

任意波形発生器を用いた 低歪み信号発生技術の 理論解析と実験検証

群馬大学

半導体理工学研究センター(STARC)

安部文隆 ○澁谷将平 小林佑太朗 東野将史
佐々木秀 荒船拓也 小林春夫 小林修

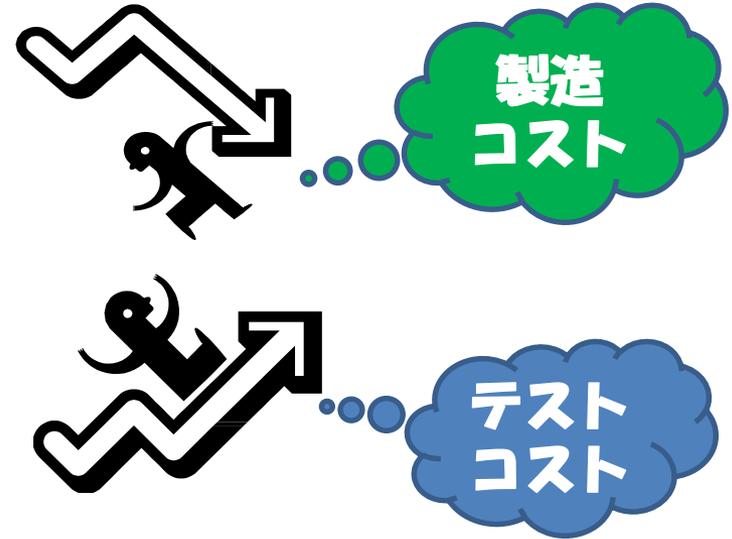
- **研究背景と研究目的**
- **AWGを用いた低歪み信号の発生**
- **位相差切り替え法の問題点とその対策**
- **理論解析**
- **実機による検証**
- **まとめ**

- **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問題点とその対策
- 理論解析
- 実機による検証
- 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

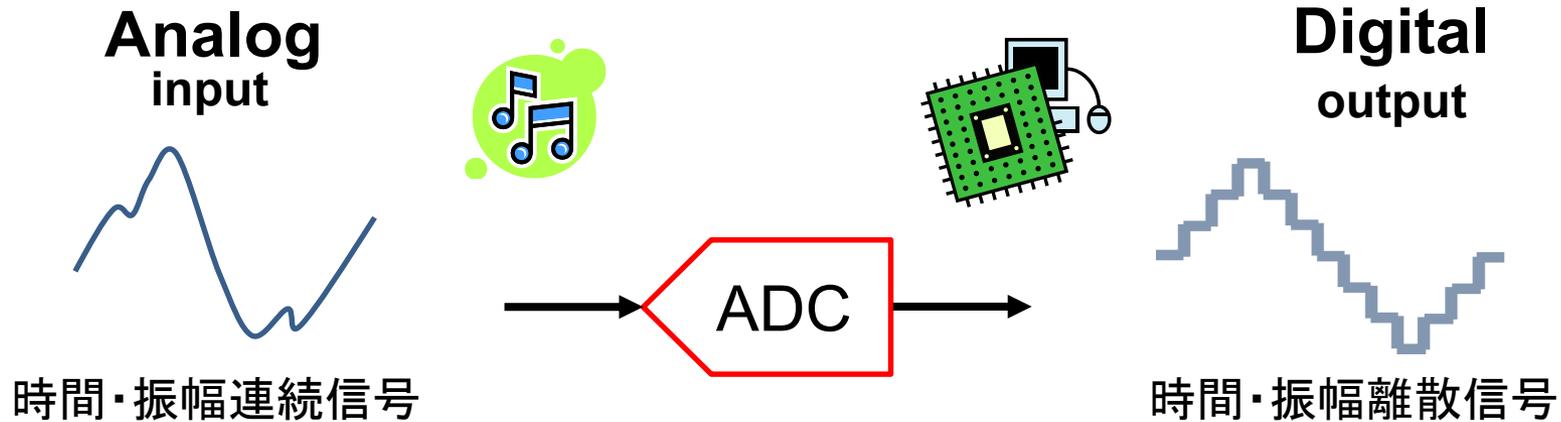
何もしなければ



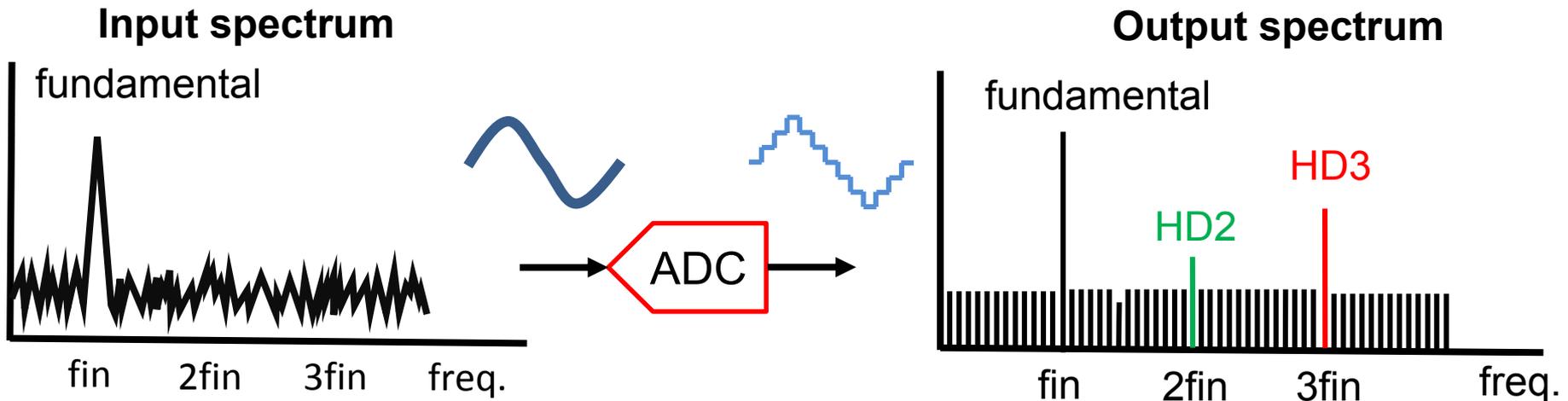
テストの低コスト化

⇒ 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

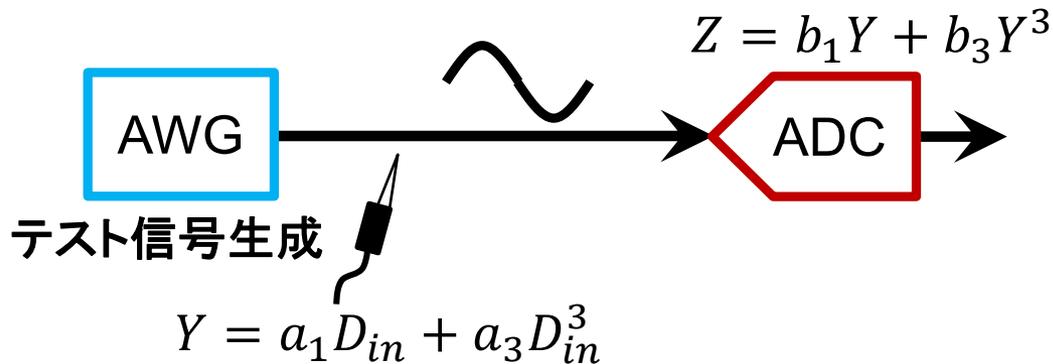


ADCの非線形性



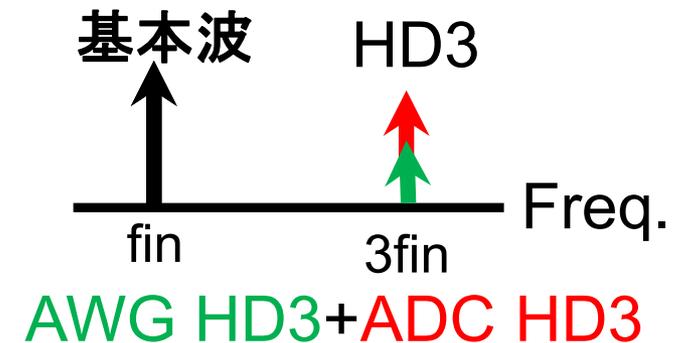
高調波ひずみの出現(HD2、HD3、...)

- 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



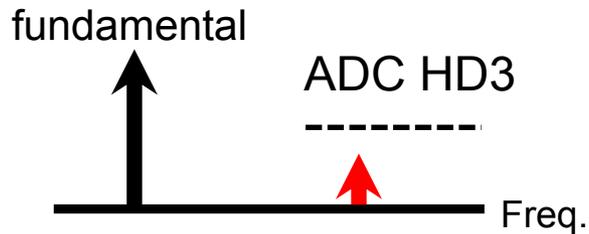
AWG内部の非線形性によるHD3

+

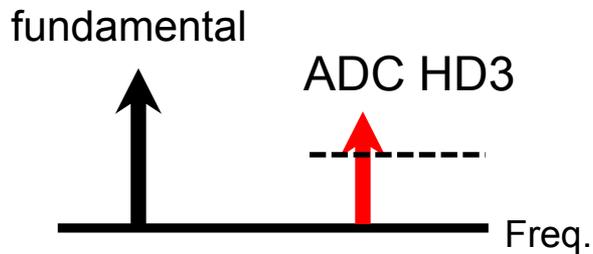
ADCの非線形性によるHD3

ADCテストで検出されるHD3が大 (over estimate)

ADC 線形性テスト



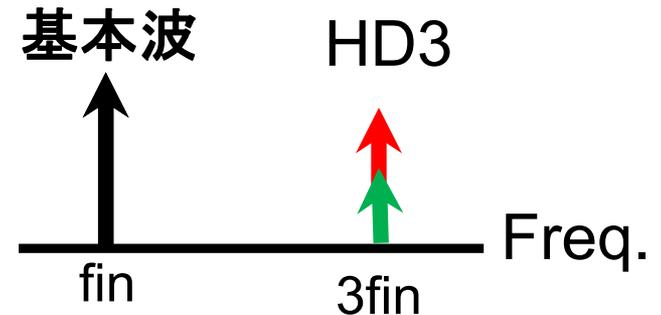
“出荷OK”



“出荷NG”



従来手法テスト結果



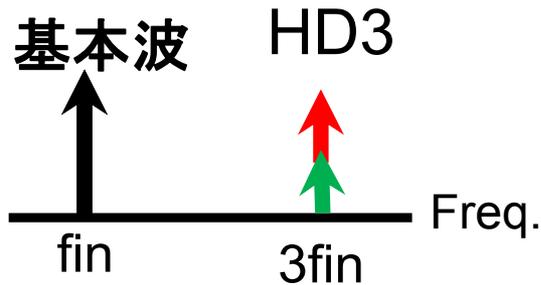
AWG HD3+ADC HD3

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

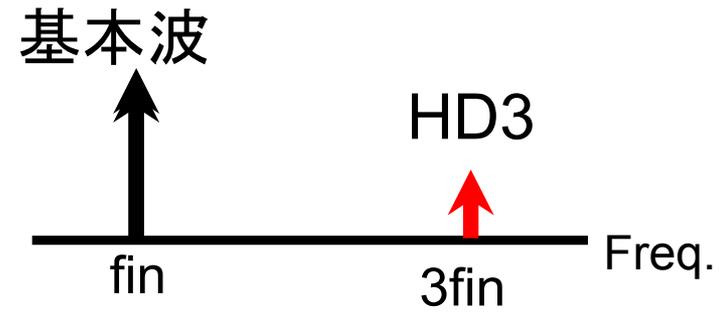
従来手法
テスト結果



AWG HD3+ADC HD3



提案手法
テスト結果



Only ADC HD3

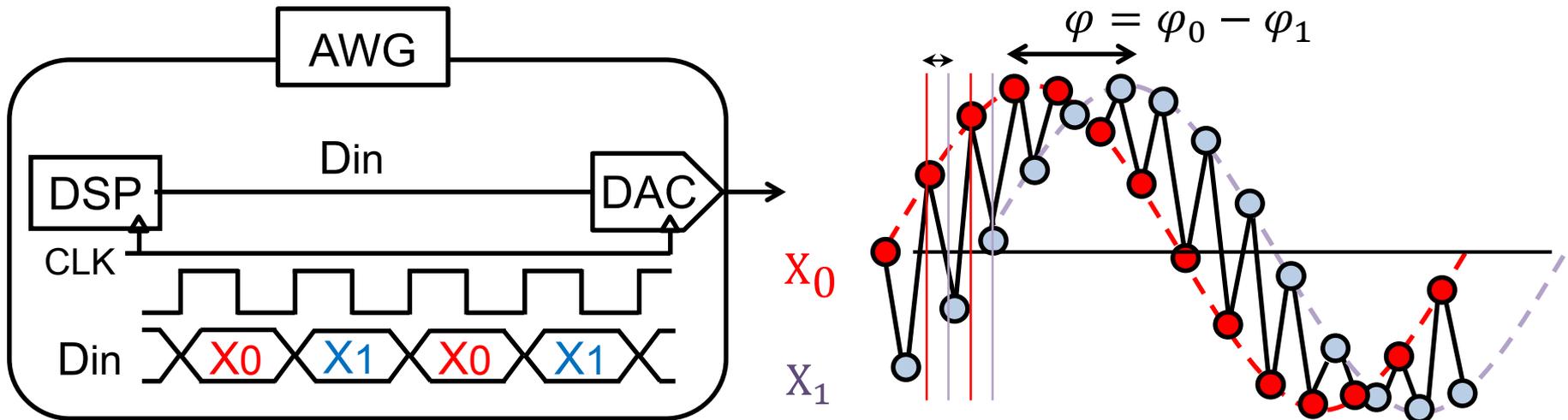
安価なAWGでの
高精度テストを可能にするアルゴリズム開発

理論解析、実機で検証

- 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問題点とその対策
- 理論解析
- 実機による検証
- 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

