

# サンプリングミキサに向けた CMOSトランスコンダクタンス アンプの解析

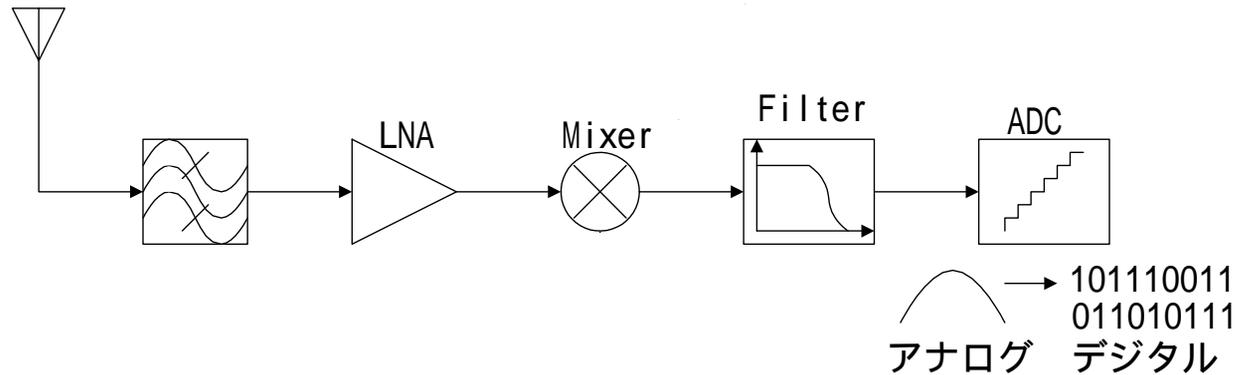
李 寧, チャイヴィパース ウィン, 倉科 隆,  
岡田 健一, 松澤 昭  
東京工業大学大学院理工学研究科  
電子物理工学専攻

