

# 任意波形発生器を用いた 高周波低歪信号生成アルゴリズム

○柳田 朋則      澁谷 将平      小林 春夫

2016年7月15日

第75回FTC研究会, 伊香保、群馬

群馬大学 修士1年

柳田 朋則

# 内容

---

- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# 内容

---

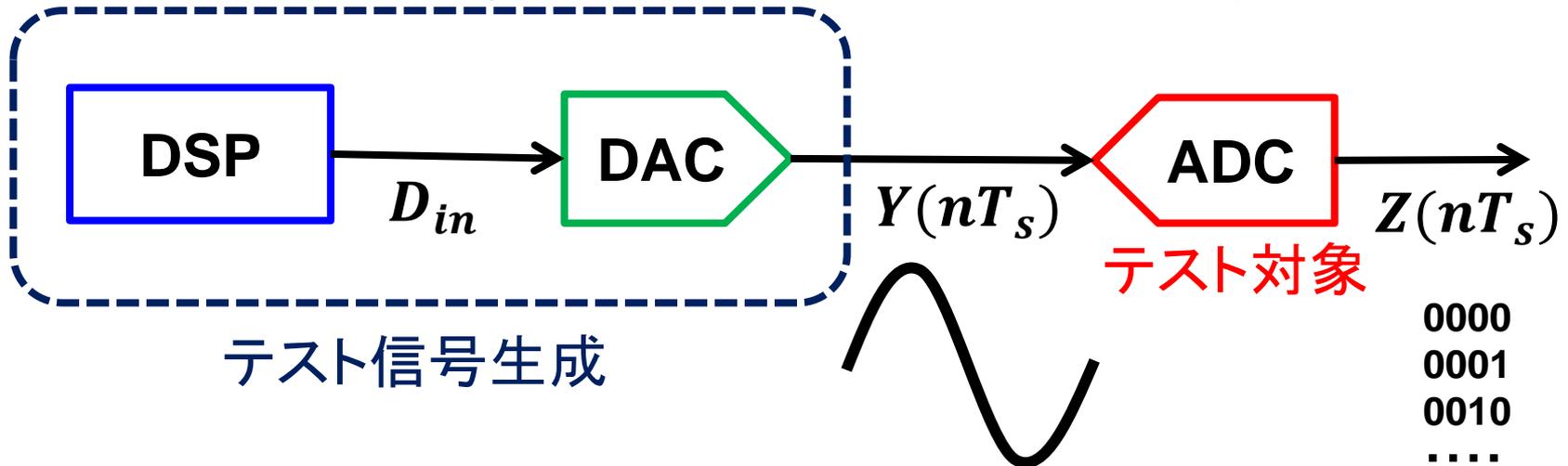
- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# 研究目的

- ADコンバータの動作テスト
- 任意波形発生器の高調波抑制
- 高周波の低歪信号を生成
  - 3次,5次同時キャンセル
  - 2トーン信号

# 任意波形発生器

## AWG (Arbitrary Waveform Generator)



DSP

生成 正弦波

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} nT_s)$$

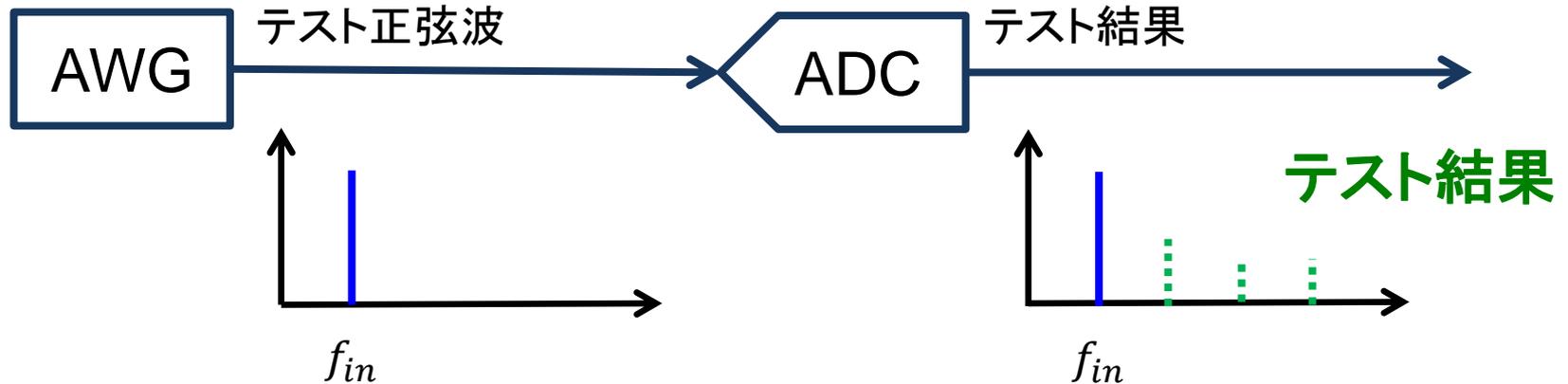
DAC

非線形性

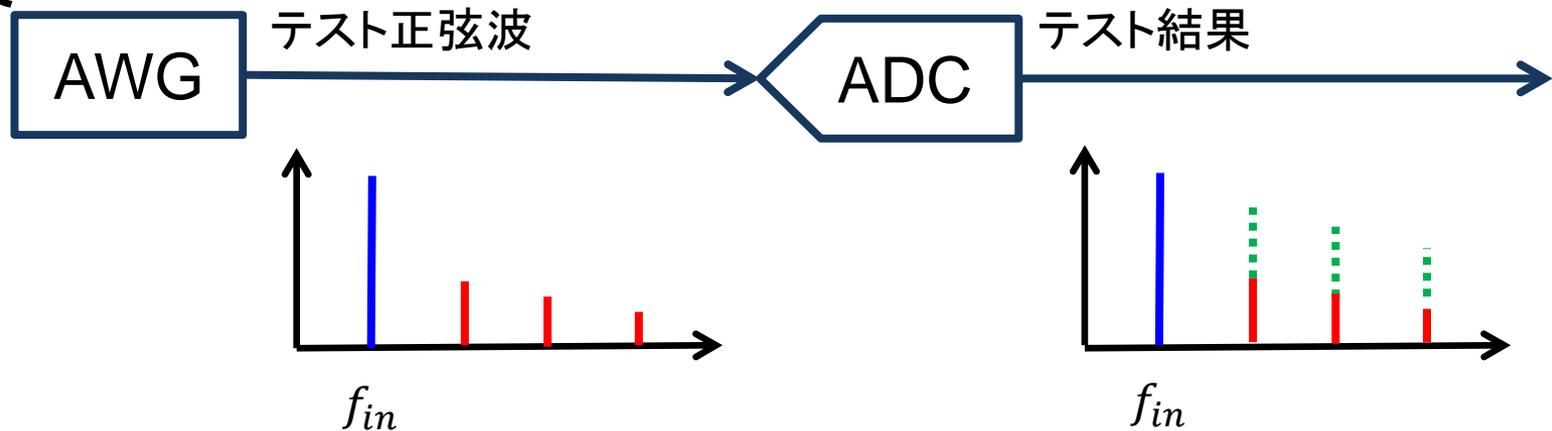
$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_2 D_{in}^2 + a_3 D_{in}^3 + \dots$$

# 理想と現実

理想

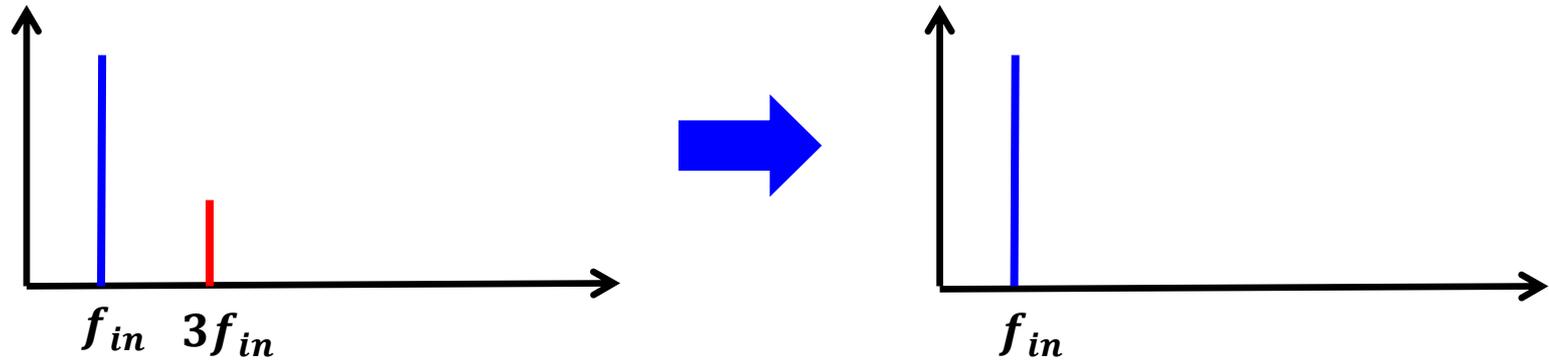


現実

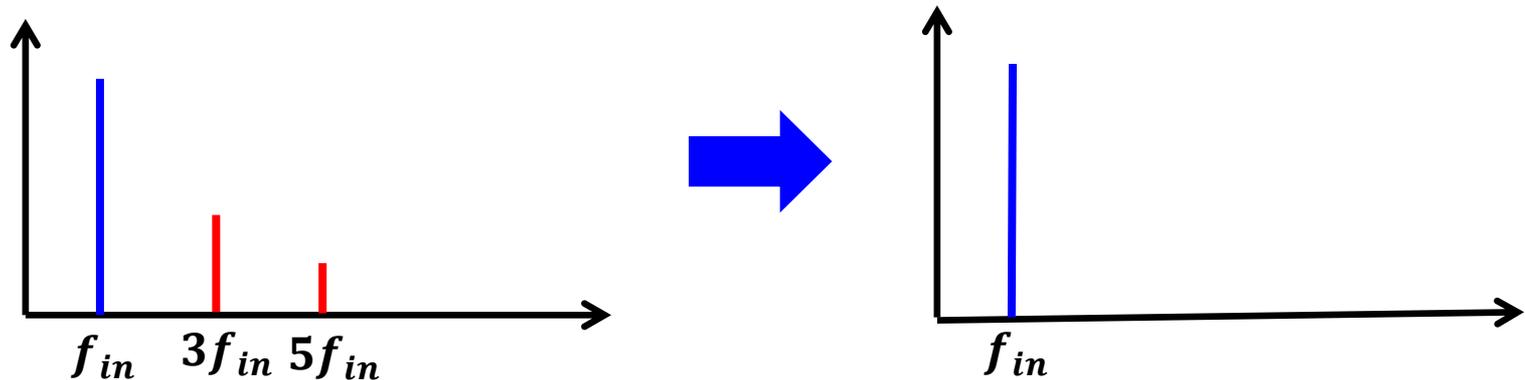


# シングルトーン信号

## 3次高調波の消去



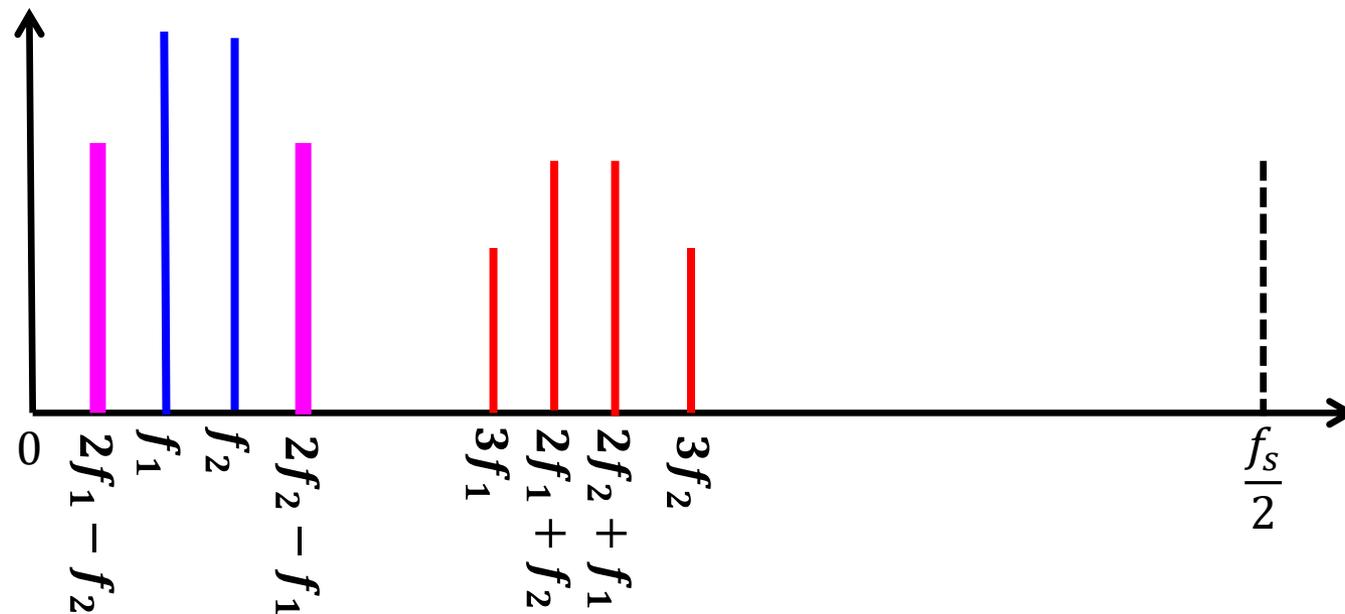
## 3次,5次高調波の同時消去



# 2トーン信号

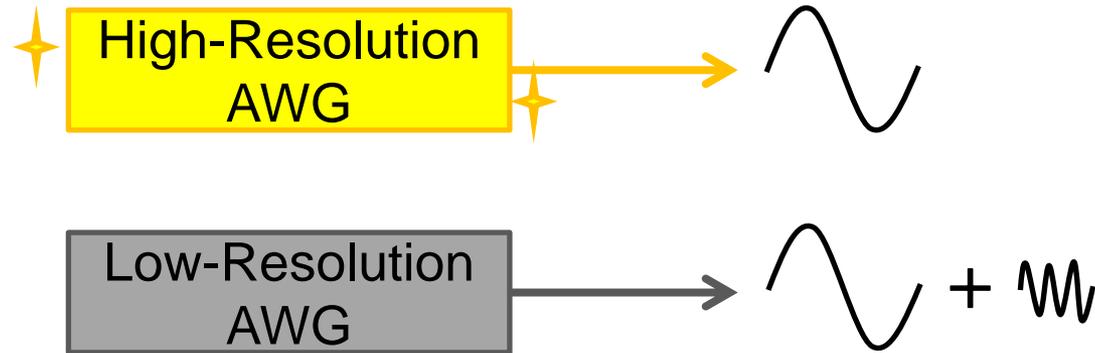
$$D_{in} = A \sin(2\pi f_1 t) + B \sin(2\pi f_2 t)$$

