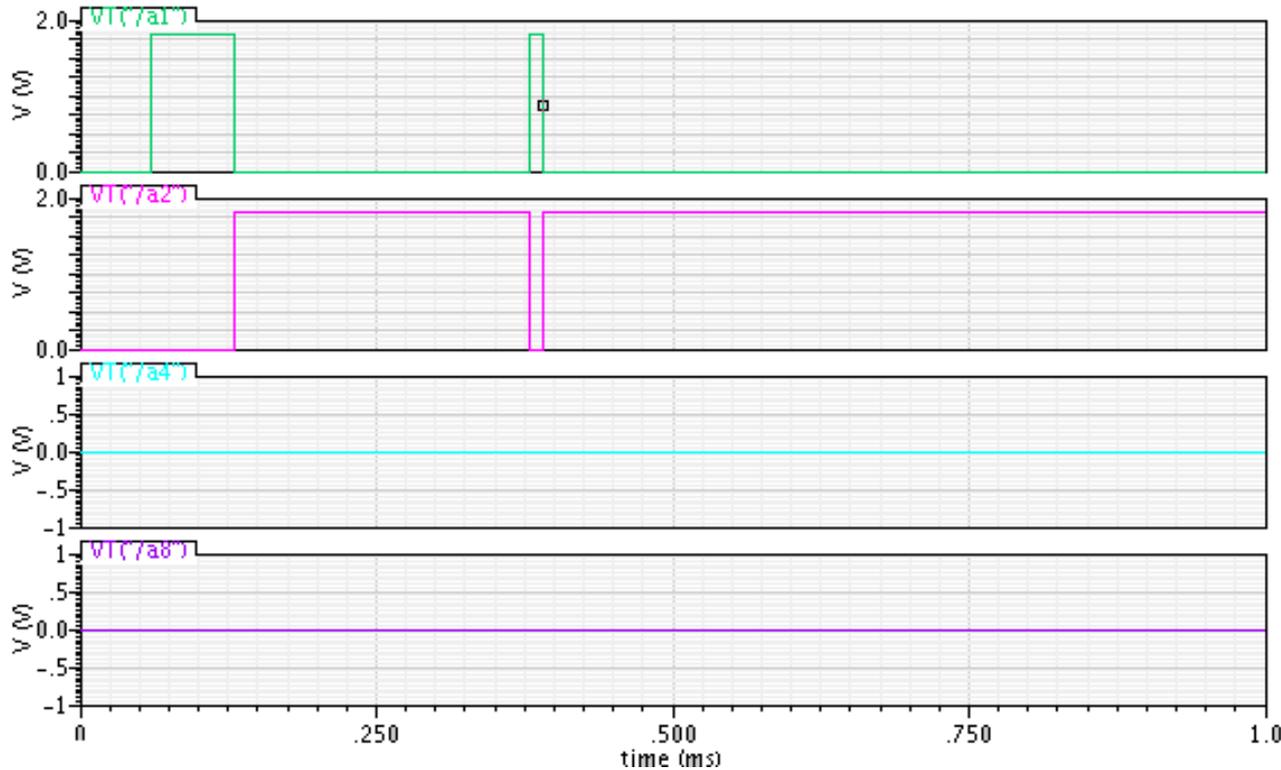
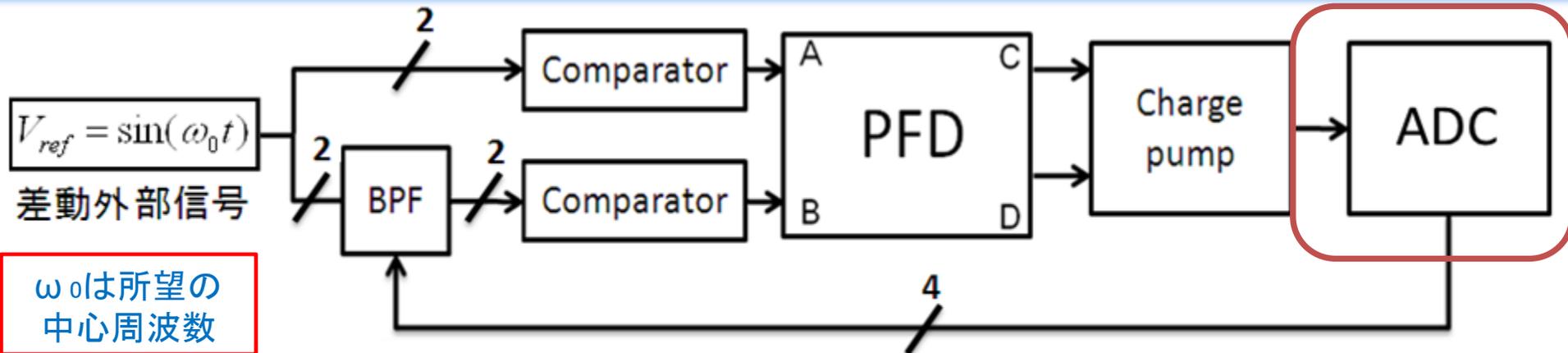
PFD(位相周波数検出器)

チャージポンプの動作



Gm3,Gm4の
スイッチ部を
制御する

ADCの制御信号

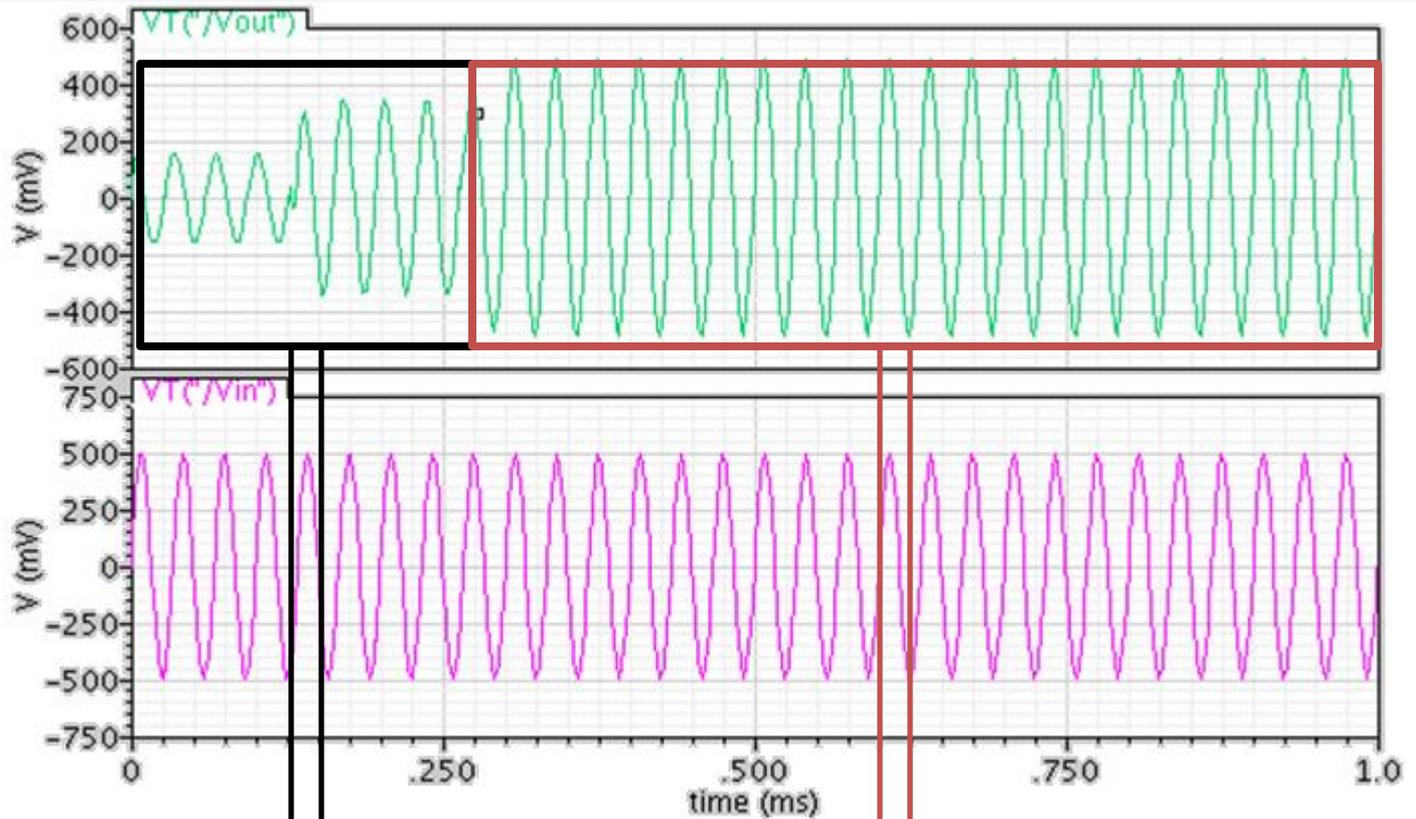


$$\left(\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4}{C_1 C_2}} \right)$$

