

Novel Linear Phase Condition for Digital Filter

*浅見幸司, ○立岩武徳, 黒澤烈士,
宮島広行, 小林春夫

*株式会社アドバンテスト
群馬大学

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

研究背景・目的

LSIテスト・電子計測器ではタイミングスキューが重要

タイミングスキューのデジタル誤差補正
デジタルフィルタの線形位相を保つことが重要

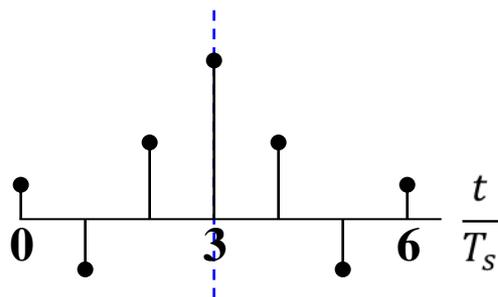
従来の線形位相フィルタ ⇒ 微小遅延 ×

提案型フィルタ: 線形位相 ⇒ 微小遅延 ○

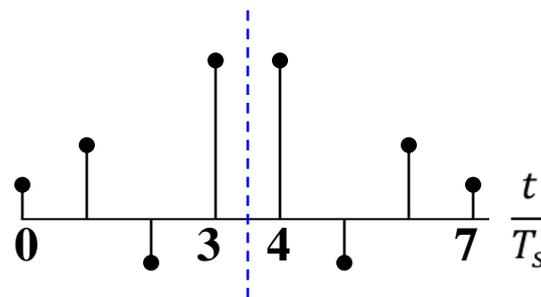
発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

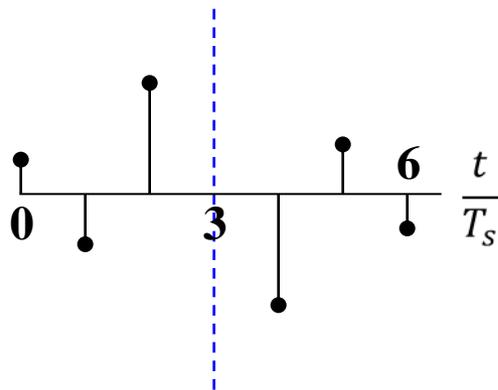
完全線形位相FIRフィルタの4ケース



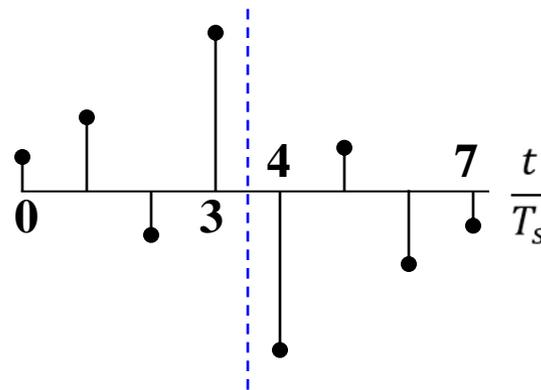
(1) ケース1
奇数タップ・偶対称



(2) ケース2
偶数タップ・偶対称



(3) ケース3
奇数タップ・奇対称



(4) ケース4
偶数タップ・奇対称

4ケースの周波数特性

$h(nT)$	$H(e^{j\omega T})$
ケース1	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \cos[\omega k T_s]$
ケース2	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2} \sum_{k=1}^{N/2} b_k \cos[\omega(k - 1/2)T_s]$
ケース3	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2 - \pi/2)} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \sin[\omega k T_s]$
ケース4	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2 - \pi/2)} \sum_{k=1}^{N/2} b_k \sin[\omega(k - 1/2)T_s]$

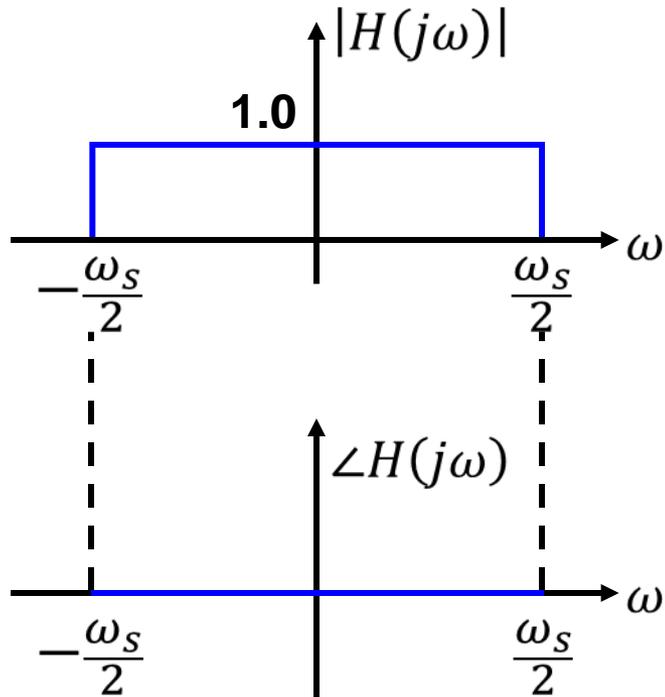
位相特性 : 周波数の一次関数
 時間分解能 $T_s/2$

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- **デジタルフィルタの線形位相の新条件**
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

理想フィルタ

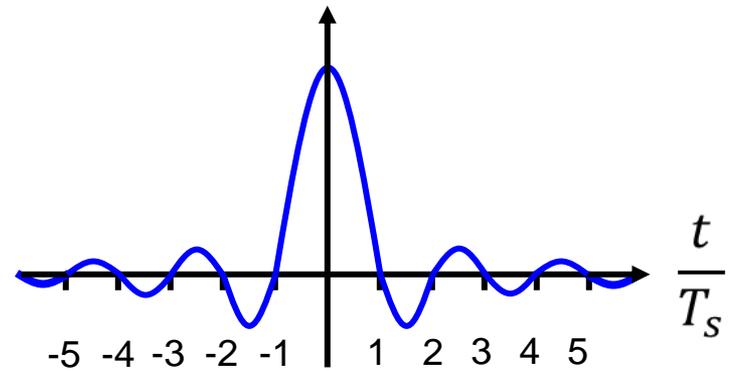
周波数応答



フーリエ変換



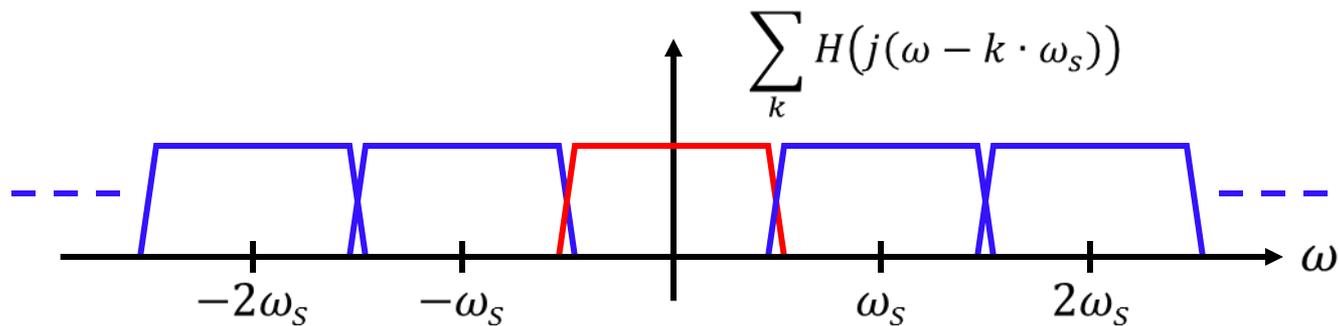
インパルス応答



$$h(t) = \frac{1}{T_s} \text{sinc} \left(\pi \frac{t}{T_s} \right)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi}{T_s} : \text{サンプリング周波数}$$