$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3$$



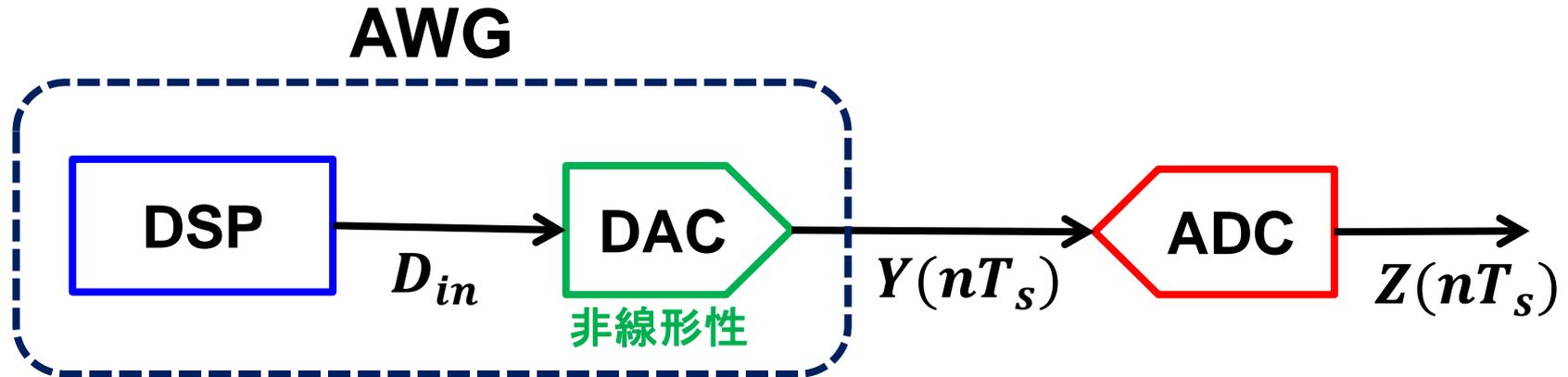
IM3の消去

# 低コストで高品質化



	コスト	品質
Hi-Resolution AWG	×	○
Low-Resolution AWG	○	×
提案手法	○	○

# 研究のメリット



**必要**

**DSPのプログラム変更**

**不必要**

**ハードウェアの改変  
非線形システムの同定  
アナログ的な較正**

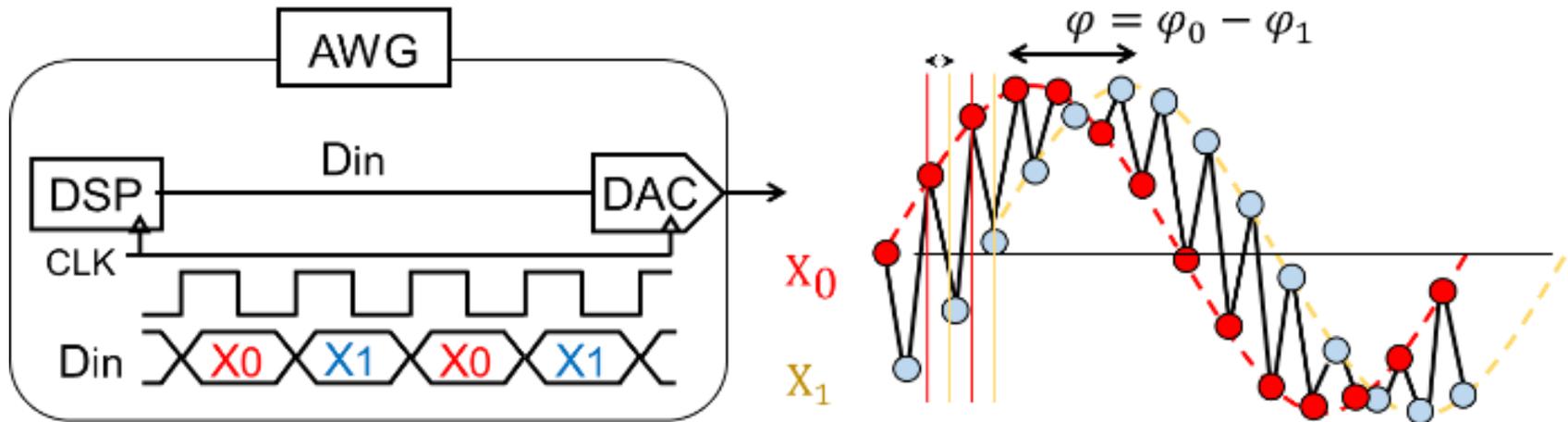
**産業的にも導入しやすい！**

# 内容

- 研究背景
- **提案アルゴリズム**
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# 位相切り替え信号

位相をずらして → インターリーブ

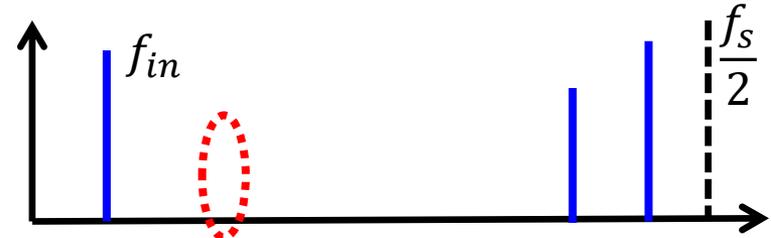
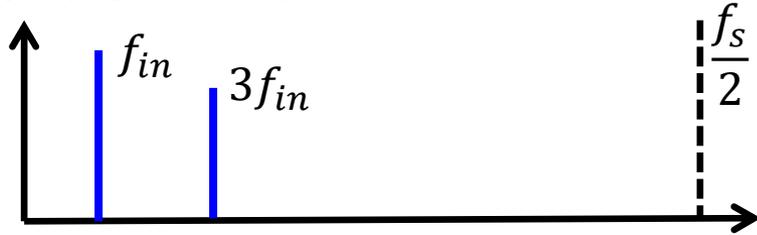


$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_0) & n: \text{奇数} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \varphi_1) & n: \text{偶数} \end{cases}$$

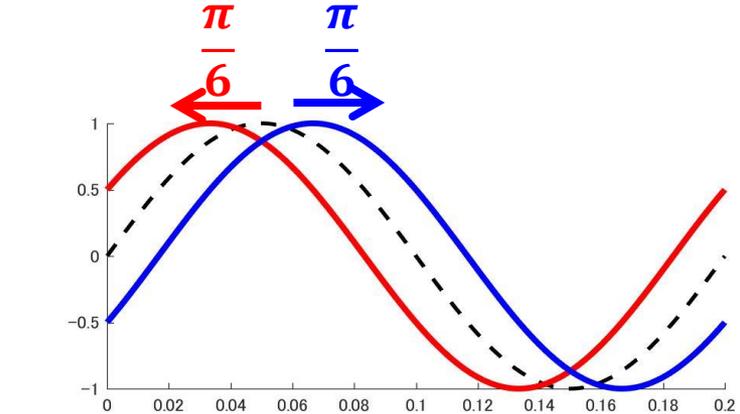
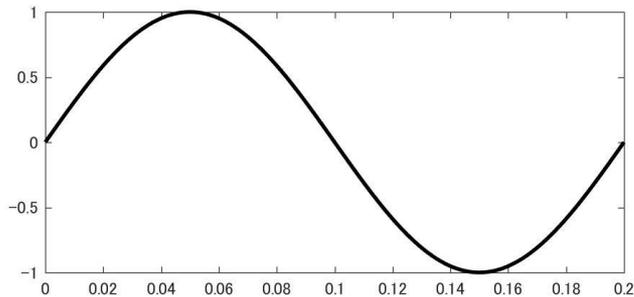
$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 = \frac{(2m - 1)\pi}{N}$$

# 低周波信号の高調波消去

## 3次高調波の場合

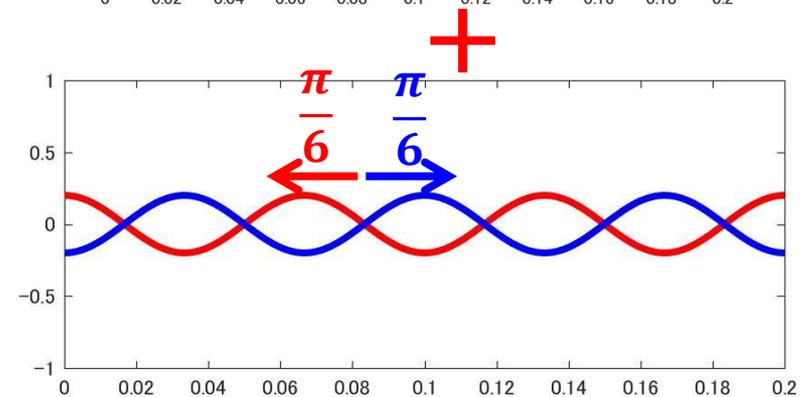
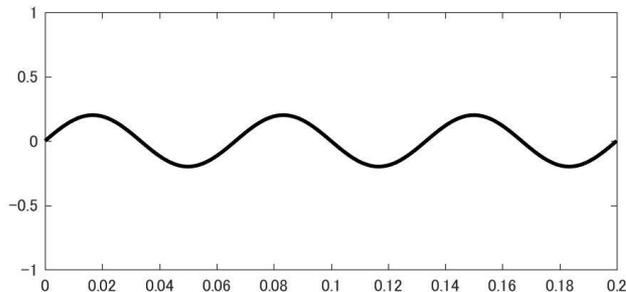


## シグナル



## 3次高調波

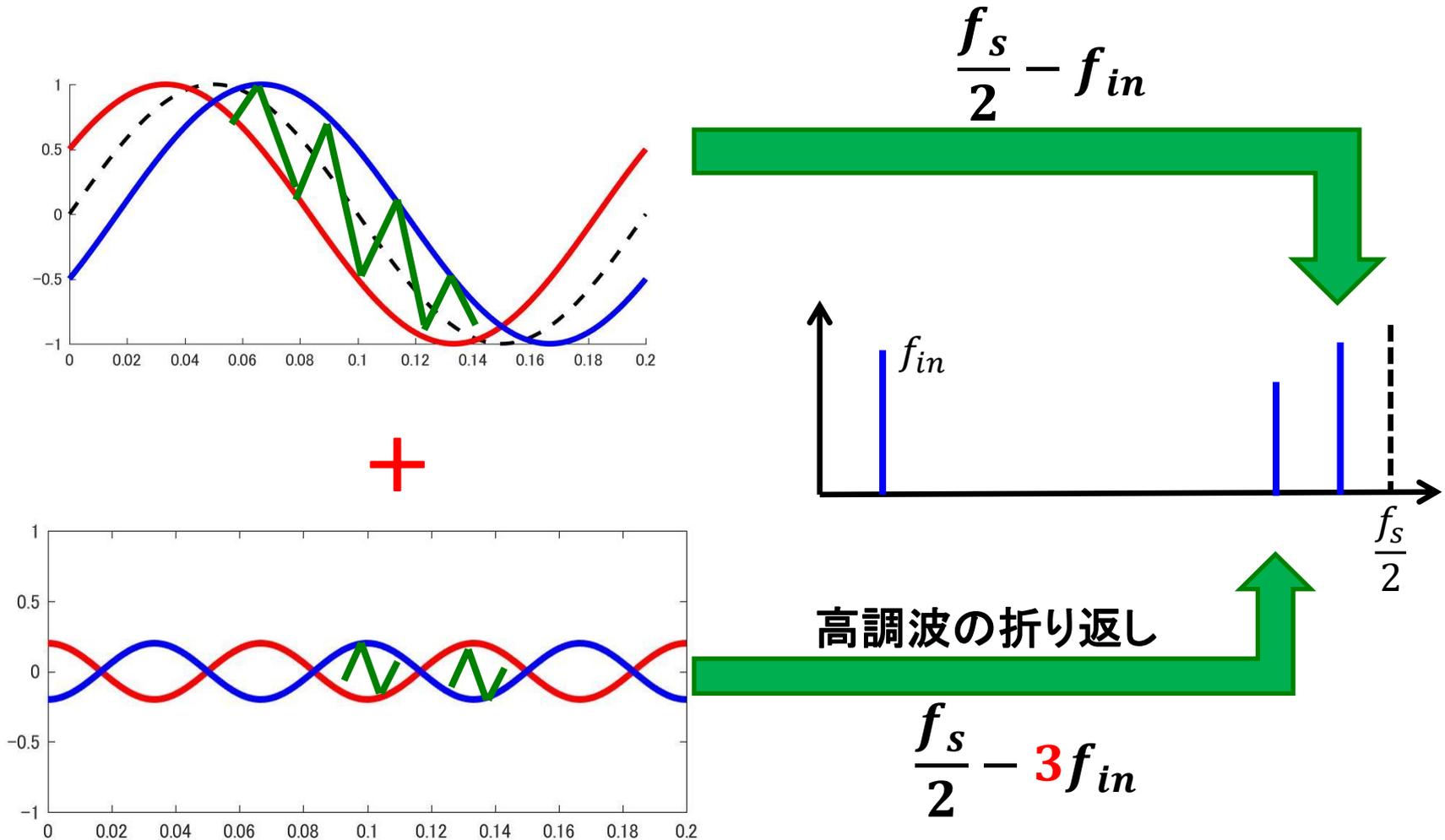
+



高調波だけキャンセル

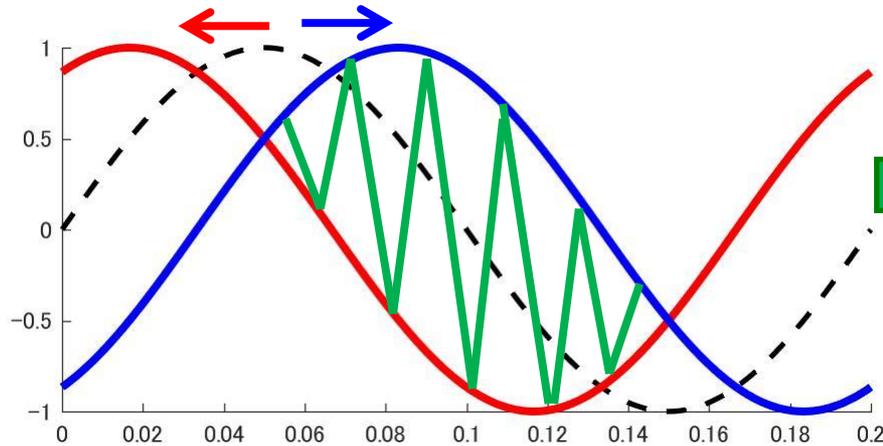
# 高周波信号の生成

インターリーブ → 高周波信号生成

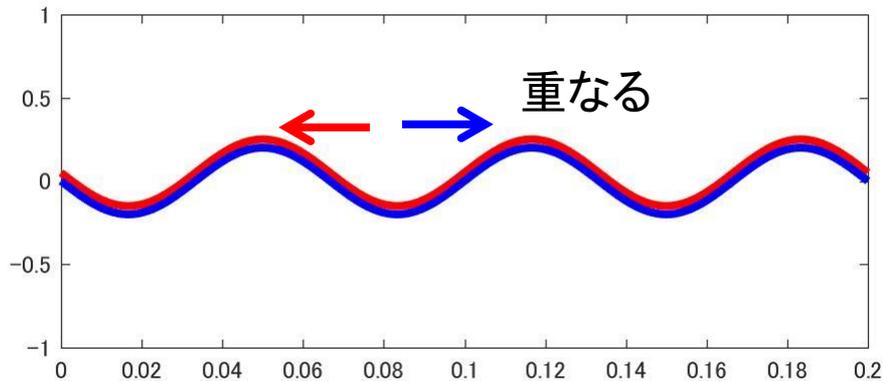
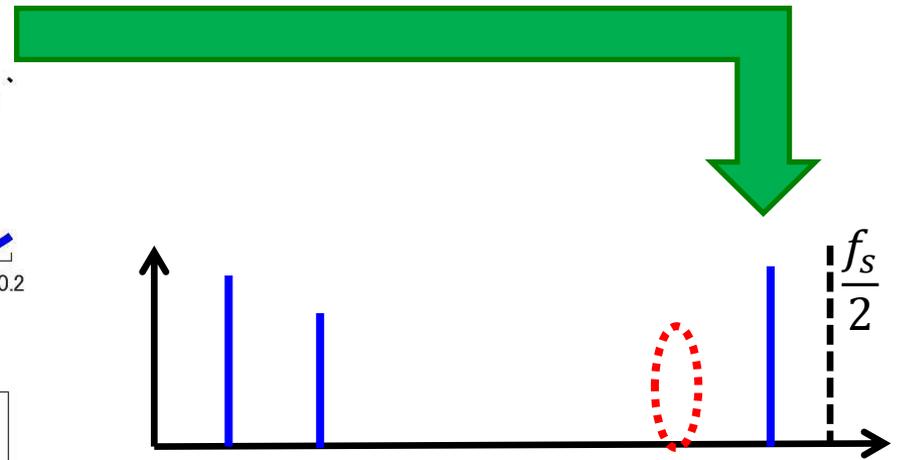


