

Explicit Analysis of Channel Mismatch Effects in Time-Interleaved ADC Systems

N.Kurosawa, K.Maruyama, H.Kobayashi,

H.Sugawara and K.Kobayashi

Gunma University, Japan Teratec Corp. Japan

発表内容

1. 研究の目的
2. インターリーブADCの原理と問題点
3. ミスマッチが独立して存在する場合の影響
4. ミスマッチが同時に存在する場合の影響
5. 帯域ミスマッチの影響
6. まとめ

1. 研究の目的

研究の目的

インターリーブ・アーキテクチャを用いて
最高速のADCを実現する場合の、
システム上の問題の理論解析を行う。

2. インターリーブADCの原理と問題点

高速・高精度ADCの構成

2 高速ADCの構成

- ± 大部分の回路が比較的低い周波数のクロックで動作
- ± 周波数の高い信号の発生が不要
- ± 周波数の高い信号が不要
- ± タイミングの問題が少ない(例:タイミングスキュー)

2 高精度ADCの構成

- ± 高精度回路が不要
- ± 大きなプロセス変動を許容
- ± 低ノイズ回路・デバイスが不要

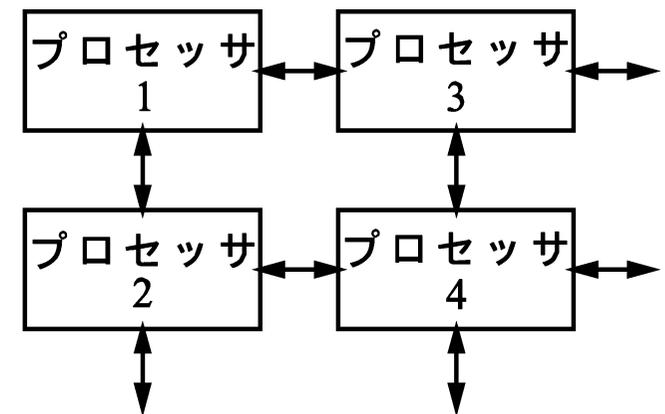
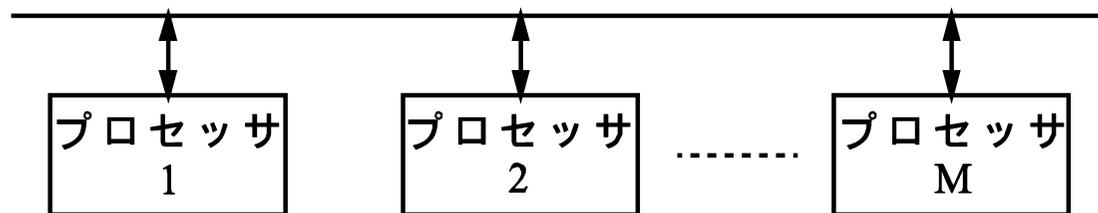
例: デルタ・シグマADC

- ! サブミクロンCMOSのアナログCMOS回路
- ! 高精度回路が不要
- ! 低ノイズ回路が不要

マルチプロセッサ構成

2 デジタルの世界では、マルチプロセッサ構成は非常に一般的

- ± 多くの低性能プロセッサ
- ± 高性能を実現

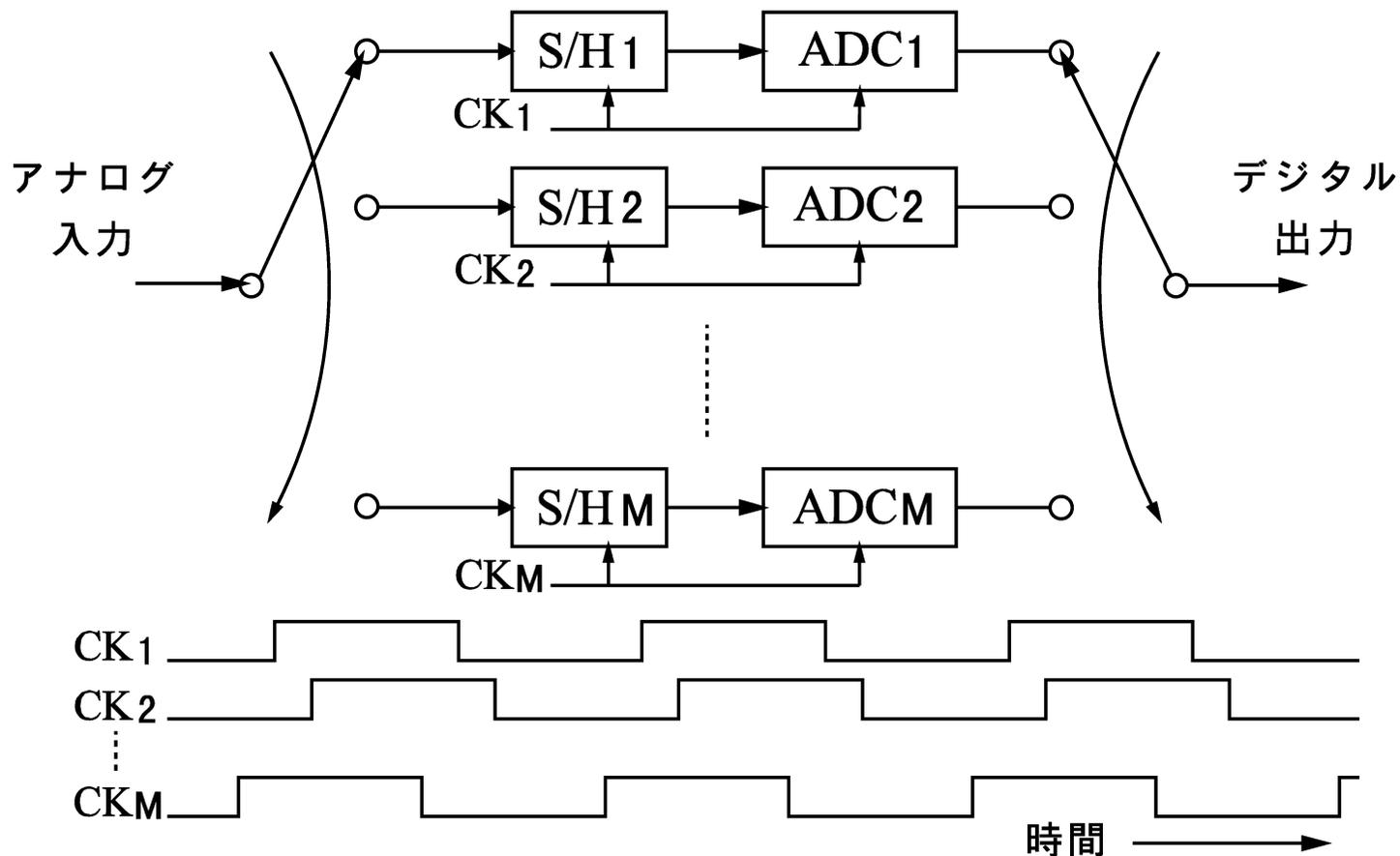


2 問題点

- ± ソフトウェア開発の負担が重い
- ± マルチプロセッサの性能 \propto プロセッサ 1 個の M 倍の性能
M : プロセッサ数

インターリーブADCの原理と問題点

- 2 M個のADCのインターリーブでM倍のサンプリングレートを実現
- ± マルチプロセッサ構成の観点から、非常に効果的
 - ± サンプリングレートの高いADCに適している



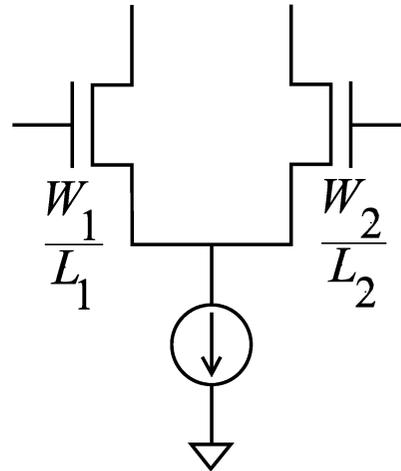
- 2 チャンネル間ミスマッチによってS/Nが低下
通常キャリブレーションが必要

アナログ回路システムのミスマッチ

2 回路レベルのミスマッチ

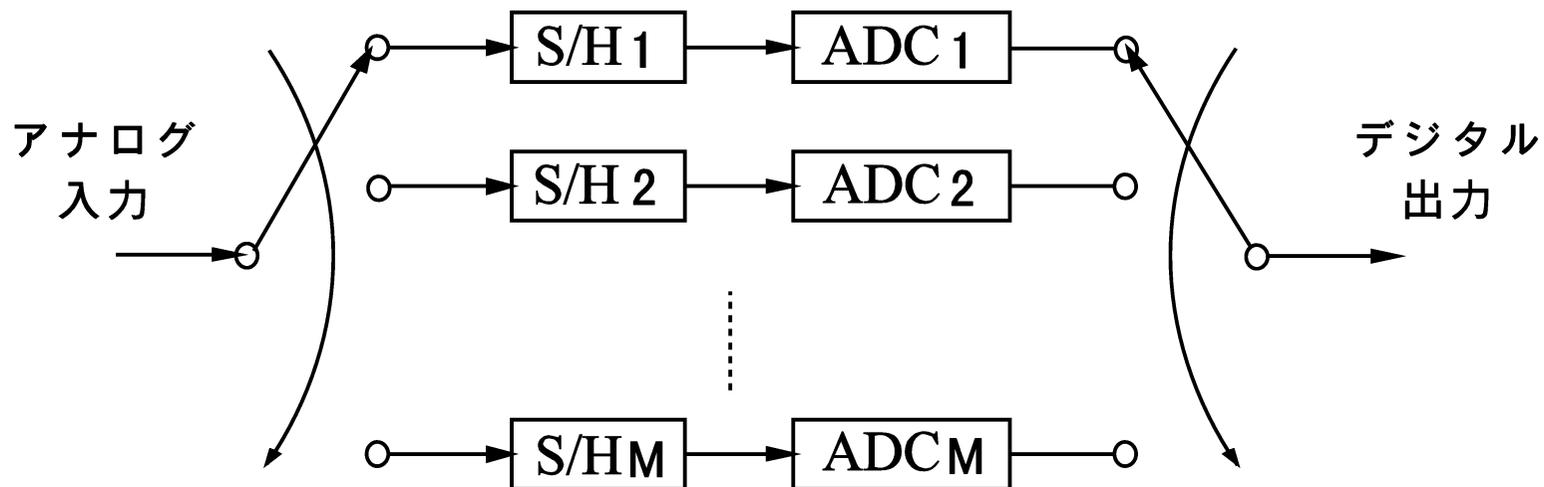
例: 差動ペアのオフセット V_{os}

$$(V_{os})_{rms} \propto \frac{1}{WL}$$



2 システムレベルのミスマッチ

例: インターリーブADCのチャンネル間のミスマッチ



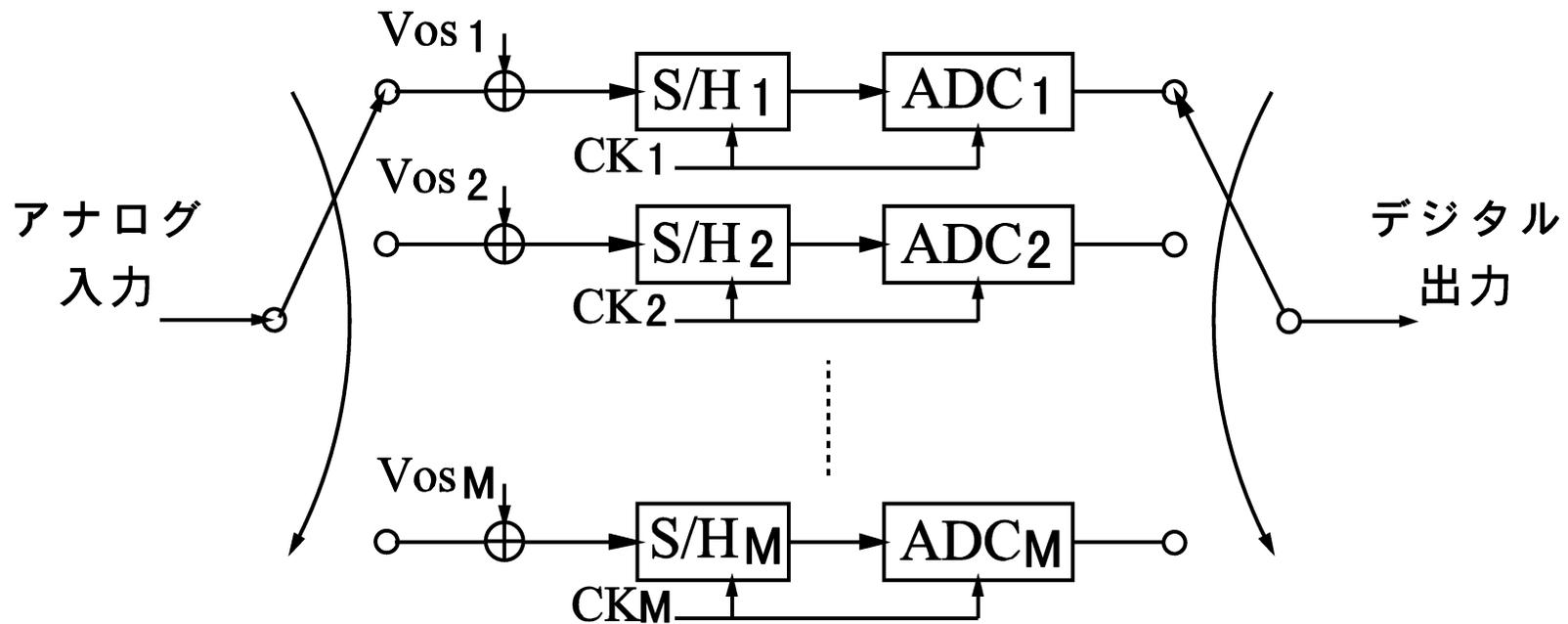
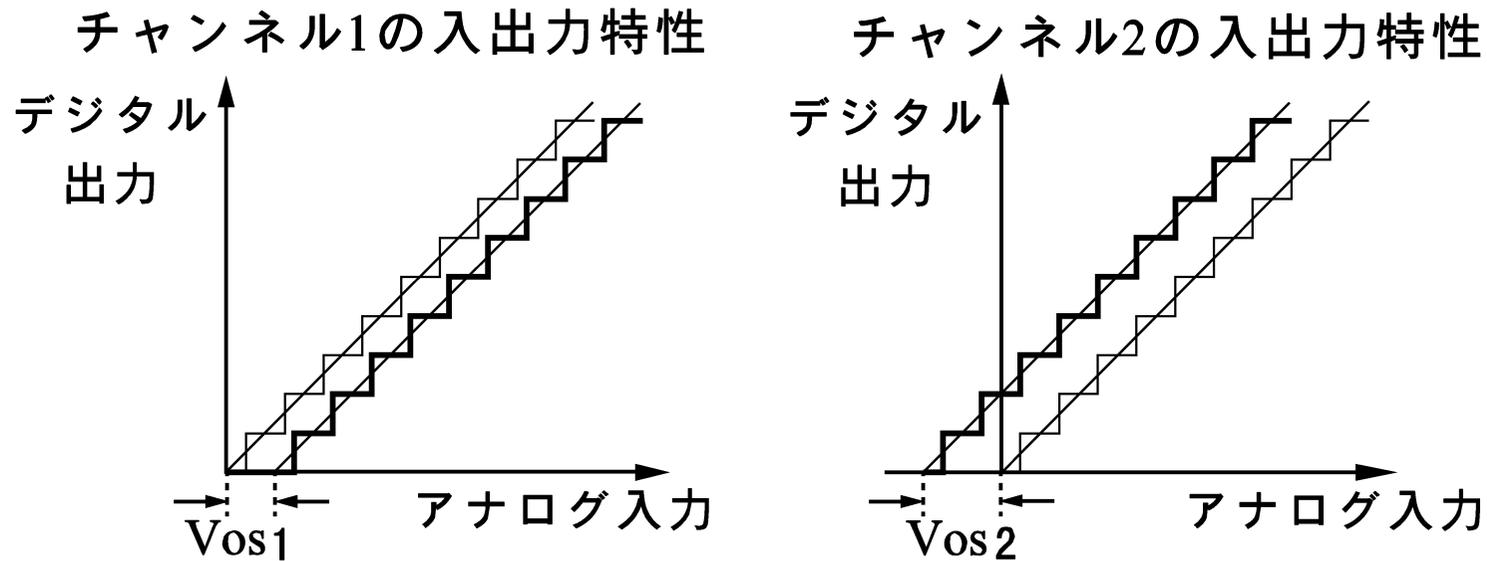
3. ミスマッチが独立して

