

AWGを用いた 低歪み高周波信号生成アルゴリズム

群馬大学

澁谷 将平* 小林 佑太郎

安部 文隆 小林 春夫

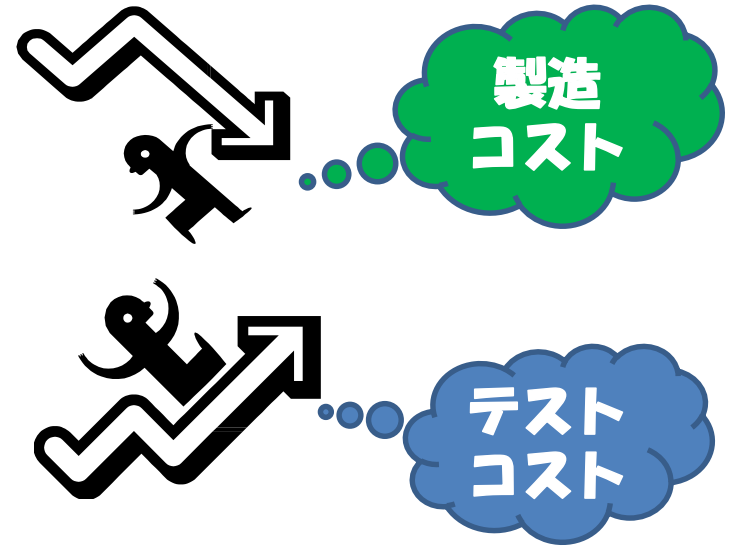
- **研究背景と研究目的**
- **AWGを用いた低歪み信号の発生**
- **位相差切り替え法の高周波信号生成**
- **理論解析**
- **まとめ**

- **研究背景と研究目的**
- AWGを用いた低歪み信号の発生
- 位相差切り替え法の高周波信号生成
- 理論解析
- まとめ

半導体産業において...

- 製造コスト → 減少
- テストコスト → 増大

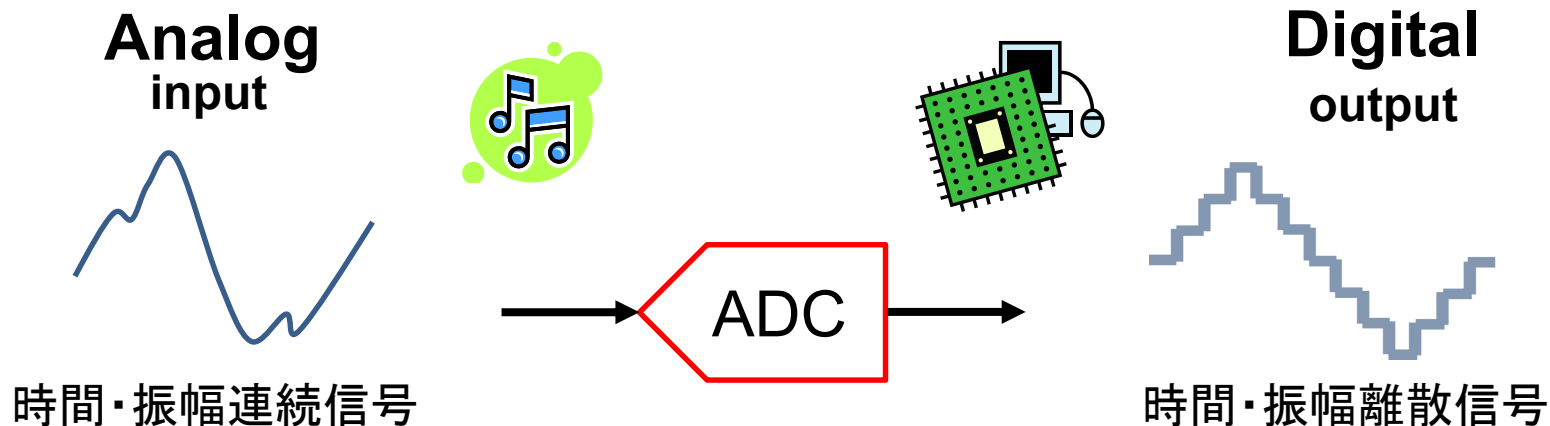
何もしなければ



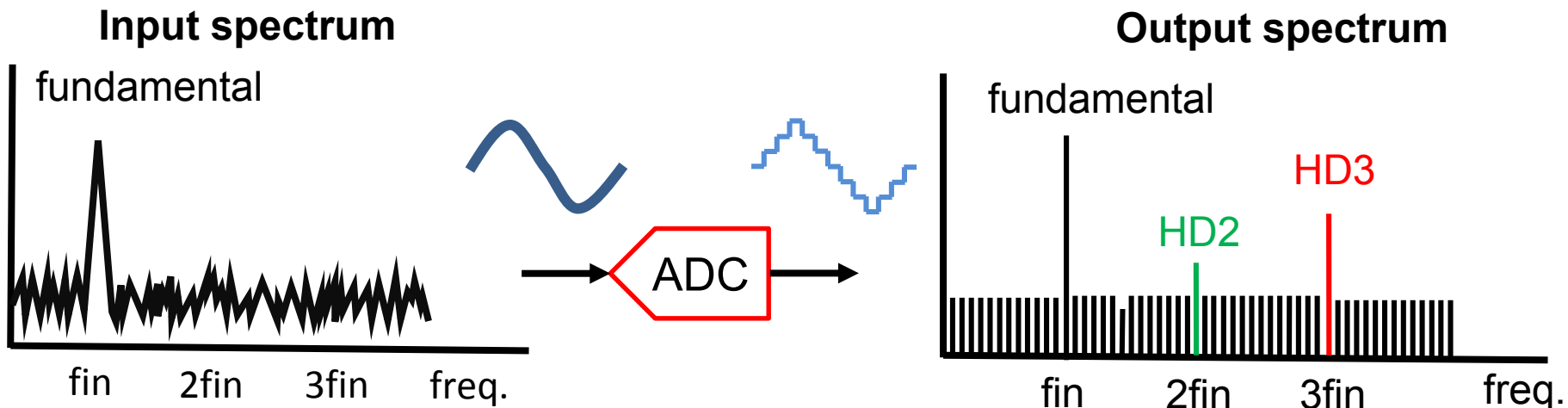
テストの低コスト化

⇒ 製造全体での低コスト化

ADC (SoC内キーコンポーネント) に着目して検討する

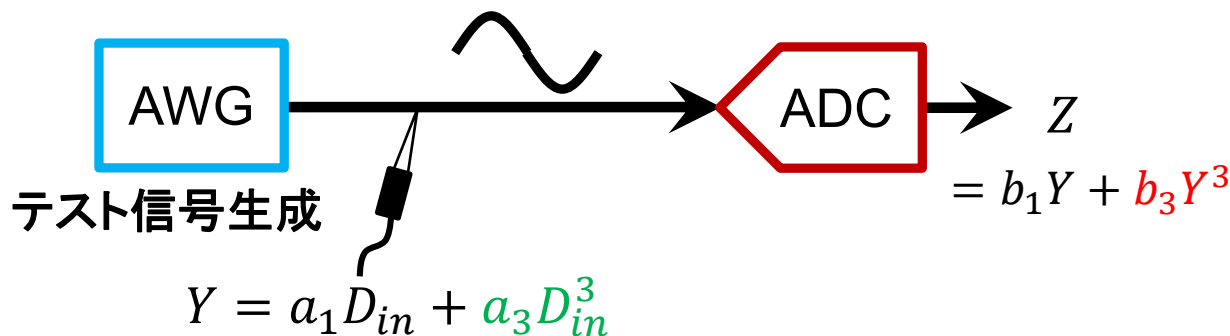


ADCの非線形性



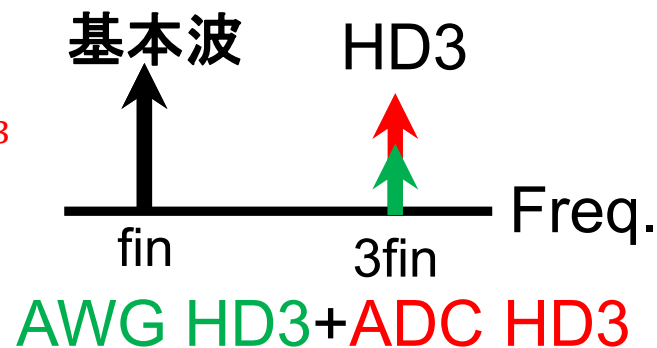
高調波ひずみの出現(HD2、HD3、...)

- AWGを用いた正弦波生成



AWG: Arbitrary Waveform Generator
任意波形発生器

ADC出力スペクトル



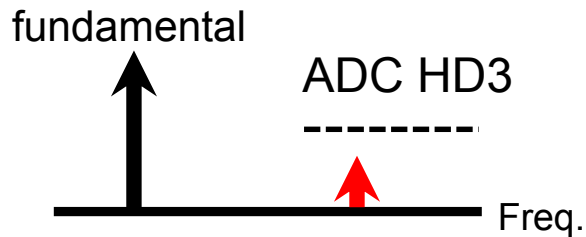
AWG内部の非線形性によるHD3

+

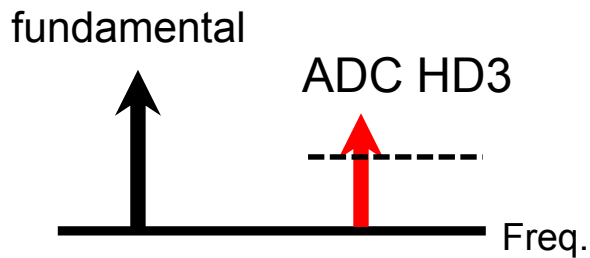
ADCの非線形性によるHD3

ADCテストで検出されるHD3 大 (over estimate)

ADC 線形性テスト



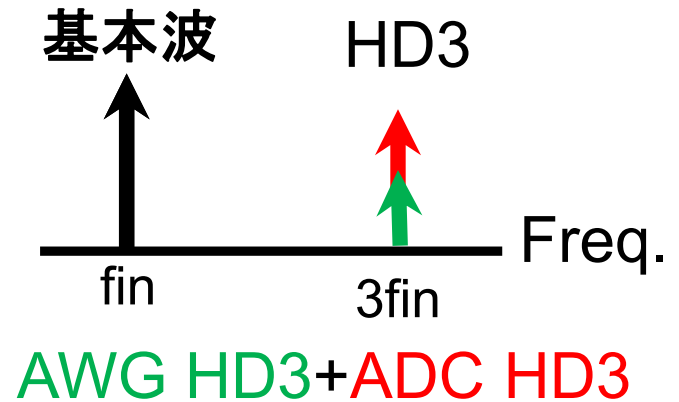
“出荷OK”



“出荷NG”



従来手法テスト結果

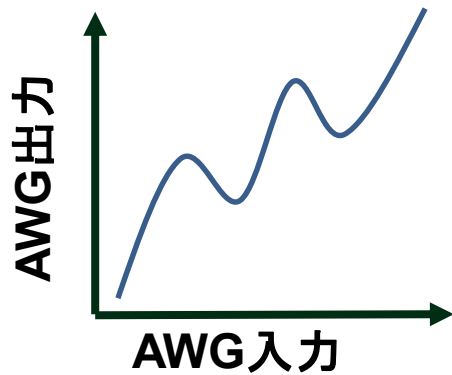


出荷試験を通らない良製品が多 (Overkill)

テスト精度 低 → 良品排除 大

AWG内部DSPプログラム変更

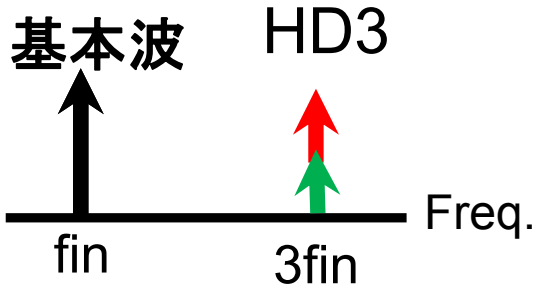
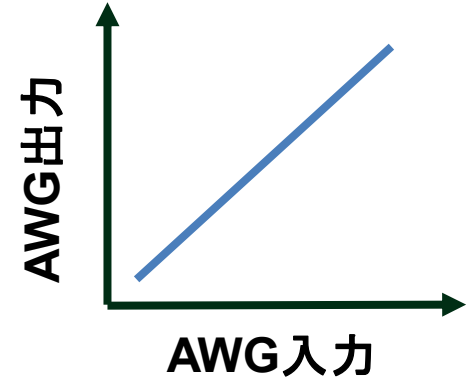
従来手法テスト信号



