

サンプリングミキサーの 特性解析

笹井重徳 小島貴志 倉科隆 松澤昭

東京工業大学大学院
理工学研究科
松澤研究室

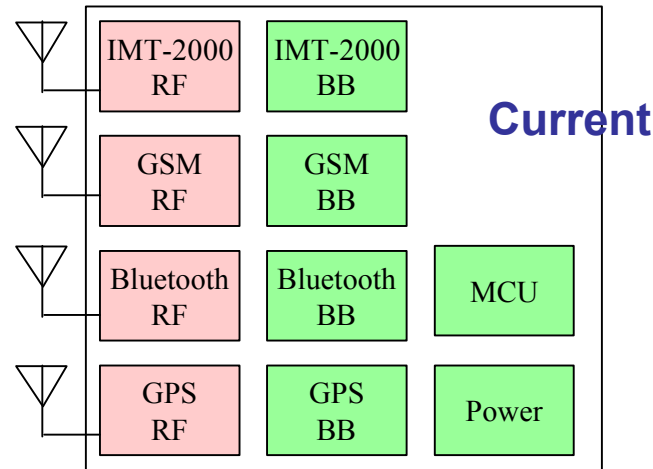
発表内容

- ワイヤレスシステムの動向
- サンプリングミキサーの動作
- 検討課題
- まとめ

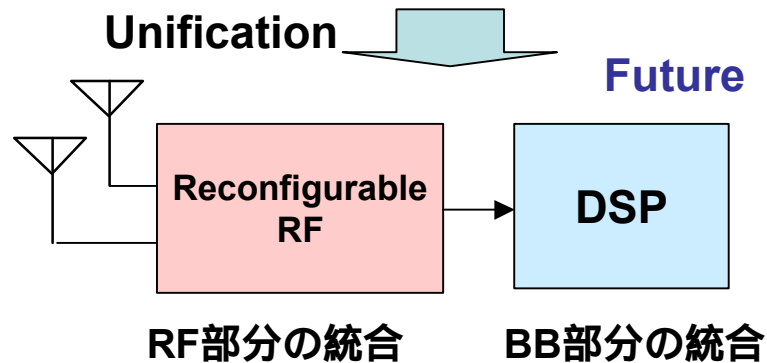
ワイアレスシステムの動向

マルチスタンダード化

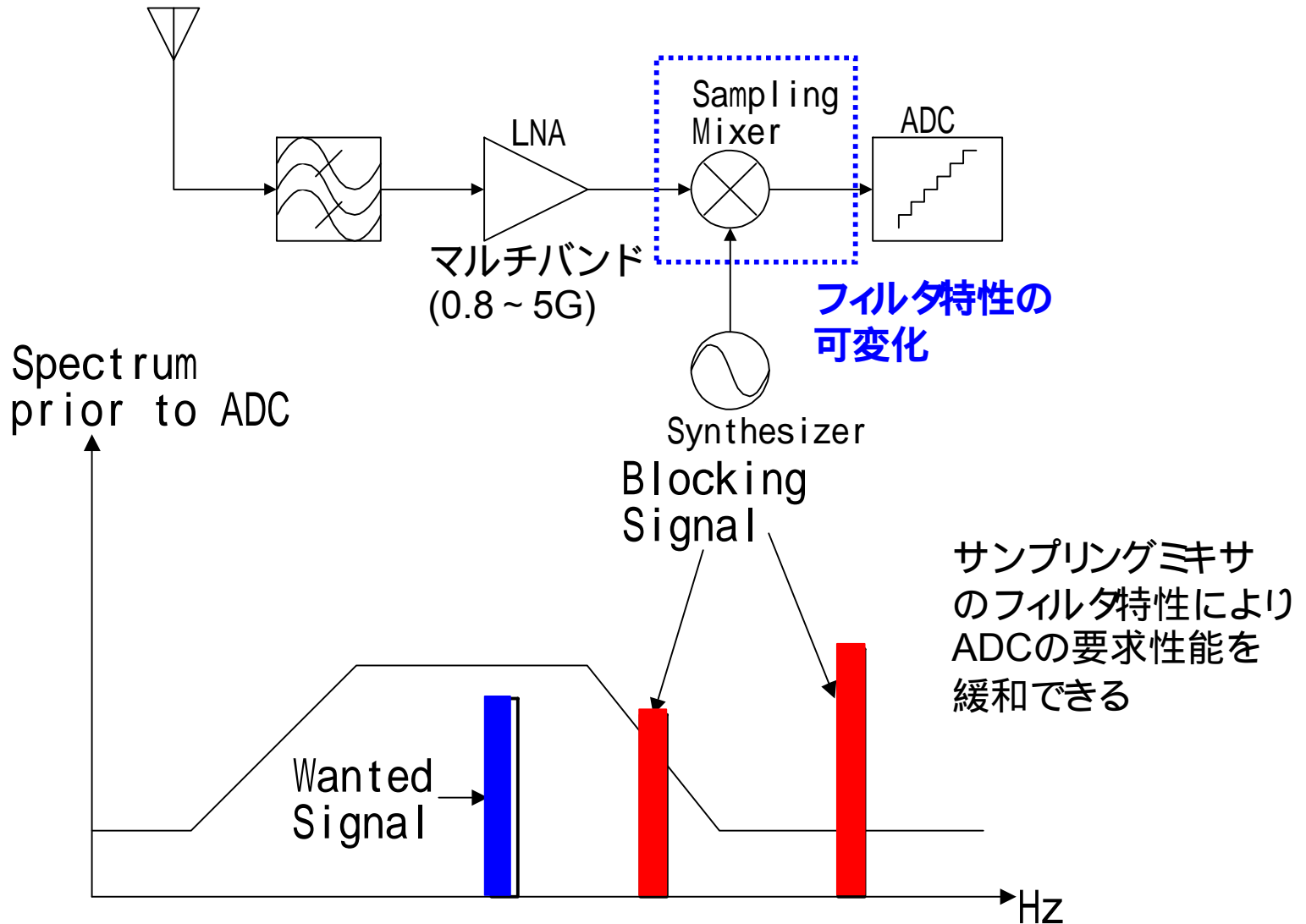
Multi-standards and multi chips



Unification

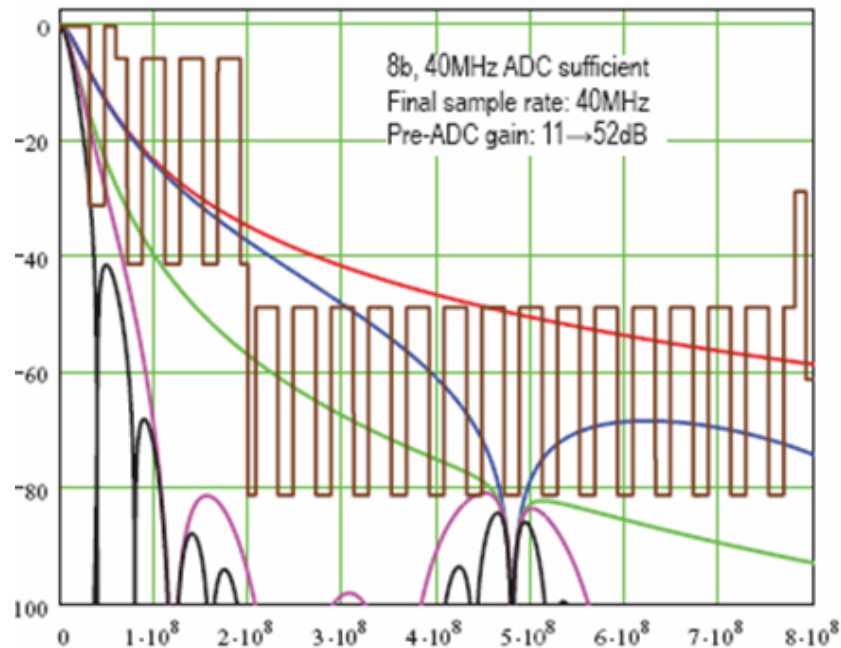


アナログフロントエンド



フィルタ効果

Cascade Filter Response: 802.11g



A. Abidi,
日本情報技術センターセミナー
2005年6月21日

スペクトラムマスクを満たす
フィルタ特性の例

サンプリングミキサーの特徴

- 長所

- フィルタ特性を持ち、妨害波を有効に除去
- Op Amp等の能動回路がないので、低歪かつ低消費電力
- ADCの折り返しノイズも除去

- 短所

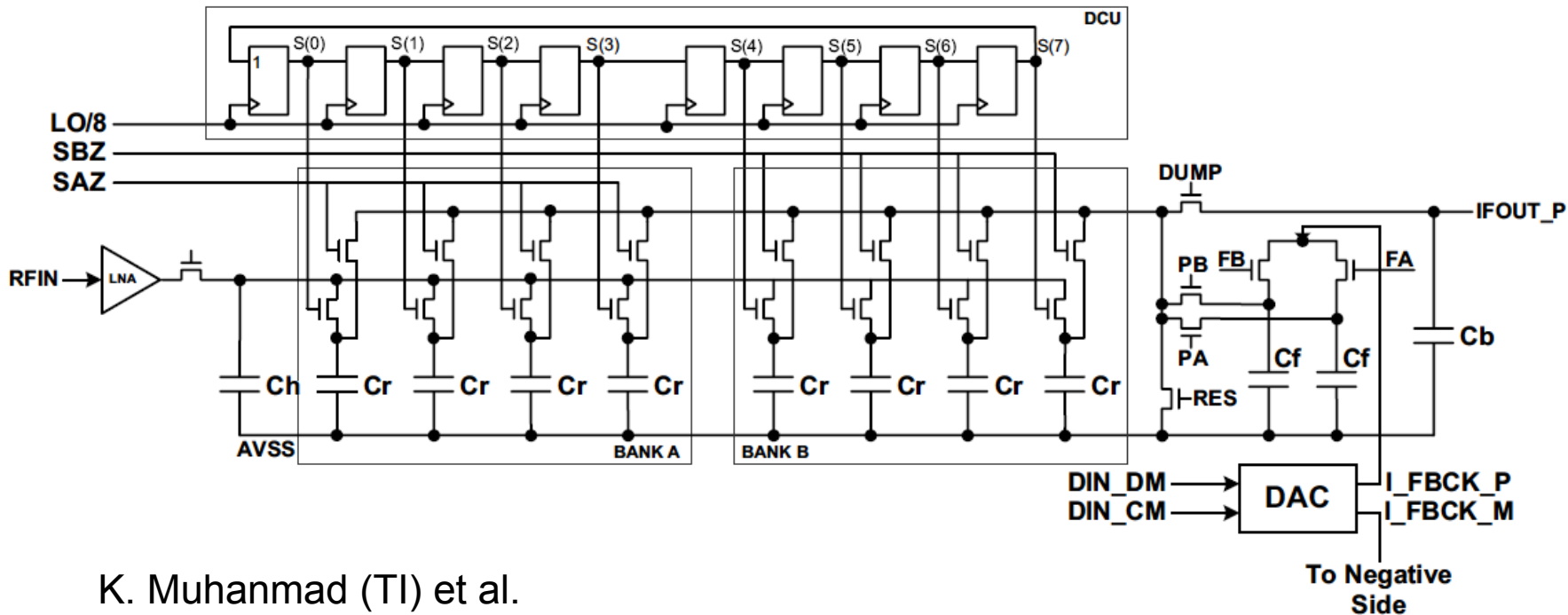
- フィルタに周期性があり、通過域が複数ある

対策 : フィルタの組み合わせにより

不要な通過域を遮断する

サンプリングミキサーの動作

サンプリングミキサー回路図



K. Muhammad (TI) et al.

“All-Digital TX Frequency Synthesizer and Discrete-Time Receiver for Bluetooth Radio in 130-nm CMOS”