存在する場合の影響

チャンネル間ミスマッチの影響

- オフセットミスマッチの影響

オフセットミスマッチのモデル



オフセットミスマッチの時間領域での影響

2 パターンノイズ

± ほぼ入力周波数と独立

± 加算的ノイズ

± $f_S = M$ 周期

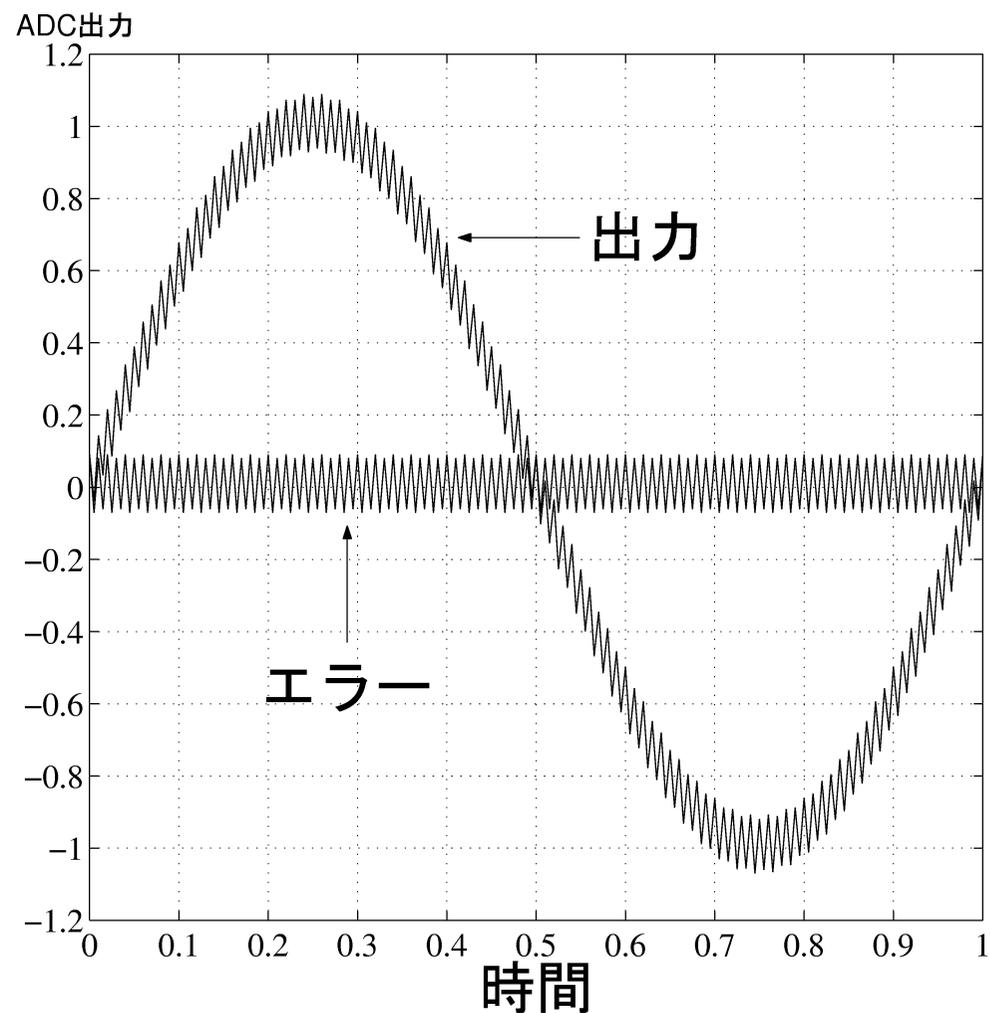
f_S : サンプルング周波数

M : チャンネル数

2 4チャンネルADCのシミュレーション

± 正弦波入力

ADCシステムの入力とエラー



オフセットミスマッチの周波数領域での影響

2 パターンノイズの周波数

$$\pm \boxed{f_{\text{noise}} = k \cdot f_s / M}$$

$k = 1; 2; 3; \dots$

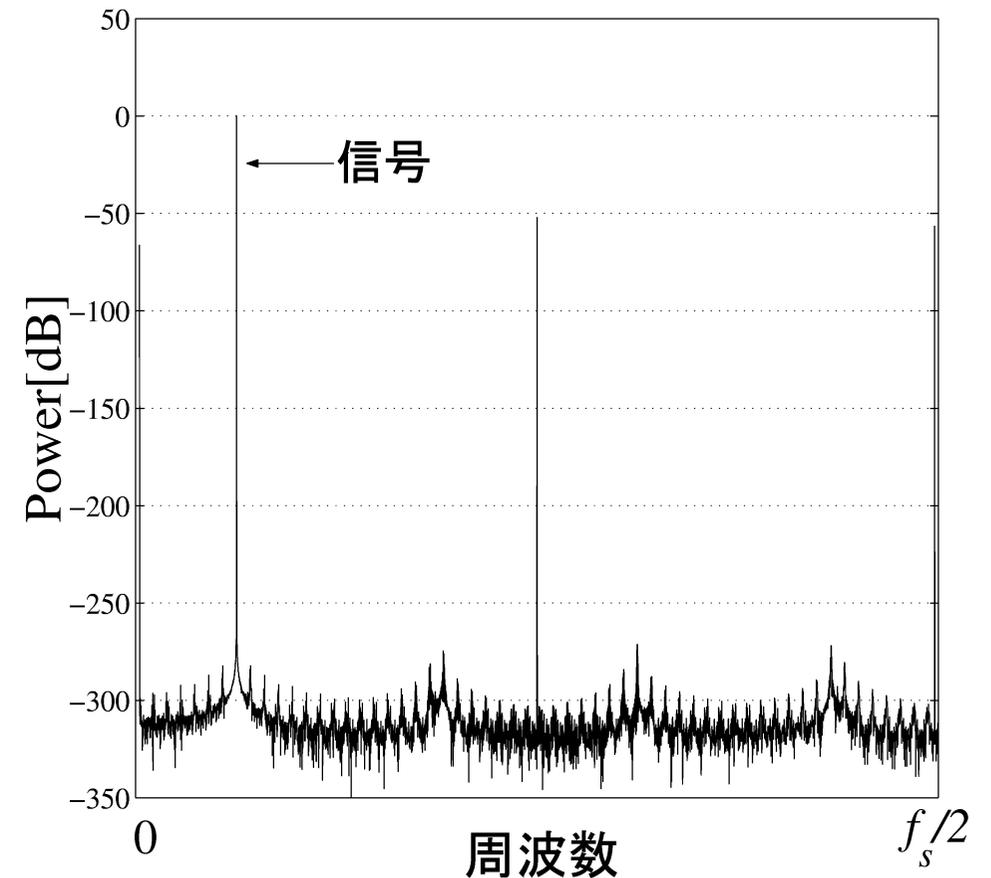
f_s : サンプル周波数

M : チャンネル数

2 4チャンネルADCのシミュレーション

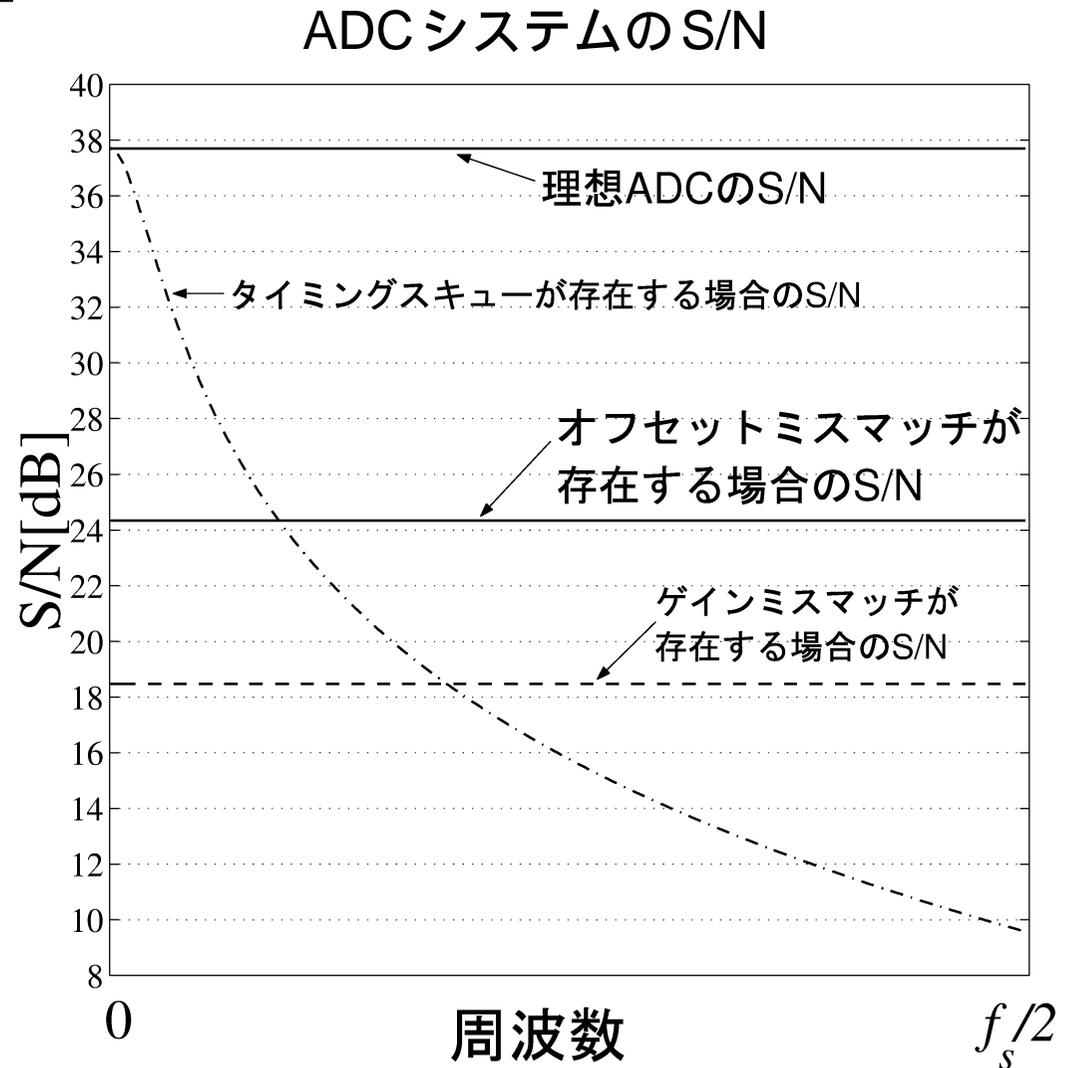
± 8192点FFT

ADC出力のパワースペクトラム



オフセットミスマッチのS/Nへの影響

- 2 4チャンネル6ビットADCのシミュレーション
- 2 オフセットミスマッチ：
S/Nは入力周波数に独立
ノイズレベルは入力振幅に独立

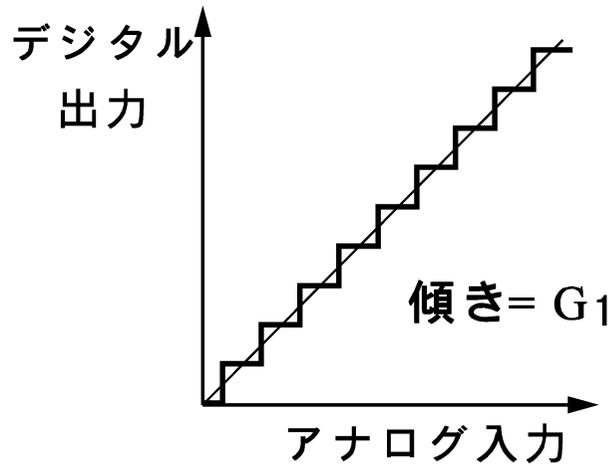


チャンネル間ミスマッチの影響

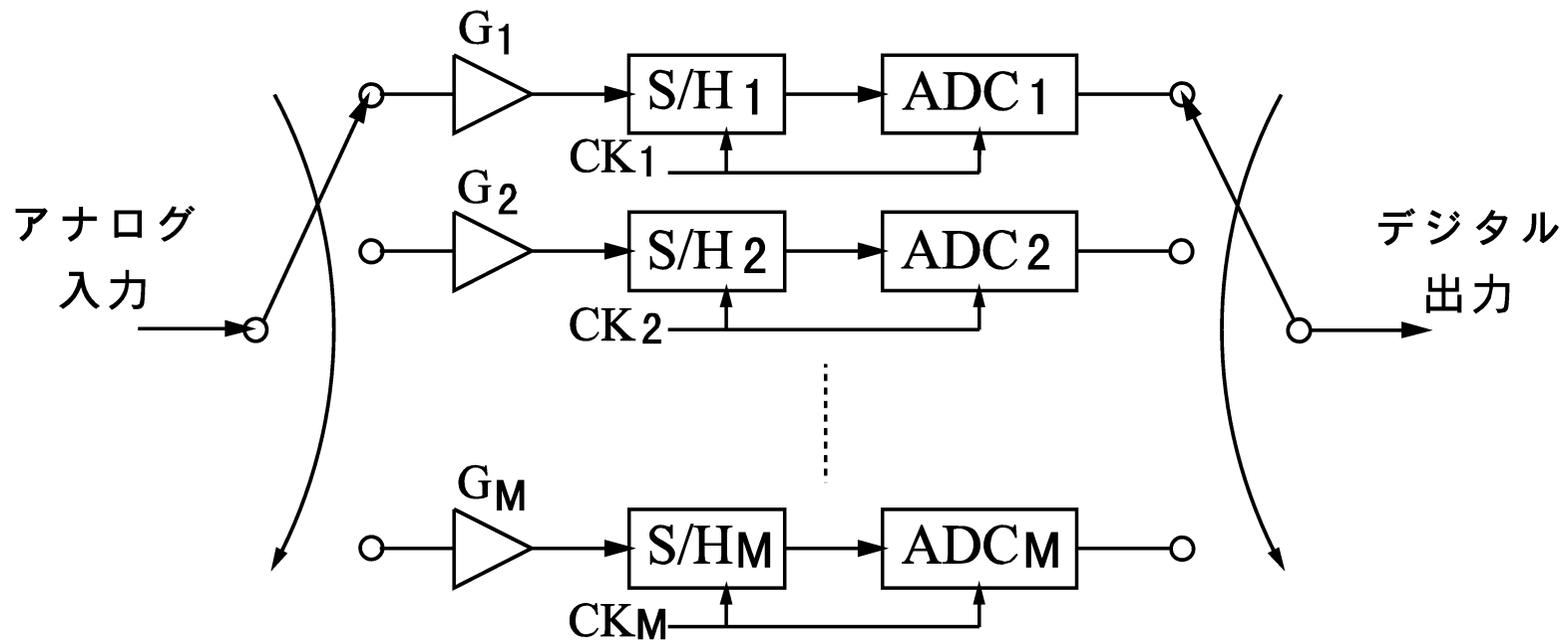
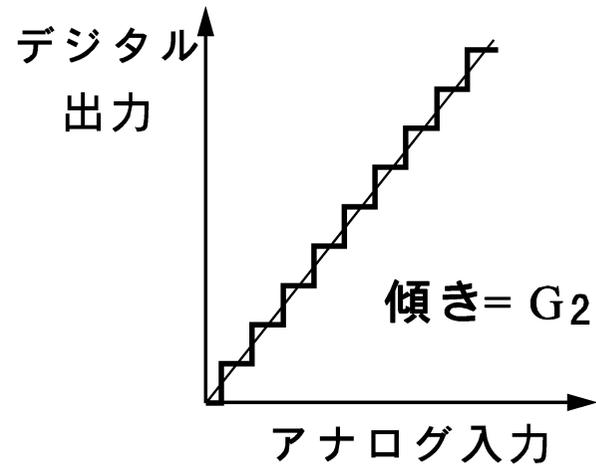
- ゲインミスマッチの影響

ゲインミスマッチのモデル

チャンネル1の入出力特性



チャンネル2の入出力特性



ゲインミスマッチの時間領域での影響

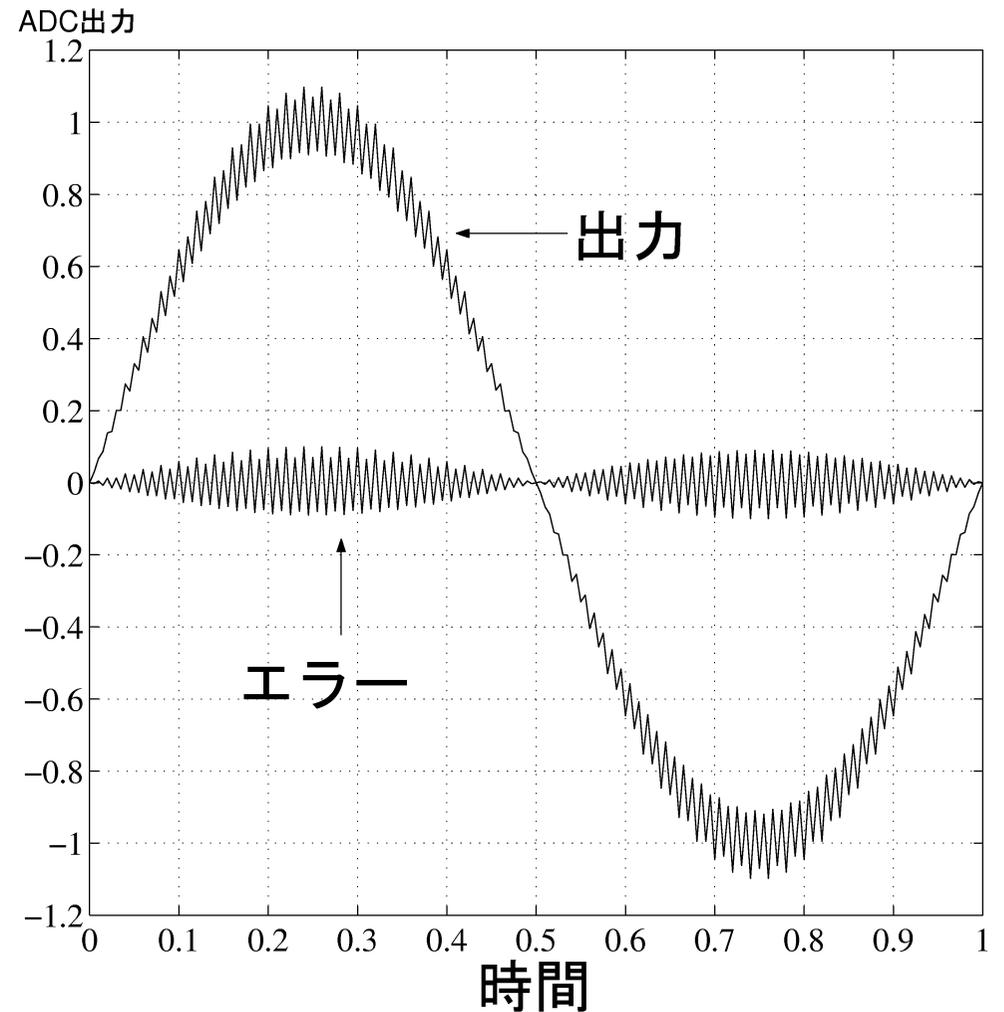
2 パターンノイズ

- ± 入力正弦波のピークでエラー最大
- ± 乗算的ノイズ(AMノイズ)

2 4チャンネルADCのシミュレーション

- ± 正弦波入力

ADCシステムの出力和エラー



ゲインミスマッチの周波数領域での影響

2 パターンノイズの周波数

$$\pm f_{\text{noise}} = f_{\text{in}} \pm k \cdot f_s / M$$
$$k = 1; 2; 3; \dots$$