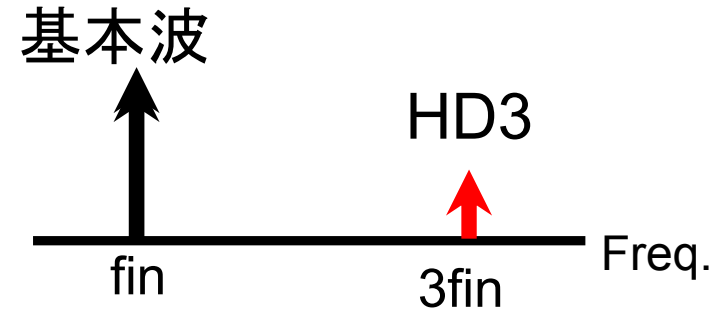
開発
アルゴリズム



提案手法テスト信号



AWG HD3+ADC HD3



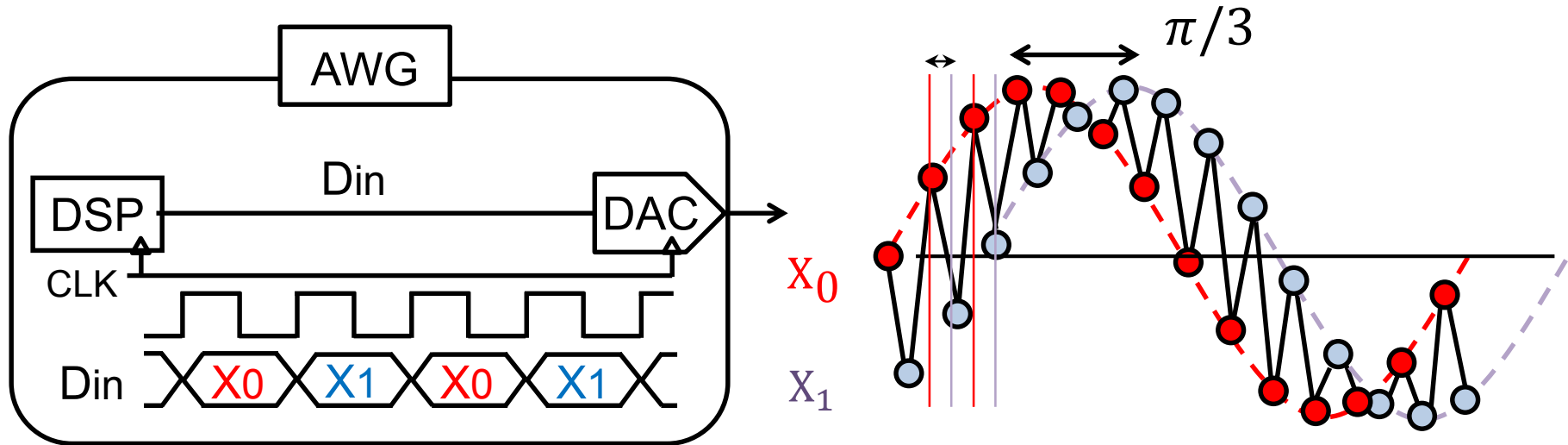
Only ADC HD3

安価なAWGでの
高精度テストを可能にするアルゴリズム開発

- 研究背景と研究目的
- **AWGを用いた低歪み信号の発生**
- 位相差切り替え法の高周波信号生成
- 理論解析
- まとめ

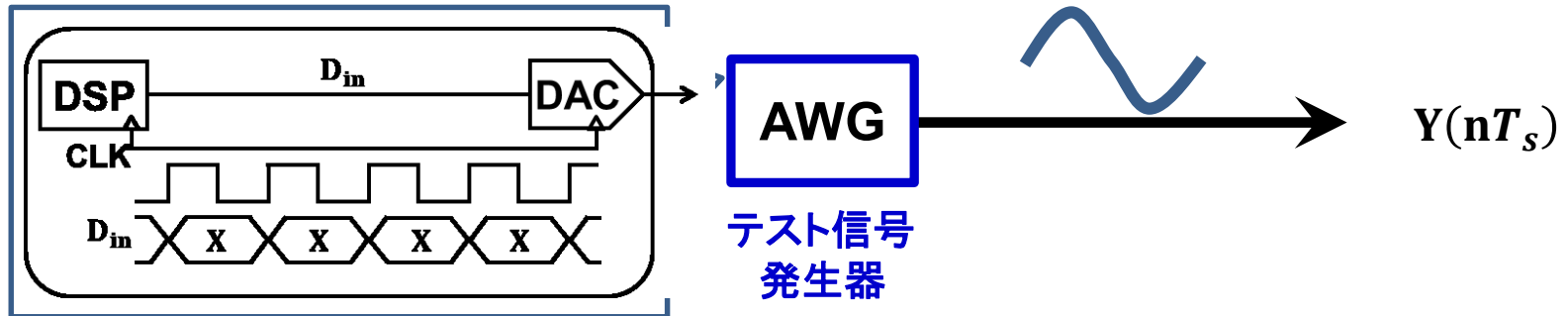
- 位相差切り替えアルゴリズム

位相差 φ の信号 X_0, X_1 を1クロックごとに切り替え

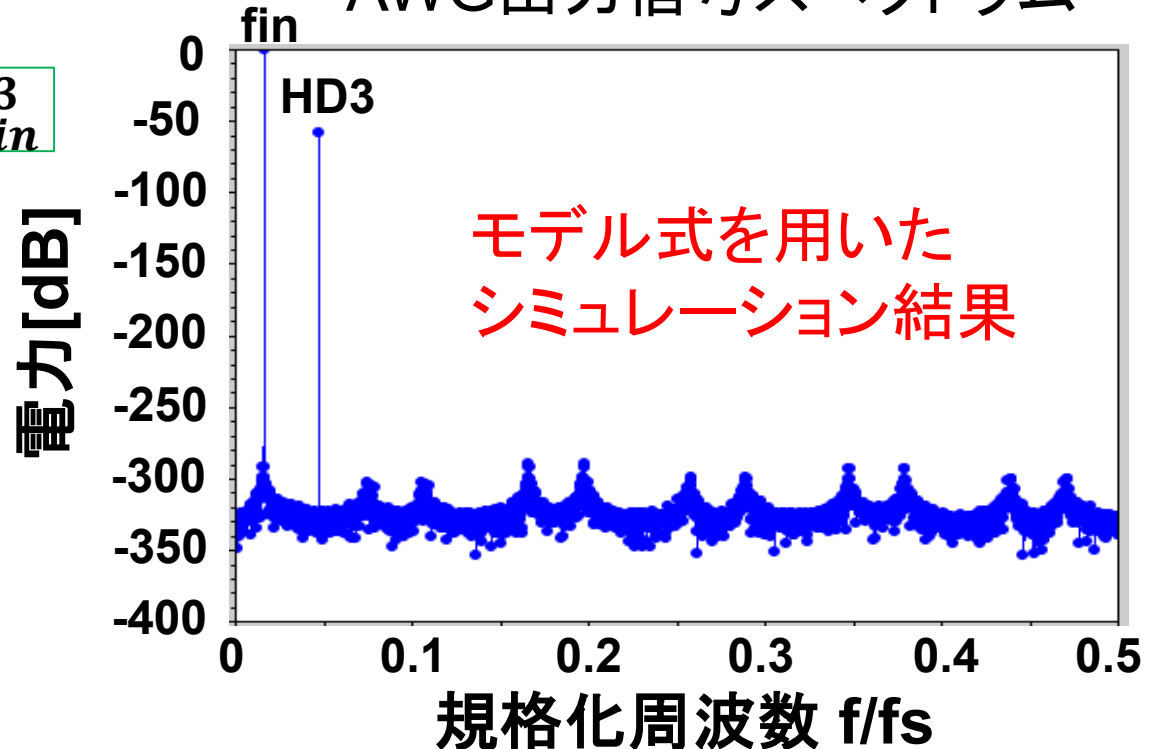


3次高調波 (3rd order Harmonic Distortion: HD3) キャンセル

- $X_0 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s + \pi/6) \dots n: \text{偶数}$
 - $X_1 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s - \pi/6) \dots n: \text{奇数}$
- $\varphi = \pi/3$



直接正弦波生成アルゴリズムによる
AWG出力信号スペクトラム

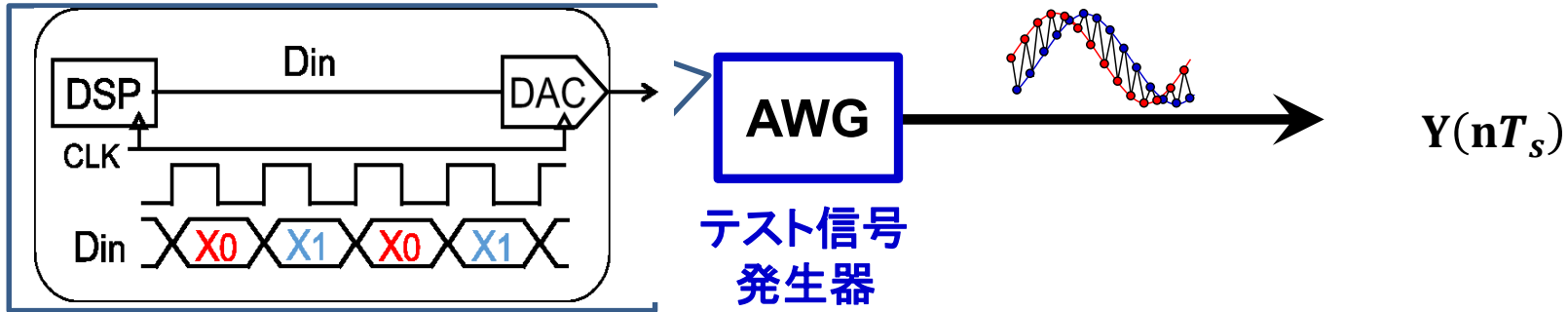


- AWG非線形モデル

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

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

AWG由来の
HD3が発生



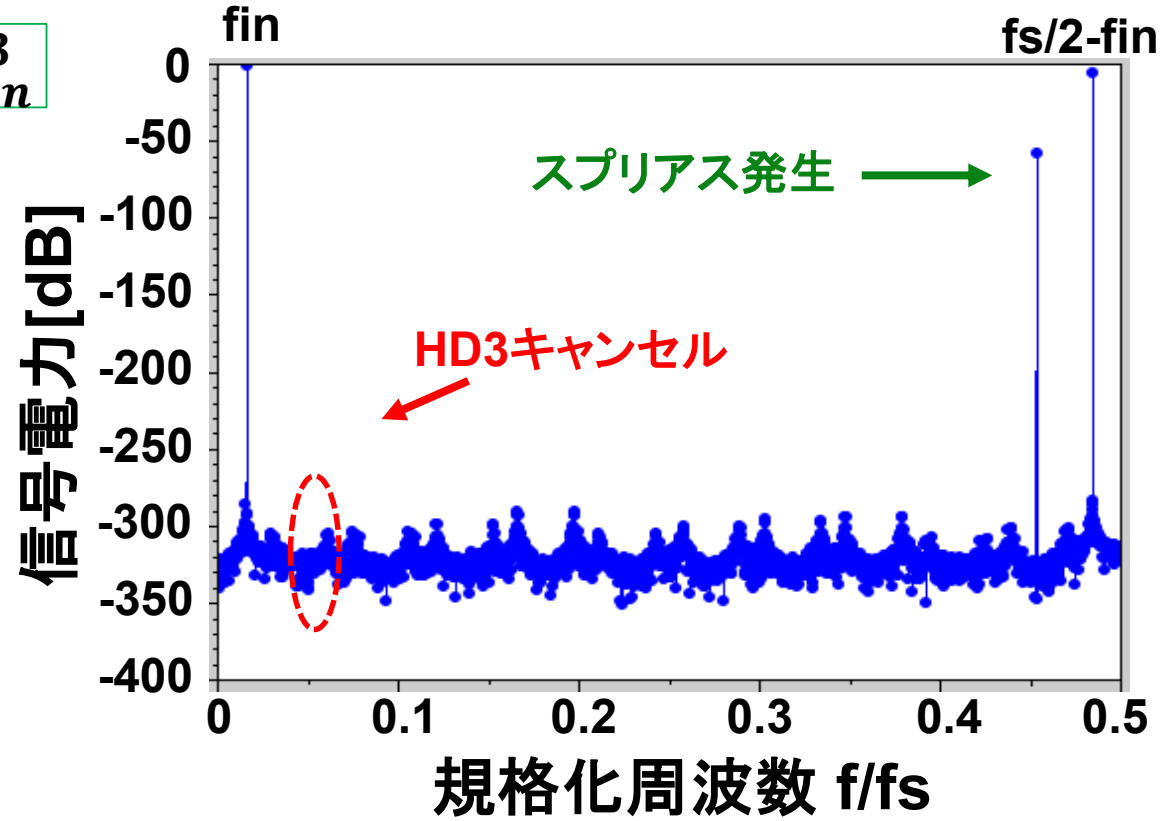
位相差切り替え信号AWG出力

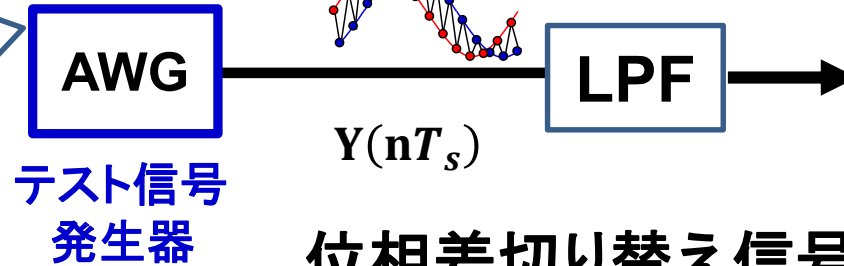
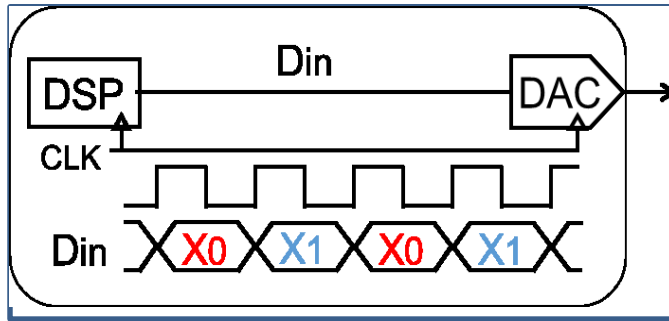
- AWG出力非線形モデル

