

RFサンプリング用 連続時間バンドパス $\Delta \Sigma$ AD変調器の検討

2007年6月19日(火)

第12回 電子情報通信学会 シリコンアナログRF研究会

群馬大学

シャープ株式会社

元澤篤史 清水一也 上森将文 ロレパスカル

高橋洋介 林海軍 飯塚邦彦 田邊朋之

小林春夫 傘昊 高井伸和

Outline

- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ループ遅延の補償
- まとめ

Outline



- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ループ遅延の補償
- まとめ

研究背景

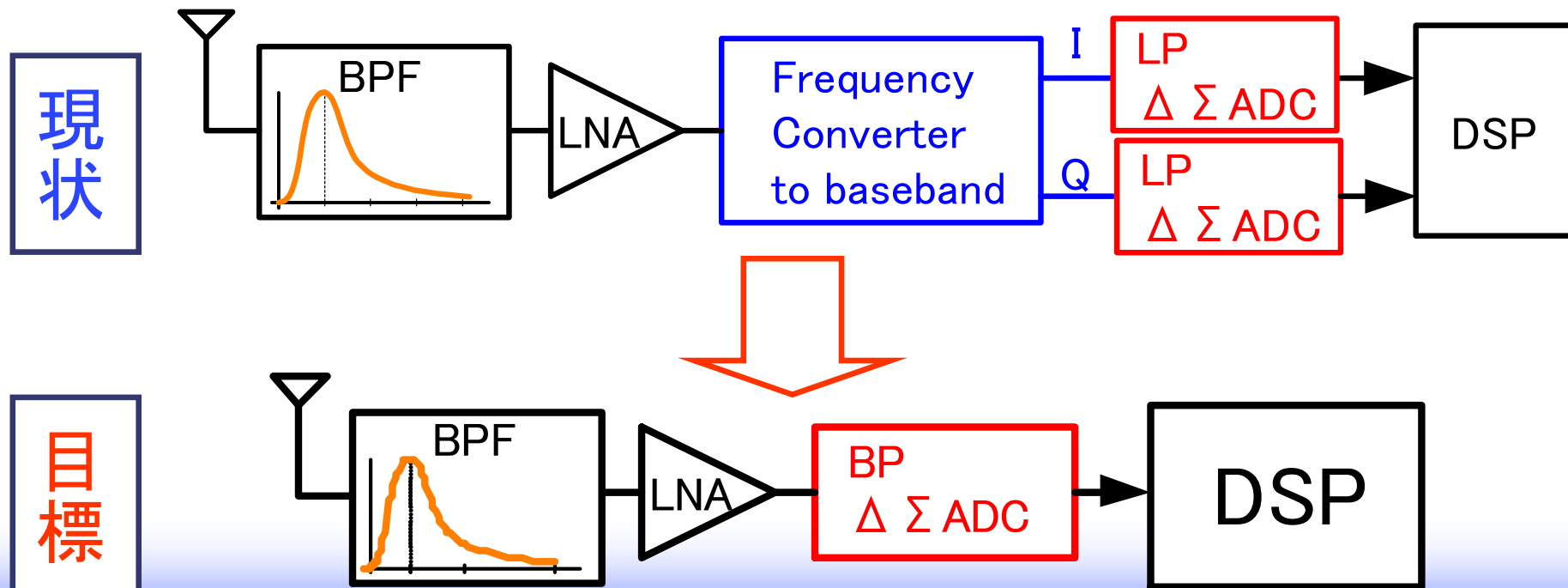
■ 携帯電話、無線LAN等の受信機アナログフロントエンド部

⇒ソフトウェア無線機の実現

– RF信号を直接AD変換

– 低消費電力、高精度

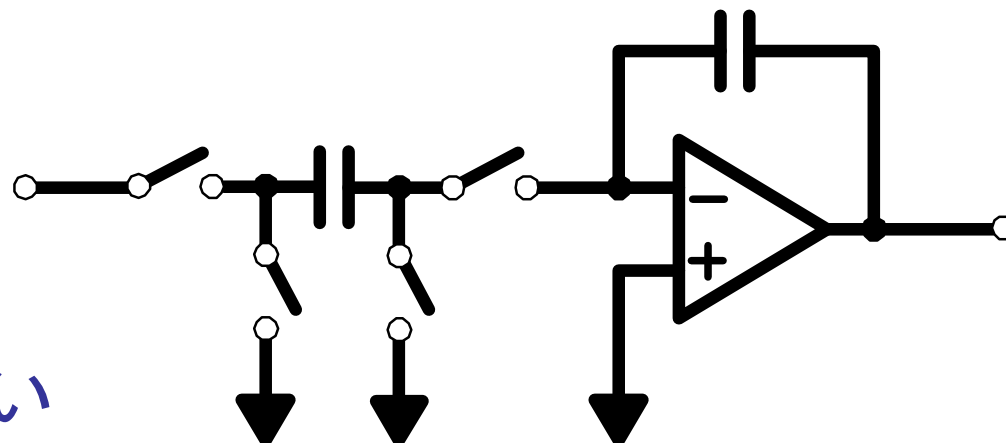
– アナログ最小、デジタルリッチな回路構成



$\Delta \Sigma$ AD変調器の実現回路

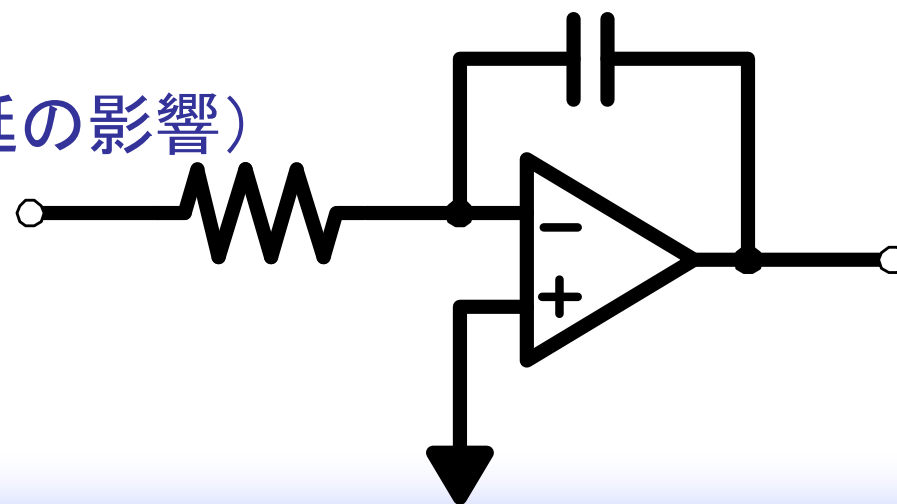
■ 離散時間 $\Delta \Sigma$ AD変調器

- 高精度
- × 消費電力大
- × 低速・低周波信号しか扱えない



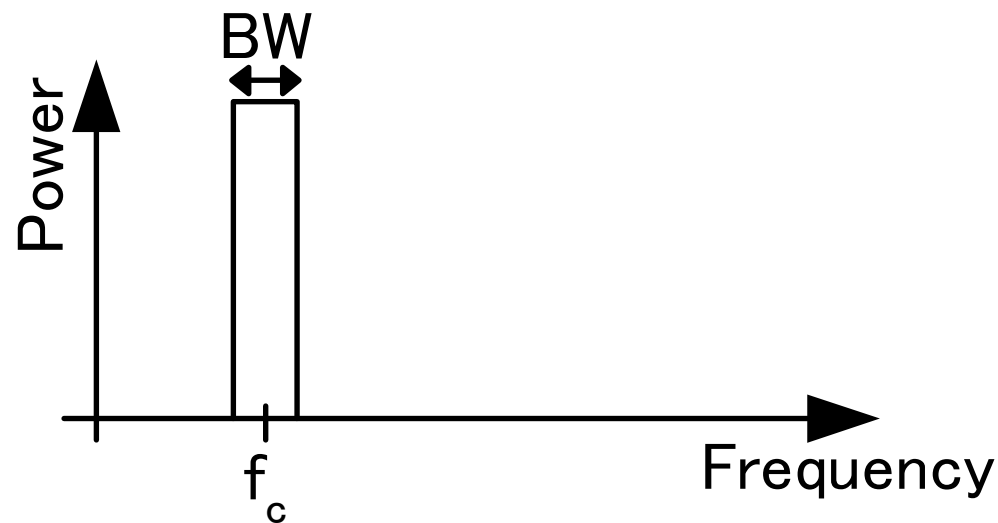
■ 連続時間 $\Delta \Sigma$ AD変調器

- × 低精度
(DACのクロックジッタとループ遅延の影響)
- 消費電力小
- 高速・高周波信号を扱える



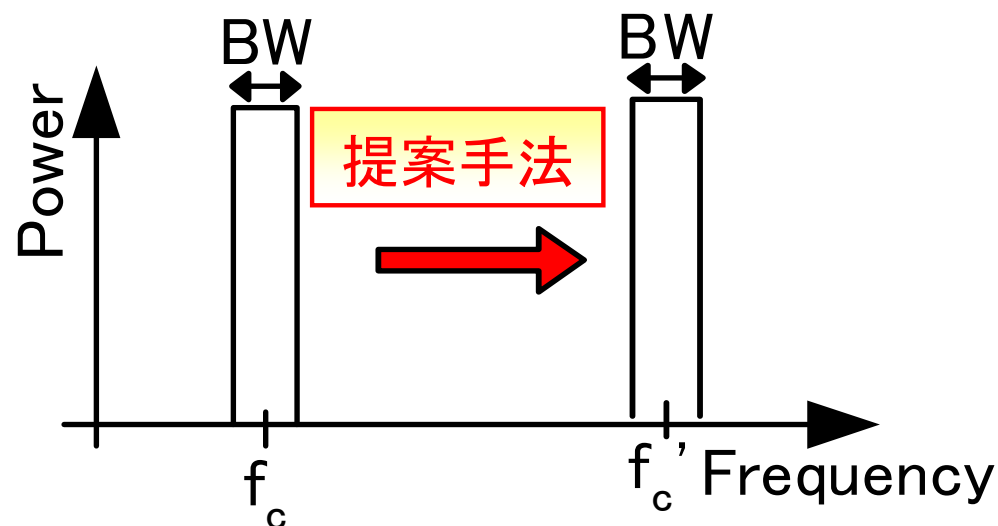
RFサンプリングの実現アプローチ

- **低消費電力** ⇒ 連続時間 $\Delta \Sigma$ AD変調器
- **狭帯域** ⇒ バンドパス
- **高周波** ⇒ サブサンプリング
- **高精度** ⇒ ジッタ影響小のDAC,
ループ遅延 補償



RFサンプリングの実現アプローチ

- **低消費電力** ⇒ 連続時間 $\Delta \Sigma$ AD変調器
- **狭帯域** ⇒ バンドパス
- **高周波** ⇒ サブサンプリング
- **高精度** ⇒ ジッタ影響小のDAC,
ループ遅延 補償



