

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

*浅見幸司, 宮島広行, 黒澤烈士
立岩武徳, 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
- 理想フィルタのインパルス応答と時間シフト
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
 - 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
 - 窓関数による補正
- 回路システムへの応用例
- まとめ・今後の課題

研究背景・目的

LSIテスト・電子計測器のタイミングスキュー補正の要求

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

従来のフィルタ: 線形位相 ⇒ 微小遅延 ×
提案型フィルタ: 線形位相 ⇒ 微小遅延 ○

デジタルフィルタの線形位相に着目
タイミングスキューを考慮したデジタルフィルタの新条件を提案
- **MATLAB**で有効性を確認

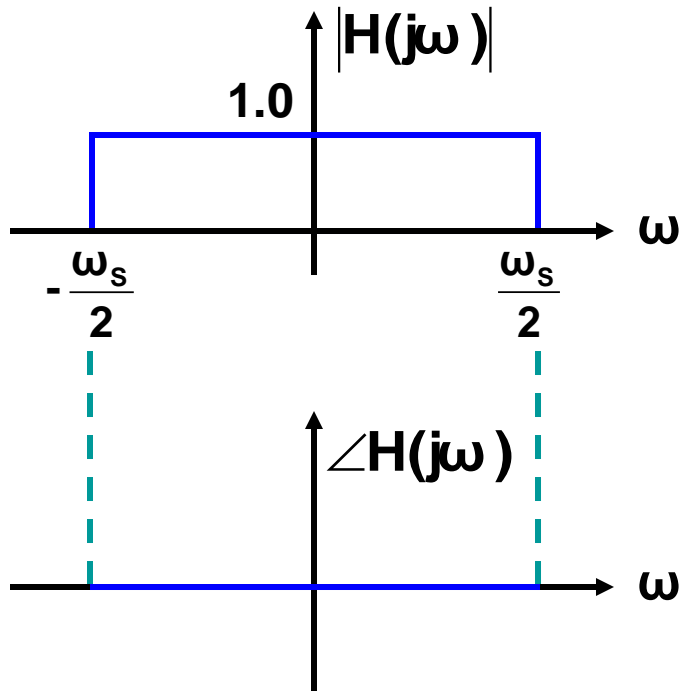
発表内容

- 研究背景・目的
- **理想フィルタのインパルス応答と時間シフト**
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
 - 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
 - 窓関数による補正
- 回路システムへの応用例
- まとめ・今後の課題