# 内容

- 背景・目的
- サンプリングミキサの基本動作
- 寄生素子を含んだ動作解析
  - 電荷積分
  - 移動平均
- 結論

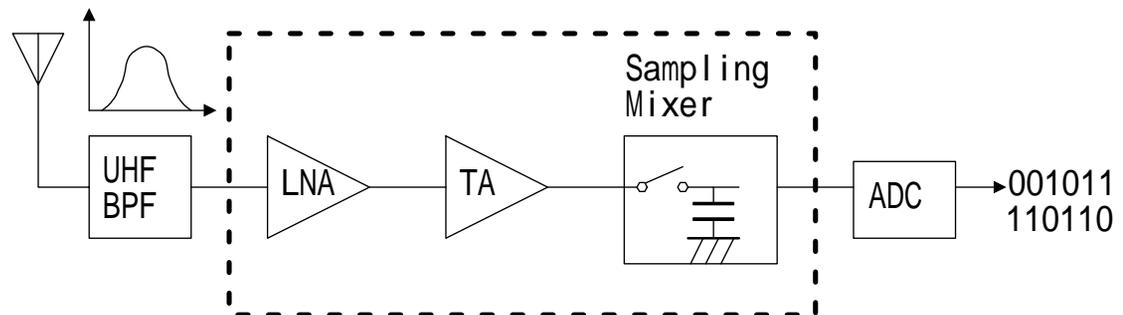
# 背景

現行システム  
単一バンド  
単一スタンダード

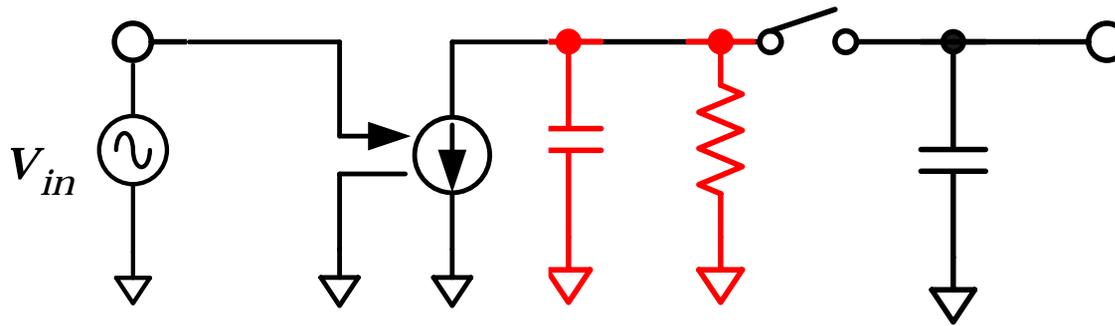


将来のシステム  
マルチバンド  
マルチスタンダード

- ・Mixer+Filterの働き
- ・Reconfigurable



# 目的



サンプリングミキサ

サンプリングミキサにおいてTAの性能が重要

・出力抵抗 } フィルタ特性の劣化  
・寄生容量 }

出力抵抗、寄生容量がサンプリングミキサの性能に与える影響について明らかにする。

# 内容

- 背景・目的
- サンプリングミキサの基本動作
- 寄生素子を含んだ動作解析
  - 電荷積分
  - 移動平均
- 結論

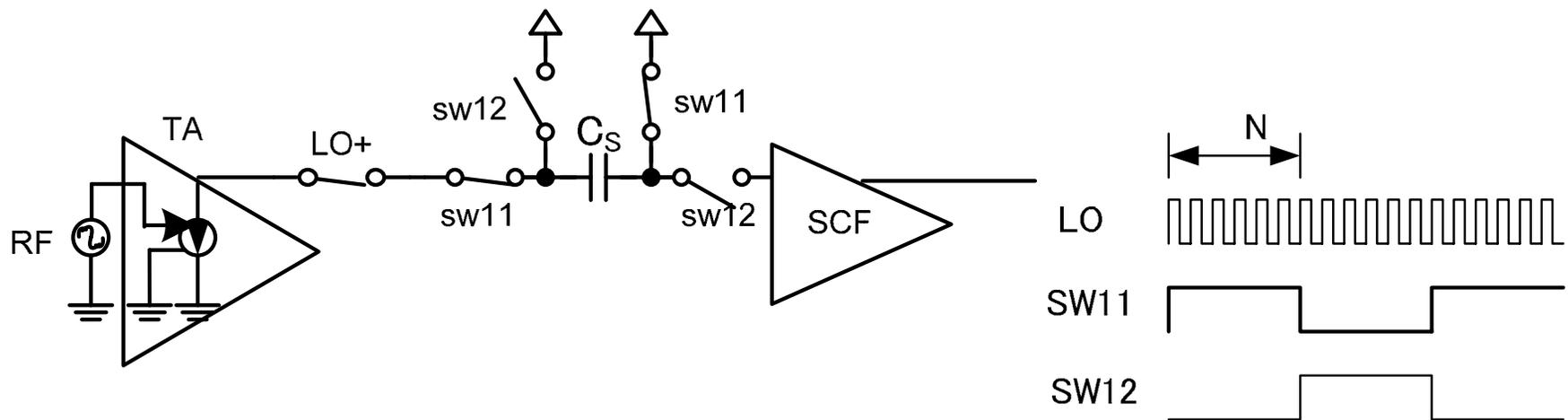
# サンプリングミキサの動作

## 1. 電流積分

クロックLOの1周期でサンプリング容量が貯まる電荷

## 2. 移動平均

クロックLOのN周期でサンプリングの効果

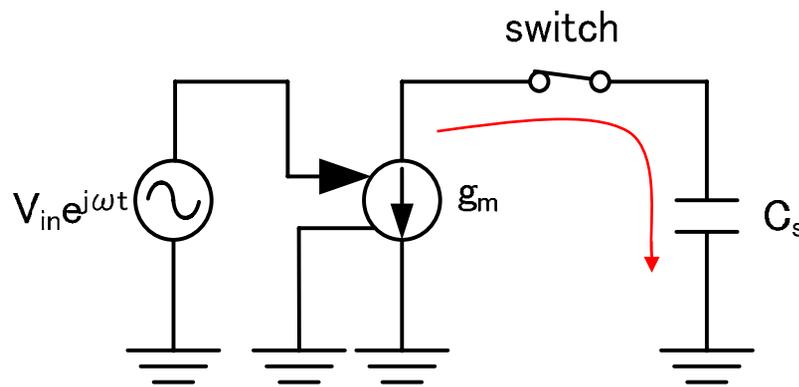


# 1. 電流積分(1)

- $T_{on}$  : サンプル周波数のデューティ
- $C_s$  : サンプル容量

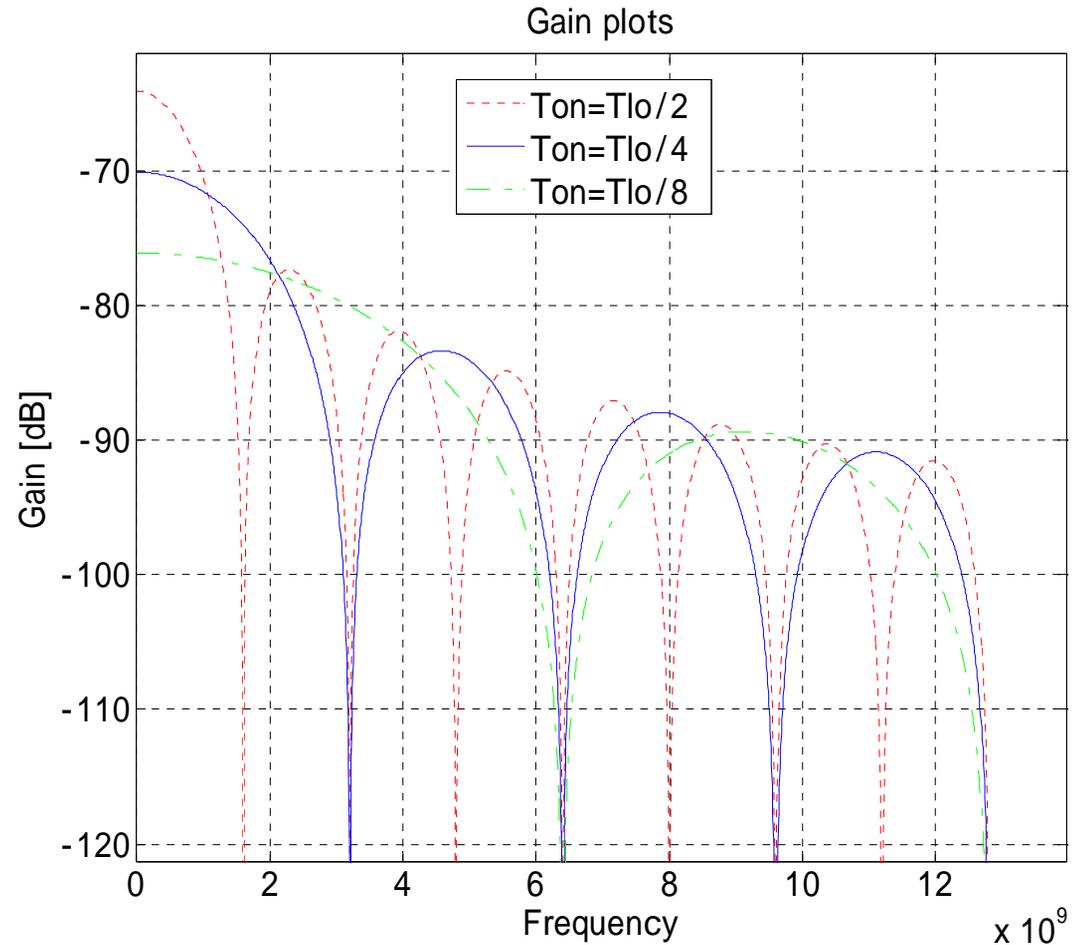
TA入力からサンプリング  
容量までの電圧伝達関数

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



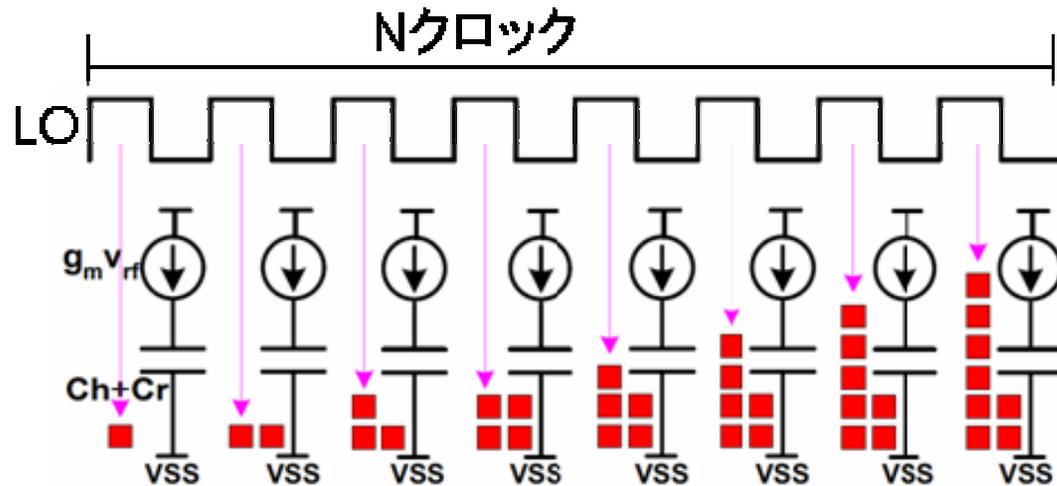
# 1. 電流積分(2)