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

HD3をキャンセル

周波数fs/2付近に
スプリアスが発生





位相差切り替え信号AWG出力

HD3をキャンセル

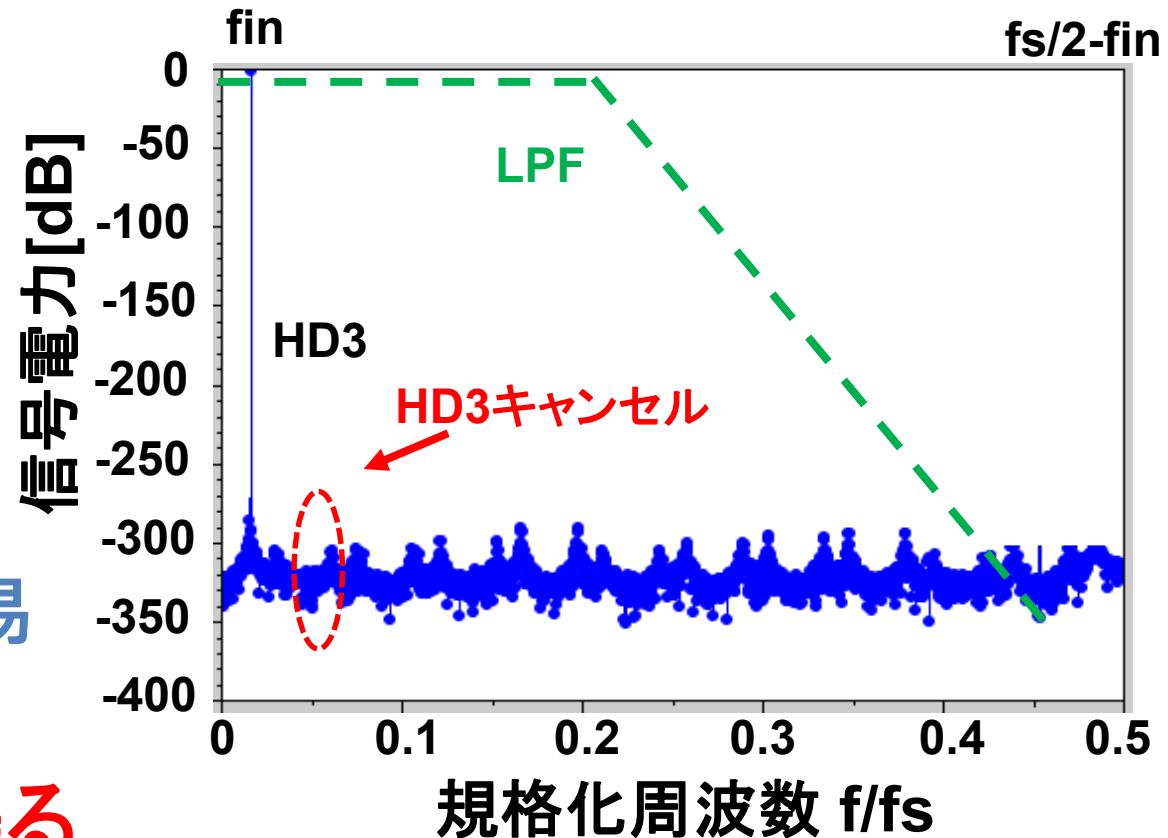
周波数 $f_s/2$ 付近に
スプリアスが発生



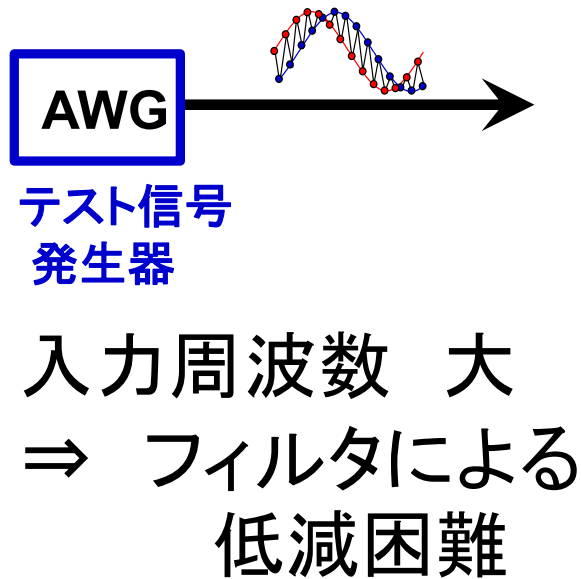
LPFによる
スプリアス低減が容易



低歪み正弦波を得る

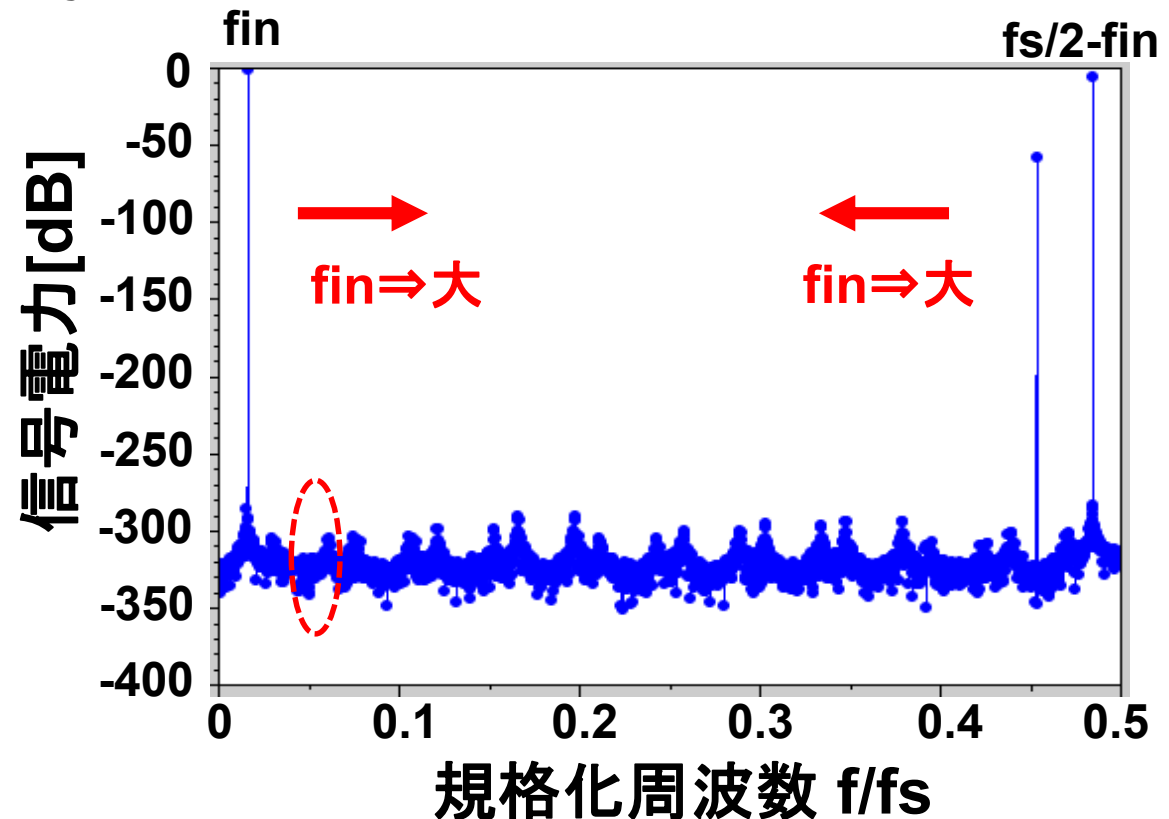


- 研究背景と研究目的
- AWGを用いた低歪み信号の発生
- **位相差切り替え法による高周波信号生成**
- 理論解析
- まとめ

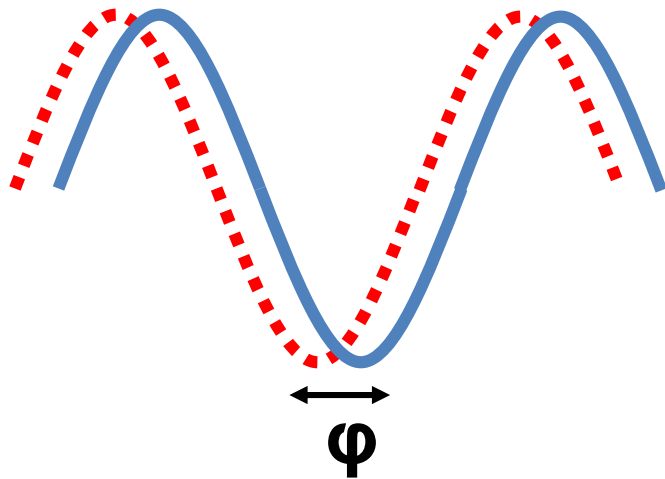


従来では
低周波のみで利用

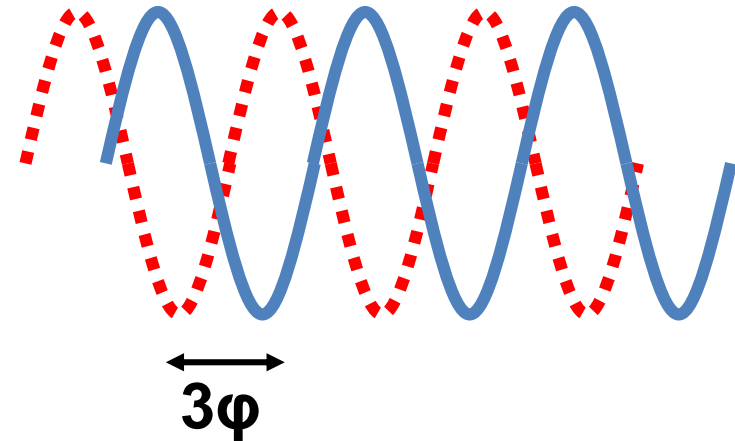
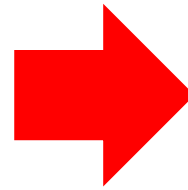
位相差切り替え信号AWG出力



