

複素 $\Delta\Sigma$ 変調器による高周波信号生成方式の検討

◎村上正紘 小林春夫（群馬大学）

OUTLINE

- ▶ 研究背景
- ▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DA 変調器
- ▶ アップコンバージョン
- ▶ まとめ

OUTLINE

▶ 研究背景

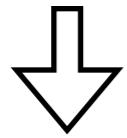
▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DA 変調器

▶ アップコンバージョン

▶ まとめ

研究背景

半導体の
微細化・複雑化

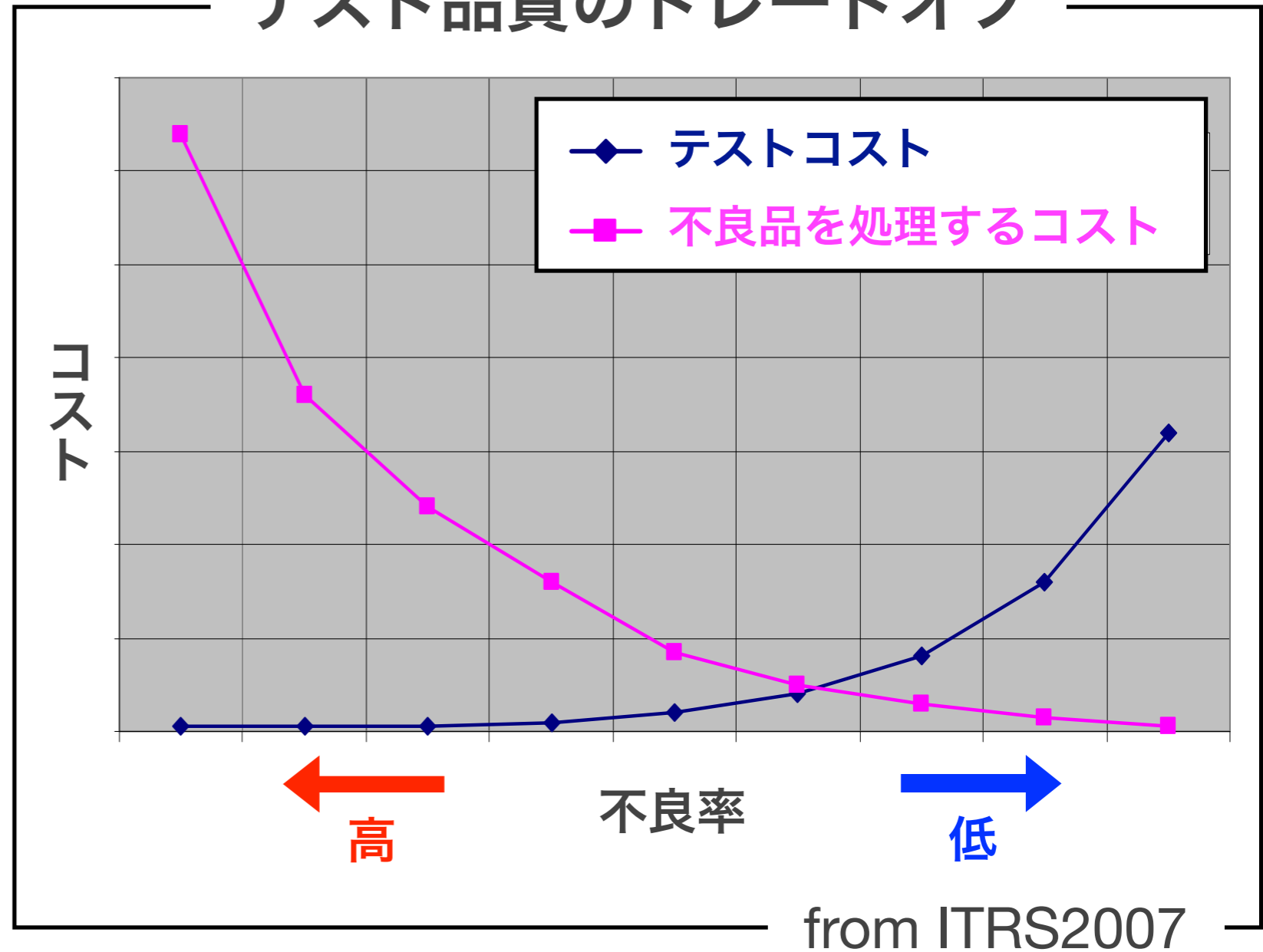


品質維持のための
テストコスト **増**



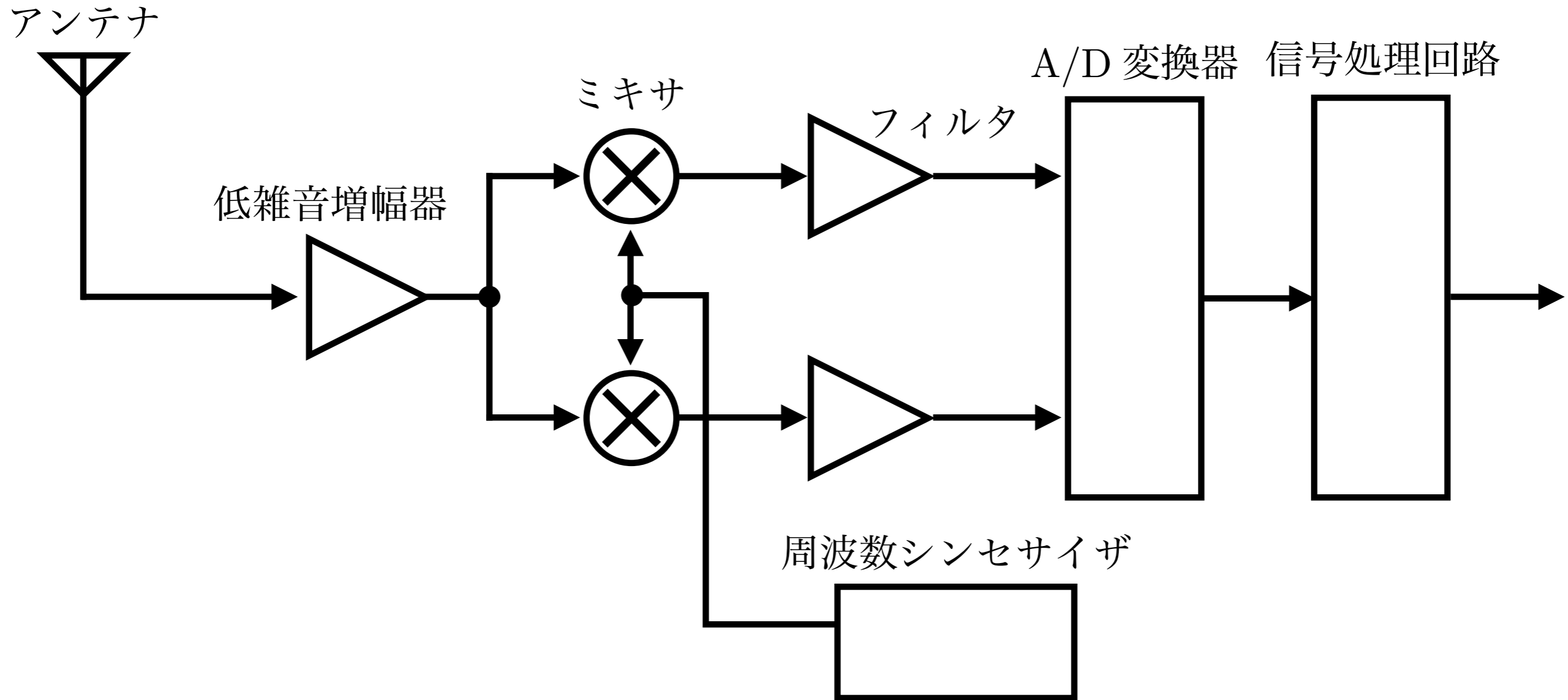
低コスト かつ 高品質テスト の要求

テスト品質のトレードオフ

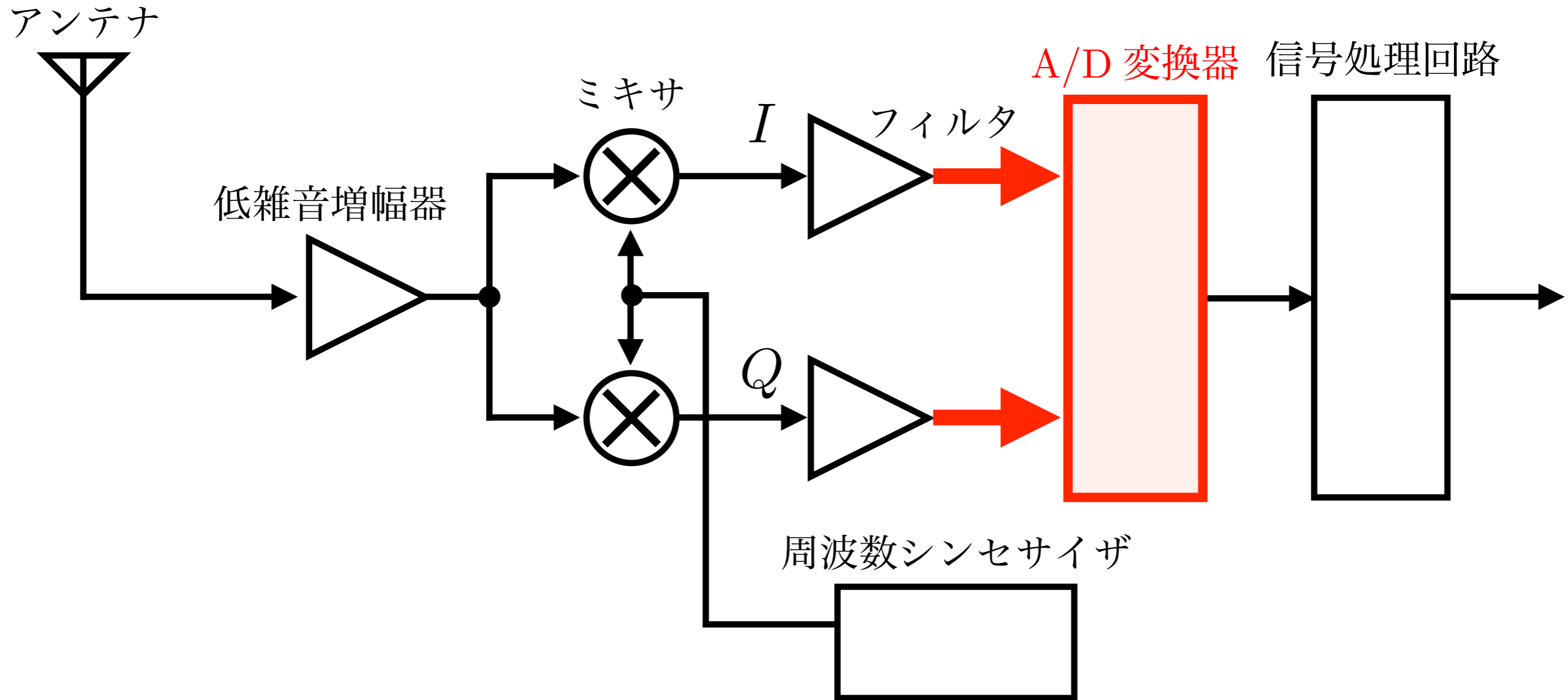


テスト対象のアプリケーション

受信機



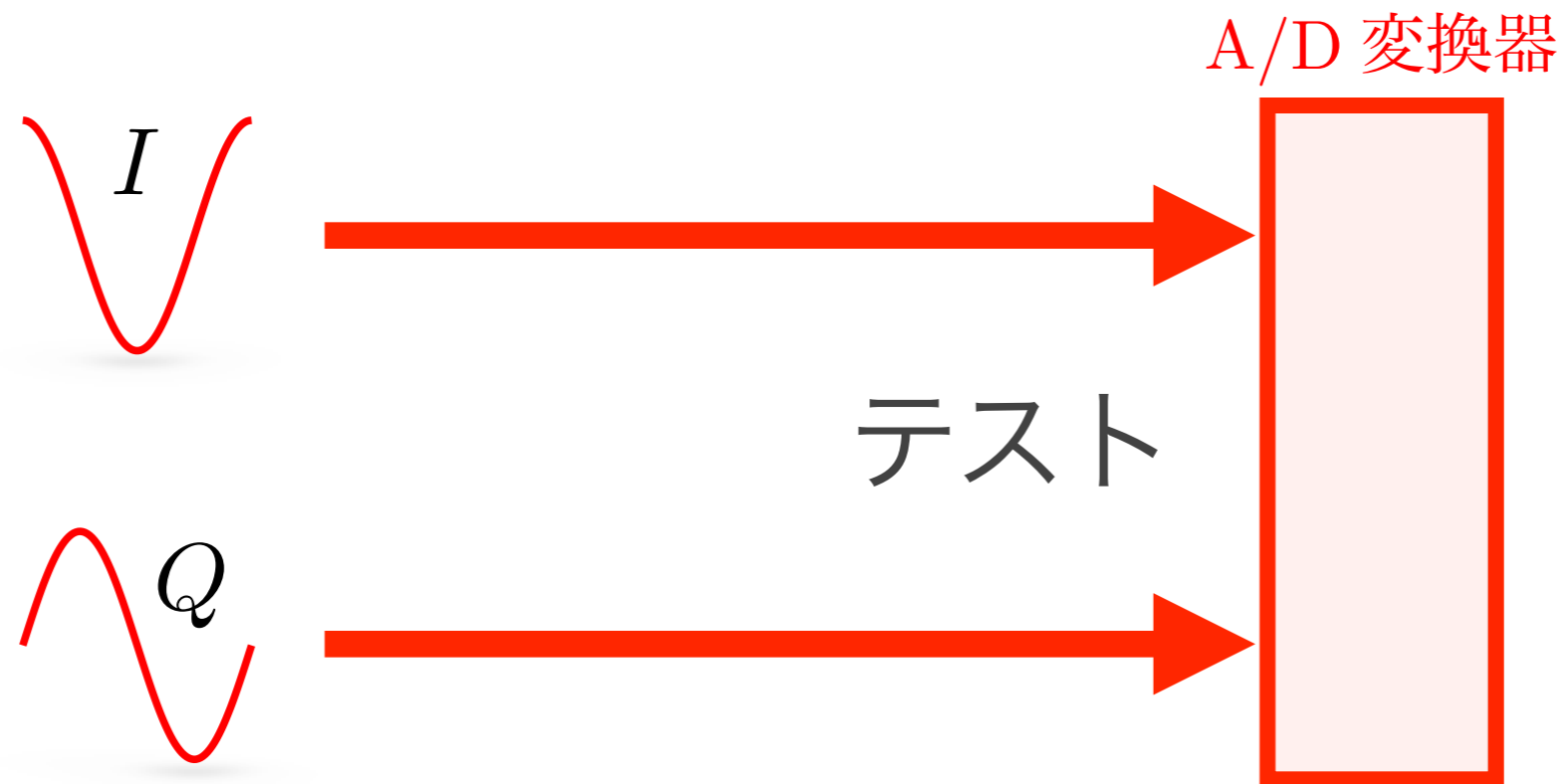
受信機



I信号, Q信号 : 互いに位相が 90° 異なる信号

研究目的

S/Nの高い I-Q信号を低コストで生成



アプローチ

