

# Two-Tone Signal Generation for Testing of Communication Application Devices

○加藤啓介 安部文隆 若林和行 高川  
山田隆文 小林春夫 小林修 新津葵一

群馬大学  
(株)半導体理工学研究センター(STARC)

# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# 研究背景

ミクスドシグナルSoC、通信用デバイスのキーコンポーネント  
→ アナログデジタル変換回路(ADC)

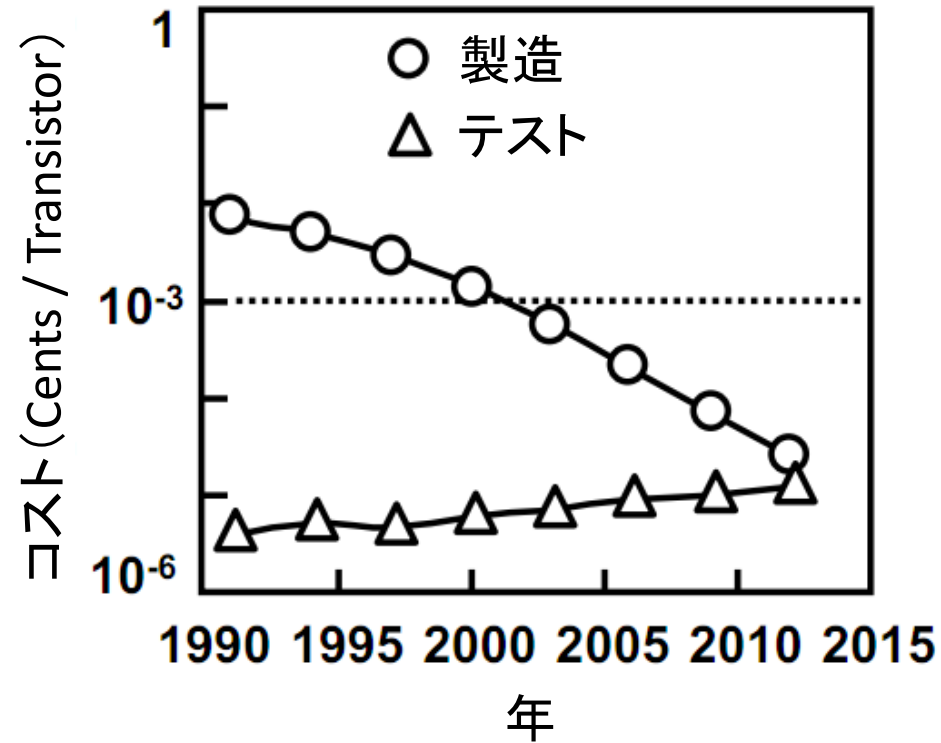
製造コスト → 減少

テストコスト → 増加

(トランジスタ当たり)



低コストテストが求められる



テストコストの傾向  
(ITRS 2001)

# 研究目的

低コスト(低性能)信号発生器で  
適正な品質のADC線形性テストを実現

低性能信号発生器 → 歪み大

低歪みの2トーン信号を  
低コストAWGで生成



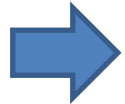
大量のテストに効果大



AWG : 任意波形発生器 (Arbitrary Waveform Generator)