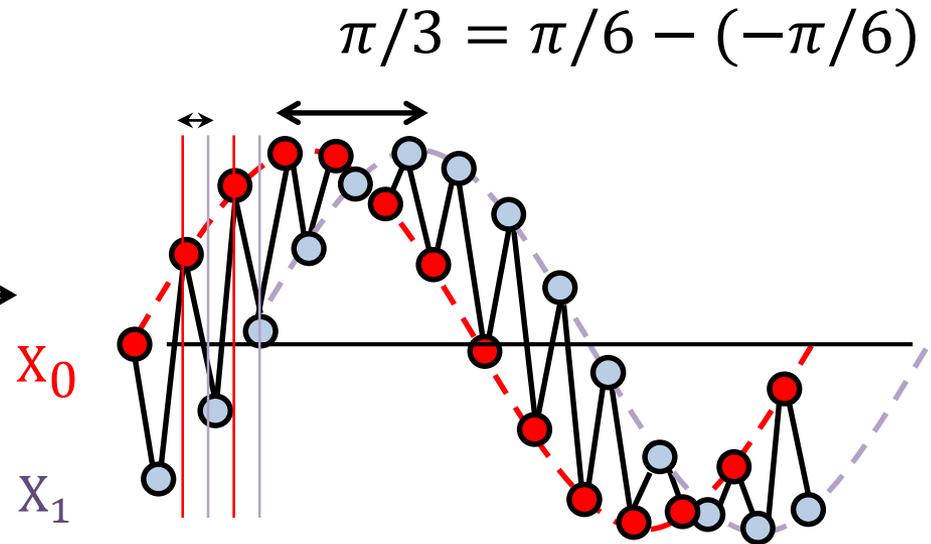
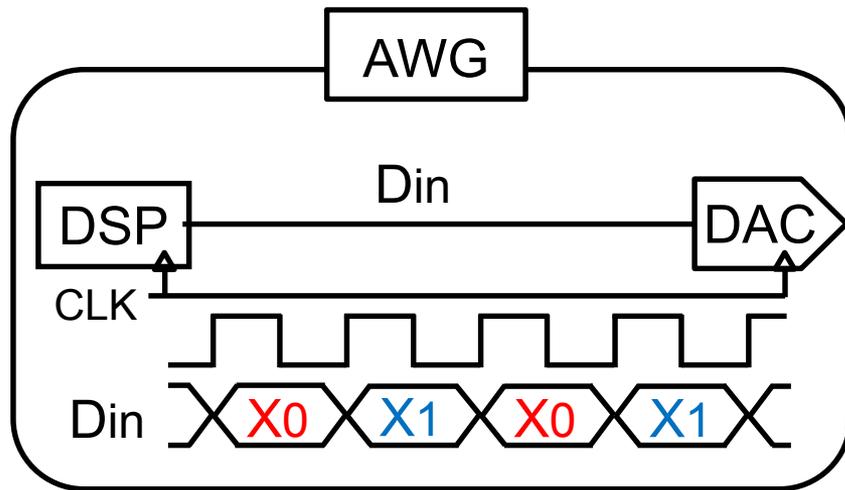


- $X_0 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_0) \dots n: \text{偶数}$
- $X_1 = A \cos(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_1) \dots n: \text{奇数}$

N次の高調波を打ち消す位相差 φ

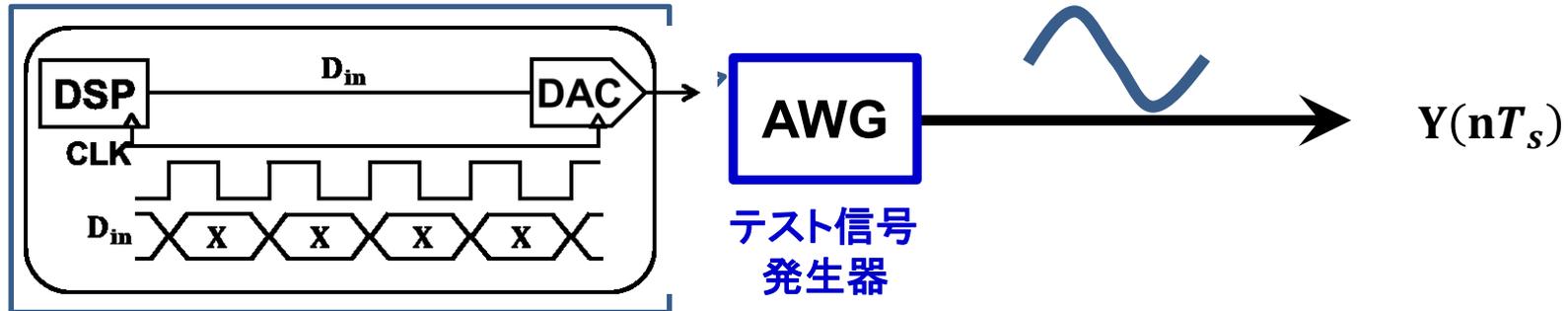
$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 = \pi/N$$

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



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

位相差は $\pi/3$



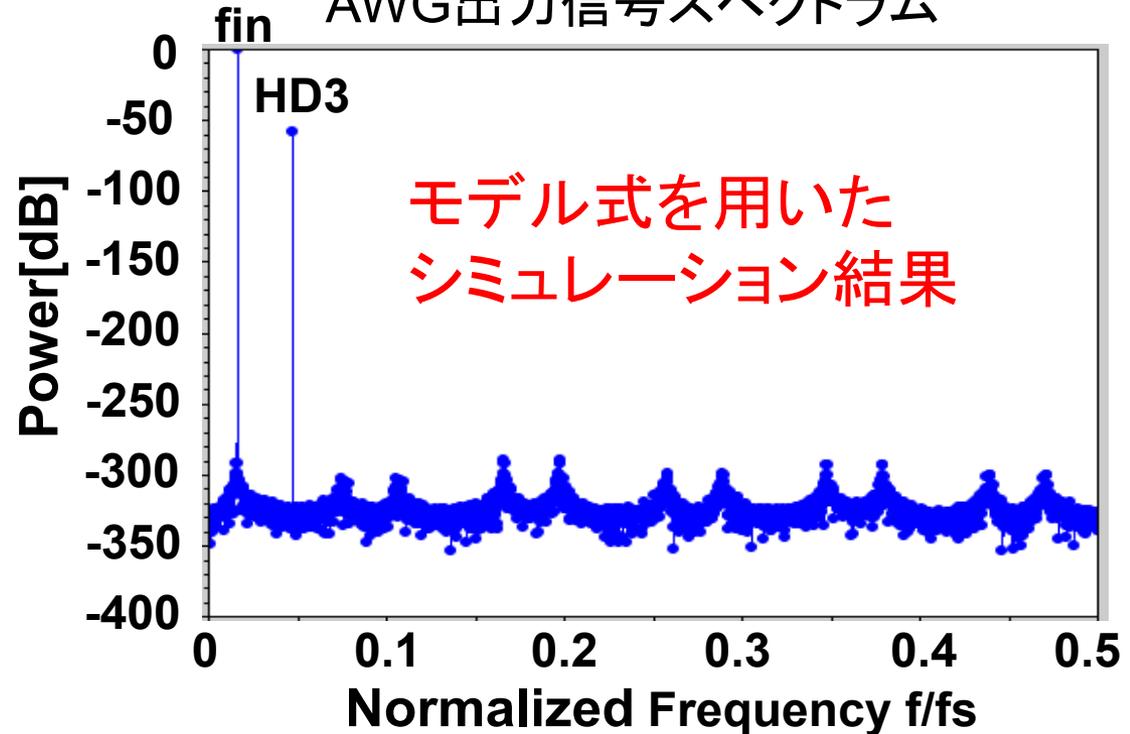
- AWG非線形モデル

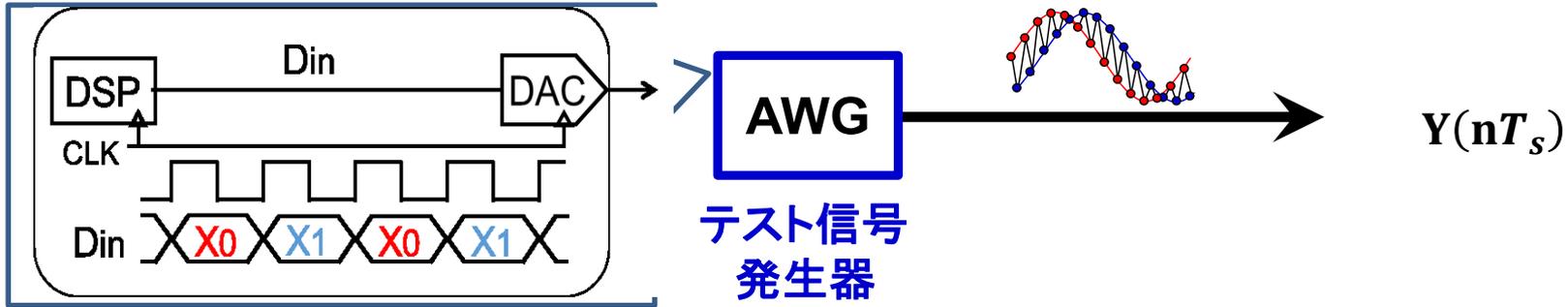
$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3$$

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

AWG由来の
HD3が発生

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





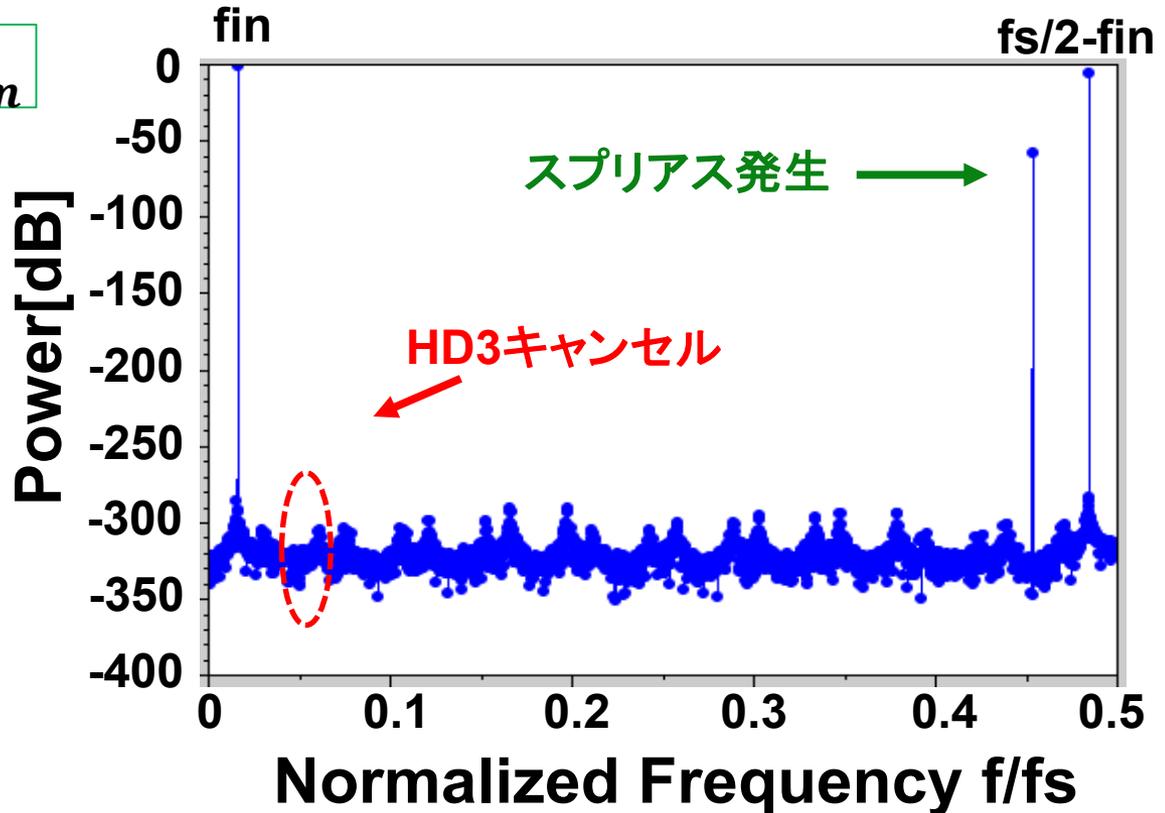
位相差切り替え信号AWG出力

- AWG出力非線形モデル

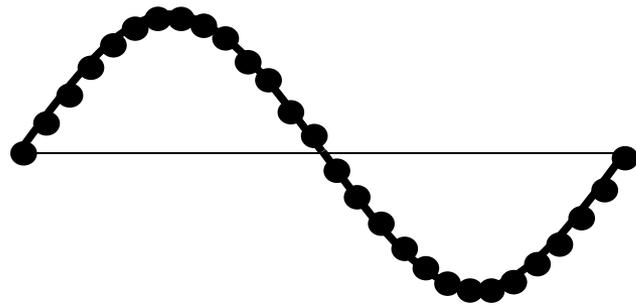
$$Y(nT_s) = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3$$

HD3をキャンセル

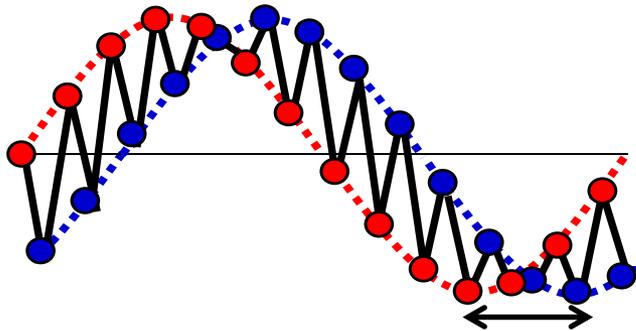
周波数 $f_s/2$ 付近に
スプリアスが発生



Phase Switching Conventional

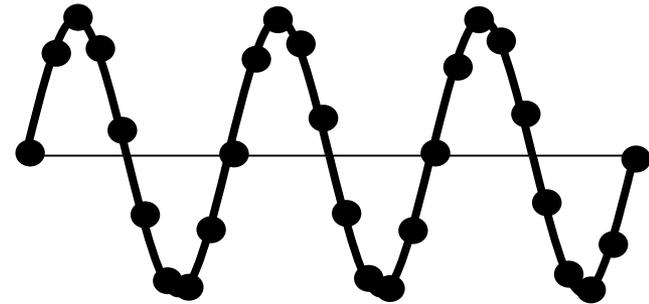


fundamental: f_{in}

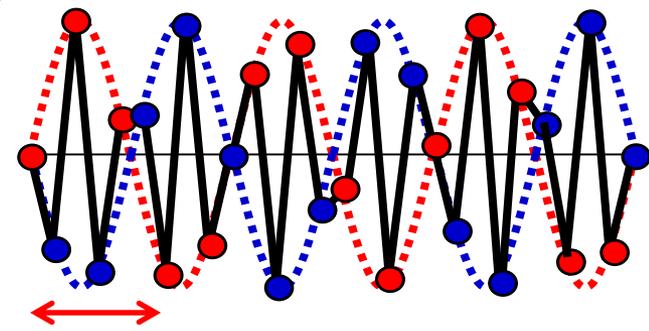


$$\Theta = \pi/3$$

3rd order non-linear system
Phase rotation by x3



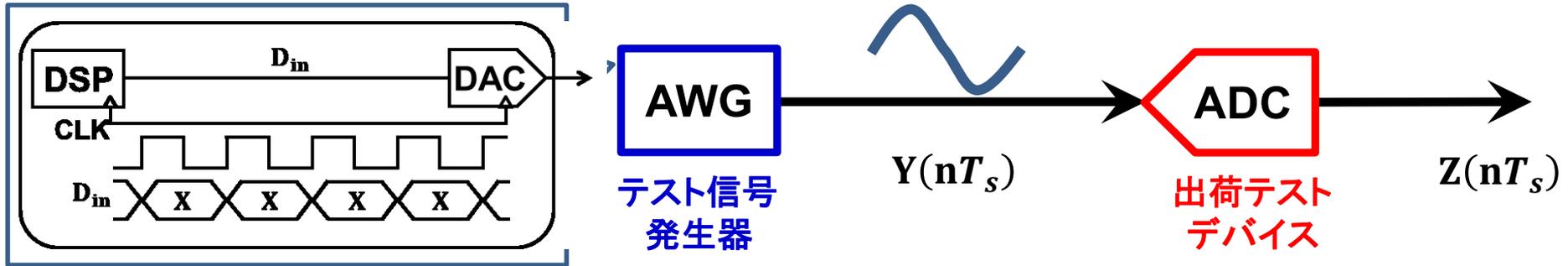
3rd harmonics: $3f_{in}$



$$3\Theta = \pi$$

位相差が π の
2つの信号は打ち消しあう

- 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問題点とその対策**
- 理論解析
- 実機による検証
- まとめ