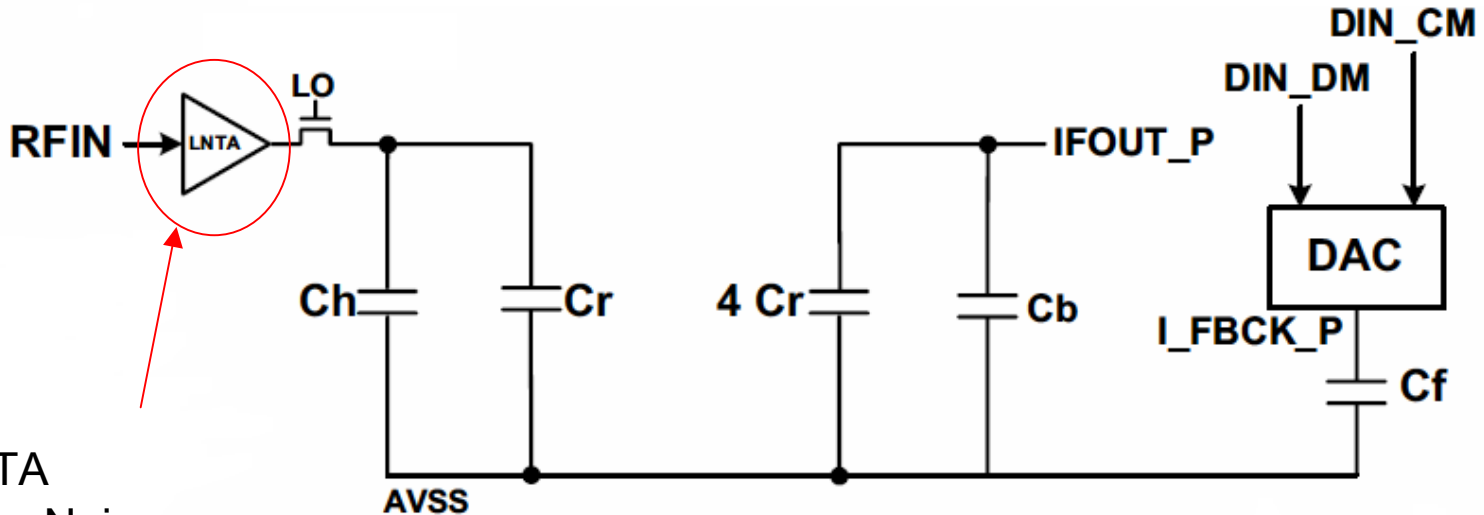
(JSSC Vol.39, No.12, pp. 2278-2291, Dec. 2004)

Sub-Blocks

Mix & Sampling

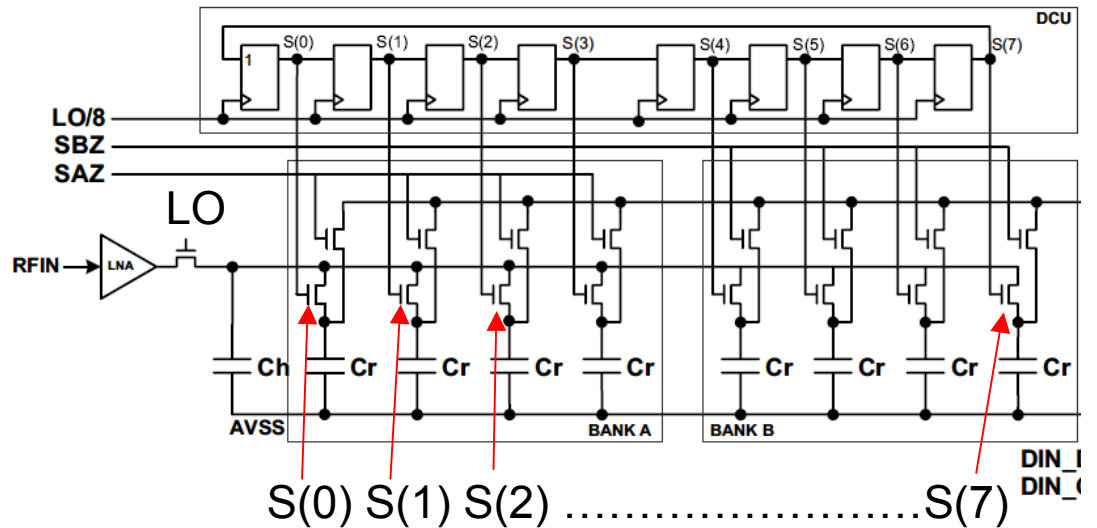
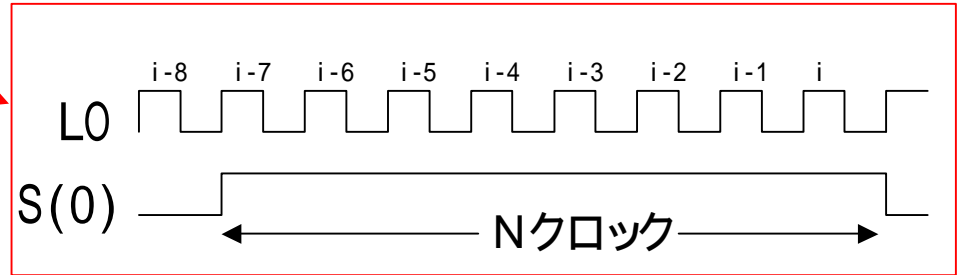
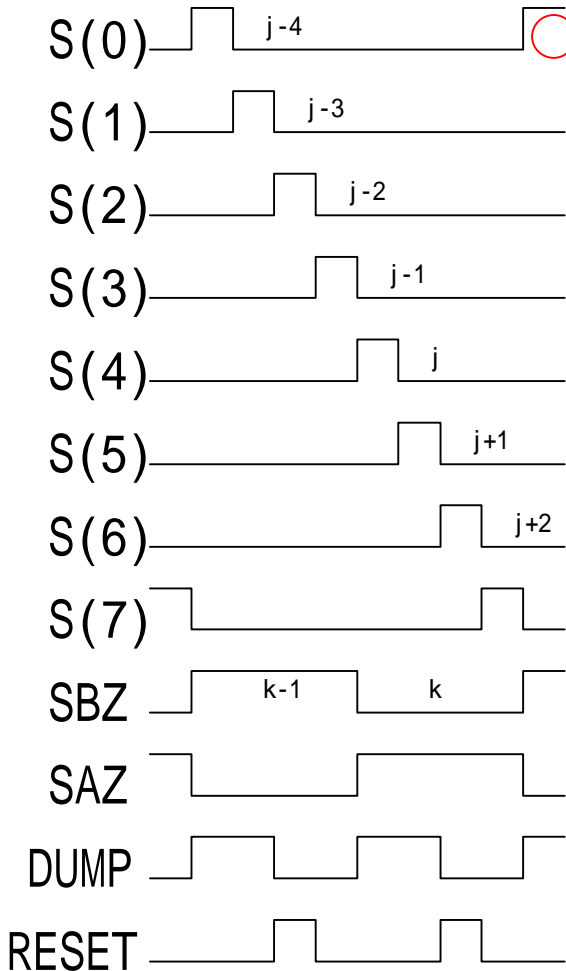
Read Out