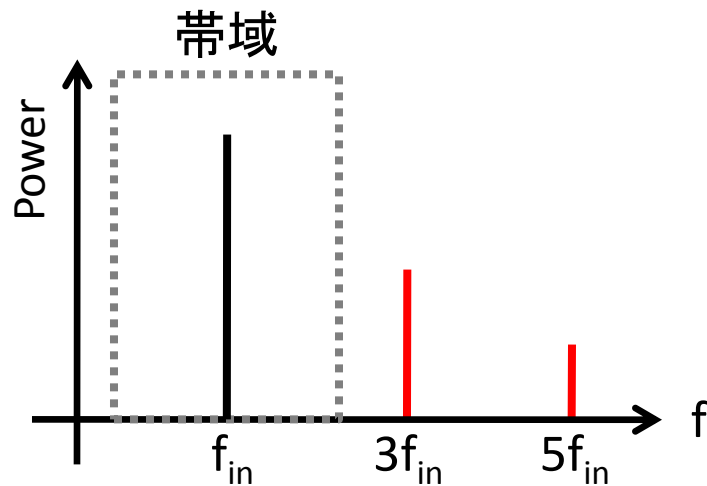
# 2トーン信号の必要性

通信用デバイス



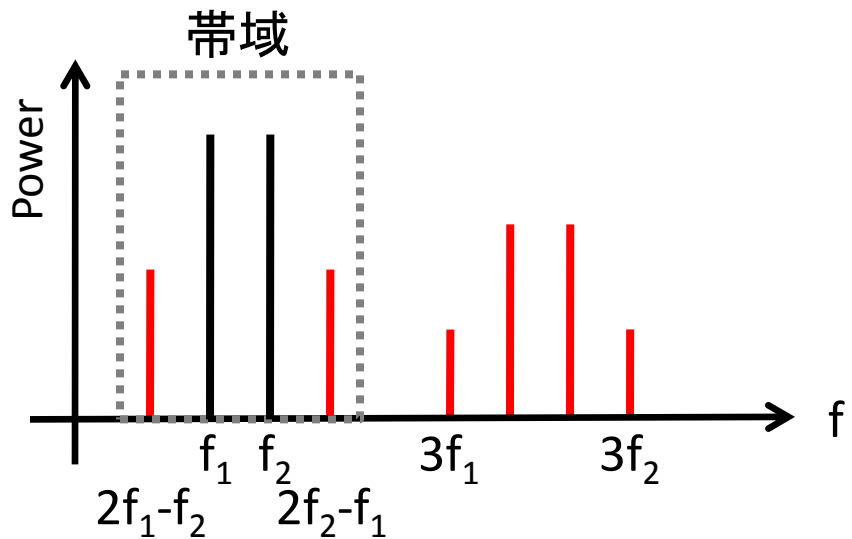
狭帯域・高周波信号を受信

通信用デバイスに非線形性あり



1トーンテスト信号

➡ 線形性のテスト不可



2トーンテスト信号

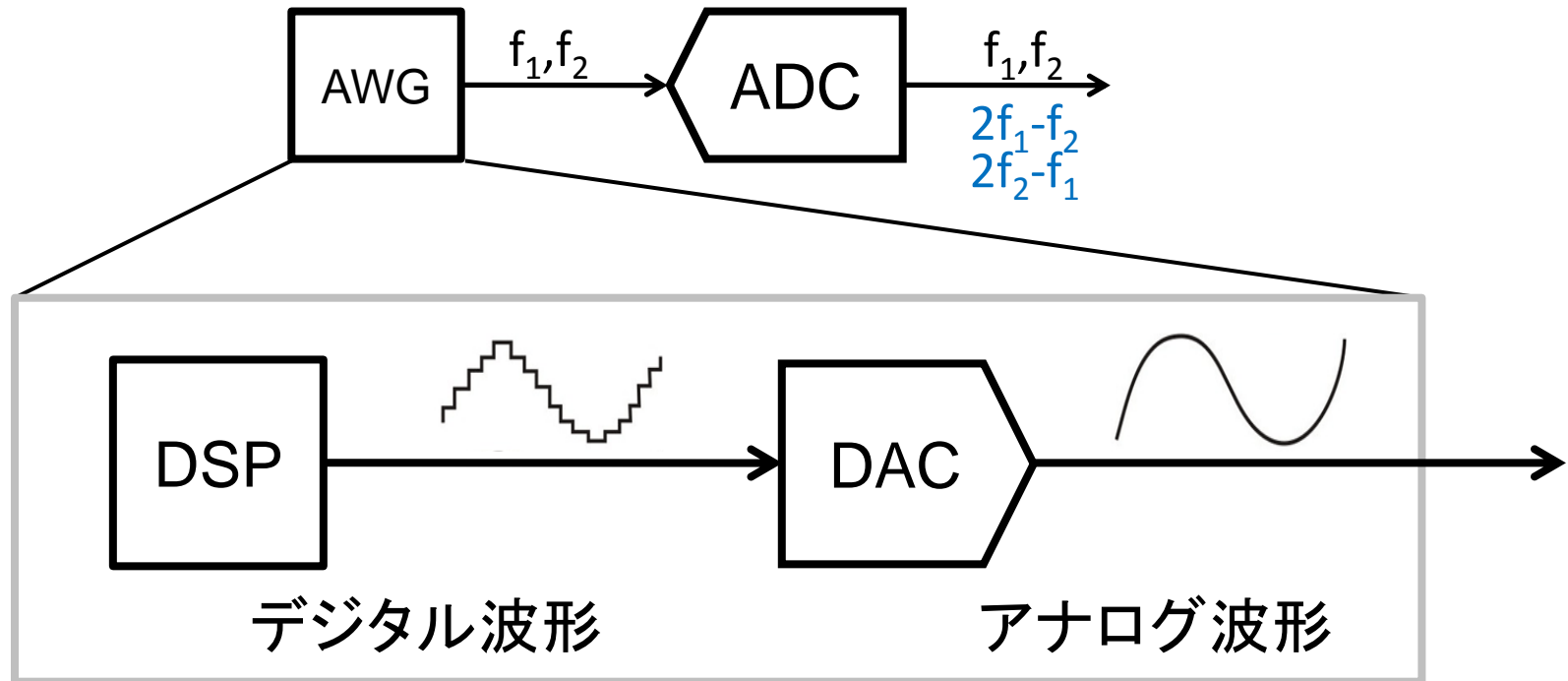
➡ 非線形性により  
帯域内に歪み発生

# アウトライン

- 研究背景・目的
- **テスト信号の発生**
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

# AWGによるテスト信号発生

AWG : 任意波形発生器 (arbitrary waveform generator)

