

発表内容

ナノCMOS時代のアナログ回路 私論

マルチバンドパス AD変調器

連続時間バンドパス AD変調器

- RF サンプリングを目指して

複素バンドパス AD変調器

まとめ

マルチバンドパス 変調器用 DWAアルゴリズムとその応用

群馬大学大学院

工学研究科 電気電子工学専攻

元澤篤史 萩原広之 山田佳央

小林春夫 小室貴紀 傘昊

発表内容

- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

発表内容

- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

研究背景

■ AD変調器

- 微細CMOSに向いている
- アナログ最小の構成



➡ 携帯電話、無線LAN、Blue Tooth、地上デジタルテレビ等

- 小面積
- 低消費電力
- 低コスト
- 高精度

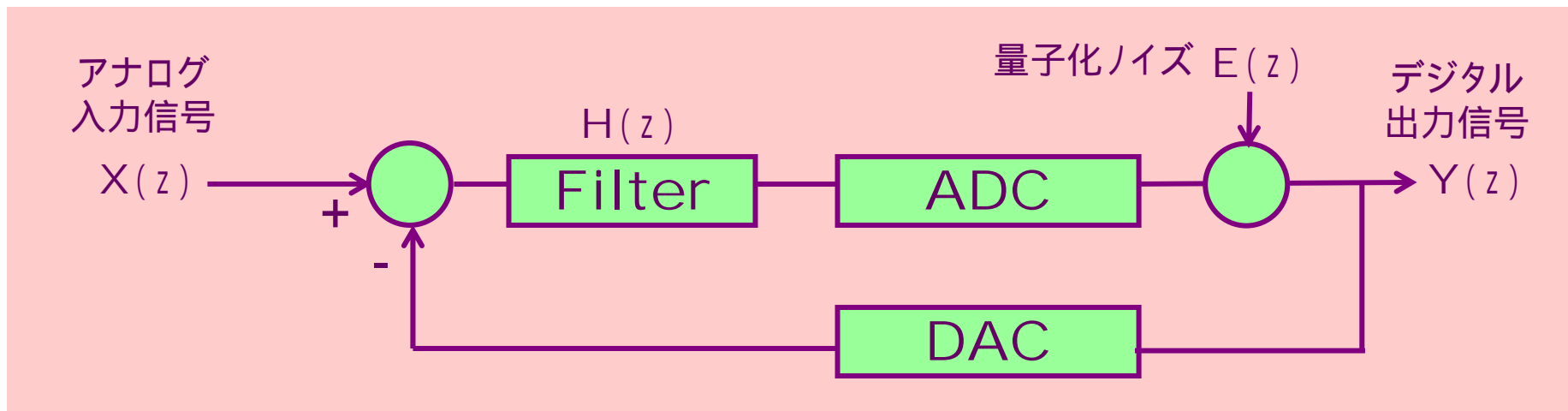
研究の目的

- 研究例の少ないマルチバンドパス変調器の研究する
- 新規性のあるフィードフォワード構成の研究を深める
- 両者を用いた新規回路の実現
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの開発
- A/D変換技術の更なる発展

発表内容

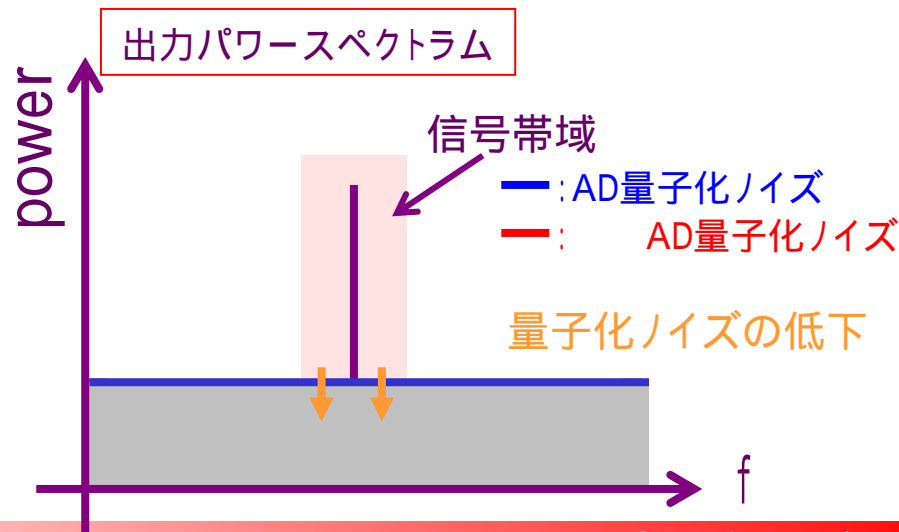
- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

AD変調器

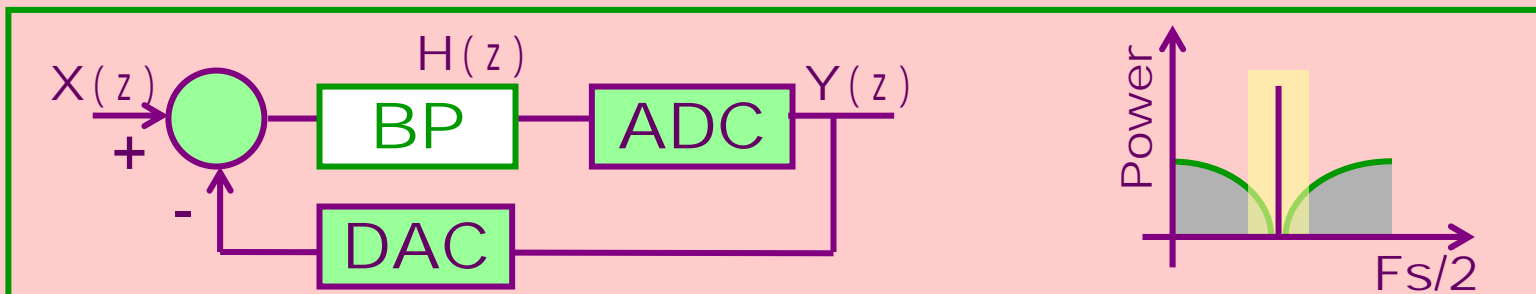
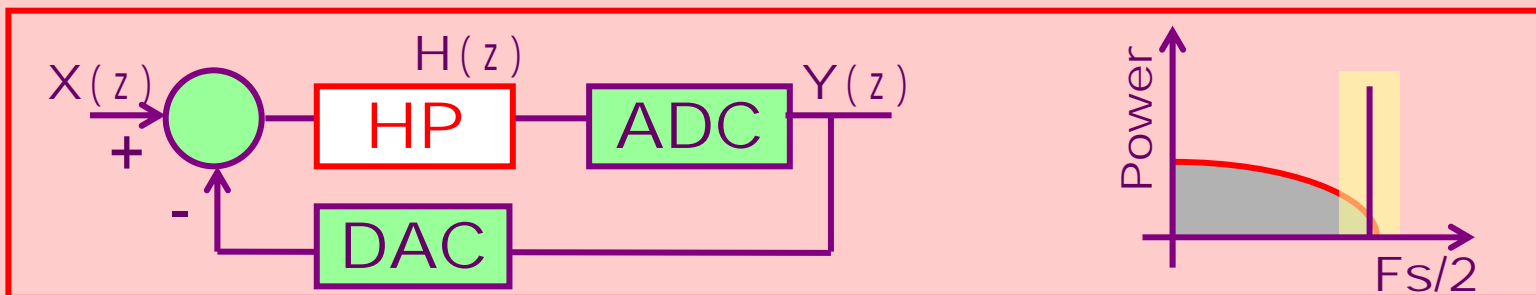
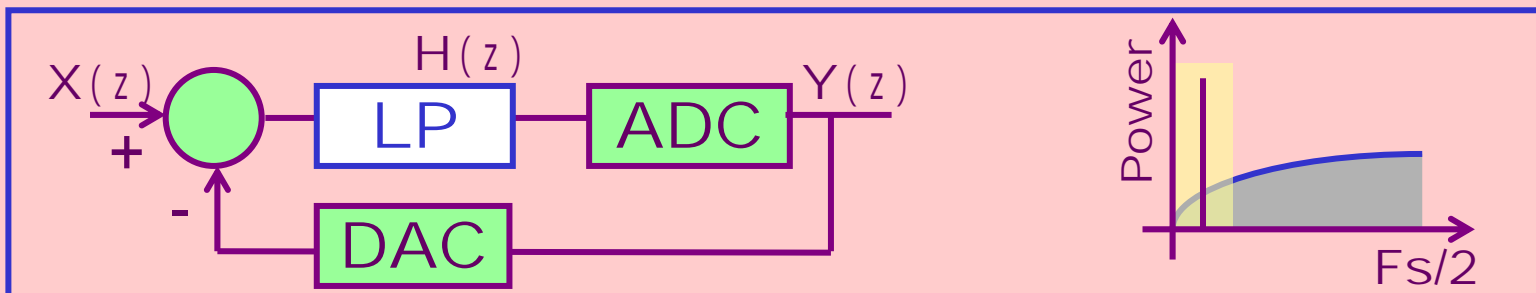


$$Y(z) = \underbrace{\frac{H(z)}{1+H(z)}}_{\text{STF}} X(z) + \underbrace{\frac{1}{1+H(z)}}_{\text{NTF}} E(z)$$

↓ 1
↓ 0



既存の AD変調器



マルチバンドパス

AD変調器

アナログ
入力信号

$X(z)$

$H(z)$



ADC

量子化ノイズ $E(z)$

デジタル出力信号

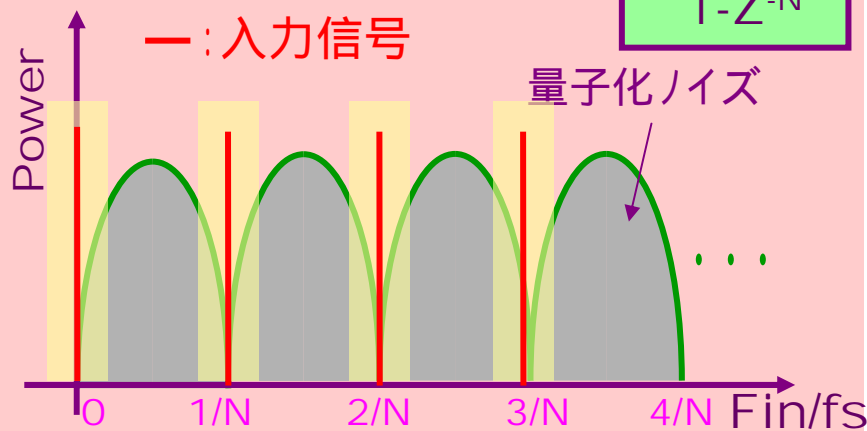
$Y(z)$

DAC

タイプ

$H(z)$

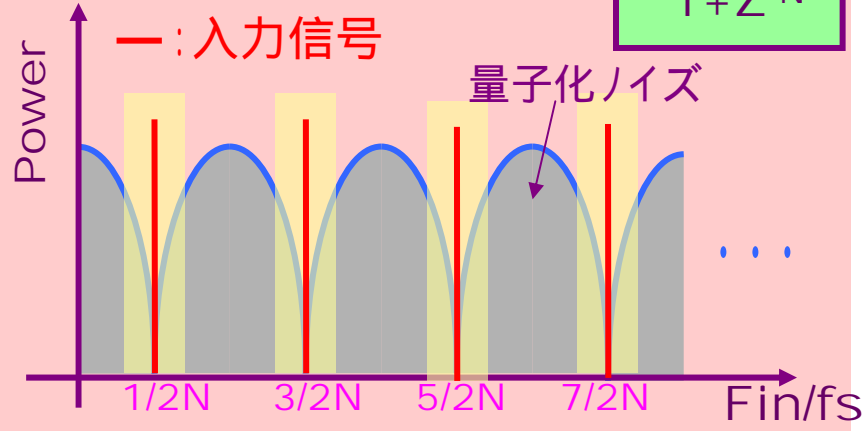
$$\frac{z^{-N}}{1-z^{-N}}$$



タイプ

$H(z)$

$$\frac{-z^{-N}}{1+z^{-N}}$$



- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- 高調波測定

発表内容

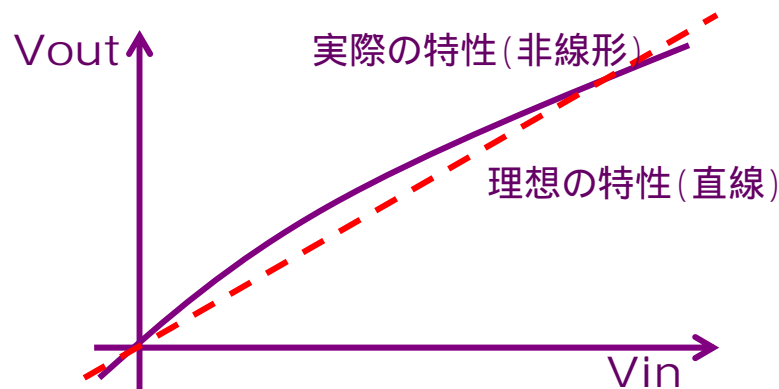
- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

リニア・アナログ回路と非線形性

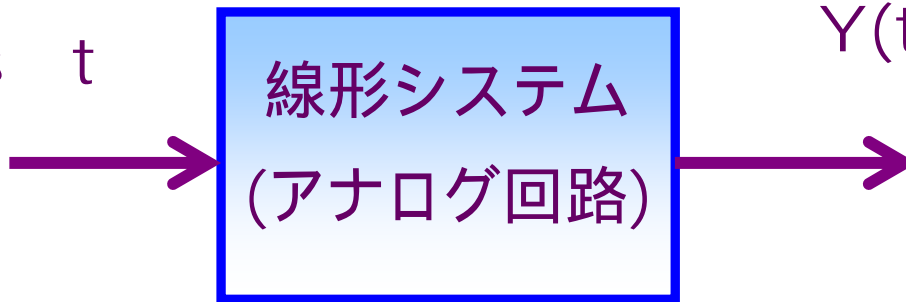
リニア・アナログ回路
(アンプ、DA変換器、スイッチ等)



非線形性により歪みが生じる



入力
 $X(t) = A \cos t$



出力

$$Y(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \vdots$$

高調波

高調波歪み測定への応用の提案1



高調波

出力: $Y(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots$

基本波

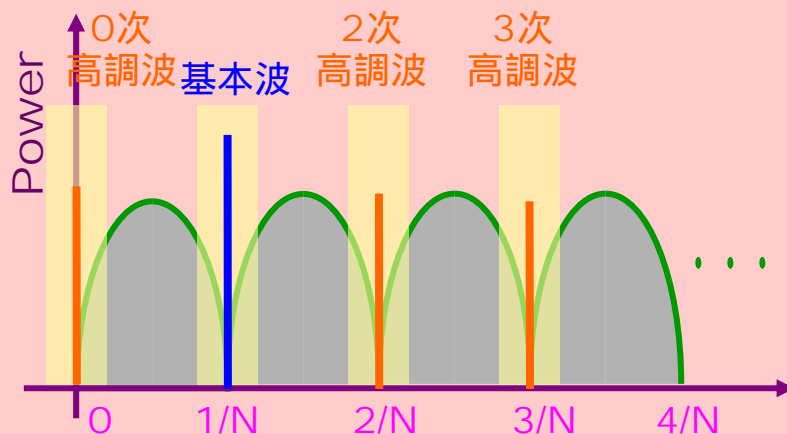
- 基本波とともに
0次、2次、3次、4次...の高調波を高精度にAD変換
- **タイプ** のマルチバンドパス 変調器を使用し測定