Calibration

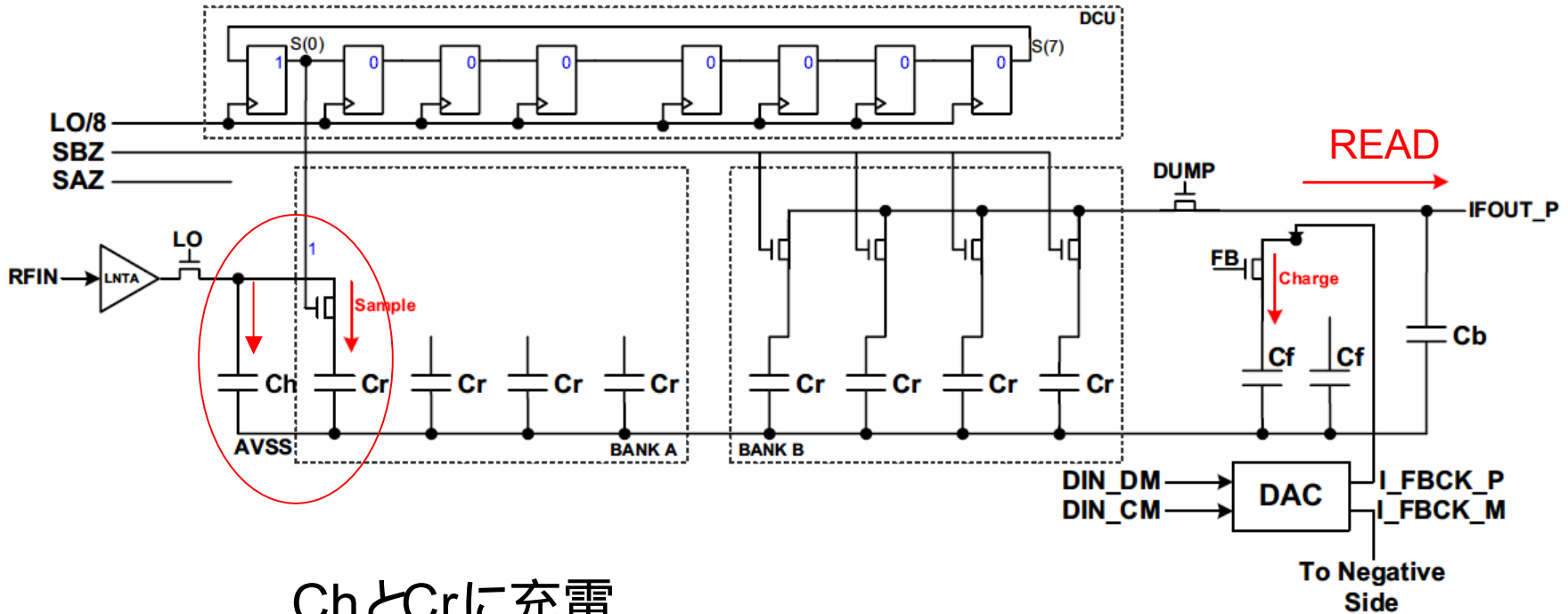


LNTA
(Low Noise
Transconductance Amp)
: 電流出力

Timing Signals



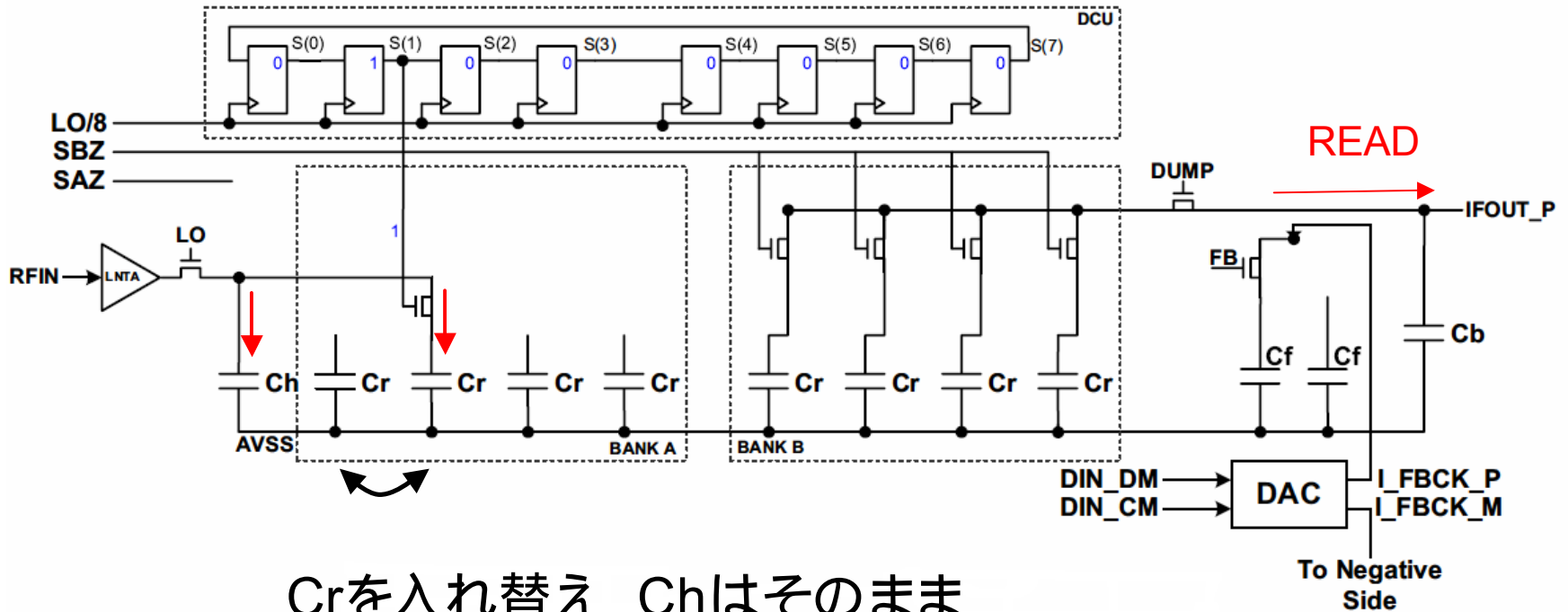
回路動作 (Phase1)



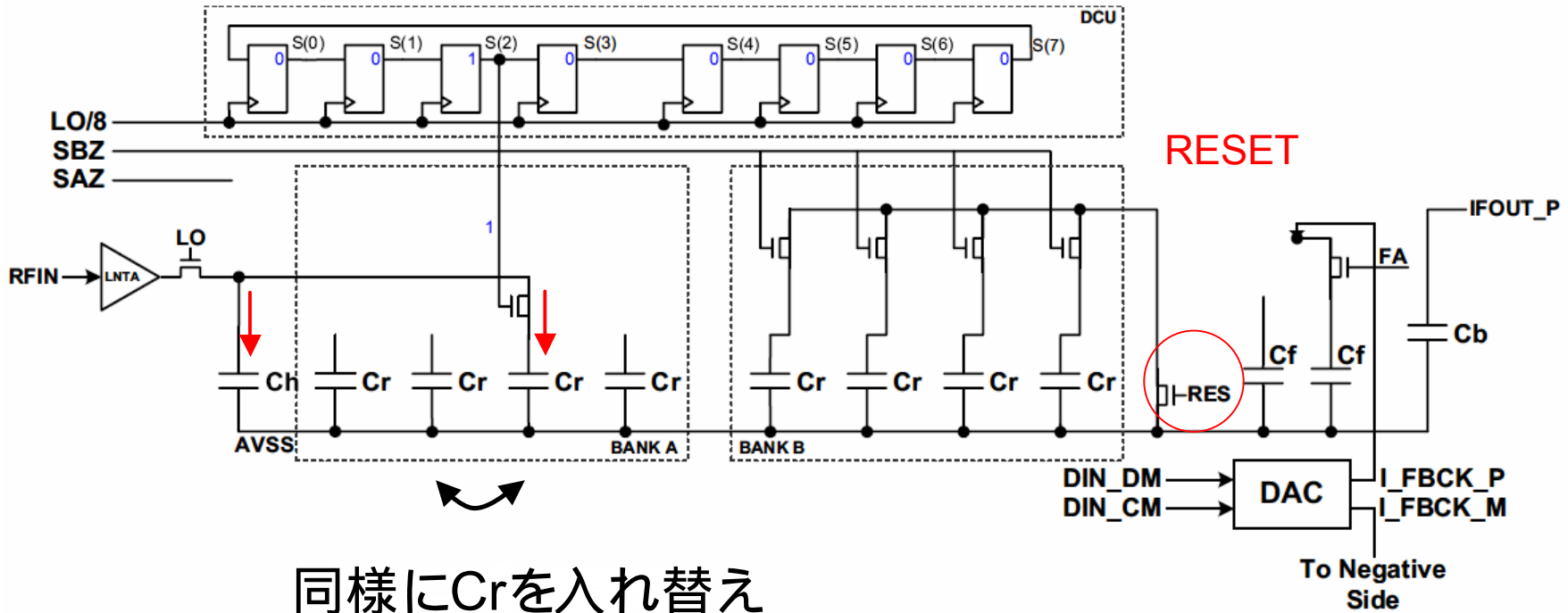
ChとCrに充電

Phase1はLO 8クロックに相当

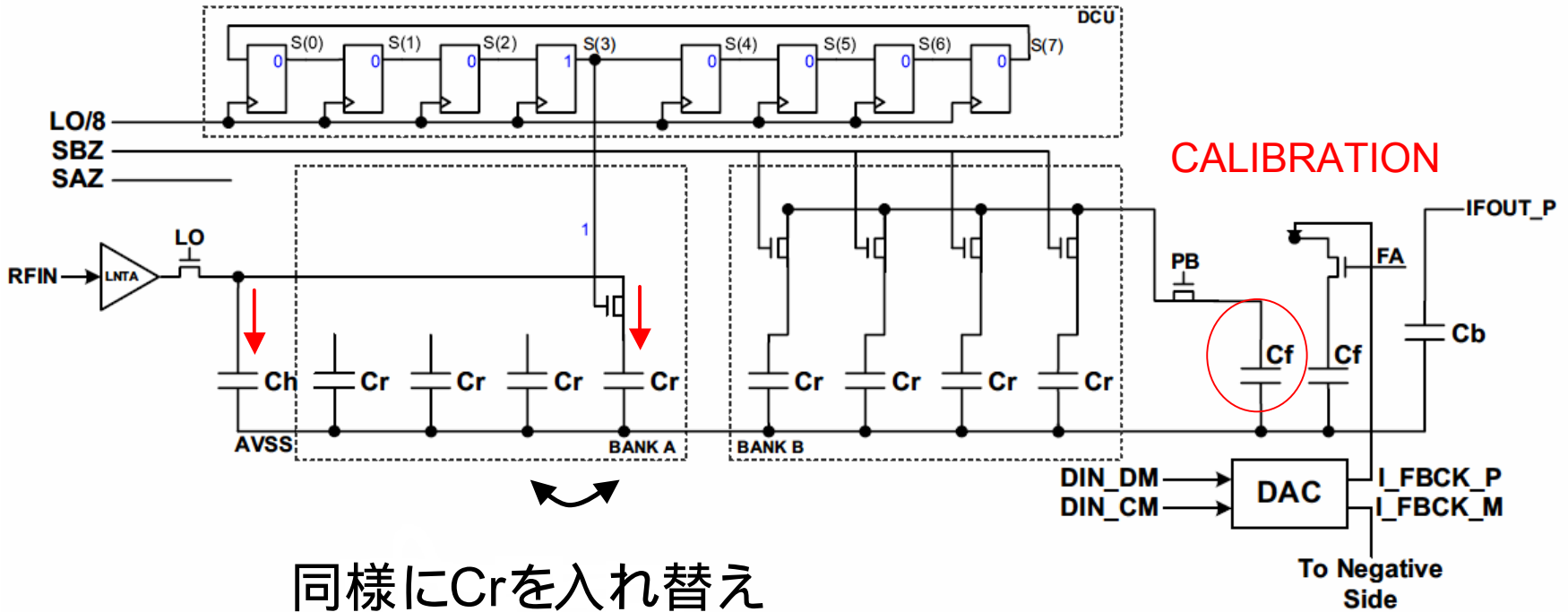
回路動作 (Phase2)



