

任意波形発生器を用いた 低歪み単一正弦波および2トーン信号生成技術

○柳田 朋則、澁谷 将平、浅見 幸司、小林 春夫
群馬大学理工学府

2017年1月21日(土)

第65回システムLSI合同ゼミ

@早稲田大学西早稲田キャンパス

研究目的

目的

- ・ADCテストに向けて低歪み信号を生成
- ・テストシステムの低コスト化・シンプル化

アプローチ

- ・AWGのプログラム変更だけで実現
- ・位相切り替え信号(Phase-Switching Method)

内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- 高周波低歪み信号生成
- 複数歪み成分の抑制
- 低歪み2トーン信号生成
- まとめ

内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- 高周波低歪み信号生成
- 複数歪み成分の抑制
- 低歪み2トーン信号生成
- まとめ

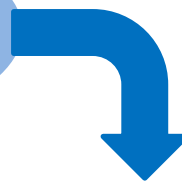
研究背景

微細化

大規模化

チップ価格

低下

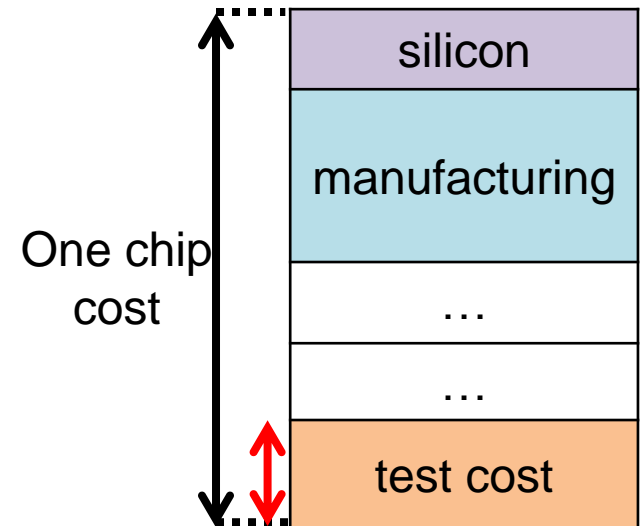
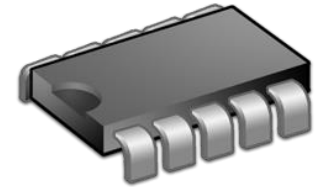
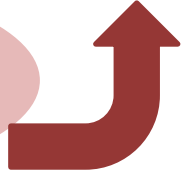