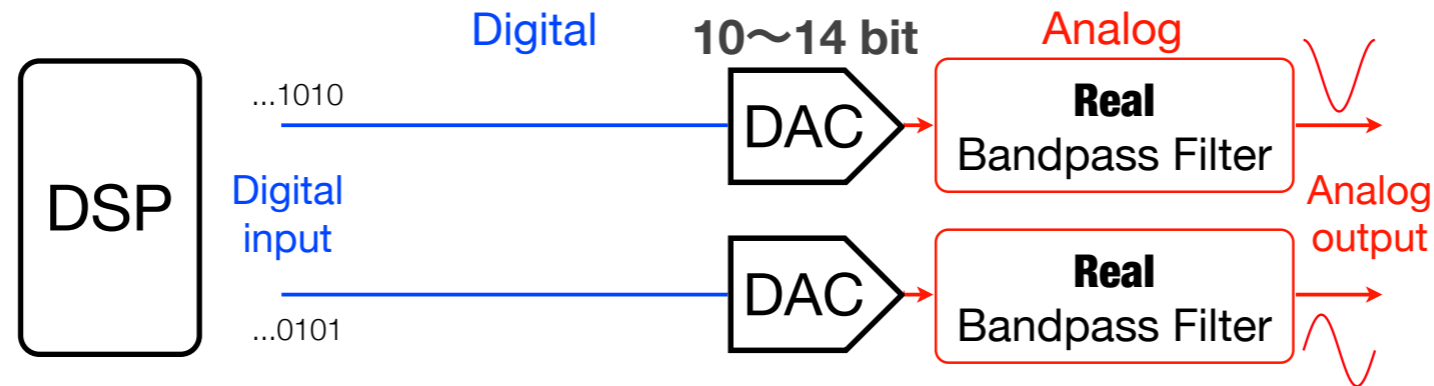
高S/N → デジタル技術導入

半導体の微細化

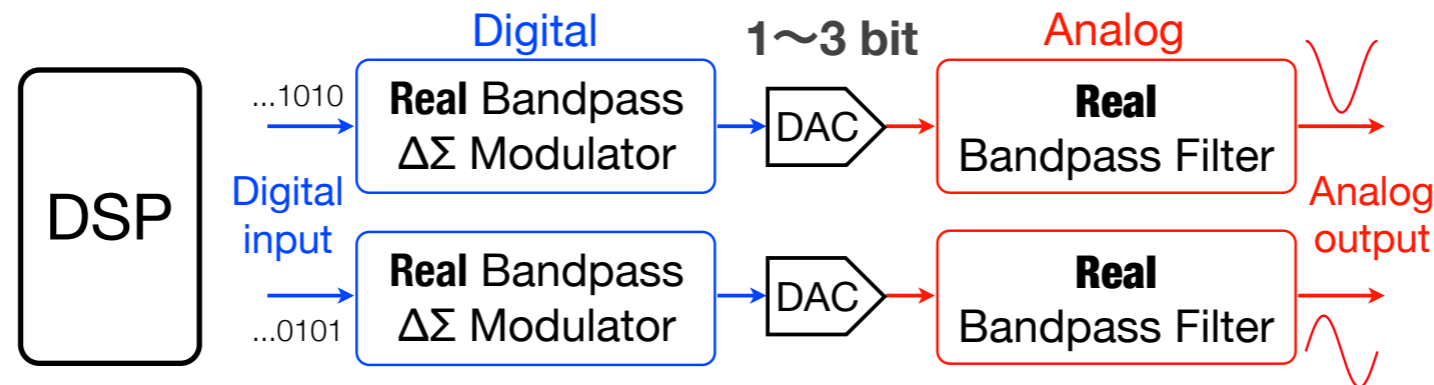
導入コスト：低

I,Q信号生成法

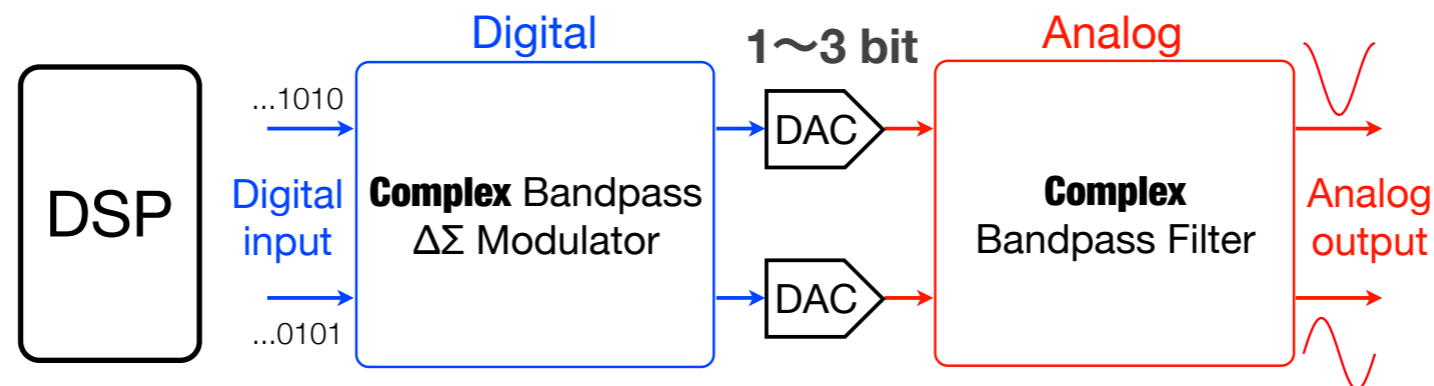
① アナログ手法



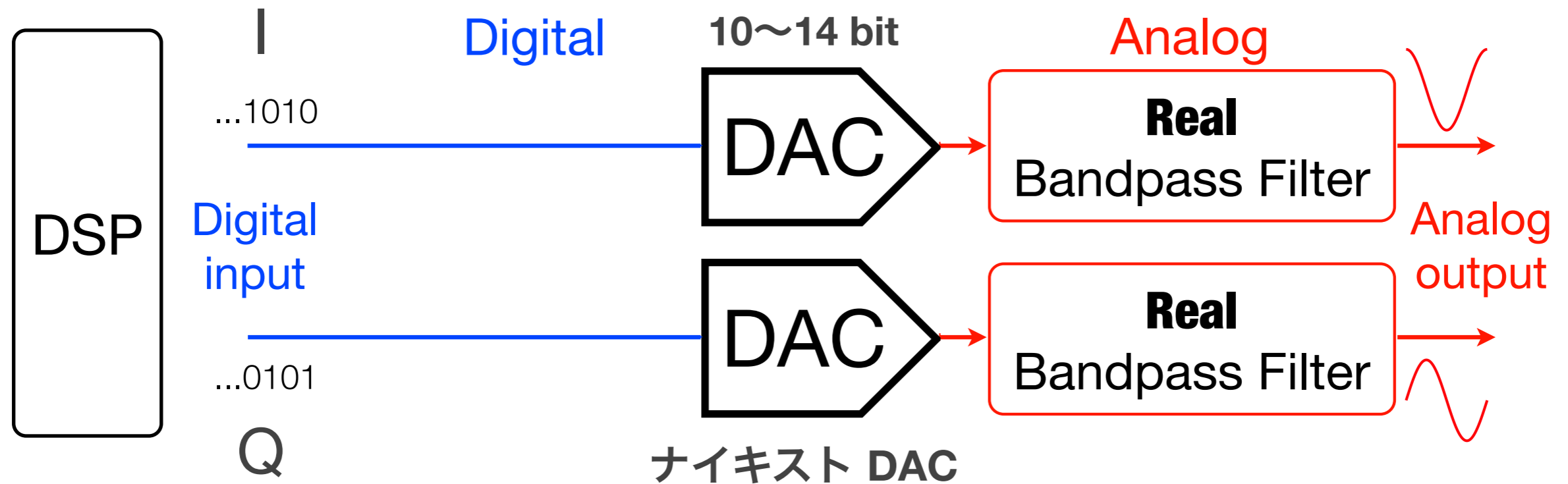
② デジタル手法 (1)



③ デジタル手法 (2)



① アナログ手法

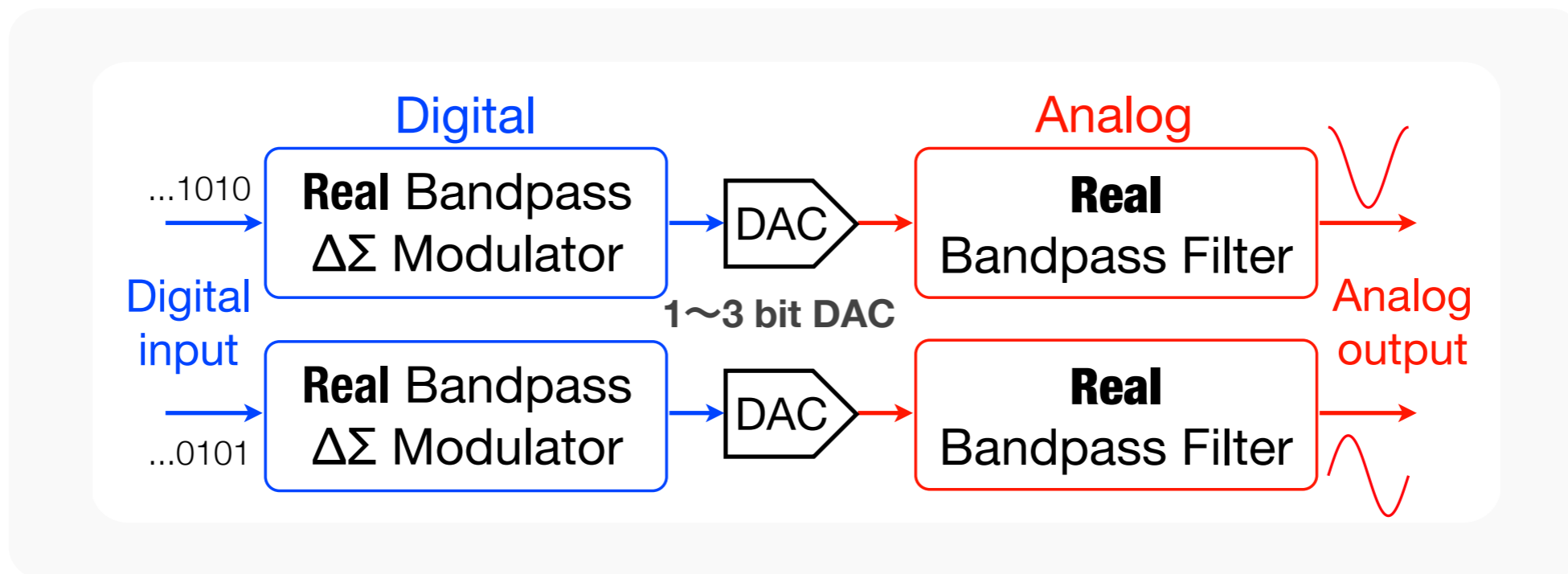


高サンプリング周波数・高分解能のDAC

急峻なアナログフィルタ

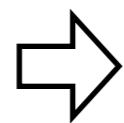
が必要 ☹️

② デジタル手法 (1)

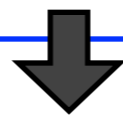


デルタシグマ変調

ノイズシェープ

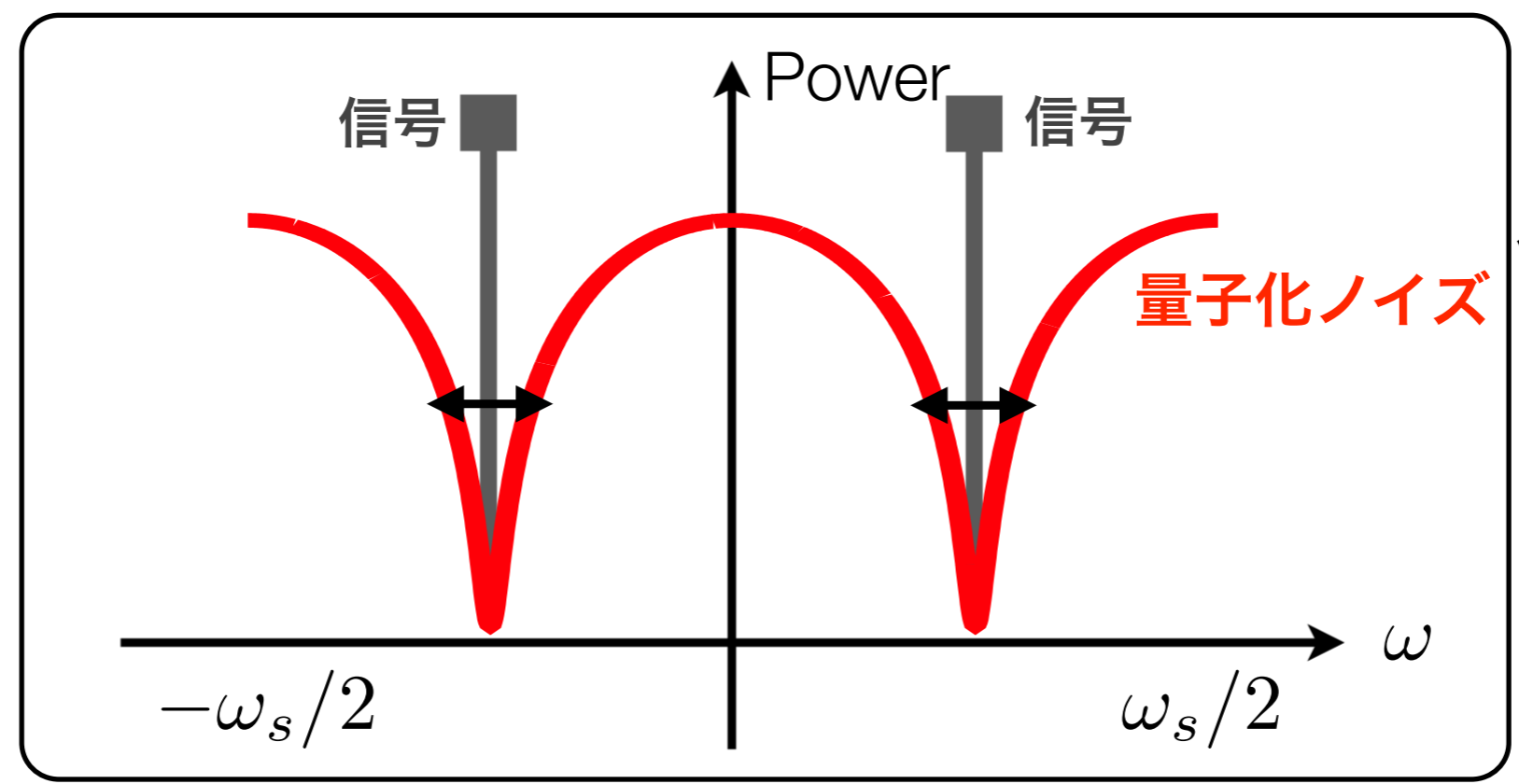
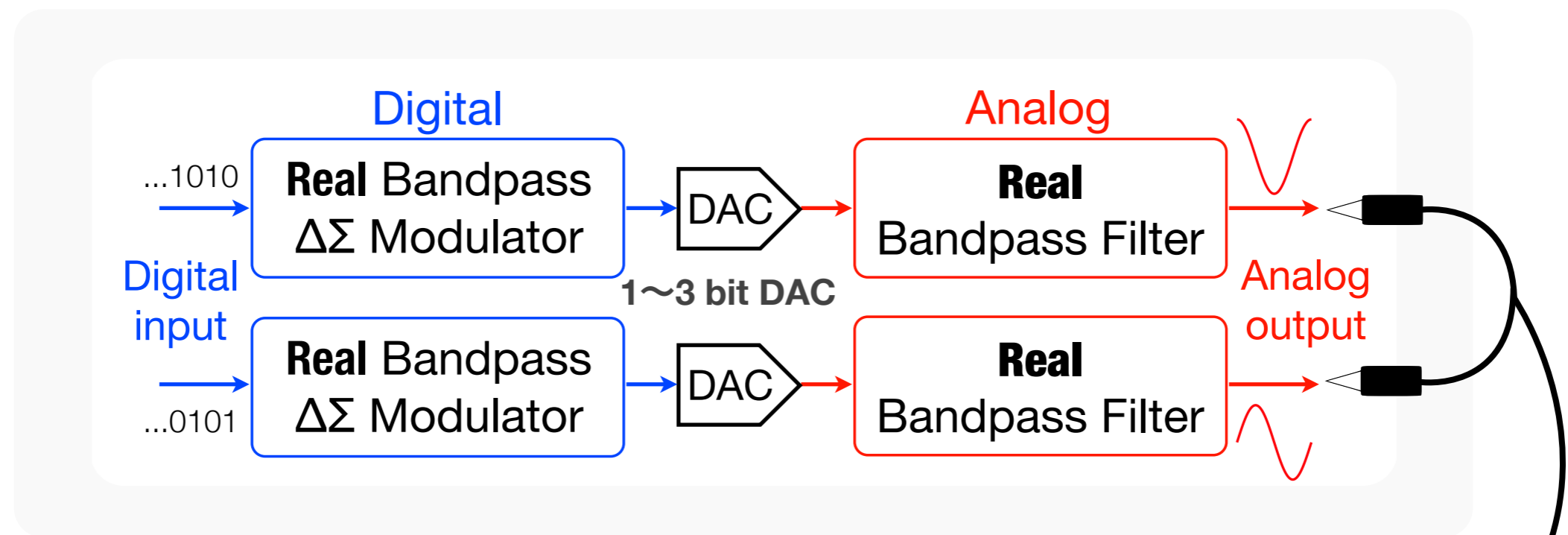


- 低オーバーサンプリング
- 1~3 bit DAC

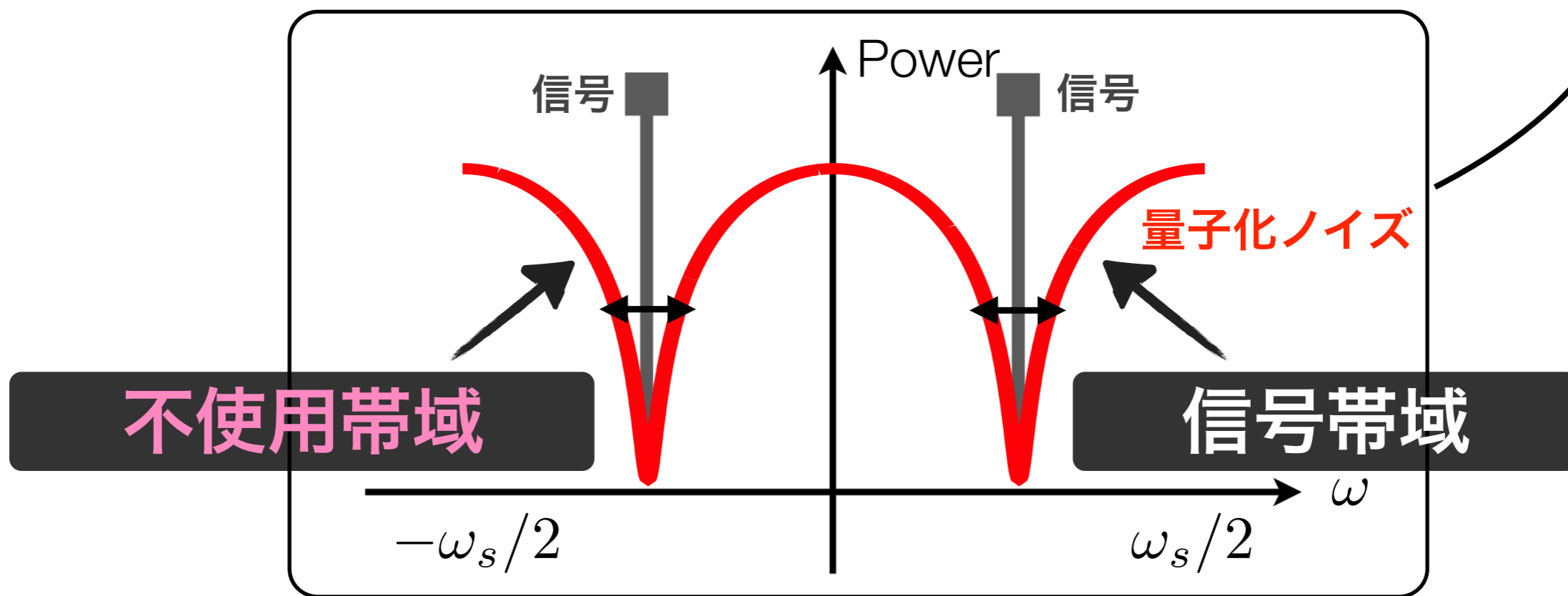
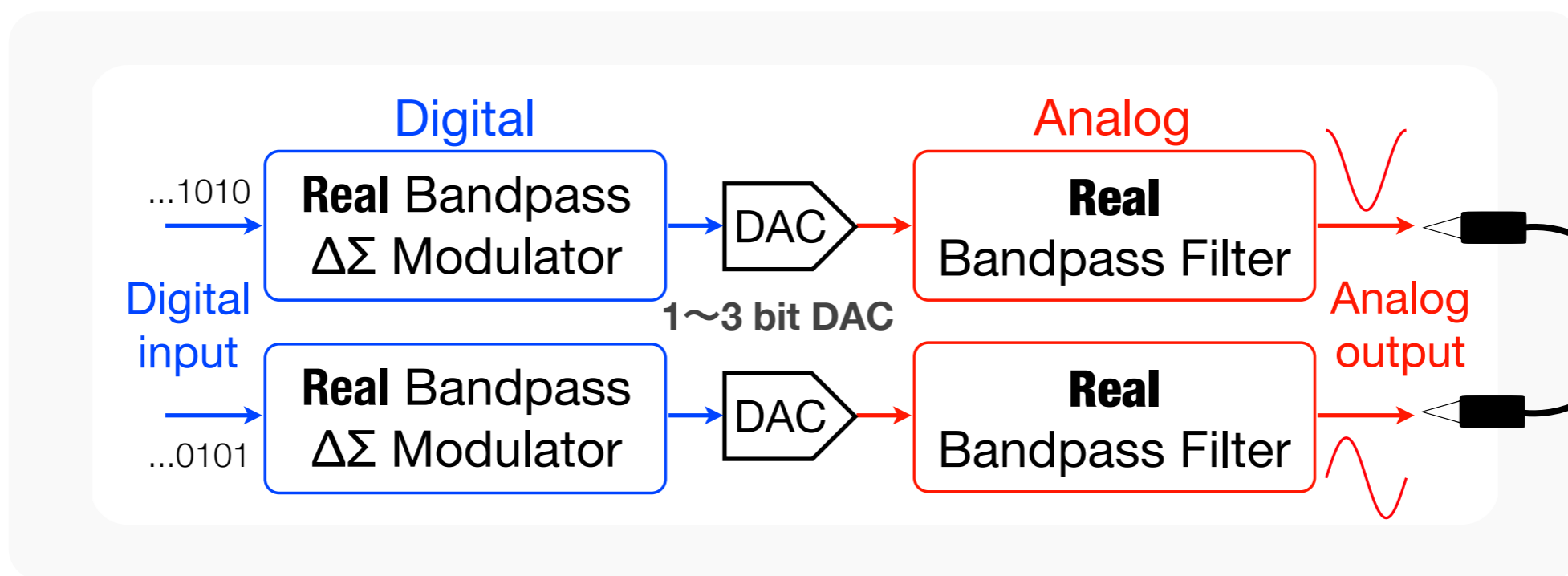