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



電流積分によりノッチが発生

## 2. 移動平均(1)



$u_i$  :  $i$ 番目にサンプリングされた電荷

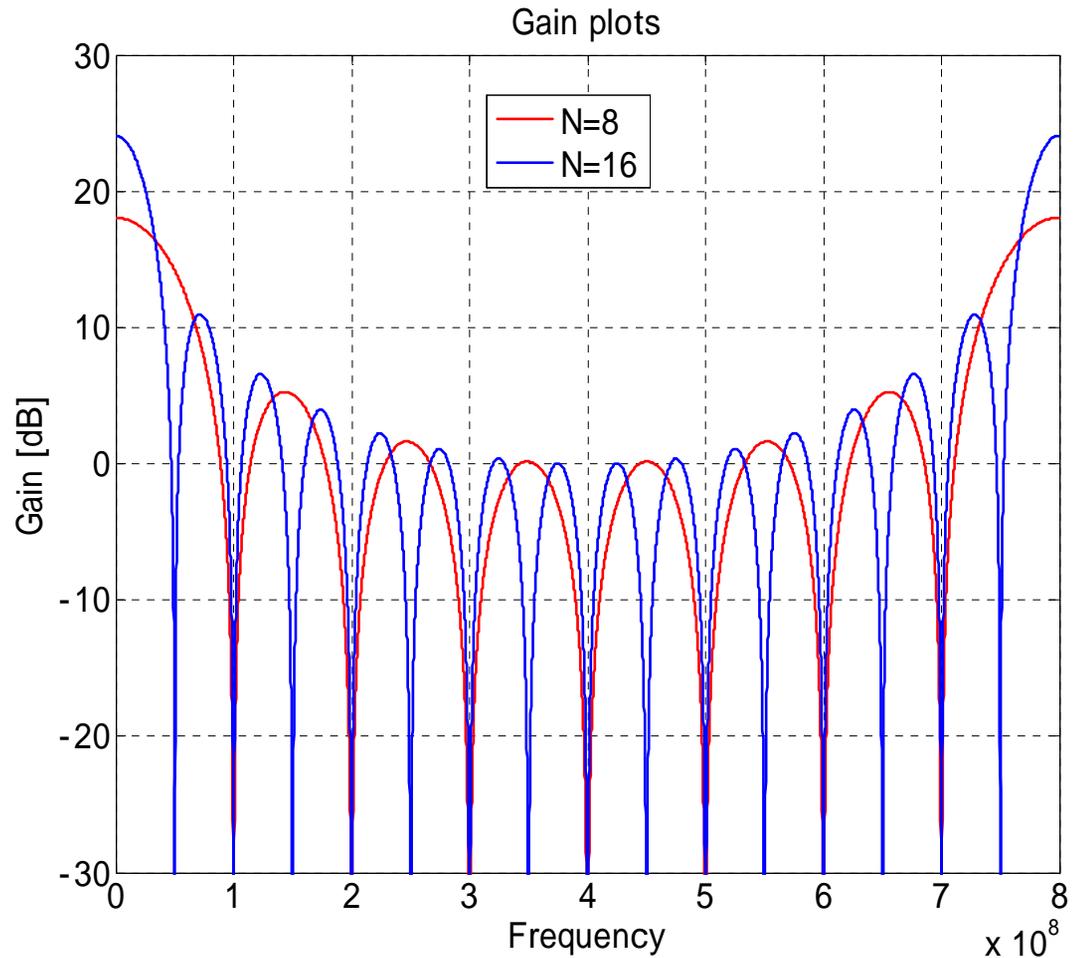
$w_i$  :  $N$ クロックの間に蓄積された電荷

$T$  : サンプリング周期

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

## 2. 移動平均(2)

$$|F_{1stSinc}(\omega)| = \frac{\left| \sin\left(\frac{N\omega T}{2}\right) \right|}{\left| \sin\left(\frac{\omega T}{2}\right) \right|}$$



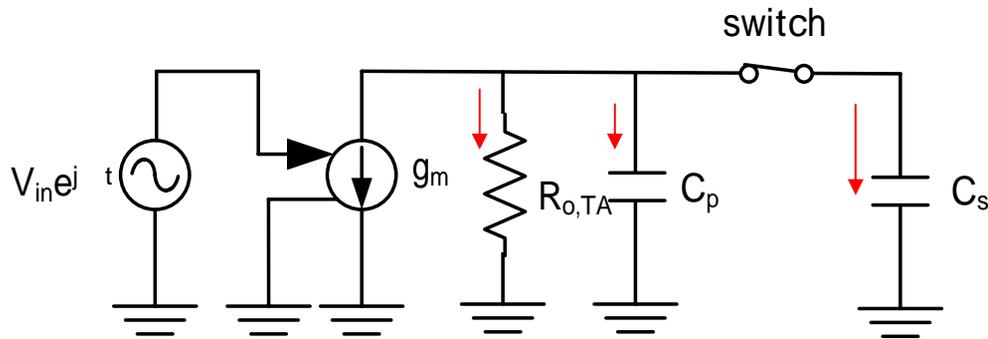
移動平均によりノッチが発生

# 内容

- 背景・目的
- サンプリングミキサの基本動作
- 寄生素子を含んだ動作解析
  - 電荷積分
  - 移動平均
- 結論

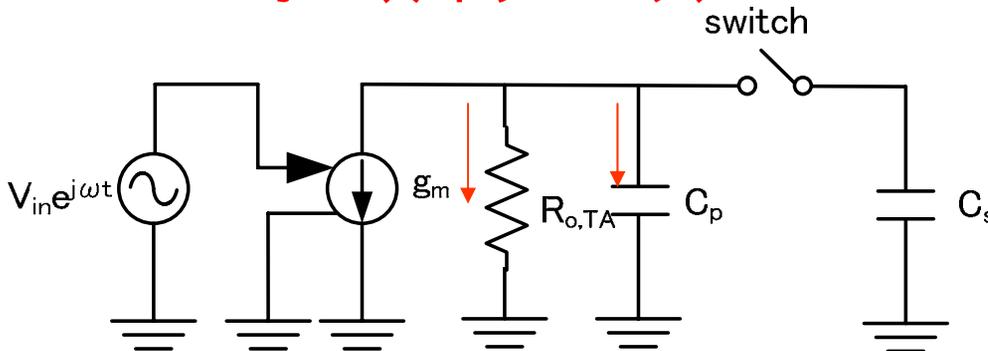
# 検討方法(1)

## サンプリングフェーズ



TAの出力抵抗と  
出力ノードの寄生容量  
を考慮し伝達関数を導出

## ホールドフェーズ



$C_p$  : 寄生容量  
 $R_{o,TA}$  : TAの出力抵抗  
 $C_s$  : サンプリング容量

# 計算結果(1)

## 電荷積分

サンプリングコンデンサに貯まる電荷

$$\left| \frac{v_{C_s}}{v_{in}} \right| = g_m \left[ \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2} \left( 1 + e^{-\frac{2T_{on}}{R(C_s + C_p)}} - 2 \cos(\omega T_{on}) e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \right) + \left(\frac{C_p}{C_s + C_p}\right)^2 \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_p)^2} \left( 1 + e^{-\frac{2T_{off}}{RC_p}} - 2 \cos(\omega T_{off}) e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$+ 2 \frac{C_p}{C_s + C_p} \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_p)^2} \left( \left(\frac{1}{R}\right)^2 + \omega^2 (C_s + C_p) C_p \right) \left( \cos(\omega T_{on}) - e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} - e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \cos(\omega T) + e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \frac{T_{off}}{RC_p} \cos(\omega T_{off}) \right)$$

$$+ 2 \frac{C_p}{C_s + C_p} \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2} \frac{1}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_p)^2} \frac{\omega C_s}{R} \left( \sin(\omega T_{on}) - e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \sin(\omega T) + e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \frac{T_{off}}{RC_p} \sin(\omega T_{off}) \right)$$