入出力波形

出力
Vout

入力
Vref



回路は未調整
状態の出力電
圧は減衰された

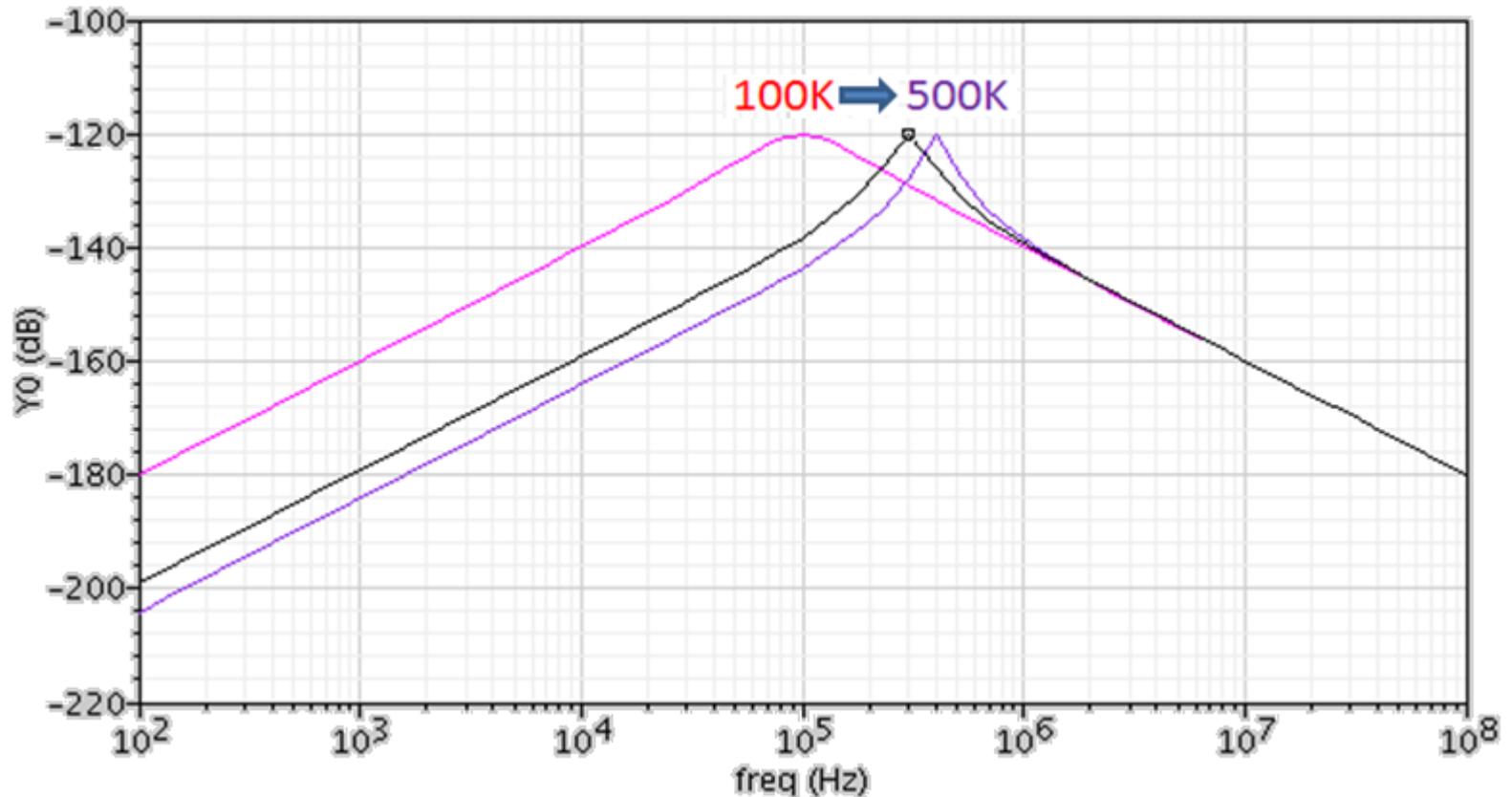
回路を調整され
た後の出力電圧

Band-pass filter 中心周波数自動調整のシミュレーション結果

シミュレーション
パラメータ

$$G_m = 5 \times 10^{-5} S \quad C = 1.59 \text{ pF}$$

$$N_1 = N_2 = 2 \quad M_1 = M_2 = 1 \quad 0 \leq N_3 = N_4 \leq 15$$

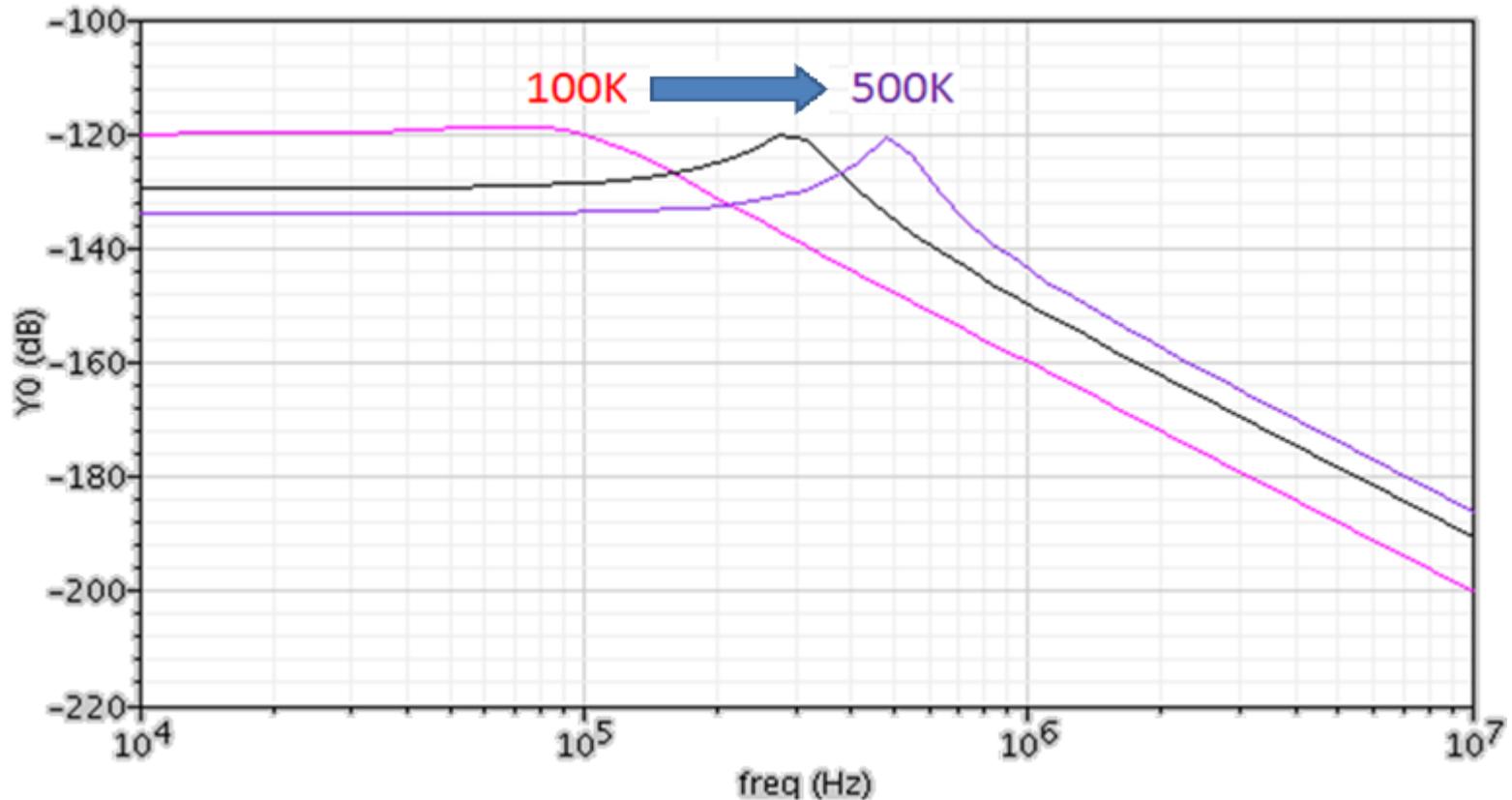


Low-pass filter 中心周波数自動調整のシミュレーション結果

シミュレーション
パラメータ

$$G_m = 5 \times 10^{-5} S \quad C = 1.59 \text{ pF}$$

$$N_1 = N_2 = 2 \quad M_1 = M_2 = 1 \quad 0 \leq N_3 = N_4 \leq 15$$



Outline

- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- 中心周波数のデジタル調整
- **Q値のデジタル調整**
- まとめ

提案するQ値自動調整のアルゴリズム

提案手法

$$H(\omega_0) = \frac{Gm_1}{Gm_2} = \sqrt{\frac{Gm_1^2 C_2}{Gm_3 Gm_4 C_1}} \cdot \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4 C_1}{Gm_2^2 C_2}} = K \cdot Q$$

ω_0 は中心周波数

$$Q = \sqrt{\frac{M_1 N_3 N_4}{M_2 N_2^2}} \quad K = \sqrt{\frac{M_2 N_1^2}{M_1 N_3 N_4}}$$