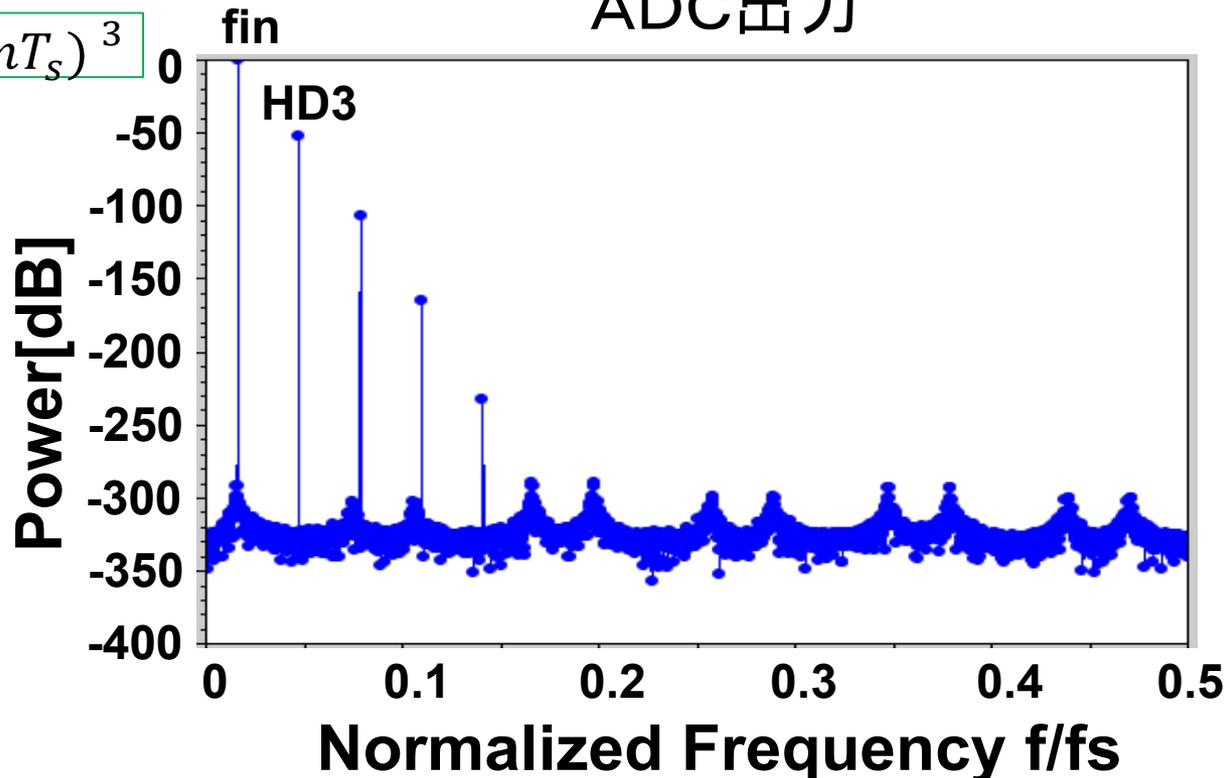


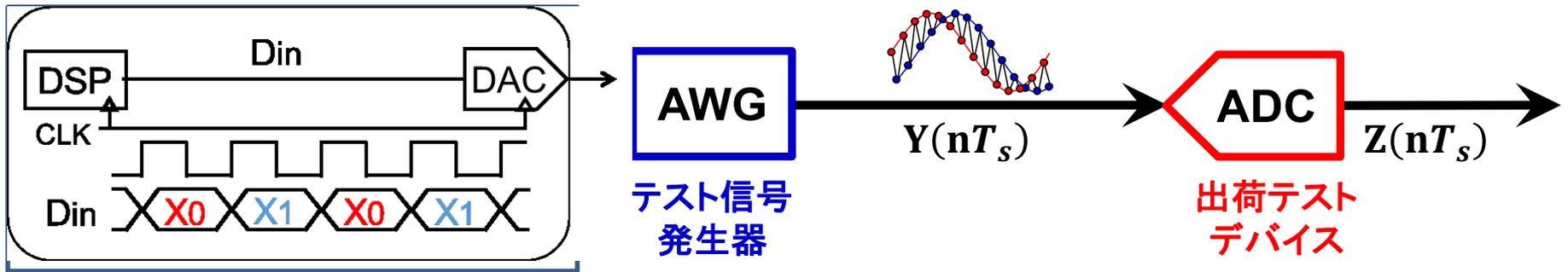
- ADC出力非線形モデル

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

AWG直接正弦波生成法による
ADC出力

AWG、ADC
両方による
HD3が発生





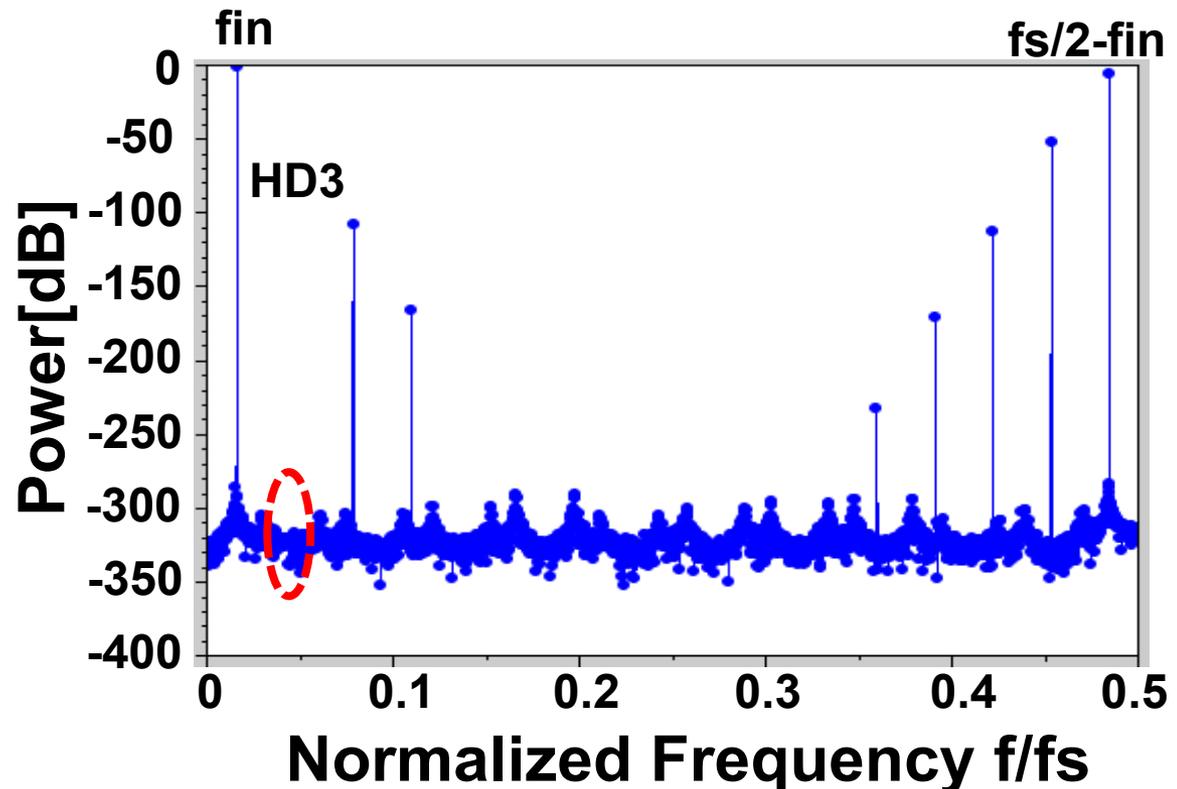
位相差切り替え信号ADC出力

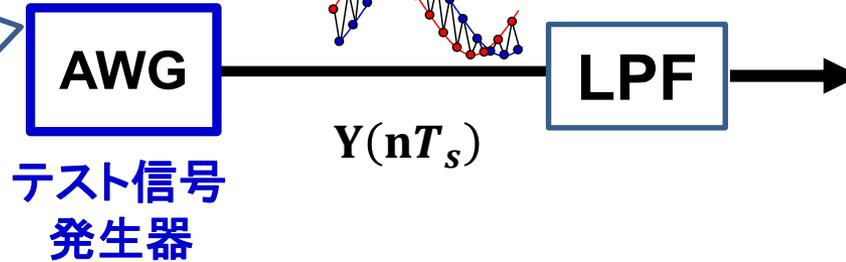
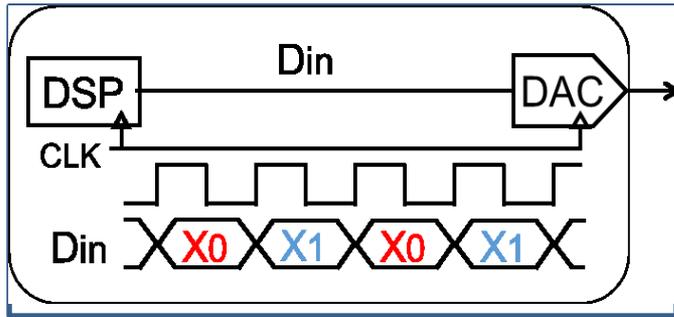
AWG由来の
HD3をキャンセル

周波数 $f_s/2$ 付近に
スプリアス発生



**ADC本来のHD3
までもキャンセル**





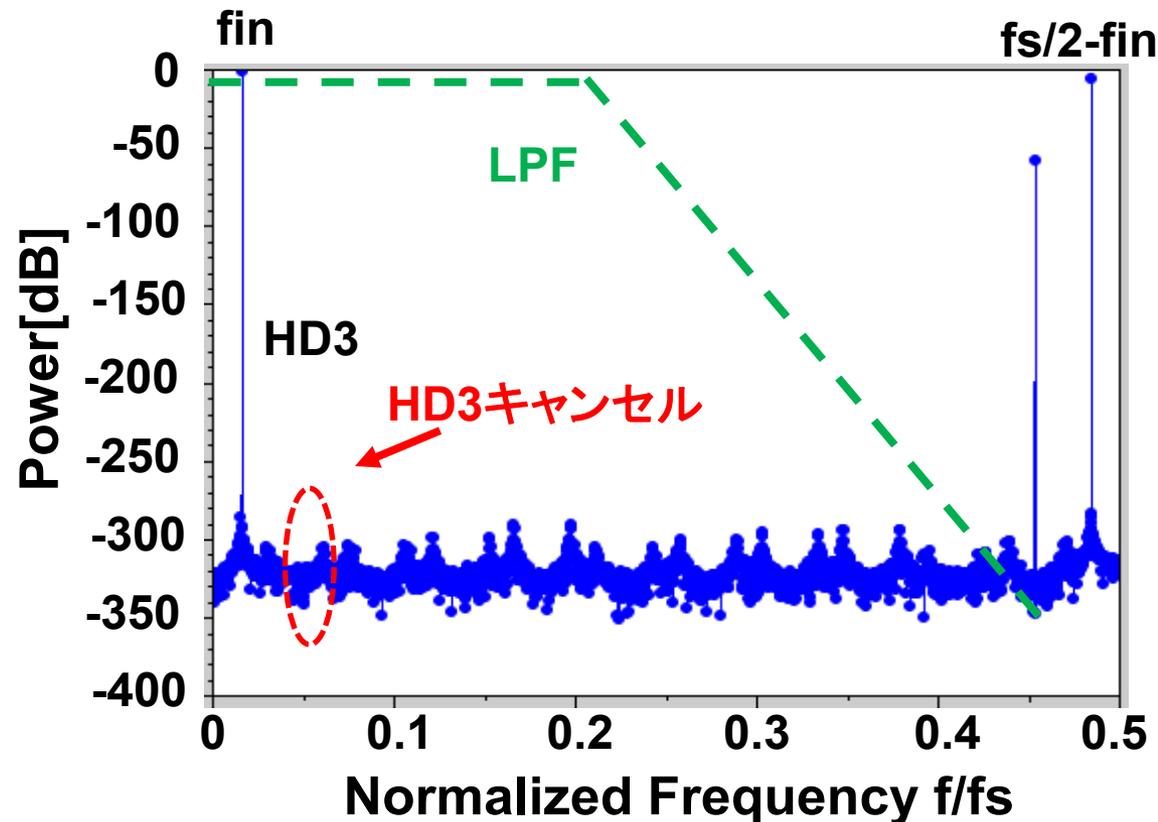
HD3をキャンセル

周波数 $f_s/2$ 付近に
スプリアスが発生

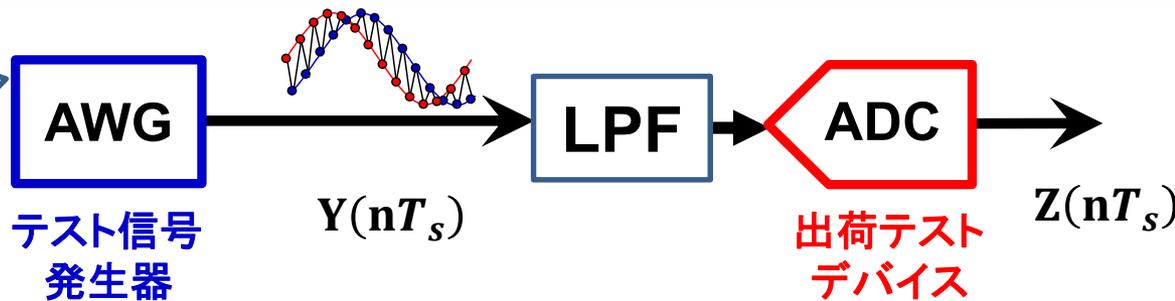
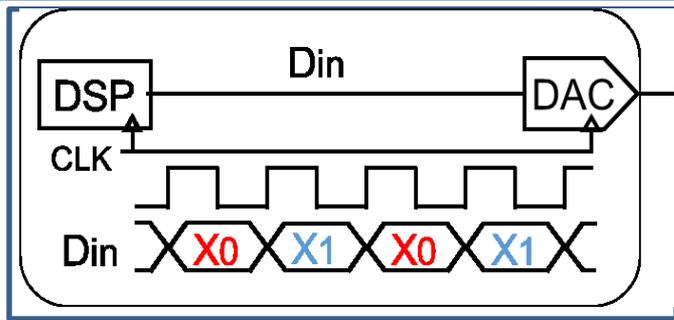