# 計算結果(1)

## 電荷積分

$$\left| \frac{V_{C_s}}{V_{in}} \right| = g_m \left[ \left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2 \left( 1 + e^{-\frac{2T_{on}}{R(C_s + C_p)}} - 2 \cos(\omega T_{on}) e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \right) + \left( \frac{C_p}{C_s + C_p} \right)^2 \frac{1}{\left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega C_p)^2} \left( 1 + e^{-\frac{2T_{off}}{RC_p}} - 2 \cos(\omega T_{off}) e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$+ 2 \frac{C_p}{C_s + C_p} \frac{1}{\left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2} \frac{1}{\left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega C_p)^2} \left( \left( \frac{1}{R} \right)^2 + \omega^2 (C_s + C_p) C_p \right) \left( \cos(\omega T_{on}) - e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} - e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \cos(\omega T) + e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \frac{T_{off}}{RC_p} \cos(\omega T_{off}) \right)$$

$$+ 2 \frac{C_p}{C_s + C_p} \frac{1}{\left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega(C_s + C_p))^2} \frac{1}{\left( \frac{1}{R} \right)^2 + (\omega C_p)^2} \frac{\omega C_s}{R} \left( \sin(\omega T_{on}) - e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} \sin(\omega T) + e^{-\frac{T_{on}}{R(C_s + C_p)}} \frac{T_{off}}{RC_p} \sin(\omega T_{off}) \right)$$

寄生コンデンサに貯まる電荷

# 分析1 -- 積分

## ■ $C_p$ の影響 ( $R$ )

$$\left| \frac{v_{C_s}}{v_{in}} \right| = \left| \frac{g_m T \sin\left(\frac{T}{2}\omega\right)}{(C_s + C_p) \left(\frac{T}{2}\omega\right)} \right| \quad (1)$$

## ■ $R$ の影響 ( $C_p=0$ )

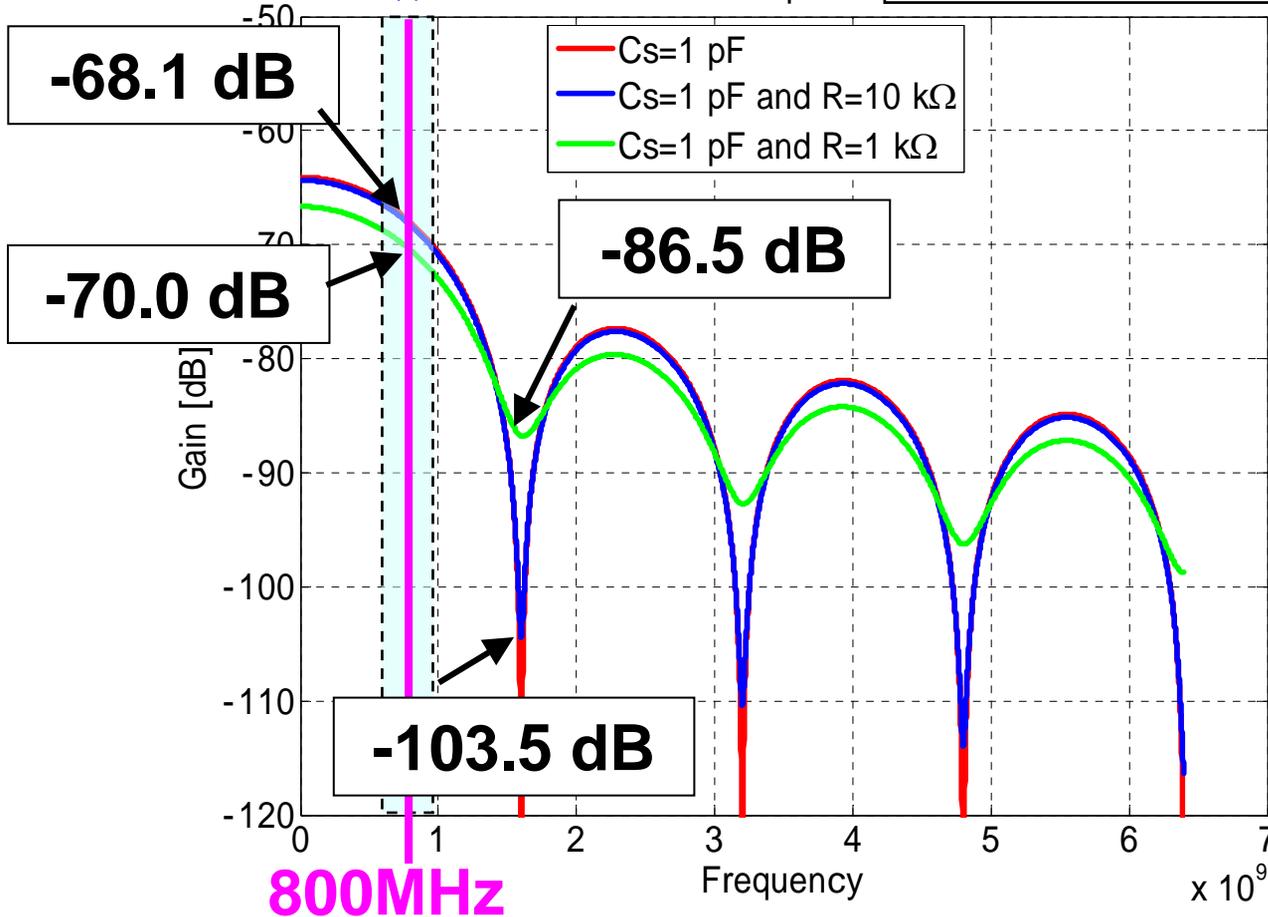
$$\left| \frac{v_{C_s}}{v_{in}} \right| = \left| \frac{g_m}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_s)^2}} \sqrt{\left(1 - \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)\right)^2 + 4 \sin^2\left(\frac{\omega T_{on}}{2}\right) \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)} \right| \quad (2)$$

# Rの影響 ( $C_p=0$ )

信号帯域

$$\left| \frac{v_{C_s}}{v_{in}} \right| = \frac{g_m}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_s)^2}} \sqrt{\left(1 - \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)\right)^2 + 4 \sin^2\left(\frac{\omega T_{on}}{2}\right) \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)}$$