高周波信号生成アルゴリズムの発見



3次非線形性
システム



周波数 f_{in} の2つの信号

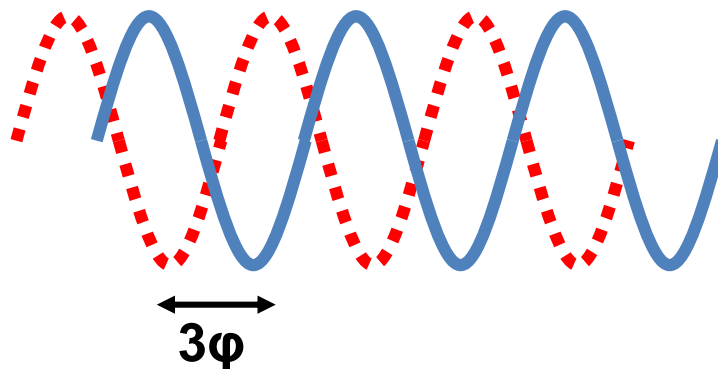
周波数 $3f_{in}$ の2つの信号

サンプリング周波数 f_s で信号を切り替え

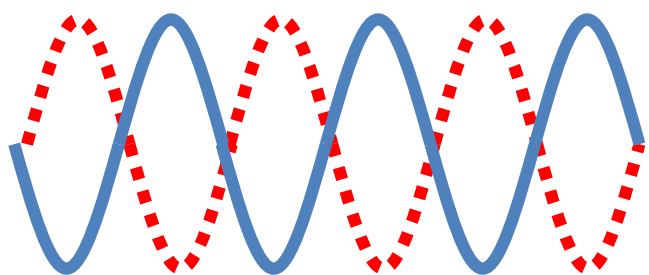
$f_s/2 - f_{in}$ の出現

$f_s/2 - 3f_{in}$ の出現

周波数 $3f_{in}$ の
2つの信号

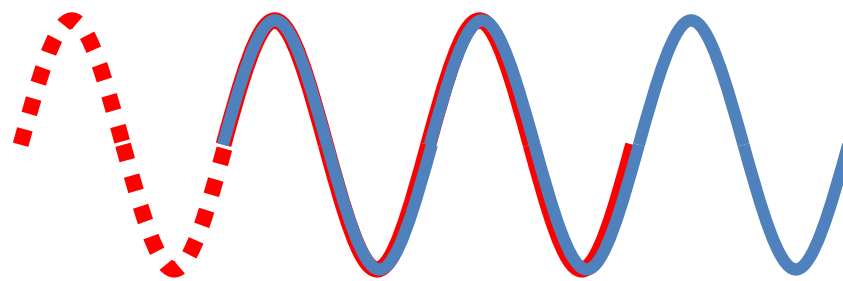


信号が打ち消しあう位相差



- HD3をキャンセル

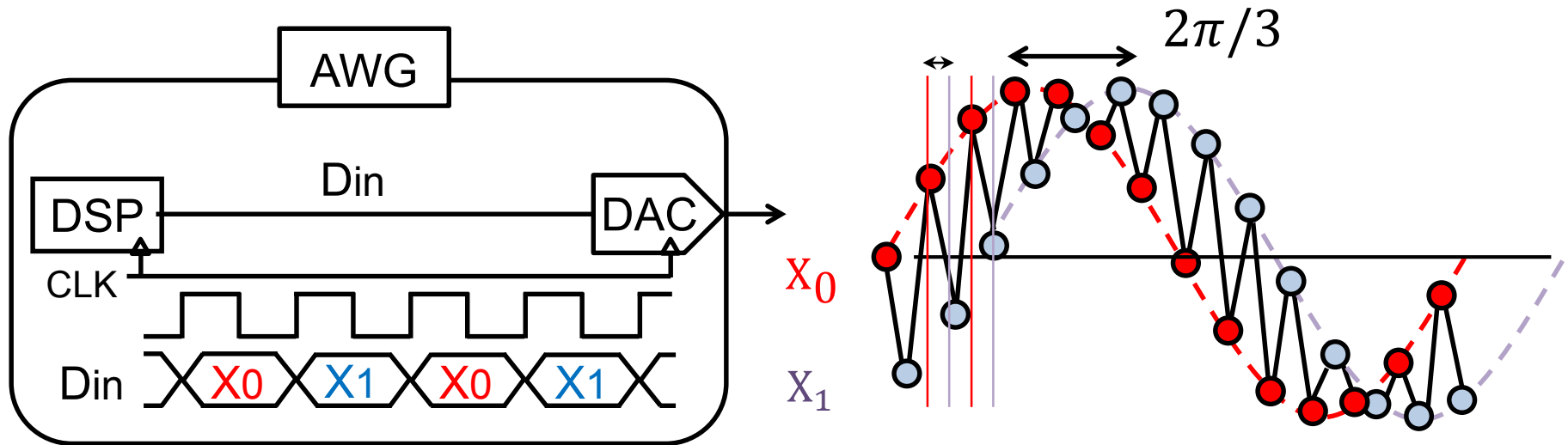
信号が重なりあう位相差



- $fs/2 - 3f_{in}$ をキャンセル

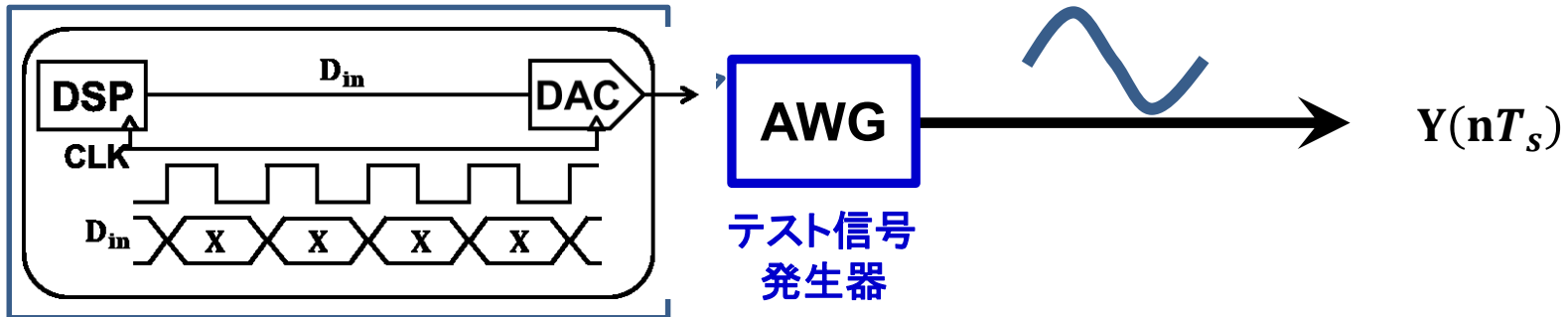
- 位相差切り替えアルゴリズム

位相差 φ の信号 X_0, X_1 を1クロックごとに切り替え



3次高調波 (3rd order Harmonic Distortion: HD3) キャンセル

- $X_0 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s + \pi/3) \dots n: \text{偶数}$
 - $X_1 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s - \pi/3) \dots n: \text{奇数}$
- $\varphi = 2\pi/3$



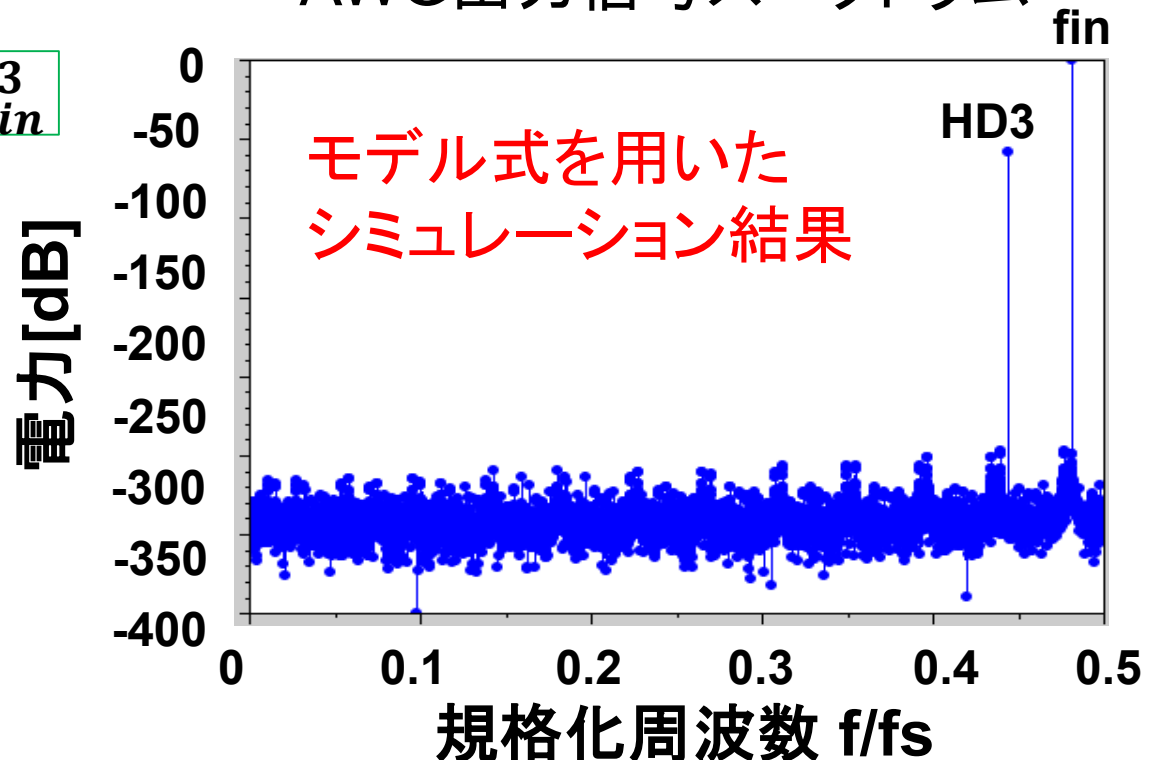
直接正弦波生成アルゴリズムによる
AWG出力信号スペクトラム

- AWG非線形モデル

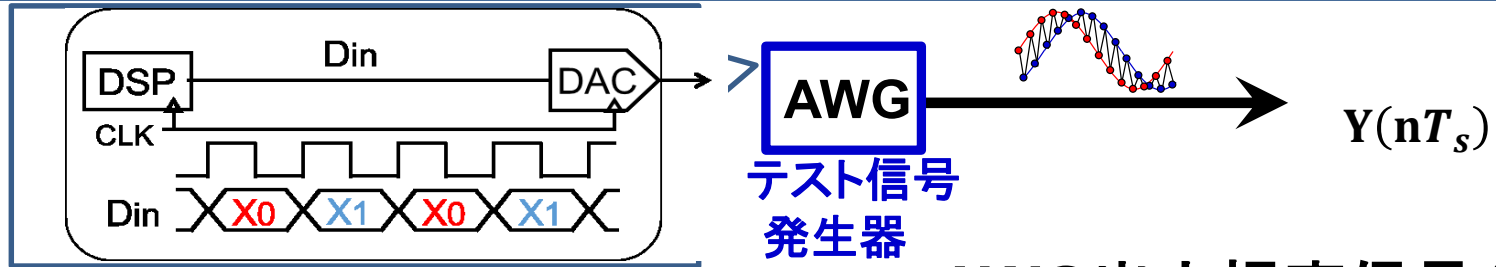
$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3$$

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

AWG由来のHD3
が折り返されて発生

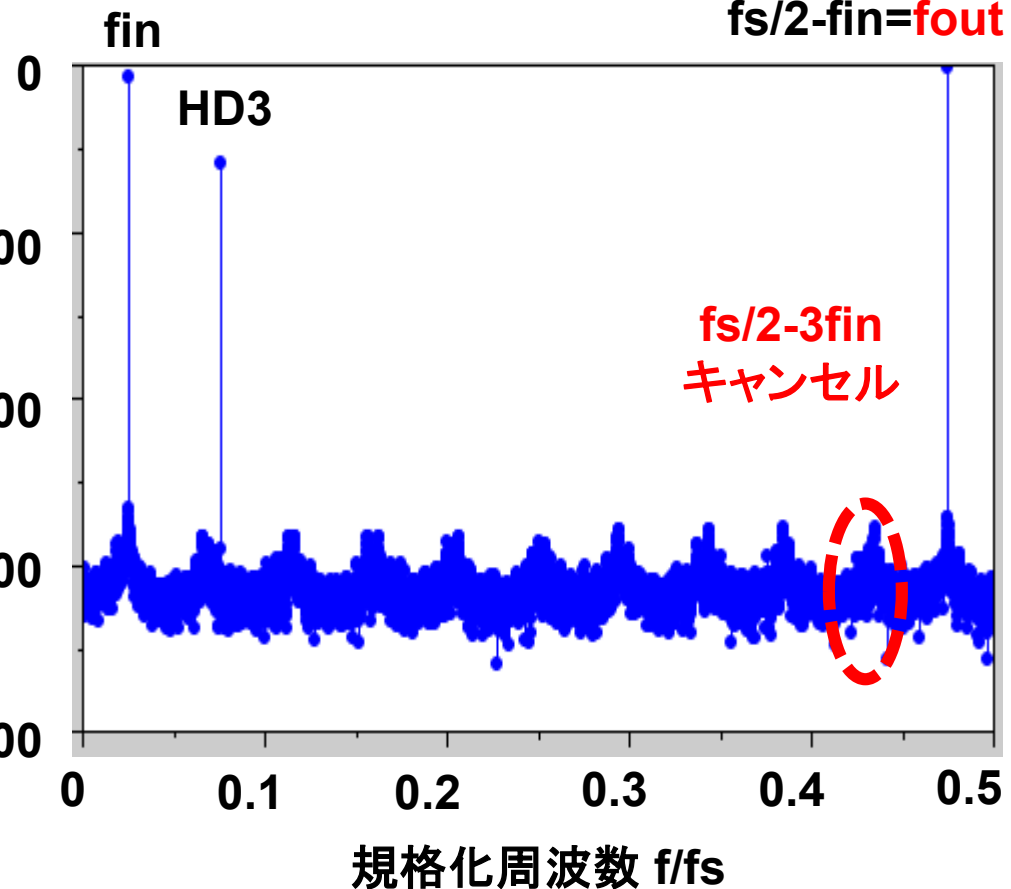


高周波信号アルゴリズムAWG出力



AWG出力提案信号(高周波)