# 高周波信号の高調波消去

$$\varphi_x = \varphi_0 - \varphi_1 = \frac{2m\pi}{N}$$



信号として  $\frac{f_s}{2} - f_{in}$

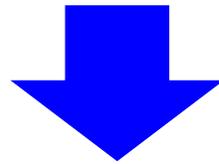


高調波の  
折り返し消去

高調波は同位相

# アルゴリズムの方針

- 低周波信号 → 高調波を消す
- 高周波信号 → 低周波信号から生成  
+  
高調波の折り返しを消す



低周波信号 → 高調波を**逆相**に

高周波信号 → 高調波を**同相**に

# 内容

- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# シミュレーション

## MATLAB R2016a を使用

- DSPサンプリング周波数 1024Hz
- シングルトーン3次高調波消去
- シングルトーン3次5次同時消去
- 2トーンのIM3消去

従来の正弦波信号を生成



提案アルゴリズムを用いた  
インターリーブ波形を生成

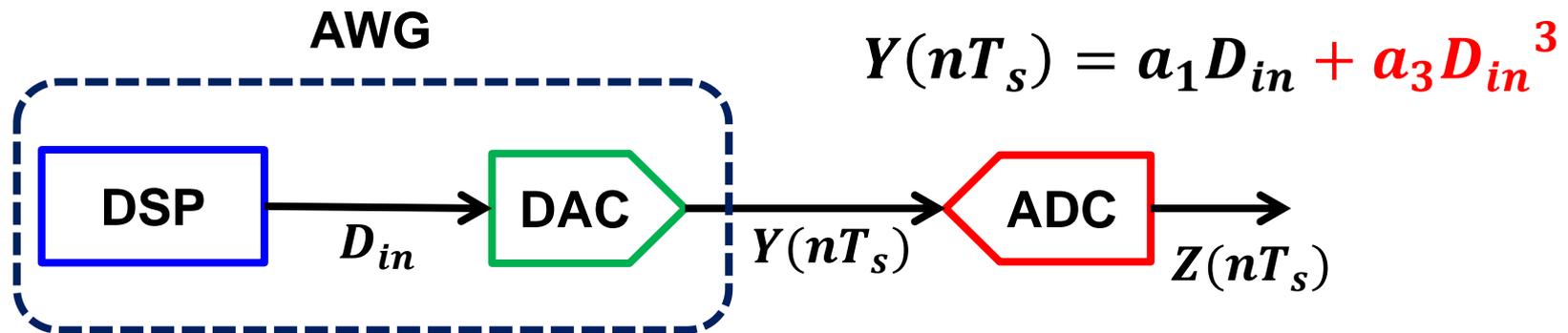
## パワースペクトル比較

# 内容

---

- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# シングルトーン 3次高調波



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} nT_s)$$

提案

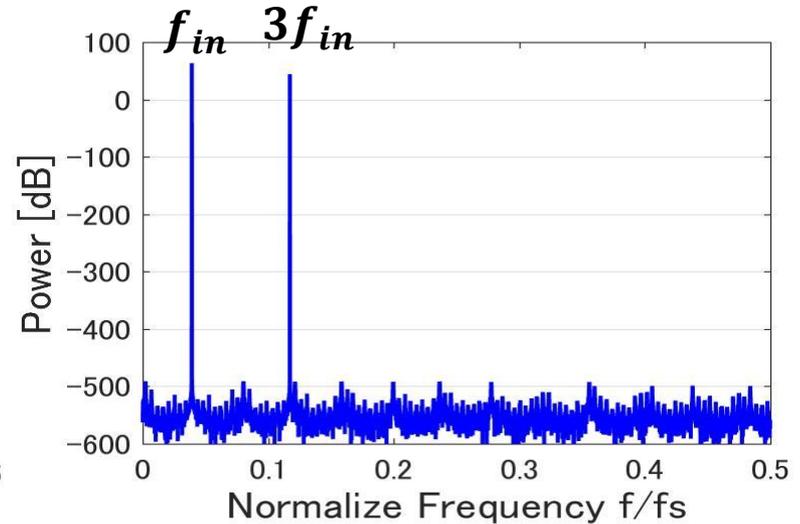
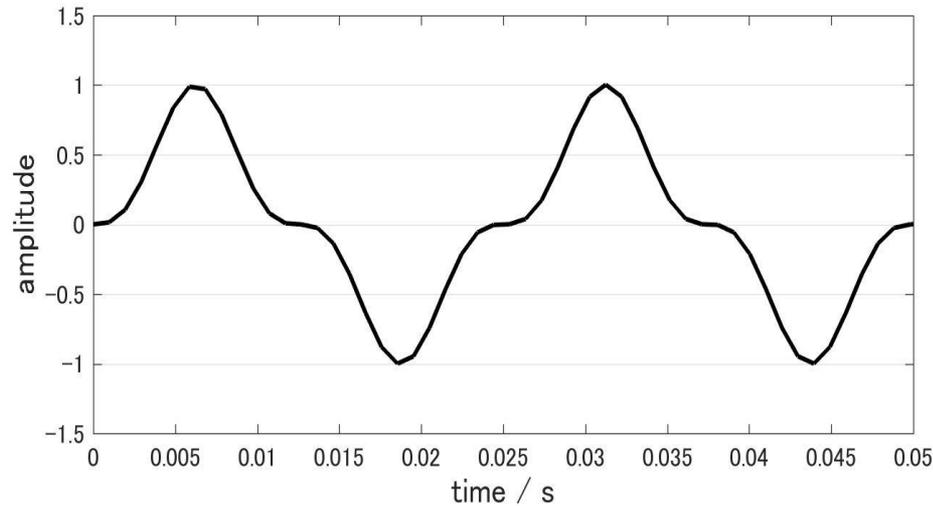
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_0) & n: \text{奇数} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_1) & n: \text{偶数} \end{cases}$$

$$\varphi_x = \varphi_0 - \varphi_1 = \frac{\pi}{3}$$

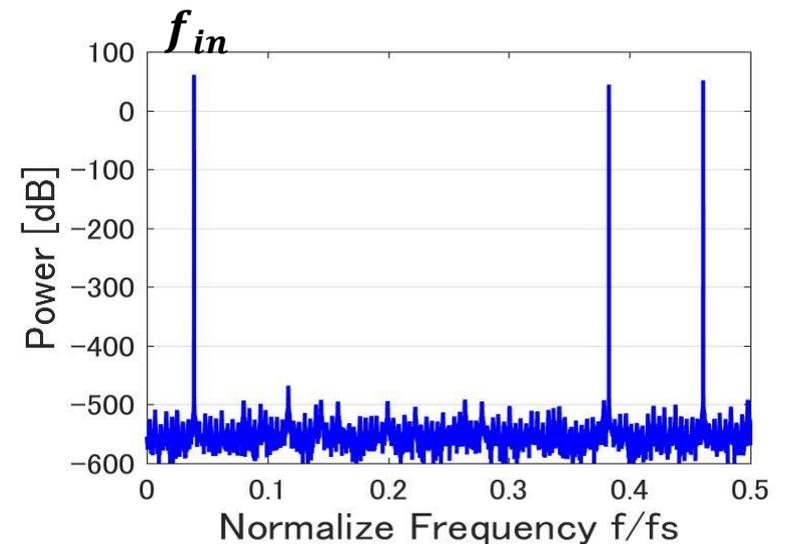
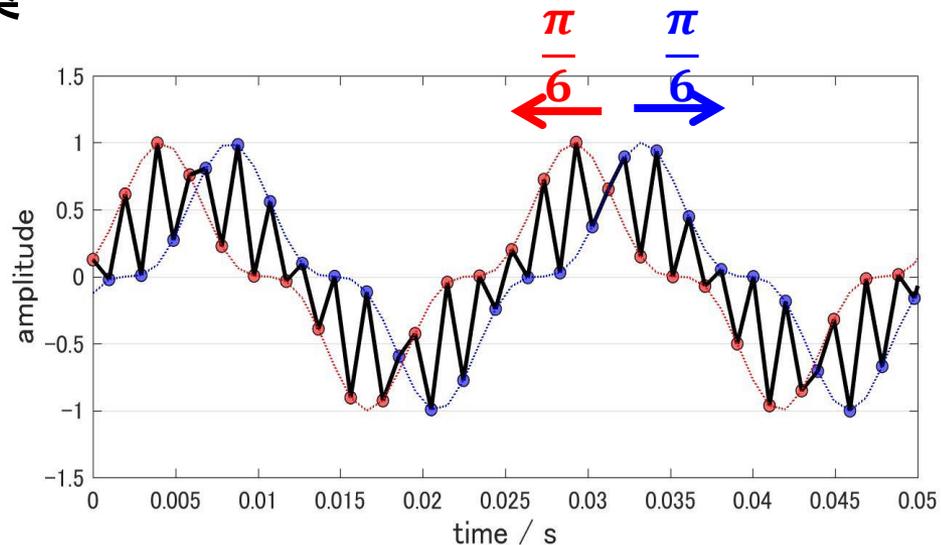
# シングルトーン 3次高調波

従来

$$f_{in}/f_s = 51/1024$$



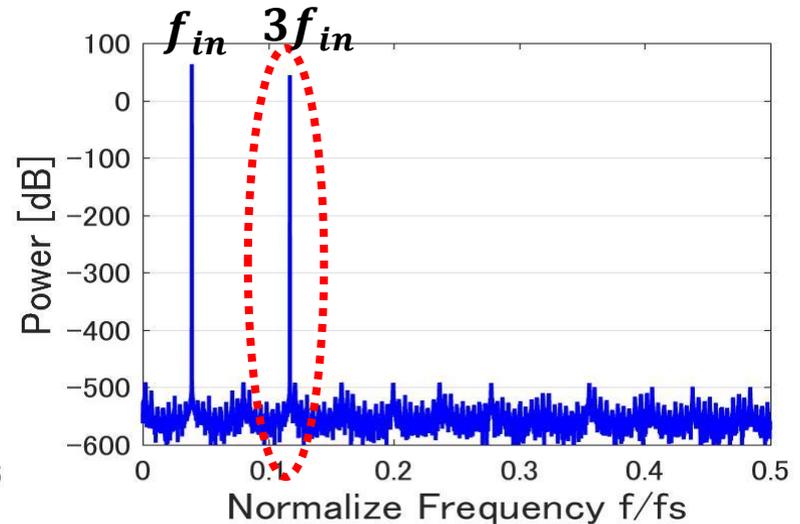
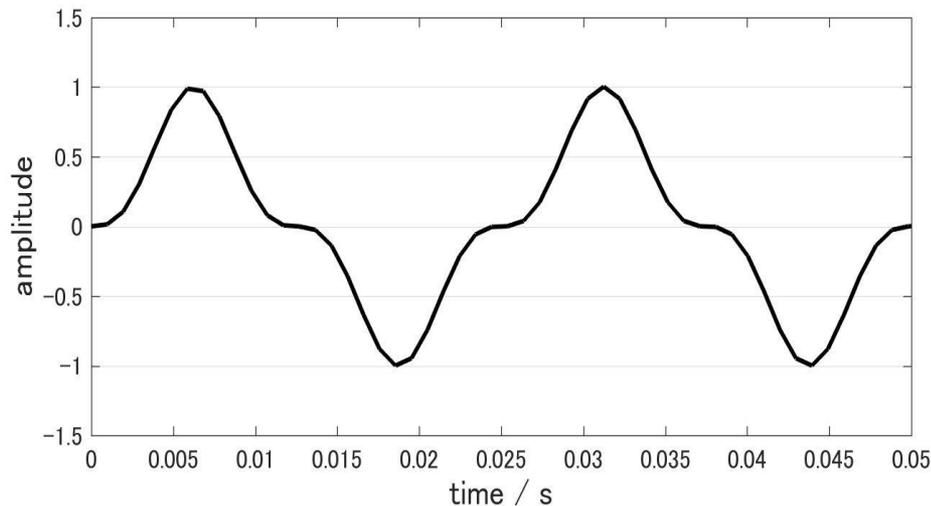
提案



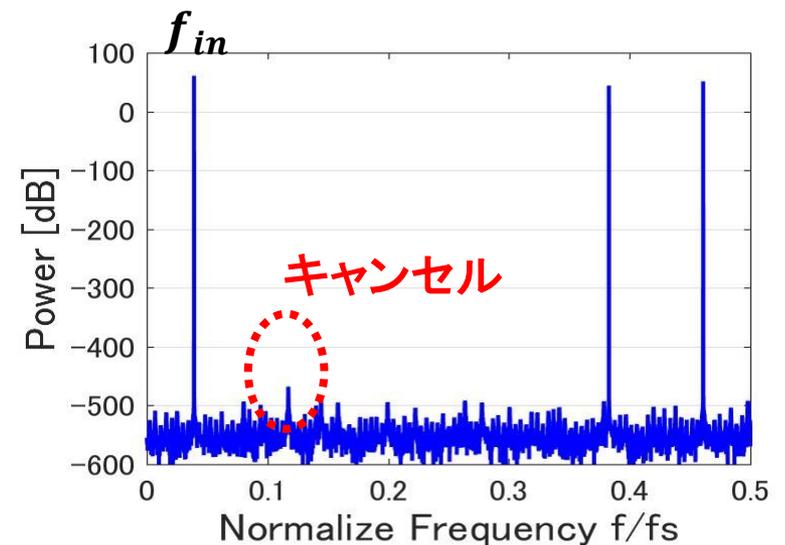
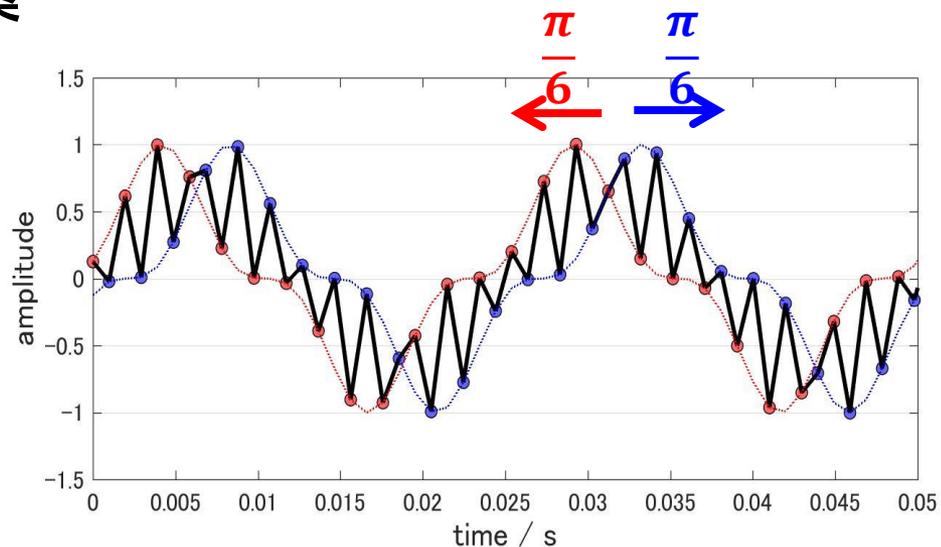
# シングルトーン 3次高調波

従来

$$f_{in}/f_s = 51/1024$$



提案



# 複数の高調波

$$\varphi_x = \frac{(2m-1)\pi}{N_a} \text{ かつ } \frac{(2m-1)\pi}{N_b} \text{ を同時に満たす}$$