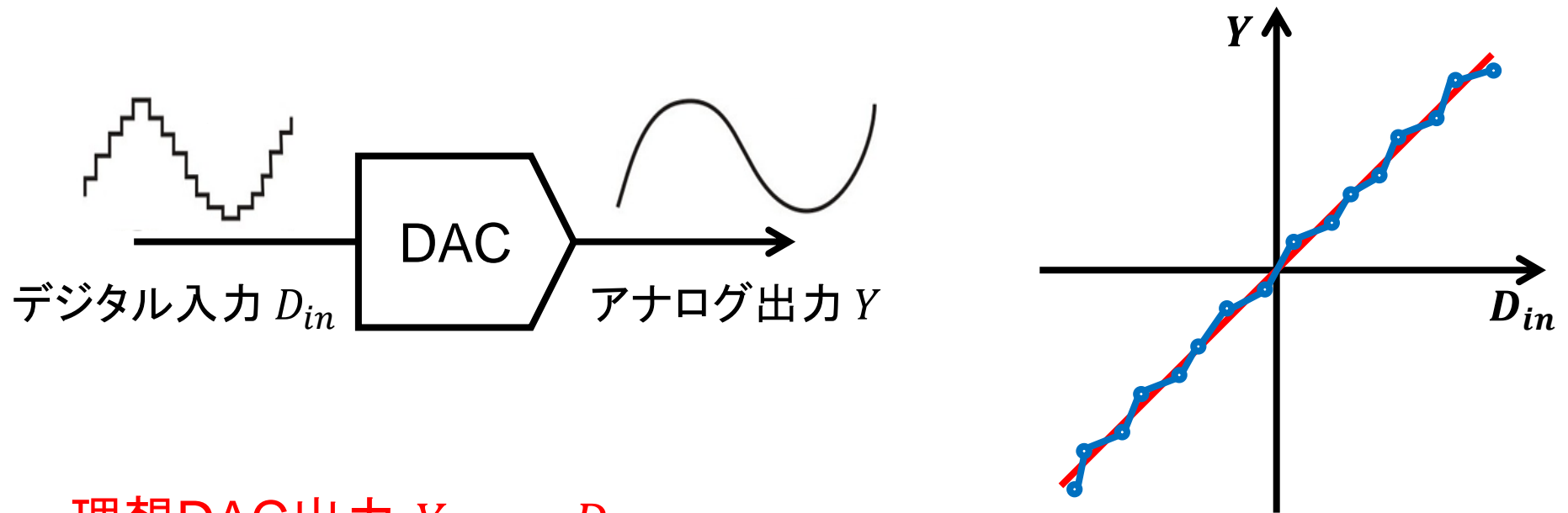


AWGブロック図

DSPで任意デジタル波形をDACに入力  
➡ アナログ波形を出力



# DACの非線形性による歪みの発生



理想DAC出力  $Y = a_1 D_{in}$

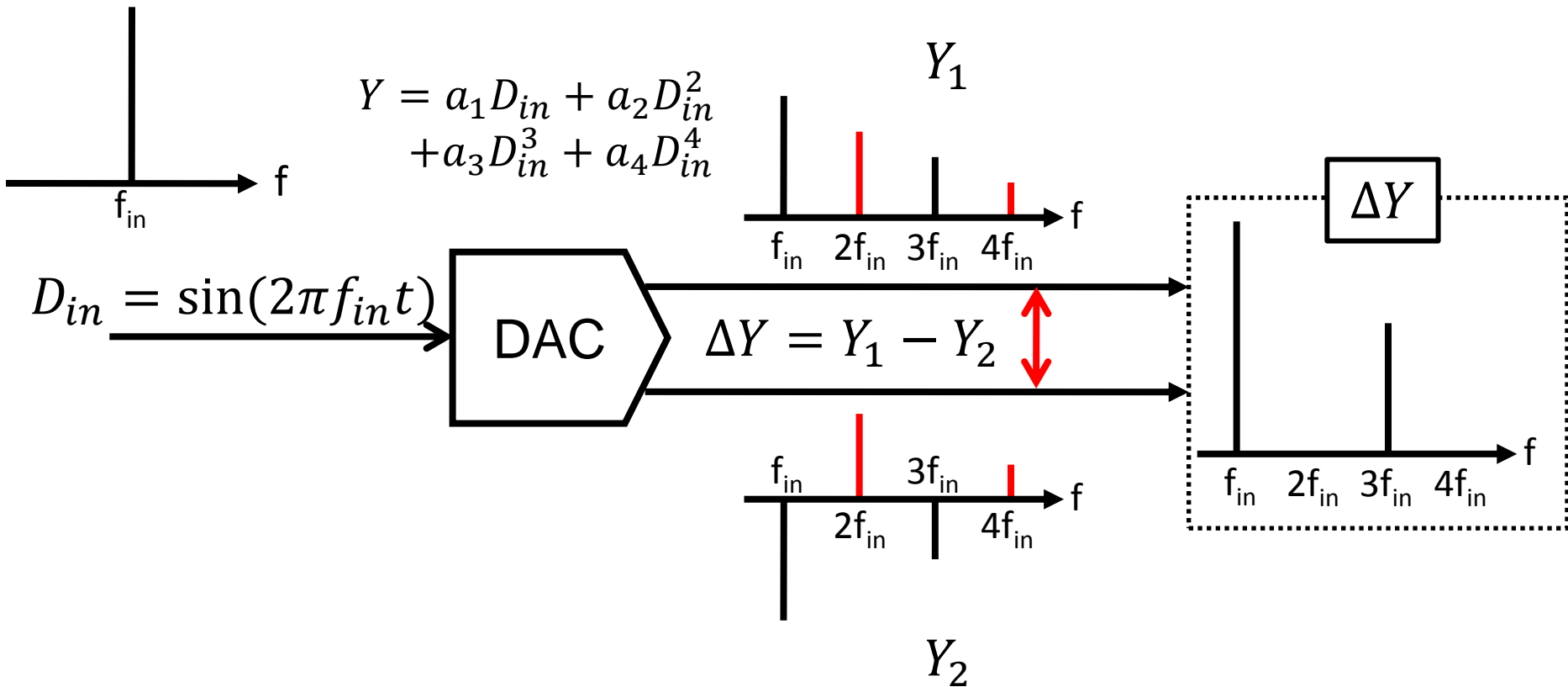
現実DAC出力  $Y = a_0 + a_1 D_{in} + \boxed{a_2 D_{in}^2} + \boxed{a_3 D_{in}^3} + \dots$   
2次歪み 3次歪み