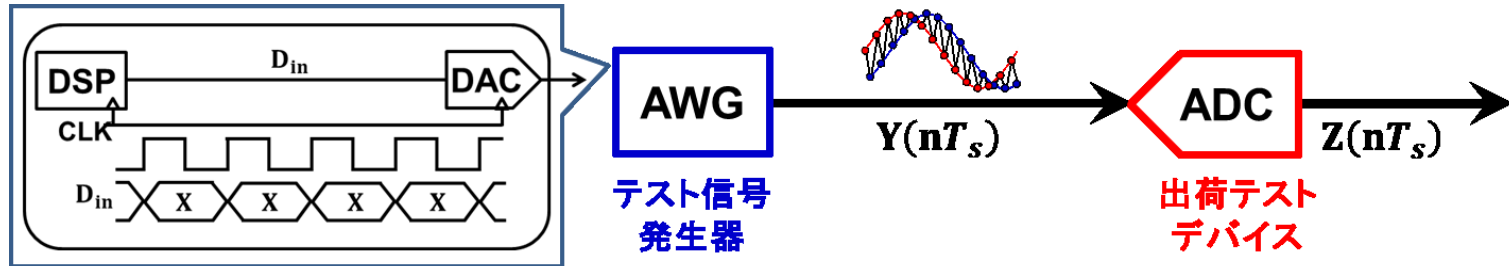
$$D_{in} = \begin{cases} A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{odd} \\ A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s - \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{even} \end{cases}$$



HD3成分出現

$\frac{f_s}{2} - 3f_{in}$ 成分キャンセル

イメージ信号 $f_s/2 - f_{in}$ 成分を
周波数 f_{out} の
信号として利用



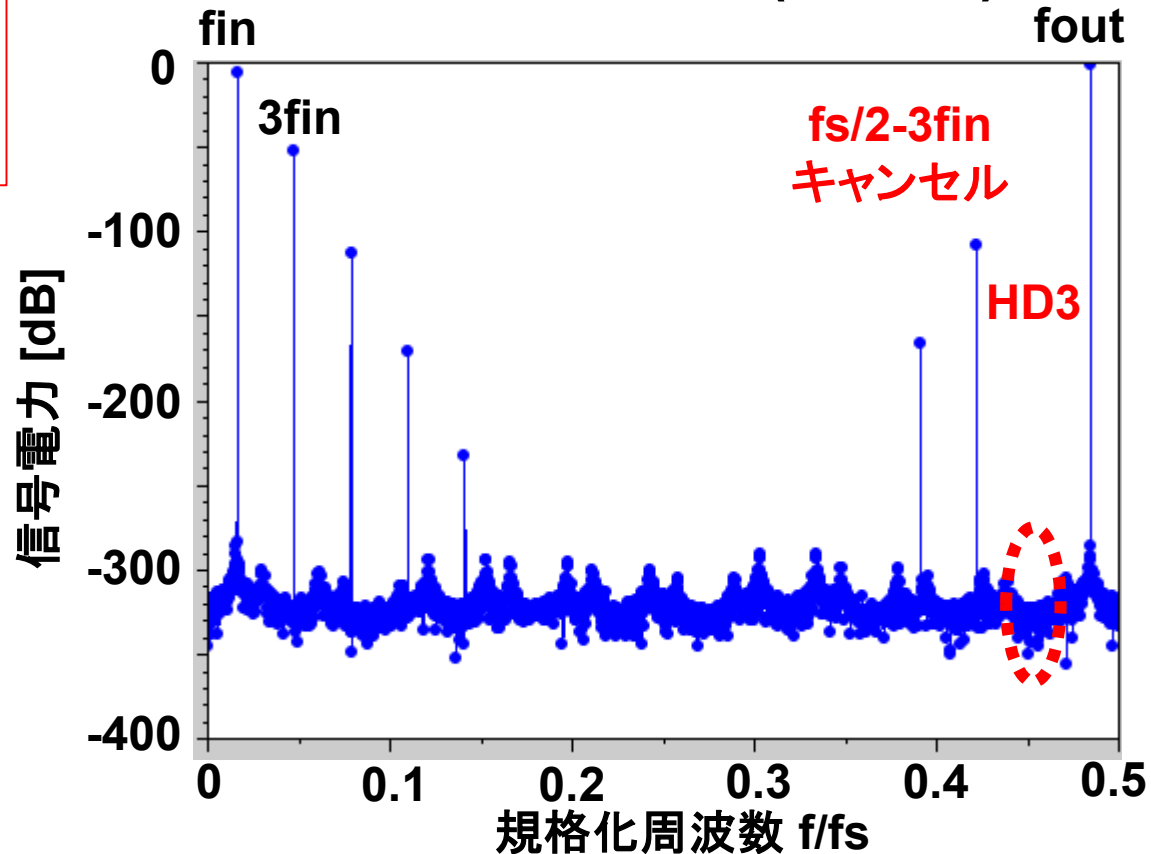
$$D_{in} = \begin{cases} A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{odd} \\ A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s - \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{even} \end{cases}$$

f_{out} に対するHD3
: キャンセル



ADCのHD3
: 測定不可

ADC出力提案手法(高周波)



AWGでの低歪み高周波信号発生

22/32



AWG出力提案信号(高周波)

$$D_{in} = \begin{cases} A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{odd} \\ A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s - \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{even} \end{cases}$$

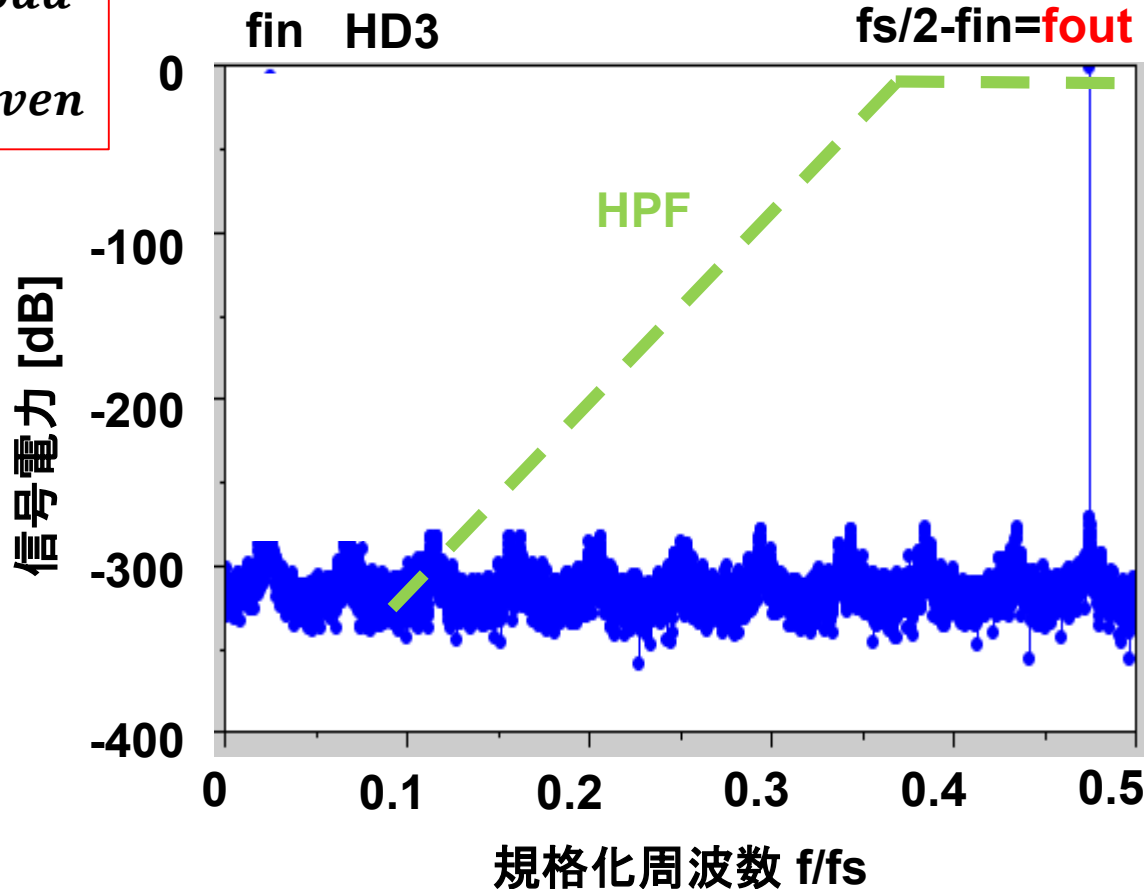
HPF

→ f_{in} , HD3を低減

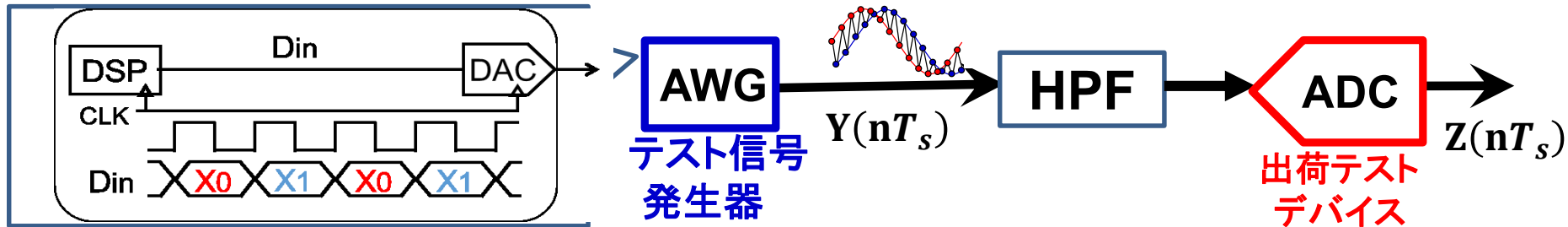


低歪み高周波信号
周波数

$fs/2 - f_{in} \rightarrow f_{out}$



AWGでの低歪み高周波信号発生



$$D_{in} = \begin{cases} A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s + \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{odd} \\ A \sin\left(2\pi f_{in} nT_s - \frac{\pi}{3}\right) \dots \text{even} \end{cases}$$