ω_0 は Gm_3, Gm_4
で決める

K は Gm_1, Gm_3, Gm_4
で決める

中心周波数を一定

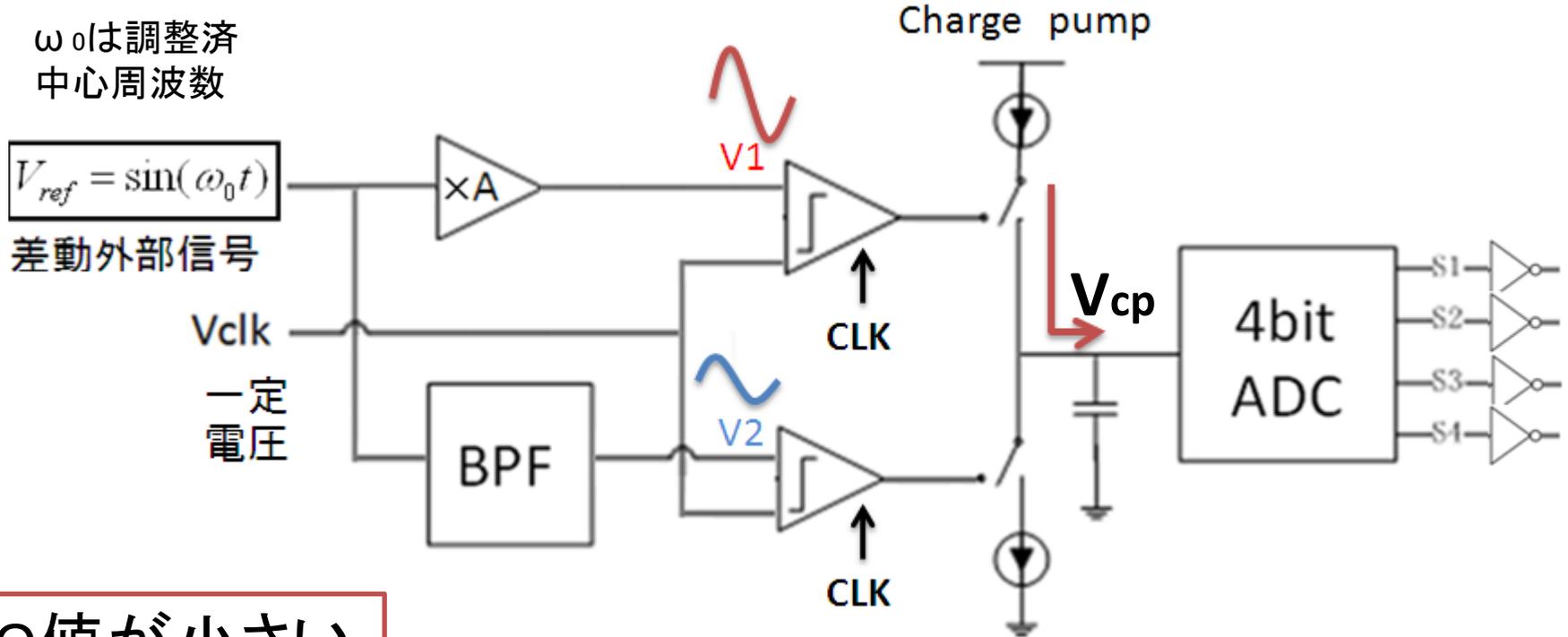
K を一定



Q値は振幅ゲイン
により調整

$$|H(j\omega_0)| = Q \cdot K$$

Q値を大きく調整する



Q値が小さい

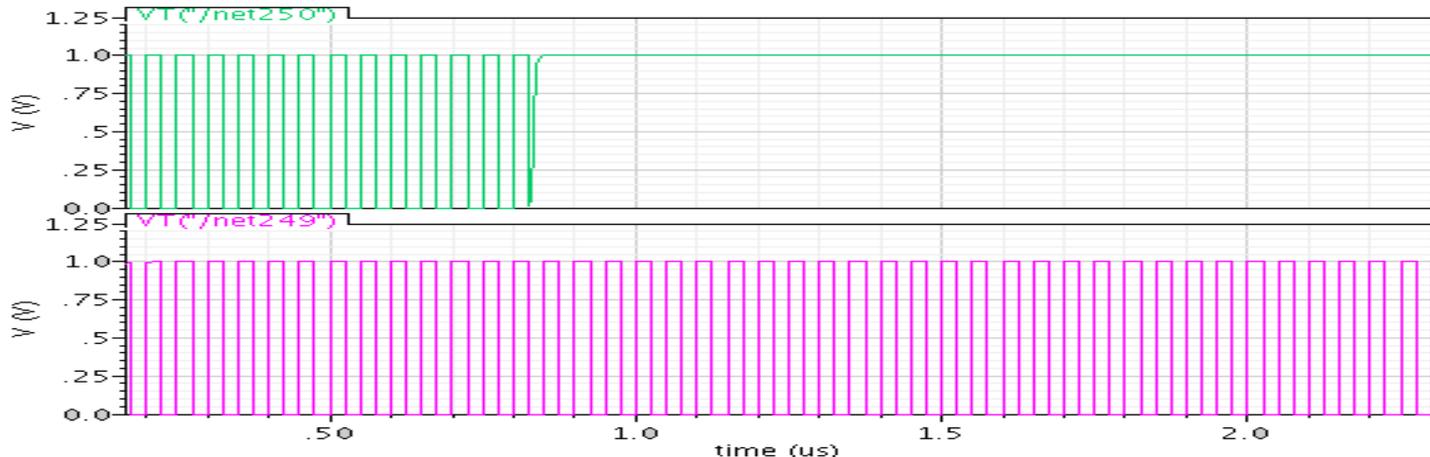
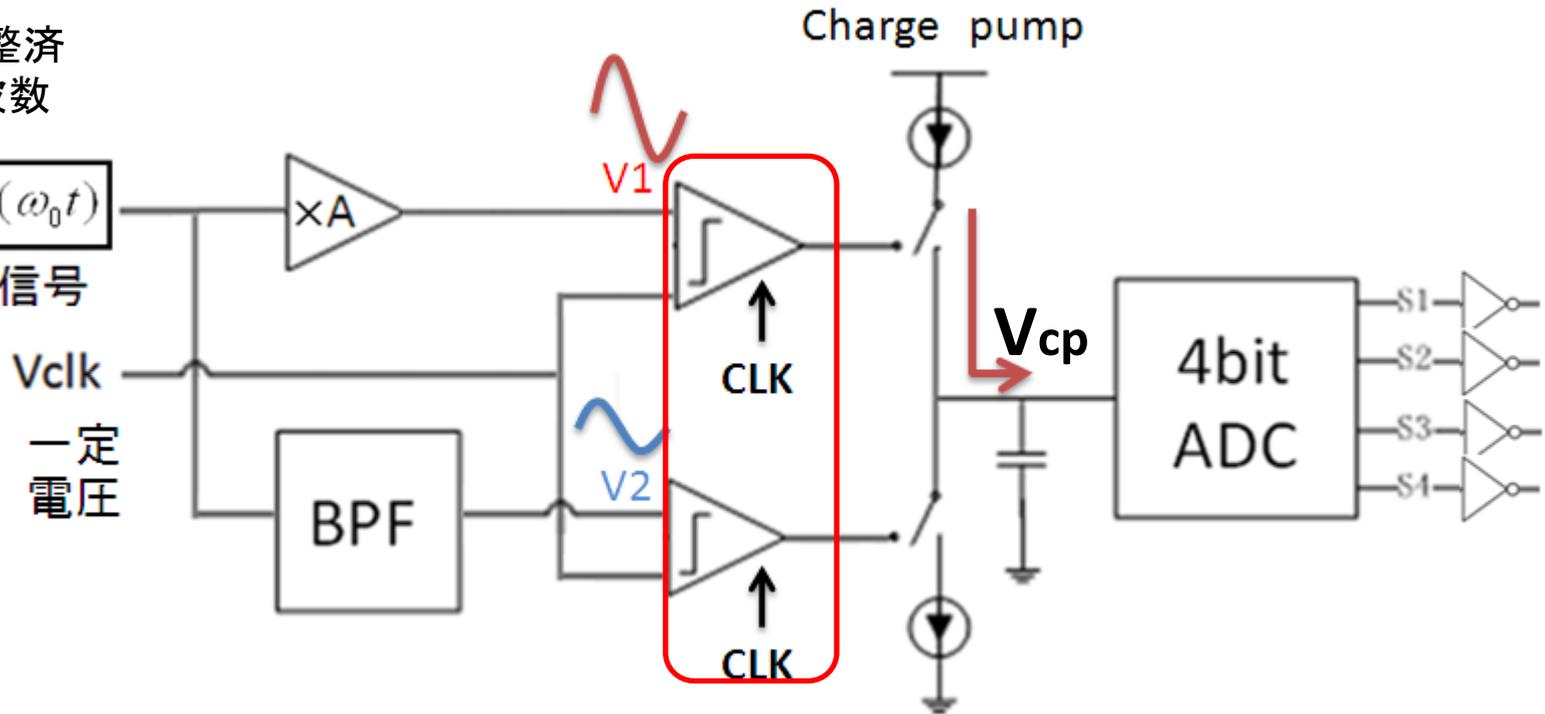
$V_1 > V_2$ \longrightarrow V_{cp} が大きく \longrightarrow Gm_2 が小さく

$\left(Q = \sqrt{\frac{C_1 Gm_3 Gm_4}{C_2 Gm_2^2}} \right)$ $Q \propto (1/Gm_2)$ \longrightarrow Qが大きくなる