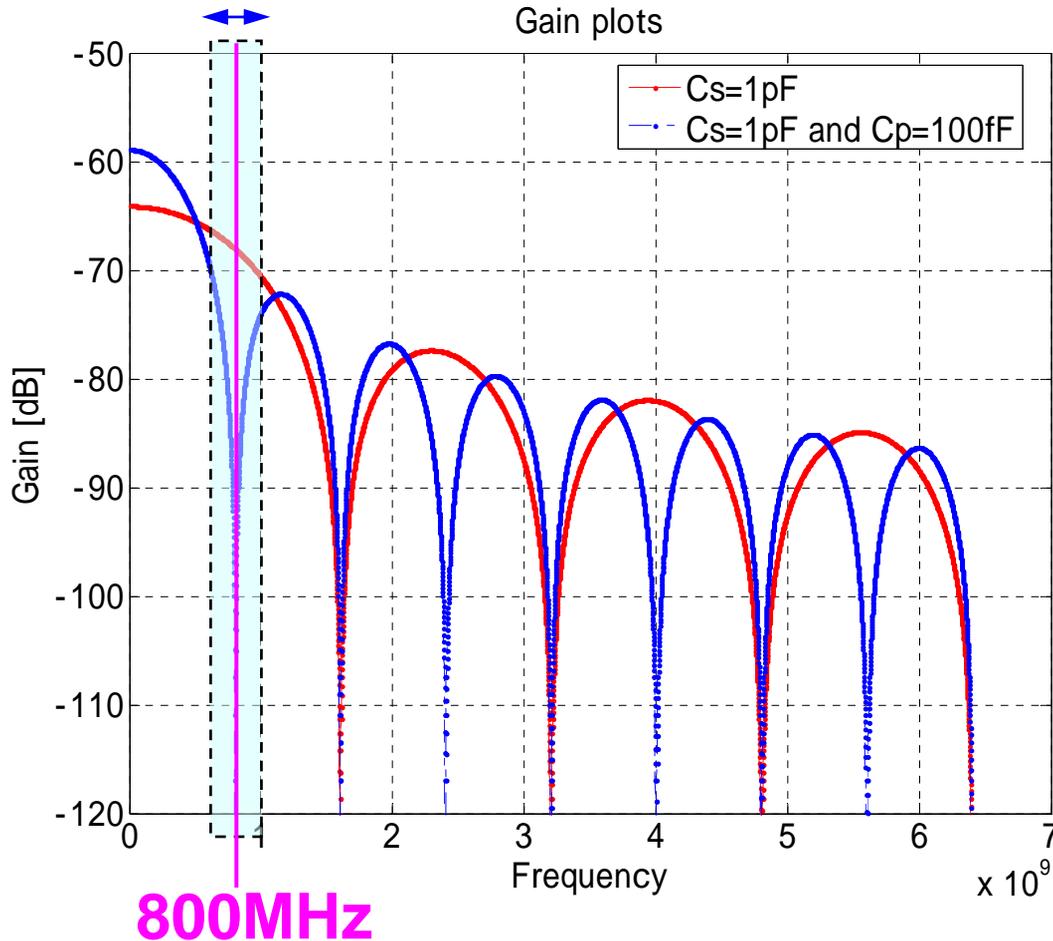
Gain plots



1. 入力信号のゲインが低下。
2. ノッチが浅くなる。

# $C_p$ の影響 (R)

信号帯域

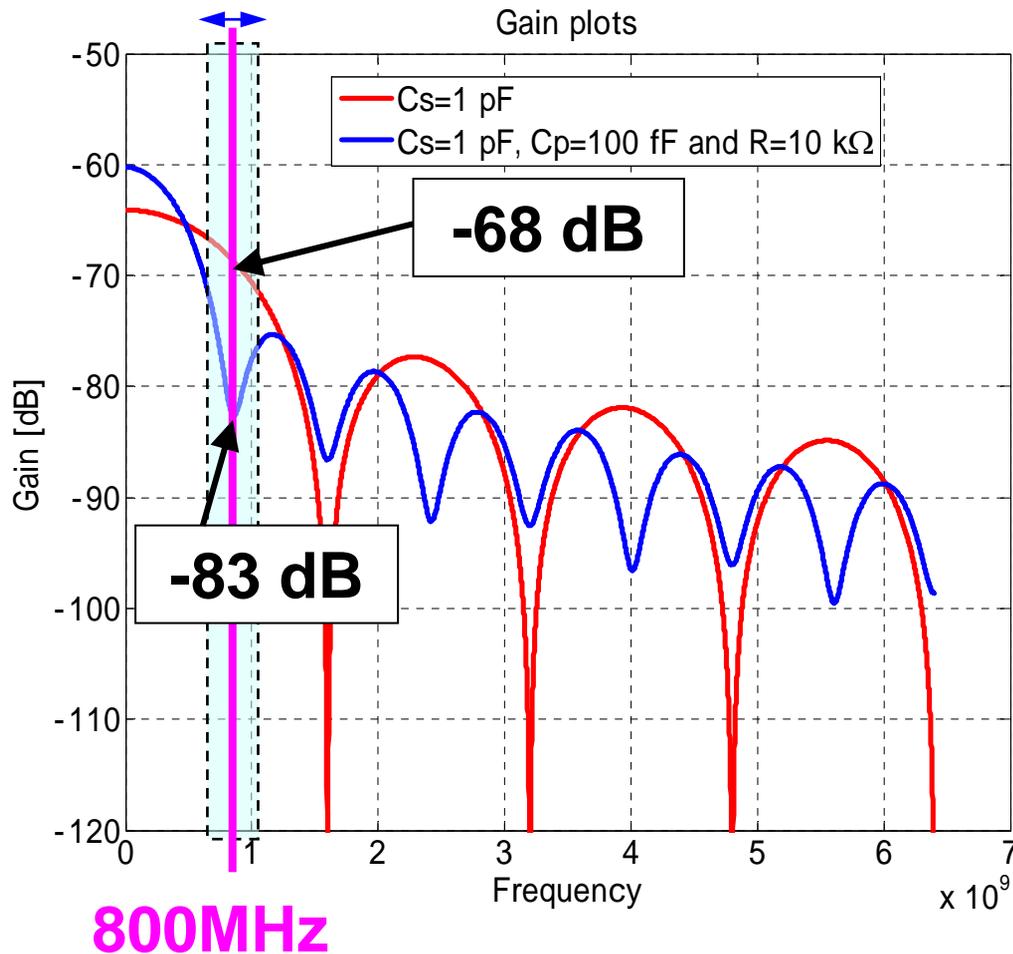


$$\left| \frac{v_{C_s}}{v_{in}} \right| = \left| \frac{g_m T \sin\left(\frac{T}{2}\omega\right)}{(C_s + C_p) \left(\frac{T}{2}\omega\right)} \right|$$

1. サンプリング周波数の奇数倍にもノッチが発生.
2. 入力信号はノッチにより減少する.

# $C_p$ と $R_{o,TA}$ の影響

信号帯域



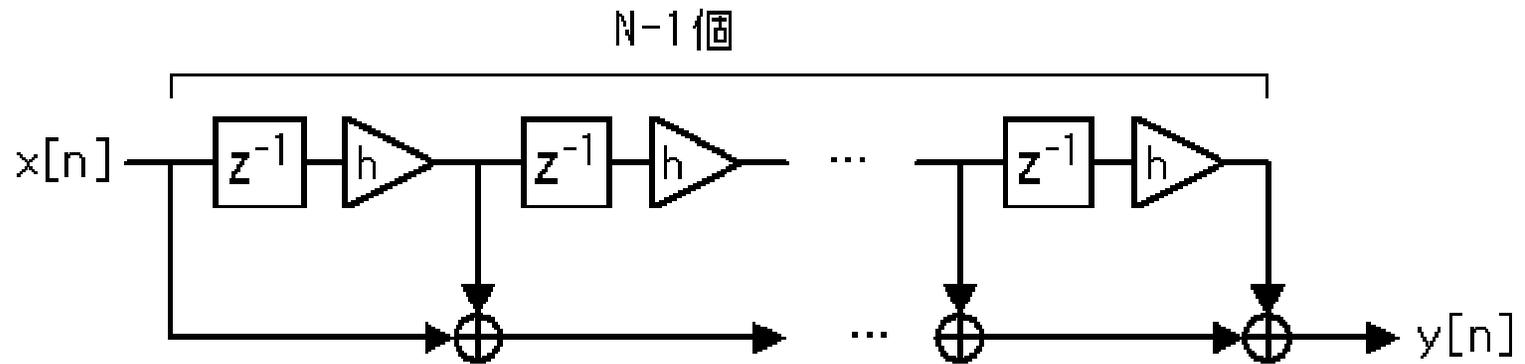
1. 全体のノッチが浅くなる。
2. 入力信号のゲインが理想より約15dB低下。

