

シグマデルタDAC信号発生回路での デジタル歪補正技術

○山田貴文 若林和行 上森聡史
小林修 加藤啓介 小林春夫

群馬大学
半導体理工学研究センター (STARC)

アウトライン

- 研究背景
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- まとめ

アウトライン

- 研究背景
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- まとめ

研究背景

半導体デバイス出荷時に故障、性能テストが必須

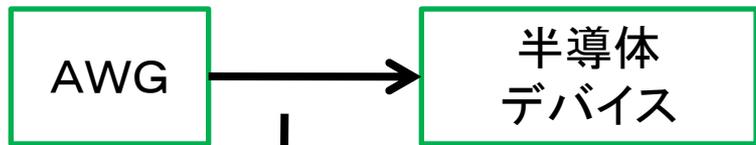
アナログ回路部のテスト容易化が課題(歪みの小さい入力信号が必要)



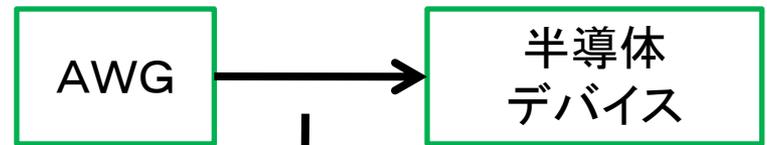
従来信号発生アルゴリズム ⇒ 歪み成分も生成 ☹️



歪みの小さい信号発生アルゴリズムを提案 😊



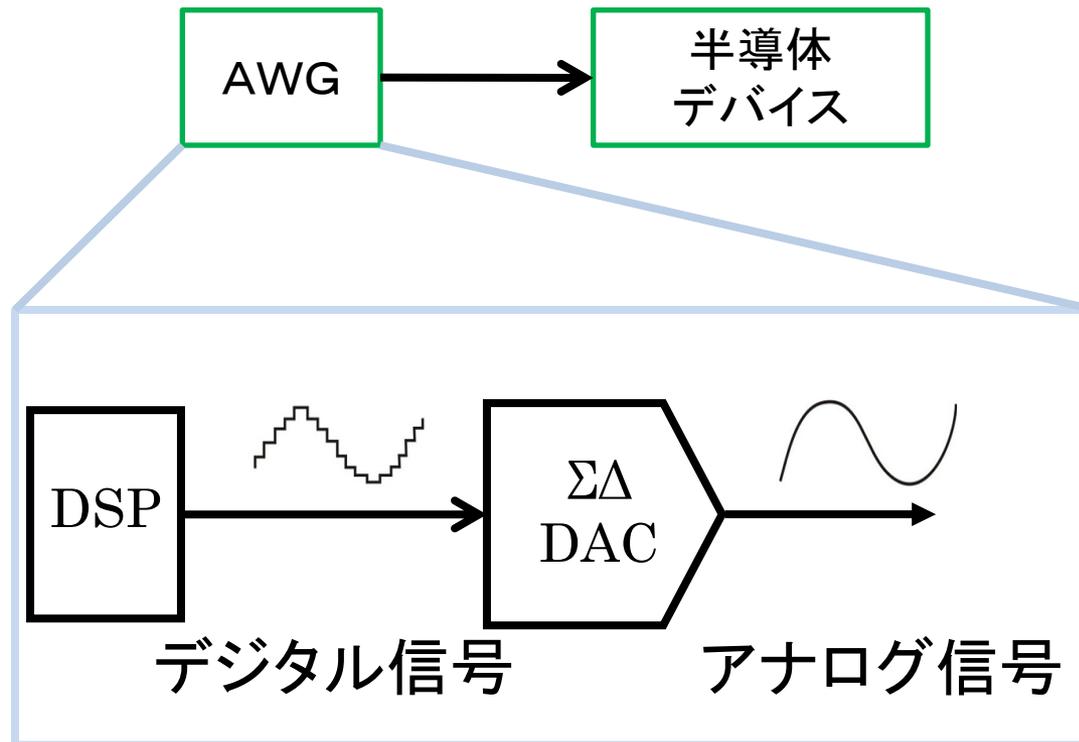
従来アルゴリズム(歪み大) ☹️



提案アルゴリズム(歪み小) 😊

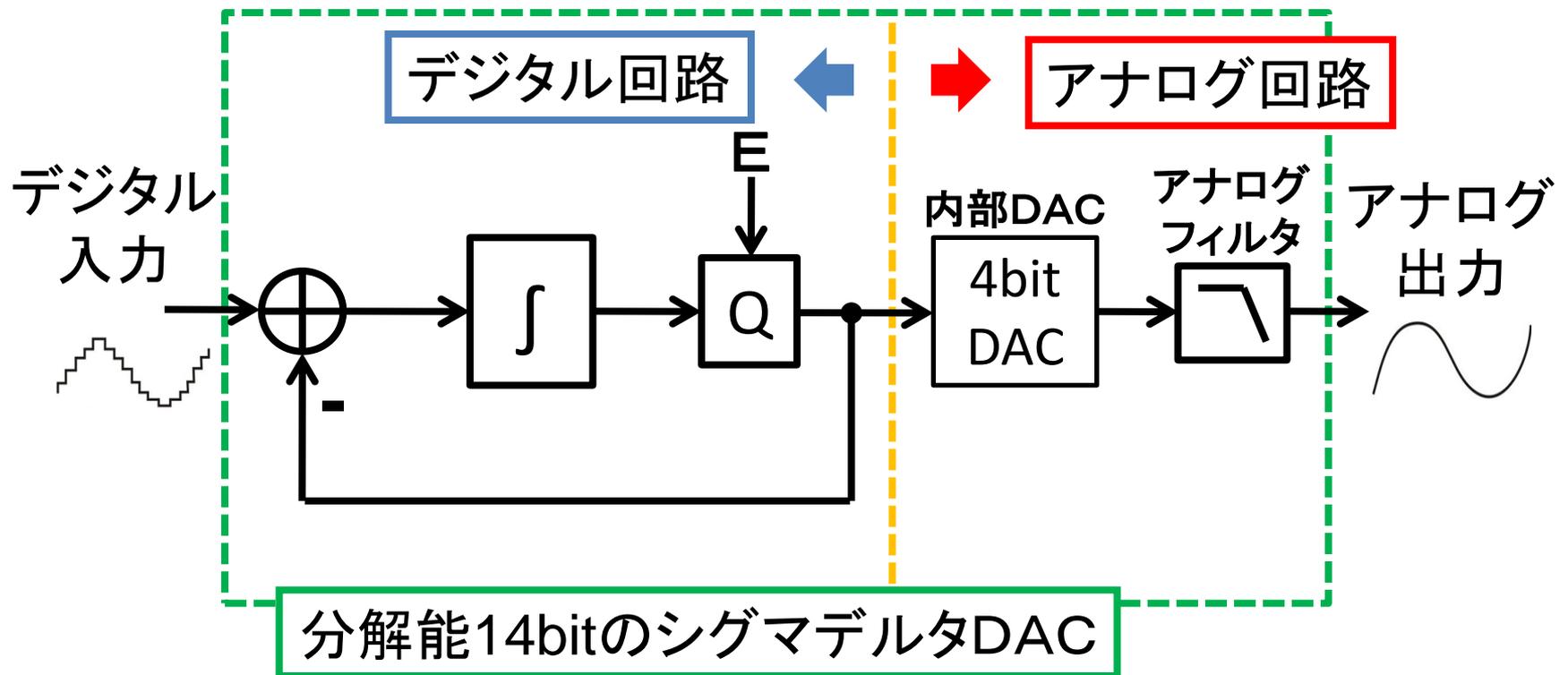
AWGによる信号発生

AWG (Arbitrary Waveform Generator : 任意波形発生器)



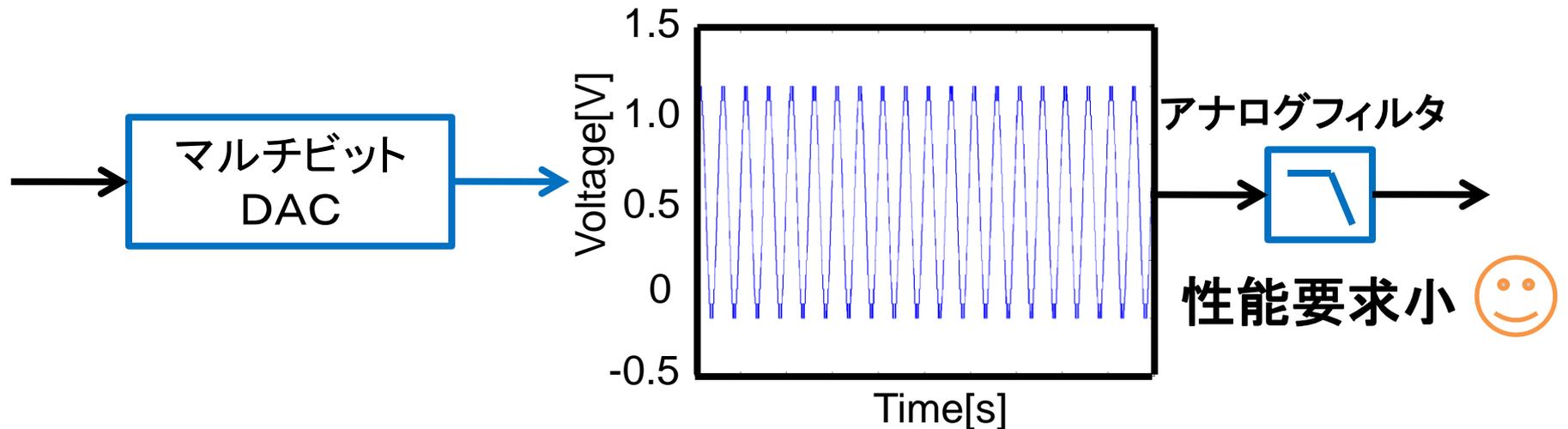
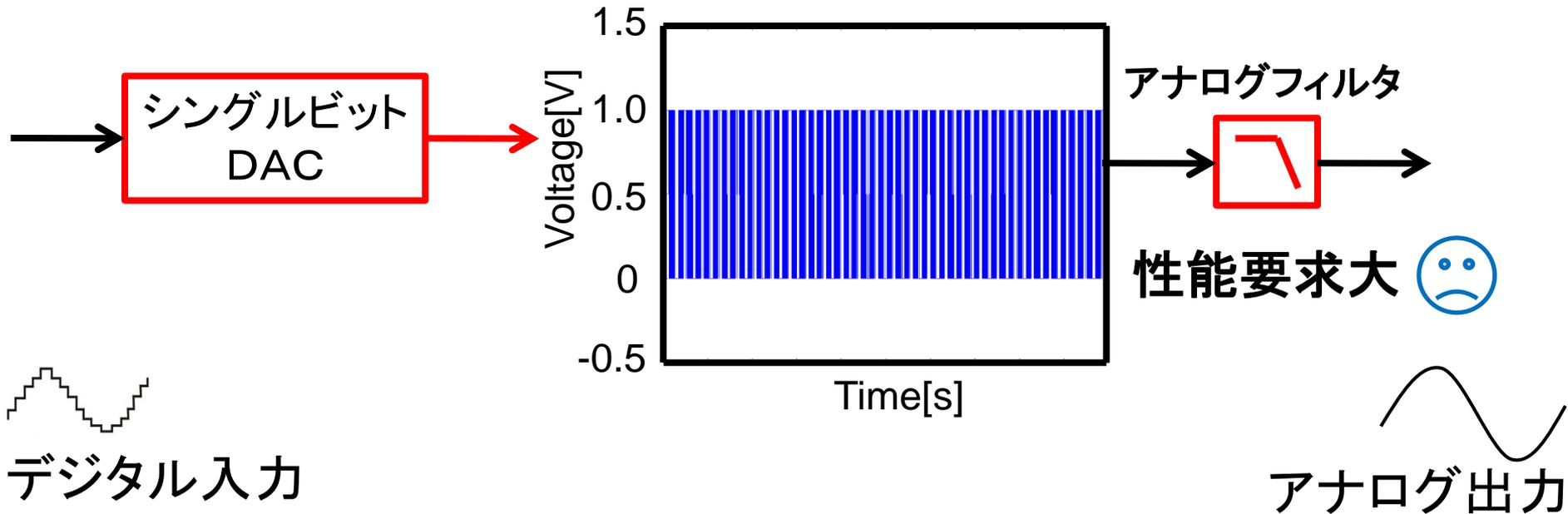
DSPでデジタル信号生成しDACでアナログ信号に変換