高速化

大規模化

テストコスト

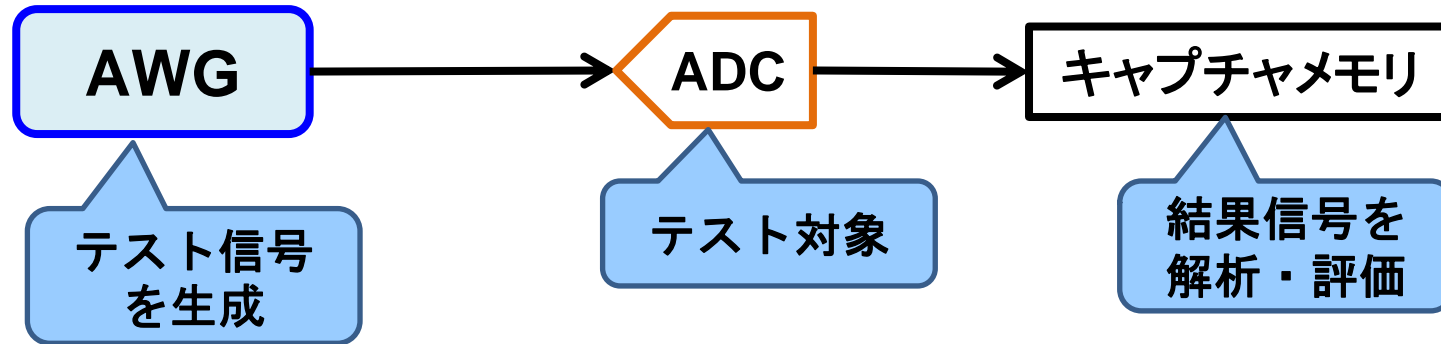
上昇



テストコスト削減が必要

ADCテストシステム

ADCの線形性テスト

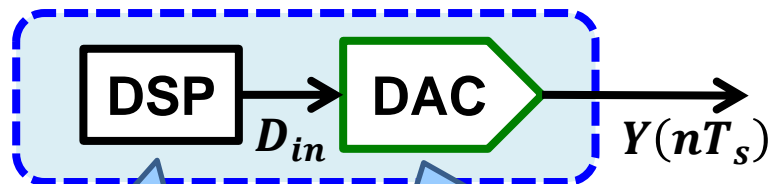


ADC

Analog to Digital Converter 「アナログ/デジタル変換器」

AWG

Arbitrary Waveform Generator 「任意波形発生器」



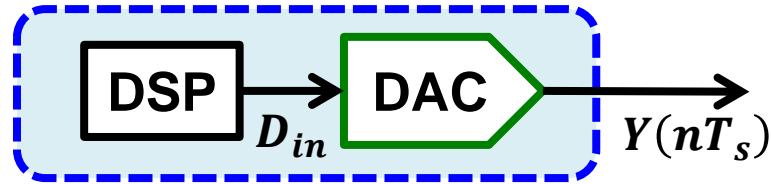
DSP : Digital Signal Processor

DAC : Digital to Analog Converter

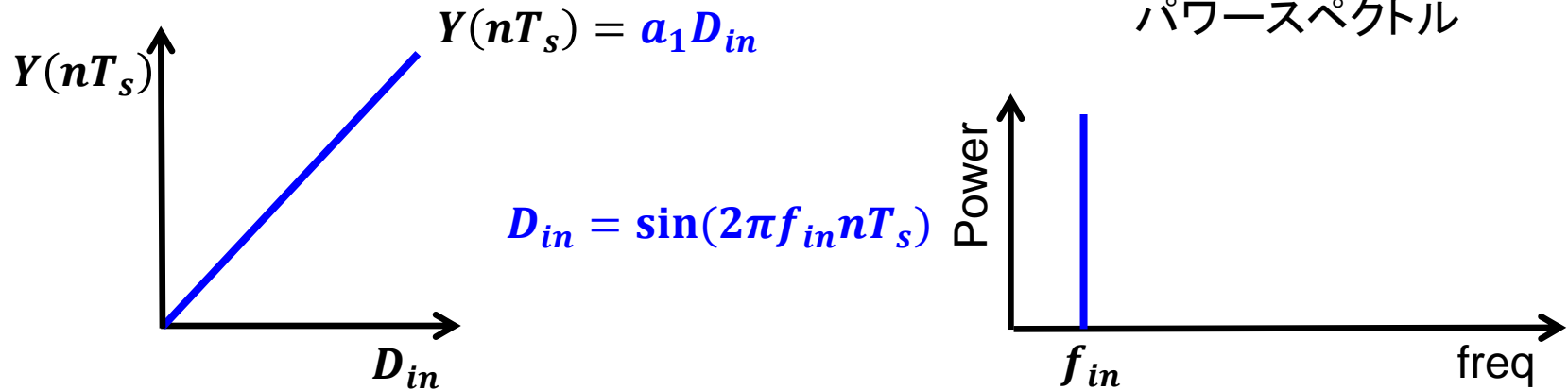
信号パターン
生成

デジタル→アナログ変換

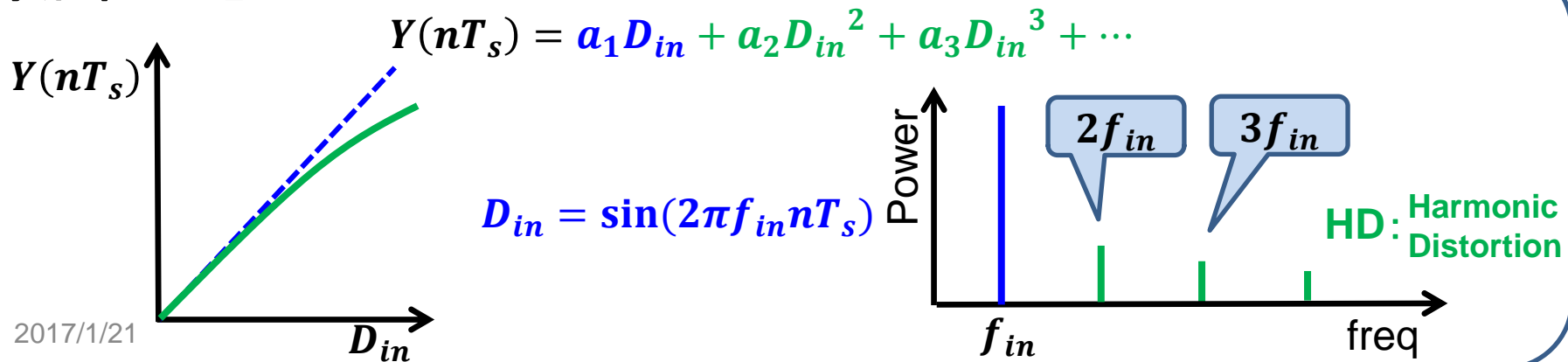
線形性の善し悪し



・線形性が良い

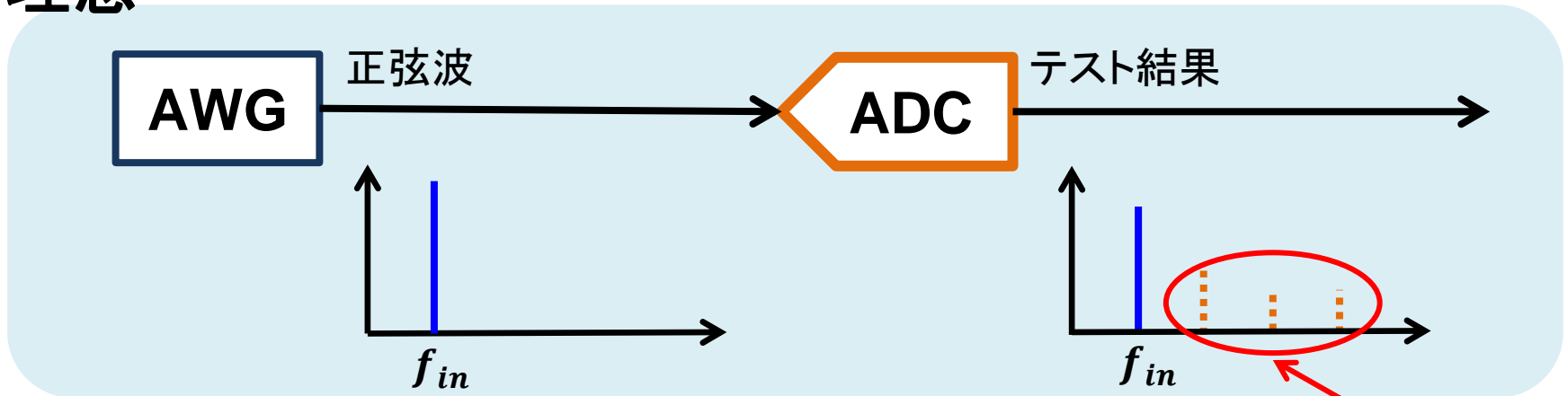


・線形性が悪い

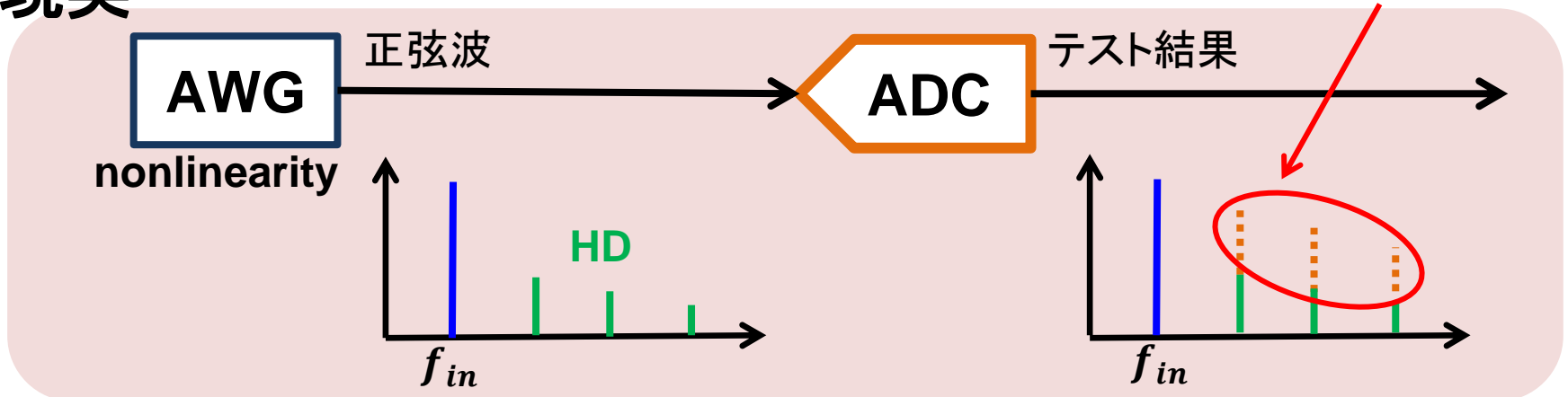


理想と現実

理想



現実



評価したい量

HD: Harmonic Distortion

AWGの高調波除去

・従来手法

- ・急峻なアナログLPFで高調波除去

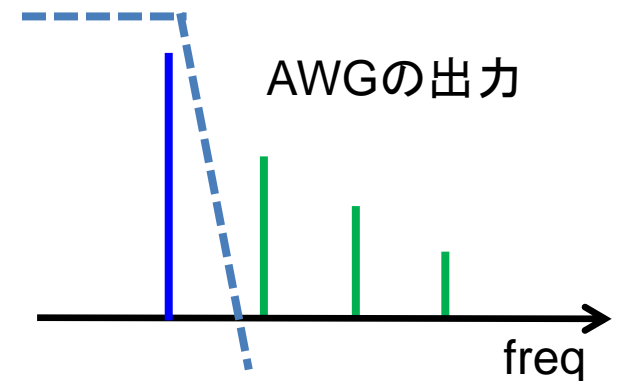


- ・素子感度が高い
- ・SNRが悪化

・プレディストーション



- ・AWGシステム同定が必要

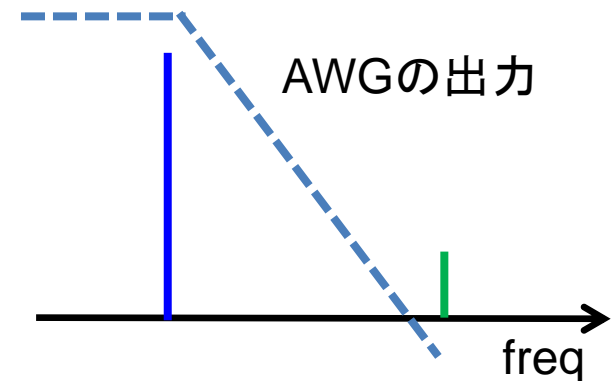


・提案手法

- DSPプログラムの変更だけで高調波除去



- ・シンプルなLPF
- ・システム同定不要
- ・すぐに産業導入できる



内容

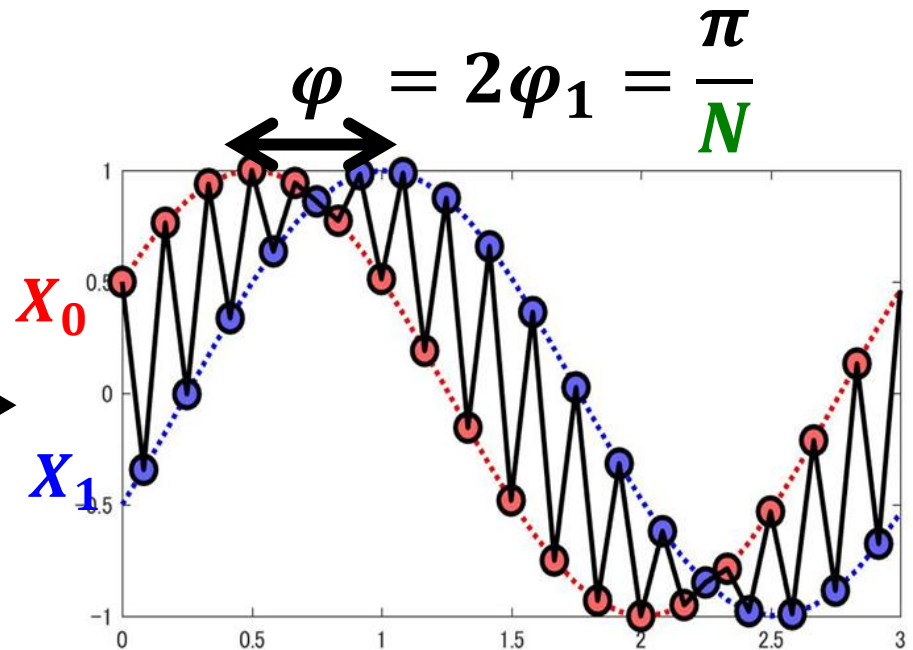
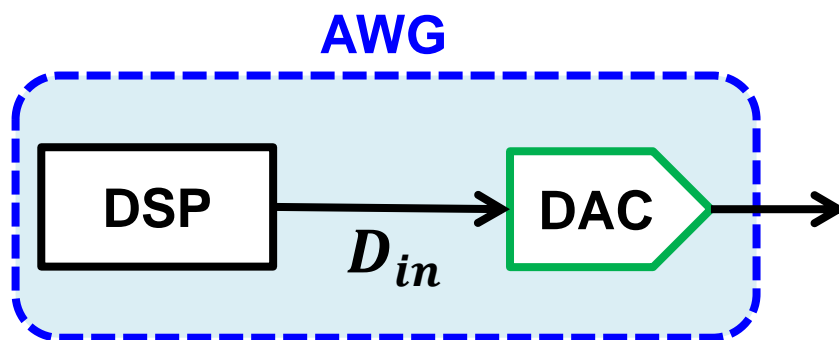
- 研究背景
- **位相切り替え信号**
- 高周波低歪み信号生成
- 複数歪み成分の抑制
- 低歪み2トーン信号生成
- まとめ