# 内容

- 背景・目的
- サンプリングミキサの基本動作
- 寄生素子を含んだ動作解析
  - 電荷積分
  - 移動平均
- 結論

# 検討方法(2)

## 移動平均モデル



## 移動平均の減衰係数 $h$ の導出

# 計算結果(2)

## 移動平均

$$|F_{1stSinc}(\omega)| = \sum_{m=0}^{N-1} (hz^{-1})^m = \sqrt{\frac{1 + h^{2N} - 2h^N \cos(N\omega T)}{1 + h^2 - 2h \cos(\omega T)}}$$

$$h = \frac{C_p e^{-\frac{T_{off}}{RC_p}} + C_s e^{-\frac{T_{on}}{R(C_p+C_s)}}}{C_s + C_p} \quad T = T_{on} + T_{off}$$

1. 積分時間、サンプリング周波数、寄生容量、およびTAの出力抵抗が減衰係数 $h$ に影響する。
2. ノッチの深さが $h$ の値に依存する;  $h$ が減少するのに従って、ノッチが浅くなる。

# 分析2—移動平均

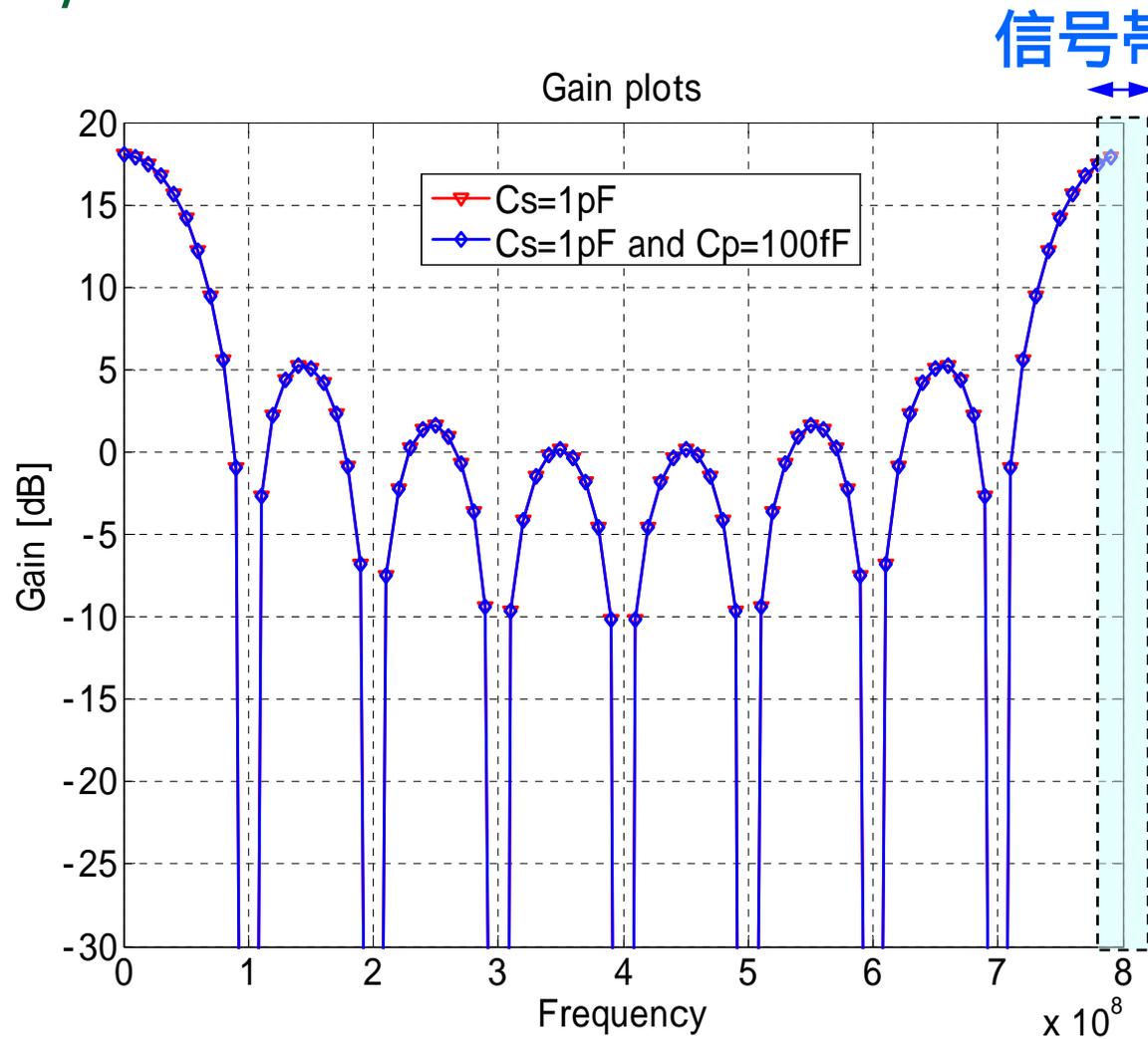
- $C_p$ の影響 ( $R = 0$ )

$$h = 1$$

- $R$ の影響 ( $C_p = 0$ )