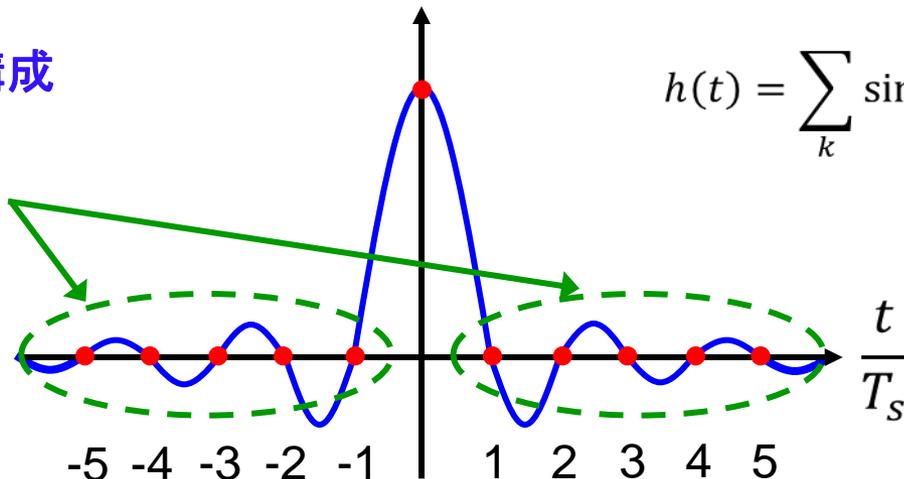
理想フィルタの離散時間表現



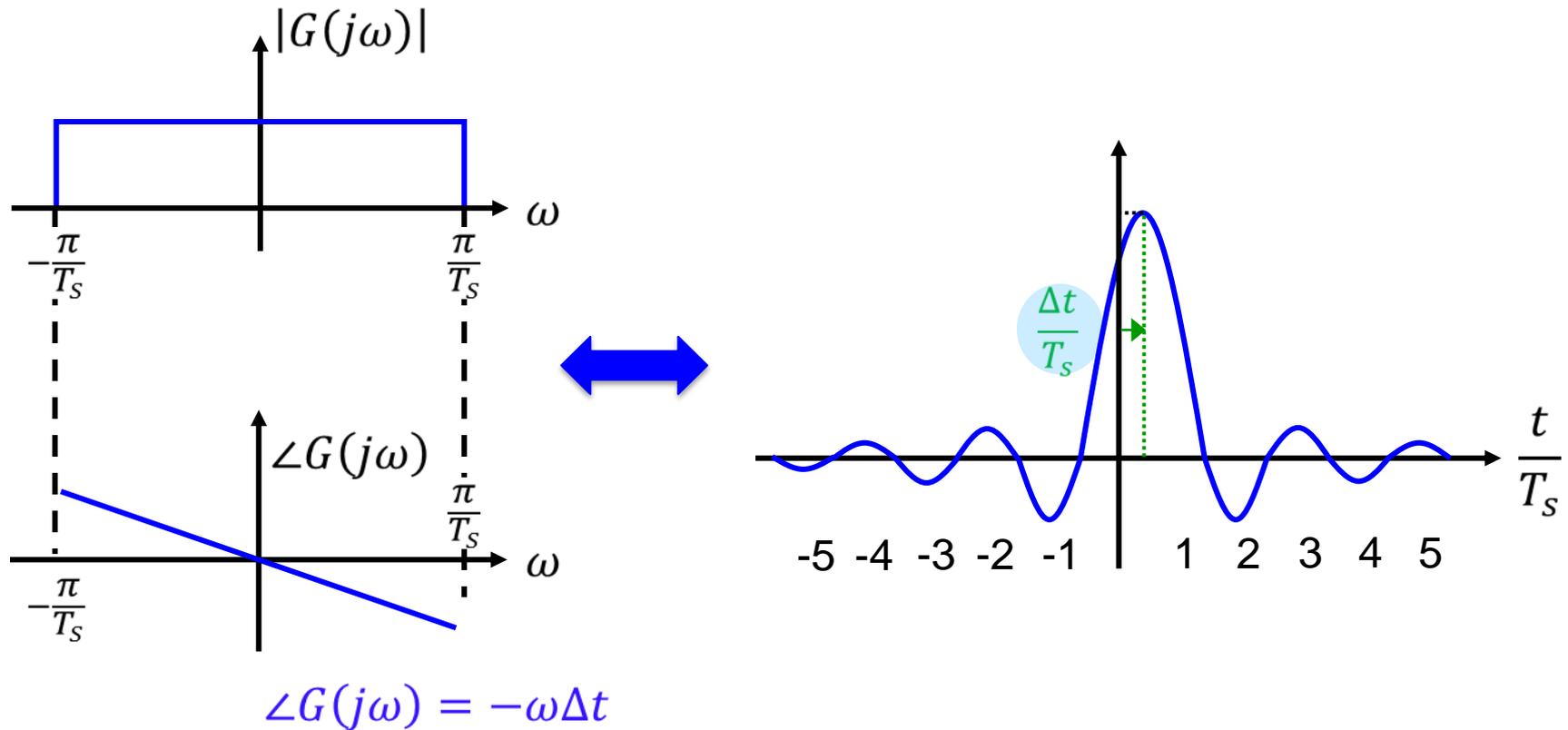
↑ ↓ フーリエ変換

FIRフィルタを構成

全てゼロ



インパルス応答の時間シフト

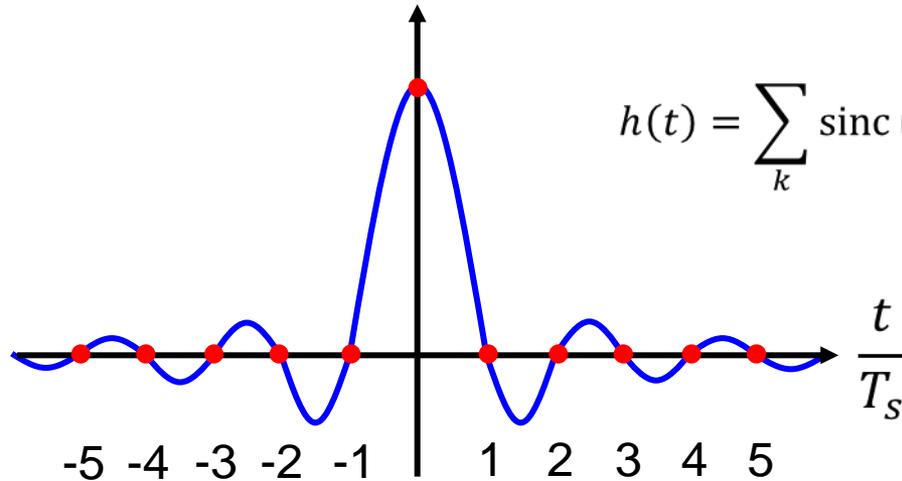


振幅特性は変化しない

インパルス応答が Δt だけシフトする

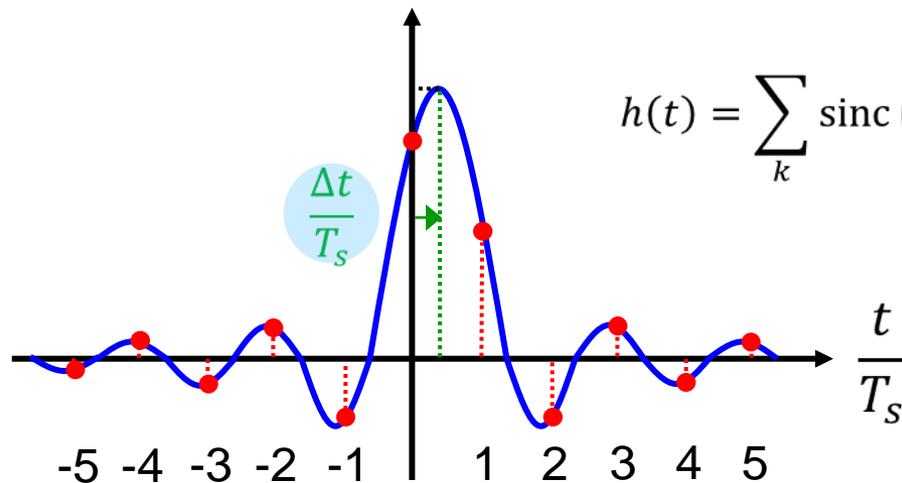
時間シフトによる係数への影響

FIRフィルタ



時間シフト

IIRフィルタ

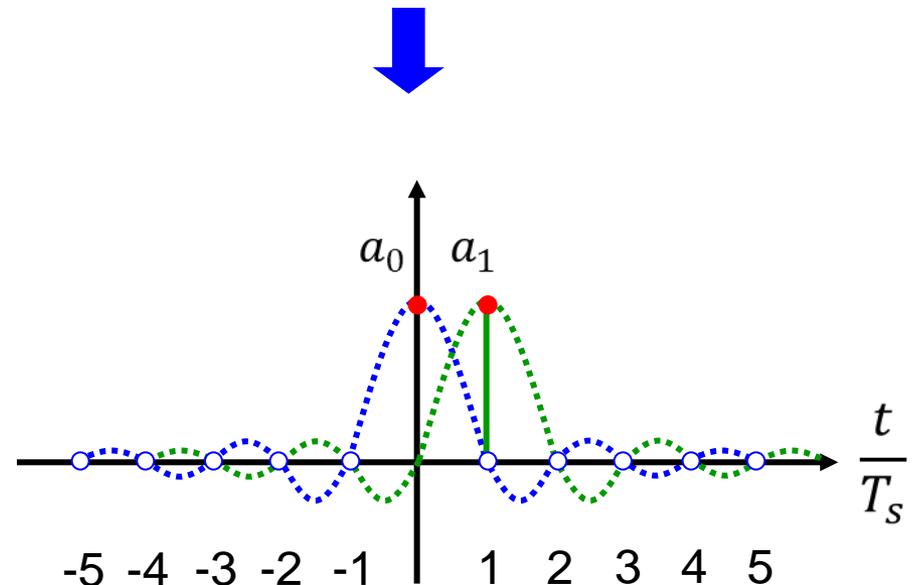
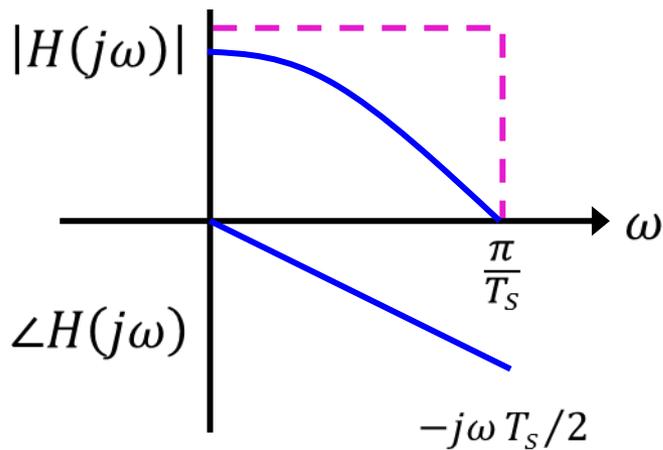
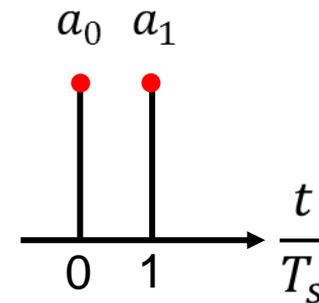
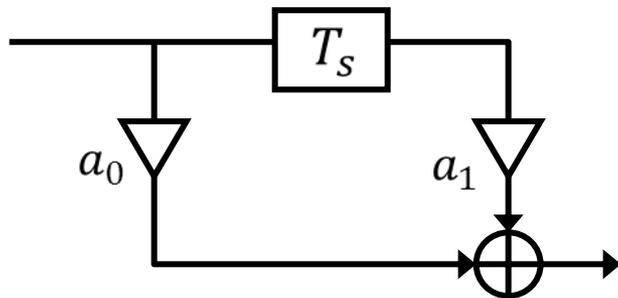


遅延理想フィルタ

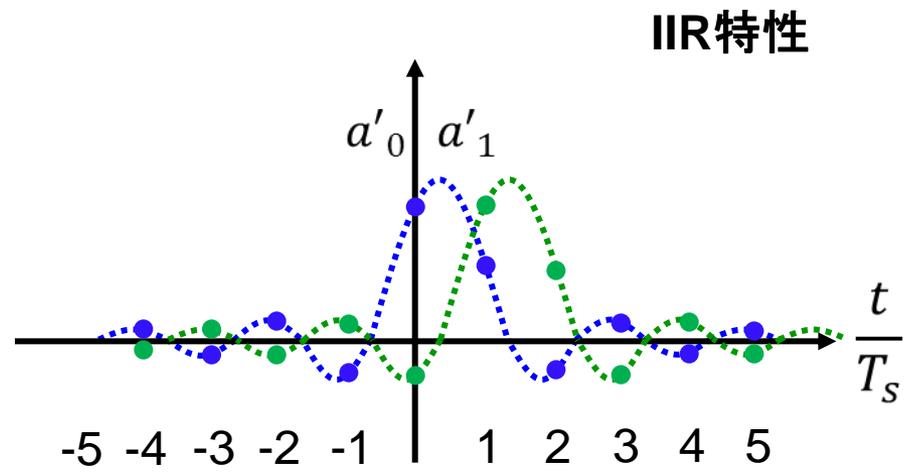