3倍の中心周波数

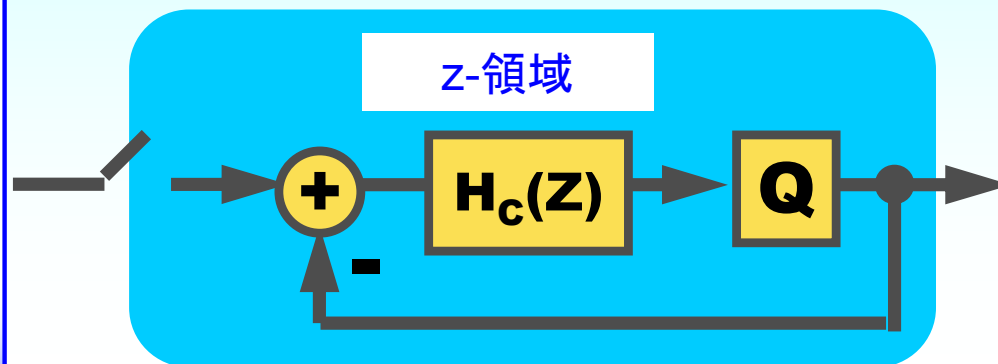
研究目的

- ▶ RFサンプリング連続時間バンドパス $\Delta\Sigma$ 変調器の設計論の確立
- ▶ ループ遅延の補償によるAD変換の精度の改善

離散時間 $\Delta\Sigma$ 変調器

■ z-領域

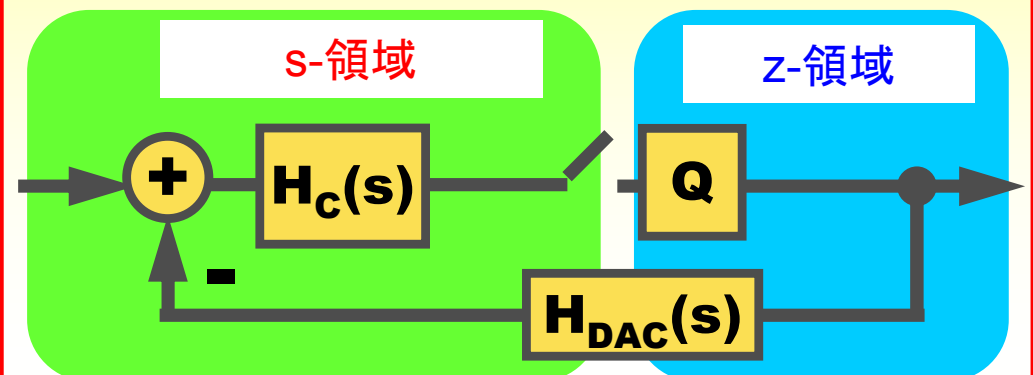
⇒ 設計は容易



連続時間 $\Delta\Sigma$ 変調器

■ s-領域とz-領域の混在

⇒ 設計が複雑



Outline

- 研究背景と目的

- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計



- $\Delta \Sigma$ 変調器

- 変調器内部DAC

- 離散時間-連続時間変換による設計

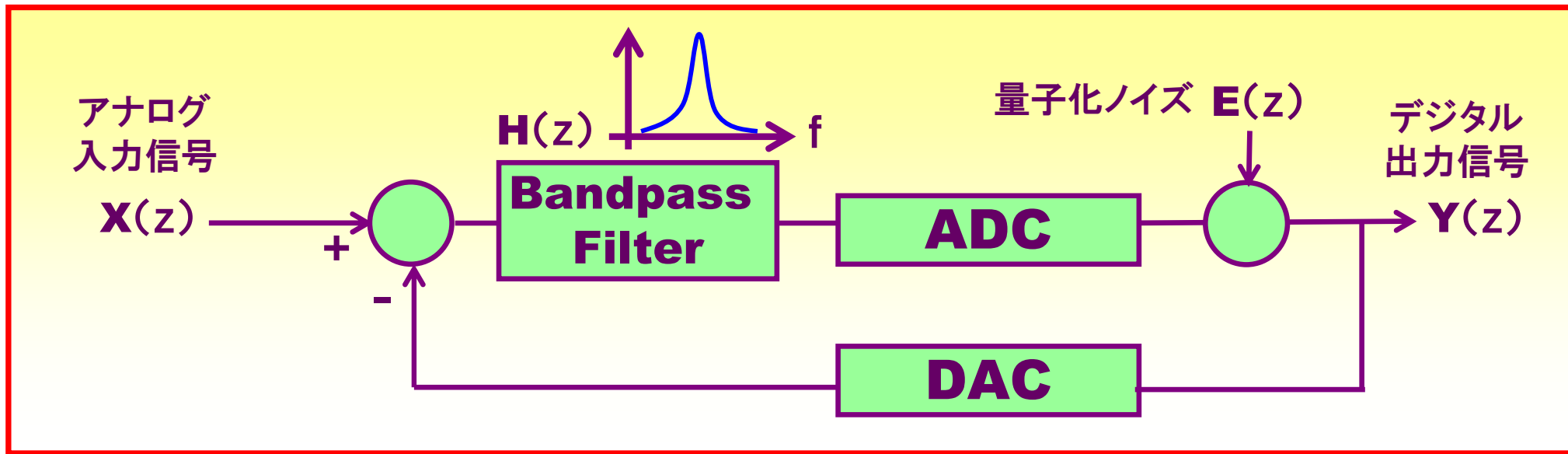
- 信号伝達関数の

- アンチエイリアシング特性の解析

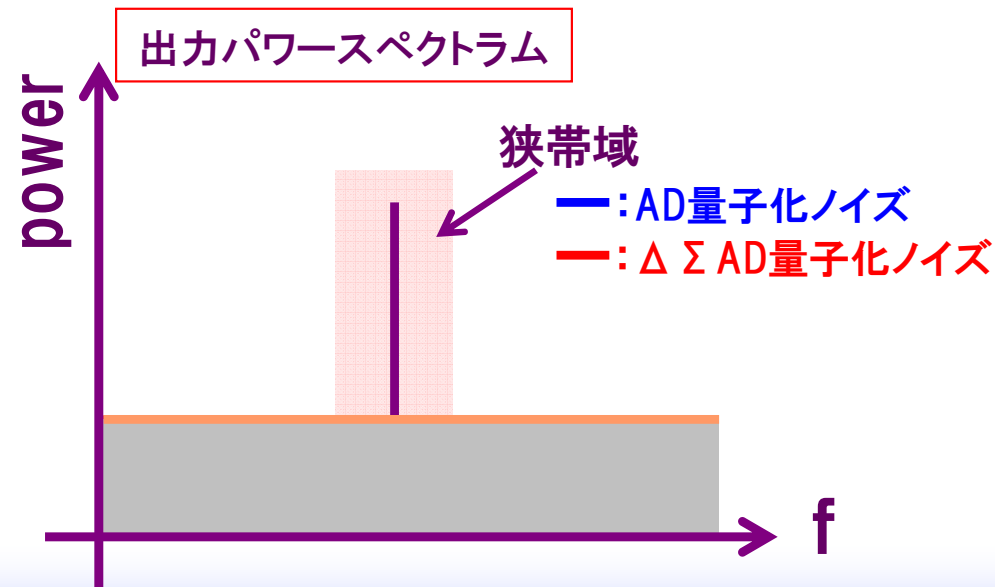
- ループ遅延の補償

- まとめ

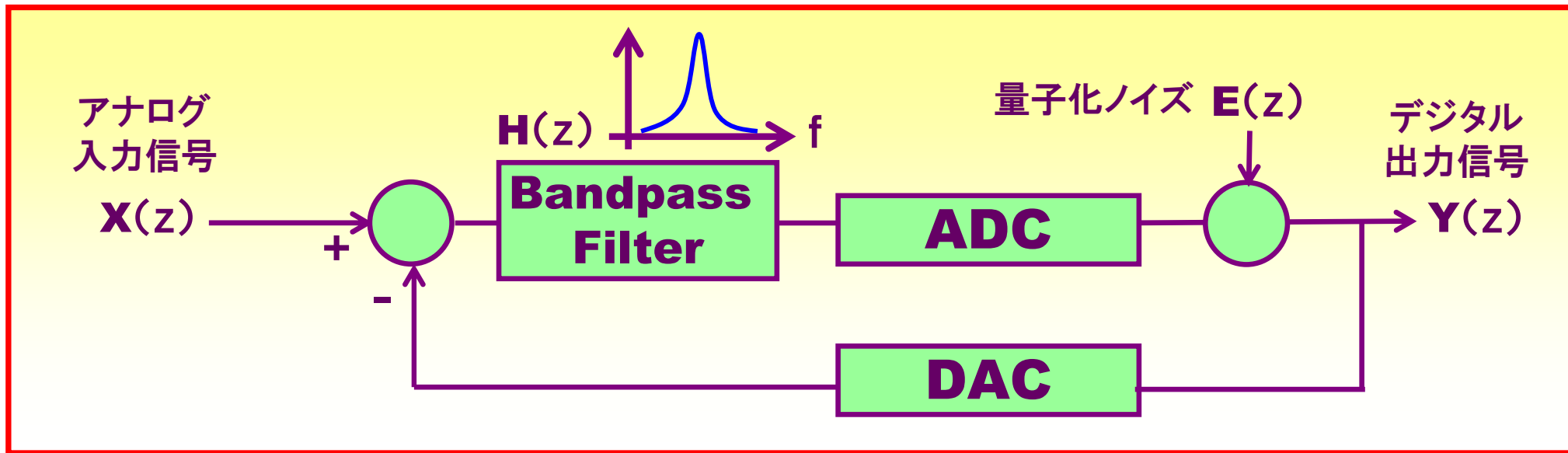
バンドパス $\Delta \Sigma$ AD変調器



$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} X(z) + \frac{1}{1+H(z)} E(z)$$



バンドパス $\Delta \Sigma$ AD変調器

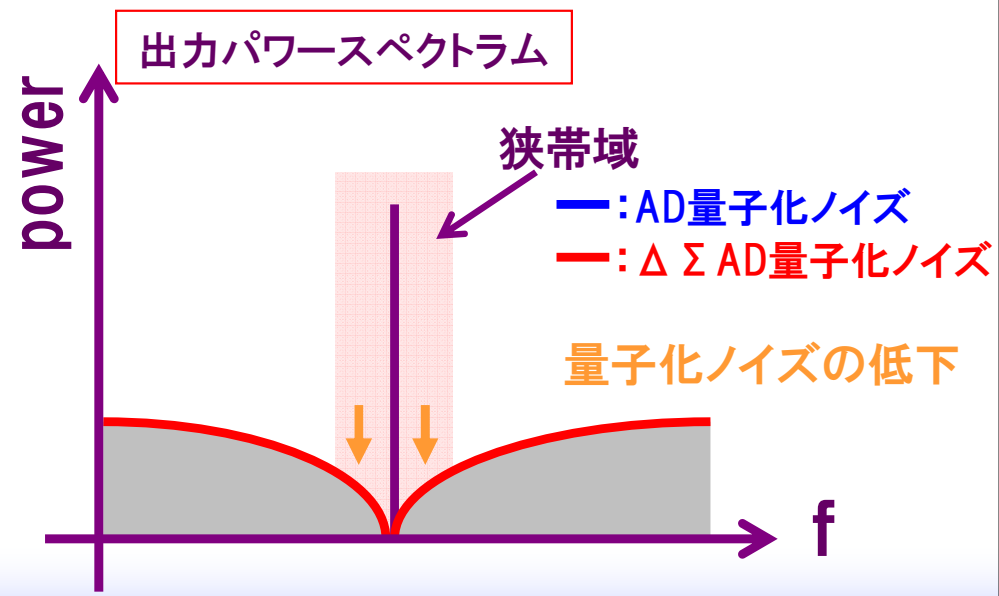


$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} X(z) + \frac{1}{1+H(z)} E(z)$$

$H(z) \Rightarrow \infty$

Signal Transfer Function (STF)

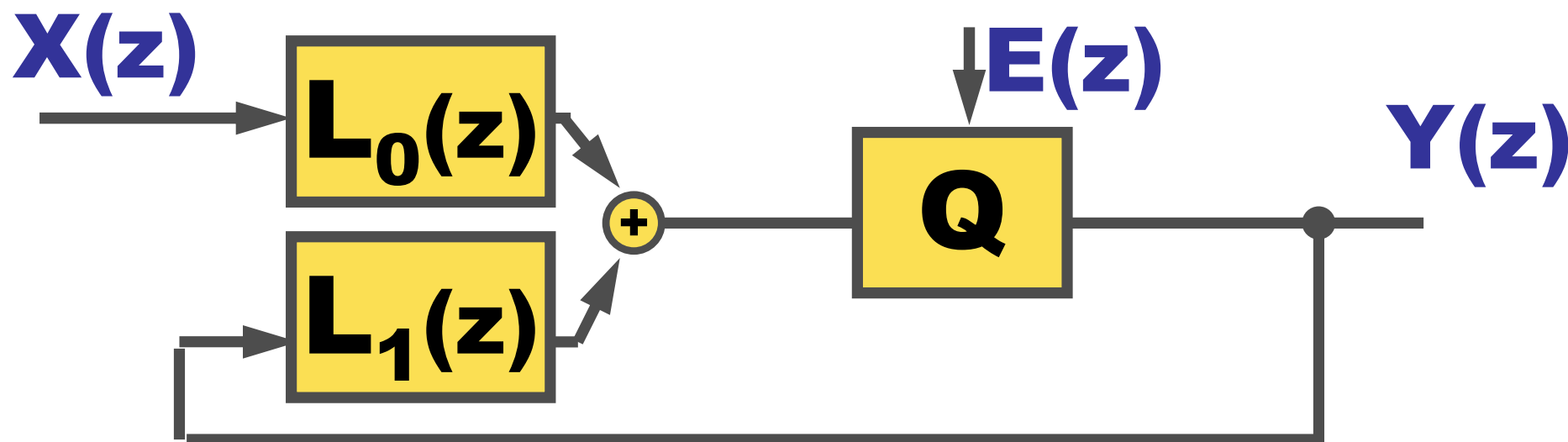
Noise Transfer Function (NTF)



△ Σ AD変調器の伝達関数

$$Y(z) = \underline{STF(z)} \cdot X(z) + \underline{NTF(z)} \cdot E(z)$$

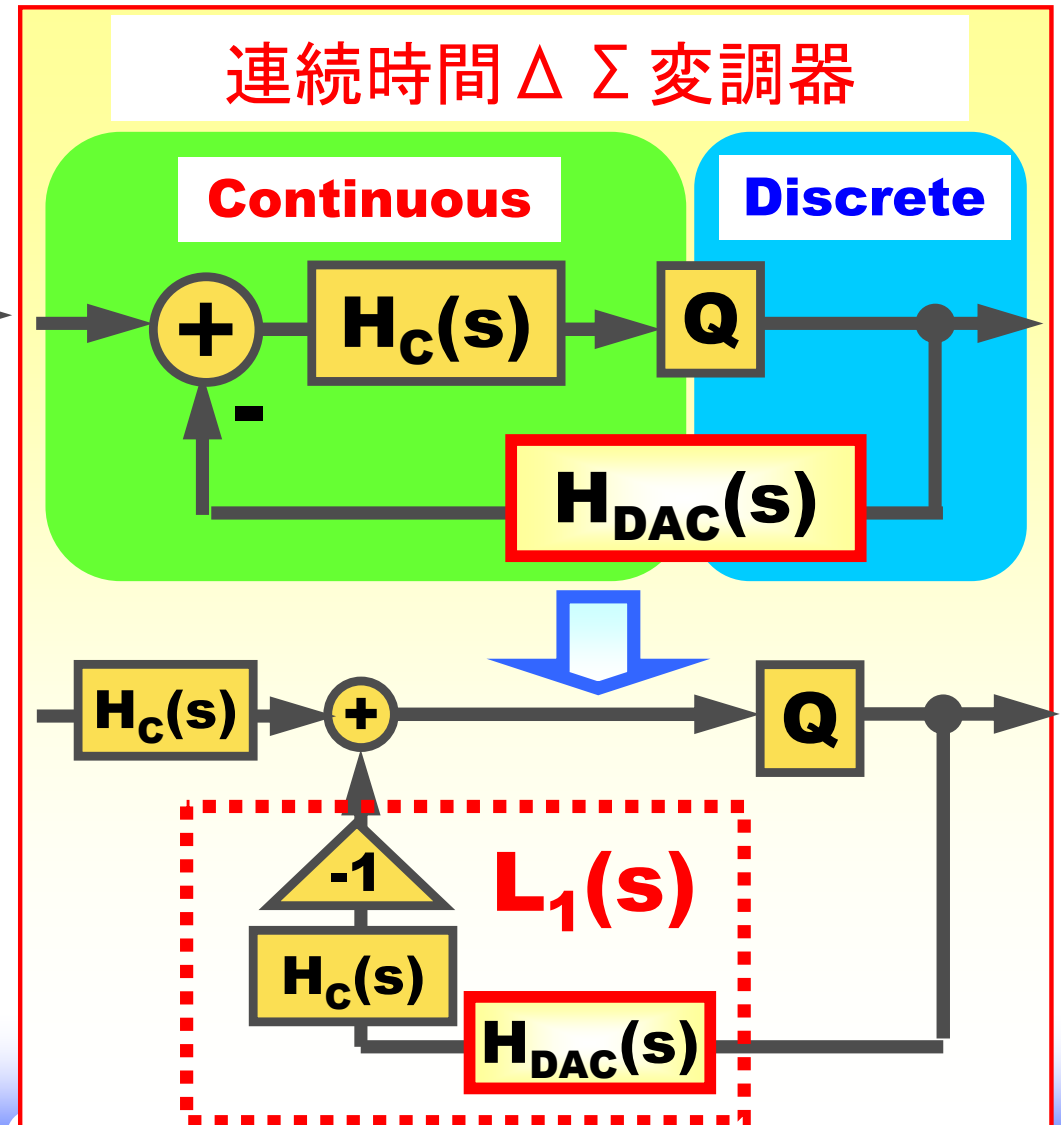
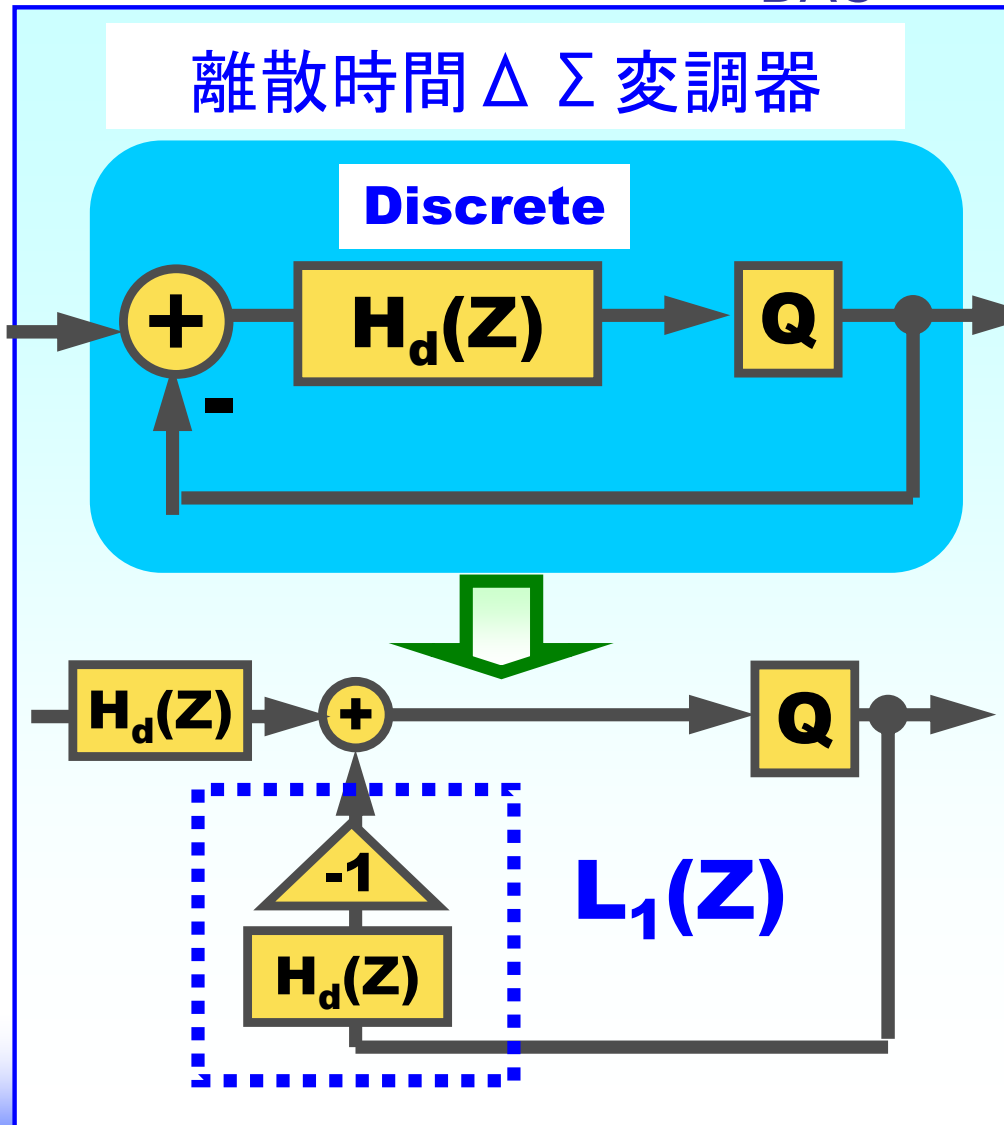
Signal Transfer Function (STF) Noise Transfer Function (NTF)



$$NTF(z) = \frac{1}{1 - L_1(z)} \quad STF(z) = \frac{L_0(z)}{1 - L_1(z)}$$

離散時間(DT) $\Delta \Sigma$ と連続時間(CT) $\Delta \Sigma$ の
フィードバック伝達関数 L_1

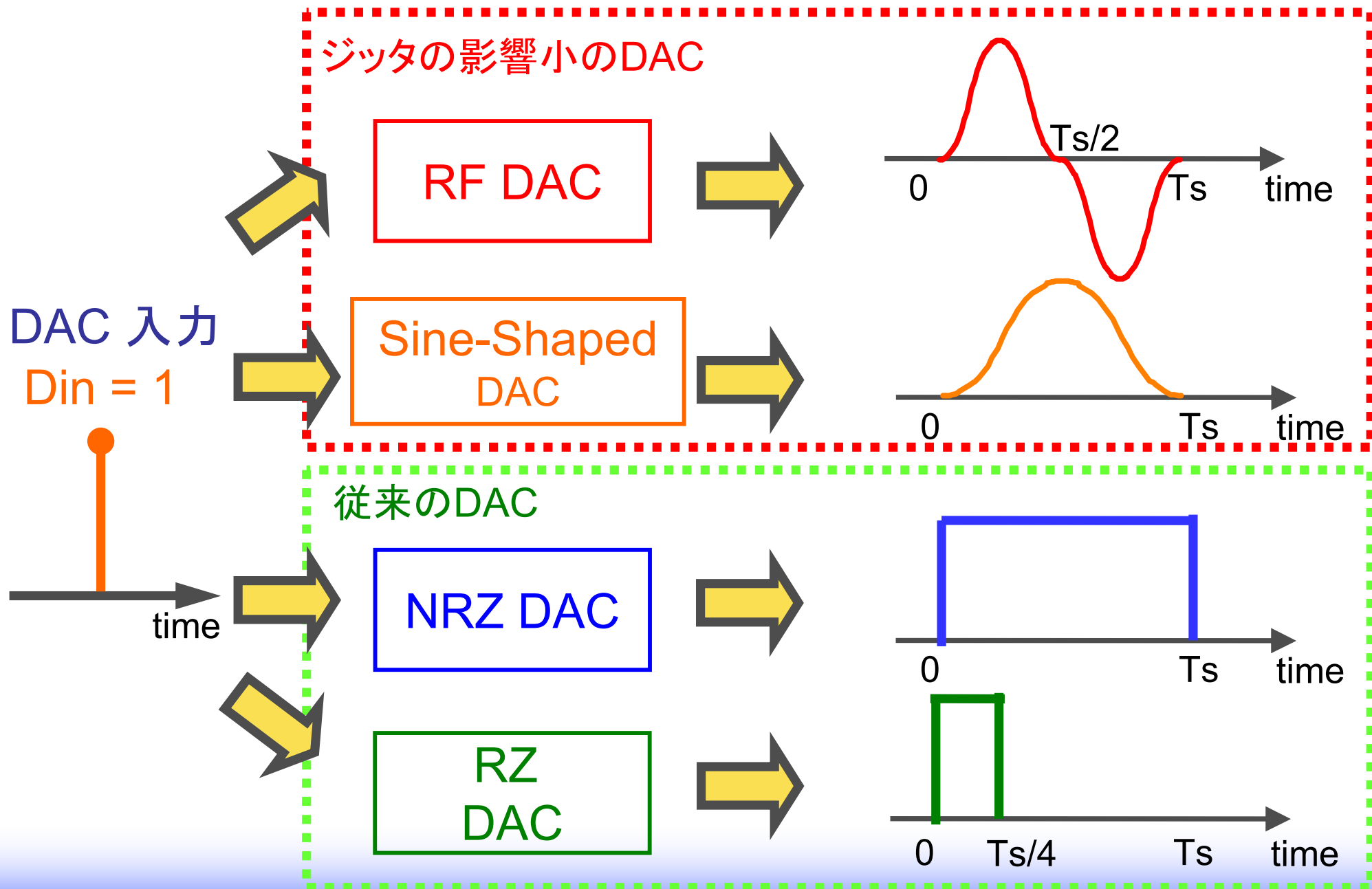
- CT $\Delta \Sigma \Rightarrow H_{DAC}(s)$ を考慮する必要がある