**LPFによる
スプリアス低減が容易**

位相差切り替え信号AWG出力



「位相差切り替え+LPF」によるADC HD3検出

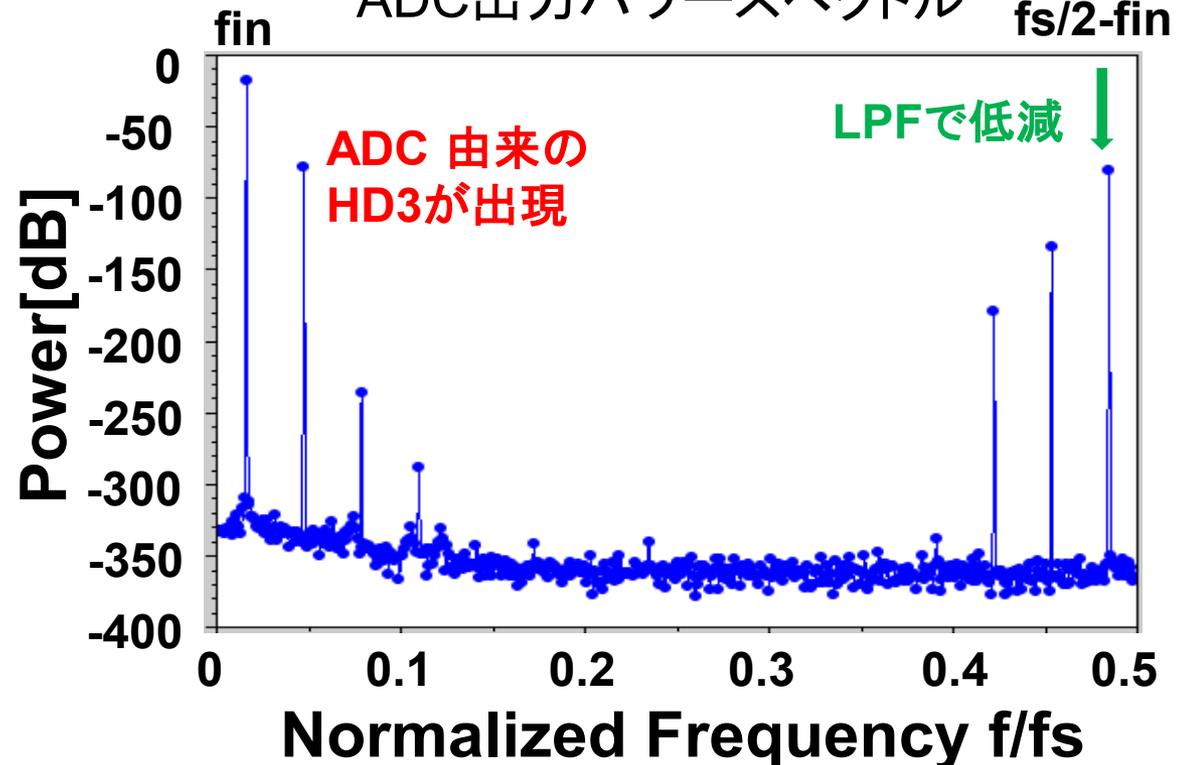


周波数 $f_s/2$ 付近の
スプリアスを
LPFで低減

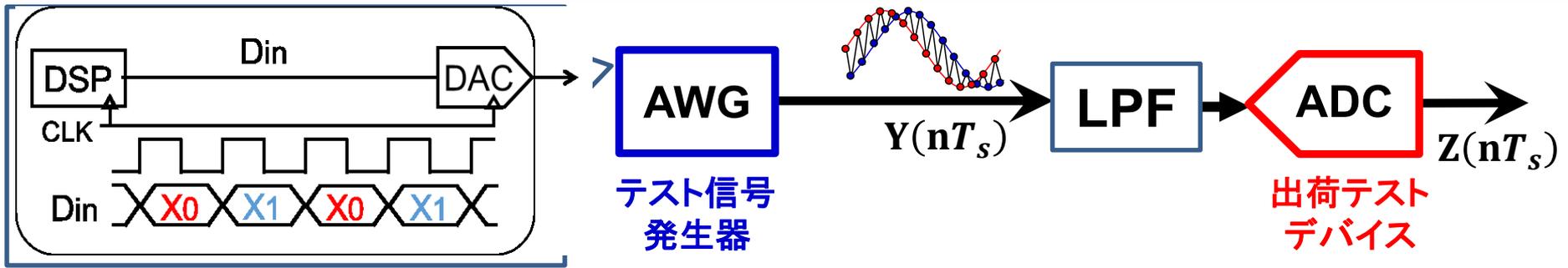


ADC本来のHD3が
測定可

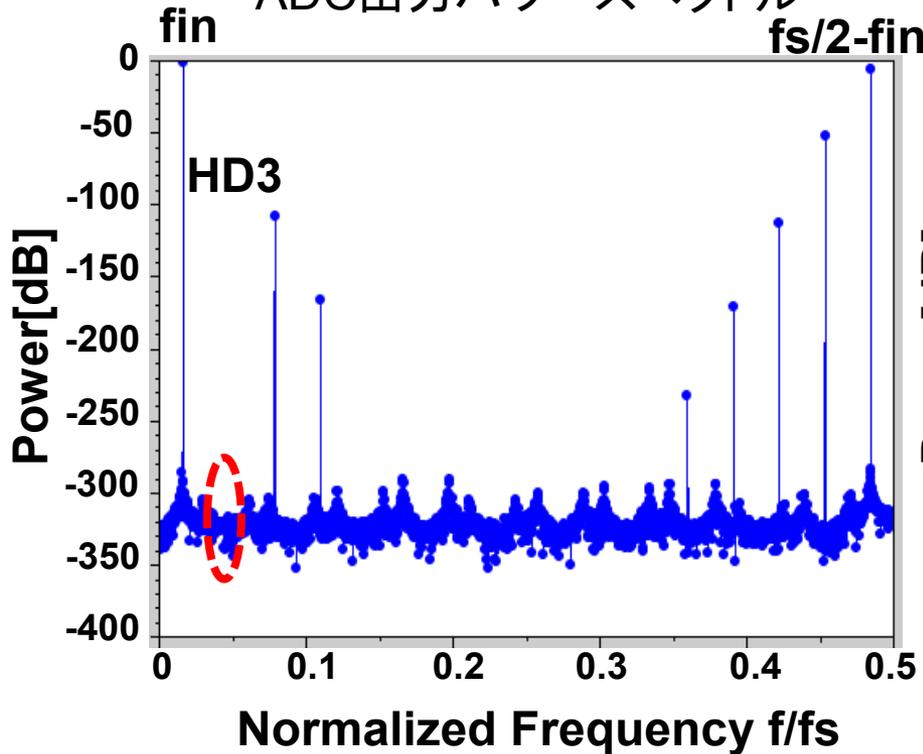
「位相差切り替え+LPF」での
ADC出力パワースペクトル



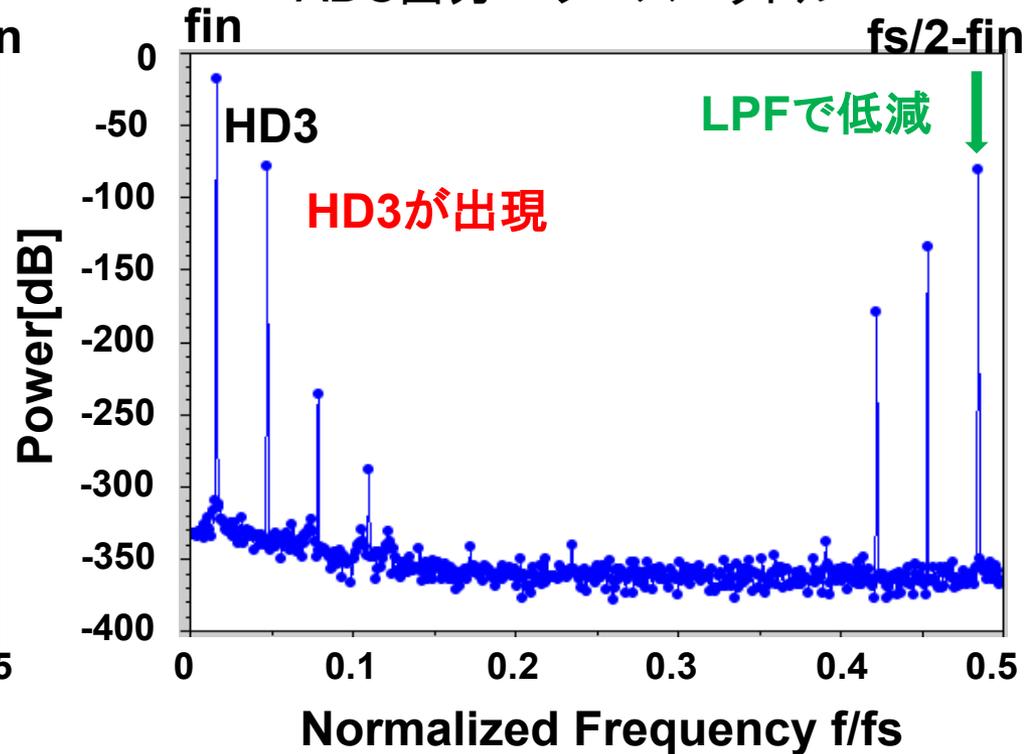
位相差切り替え法でのLPFの効果



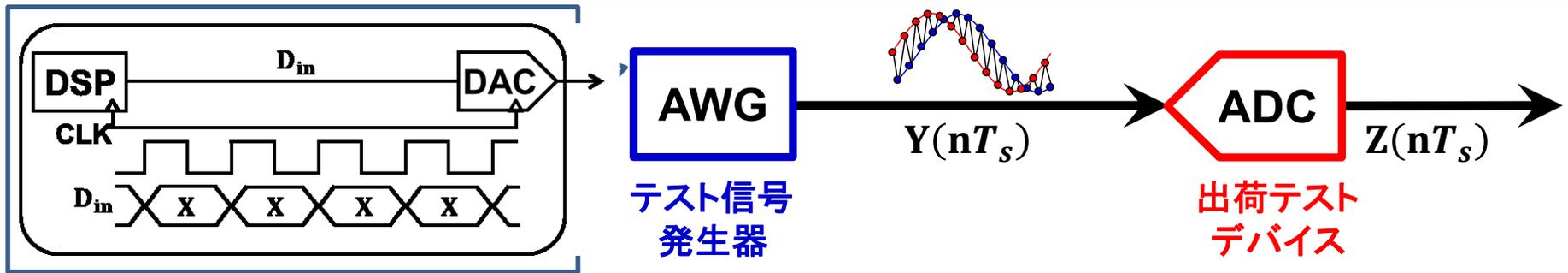
位相差切り替え、LPF無
ADC出カパワースペクトル



位相差切り替え、LPF有
ADC出カパワースペクトル



- 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問題点とその対策
- **理論解析**
- 実機による検証
- まとめ



* 位相差切り替え信号(DAC入力信号)

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

* AWG出力信号=テスト信号

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

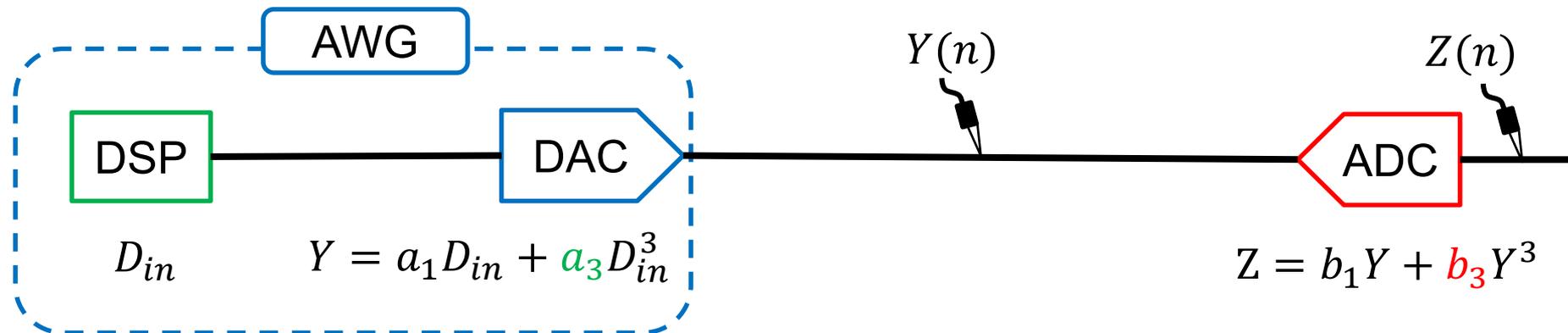
* ADC出力信号

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

ただし

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

- 位相差切り替え信号AWG出力



$$Y(nT_s) = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \sin(2\pi f_{in} nT_s)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - f_{in} \right) nT_s \right)$$

$$- \frac{1}{4} a_3 A^3 \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - 3f_{in} \right) nT_s \right)$$

HD3成分を
含まない

ADC出力波形 理論式

$$\begin{aligned}
 Z(nT_s) = & \left\{ b_1 P + b_3 \left(\frac{3}{4} P^3 + \frac{3}{2} P Q^2 + \frac{3}{2} P R^2 - \frac{3}{2} P Q R \right) \right\} \sin(2\pi f_{in} n T_s) \\
 & + b_3 \left(-\frac{1}{4} P^3 + \frac{3}{2} P Q R \right) \sin(2\pi 3 f_{in} n T_s) \\
 & + \left\{ b_1 Q + b_3 \left(\frac{3}{4} Q^3 + \frac{3}{2} P^2 Q - \frac{3}{4} P^2 R + \frac{3}{2} Q R^2 \right) \right\} \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - f_{in} \right) n T_s \right) \\
 & + b_3 \left(-\frac{3}{4} P^2 Q + \frac{3}{4} Q^2 R \right) \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} + f_{in} \right) n T_s \right) \\
 & + \left\{ b_1 R + b_3 \left(\frac{3}{4} R^3 - \frac{3}{4} P^2 Q + \frac{3}{2} P^2 R + \frac{3}{2} Q^2 R \right) \right\} \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - 3 f_{in} \right) n T_s \right) \\
 & + b_3 \left\{ -\frac{3}{4} P^2 R + \frac{3}{4} Q R^2 \right\} \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - 5 f_{in} \right) n T_s \right) \\
 & + \frac{3}{4} b_3 P Q^2 \sin(2\pi (f_s - f_{in}) n T_s) + b_3 \left\{ -\frac{3}{4} P Q^2 + \frac{3}{2} P Q R \right\} \sin(2\pi (f_s - 3 f_{in}) n T_s) \\
 & + b_3 \left(\frac{3}{4} P R^2 - \frac{3}{2} P Q R \right) \sin(2\pi (f_s - 5 f_{in}) n T_s) - \frac{3}{4} b_3 P R^2 \sin(2\pi (f_s - 7 f_{in}) n T_s) \\
 & + \frac{1}{4} b_3 Q^3 \cos \left(2\pi \left(\frac{3}{2} f_s - 3 f_{in} \right) n T_s \right) + \frac{3}{4} b_3 Q^2 R \cos \left(2\pi \left(\frac{3}{2} f_s - 5 f_{in} \right) n T_s \right) \\
 & + \frac{3}{4} b_3 Q R^2 \cos \left(2\pi \left(\frac{3}{2} f_s - 7 f_{in} \right) n T_s \right) + \frac{1}{4} b_3 R^3 \cos \left(2\pi \left(\frac{3}{2} f_s - 9 f_{in} \right) n T_s \right)
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{P} \equiv \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\mathbf{a}_1 A + \frac{3}{4} \mathbf{a}_3 A^3 \right)$$

