

# インターリーブADCでのタイミングスキュー影響 のデジタルフィルタによる補正技術

浅見幸司<sup>+</sup>      黒沢烈士<sup>++</sup>      ◎ 立岩武徳<sup>++</sup>  
宮島広行<sup>++</sup>      小林春夫<sup>++</sup>

<sup>+</sup>(株)アドバンテスト      <sup>++</sup>群馬大学

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題

電子デバイス信号の**高速化・高周波化**



LSI試験装置等への性能要求**増大**



**高速サンプリングADC**が求められる



**インターリーブADCシステムの採用**

各チャネルADC間の特性ミスマッチ  
インターリーブADC全体の**精度劣化** (SNDR、SFDR)

研究目標

インターリーブADCシステムの  
デジタル補正技術の開発



試験デバイス信号の高速化・高周波化のため  
タイミングスキューの影響が大きい

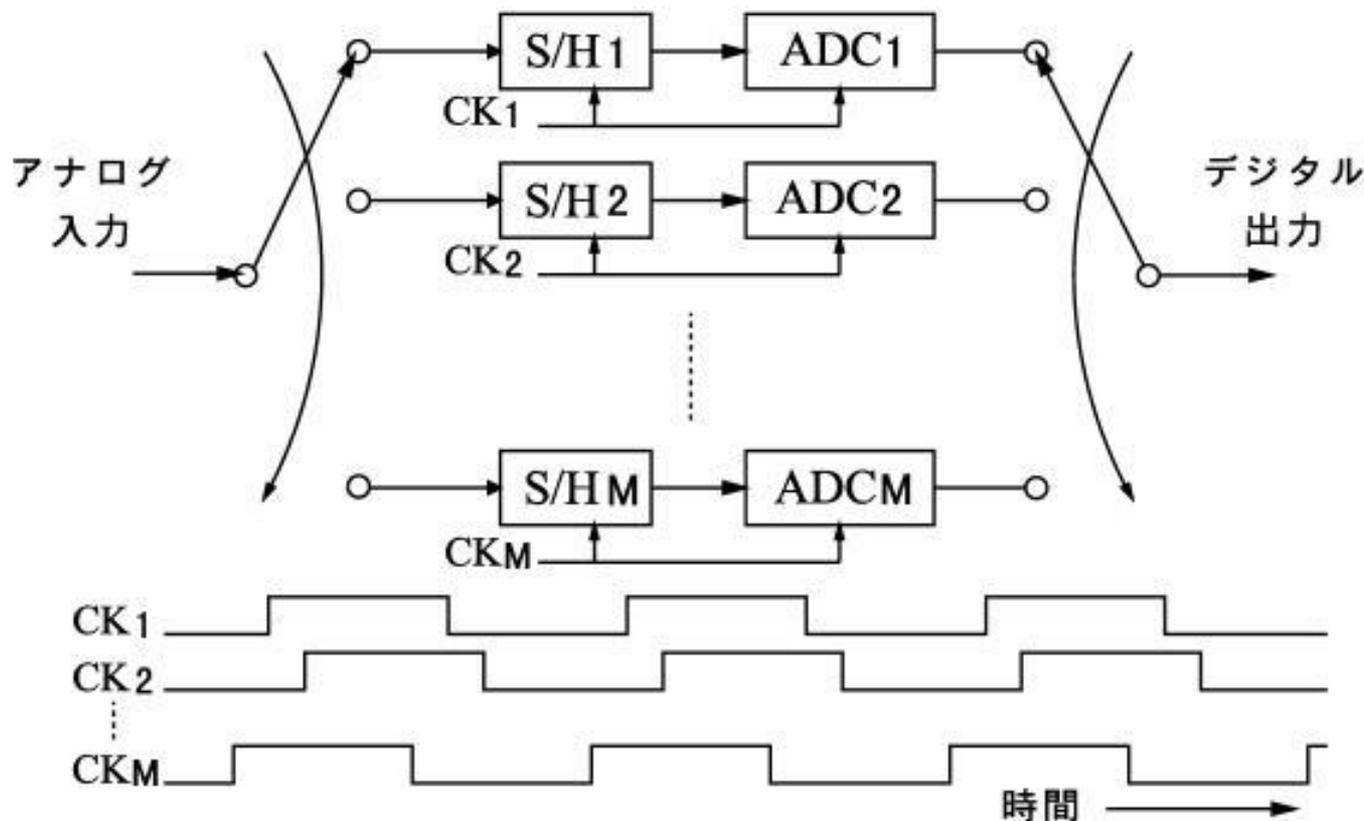


タイミングスキュー影響を補正

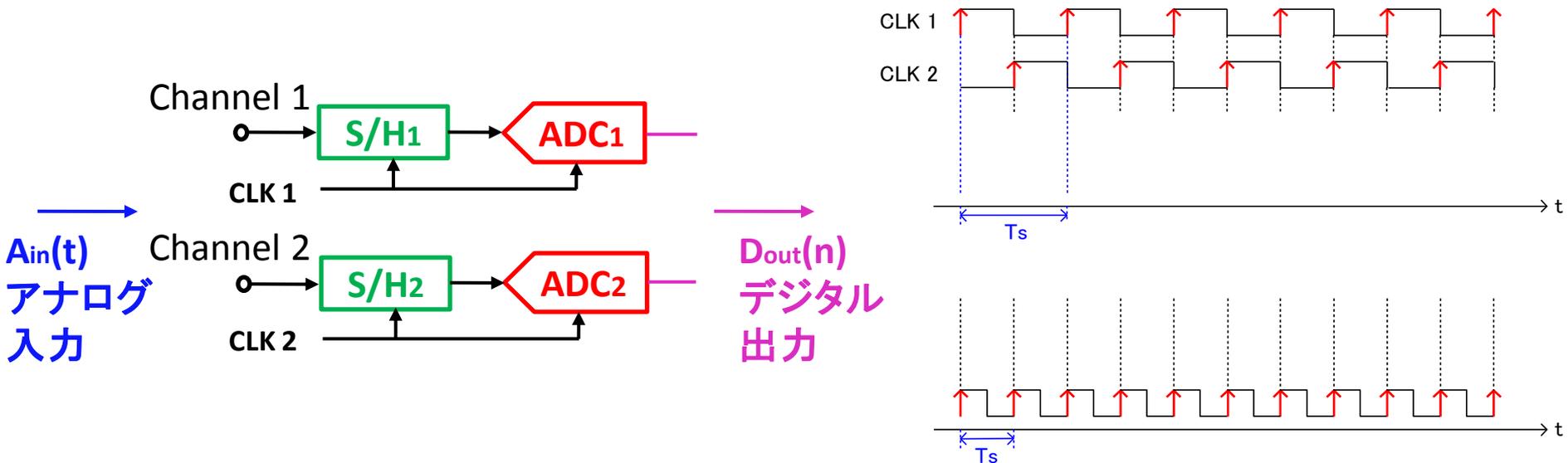
- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



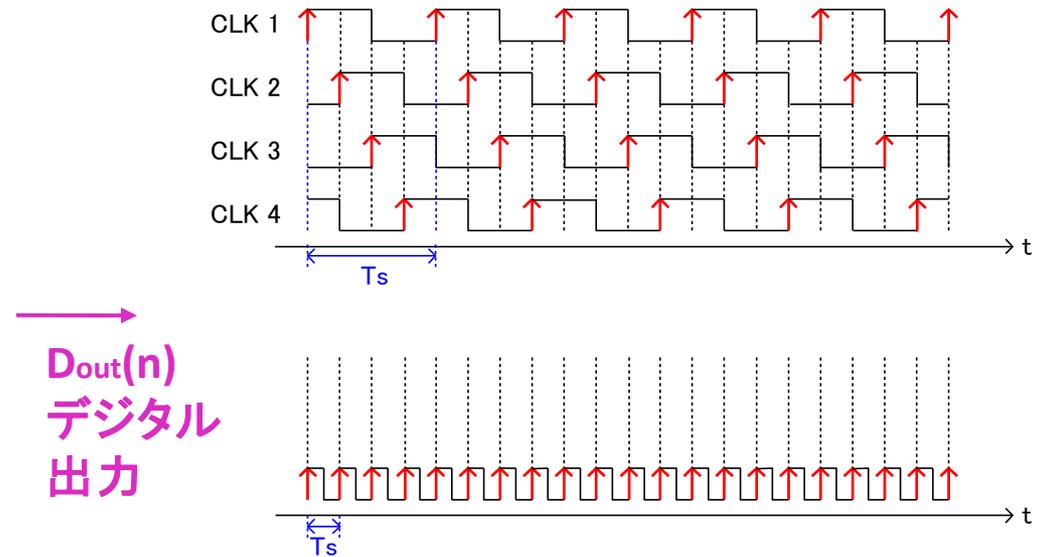
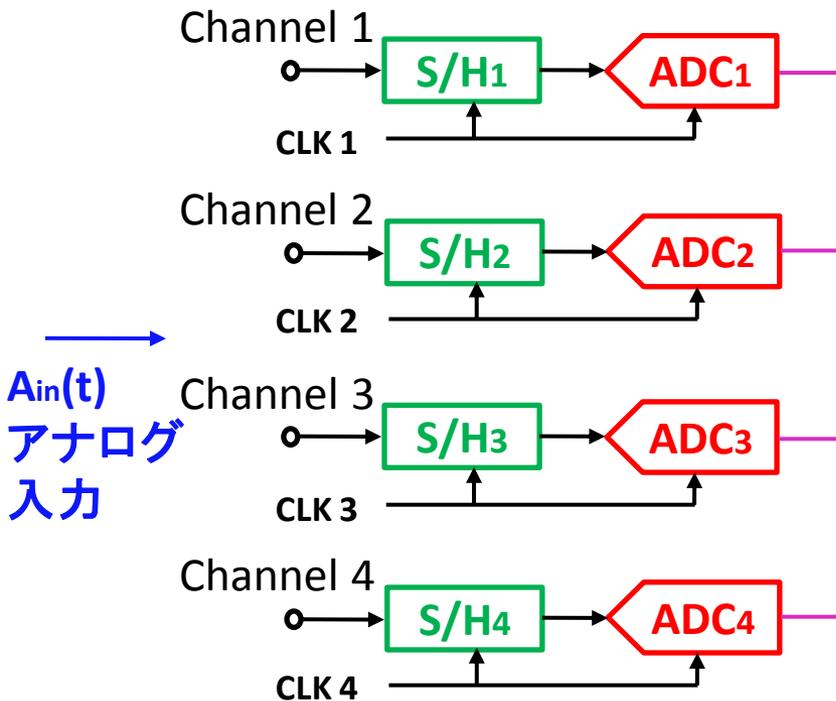
- M個のADCのインターリーブでM倍のサンプリングレートを実現  
→ 高速サンプリングADCの実現