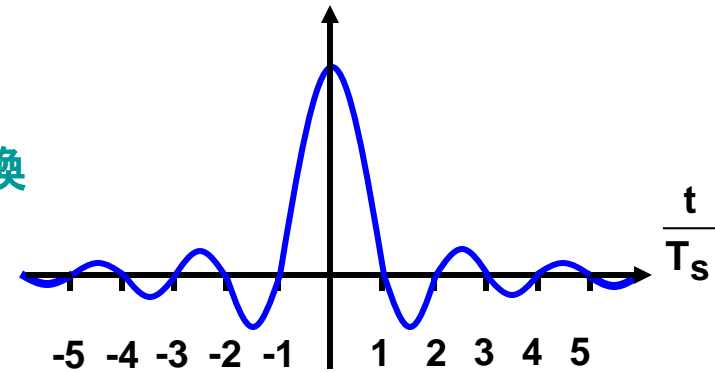
理想フィルタ

周波数応答

インパルス応答



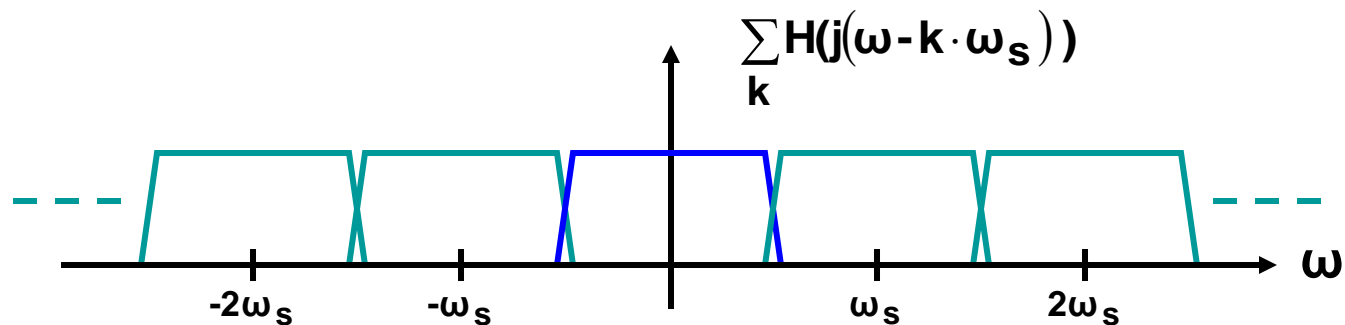
フーリエ変換



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

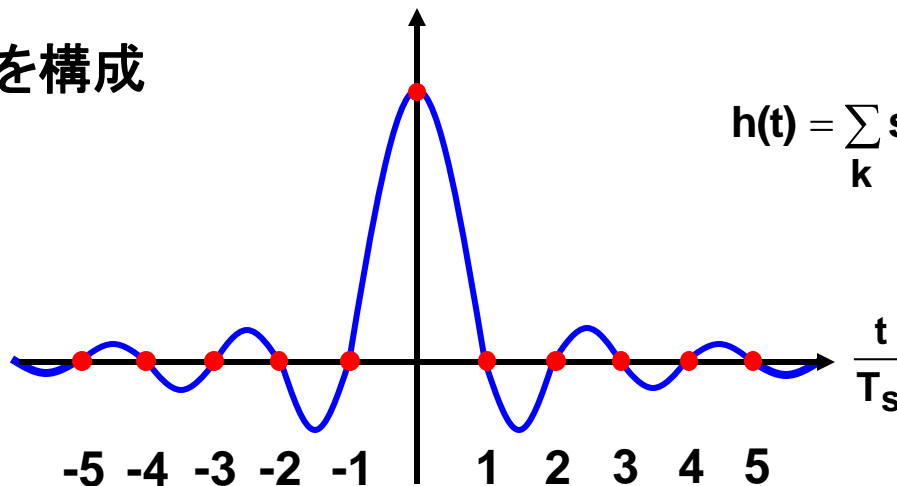
$\omega_s = \frac{1}{T_s}$: サンプル周波数

理想フィルタの離散時間表現



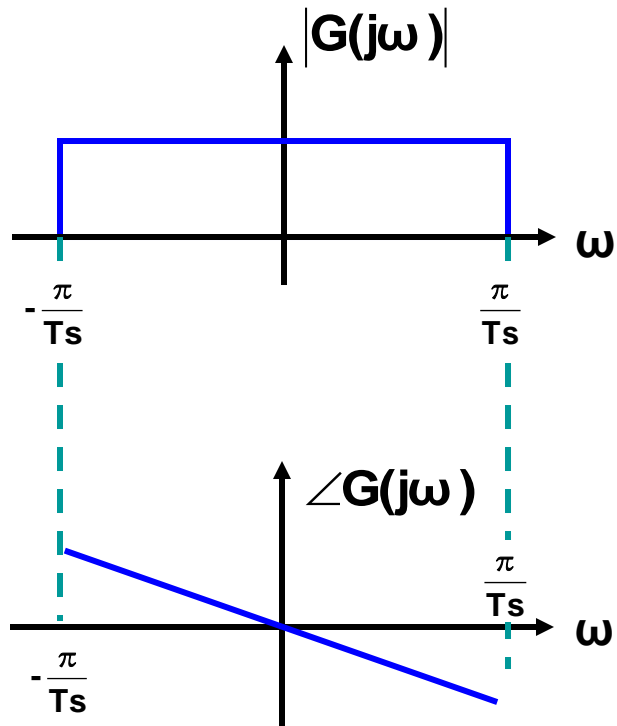
↑ ↓ フーリエ変換

FIRフィルタを構成

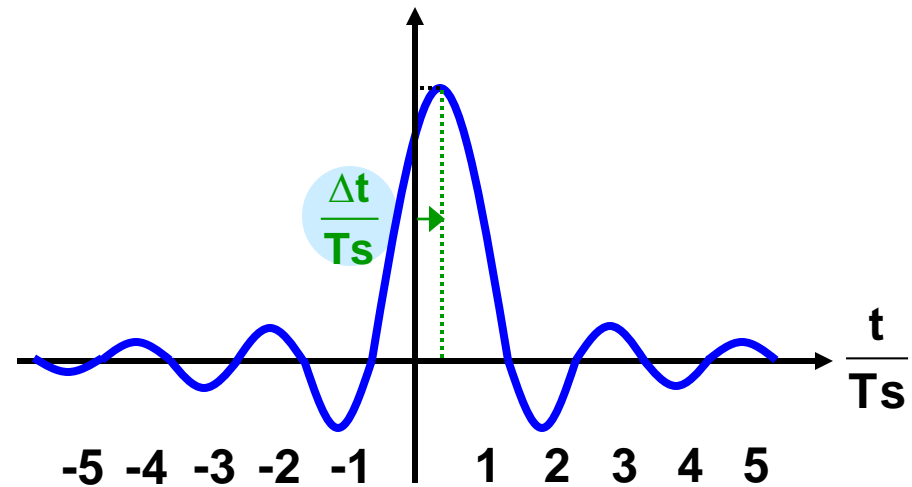


$$h(t) = \sum_k \text{sinc}\left(\pi \frac{k \cdot T_s}{T_s}\right) \delta(t - k \cdot T_s)$$

インパルス応答の時間シフト



$$\angle G(j\omega) = -\omega \Delta t$$

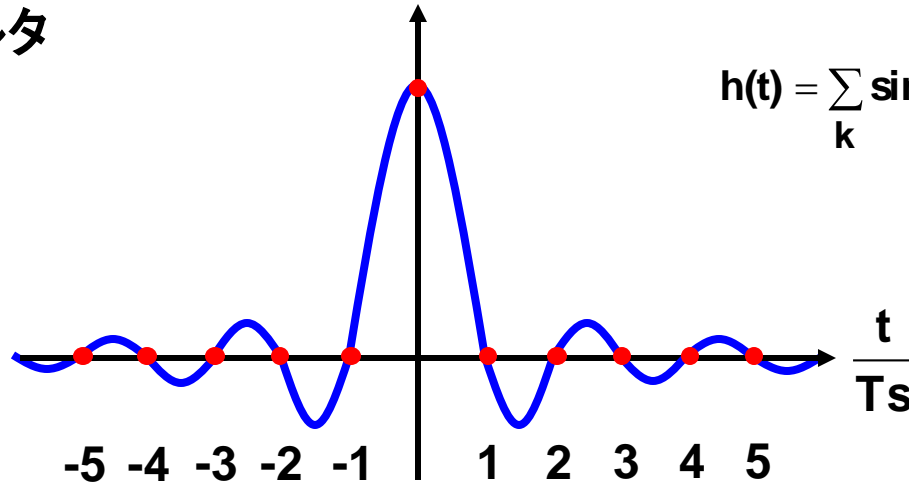


振幅特性は変化しない

インパルス応答が Δt だけシフトする

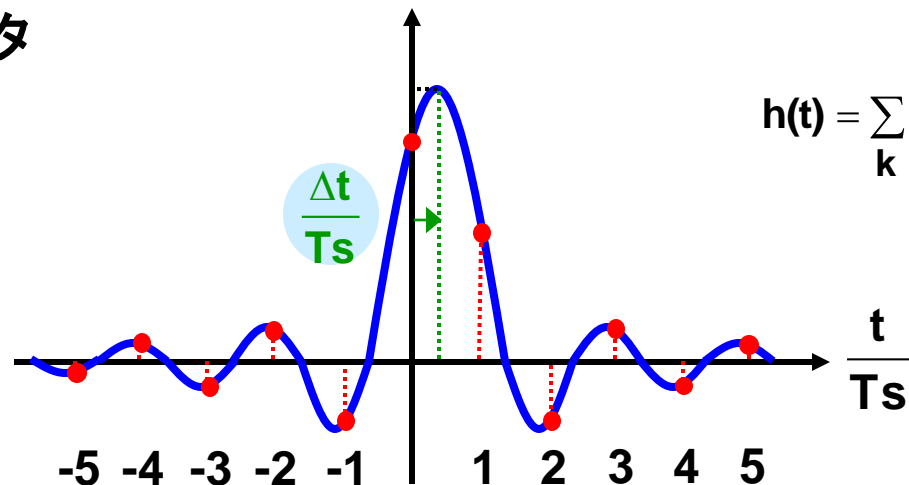
時間シフトによる係数への影響

FIRフィルタ



$$h(t) = \sum_k \text{sinc} \left(\pi \frac{k \cdot T_s}{T_s} \right) \delta(t - k \cdot T_s)$$

IIRフィルタ

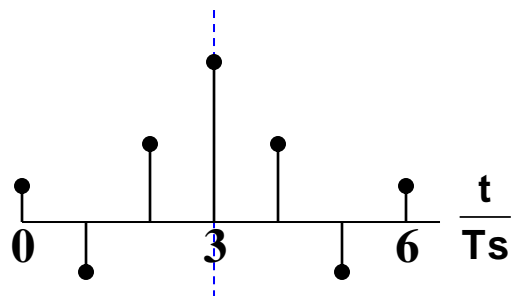


$$h(t) = \sum_k \text{sinc} \left(\pi \frac{k \cdot T_s - \Delta t}{T_s} \right) \delta(t - k \cdot T_s)$$

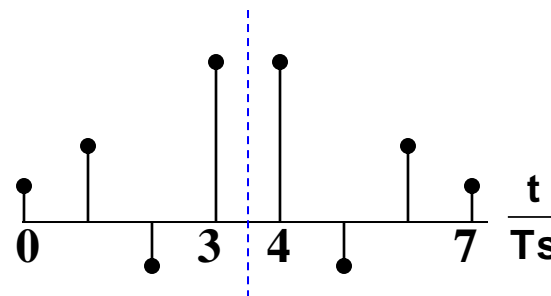
発表内容

- 研究背景・目的
- 理想フィルタのインパルス応答と時間シフト
- **デジタルフィルタの線形位相の新条件**
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
 - 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
 - 窓関数による補正
- 回路システムへの応用例
- まとめ・今後の課題