シグマデルタDAC

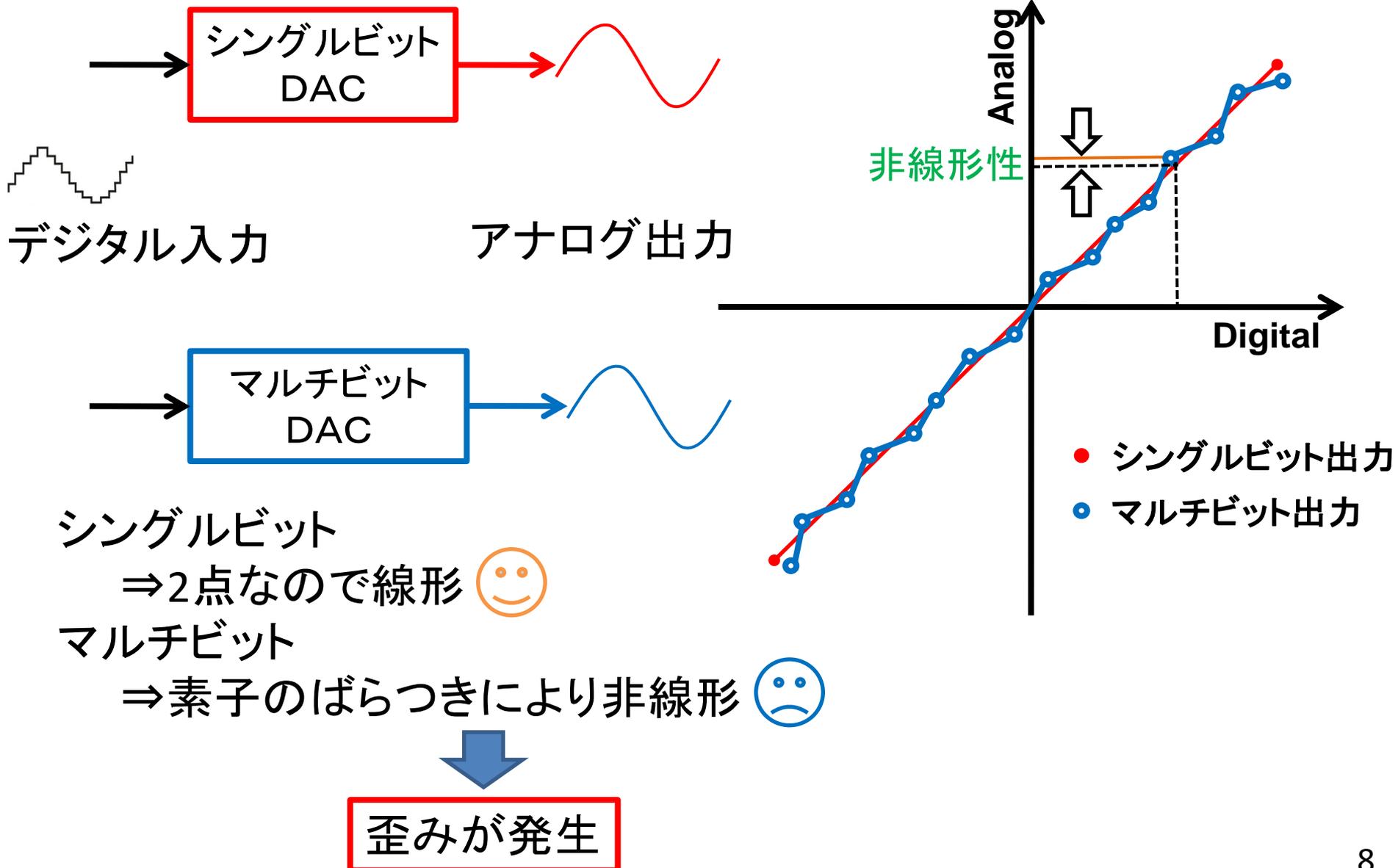


- 大部分をデジタル回路で構成
半導体デバイスの集積化、微細化⇒高速化、低電力化、高精度化
- オーバーサンプリングとノイズシェイプで高精度のDA変換が可能

内部マルチビットDAC



内部DACの非線形性

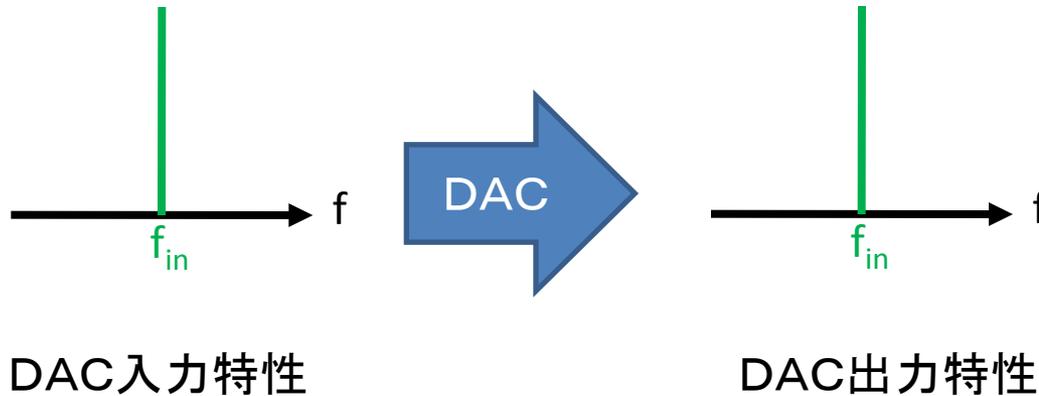
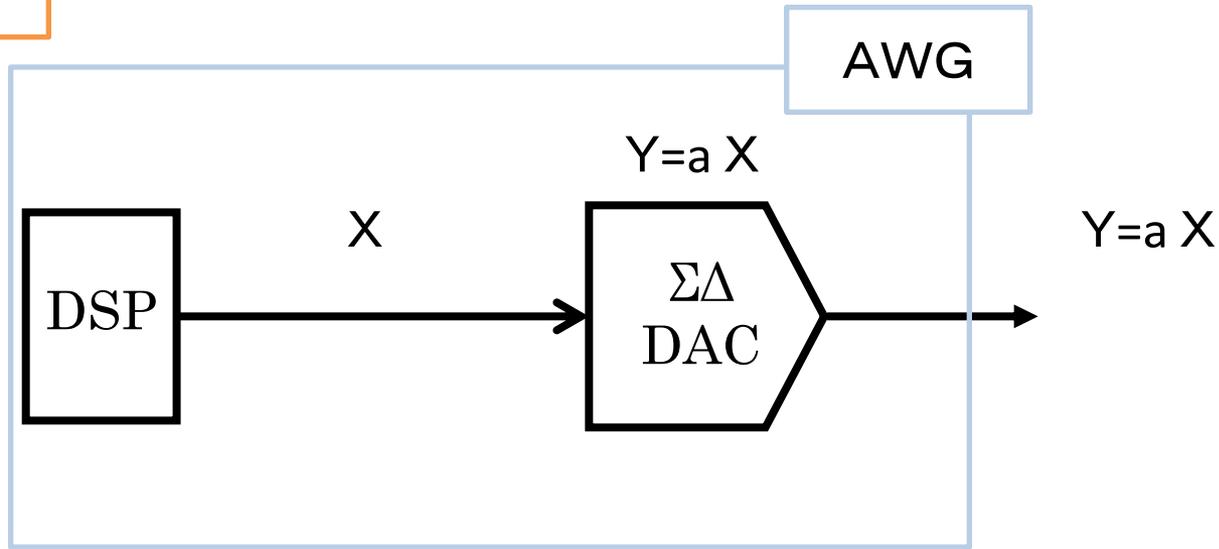


アウトライン

- 研究背景
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- まとめ

従来手法による歪み

歪み無し



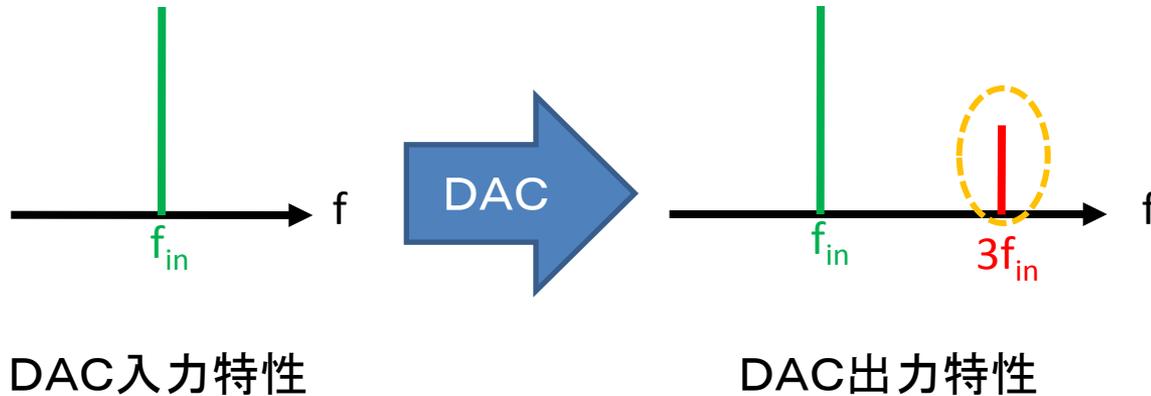
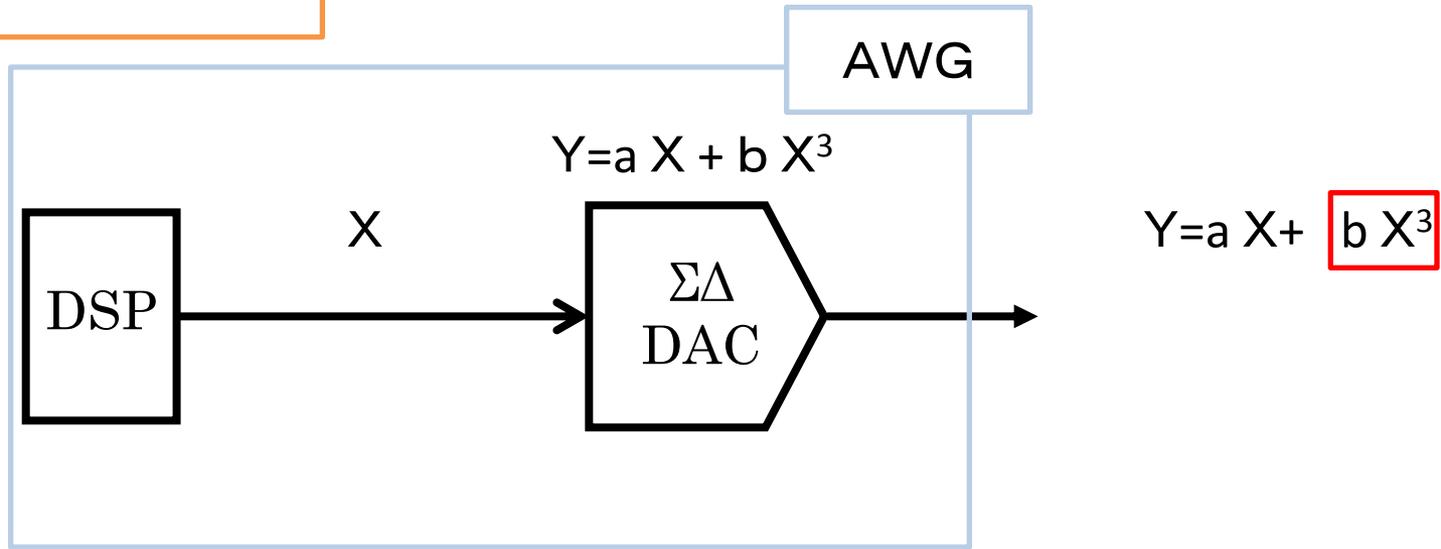
DAC入力特性

DAC出力特性

入力特性と出力特性が一致

従来手法による歪み

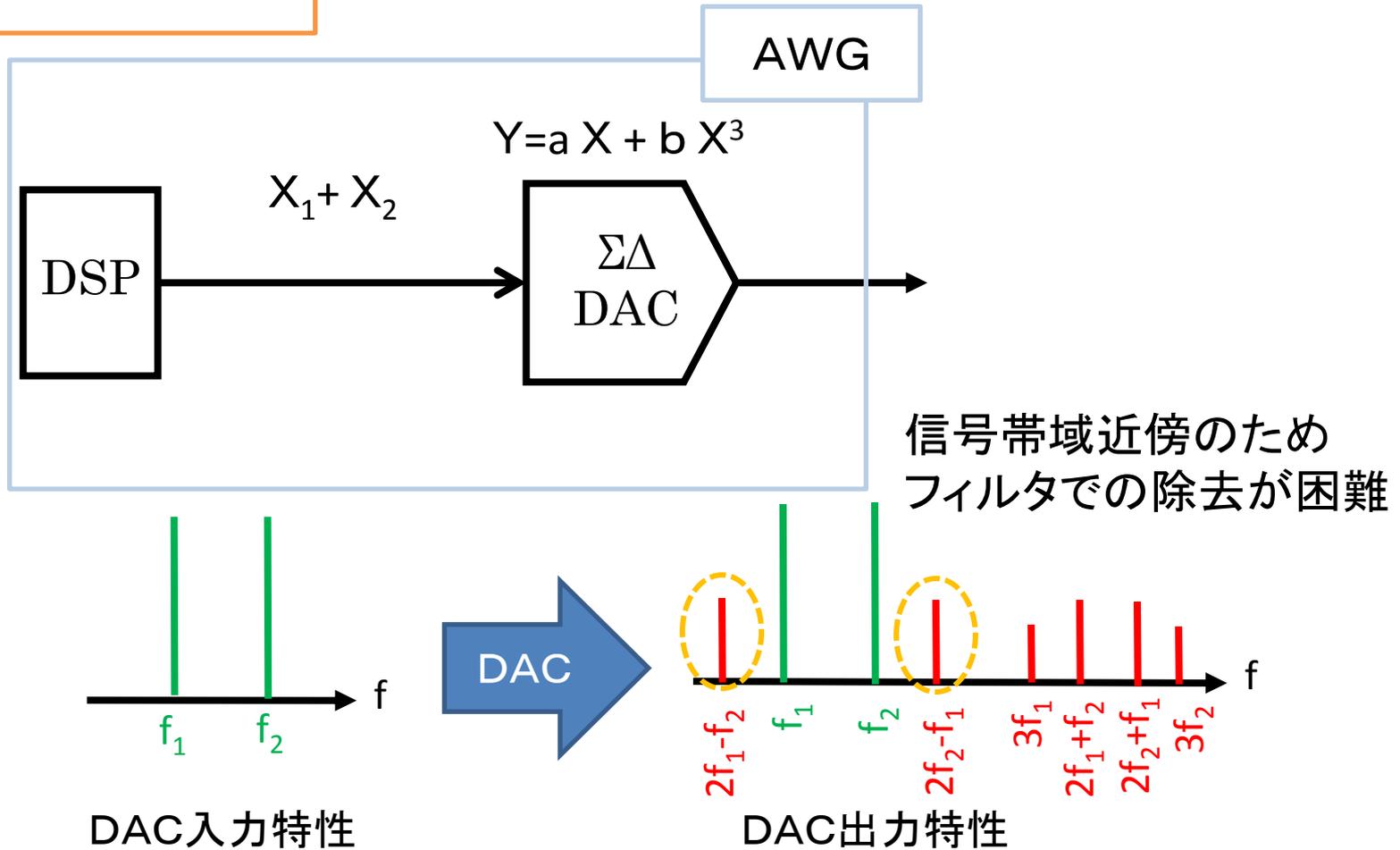
歪みあり(単一信号)



3次高調波歪みが発生

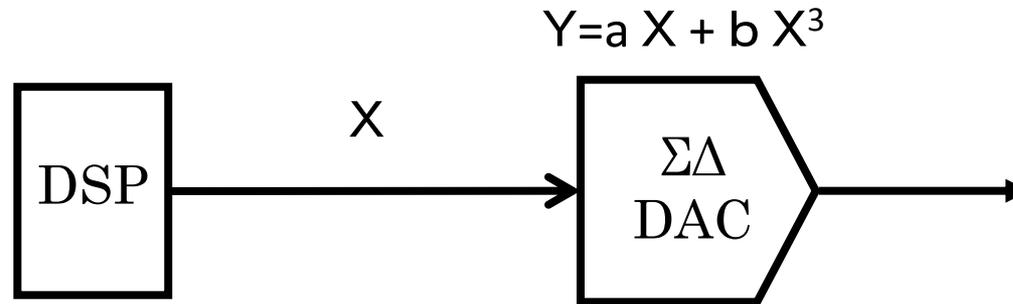
従来手法による歪み

歪みあり(2トーン信号)