- チャンネル間にミスマッチが存在しSNDR、SFDRが低下  
→ キャリブレーションが必要



- CLK 1 を基準
- CLK 2 を半クロック遅延
- インターリーブADC全体で2倍のサンプリングレート実現

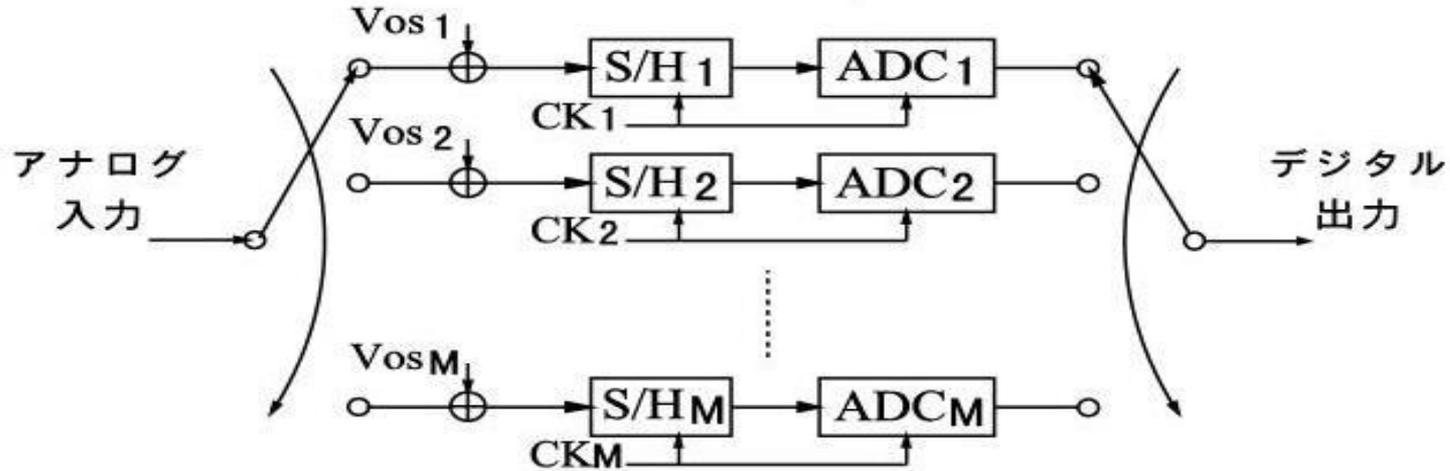


- CLK 1 を基準
- CLK 2 を1/4クロック遅延
- CLK 3 を半クロック遅延
- CLK 4 を3/4クロック遅延
- インターリーブADC全体で  
4倍のサンプリングレート実現

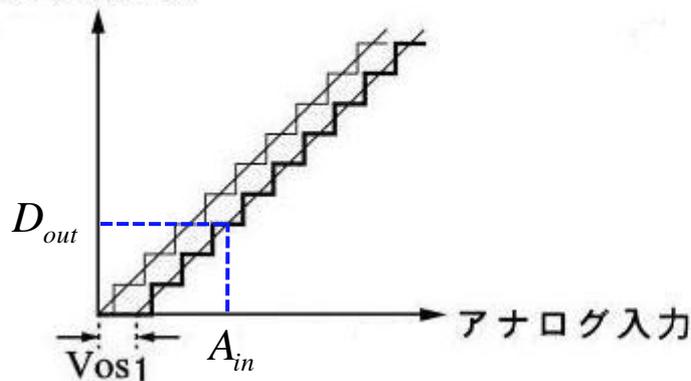
- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



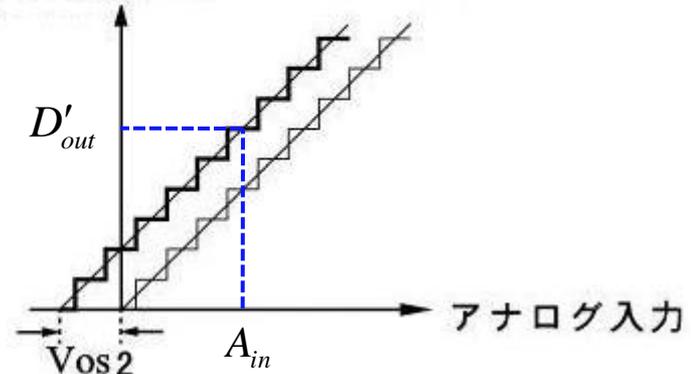
## オフセットミスマッチのモデル



チャンネル1の入出力特性  
デジタル出力



チャンネル2の入出力特性  
デジタル出力



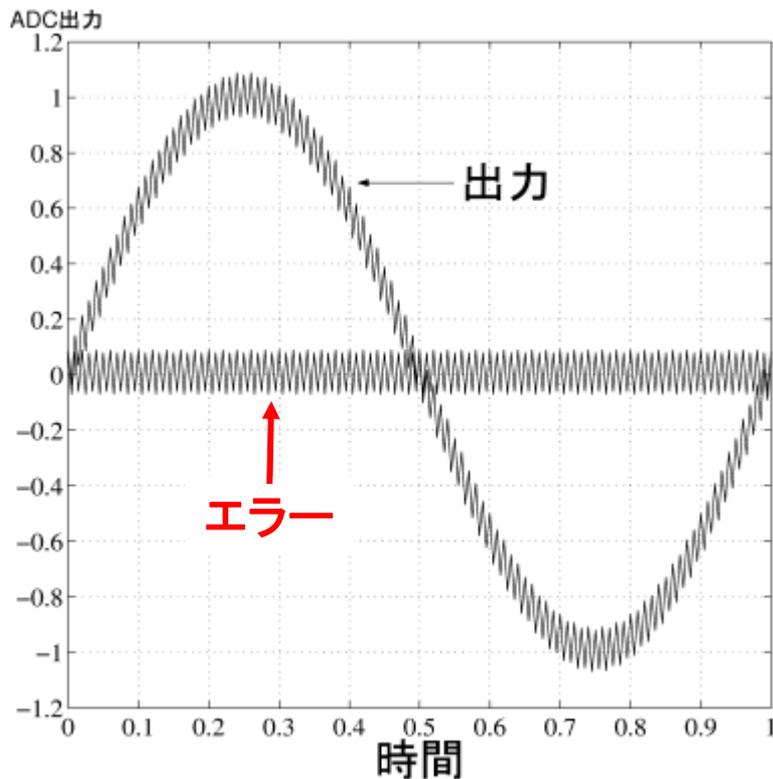
■各ADCのオフセットがランダムにばらつく



オフセットミスマッチが発生

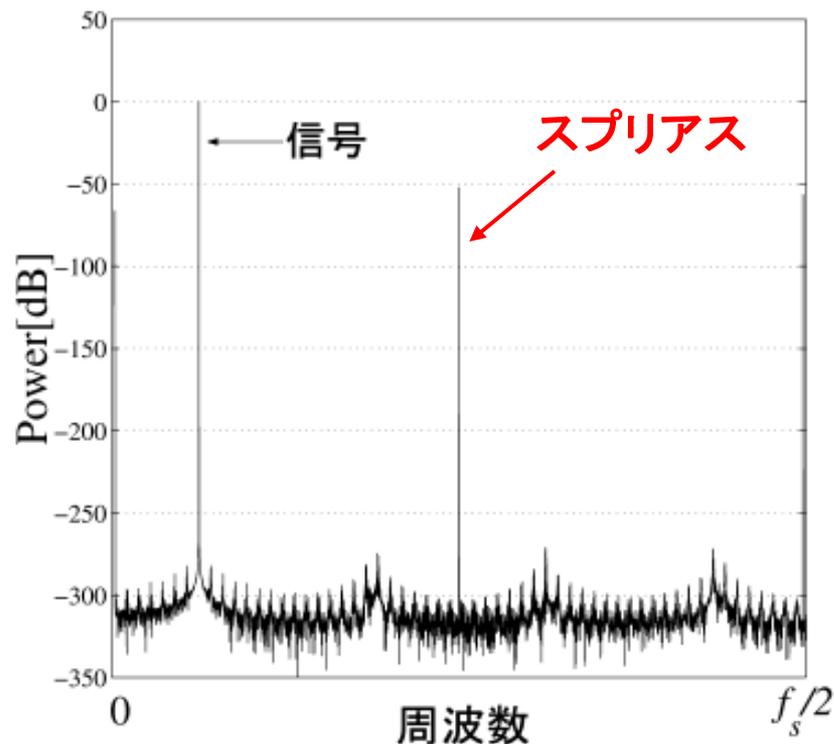
## 4ch-インターリーブADC

### ADCシステムの出力和エラー



時間領域での影響

### ADC出力のパワースペクトラム



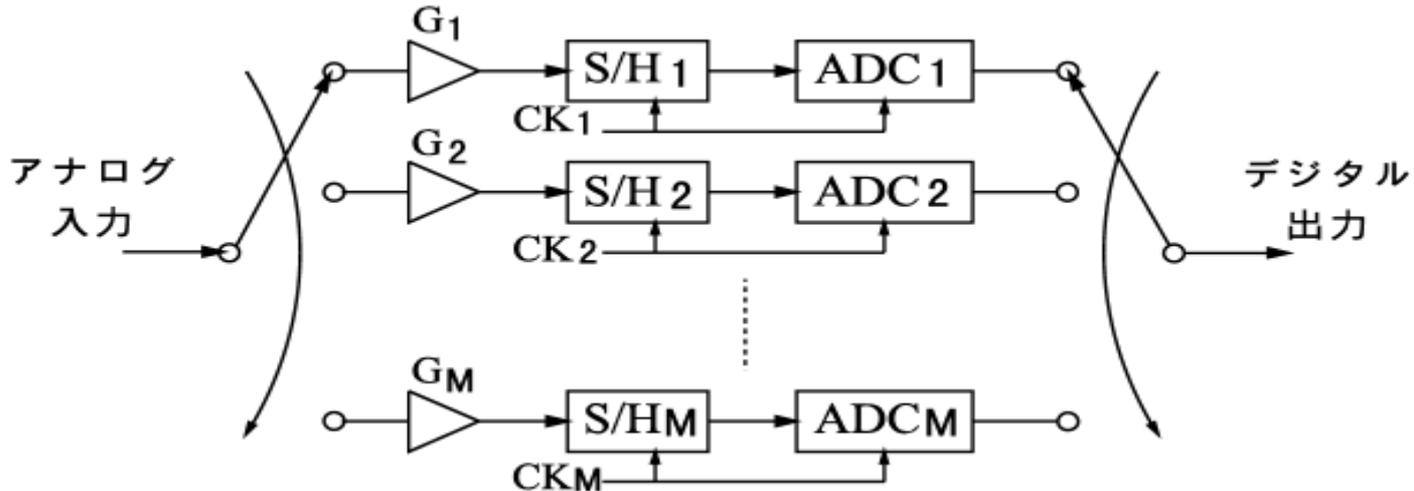
周波数領域での影響

入力信号とほぼ独立してオフセットミスマッチの影響が生じる

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- **インターリーブADCのチャンネル間のミスマッチ**
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響**
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題