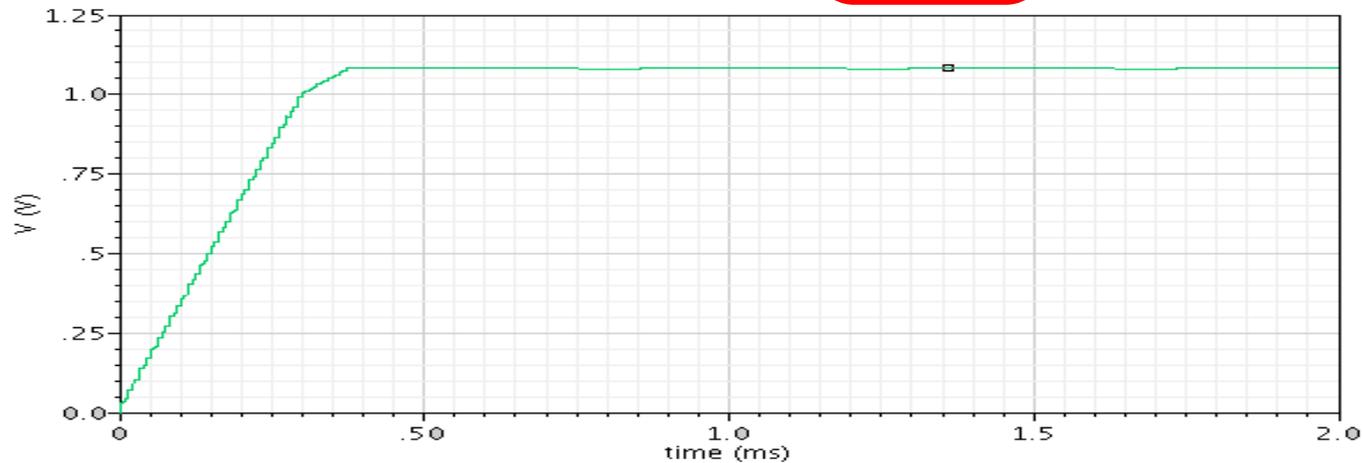
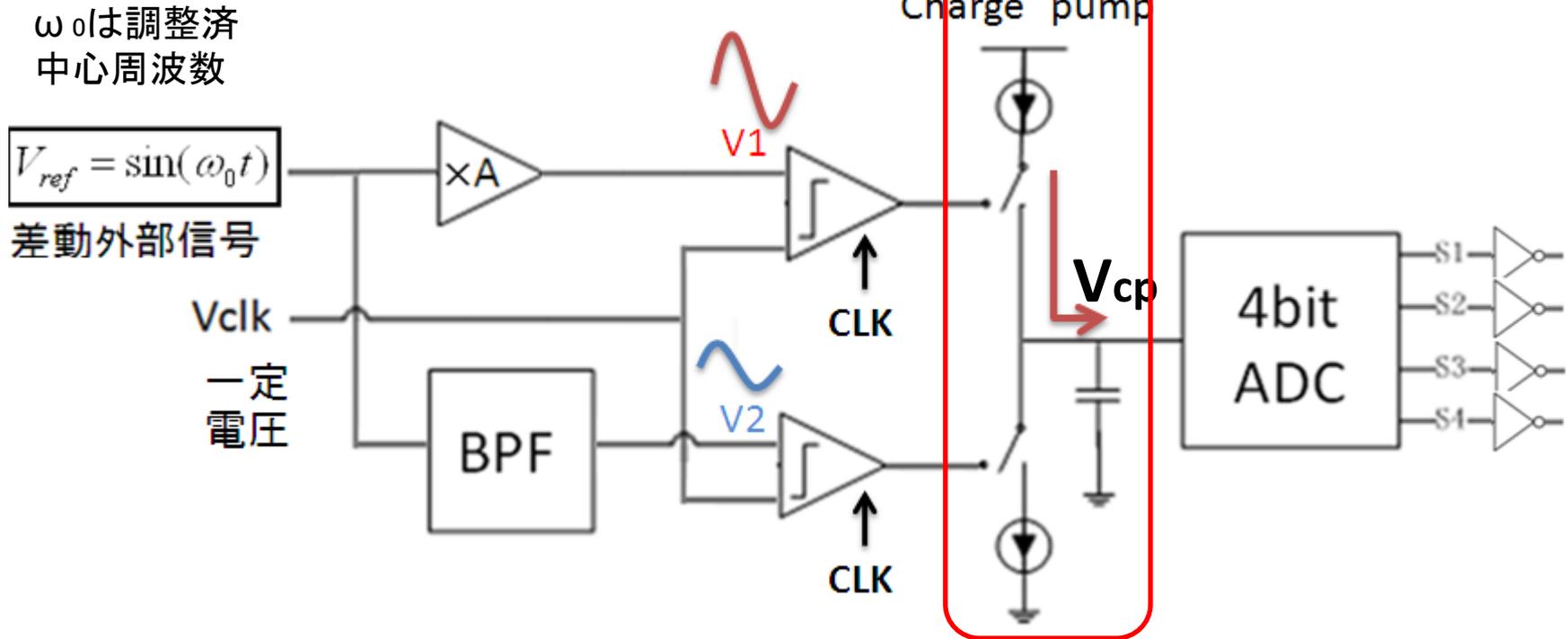
コンパレータの出力

ω_0 は調整済
中心周波数

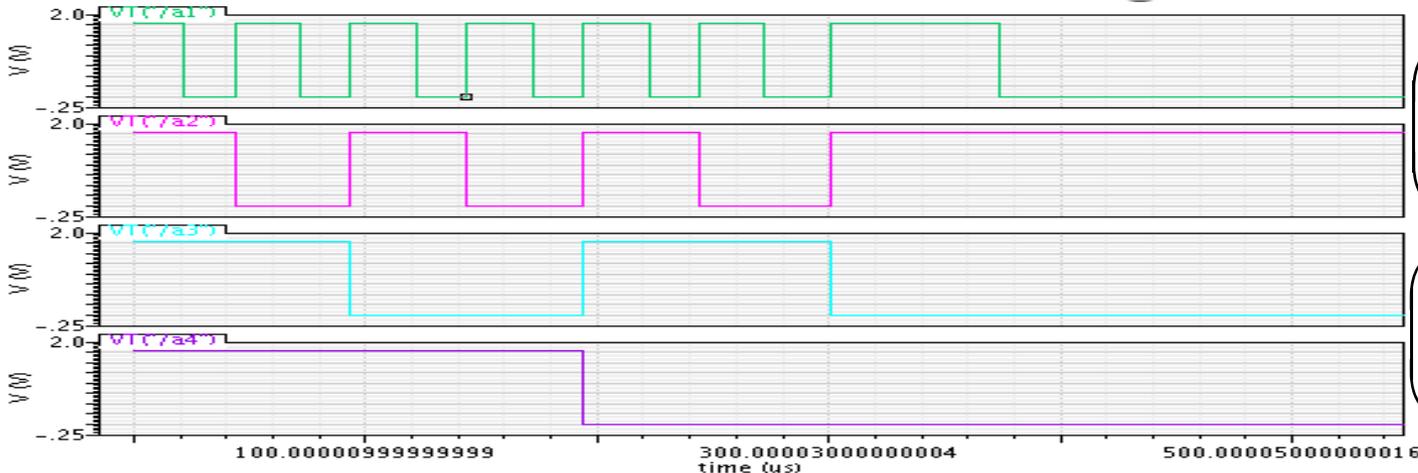
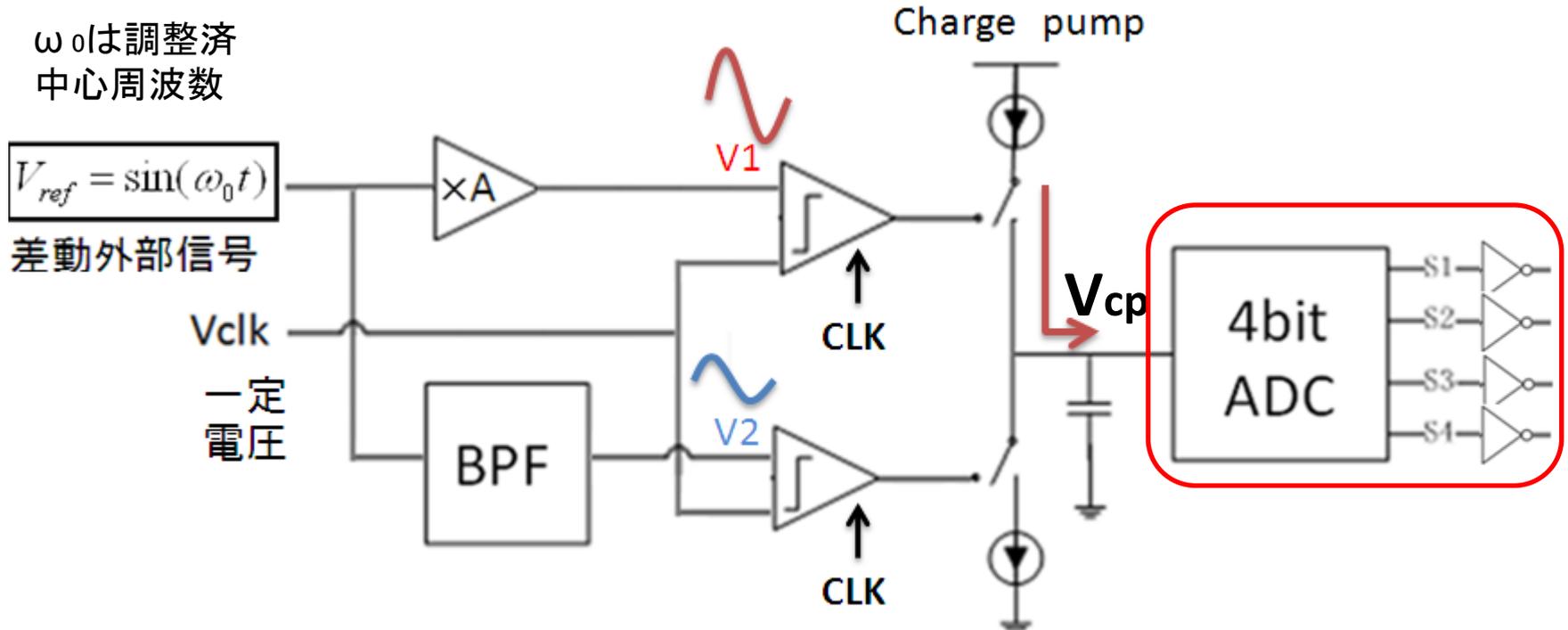
$V_{ref} = \sin(\omega_0 t)$
差動外部信号