(Y(nTs)式の f_{in} 成分の係数)

$$\mathbf{Q} \equiv \frac{1}{2} \left(\mathbf{a}_1 A + \frac{3}{4} \mathbf{a}_3 A^3 \right)$$

(Y(nTs)式の $(f_s/2 - f_{in})$ 成分の係数)

$$\mathbf{R} \equiv -\frac{1}{4} \mathbf{a}_3 A^3$$

(Y(nTs)式の $(f_s/2 - 3f_{in})$ 成分の係数)

$$\begin{aligned}
Z(nT_s) &= Z_{f_{in}} \sin(2\pi f_{in} nT_s) \\
&+ Z_{3f_{in}} \sin(2\pi \cdot 3f_{in} \cdot nT_s) \longleftarrow \text{HD3} \\
&+ \dots \\
&\quad \vdots \\
&+ Z_{-f_{in}} \sin(2\pi(f_s - f_{in})nT_s) \quad \text{HD3に重畳する} \\
&+ Z_{-3f_{in}} \sin(2\pi \cdot (f_s - 3f_{in}) \cdot nT_s) \longleftarrow \text{エイリアシング成分} \\
&+ \dots \quad = -Z_{-3f_{in}} \sin(2\pi \cdot 3f_{in} \cdot nT_s)
\end{aligned}$$

位相差切り替え信号におけるHD3

HD3成分 + 折り重なるエイリアシング成分

ADC出力の理論式三次高調波解析

三次高調波成分

$$b_3 \left\{ -\frac{1}{4}P^3 + \frac{3}{2}PQR \right\} \sin(2\pi 3f_{in}nT_s)$$

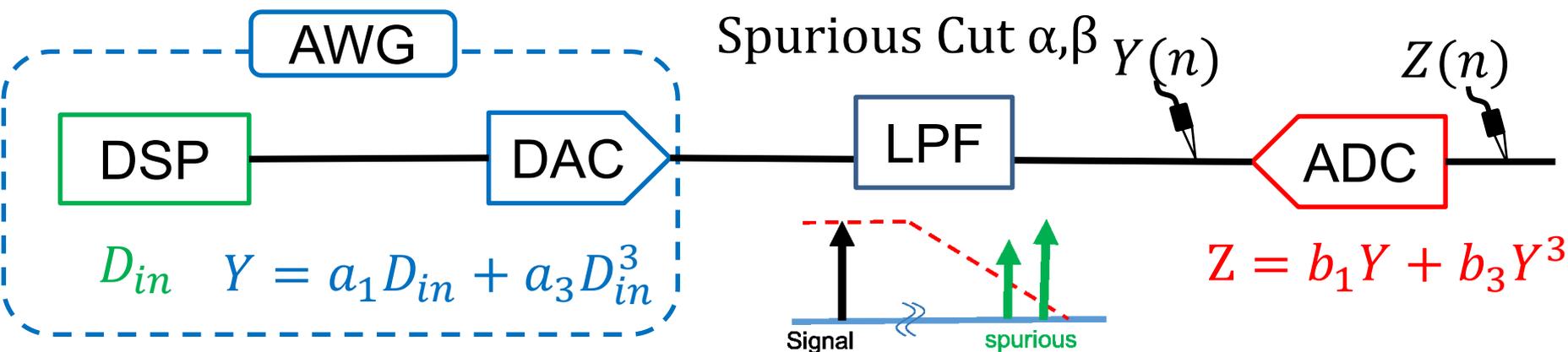
三次高調波の折り返し

$$b_3 \left\{ -\frac{3}{4}PQ^2 + \frac{3}{2}PQR \right\} \sin(2\pi(f_s - 3f_{in})nT_s) \\ = -\sin(2\pi 3f_{in})$$

足し合わせると

$$b_3 \left\{ -\frac{1}{4}P^3 + \frac{3}{2}PQR - \left(-\frac{3}{4}PQ^2 + \frac{3}{2}PQR \right) \right\} \\ = b_3 \left\{ -\frac{1}{4} * \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^3 - \left(-\frac{3}{4} * \frac{\sqrt{3}}{2} * \left(\frac{1}{2} \right)^2 \right) \right\} \left(a_1A + \frac{3}{4}a_3A^3 \right)^3 = 0$$

三次高調波が
キャンセル



$$Y(nT_s) = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \sin(2\pi f_{in} nT_s) \quad \leftarrow \text{基本波}$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \underline{\alpha} \cdot \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right) \cos \left(2\pi \left(\frac{f_s}{2} - f_{in} \right) nT_s \right)$$

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

フィルタ

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

スプリアス

三次高調波成分

$$b_3 \left\{ -\frac{1}{4} P^3 + \frac{3}{2} \alpha \beta PQR \right\} \sin(2\pi 3f_{in} nT_s)$$

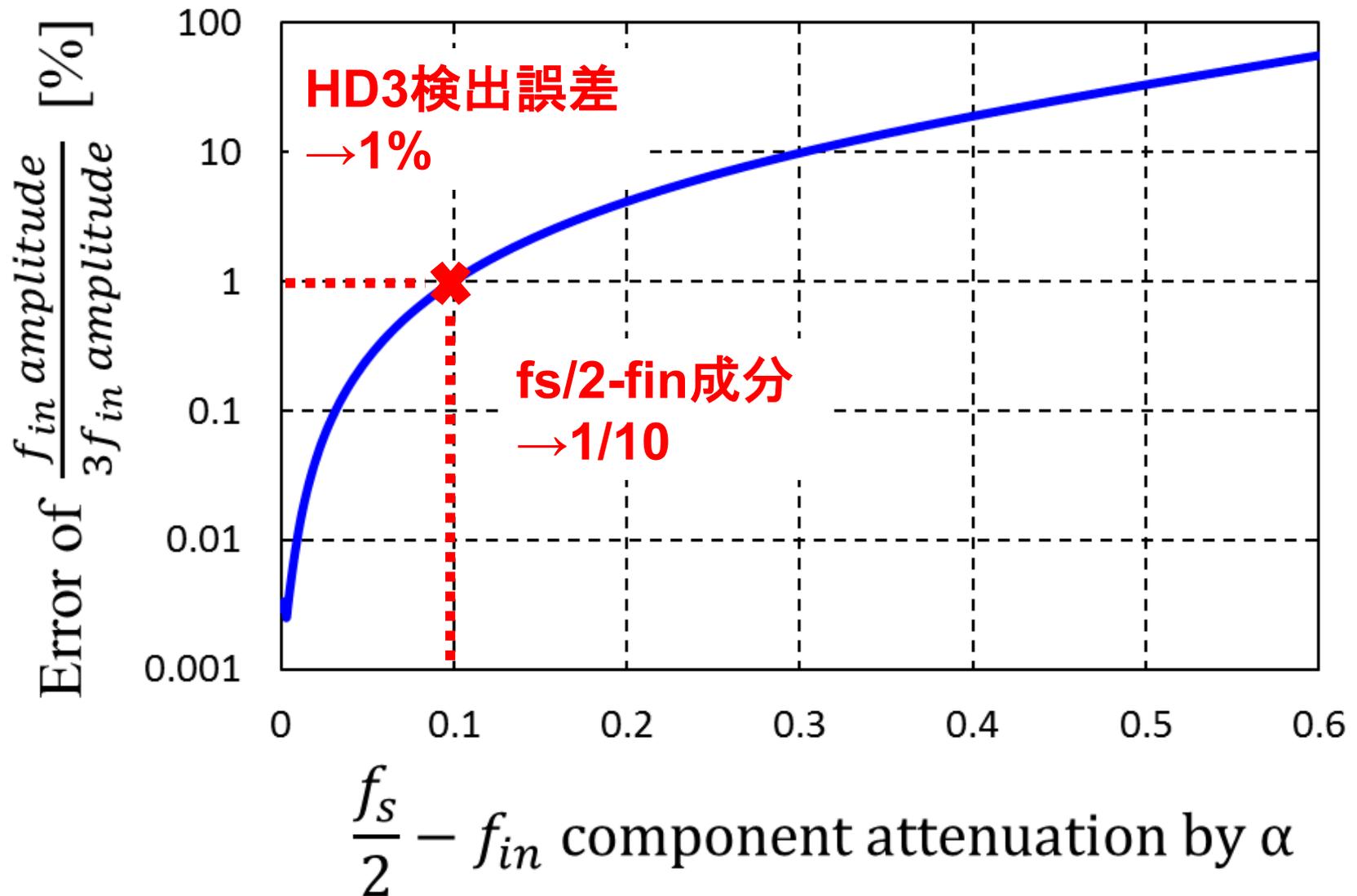
三次高調波の折り返し

$$b_3 \left\{ -\frac{3}{4} \alpha^2 PQ^2 + \frac{3}{2} \alpha \beta PQR \right\} \sin(2\pi (f_s - 3f_{in}) nT_s)$$

足し合わせると

$$\begin{aligned} & b_3 \left\{ -\frac{1}{4} P^3 + \frac{3}{2} \alpha \beta PQR - \left(-\frac{3}{4} \alpha^2 PQ^2 + \frac{3}{2} \alpha \beta PQR \right) \right\} \\ &= b_3 \left\{ -\frac{1}{4} * \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^3 - \alpha^2 \left(-\frac{3}{4} * \frac{\sqrt{3}}{2} * \left(\frac{1}{2} \right)^2 \right) \right\} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right)^3 \\ &= -b_3 \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{8} \left(a_1 A + \frac{3}{4} a_3 A^3 \right)^3 \right\} \underline{(1 - \alpha^2)} \end{aligned}$$

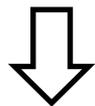
スプリアス低減
による3次成分の出現



- 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問題点とその対策
- 理論解析
- **実機による検証**
- まとめ

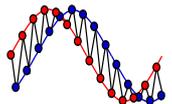
信号プログラムの生成

PC1



AWG

Agilent
33220A



スプリアス低減

オシロスコープ,
スペクトラムアナライザ

LPF

DUT
ADC

ADI
AD7356

ADC出カスペクトル取得

デジタル出力

..01011..