構成簡単(低コスト)で高S/N

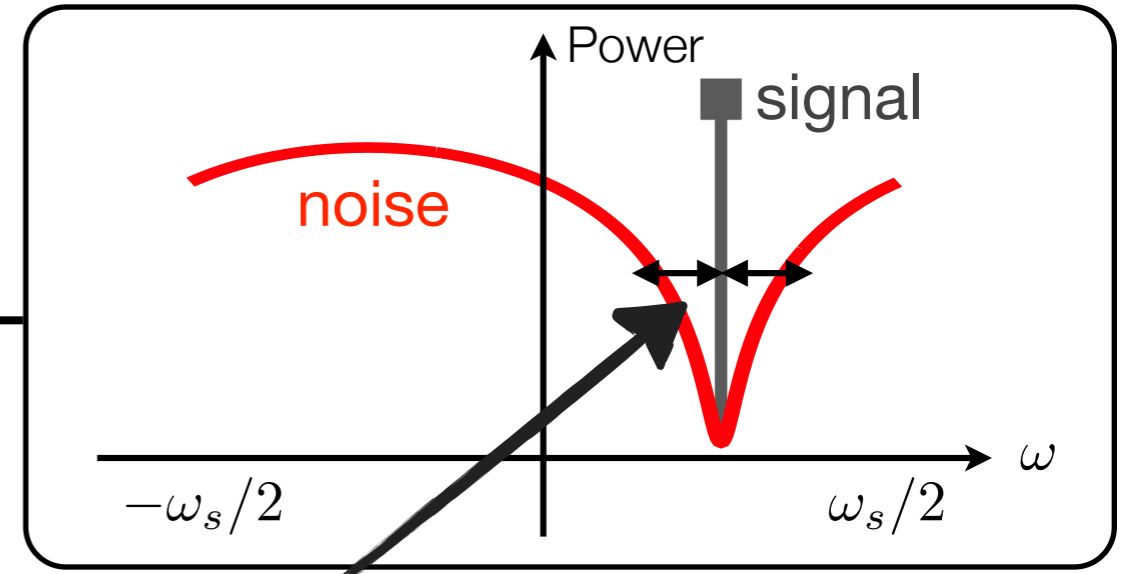
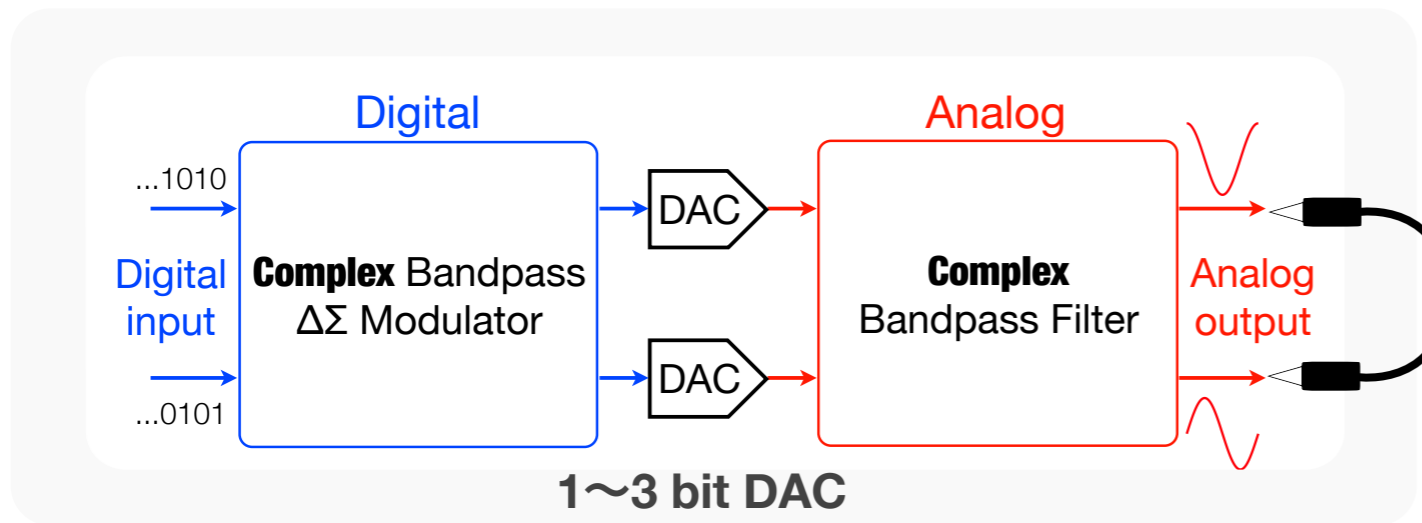
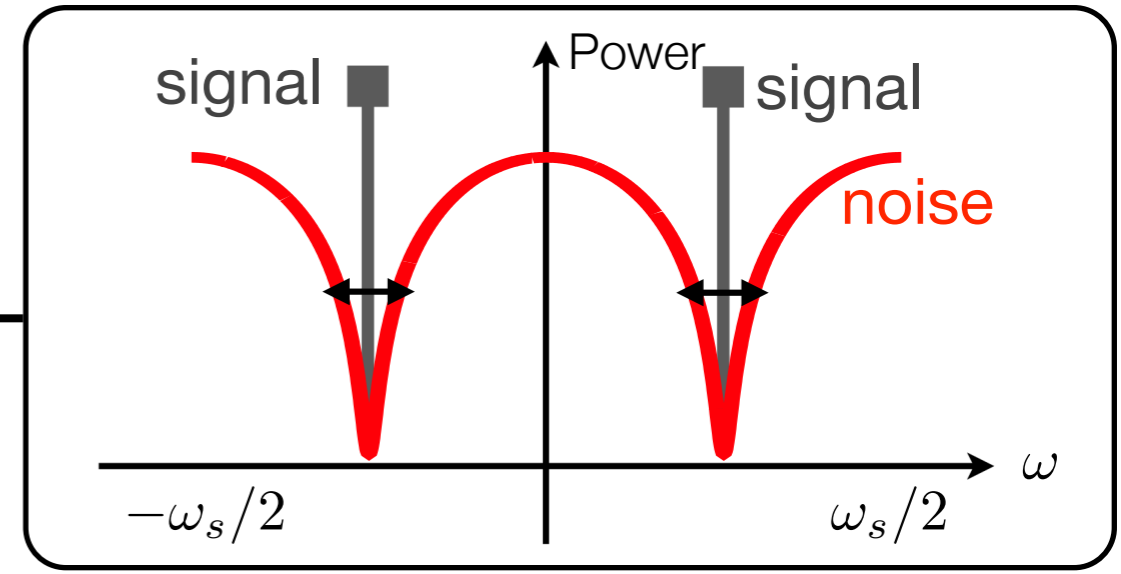
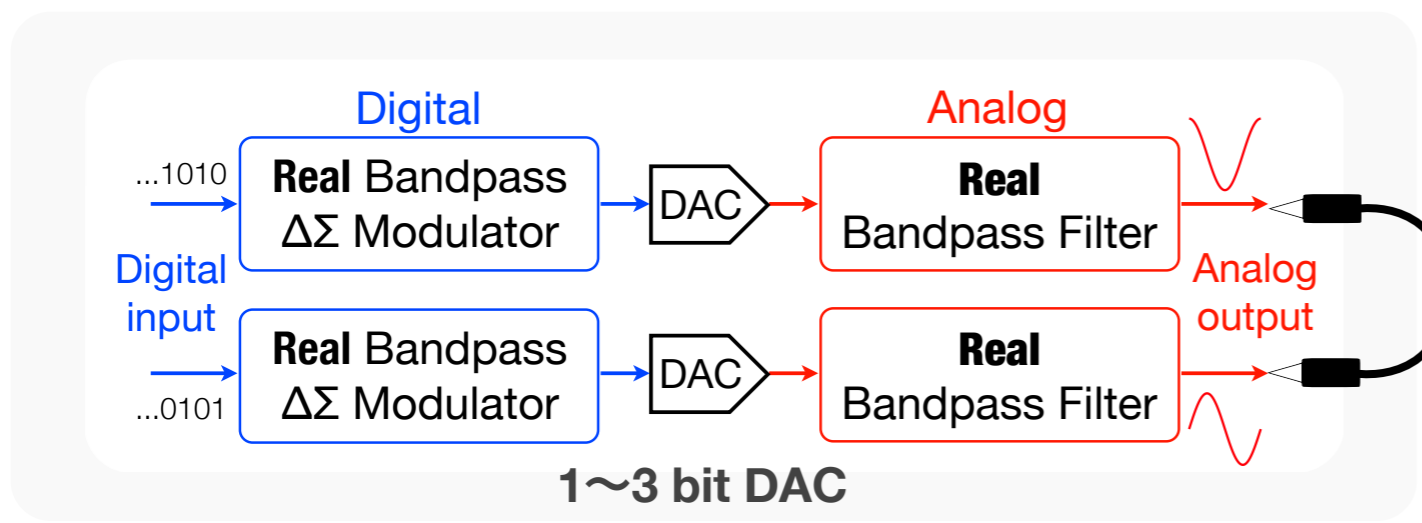
② デジタル手法 (1) ~出力パワー~



② デジタル手法 (1) ~信号帯域~



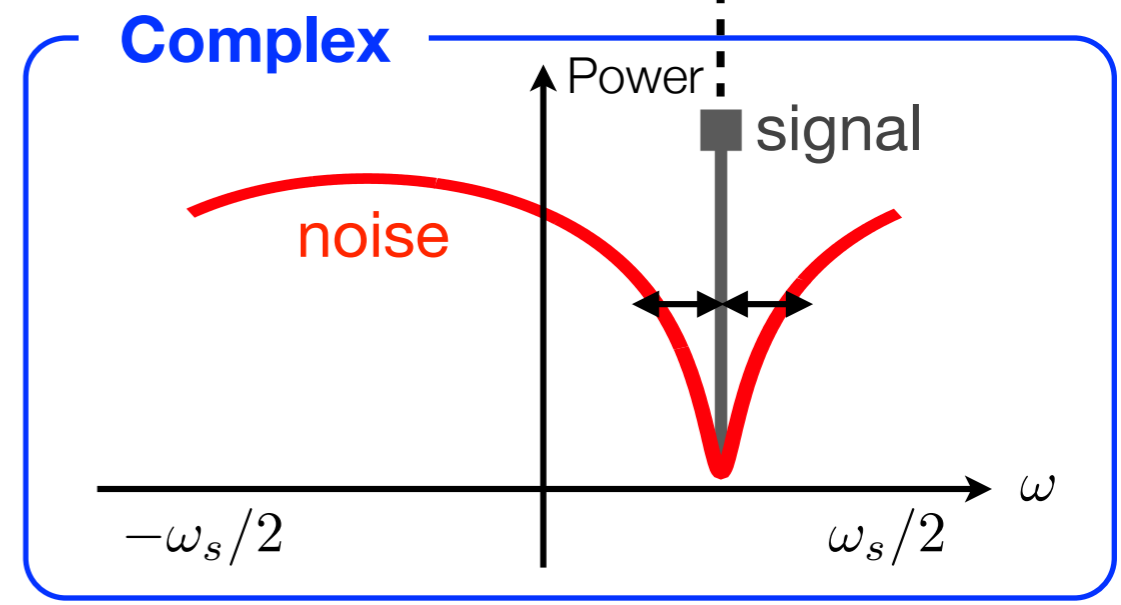
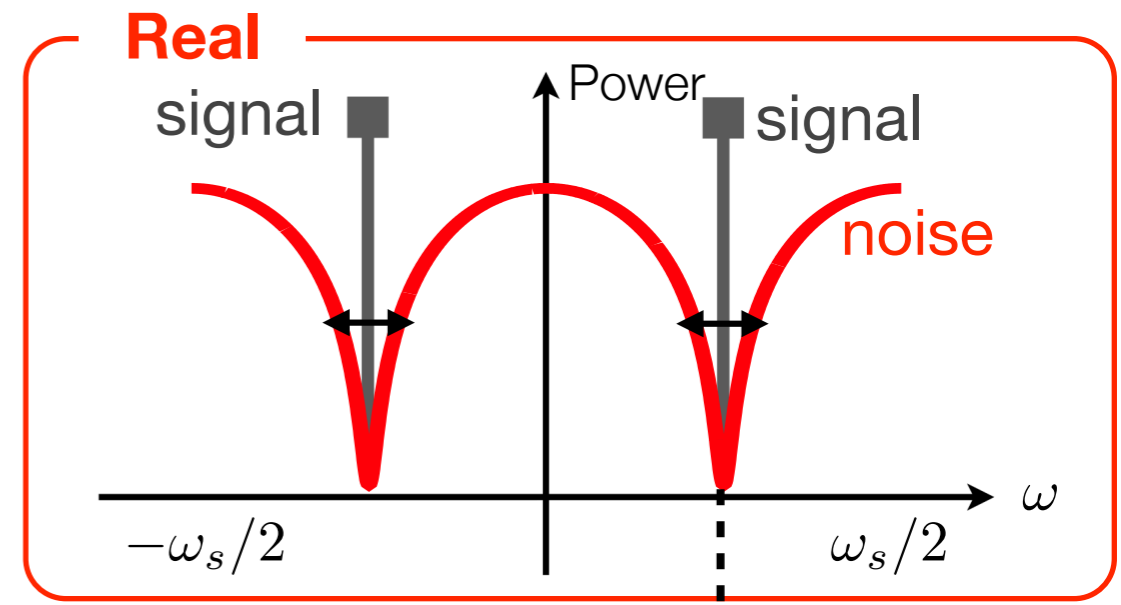
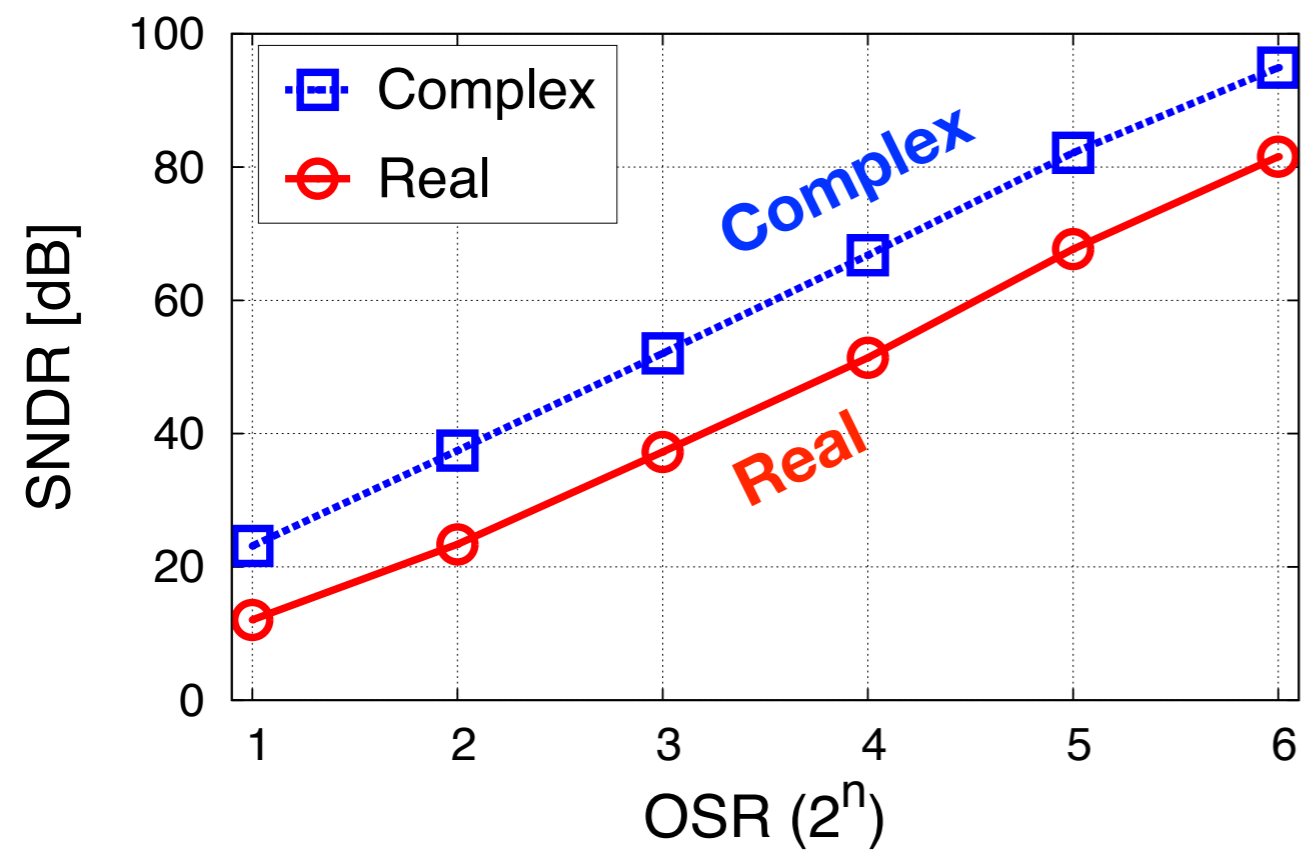
② デジタル手法 (2) ~複素信号処理~