相互変調歪みが発生

シミュレーション条件



単一信号

$$X = A \sin(2\pi f_{in} t)$$

$$A = 1 \quad a = 1.0$$

$$f_{in} = 33 \quad b = -0.005$$

点数:16384

2トーン信号

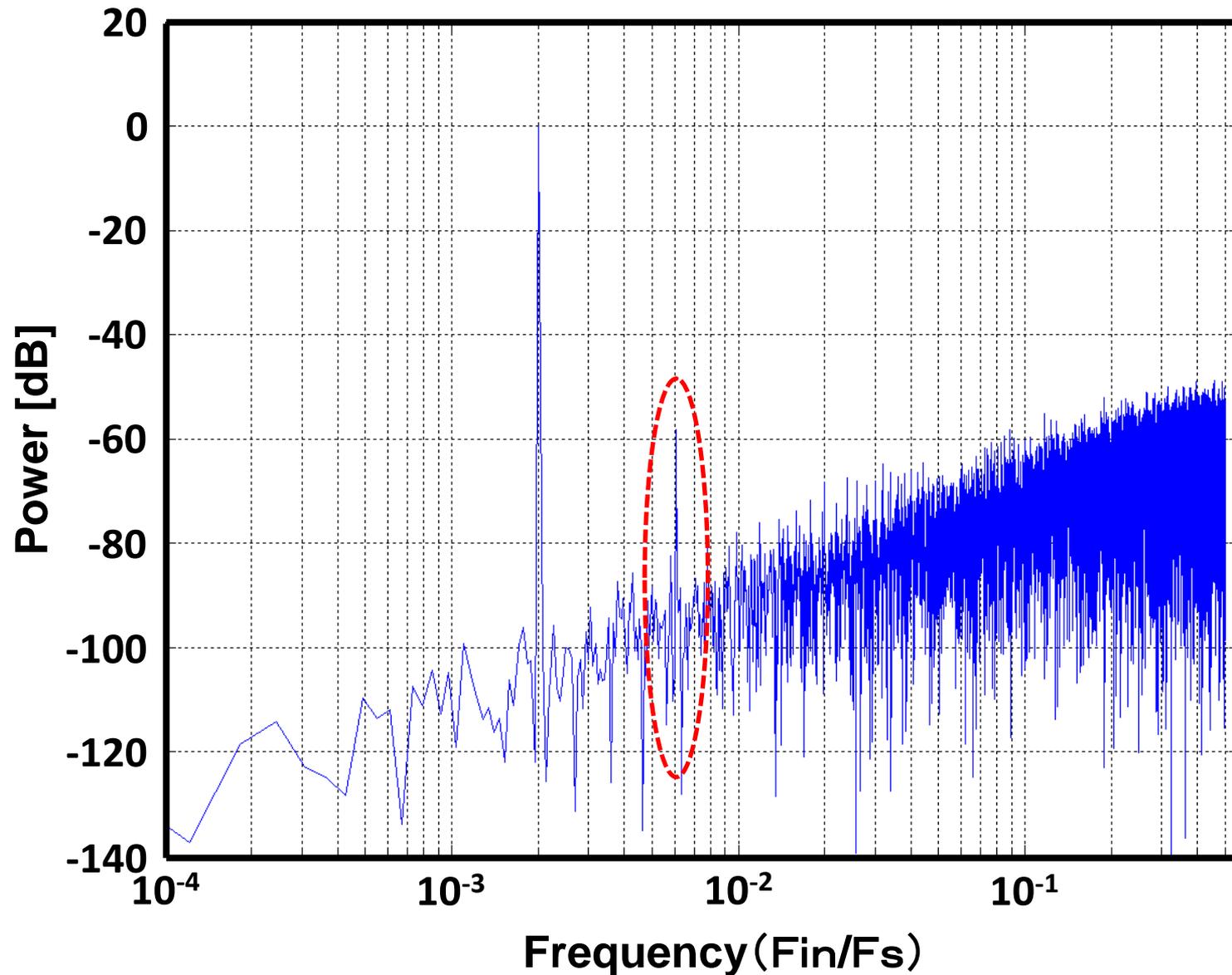
$$X = A \sin(2\pi f_1 t) + B \sin(2\pi f_2 t)$$

$$A = 1 \quad f_1 = 33 \quad a = 1.0$$

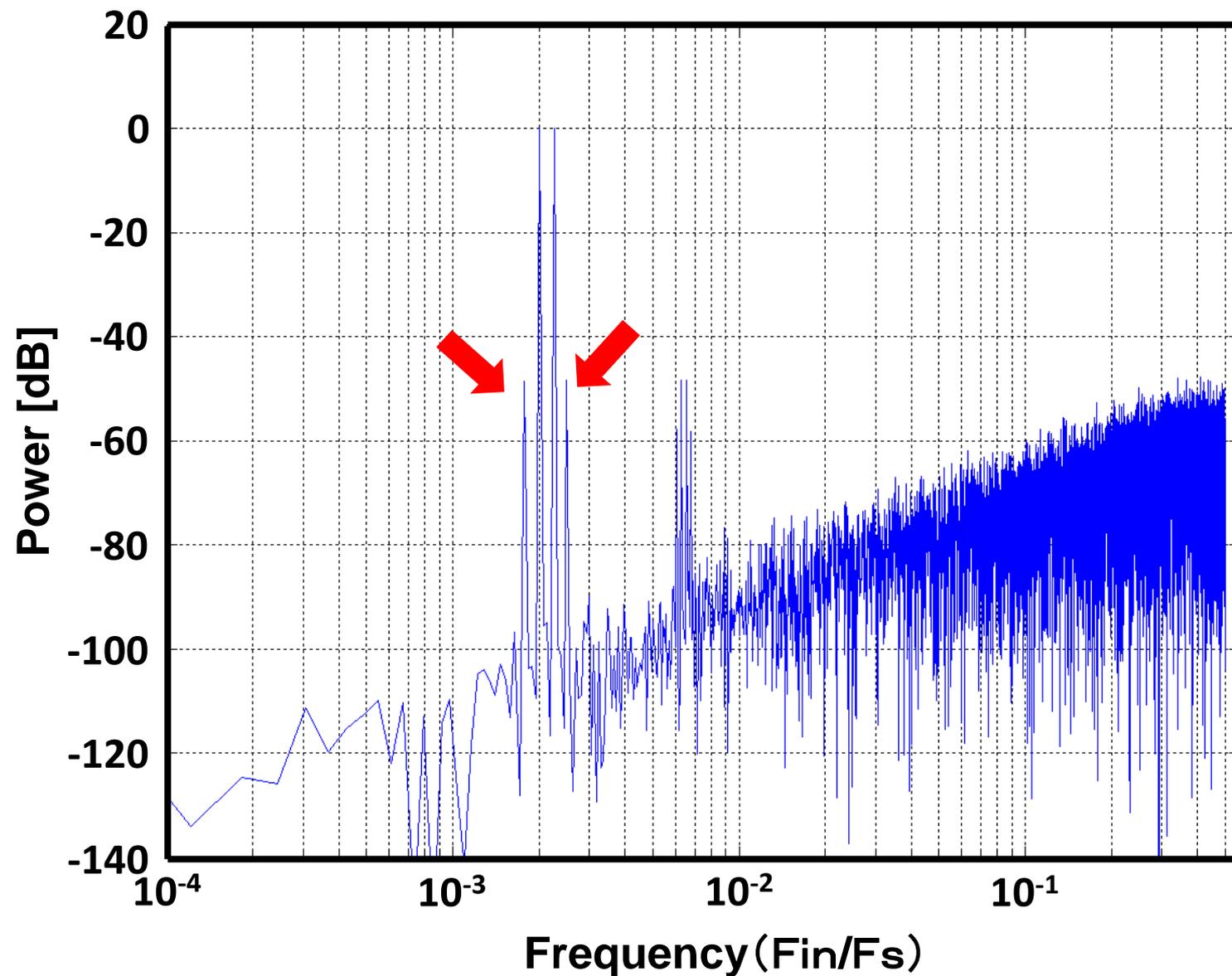
$$B = 1 \quad f_2 = 37 \quad b = -0.005$$

点数:16384

歪みのスペクトル(単一信号)



歪みのスペクトル(2トーン信号)

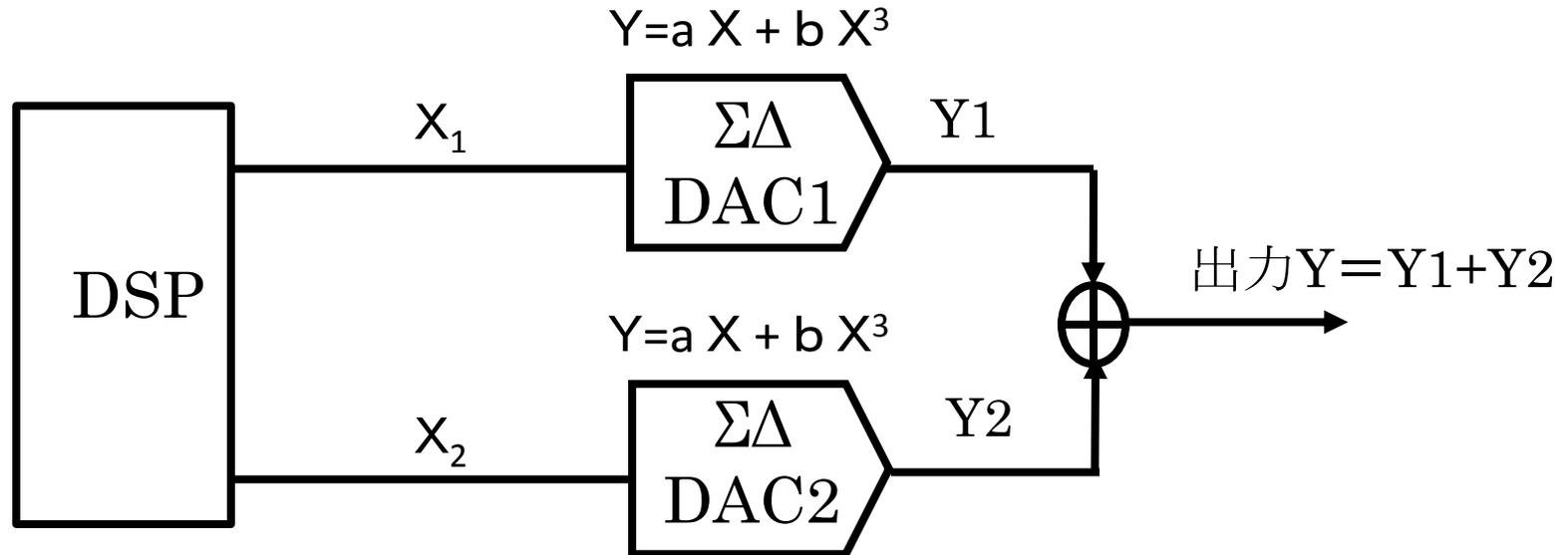


アウトライン

- 研究背景
- 従来手法
- **提案手法**
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- まとめ

位相差信号合成型

前提条件 ①2つのDACの特性は同じ ②出力加算部は非線形性なし



2種類の位相差を持たせたデジタル信号をDACに入力

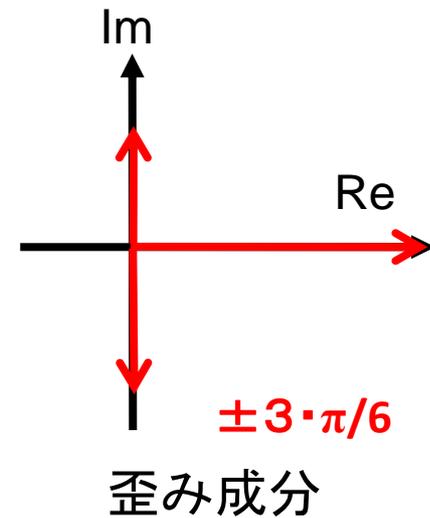
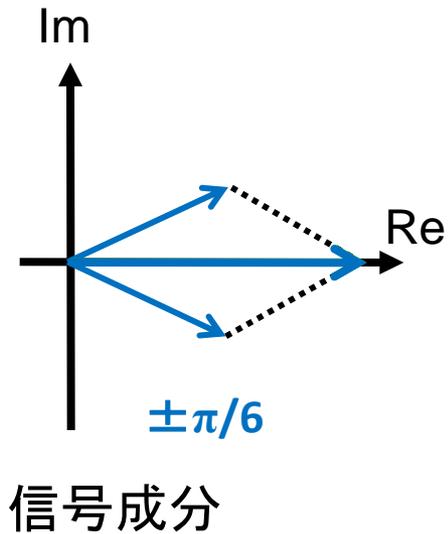
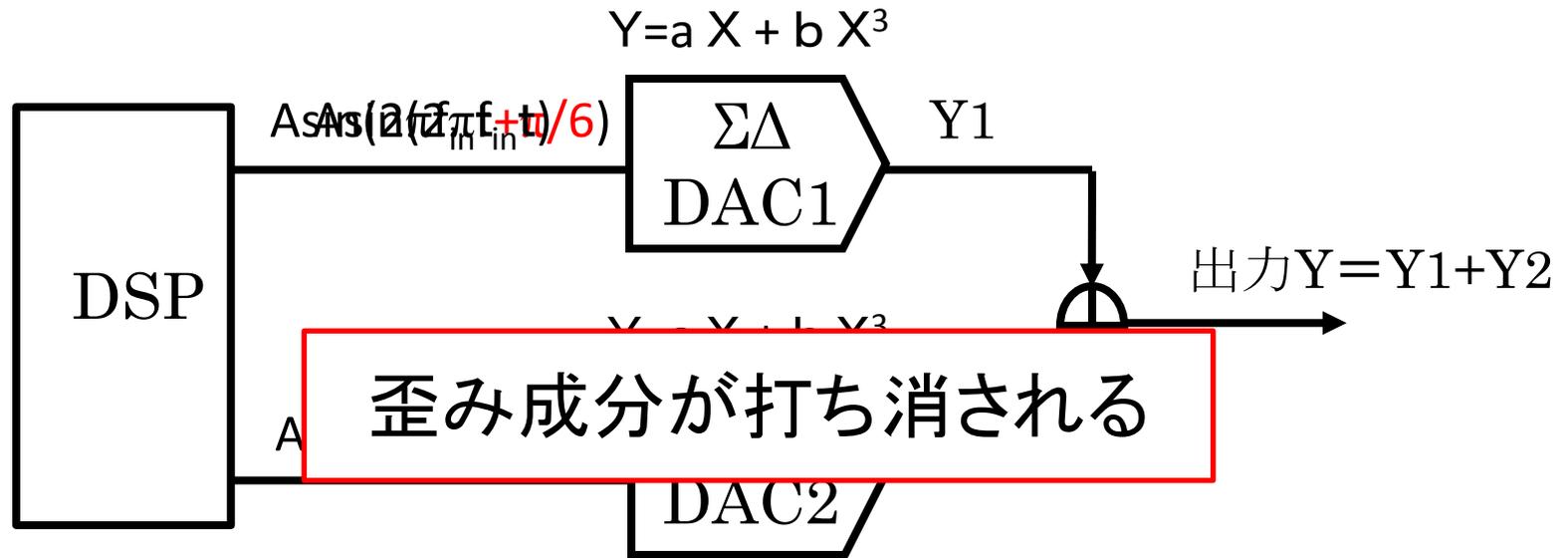