素子のばらつきなどにより非線形



歪みが発生

# 差動構成による偶数次歪みの除去



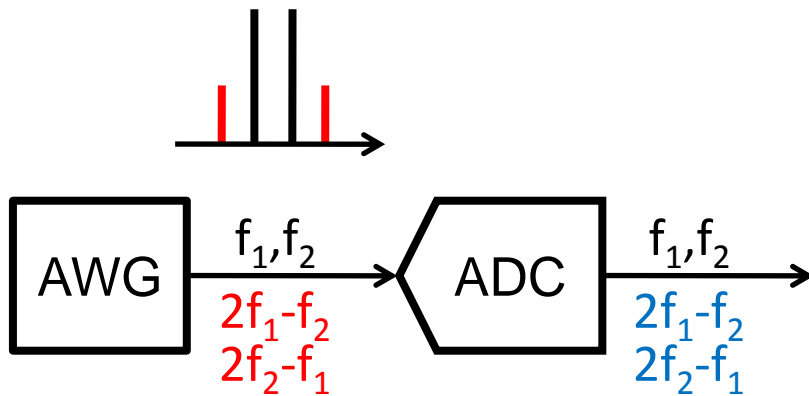
差動出力で偶数次歪みキャンセル



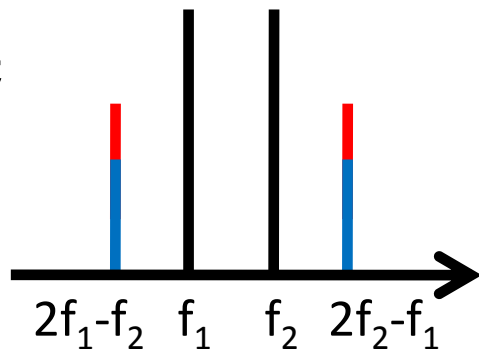
影響の大きい3次歪みを考慮

# ADC線形性テスト信号への要求

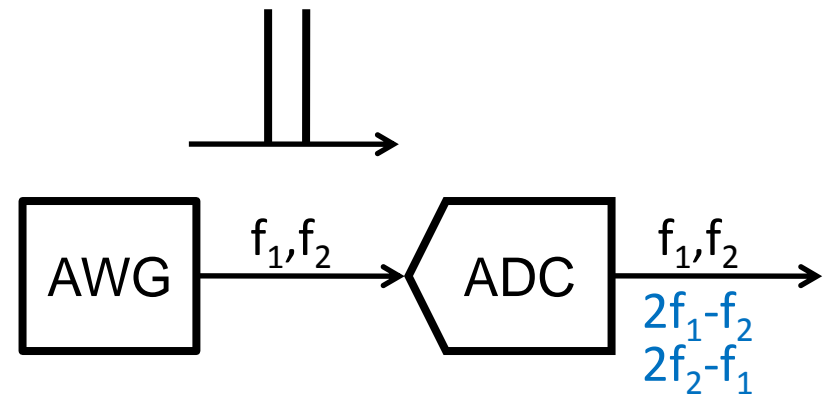
歪みのある信号発生