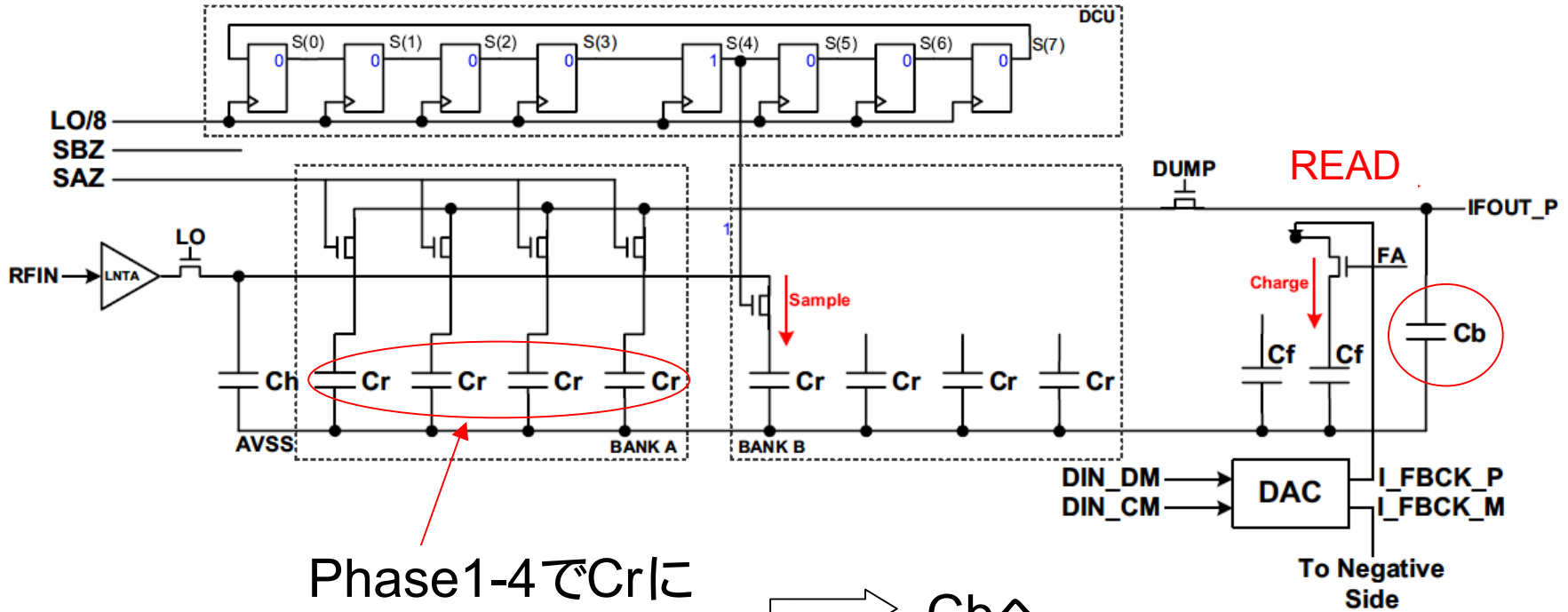
回路動作 (Phase 3)



回路動作 (Phase4)



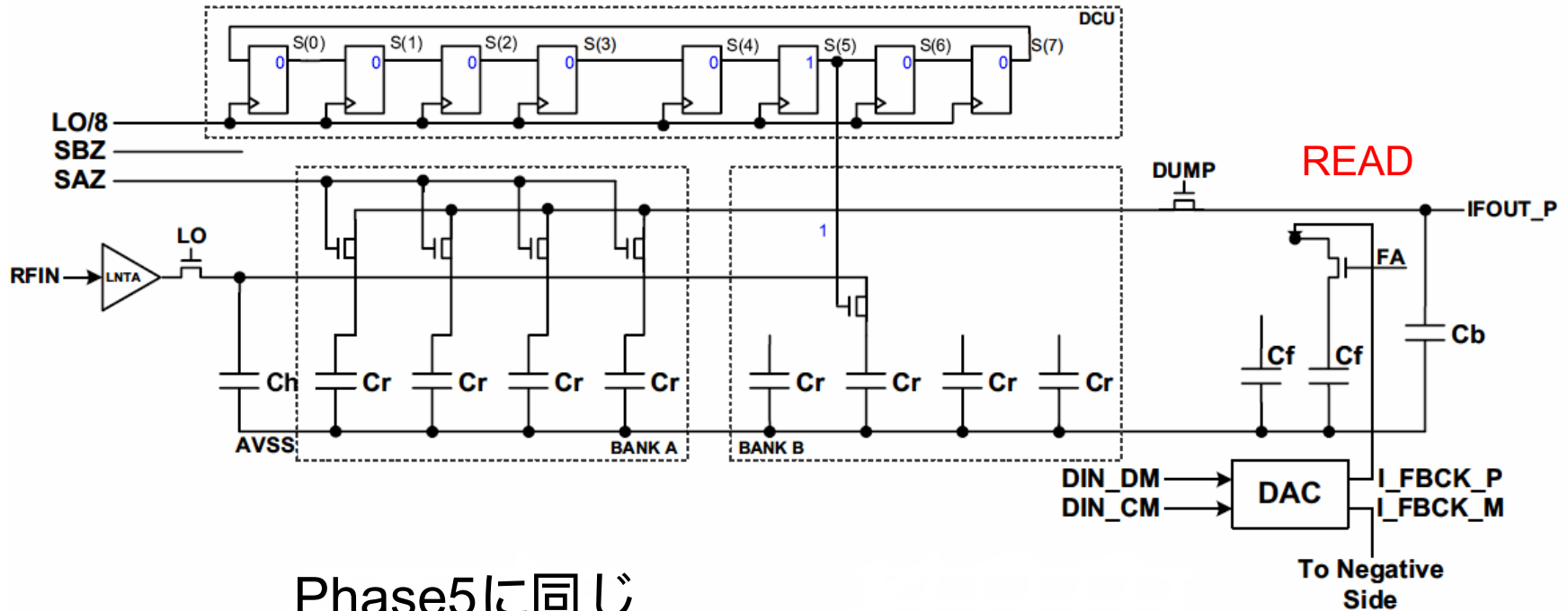
回路動作 (Phase5)



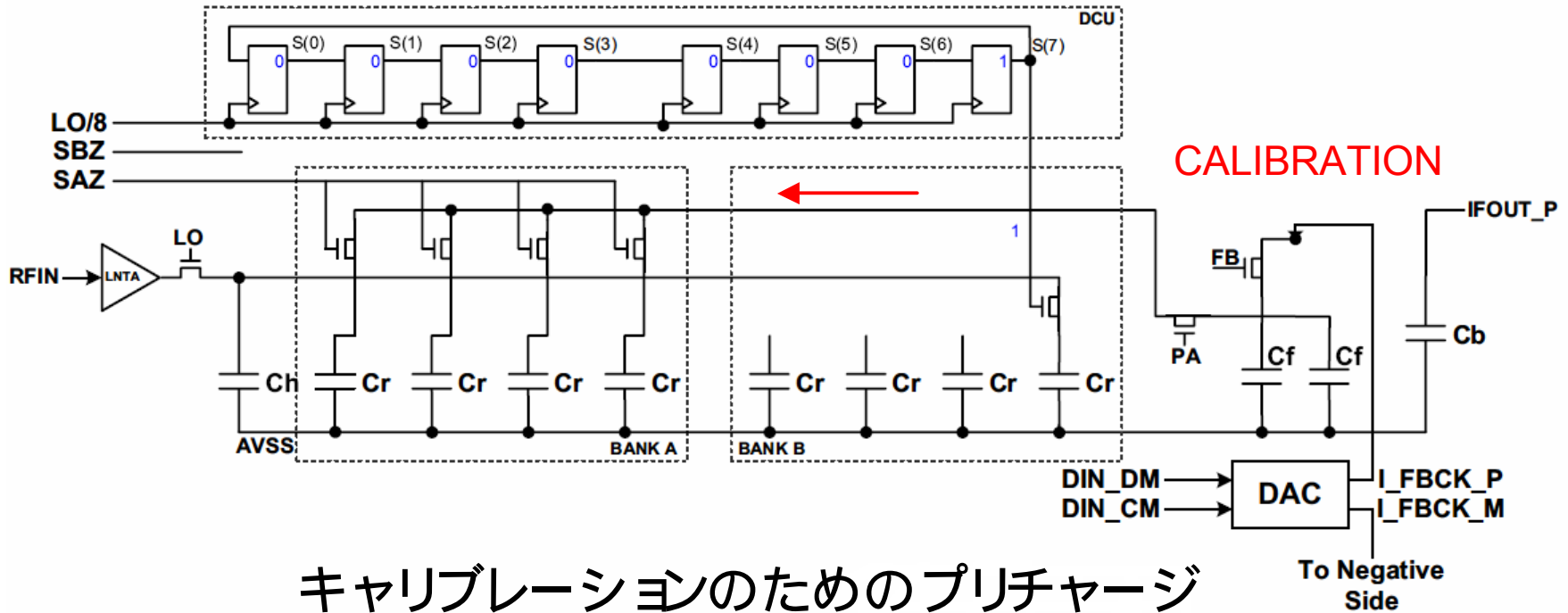
Phase1-4でCrに
充電した電荷を讀出

⇒ Cbへ

回路動作 (Phase6)



回路動作 (Phase8)



キャリブレーションのためのプリチャージ

検討課題

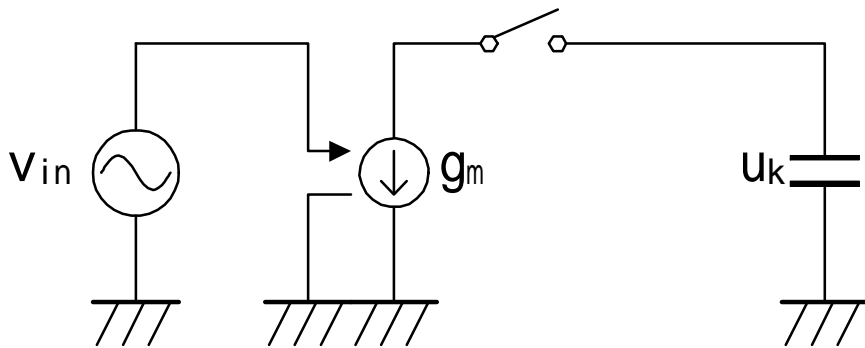
- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズへの影響
- TAの出力インピーダンスの影響

* シミュレーションでは
LNTAは理想的な電圧制御電流源
スイッチは電圧制御抵抗を用いた

検討課題

- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズの影響
- TAの出力インピーダンスの影響

電流積分の効果



電圧源からVCCSを通しての
電荷への伝達関数

$$\begin{aligned} u_k &= \int_{t_0}^{t_0+T_{on}} i dt = \int_{t_0}^{t_0+T_{on}} g_m v_{in} dt = \int_{t_0}^{t_0+T_{on}} g_m V e^{j\omega t} dt \\ &= \left[\frac{g_m V e^{j\omega t}}{j\omega} \right]_{t_0}^{t_0+T_{on}} = \frac{g_m (V e^{j\omega(t_0+T_{on})} - V e^{j\omega t_0})}{j\omega} \end{aligned}$$

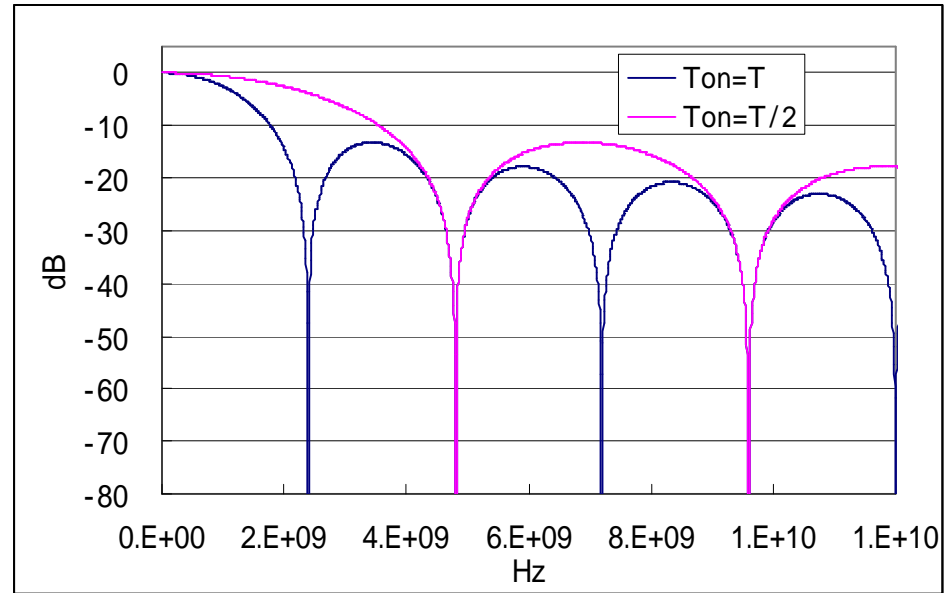
T_{on} : LOによりサンプリングされる時間

$$\left| \frac{u_k}{v_{in}} \right| = \left| g_m T_{on} \frac{\sin\left(\frac{T_{on}}{2} \omega\right)}{\left(\frac{T_{on}}{2} \omega\right)} \right|$$