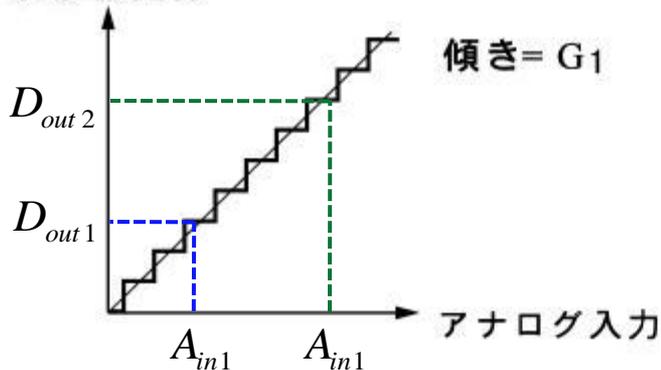


## ゲインミスマッチのモデル



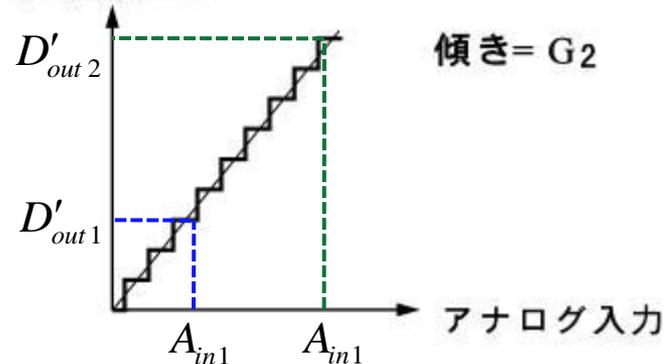
チャンネル1の入出力特性

デジタル出力



チャンネル2の入出力特性

デジタル出力

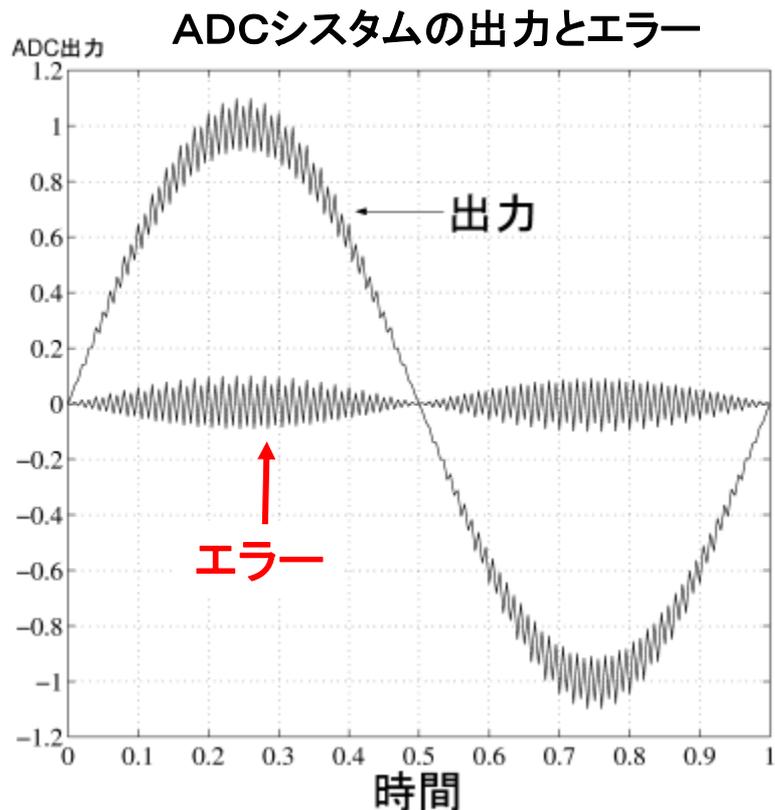


■各ADCのゲインがランダムにばらつく

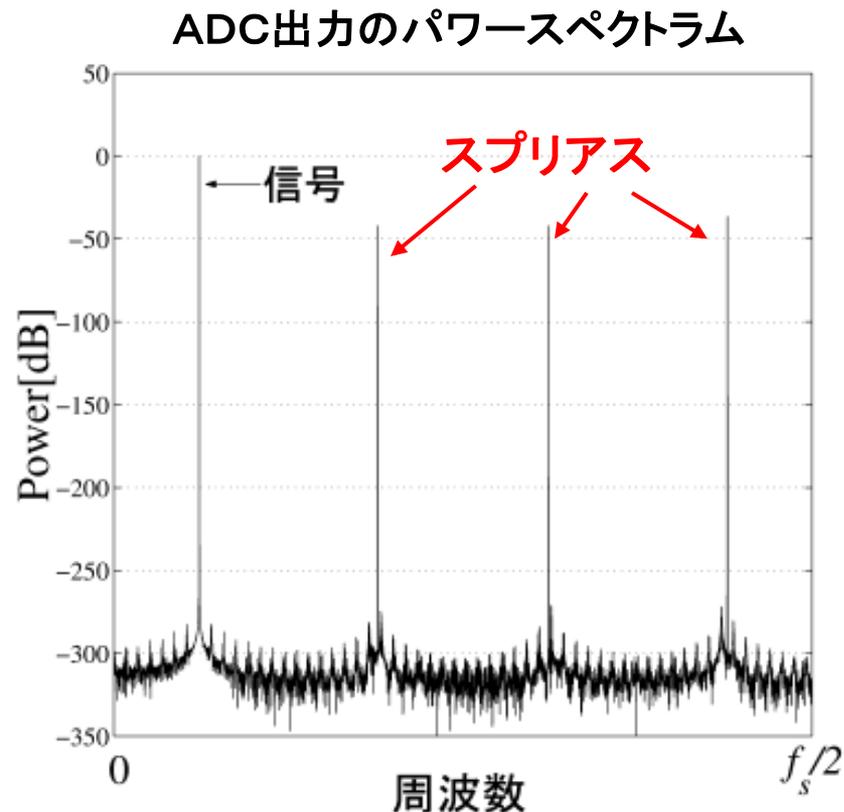


ゲインミスマッチが発生

## 4ch-インターリーブADC



時間領域での影響



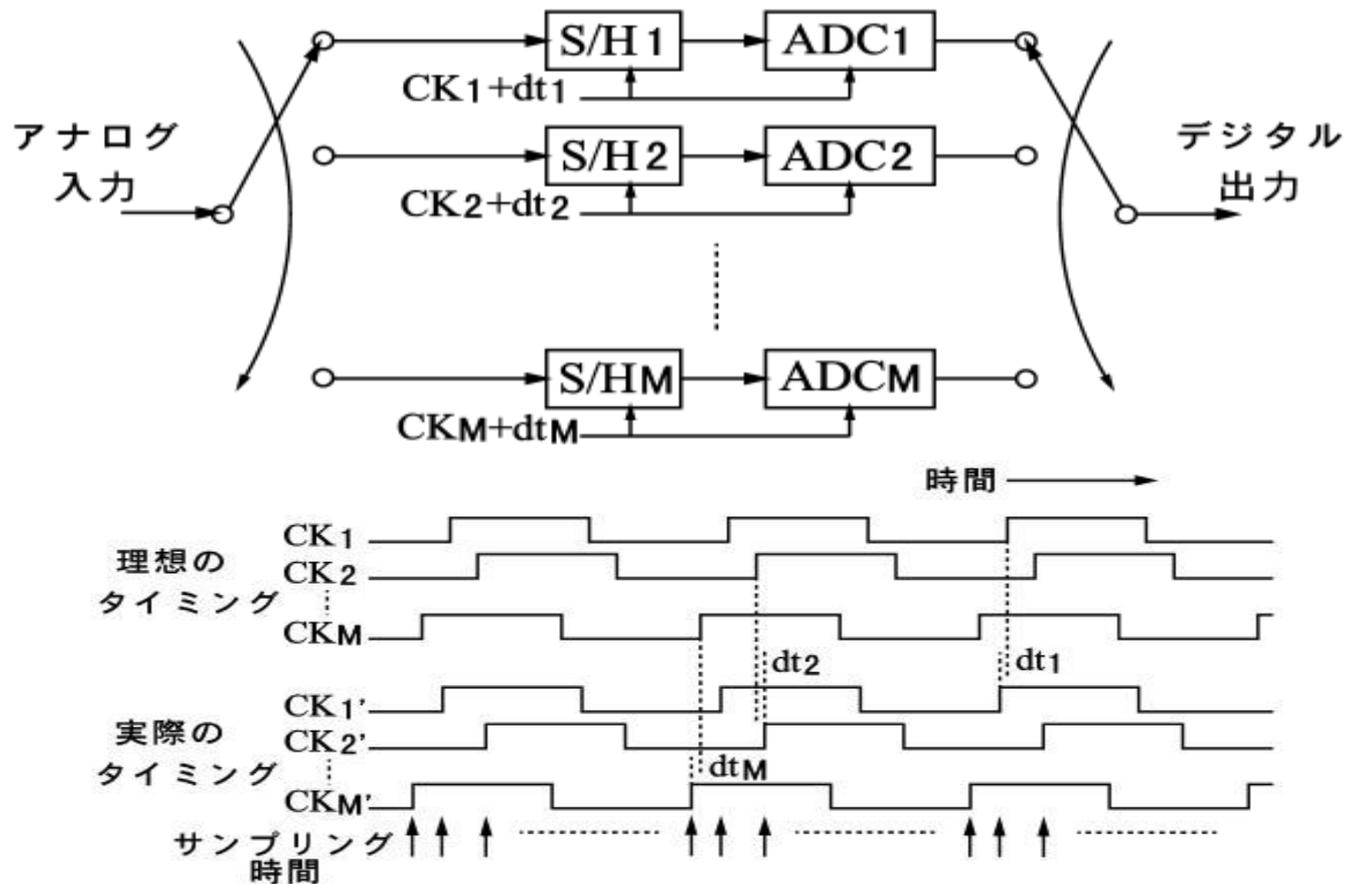
周波数領域での影響

入力信号の大きさに比例してゲインミスマッチの影響が生じる

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャンネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



