

任意波形発生器を用いた 低歪み信号発生技術

第28回シリコンアナログRF研究会
2012.3.16

群馬大学

○安部文隆 加藤啓介 若林和行 小林春夫(群馬大学)
小林修(STARC) 新津葵一(群馬大学)

OUTLINE

- **本研究の目的と今回の目標**
- **テスト信号の歪み低減技術**
- **シミュレーション検証**
- **実機検証**
- **まとめと今後の課題**

OUTLINE

- 本研究の目的と今回の目標
- テスト信号の歪み低減技術
- シミュレーション検証
- 実機検証
- まとめと今後の課題

研究背景と今回の検討内容

微細化の効果

シリコンコスト：減少

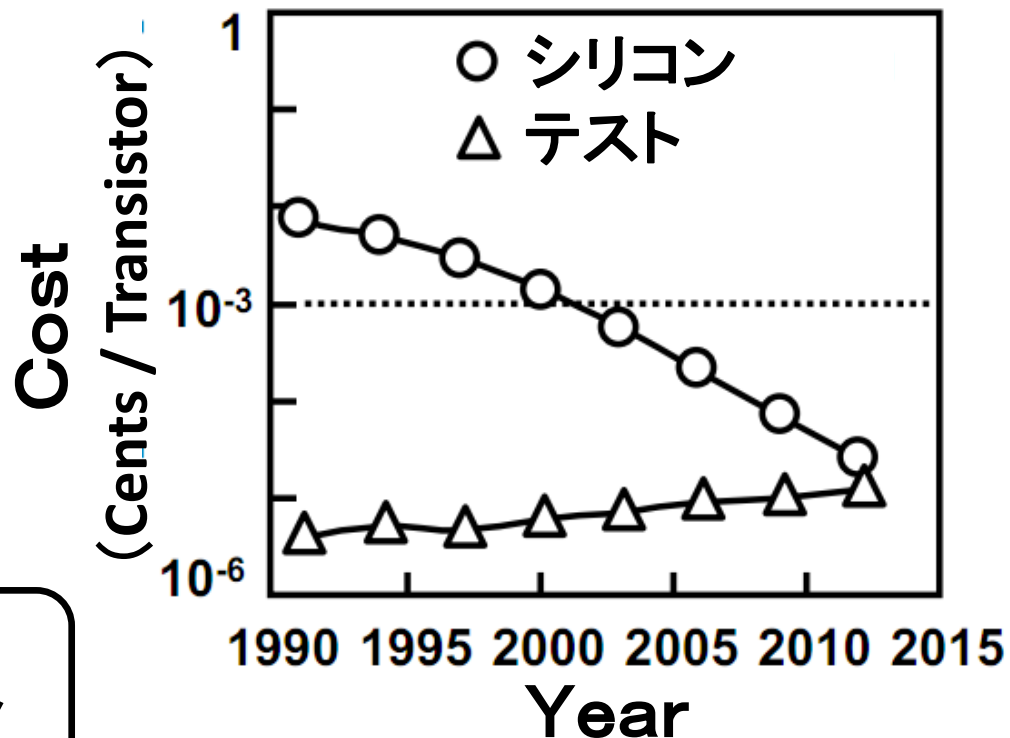
テストコスト：増加

本研究の目的

高品質・低コストテスト

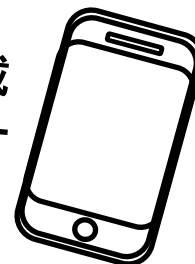
検討内容

通信用ADCの線形性テスト



製造コストとテストコストの動向
(ITRS 2001)

端末内部に搭載



高価格AWGを用いた線形性テスト

狭帯域・高周波信号受信

高価格
AWG

Y : 2トーンテスト信号

通信用
ADC

非線形

デジタル信号 アナログ信号
...00111001...

DSP

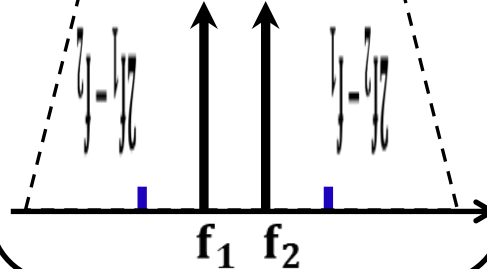
D_{in}

DAC

Y

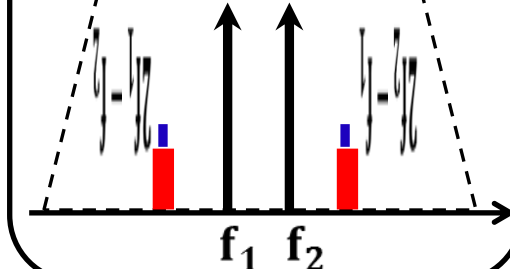
比較的線形な特性

信号帯域



テスト信号の歪み小

信号帯域



高品質なテスト



大量のデバイス試験装置が必要!!

より低価格なAWGに置き換え試験可能

コスト低下

低価格AWGを用いた線形性テスト

狭帯域・高周波信号受信

低価格
AWG

Y : 2トーンテスト信号

通信用
ADC

非線形

デジタル信号 アナログ信号
...00111001...

DSP

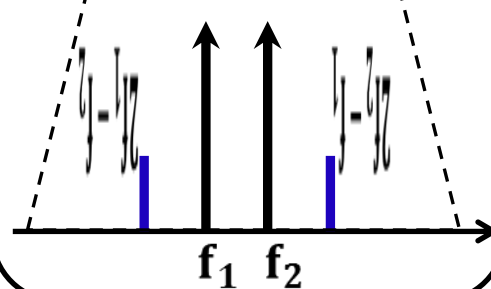
D_{in}

DAC

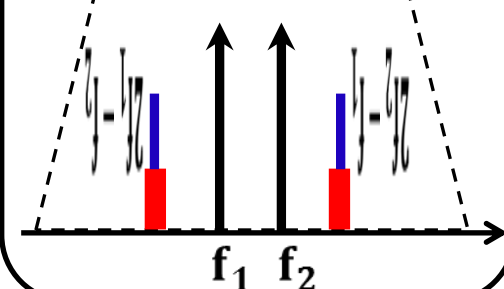
Y

非線形

信号帯域



信号帯域

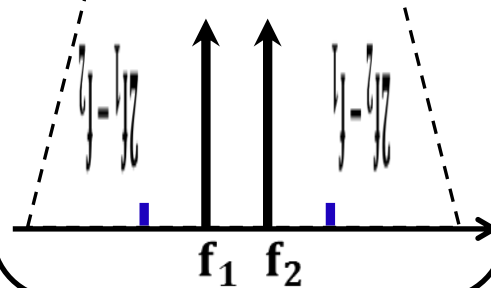


提案技術

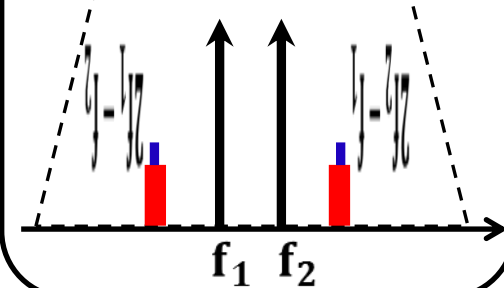
今回の目標

低価格AWGを用いてSFDRの改善

信号帯域



信号帯域



OUTLINE

- 本研究の目的と今回の目標
- テスト信号の歪み低減技術
- シミュレーション検証
- 実機検証
- まとめと今後の課題

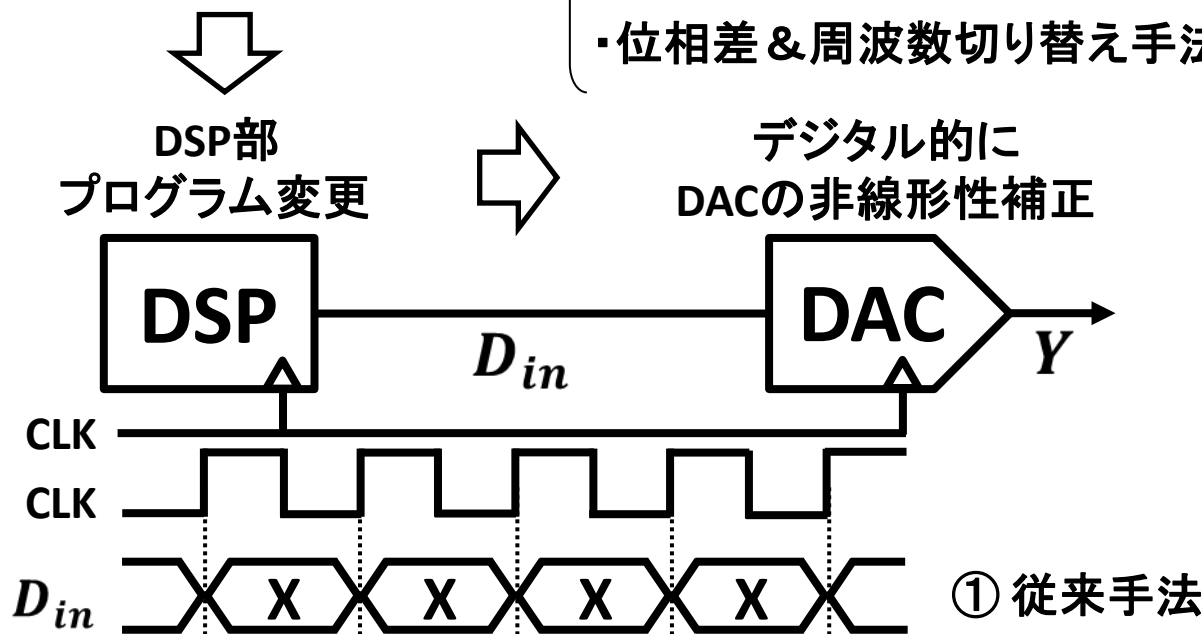
テスト信号歪み低減手法

テスト信号歪み低減手法

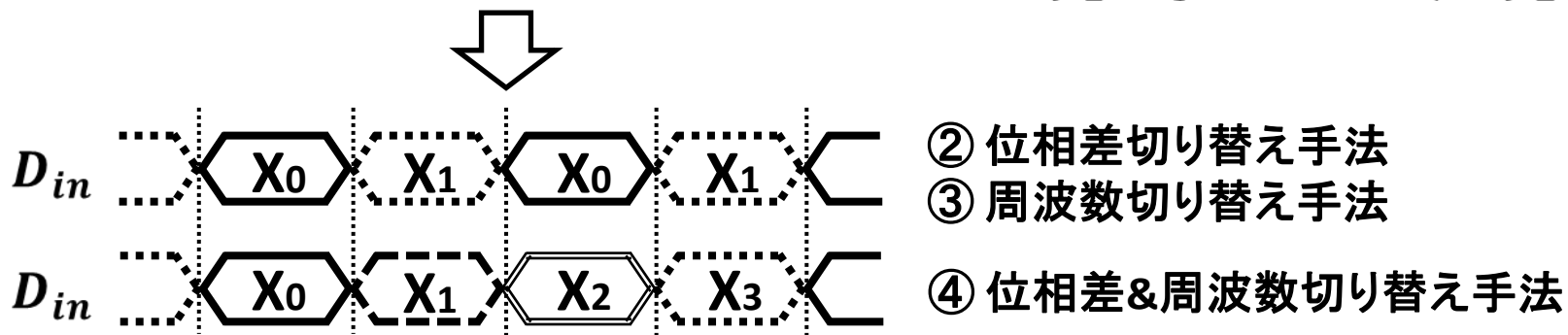
- ・位相差切り替え手法
- ・周波数切り替え手法
- ・位相差&周波数切り替え手法