f_s : サンプル周波数

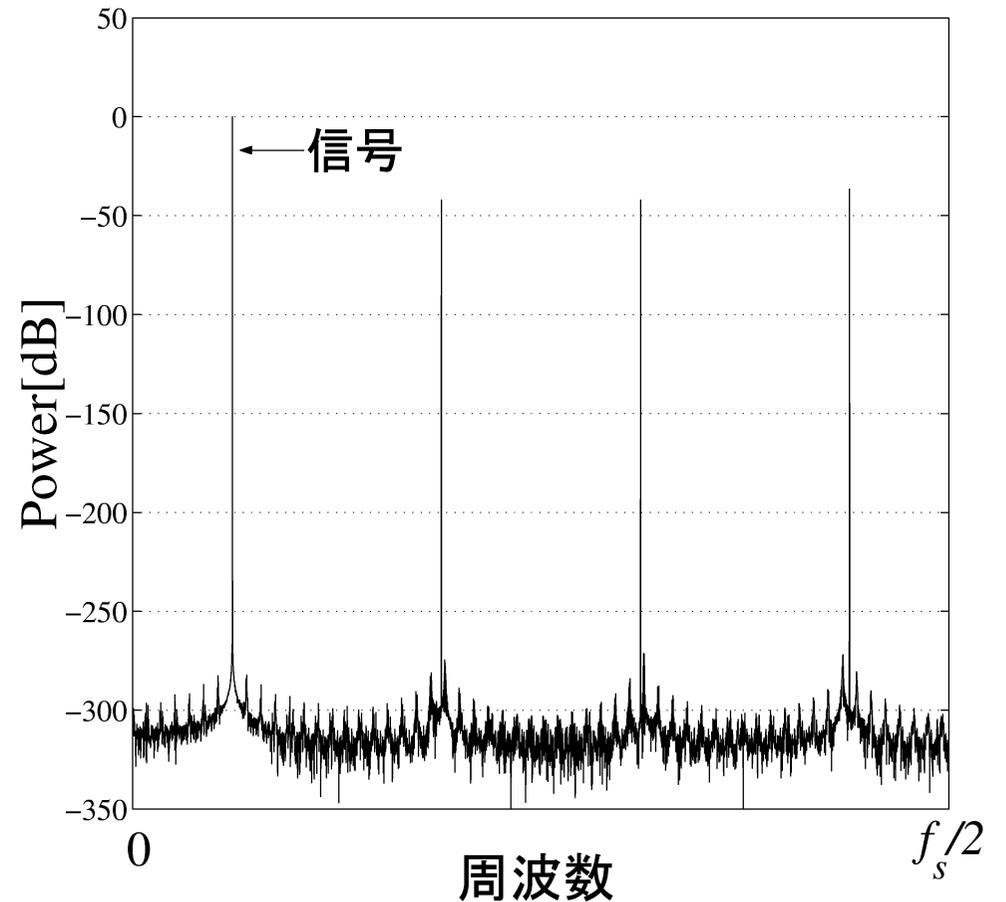
f_{in} : 入力周波数

M : チャンネル数

2 4チャンネルADCのシミュレーション

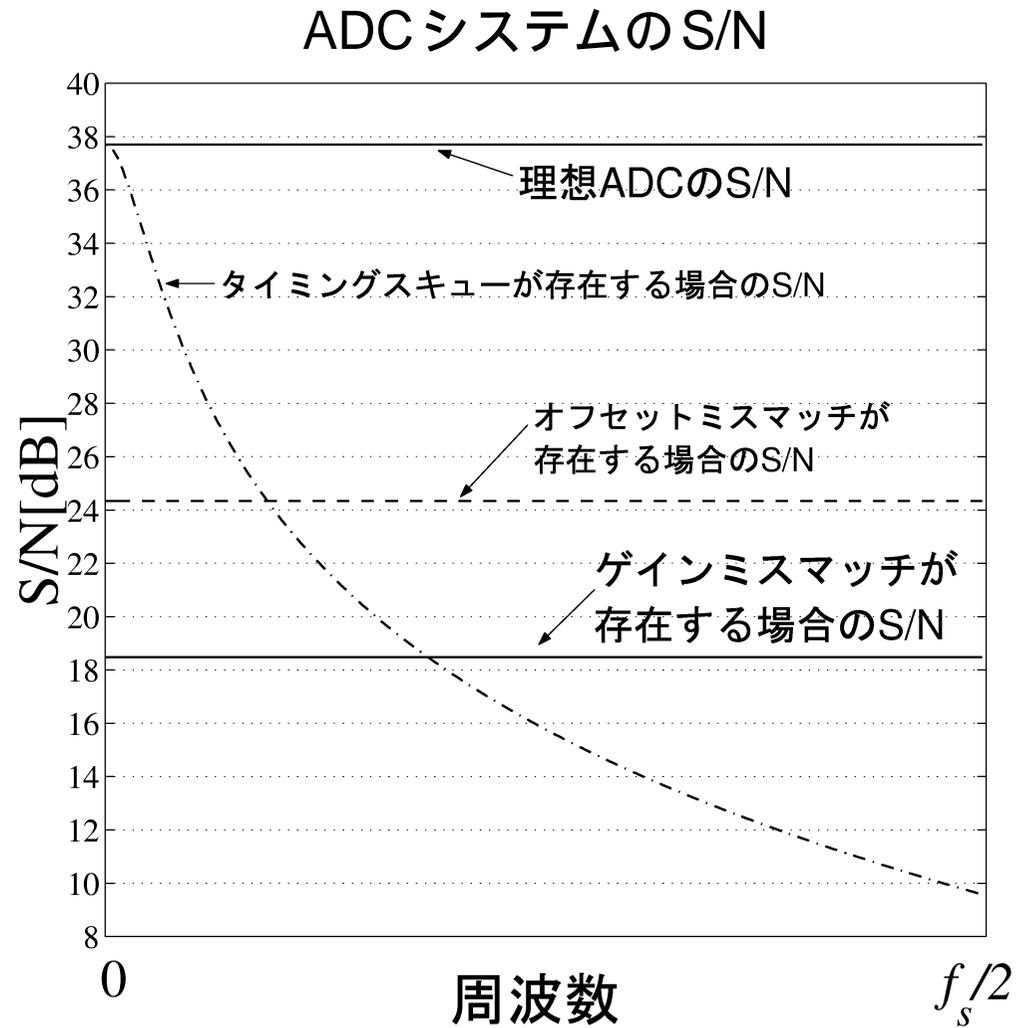
± 8192点FFT

ADC出力のパワースペクトラム



ゲインミスマッチのS/Nへの影響

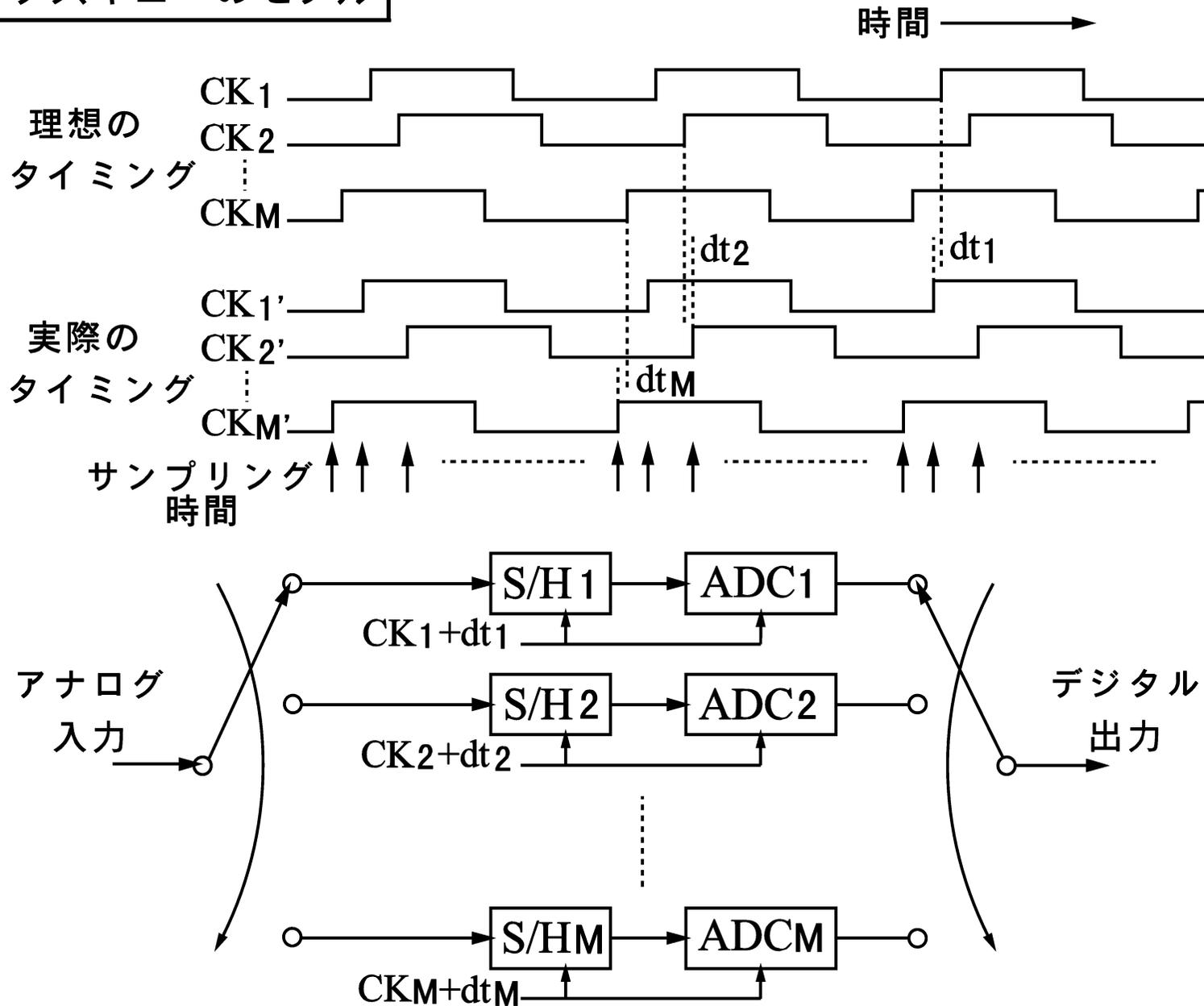
- 2 4チャンネル6ビットADCのシミュレーション
- 2 ゲインミスマッチ：
S/Nは入力周波数に独立
入力振幅に独立