位相切り替え信号

位相切り替えアルゴリズム

step 1. 位相を φ ずらす
step 2. 交互にとる

N 次歪みを
除去できる φ



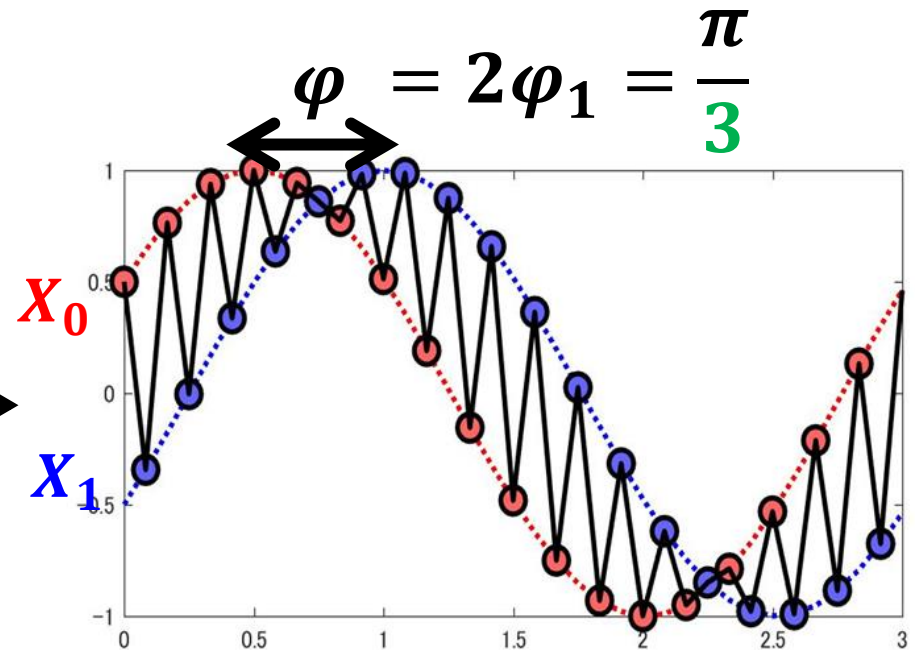
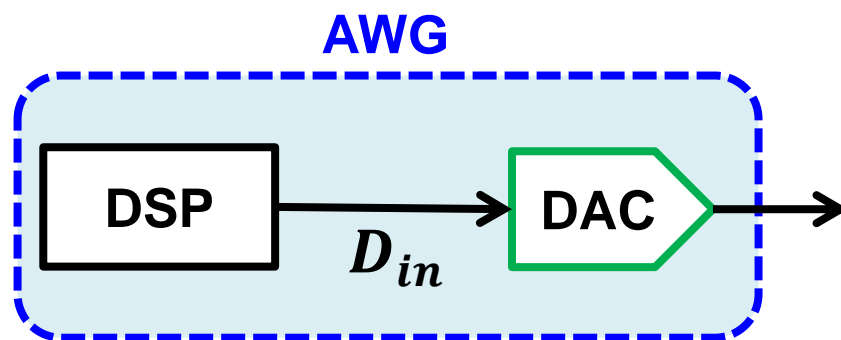
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_1) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \varphi_1) & n: \text{odd} \end{cases}$$

位相切り替え信号

位相切り替えアルゴリズム

step 1. 位相を φ ずらす
step 2. 交互にとる

N 次歪みを
除去できる φ



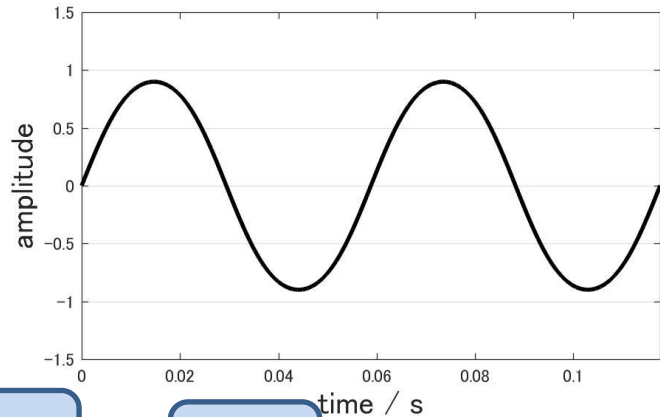
$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \pi/6) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \pi/6) & n: \text{odd} \end{cases}$$

我々の先行研究

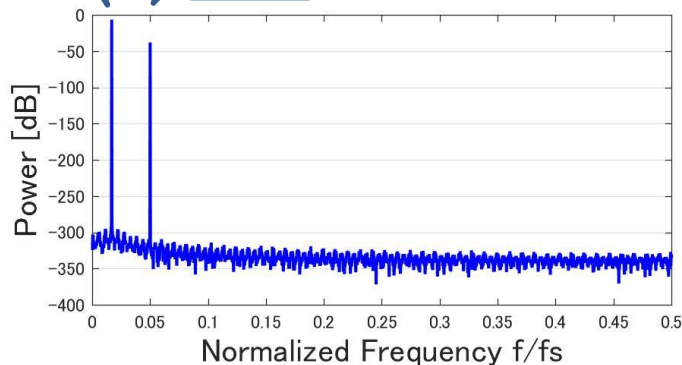
・1トーン低周波信号の3次歪みの消去

・従来信号

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


 f_{in}

HD3

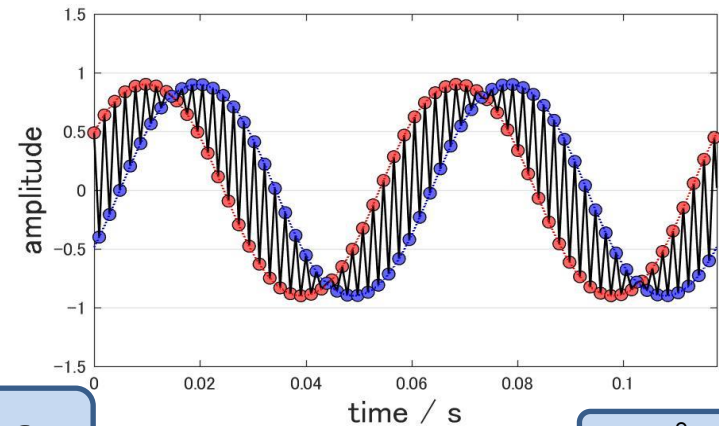


2017/1/21

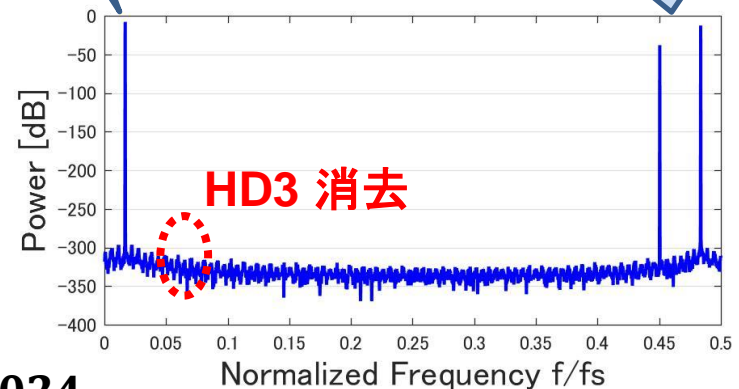
$$f_{in}/f_s = 17/1024$$

・位相差切り替え信号

$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \pi/6) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \pi/6) & n: \text{odd} \end{cases}$$