既存ハードウェア
で実現可能

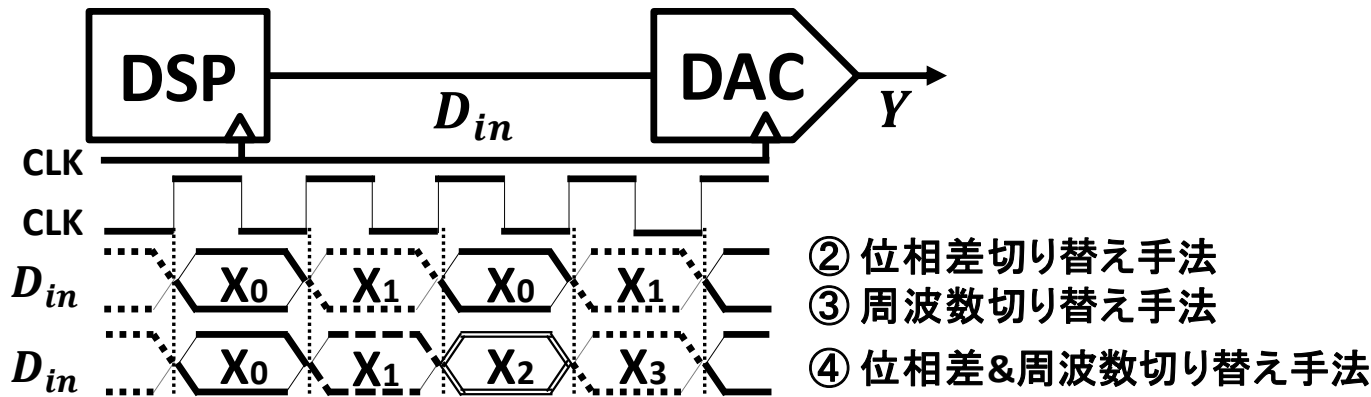
→ 付加コスト: ¥0



① 従来デジタル入力信号_従来手法 $X = A \cdot \cos(2\pi f_1 n T_s) + A \cdot \cos(2\pi f_2 n T_s)$



DAC入力インターリーブ信号



② 提案デジタル2相インターリーブ信号_位相差切り替え手法

$$D_{in} \begin{cases} X_0 = A \cdot \cos(2\pi f_1(2m-2)T_s + \pi/6) + A \cdot \cos(2\pi f_2(2m-2)T_s - \pi/6) \\ X_1 = A \cdot \cos(2\pi f_1(2m-1)T_s - \pi/6) + A \cdot \cos(2\pi f_2(2m-1)T_s + \pi/6) \end{cases}$$

③ 提案デジタル2相インターリーブ信号_周波数切り替え手法

$$D_{in} \begin{cases} X_0 = 2A \cdot \cos(2\pi f_1(2m-2)T_s) \\ X_1 = 2A \cdot \cos(2\pi f_2(2m-1)T_s) \end{cases}$$

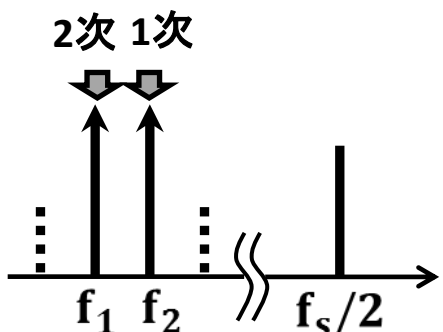
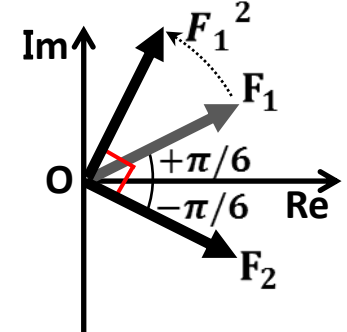
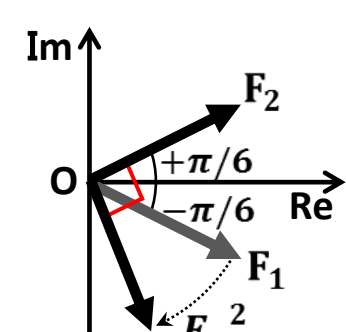
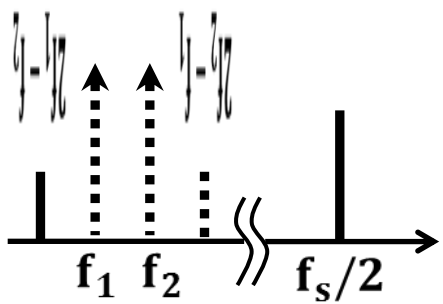
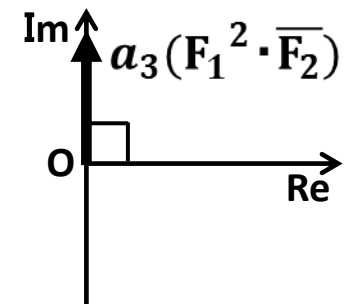
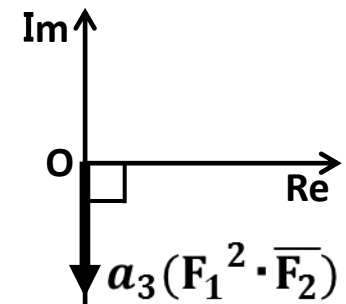
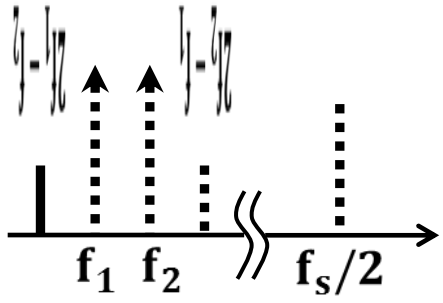
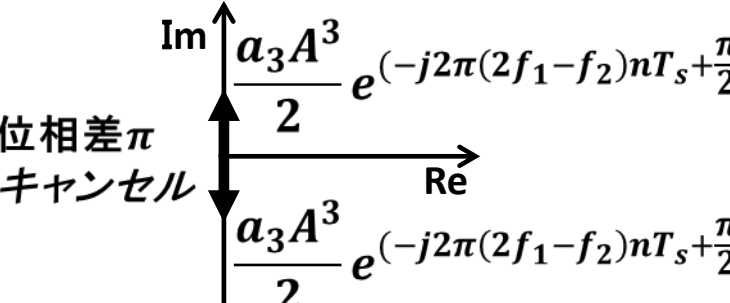

④ 提案デジタル4相インターリーブ信号_位相差&周波数切り替え手法

$$D_{in} \begin{cases} X_0 = 2A \cdot \cos(2\pi f_1(4m-4)T_s + \pi/6) \\ X_1 = 2A \cdot \cos(2\pi f_1(4m-3)T_s - \pi/6) \\ X_2 = 2A \cdot \cos(2\pi f_2(4m-2)T_s + \pi/6) \\ X_3 = 2A \cdot \cos(2\pi f_2(4m-1)T_s - \pi/6) \end{cases}$$

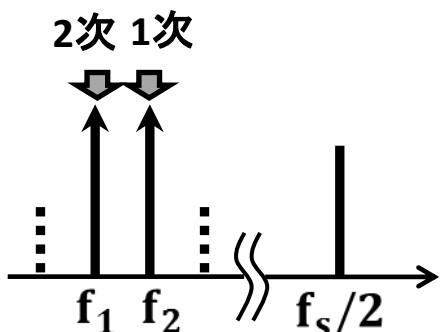
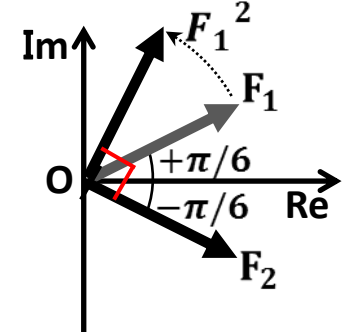
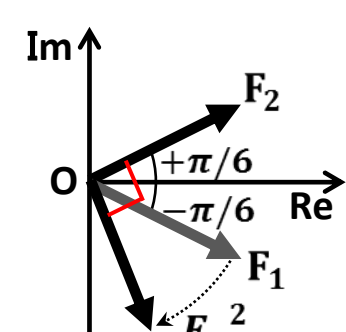
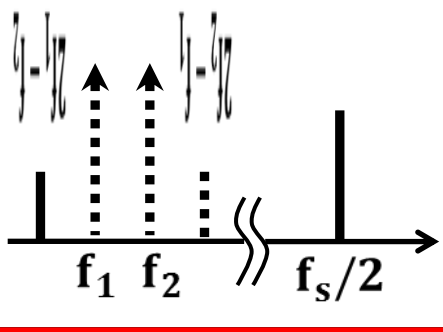
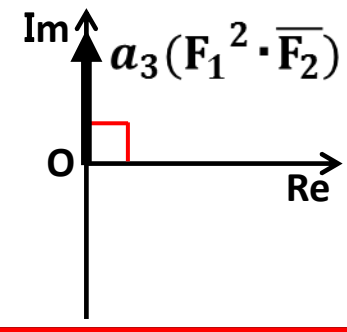
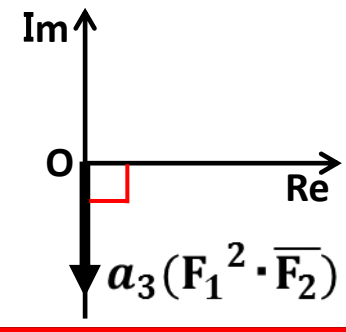
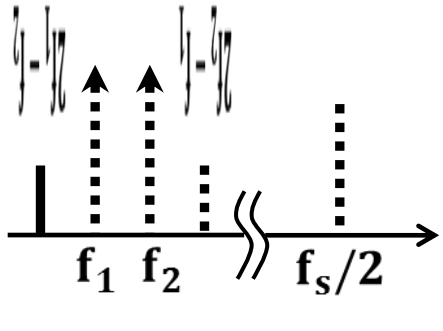
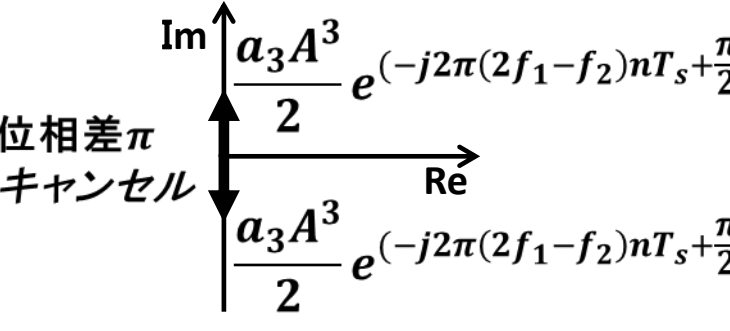
位相差切り替え手法原理_2f₁ - f₂除去