DAC出力信号を後段の加算器で合成

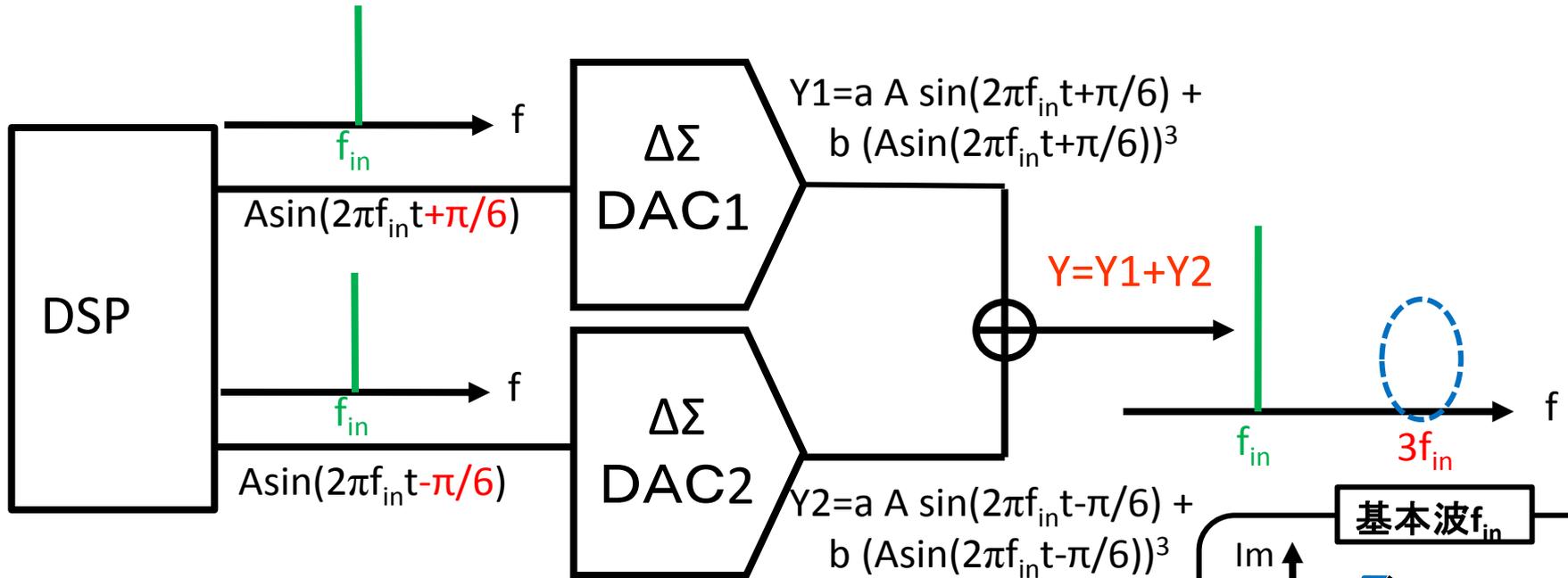


歪みをキャンセル

位相差信号合成型の原理



単一信号AWG



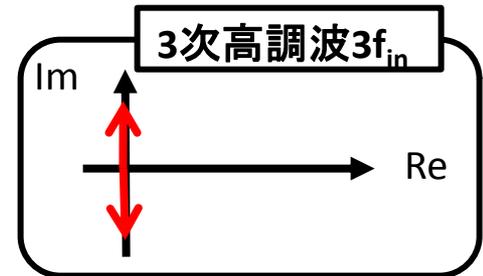
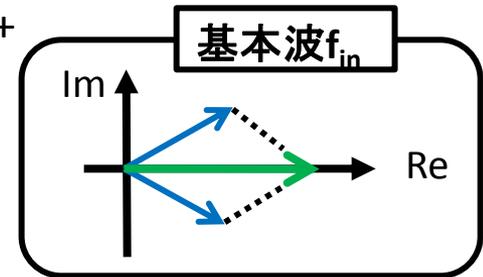
Y の $2\pi f_{in}$ の項: $a \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6) + a \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6) = 1.7 a \sin(2\pi f_{in} t)$

基本波振幅は1.7倍

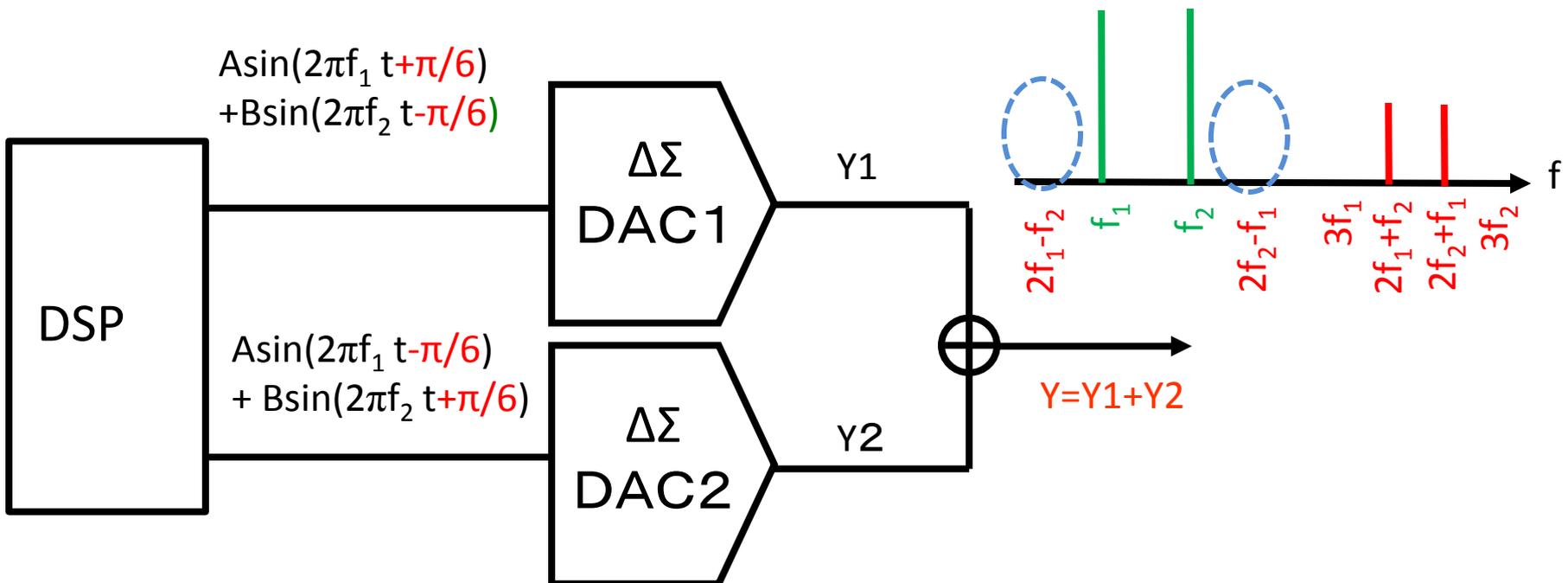
⇒ (2つのDACを使っても消費電力2/1.7倍)

Y の $3 \cdot 2\pi f_{in}$ の項: $b \sin(3 \cdot 2\pi f_{in} t + \pi/2) + b \sin(3 \cdot 2\pi f_{in} t - \pi/2) = 0$

⇒ 3次高調波がキャンセルできる

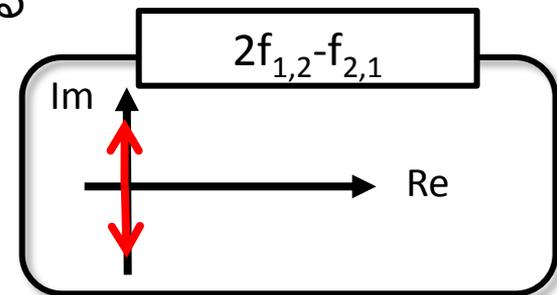


2トーン信号AWG

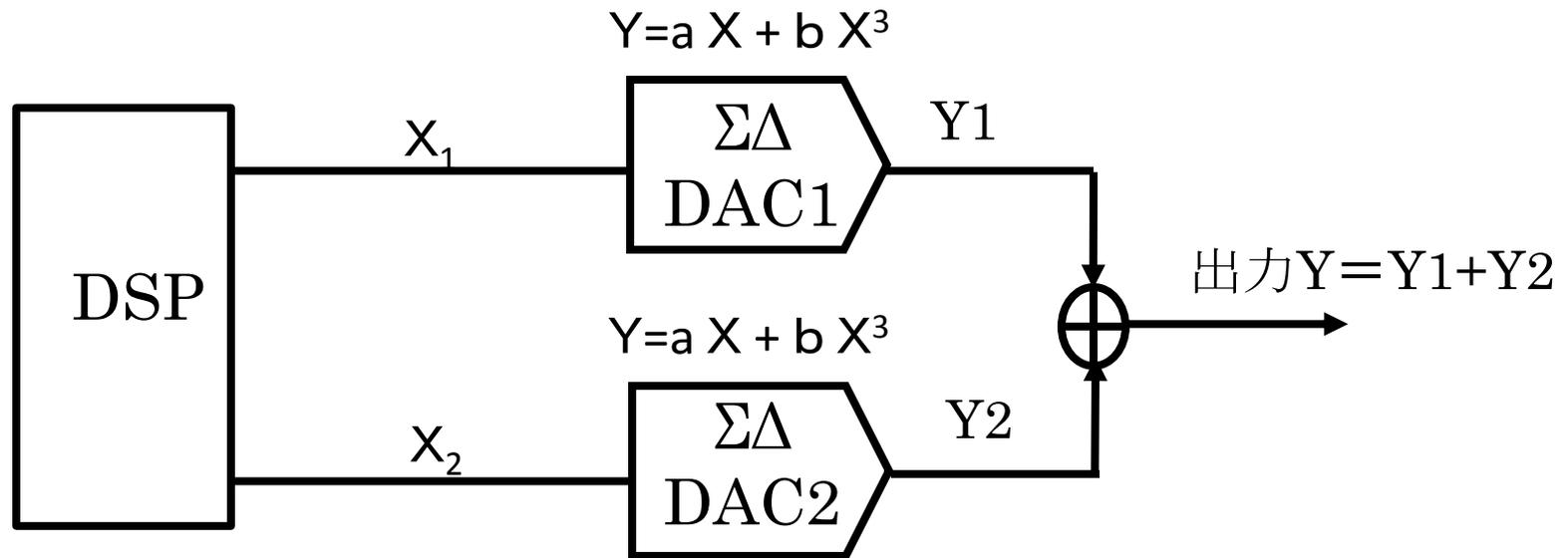


■ Y の $2f_{1,2} - f_{2,1}$ の項: $\sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1}) t + \pi/2\} + \sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1}) t - \pi/2\} = 0$

\Rightarrow 相互変調歪み ($2f_{1,2} - f_{2,1}$) がキャンセルできる



シミュレーション条件



単一信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$$

$$X_2 = A \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$$

$$A = 1 \quad a = 1.0$$

$$f_{in} = 33 \quad b = -0.005$$

点数:16384

2トーン信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$$

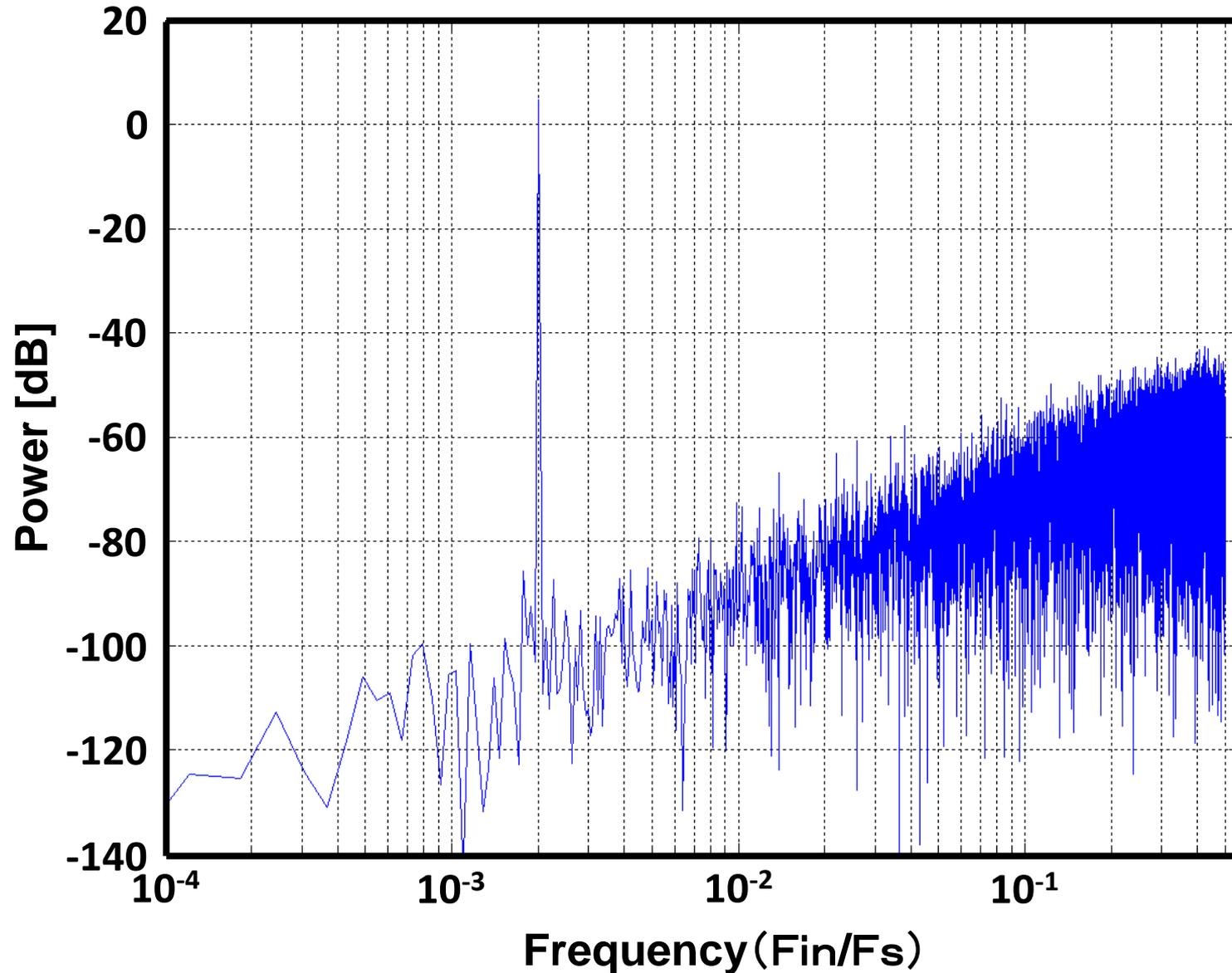
$$X_2 = A \sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$$