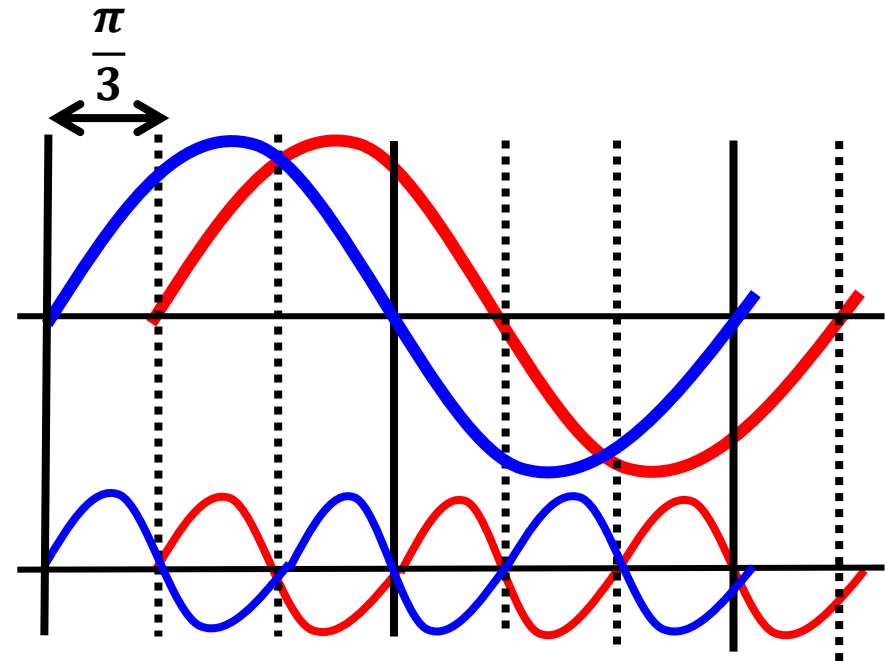
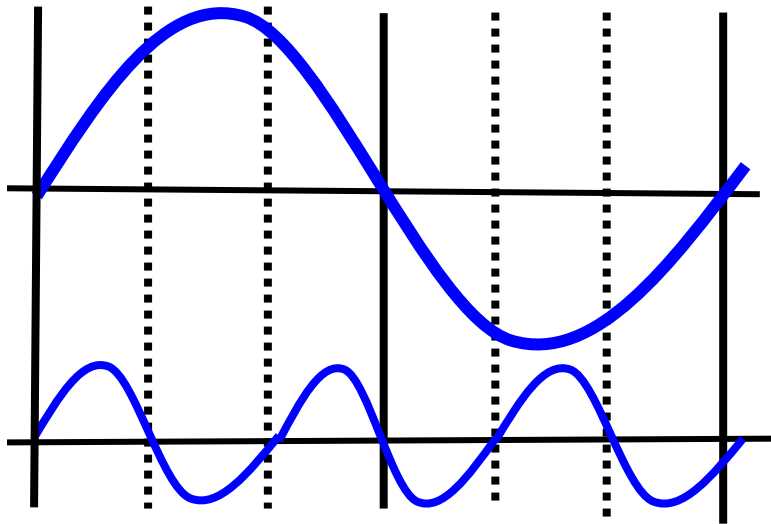

 f_{in}

スプリアス



位相切り替え信号

3次歪みの場合



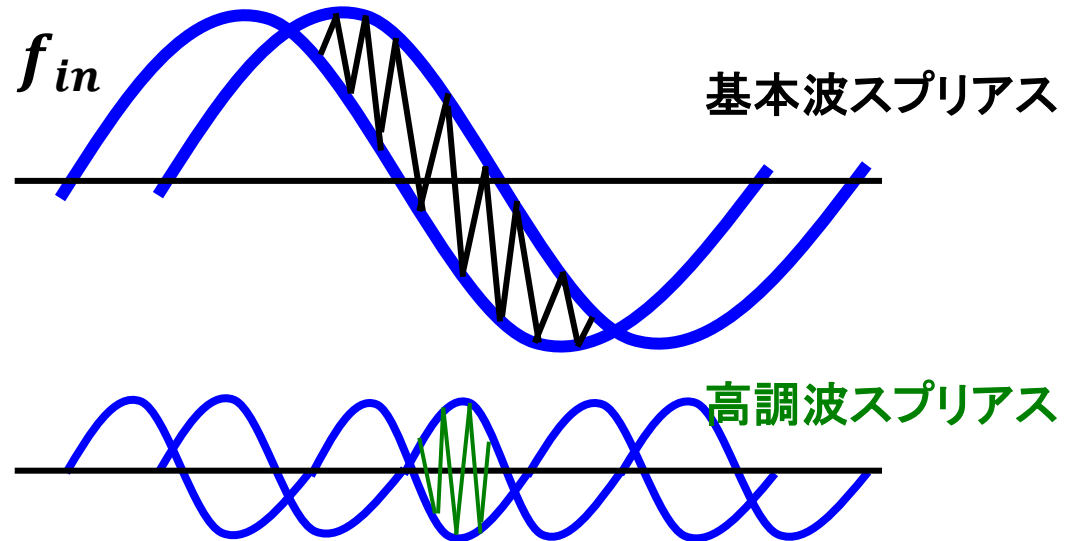
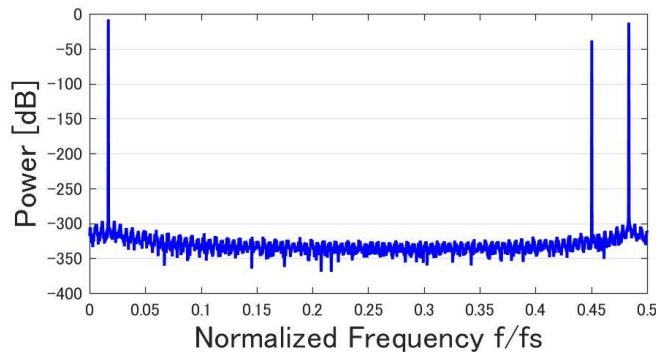
高調波成分が逆相

内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- **高周波低歪み信号生成**
- 複数歪み成分の抑制
- 低歪み2トーン信号生成
- まとめ

高周波低歪み信号生成

スプリアスの生成



位相差があるとスプリアスが生まれる



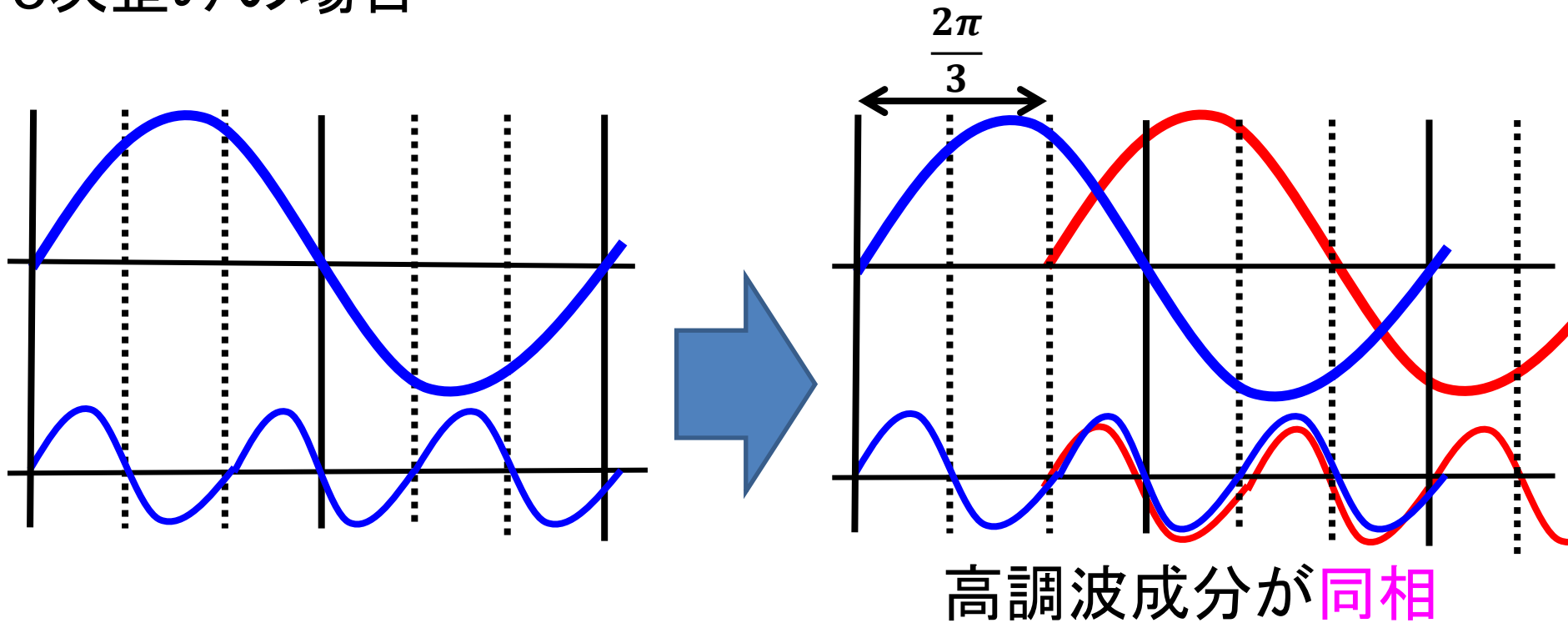
高調波スプリアスを消したい



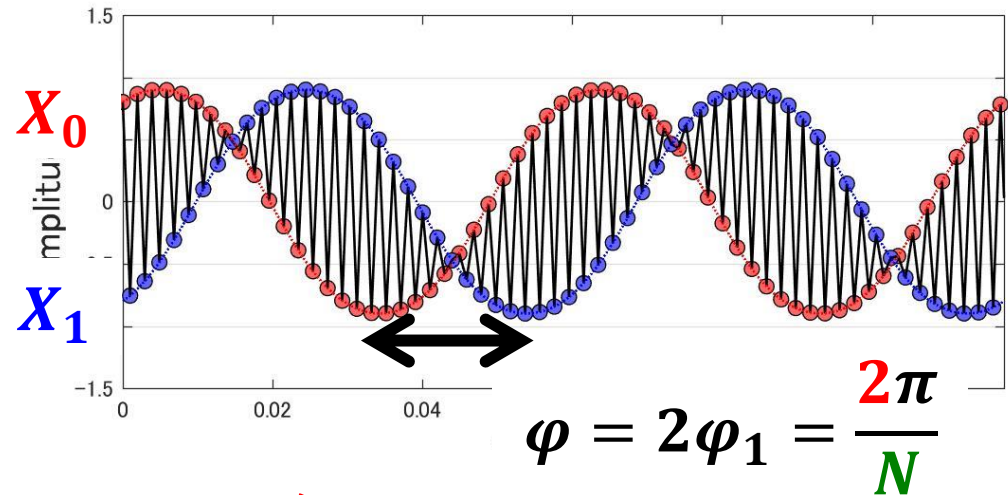
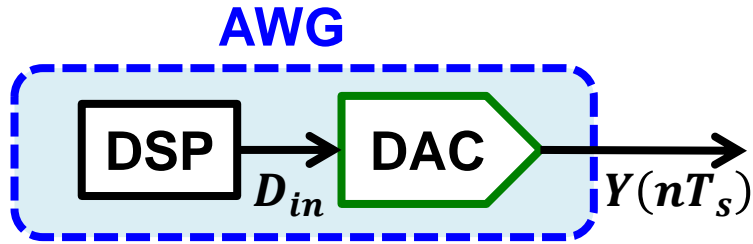
高調波を同相にする