CLK

3.478261
MHz

PC2

FFT

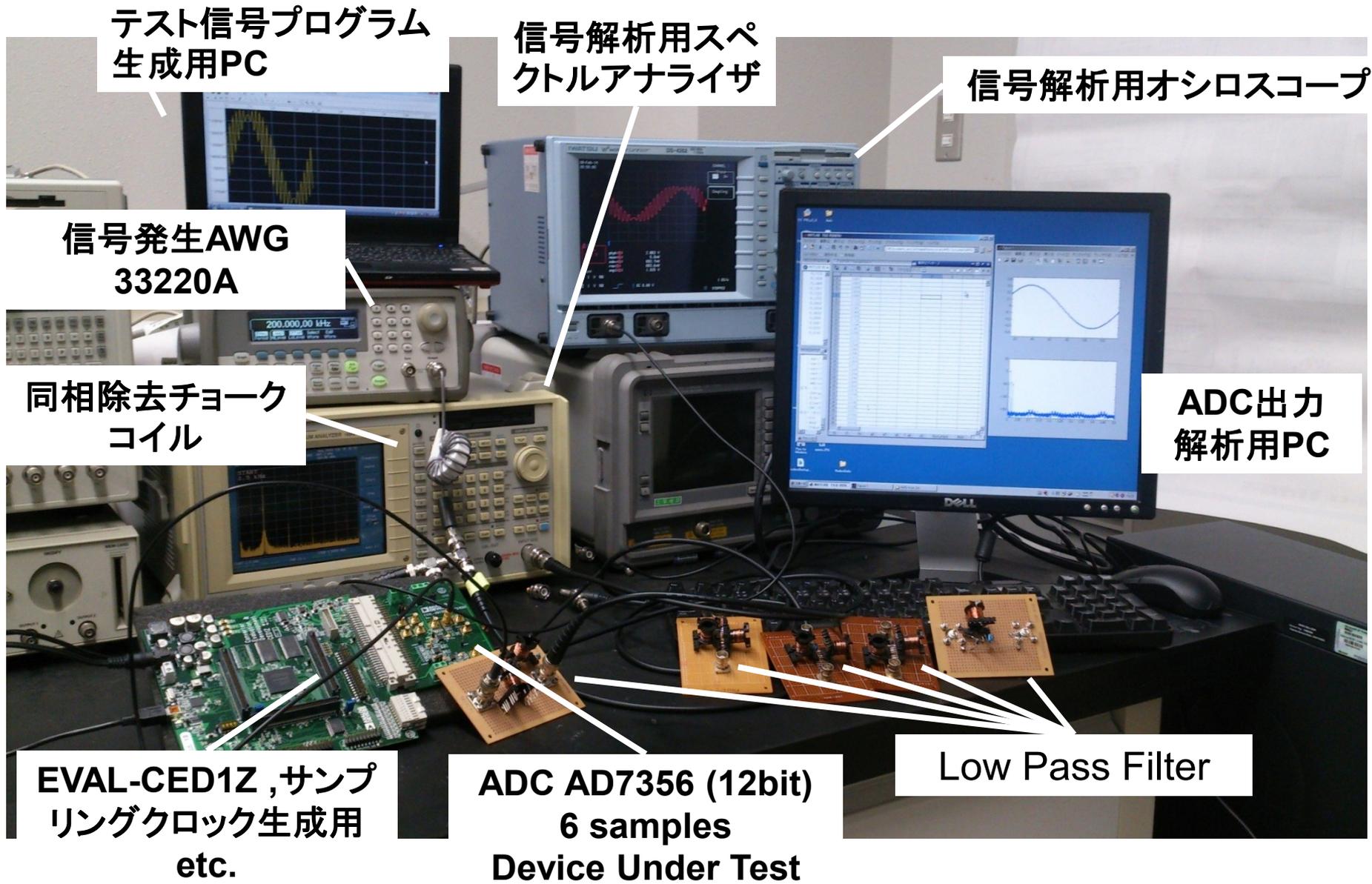


AD7356
output

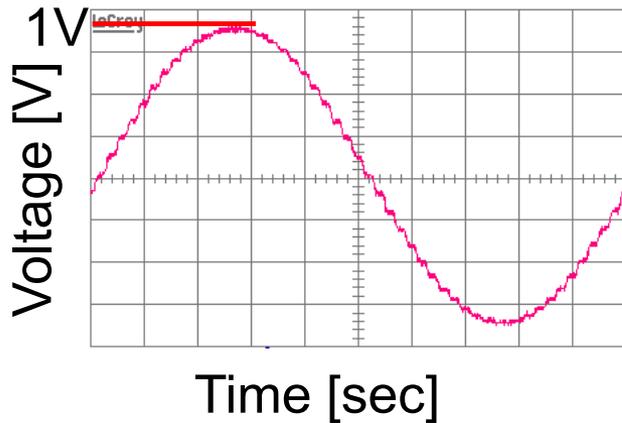
評価用
ボード

EVAL
CED1Z

信号発生



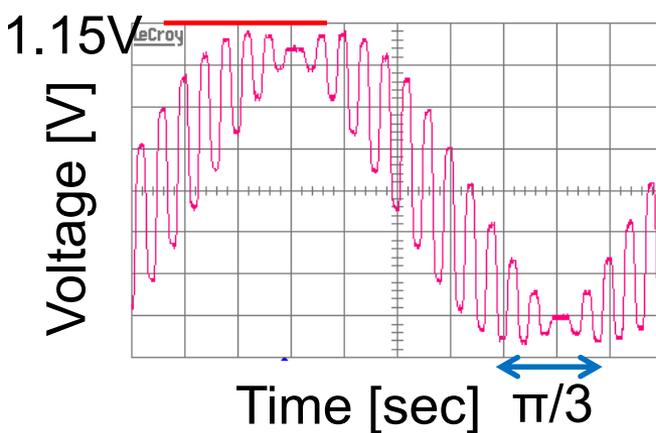
Waveform



直接正弦波生成法

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

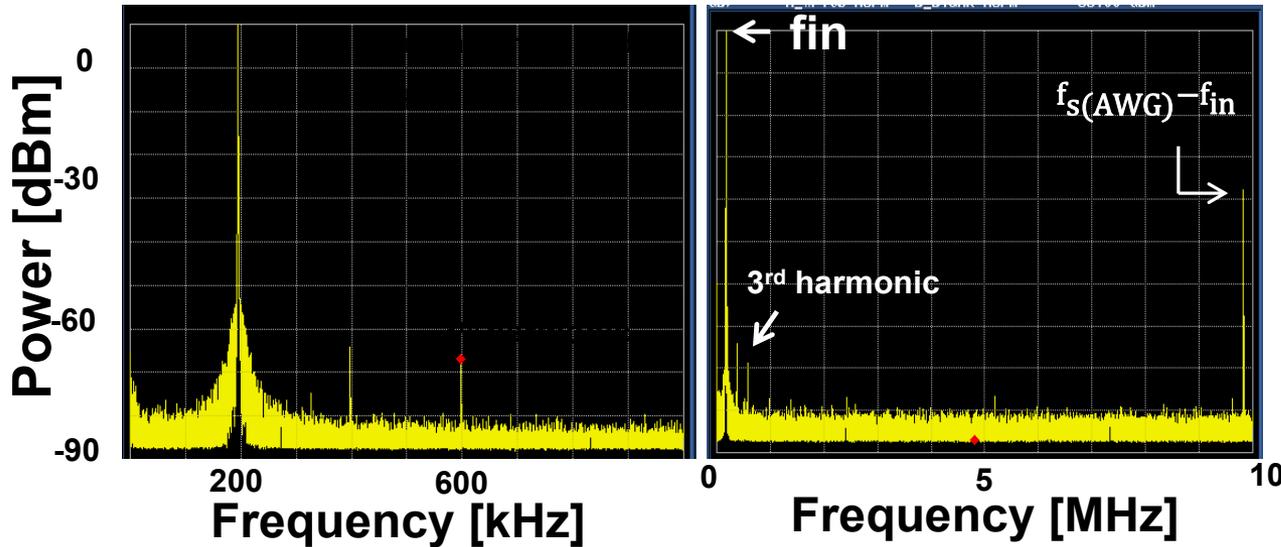
Waveform



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



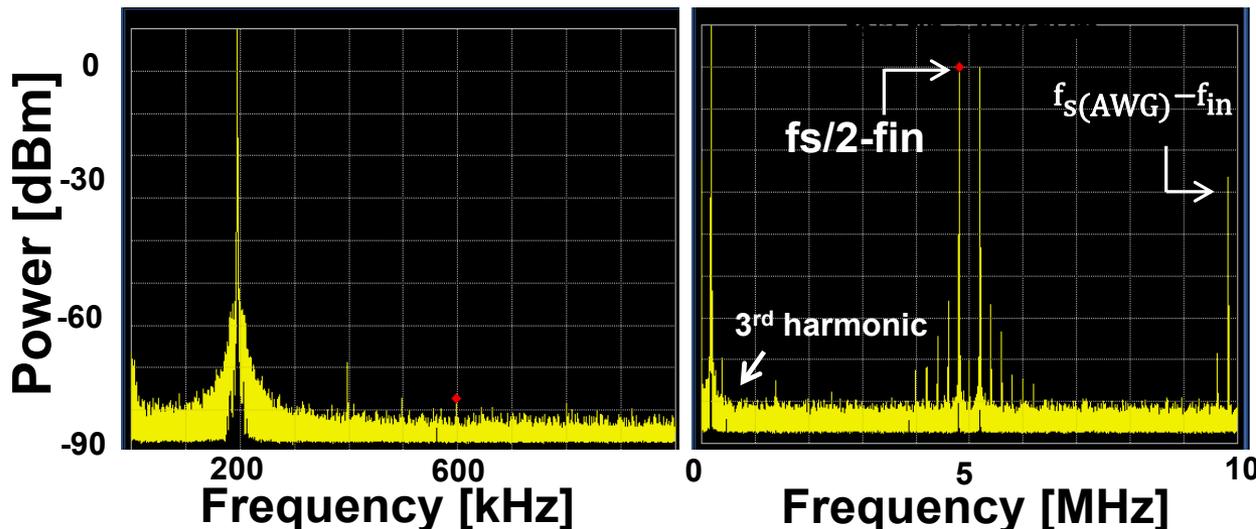
**Fundamental
: 9.0dBm**

**HD3:
-68.0dBm**



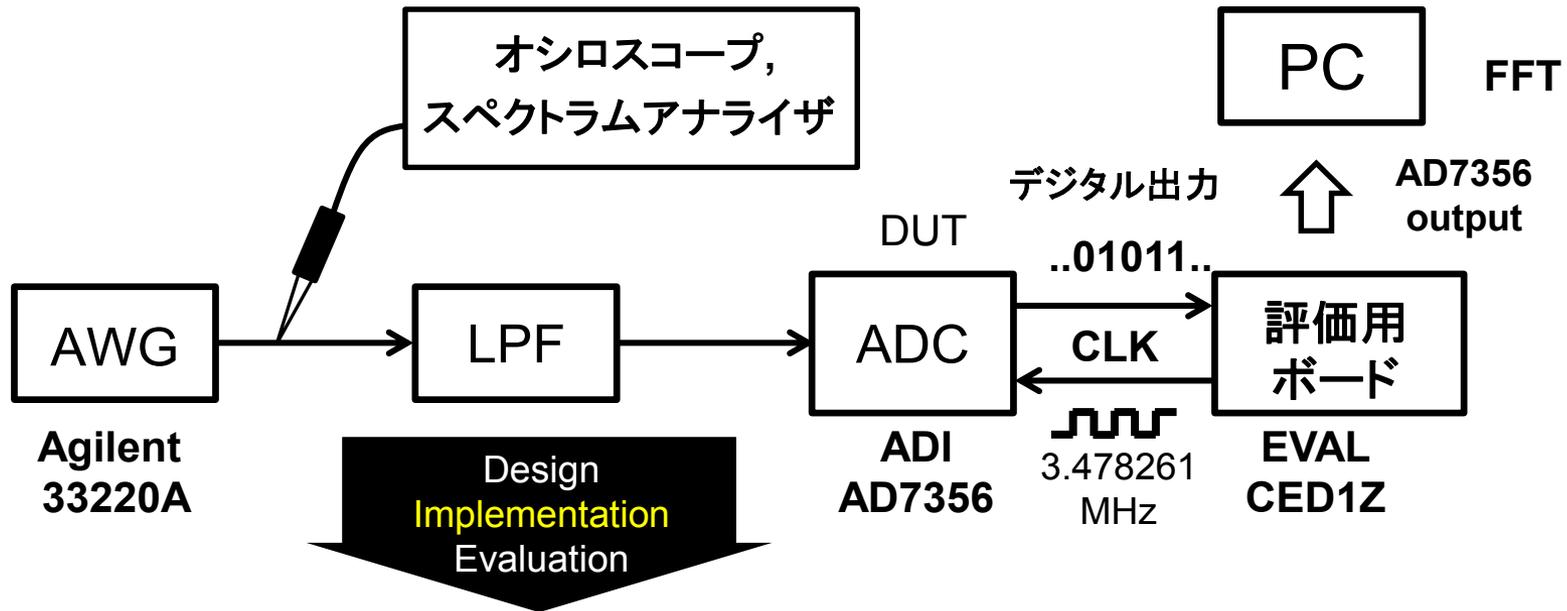
-10.2dBm

位相差切り替え手法

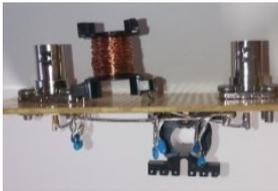


**Fundamental:
9.0dBm**

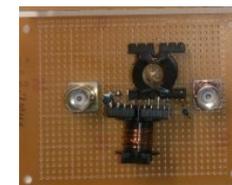
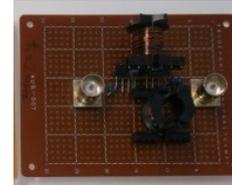
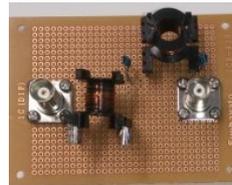
**HD3:
-78.2dBm**



fc=250kHz



fc=1MHz fc=2MHz fc=2.7MHz fc=3.7MHz



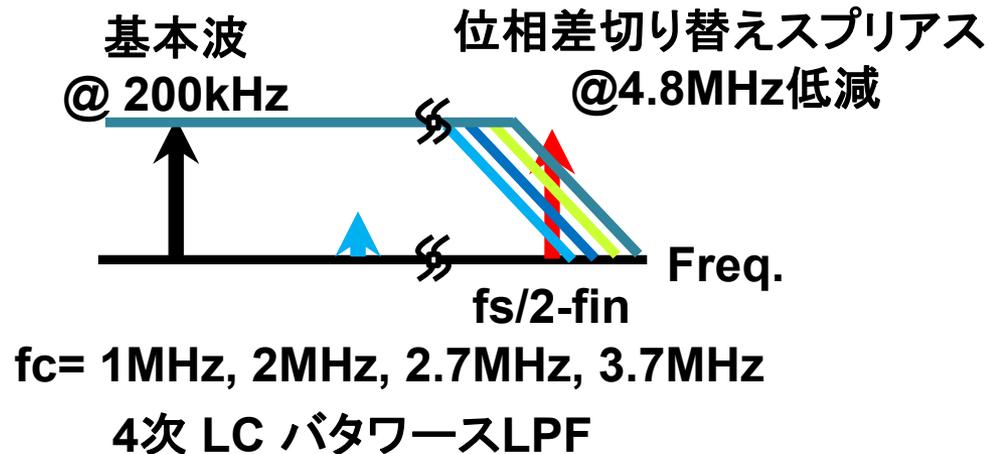
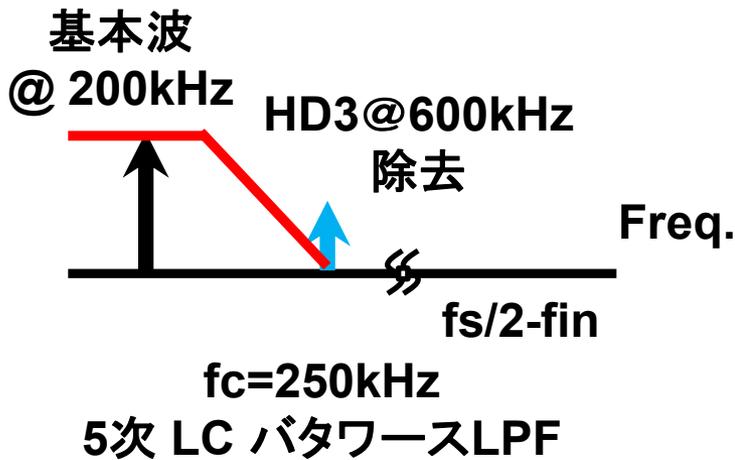
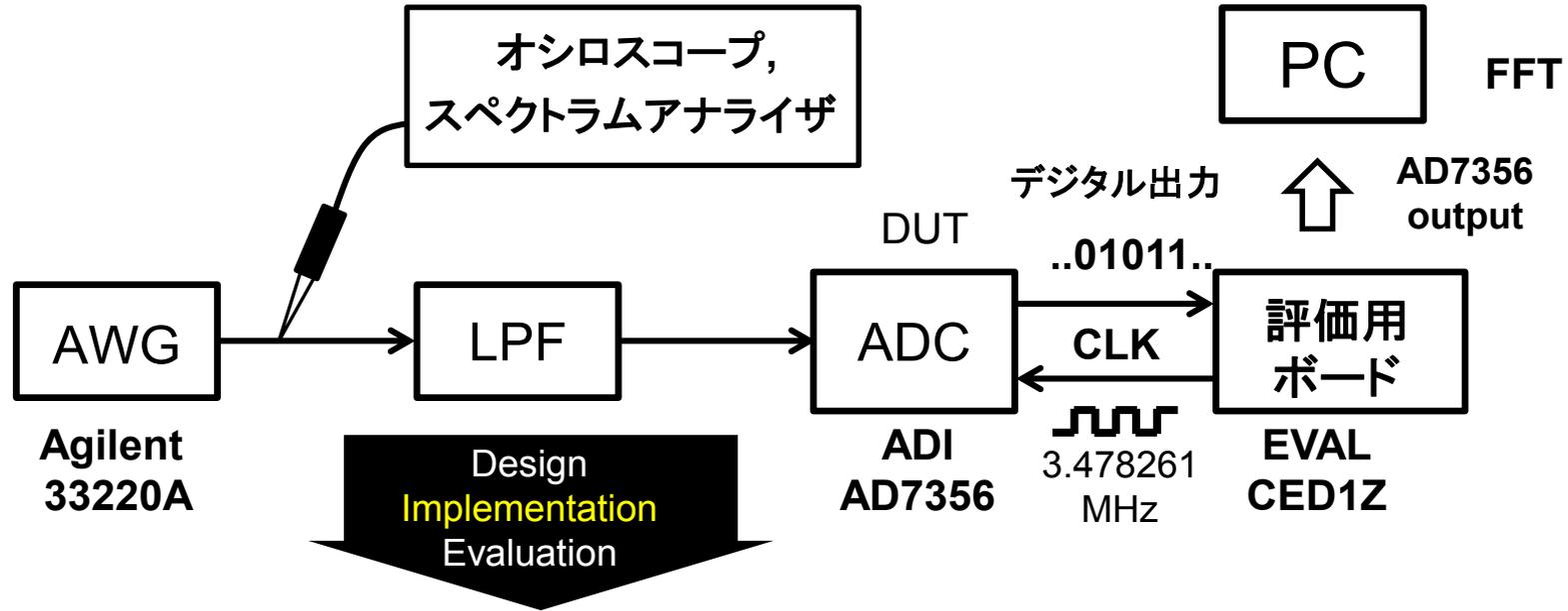
5th LCバターースフィルタ