$$A = 1 \quad f_1 = 33 \quad a = 1.0$$

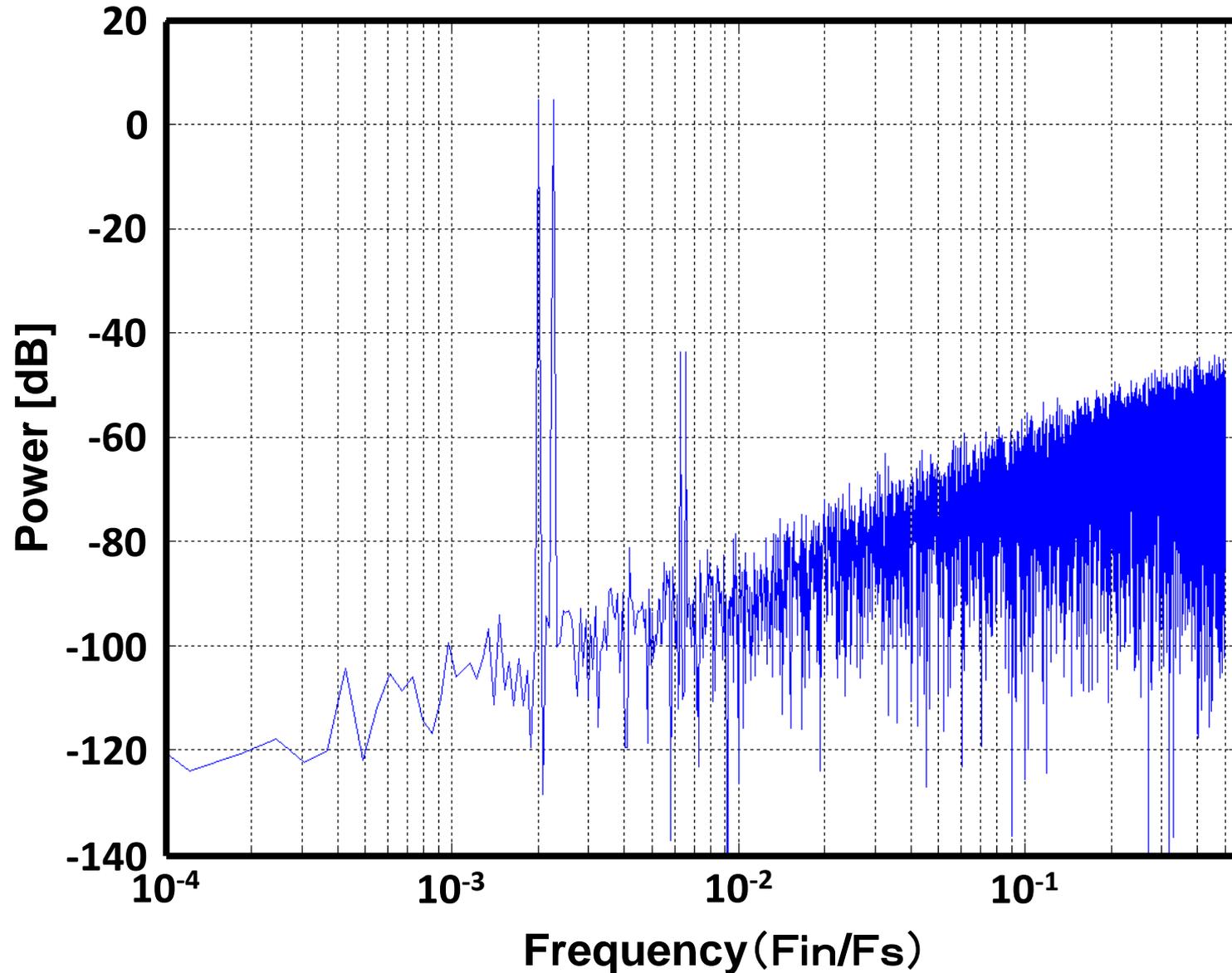
$$B = 1 \quad f_2 = 37 \quad b = -0.005$$

点数:16384

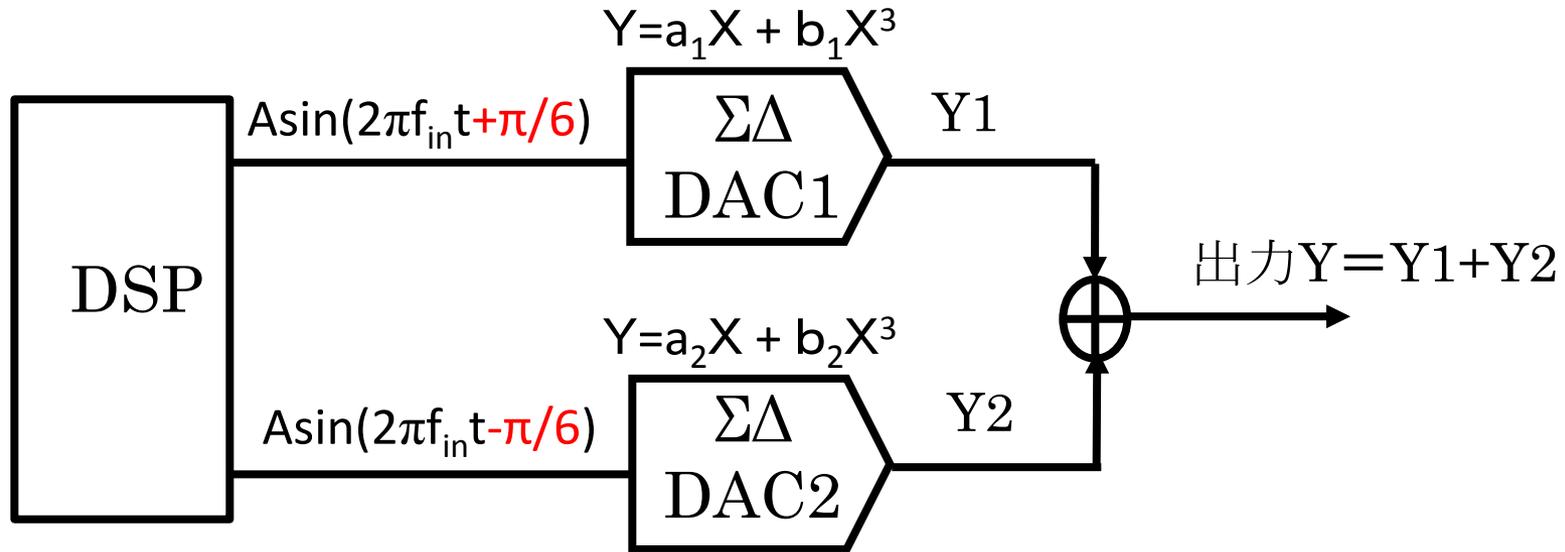
除去後のスペクトル(単一信号)



除去後のスペクトル(2トーン信号)



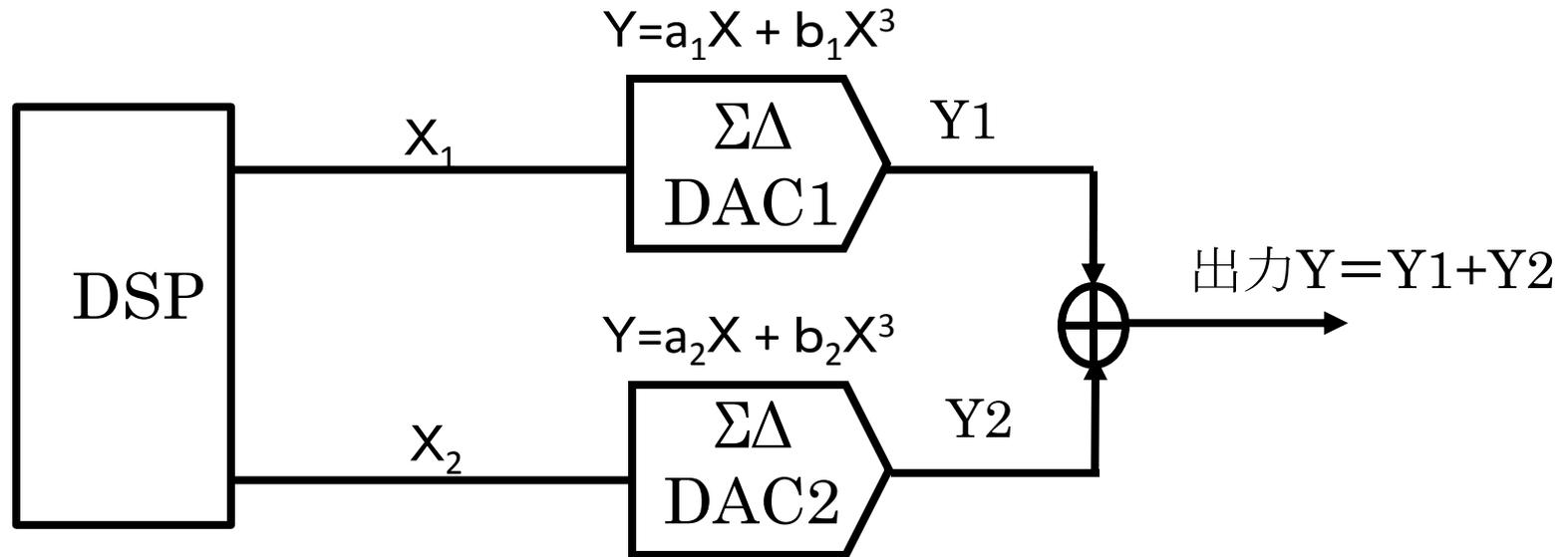
DAC特性間にばらつきがある場合



$a_1 \neq a_2, b_1 \neq b_2$ の時

- ・3次高調波の項: $b_1 \sin(3 \cdot 2\pi f_{in}t + \pi/2) + b_2 \sin(3 \cdot 2\pi f_{in}t - \pi/2) \neq 0$
⇒3次高調波がキャンセル不可
- ・2トーン信号の場合も同様に相互変調歪みのキャンセル不可

シミュレーション条件



単一信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$$

$$X_2 = A \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$$

$$A = 1 \quad a_1 = 1.0 \quad a_2 = 0.9$$

$$f_{in} = 33 \quad b_1 = -0.005 \quad b_2 = -0.006$$

点数:16384

2トーン信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$$

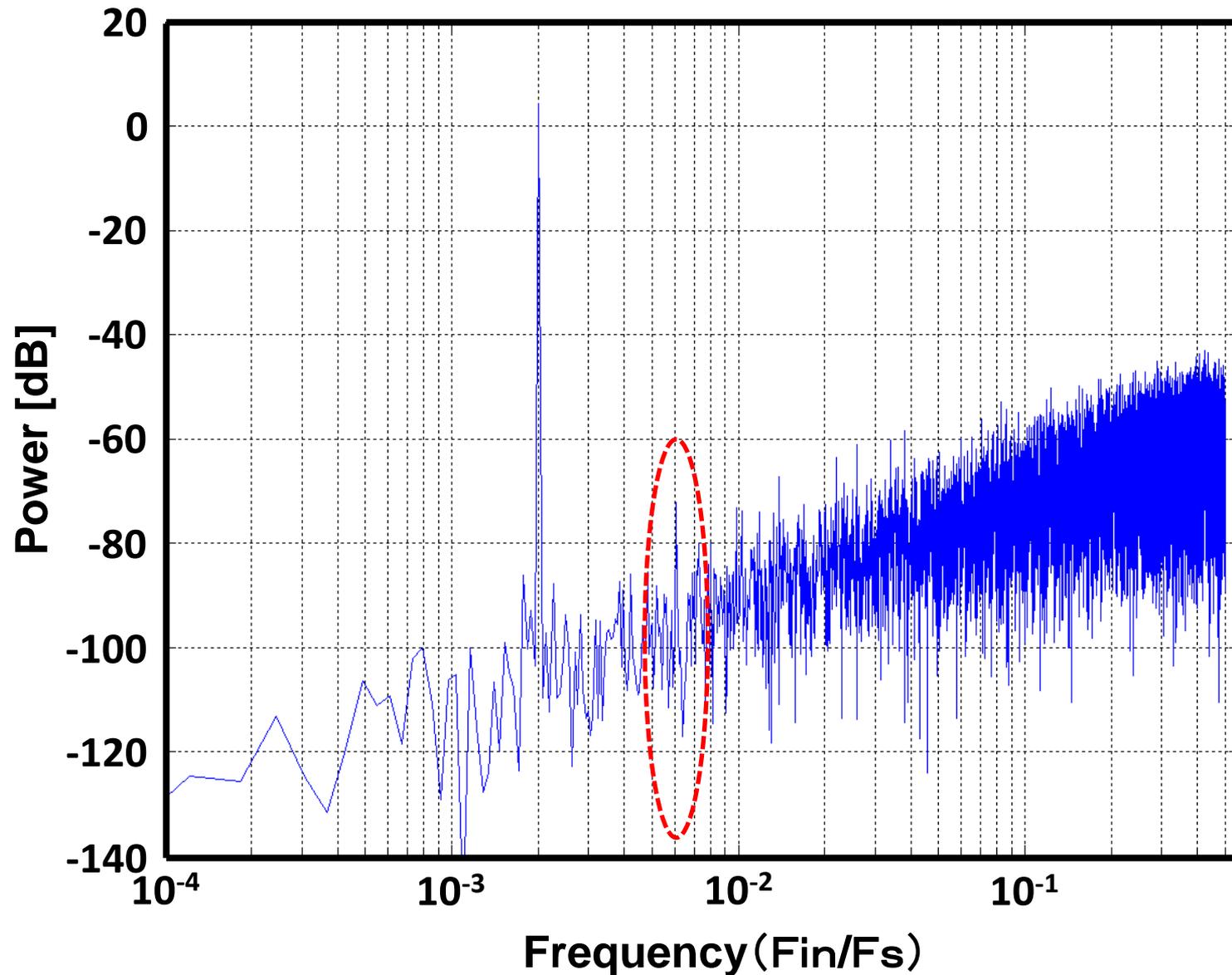
$$X_2 = A \sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$$