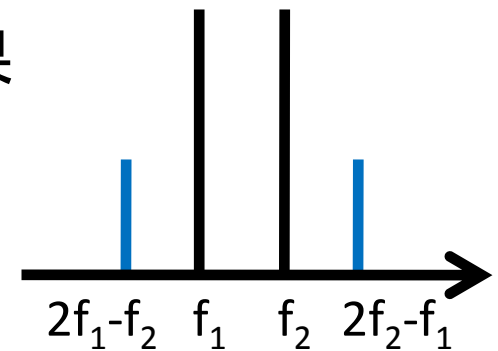
テスト結果  
判別不可



歪みのない信号発生



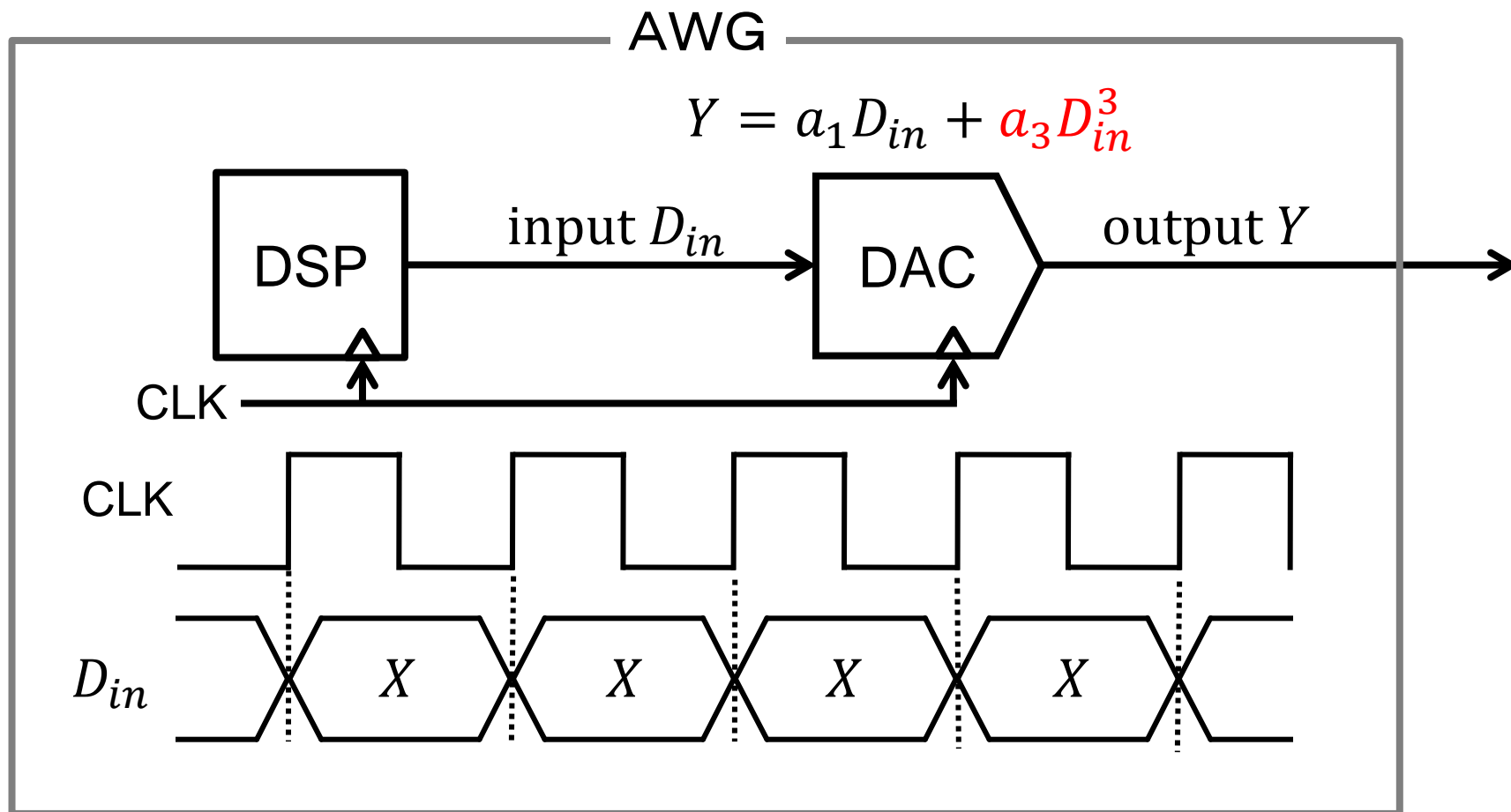
テスト結果  
判別可



# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- **従来手法**
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