HD3の低減用
=ADC本来のHD3測定

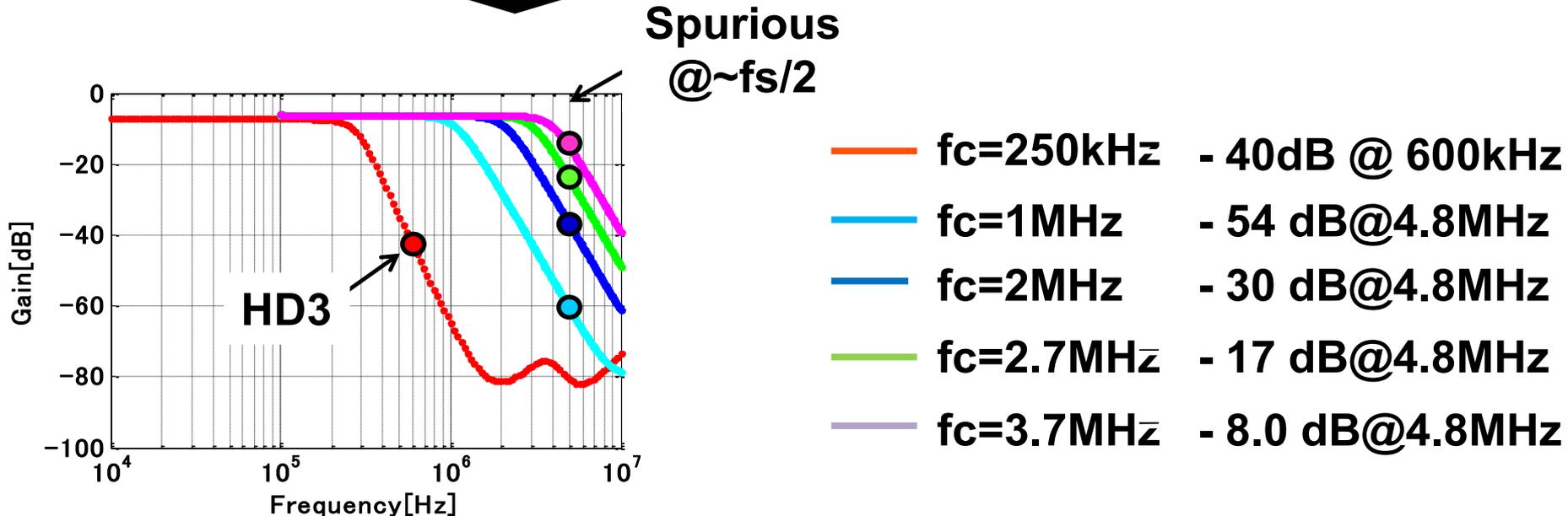
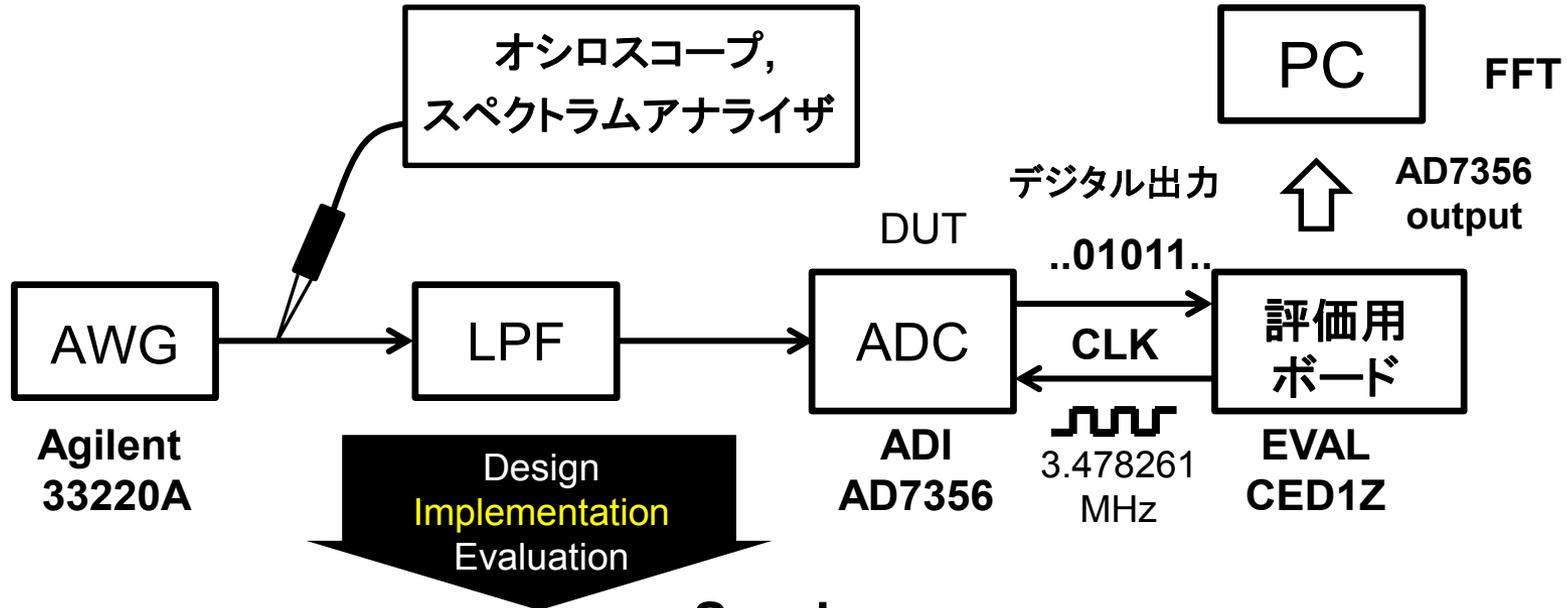
4th LCバターースフィルタ

fs/2-finのスプリアス低減用
=ADCのHD3検出誤差測定

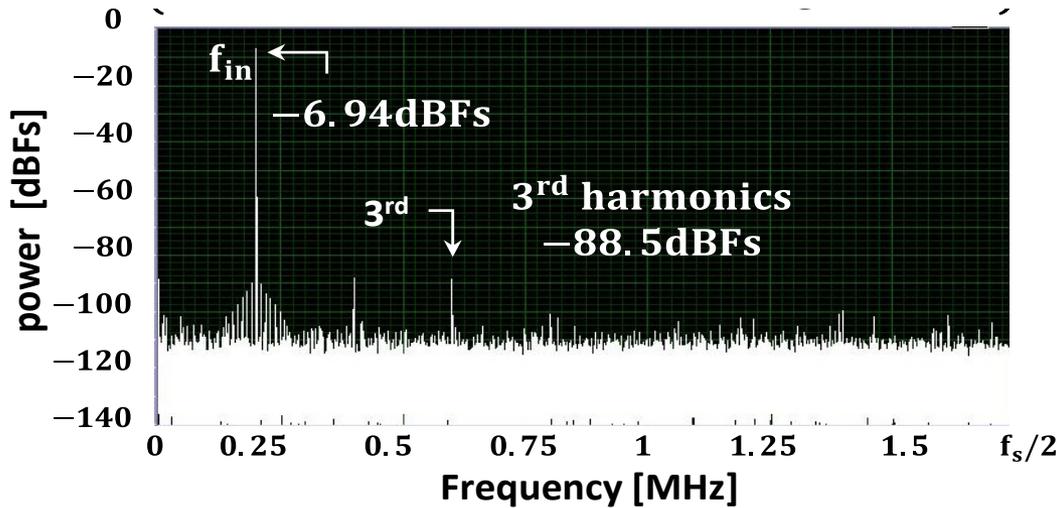
開発したLPFによるスプリアス低減



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

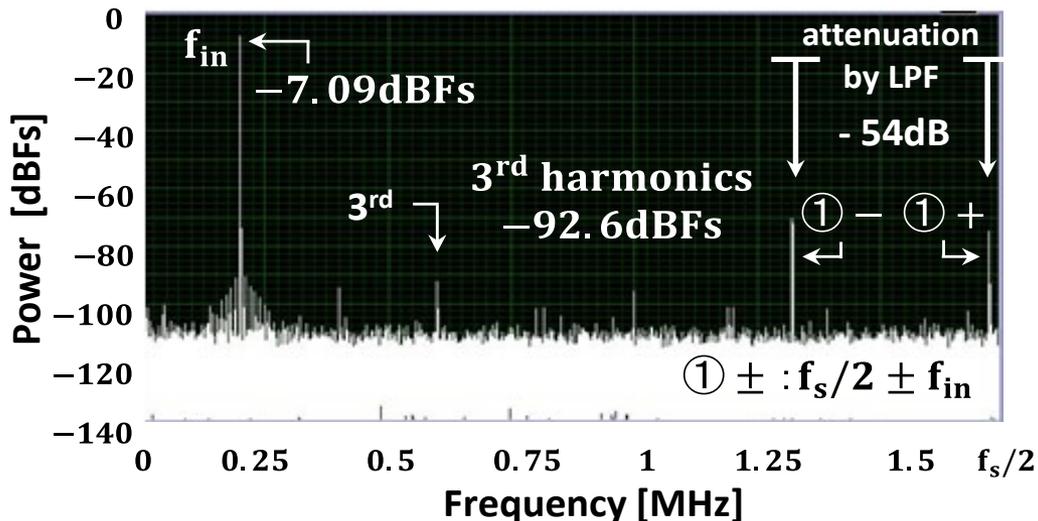
基本波

: -6.94dBFs

HD3

: -88.5dBFs

提案手法ADC出力(LPF:fc=1MHz挿入)



提案手法

基本波

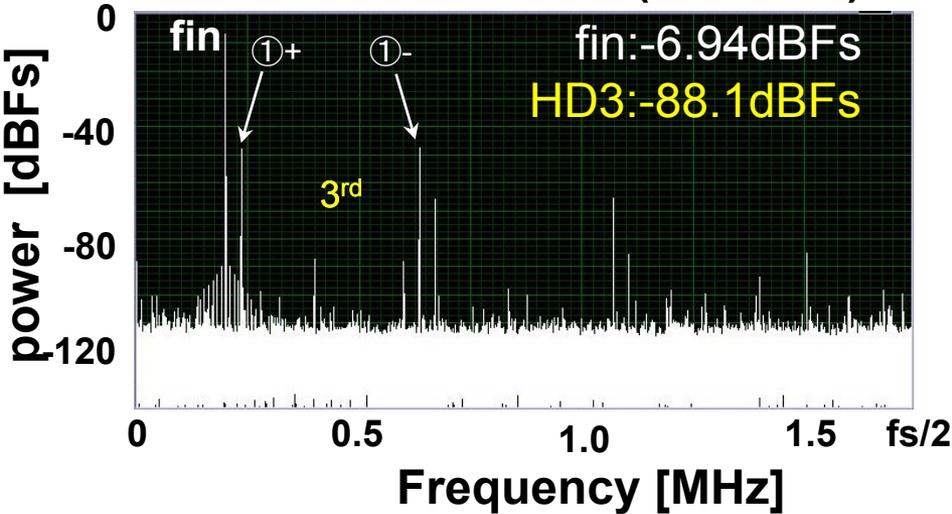
: -7.09dBFs

HD3

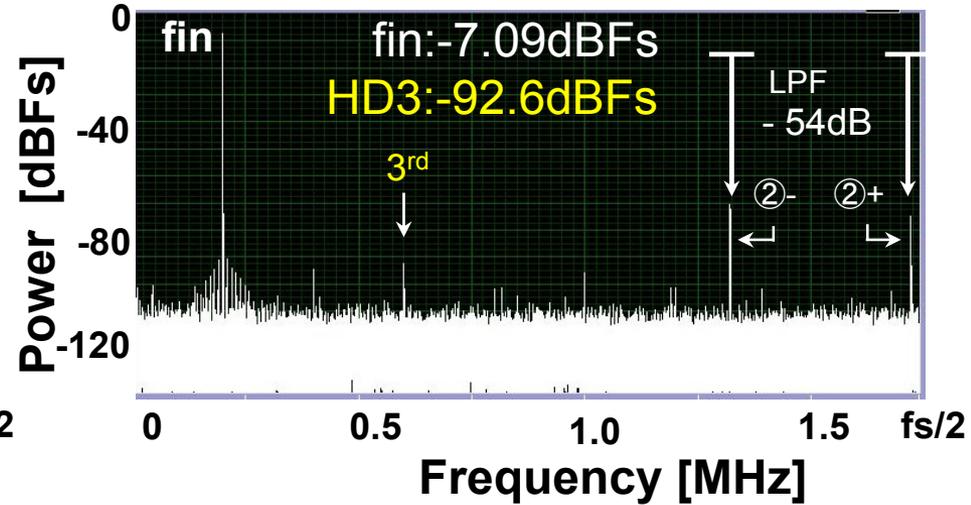
: -92.6dBFs

ADC出力信号スペクトル測定結果比較

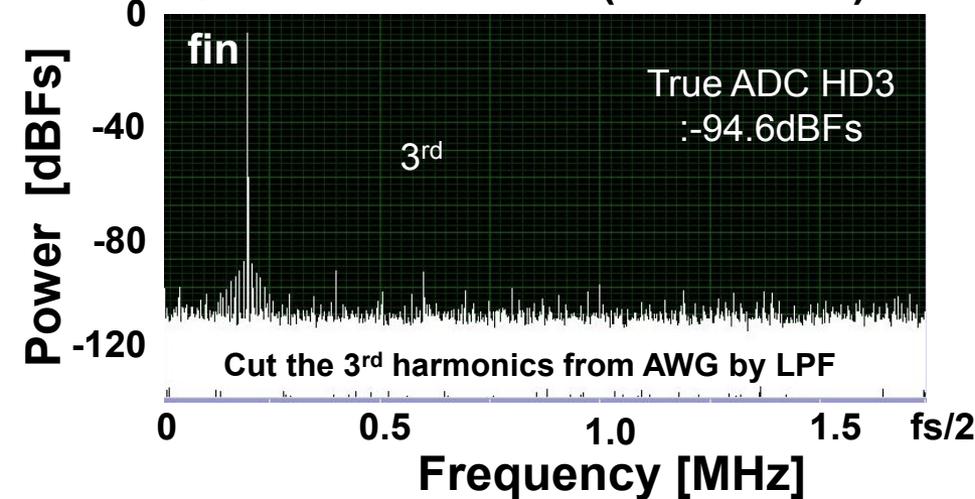
従来信号LPFあり($f_c=1\text{MHz}$)



LPFあり位相差切り替え信号 ($f_c=1\text{MHz}$)



従来信号 LPFあり ($f_c=250\text{kHz}$)