$$A = 1 \quad f_1 = 33 \quad a_1 = 1.0 \quad a_2 = 0.9$$

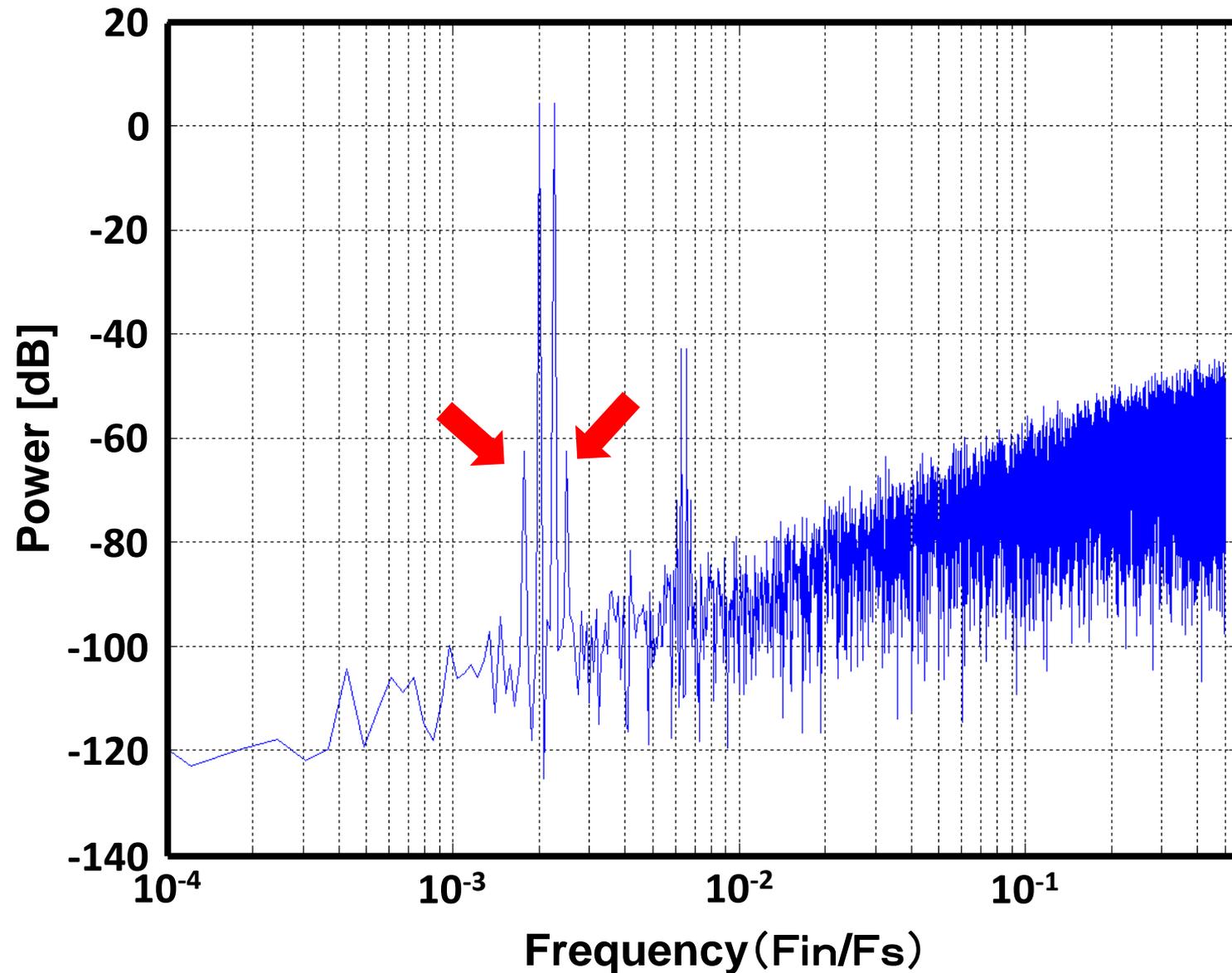
$$B = 1 \quad f_2 = 37 \quad b_1 = -0.005 \quad b_2 = -0.006$$

点数:16384

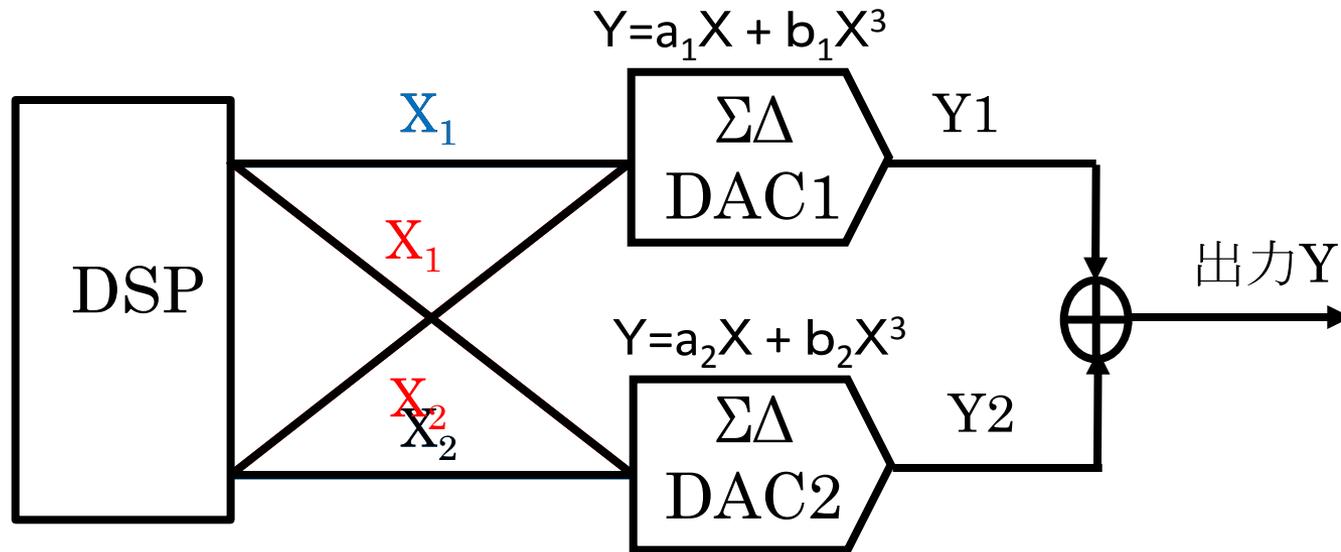
ばらつきの影響(単一信号)



ばらつきの影響 (2トーン信号)



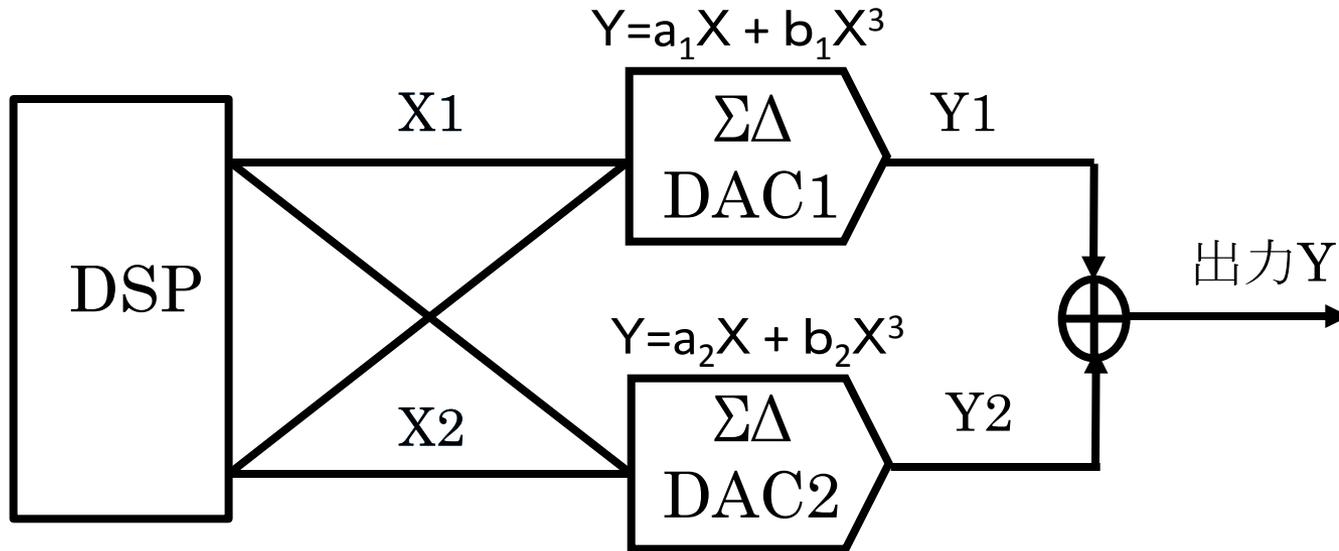
ダイナミックエレメントマッチング構成



1クロック毎に信号の経路を変更
⇒DAC特性のばらつきが時間平均化される

DAC特性にばらつきがあっても歪を**キャンセル可能**

シミュレーション条件



単一信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$$

$$X_2 = A \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$$

$$A = 1 \quad a_1 = 1.0 \quad a_2 = 0.9$$

$$f_{in} = 33 \quad b_1 = -0.005 \quad b_2 = -0.006$$

点数:16384

2トーン信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$$

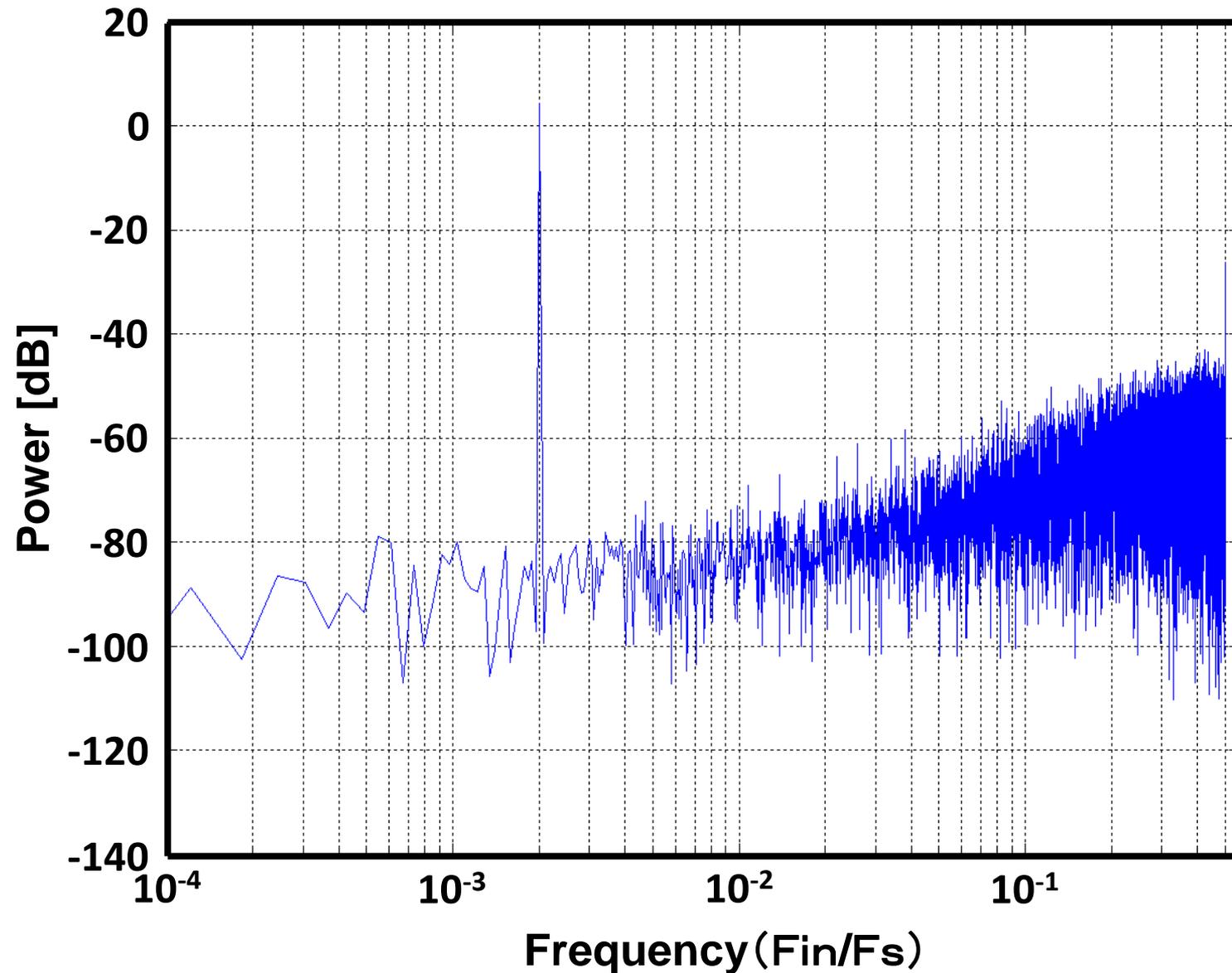
$$X_2 = A \sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$$

$$A = 1 \quad f_1 = 33 \quad a_1 = 1.0 \quad a_2 = 0.9$$

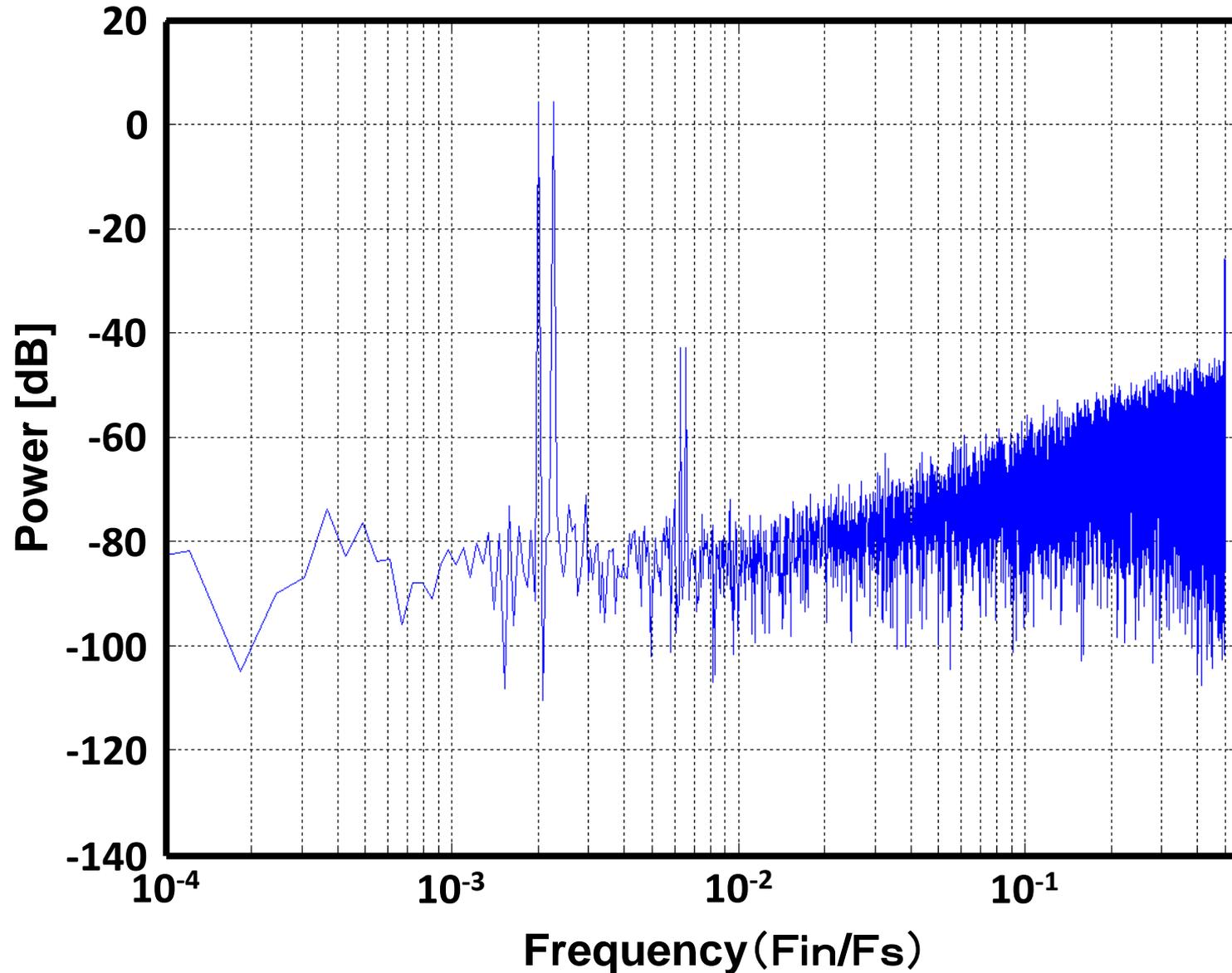
$$B = 1 \quad f_2 = 37 \quad b_1 = -0.005 \quad b_2 = -0.006$$