高周波低歪み信号生成

3次歪みの場合

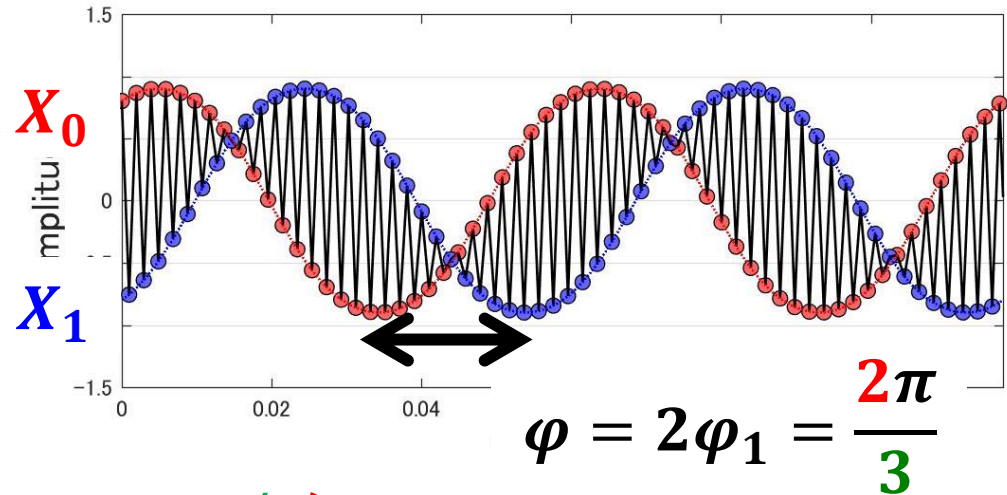
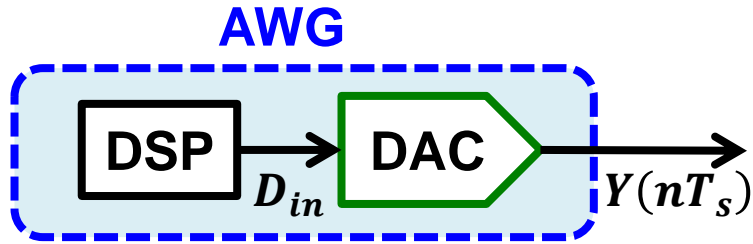


高周波低歪み信号生成



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

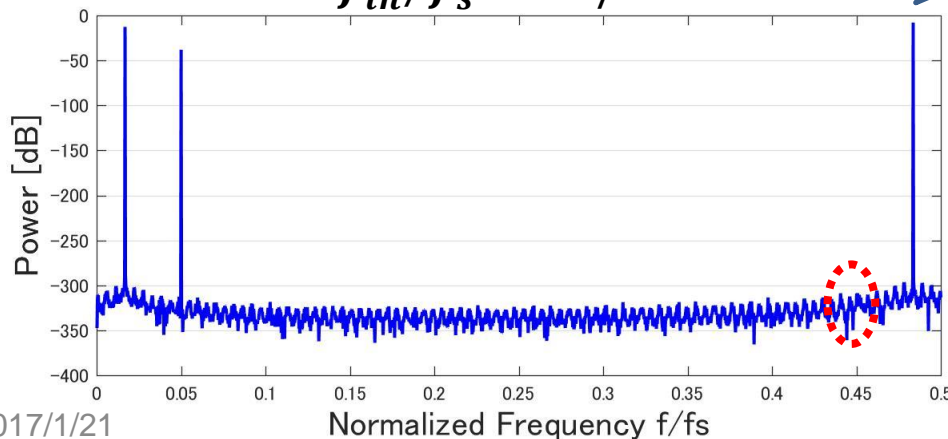
高周波低歪み信号生成



$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s + \pi/3) & n: \text{even} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} nT_s - \pi/3) & n: \text{odd} \end{cases}$$

$$f_{in}/f_s = 17/1024$$

$f_s/2 - f_{in}$ → 信号として使う



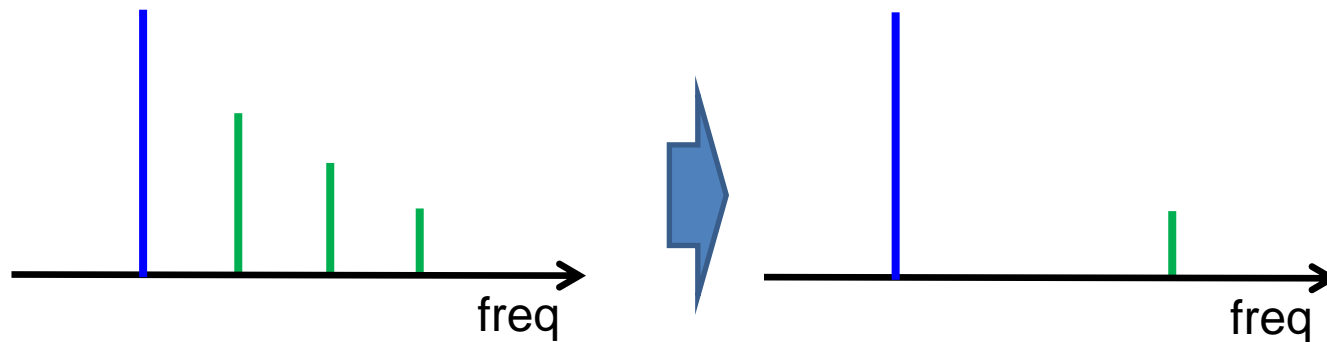
- f_{in} から低歪み $f_s/2 - f_{in}$ を生成
- HD3のイメージ消去
- 高周波 = $f_s/2$ に近い周波数

内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- 高周波低歪み信号生成
- **複数歪み成分の抑制**
- 低歪み2トーン信号生成
- まとめ