**2相インターリーブでは実現不可**

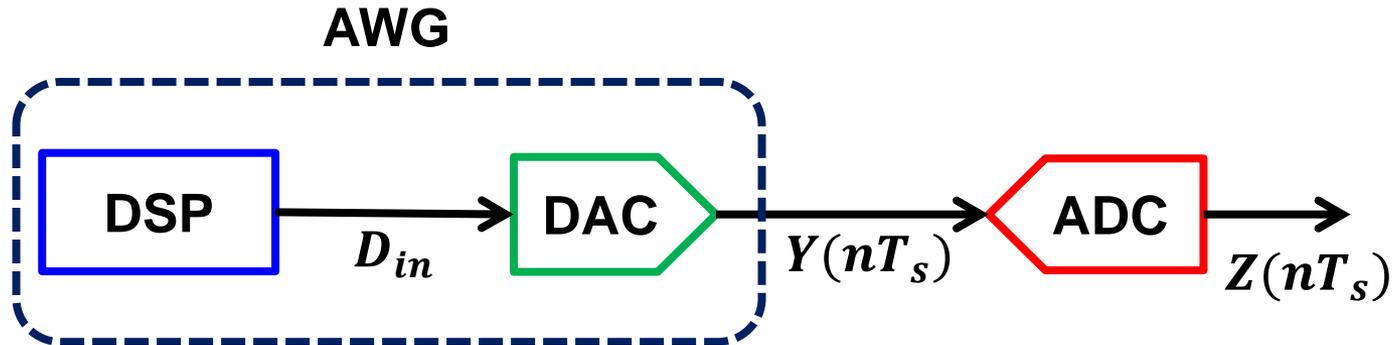


$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 1 \\ X_2 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k + 2 \\ X_3 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

**4相インターリーブで問題解決！**

# シングルトーン 3次, 5次高調波

$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3 + a_5 D_{in}^5$$



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} nT_s)$$

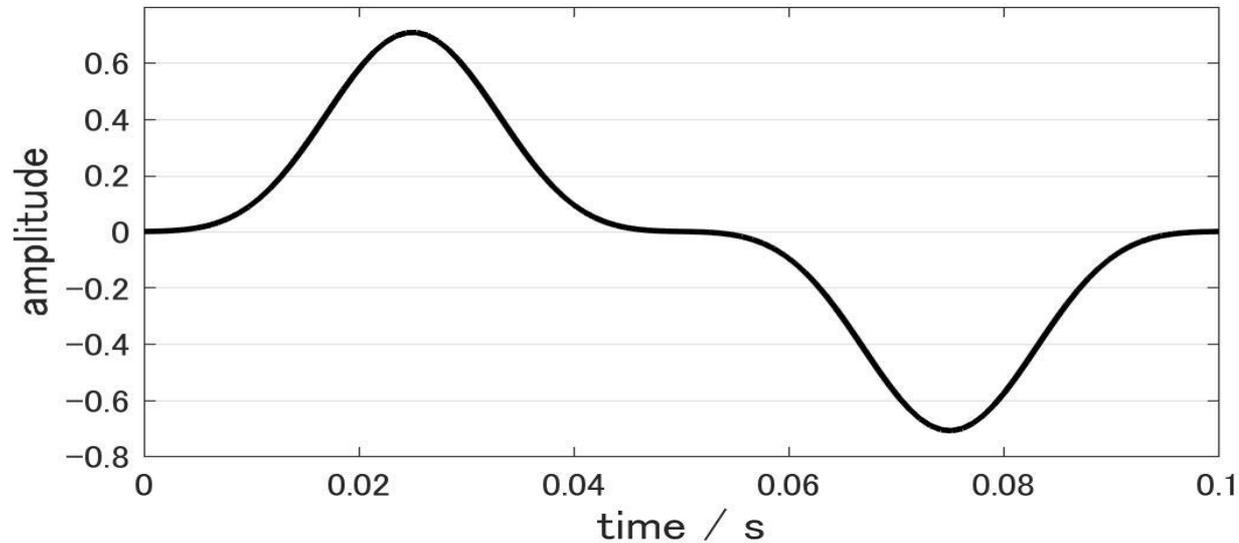
提案

$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 1 \\ X_2 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k + 2 \\ X_3 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

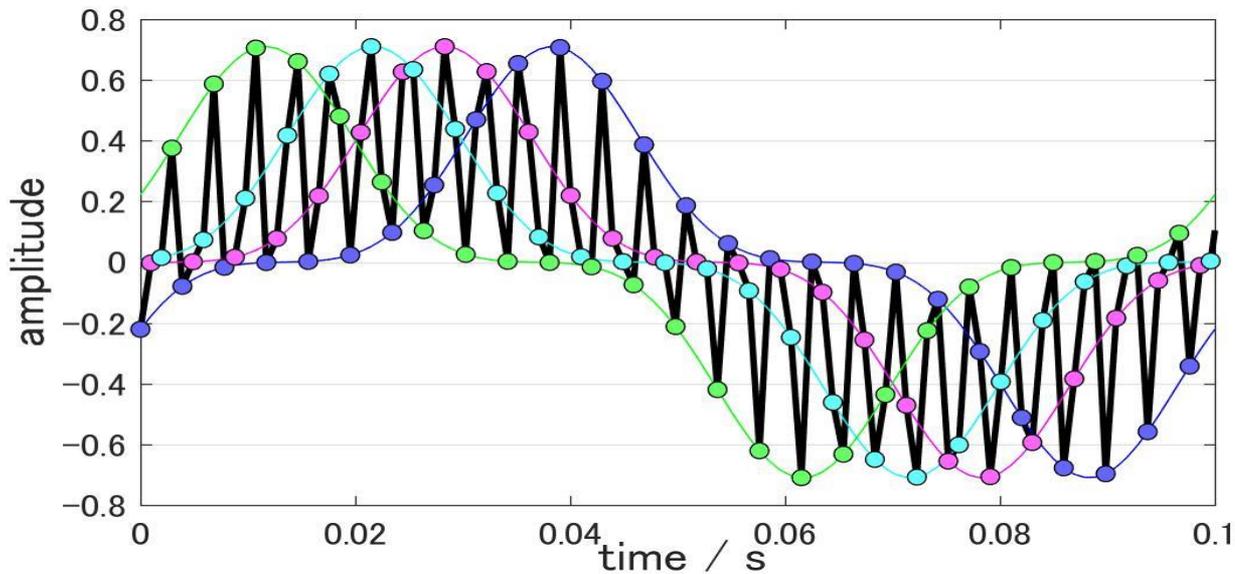
$$\varphi_a = \frac{\pi}{6}, \varphi_b = \frac{\pi}{10}$$