$$h = \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)$$

# $C_p$ の影響 (R )

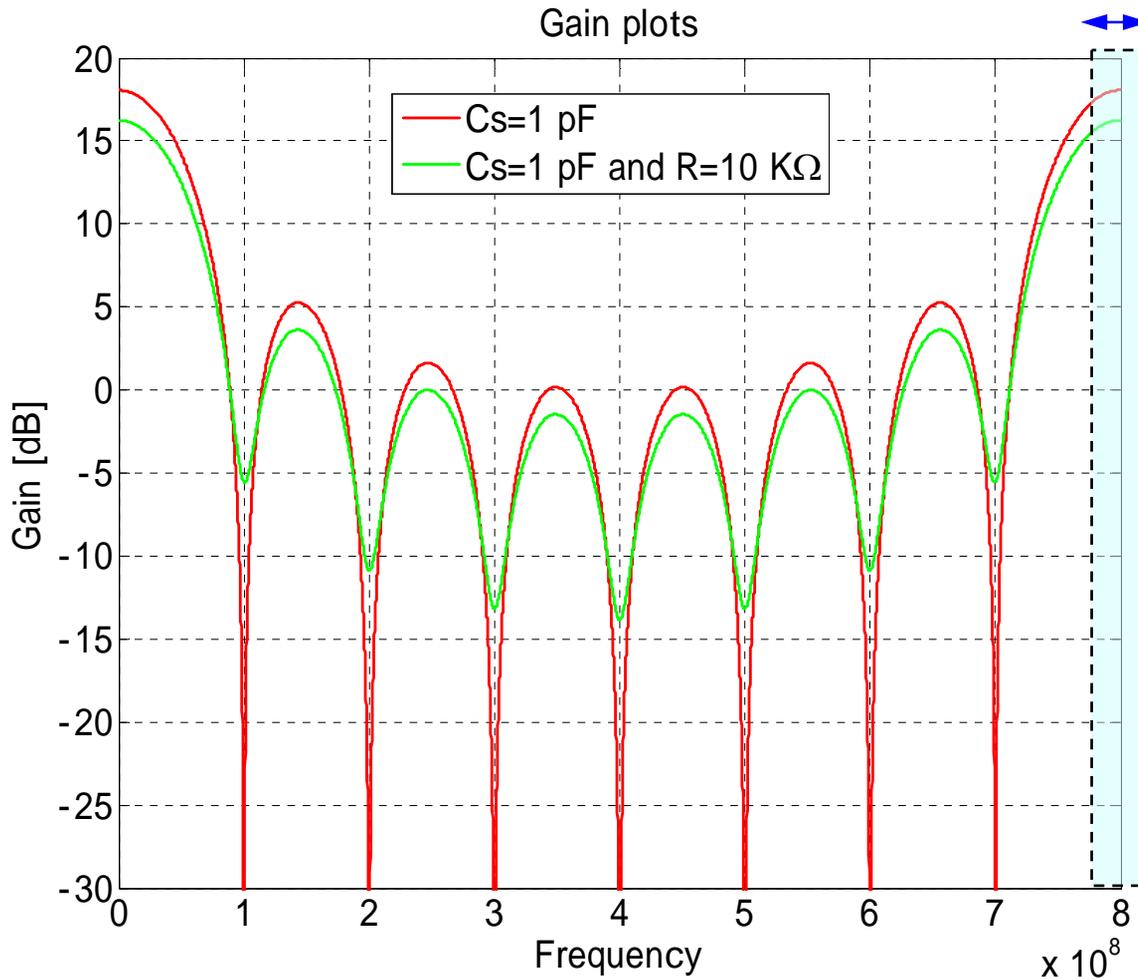


$$h = 1$$

- $C_p$  の影響はなし

# Rの影響 ( $C_p=0$ )

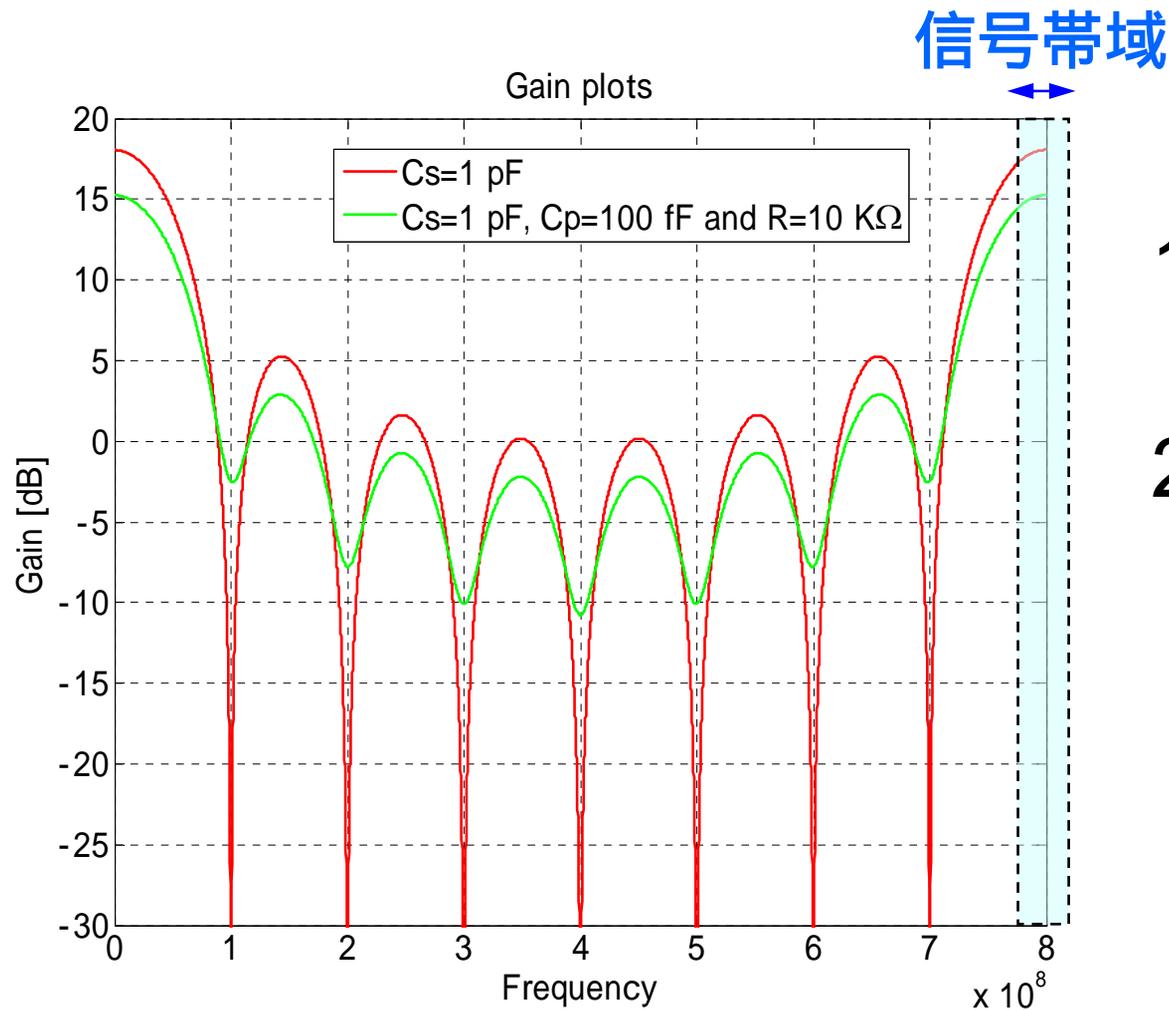
信号帯域



$$h = \exp\left(-\frac{T_{on}}{RC_s}\right)$$

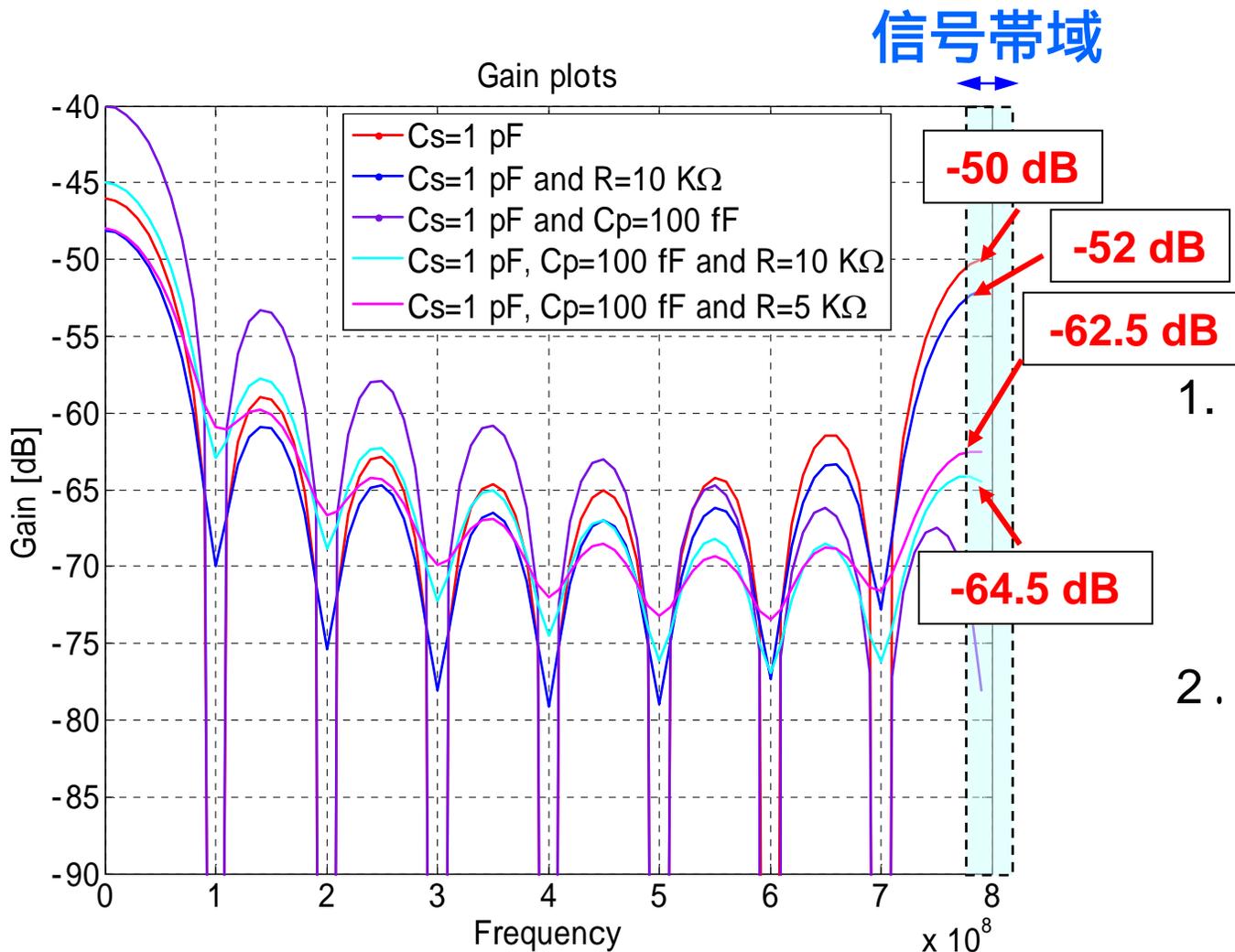
1. ノッチが浅くなる。
2. ゲインも減少する。

# $C_p$ と $R_{o,TA}$ の影響



1. ノッチが浅くなる。
2. ゲインも減少する。

# 全てを考慮した伝達特性



1. サンプリング周波数における利得は Cp(100fF)と R(10k )の場合 約14dB低下
2. ノッチの深さとサンプリング周波数部分の利得の間には、TAの出力抵抗に関してトレードオフがある