電流積分の効果

$$\left| \frac{u_k}{v_{in}} \right| = \left| g_m T_{on} \frac{\sin\left(\frac{T_{on}}{2} \omega\right)}{\left(\frac{T_{on}}{2} \omega\right)} \right|$$

周波数特性が
デューティ比に依存

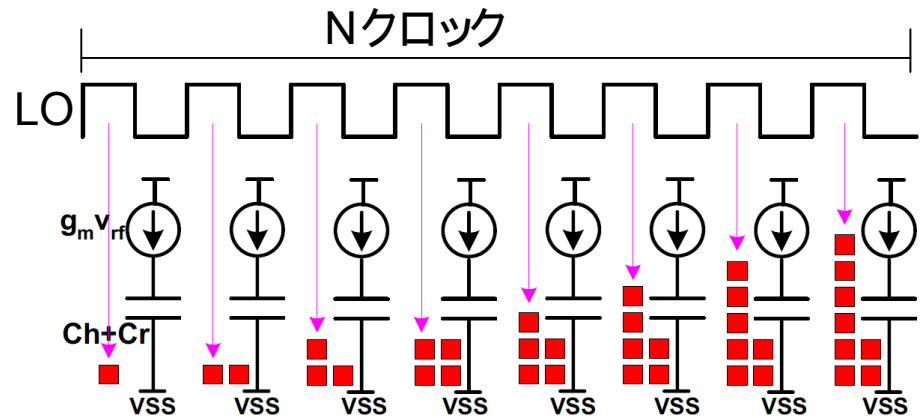


T: LOの周期

1st Sinc Filter

- LOクロックN回の移動平均

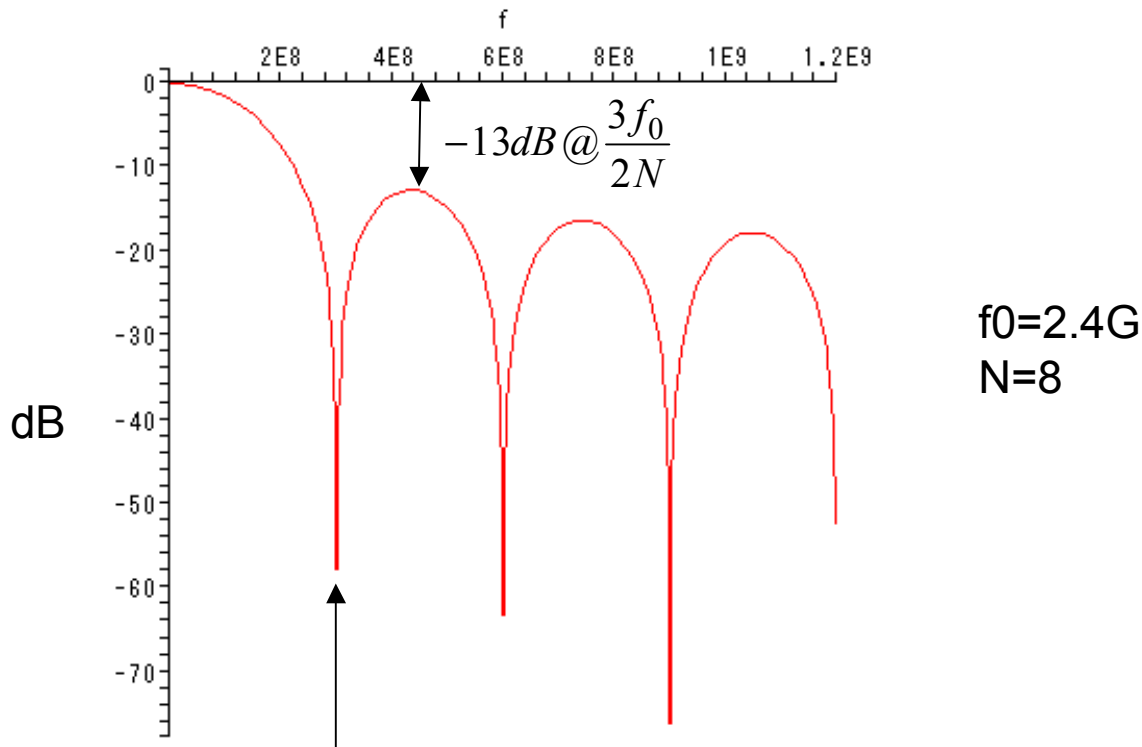
$$w_i = \sum_{l=0}^{N-1} u_{i-l}$$



u_i : i番目にサンプリングされた電荷

w_i : Nクロックの間に蓄積された電荷

1st Sinc Filter



$$w_i = \sum_{l=0}^{N-1} u_{i-l} \rightarrow W(Z) = \frac{1-Z^{-N}}{1-Z^{-1}} U(Z) \rightarrow |F_{1stSinc}(\mathbf{w})| = \left| \frac{\sin\left(\frac{N\mathbf{w}T}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\mathbf{w}T}{2}\right)} \right|$$

1st IIR Filter

- 電荷が C_h と C_r に分割して蓄積

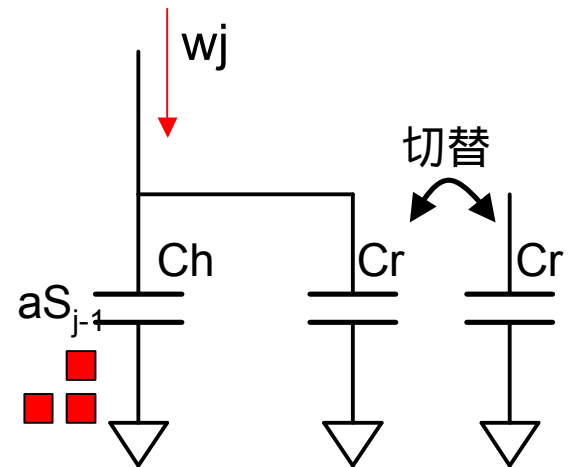
$$\underline{s_j = a s_{j-1} + w_j} \xrightarrow{i=Nj} s_i = a s_{i-N} + w_i$$