信号帯域

SNDRの比較 ~なぜ複素を用いるのか~

SNDR | Signal to Noise and Distortion Ratio



SNDR

Complex $>$ **Real**

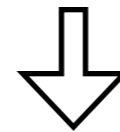
15_{dB}

⇒ 高品質な I,Q 信号

複素信号とは

実信号

I_{in} , Q_{in}



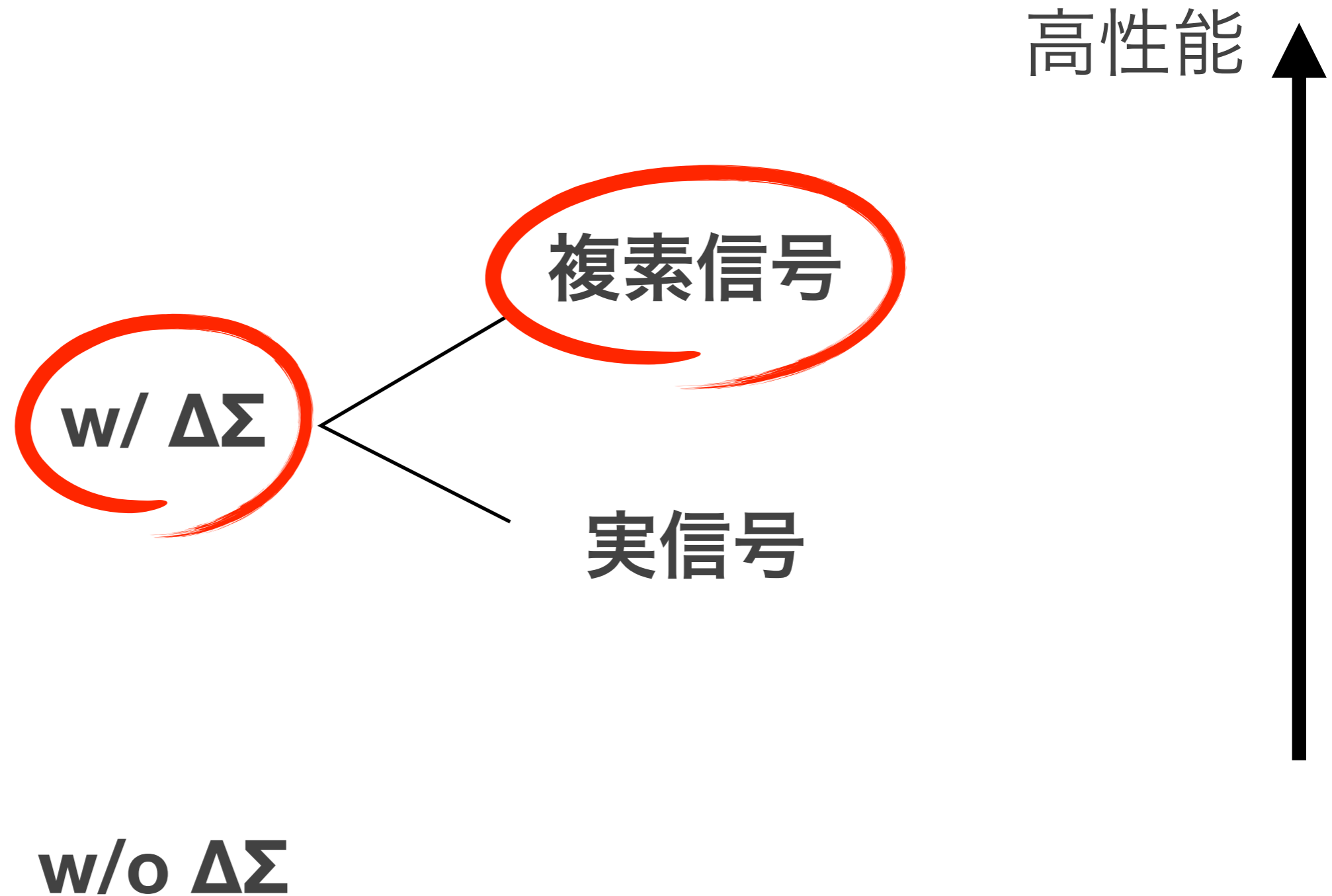
複素信号

$I_{in} + jQ_{in}$

$j = \sqrt{-1}$

Complex signal processing is NOT complex. (K.Martin)

高性能化へのアプローチ まとめ



OUTLINE

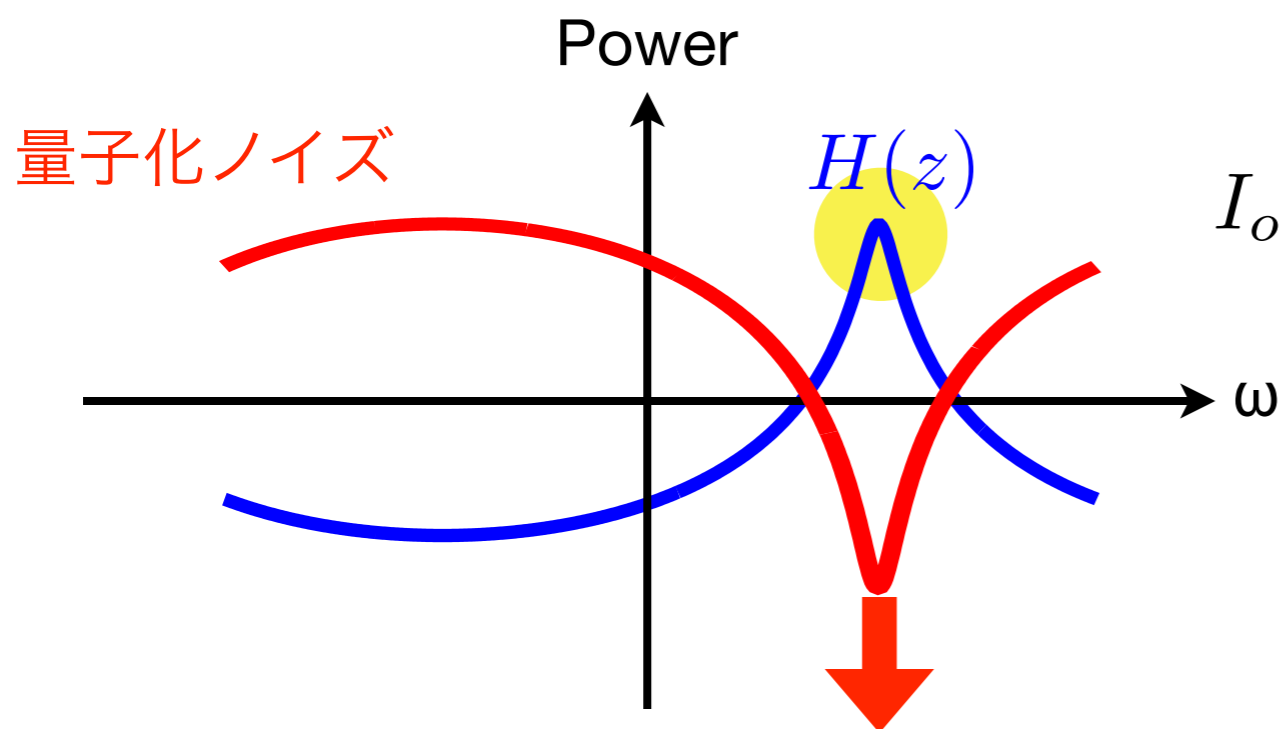
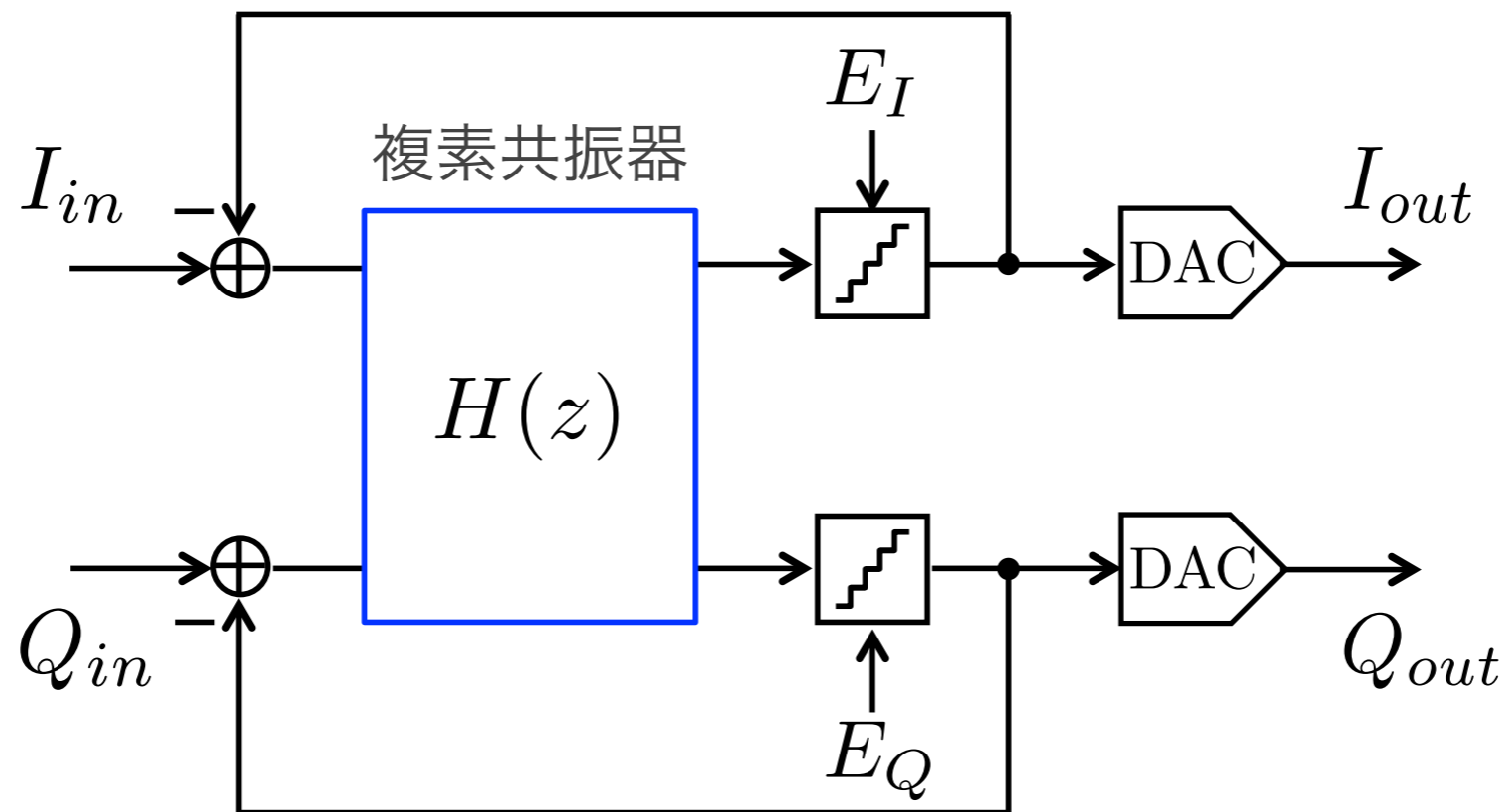
▶ 研究背景

▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DA 変調器

▶ アップコンバージョン

▶ まとめ

複素バンドパス $\Delta\Sigma$ DACの構成

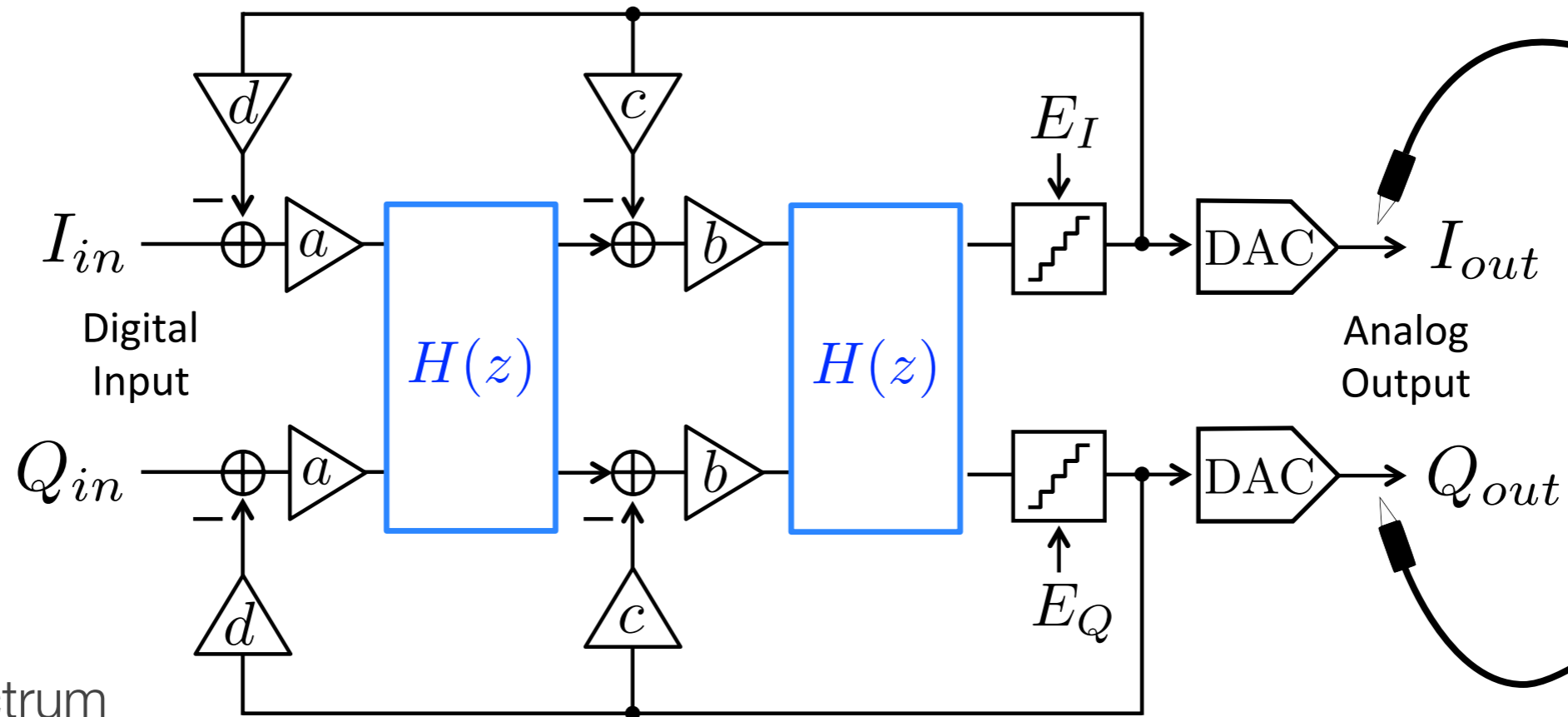


Signal Transfer Function = 1

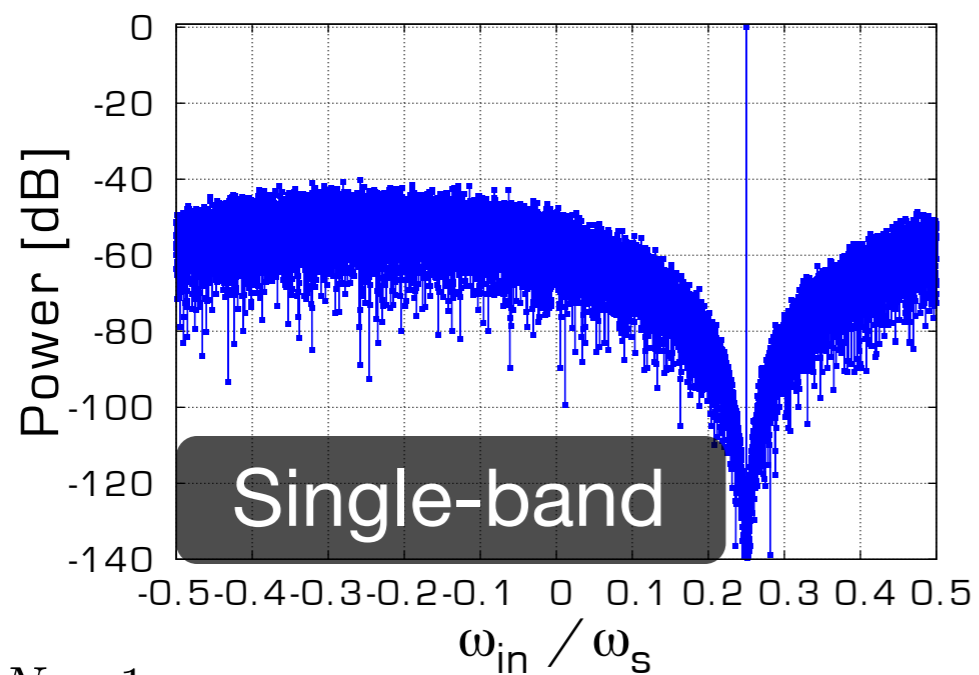
$$I_{out} + jQ_{out} = \boxed{1} (I_{in} + jQ_{in}) + \boxed{0} (E_I + jE_Q)$$

Noise Transfer Function = 0

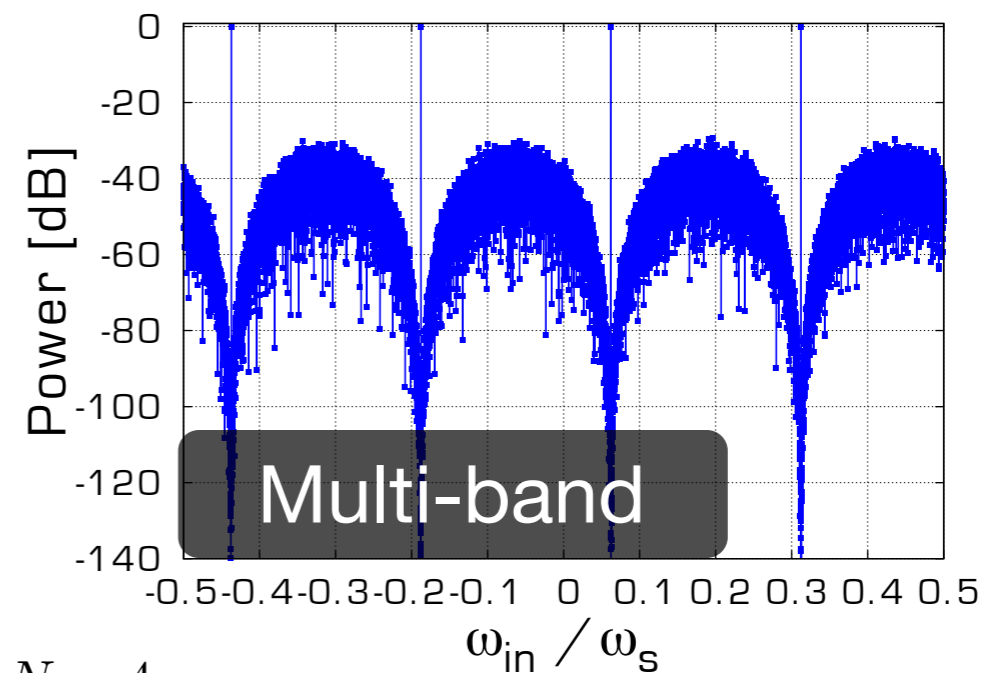
2次複素マルチバンドパスデルタシグマDAC



Output spectrum



$N = 1$

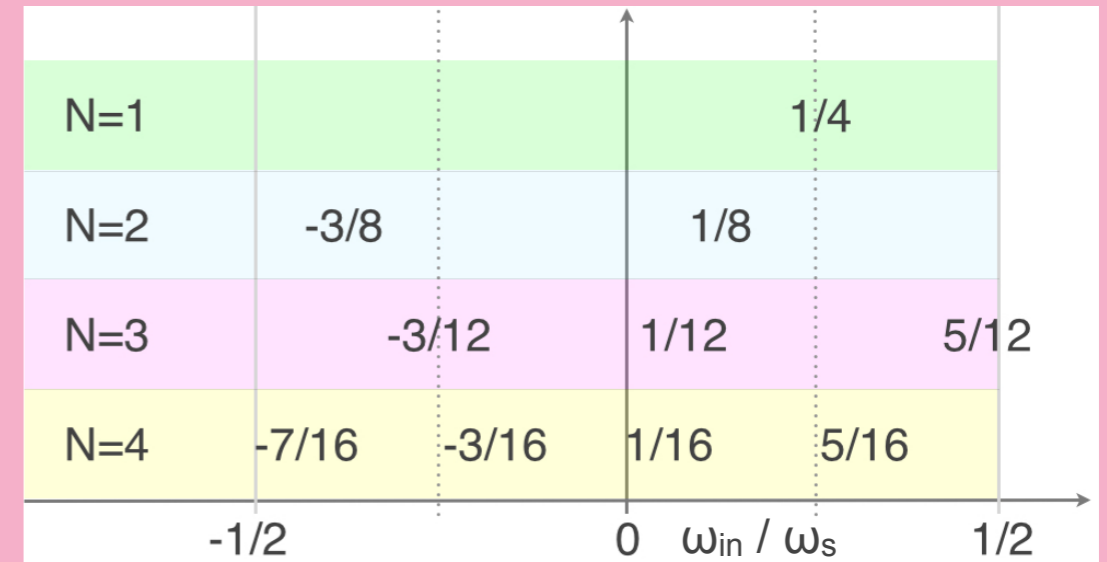


$N = 4$

NTFのゼロ点の位置 (信号帯域)