## タイミングミスマッチのモデル

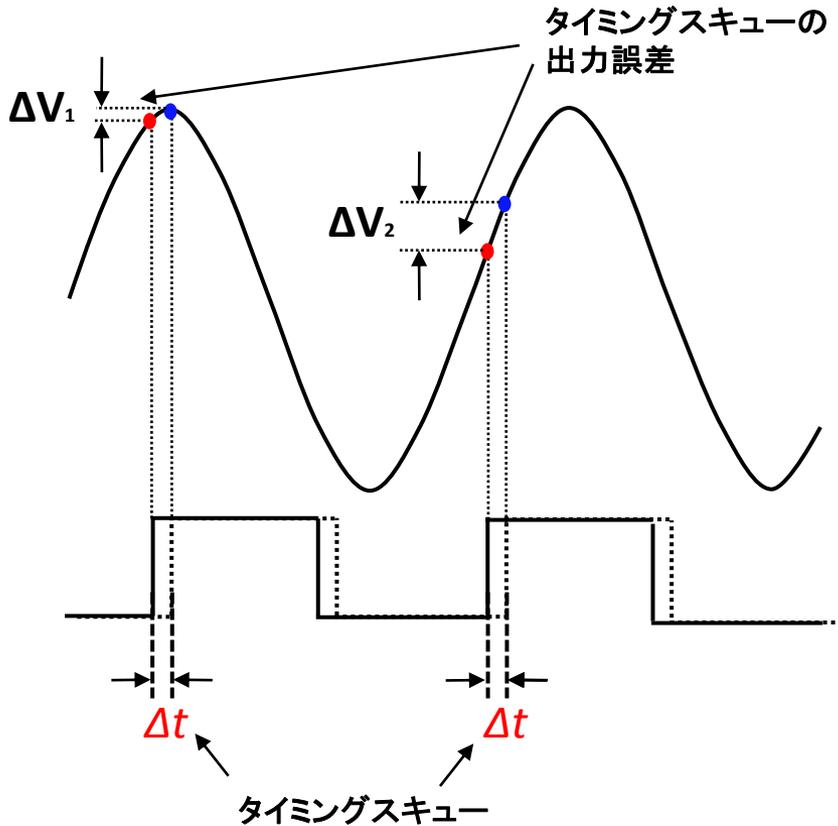


■各ADCのクロックにランダムなスキューが存在

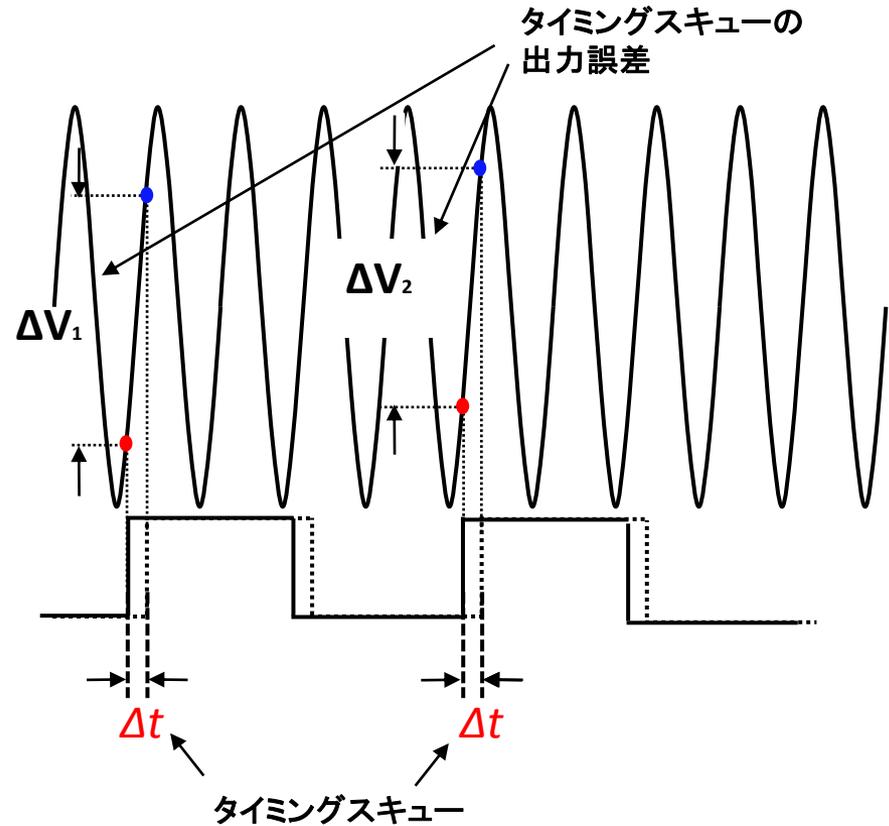
➡ タイミングミスマッチが発生

タイミングスキューの出力への影響

■ 低周波



■ 高周波



— 理想的なクロック

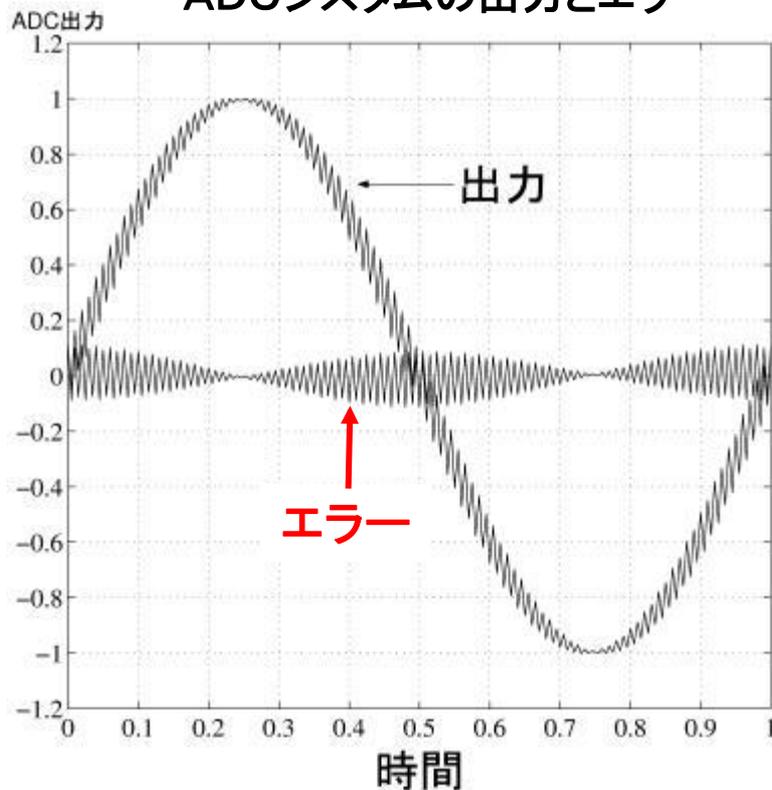
..... タイミングスキューの影響を受けたクロック

● 理想的なサンプリング点

● タイミングスキューの影響を受けたサンプリング点

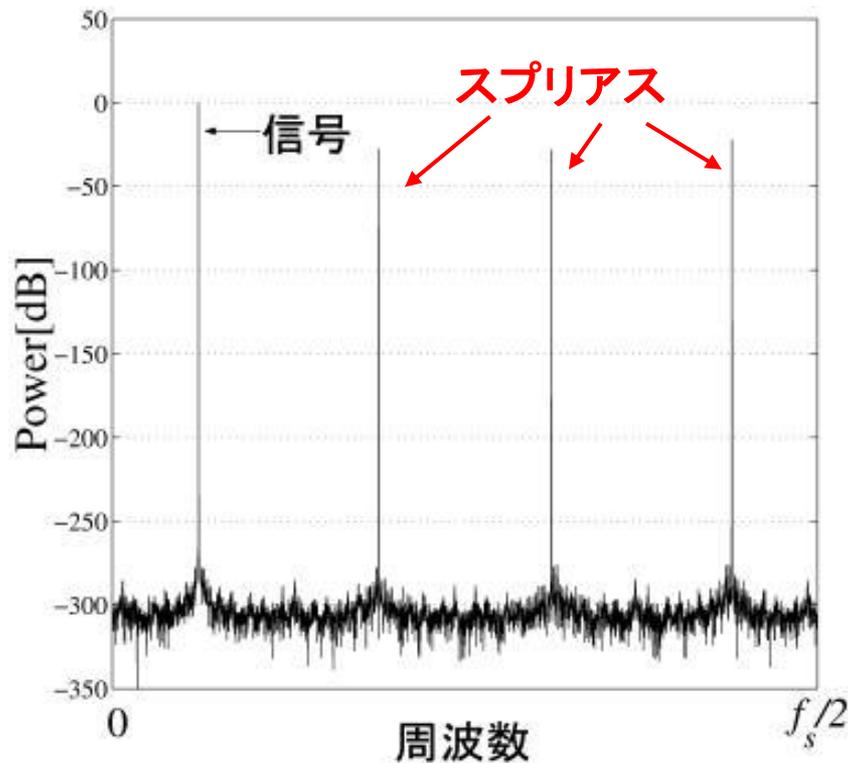
## 4ch-インターリーブADC

### ADCシステムの出力とエラー



時間領域での影響

### ADC出力のパワースペクトラム



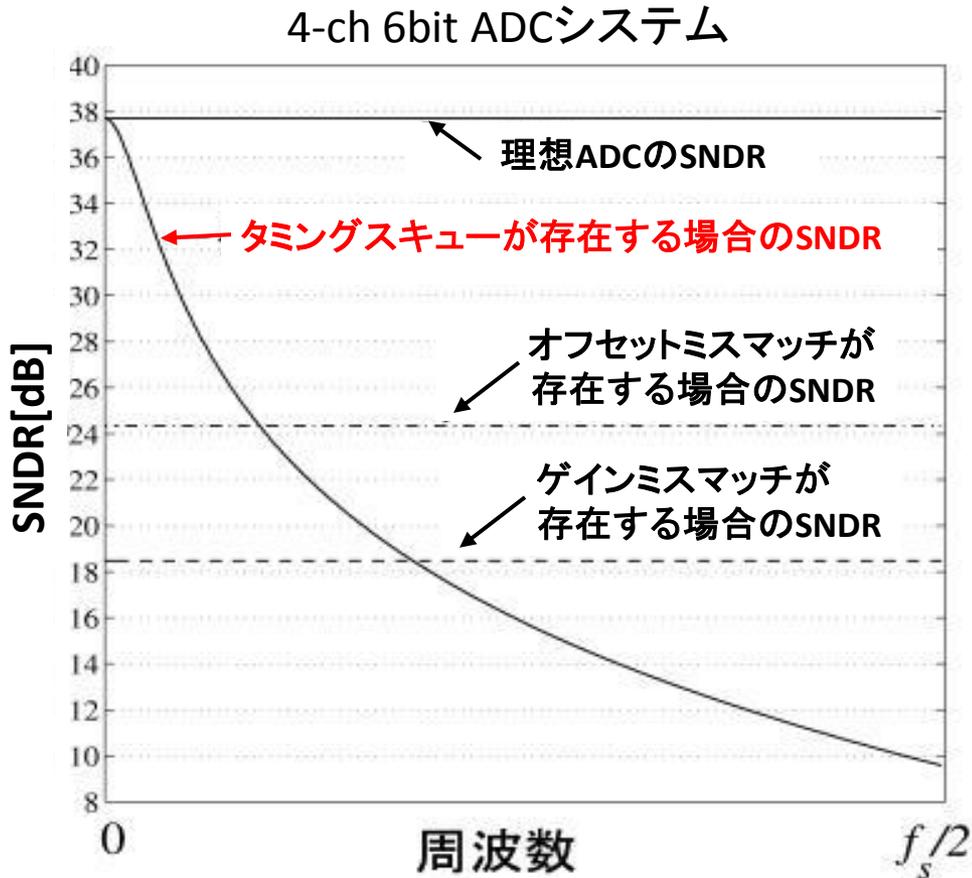
周波数領域での影響

入力信号のスルーレートに比例してタイミングミスマッチの影響が生じる

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



## 各ミスマッチのSNDRに対する影響



### ■ オフセットミスマッチ:

- ・入力信号の周波数に独立
- ・ノイズレベルは入力信号の振幅に独立

### ■ ゲインミスマッチ:

- ・入力信号の周波数に独立
- ・ノイズレベルは入力信号の振幅に独立

### ■ タイミングスキュー:

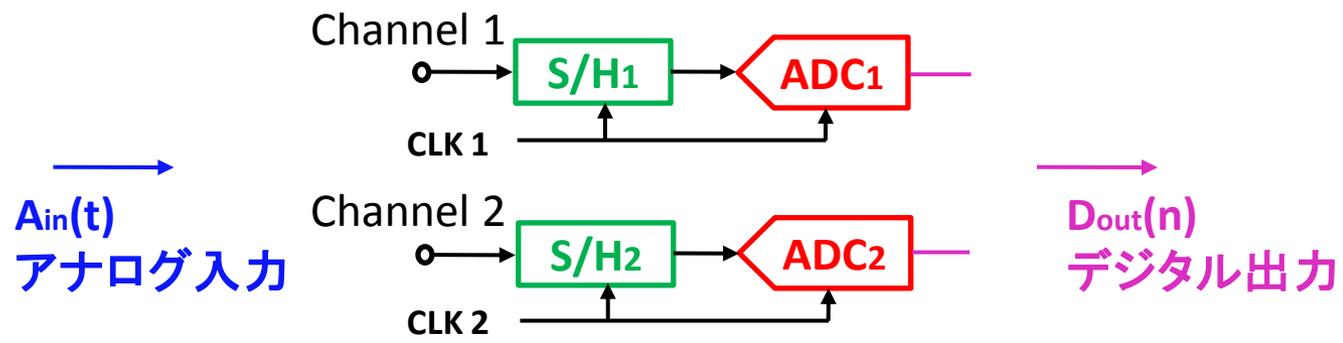
- ・入力信号の周波数が高くなると共に低下
- ・ノイズレベルは入力信号の振幅に独立