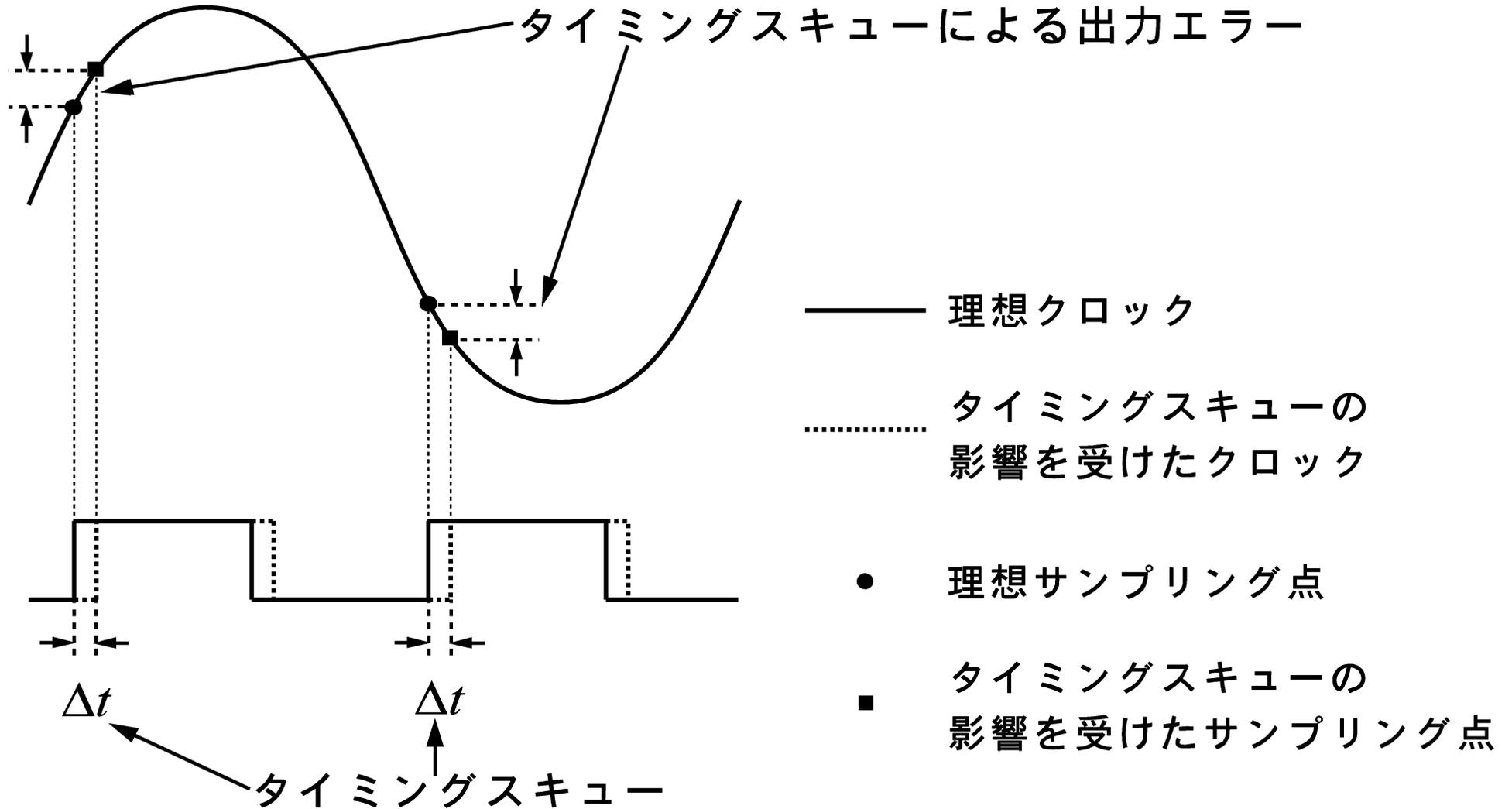
チャンネル間ミスマッチの影響

- タイミングスキューの影響

タイミングスキューのモデル



タイミングスキューの出力への影響



タイミングスキューの時間領域での影響

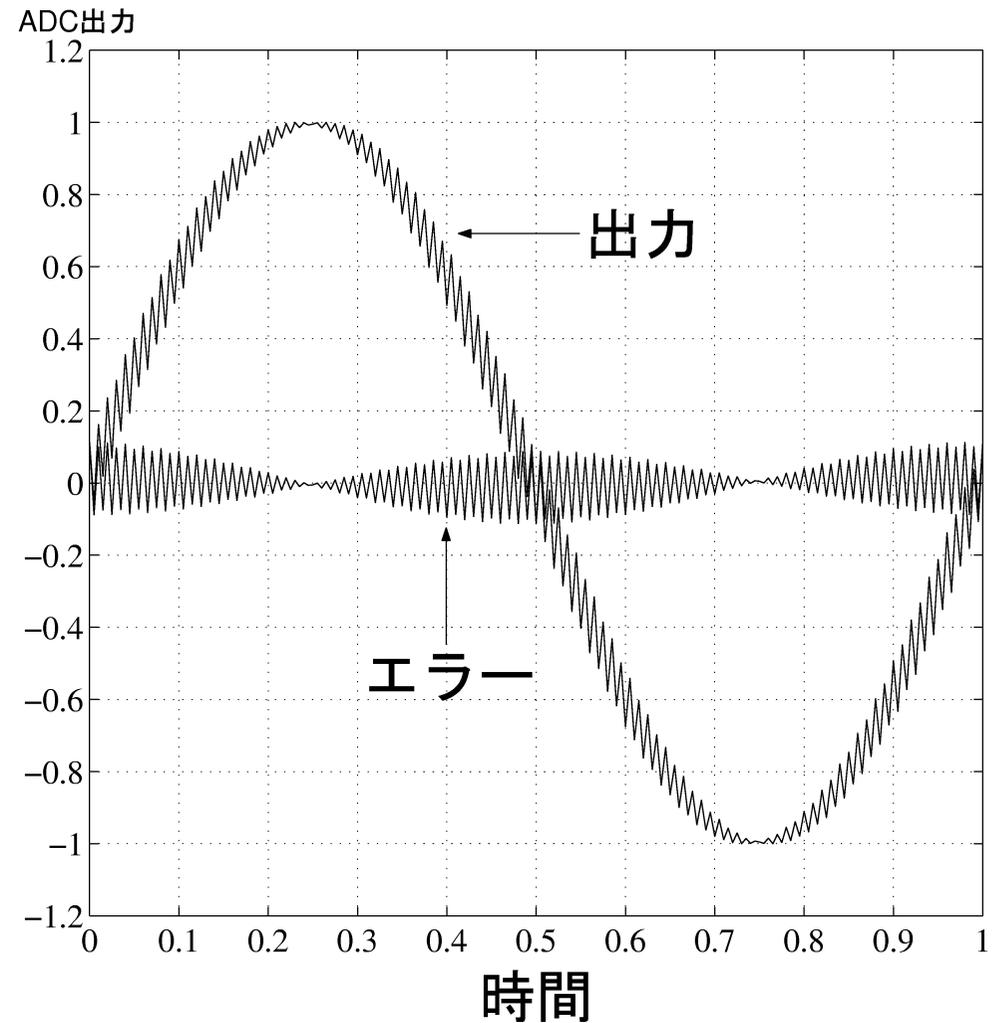
2 パターンノイズ

- ± 入力正弦波のゼロ交差
(スルーレート最大)
付近で最大のエラー
- ± ゲインミスマッチとは逆
- ± PM ノイズ

2 4チャンネルADCのシミュレーション

- ± 正弦波入力

ADCシステムの入力とエラー



タイミングスキューの周波数領域での影響

2 パターンノイズの周波数

$$\pm \boxed{f_{\text{noise}} = f_{\text{in}} \sum_{k=1}^M \frac{1}{k}}$$

$$k = 1; 2; 3; \dots$$

f_s : サンプル周波数

f_{in} : 入力周波数

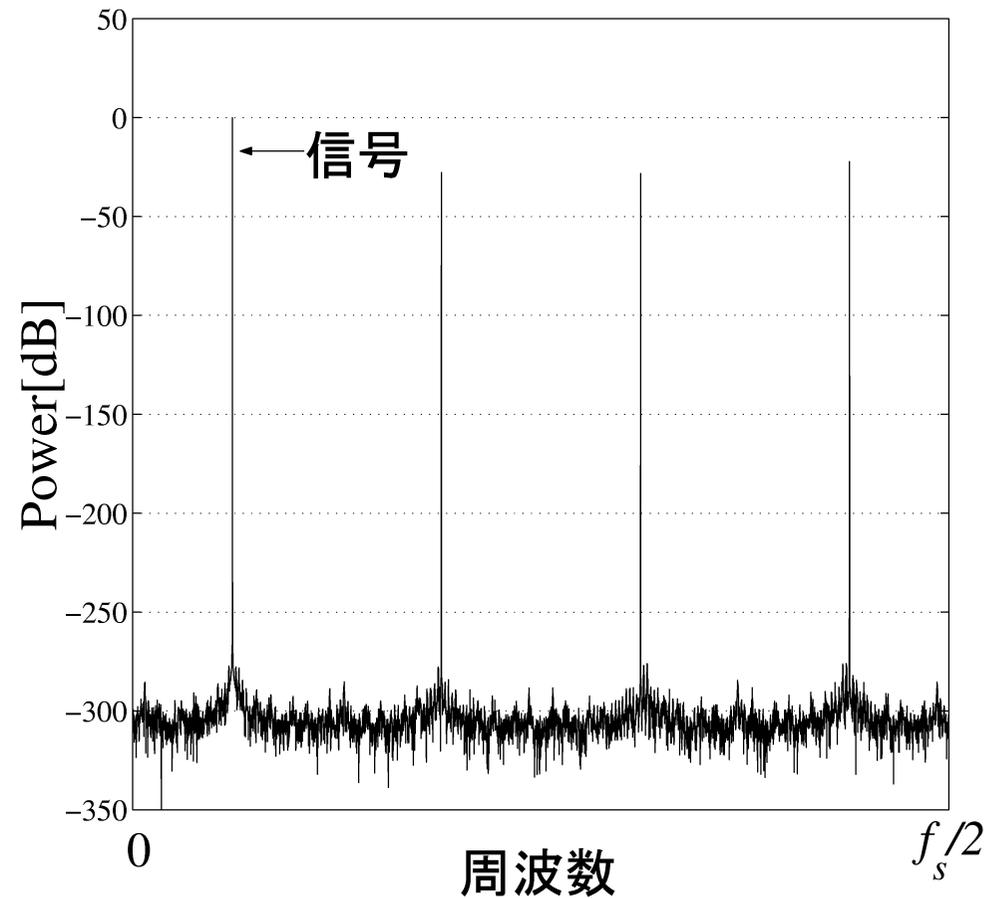
M : チャンネル数

± ゲインミスマッチの場合と同じ

2 4チャンネルADCのシミュレーション

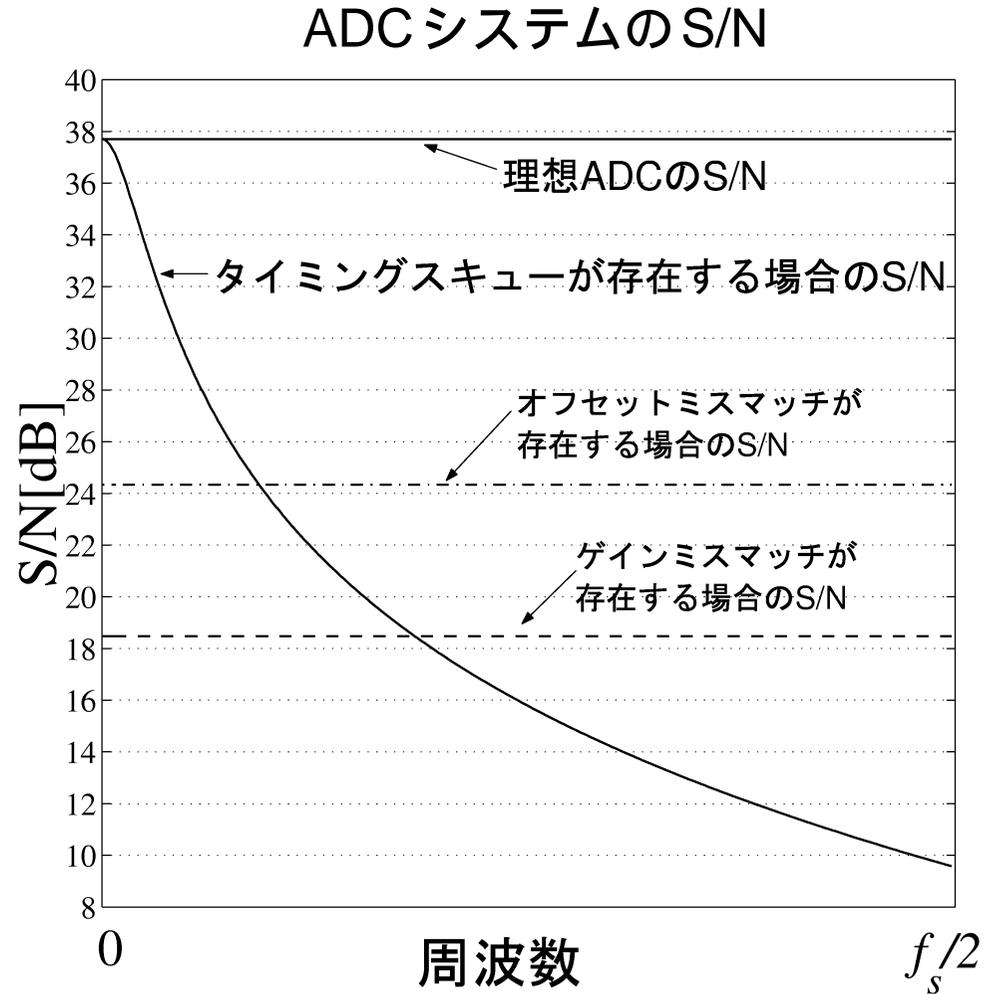
± 8192点FFT

ADC出力のパワースペクトラム



タイミングスキューのS/Nへの影響

- 2 4チャンネル6ビットADCのシミュレーション
- 2 タイミングスキュー：
S/Nは
 - ± 入力周波数が高くなると共に低下
 - ± 入力振幅に独立



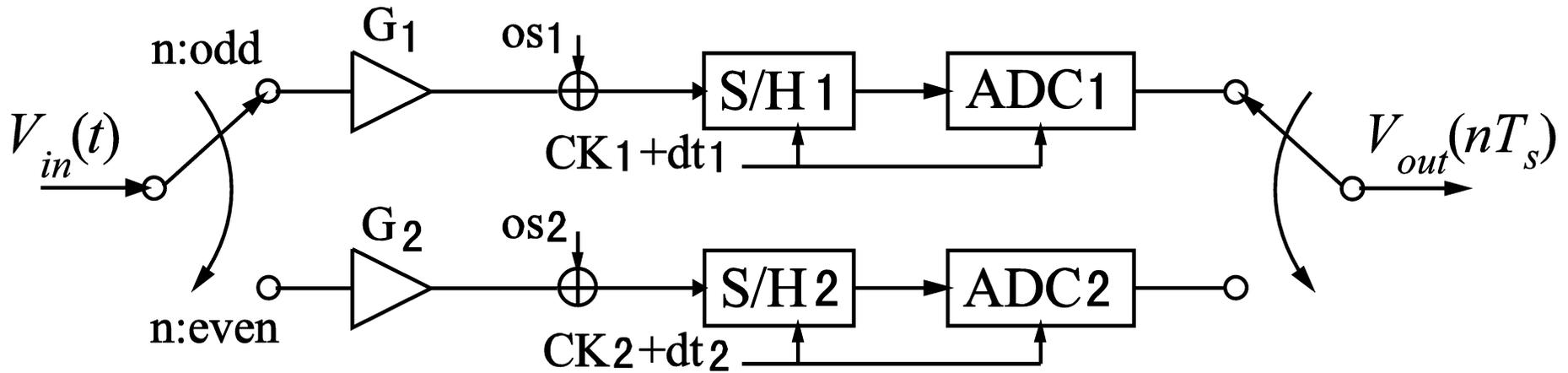
4. ミスマッチが同時に

存在する場合の影響

ミスマッチが同時に存在する場合の影響

- 2チャンネルADC

2ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合のモデル



$$V_{in}(t) = A \cos(2\pi f_{in} t)$$

$$V_{out}(nT_s)$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{cases} AG_1 \cos(2\pi f_{in} (nT_s + \pm t_1) + os_1) & (n : \text{odd}) \\ AG_2 \cos(2\pi f_{in} (nT_s + \pm t_2) + os_2) & (n : \text{even}) \end{cases} \\