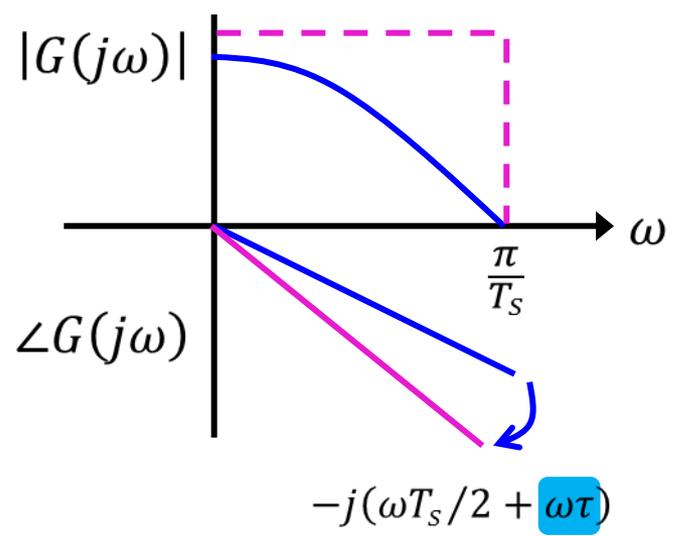
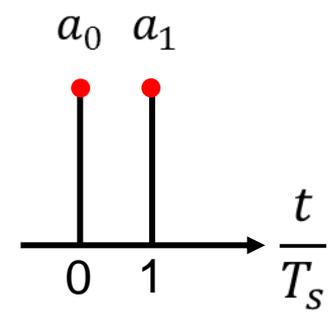
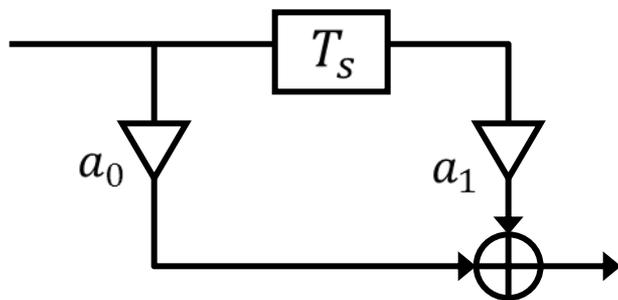
発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- **デジタルフィルタの線形位相の新条件**
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - **新条件の線形位相IIRフィルタの構成**
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

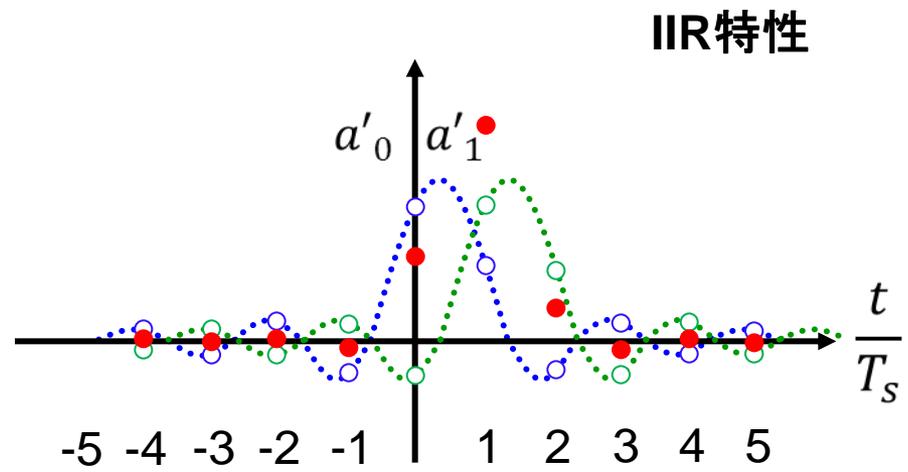
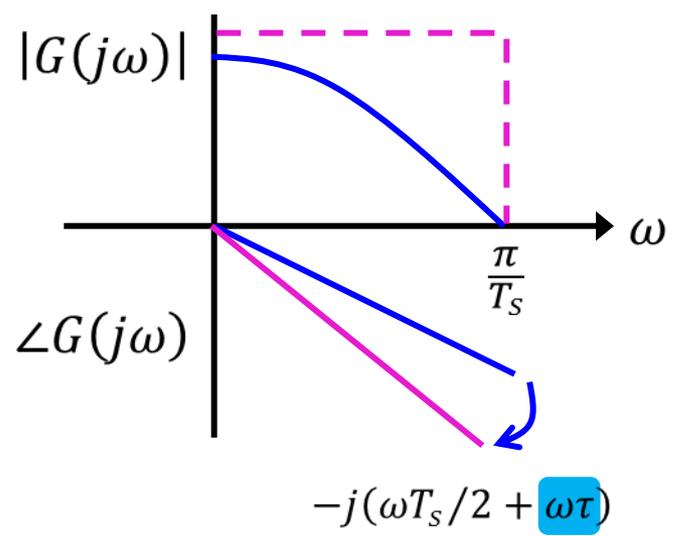
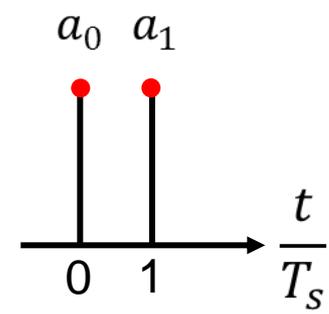
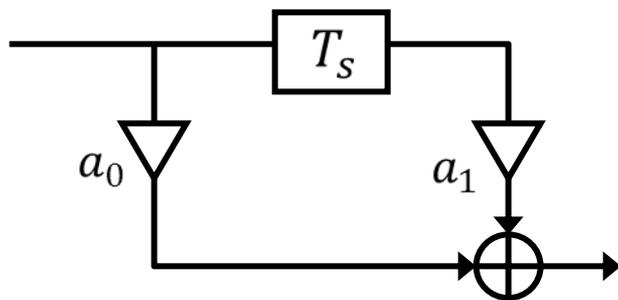
2タップフィルタ・モデル