Outline

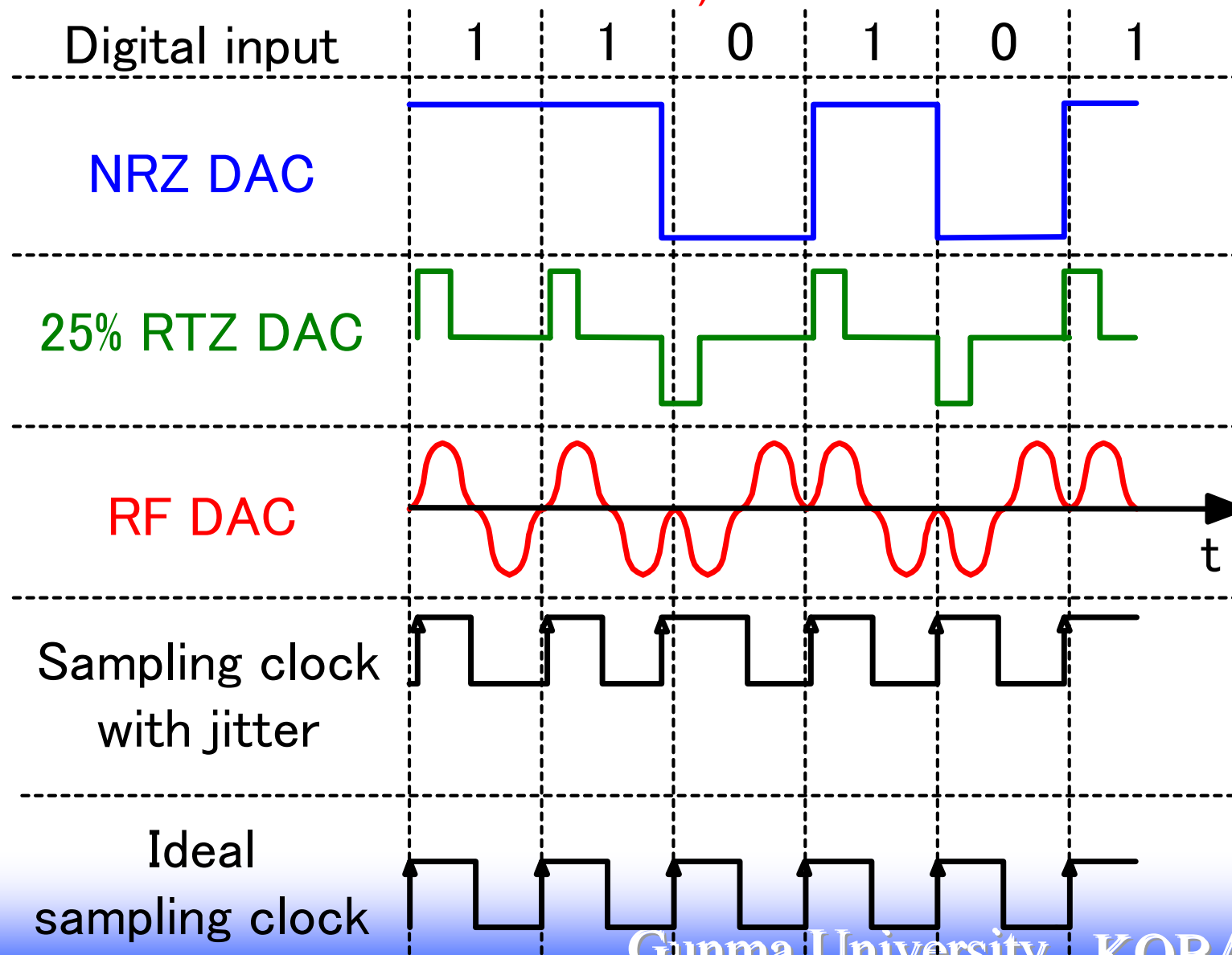
- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - ➔ – 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ループ遅延の補償
- まとめ

変調器内部DACの出力波形



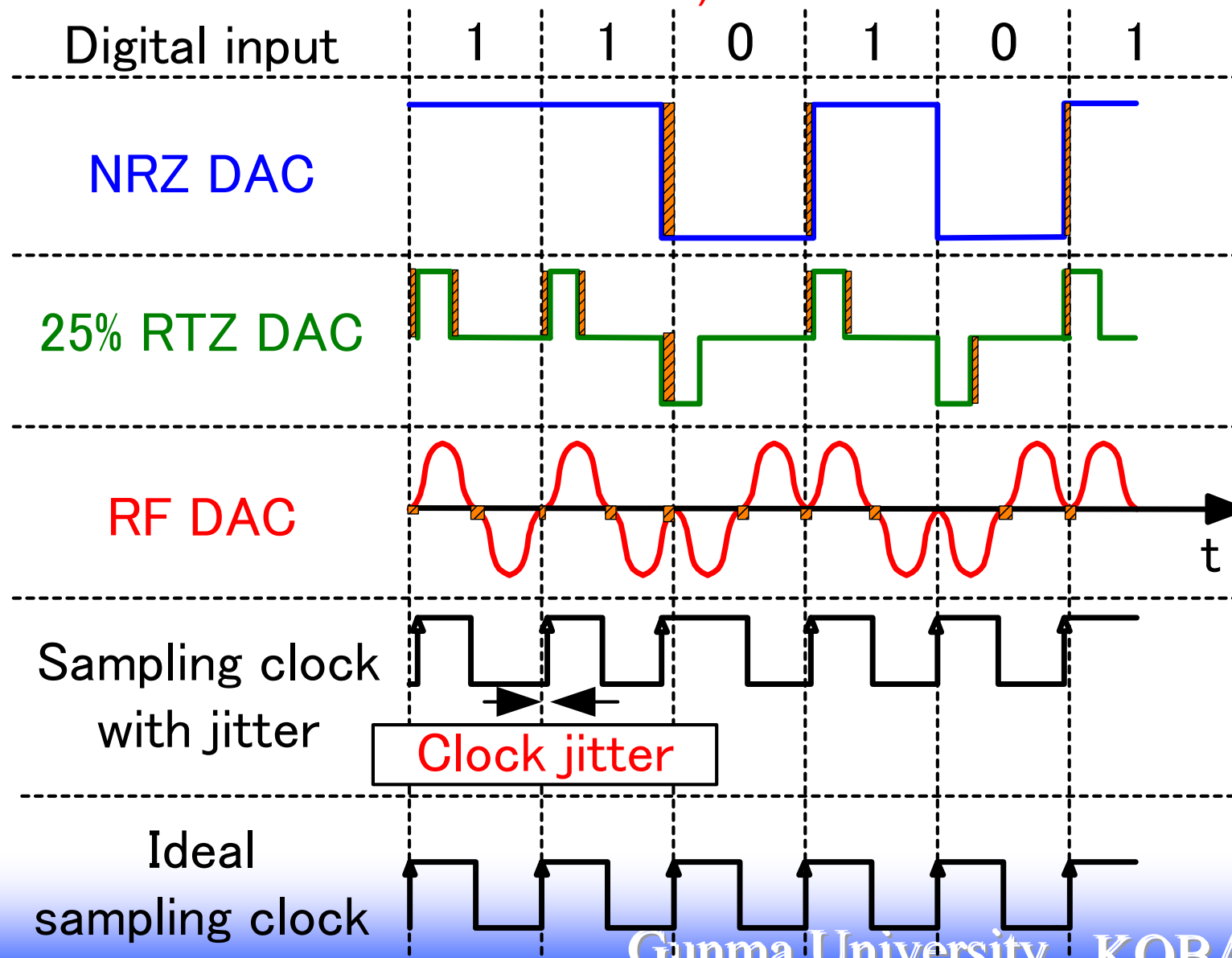
DACのジッタの影響

- RF, Sine shaped DAC \Rightarrow DACのジッタの影響小
(サンプリングタイミングでスルーレートが0)



DACのジッタの影響

- RF, Sine shaped DAC \Rightarrow DACのジッタの影響小
(サンプリングタイミングでスルーレートが0)



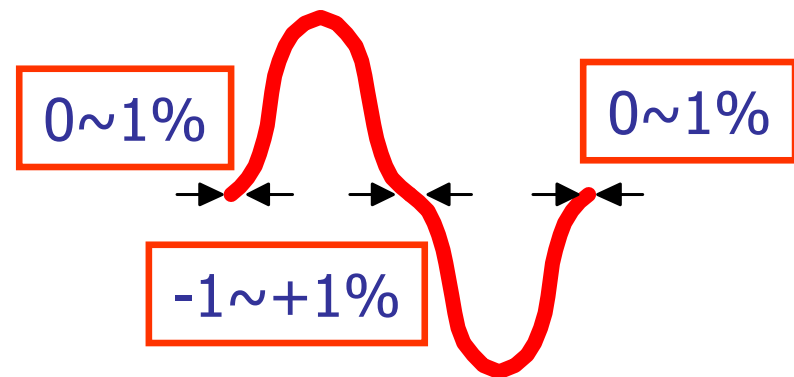
DACのジッタによる出力パワースペクトラムの変化

■ RF DAC使用の変調器

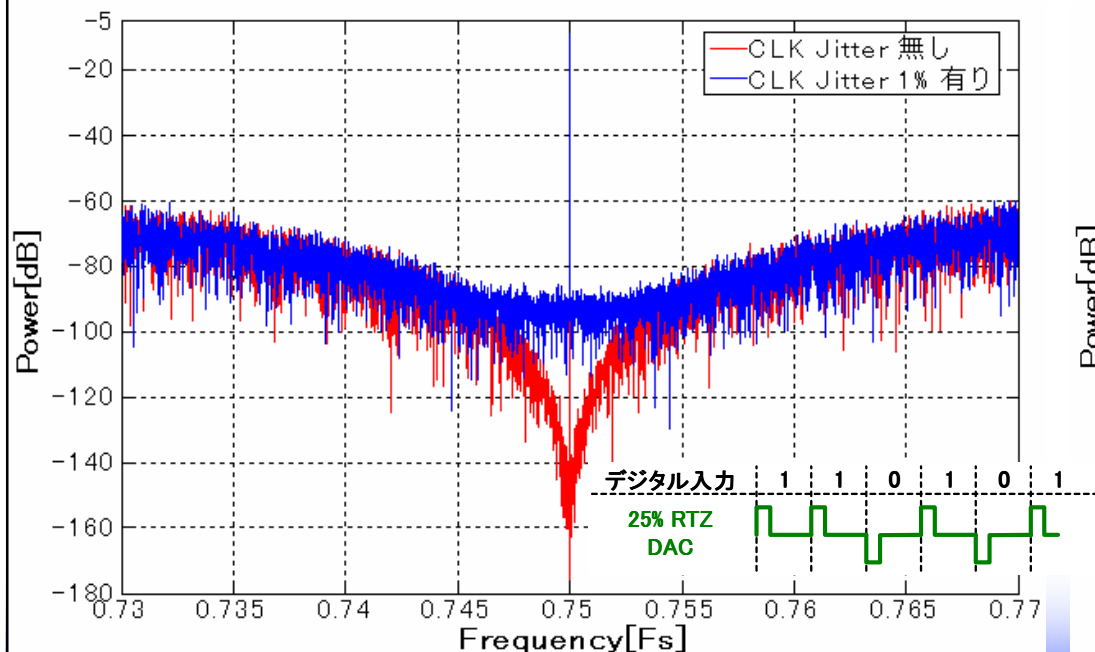
- 変化ほぼなし

■ 25% RZ DAC使用の変調器

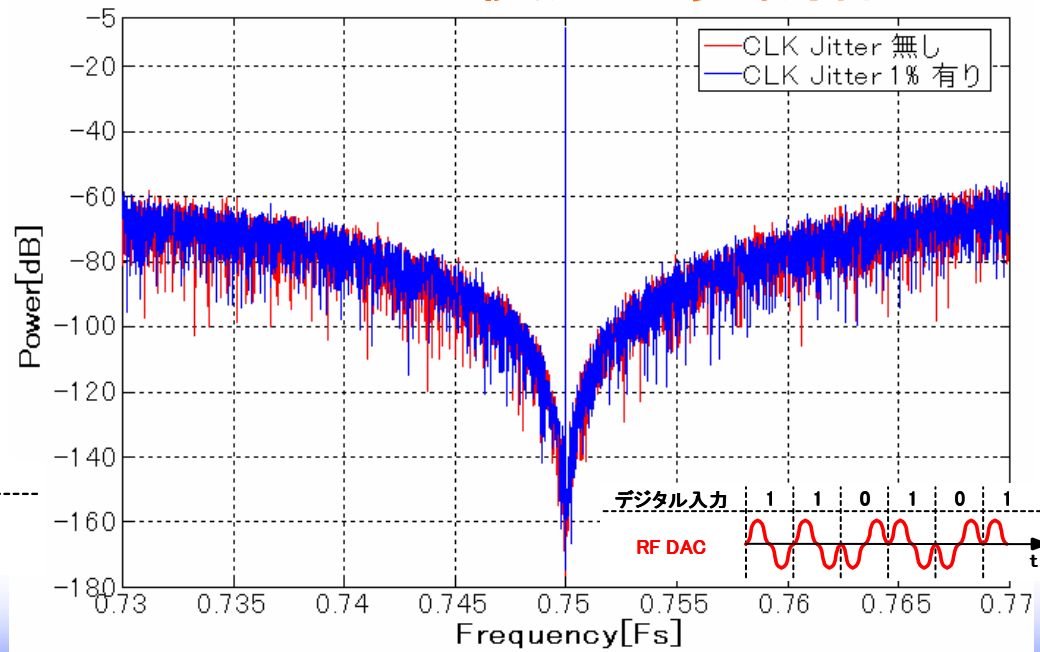
- ノイズフロアが大きく上昇



25% RZ DAC使用の変調器



RF DAC使用の変調器



Outline

- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計

- $\Delta \Sigma$ 変調器
- 変調器内部DAC

 – 離散時間-連続時間変換による設計

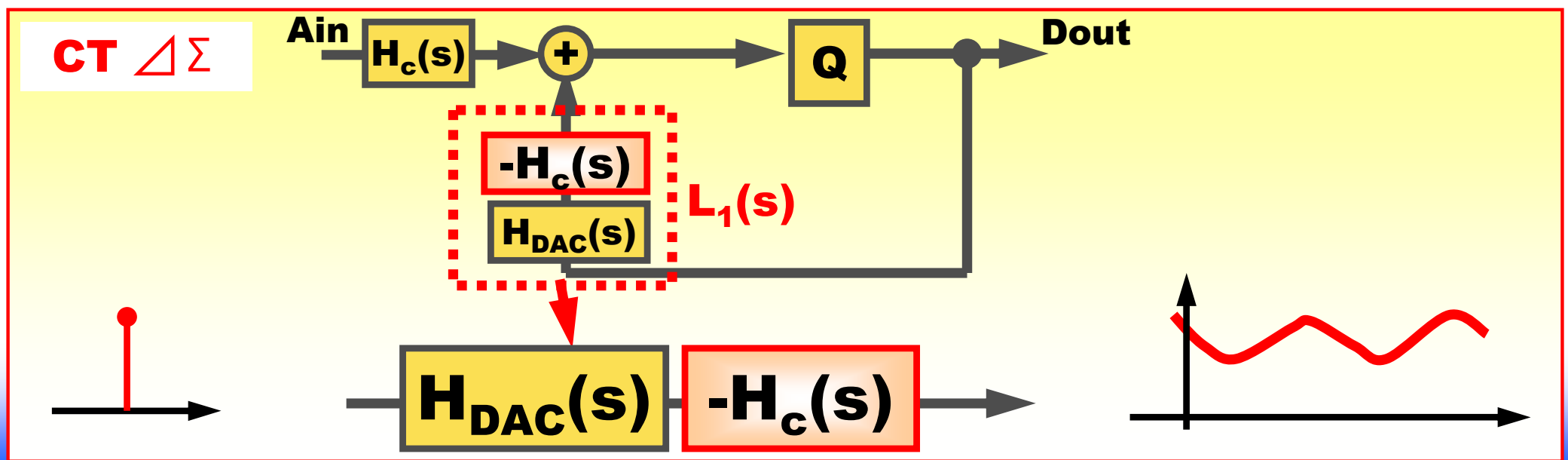
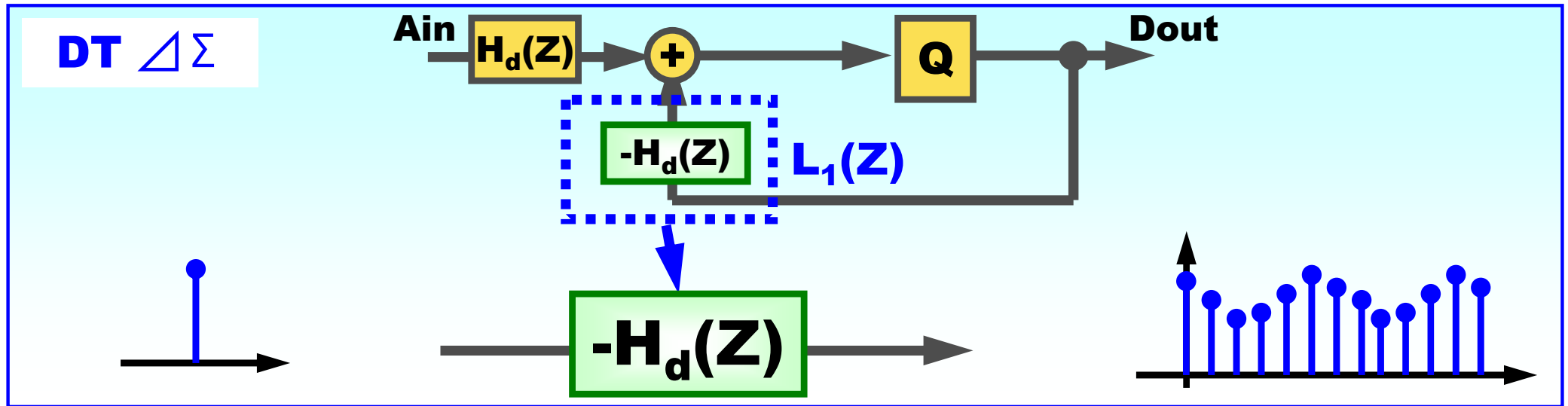
- 信号伝達関数の
アンチエイリアシング特性の解析