$$a = \frac{C_h}{C_h + C_r}$$

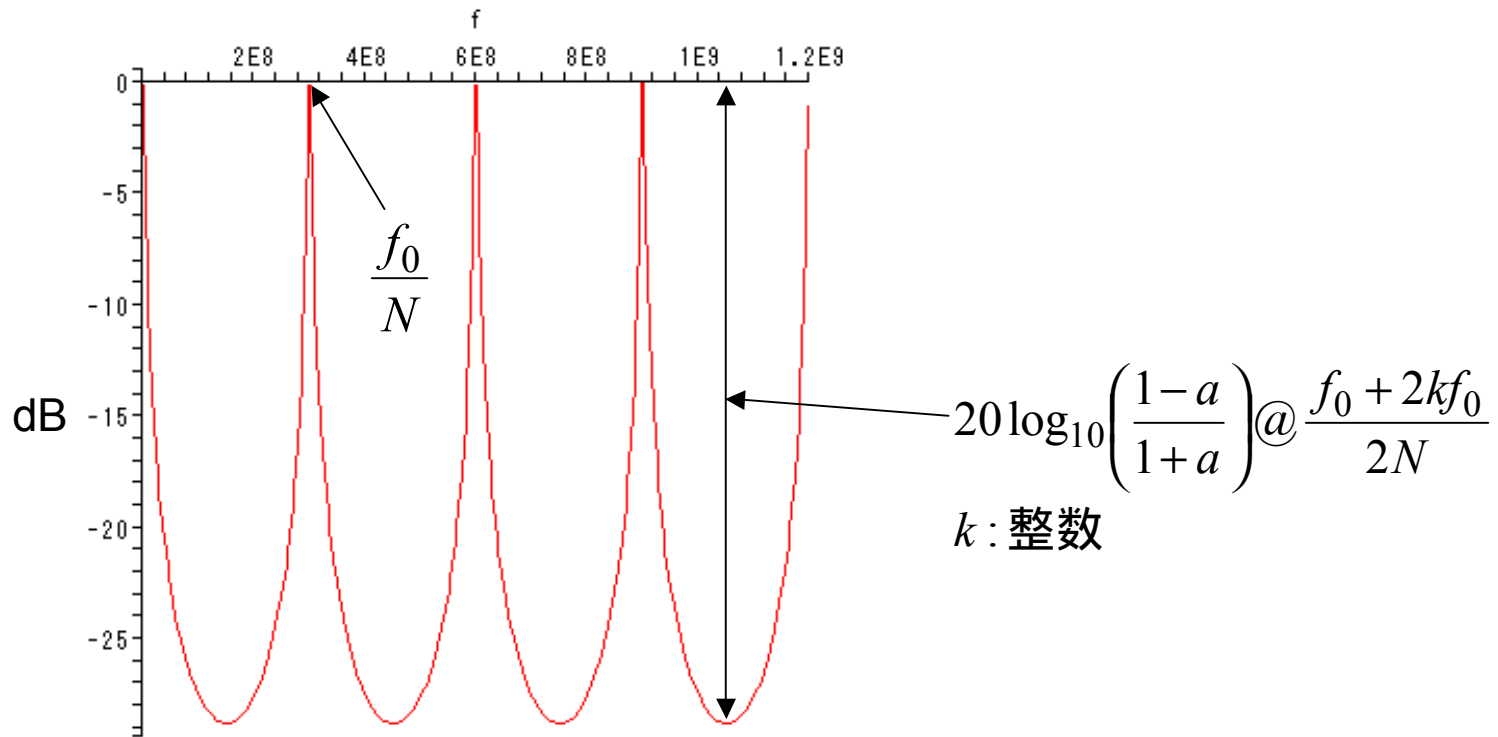
$a s_{j-1}$: $j-1$ のとき C_h に蓄積された電荷

w_j : j のとき C_h と C_r 注入された電荷

s_j : j で C_h と C_r に蓄積されている電荷の合計

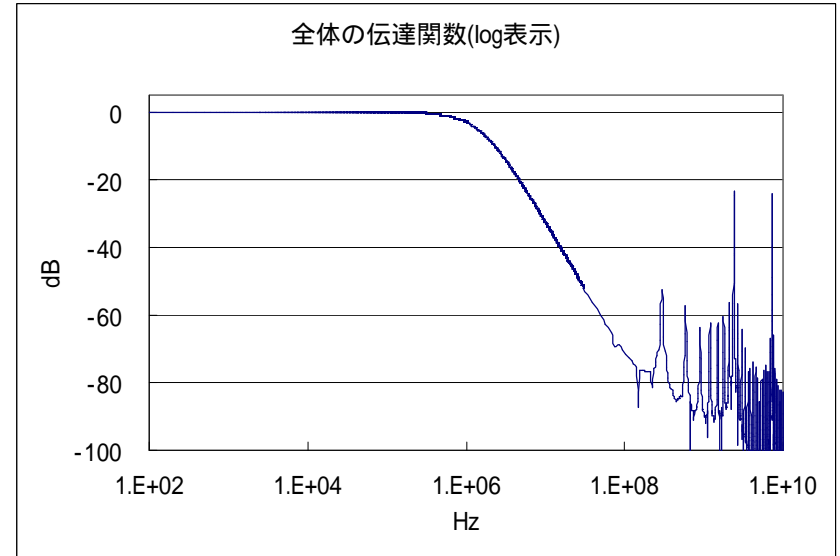
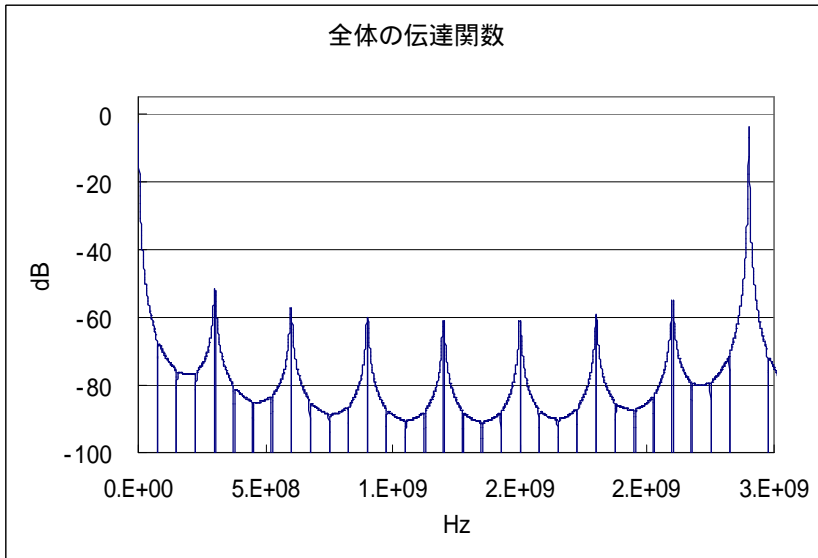


1st IIR Filter



$$s_i = a s_{i-N} + w_i \rightarrow S(Z) = \frac{W(Z)}{1 - aZ^{-N}} \rightarrow |F_{1stIIR}(\mathbf{w})| = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 - 2a \cos(N\omega T)}}$$

全体の伝達関数



$$|F_{all}| = g_m T_{on} \frac{\sin\left(\frac{\omega T_{on}}{2}\right)}{\left(\frac{\omega T_{on}}{2}\right)} (1-a) \frac{\sin\left(\frac{MN\omega T}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega T}{2}\right)} \frac{1}{\sqrt{1+a^2-2a\cos(N\omega T)}} \frac{1}{\sqrt{1+b^2-2b\cos(MN\omega T)}} \frac{1}{C_b}$$

電流積分

1st Sincと2nd Sinc

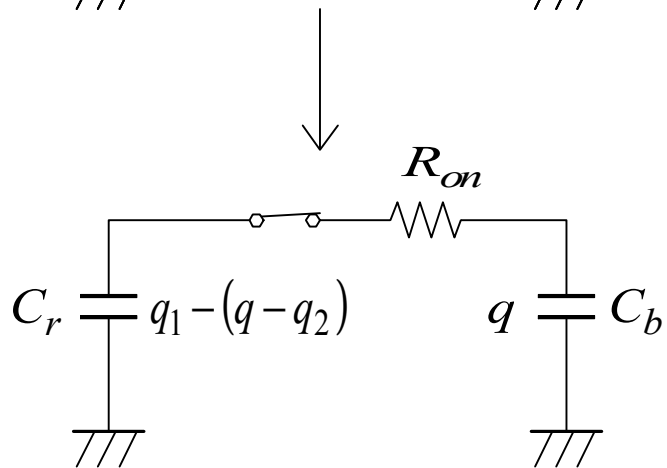
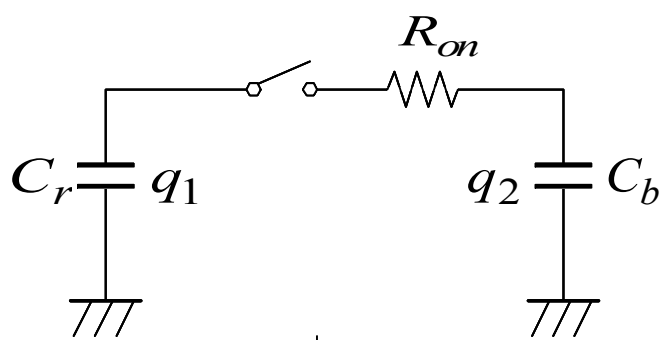
1st IIR

2nd IIR

C_b : バッファ容量

検討課題

- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズの影響
- TAの出力インピーダンスの影響



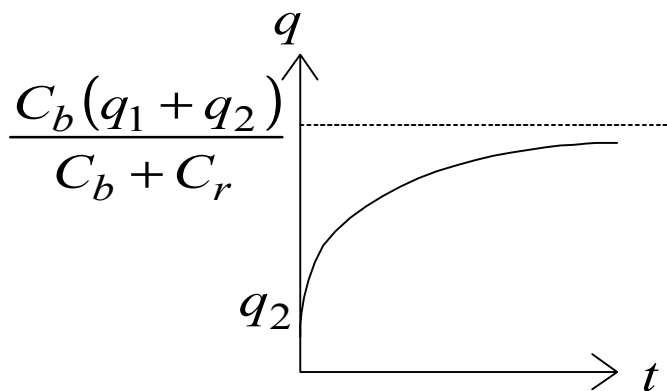
セトリング

$$q = \left(\frac{C_r q_2 - C_b q_1}{C_r + C_b} \right) \exp\left(\frac{-(C_r + C_b)t}{R_{on} C_r C_b} \right) + \frac{C_b (q_1 + q_2)}{C_r + C_b}$$