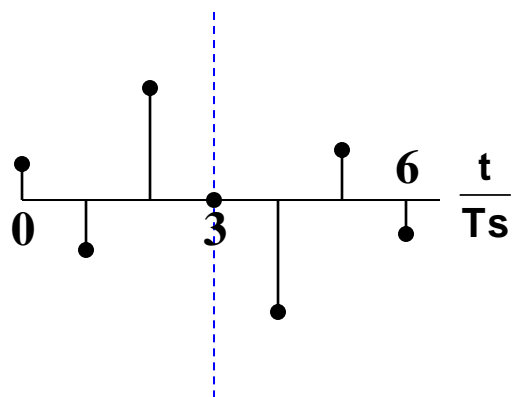
完全線形位相FIRフィルタの4ケース



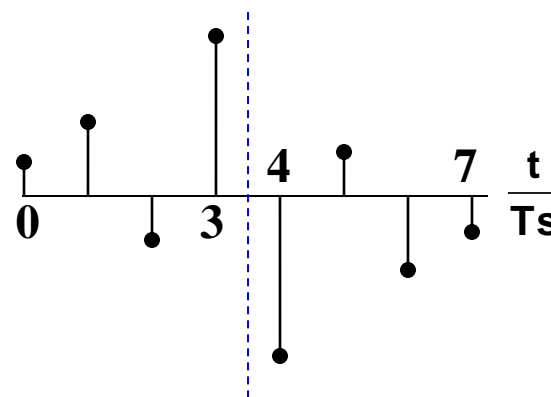
(1) ケース1
奇数タップ・偶対称



(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



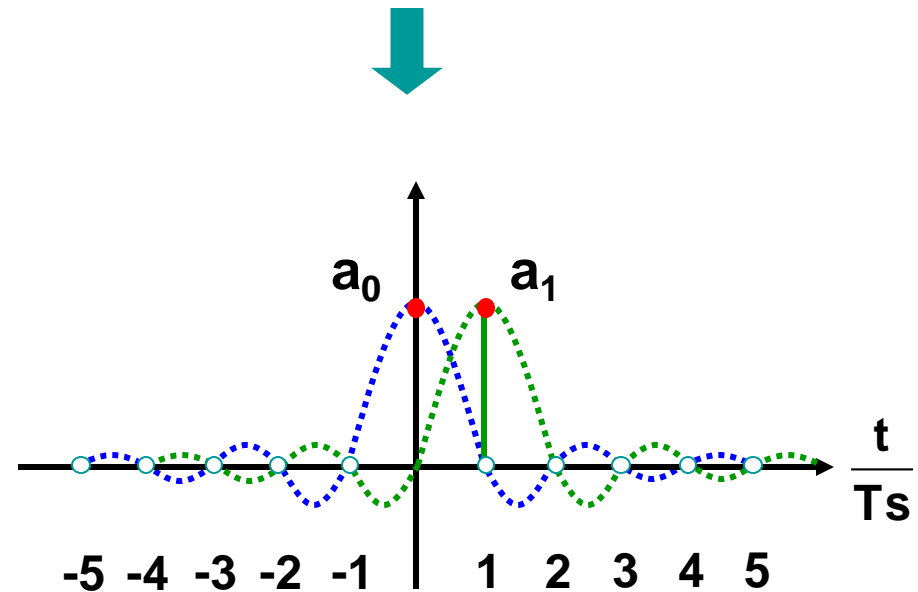
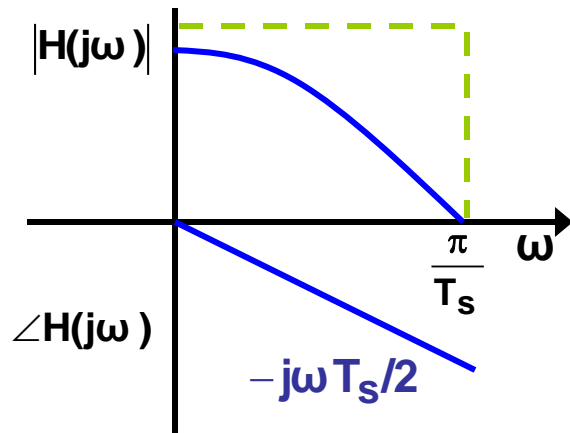
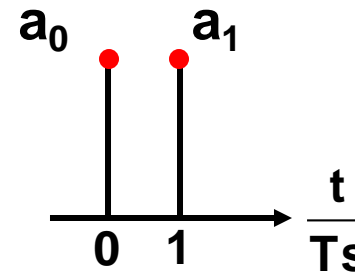
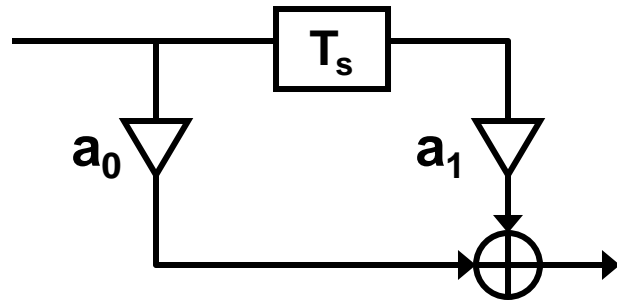
(4) ケース4
偶数タップ・奇対称

4ケースの周波数特性

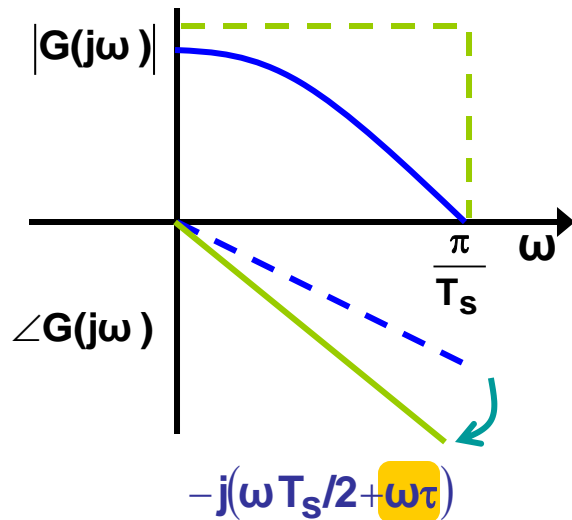
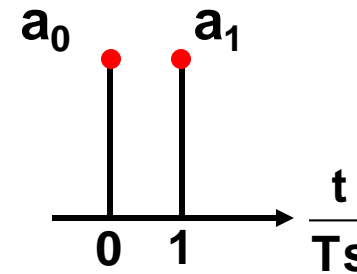
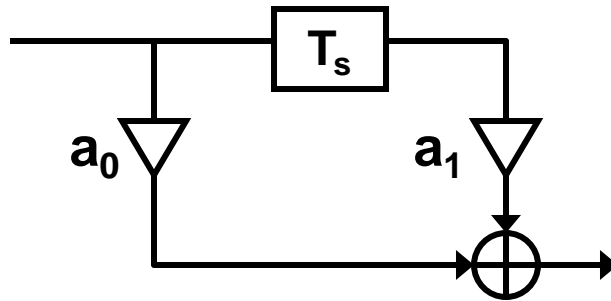
$h(nT)$	$H(e^{j\omega T})$
ケース1	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \cos[\omega k T_s]$
ケース2	$e^{-j\omega(N-1)T_s/2} \sum_{k=1}^{N/2} b_k \cos[\omega(k-1/2)T_s]$
ケース3	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2 - \pi/2)} \sum_{k=0}^{(N-1)/2} a_k \sin[\omega k T_s]$
ケース4	$e^{-j(\omega(N-1)T_s/2 - \pi/2)} \sum_{k=1}^{N/2}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