# シングルトーン 3次, 5次高調波

従来



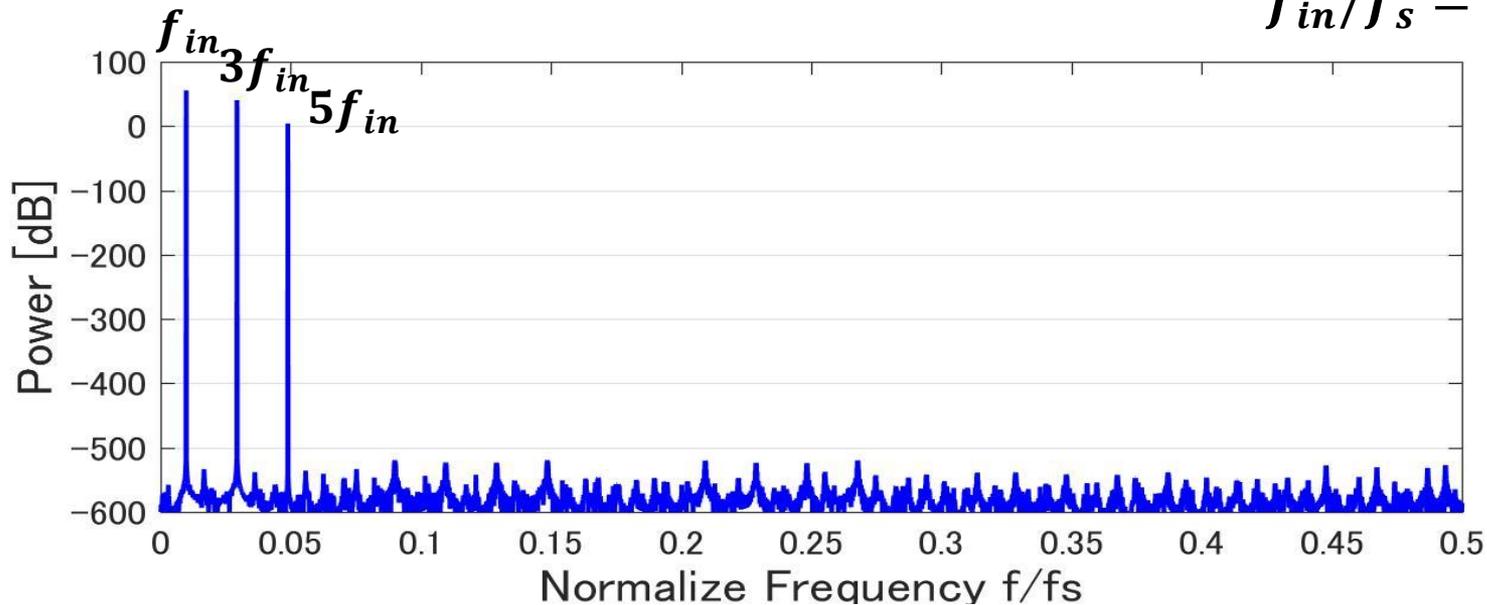
提案



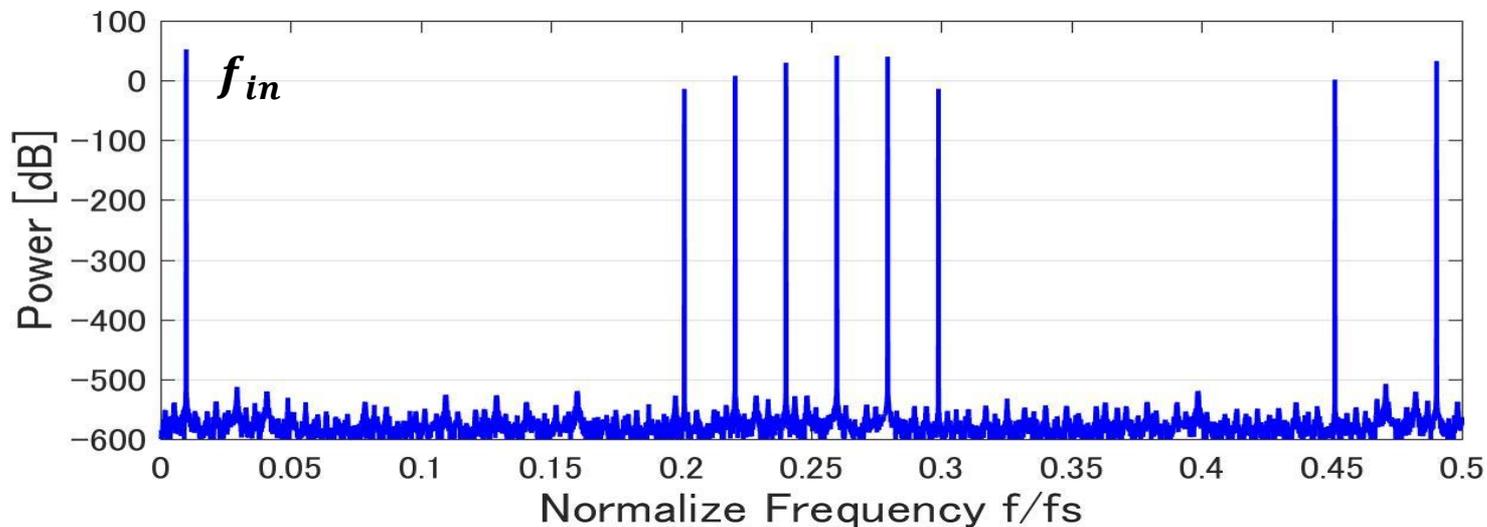
# シングルトーン 3次, 5次高調波

$$f_{in}/f_s = 11/1024$$

従来



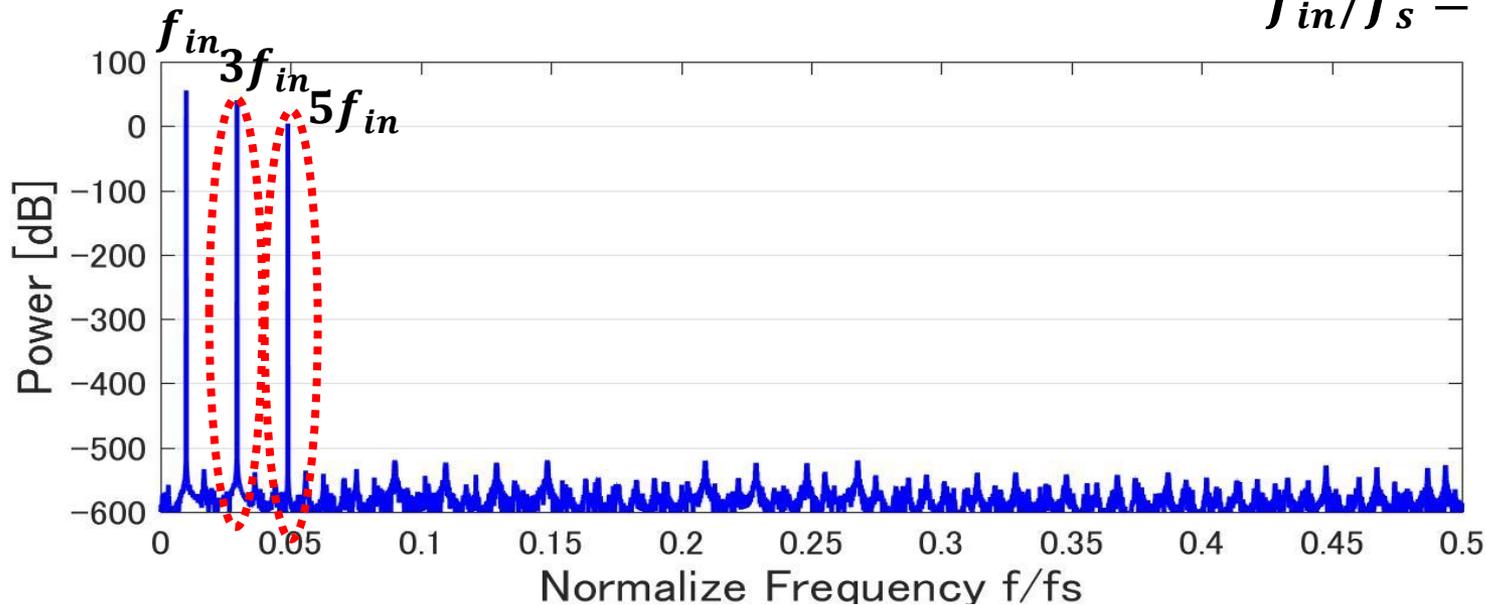
提案



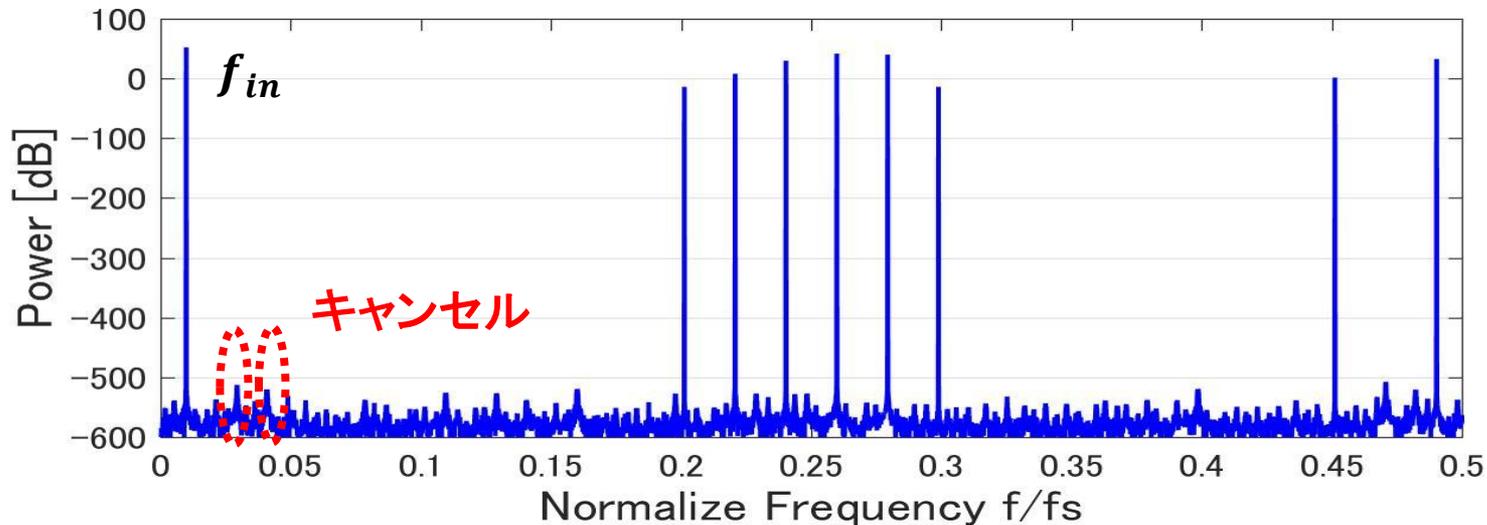
# シングルトーン 3次, 5次高調波

$$f_{in}/f_s = 11/1024$$

従来

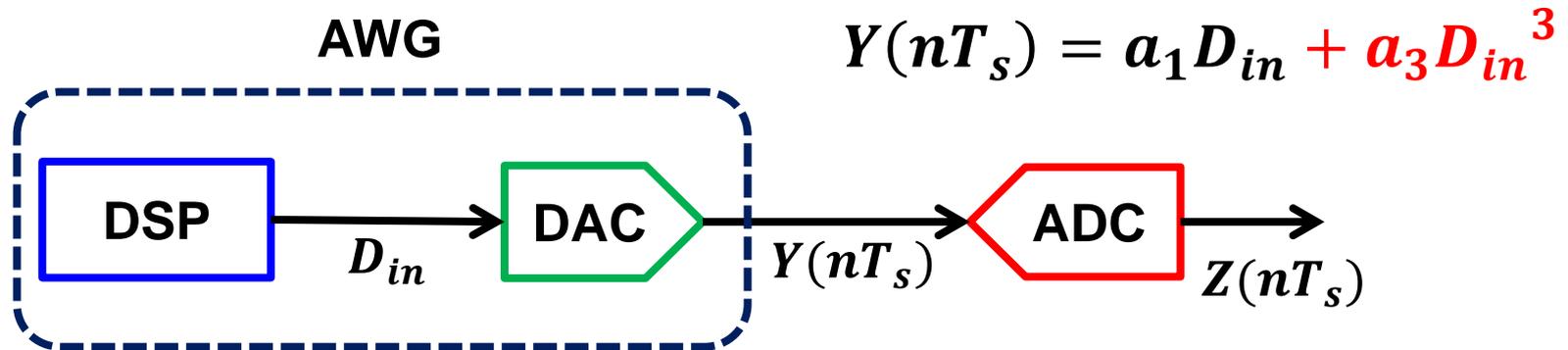


提案



## 2トーン

## 3次高調波



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_1 nT_s) + B \sin(2\pi f_2 nT_s)$$

提案

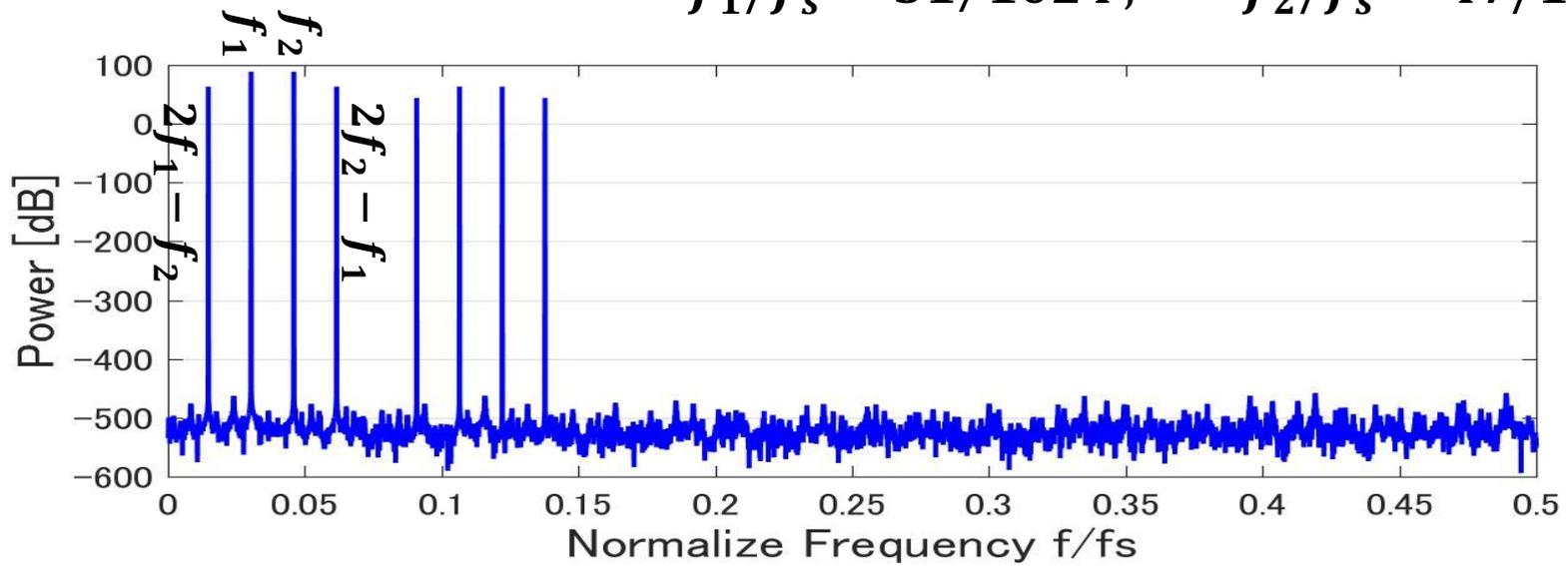
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_0) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_0) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_0) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_0) & n: \text{odd} \end{cases}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{6}$$