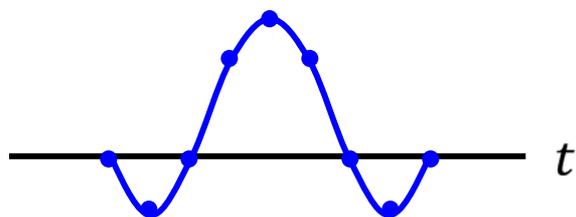
2タップフィルタ・遅延モデル



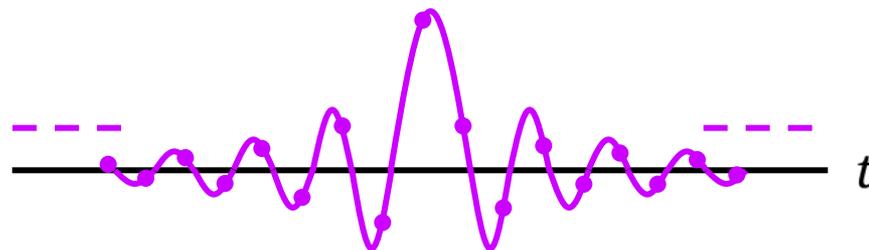
2タップフィルタ・遅延モデル



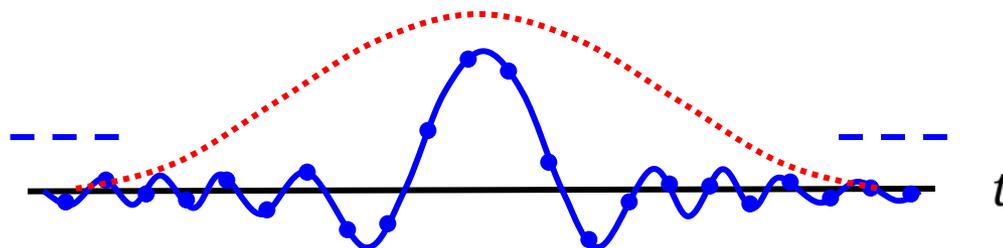
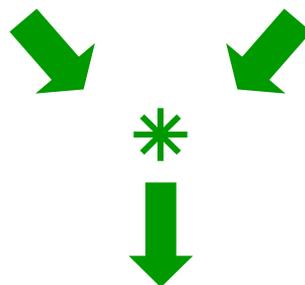
提案の遅延デジタルフィルタ



(a) FIRフィルタ



(b) 遅延理想フィルタ



(c) 遅延デジタルフィルタ

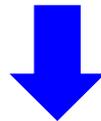
提案の遅延デジタルフィルタ特性

$g(nT)$	$G(e^{j\omega T})$
ケース1	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2+\omega\tau} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \cos[\omega k T_s]$
ケース2	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2+\omega\tau} \sum_{k=1}^{N/2} b_k \cos[\omega(k-1/2)T_s]$
ケース3	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2-\pi/2+\omega\tau)} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \sin[\omega k T_s]$
ケース4	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2-\pi/2+\omega\tau)} \sum_{k=1}^{N/2} b_k \sin[\omega(k-1/2)T_s]$

位相特性 : 周波数の一次関数
 時間分解能 τ : 任意に小さい値

線形位相フィルタの使用条件

- 元のフィルタ特性が線形位相であること
- 元のフィルタ特性が帯域制限されていること
- フィルタで取り扱う信号周波数範囲がナイキスト周波数以下であること

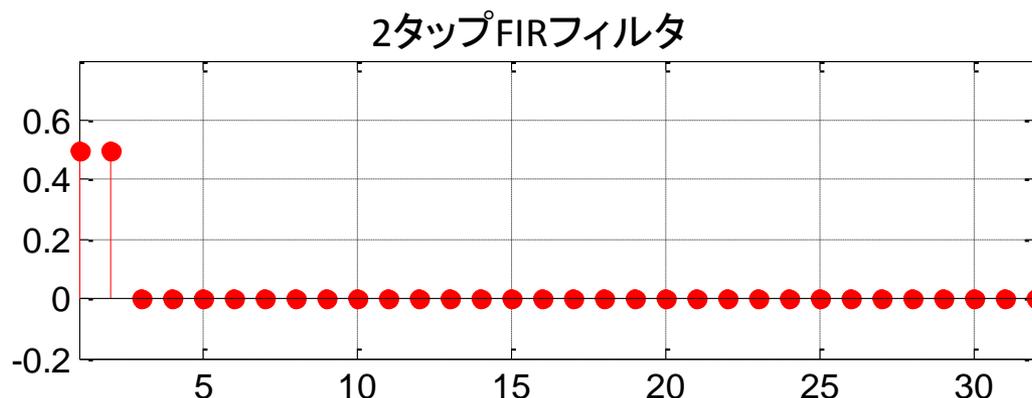


理想フィルタによる微小遅延の制御が可能

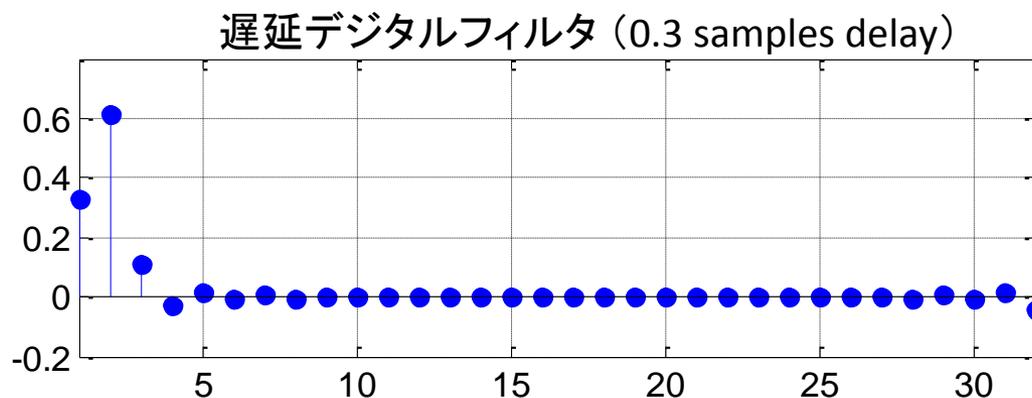
発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- **MATLABによるシミュレーション結果と考察**
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