位相特性 : 周波数の一次関数
 遅延量 : タップ数で決まる

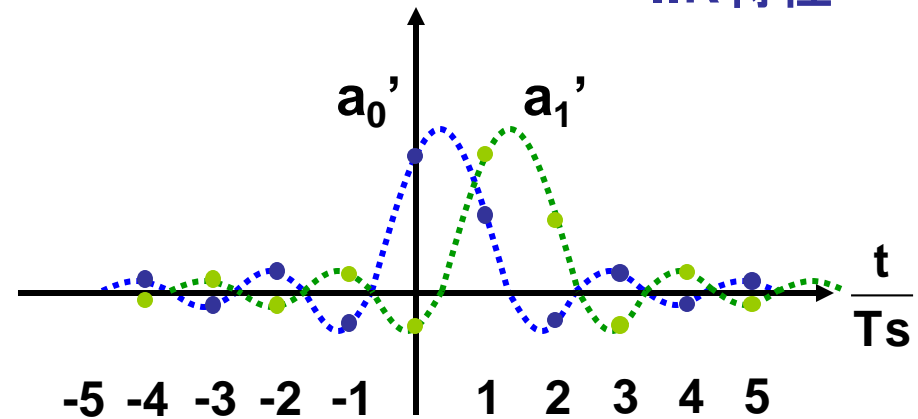
2タップフィルタ・モデル



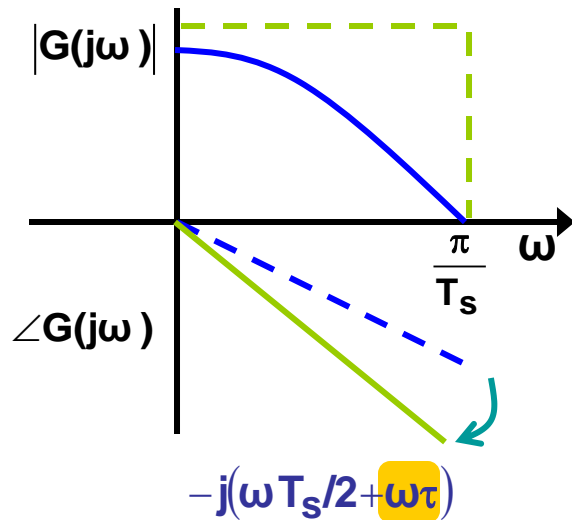
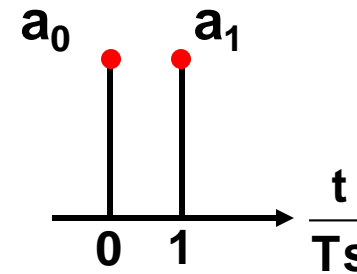
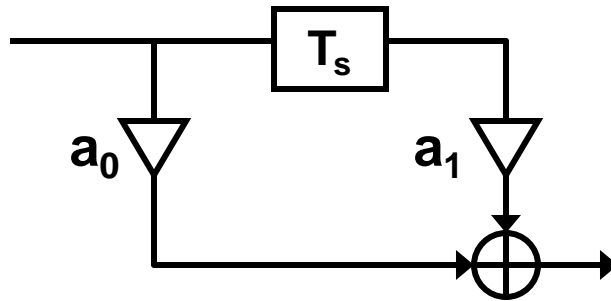
2タップフィルタ・遅延モデル



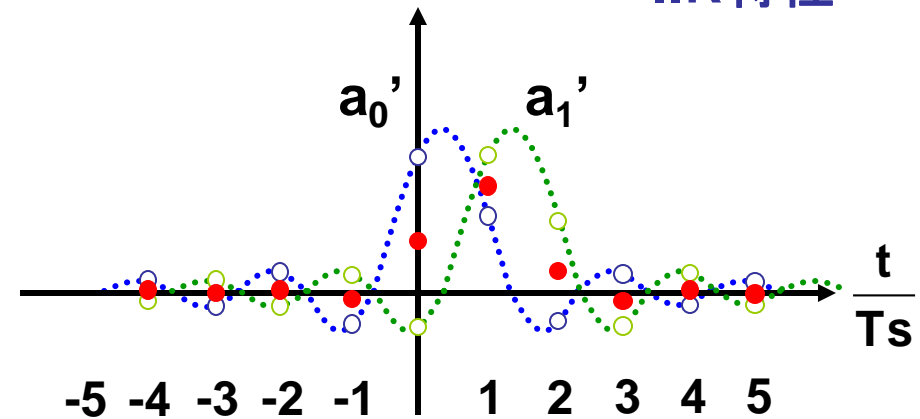
IIR特性



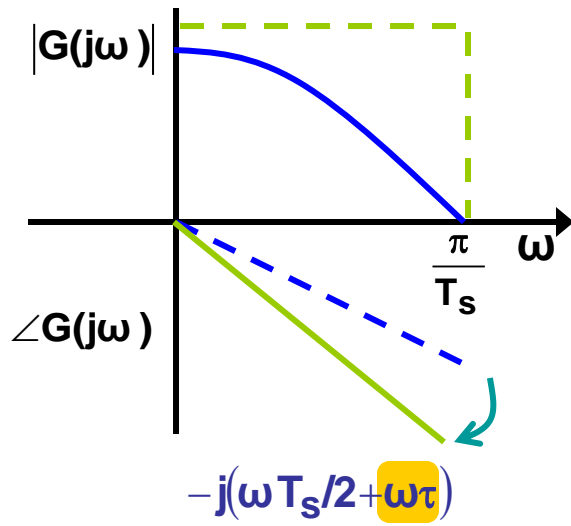
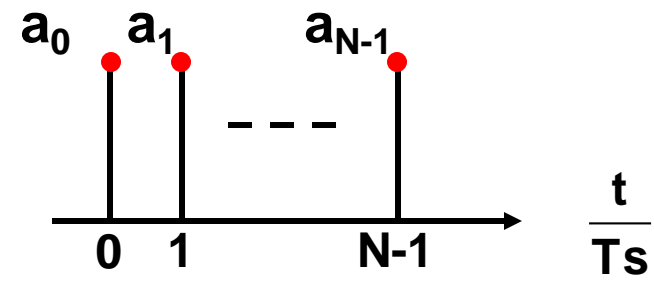
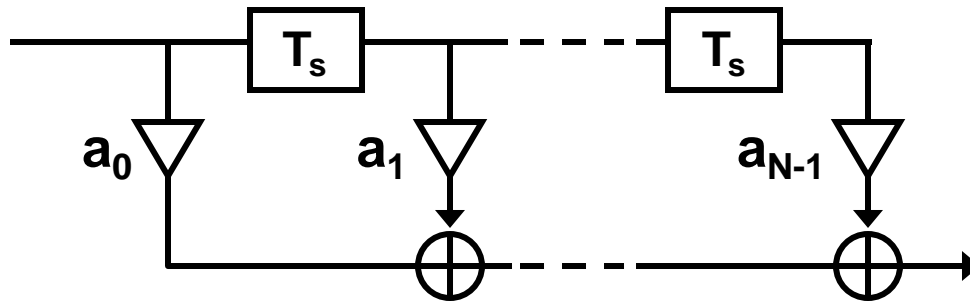
2タップフィルタ・遅延モデル