内部フィルタ

$$\frac{Z^{-N}}{1 - Z^{-N}}$$

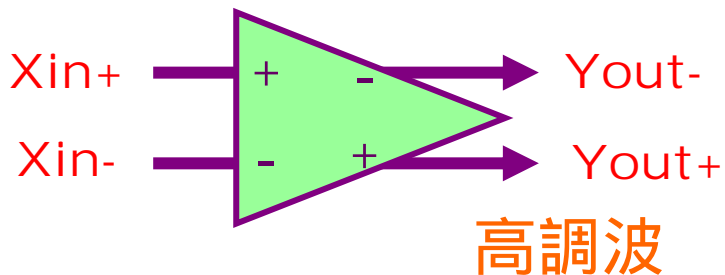
タイプ

— : 入力信号
— : 高調波



高調波歪み測定への応用の提案2

■ 完全差動回路



出力: $Y(t) = A_1 \cos t + A_3 \cos 3t + A_5 \cos 5t + \dots$

基本波

- 基本波とともに 3次、5次、7次、…の高調波を高精度にAD変換

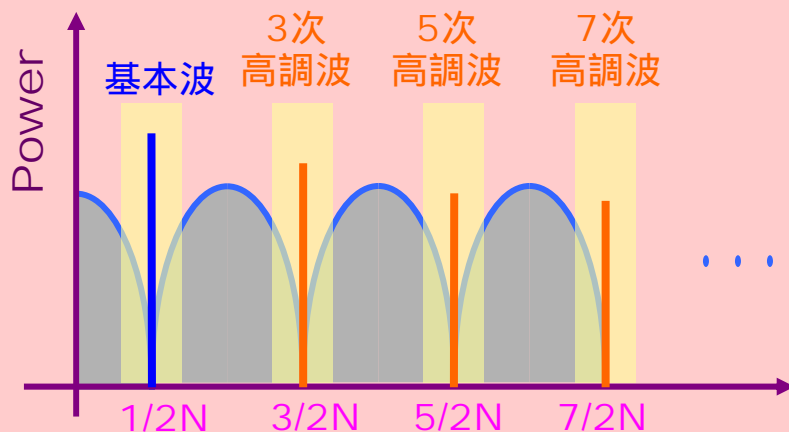
- タイプ のマルチバンドパス 変調器を使用し測定

内部フィルタ

$$\frac{-Z^{-N}}{1+Z^{-N}}$$

タイプ

- : 入力信号
- : 高調波



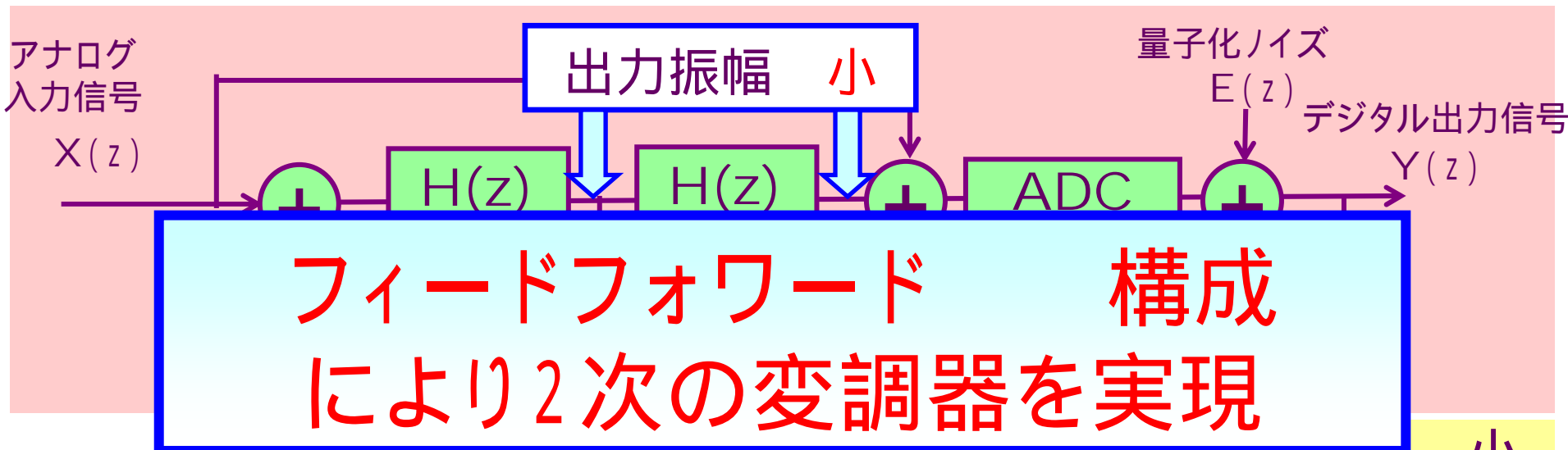
発表内容

- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

フィードフォワード

AD変調器

入力、積分器出力をフィードフォワードする構成



$$STF = 1$$

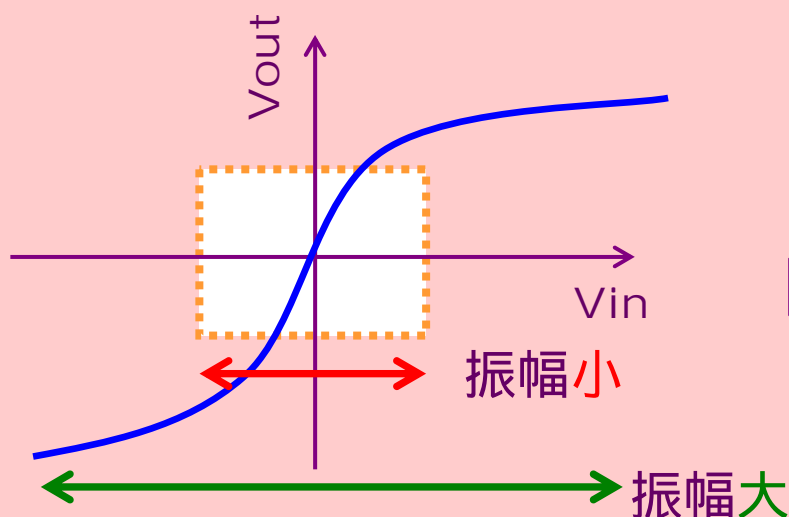
$$NTF = \frac{1}{H^2(z) + H(z) + 1}$$

出力振幅 小

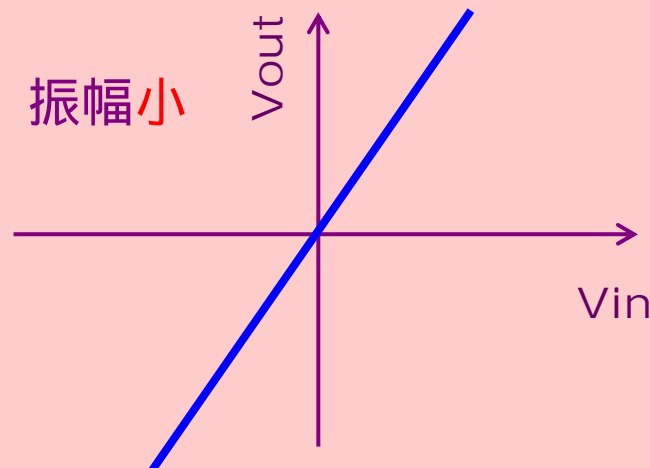
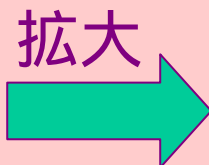


- 積分器の線形性向上
- 低消費電力化

積分器の線形性の向上



非線形特性



線形特性

フィードフォワード では積分器出力振幅 小

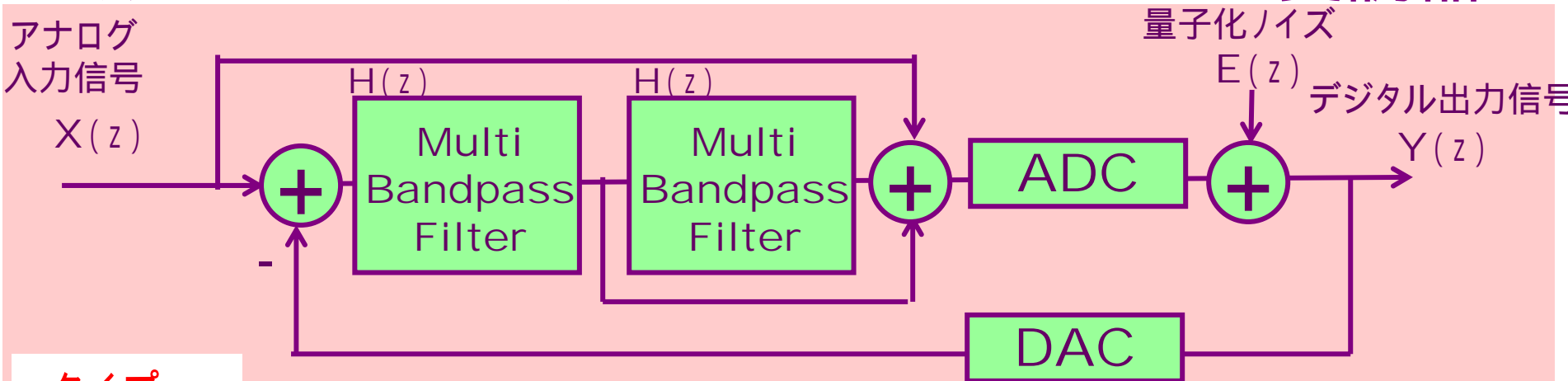


- 高精度
- 低消費電力化
(アンプの振幅 小)

タイプ N=8

マルチバンドパス・フィードフォワード

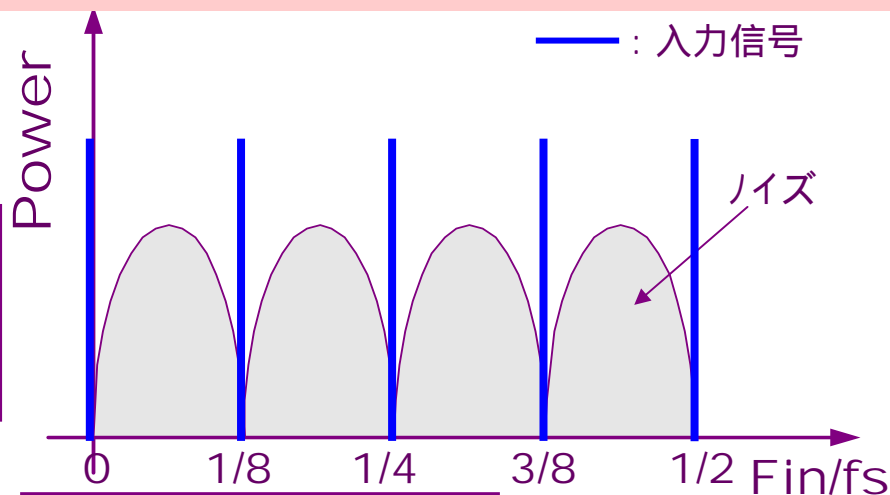
変調器



タイプ

$H(z)$

$$\frac{Z^{-8}}{1-Z^{-8}}$$



DCを含む

$$STF = Z^{-8}$$

$$NTF = (1-Z^{-8})^2$$

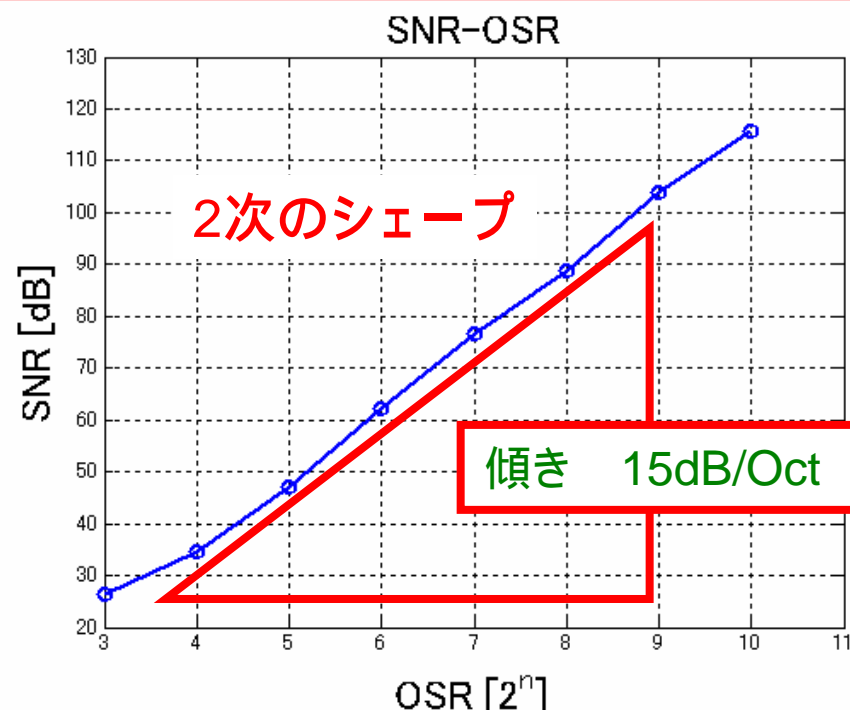
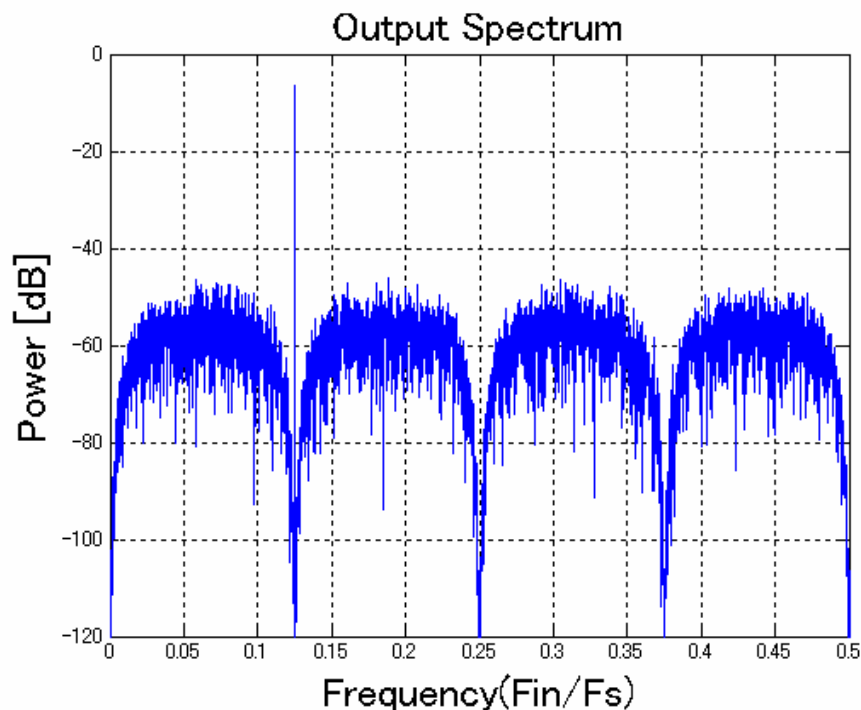
中心周波数はFsの