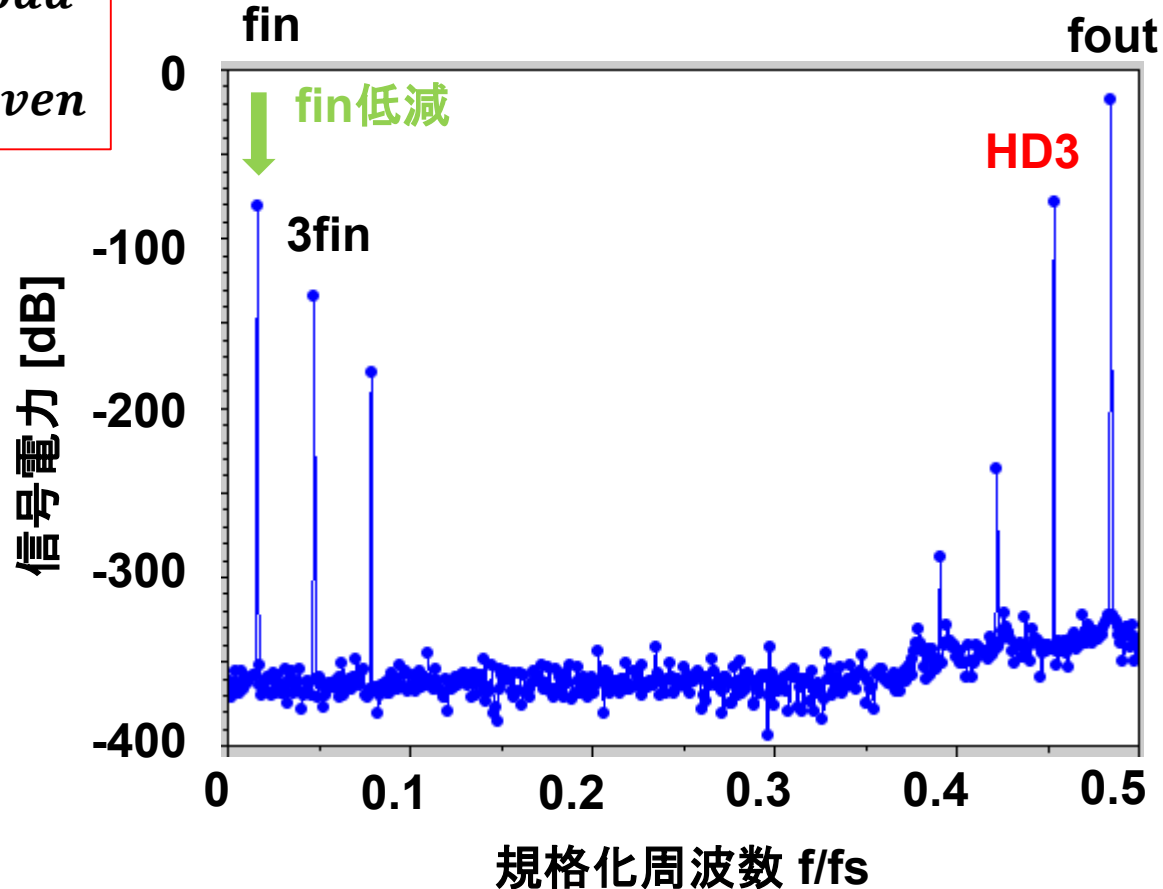
HPF

→ f_{in} , $3f_{in}$ を低減

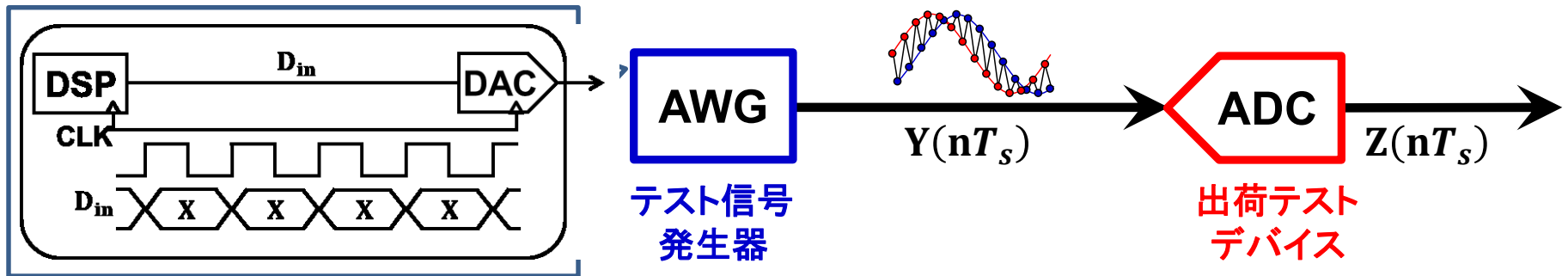


f_{out} の HD3
: 検出可能

AWG出力提案信号(高周波)



- 研究背景と研究目的
- AWGを用いた低歪み信号の発生
- 位相差切り替え法の高周波信号生成
- **理論解析**
- まとめ



* 位相差切り替え信号(DAC入力信号)

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

* AWG出力信号=テスト信号

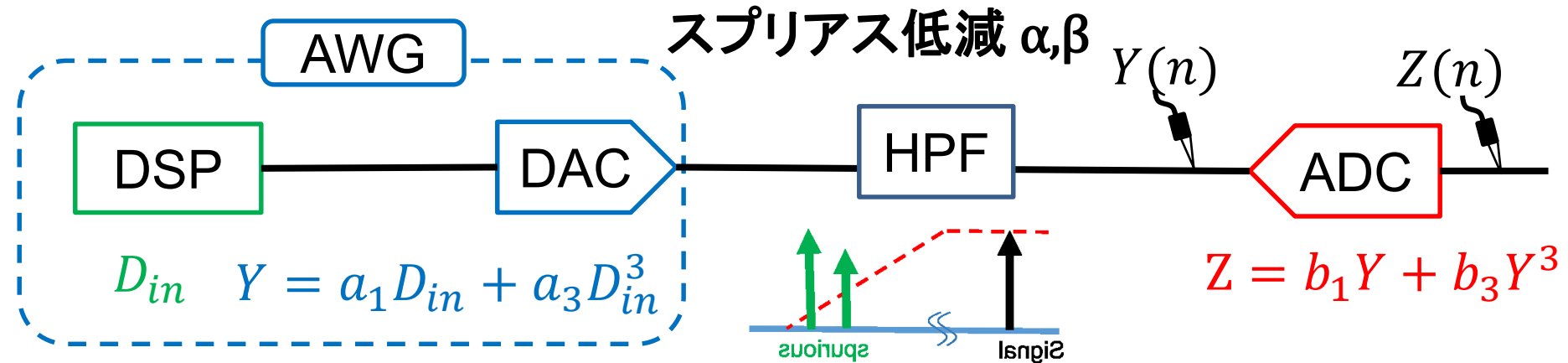
$$Y(nT_s) = \begin{cases} a_1 X_0(n) + a_3 \{X_0(n)\}^3 & n: \text{even} \\ a_1 X_1(n) + a_3 \{X_1(n)\}^3 & n: \text{odd} \end{cases}$$

* ADC出力信号

$$Z(nT_s) = b_1 Y(nT_s) + b_3 \{Y(nT_s)\}^3$$

ただし

$$f_s(\text{AWG}) = f_s(\text{ADC})$$



$$Y(nT_s) = -\frac{1}{2} \cdot \underline{\alpha} \cdot \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \sin(2\pi f_{in} nT_s) \quad \leftarrow \text{入力周波数}$$

フィルタ

$$-\frac{1}{4} \cdot \underline{\beta} \cdot a_3 A^3 \cos(2\pi(3f_{in})nT_s)$$

$$0 \leq \alpha, \beta \leq 1$$

$$+\frac{\sqrt{3}}{2} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - f_{in} \right) nT_s \right) \quad \text{利用する周波数}$$

$$\begin{aligned}
 Z(nT_s) = & Z_{f_{in}} \sin(2\pi f_{in} nT_s) \\
 & + \cancel{Z_{3f_{in}} \sin(2\pi \cdot (\frac{f_s}{2} - 3f_{in}) \cdot nT_s)} \quad \leftarrow \text{fs/2-3fin} \\
 & + \dots \\
 & \quad \vdots \\
 & + Z_{-f_{in}} \sin(2\pi(f_s - f_{in})nT_s) \\
 & + \cancel{Z_{-3f_{in}} \sin(2\pi \cdot (\frac{f_s}{2} + 3f_{in}) \cdot nT_s)} \quad \leftarrow \text{fs/2-3finに重畳する} \\
 & \quad \quad \quad \text{エイリアシング成分} \\
 & + \cancel{Z_{3f_{in}} \sin(2\pi \cdot (\frac{3f_s}{2} + 3f_{in}) \cdot nT_s)} \quad \swarrow \\
 & + \dots
 \end{aligned}$$

高周波アルゴリズムのHD3

$\frac{f_s}{2} - 3f_{in}$ 成分 + エイリアシングで折り重なる成分

三次高調波成分

$$\frac{1}{4} b_3 R^3 \cos \left(2\pi \cdot 3 \cdot \left(\frac{f_s}{2} - f_{in} \right) n T_s \right)$$

三次高調波の折り返し

$$-\frac{3}{2} \alpha \beta b_3 P Q R \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} + 3 f_{in} \right) n T_s \right)$$

$$\left(-\frac{3}{4} \alpha^2 b_3 P^2 R + \frac{3}{2} \alpha \beta b_3 P Q R \right) \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - 3 f_{in} \right) n T_s \right)$$

足し合わせると

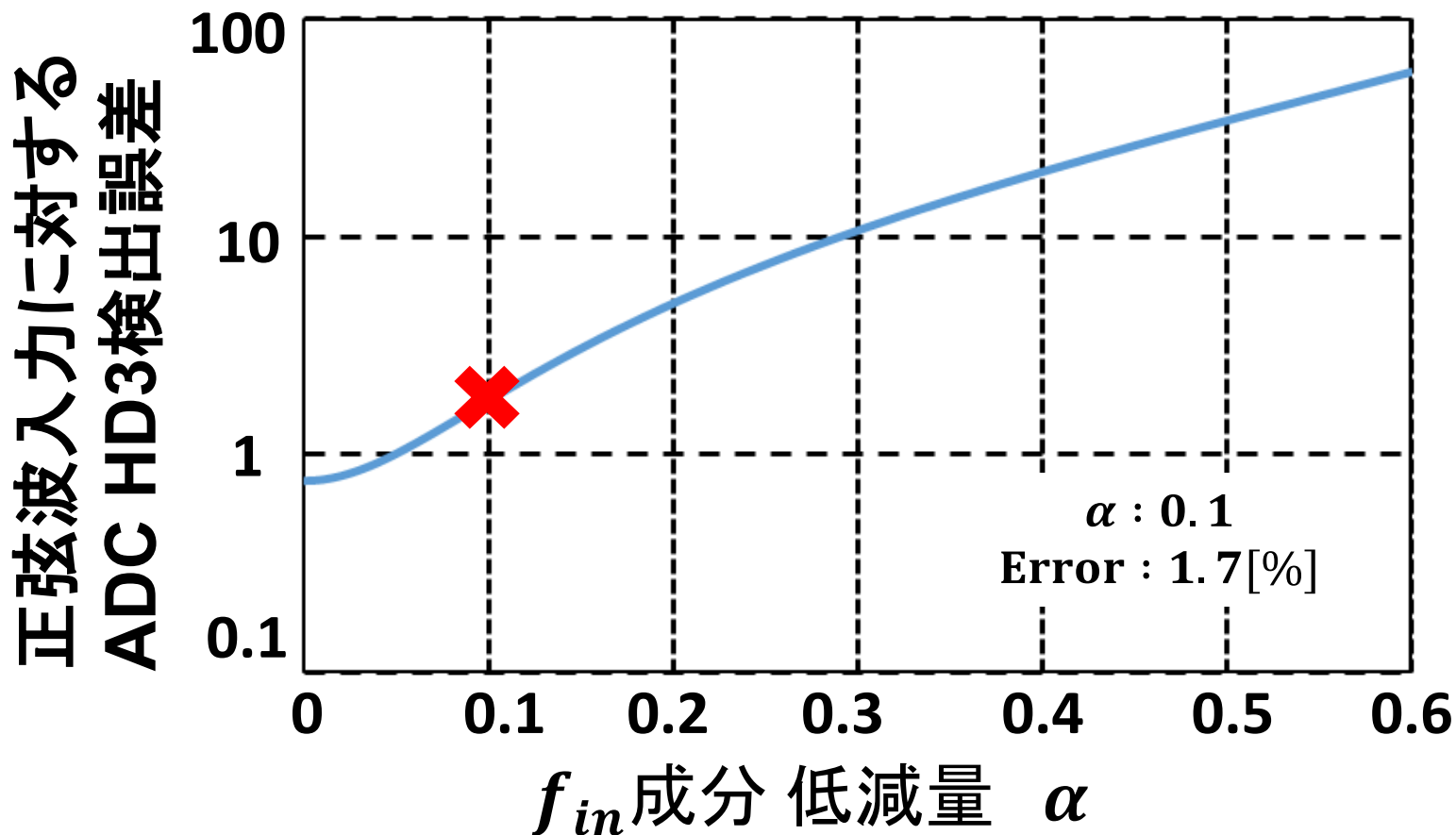
$$-b_3 \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{32} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right)^3 \right\} \underline{(1 - \alpha^2)}$$

入力周波数低減
による3次成分の出現

$$\begin{cases} \alpha = 1 \rightarrow 0 & : \text{キャンセル} \\ \alpha \neq 1 \rightarrow & \text{HD3 検出可} \end{cases}$$

理論解析結果

HPFによる信号低減

 f_{in} 成分: 1/10 \Rightarrow **検出誤差 1.7%程度**

- 研究背景と研究目的
- AWGを用いた低歪み信号の発生
- 位相差切り替え法の高周波信号生成
- 理論解析
- **まとめ**

AWG で、プログラム変更 + 簡単なフィルタ のみで 低歪正弦波生成法の提案

- 高周波信号生成アルゴリズム
 - 位相差切り替え手法に対して高周波での利用アルゴリズムを提案
 - 理論解析
 - 位相差切り替えの問題点の原因説明
 - フィルタによる測定誤差改善