チャージポンプの出力



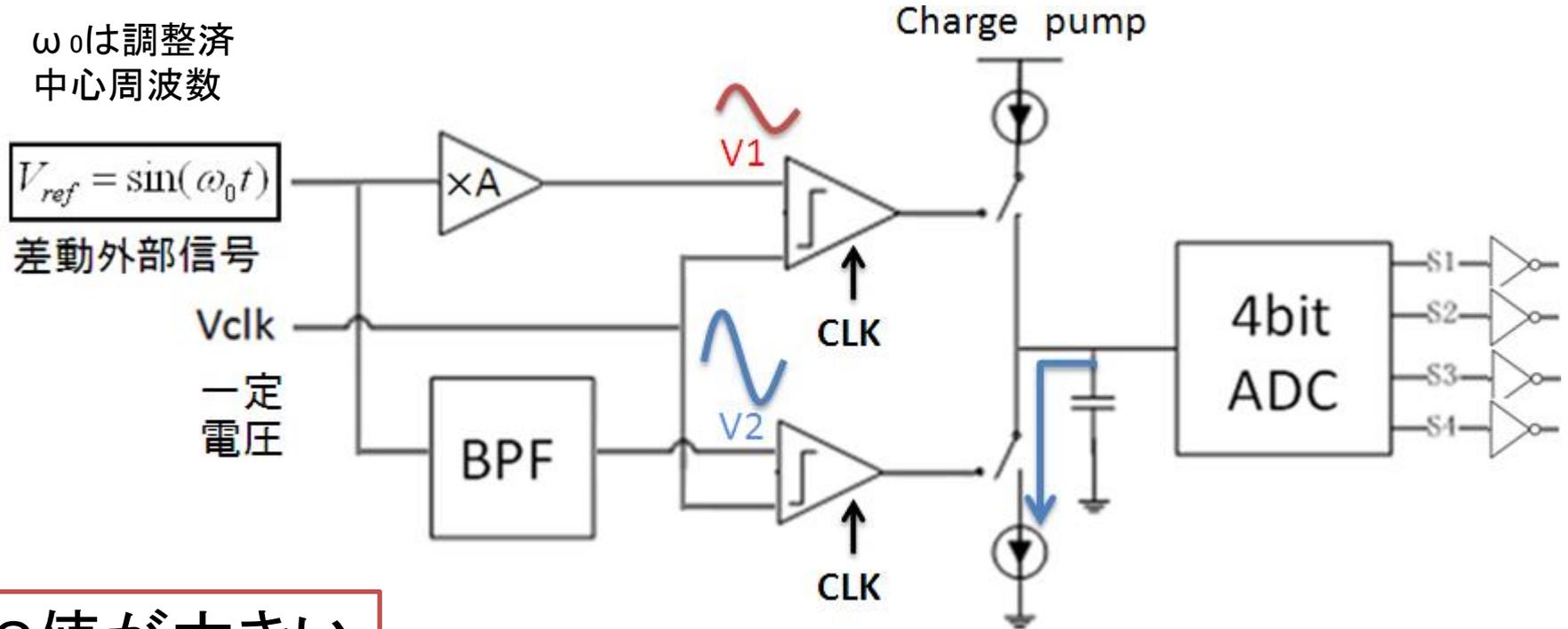
ADCの制御信号



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Gm_3 Gm_4}{C_1 C_2}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 Gm_3 Gm_4}{C_2 Gm_2^2}}$$

提案するQ値自動調整法の構成



Q値が大きい

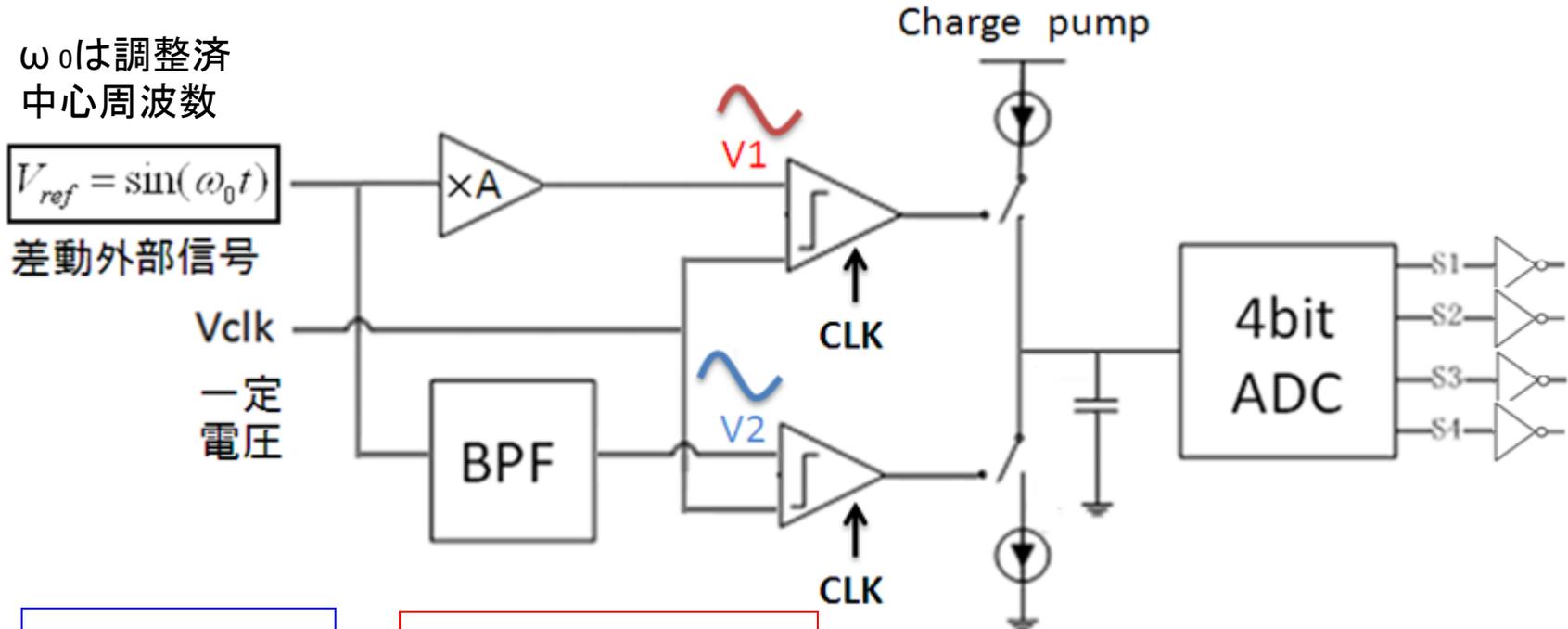
$V_1 < V_2$ \longrightarrow V_{cp} が小さく \longrightarrow Gm_2 が大きく