オフセット・ゲインミスマッチの影響 ➡️ コンスタント

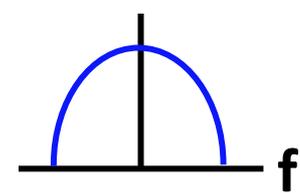
タイミングスキューの影響 ➡️ 周波数に依存

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題

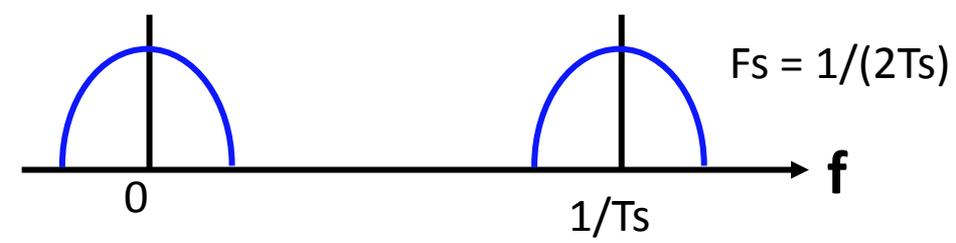
理想的なクロックの場合



フーリエ変換

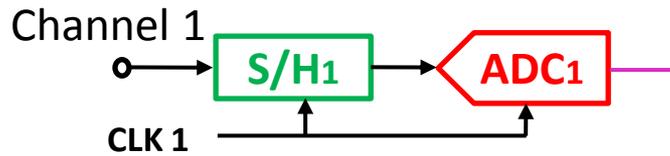


サンプリング

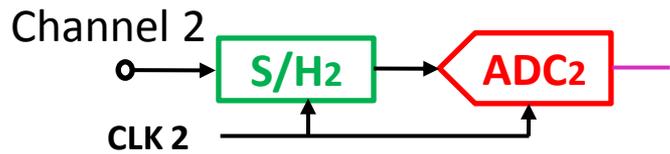




理想的なクロックの場合



$$X_1(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right)$$



$$X_2(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) e^{-j\pi k}$$

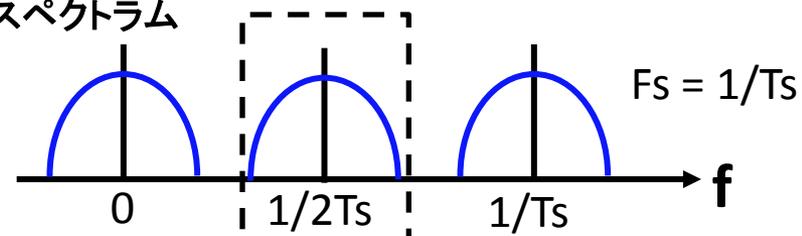
■ インターリーブ後:

$$X(f) = X_1(f) + X_2(f)$$

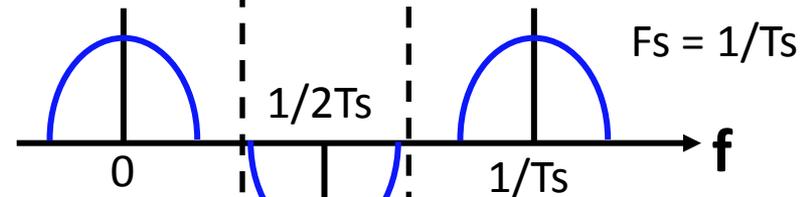
$$= \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) (1 + e^{-j\pi k})$$

完全に打ち消し合う

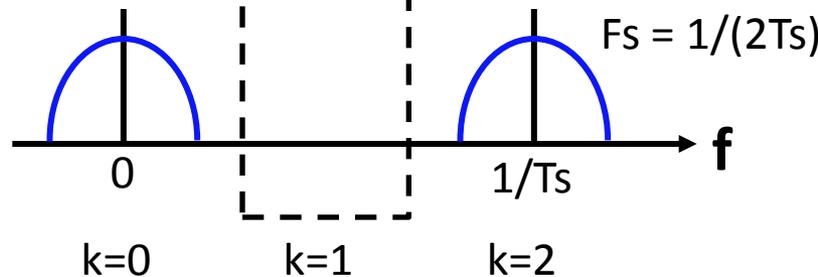
ADC1の単出力のスペクトラム



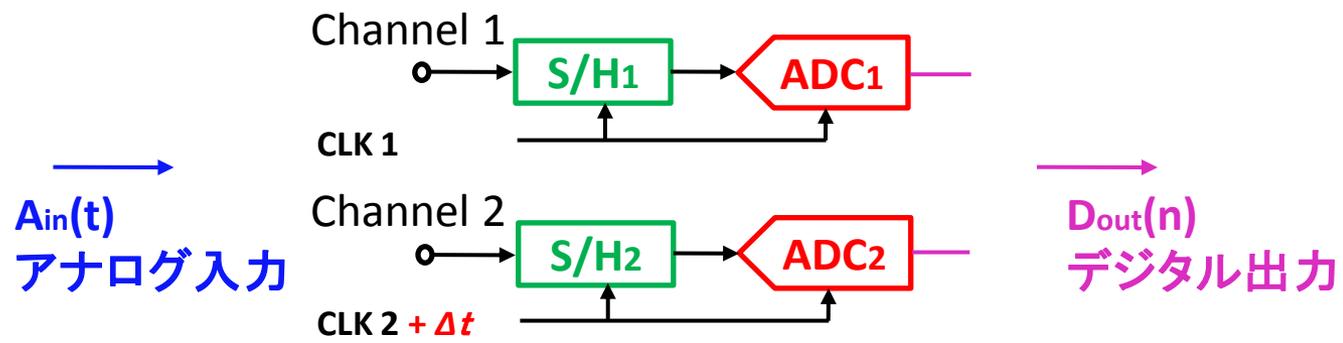
ADC2の単出力のスペクトラム



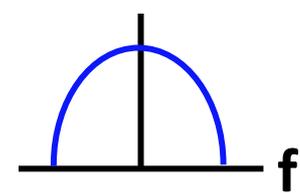
インターリーブ後のスペクトラム



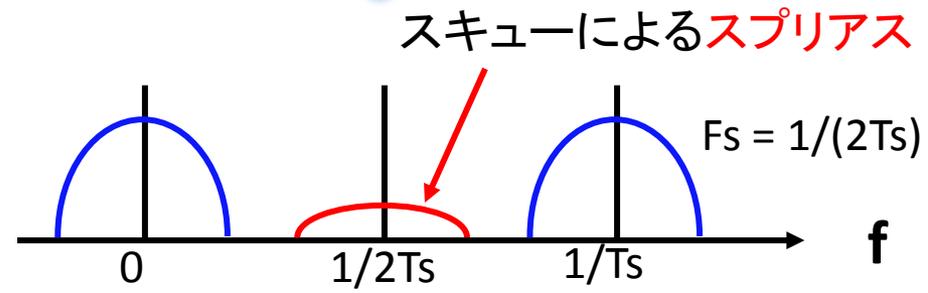
クロックのタイミングが  $\Delta t$  ずれている場合



フーリエ変換

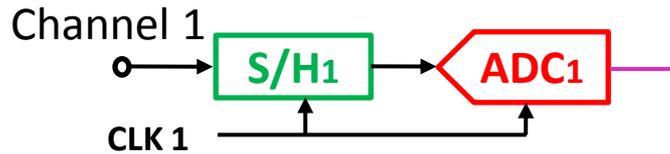


サンプリング

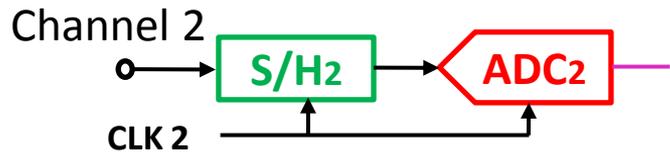




クロックのタイミングが  $\Delta t$  ずれている場合



$$X_1(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right)$$



$$X_2(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) e^{-j2\pi\Delta t(f - k/(2T_s))} e^{-j\pi k}$$

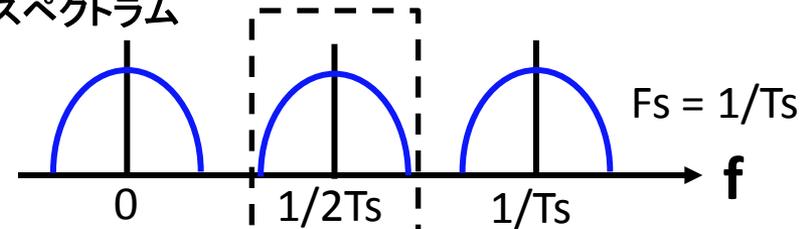
■ インターリーブ後:

$$X(f) = X_1(f) + X_2(f)$$

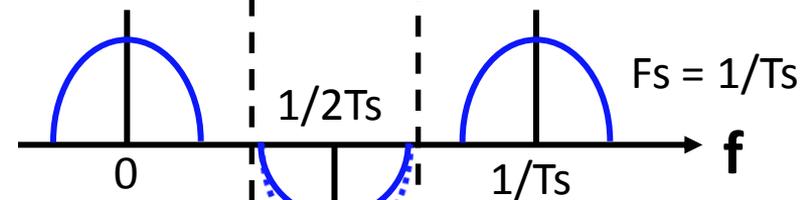
$$= \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) \left(1 + e^{-j2\pi\Delta t(f - k/2T_s)} e^{-j\pi k}\right)$$

完全に打ち消し合わない

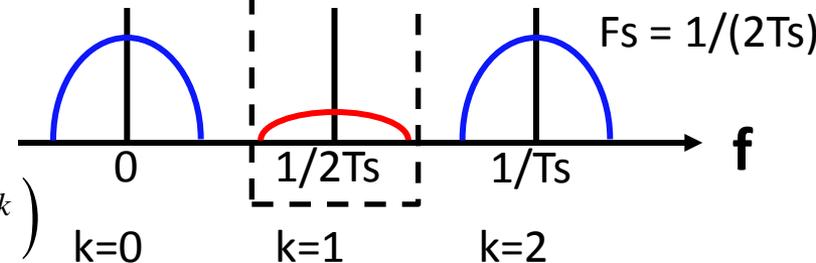
ADC1の単出力のスペクトラム



ADC2の単出力のスペクトラム

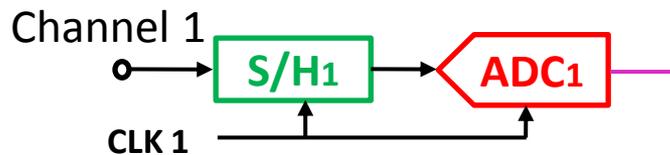


インターリーブ後のスペクトラム

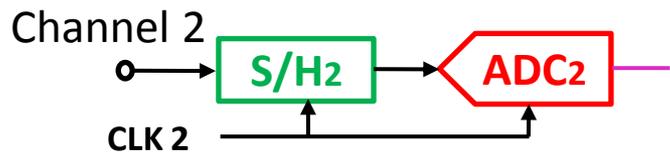


実際に扱うデータの信号帯域

$DC \sim M \cdot (f_s/2)$   $\longrightarrow$  単出力のスペクトラム式の  $k=0, 1, 2$  のみを考慮



$$X_1(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) = \frac{1}{2T_s} \left[ X(f) + X\left(f - \frac{1}{2T_s}\right) + X\left(f - \frac{1}{T_s}\right) \right]$$