ADC のHD3本来値: **-94.6dBFS**

従来手法測定HD3: -88.1dBFS

Error 6.8%

提案手法測定HD3: -92.6dBFS

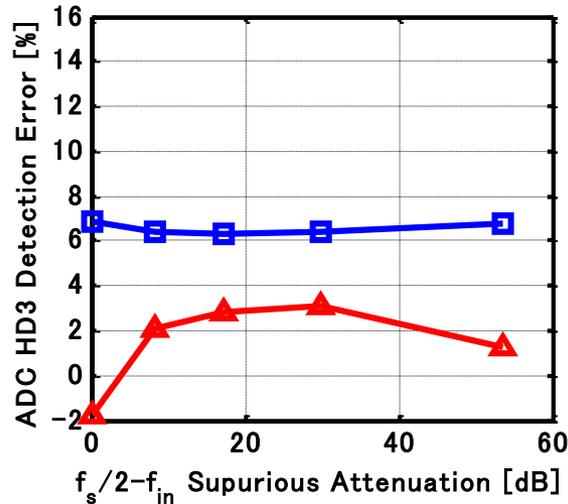
Error 2.1%

①± : $f_s(\text{AWG}) \pm f_{\text{in}}$ ②± : $\frac{f_s}{2} \pm f_{\text{in}}$

ADC出力HD3検出誤差測定結果(6サンプル)

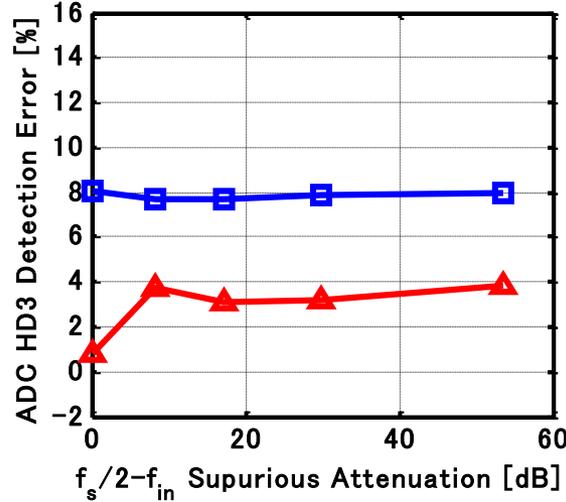
—□— 従来手法

sample1

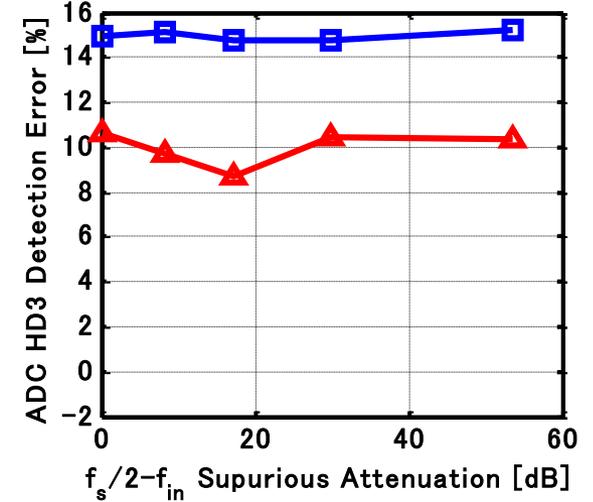


—△— 位相差切り替え手法

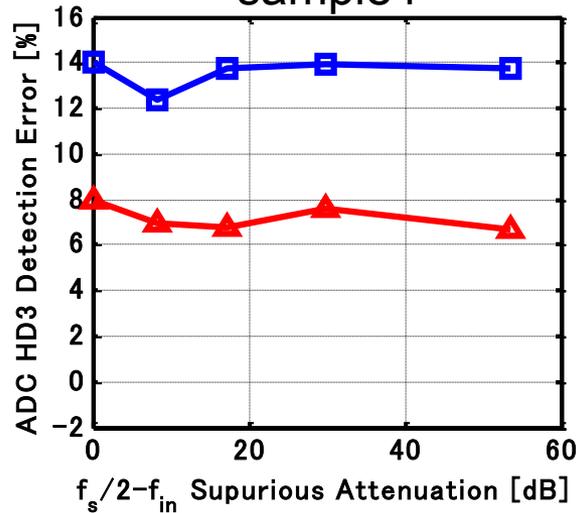
sample2



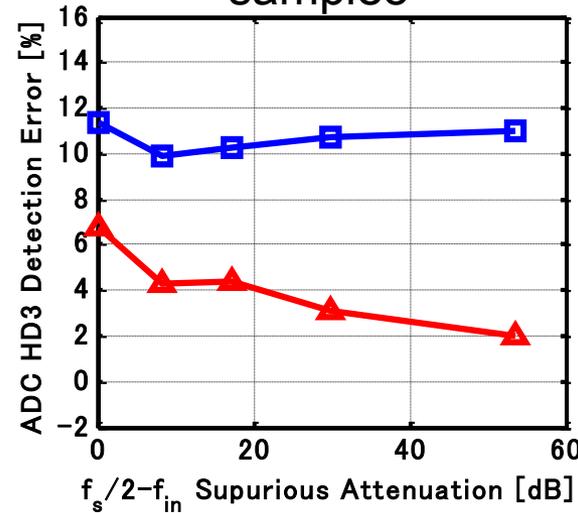
sample3



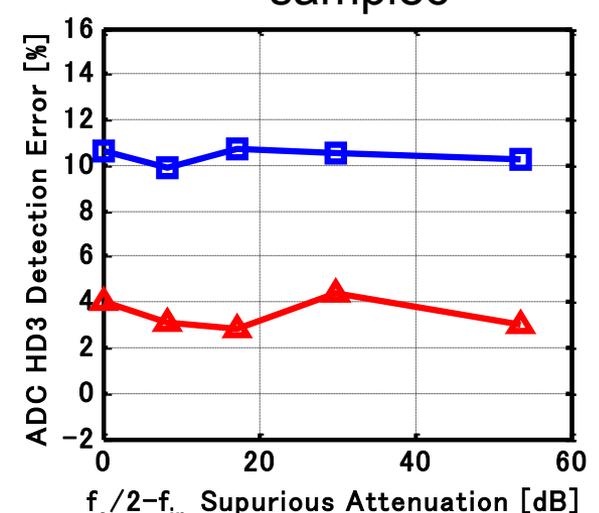
sample4



sample5



sample6

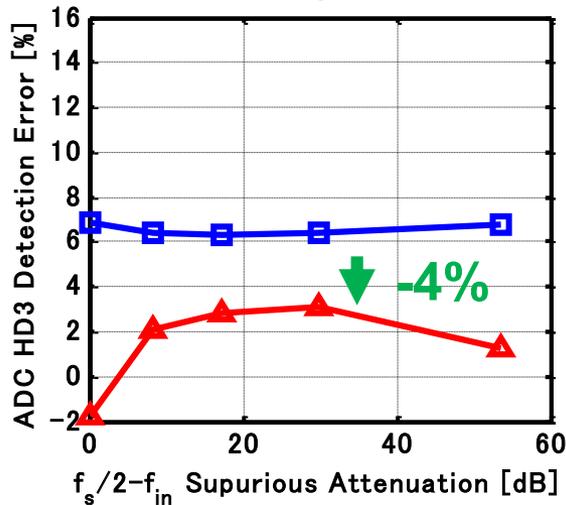


ADC出力HD3測定結果誤差低減確認

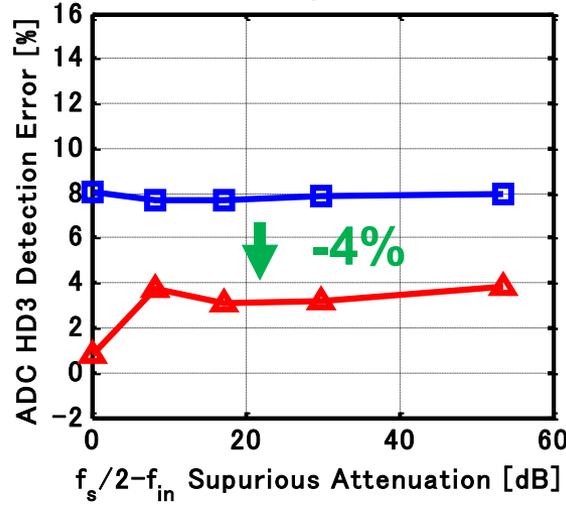
—□— 従来手法

—△— 位相差切り替え手法

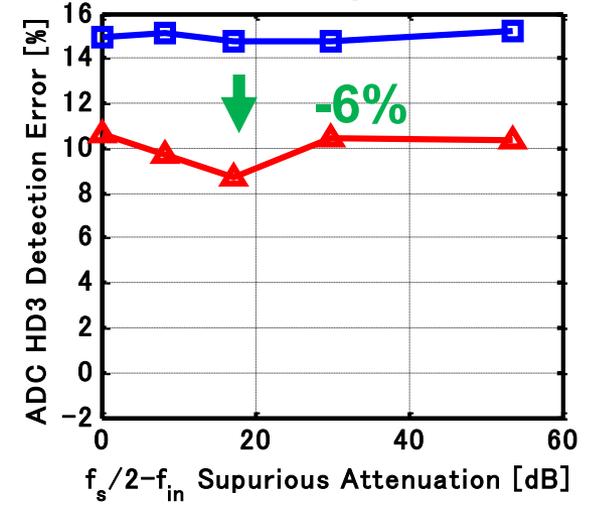
sample1



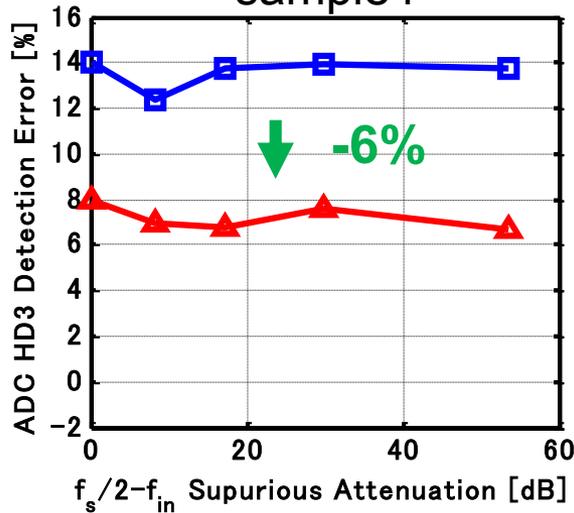
sample2



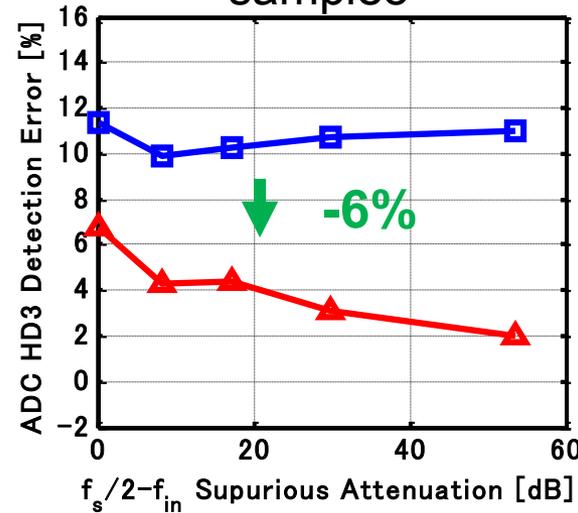
sample3



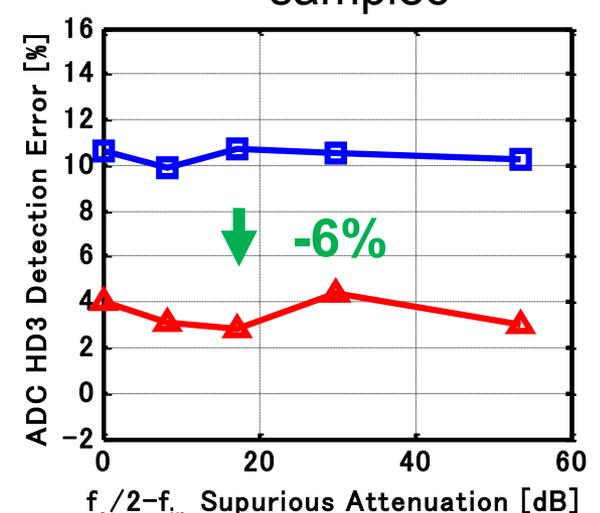
sample4



sample5



sample6



- 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問題点とその対策
- 理論解析
- 実機による検証
- まとめ

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

- 理論解析
 - AWG 位相差切り替え手法
 - 低HD3 正弦波生成
 - ADCのHD3もキャンセルされてしまう
 - 原因の解明
 - LPF で問題解決

- 実機による検証
 - ADC出力テストでのHD3検出誤差の半減

- 3次以外の高調波歪みの低減アルゴリズム
 - HD2低減
 - HD2とHD3の同時低減

- 今回の提案は低周波信号生成のみ



fs/2近傍周波数(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

1. 小林春夫, 山口隆弘「デジタルアシスト・アナログテスト技術」
電子情報通信学会, 集積回路研究会, 大阪(2010年7月)
2. 小林春夫, "ミクストシグナルSOC テスト容易化技術への挑戦",
SEMICON Japan 2010 SEMI テクノロジー・シンポジウム
STSテストセッション (2010年12月)
3. 小林春夫, 新津葵一、高井伸和、山口隆弘、「デジタルアシスト・アナログRF
テスト技術 - サブ100nm ミクストシグナルSOCのテストの検討 -」
電子情報通信学会 総合大会、東京 (2011年3月).
4. K. Wakabayashi, K. Kato, T. Yamada, O. Kobayashi, H. Kobayashi, F. Abe,
K. Niitsu, "Low-Distortion Sinewave Generation Method Using Arbitrary
Waveform Generation", Journal of Electronic Testing, vol.28, no. 5,
pp.641-651 (Oct.2012)
5. F.Abe, Y.Kobayashi, K. Sawada, K. Kato, O. Kobayashi, H. Kobayashi,
"Low-Distortion Signal Generation for ADC Testing",
IEEE International Test Conference, Seattle, WA (Oct. 2014)
6. K. Kato, F. Abe, K. Wakabayashi, C. Gao, T. Yamada, H. Kobayashi,
O. Kobayashi, K. Niitsu, "Two-Tone Signal Generation for ADC Testing,"
IEICE Trans. on Electronics, vol.E96-C, no.6, pp.850-858 (June 2013).

Q.1理論式結果(P29)のスプリアス低減→1/10に対して1%の測定誤差、実測→2~4%とその領域までいってない。何故か？

A.1理論式と違い、実測時はサンプリング周波数が違うためエイリアシングの影響がほとんどないためP.29のとおりにはならない。しかしAWG出力におけるHD3は低減されているため測定誤差は改善される。

Q2.この信号の場合、他の次数の高調波への影響が大きいのでは？

また、HD3のみでは「低歪み」とは言えないのでは？

A.2.HD3以外のキャンセルはシミュレーション、数式で確認済み。HD3との同時での低減もシミュレーション、数式では確認済み。(参考文献[4])

Q.3.ハードの変更なしにプログラム変更のみでの実現という目的があるならばフィルタの設計、製造、挿入は負担にならないのか？

A.3.波形発生時のサンプリング周波数を大きくすれば、AWG内部のアンチエイリアスフィルタによって高周波に存在するスプリアスは低減される。また、簡単なLPFでも容易にスプリアスは低減できるため設計は負担にならないと考える。