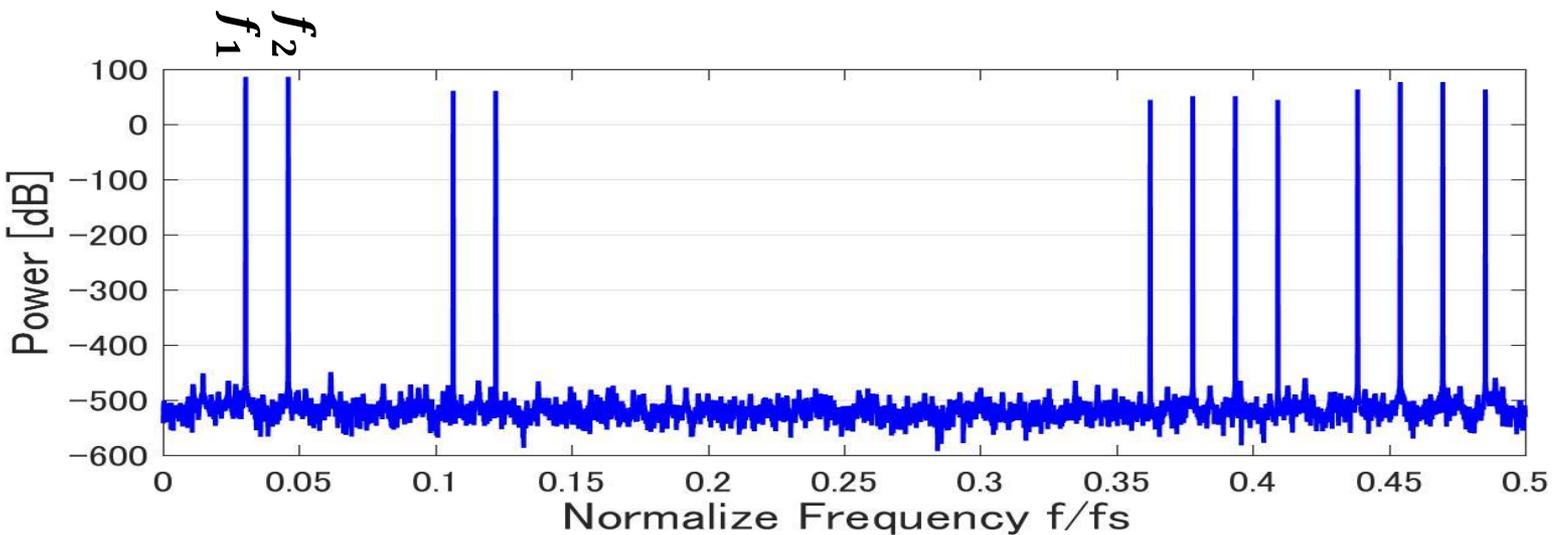
# 2トーン 3次高調波

従来

$$f_1/f_s = 31/1024, \quad f_2/f_s = 47/1024$$



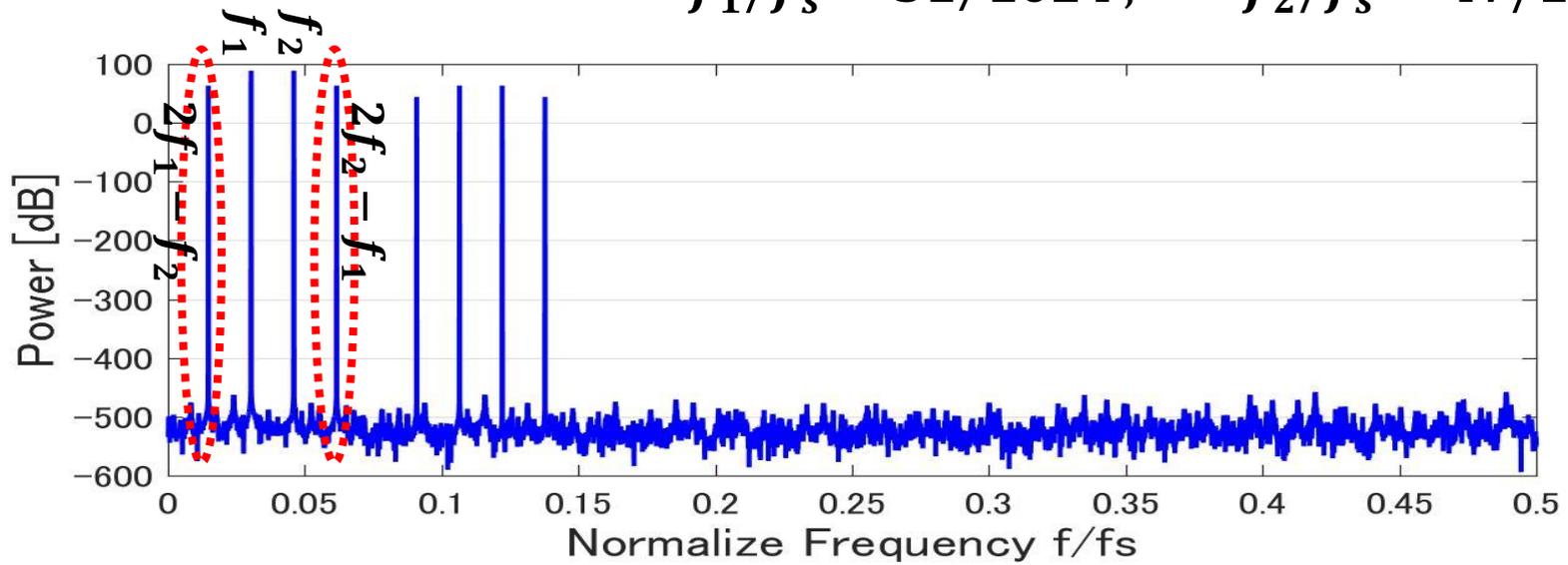
提案



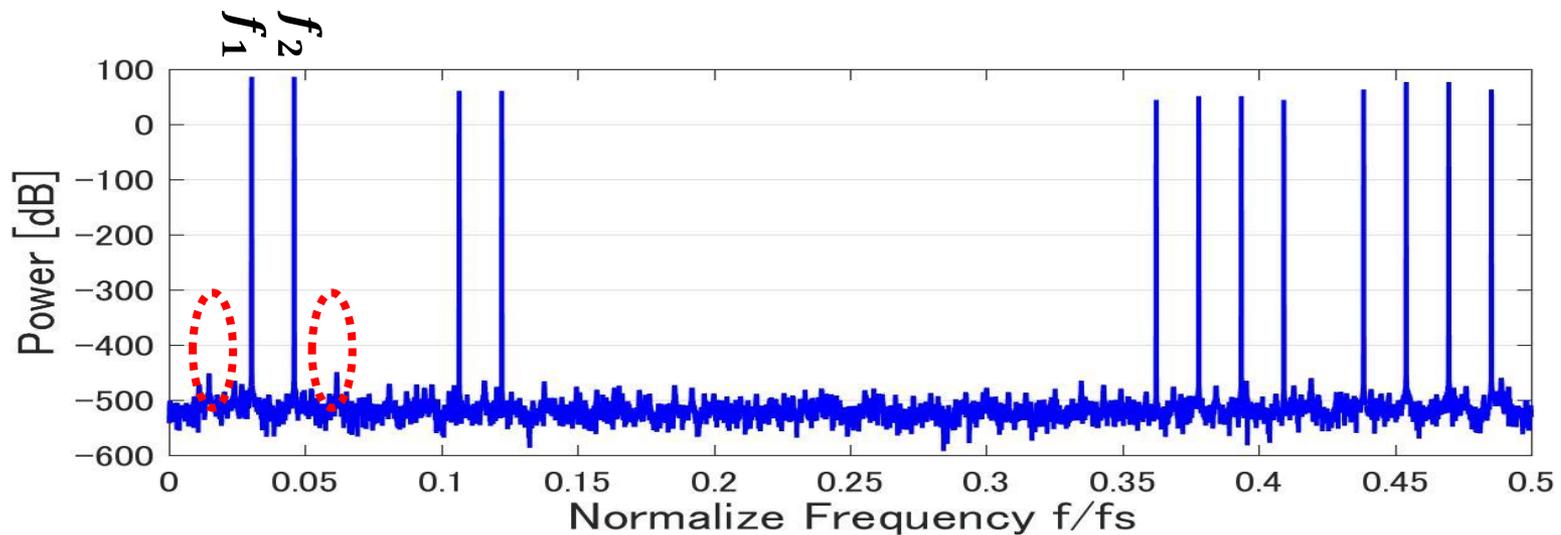
# 2トーン 3次高調波

従来

$$f_1/f_s = 31/1024, \quad f_2/f_s = 47/1024$$



提案

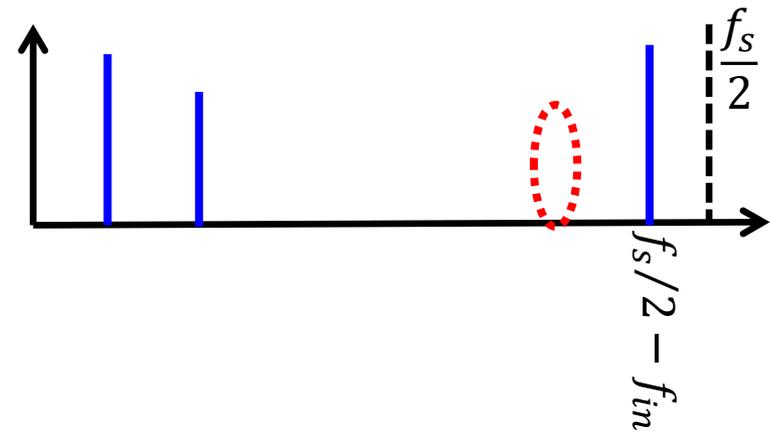
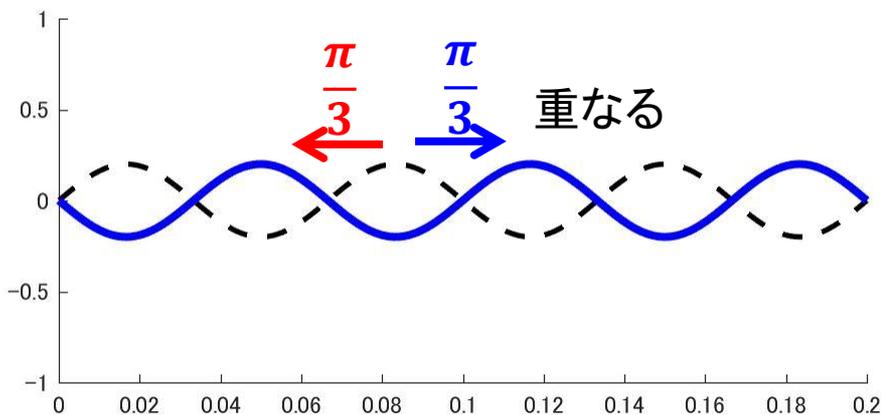
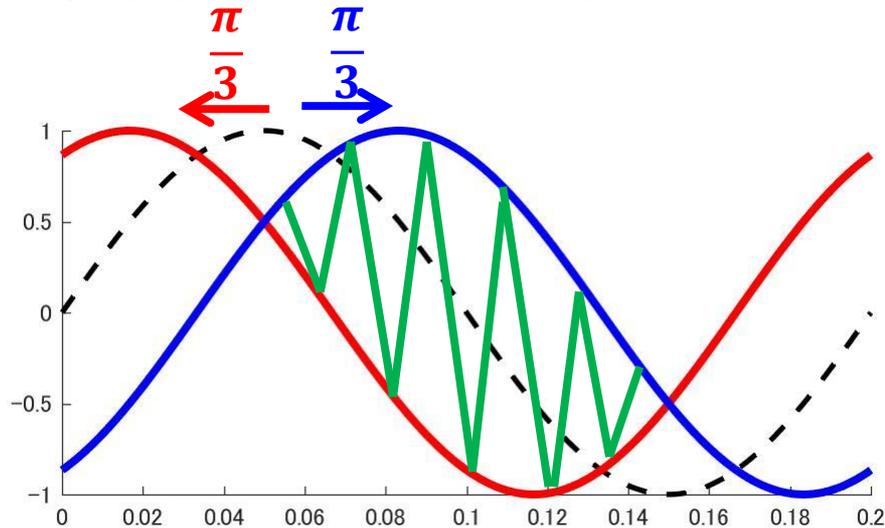


# 内容

- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

# シングルトーン 3次高調波

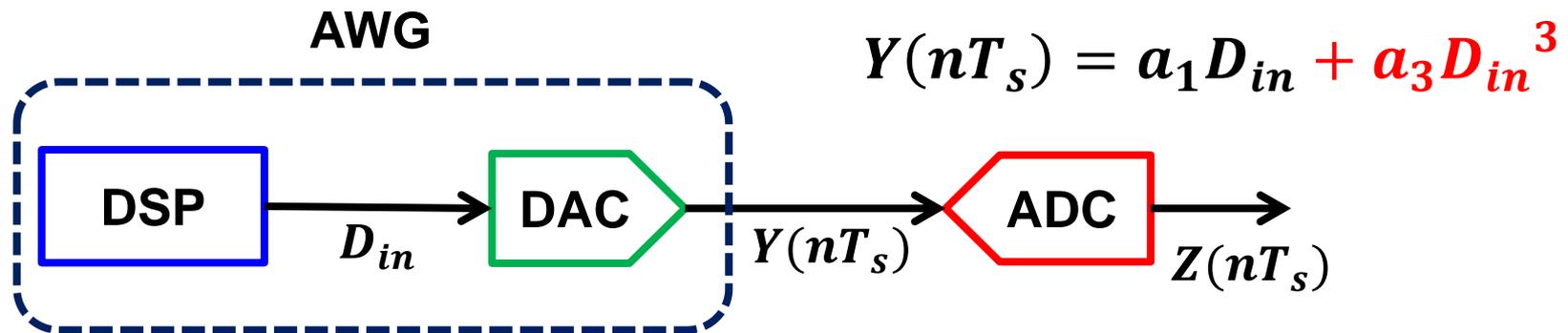
3次高調波が含まれる場合



信号として  $\frac{f_s}{2} - f_{in}$

高調波は同位相

# シングルトーン 3次高調波



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f'_{in} nT_s)$$

提案

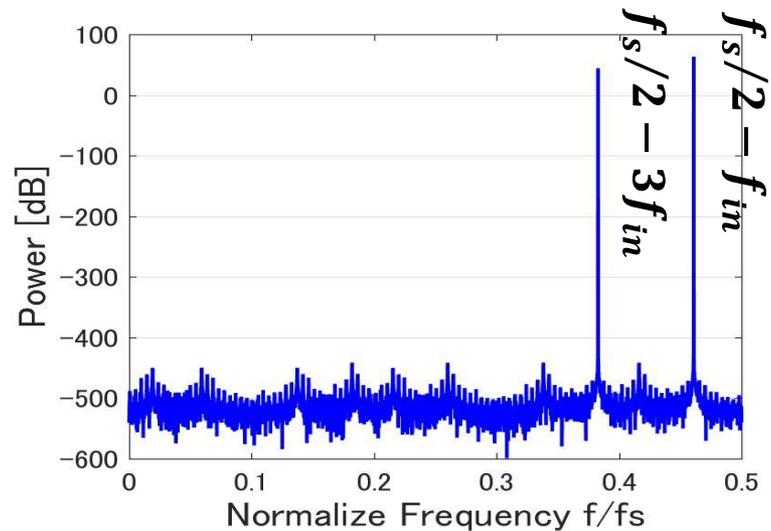
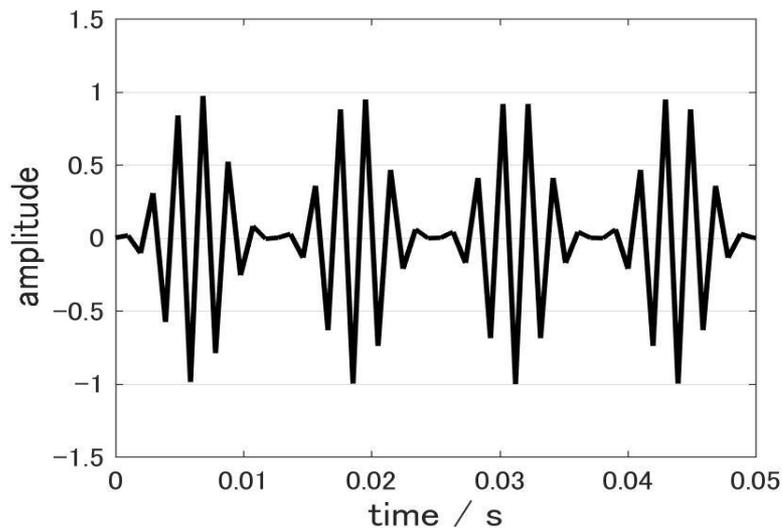
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_0) & n: \text{奇数} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_1) & n: \text{偶数} \end{cases}$$

$$\varphi_x = \varphi_0 - \varphi_1 = \frac{2m\pi}{3}$$

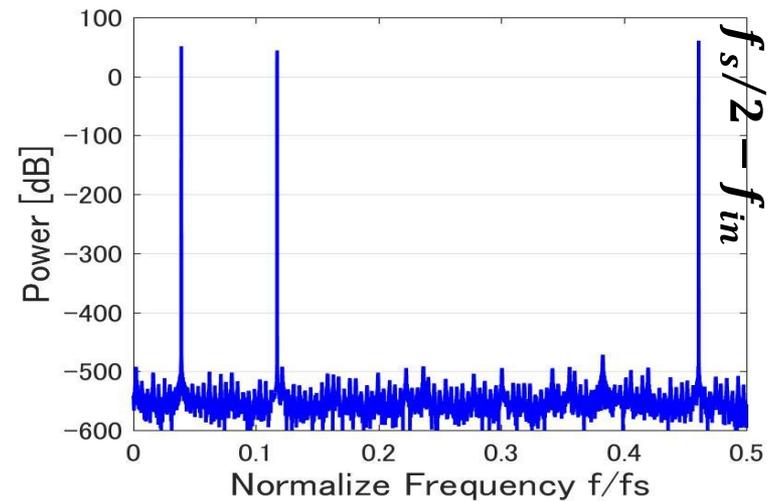
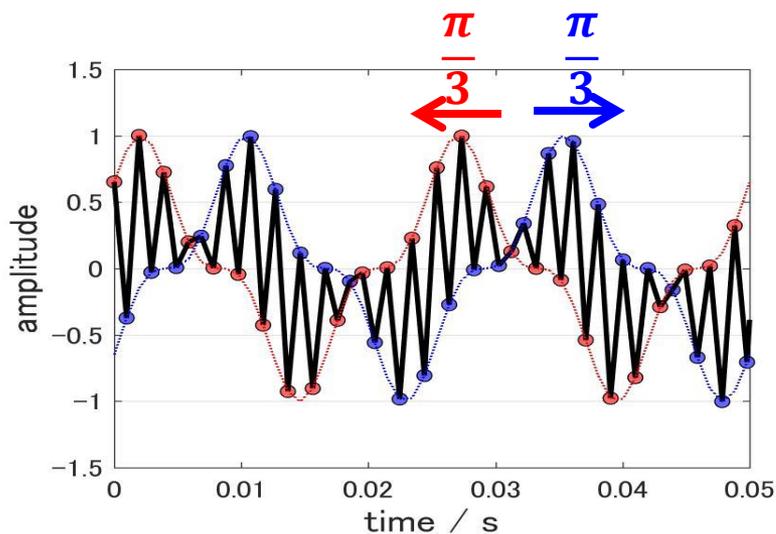
# シングルトーン 3次高調波

$$f_{in}/f_s = 51/1024, f'_{in} = 461$$

従来



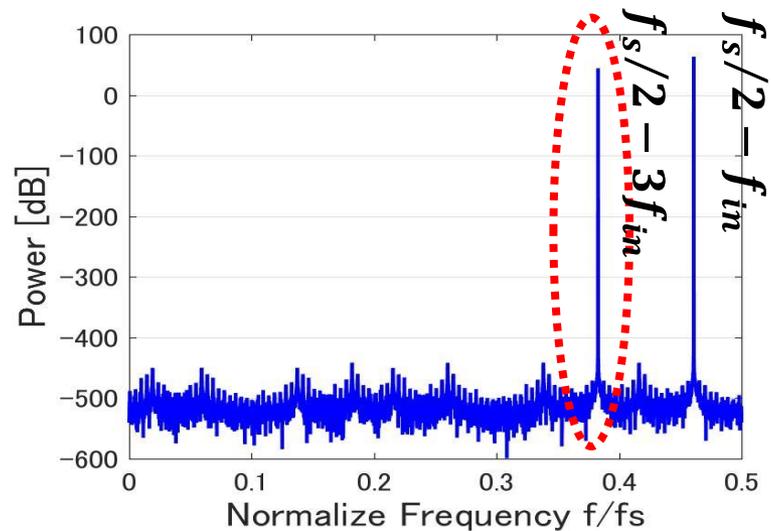
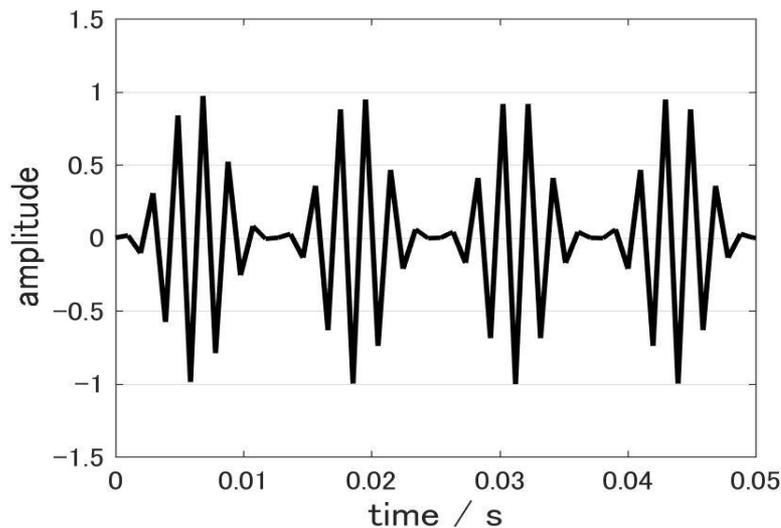
提案