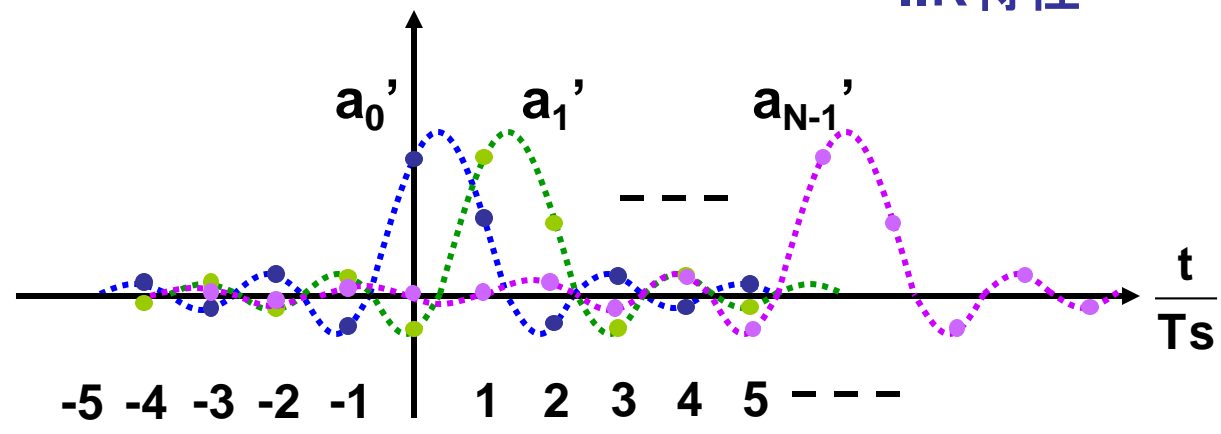
IIR特性



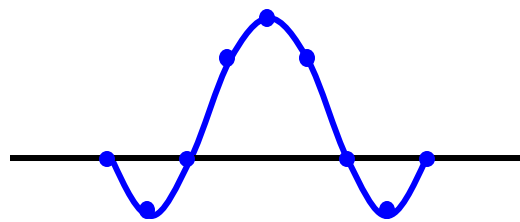
Nタップフィルタ・遅延モデル



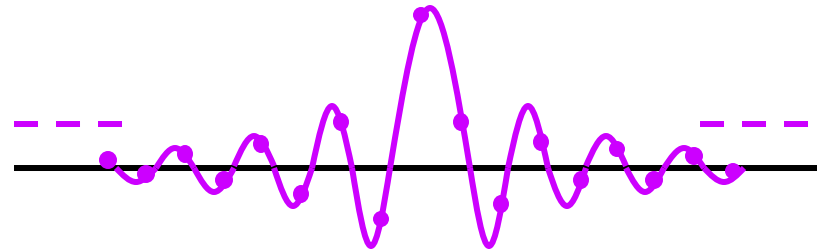
IIR特性



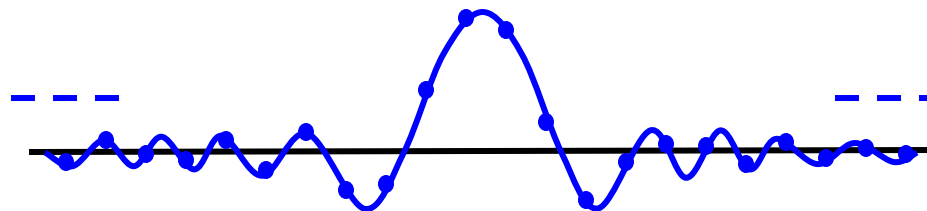
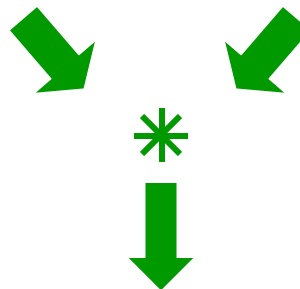
提案の遅延デジタルフィルタ



(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

遅延量 : τ で制御可能

線形位相フィルタの新条件

- 元のフィルタ特性が完全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
- フィルタで取り扱える信号周波数範囲がナイキスト周波数の範囲であること



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
- 理想フィルタのインパルス応答と時間シフト
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
- **MATLABによるシミュレーション結果と考察**
 - 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
 - 窓関数による補正
- 回路システムへの応用例
- まとめ・今後の課題

MATLABによるシミュレーション

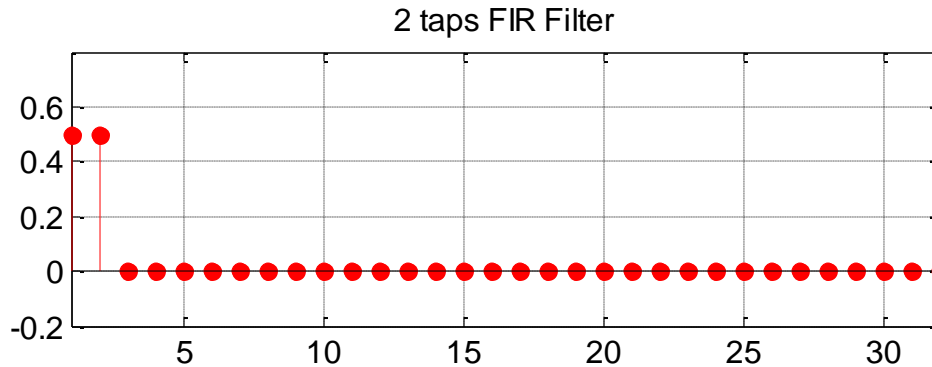
- タイミングスキューなし
⇒ **FIR**フィルタ
- タイミングスキューを考慮
⇒ **IIR**フィルタ
- 窓関数による補正
⇒ 有限項で打ち切る
⇒ **FIR**フィルタ