COMPLEX

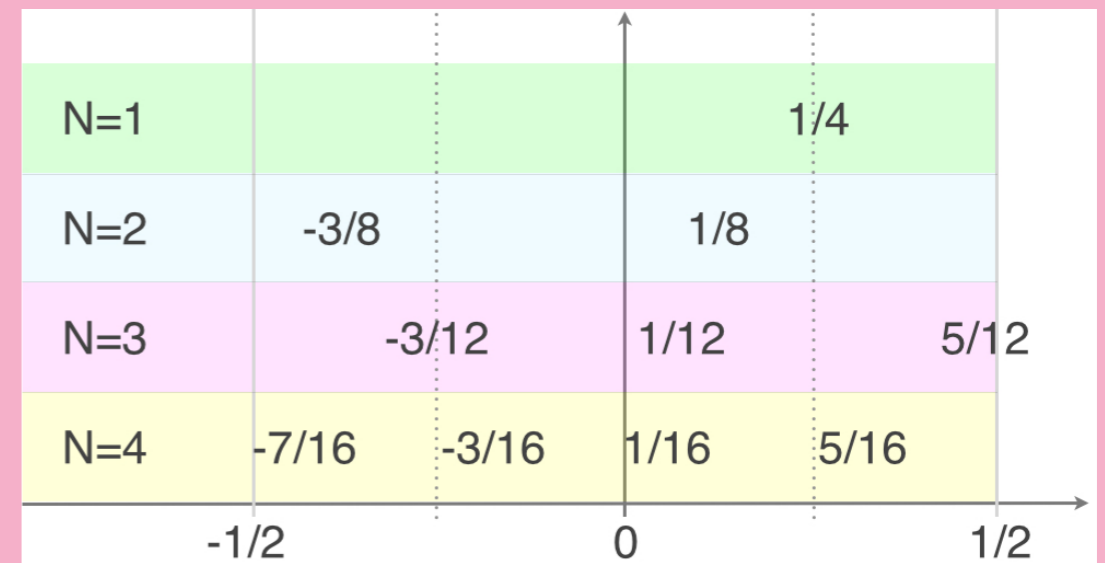
$\omega = 0$ に対して非対称



NTFのゼロ点の位置 (信号帯域)

COMPLEX

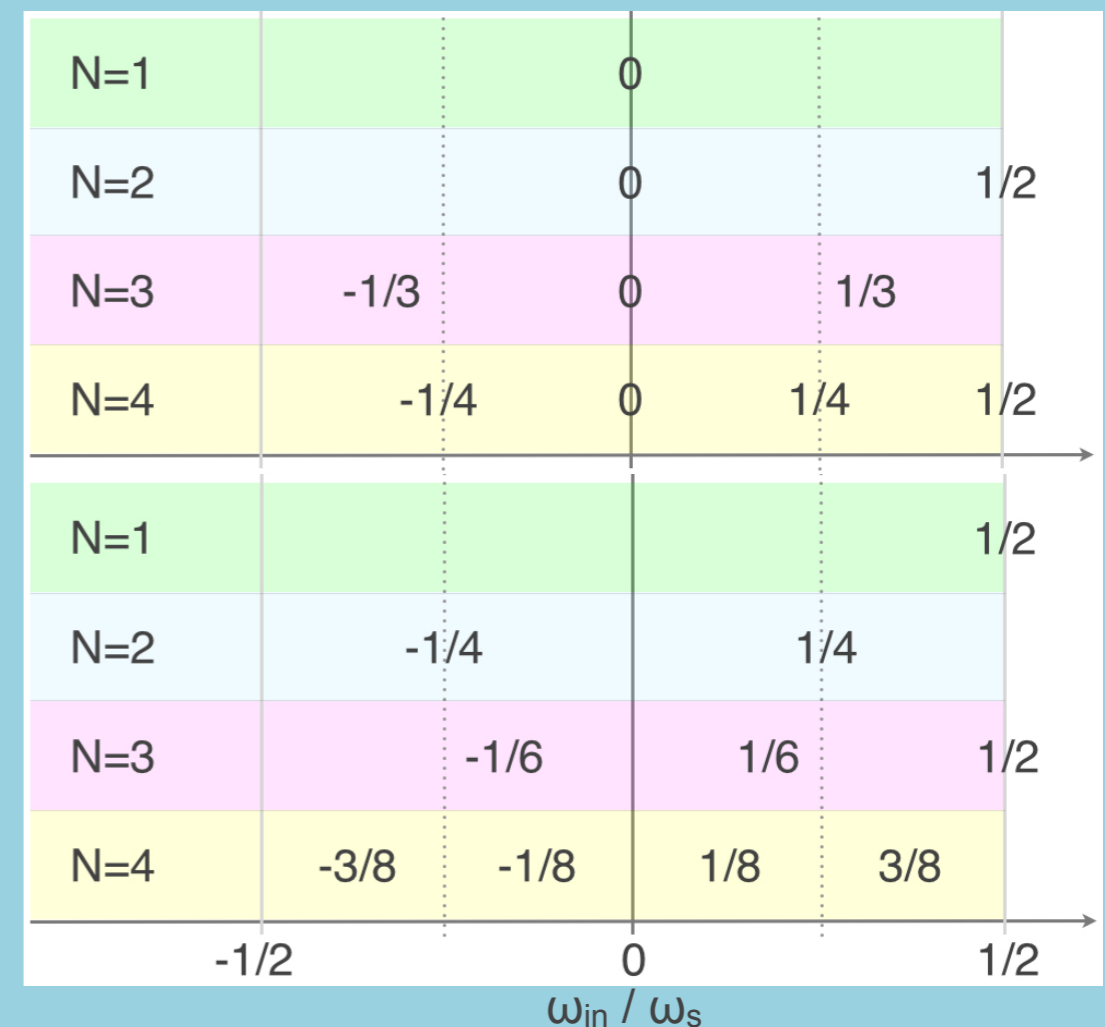
$\omega = 0$ に対して非対称



REAL

DCにゼロ点 (ノッチ)