0, 1/8, 1/4, 3/8, 1/2

タイプ N=8

マルチバンドパス・フィードフォワード

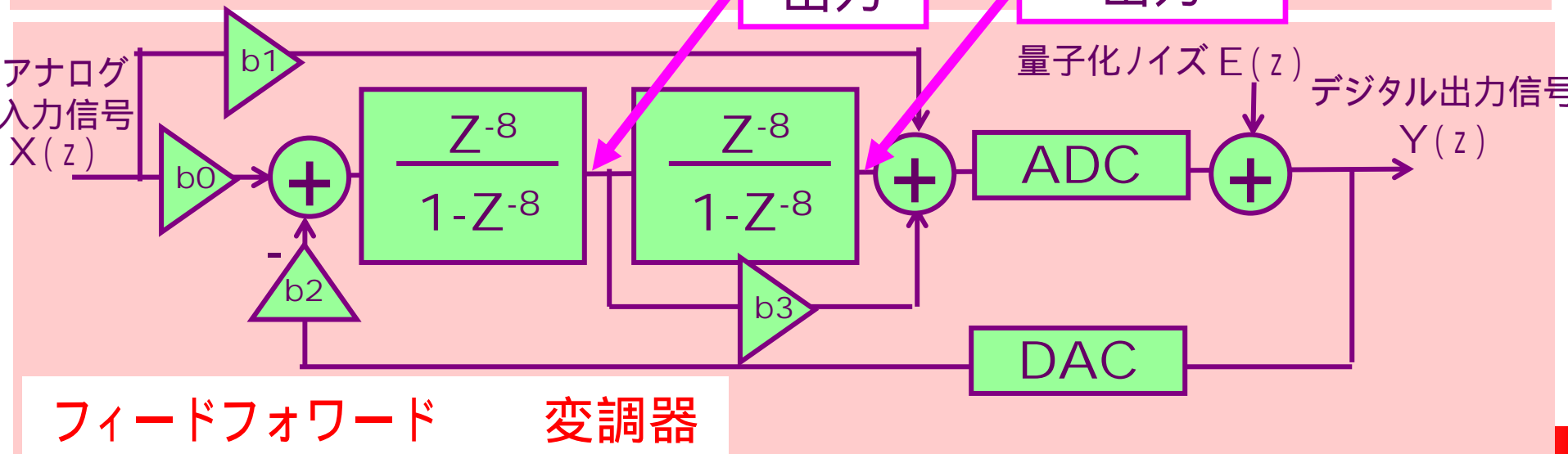
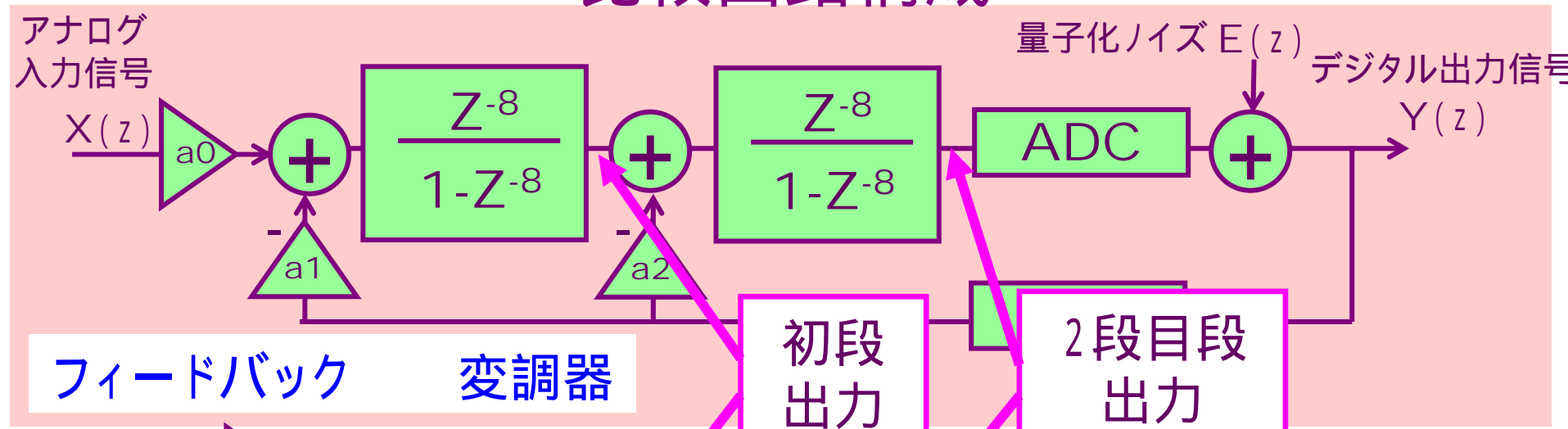
変調器



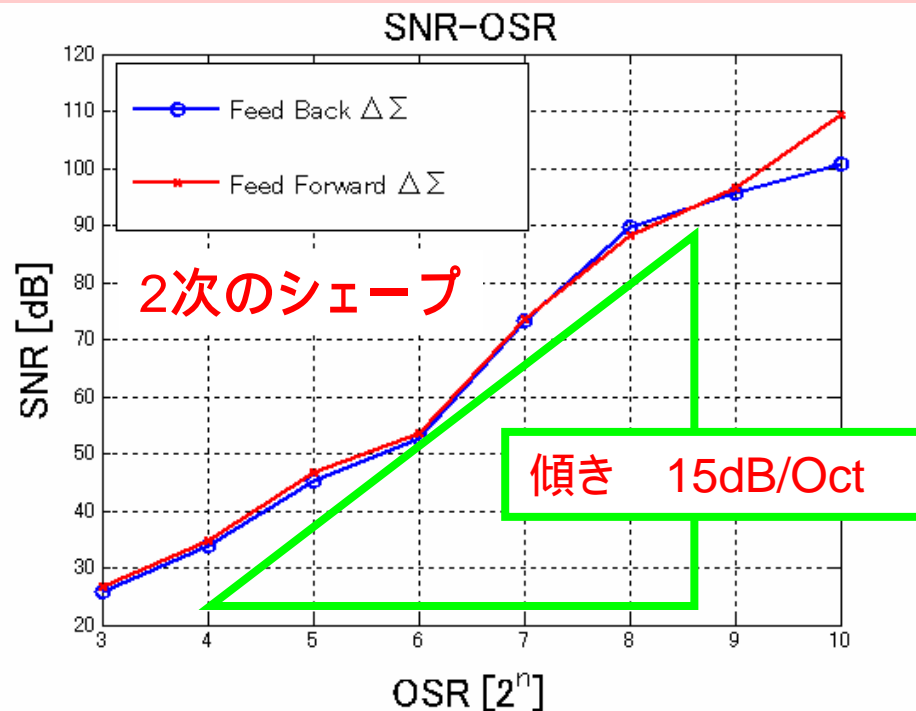
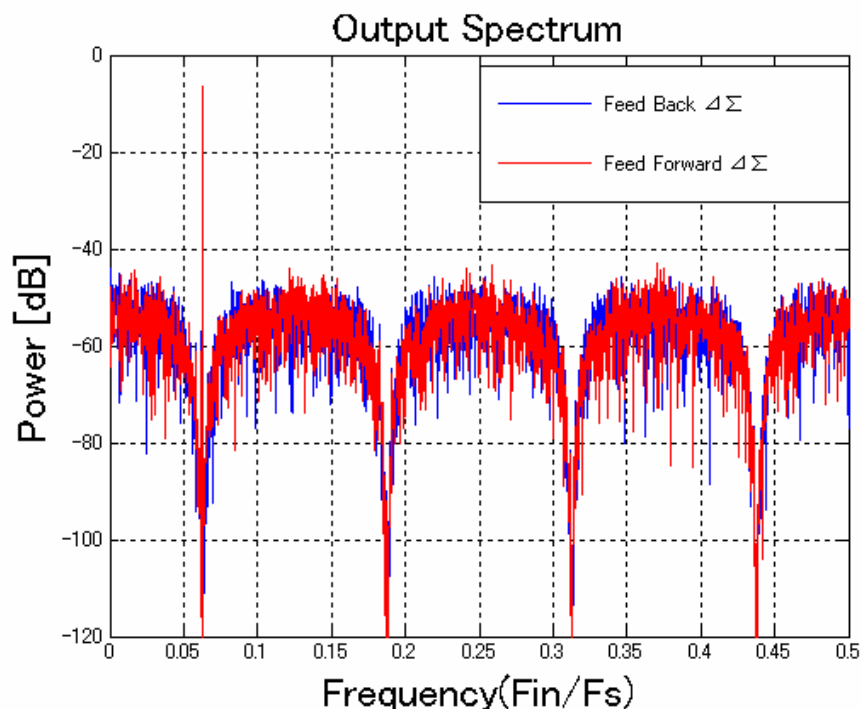
シミュレーションによりマルチバンドパス
フィードフォワード AD変調器の動作を確認