 &\approx \begin{cases} AG(1 - \mu) \cos(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pm t}{2} + os_{cm} + os_{diff}) & (n : \text{odd}) \\ AG(1 + \mu) \cos(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pm t}{2} + os_{cm} + os_{diff}) & (n : \text{even}) \end{cases} \\
 & \quad (n = 0; \mu; \mu; \mu)
 \end{aligned}$$

2ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の出力

$$V_{out}(nT_s) = A_s \cos\left(\frac{1}{2}f_{in}nT_s + \mu_s\right) + A_n \cos\left(\frac{1}{2}f_{in}nT_s + \frac{1}{2}f_s nT_s + \mu_n\right) + OS_{cm} + OS_{diff} \cos\left(\frac{1}{2}f_s nT_s\right)$$

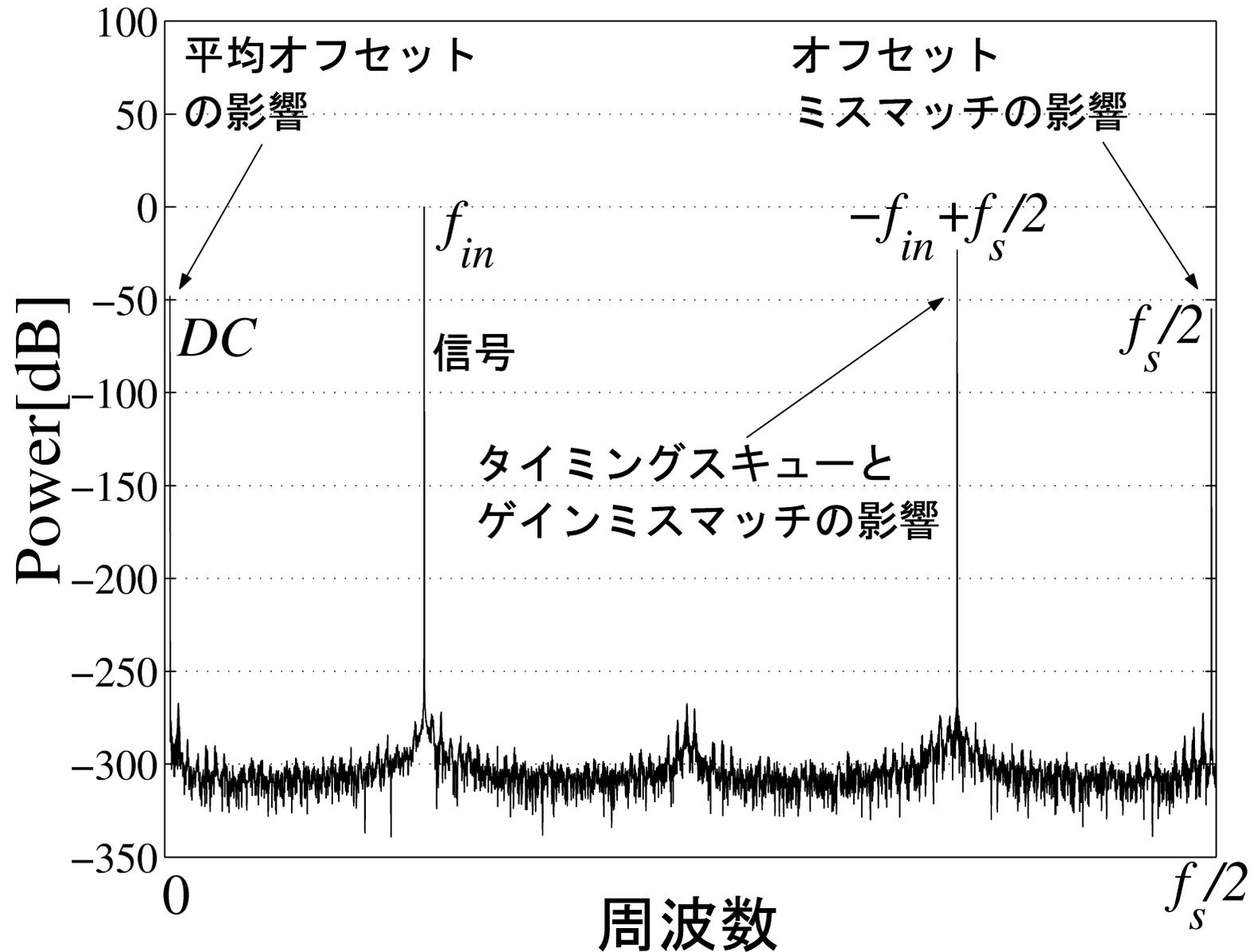
$$A_s = AG_r \frac{\cos^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right) + \mathbb{R}^2 \sin^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right)}{\mathbb{R}^2 \cos^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right) + \sin^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right)}$$

$$A_n = AG_r \frac{\mathbb{R}^2 \cos^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right) + \sin^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right)}{\mathbb{R}^2 \cos^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right) + \sin^2\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right)}$$

$$\mu_s = \arctan f^{\mathbb{R}} \tan\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right)g$$