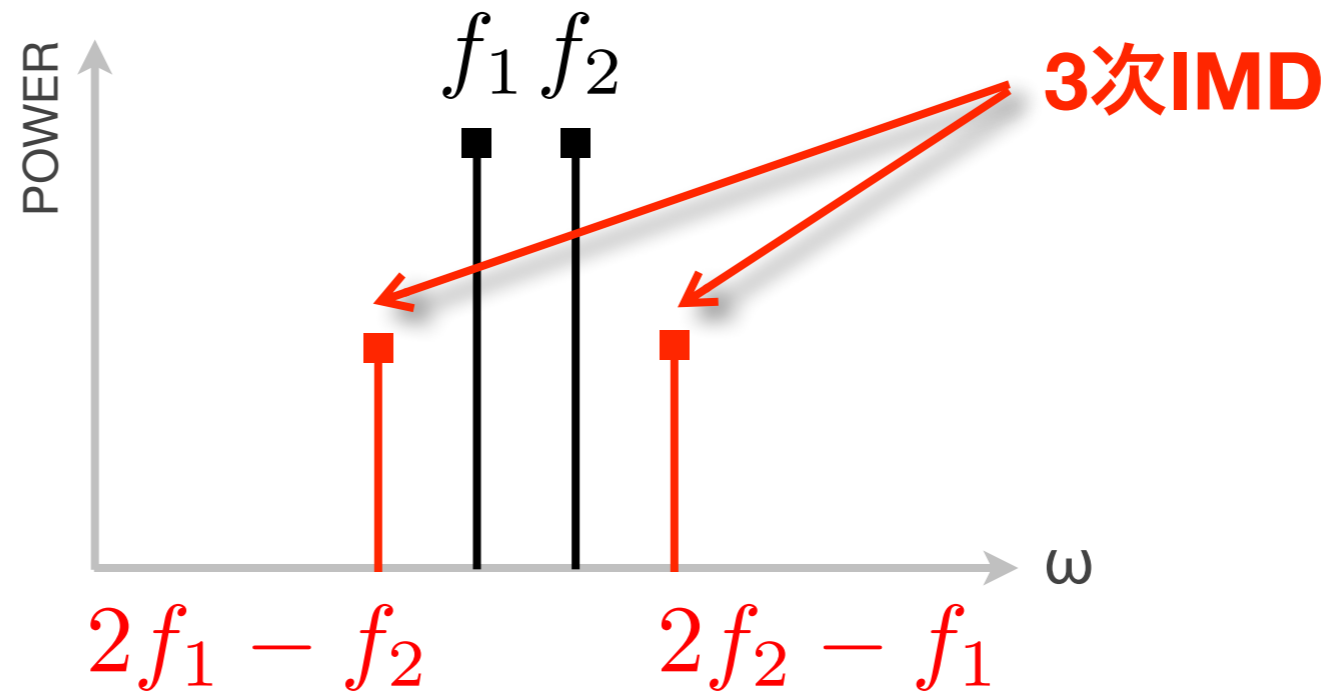
LowPass



High Pass

ω_{in} / ω_s

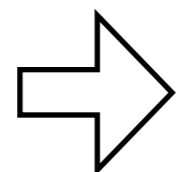
相互変調ひずみ (IMD) の測定



入力周波数 $f_1 \approx f_2$ のとき

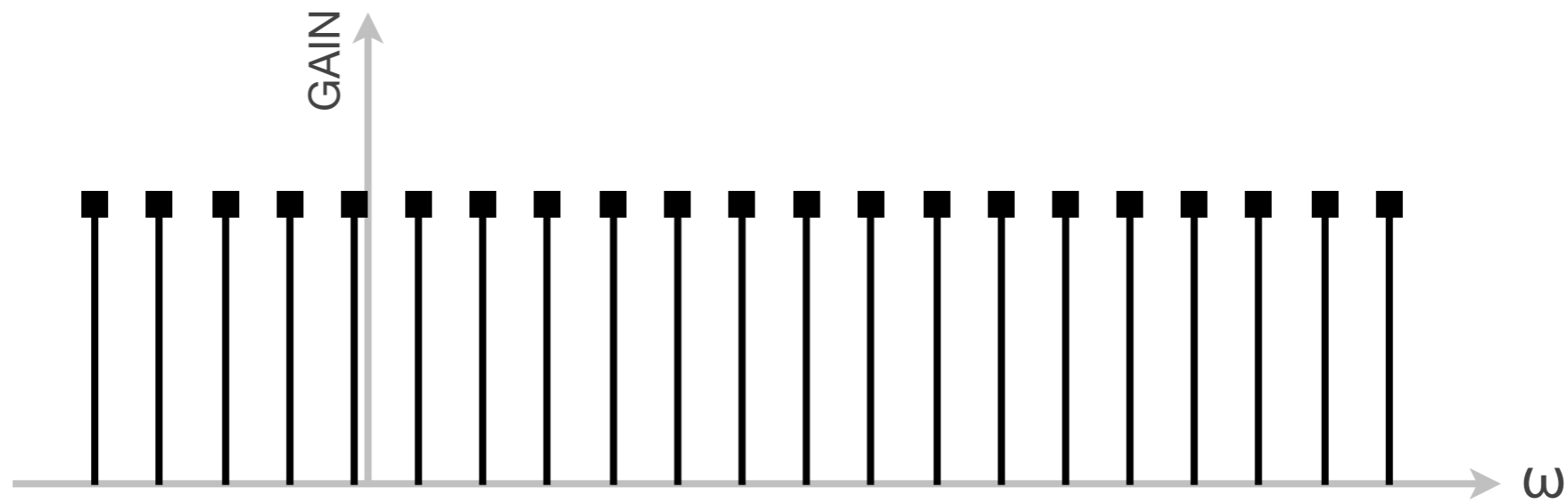
3次IMD成分が信号帯域に入り込む

評価のために

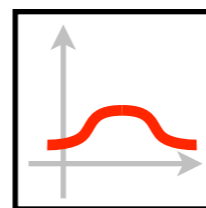


高精度な2トーン信号が必要

アナログフィルタのテスト

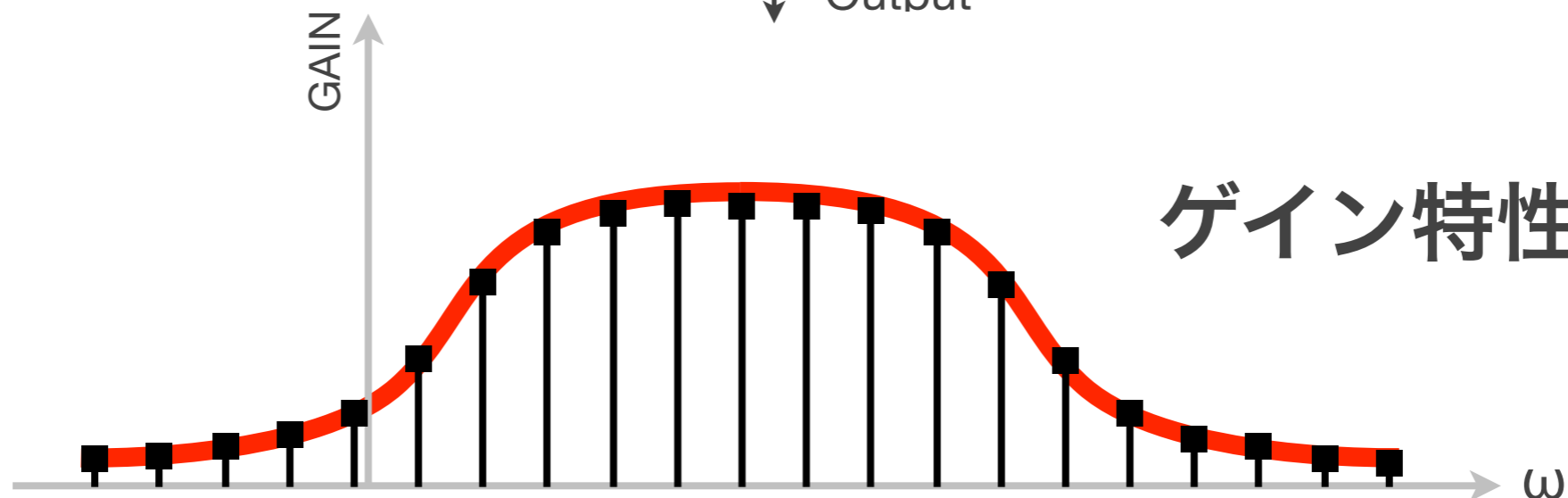


Input



複素バンドパス アナログフィルタ

Output



ゲイン特性をみる

OUTLINE

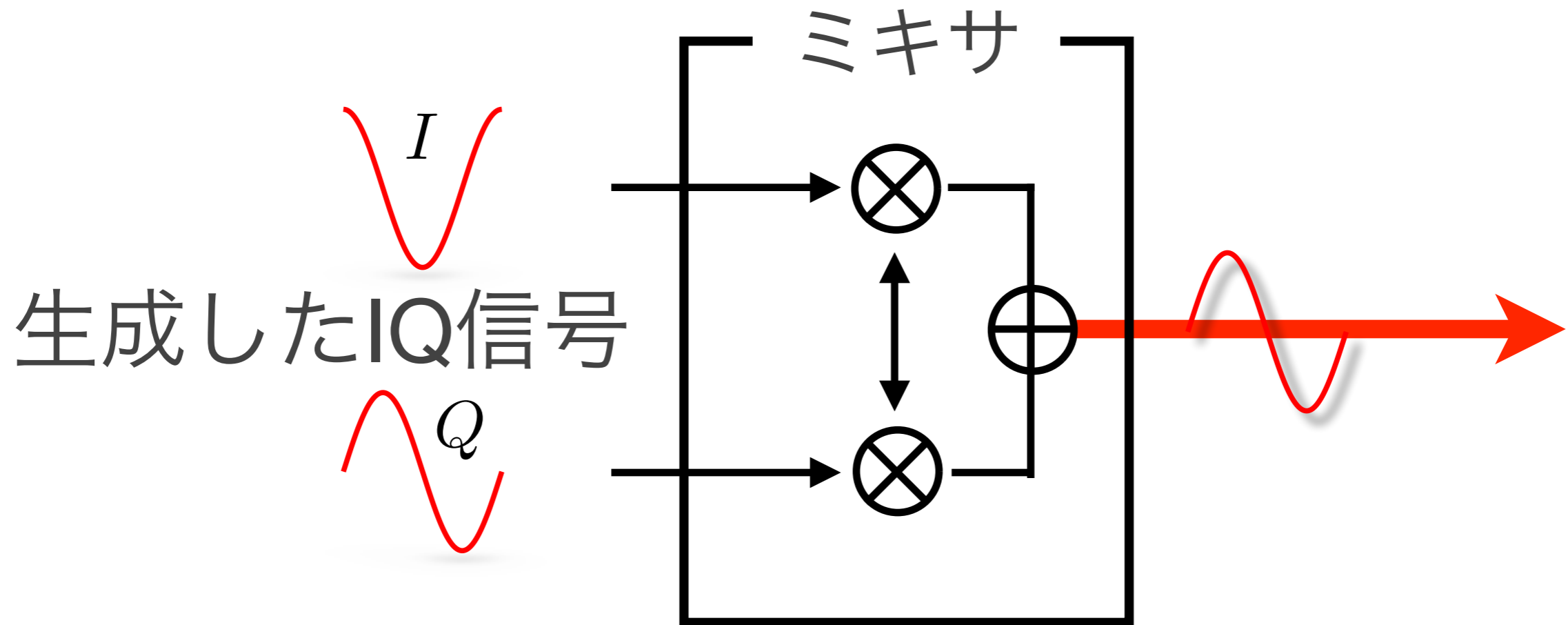
▶ 研究背景

▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DA 変調器

▶ アップコンバージョン

▶ まとめ

テスト対象アプリケーションの拡張



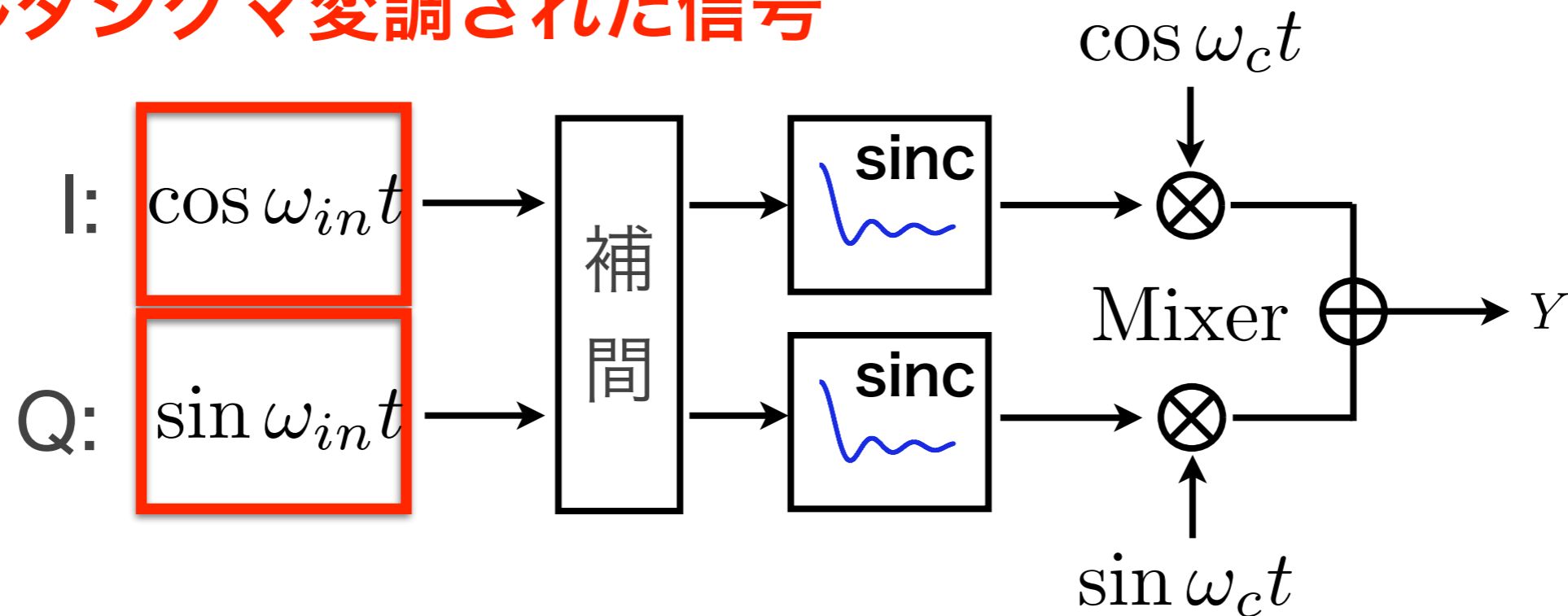
生成したIQ信号 → アップコンバージョン



アプリケーションの幅はさらに広がる

被アップコンバージョンの波

複素デルタシグマ変調された信号

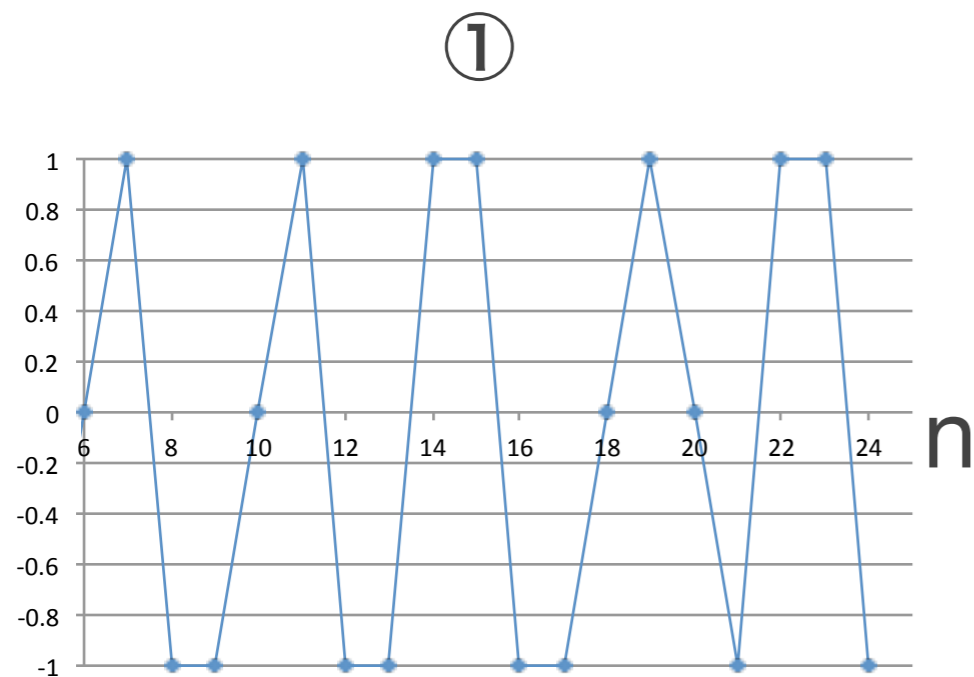
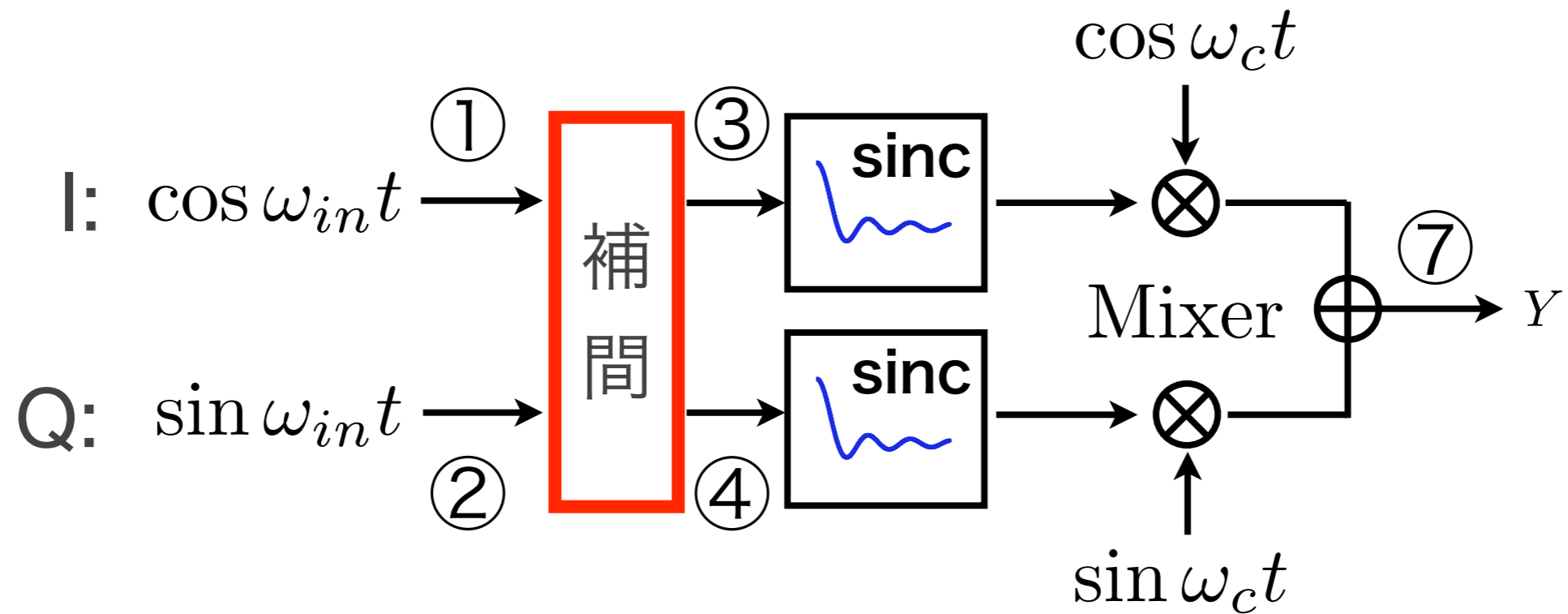


サンプリング周波数 f_s : 2^{10}

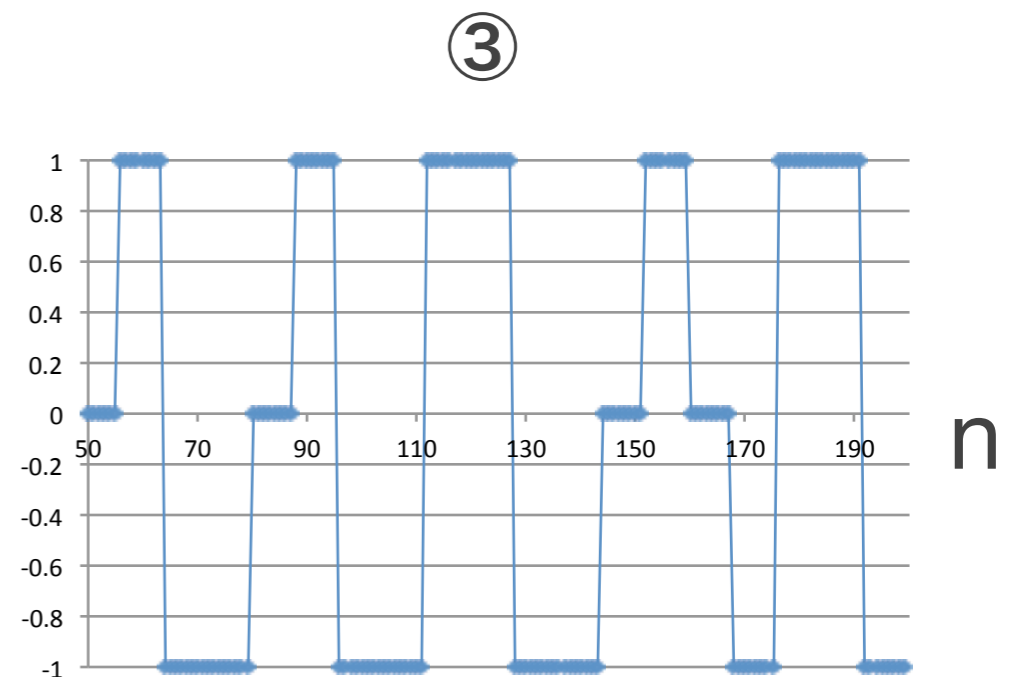
cos(sin)波周波数 f_{in} : 257 ← $f_s/4$ に近い素数

サンプル数 n : 2^{10}

デジタル値の補間 8clk-Hold

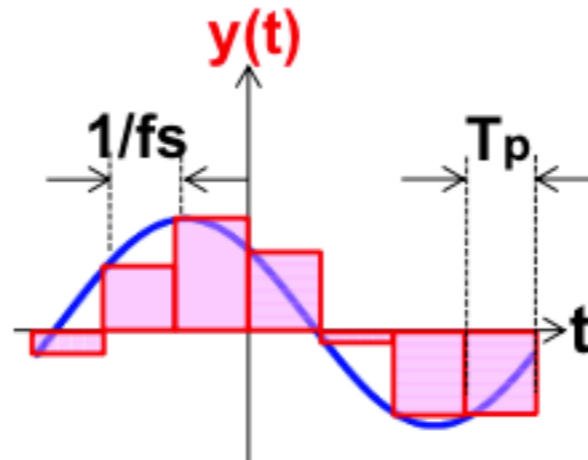


Hold(8clk)

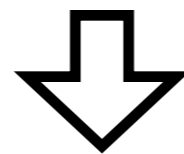


DACの出力波形 ~0次ホールド~

($T_p=1/f_s$)



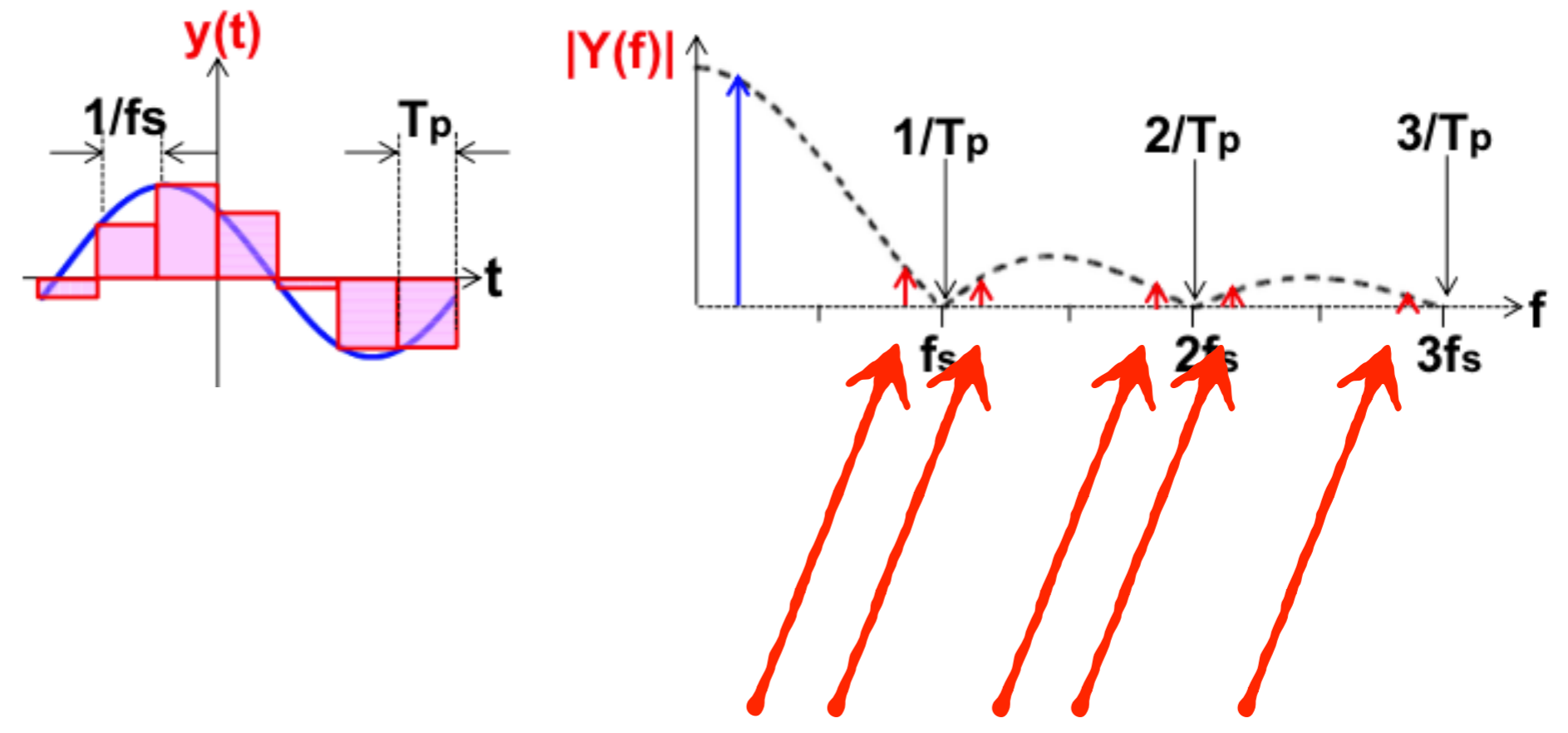
通常のDAC：0次ホールド



0次ホールドに近づけるために補間をする
(ホールドする点数は多いほどよい)

DACの出力スペクトル ~イメージの発生~

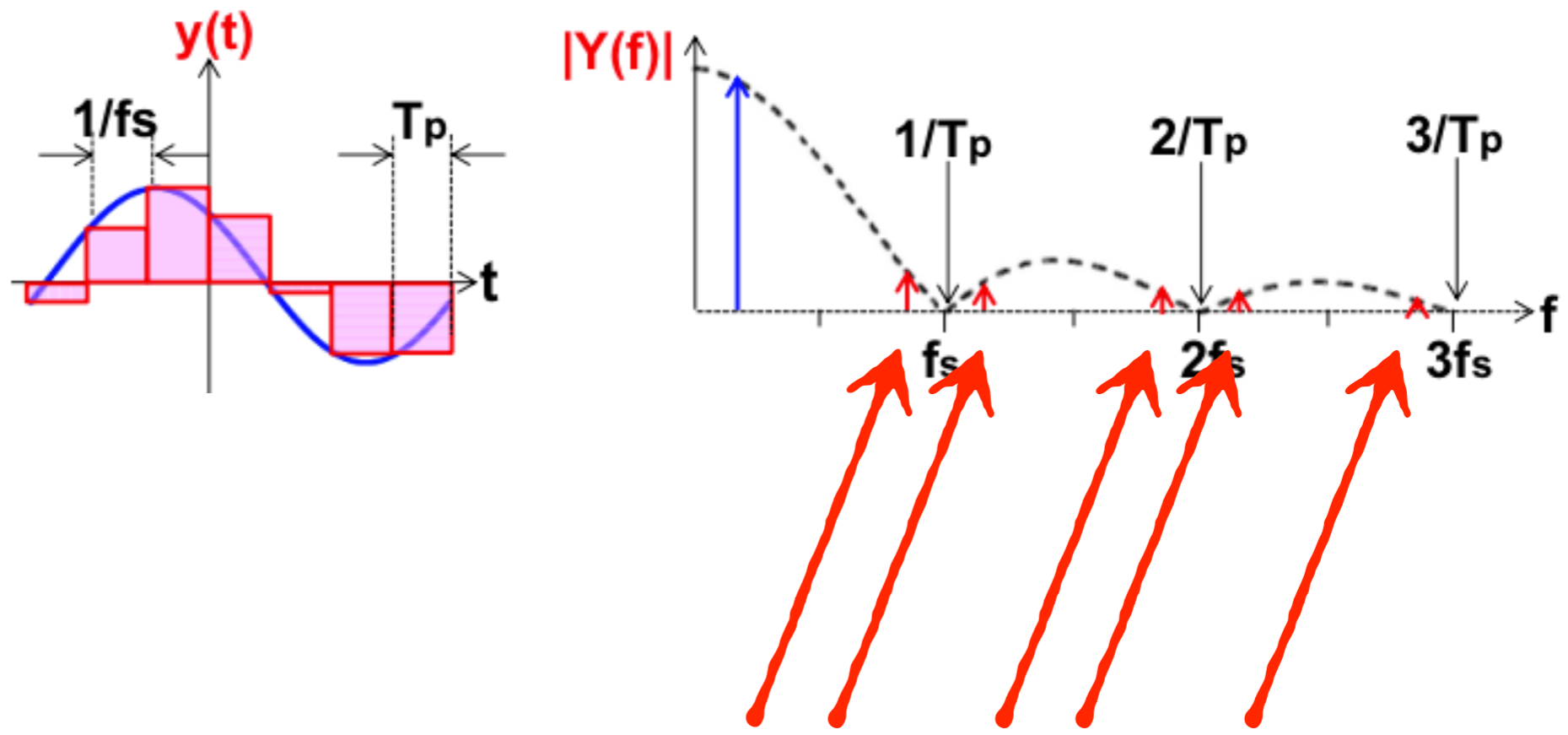
($T_p=1/f_s$)