$$Q = \sqrt{\frac{C_1 Gm_3 Gm_4}{C_2 Gm_2^2}}$$

$Q \propto (1/Gm_2)$

Qが小さくなる

Q値を小さく調整する



$$V_1 = AV_{ref}$$

$$V_2 = Q \cdot KV_{ref}$$

$V_1 = V_2$ のとき



$$Q \cdot KV_{ref} = AV_{ref} \Rightarrow Q = \frac{1}{K} A$$

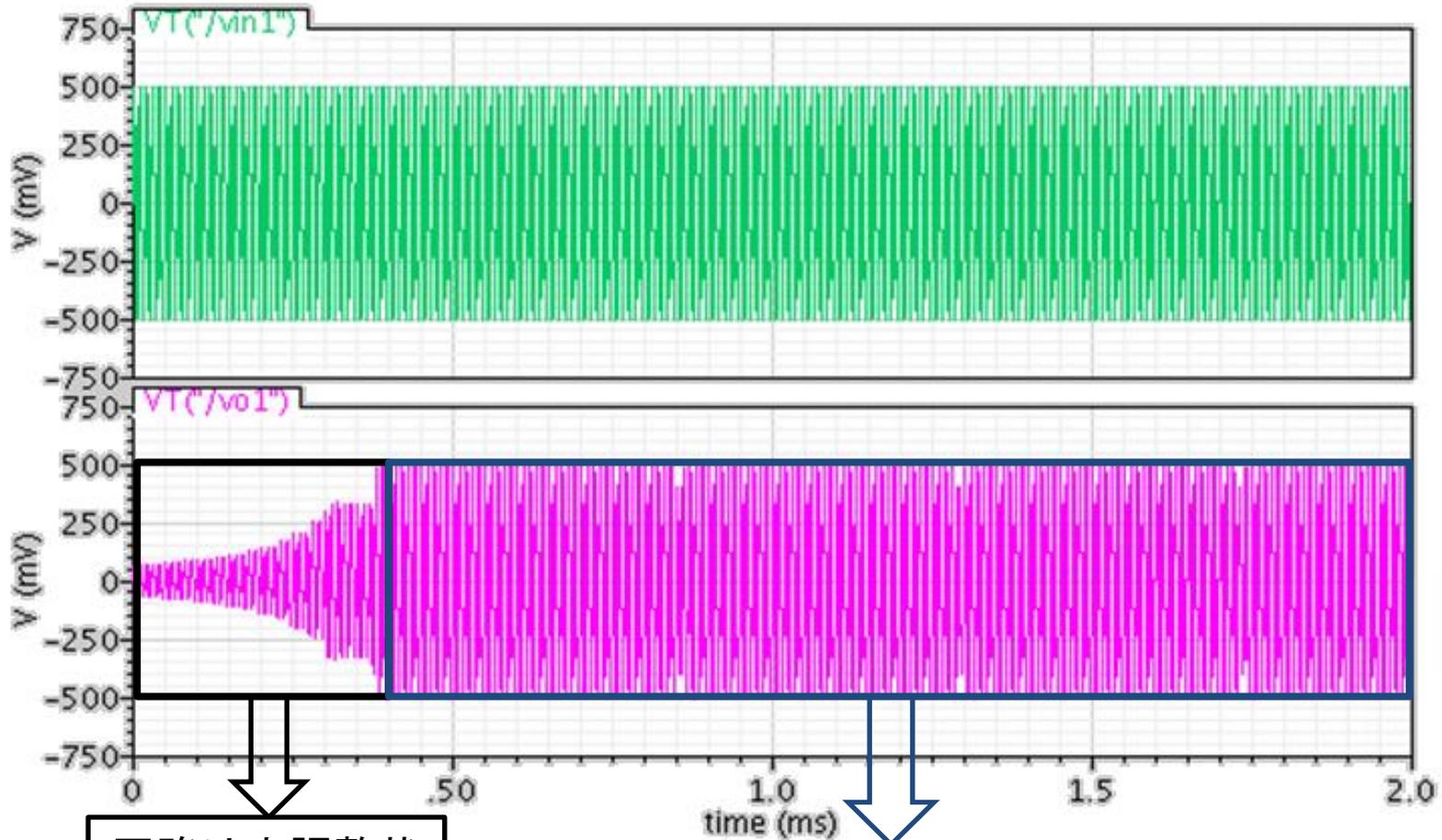
Kが一定



Q値がAにより調整

Q値自動調整の入出力は波形

入力
Vref



出力
Vout

$$\left| H(j\omega_0) \right|$$

回路は未調整状態の電圧ゲインは小さい

回路を調整された後の電圧ゲインは大きくなる

Band-pass filter Q値自動調整のシミュレーション結果