$$\mu_n = \arctan f \tan\left(\frac{1}{4}f_{in}t\right) = \mathbb{R}g$$

2ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の出力のパワースペクトラム

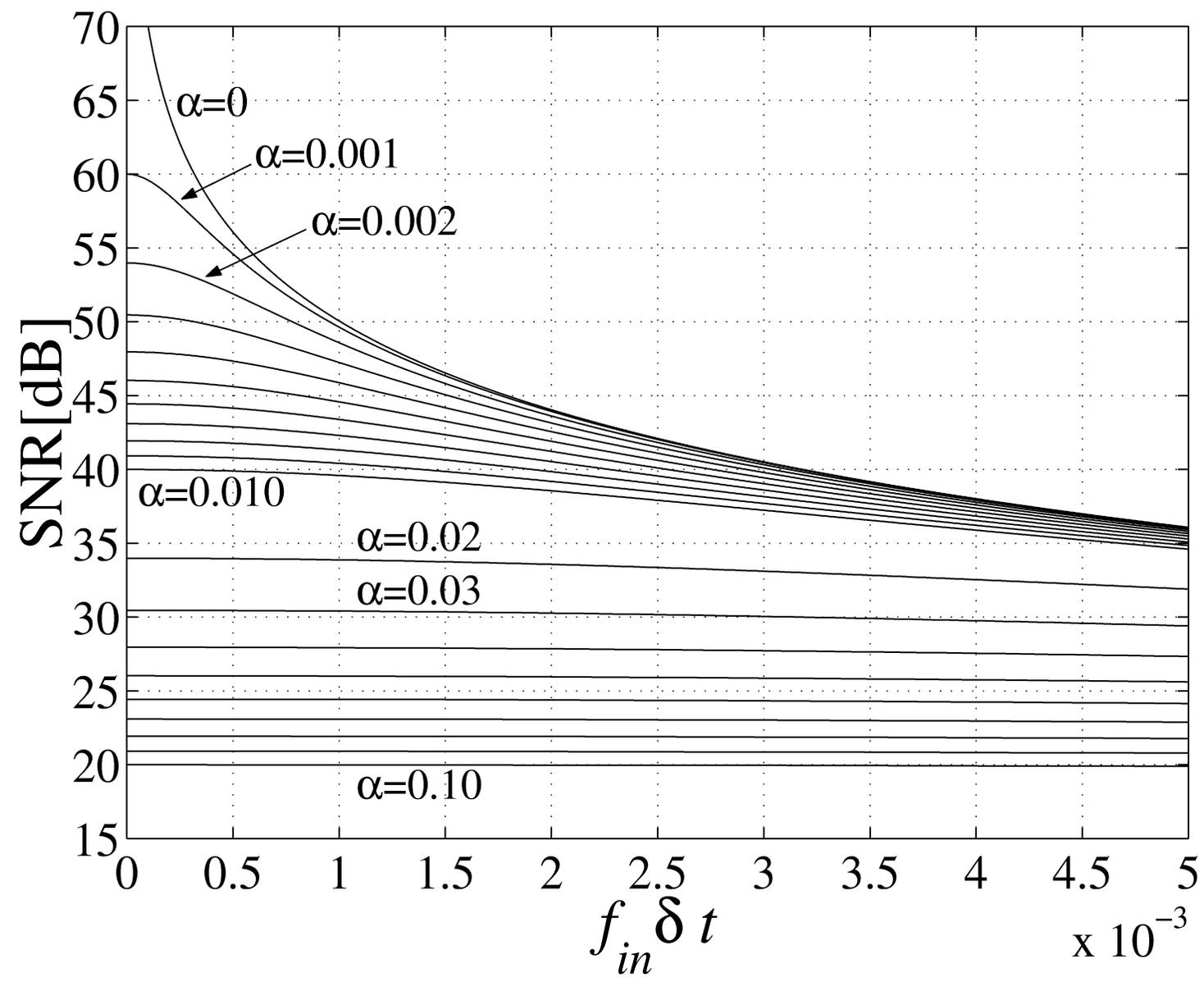


解析式と数値計算の結果が一致

+

解析式の正当性を確認

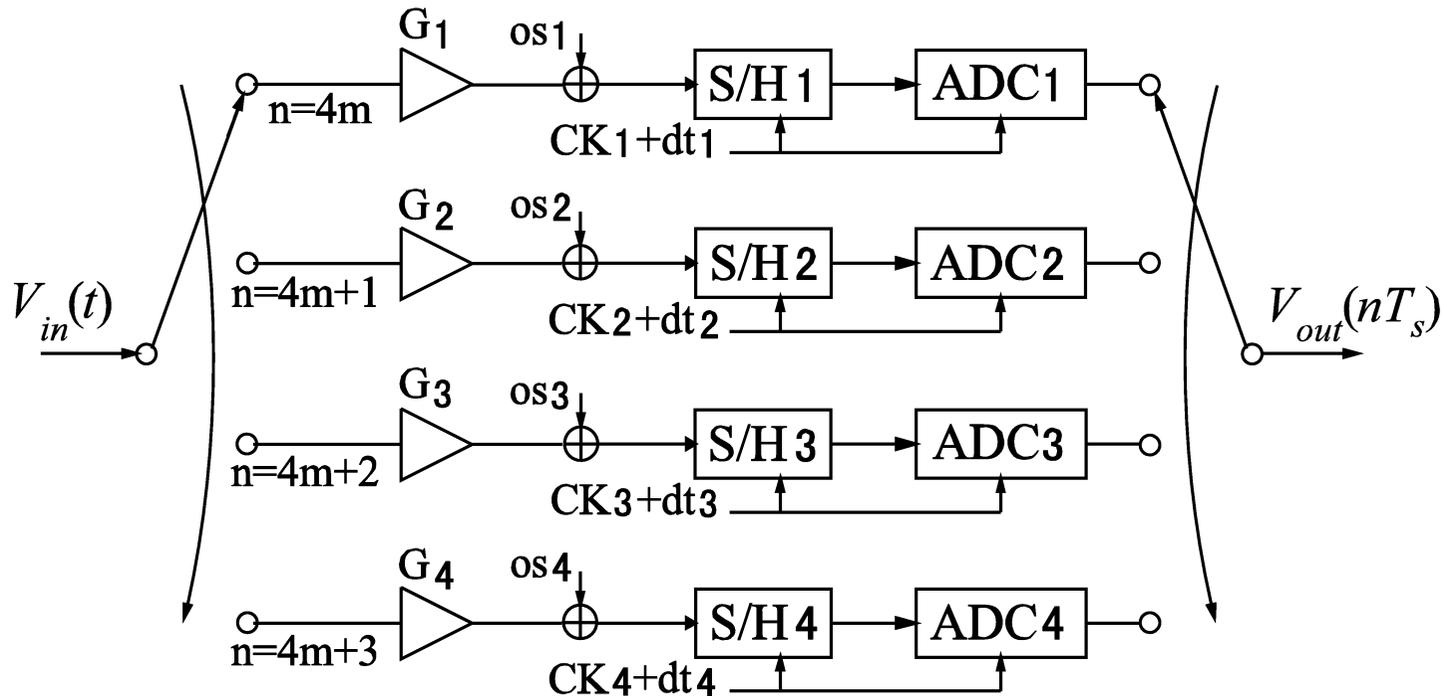
2ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の SNR の低下



ミスマッチが同時に存在する場合の影響

- 4チャンネルADC

4ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合のモデル



$$V_{in}(t) = A \cos(2\frac{1}{4}f_{in}t)$$

$$V_{out}(nT_s) =$$

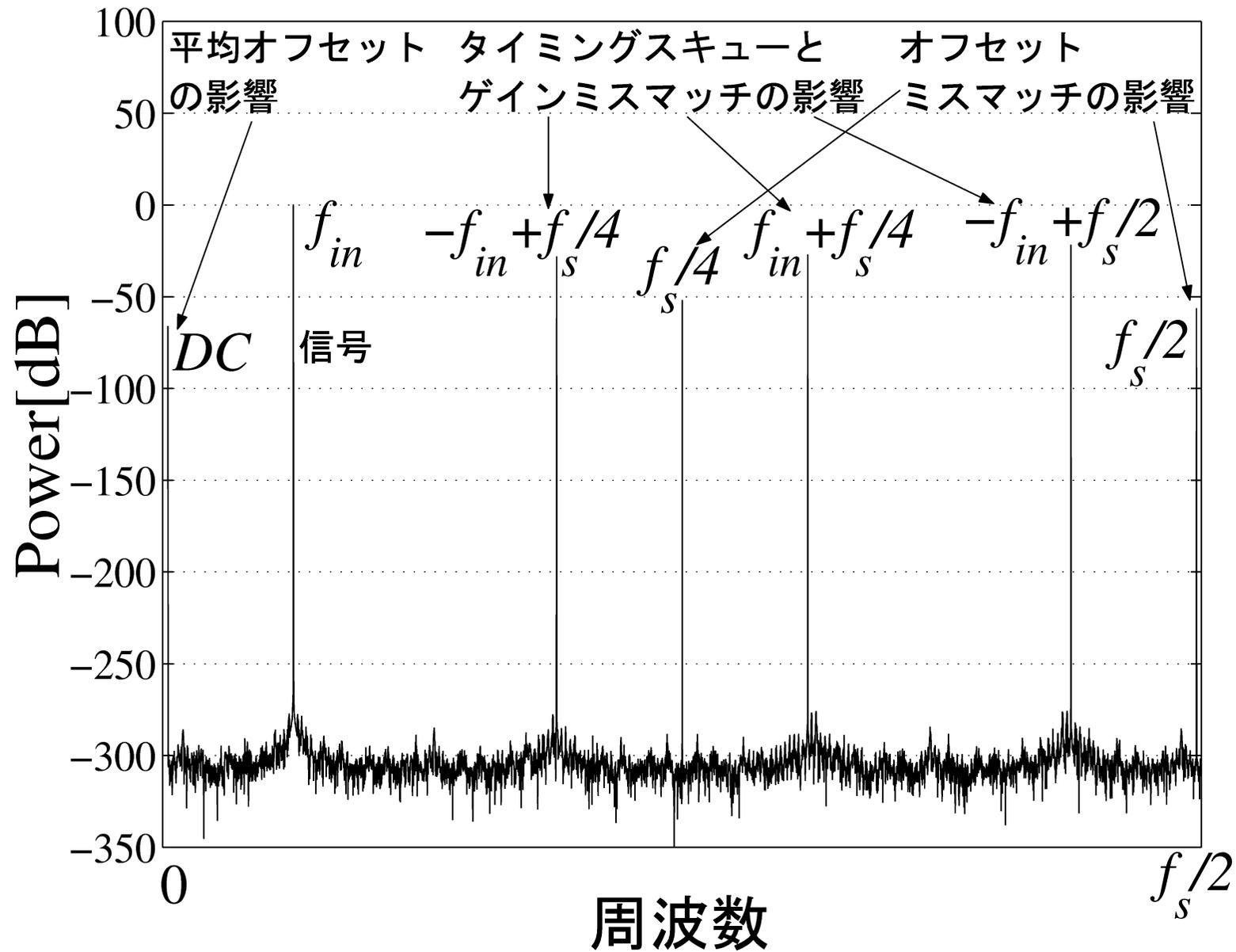
$$\begin{aligned} & AG_1 \cos f2\frac{1}{4}f_{in} (nT_s + \pm t_1)g + os_1 \quad (n = 4m) \\ & AG_2 \cos f2\frac{1}{4}f_{in} (nT_s + \pm t_2)g + os_2 \quad (n = 4m + 1) \\ & AG_3 \cos f2\frac{1}{4}f_{in} (nT_s + \pm t_3)g + os_3 \quad (n = 4m + 2) \\ & AG_4 \cos f2\frac{1}{4}f_{in} (nT_s + \pm t_4)g + os_4 \quad (n = 4m + 3) \end{aligned}$$

(m = 0; §1; §2; ¶¶)

4ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の出力

$$\begin{aligned}
 V_{\text{out}}(nT_s) = & \sqrt{A_{\text{SC}}^2 + A_{\text{SS}}^2} \cos \left(2\pi f_{\text{in}} nT_s + \arctan \frac{A_{\text{SS}}}{A_{\text{SC}}} \right) \\
 & + \sqrt{A_{n1c}^2 + A_{n1s}^2} \cos \left(2\pi f_{\text{in}} nT_s + \frac{1}{4} f_s nT_s + \arctan \frac{A_{n1s}}{A_{n1c}} \right) \\
 & + \sqrt{A_{n2c}^2 + A_{n2s}^2} \cos \left(2\pi f_{\text{in}} nT_s + \frac{1}{2} f_s nT_s + \arctan \frac{A_{n2s}}{A_{n2c}} \right) \\
 & + \sqrt{A_{n3c}^2 + A_{n3s}^2} \cos \left(2\pi f_{\text{in}} nT_s + \frac{3}{4} f_s nT_s + \arctan \frac{A_{n3s}}{A_{n3c}} \right) \\
 & + \frac{1}{4} (OS_1 + OS_2 + OS_3 + OS_4) \cos \left(2\pi \frac{1}{4} f_s nT_s \right) \\
 & + \frac{1}{2} \sqrt{(OS_1 + OS_3)^2 + (OS_2 + OS_4)^2} \cos \left(2\pi \frac{1}{4} f_s nT_s + \arctan \frac{OS_2 + OS_4}{OS_1 + OS_3} \right) \\
 & + \frac{1}{4} (OS_1 + OS_2 + OS_3 + OS_4)
 \end{aligned}$$

4ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の出力のパワースペクトラム

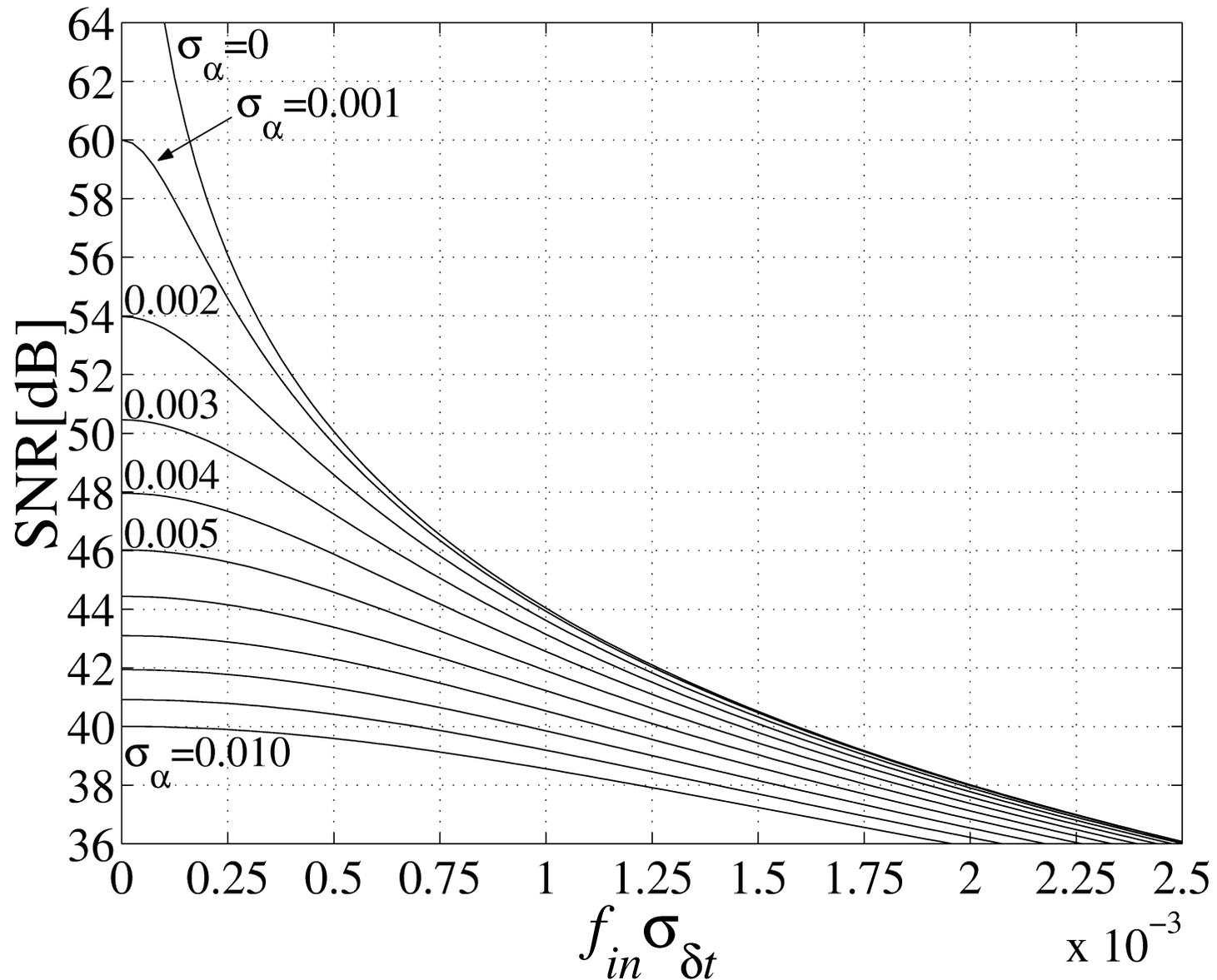


解析式と数値計算の結果が一致

+

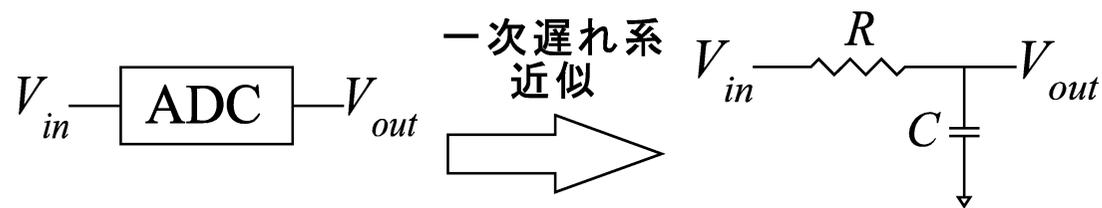
解析式の正当性を確認

4ch ADC に複数のミスマッチが同時に存在する場合の SNR の低下



5. 帯域ミスマッチの影響

ADCの一次遅れ系近似



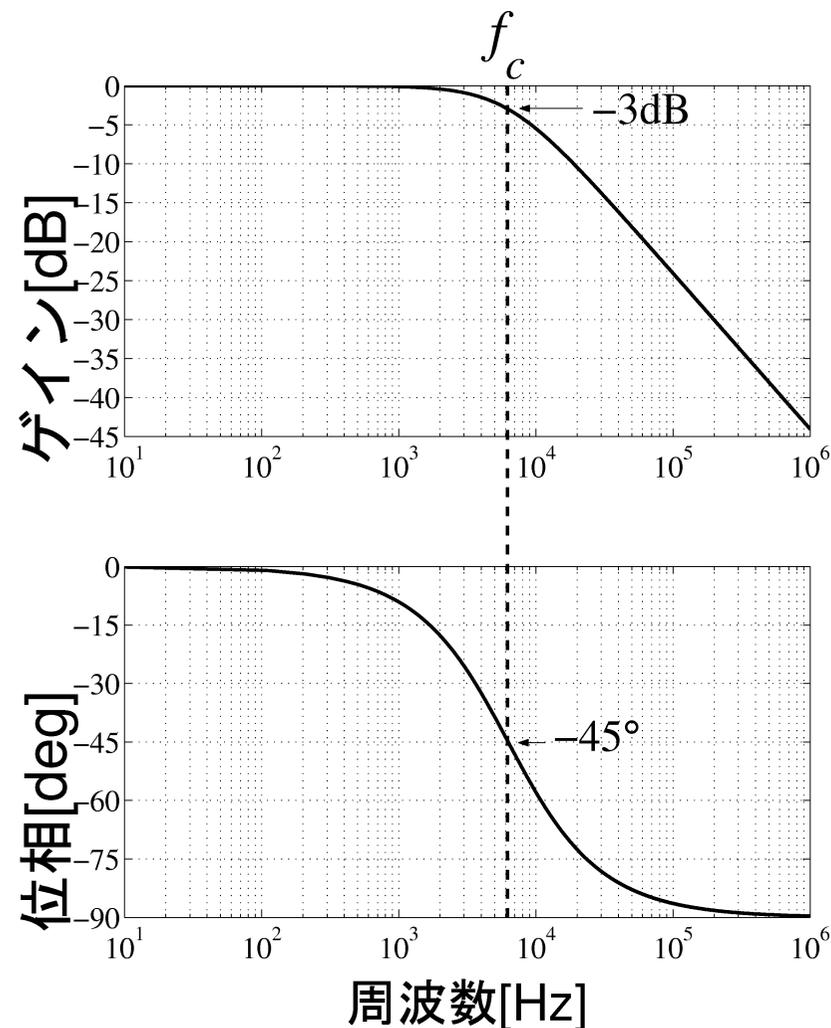
$$H(j2\pi f) = \frac{1}{1 + j f_{in} = f_c}$$

ゲイン $|H(j2\pi f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_{in} = f_c)^2}}$

位相 $\angle H(j2\pi f) = -\arctan(f_{in} = f_c)$

$V_{in}(t) = \cos(2\pi f_{in} t)$ のとき

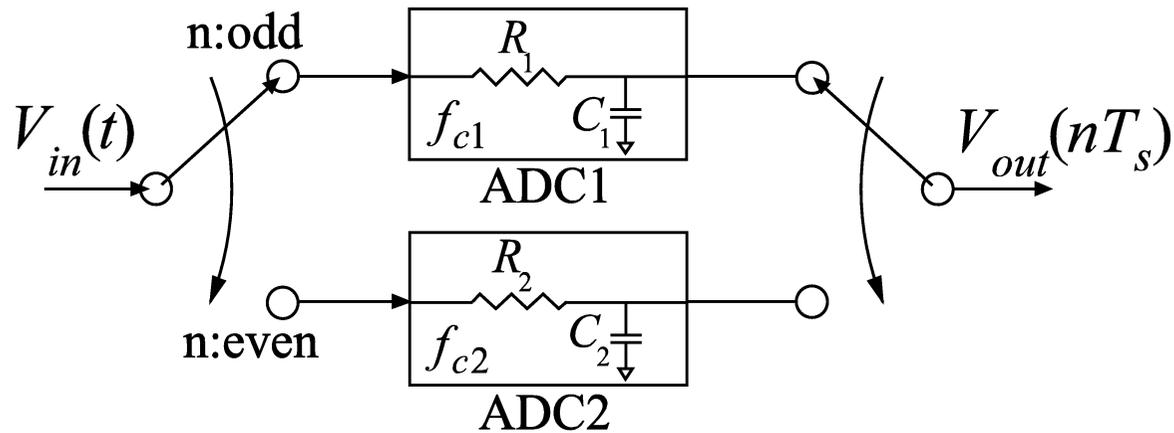
$$V_{outk}(nT_s) = G_k \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_k)$$



帯域ミスマッチの影響

- 2チャンネルADC

2ch ADC に帯域のミスマッチが存在する場合のモデル



$$V_{in}(t) = A \cos(2\pi f_{in} t)$$

$$\begin{aligned}
 & V_{out}(nT_s) \\
 &= \begin{cases} A = \frac{g}{\sqrt{1 + (f_{in} = f_{c1})^2}} \cos(2\pi f_{in} nT_s + \arctan(f_{in} = f_{c1})g) & (n : \text{odd}) \\ A = \frac{g}{\sqrt{1 + (f_{in} = f_{c2})^2}} \cos(2\pi f_{in} nT_s + \arctan(f_{in} = f_{c2})g) & (n : \text{even}) \end{cases} \\
 &= \begin{cases} AG_1 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_1) & (n : \text{odd}) \\ AG_2 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_2) & (n : \text{even}) \end{cases} \quad (n = 0; S1; S2; \dots)
 \end{aligned}$$

2 帯域のミスマッチ

- ± ゲインと位相のミスマッチ
- ± ゲインミスマッチとタイミングスキューに相似
- ± ゲイン, 位相は周波数の関数

2ch ADC に帯域のミスマッチが存在する場合の出力

$$V_{out}(nT_s) = A_s \cos \left(2\pi f_{in} nT_s + \mu_s \right) + A_n \cos \left(2\pi \left(f_{in} + \frac{1}{2}f_s \right) nT_s + \mu_n \right)$$

$$A_s = \frac{1}{2} A \sqrt{\frac{G_c^2 \cos^2(\mu_d) + G_d^2 \sin^2(\mu_d)}{G_c^2 \sin^2(\mu_d) + G_d^2 \cos^2(\mu_d)}}$$

$$A_n = \frac{1}{2} A \sqrt{\frac{G_c^2 \sin^2(\mu_d) + G_d^2 \cos^2(\mu_d)}{G_c^2 \cos^2(\mu_d) + G_d^2 \sin^2(\mu_d)}}$$

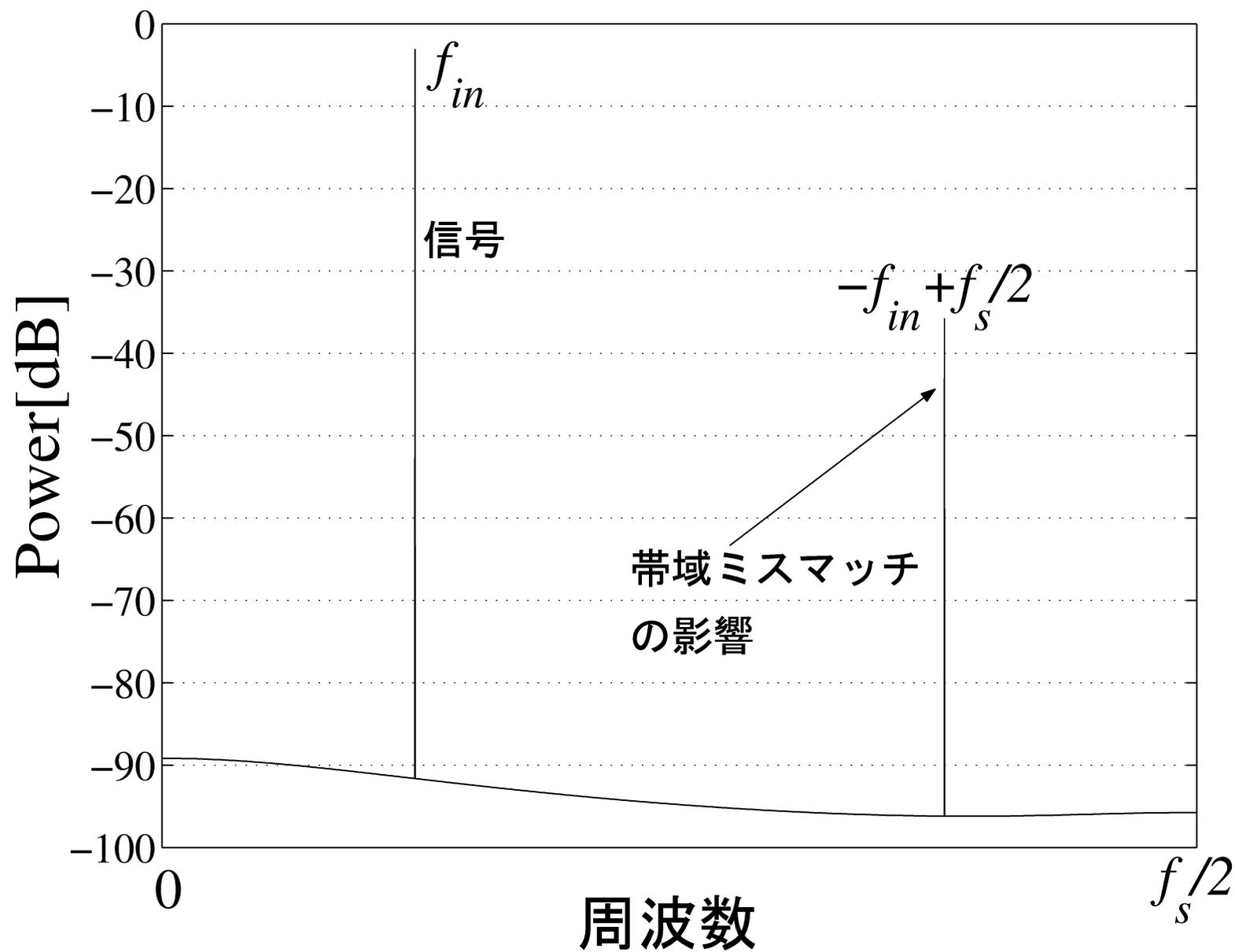
$$\mu_s = \arctan \left(\frac{G_c \sin(\mu_c) \cos(\mu_d) + G_d \cos(\mu_c) \sin(\mu_d)}{G_c \cos(\mu_c) \cos(\mu_d) + G_d \sin(\mu_c) \sin(\mu_d)} \right)$$