考慮する信号成分	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
<p>2次 1次</p>			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{6})}$ $F_2 = Ae^{(-j2\pi(f_2)nT_s \mp \frac{\pi}{6})}$ $F_1^2 = A^2 e^{(-j2\pi(2f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{3})}$ <p>(複号同順)</p>
			$F_1^2 \cdot \overline{F_2} : 2f_1 - f_2 \text{ 成分}$ $a_3(F_1^2 \cdot \overline{F_2})$ $= a_3 A^3 e^{(-j2\pi(2f_1 - f_2)nT_s \pm \frac{\pi}{2})}$
	<p>位相差 π キャンセル</p>	<p>スイッチング周波数成分 $f_s/2$を考慮から外す</p> <p>信号 $2f_1 - f_2$のみ考慮</p>	

位相差切り替え手法原理_ $2f_1 - f_2$ 除去

考慮する信号成分	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
<p>2次 1次</p> 			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{6})}$ $F_2 = Ae^{(-j2\pi(f_2)nT_s \mp \frac{\pi}{6})}$ $F_1^2 = A^2 e^{(-j2\pi(2f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{3})}$ <p>(複号同順)</p>
			$F_1^2 \cdot \overline{F_2} : 2f_1 - f_2 \text{ 成分}$ $a_3(F_1^2 \cdot \overline{F_2})$ $= a_3 A^3 e^{(-j2\pi(2f_1 - f_2)nT_s \pm \frac{\pi}{2})}$
	<p>位相差 π キャンセル</p> 	<p>スイッチング周波数成分 $f_s/2$を考慮から外す</p>  <p>信号 $2f_1 - f_2$のみ考慮</p>	

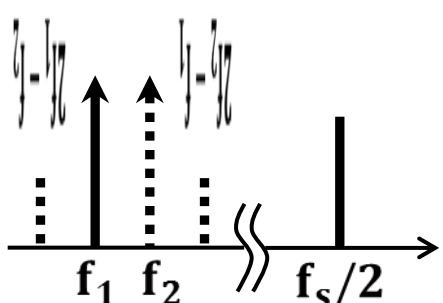
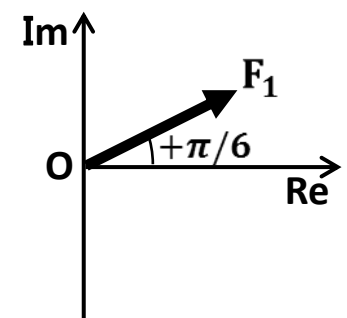
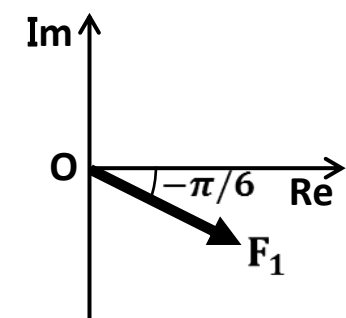
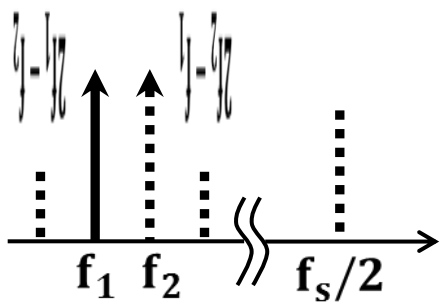
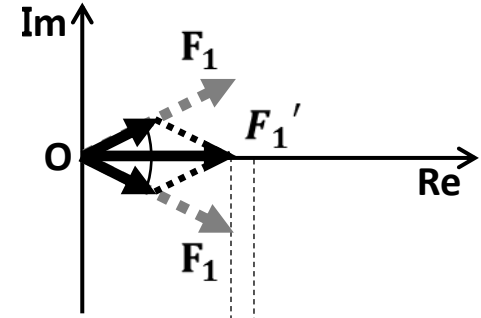
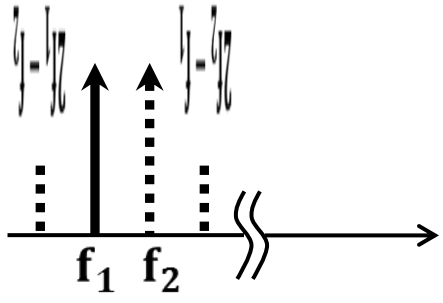
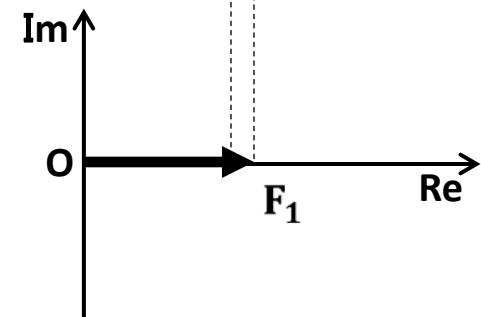
位相差切り替え手法原理_ $2f_1 - f_2$ 除去

考慮する信号成分	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
<p>2次 1次</p> 			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{6})}$ $F_2 = Ae^{(-j2\pi(f_2)nT_s \mp \frac{\pi}{6})}$ $F_1^2 = A^2 e^{(-j2\pi(2f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{3})}$ <p>(複号同順)</p>
			$F_1^2 \cdot \overline{F_2} : 2f_1 - f_2 \text{ 成分}$ $a_3(F_1^2 \cdot \overline{F_2})$ $= a_3 A^3 e^{(-j2\pi(2f_1 - f_2)nT_s \pm \frac{\pi}{2})}$
	<p>位相差 π キャンセル</p> 	<p>スイッチング周波数成分 $f_s/2$を考慮から外す</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>信号 $2f_1 - f_2$のみ考慮</p>	

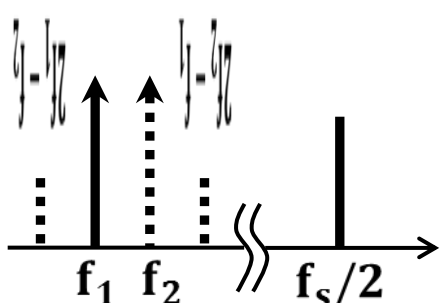
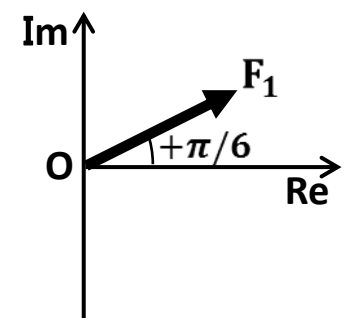
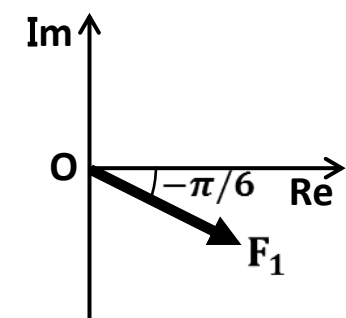
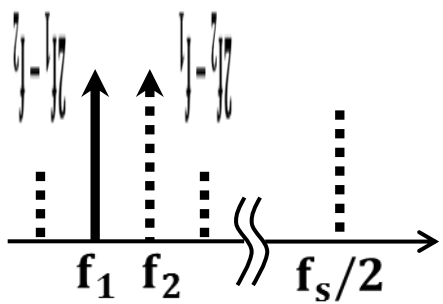
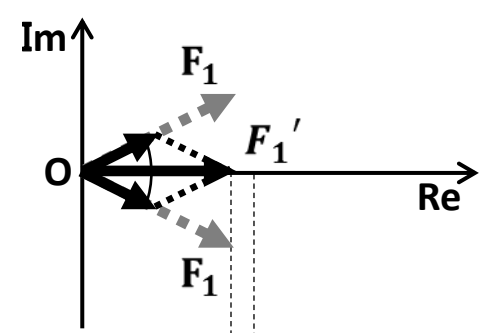
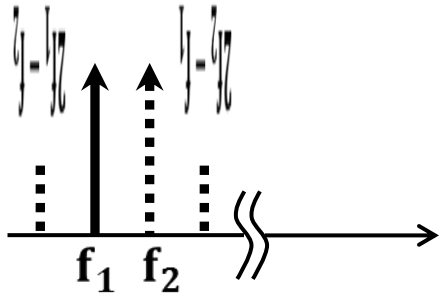
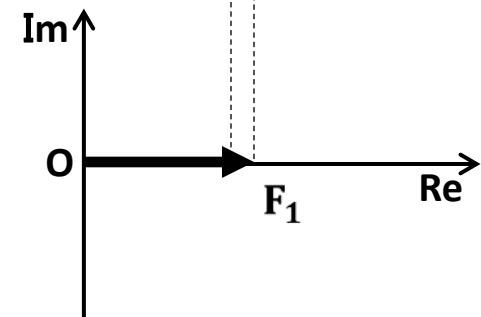
位相差切り替え手法原理_2f₁ - f₂除去