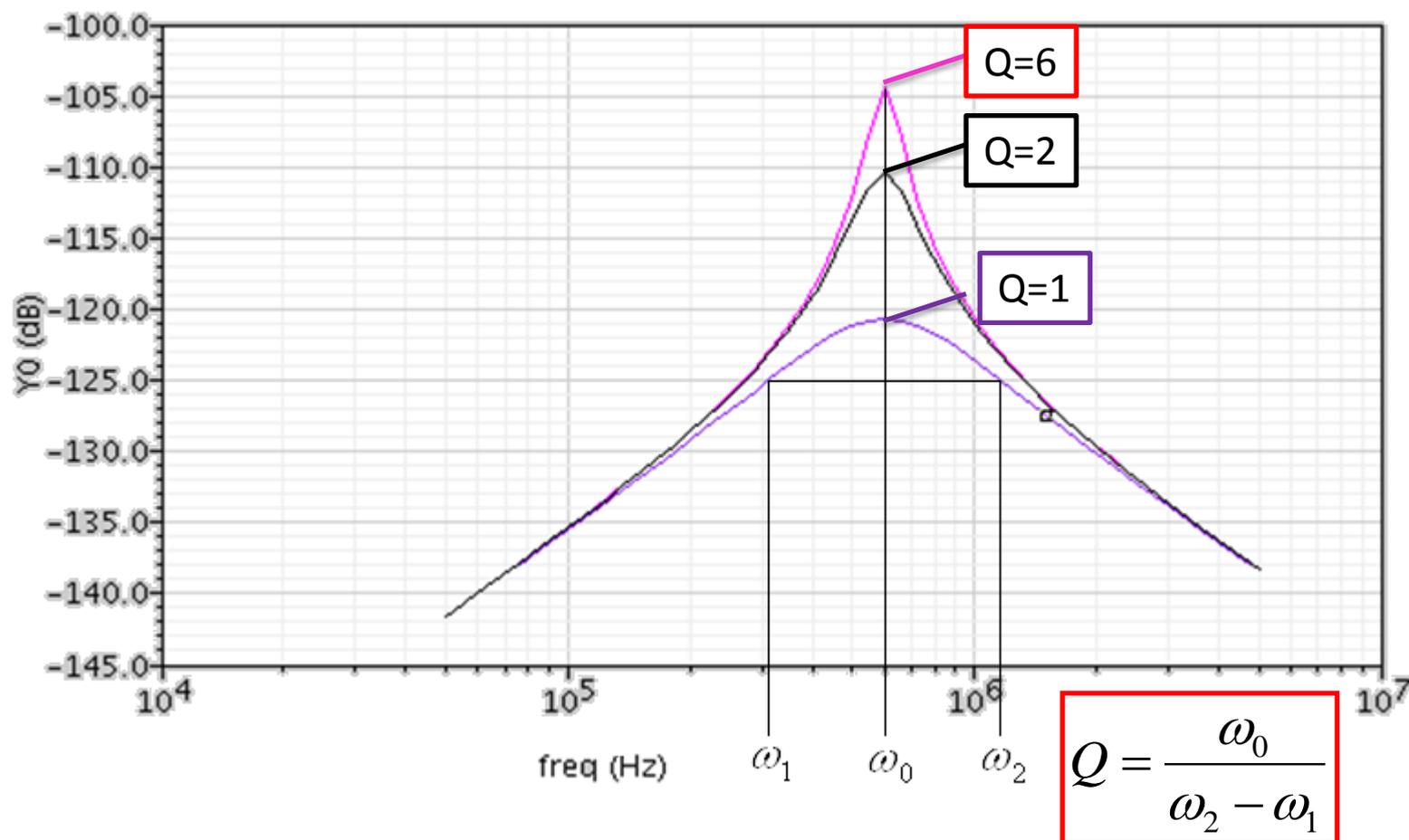
シミュレーション
パラメータ

$$G_m = 5 \times 10^{-5} S$$

$$C = 1.59 \text{ pF}$$

$$f_0 = 600 \text{ kHz}$$

$$M_1 = M_2 = 1$$



Low-pass filter Q値自動調整のシミュレーション結果

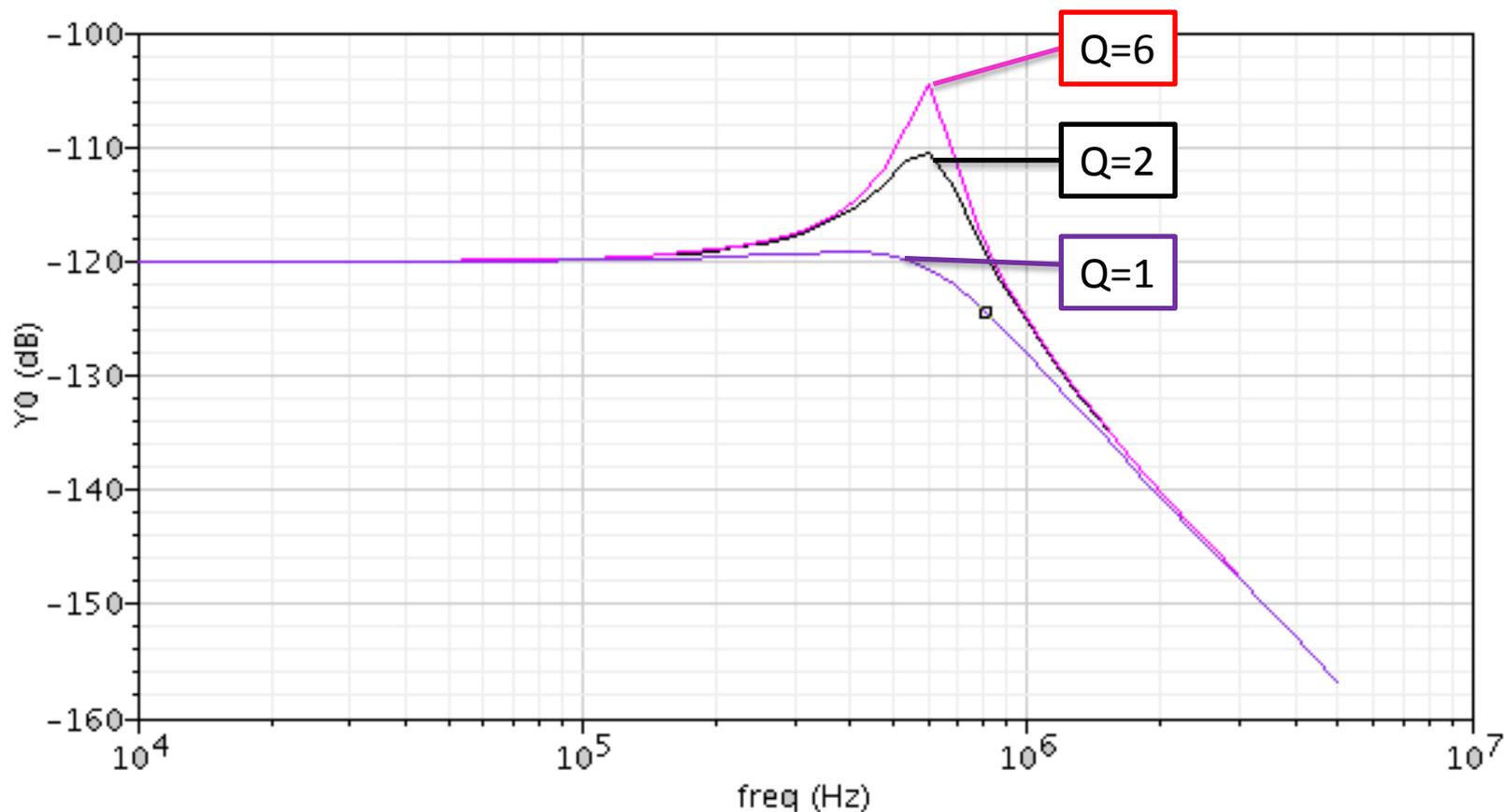
シミュレーション
パラメータ

$$G_m = 5 \times 10^{-5} S$$

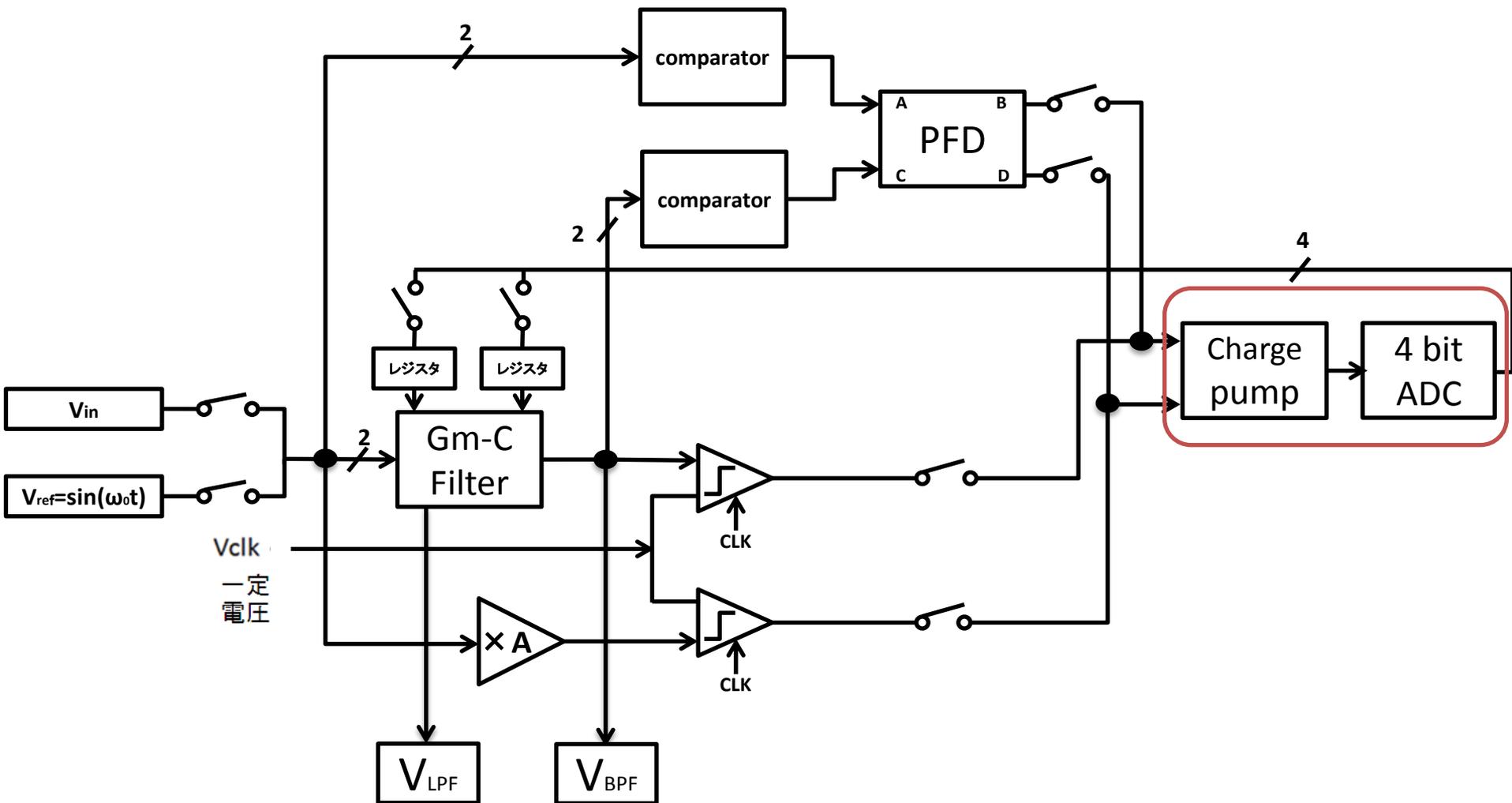
$$C = 1.59 \text{ pF}$$

$$f_0 = 600 \text{ kHz}$$

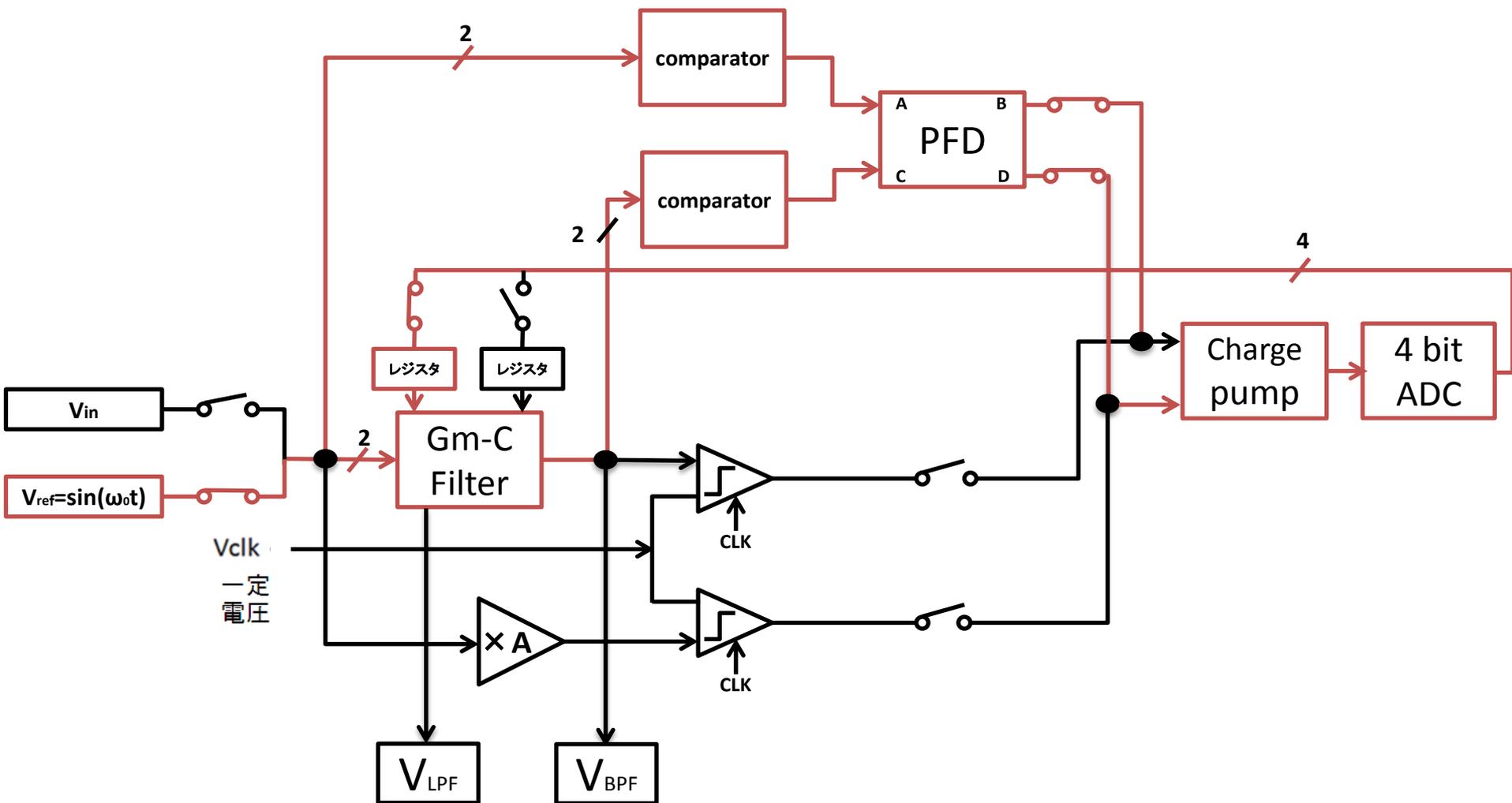