- ループ遅延の補償

- まとめ

フィードバック伝達関数 L_1 のインパルス応答

- L_1 のインパルス応答が不変となるCT-DT変換を求める
 - L_1 の一致 \Leftrightarrow NTFの一致 \therefore NTF=1/(1- L_1)



1次、2次の伝達関数の場合のCT-DT変換式(RF DACを用いた場合)

■ 1次の伝達関数の場合

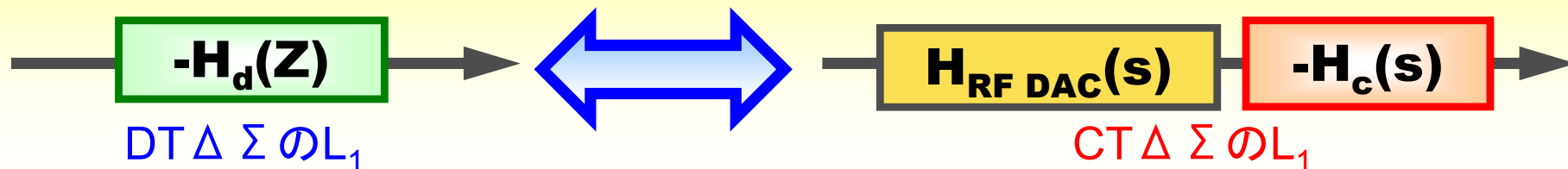
Hd(z)	Hc(s)
$\frac{z^{-1}}{1 - e^{s_k T} z^{-1}}$	$\frac{s_k (s_k^2 T^2 + 16\pi^2)}{8\pi^2 \left(1 - e^{-\frac{1}{2}s_k T}\right)^2} \frac{1}{e^{s_k T} (s - s_k)}$

■ 2次の伝達関数の場合

Hd(z)	Hc(s)
$\frac{z^{-2}}{\left(1 - e^{s_k T} z^{-1}\right)^2}$	$\frac{As + B}{8\pi^2 T \left(1 - e^{-s_k \frac{T}{2}}\right)^3} \frac{1}{e^{s_k T} (s - s_k)^2}$

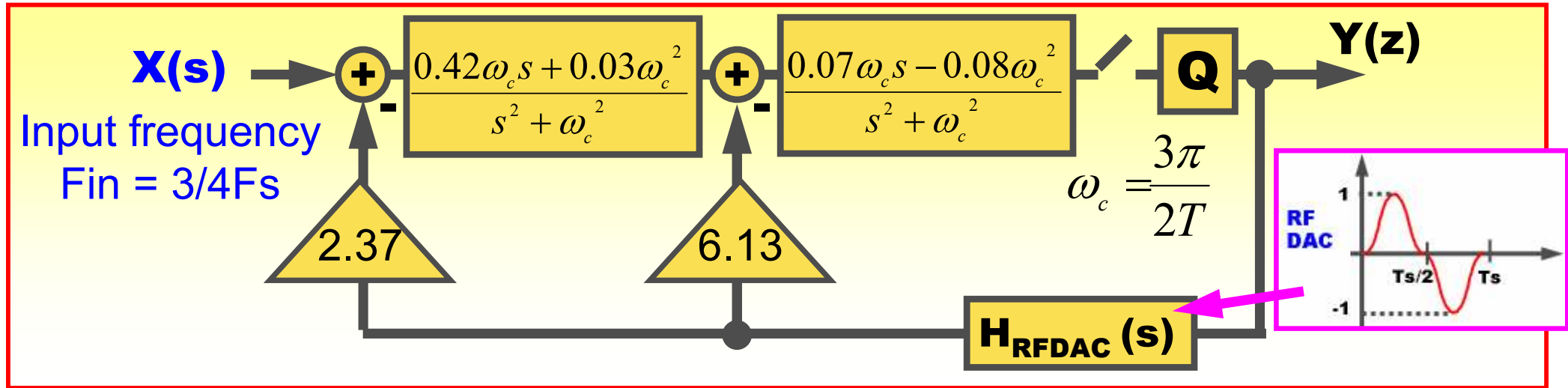
但し、 $A = e^{s_k \frac{T}{2}} (s_k^3 T^3 - 3s_k^2 T^2 + 16\pi^2 s_k T - 16\pi^2) + 16\pi^2 + 3s_k^2 T^2$
 $B = e^{s_k \frac{T}{2}} (-s_k^4 T^3 + 2s_k^3 T^2 - 16\pi^2 s_k^2 T) - 2s_k^3 T^2$