考慮する信号成分	D _{in} (n)		信号成分補足
	X ₀ (n = 2m - 2)	X ₁ (n = 2m - 1)	
<p>2次 1次</p>			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{6})}$ $F_2 = Ae^{(-j2\pi(f_2)nT_s \mp \frac{\pi}{6})}$ $F_1^2 = A^2 e^{(-j2\pi(2f_1)nT_s \pm \frac{\pi}{3})}$ <p>(複号同順)</p>
			<p>F₁² · F₂ : 2f₁ - f₂成分</p> $a_3(F_1^2 \cdot \overline{F_2})$ $= a_3 A^3 e^{(-j2\pi(2f_1 - f_2)nT_s \pm \frac{\pi}{2})}$
	<p>位相差π キャンセル</p>	<p>スイッチング周波数成分 fs/2を考慮から外す</p> <p>信号2f₁ - f₂のみ考慮</p>	

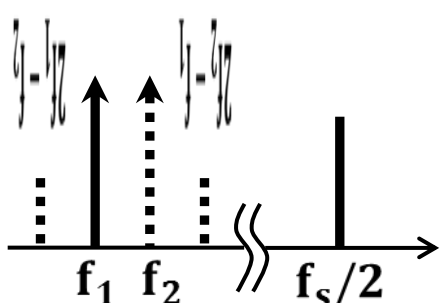
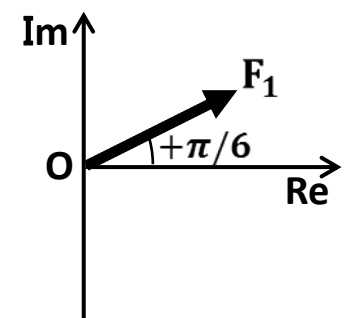
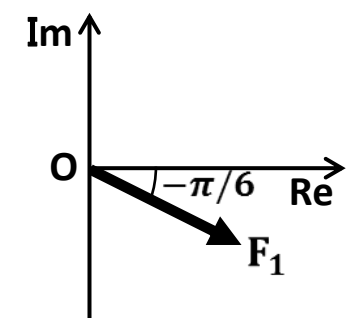
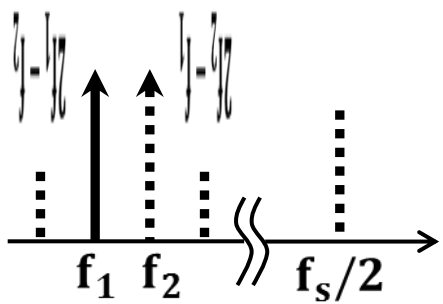
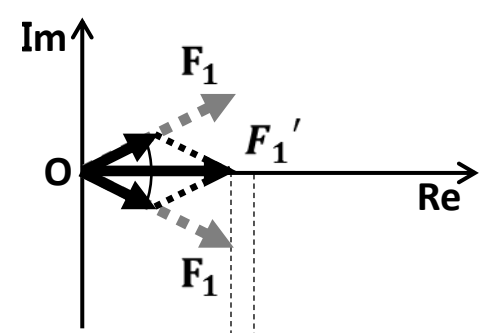
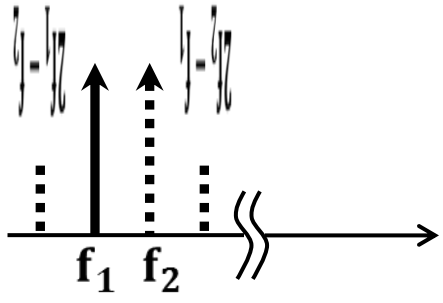
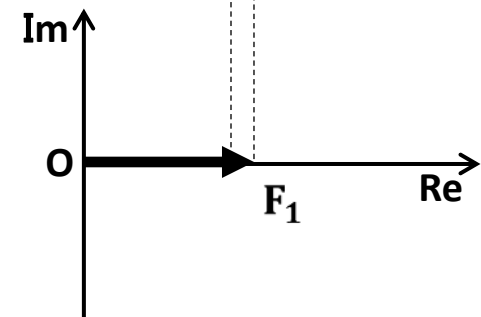
位相差切り替え手法原理_ f_1 への効果

考慮する信号成分 —	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-2)T_s + \frac{\pi}{6})}$ $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-1)T_s - \frac{\pi}{6})}$
			<p>位相差切り替え手法</p> $F_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$
			<p>従来手法</p> $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$

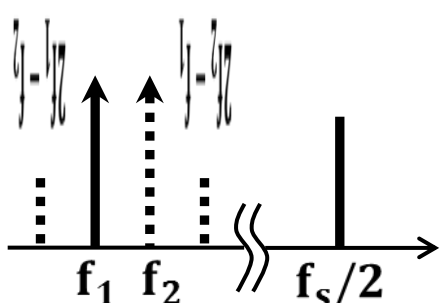
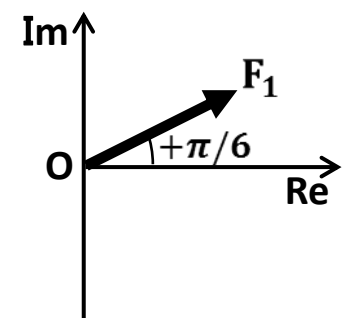
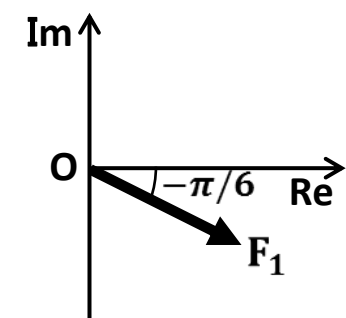
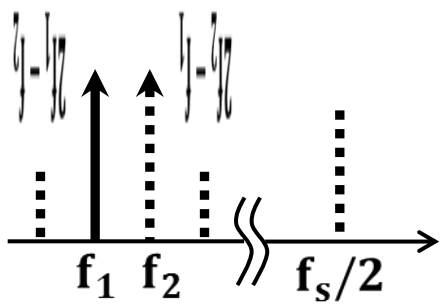
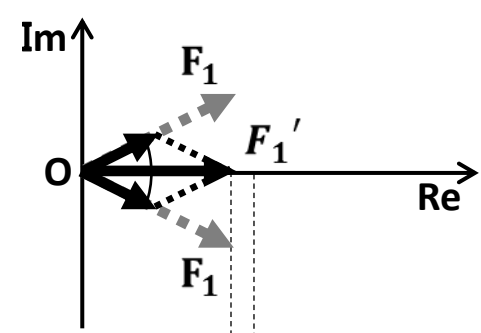
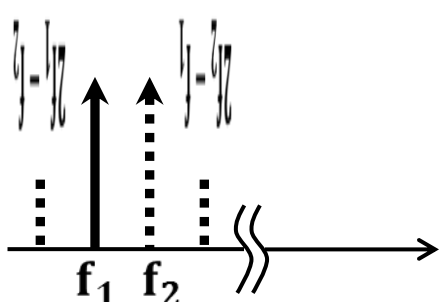
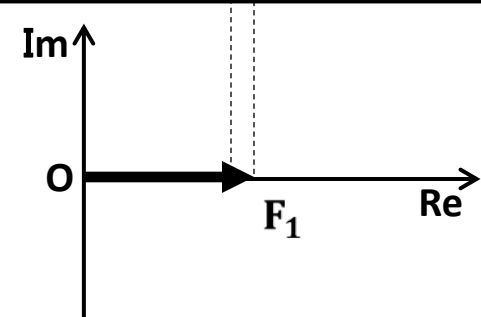
位相差切り替え手法原理_ f_1 への効果

考慮する信号成分	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-2)T_s + \frac{\pi}{6})}$ $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-1)T_s - \frac{\pi}{6})}$
			<p>位相差切り替え手法</p> $F_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$
			<p>従来手法</p> $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$

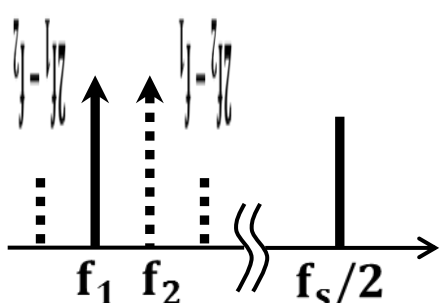
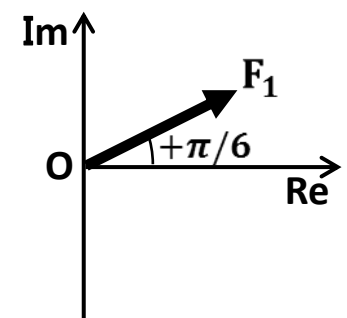
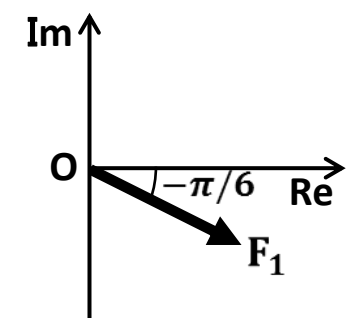
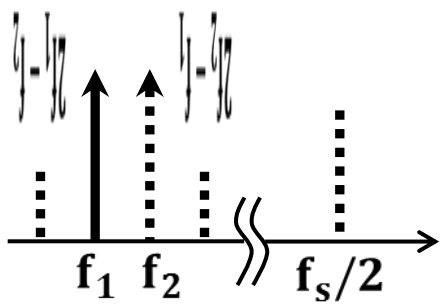
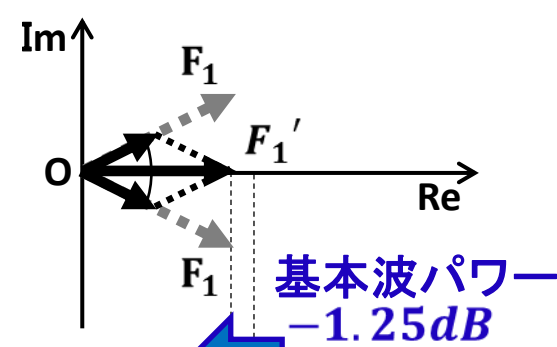
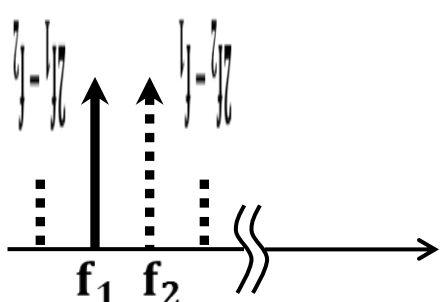
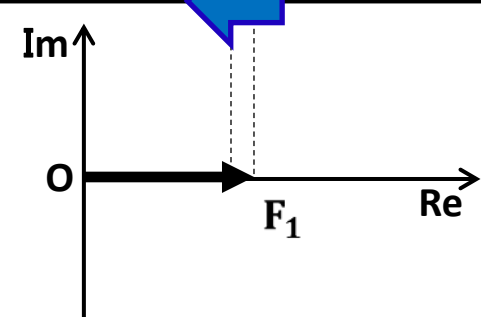
位相差切り替え手法原理_ f_1 への効果