2タップフィルタ・インパルス応答の比較

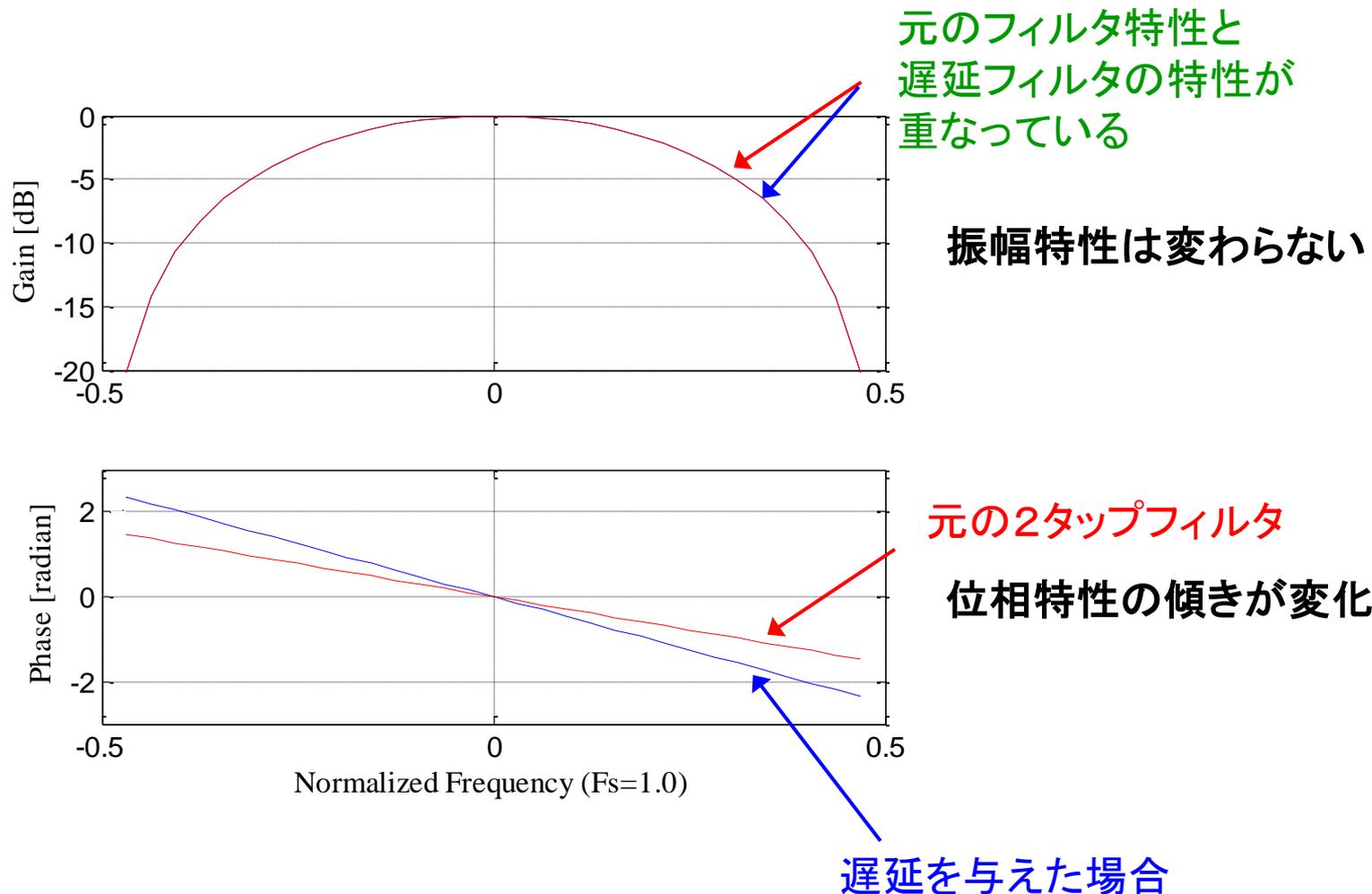


2タップ FIR 係数

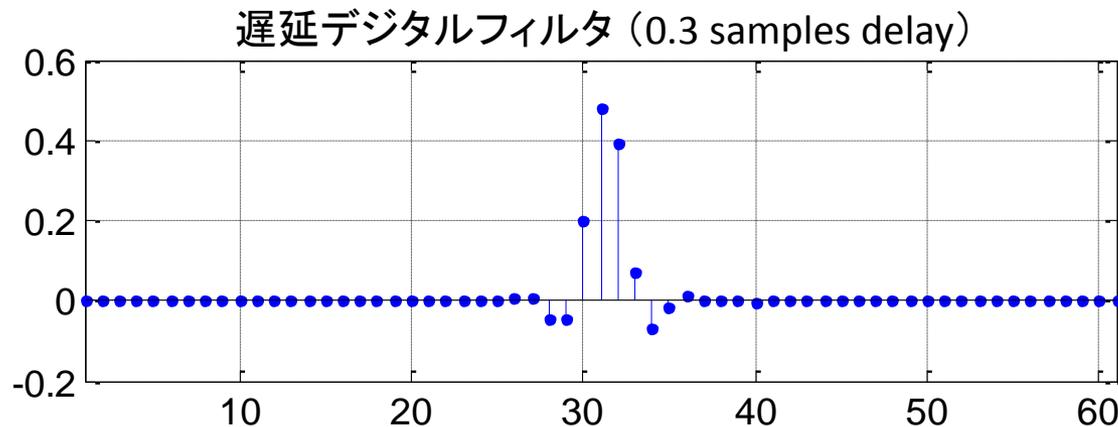
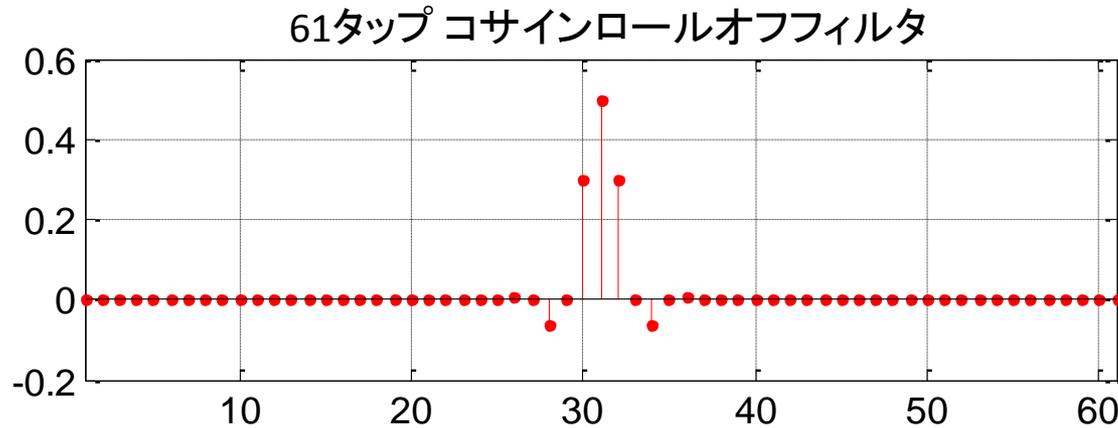