点数:16384

ダイナミックエレメントマッチングの効果(単一信号)



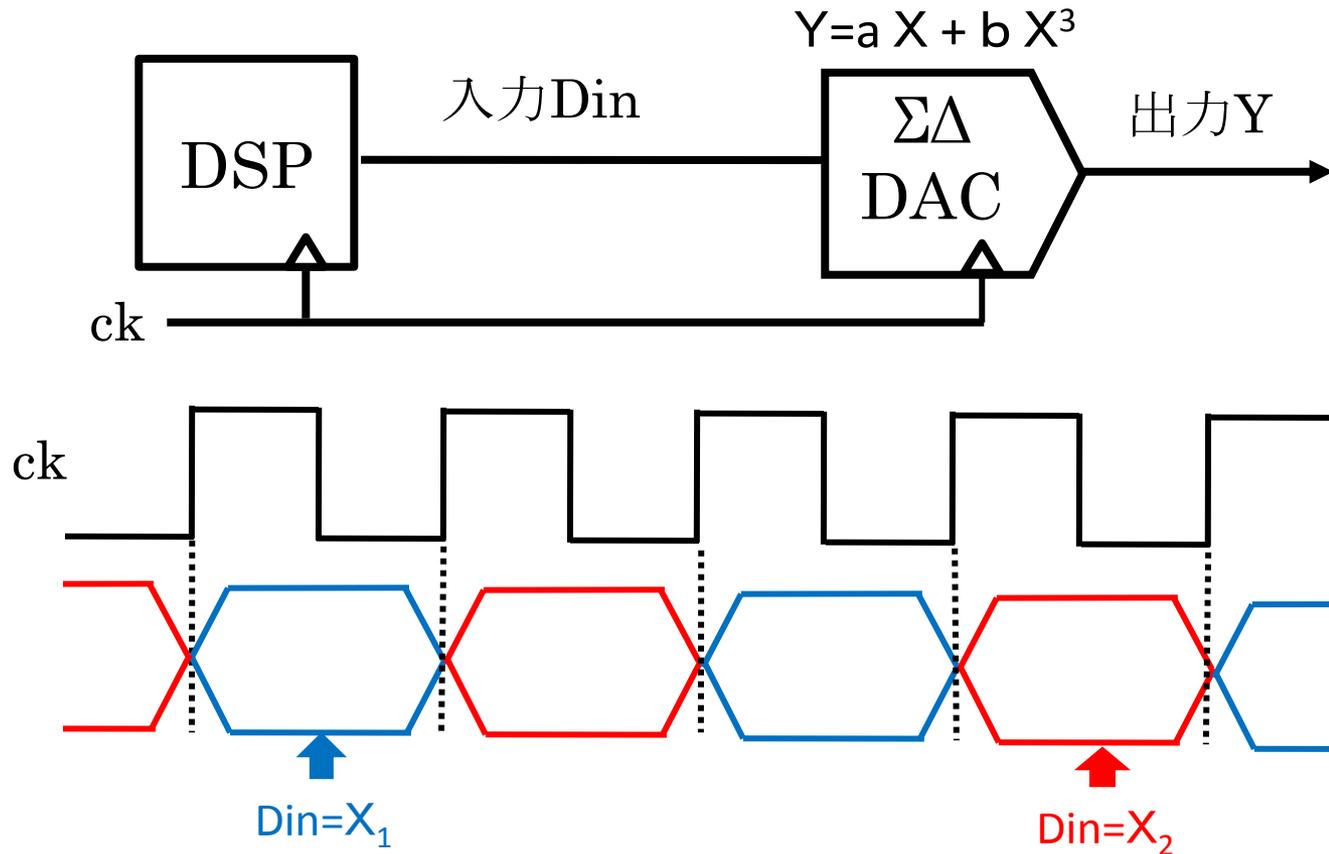
ダイナミックエレメントマッチングの効果(2トーン信号)



アウトライン

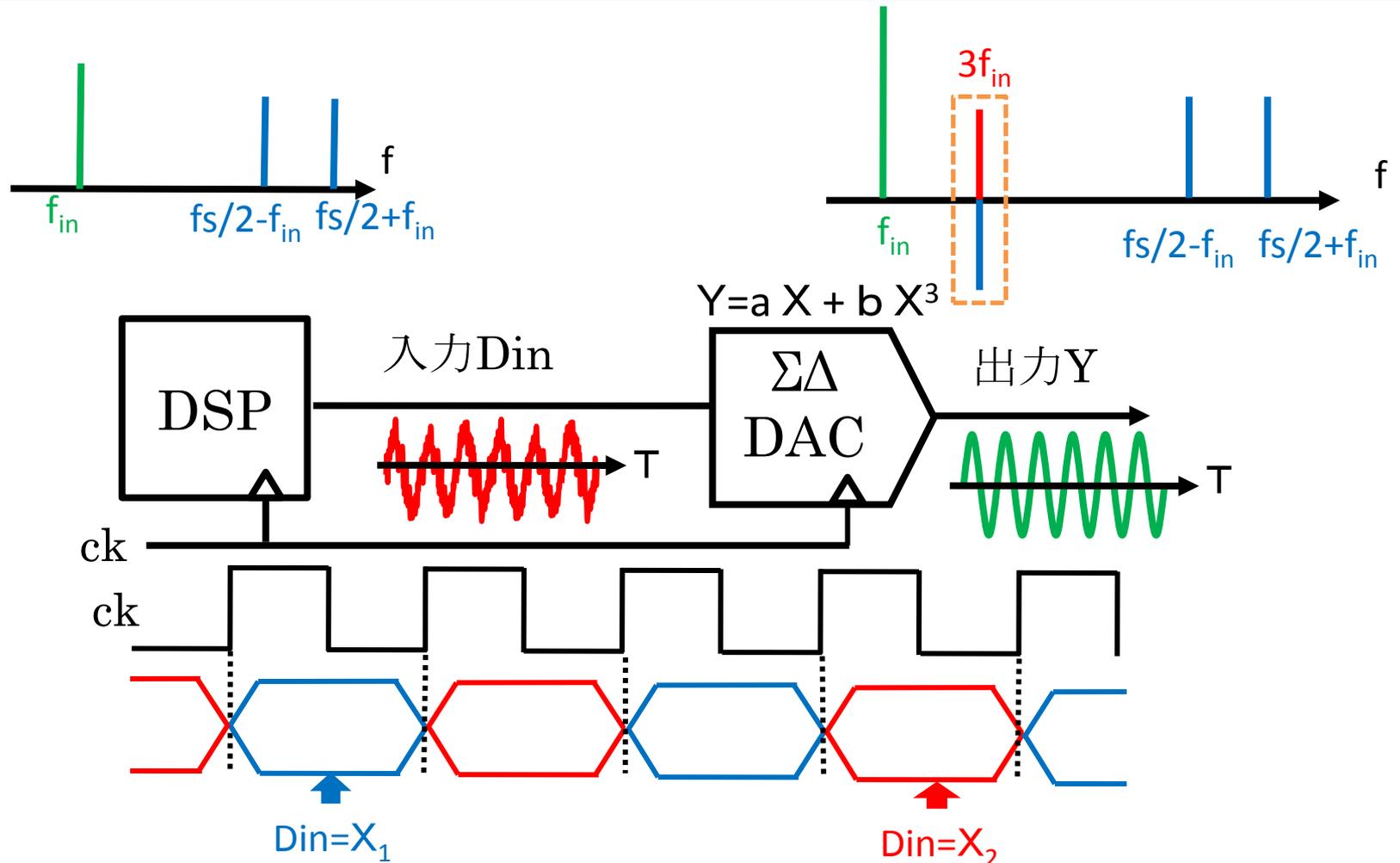
- 研究背景
- 従来手法
- **提案手法**
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- まとめ

位相差切り替え型



- 位相の異なる X_1 、 X_2 を交互にDACへ入力
- 余分なDACや加算器は必要ない
- 信号の切り替えで歪が発生
(信号帯域より十分離れているためローパスフィルタで除去可能)

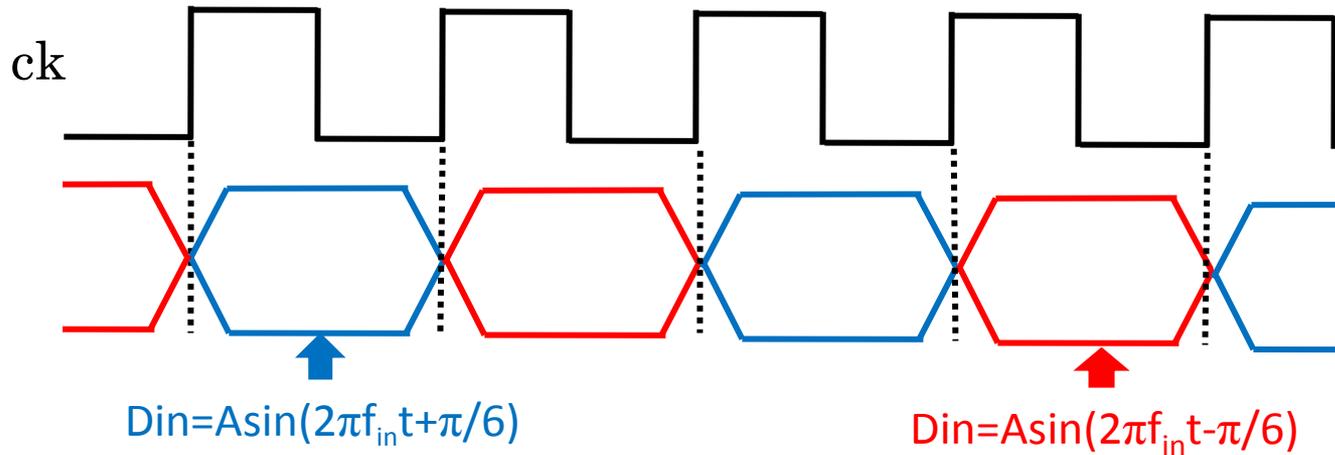
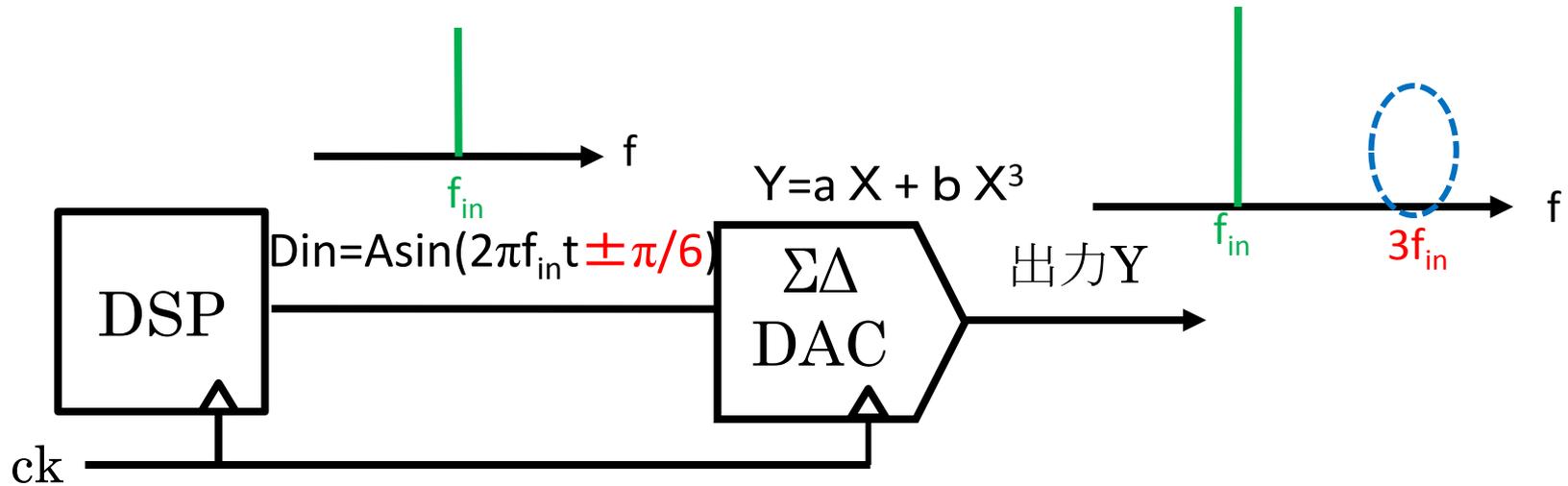
位相差切り替え型の原理