考慮する信号成分 —	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-2)T_s + \frac{\pi}{6})}$ $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-1)T_s - \frac{\pi}{6})}$
			<p>位相差切り替え手法</p> $F_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$
			<p>従来手法</p> $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$

位相差切り替え手法原理_ f_1 への効果

考慮する信号成分	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-2)T_s + \frac{\pi}{6})}$ $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-1)T_s - \frac{\pi}{6})}$
			<p>位相差切り替え手法</p> $F_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$
			<p>従来手法</p> $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$

位相差切り替え手法原理_ f_1 への効果

考慮する信号成分 —	$D_{in}(n)$		信号成分補足
	$X_0(n = 2m - 2)$	$X_1(n = 2m - 1)$	
			$F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-2)T_s + \frac{\pi}{6})}$ $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)(2m-1)T_s - \frac{\pi}{6})}$
			位相差切り替え手法 $F_1' = \frac{\sqrt{3}}{2} Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$
			従来手法 $F_1 = Ae^{(-j2\pi(f_1)nT_s)}$

周波数切り替え手法原理

※ $f \equiv \sin(2\pi ft)$

・従来手法

2トーン信号

$f_1 + f_2$

$$a_1 X + a_3 X^3$$

HD,IM成分発生

$3f_1$ $2f_1 \pm f_2$

$3f_2$ $2f_2 \pm f_1$

・周波数切り替え手法

f_1

f_2

等価的2トーン信号

$$a_1 X + a_3 X^3$$

HD成分発生

$3f_1$ $f_s/2 \pm f_{1,2}$

$3f_2$ $f_s/2 \pm 3f_{1,2}$

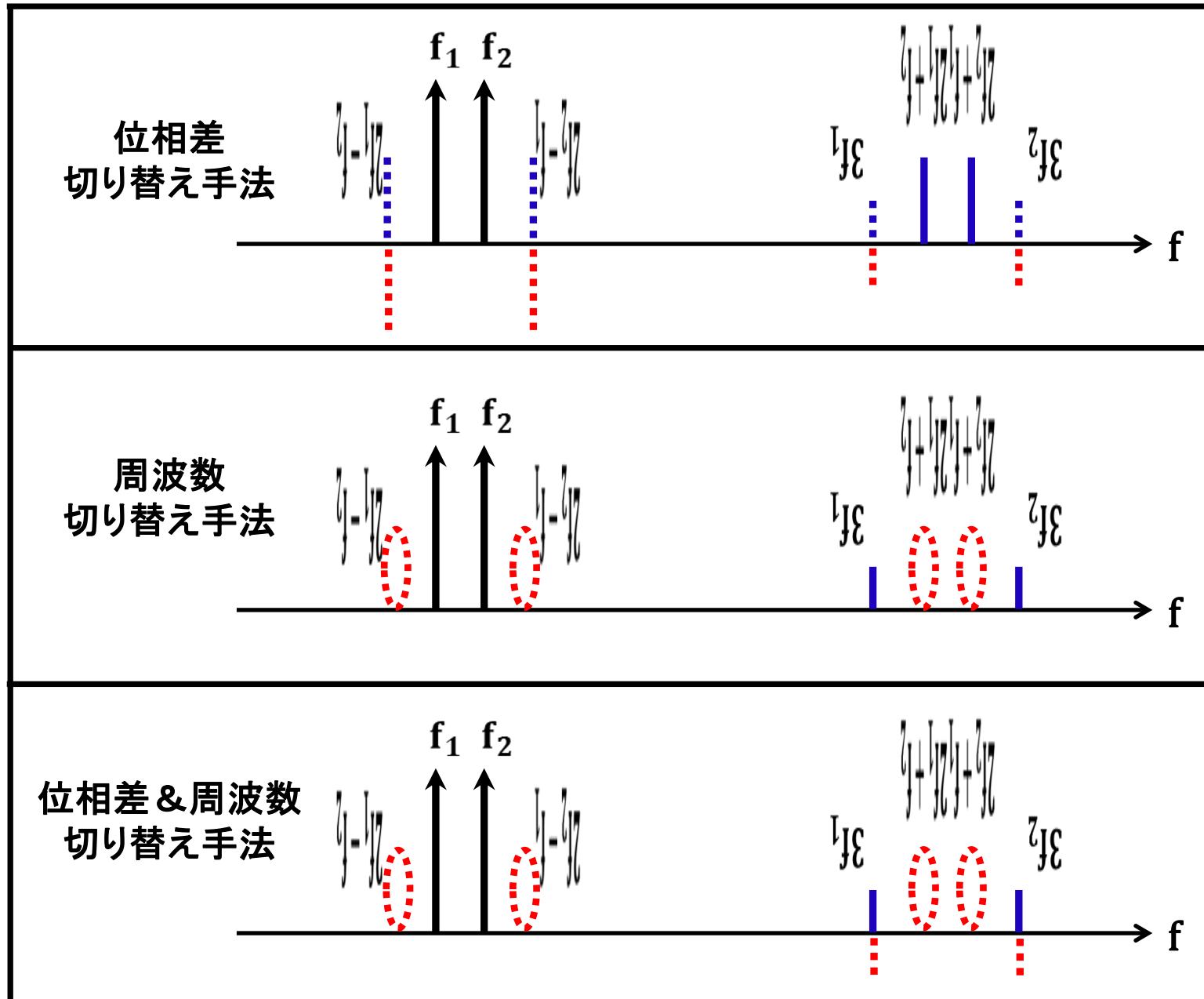
1トーンずつ3次歪みの影響を受けさせる

1トーンずつ信号を生成

非線形

相互変調歪みの発生なし
高調波歪みのみ発生

提案手法の歪み除去効果



OUTLINE

- 本研究の目的と今回の目標
- テスト信号の歪み低減技術
- シミュレーション検証
- 実機検証
- まとめと今後の課題

MATLABシミュレーション

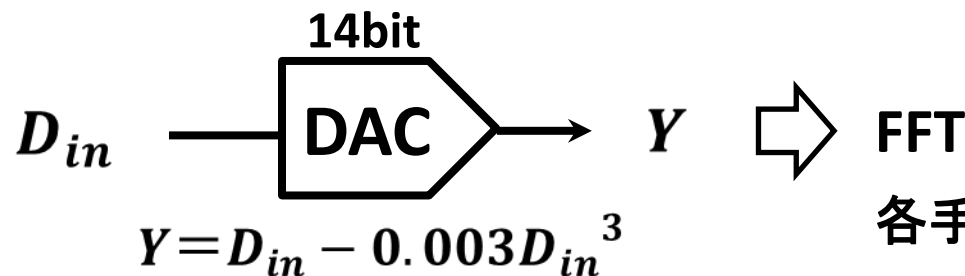
シミュレーション手法

DAC入力信号 D_{in}

従来手法	X
位相差切り替え手法	2相インターリーブ信号 X_0, X_1
周波数切り替え手法	2相インターリーブ信号 X_0, X_1
位相差 & 周波数切り替え手法	4相インターリーブ信号 X_0, X_1, X_2, X_3

D_{in} パラメータ

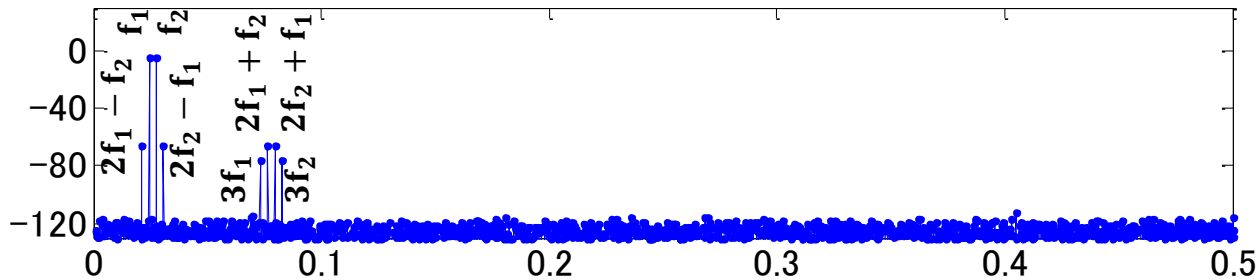
サンプリング点数	4096
入力2トーン信号	$f_1 = 100$ $f_2 = 153$
信号振幅 (peak-to-peak)	1.2