$$\mu_n = \arctan \left(\frac{G_c \cos(\mu_c) \sin(\mu_d) + G_d \sin(\mu_c) \cos(\mu_d)}{G_c \sin(\mu_c) \sin(\mu_d) + G_d \cos(\mu_c) \cos(\mu_d)} \right)$$

$$G_c = G_1 + G_2; \quad G_d = G_1 - G_2$$

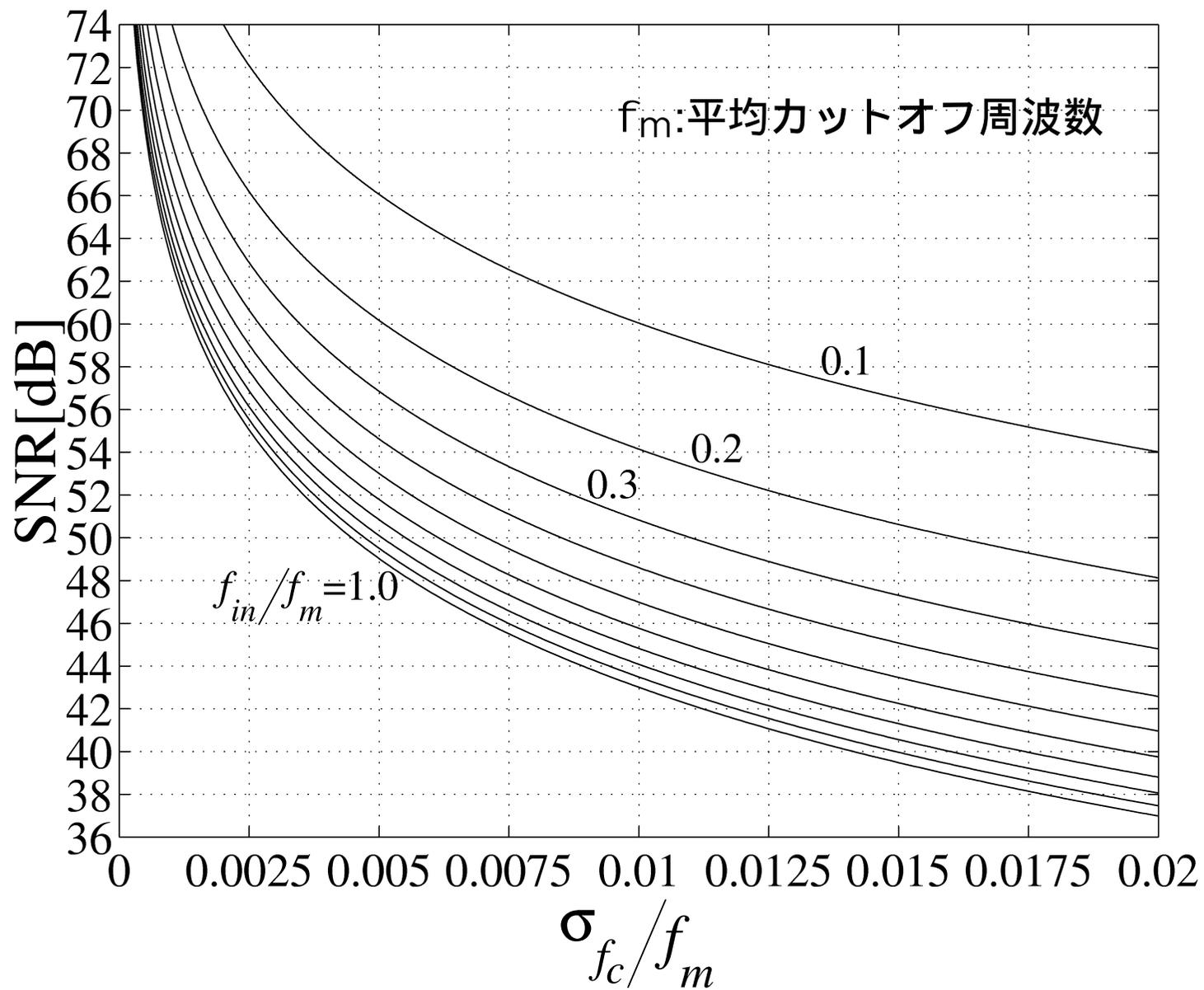
$$\mu_c = (\mu_1 + \mu_2) = 2; \quad \mu_d = (\mu_1 - \mu_2) = 2$$

2ch ADC に帯域の不マッチが存在する場合の出力のパワースペクトラム



解析式と
Spiceシミュレーション結果が一致
+
解析式の正当性を確認

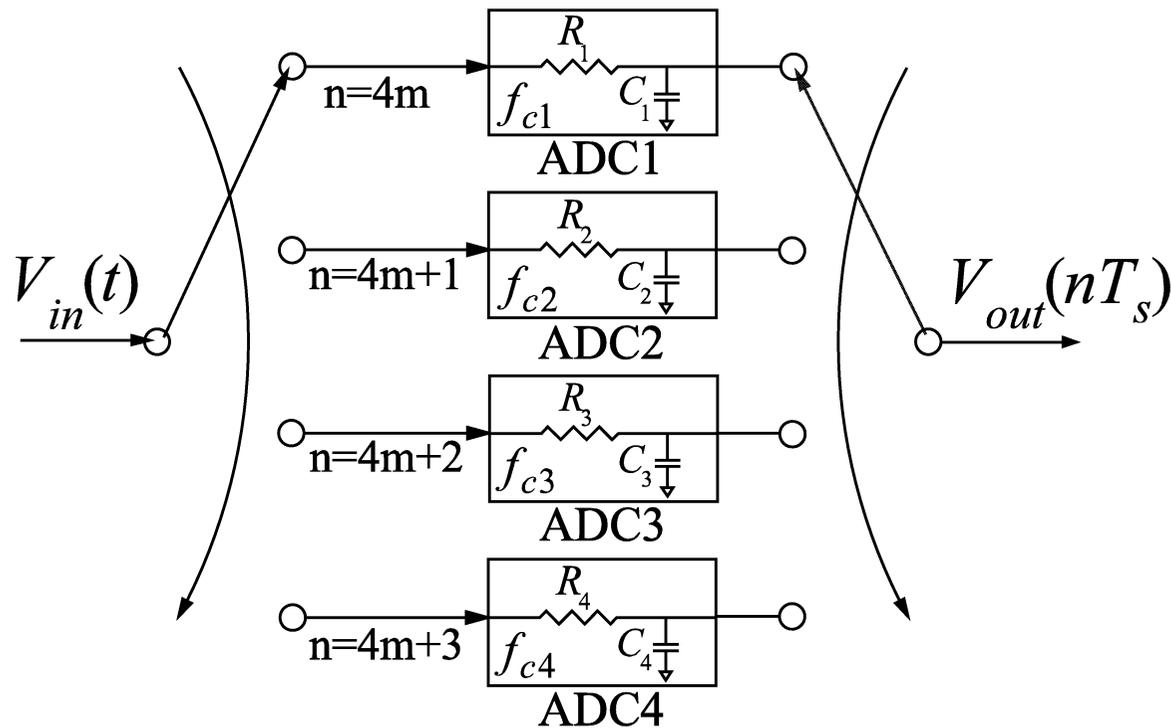
2ch ADC に帯域のミスマッチが存在する場合の SNR の低下



帯域ミスマッチの影響

- 4チャンネルADC

4ch ADC に帯域のミスマッチが存在する場合のモデル



$$V_{in}(t) = A \cos(2\pi f_{in} t)$$

$$V_{out}(nT_s) =$$

$$\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} G_1 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_1) \quad (n = 4m)$$

$$\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} G_2 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_2) \quad (n = 4m + 1)$$

$$\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} G_3 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_3) \quad (n = 4m + 2)$$

$$\begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} G_4 \cos(2\pi f_{in} nT_s + \mu_4) \quad (n = 4m + 3)$$

$$(m = 0; \text{---}; \text{---}; \text{---})$$

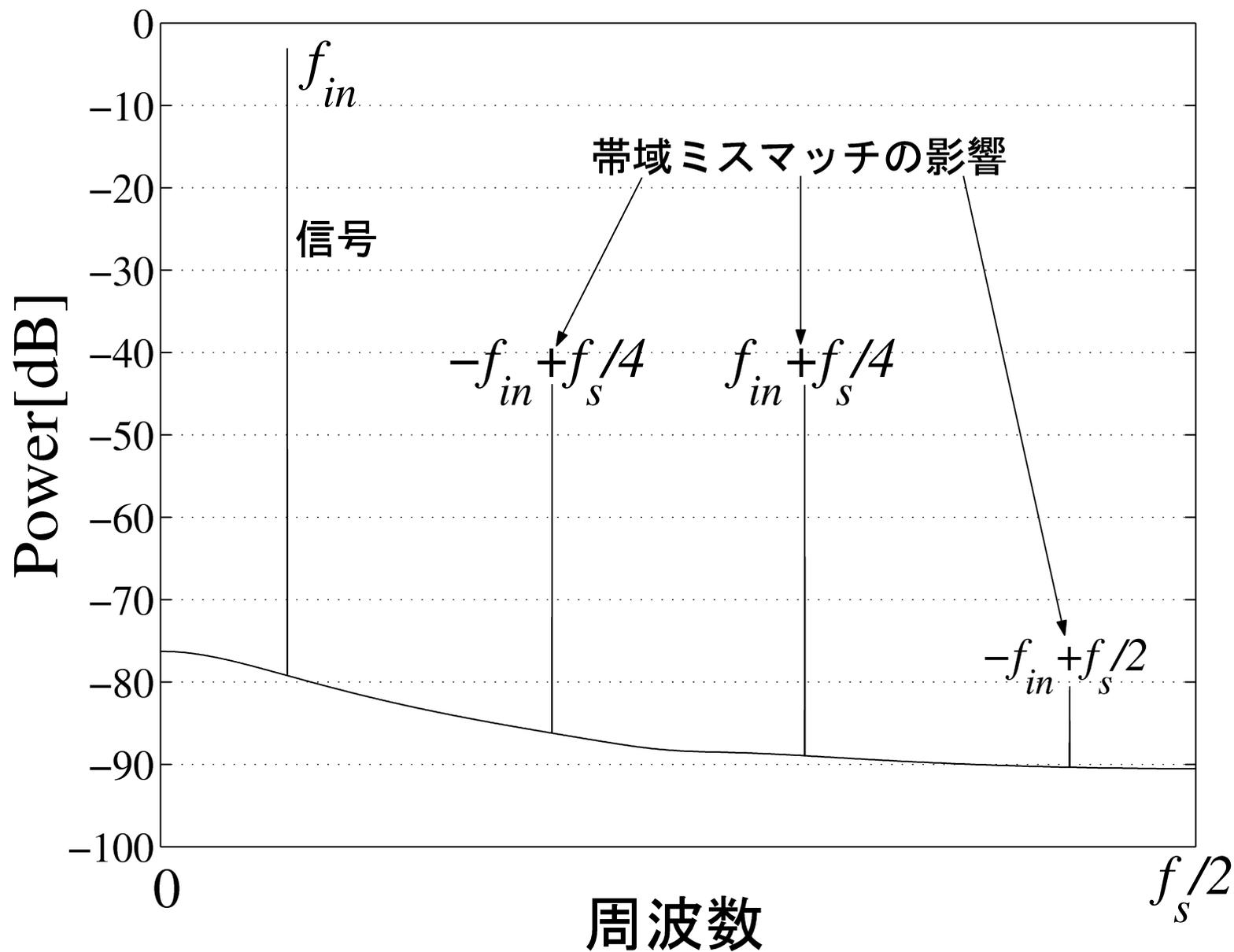
4ch ADC に帯域のミスマッチが存在する場合の出力

$$\begin{aligned}
 V_{out}(nT_s) = & \frac{r}{A_{sc}^2 + A_{ss}^2} \cos \left(2\frac{1}{4} f_{in} nT_s \right) \arctan \frac{\tilde{A}_{ss}}{A_{sc}} \\
 + & \frac{r}{A_{n1c}^2 + A_{n1s}^2} \cos \left(2\frac{1}{4} f_{in} + \frac{1}{4} f_s nT_s \right) \arctan \frac{\tilde{A}_{n1s}}{A_{n1c}} \\
 + & \frac{r}{A_{n2c}^2 + A_{n2s}^2} \cos \left(2\frac{1}{4} f_{in} + \frac{1}{2} f_s nT_s \right) \arctan \frac{\tilde{A}_{n2s}}{A_{n2c}} \\
 + & \frac{r}{A_{n3c}^2 + A_{n3s}^2} \cos \left(2\frac{1}{4} f_{in} + \frac{3}{4} f_s nT_s \right) \arctan \frac{\tilde{A}_{n3s}}{A_{n3c}}
 \end{aligned}$$

$A_{sc}; A_{ss}; A_{n1c}; A_{n1s}; A_{n2c}; A_{n2s}; A_{n3c}; A_{n3s}$ は

$f_{in}; f_{c1}; f_{c2}; f_{c3}; f_{c4}$ の関数

4ch ADC に帯域の不マッチが存在する場合の出力のパワースペクトラム



解析式と
Spiceシミュレーション結果が一致
+
解析式の正当性を確認

6.まとめ

研究成果

インターリーブADCのミスマッチの影響について

- 2 複数のミスマッチが同時に存在する場合の解析式を導出
- 2 帯域のミスマッチが存在する場合の解析式を導出
- 2 実際のアプリケーションの80%以上をカバーする
2チャンネルと4チャンネルについて解析