周波数特性を確認

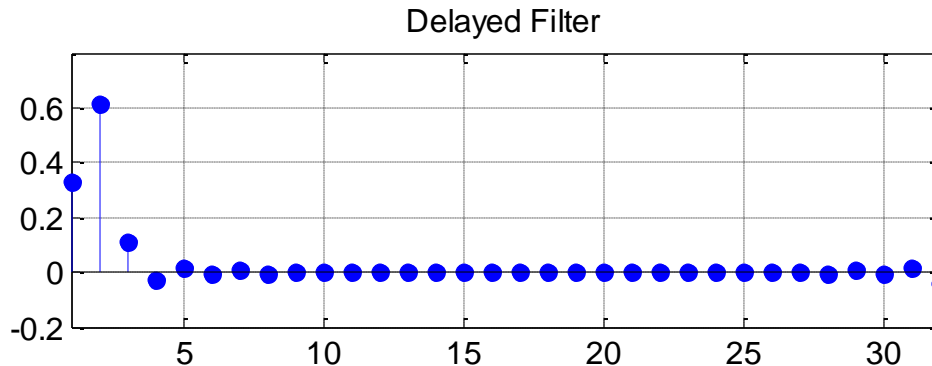
タイミングスキューが加わっても

- ・ 振幅特性が**変わらない**
- ・ 位相特性が**線形位相を保持**

2タップフィルタ・インパルス応答の比較

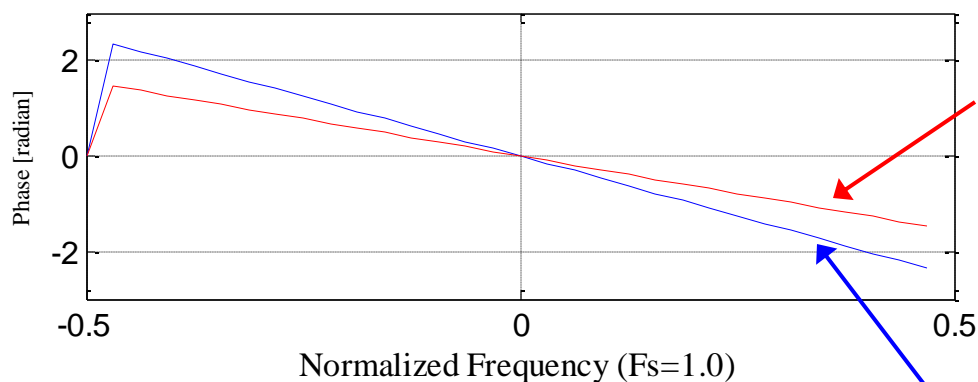
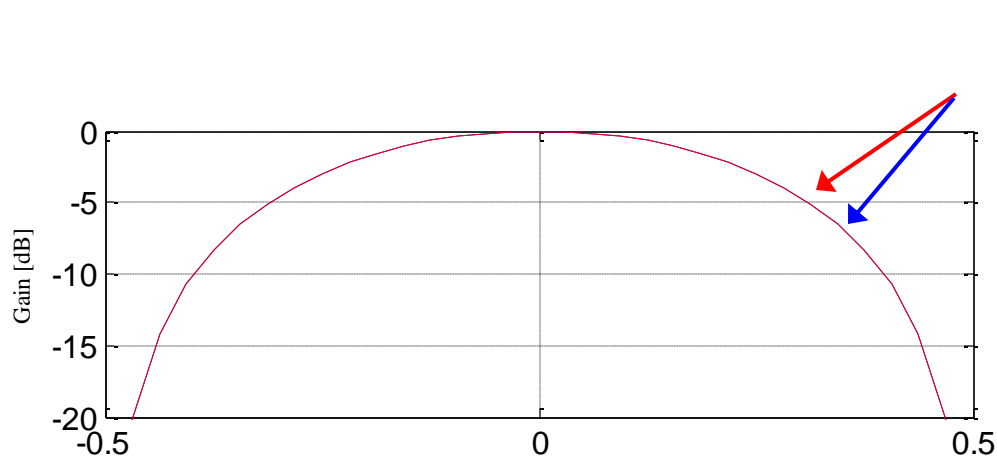