時定数 $\frac{R_{on} C_r C_b}{C_r + C_b}$

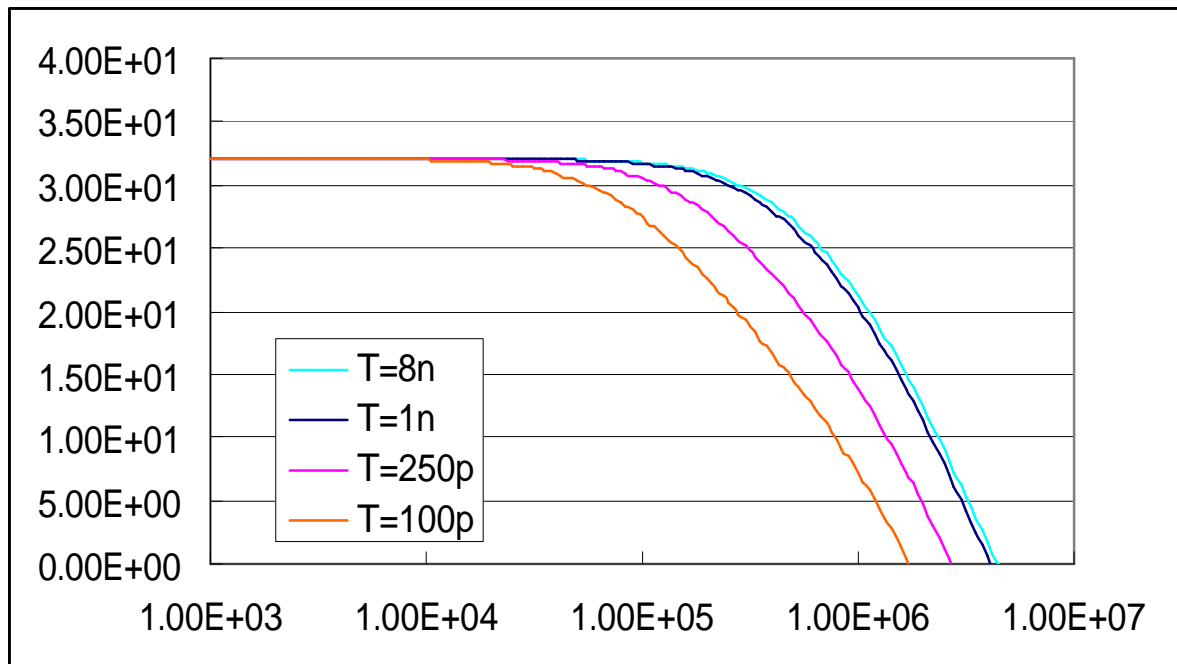
$C_b \gg C_r$ のとき

時定数 $R_{on} C_r$



時定数はCrとRonで決まる

時定数に対してスイッチのオン時間を 十分にとらなかった場合



時定数100p
T=8n fc
T=1n 0.89fc
T=250p 0.45fc
T=100p 0.21fc

T: CrとCbの間のスイッチのオン時間

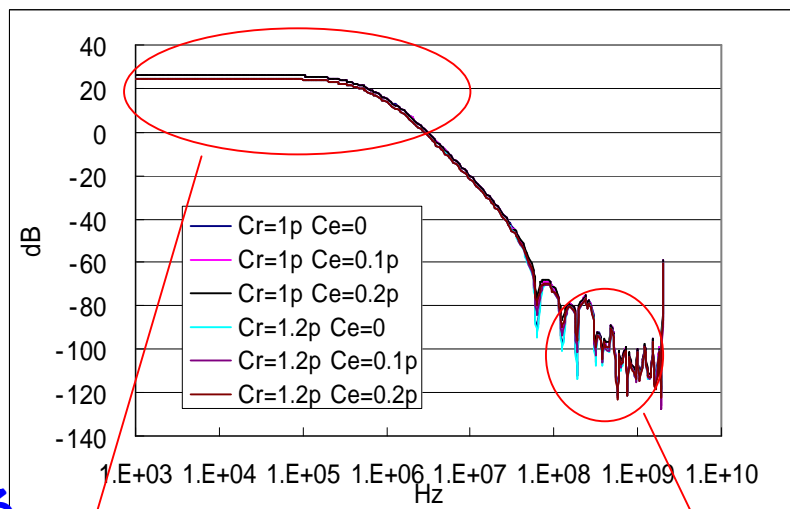
時定数よりオン時間を十分大きくしなければならぬ

検討課題

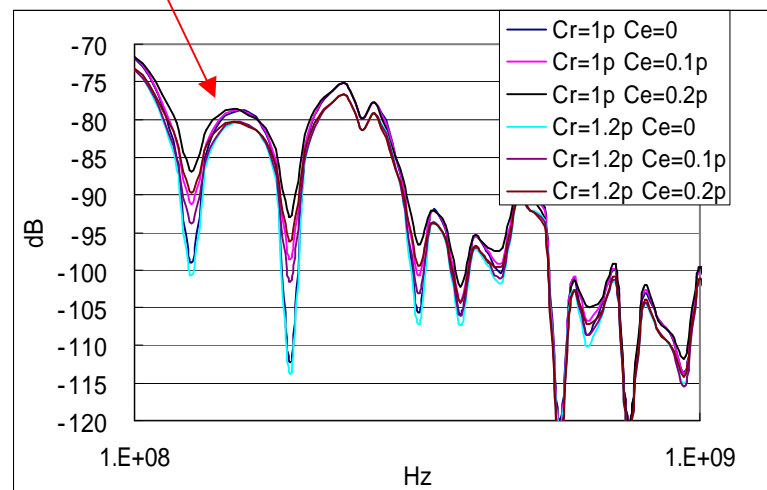
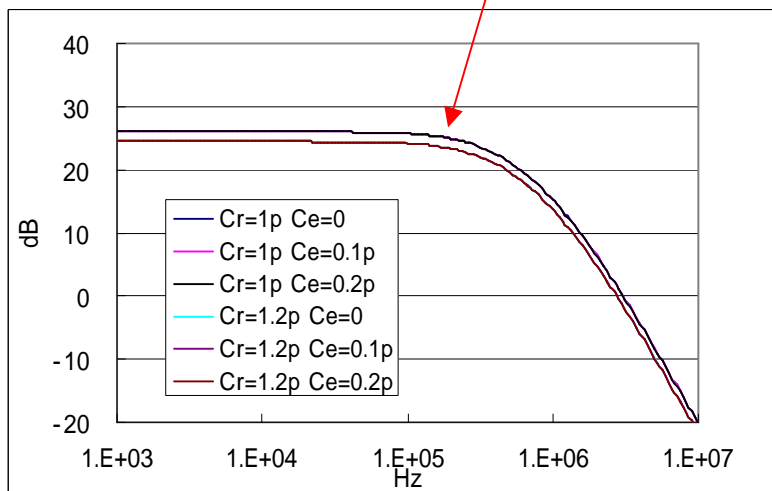
- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズの影響
- TAの出力インピーダンスの影響

容量ばらつきの効果

ばらつきがあっても
DC付近の伝達関数
はCrの平均で決まる



容量ばらつきがあると
ノッチは浅くなる



ノッチへのばらつきの影響

ばらつきが有る場合 ノッチ部分では以下の値に近似できる

$a = b = 0.95$ とすると

$$F_{all} = 0.127(\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_5)(1 - j0.95) + 0.134(\mathbf{e}_2 - \mathbf{e}_6)(0.95 + j) \\ - 0.141(\mathbf{e}_3 - \mathbf{e}_7)(1 - j0.95) - 0.149(\mathbf{e}_4 - \mathbf{e}_8)(0.95 + j)$$

(理想的には0となる)

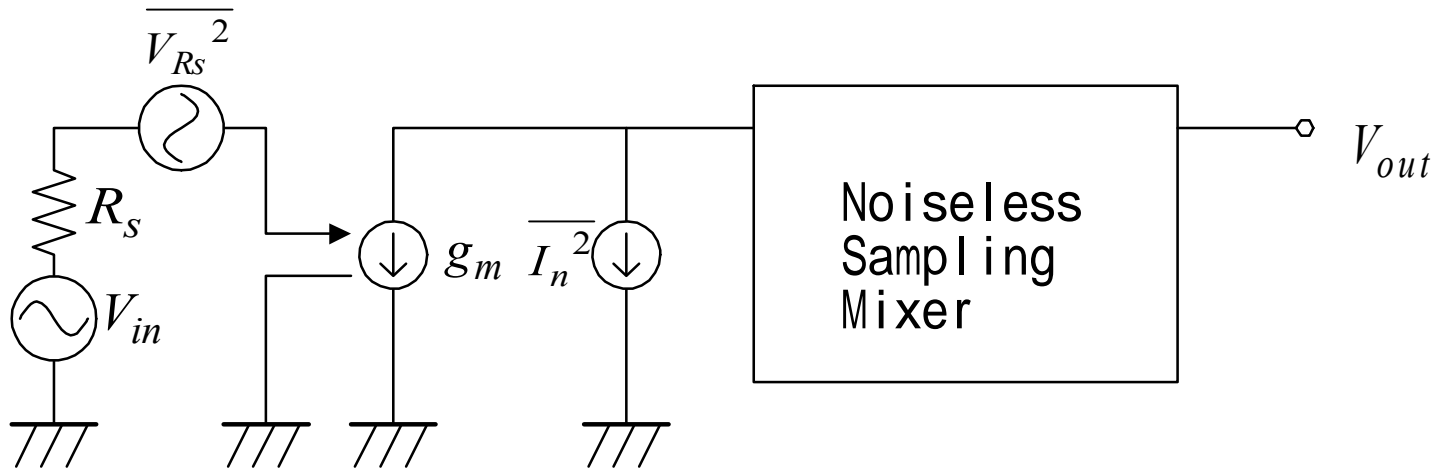
e_k はローテーション容量の誤差

以下の誤差によりノッチが浅くなる

検討課題

- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズの影響
- TAの出カインピーダンスの影響

NF



$$NF = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{N_A}{N_{in}} \right)$$

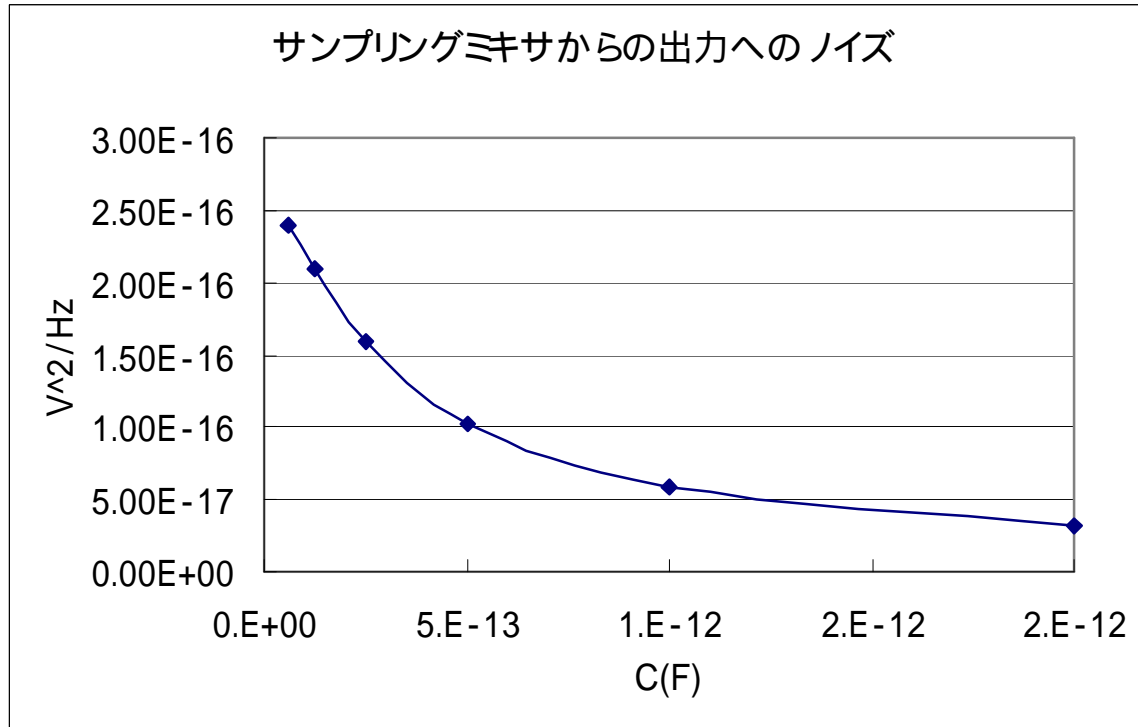
$$N_{in} = g_m^2 \overline{V_{Rs}^2}$$

$$N_A = \overline{I_n^2}$$

$\overline{V_{Rs}^2}$: 入力ノイズ

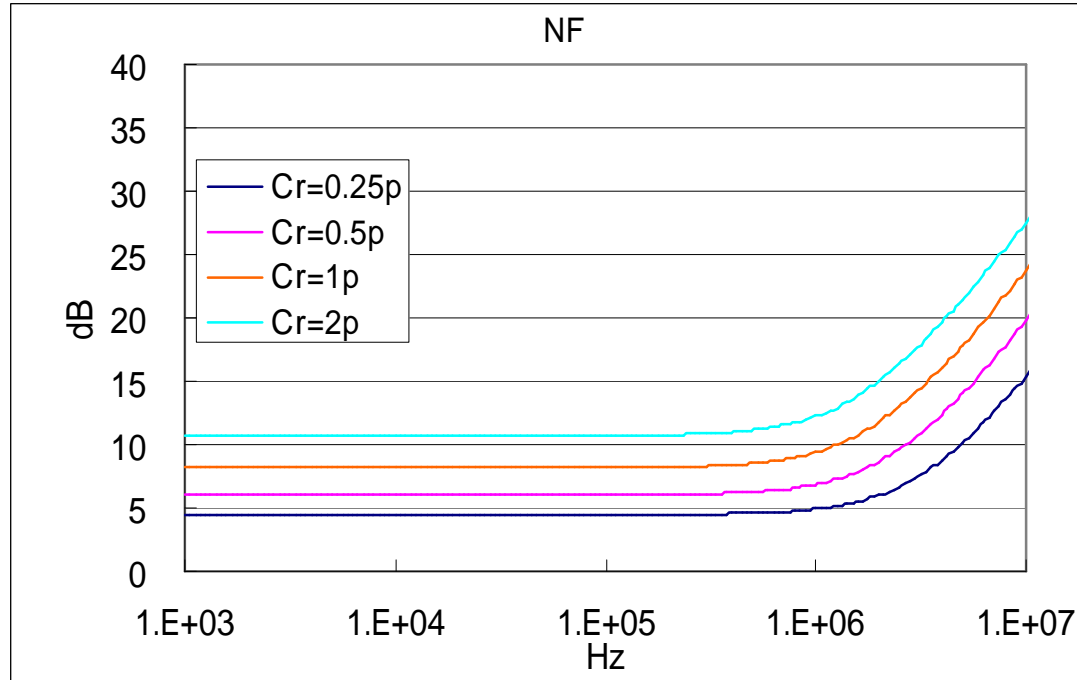
$\overline{I_n^2}$: サンプリングミキサーで発生するノイズの入力換算分