マルチバンドパス・タイプ $_N=8$

比較回路構成



マルチバンドパス 変調器 スペクトラム及びSNR



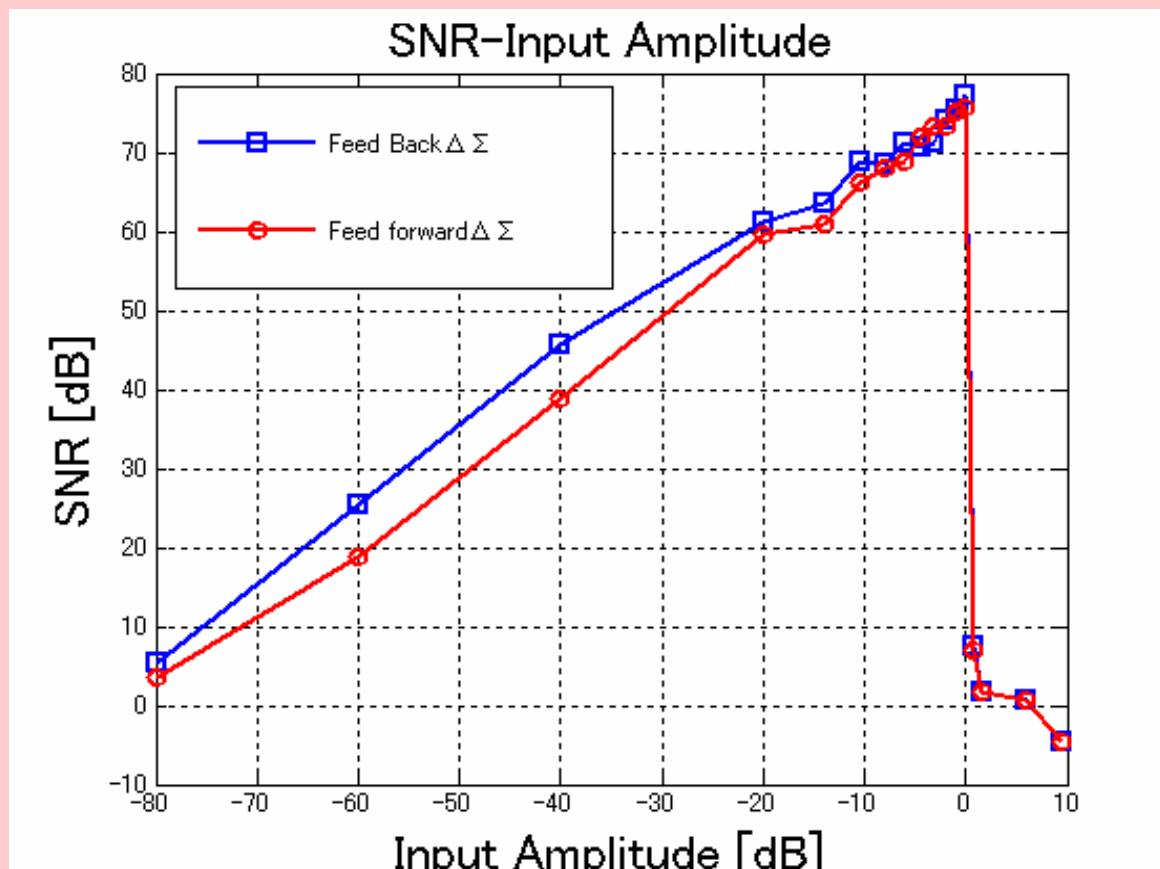
同等のSNRであることを確認

SNR-アナログ入力 V_{in}

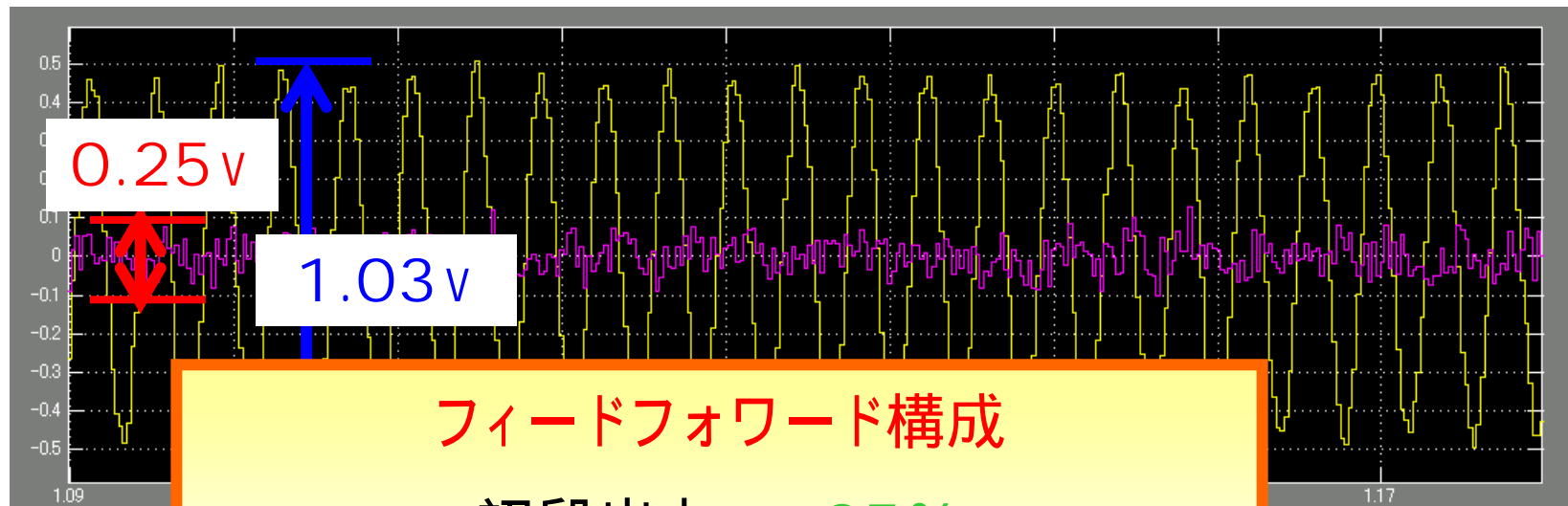
OSR = 128

でシミュレーション

同等の精度であることを確認



積分器出力振幅の比較

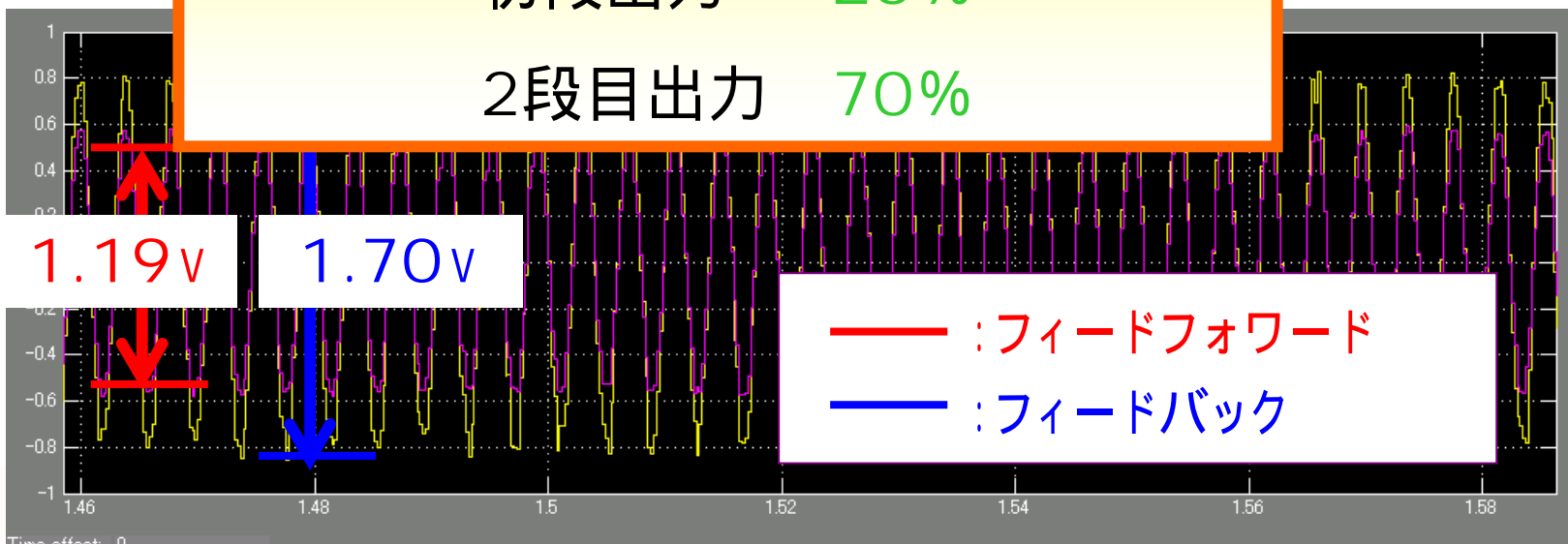


初段

フィードフォワード構成

初段出力 25%

2段目出力 70%



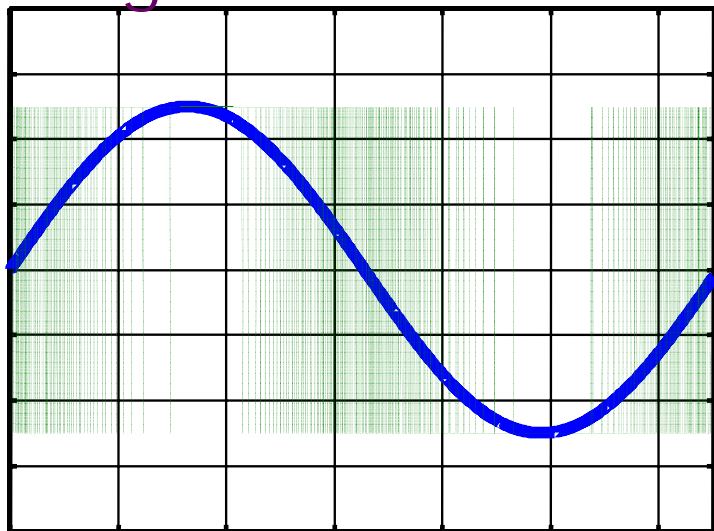
2段目

発表内容

- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

変調器内のADC/DAC

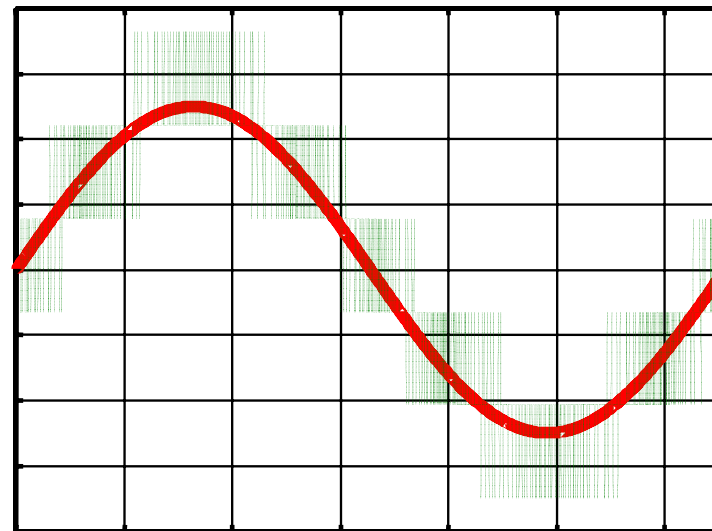
Single-Bit



■ シングルビット

- 高次フィルタが必要
(消費電力 大)

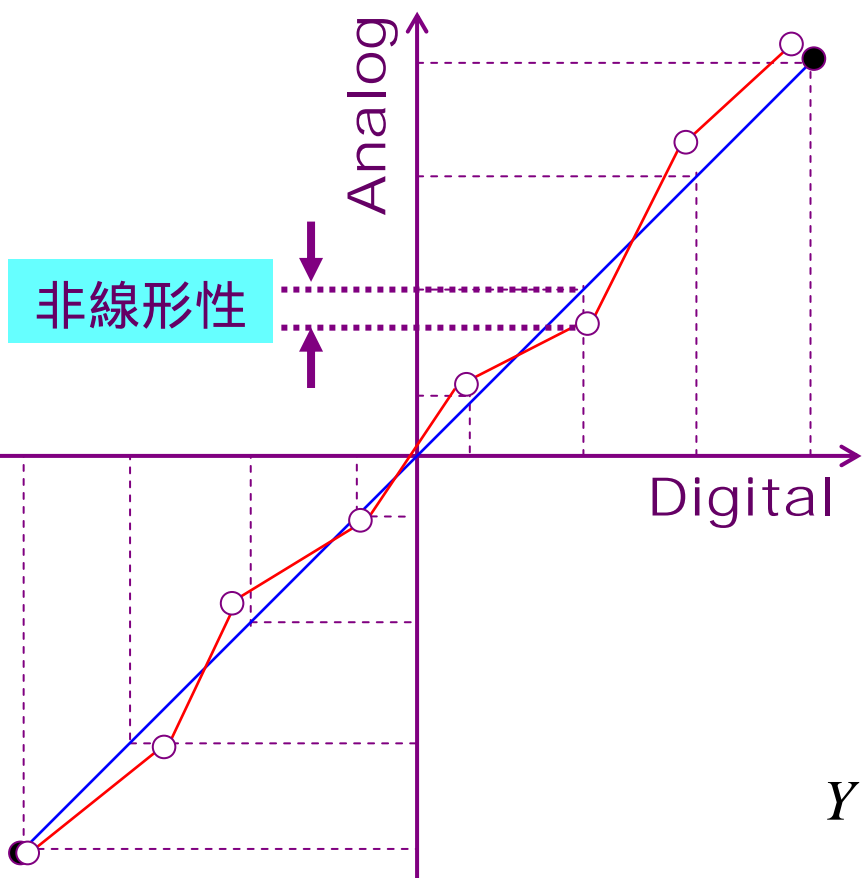
Multi-Bit



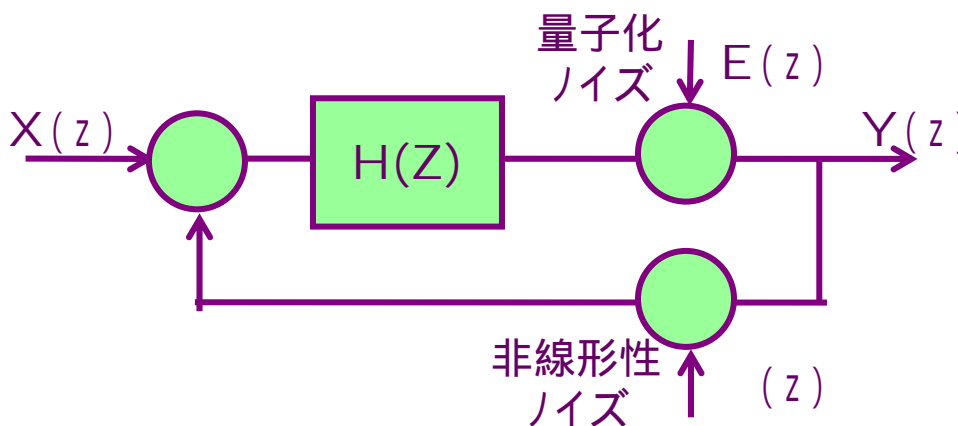
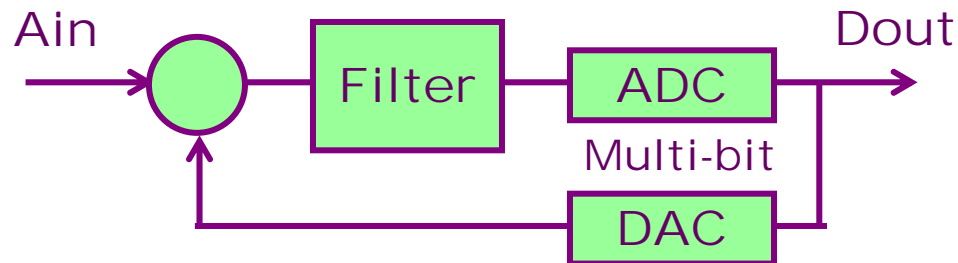
■ マルチビット

- 低次フィルタで高精度(低消費電力)
- アンプのスルーレート緩和(低消費電力)
- マルチビットDACの非線形性が問題

マルチビットDACの非線形性



● : Single-bit Output
○ : Multi-bit Output



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

非線形ノイズ $\delta(z)$ がシェープされない

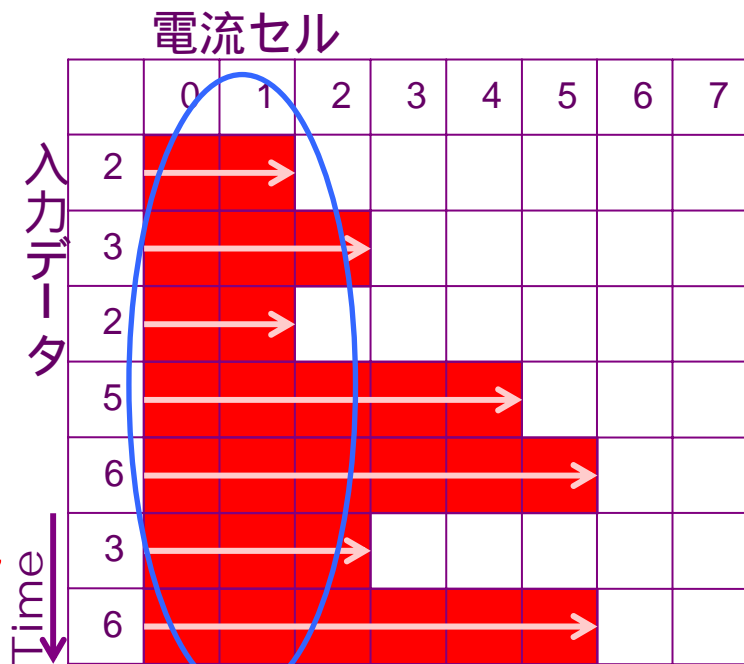
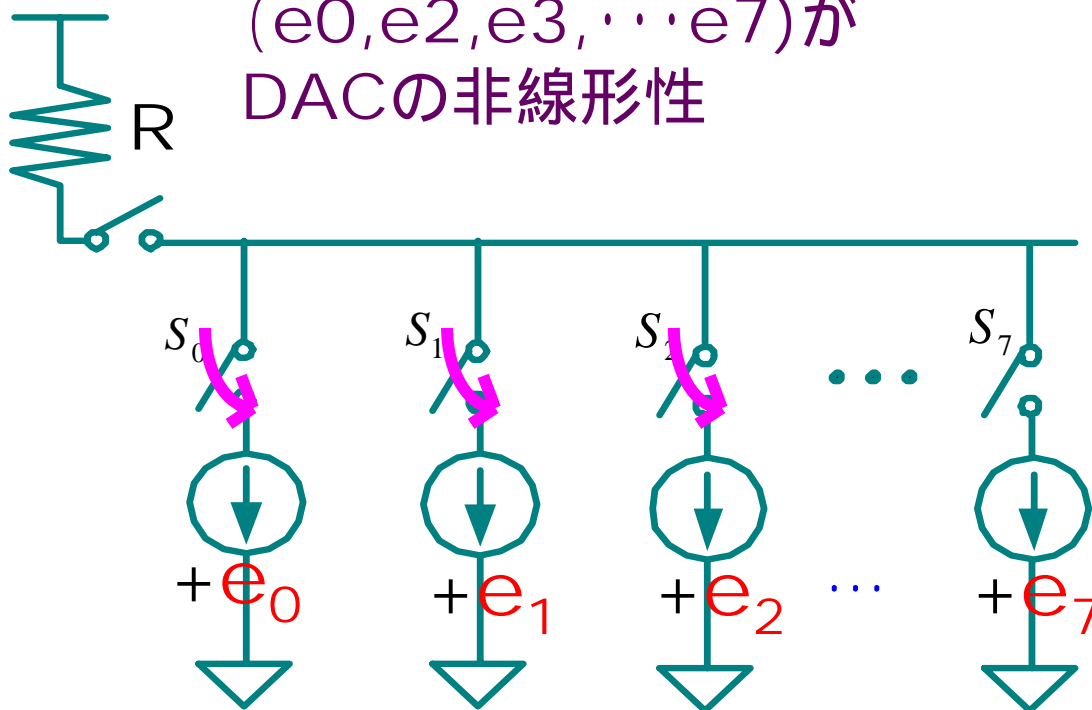
DACの素子ミスマッチ