■ 上式を用いることでDTΔΣからCTΔΣへ変換が可能

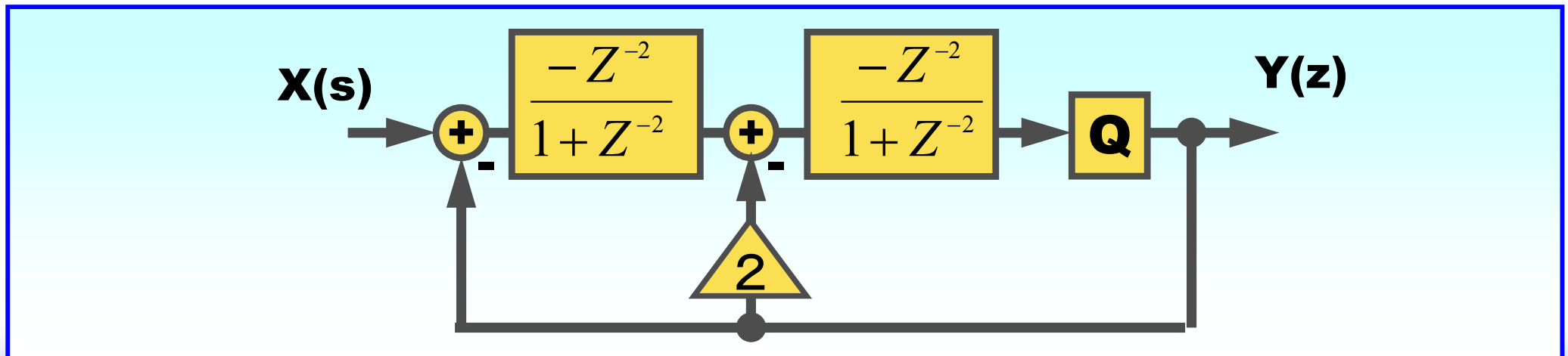


提案サブサンプリングCT $\Delta \Sigma$ 変調器と
対応するDT $\Delta \Sigma$ 変調器

CT $\Delta \Sigma$ Modulator



DT $\Delta \Sigma$ Modulator

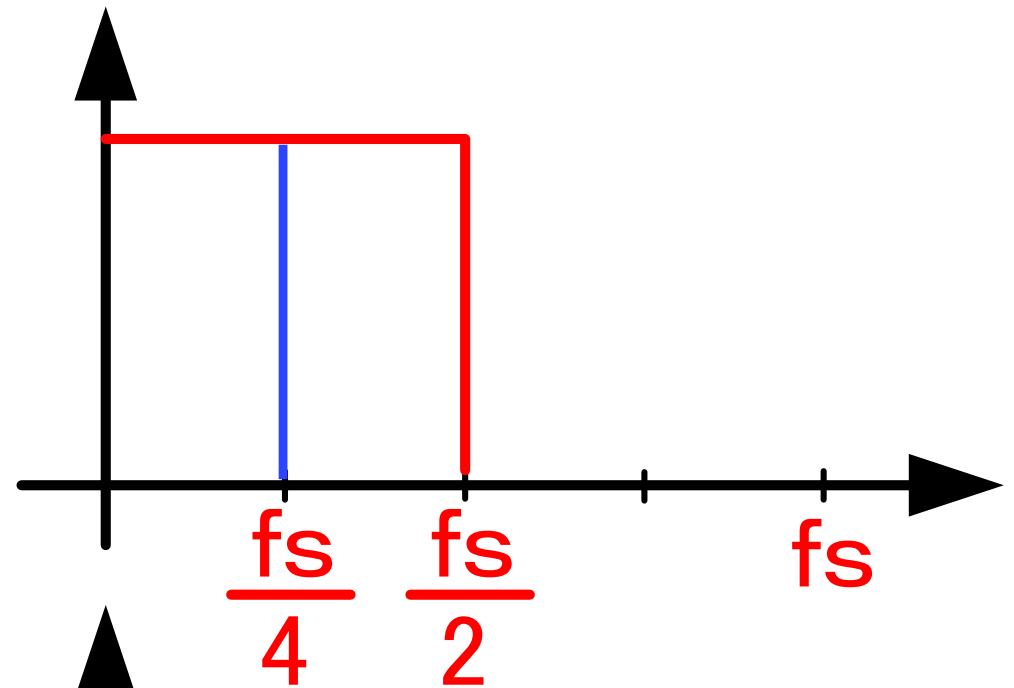


サブサンプリング

■ 従来のバンドパス $\Delta \Sigma$ AD変調器

☆ 中心周波数 $f_s/4$

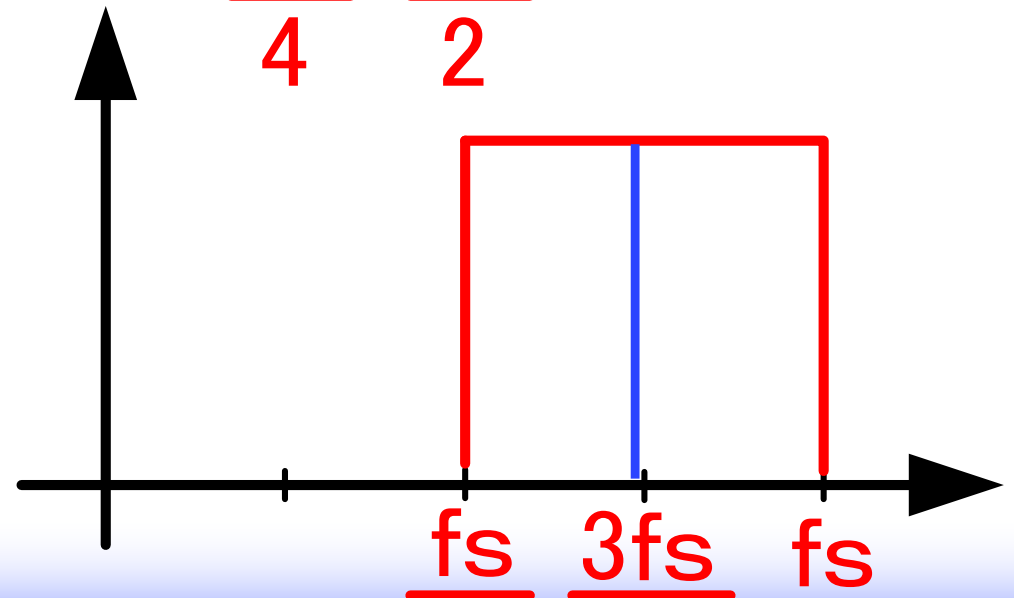
- 中心周波数: $f_s/4$
- 帯域 : $0 \sim f_s/2$



■ 提案手法

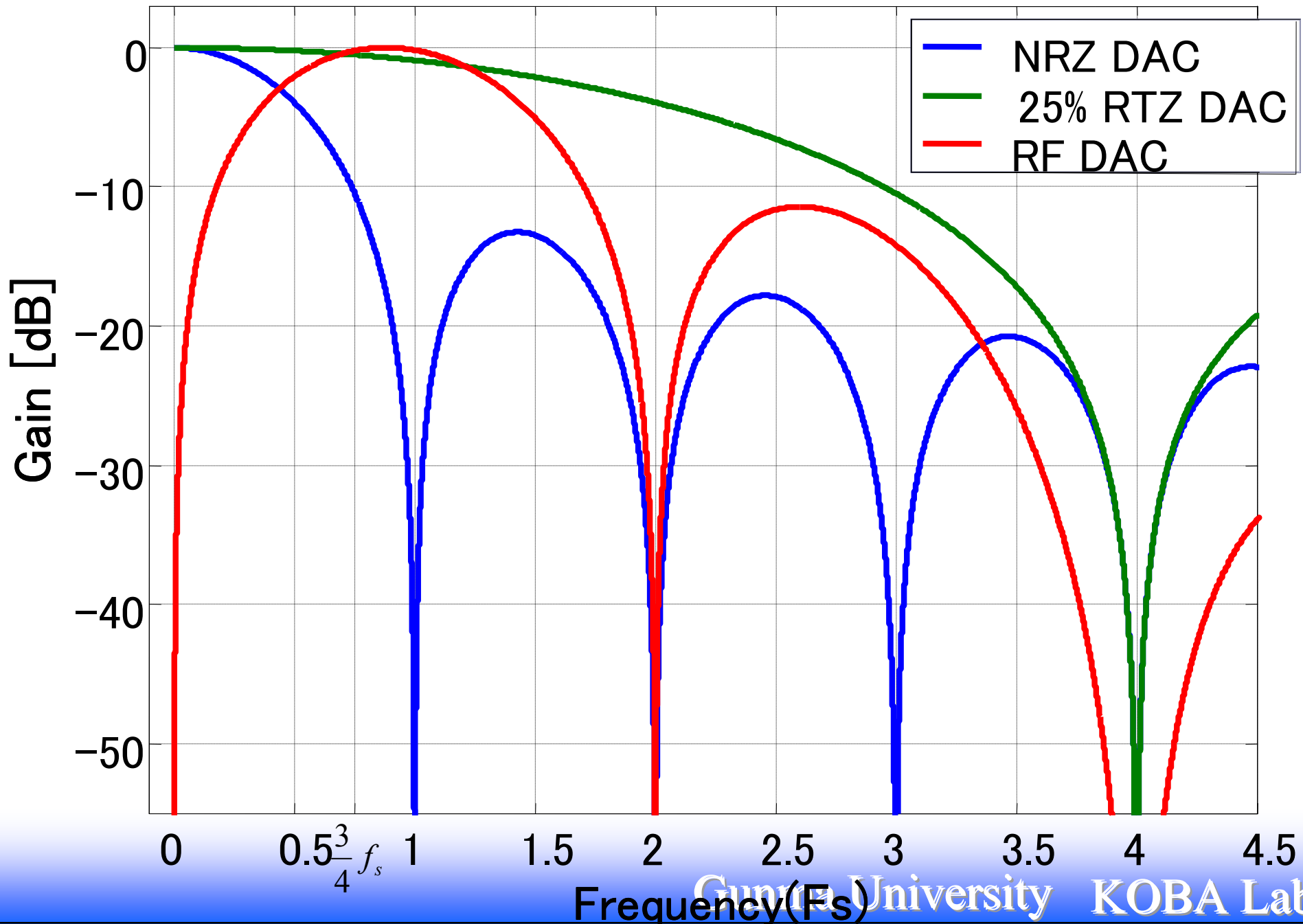
☆ 中心周波数 $3f_s/4$

- 中心周波数: $3f_s/4$
- 帯域 : $f_s/2 \sim f_s$



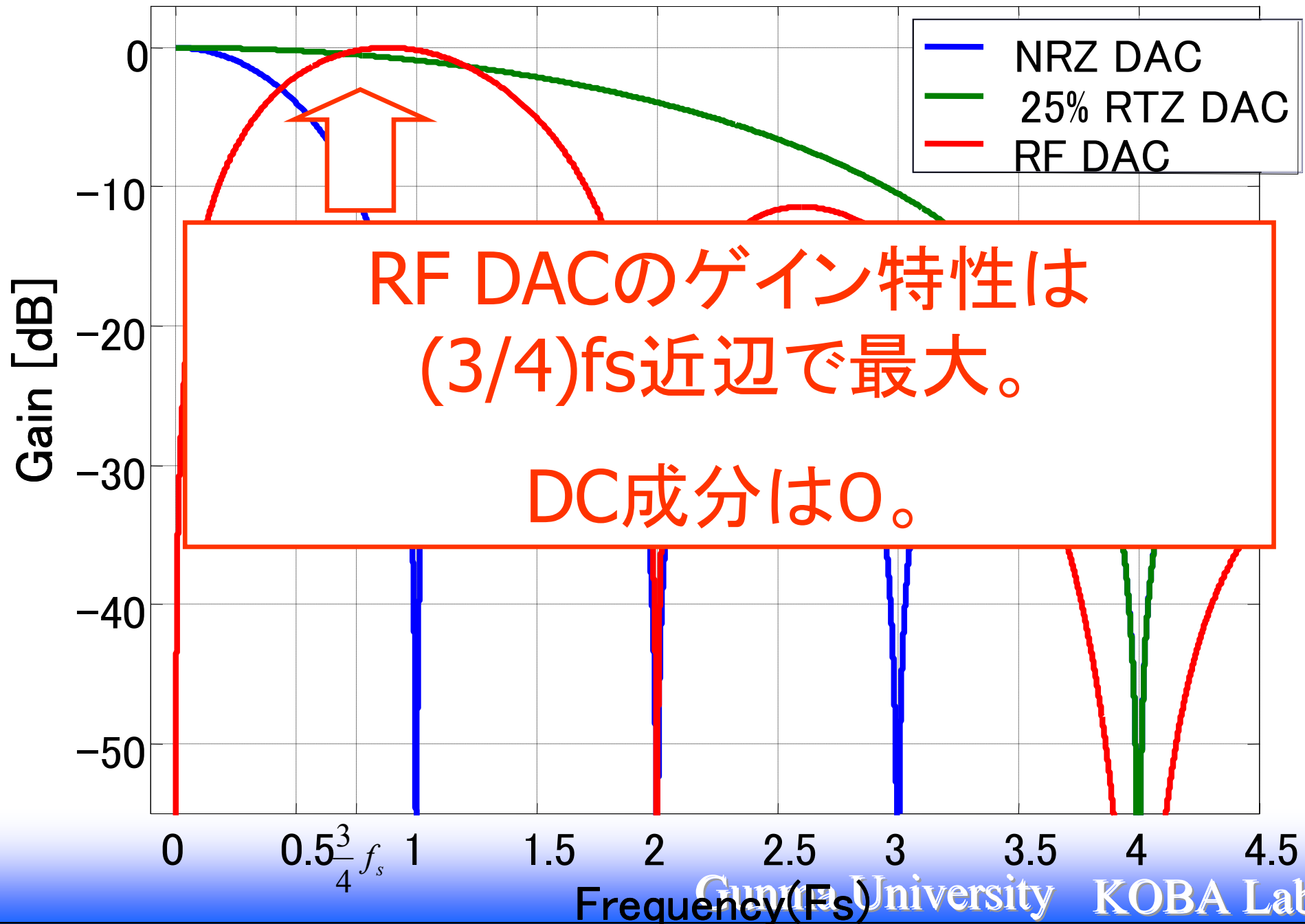
NRZ DAC, RZ DAC と RF DAC

—インパルス応答のゲイン特性—



NRZ DAC, RZ DAC と RF DAC

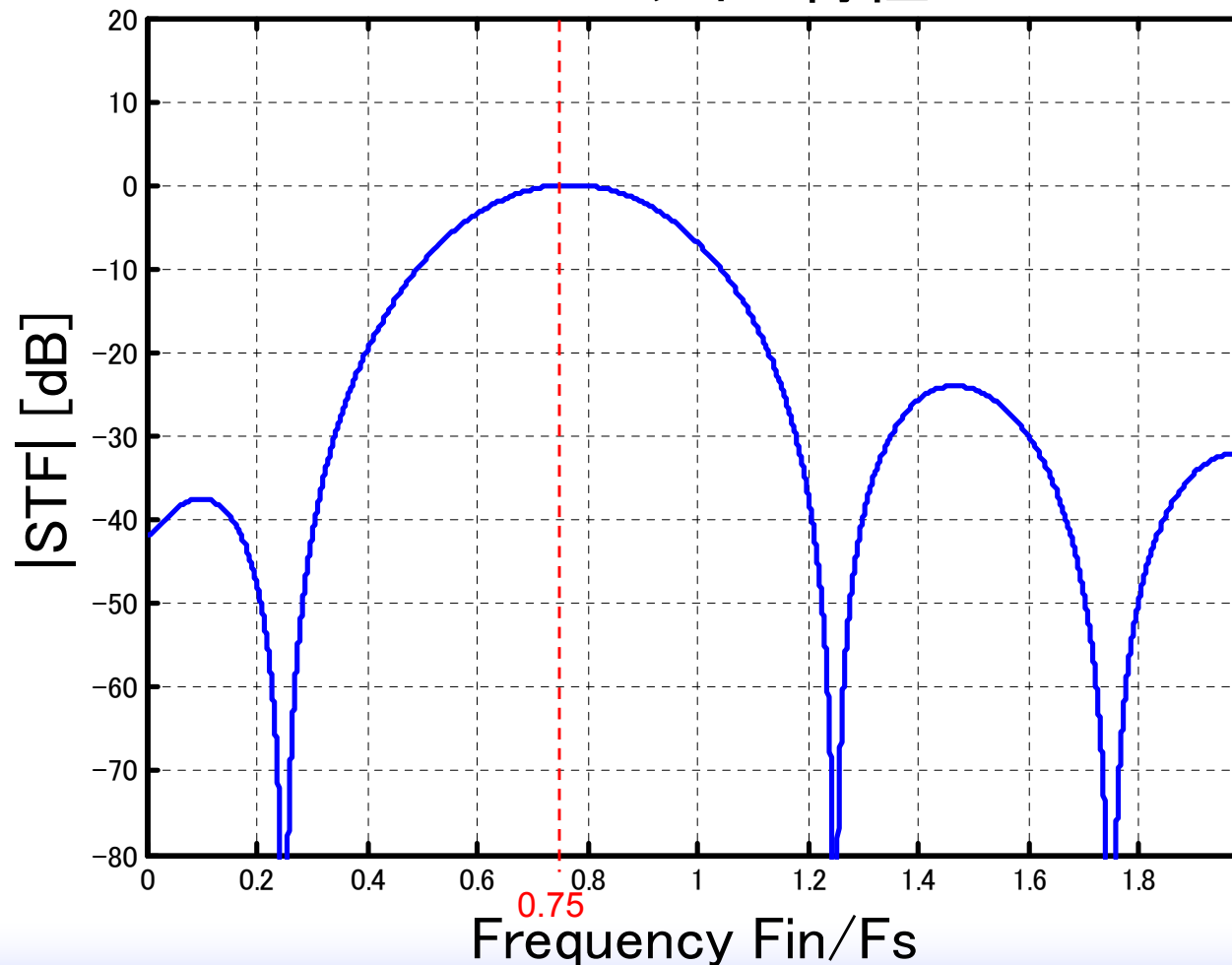
—インパルス応答のゲイン特性—



信号伝達関数(STF)の周波数特性

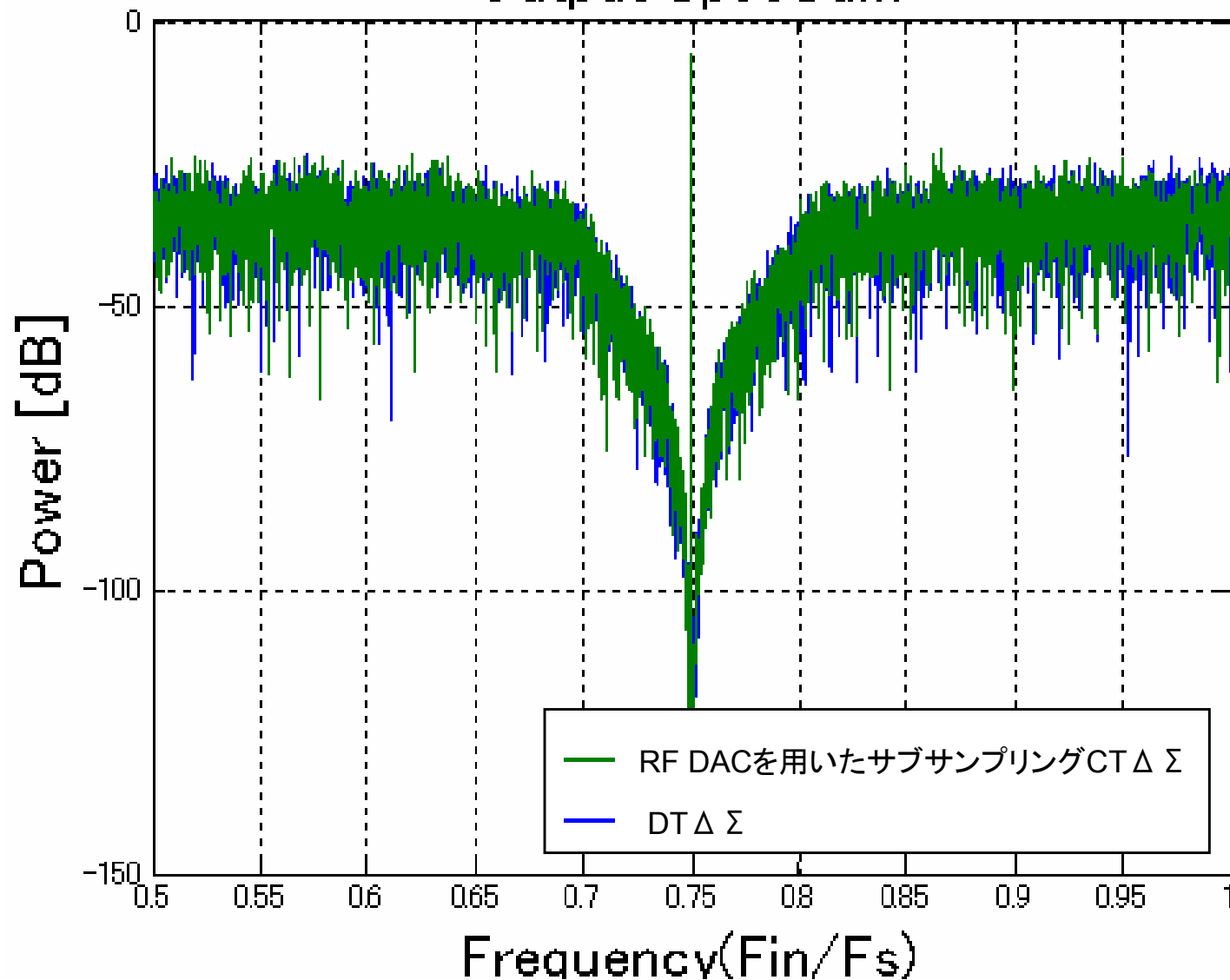
- アンチエイリアスフィルタの機能を変調器内部に持つ
($4/3F_s$ 中心のバンドパスフィルタ)

STFのゲイン特性



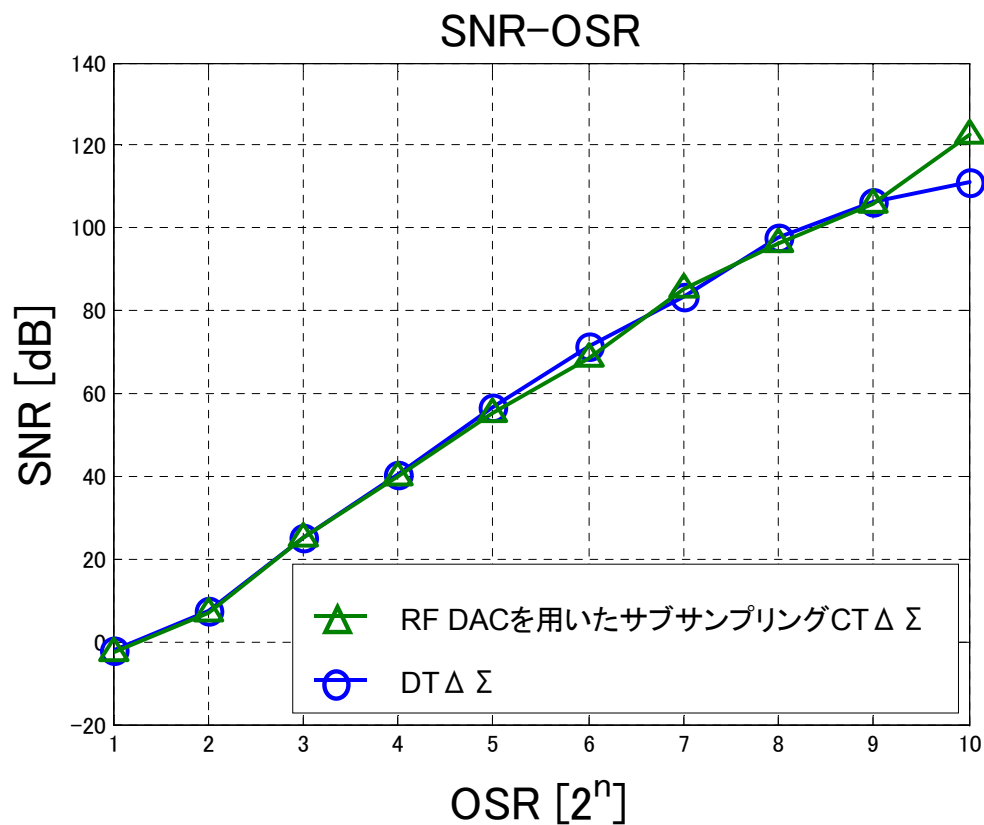
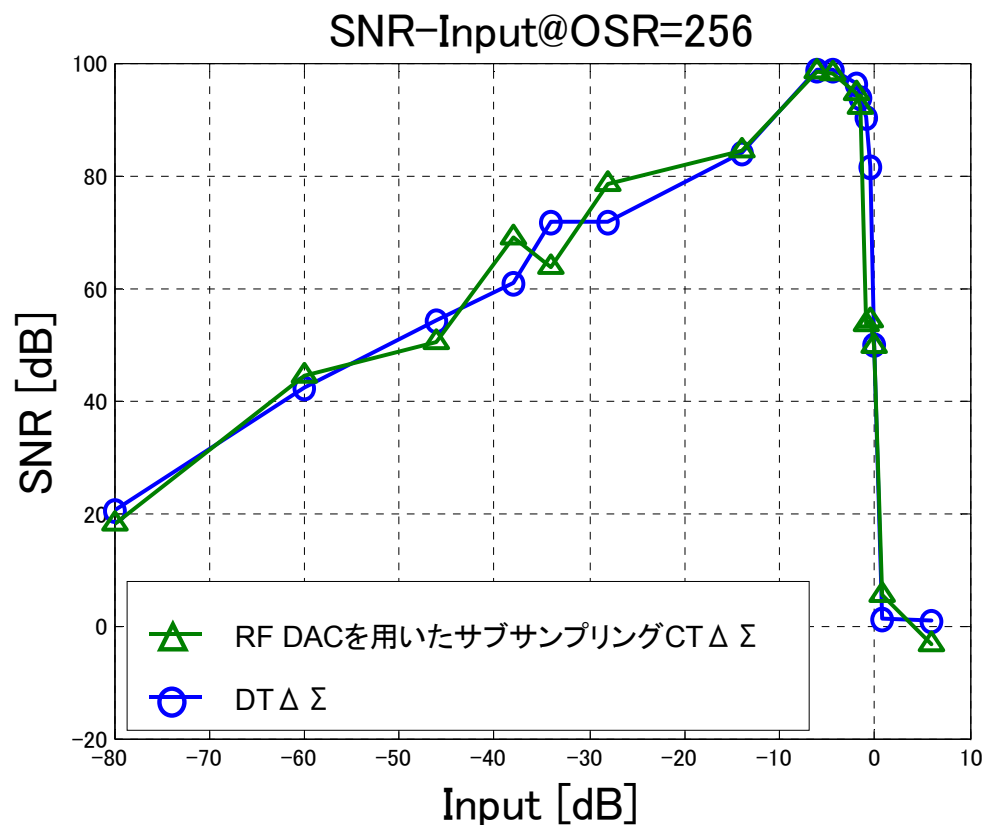
出力パワースペクトラムのシミュレーション結果