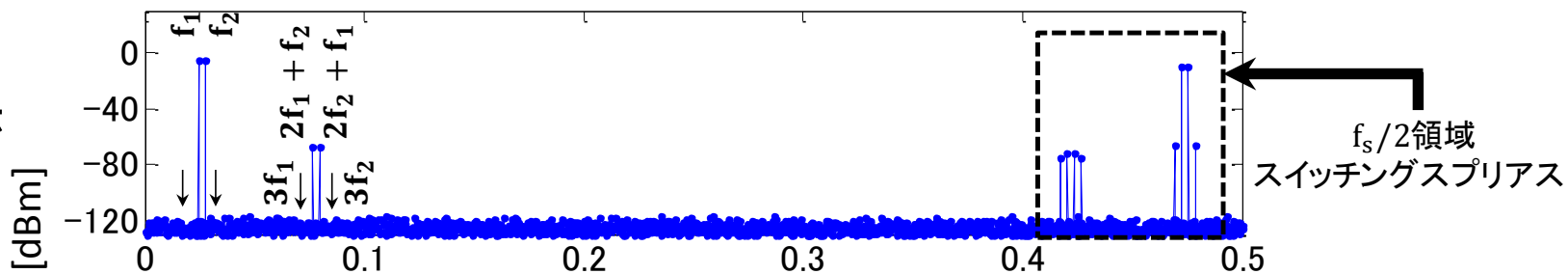
各手法のスペクトラムを比較

シミュレーション結果

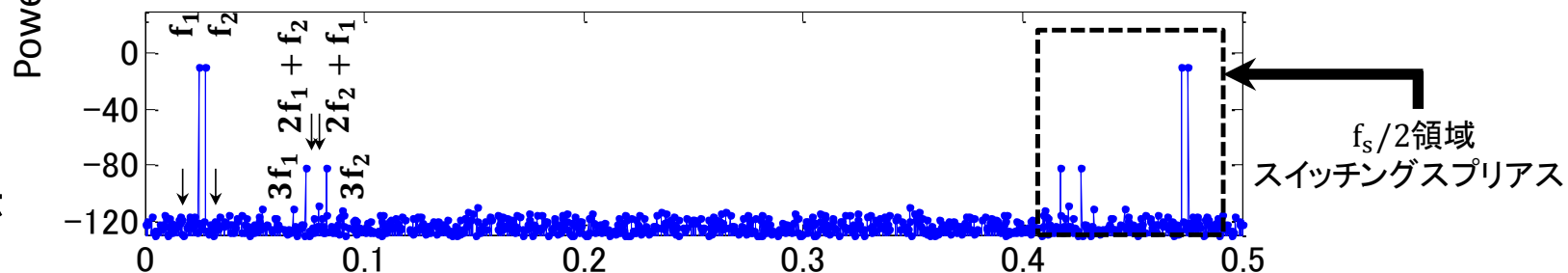
従来手法



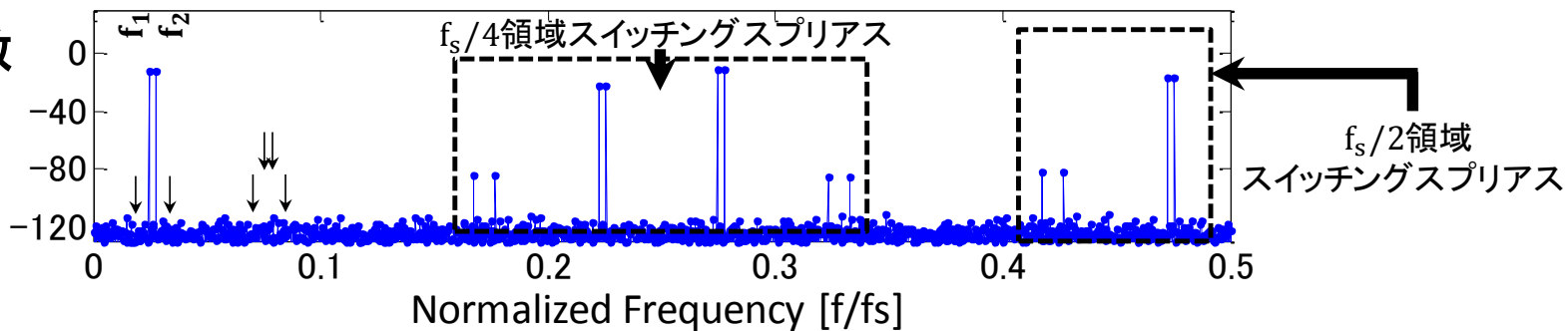
位相差
切り替え手法



周波数
切り替え手法



位相差 & 周波数
切り替え手法



OUTLINE

- 本研究の目的と今回の目標
- テスト信号の歪み低減技術
- シミュレーション検証
- **実機検証**
- まとめと今後の課題

測定条件

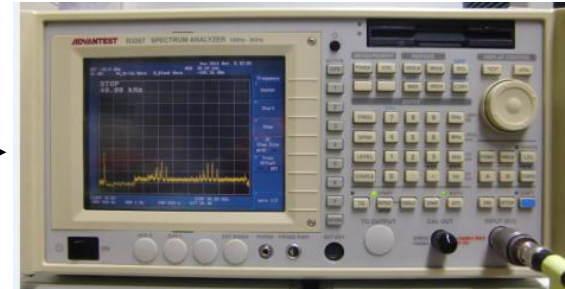
AWG



Agilent社33220A

周波数レンジ	1 μ Hz~6MHz
振幅分解能	14bits
最大サンプリングレート	50MSa/s

スペクトラムアナライザ



ADVANTEST社R3267

周波数帯	100Hz~8GHz
RBW	10Hz~30MHz

信号

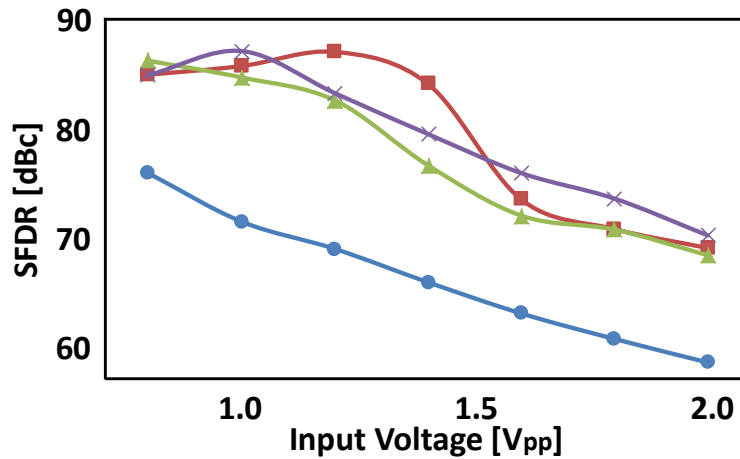
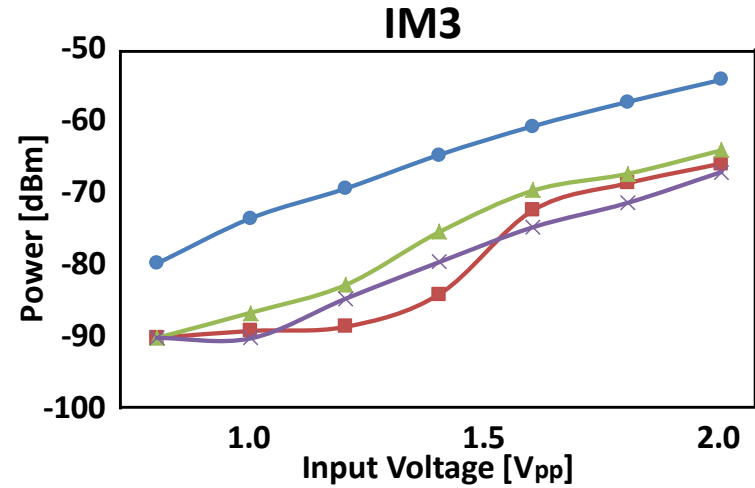
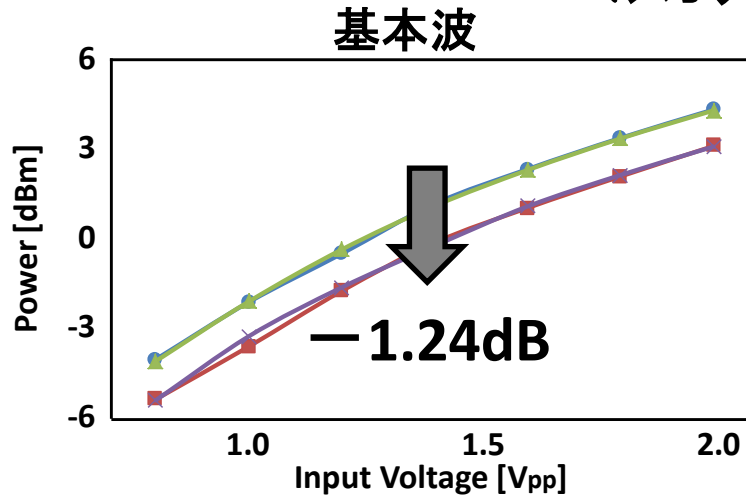


測定信号データ

周波数 f_1, f_2	200kHz , 220kHz
サンプリングレート	10MSa/s
入力電圧	0.8~1.2V _{pp} (0.2Vstep)
オフセット	0