セグメント・電流セル型DAC



電流源のミスマッチ
($e_0, e_2, e_3, \dots, e_7$)が
DACの非線形性

特定の電流セルのミスマッチが蓄積してしまう



DWA手法

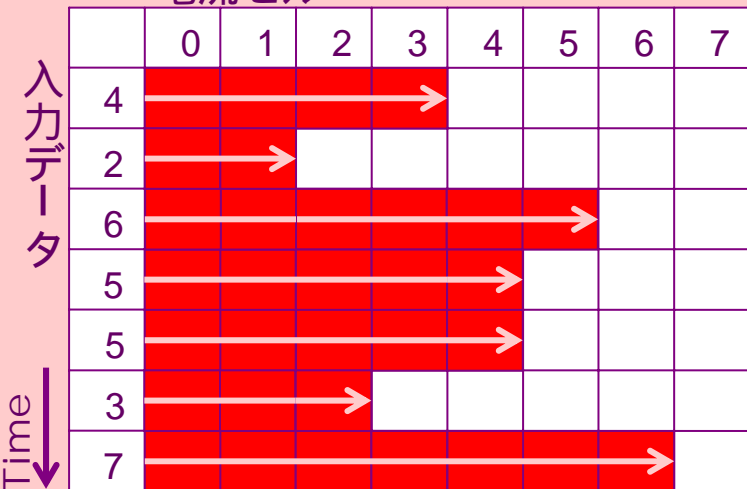
特定アルゴリズムで素子を選択し、非線形性を軽減

- LP アルゴリズム
- HP アルゴリズム

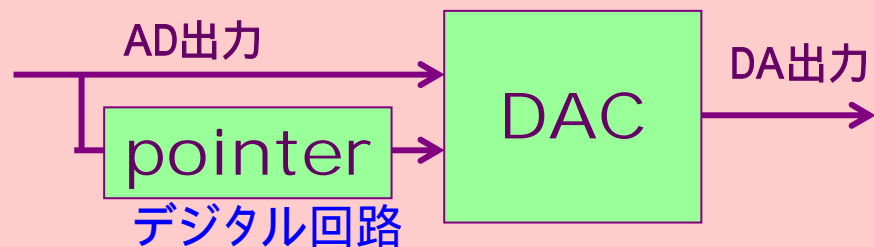
Normal DAC



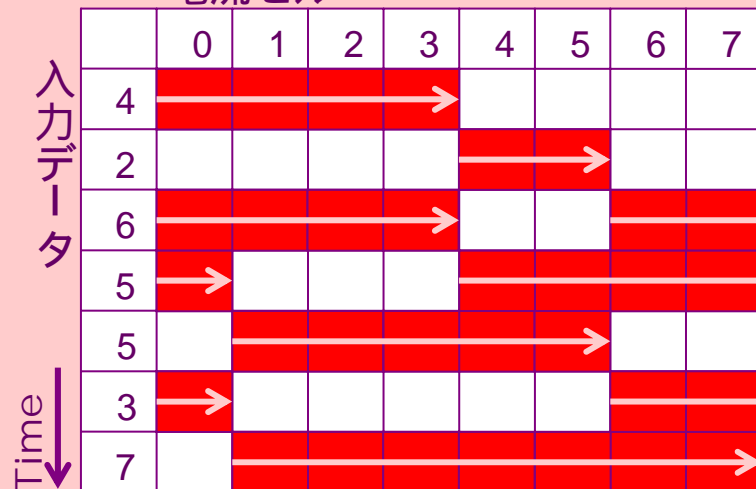
電流セル



DWA DAC



電流セル

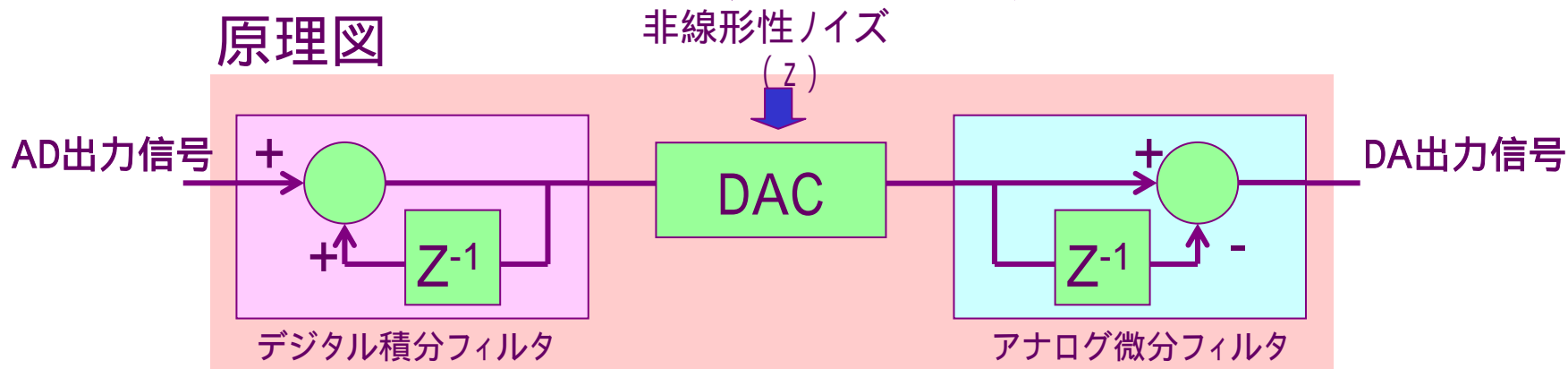


タイプ マルチバンドパス DWAアルゴリズム

- N個のポインタを使用
- LP DWA動作をNチャンネル・インターリーブ

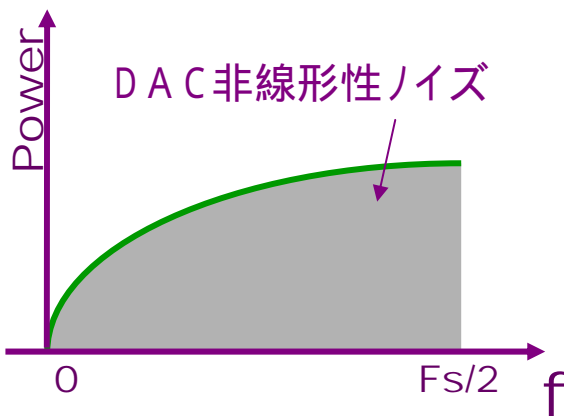
LPアルゴリズム

原理図



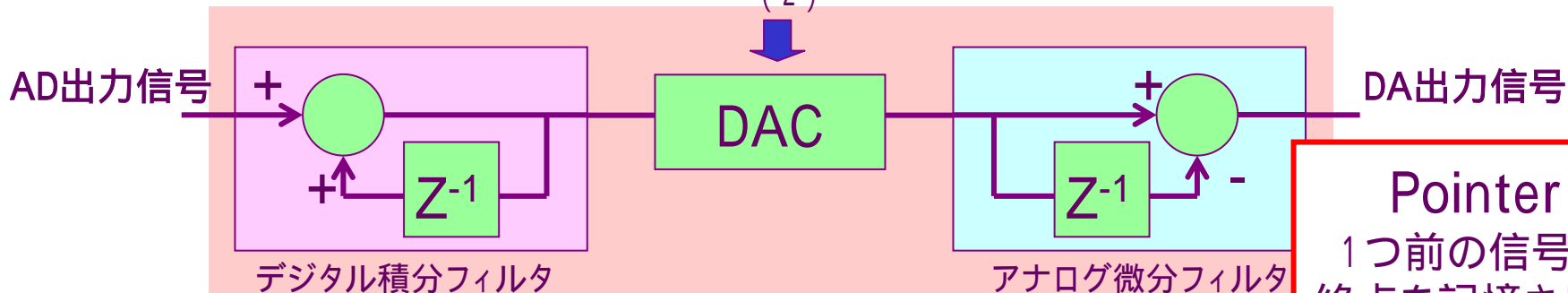
- 信号 積分 × 微分 = Flat
- DAC非線形性 微分特性 (High Pass)

LP DWAによるDAC非線形性ノイズの分布



LPアルゴリズム動作

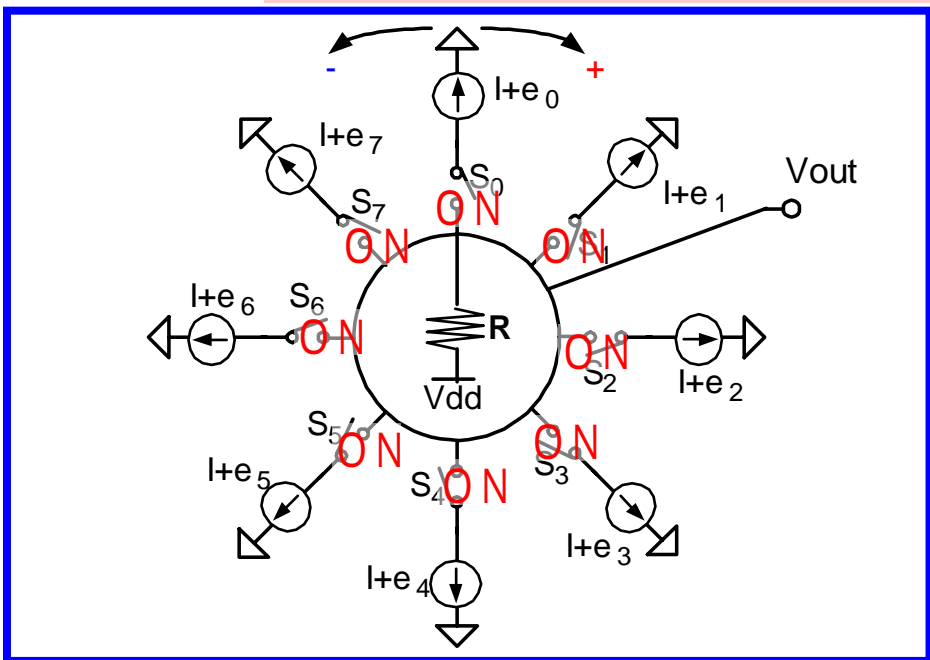
非線形性ノイズ
(z)



Pointer
1つ前の信号の
終点を記憶させる

$$H(z) = 1 / (1 - Z^{-1})$$

電流セル



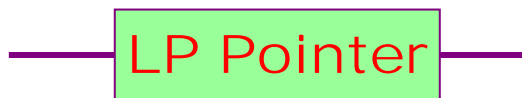
Time ↓

	0	1	2	3	4	5	6	7
4	→							
2				→				
6	→							
5	→							
5		→						
3	→							
7		→						

LP Multi BP

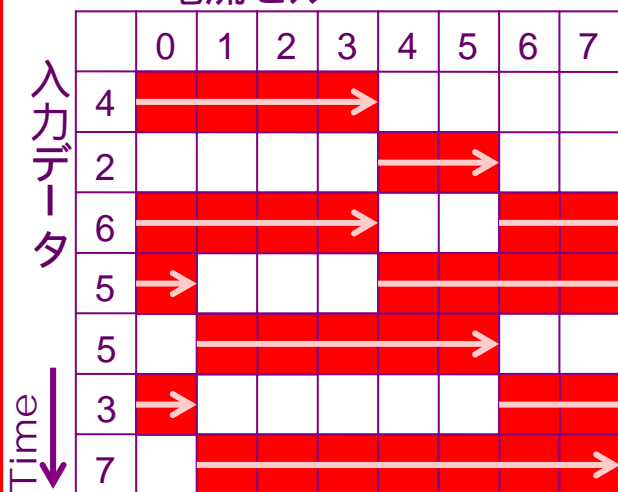
タイプ

LPアルゴリズム



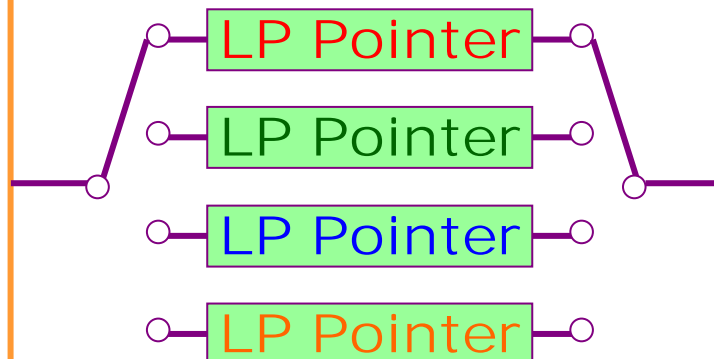
$$H(z) = 1/(1 - Z^{-1})$$

電流セル



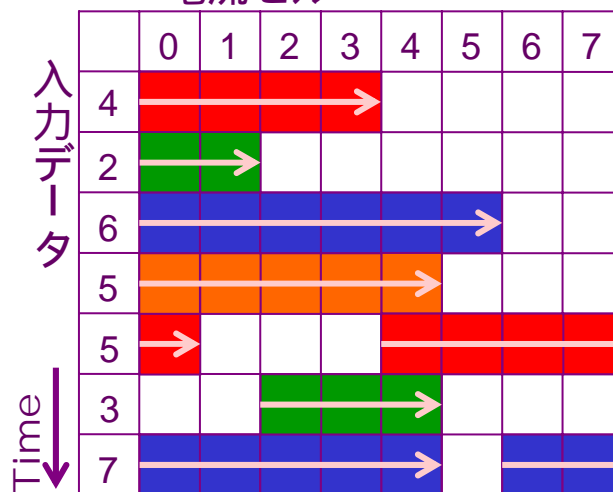
マルチBPアルゴリズム (LPF)

N=4



$$H(z) = 1/(1 - Z^{-4})$$

電流セル



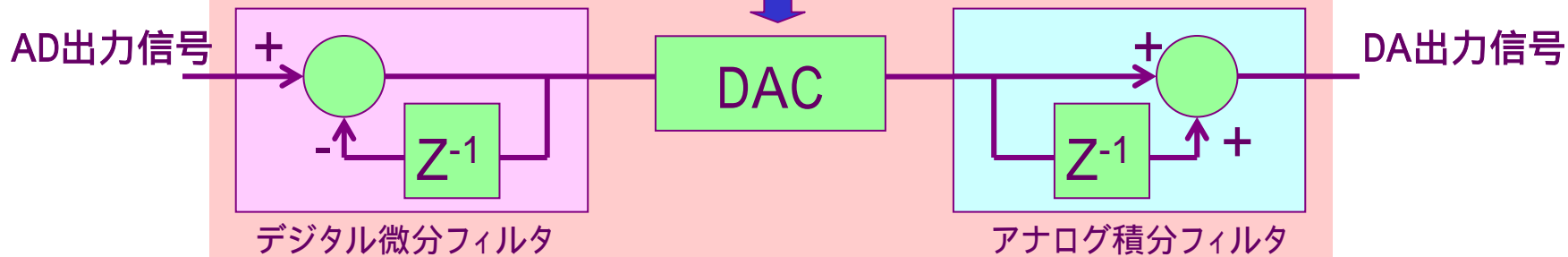
タイプ マルチバンドパス DWAアルゴリズム

- N個のポインタを使用
- HP DWA動作をNチャンネル・インターリーブ

HPアルゴリズム

原理図

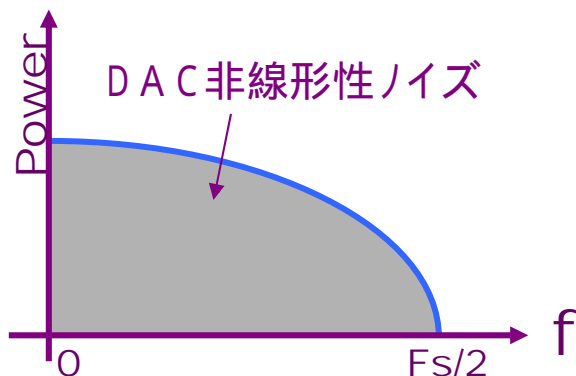
非線形性ノイズ
(z)



■ 信号 微分 × 積分 = Flat

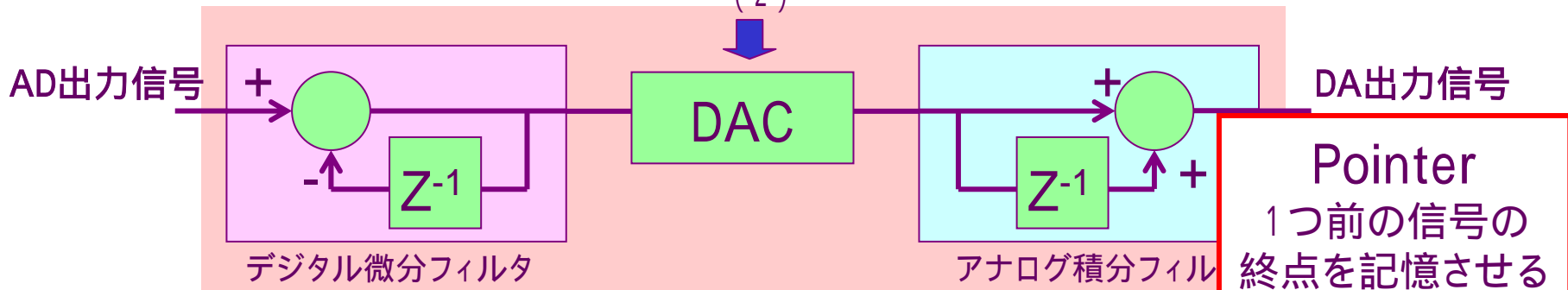
■ DAC非線形性 積分特性 (Low Pass)