容量とノイズの関係



容量を小さくする 出力ノイズは大きくなる

容量を変化させたときのNF



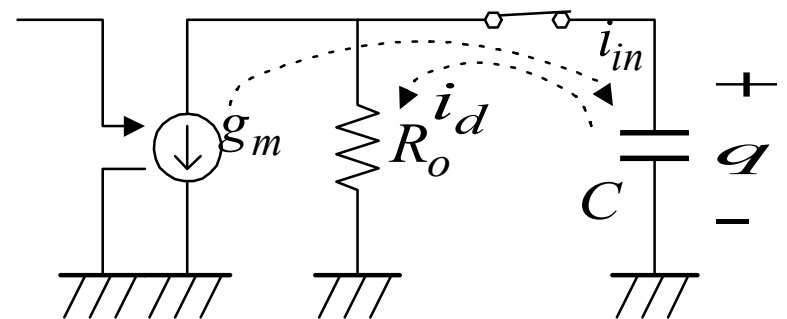
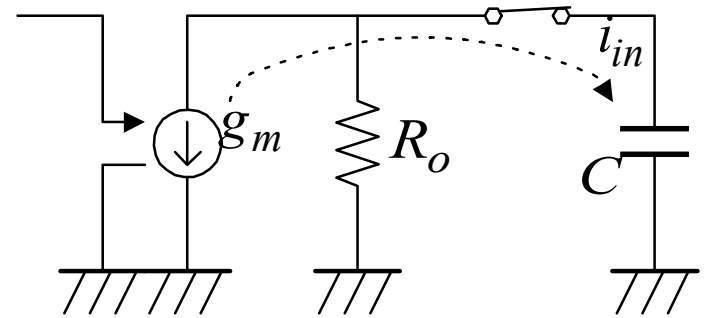
容量小さくする NFは向上する

検討課題

- 周波数特性の導出
- セトリング特性
- 容量ばらつきの影響
- 容量の大きさによるノイズの影響
- TAの出力インピーダンスの影響

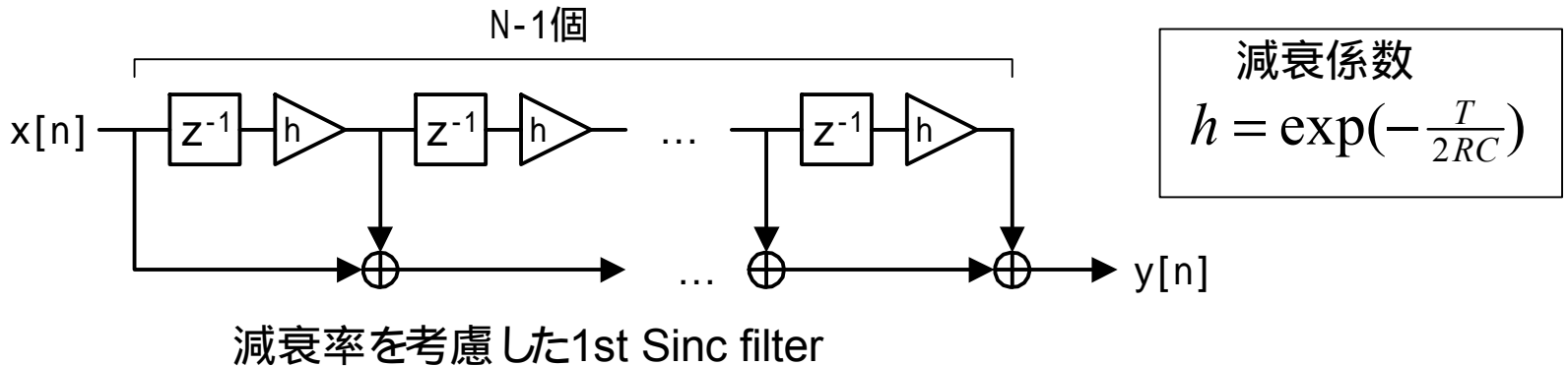
放電の影響

- 電荷が蓄えられている状態でスイッチがONになると、充電電荷は並列抵抗を介して放電される
- 次段の移動平均フィルタではキャパシタに電荷を積算する
- 放電による電荷の減少を検討



R_o : TAの出力インピーダンス

移動平均フィルタへの影響

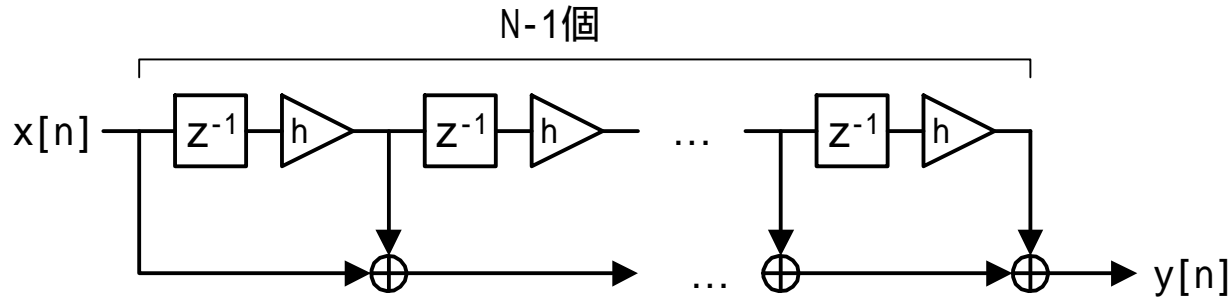


$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{m=0}^{N-1} (hz^{-1})^m$$

$$= \frac{1 - h^N z^{-N}}{1 - hz^{-1}}$$

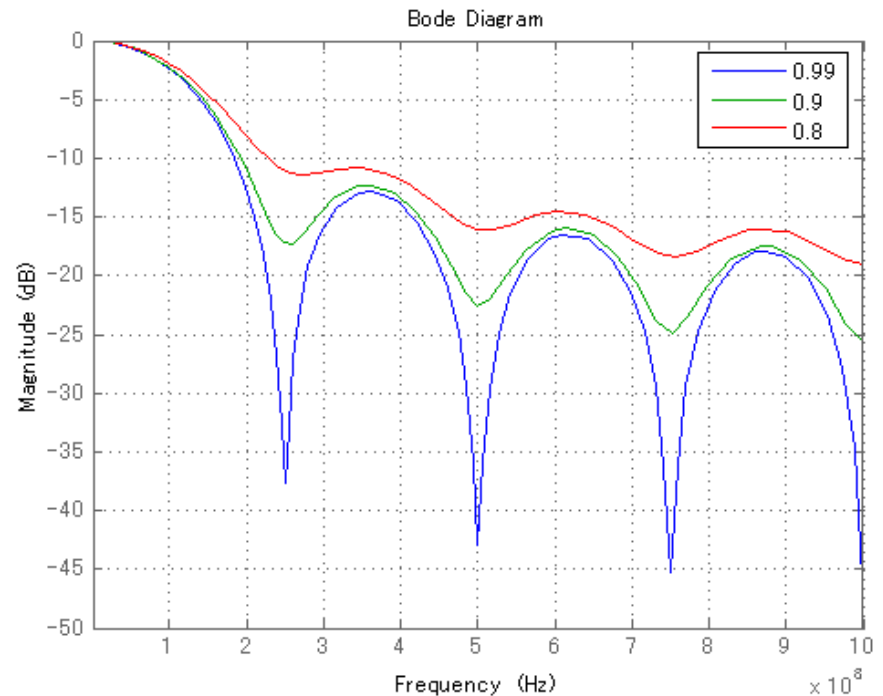
$$\left| \frac{Y(Z)}{X(Z)} \right| = \sqrt{\frac{1 + h^{2N} - 2h^N \cos(N\omega T)}{1 + h^2 - 2h \cos(\omega T)}}$$

移動平均フィルタ

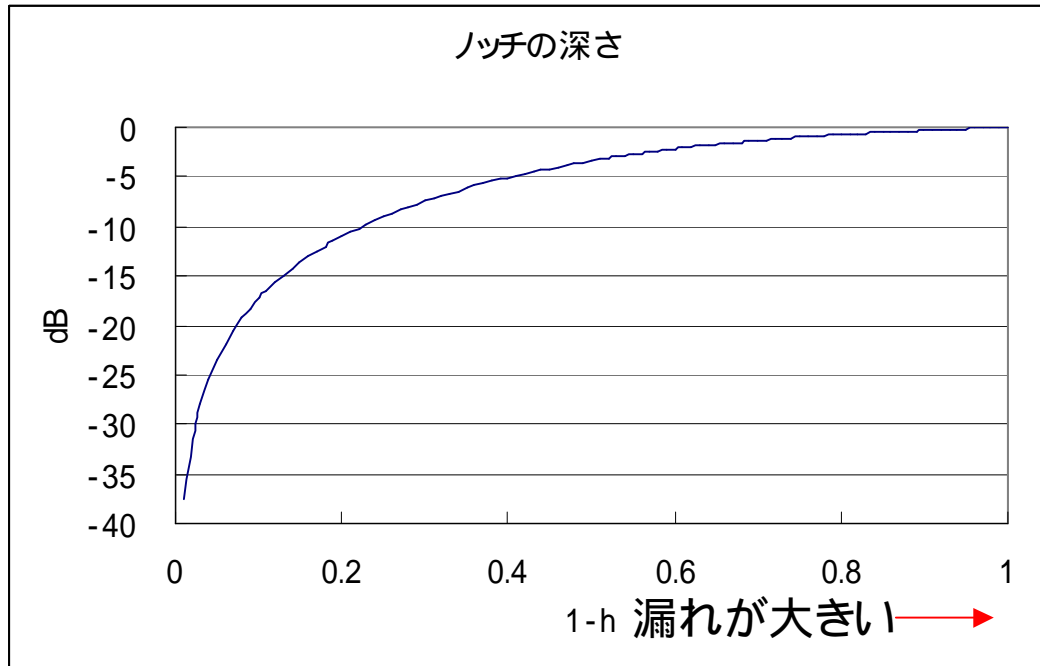


- Matlabシミュレーション
- $h=0.8, 0.9, 0.99$
- サンプリング 2GHz

hが0に近づくと
ノッチは浅くなる



TAの出力インピーダンスの影響の まとめ



@f0/N (N=8)

$$h = \exp\left(-\frac{T}{2RC}\right)$$

Cr=1p, Ch=30p,
ノッチの深さ < -30dB

Roは277 以上

まとめ

サンプリングミキサはFIR・IIRフィルタによって

効果的に妨害波を除去可能

注意点

- セトリング特性
 - スイッチのオン時間が時定数に比べ十分に大きくないと遮断周波数が低下する
- 容量ばらつき
 - 容量ばらつきがあるとノッチが浅くなる
- ノイズ
 - 容量は小さいほうがNF向上
- TAの出カインピーダンス
 - R_o が小さいとフィルタの役割を成さない

今後の課題

- LNAとMixerの結合
- フィルタ特性の可変性