- ・従来手法
- ・位相差切り替え手法
- ・周波数切り替え手法
- ・位相差 & 周波数切り替え手法

測定結果



- 従来手法
- 位相差切り替え手法
- ▲ 周波数切り替え手法
- ✕ 位相差&周波数切り替え手法

位相差切り替え手法

基本波	IM3	SFDR
-1.27 dB	-13.7 dB	+12.5 dB

周波数切り替え手法

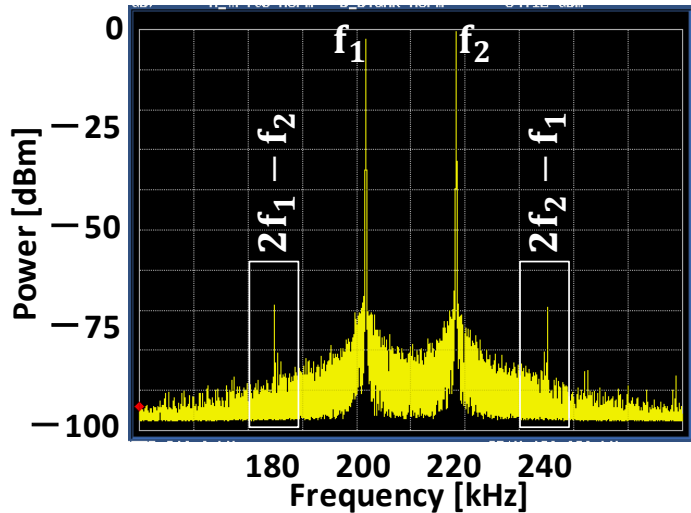
基本波	IM3	SFDR
0 dB	-10.7 dB	+10.7 dB

位相差 & 周波数切り替え手法

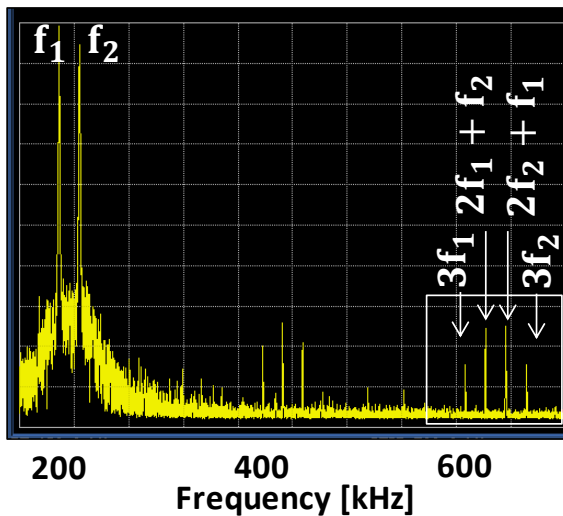
基本波	IM3	SFDR
-1.21 dB	-13.6 dB	+12.4 dB

位相差切り替え手法

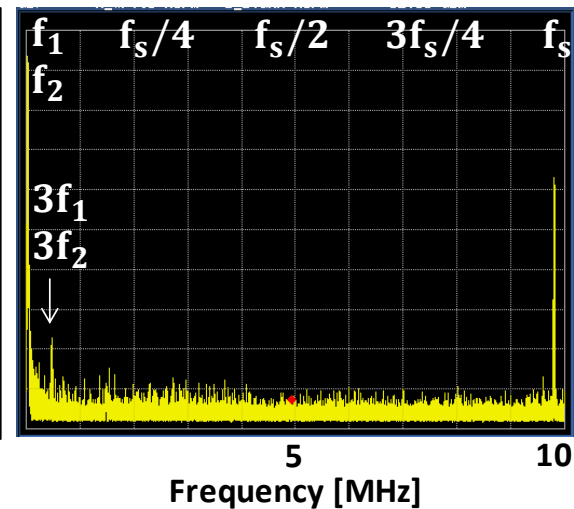
従来手法



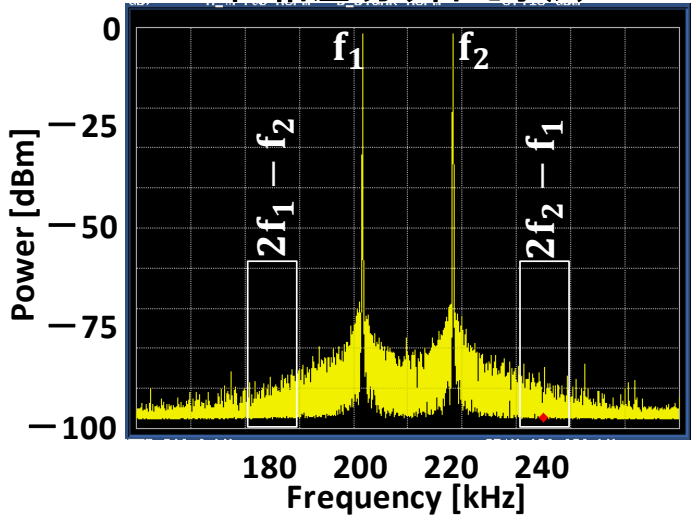
従来手法



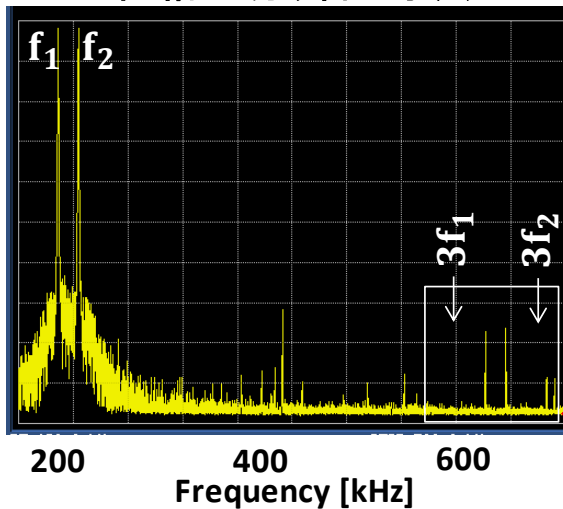
従来手法



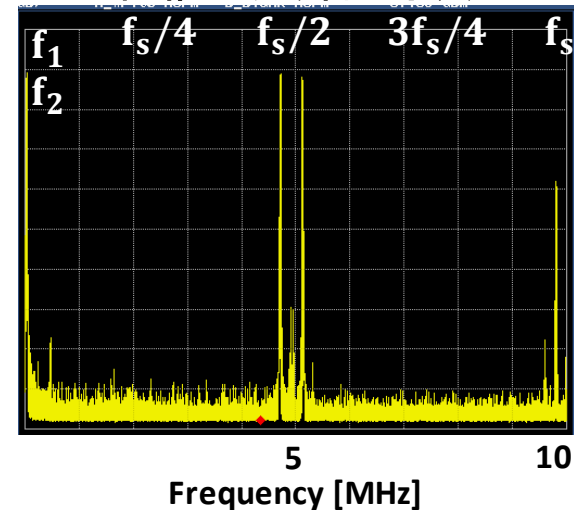
位相差切り替え手法



位相差切り替え手法

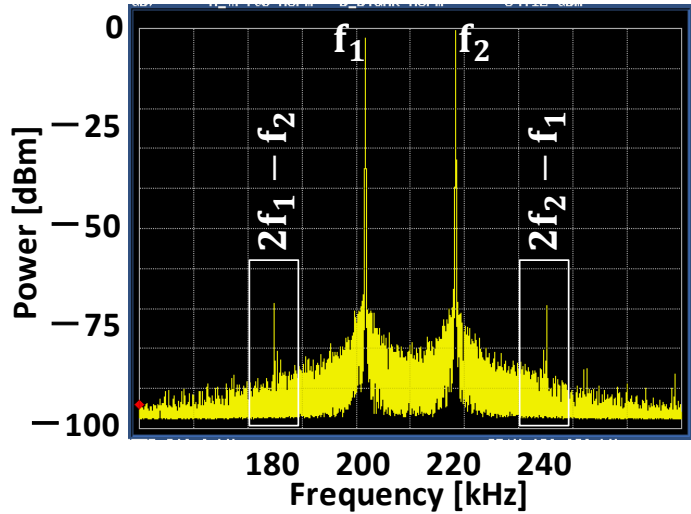


位相差切り替え手法

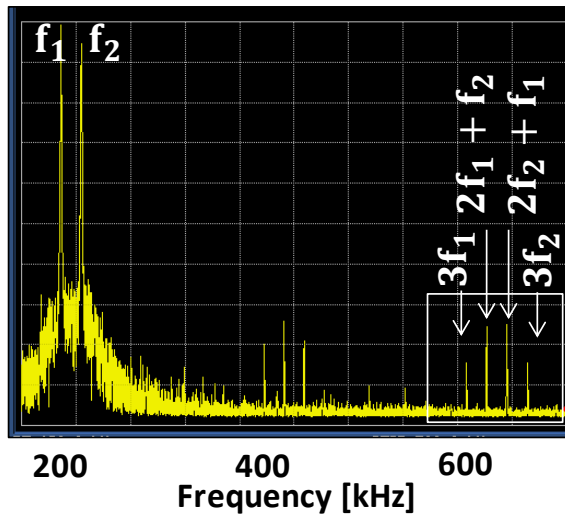


周波数切り替え手法

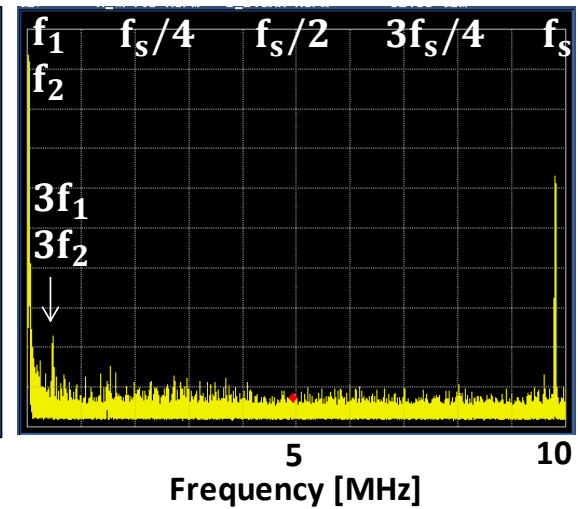
従来手法



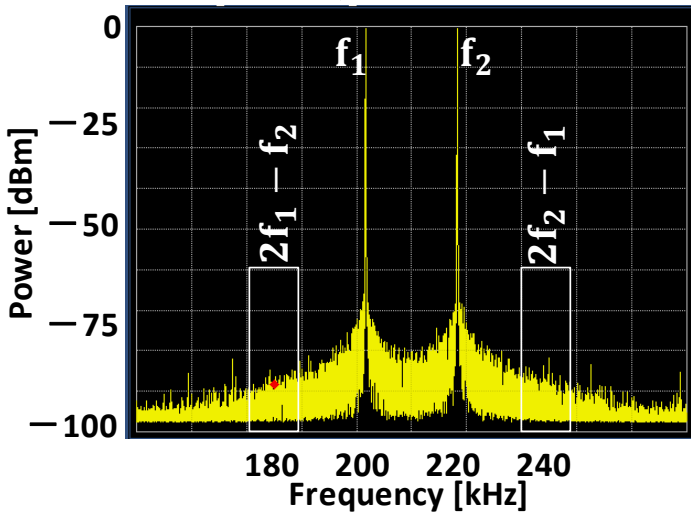
従来手法



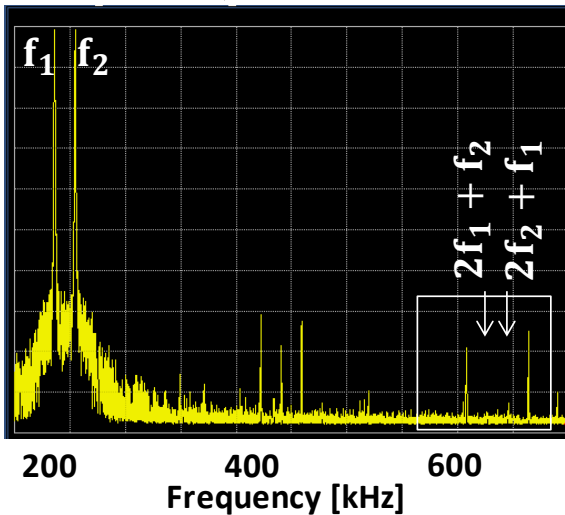
従来手法