# 内容

- 背景・目的
- サンプリングミキサの基本動作
- 寄生素子を含んだ動作解析
  - 電荷積分
  - 移動平均
- 結論

# 結論

- サンプリングミキサ動作における積分と移動平均に対して、TAの出力抵抗と寄生容量の影響を明らかにした。
- 寄生容量は、サンプリング周波数近傍における周波数特性に影響を与え、不要なノッチを生成する。サンプリング周波数近傍における利得が大きく下がるのが問題である。
- TA の出力抵抗の影響に関して、ノッチが浅くなり利得も低下する。
- ノッチの深さとサンプリング周波数近傍での利得には、TAの出力抵抗に関してトレードオフがある。

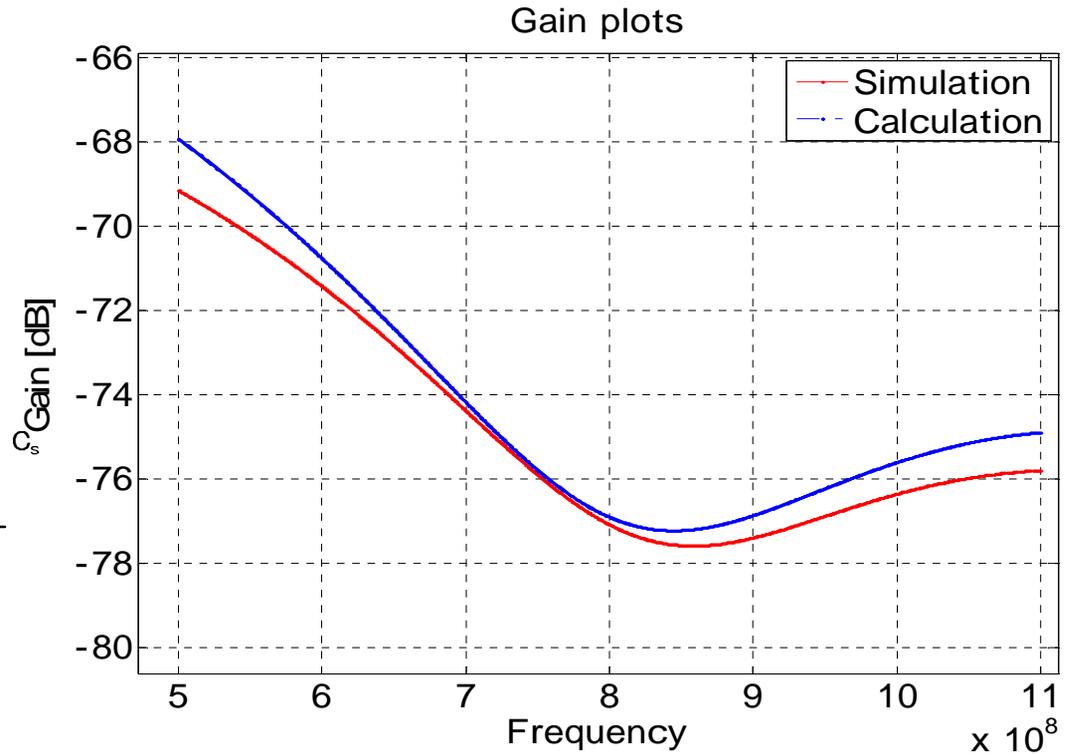
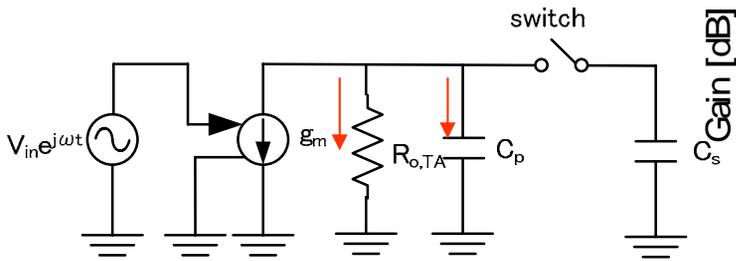
---

# Thank You

---

## Question?

# 積分の確認



$C_p$	$C_s$	$R$	$f_{sig}$	$T_{on}$
100 fF	1 pF	10 k	800 MHz	200 pS