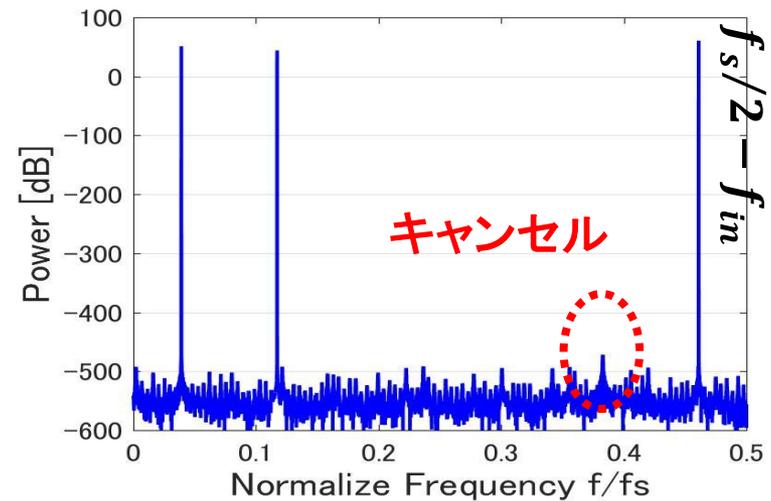
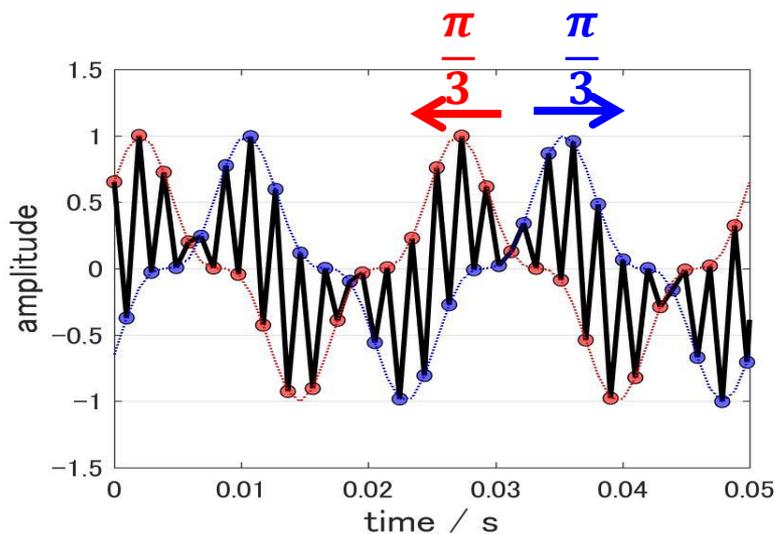
# シングルトーン 3次高調波

$$f_{in}/f_s = 51/1024, f'_{in} = 461$$

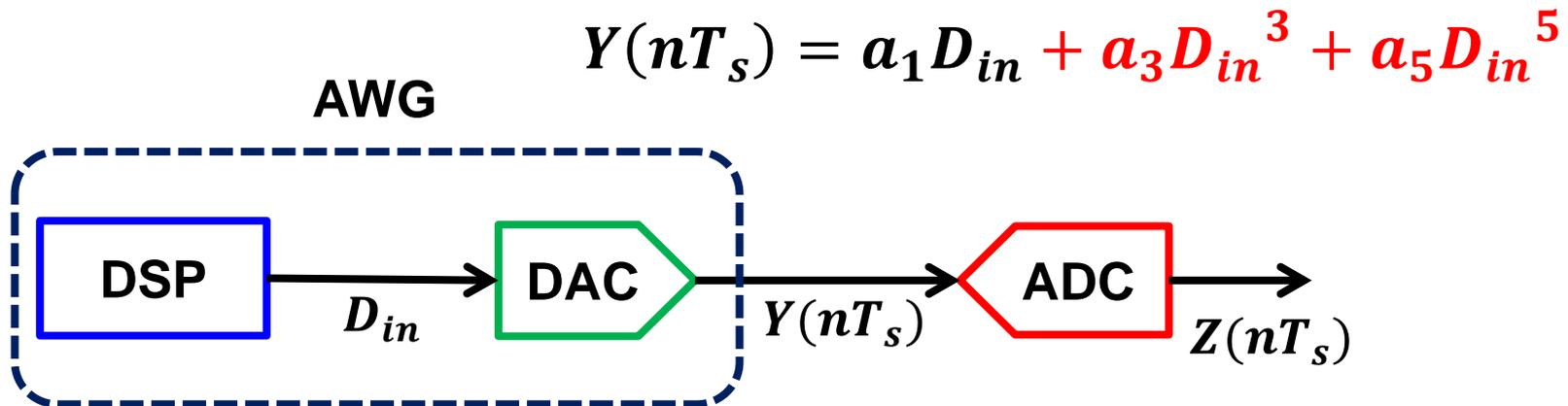
従来



提案



# シングルトーン 3次, 5次高調波



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f'_{in} nT_s)$$

提案

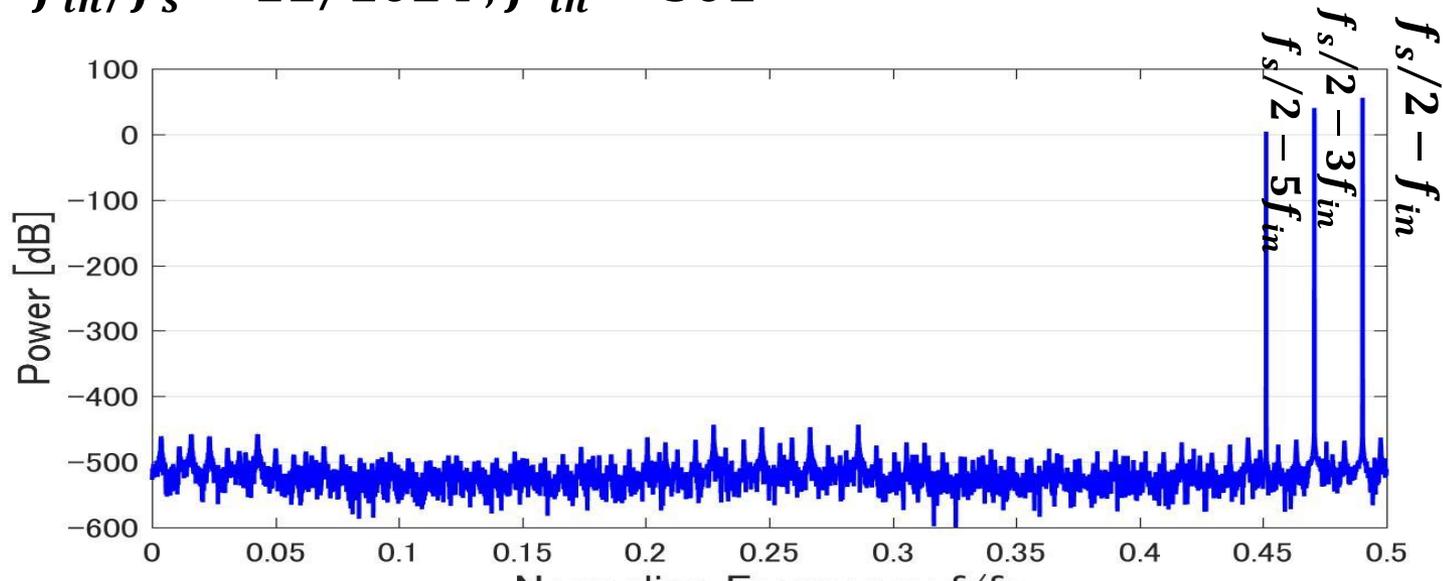
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 1 \\ X_2 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_a - \varphi_b) & n = 4k + 2 \\ X_3 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \varphi_a + \varphi_b) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