複数歪み成分の抑制

複数個の歪み成分を消したい

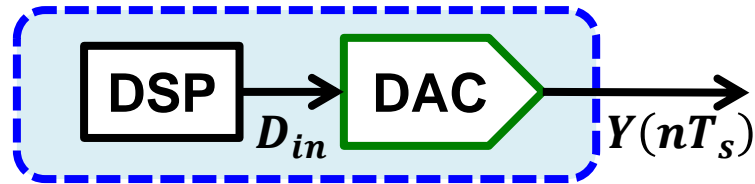


(例) 3次歪み、5次歪み同時消去

2相インターリーブのスイッチングでは不可能

➡ パラメータを増やす

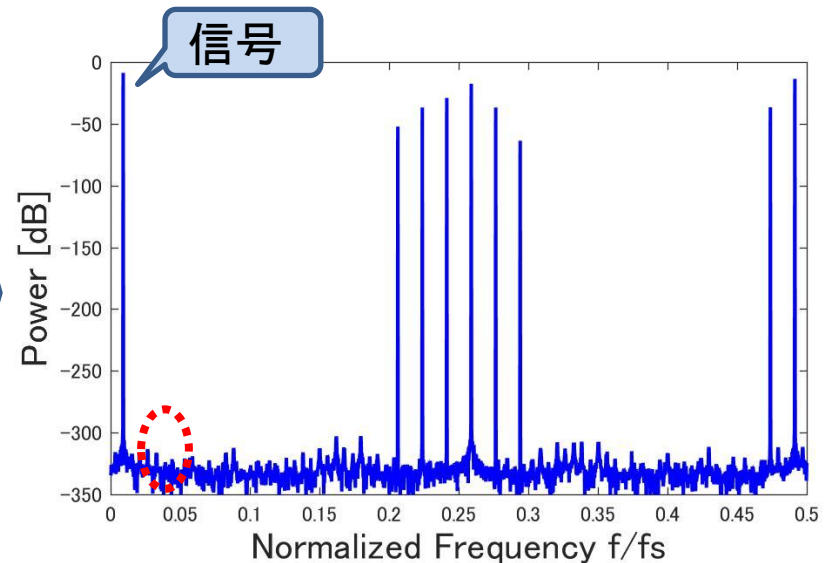
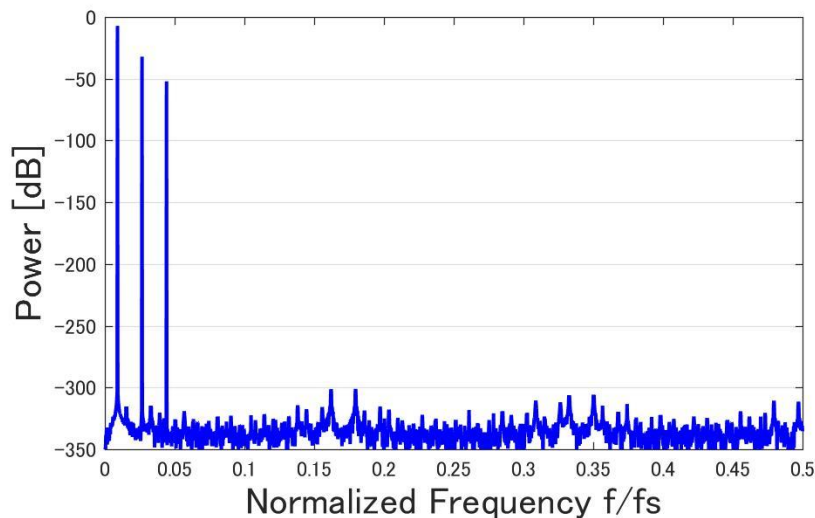
3次、5次高調波の同時消去



$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k \\ X_2 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 1 \\ X_3 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 2 \\ X_4 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2M}, \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2N}$$

M 次, N 次歪みの消去



2017/1/21

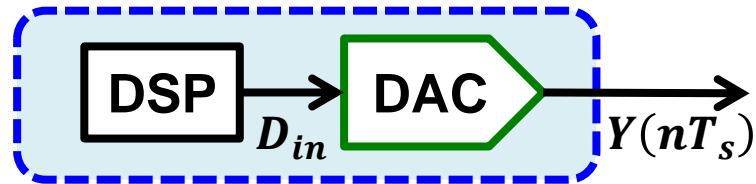
$$f_{in}/f_s = 17/1024$$

3次、5次高調波の同時消去

$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin \left(2\pi f_1 n T_s + \frac{4}{15} \pi \right) & n = 4k \\ X_2 = A \sin \left(2\pi f_1 n T_s + \frac{1}{15} \pi \right) & n = 4k + 1 \\ X_3 = A \sin \left(2\pi f_1 n T_s - \frac{1}{15} \pi \right) & n = 4k + 2 \\ X_4 = A \sin \left(2\pi f_1 n T_s - \frac{4}{15} \pi \right) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

The diagram illustrates the phase relationships between the four components. Red arrows labeled $\frac{\pi}{5}$ indicate phase shifts from the first and third components to the second and fourth. Blue arrows labeled $\frac{\pi}{3}$ indicate phase shifts from the second and fourth components to the first and third.

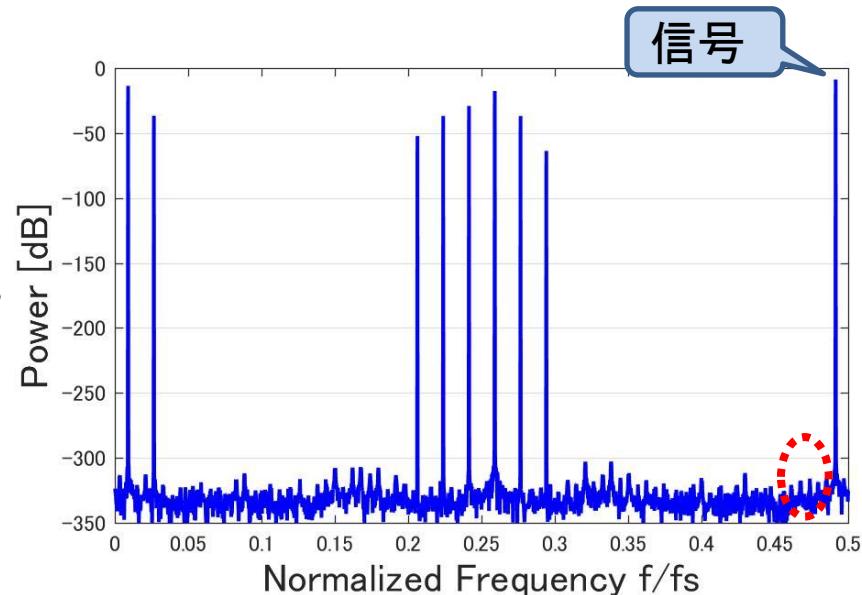
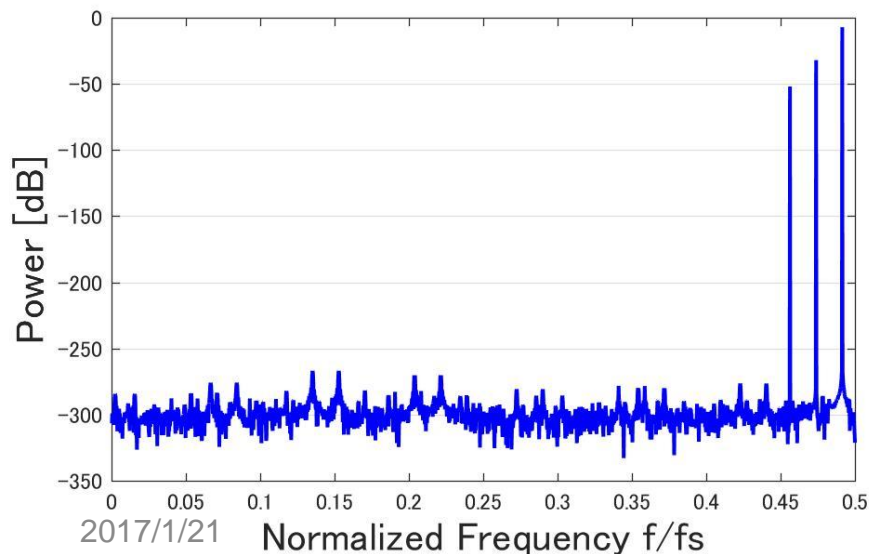
3次、5次高調波の同時消去



$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 1 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 2 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{M}, \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2N}$$

M 次, N 次歪みの消去



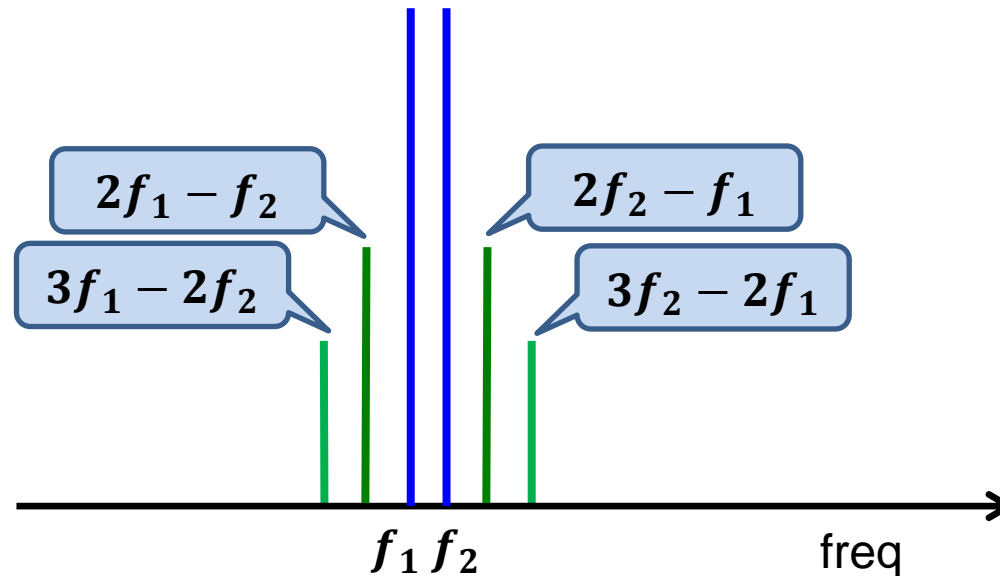
内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- 高周波低歪み信号生成
- 複数歪み成分の抑制
- **低歪み2トーン信号生成**
- まとめ

2トーン信号

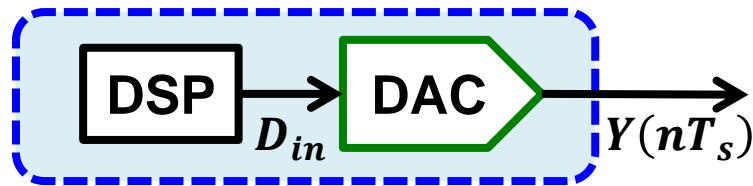
2トーン信号 $X = A \sin(2\pi f_1 nT_s) + B \sin(2\pi f_2 nT_s)$