2タップ FIR 係数

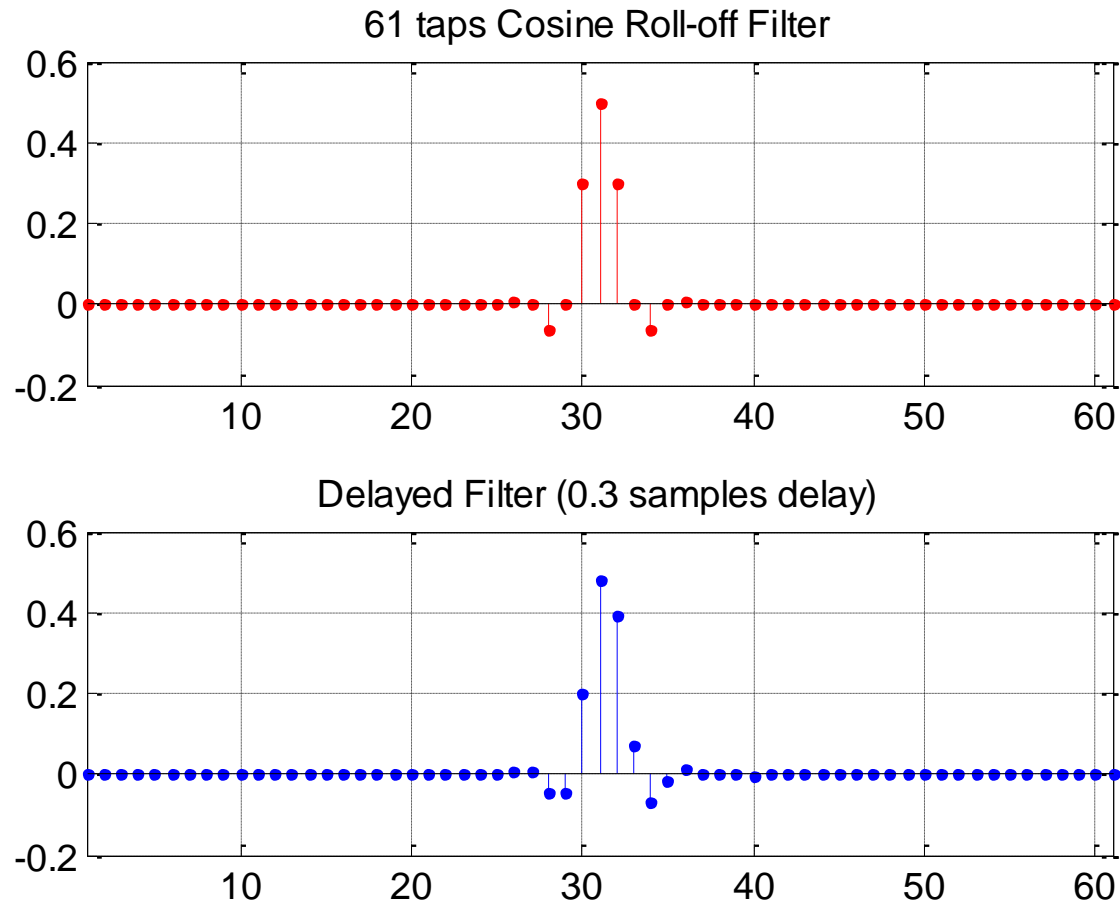


インパルス応答が変化

周波数特性の比較

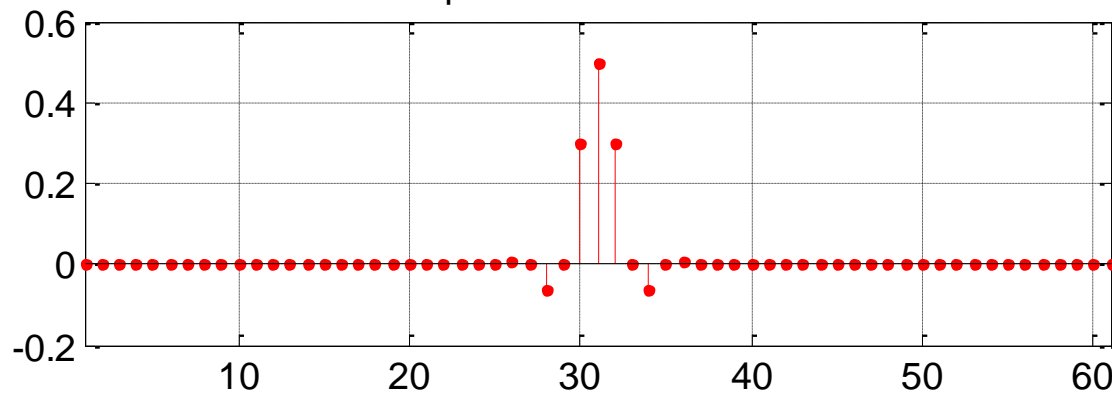


NタップFIRフィルタへの打ち切り

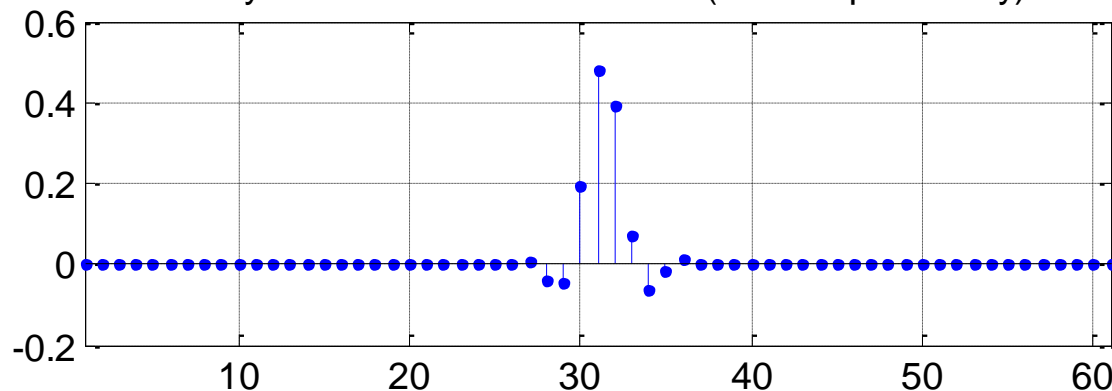


Hann窓を掛けた場合

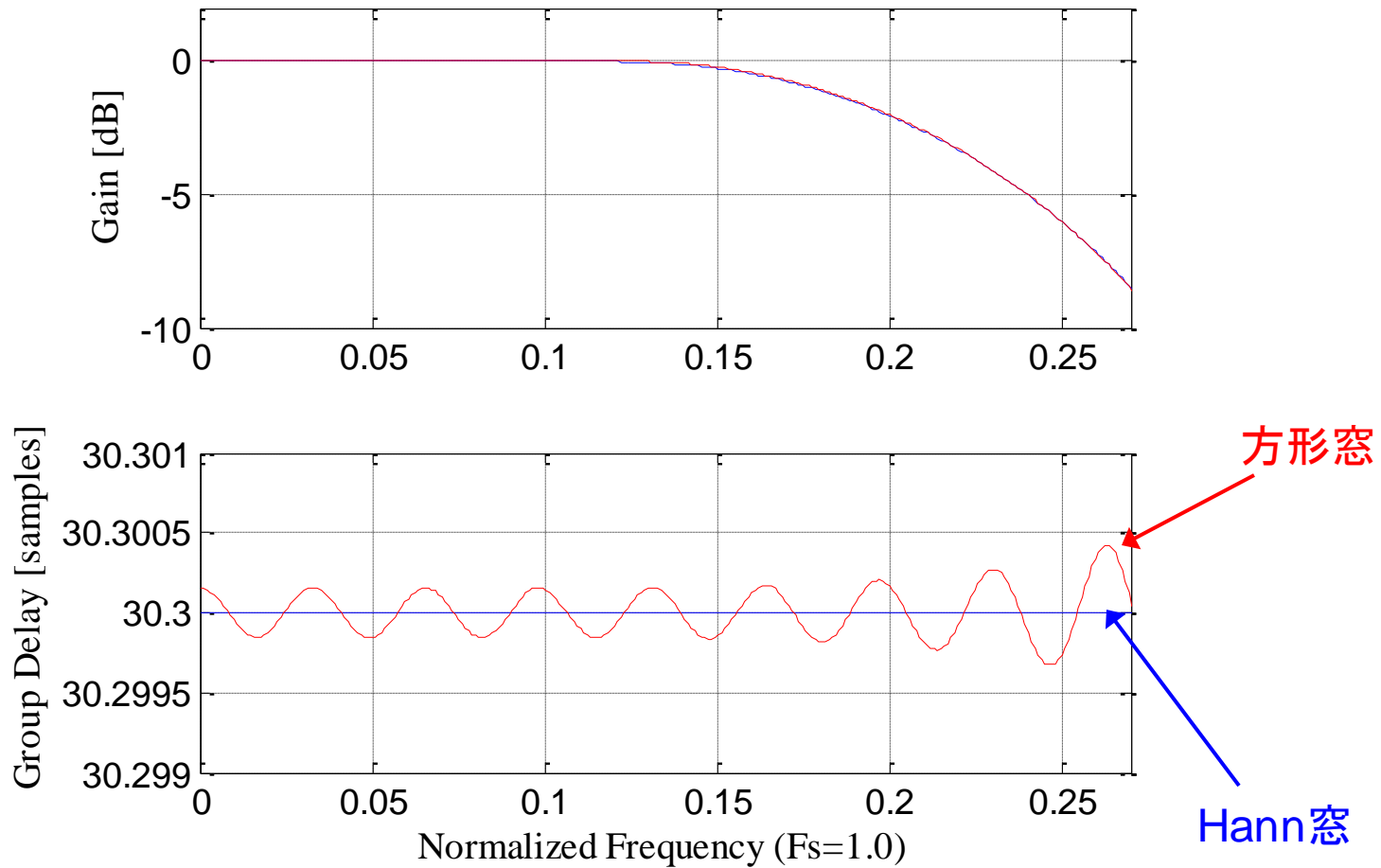
61 taps Cosine Roll-off Filter



Delayed Filter with Hann window (0.3 samples delay)



窓関数の効果



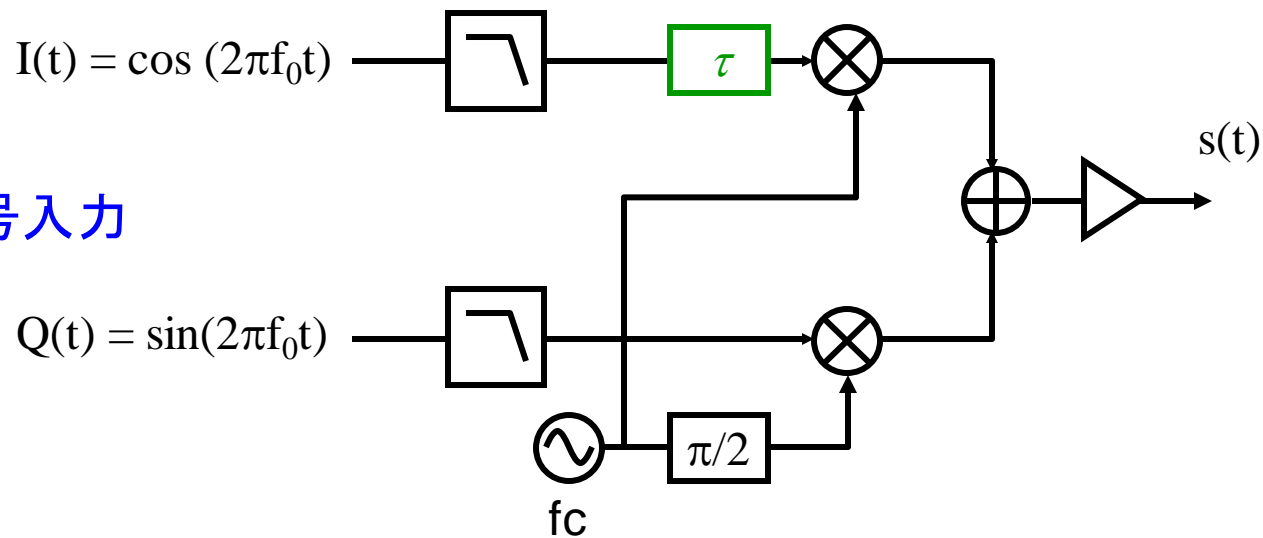
61タップで打ち切った場合の周波数特性

発表内容

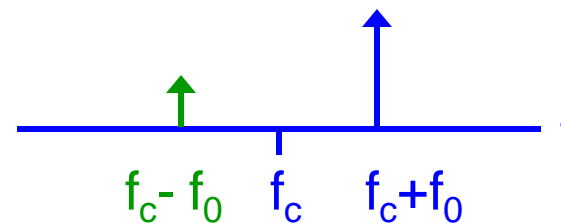
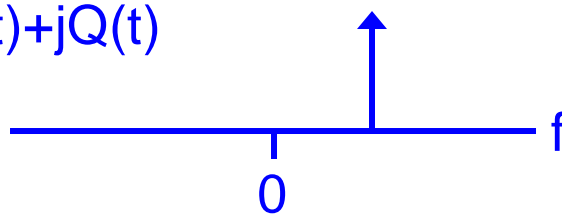
- 研究背景・目的
- 理想フィルタのインパルス応答と時間シフト
- デジタルフィルタの線形位相の新条件
- MATLABによるシミュレーション結果と考察
 - 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
 - 窓関数による補正
- **回路システムへの応用例**
- まとめ・今後の課題