Output Spectrum



Output power spectrum: CT $\Delta\Sigma$ とDT $\Delta\Sigma$ で特性がほぼ一致

SNR-Input, SNR-OSRのシミュレーション結果



CT $\Delta\Sigma$ とDT $\Delta\Sigma$ で特性がほぼ一致

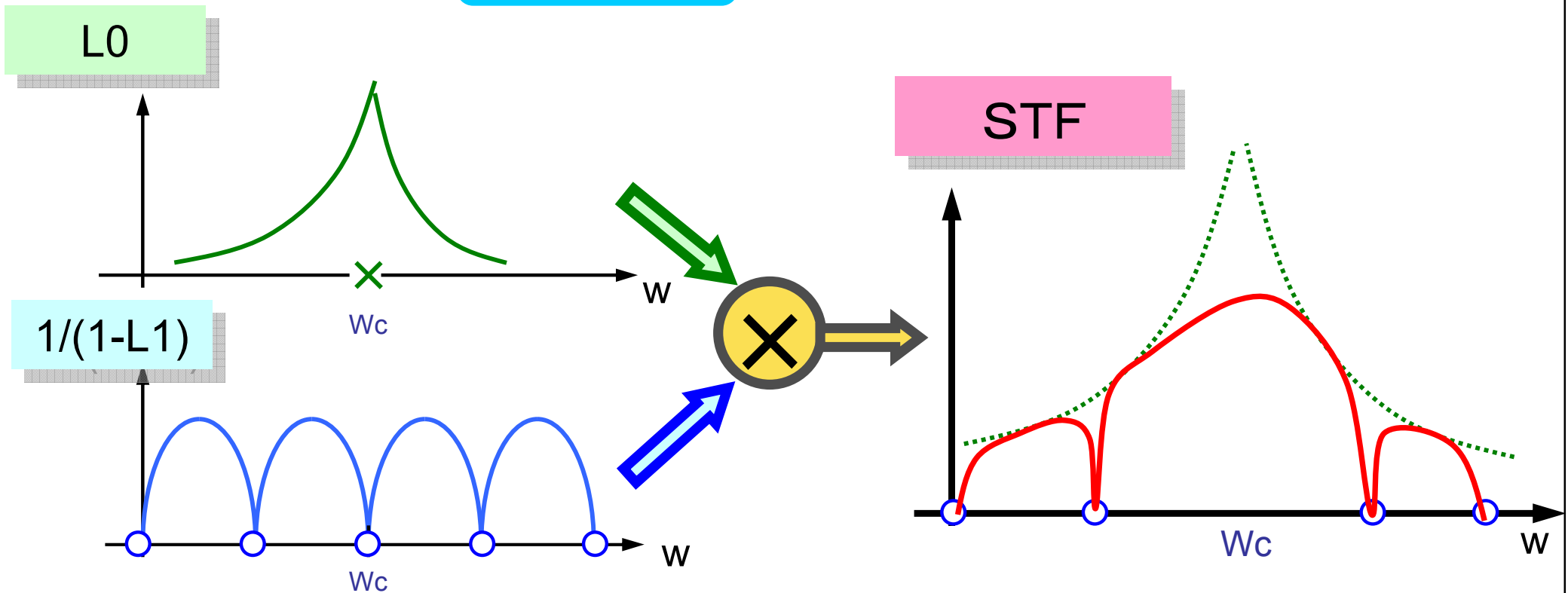
Outline

- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- ➡ ■ 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ループ遅延の補償
- まとめ

CT $\Delta \Sigma$ 変調器のSTF

$$STF = \frac{L_o(s)}{1 - L_1(z)}$$

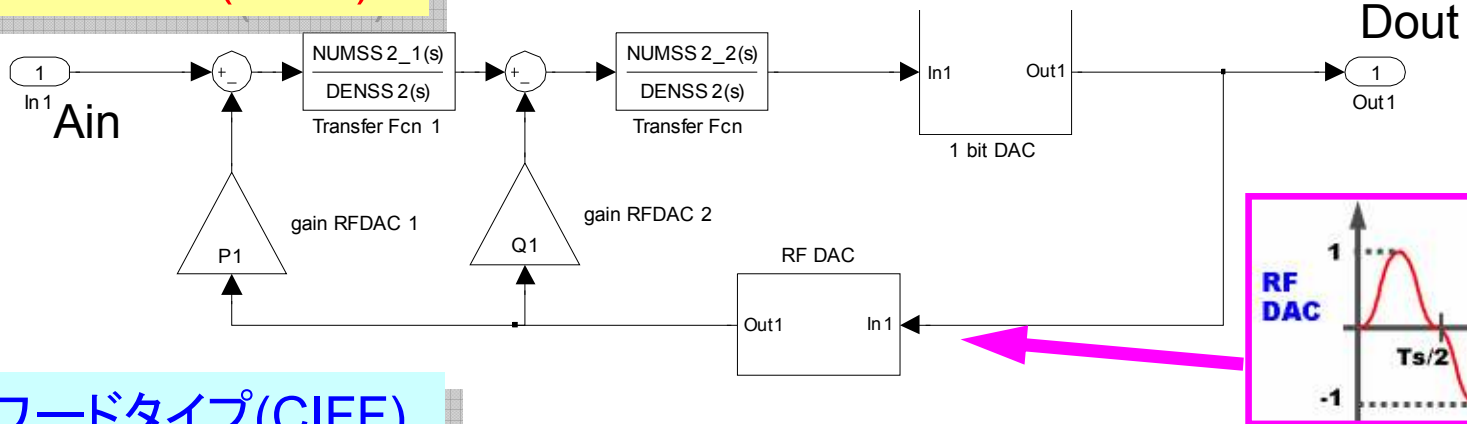
← s領域
← z領域



STF \Rightarrow L_0 の周波数特性に大きく依存

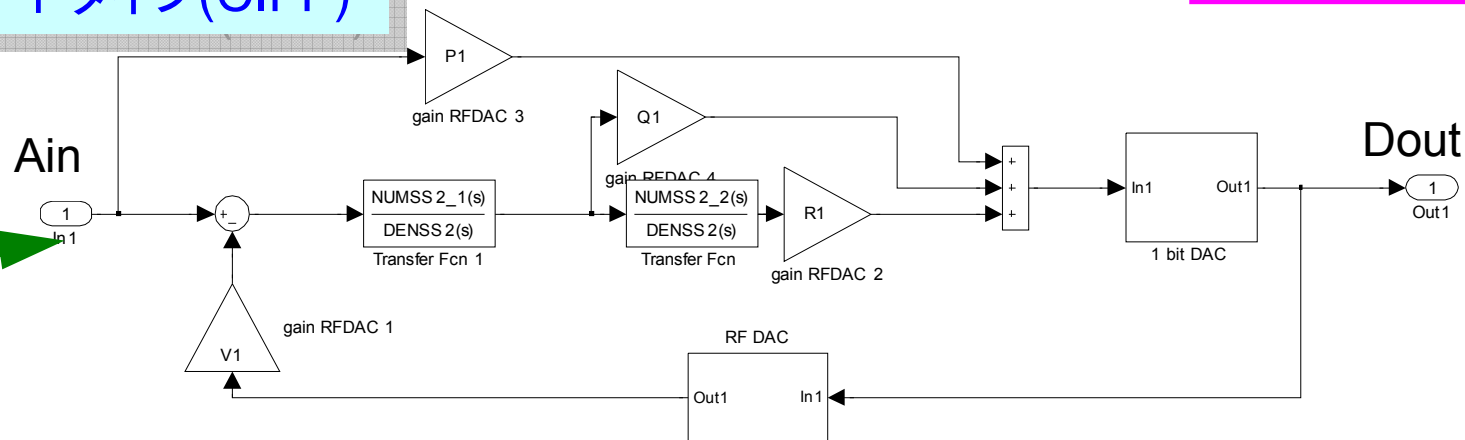
ΔΣ変調器のトポロジ

フィードバックタイプ(CIFB)

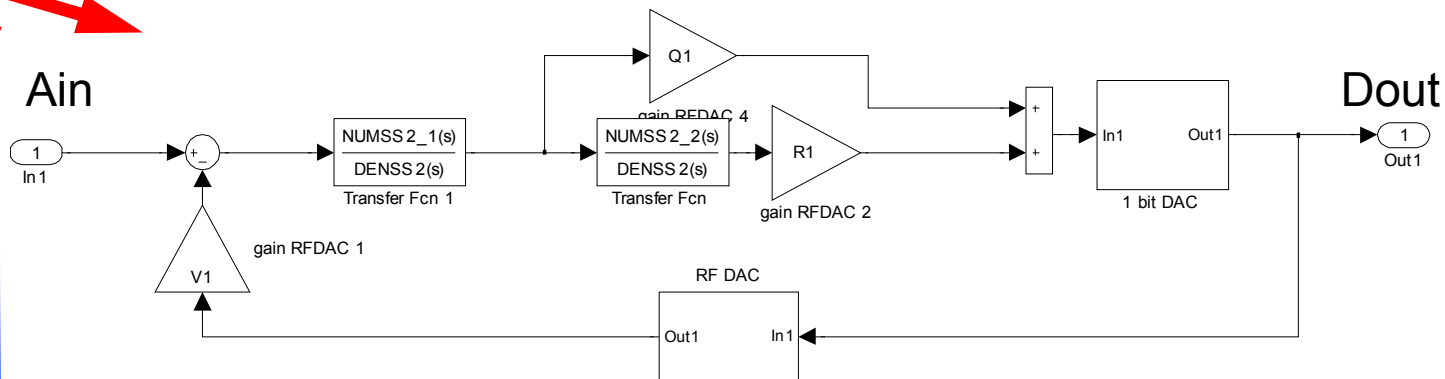


フィードフォワードタイプ(CIFF)

入力からのパスがある場合



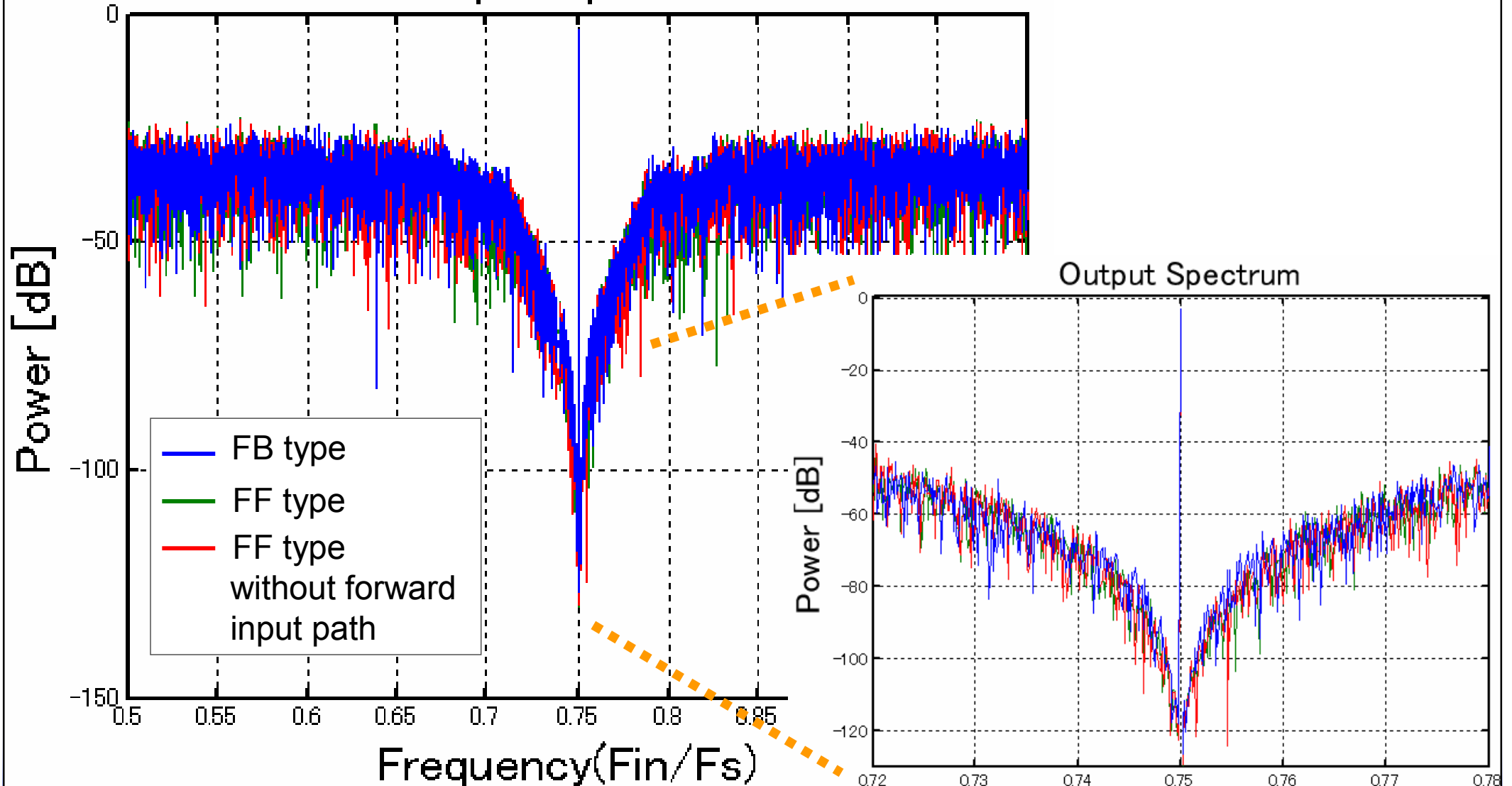
入力からのパスがない場合



出力パワースペクトラムのシミュレーション結果

各トポロジの変調器で同じ特性であることを確認

Output Spectrum

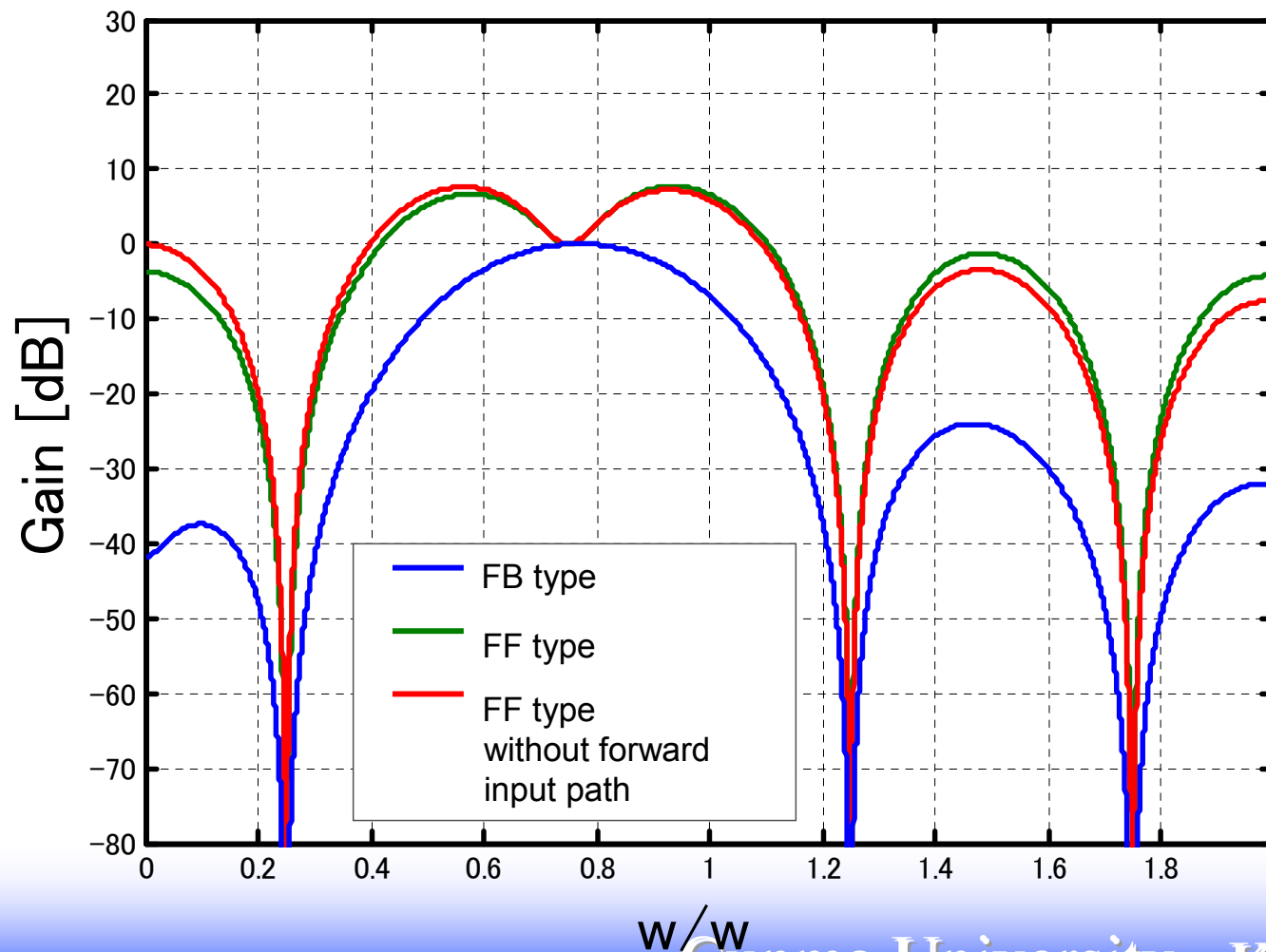


各トポロジの変調器のSTF

フィードフォワードタイプ

⇒STFのアンチエイリアシングフィルターの機能少ない

STF



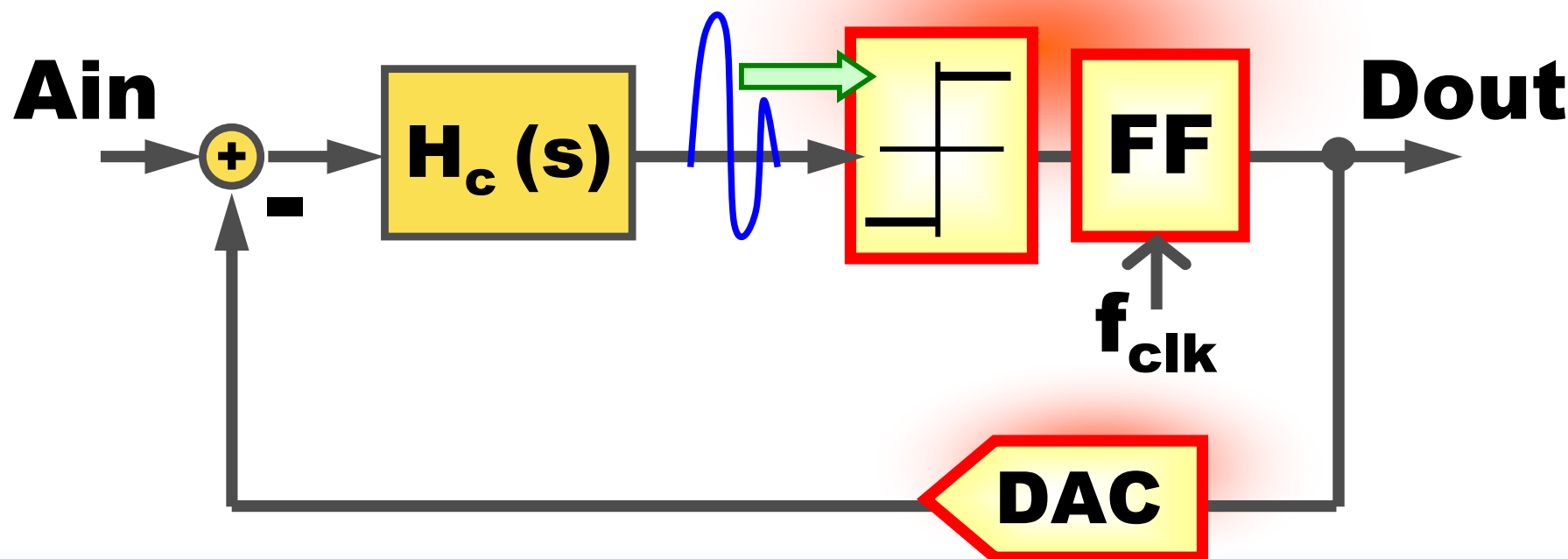
Outline

- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ➡ ■ ループ遅延の補償
- まとめ

ループ遅延 (Excess Loop Delay)