HP DWAによるDAC非線形性ノイズの分布



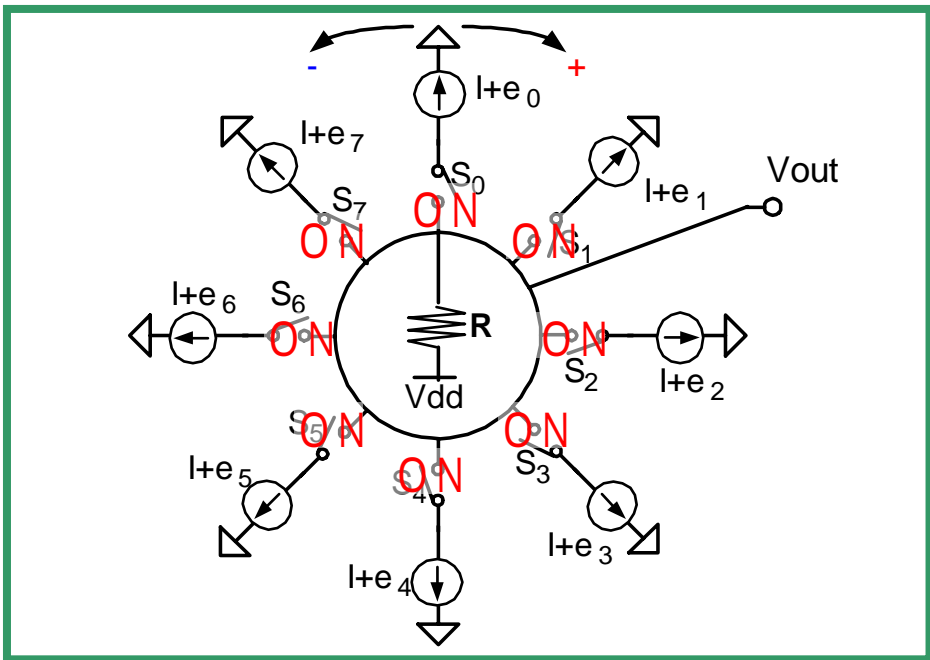
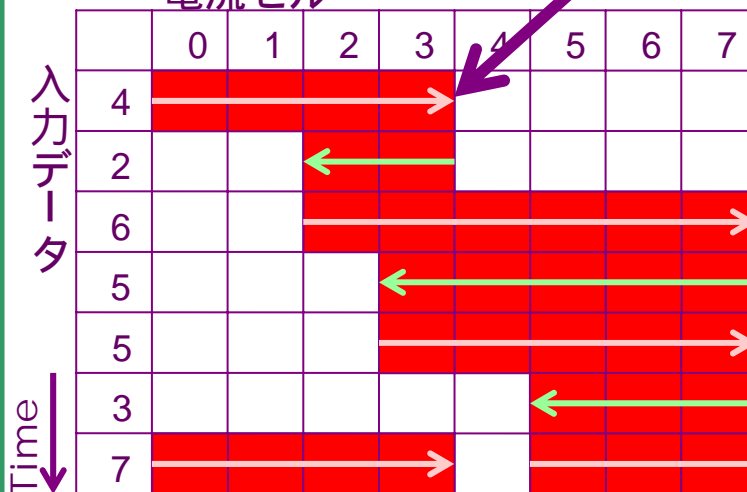
HPアルゴリズム動作

非線形性ノイズ
(z)



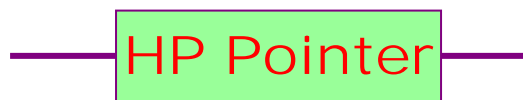
$$H(z) = 1 / (1 + Z^{-1})$$

電流セル



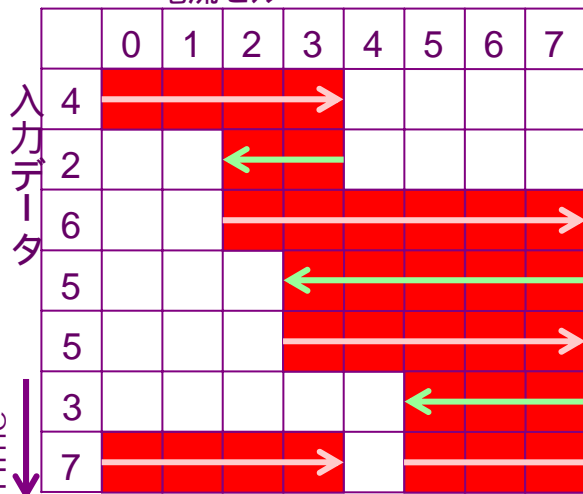
HP BP Multi BP

HPアルゴリズム



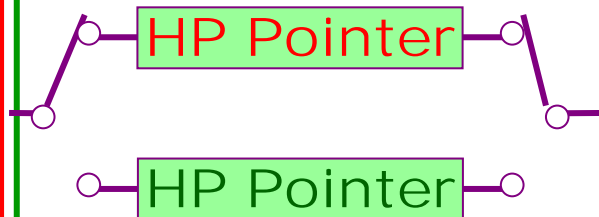
$$H(z) = 1/(1 + Z^{-1})$$

電流セル

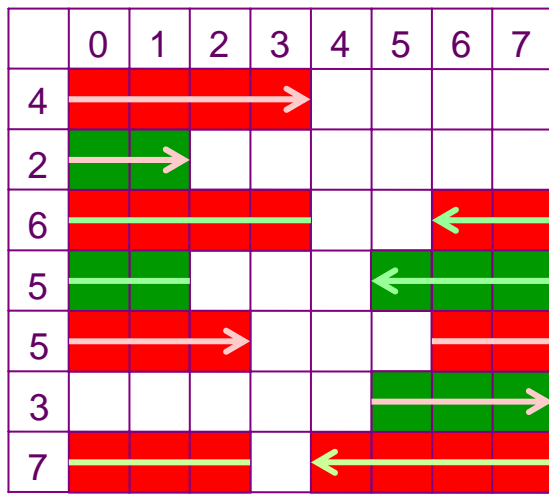


BPアルゴリズム

N=2

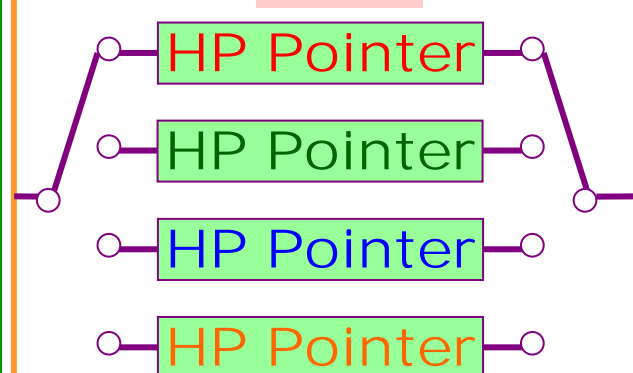


$$H(z) = 1/(1 + Z^{-2})$$

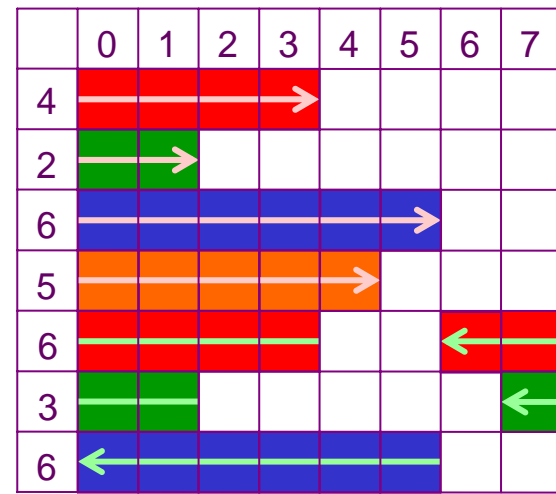


マルチBPアルゴリズム

N=4



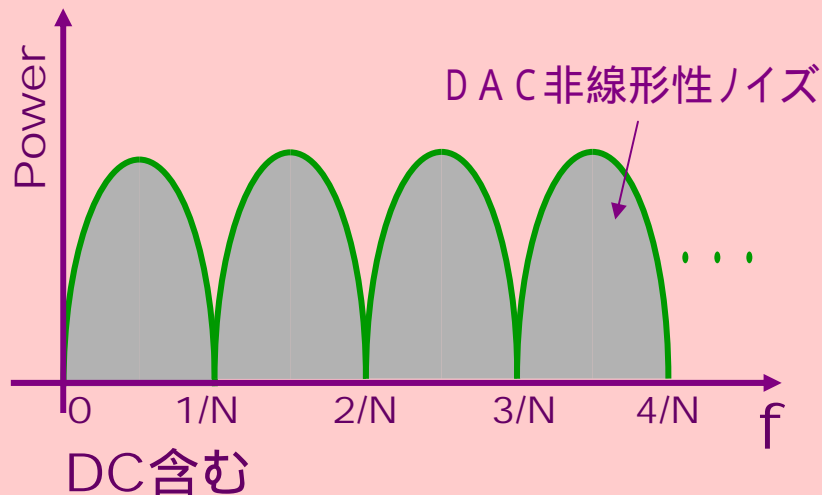
$$H(z) = 1/(1 + Z^{-4})$$



開発マルチバンドパス用DWA

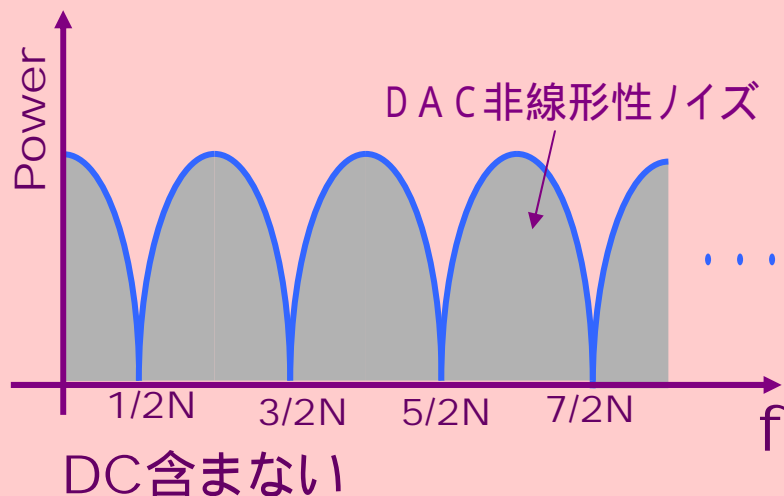
マルチバンドパス・タイプ 用DWA

- 電流セルを選択するためのポイントをN個使用
- LP DWAアルゴリズムをNチャンネル・インターリーブ

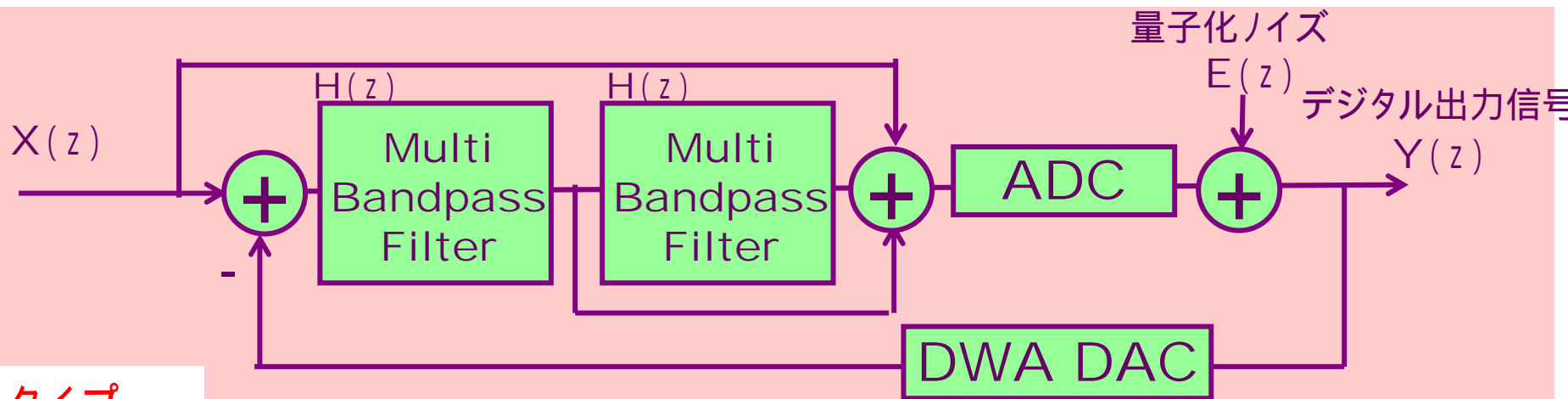


マルチバンドパス・タイプ 用DWA

- 電流セルを選択するためのポイントをN個使用
- HP DWAアルゴリズムをNチャンネル・インターリーブ



マルチバンドパス・タイプ $N=4$



タイプ

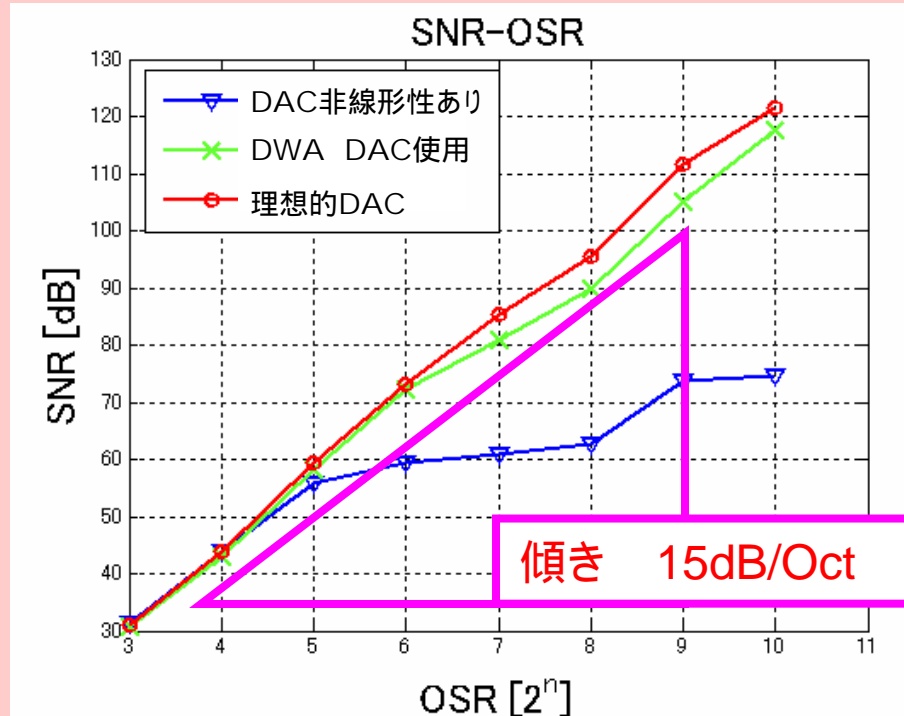
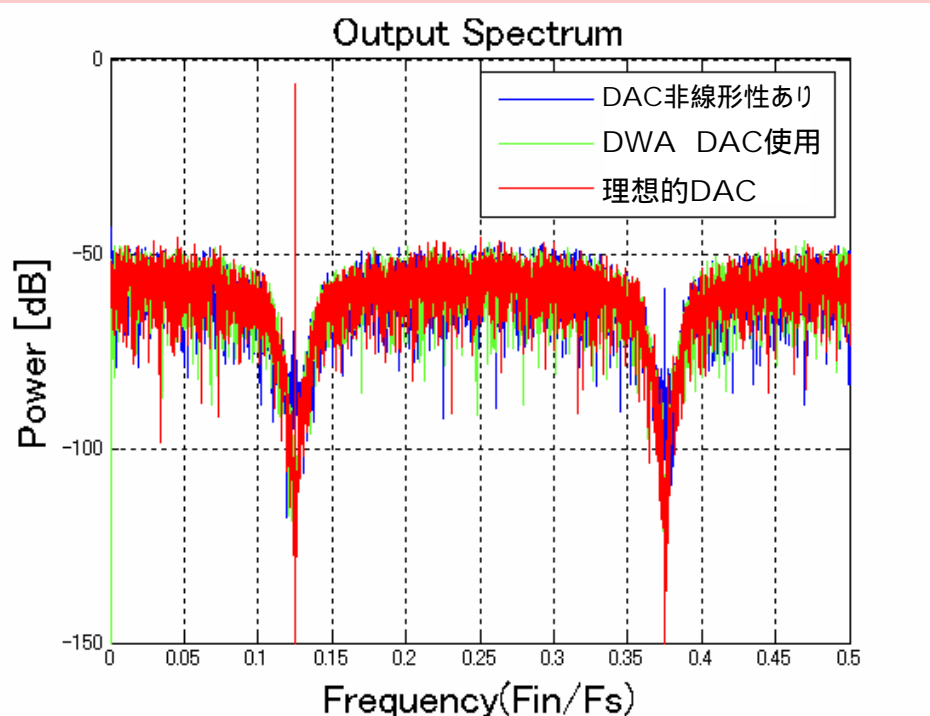
$$H(z) = \frac{-Z^{-4}}{1+Z^{-4}}$$