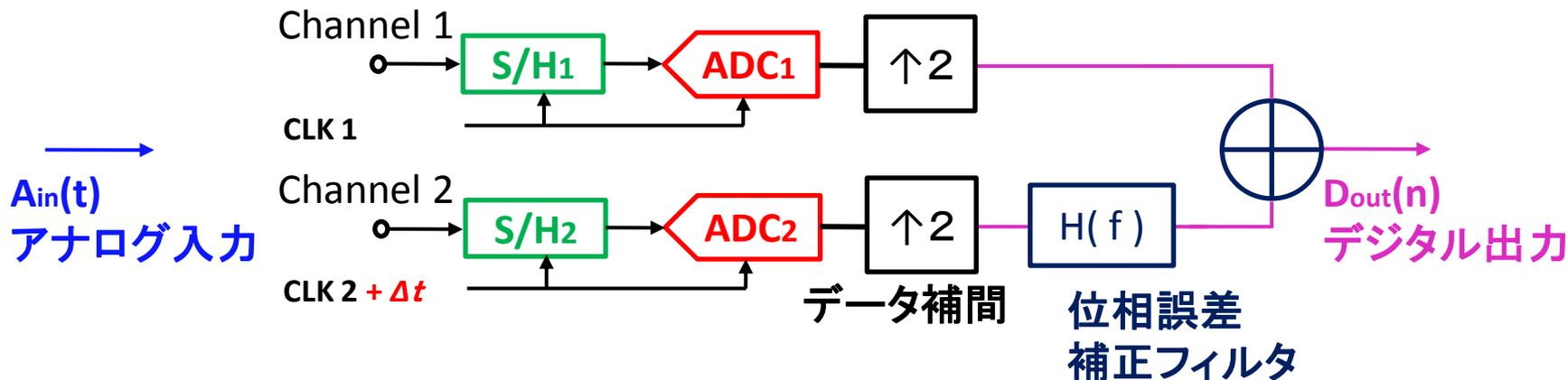
タイミングスキューの影響

$$X_2(f) = \frac{1}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{2T_s}\right) e^{-j2\pi\Delta(f-k/(2T_s))} e^{-j\pi k}$$

$$= \frac{1}{2T_s} \left[ X(f) e^{-j2\pi\Delta t} + X\left(f - \frac{1}{2T_s}\right) e^{-j2\pi\Delta t(f-1/(2T_s))} e^{-j\pi} + X\left(f - \frac{1}{T_s}\right) e^{-j2\pi\Delta t(f-1/(T_s))} e^{-j2\pi} \right]$$

この逆関数を用いる

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



## 補正フィルタの特性

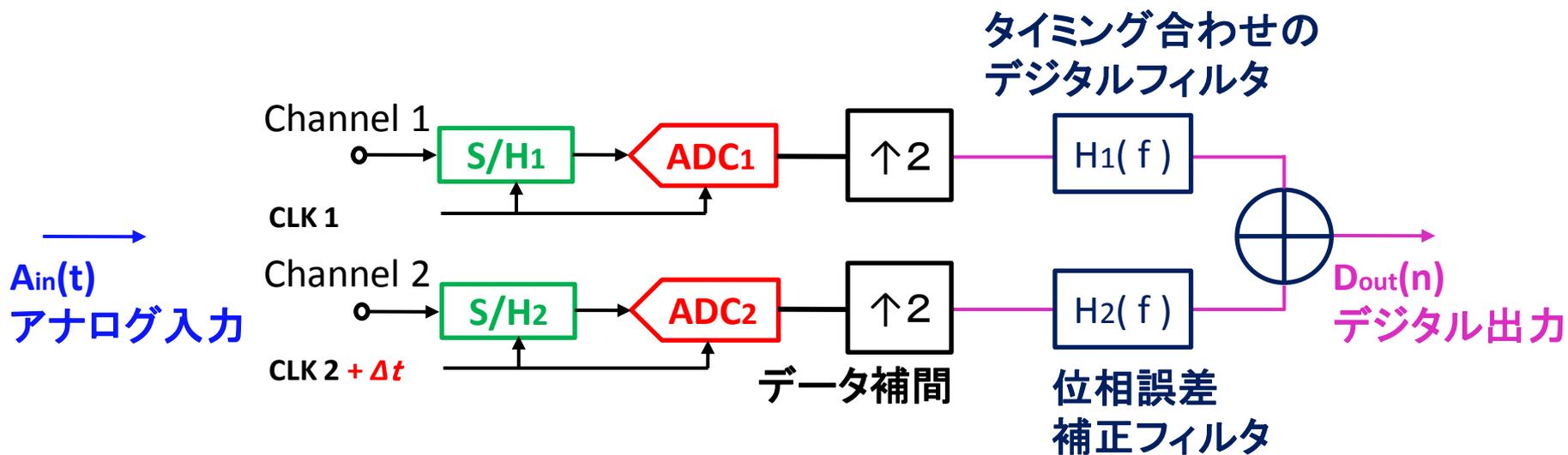
$$H(f) = e^{j2\pi\Delta t(f - 1/(2T_s))}$$

$$X_1(f) + X_2(f)e^{j2\pi\Delta t(f - 1/(2T_s))} = \frac{1}{T_s} \left[ X'(f) + X'\left(f - \frac{1}{T_s}\right) \right]$$

k=1 が成分を削除



スプリアスを打ち消す

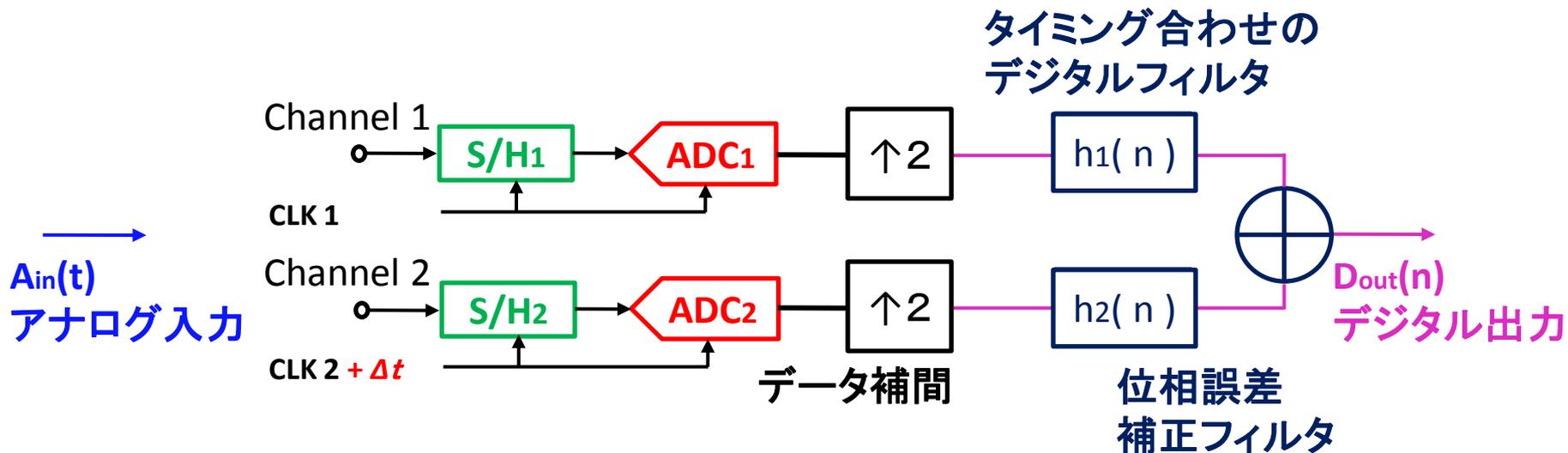


フィルタの群遅延を考慮  $\longrightarrow$  補正フィルタとのタイミングを合わせる

$H_1(f)$  のフィルタ特性:  $H_1(f) = e^{-j2\pi f\xi}$

$H_2(f)$  のフィルタ特性:  $H_2(f) = e^{-j2\pi f\xi} e^{j2\pi\Delta t(f-1/(2Ts))}$

ただし、 $\xi$  : フィルタによる群遅延



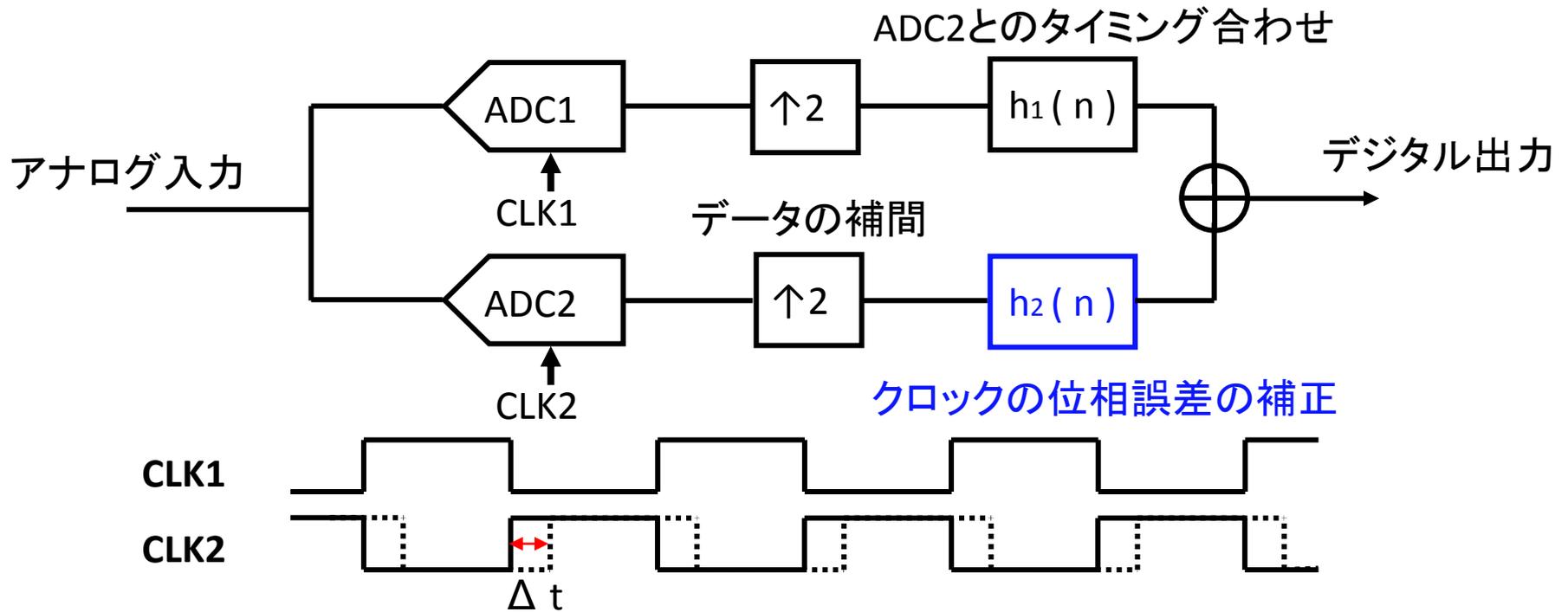
$H_1(f)$  のフィルタ特性:  $H_1(f) = e^{-j2\pi f\xi}$