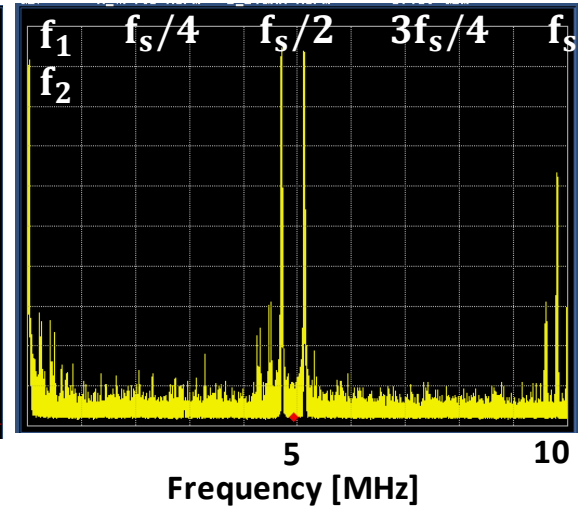
周波数切り替え手法



周波数切り替え手法

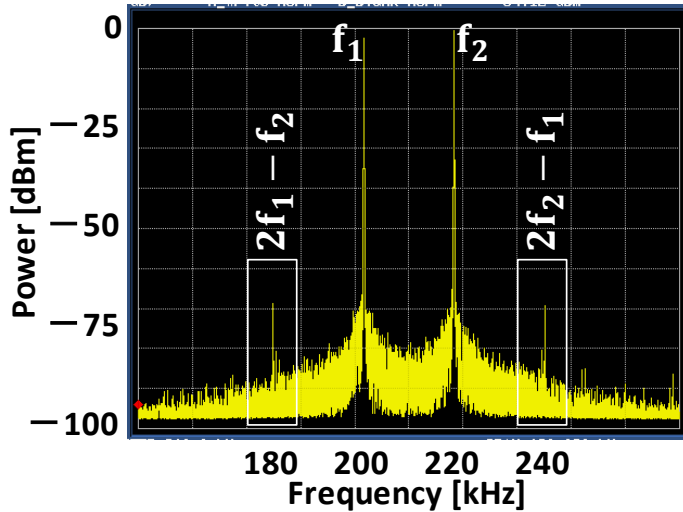


周波数切り替え手法

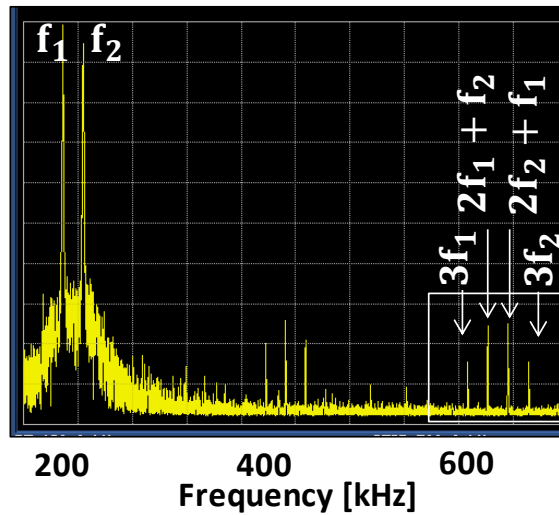


位相差 & 周波数切り替え手法

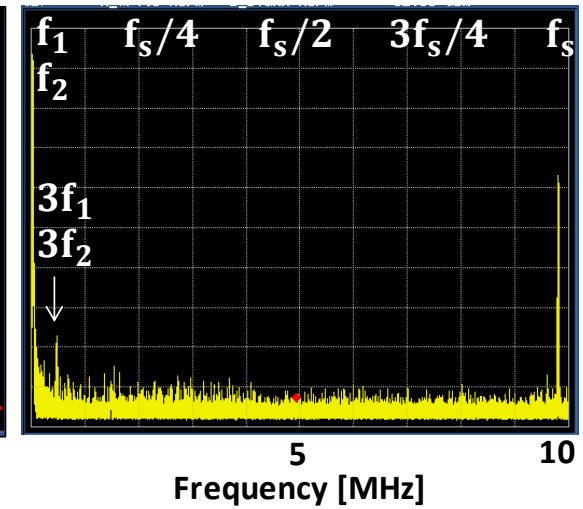
従来手法



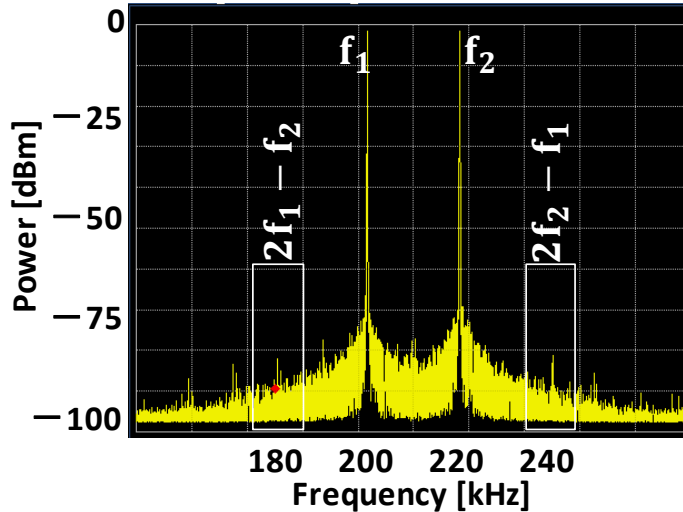
従来手法



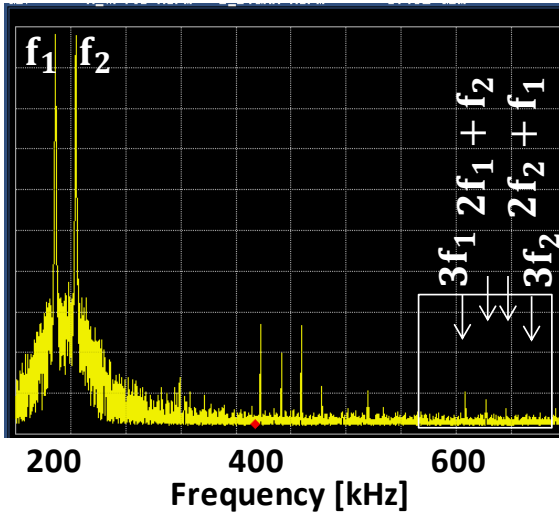
従来手法



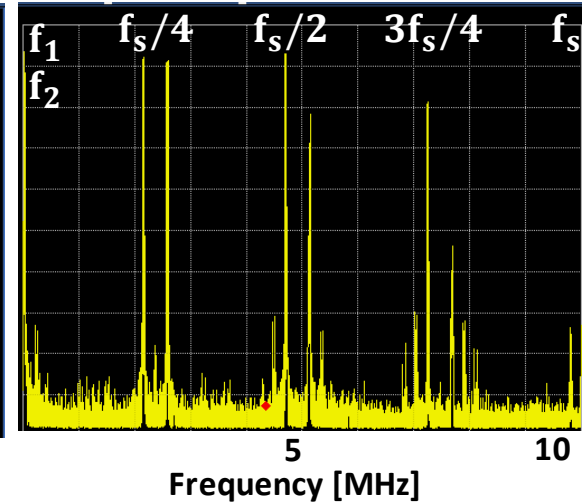
位相差 & 周波数切り替え手法



位相差 & 周波数切り替え手法

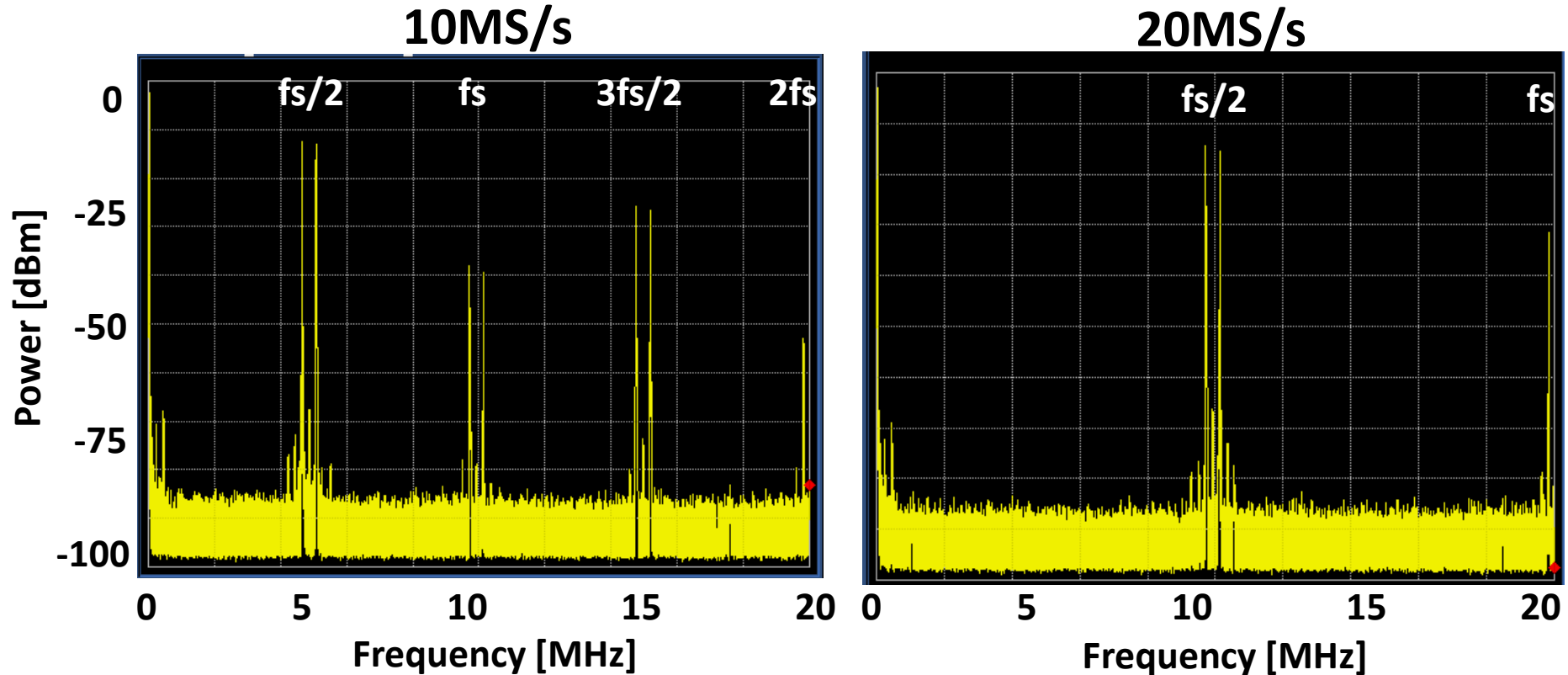


位相差 & 周波数切り替え手法



2倍速サンプリング

位相差切り替え手法



サンプリング速度を上げることでスプリアスが更に高周波側へ

微細化によりDAC速度の向上期待可能

→ フィルタ要求の緩和へ

OUTLINE

- 本研究の目的と今回の目標
- テスト信号の歪み低減技術
- シミュレーション検証
- 実機検証
- まとめと今後の課題

まとめと今後の課題

- テスト信号歪み低減技術を提案
- 付加コスト **¥0** (低コスト化技術)
- 位相差切り替え手法で**12.5dB**のSFDR改善
- 周波数切り替え手法で**10.4dB**のSFDR改善
- 位相差 & 周波数切り替え手法で**12.4dB**のSFDR改善
- 微細化によりDACの速度が向上することでスプリアスが更に高周波側へ移動しフィルタ要求緩和
- ADCへ提案テスト信号の適用を検討