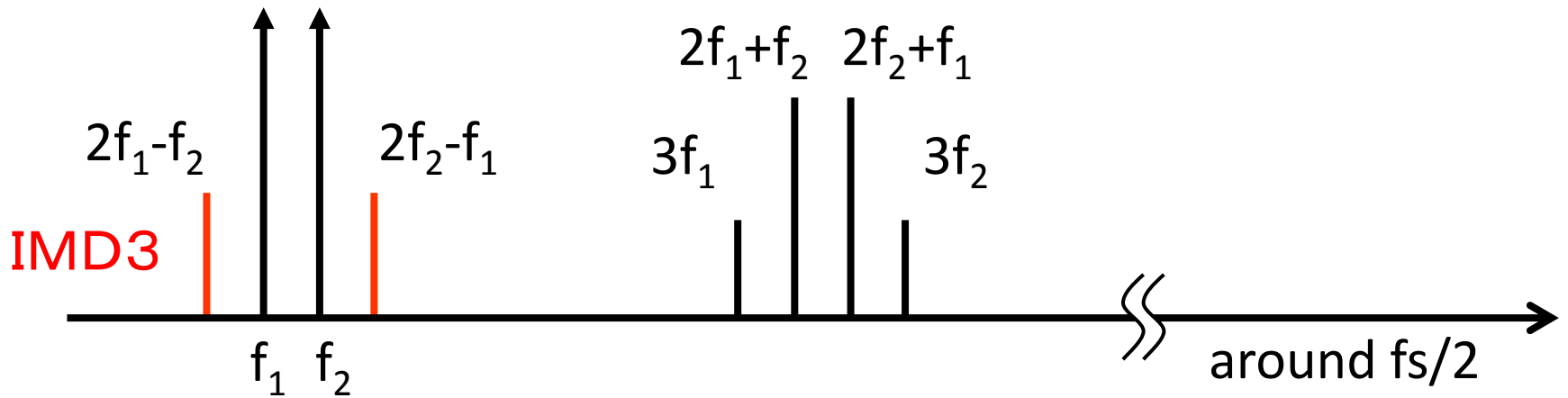
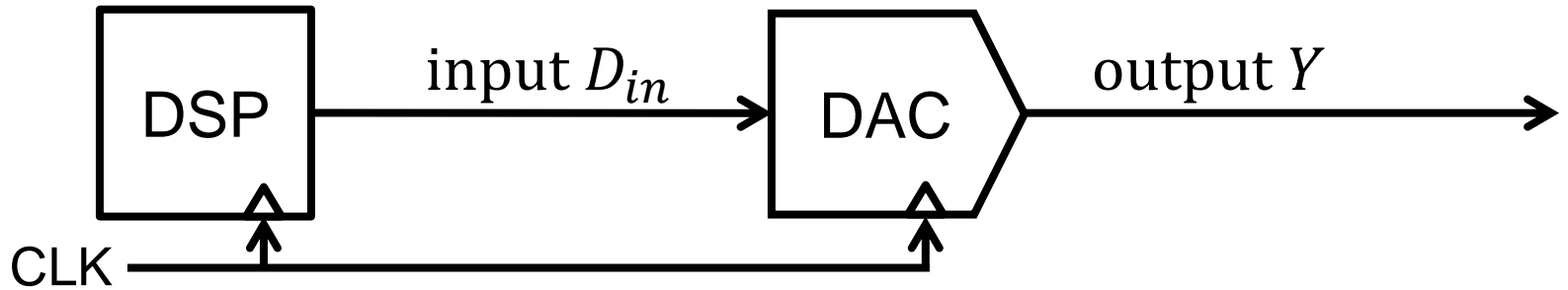
# 従来手法



$$X = A \cdot \sin(2\pi f_1 n T_s) + B \cdot \sin(2\pi f_2 n T_s)$$

# 従来手法

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



出力  $Y$  のスペクトル

IMD: 相互変調歪み ( Inter-modulation Distortion )