$H_2(f)$  のフィルタ特性:  $H_2(f) = e^{-j2\pi f\xi} e^{j2\pi\Delta t(f-1/(2Ts))}$

実際に処理を行うのは時間領域  
逆フーリエ変換により時間領域へ

$$h_1(n), h_2(n)$$

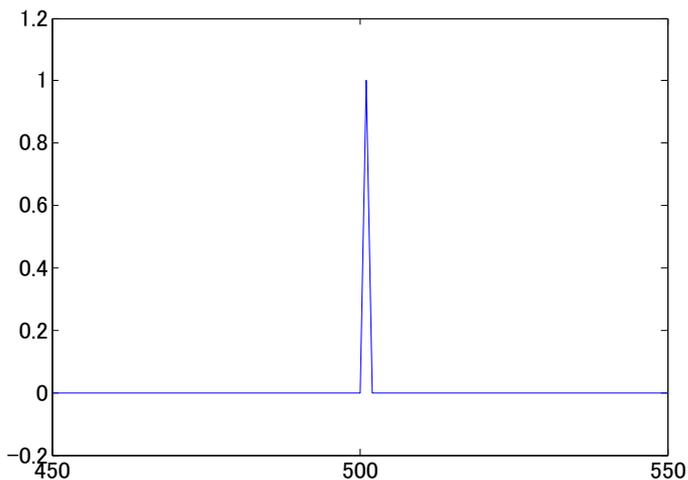
- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- まとめ・今後の課題