■ ADCとDACの間の遅延時間

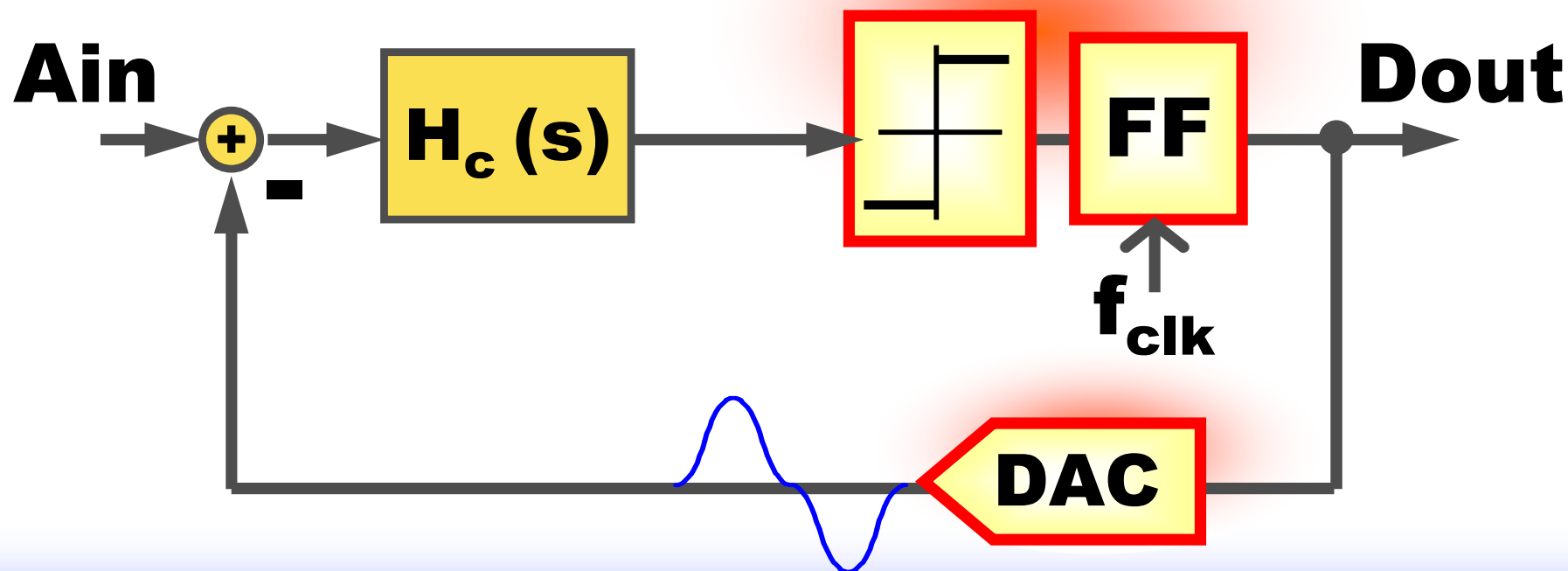
- コンパレータ、フリップフロップ、DACでの
トータルの遅延
- AD変換の精度劣化



ループ遅延 (Excess Loop Delay)

■ ADCとDACの間の遅延時間

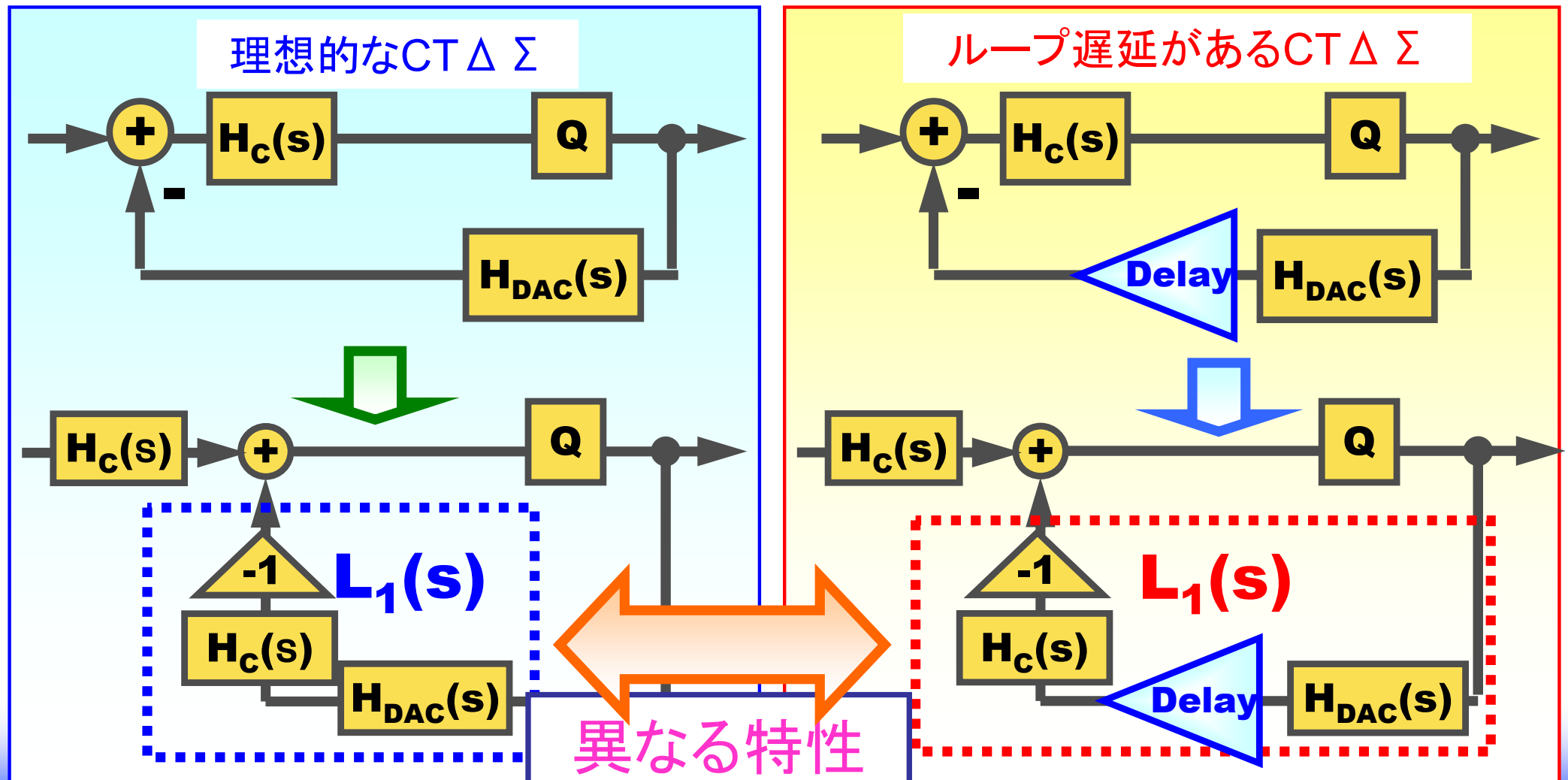
- コンパレータ、フリップフロップ、DACでのトータルの遅延
- AD変換の精度劣化



ループ遅延のノイズ伝達関数NTFへの影響

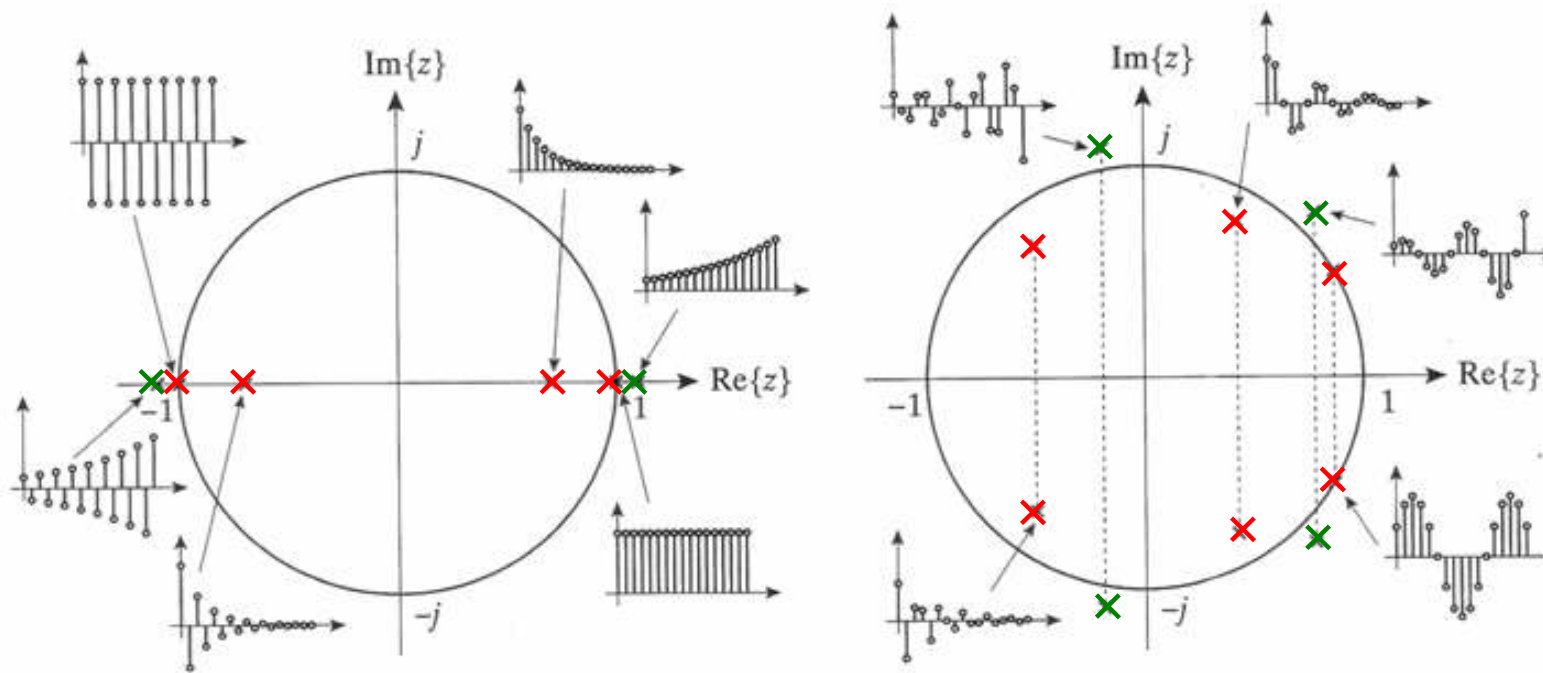
■ ループ遅延⇒L1の特性に影響

– NTFの特性⇒不安定



ノイズ伝達関数(NTF)の安定性

- 単位円の内側 → 安定 (収束)
- 単位円の外側 → 不安定 (発散)



実極の場合

複素極の場合

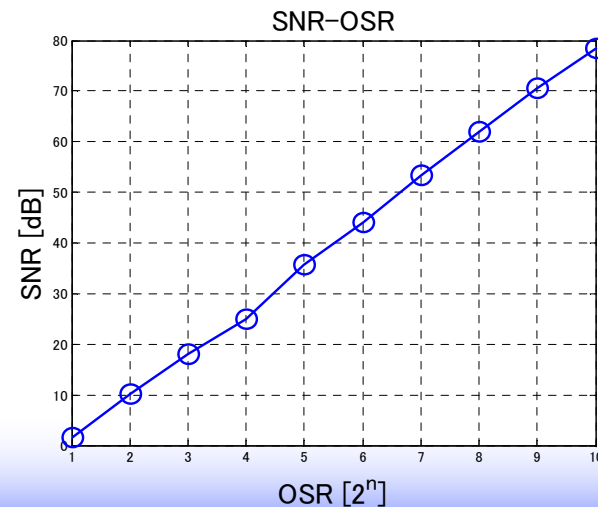
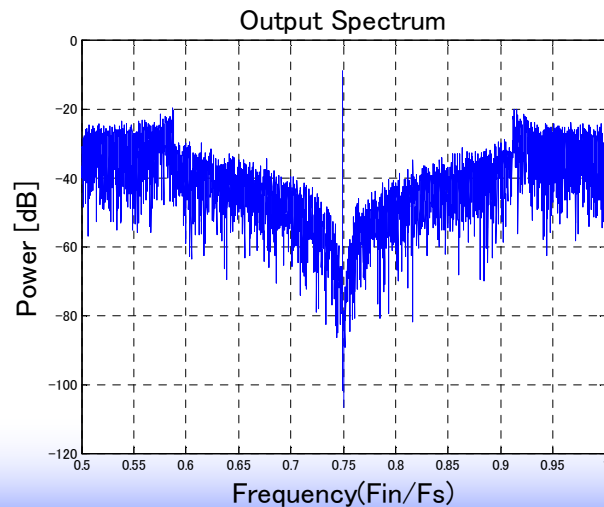
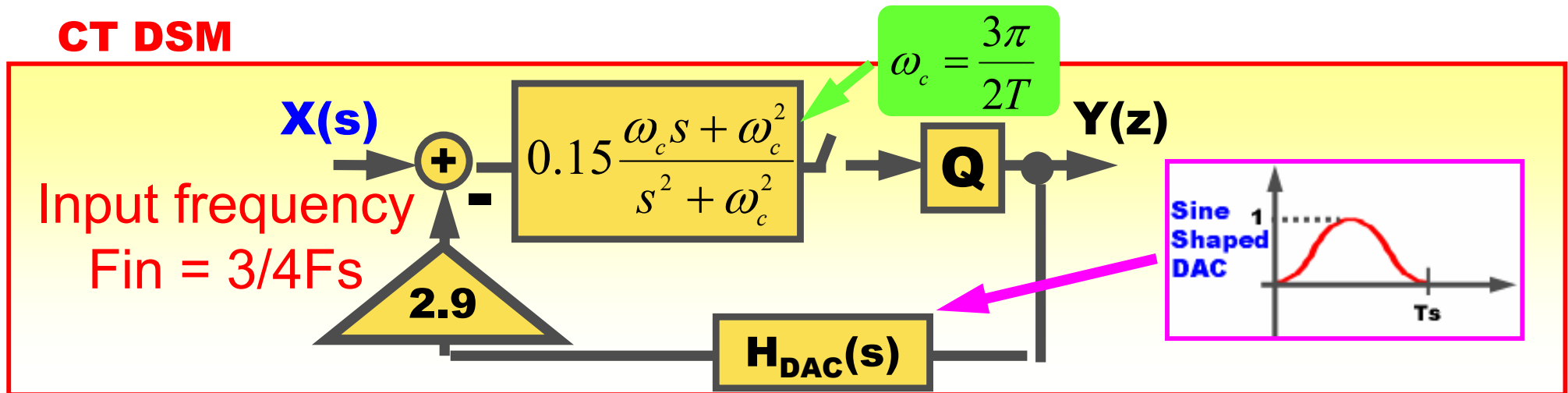
出典: 東工大 松澤先生の資料より