・Inter Modulation Distortion (IMD) 相互変調歪み



- ・基本波の両側、かなり近傍
- ・高周波でも近傍に現れる

2トーン信号, 3次歪み消去

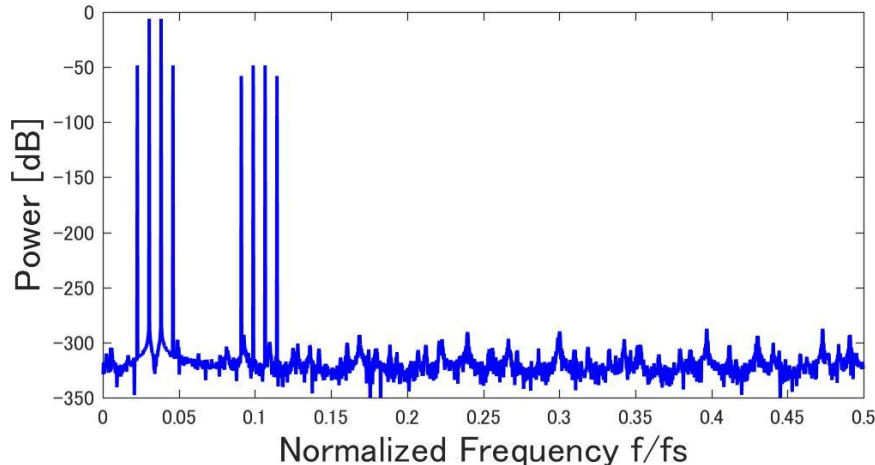


$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_1) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_1) & n: \text{奇数} \\ X_2 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_1) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_1) & n: \text{偶数} \end{cases}$$

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2N}$$

N次歪みの消去

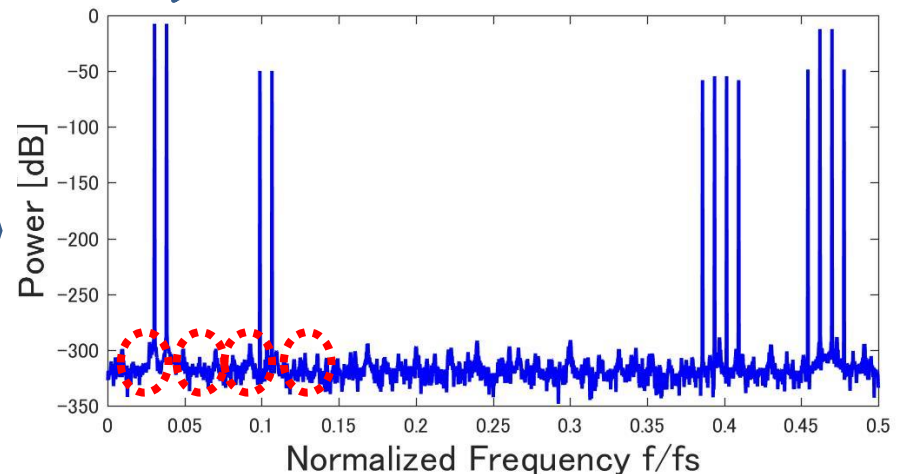
従来手法



2017/1/21

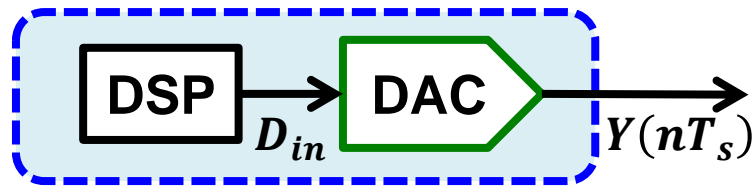
信号

提案手法



$$f_1/f_2/f_s = 31/39/1024$$

2トーン信号, 3次歪み消去

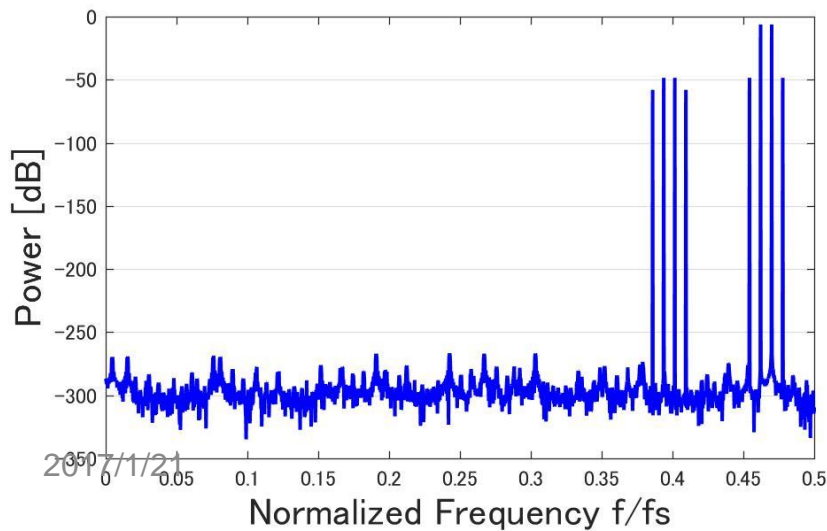


$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_1) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_1) & n: \text{奇数} \\ X_2 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_1) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_1) & n: \text{偶数} \end{cases}$$

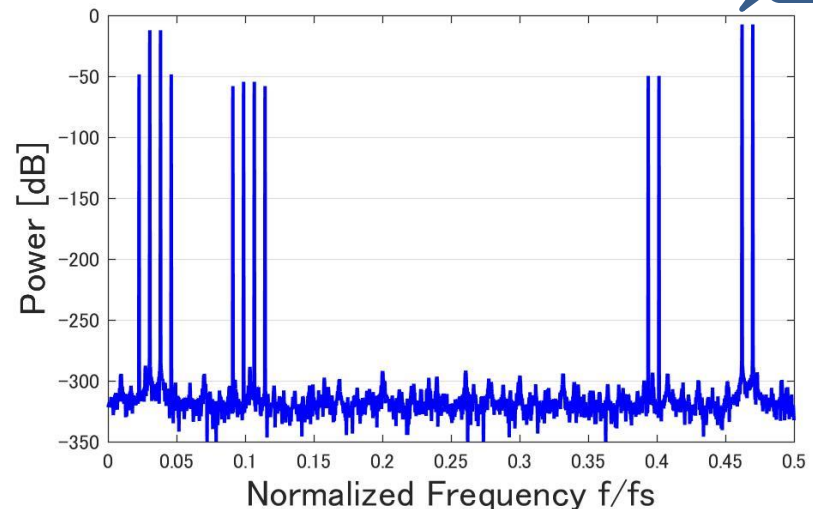
$$\varphi_1 = \frac{\pi}{N}$$

N 次歪みの消去

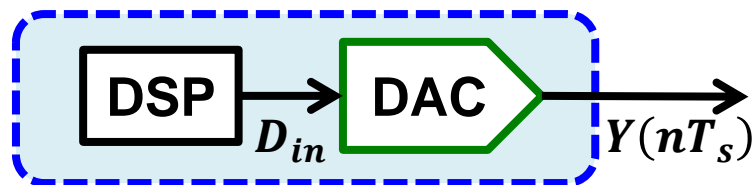
・従来手法



・提案手法



2トーン信号, 3次5次同時消去

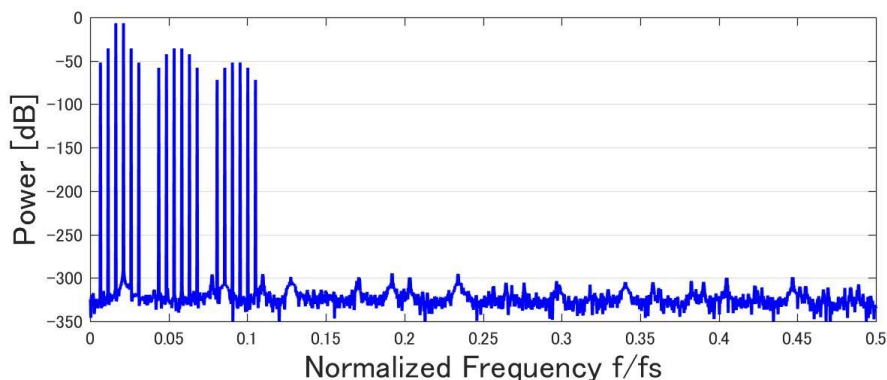


$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m + \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 n T_s - \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m + \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 n T_s + \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 1 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s + \varphi_m - \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 n T_s - \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 2 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 n T_s - \varphi_m - \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 n T_s + \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2M}, \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2N}$$