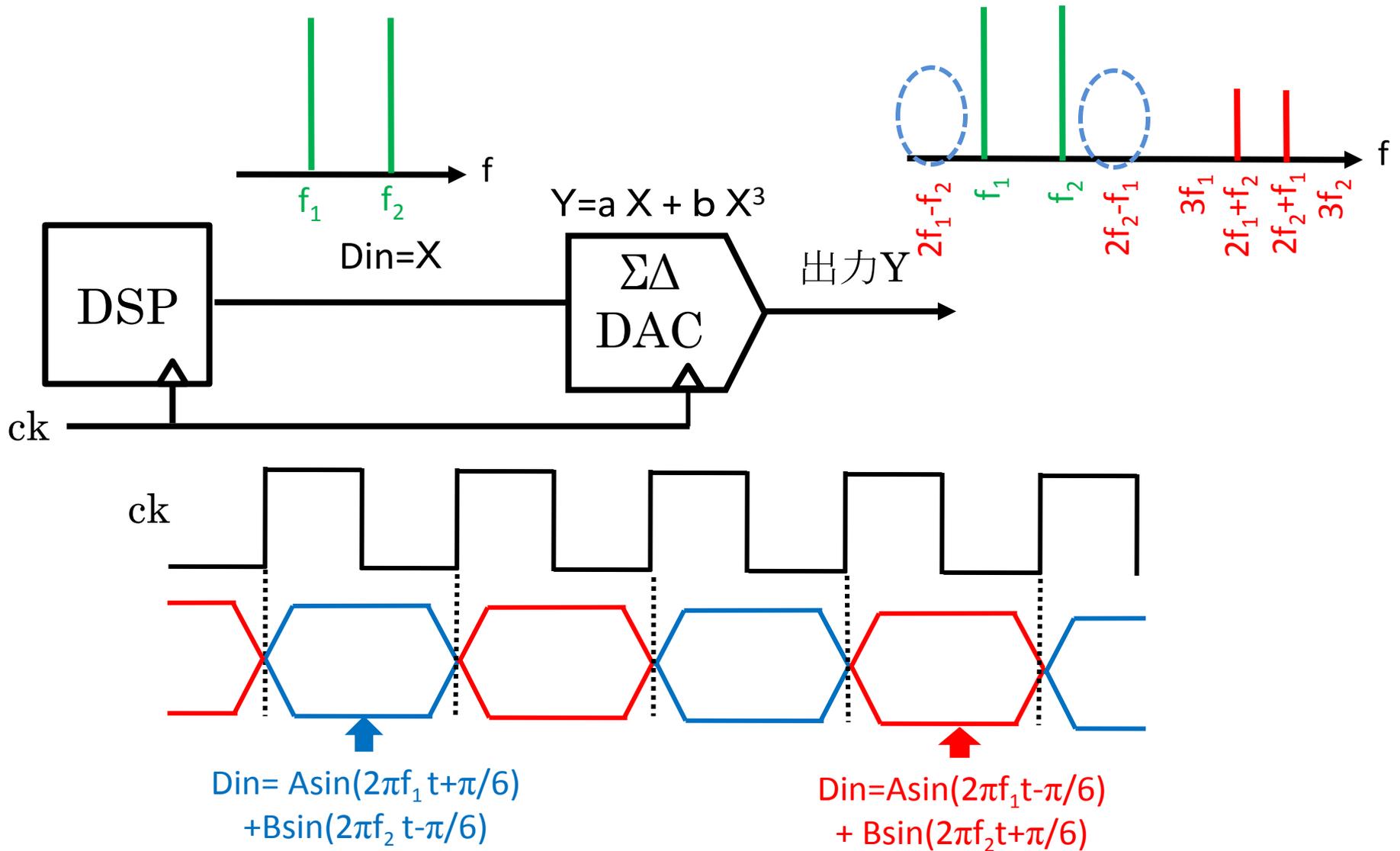
位相差違う信号の切り替え \Rightarrow $fs/2$ 付近に歪みが発生

3次高調波成分が打ち消される

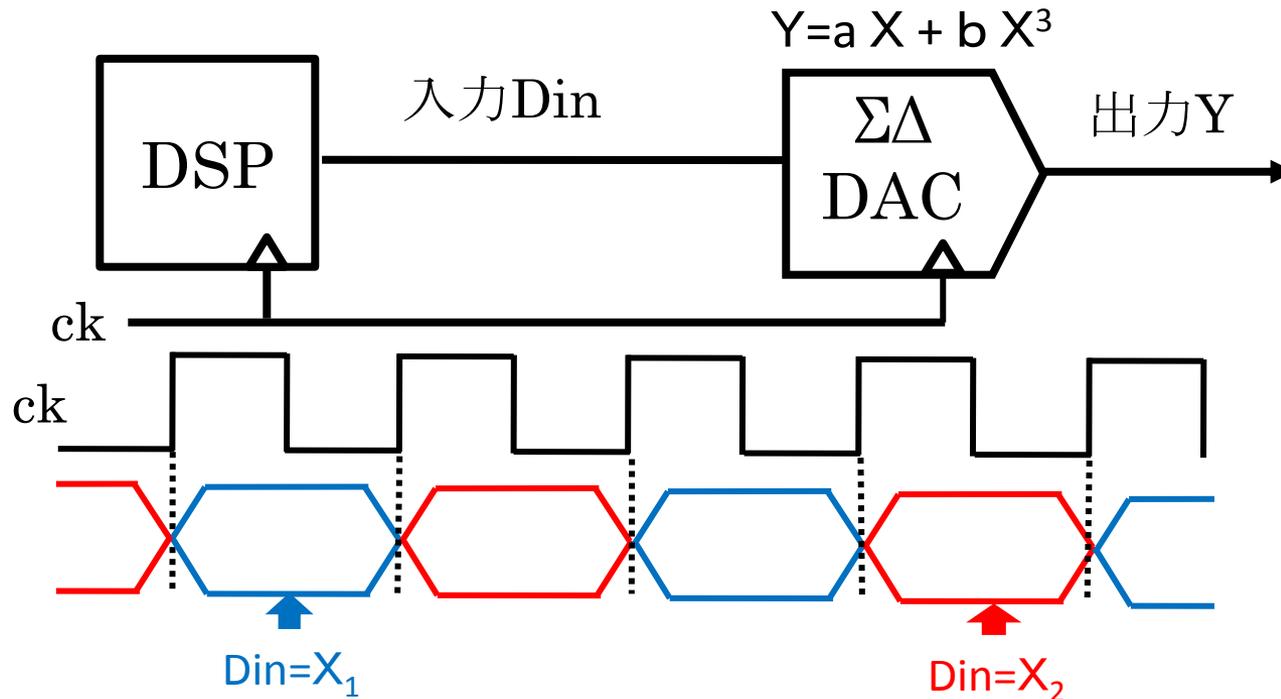
单一信号AWG



2トーン信号AWG



シミュレーション条件



単一信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$$

$$X_2 = A \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$$

$$A = 1 \quad a = 1.0$$

$$f_{in} = 33 \quad b = -0.005$$

点数: 16384

2トーン信号

$$X_1 = A \sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$$

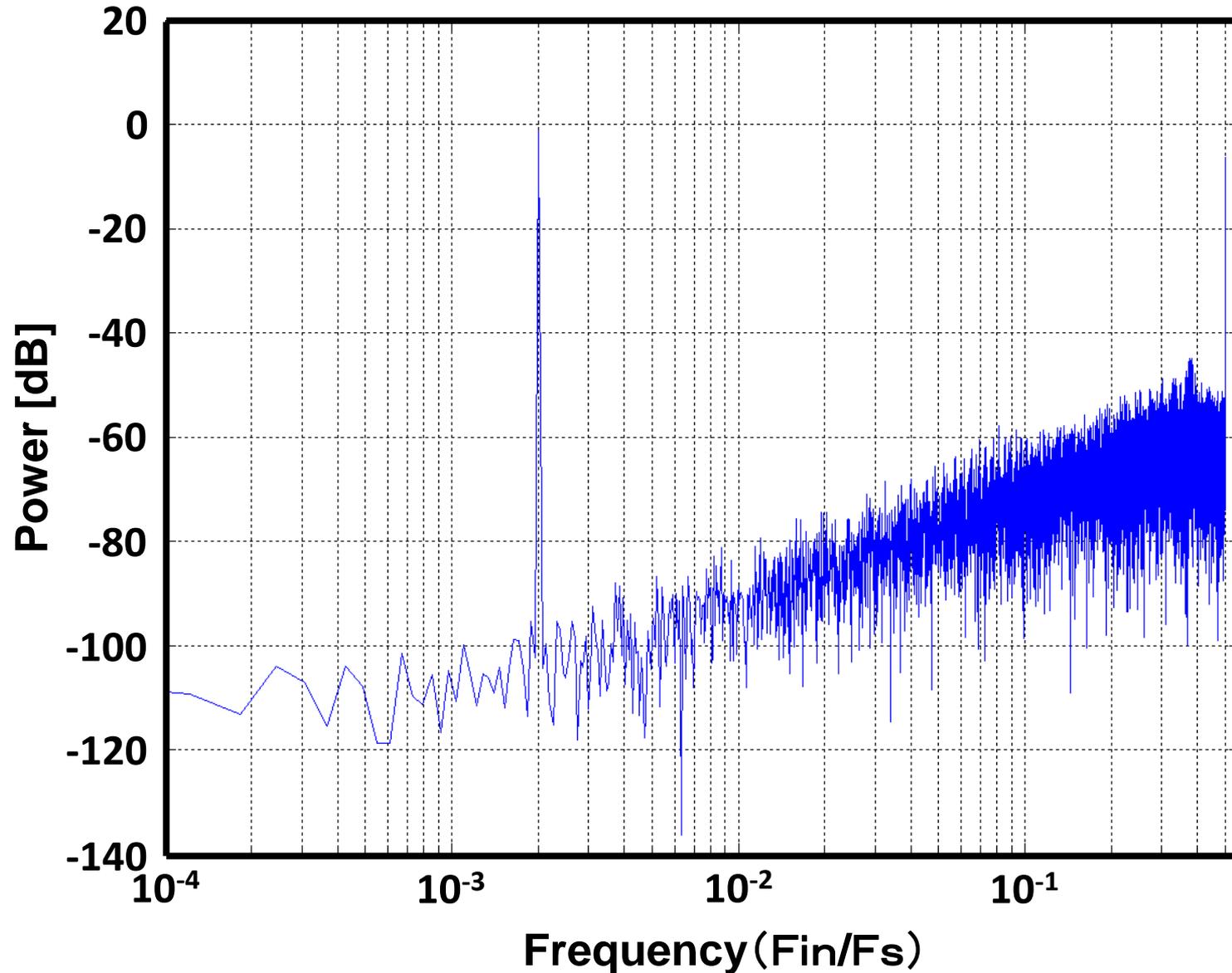
$$X_2 = A \sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$$

$$A = 1 \quad f_1 = 33 \quad a = 1.0$$

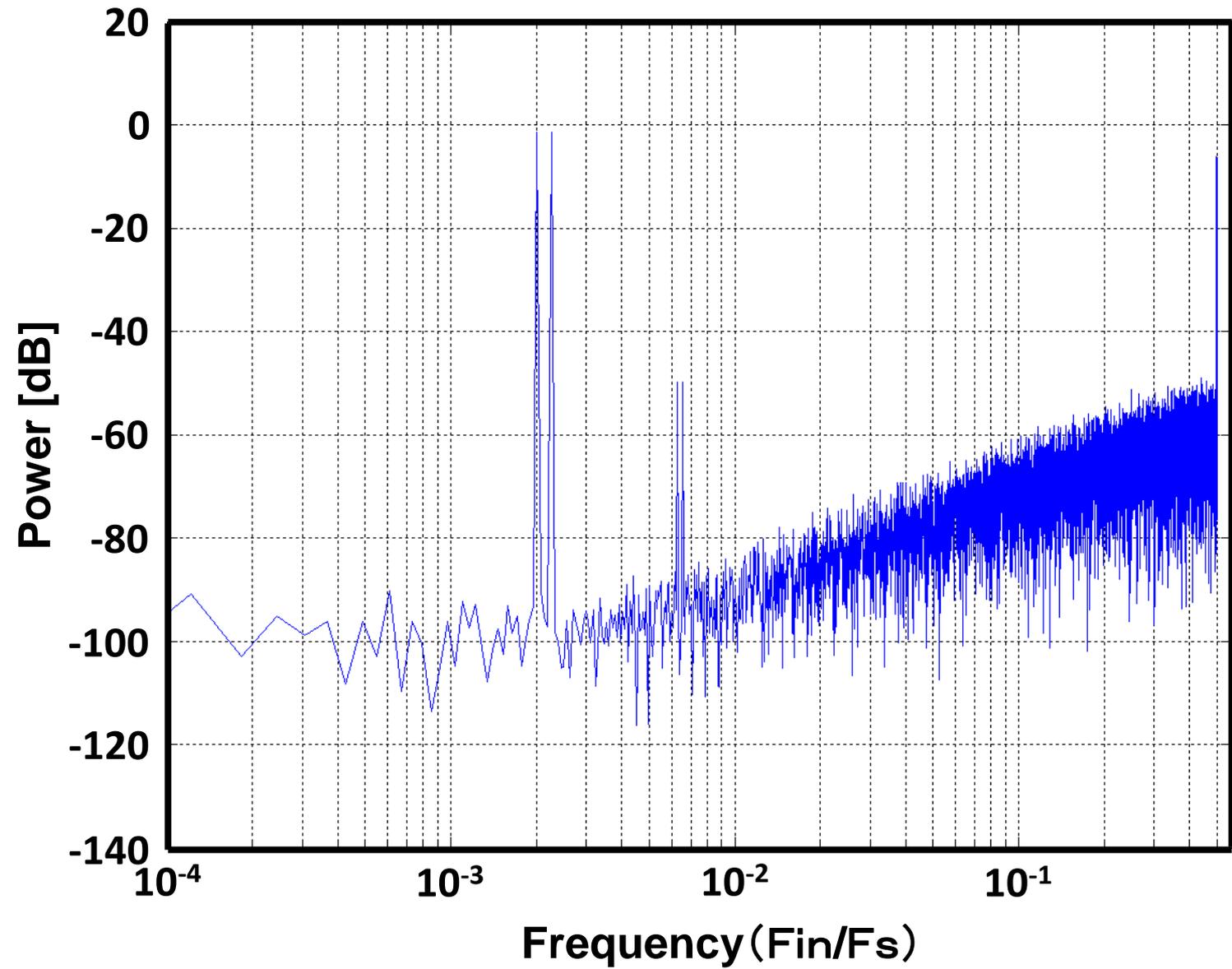
$$B = 1 \quad f_2 = 37 \quad b = -0.005$$

点数: 16384

除去後のスペクトル(単一信号)



除去後のスペクトル(2トーン信号)



アウトライン

- 研究背景
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- **まとめ**

まとめ

シグマデルタDAC信号発生回路での歪補正技術の提案、検討

- 位相差信号合成型
 - シミュレーションにより歪みの除去効果を確認
 - DAC特性により除去が不可
 - ⇒ダイナミックエレメントマッチング構成で解決
- 位相差切り替え型
 - シミュレーションにより歪みの除去効果を確認
 - 余分な回路を増加せず構成可能
 - $f_s/2$ 付近に歪みが発生
 - ⇒信号帯域より十分離れているためフィルタで除去可能

謝辞

有意義なご討論をいただきました

宮下博之、矢野雄二、力野邦人、岸上真也、
我毛辰弘、松浦達治、山口隆弘、高井伸和、
新津葵一 各位

およびこの研究をご支援いただいています
STARCに感謝の意を表します。