$$\varphi_a = \frac{\pi}{6}, \varphi_b = \frac{\pi}{5}$$

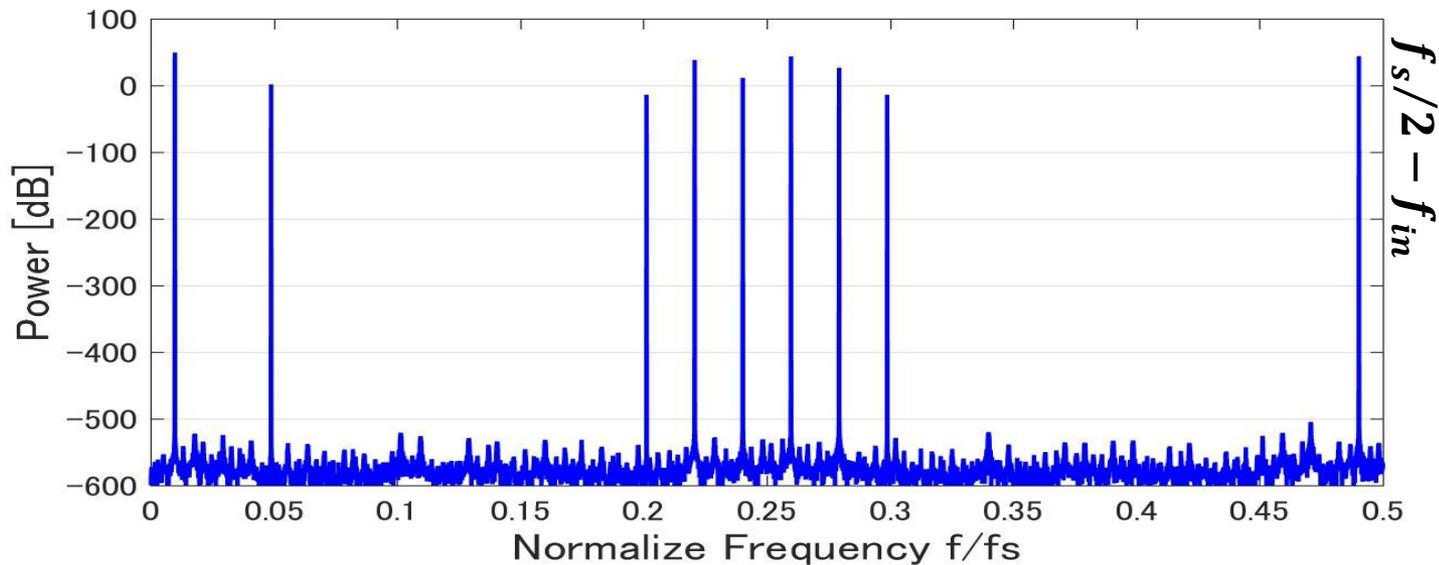
# シングルトーン 3次, 5次高調波

$$f_{in}/f_s = 11/1024, f'_{in} = 501$$

従来



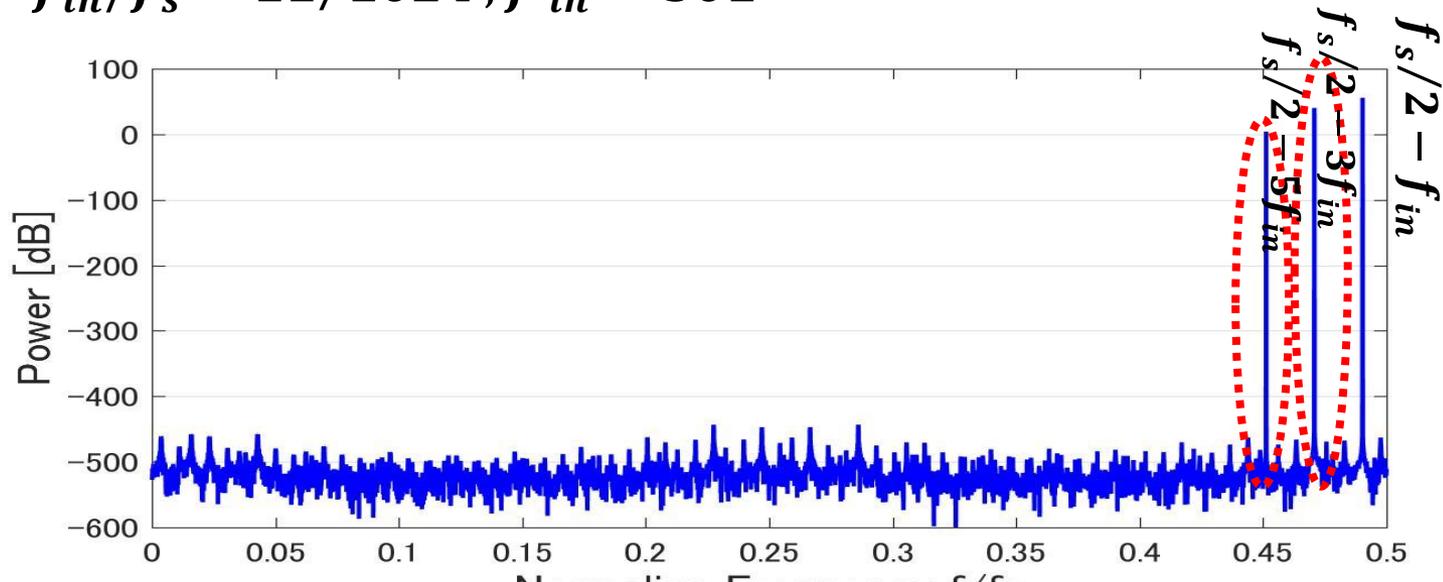
提案



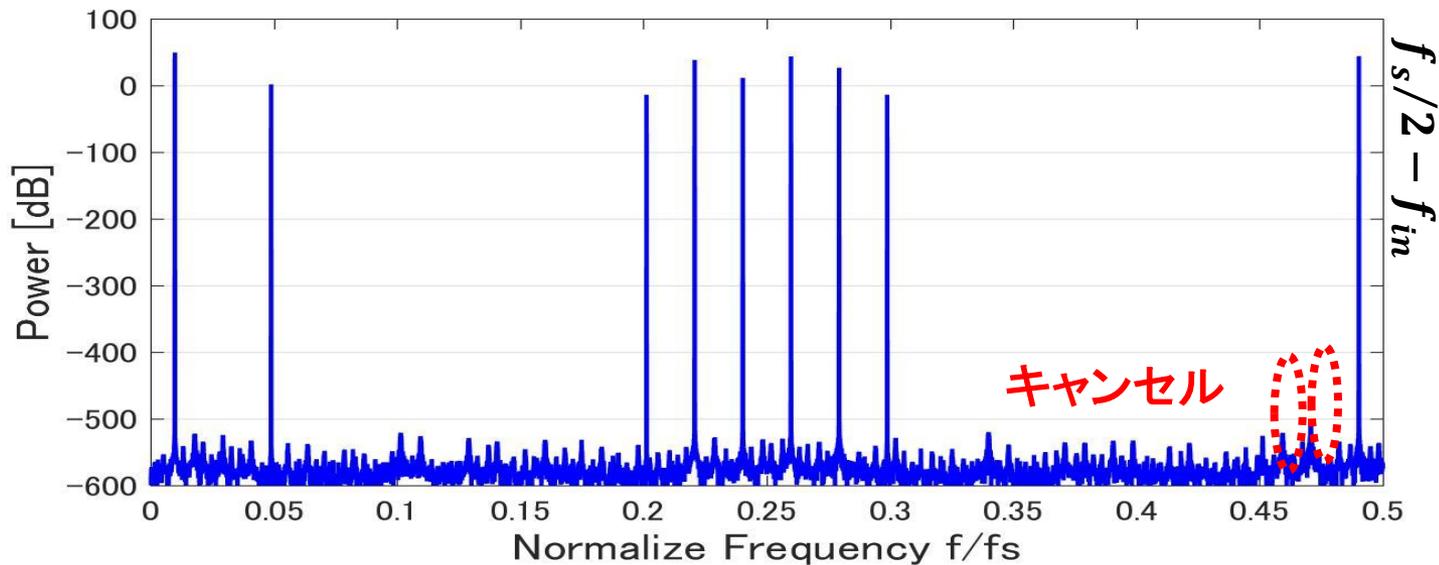
# シングルトーン 3次, 5次高調波

$$f_{in}/f_s = 11/1024, f'_{in} = 501$$

従来

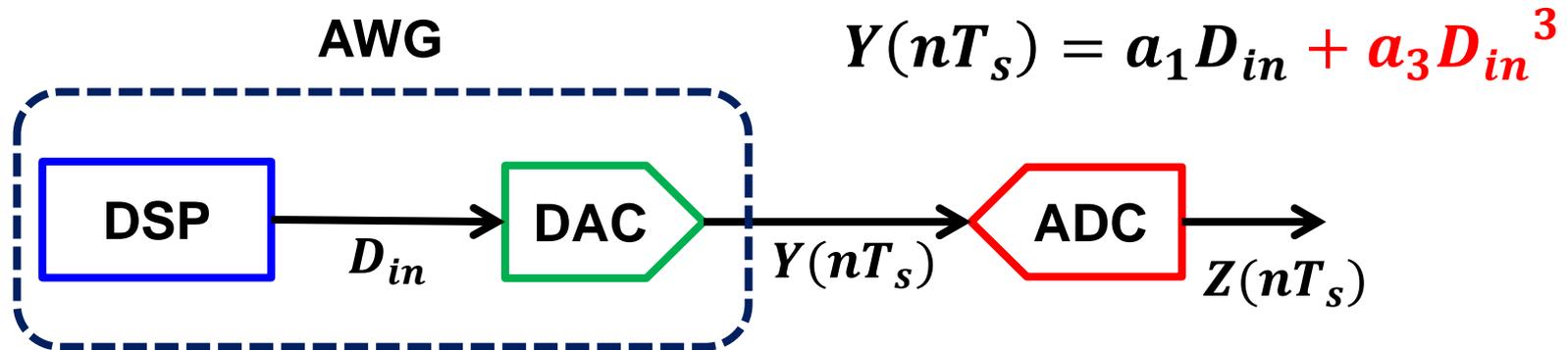


提案



## 2トーン

## 3次高調波



従来

$$D_{in} = A \sin(2\pi f'_1 nT_s) + B \sin(2\pi f'_2 nT_s)$$

提案

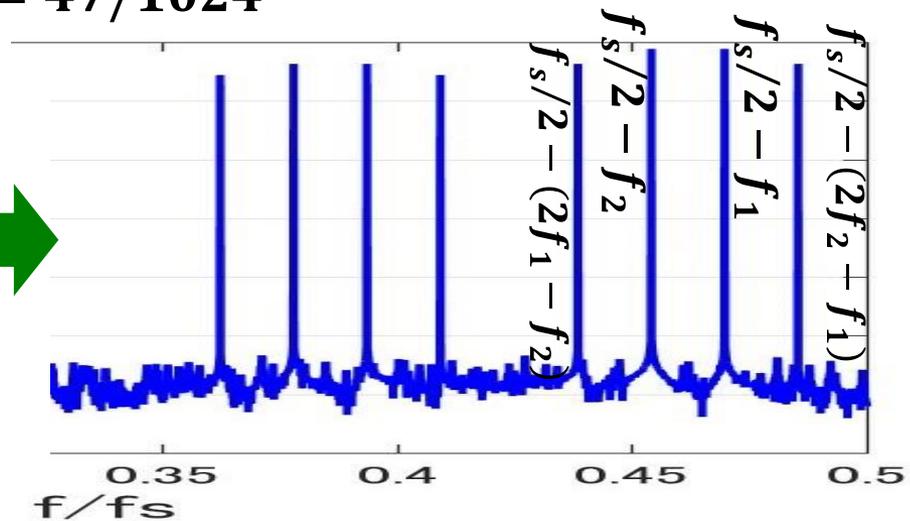
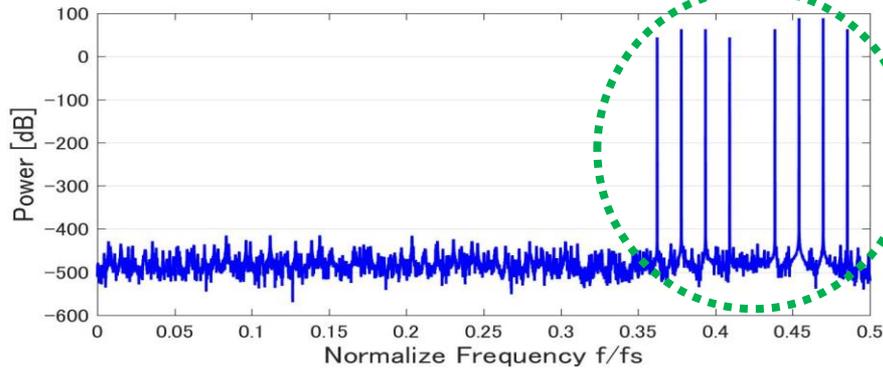
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_0) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_0) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_0) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_0) & n: \text{odd} \end{cases}$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{3} \quad f_1/f_s = 31/1024, \quad f_2/f_s = 47/1024$$

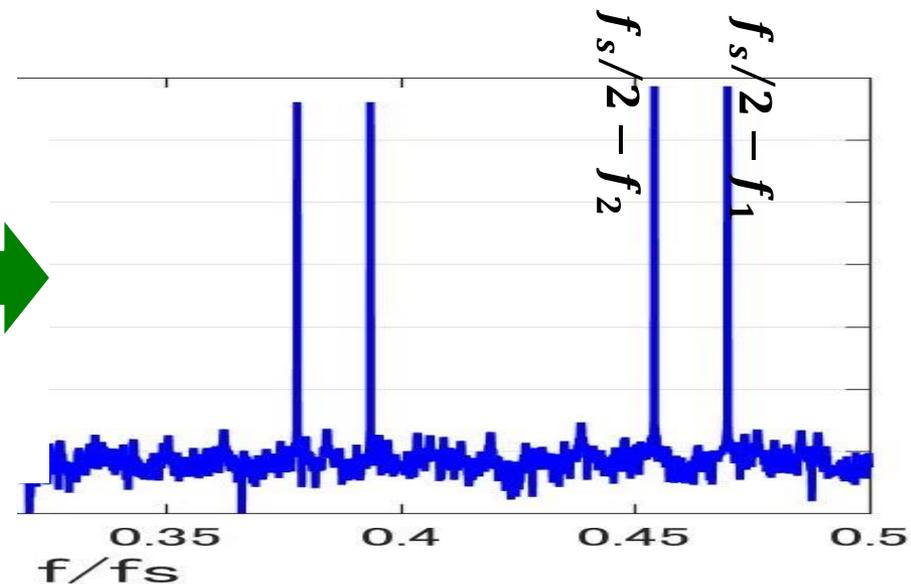
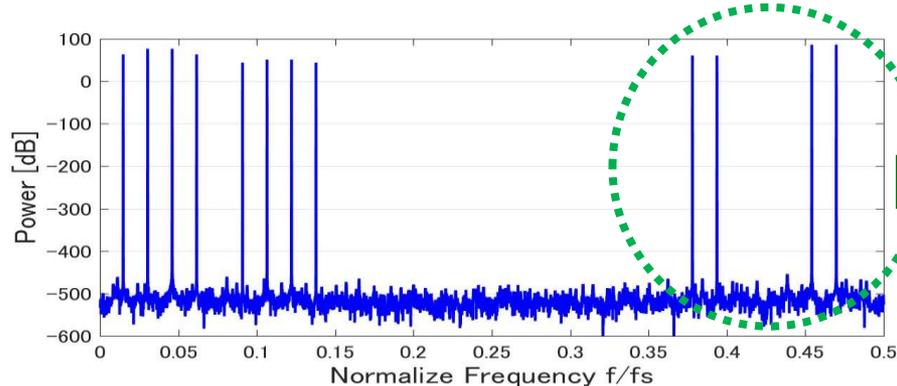
# 2トーン 3次高調波

$$f_1/f_s = 31/1024, \quad f_2/f_s = 47/1024$$

従来



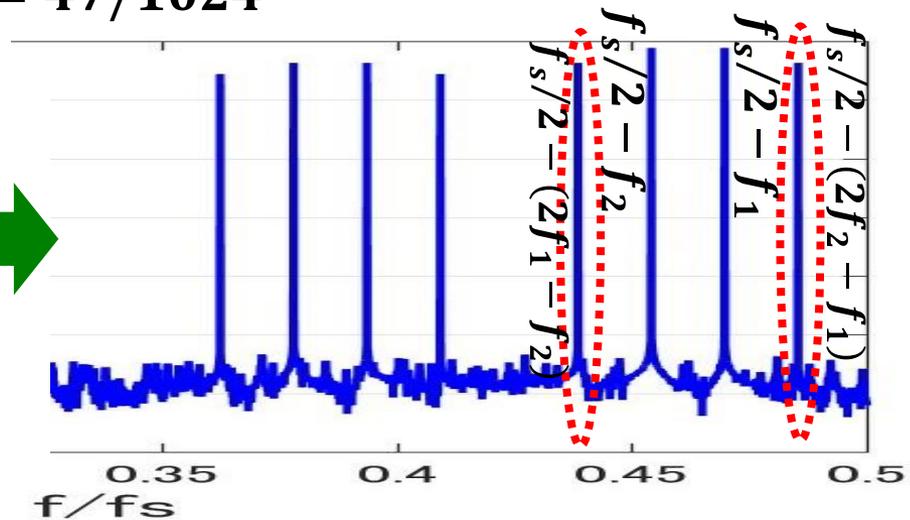
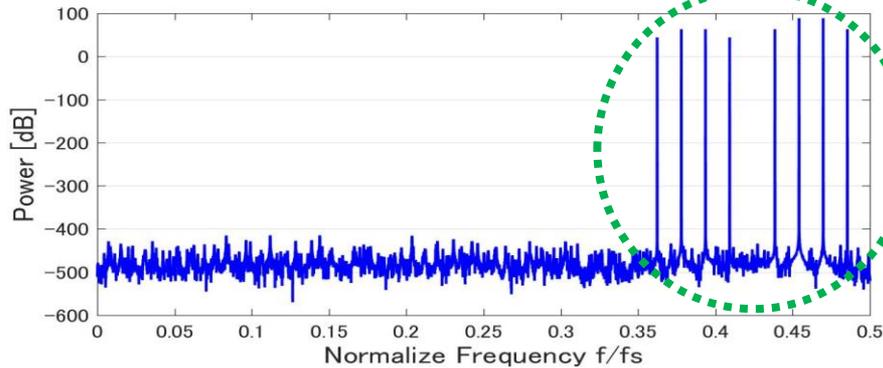
提案



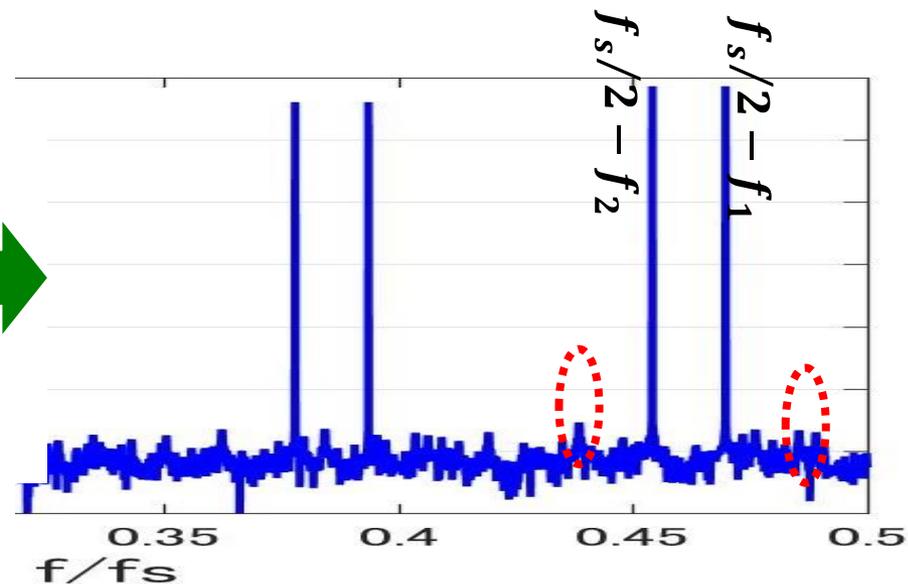
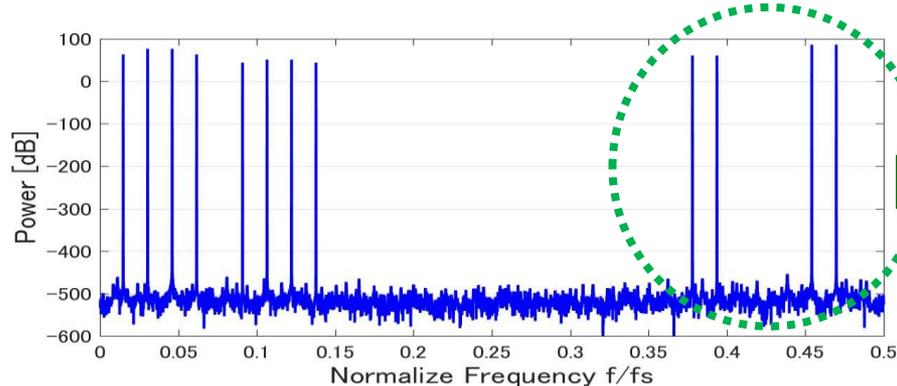
# 2トーン 3次高調波

$$f_1/f_s = 31/1024, \quad f_2/f_s = 47/1024$$

従来



提案



# 内容

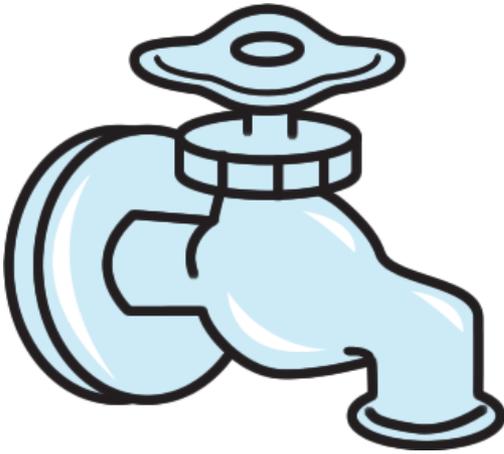
---

- 研究背景
- 提案アルゴリズム
- シミュレーション
  - 低周波信号
  - 高周波信号
- まとめ

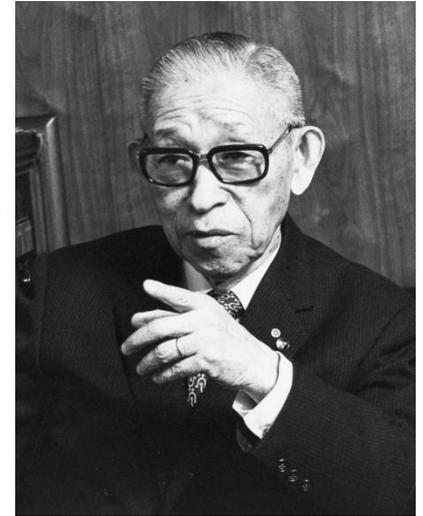
# まとめ

- 低歪み信号生成アルゴリズムを提案
- 高周波領域へ拡大
  - 3次5次同時消し
  - 2トーン信号への適用
- ADCの高品質テスト環境の構築
- 実機実験

# 集積回路が低コスト化技術で広く普及



## 水道哲学

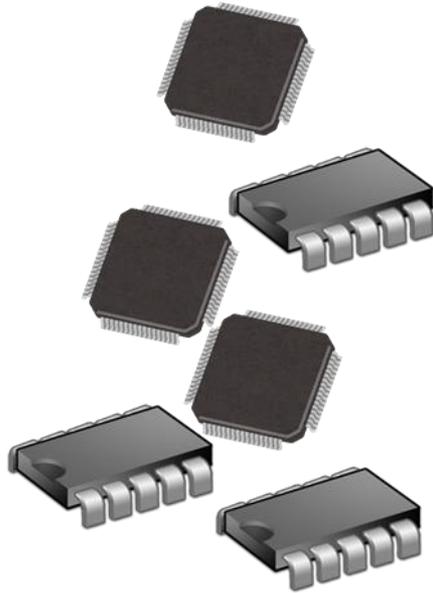


松下幸之助

水道水のように  
低価格・良質なものを大量供給



物価を低廉、消費者に容易に行き渡らせる



# 集積回路テスト技術で付加価値を

「水道からはいくらでもただの水が出るのに  
みんなお金を出して  
ミネラルウォーターを買っているじゃないか」



Steve Jobs

**価値**



# 質疑応答

Q1. AWGのDACの出力を期待値とする？ADCの結果を議論すれば？

Q2. DSPのサンプリング周波数は実際1024Hzですか？

オーディオ領域に応用することもできそう。

A2. シミュレーション上で1024Hzと設定しているだけ

Q3. DSPで変な信号(インターリーブ)を出すと結果的にきれいなsin波が出るという認識でよろしいか。キャンセルしすぎることはないか？

A3. 目的の高調波だけキャンセルされる

Q4. 5次高調波には3次成分も含まれるが、3次抑制アルゴリズムでキャンセルすることはできるか(3次5次高調波の3次だけ消すこと)

A4. 理論上は可能

Q5. ローパスフィルタを通せばsinが取り出せるという話だが、スペクトル図だけでsin波を読み取るというのは知識が相当ある人じゃないと分からない。

MATLABを使っているのならば、フィルタも含めてシミュレーションして、きれいなsin波を示してみてもいい。

## 質疑応答

Q6. 高周波、低周波のターゲットはどの程度なのか？

レンジで結構精度が変わると思うんだが？

A6. 高周波、低周波はナイキスト周波数近辺、DC近辺を意味している

Q7. ADCとDACの前提が分からない。

Q8. 普通は3次高調波を消すときデジタルフィルタを使うが？

A8. 消したい周波数成分との周波数的な距離を長くしてフィルタをかけやすくしている。