インパルス応答が変化

2タップフィルタ・周波数特性の比較



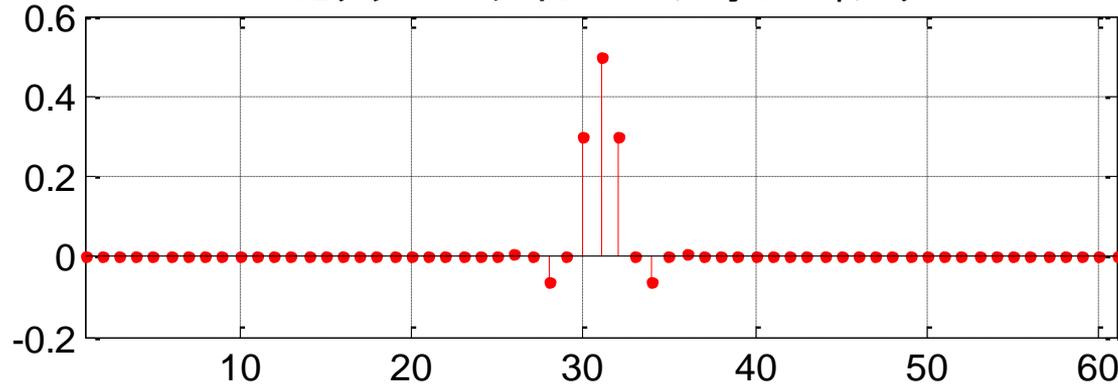
NタップFIRフィルタへの打ち切り



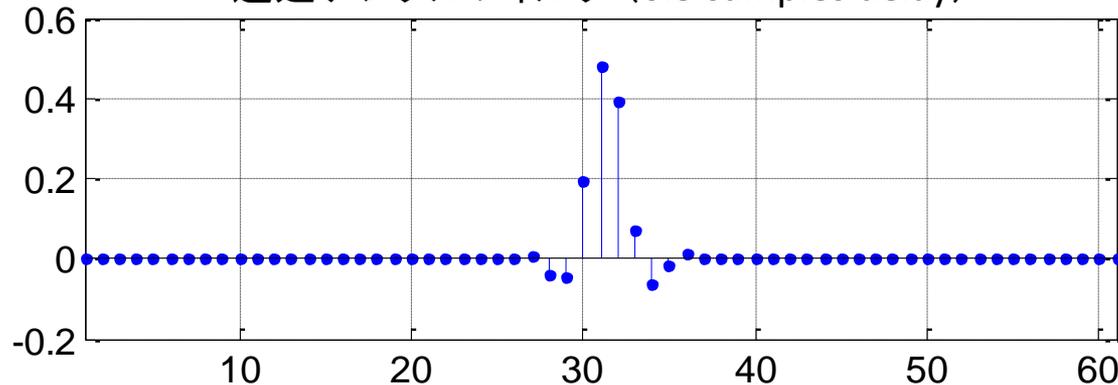
方形窓

Hann窓を掛けた場合

61タップ コサインロールオフフィルタ

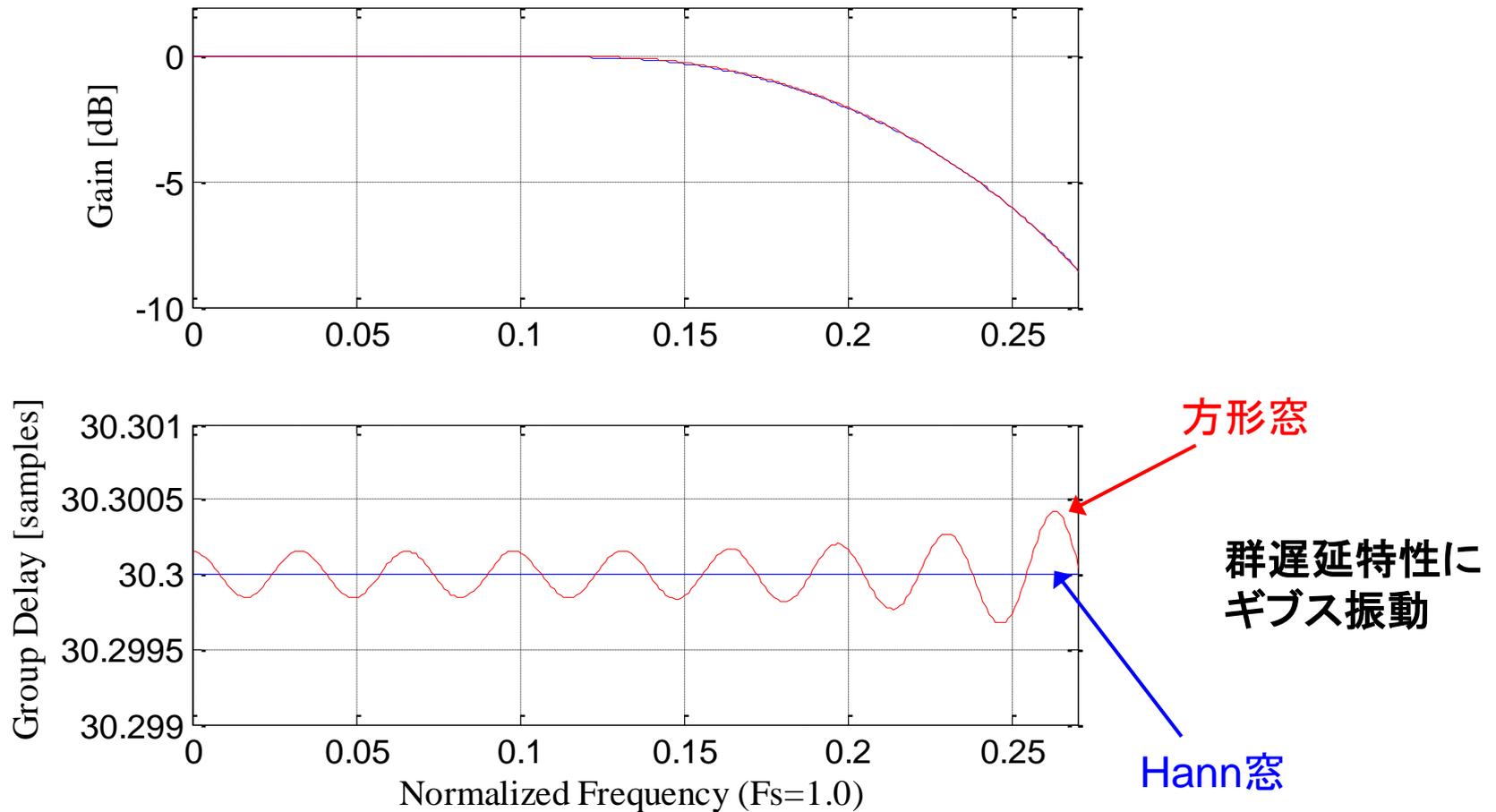


遅延デジタルフィルタ (0.3 samples delay)



Hann窓

窓関数の効果

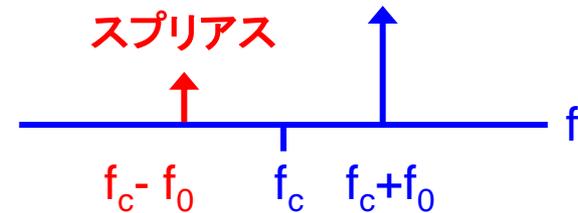
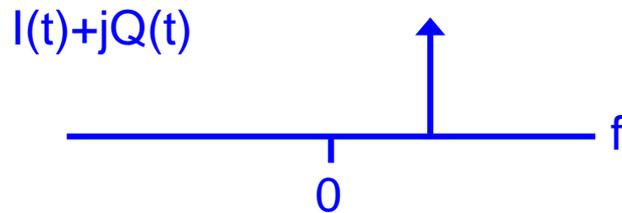
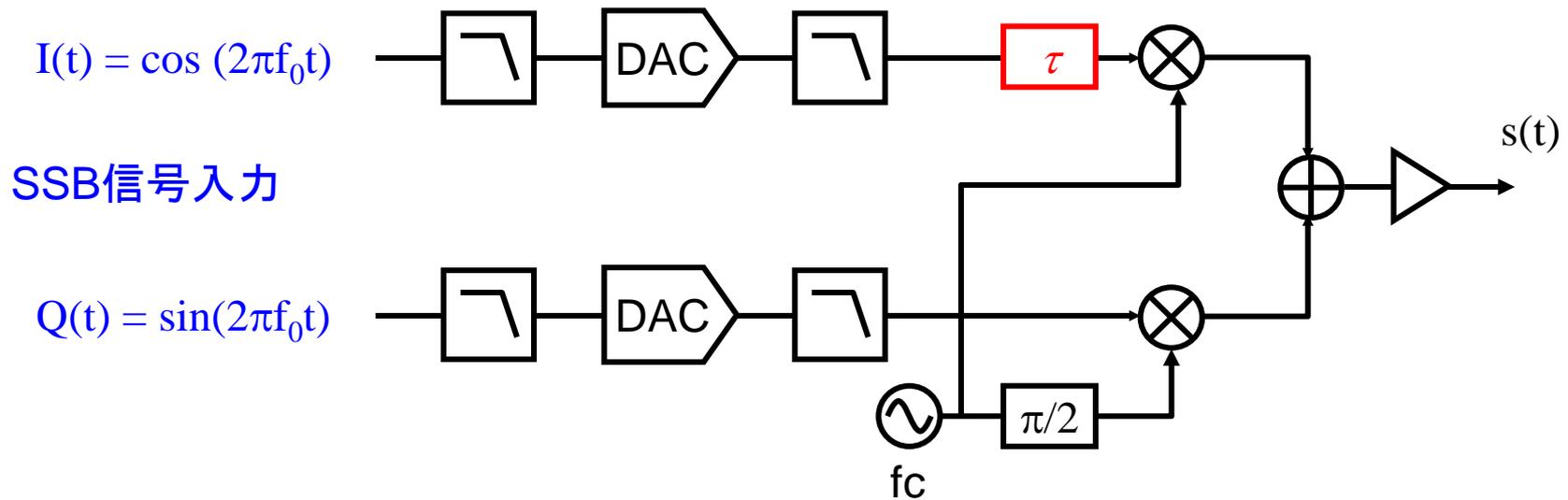


61タップで打ち切った場合の周波数特性

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

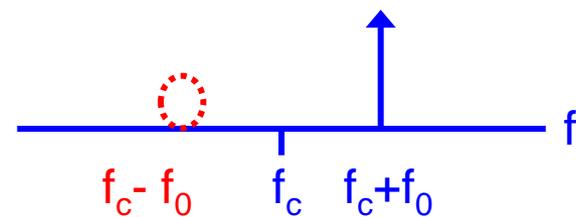
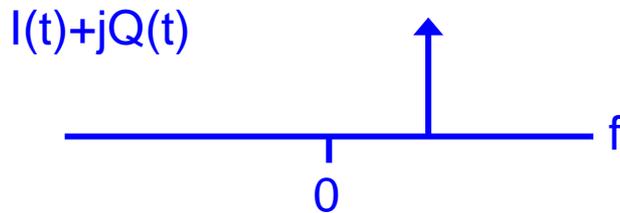
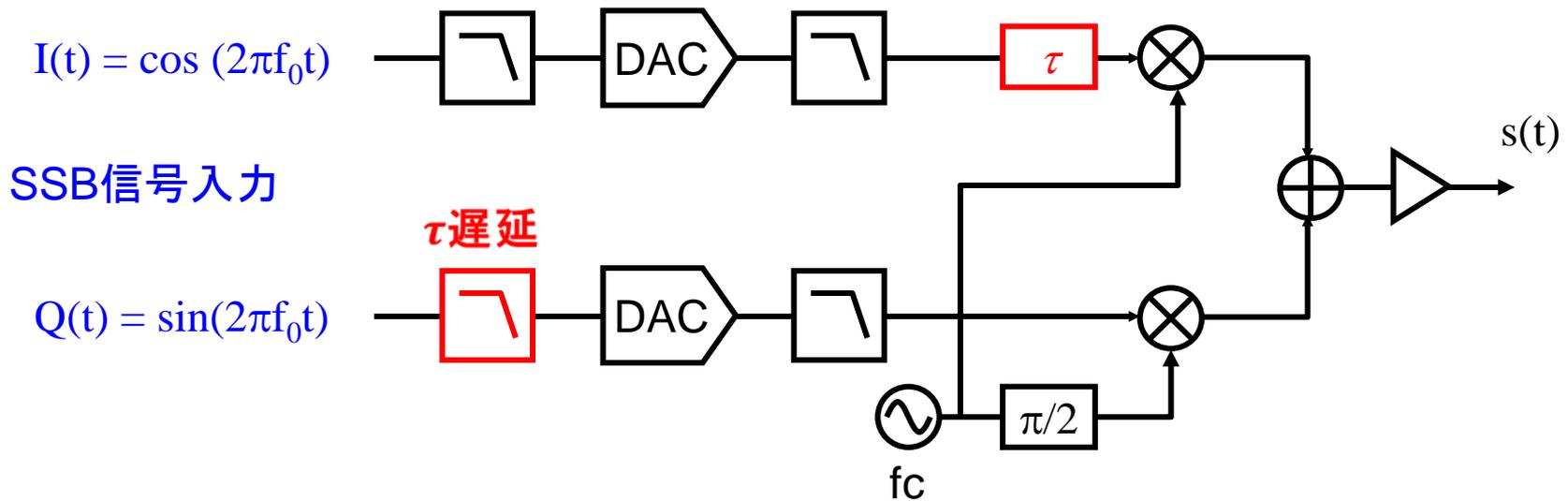
直交変調器への応用