http://www.ssc.pe.titech.ac.jp/materials/TMC_2005_4.pdf

内部DACにSine-Shaped DACを使った 1次 サブサンプリング CTBP $\Delta\Sigma$

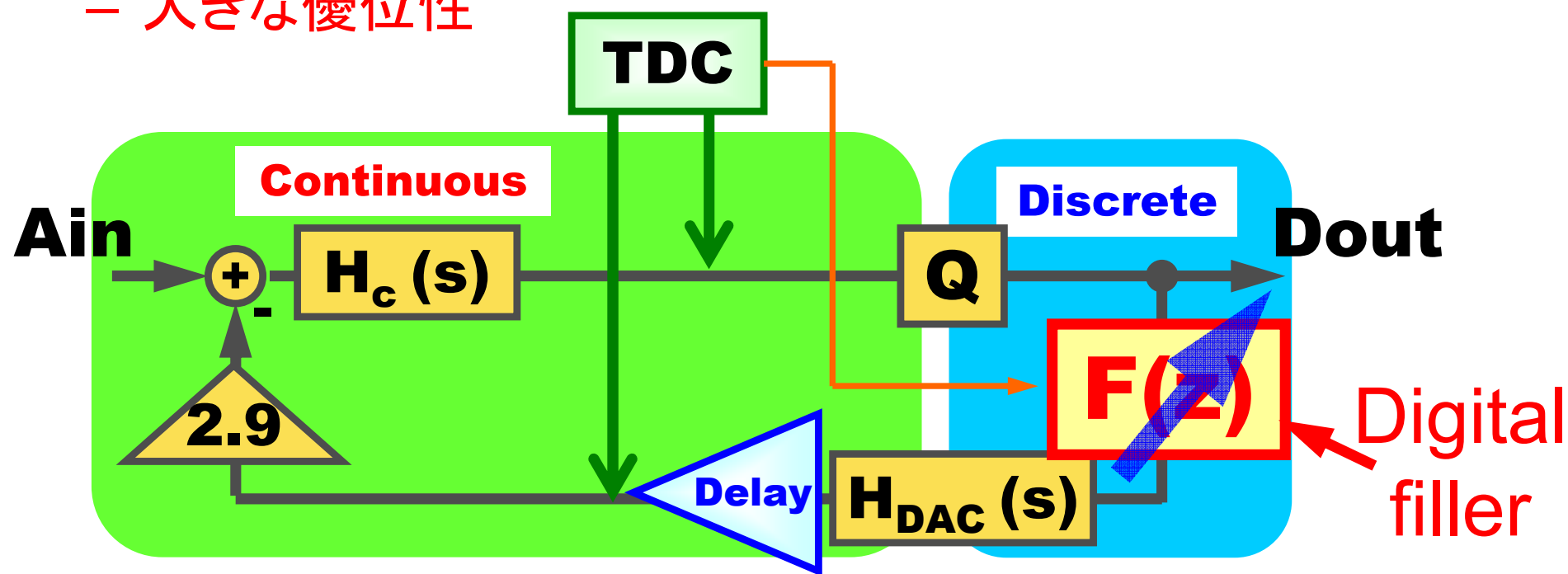
- ループ遅延補償の効果を確認するため用いた変調器

CT DSM



デジタルフィルタを用いた補償

- TDCを用いてループ遅延をリアルタイムに測定
 - デジタルフィルタの伝達関数を調整
- アナログ的な調整がない
 - 大きな優位性

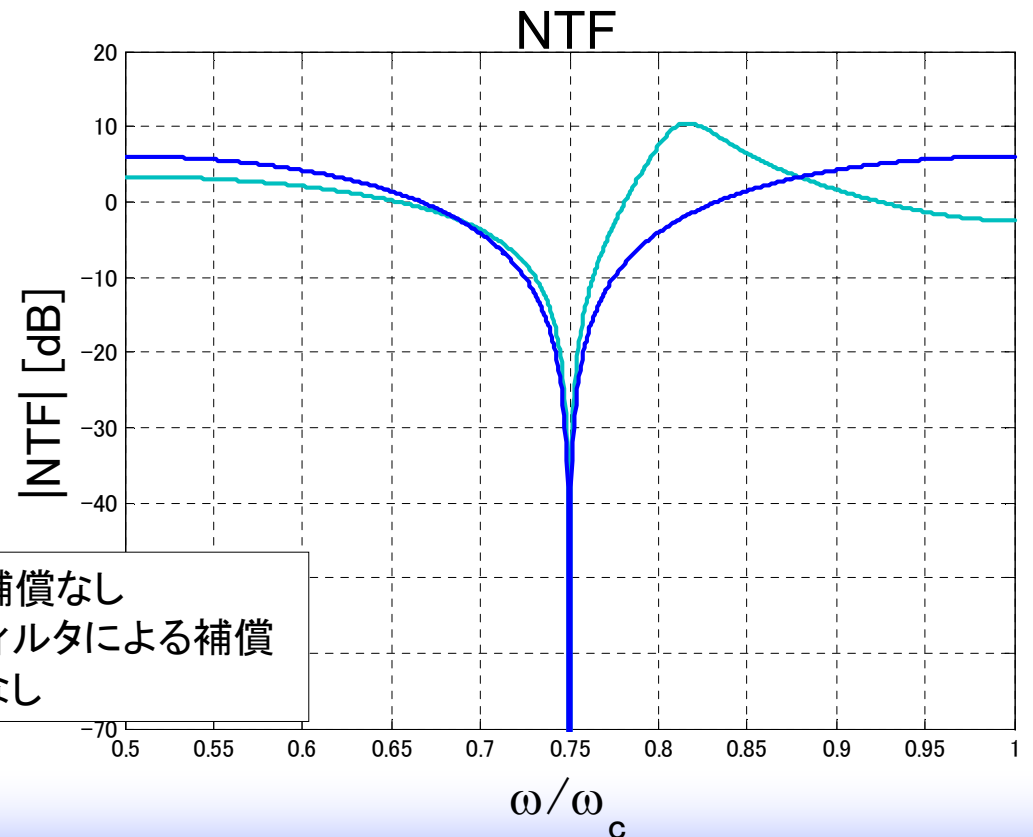
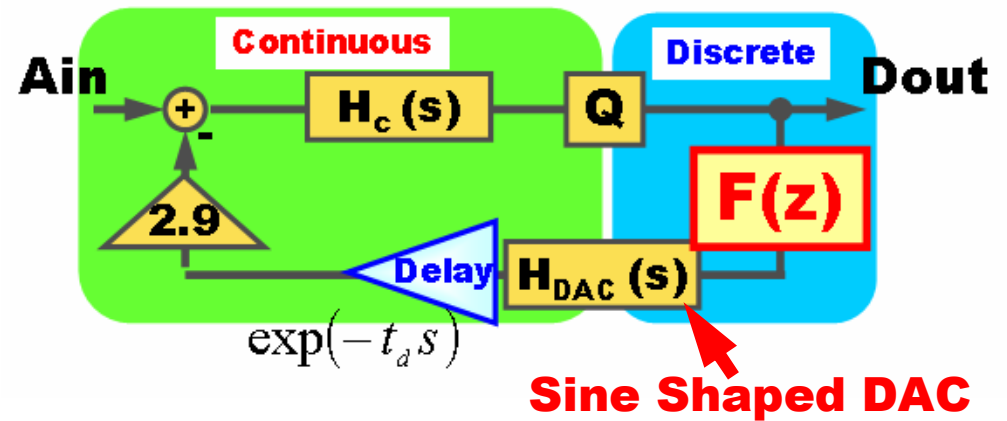
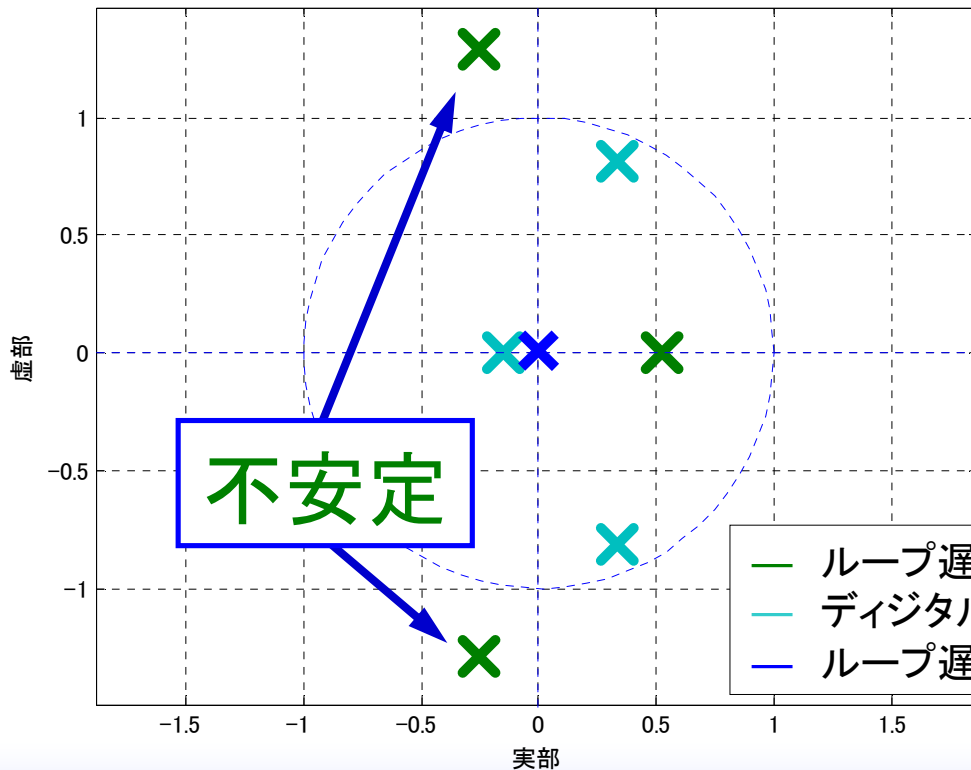


ループ遅延がサンプリング時間の90%のNTF

付加したデジタル
フィルタの伝達関数

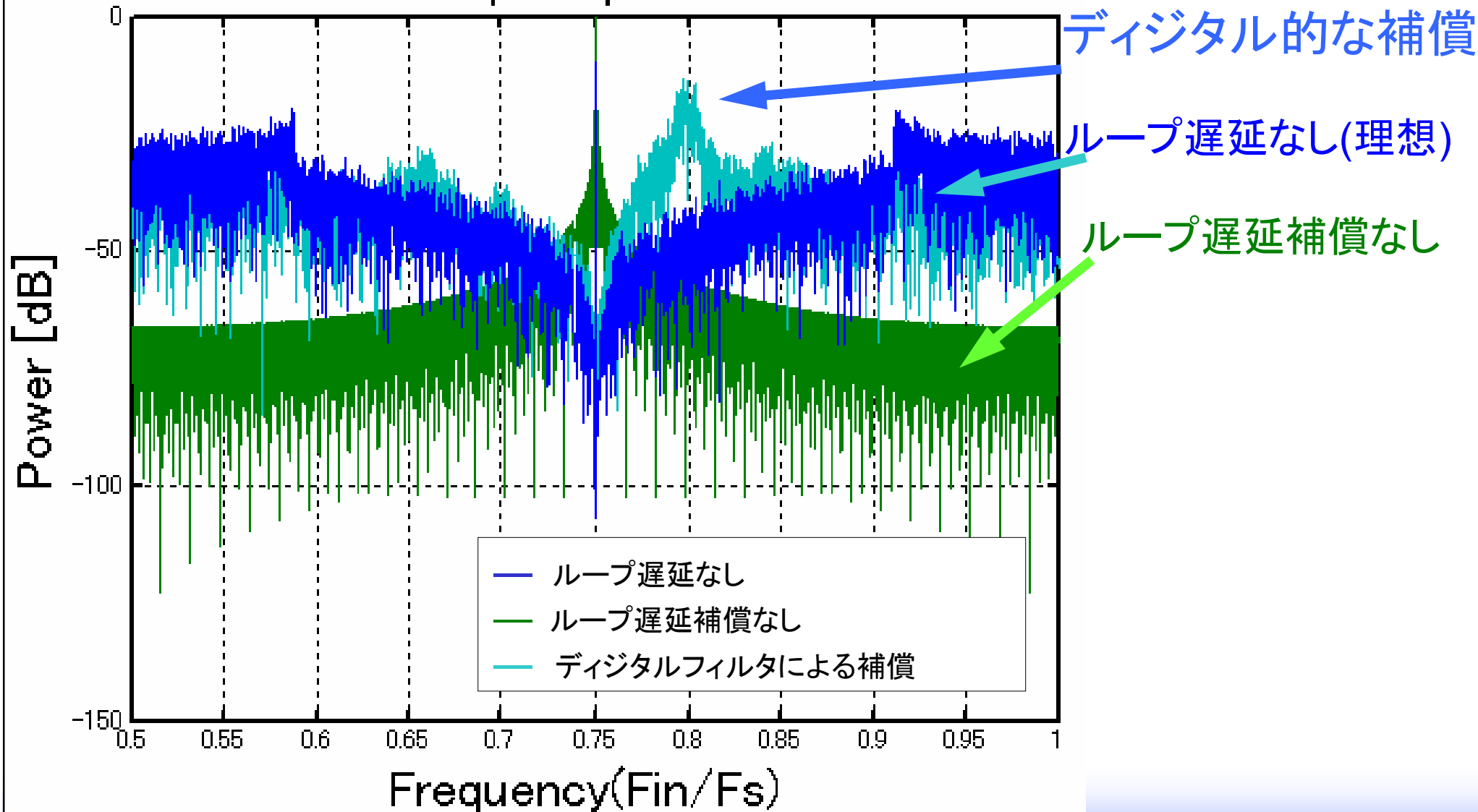
$$F(z) = \frac{-1.5z^{-1}}{-1.1z^{-1} + 2.1}$$

Pole of NTF

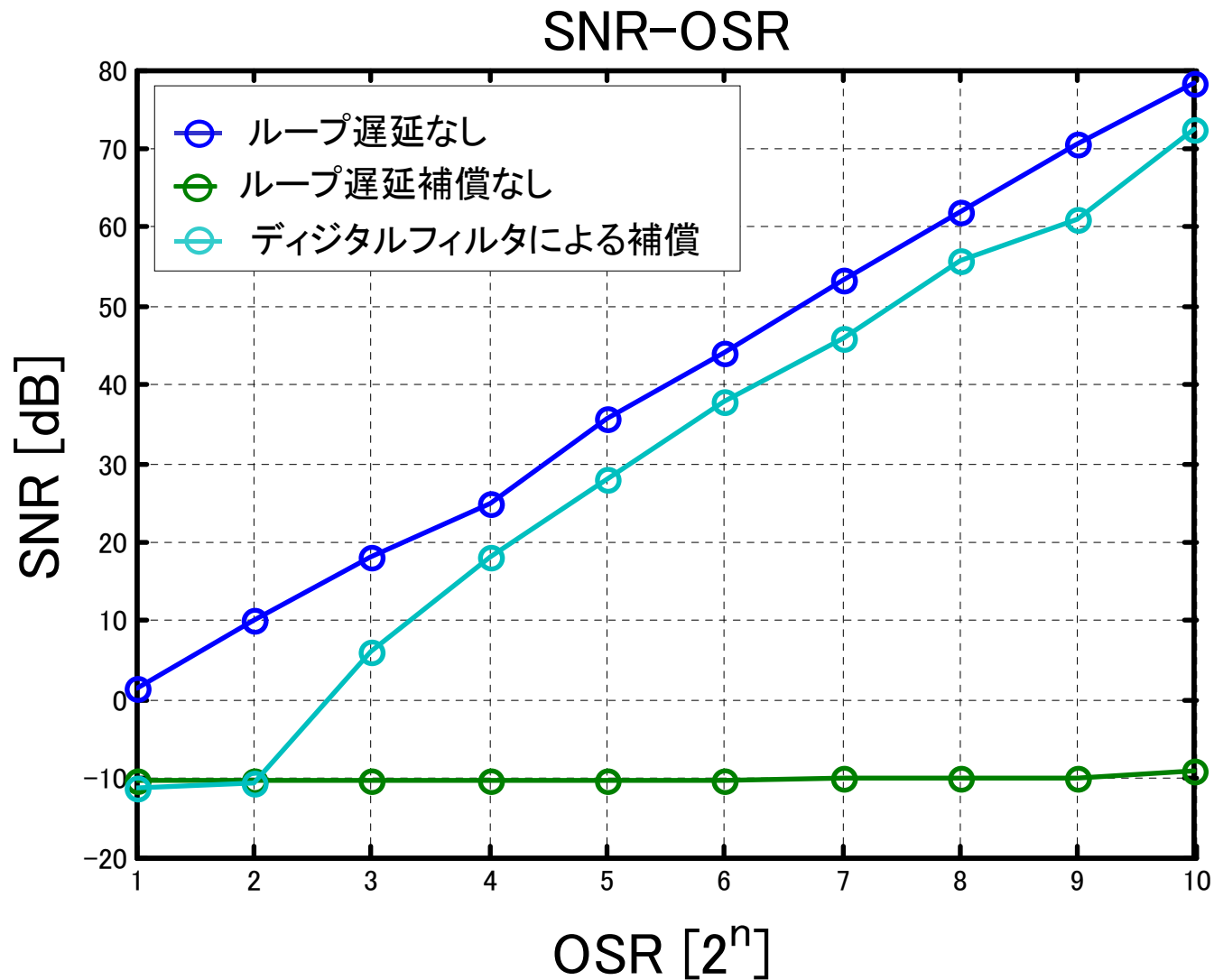


出力パワースペクトラム @ループ遅延=90%

Output Spectrum



SNR-OSR @ループ遅延=90%



■ ループ遅延=90%における効果を確認

Outline

- 研究背景と目的
- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - $\Delta \Sigma$ 変調器
 - 変調器内部DAC
 - 離散時間-連続時間変換による設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
- ループ遅延の補償

 ■ まとめ

まとめ

- RFサンプリング $\Delta \Sigma$ AD変調器の設計
 - ⇒ RF DACを用いたサブサンプリング動作のためのCT-DT変換を導出
 - ⇒ 提案CT $\Delta \Sigma$ を対応するDT $\Delta \Sigma$ と同じ特性で設計
- 信号伝達関数のアンチエイリアシング特性の解析
 - ⇒ 異なる2つの変調器トポロジで解析
- ループ遅延の補償によるAD変換の精度の改善
 - ⇒ ループ遅延のリアルタイム補償法を提案
 - ⇒ ループ遅延が90%でも効果があることを確認