回路システムへの応用例

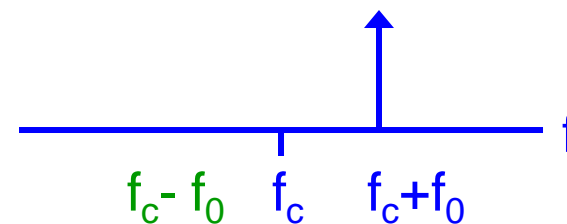
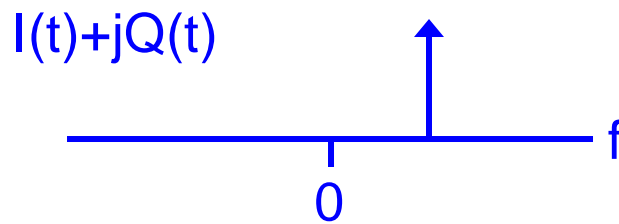
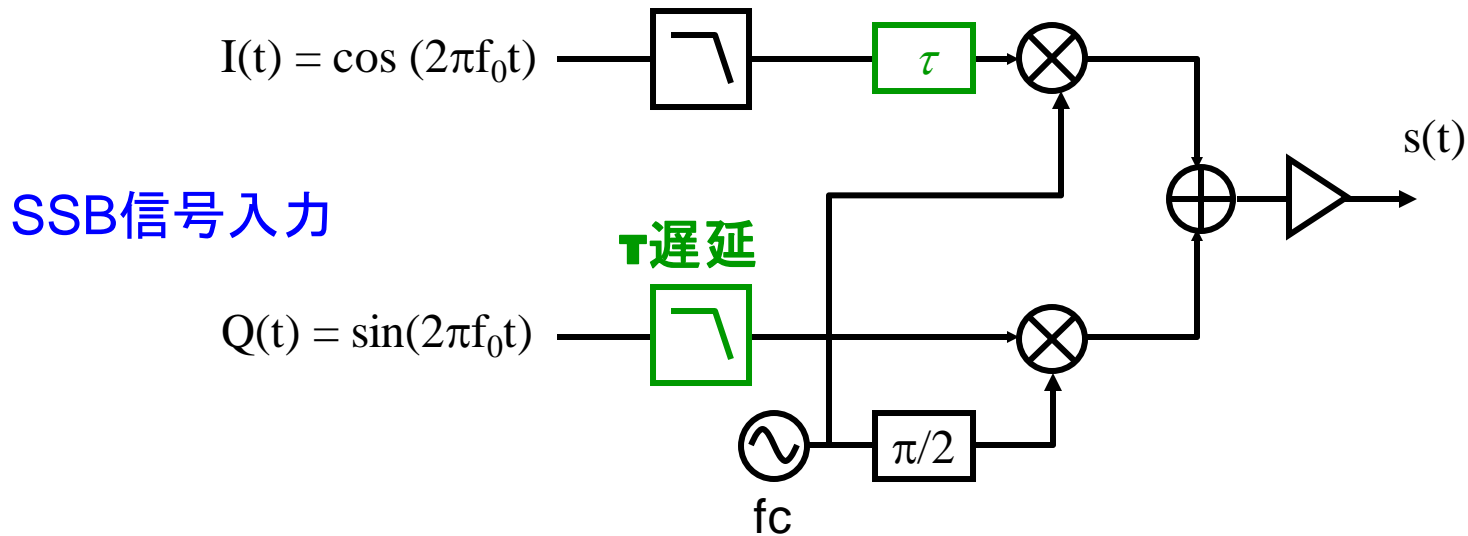
SSB信号入力



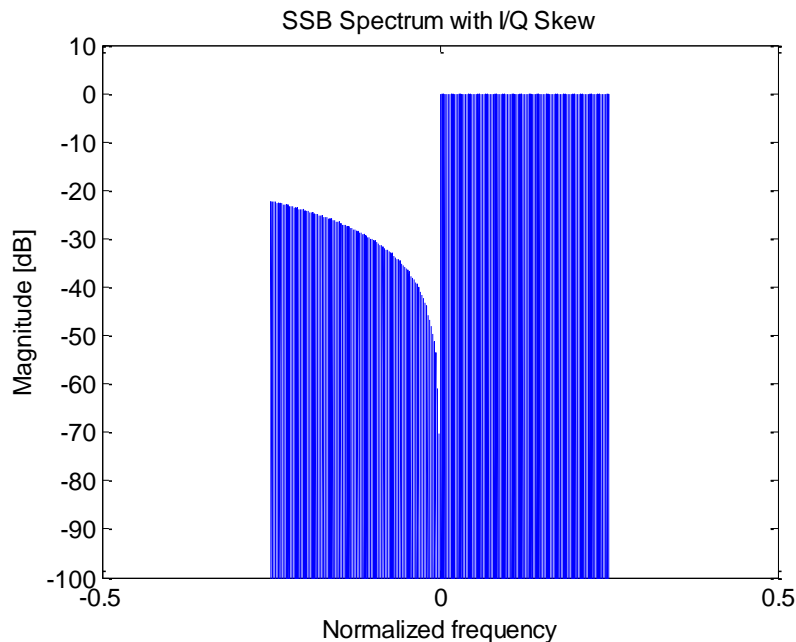
$I(t) + jQ(t)$



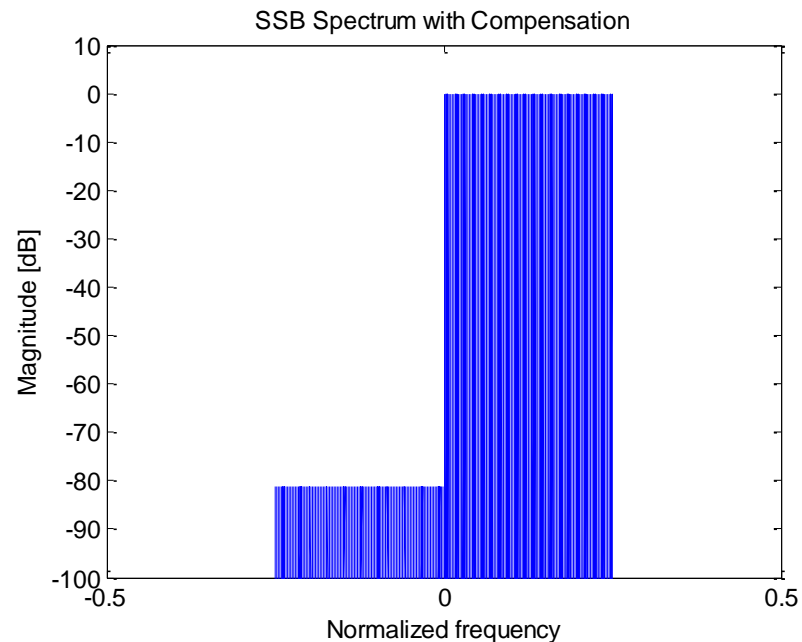
回路システムへの応用例



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

まとめ・今後の課題

まとめ

デジタルフィルタの線形位相に着目

- デジタルフィルタの線形位相の新条件を提案
- **MATLAB**で有効性を確認
- ・ 線形位相の新条件を考慮したデジタルフィルタ
- ・ 窓関数による効果

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