SSB : single side band (シングルサイドバンド)

DAC : digital-to-analog converter (デジタル-アナログ変換)

直交変調器のI/Qスキュー補正

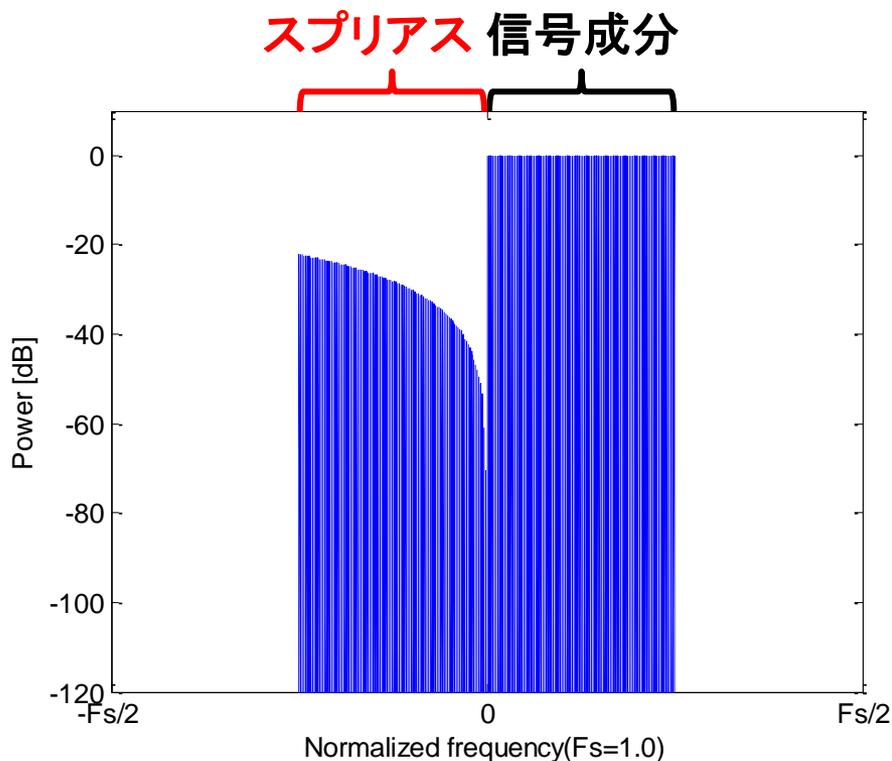


SSB : single side band (シングルサイドバンド)

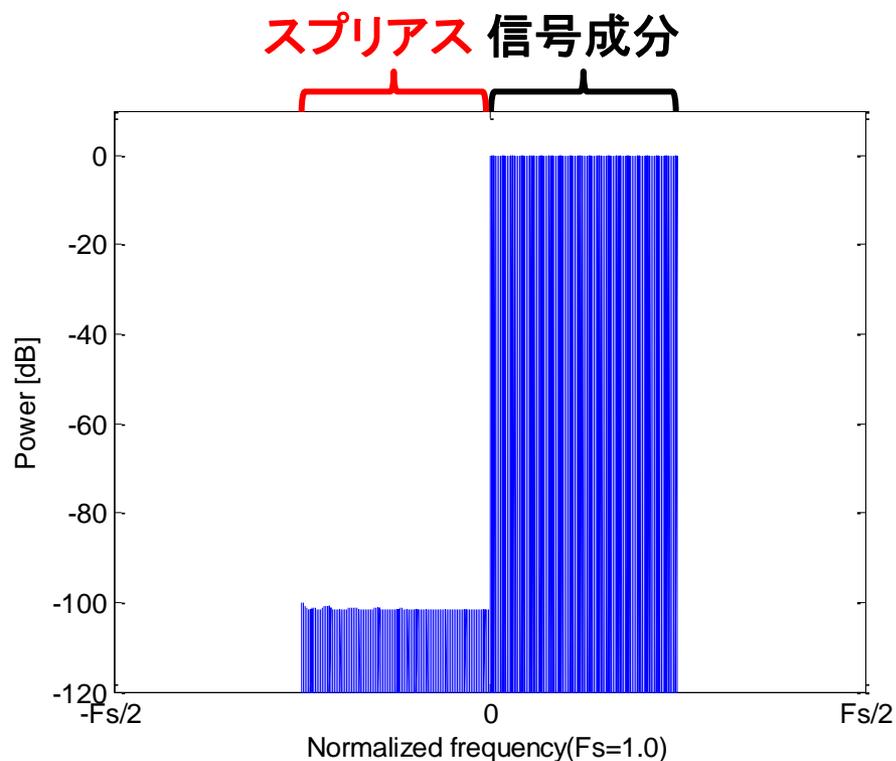
DAC : digital-to-analog converter (デジタル-アナログ変換)

SSB信号によるシミュレーション結果

(a) 補正なし



(b) 遅延フィルタにより補正



加えた遅延量	0.1 samples
フィルタタップ数	61 taps
窓関数	Hann窓
FFTサイズ	1024 points

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- **Fractional Delay Digital Filterとの比較**
- まとめ・今後の課題

Fractional Delay Digital Filter

V. Välimäki, T. I. Laakso両氏らが提案したデジタルフィルタ
Lagrange補間を用いた設計手法

Lagrange補間式
$$h_{D,N}(n) = \prod_{k=0, k \neq n}^N \frac{D-k}{n-k}$$

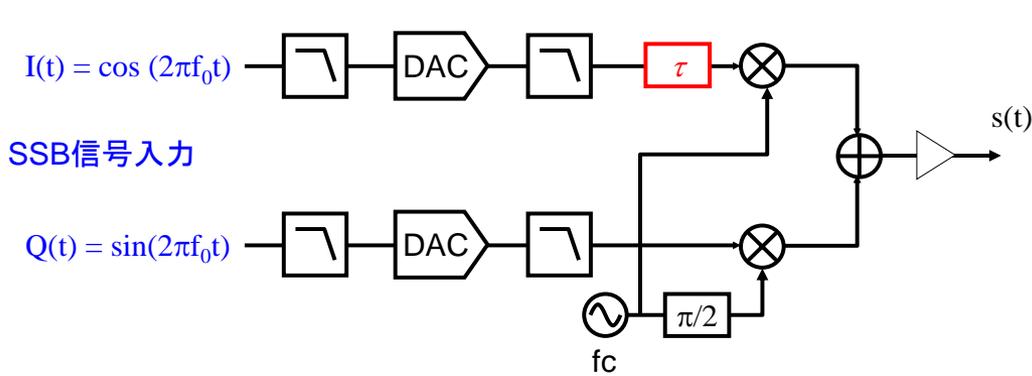
遅延量の決定
$$D = \frac{N-1}{2} + x$$

N : フィルタの次数
 x : Fractional part

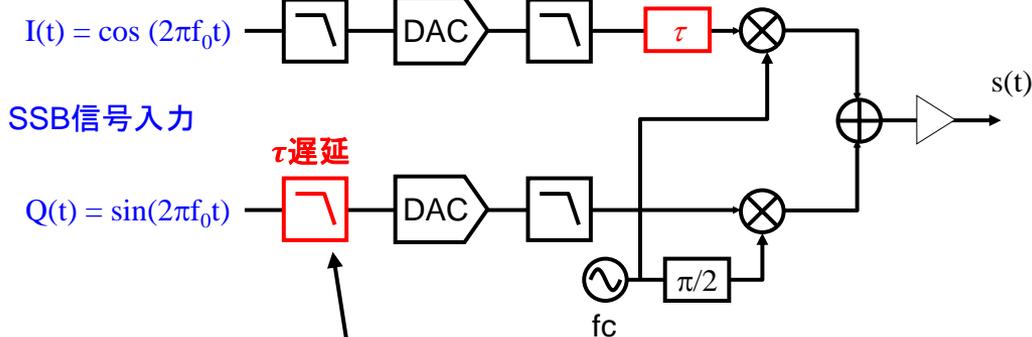
参考文献

- [5] V. Viilimiilci, M. Karjalainen, T. I. Laakso, “Fractional Delay Digital Filters”
IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp.355–358 (May 1993).
- [7] V. Väimäki, T. I. Laakso, “Fractional Delay Filters – Design and Applications”
Chapter 20, pp.835–885, edited by F. Marvasti, Nonuniform Sampling – Theory and Practice
Kluwer Academic/Plenum Publishers (2001).