$$STF = -Z^{-4}$$

$$NTF = (1+Z^{-4})^2$$

中心周波数は F_s の
1/8, 3/8

マルチバンドパス・タイプ $_N=4$ シミュレーション結果



- シミュレーションによりDWAアルゴリズムの効果を確認
- 2次の精度を確認

発表内容

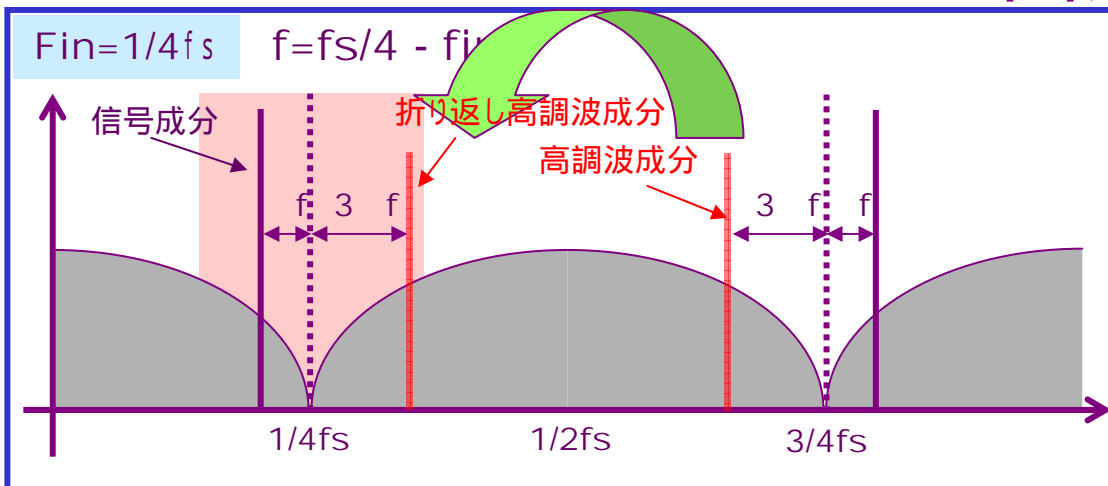
- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

マルチバンドパスDWAアルゴリズム の応用1

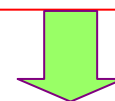
中心周波数 $1/6f_s$

単一帯域マルチビットバンドパス
変調器への応用

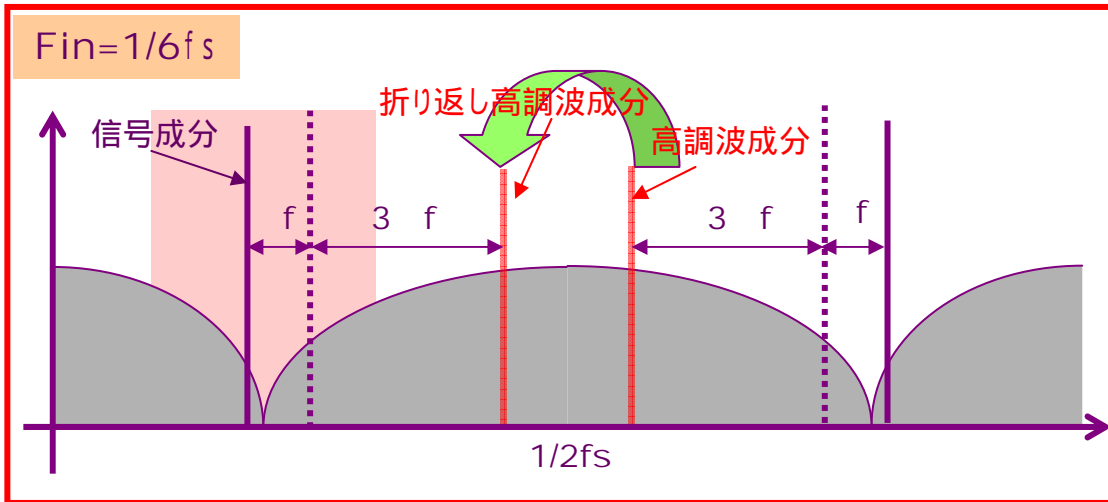
単一帯域のバンドパス変調器の イメージ回避



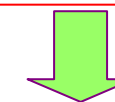
従来のBP変調器
入力信号帯域中心 $f_s/4$



折り返し高調波成分が
信号帯域内に発生

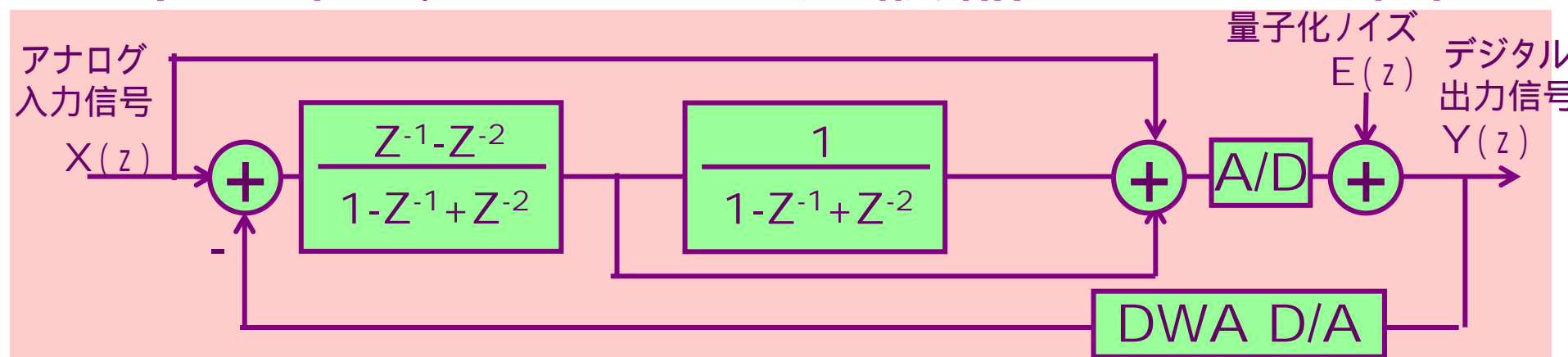


信号帯域を
 $f_s/4$ 以外に置く



折り返し高調波成分は
信号帯域外へ

単一帯域バンドパス変調器のブロック図

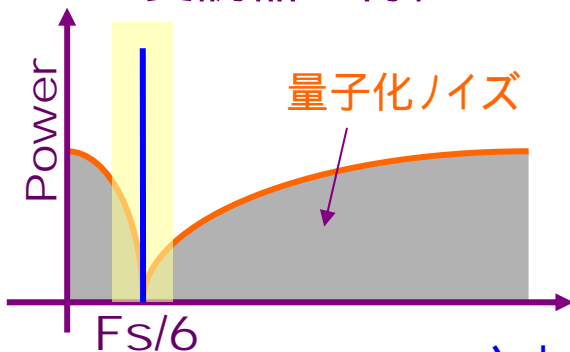


$$Y(z) = X(z) + (1 - Z^{-1} + Z^{-2})^2 \cdot E(z)$$

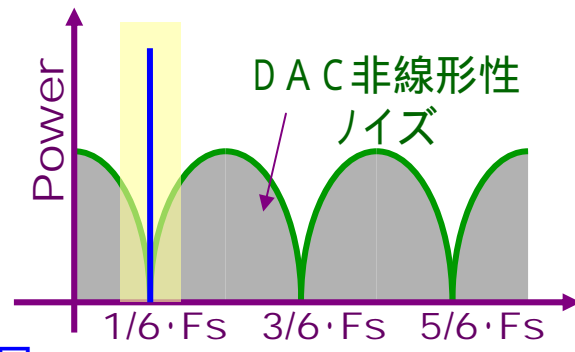
$$STF = 1$$

$$NTF = (1 - Z^{-1} + Z^{-2})^2$$

変調器の特性

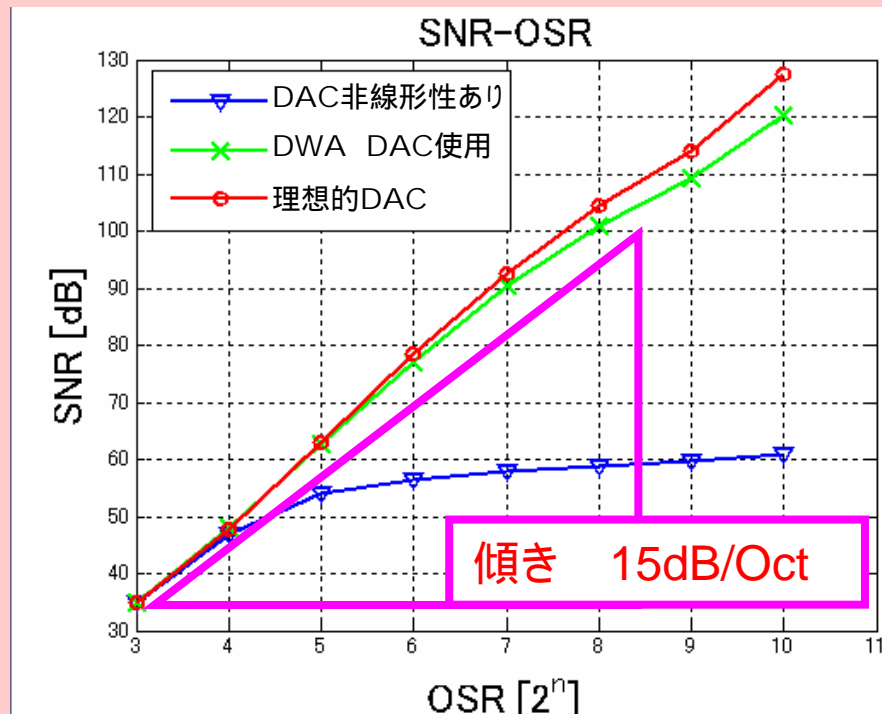
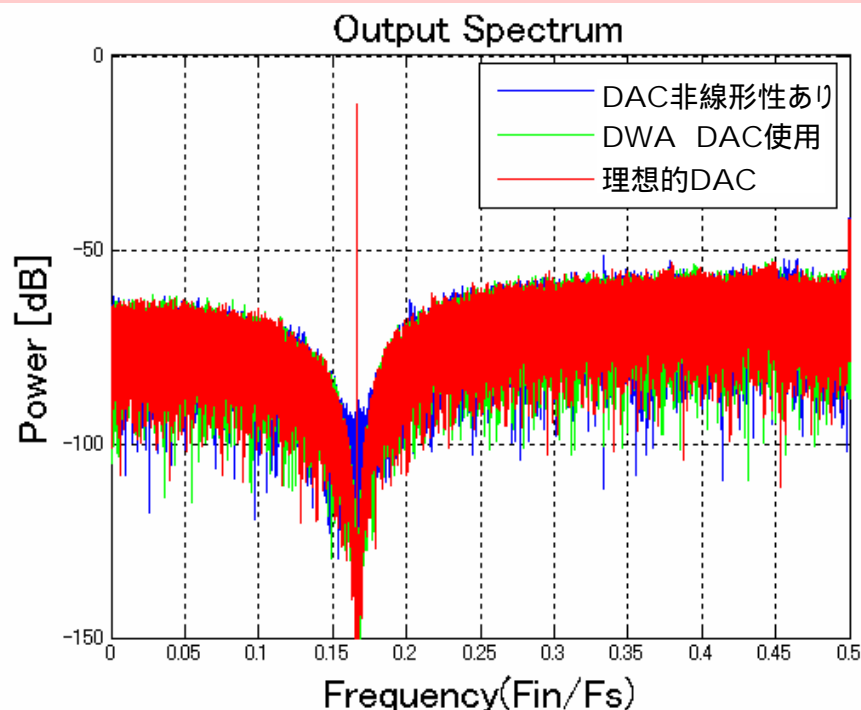