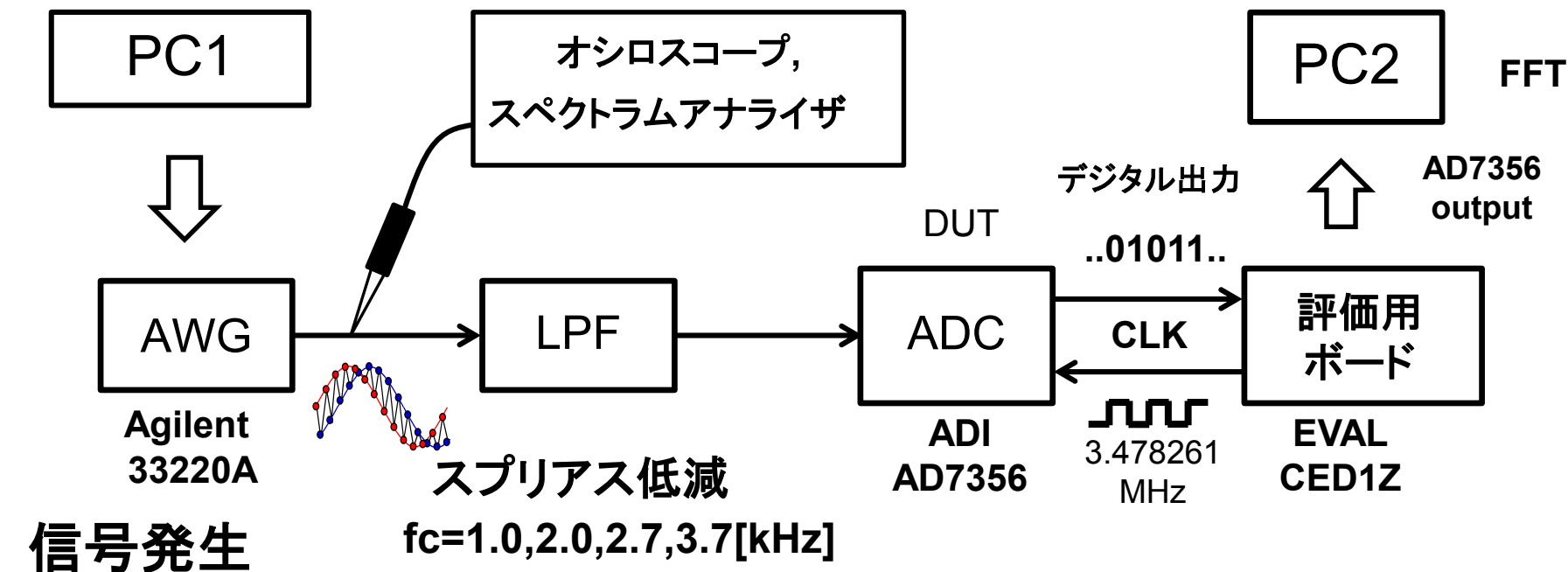
- 3次以外の高調波歪みの低減
 - HD2低減
 - HD2とHD3の同時低減
- 高周波信号生成のための位相差切り替え手法の利用検討
 - AWG出力確認
 - HPF仕様検討

アルゴリズムによる
ADCテストの大きな進歩

Appendix

信号プログラムの生成

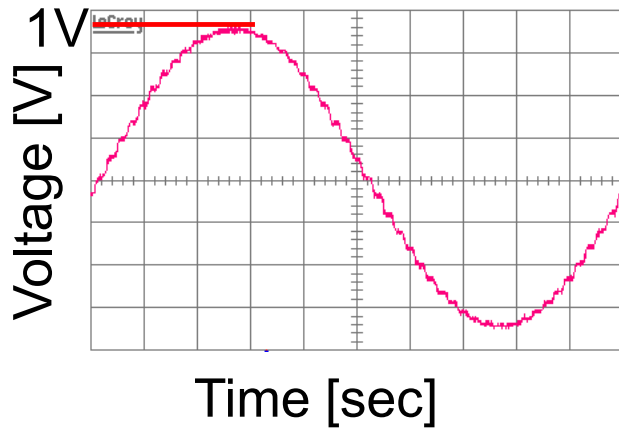
ADC出力スペクトル取得



LPFによるスプリアス低減

低減量に対する測定誤差の測定

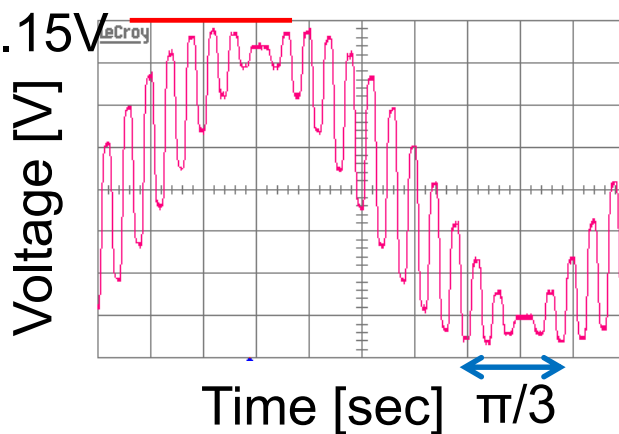
Waveform



直接正弦波生成法

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

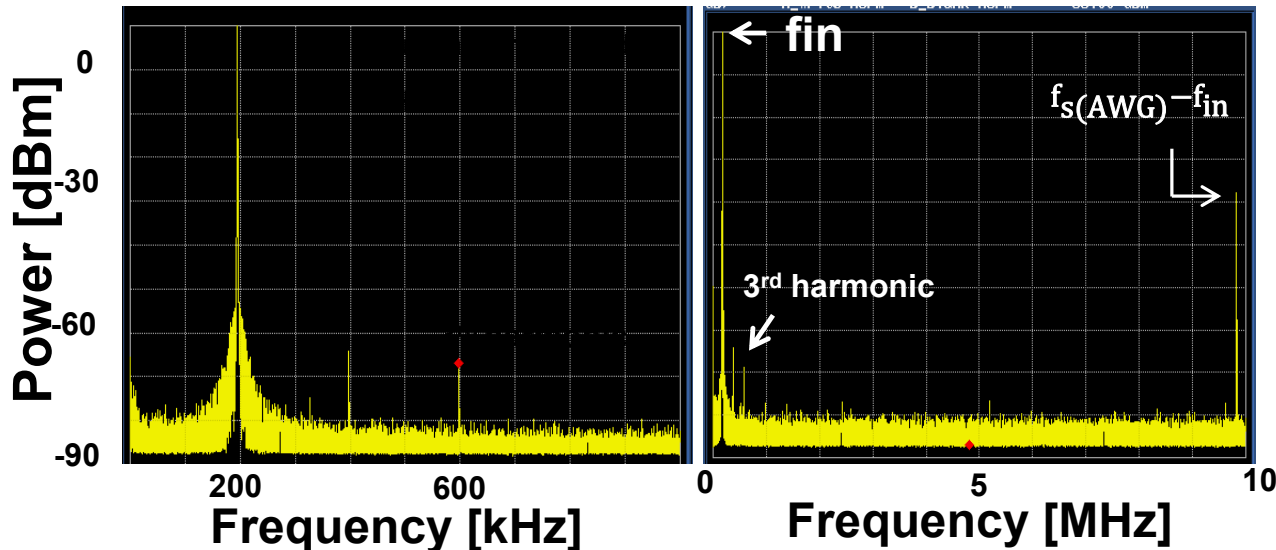
Waveform



位相差切り替え手法

$$D_{in}(n) = \begin{cases} 1.15A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \pi/6) & n: \text{偶数} \\ 1.15A \sin(2\pi f_{in} n T_s - \pi/6) & n: \text{奇数} \end{cases}$$

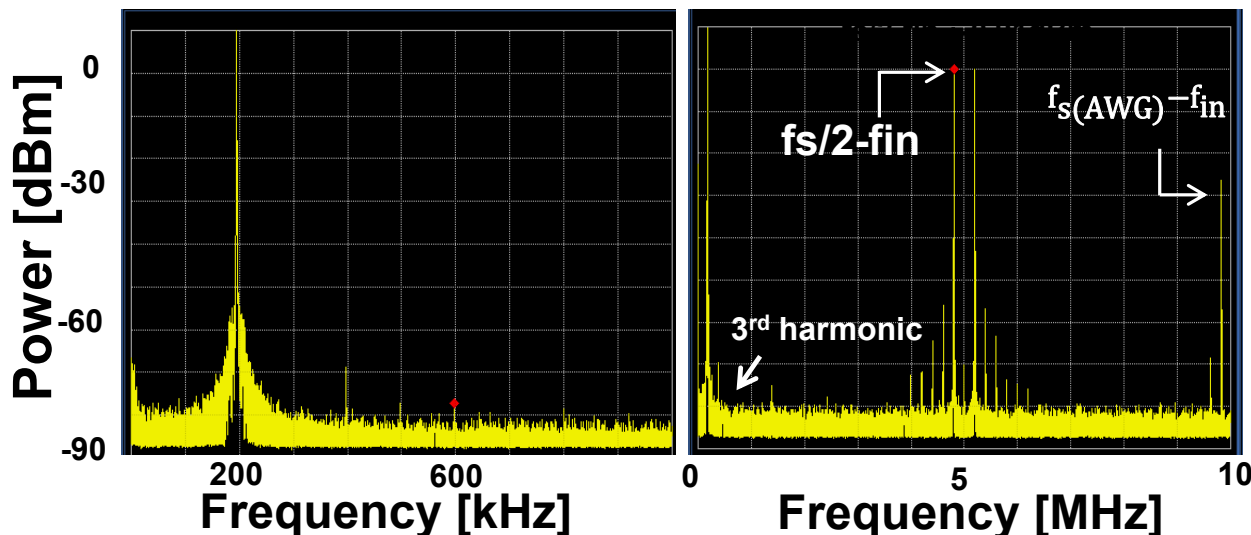
従来手法



**Fundamental
: 9.0dBm**

**HD3:
-68.0dBm**

位相差切り替え手法



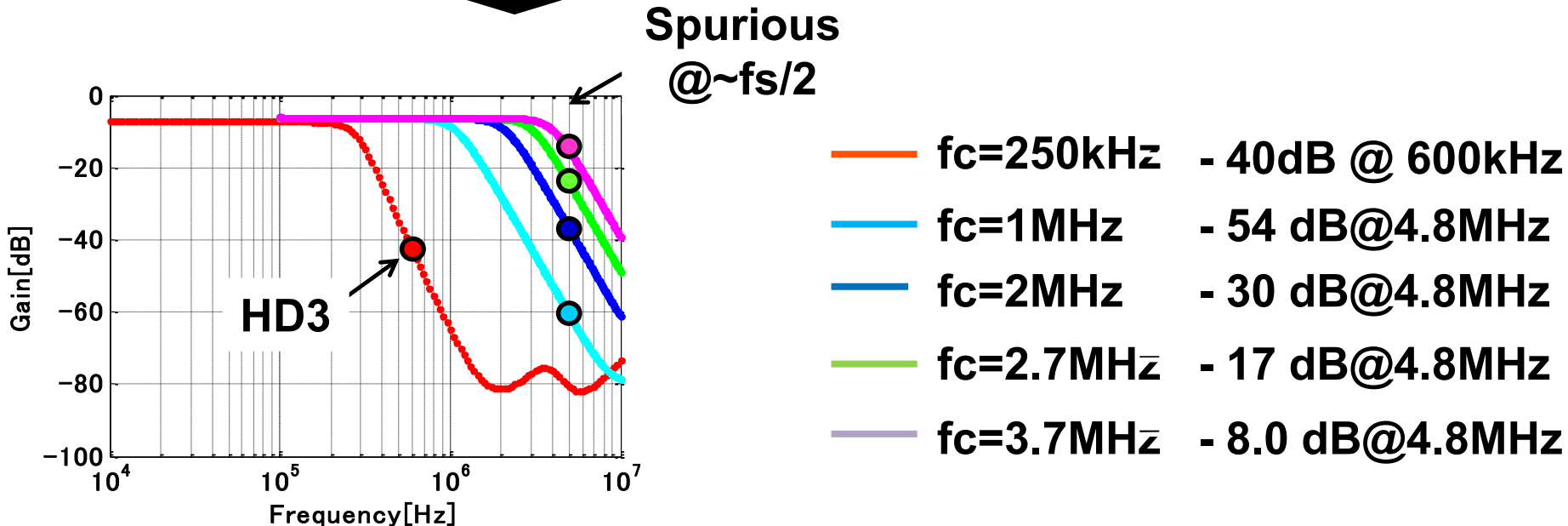
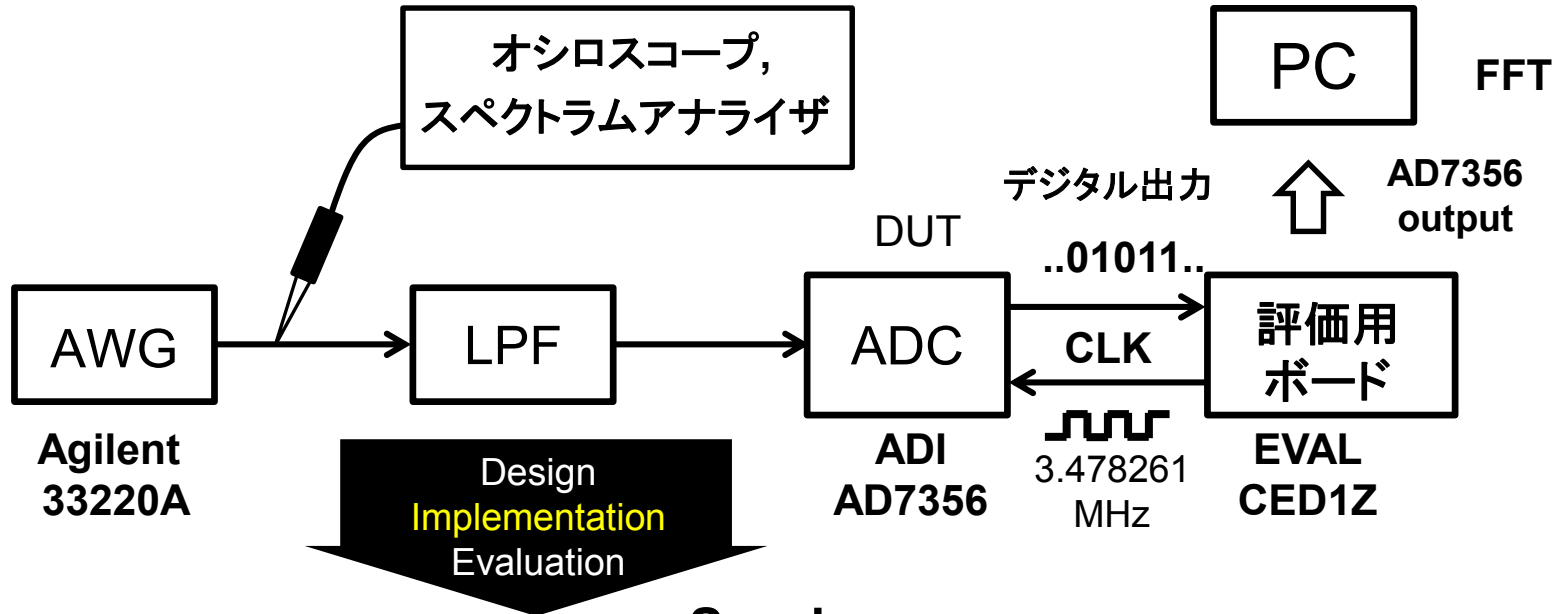
**Fundamental:
9.0dBm**