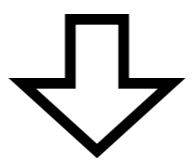
(sinc効果はかかるが) イメージが発生

DACの出力スペクトル ~イメージの発生~

($T_p=1/f_s$)

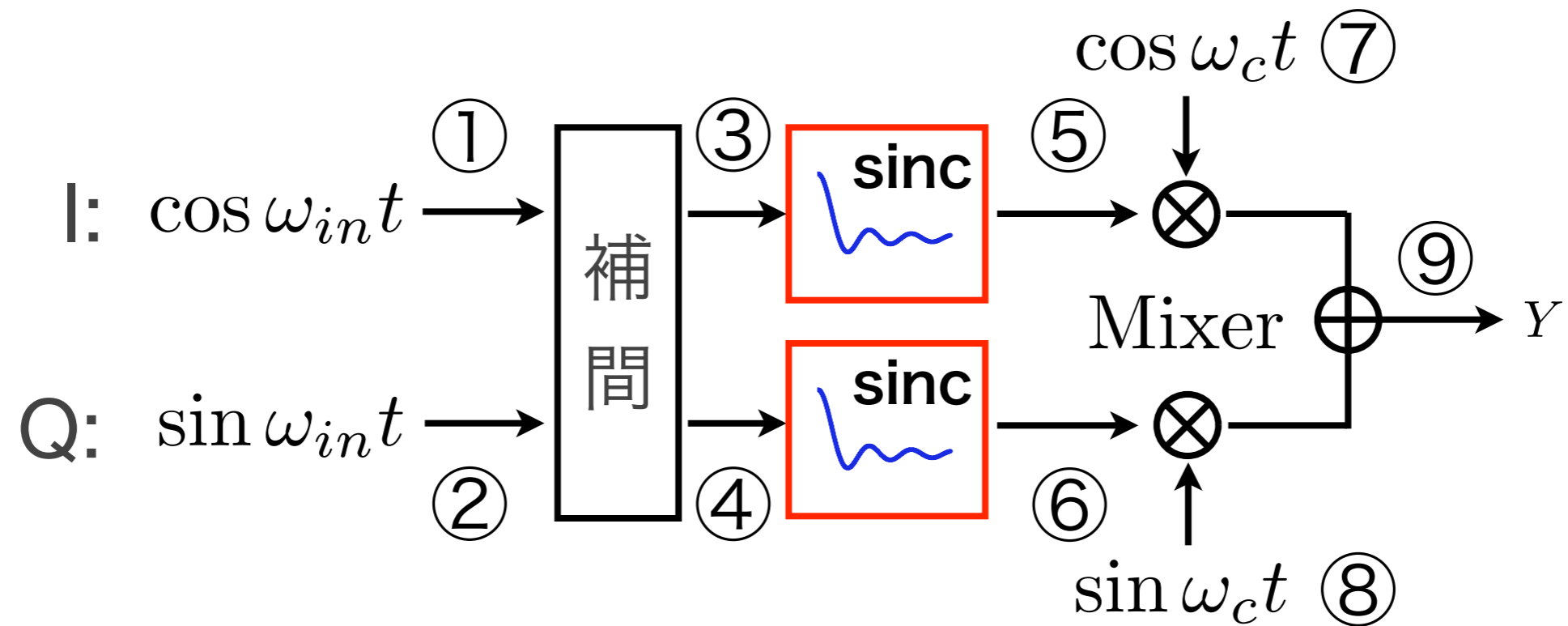


sinc効果はかかるが、イメージが発生

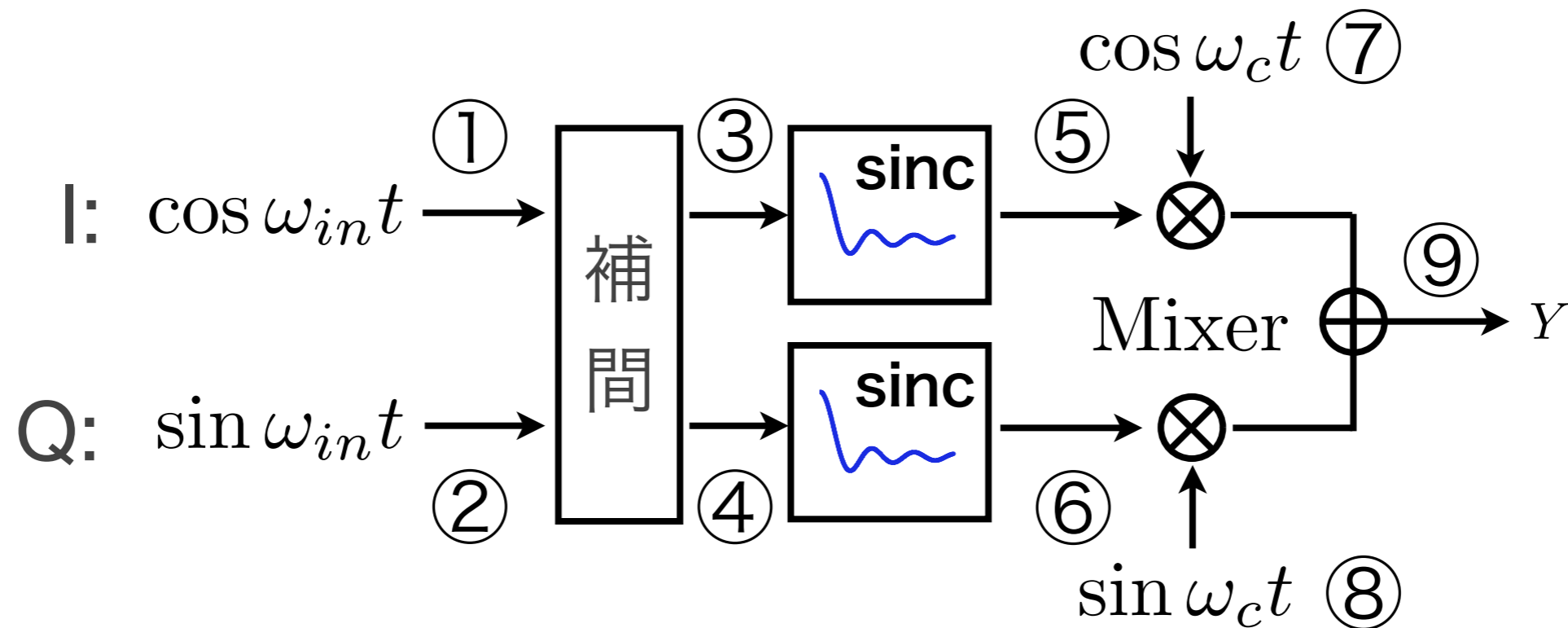


フィルタを挿入

フィルタの挿入



キャリア波の生成 $f_s \rightarrow 8f_s$



サンプリング周波数 $f_s : 2^{10}$

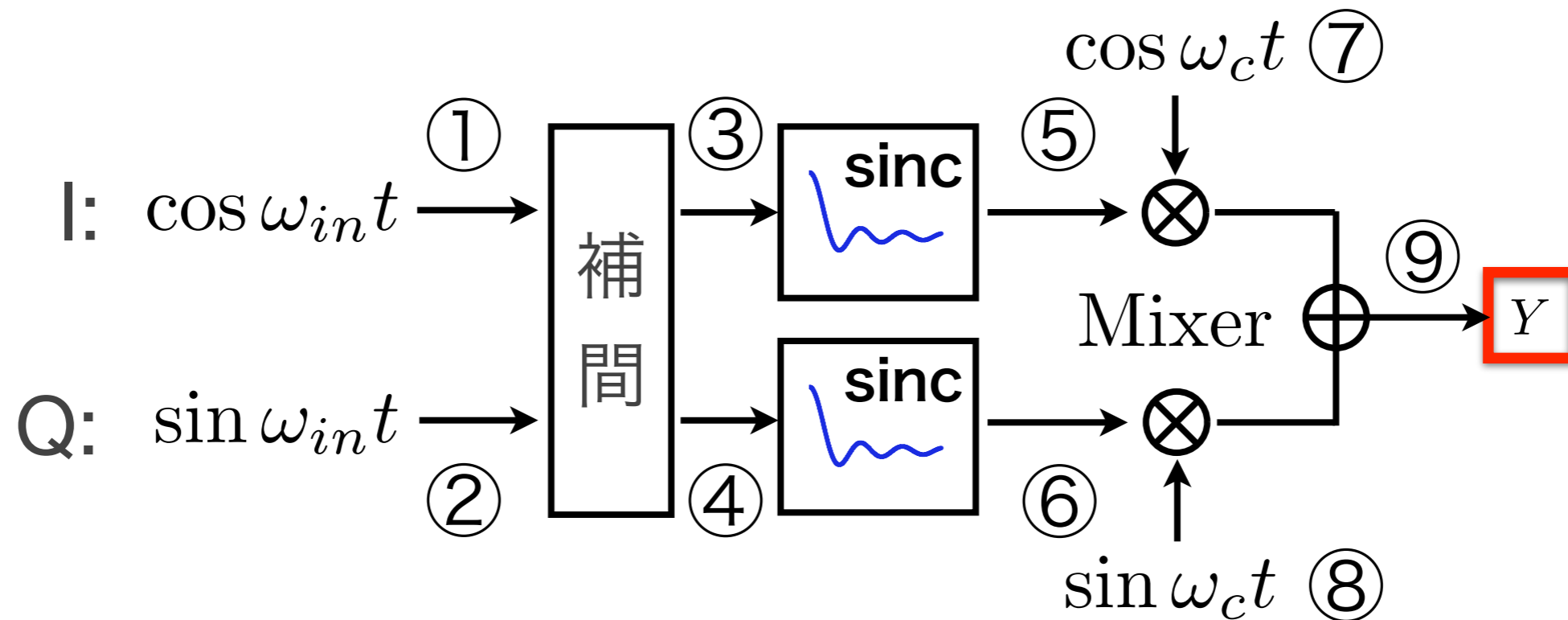
cos(sin)波周波数 $f_c : 10^5 - 1 = 99999$

サンプル数 $n : 2^{10}$

$$\cos \omega_c (n) = \cos(2 * \pi * (f_c / (8 * f_s)) * n)$$

$$\sin \omega_c (n) = \sin(2 * \pi * (f_c / (8 * f_s)) * n)$$

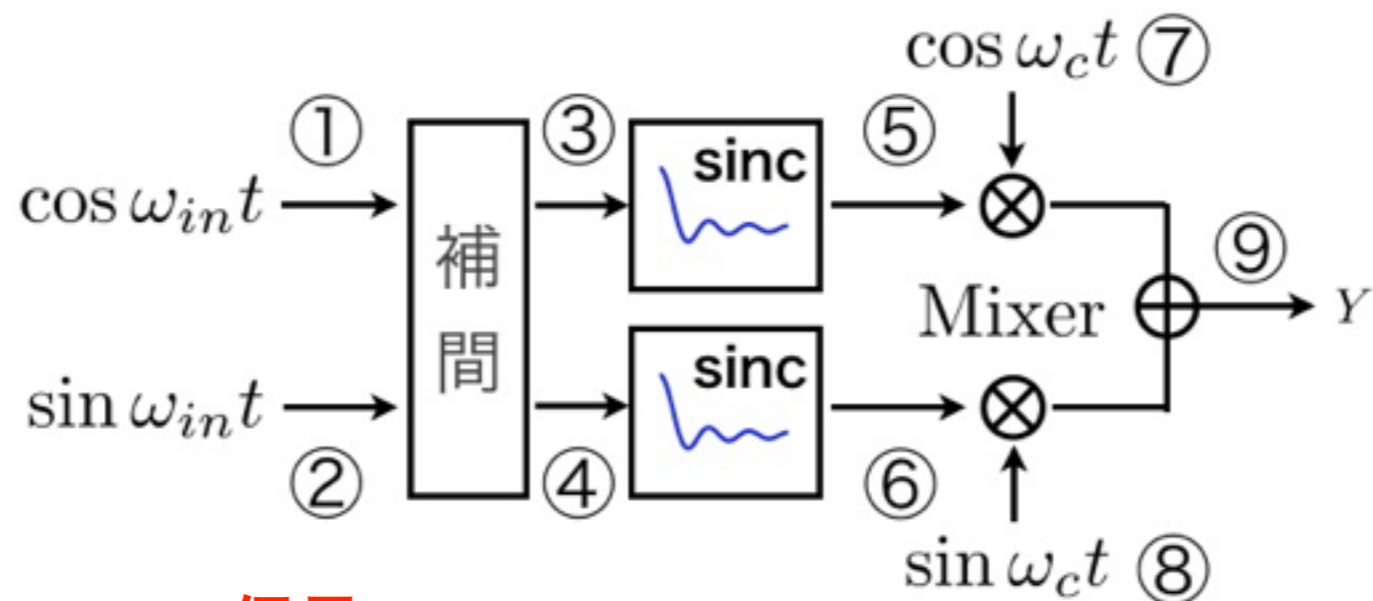
アップコンバージョン後の周波数



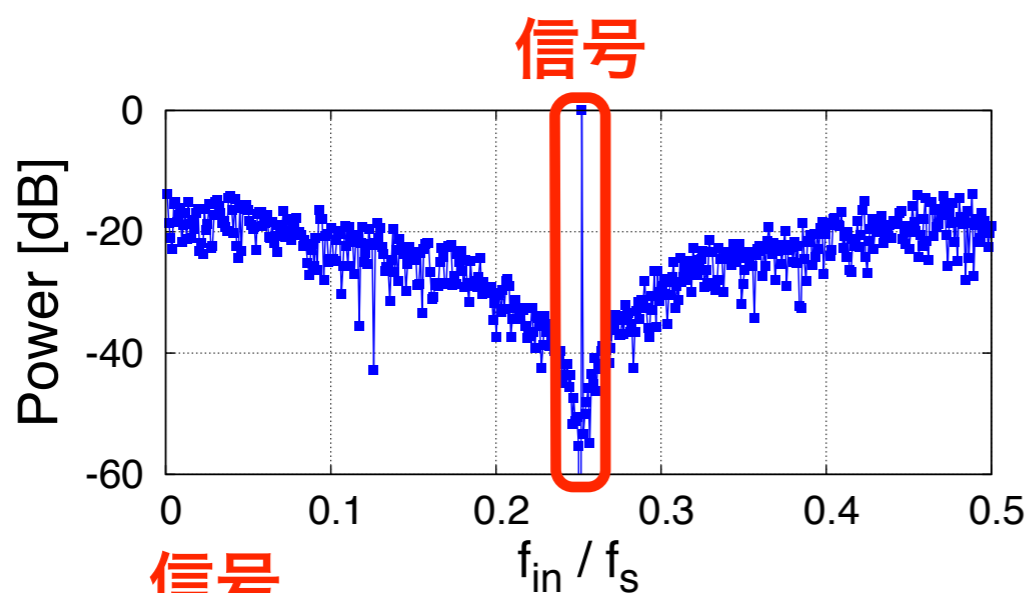
アップコンバージョン後の周波数 f_{up}

$$f_{up} \equiv f_c - f_{in} = 99999 - 257 = 99742$$

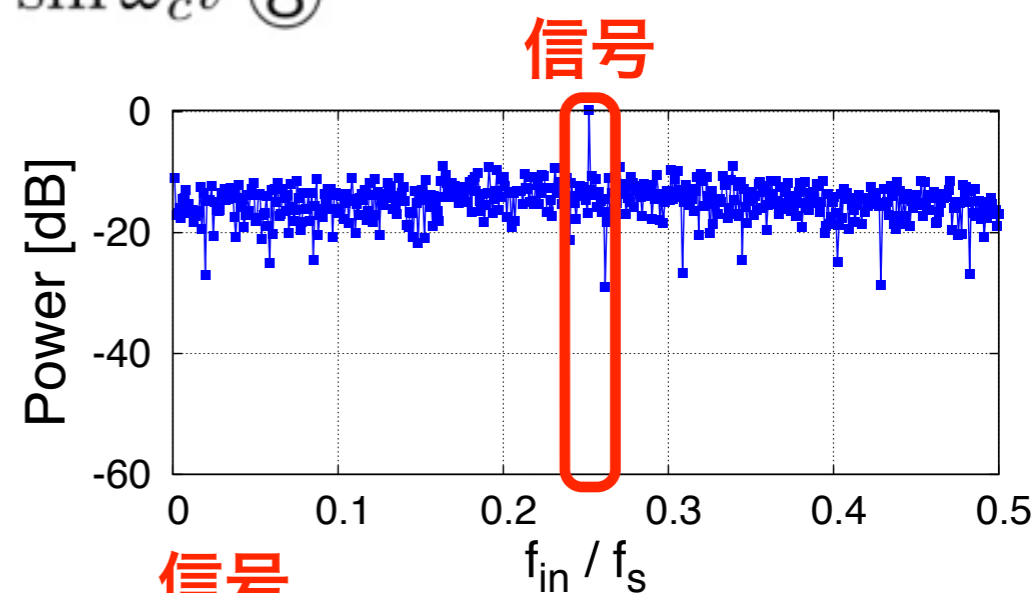
シミュレーション結果 ~パワースペクトラム~



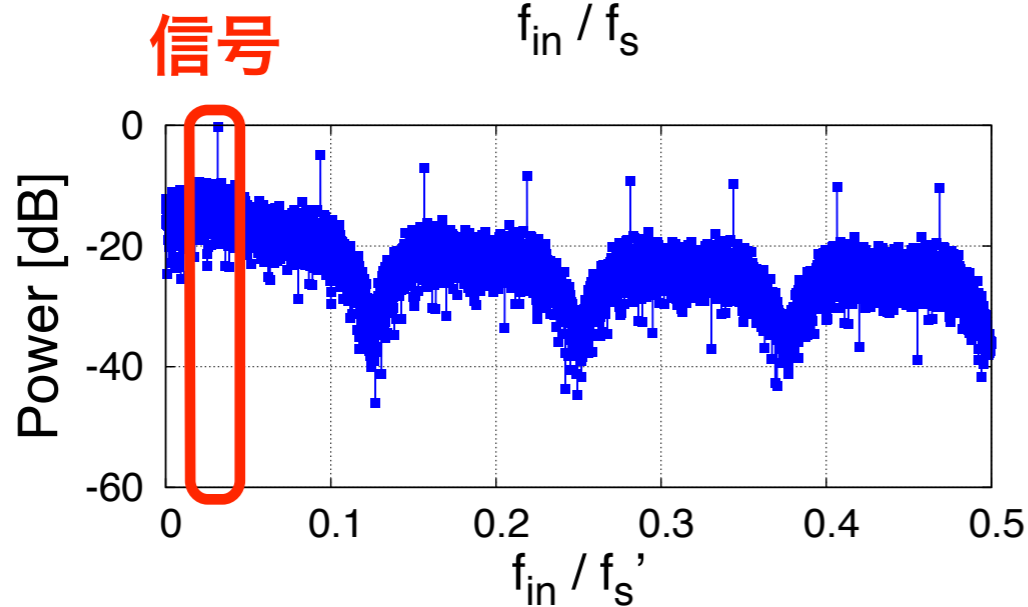
① + j②



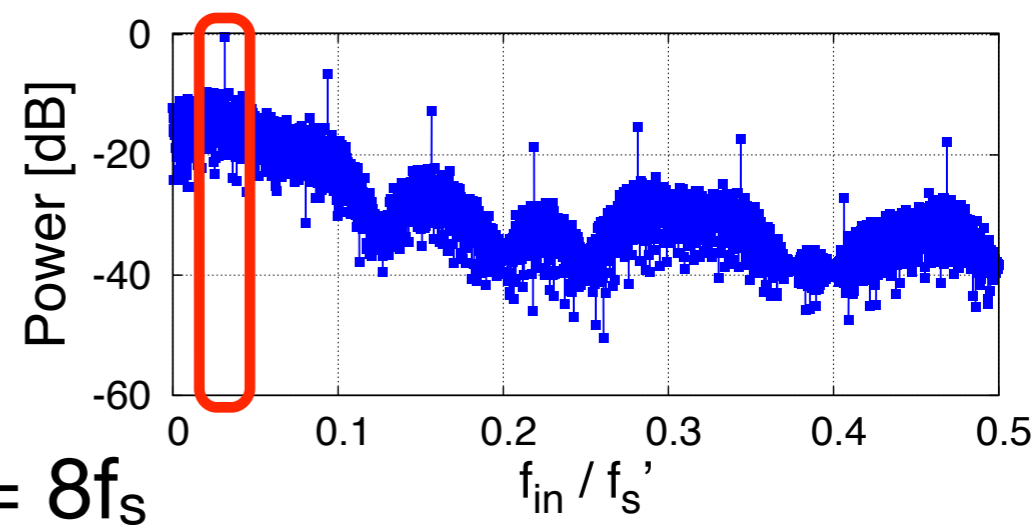
①



③

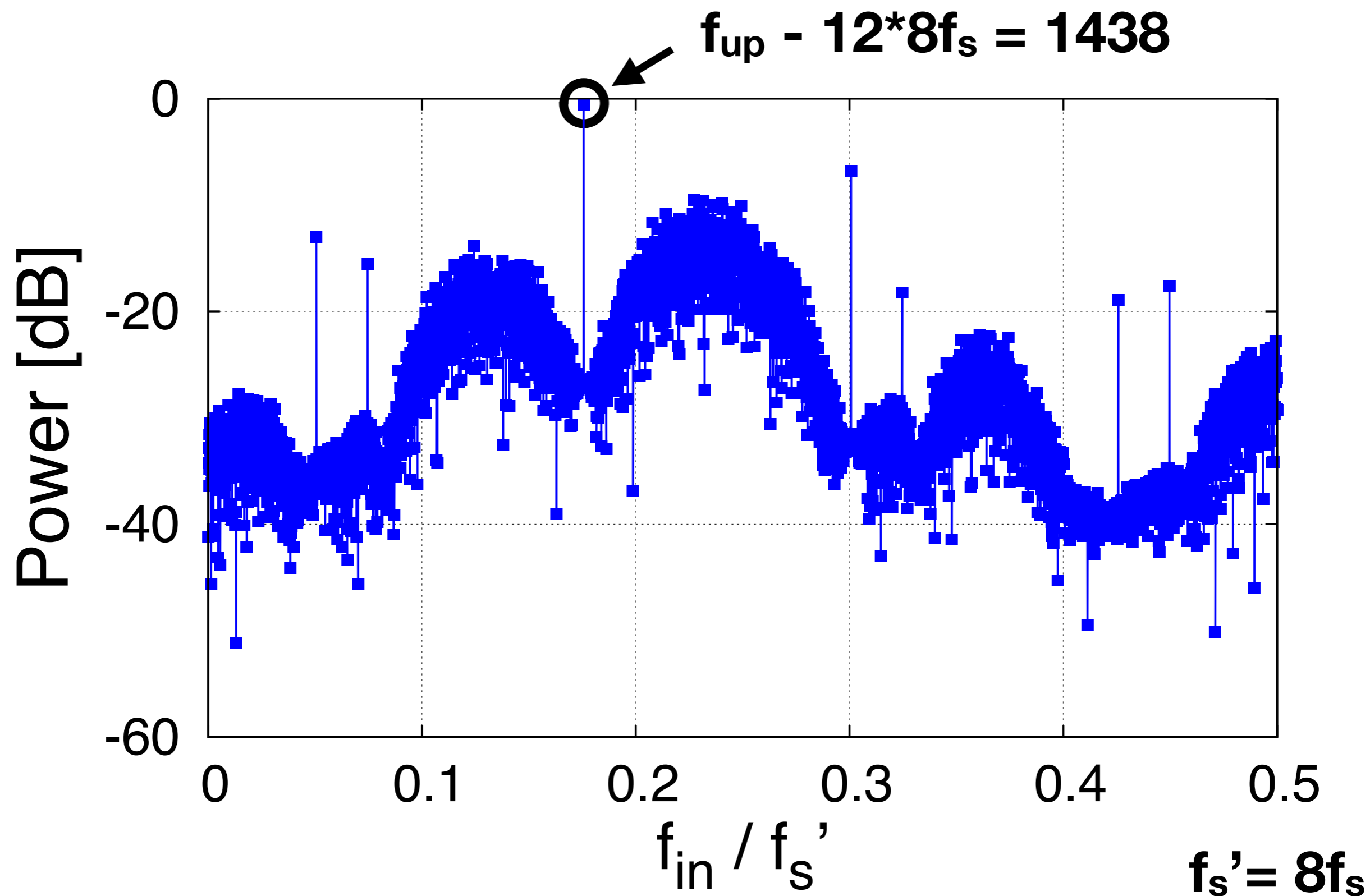