DWA動作による特性



— : 入力信号

シミュレーションによる効果の確認



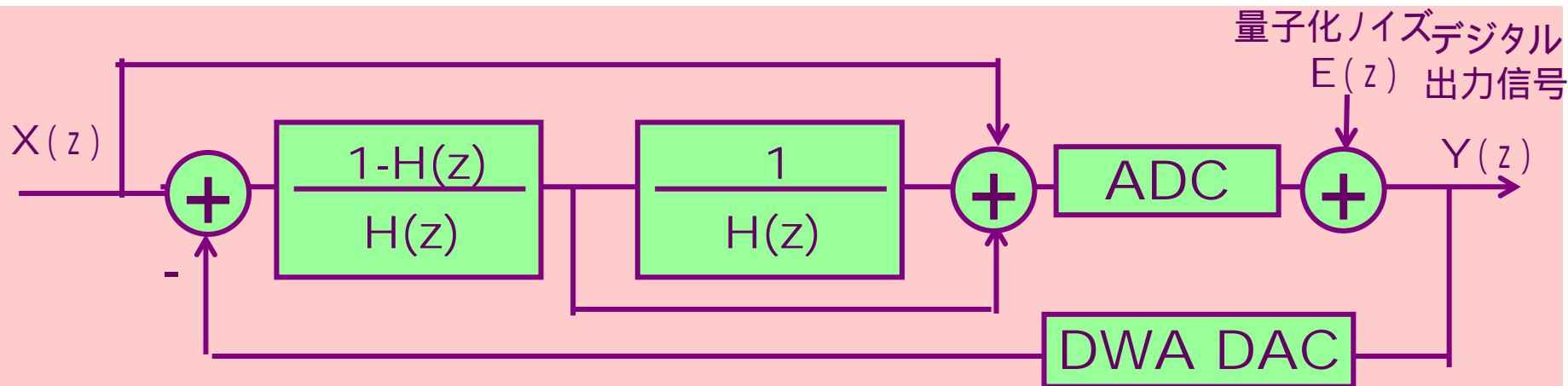
- シミュレーションによりDWAアルゴリズムの効果を確認
- 2次の精度を確認

マルチバンドパスDWAアルゴリズム の応用2

等間隔でない複数帯域の
マルチビットバンドパス
AD変調器への応用

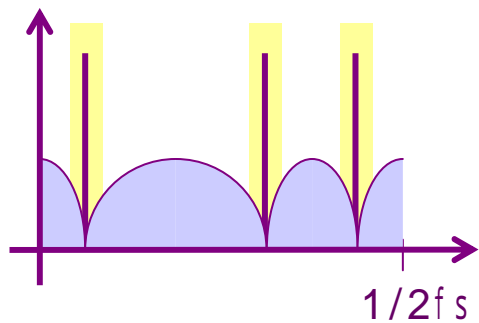
キャリア選択をする

AD変調器



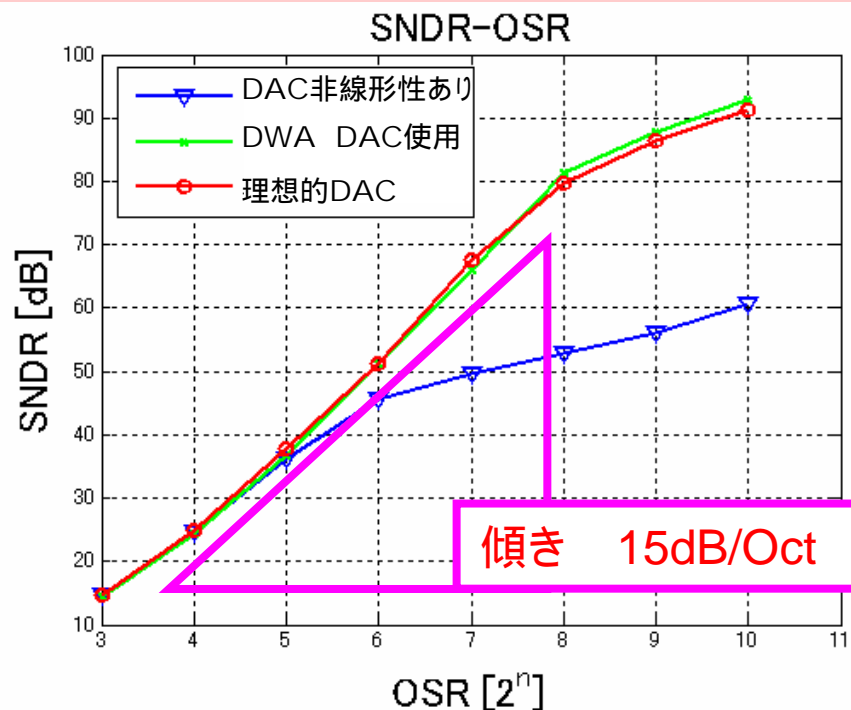
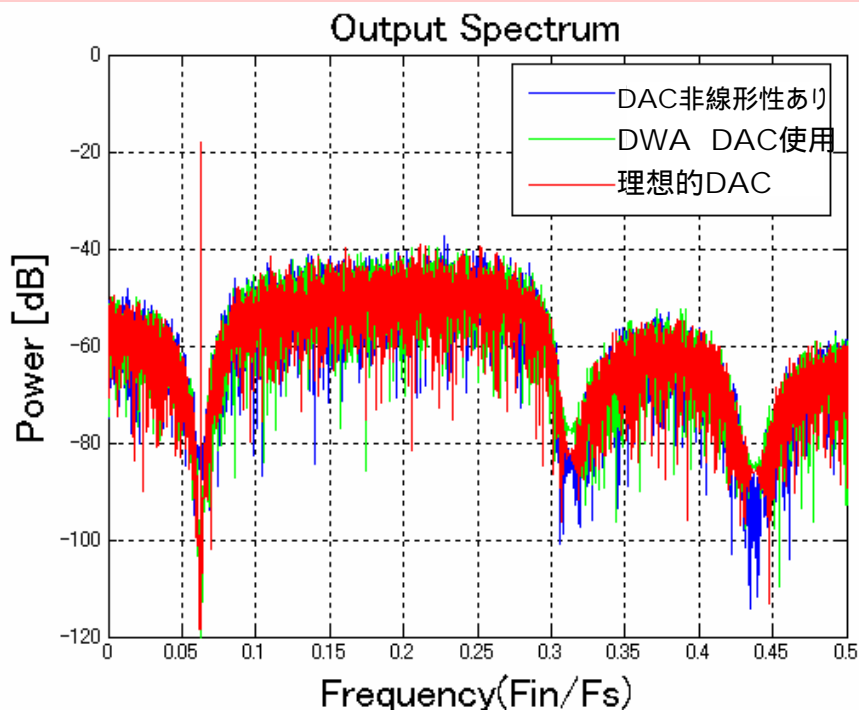
$$H(z) = (1 - 2AZ^{-1} + Z^{-2})(1 - 2BZ^{-1} + Z^{-2})(1 - 2CZ^{-1} + Z^{-2})$$

- A = Cos 22.5 °
- B = Cos 112.5 °
- C = Cos 157.5 °



中心周波数
1/16fs, 5/16fs, 7/16fs

キャリア選択を行う AD変調器の出力



- シミュレーションによりDWAアルゴリズムの効果を確認
- 2次の精度を確認

マルチバンドパスDWAアルゴリズム の応用3

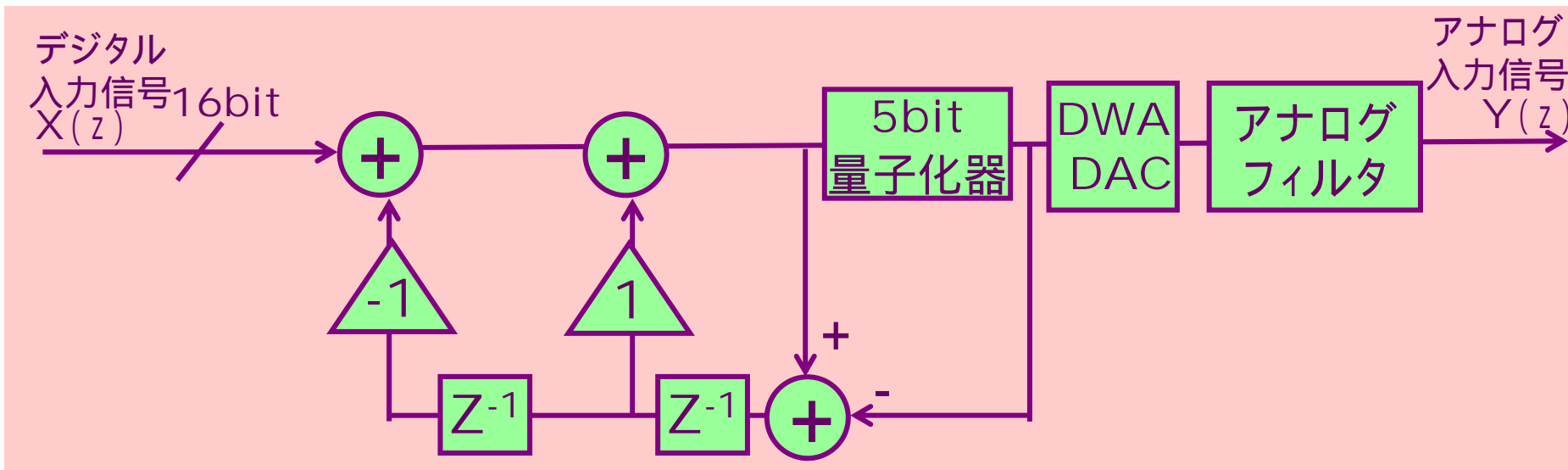
中心周波数 $1/6 f_s$

単一帯域マルチビットバンドパス

DA変調器への応用

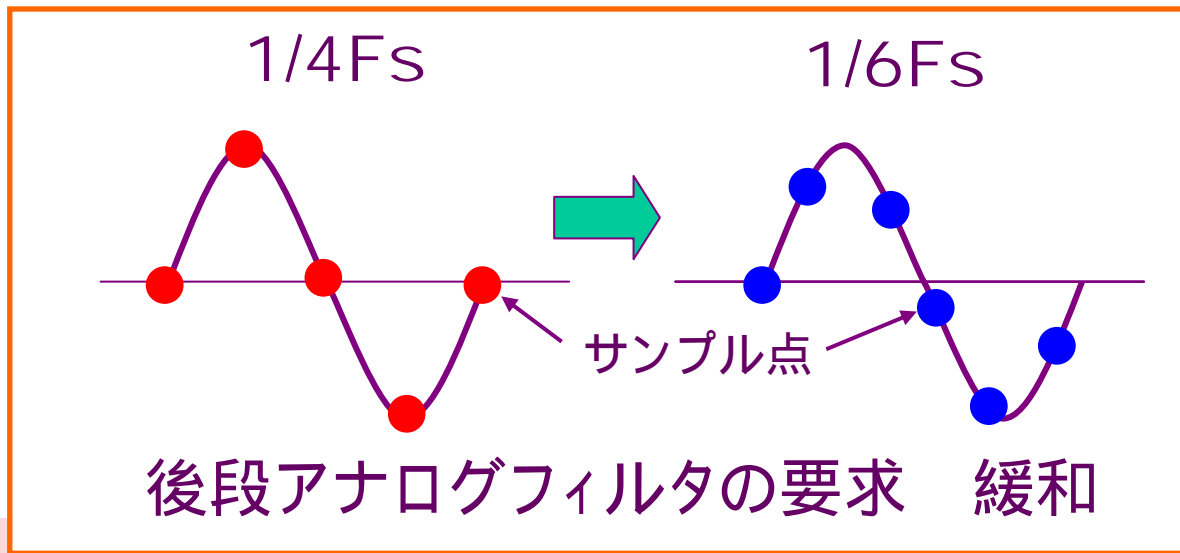
中心周波数 $1/6 f_s$ の

DA変調器

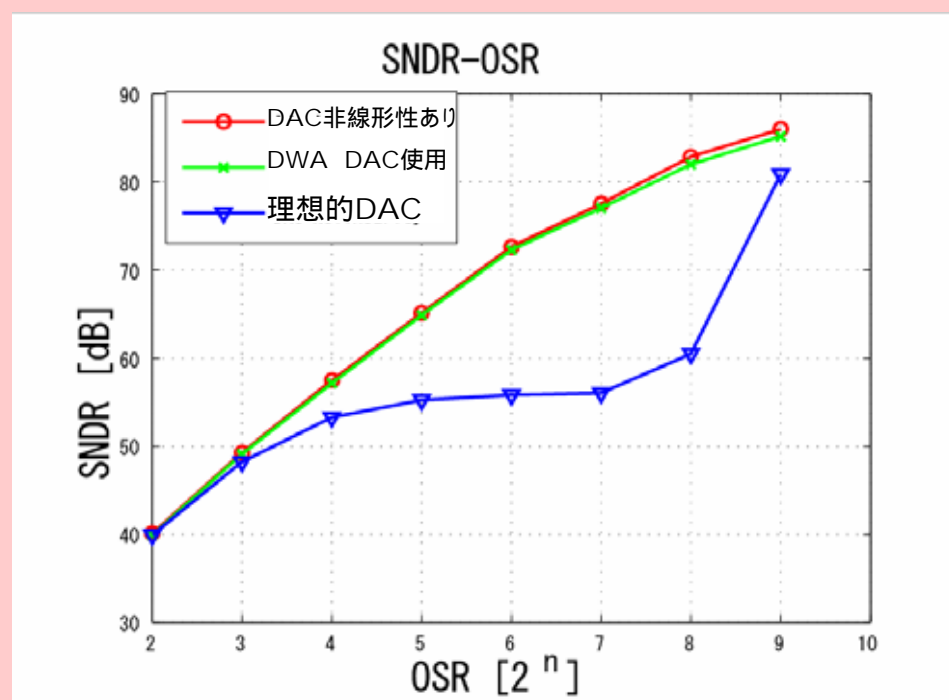
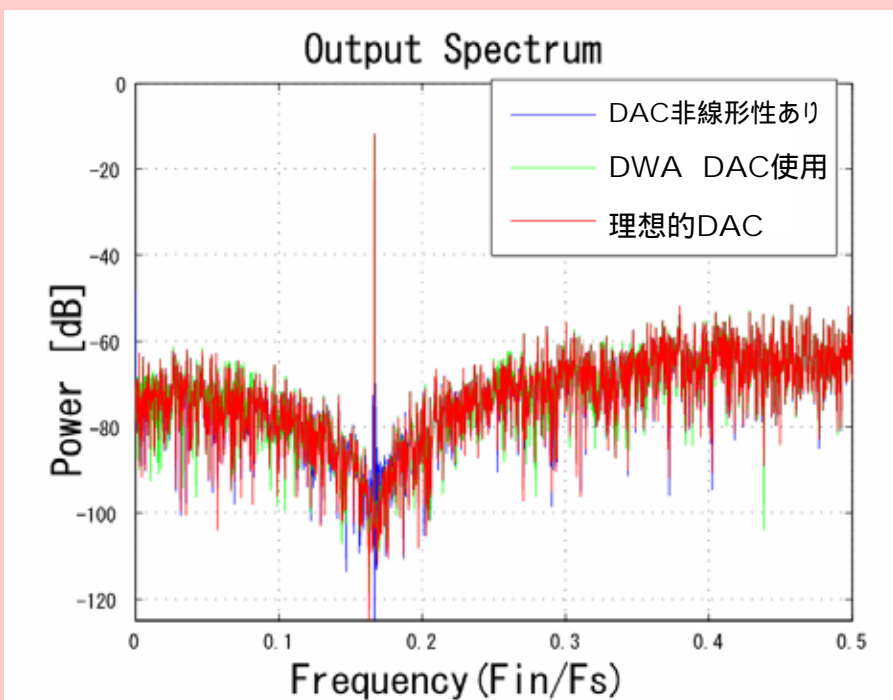


$$STF = 1$$

$$NTF = 1 - Z^{-1} + Z^{-2}$$



中心周波数 $1/6 F_s$ の D/A 変調器



• シミュレーションによりDWAアルゴリズムの効果を確認

発表内容

- 研究背景と目的
- マルチバンドパス 変調器
- 電子部品の線形性計測への応用
- マルチバンドパス 変調器の
フィードフォワード構成の提案
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズム
- マルチバンドパス用DWAアルゴリズムの
他の変調器への応用
- まとめと今後の課題

まとめ

- マルチバンドパス 変調器の電子部品の線形性計測への応用を提案した
- フィードフォワード 構成を提案した
- マルチバンドパス 変調器用DWAアルゴリズムの開発を行った
- 開発アルゴリズムの他の変調器への応用を行った

今後の課題

マルチバンドパス

AD変調器

- 研究例 少ない
- 実用化の例 なし



- 実用化への更なるアプローチ
- トランジスタレベルでの設計
- 新規アプリケーションの開拓、応用