**HD3:
-78.2dBm**

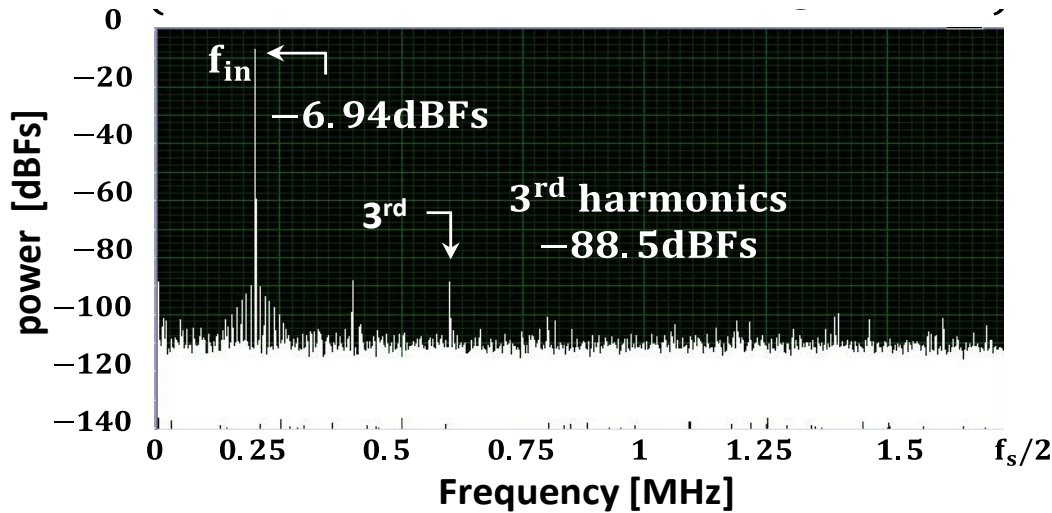


-10.2dBm

開発したLPF特性の測定結果



従来手法ADC出力(LPF:fc=1MHz挿入)



従来手法

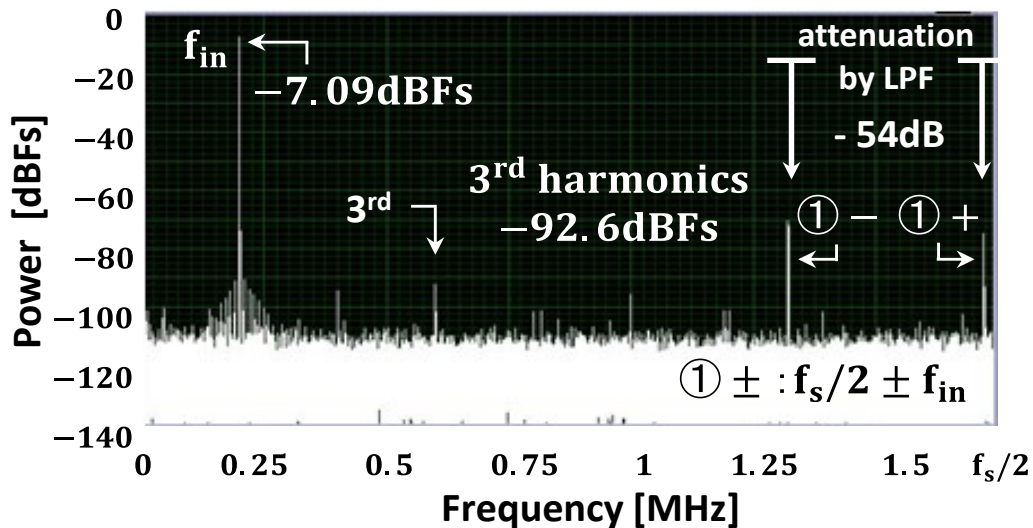
基本波

: -6.94dBFs

HD3

: -88.5dBFs

提案手法ADC出力(LPF:fc=1MHz挿入)



提案手法

基本波

: -7.09dBFs

HD3

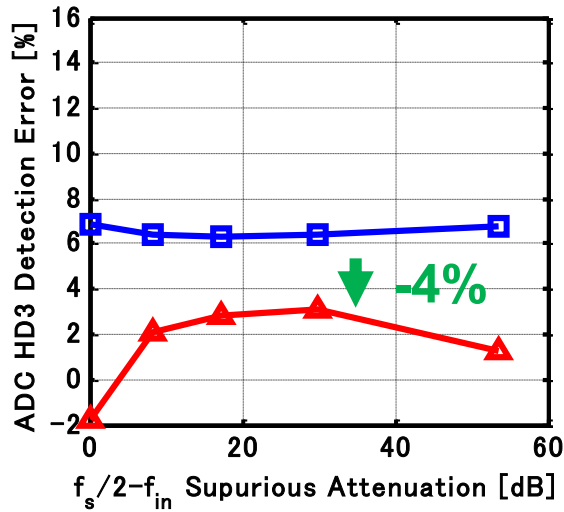
: -92.6dBFs

ADC出力HD3測定結果誤差低減確認

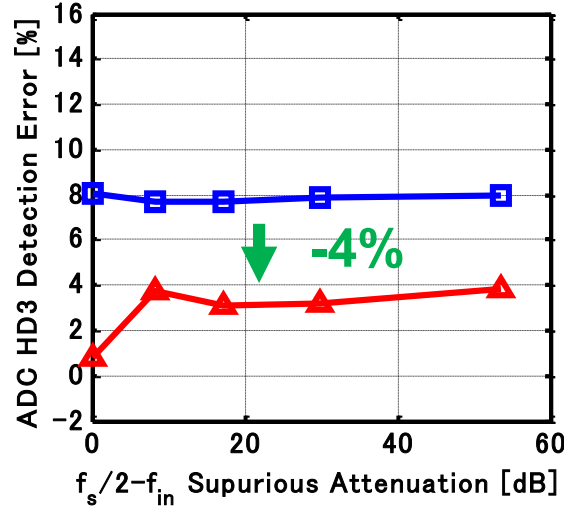
—□— 従来手法

—△— 位相差切り替え手法

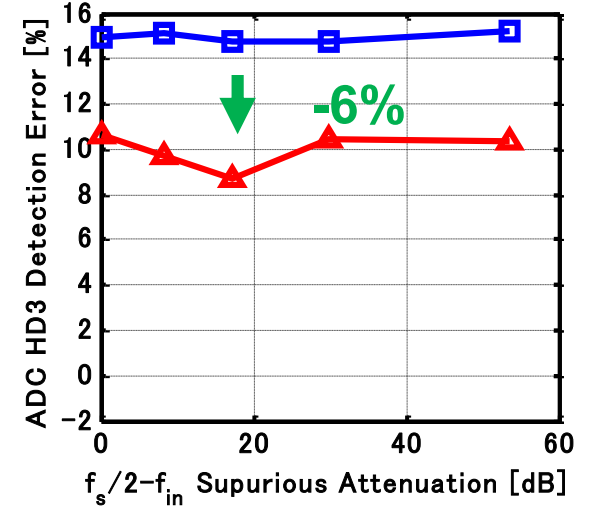
sample1



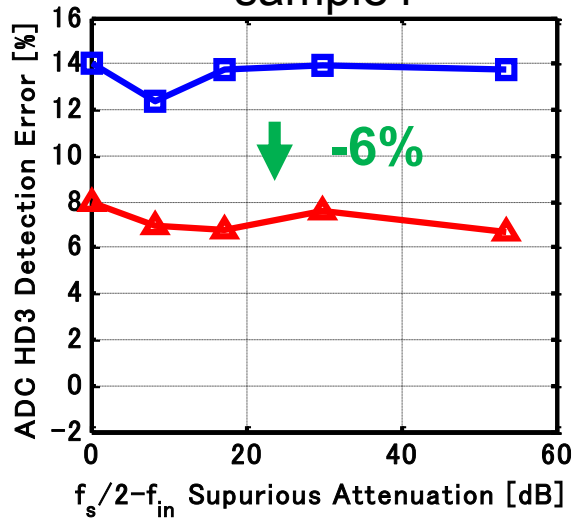
sample2



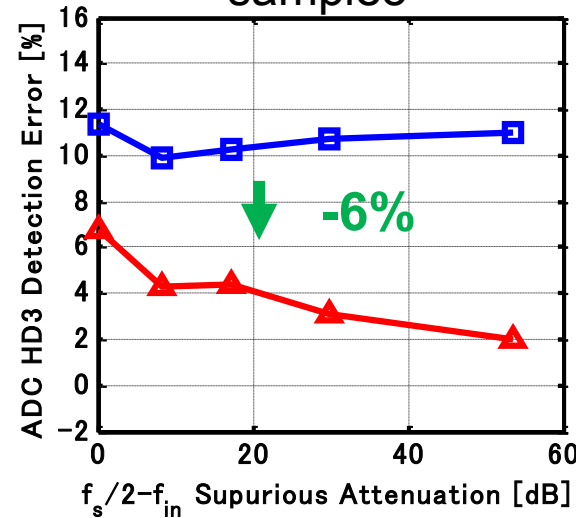
sample3



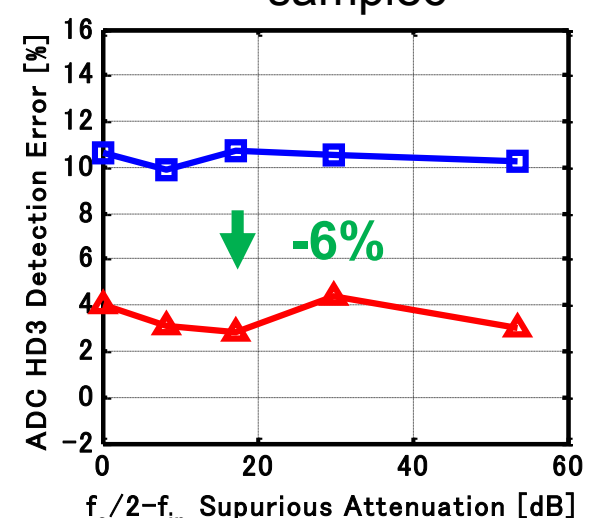
sample4



sample5



sample6



Q.P29で測定誤差を1.7%に低減とあったが、従来と比べると何%程度改善される？

A.大体4~5%

Q.導入でテストコスト削減が重要とあったが産業界からはどの程度要望があるのか

A.厳密な要望がどの程度かは調査中。ただ設計、製造におけるコスト削減には限界があるだろうから需要は多いだろうと考える。