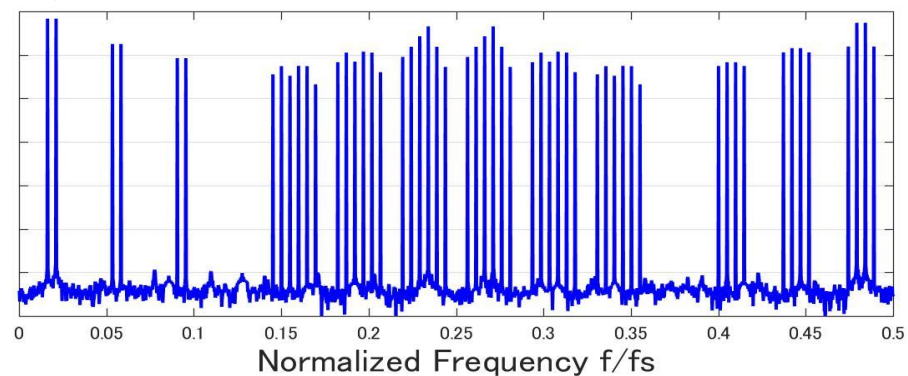
M次, N次歪みの消去

・従来手法

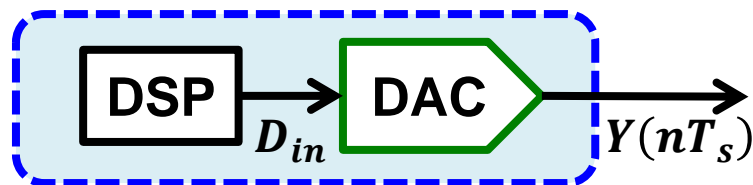


信号

・提案手法



2トーン信号, 3次5次同時消去

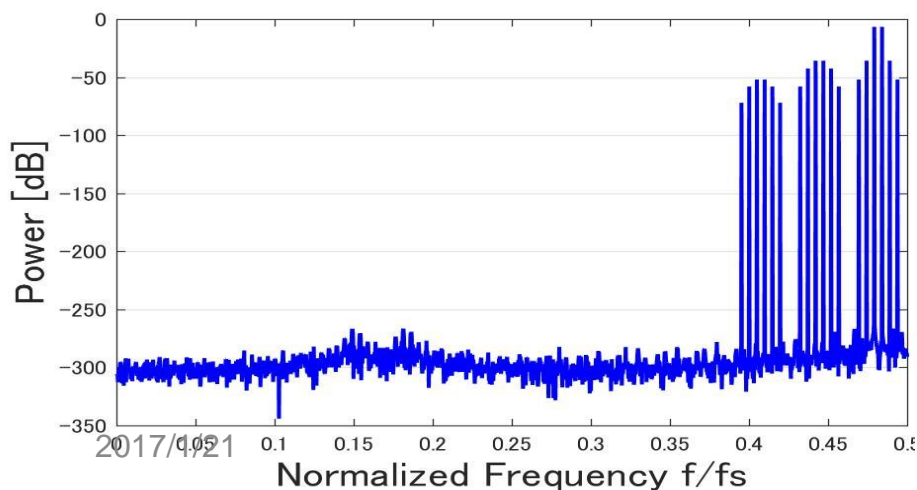


$$D_{in} = \begin{cases} X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_m + \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_m + \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_m - \varphi_n) & n = 4k + 1 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s + \varphi_m - \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 nT_s - \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 2 \\ X_1 = A \sin(2\pi f_1 nT_s - \varphi_m - \varphi_n) + B \sin(2\pi f_2 nT_s + \varphi_m + \varphi_n) & n = 4k + 3 \end{cases}$$

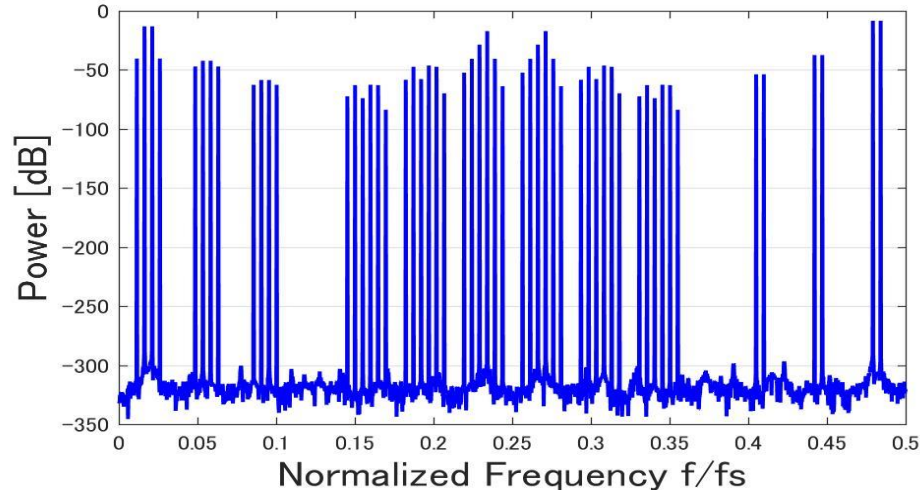
$$\varphi_m = \frac{\pi}{M}, \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2N}$$

M 次, N 次歪みの消去

従来手法



提案手法



内容

- 研究背景
- 位相切り替え信号
- 高周波低歪み信号生成
- 複数歪み成分の抑制
- 低歪み2トーン信号生成
- **まとめ**

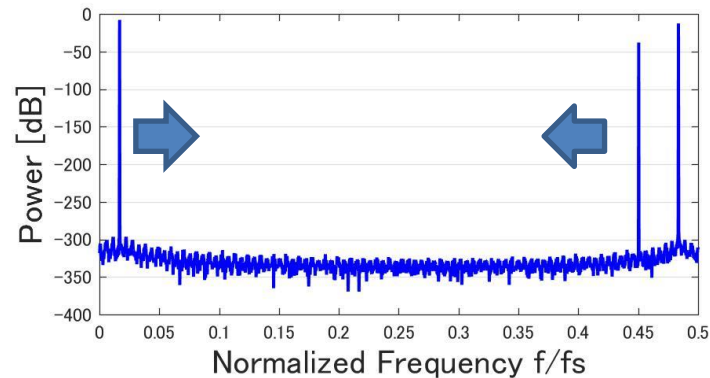
まとめ

- ADCテストに向けた低歪み信号生成
- 低周波信号から低歪み高周波信号を生成
- 複数の歪み成分消去
- 2トーン信号の相互変調歪みを消去

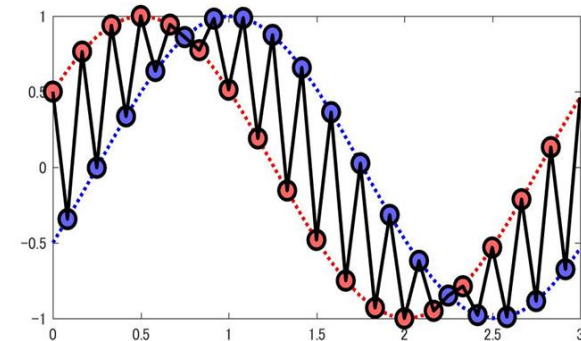
- AWGの非線形同定は必要ない
- DSPのプログラムを変更するだけ
- シンプルなLPFで構成できる

今後の課題

- 適用周波数範囲を決める

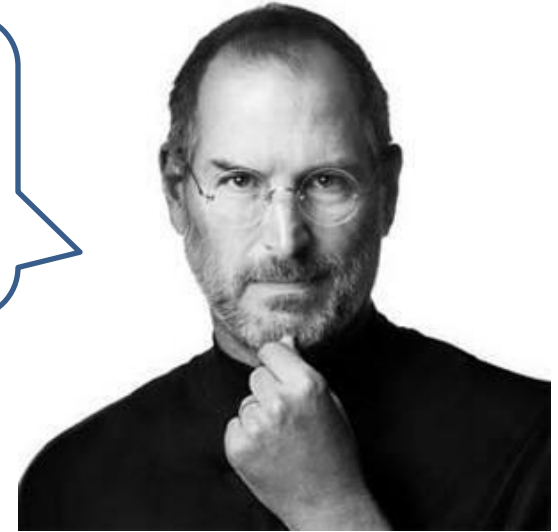


- 実機実験
- 高周波の場合のスループレート制限の考慮



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

安全



信頼

高品質

質疑

Q. テストコストとはどのようなものがあるか

A. AWGは高価。最新のAWGを買わず、既存のAWGでも適用できる。

Q. 時間的なコストは

A. 非線形同定や急峻フィルタを作るより簡単。

Q. 歪み成分の位相はちゃんと $\pi/3$ ずれるのか。ギザギザ自体が歪まないか？

A. 点ごとに歪みが出るから、 $\pi/3$ ずれる。

Q. DSPの前提は？DSPのジッタなどの考慮は？

A. DSPはデジタル。理想的に考えている。

Q. 2種類の歪みを消すとき、どのような波形になっている？

A. (図を使って4相インターリーブの説明)

Q. どのような発想から研究を行ったか明確に説明して欲しかった。

A. 高調波だけを逆相→高調波だけが消える から

質疑

Q. 最初から歪みの無い信号を作る手間と比べて、あまり変わらないのでは
A. 非線形同定が必要。大量生産(大量のAWG)に対しても提案手法は有効。

Q. 安いAWGというより安いDACで線形性が悪くても低歪み信号が得られる
認識でよい？
A. その通りです。

その後のポスターセッションでも活発に質問、ご意見をいただいた。