$$M_1 = M_2 = 1$$



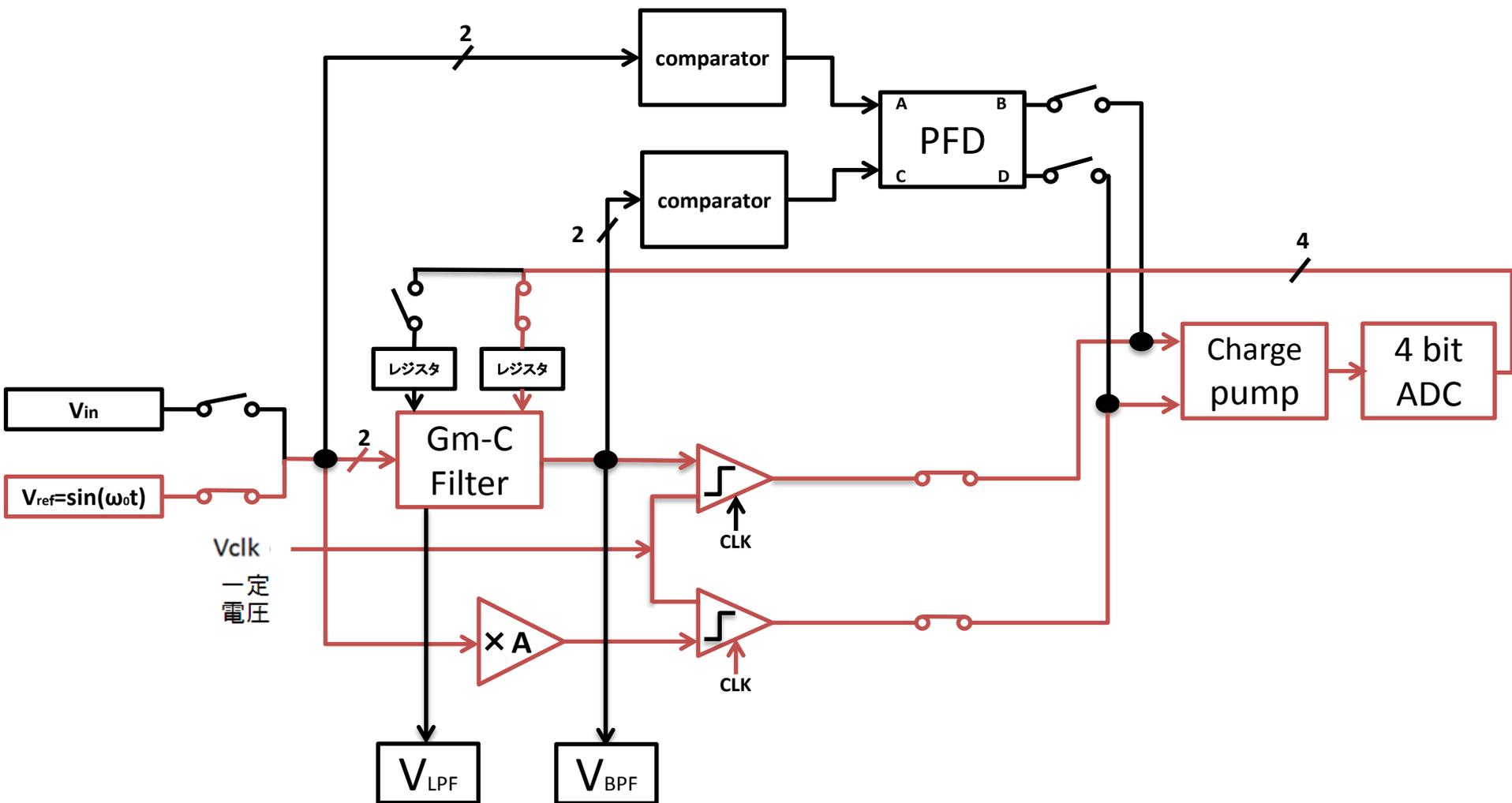
全体の回路



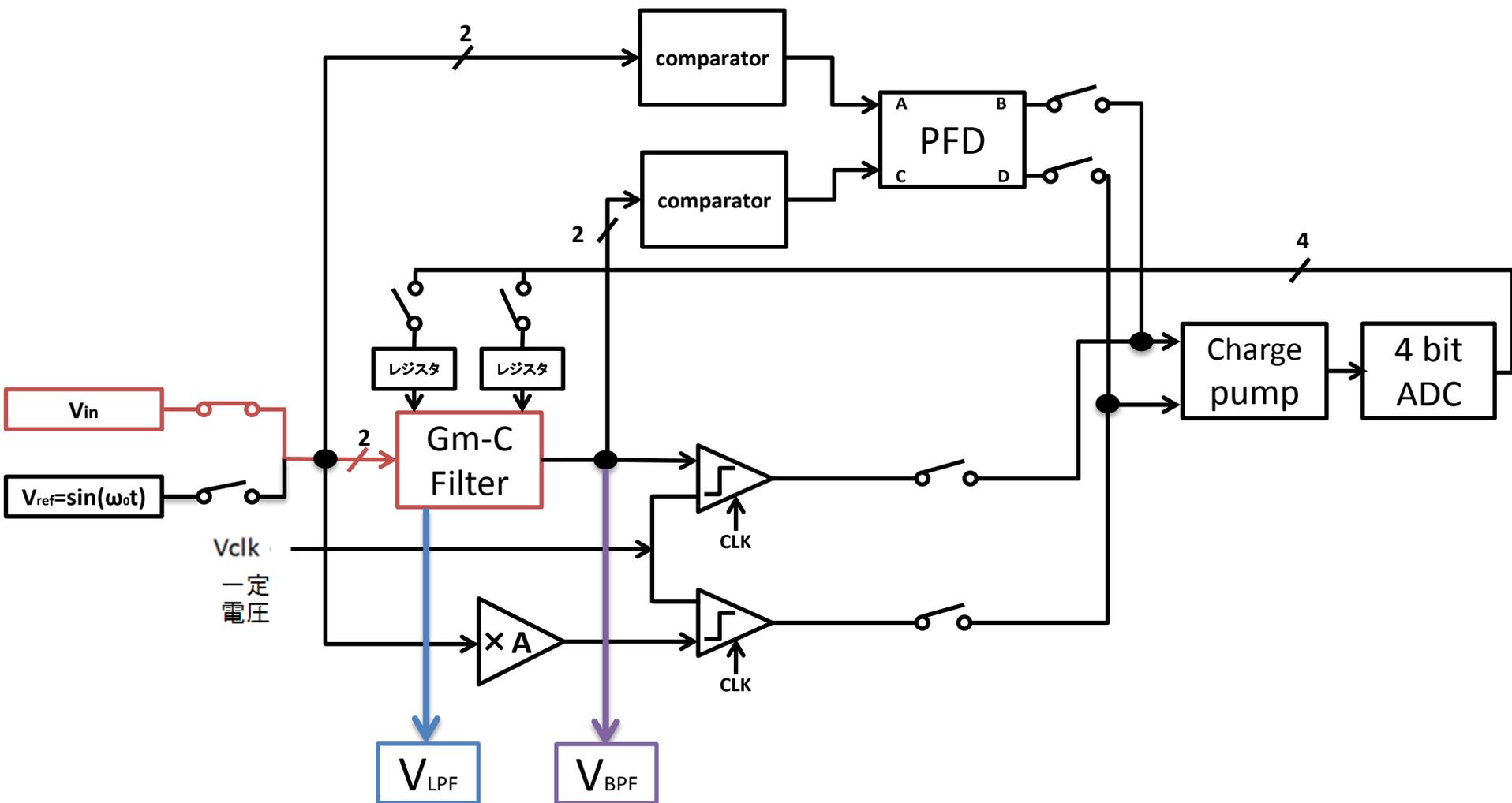
中心周波数の調整



Q値の調整



ローパスフィルタとバンドパスフィルタの出力選択



Outline

- 研究背景と目的
- Switched Gm-Cバンドパスフィルタの提案
- 中心周波数のデジタル調整
- Q値のデジタル調整
- まとめ

まとめと今後の課題

- デジタル制御Gm-C積分器を用いて 二次フィルタの構成
- Gm-C二次フィルタ中心周波数とQ値のデジタル自動調整

中心周波数が $Gm3$, $Gm4$ で決める

Q値が $Gm2$ で決める

• 今後の課題

デルタシグマ変調器を使用してバンドパスフィルタ小数部分の調整を実現する

OTA回路を実際の回路を使用する