SSB信号での補正効果の比較

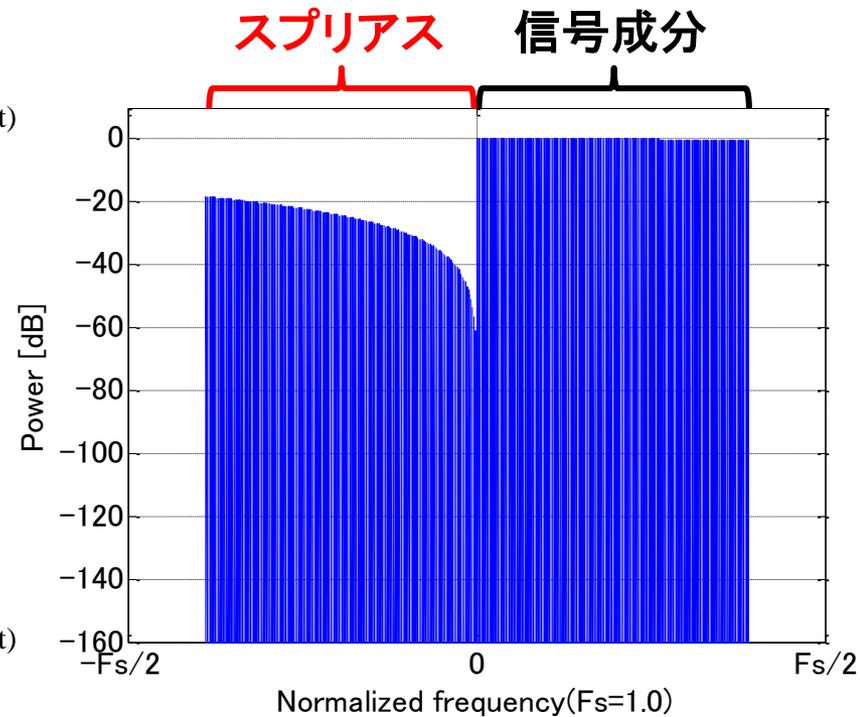


補正



(a) Fractional Delay Digital Filter

(b) 提案遅延デジタルフィルタ



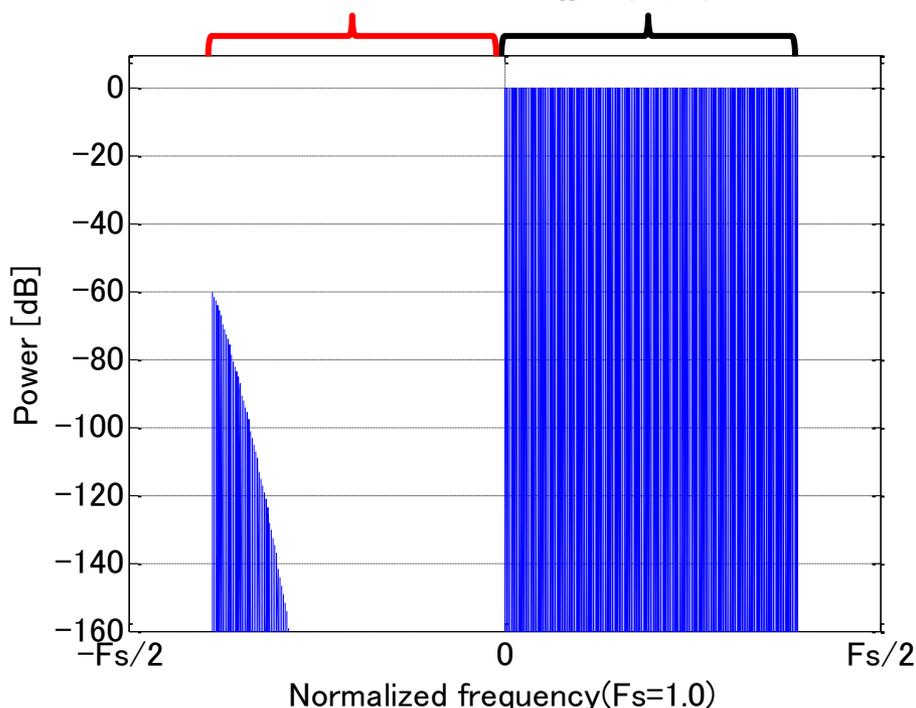
補正前

加えた遅延量	0.1 samples
FFTサイズ	1024 points

Fractional Delay Digital Filterと 遅延デジタルフィルタの補正効果

(a) Fractional Delay Digital Filterにより補正

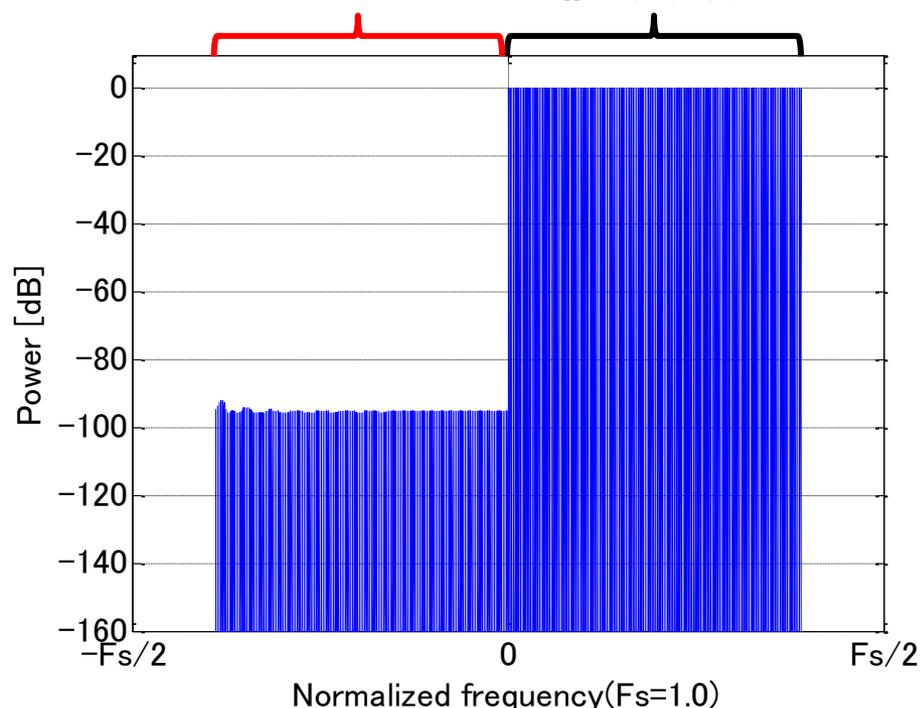
スプリアス 信号成分



加えた遅延量	0.1 samples
フィルタタップ数	61 taps
FFTサイズ	1024 points

(b) 提案遅延デジタルフィルタにより補正

スプリアス 信号成分



加えた遅延量	0.1 samples
フィルタタップ数	61 taps
窓関数	Blackman窓
FFTサイズ	1024 points

提案遅延デジタルフィルタの利点

- 微小遅延を補正することができる
- 簡単に任意フィルタを遅延させることができる
- Fractional Delay Digital Filterより通過域が広い
- ローパスフィルタだけでなく、バンドパスやハイパスフィルタにも適用可能

発表内容

- 研究背景・目的
- 従来の線形位相FIRフィルタの条件
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
 - 理想フィルタの時間シフトとインパルス応答
 - 新条件の線形位相IIRフィルタの構成
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
- 回路システムへの応用例
- Fractional Delay Digital Filterとの比較
- まとめ・今後の課題

まとめ・今後の課題

まとめ

- 微小遅延制御可能な線形位相デジタルフィルタの提案
 - 任意特性に適用可能
- MATLABで有効性を確認
 - 遅延デジタルフィルタ特性を確認
 - 窓関数による効果を確認

今後の課題

- 遅延デジタルフィルタ実用化の検討
 - 量子化誤差、タップ数による影響の解析
 - 実装構成