⑤



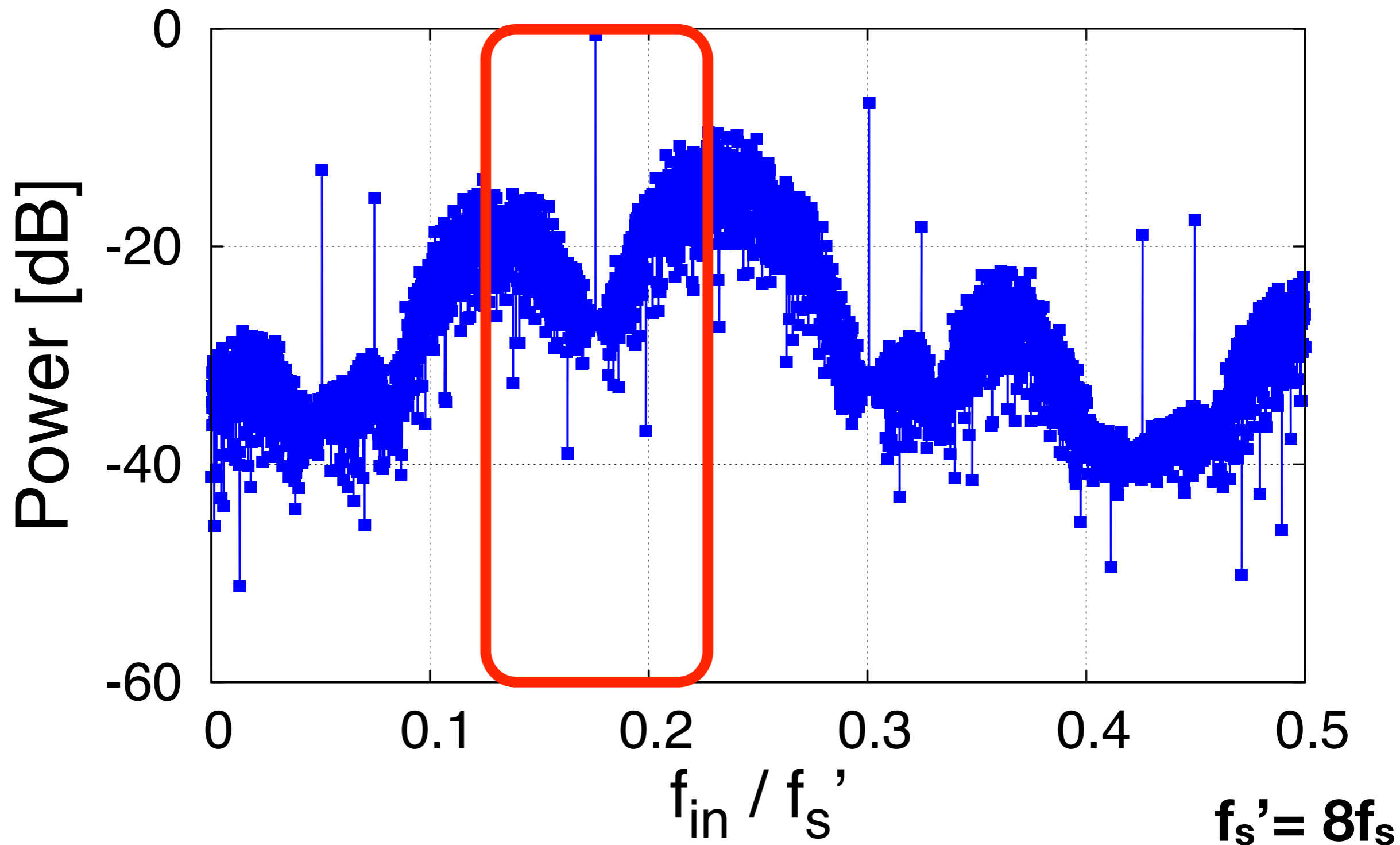
シミュレーション結果 ~⑨最終出力パワースペクトラム~

アップコンバージョン後の周波数(折り返し)



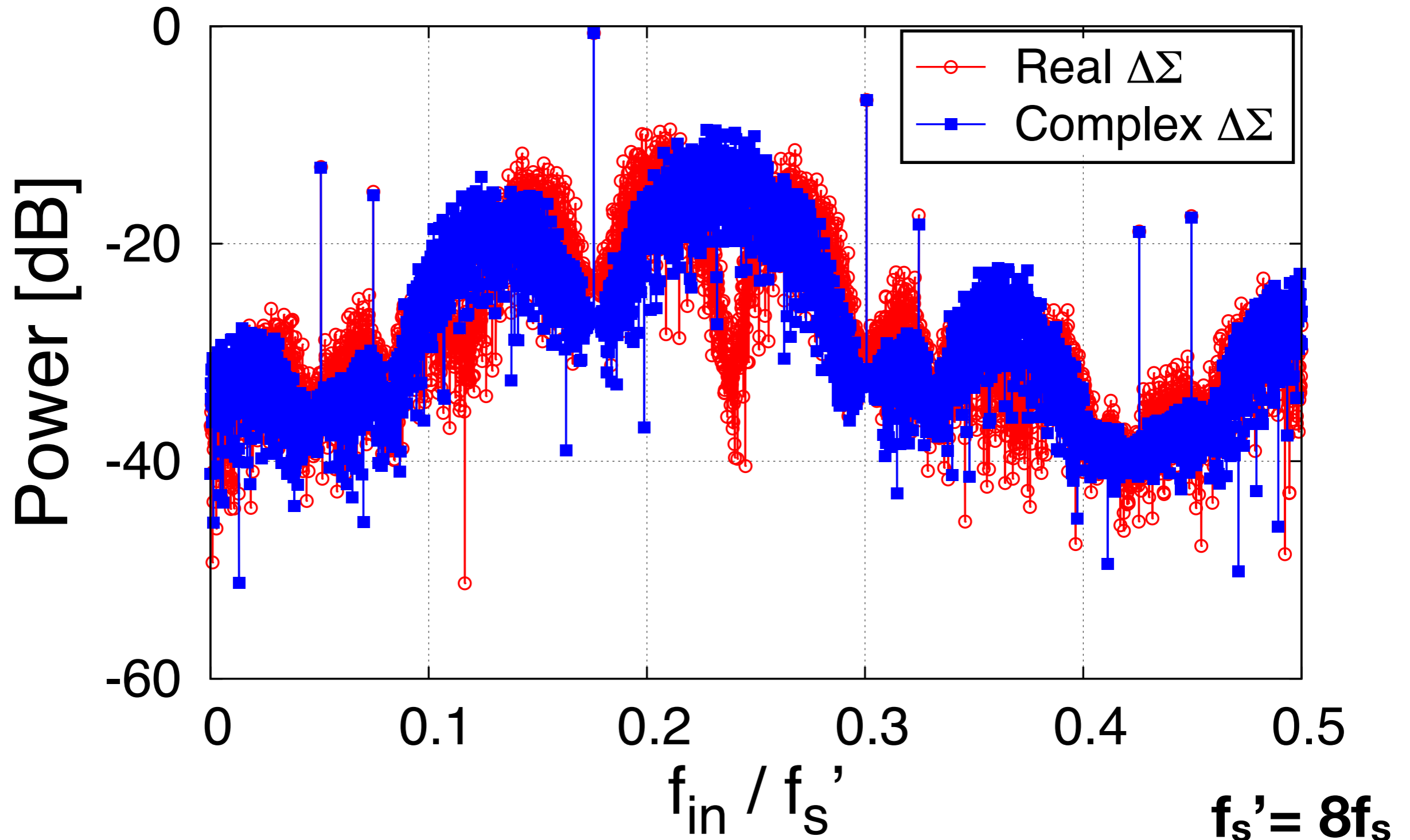
シミュレーション結果 ~⑨最終出力パワースペクトラム~

ノイズシェープの確認



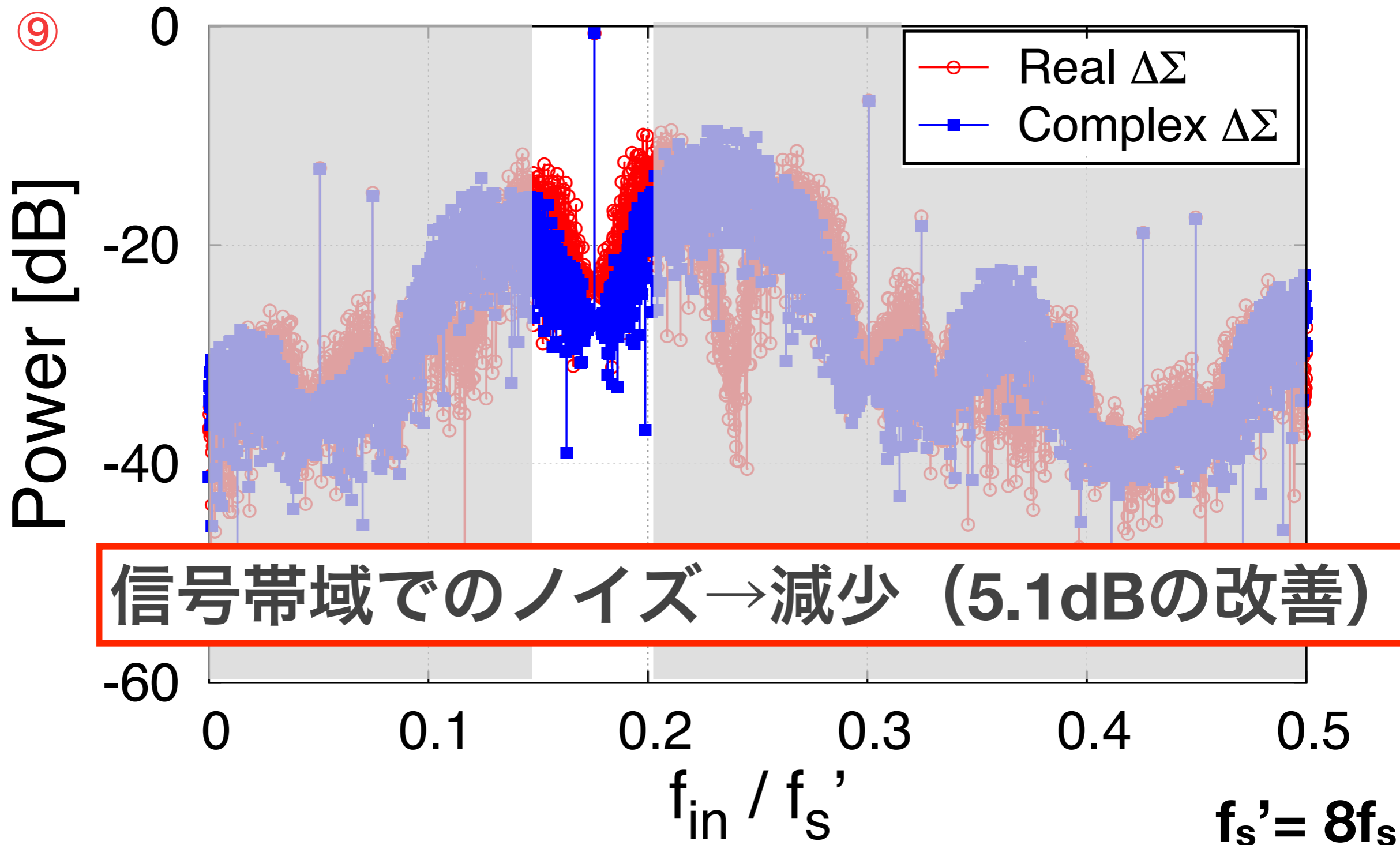
シミュレーション結果 ~⑨最終出力パワースペクトラム~

被アップコンバージョンの信号が
Realデルタシグマ変調されたものとの比較



シミュレーション結果 ~⑨最終出力パワースペクトラム~

被アップコンバージョンの信号が
Realデルタシグマ変調されたものとの比較



OUTLINE

▶ 研究背景

▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DA 変調器

▶ アップコンバージョン

▶ まとめ

まとめ

- ▶ 通信用ICのテストのために、デジタル技術を利用した、I,Q信号生成法を提案
- ▶ 複素マルチバンドパス $\Delta\Sigma$ DAC
- ▶ アップコンバージョン

**多くのアプリケーションに対応した
低コスト・高品質な信号生成を実現**

Q & A

里 周二先生（宇都宮大学）

なぜ複素はゼロ点が半分に減るの？

- 計算すればわかるが、簡単にいえばREALでは0としている
虚数部も考慮していて、同一帯域で情報が2倍になるから。

清水 隆志先生（宇都宮大学）

どのくらいの高周波まで使えるの？

- アプリケーションによるが、
複素デルタシグマ変調ではMHzオーダー、
アップコンバージョンしてGHzオーダーを想定している。

→ ミリ波（30~300GHz）までできる？

- アップコンバージョンはできるかもしれないが、
アナログフィルタが難しいかも。

以上