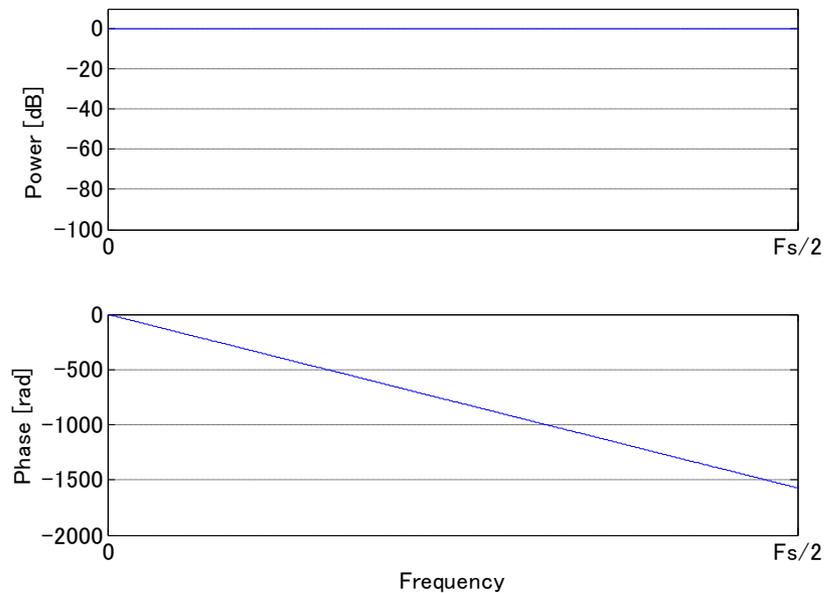
提案デジタルフィルタによりタイミングのずれを補正



FFTにより、効果を確認



インパルス応答

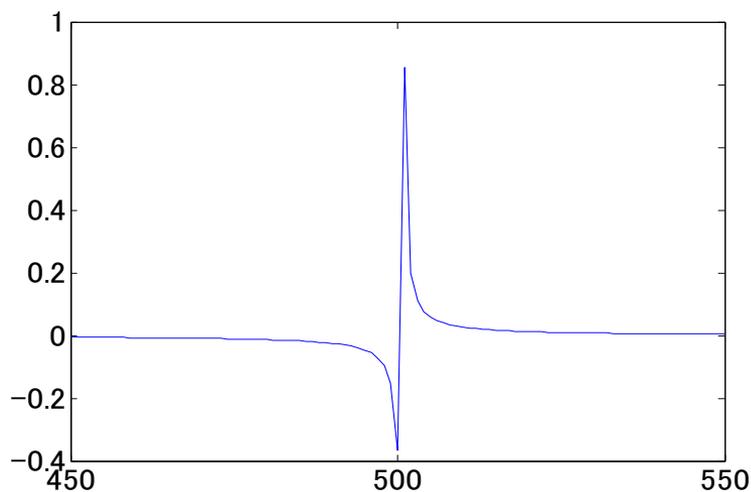


位相応答

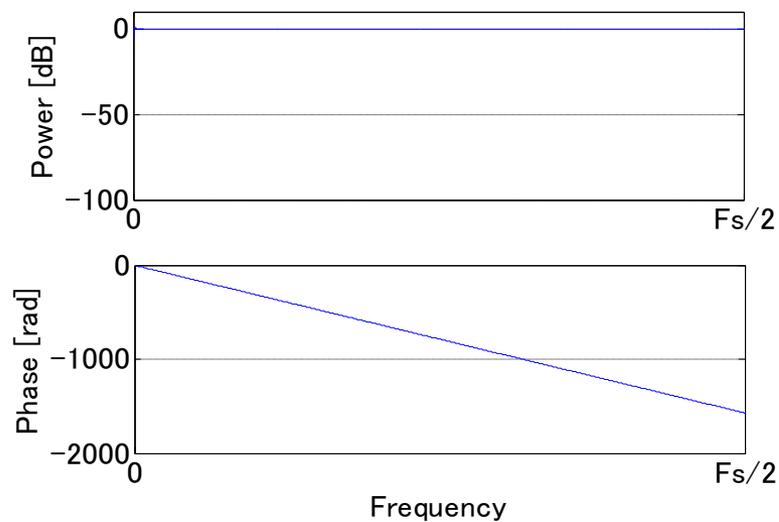
群遅延を合わせるために使用



オールパスフィルタ



インパルス応答



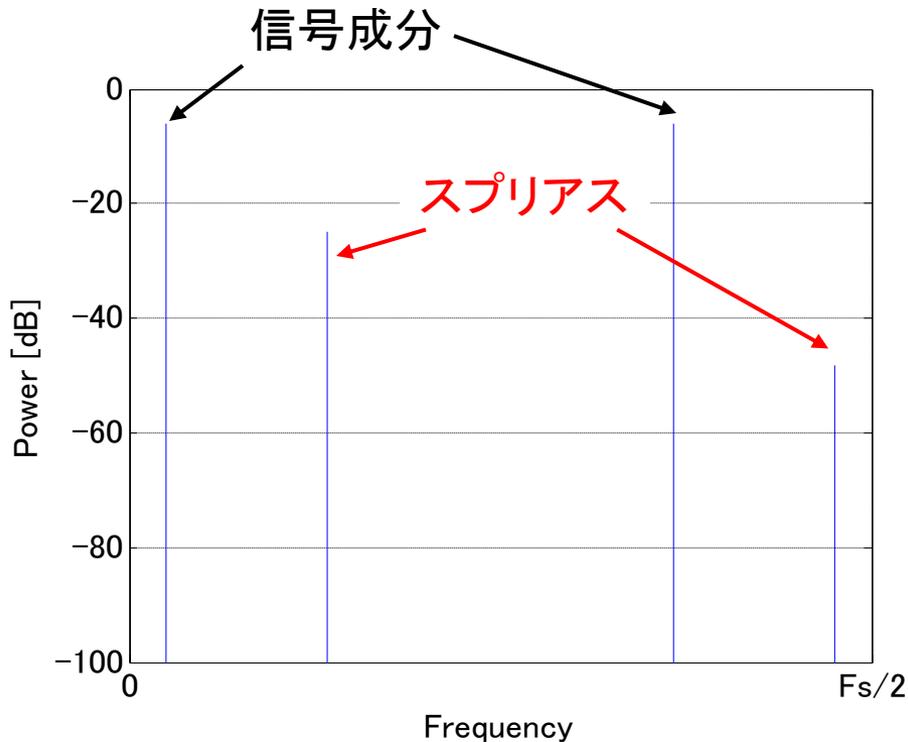
位相応答

奇対称のインパルス応答

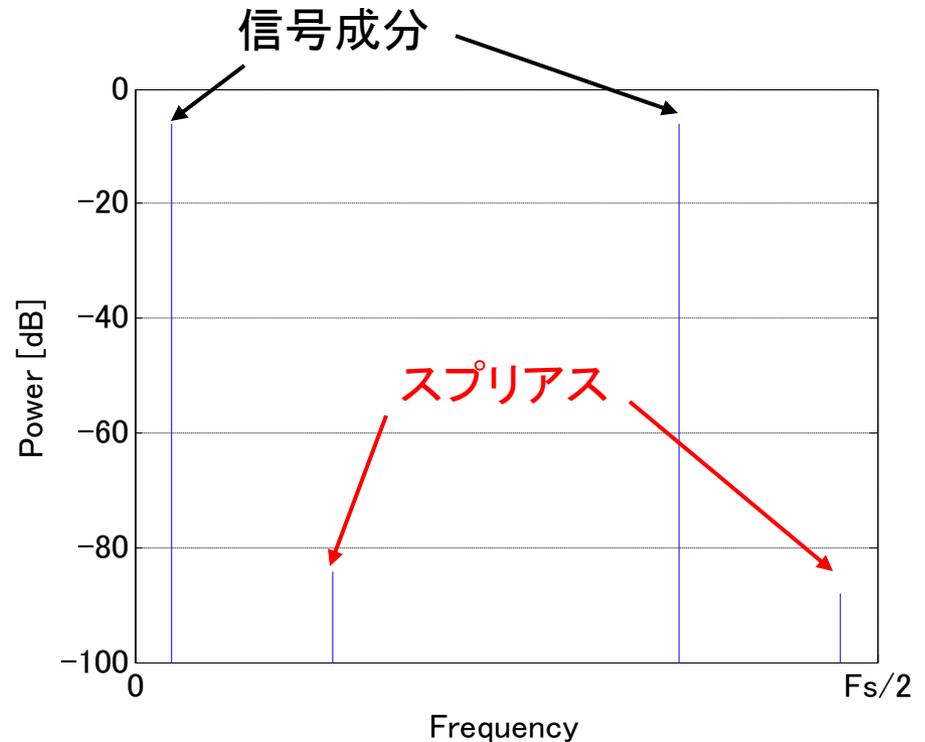


線形位相

スキューの量  $\Delta t=0.1T_s$   
フィルタのタップ数 : 1001



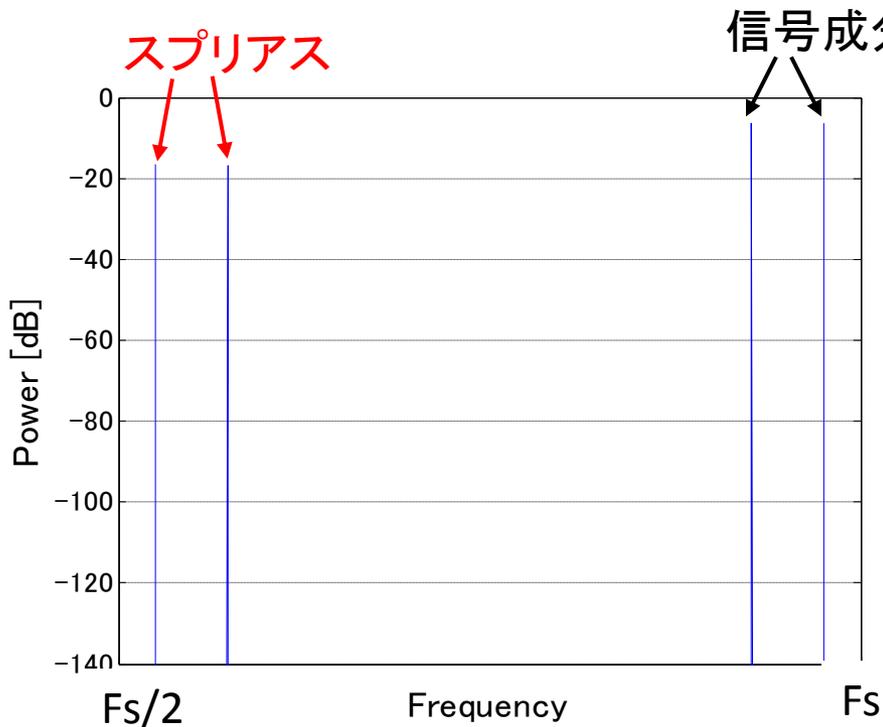
補正なし  
の出力スペクトラム



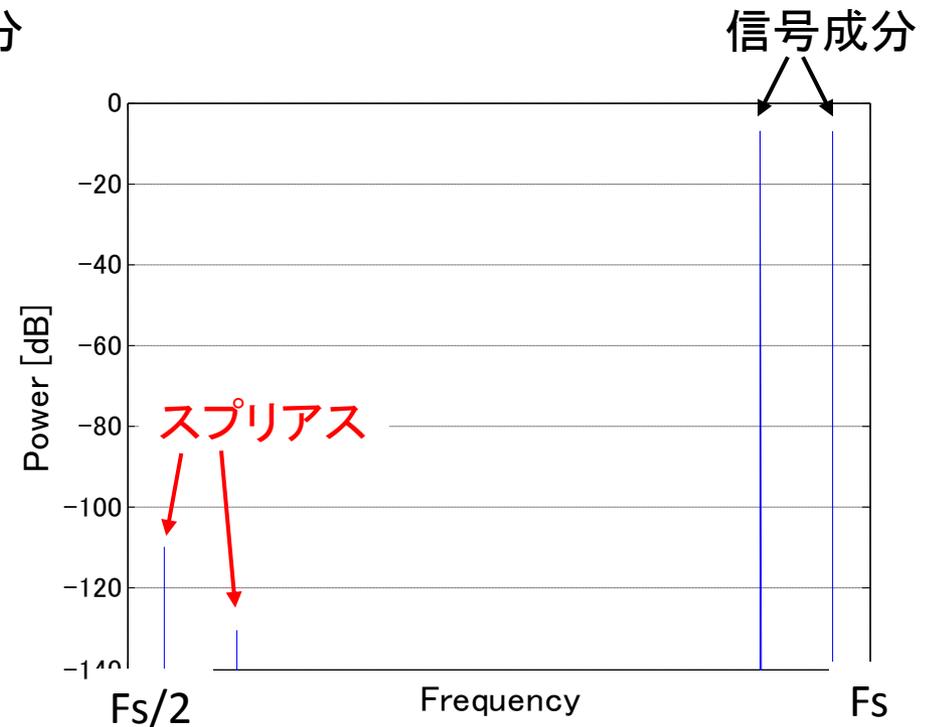
補正あり  
の出力スペクトラム

インターリーブADCのナイキスト周波数まで補正可能

スキューの量  $\Delta t = 0.1T_s$   
フィルタのタップ数 : 1001



補正なし  
の出カスペクトラム

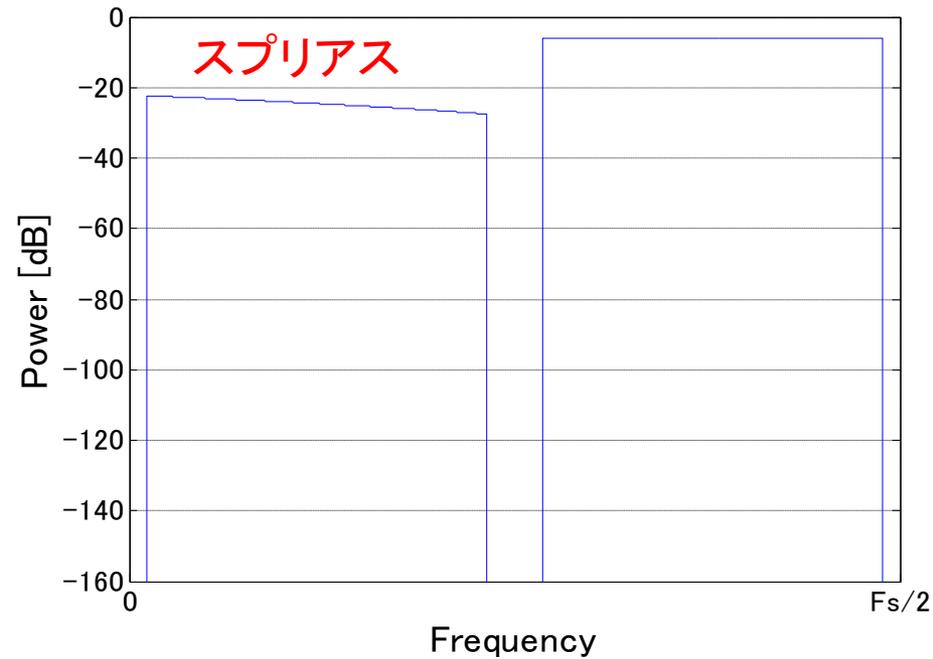


補正あり  
の出カスペクトラム

第2ナイキスト領域でも補正可能

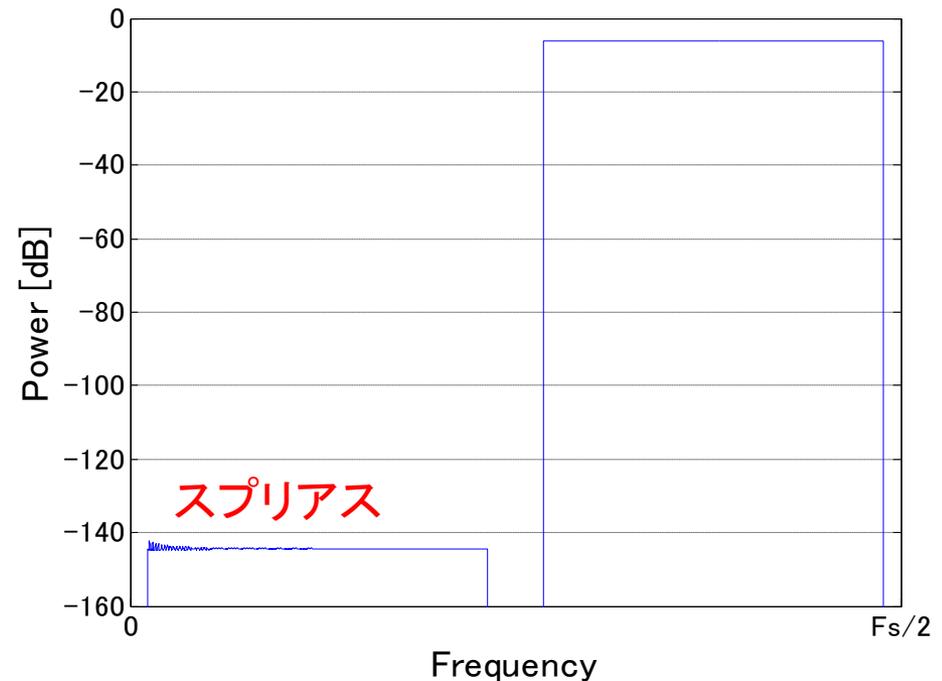
スキューの量  $\Delta t = 0.1T_s$   
フィルタのタップ数 : 1001

信号成分



補正なし  
の出力スペクトラム

信号成分



補正あり  
の出力スペクトラム

一定周波数帯域を持った入力信号もナイキスト周波数まで補正可能

- 研究背景・目的
- インターリーブADCの動作原理
- インターリーブADCのチャネル間のミスマッチ
  - A) オフセットミスマッチの影響
  - B) ゲインミスマッチの影響
  - C) タイミングミスマッチの影響
  - D) 各ミスマッチのADCシステムのSNDRに対する影響
- インターリーブADCのタイミングスキュー補正のためのデジタルフィルタ
  - A) タイミングスキュー影響の周波数領域での解析
  - B) デジタルフィルタの設計
  - C) シミュレーション
- **まとめ・今後の課題**

## まとめ

- 試験デバイス的高速化・高周波化に対応したインターリーブADC構成
- 各ADCのクロックのタイミングスキューの影響による精度劣化の大きな問題
- インターリーブADCのデジタル補正技術の開発
- インターリーブADCの新しい補正アルゴリズムを考案
- ナイキスト周波数まで補正可能
- 第2ナイキスト領域でも補正可能

## 今後の課題

- フィルタのタップ数、乗算器のビット数
- 実装構成の検討
- 検討した補正アルゴリズムの実機での検証

- N. Kurosawa, H. Kobayashi, K. Maruyama, H. Sugawara, K. Kobayashi, “Explicit Analysis of Channel Mismatch Effects in Time-Interleaved ADC Systems”, *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol.48, no.3, pp.261-271 (March 2001)
- N. Kurosawa, H. Kobayashi, K. Kobayashi, “Channel Linearity Mismatch Effects in Time-Interleaved ADC Systems”, *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol. E85-A, no. 4, pp.749-756 (April 2002).
- K. Asami “An Algorithm to Improve the Performance of M-channel Time-Interleaved A-D Converters”, *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E90-A, no.12, pp.2846-2852, Dec. 2007.
- K. Asami, T. Suzuki, H. Miyajima, T. Taura, H. Kobayashi, “Technique to Improve the Performance of Time-Interleaved A-D Converters with Mismatches of Non-linearity”, *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E92-A, no.2, pp.374-380 (Feb. 2009).
- K. Asami, “Technique to Improve the Performance of Time-Interleaved A-D Converters,” *Proc. of IEEE International Test Conference*, Paper 34.1, Austin (Nov.2005).
- 浅見幸司, 黒沢烈士, 立岩武徳, 宮島広行、小林春夫 「インターリーブADCでのタイミングスキュー影響のデジタル補正技術」電子情報通信学会 集積回路研究会 (2009年10月)
- 浅見幸司, 宮島広行、黒沢烈士, 立岩武徳, 小林春夫、「デジタルフィルタの新線形位相条件と回路システムへの応用」電気学会 電子回路研究会、桐生 (2010年3月).

御清聴ありがとうございます。