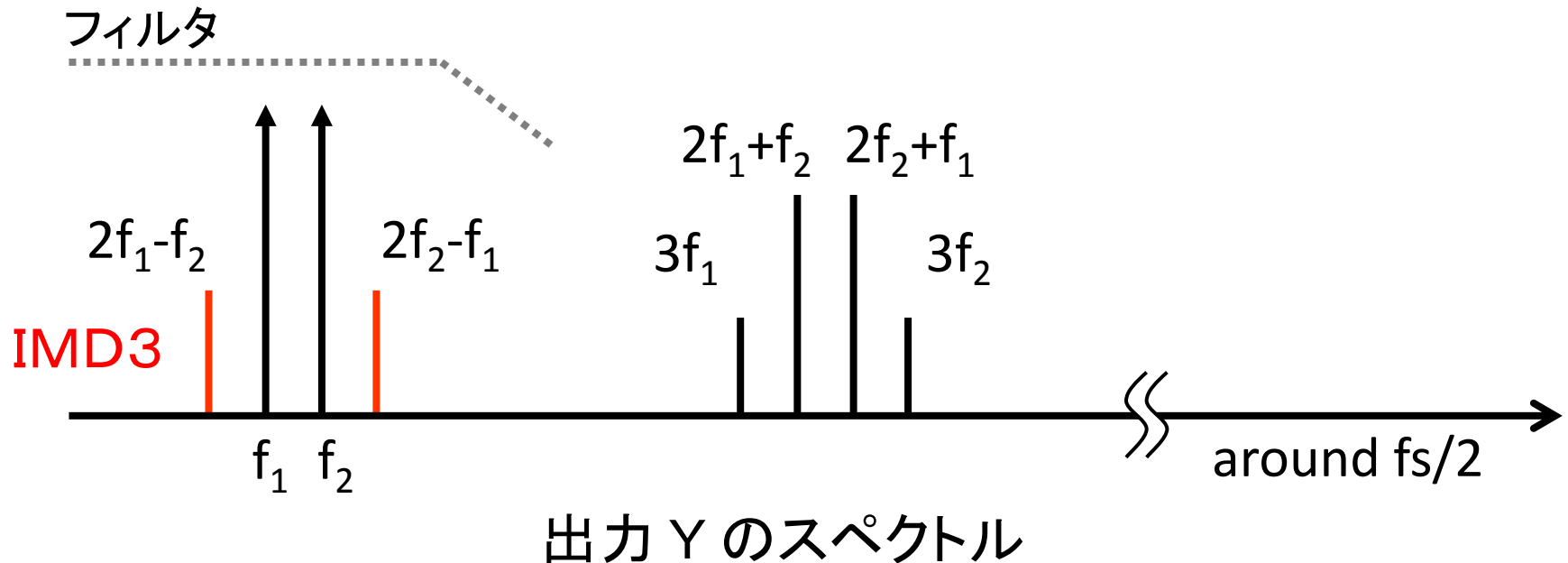
# 相互変調歪みの性質

$f_1, f_2$  が近い値



相互変調歪み → 入力周波数に近傍  
フィルタでの除去は困難

AWGでは問題となる



# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- **提案手法**
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ



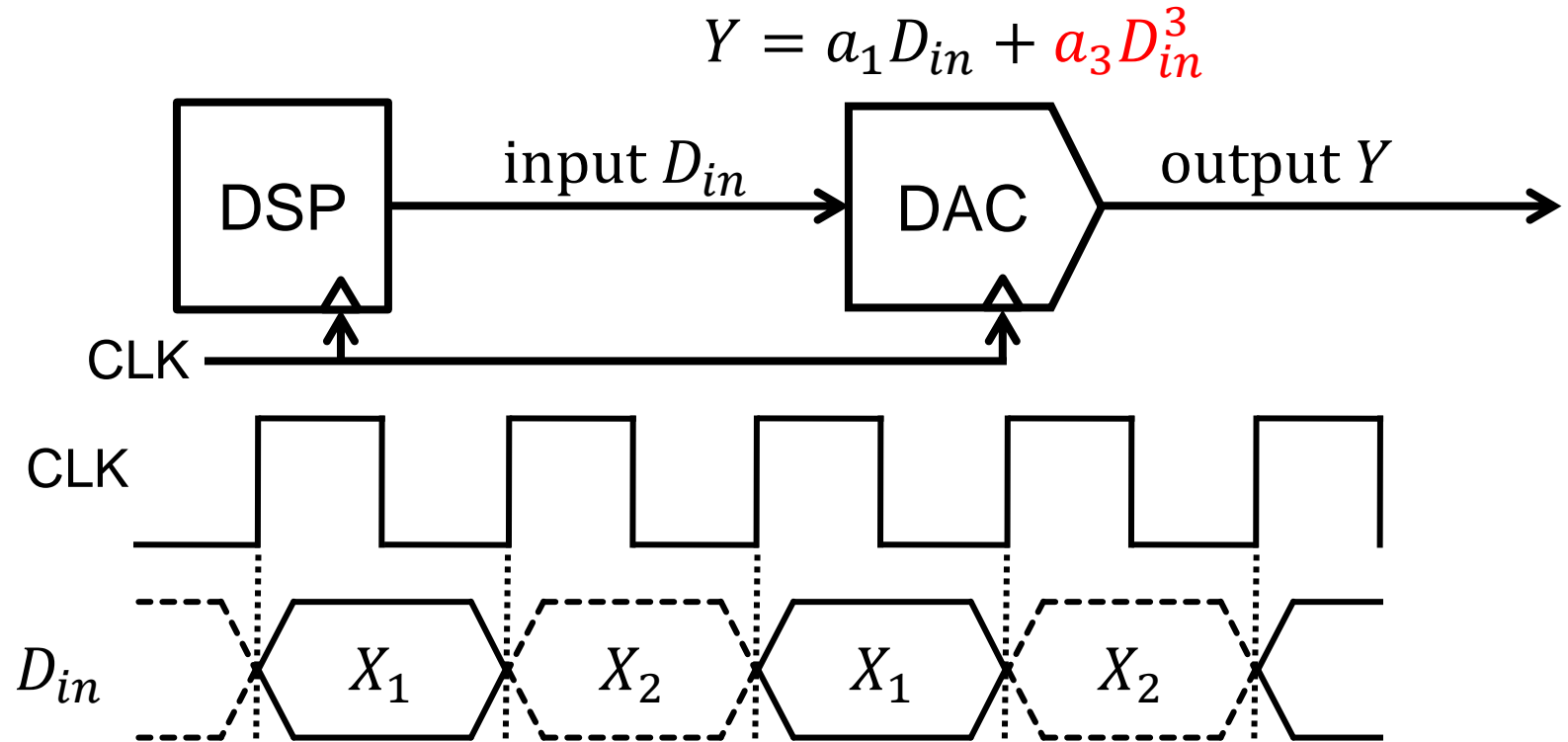
# 提案手法

- 位相切り替え手法
- 周波数切り替え手法
- 位相 & 周波数切り替え手法

# 提案手法

- 位相切り替え手法
- 周波数切り替え手法
- 位相 & 周波数切り替え手法

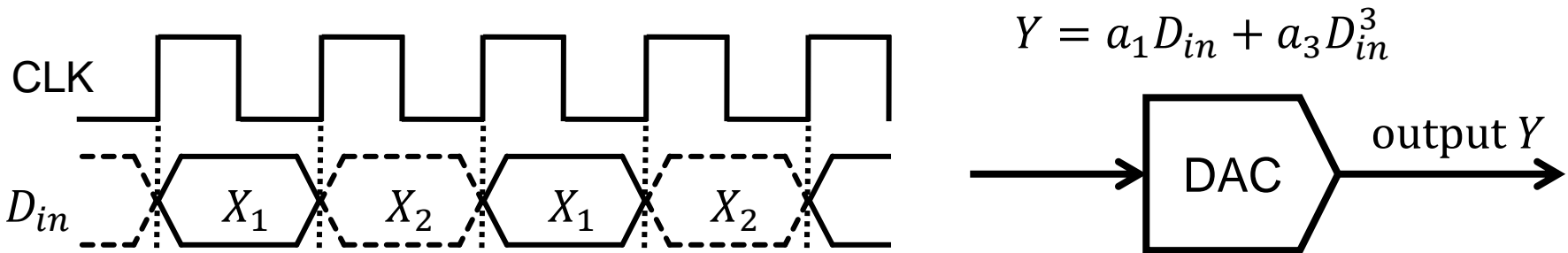
# 位相切り替え手法



$$X_1 = A \cdot \sin\left(2\pi f_1 n T_s + \frac{\pi}{6}\right) + B \cdot \sin\left(2\pi f_2 n T_s - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$X_2 = A \cdot \sin\left(2\pi f_1 n T_s - \frac{\pi}{6}\right) + B \cdot \sin\left(2\pi f_2 n T_s + \frac{\pi}{6}\right)$$

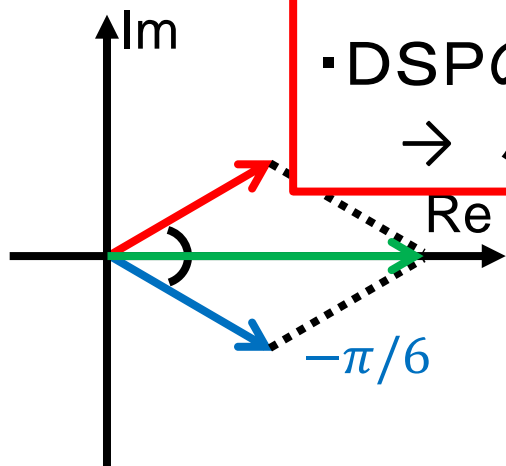
# 位相切り替え手法 原理



$$X_1 = A \cdot \sin(2\pi f t)$$

$$X_2 = A \cdot \sin(2\pi f t + \pi/3)$$

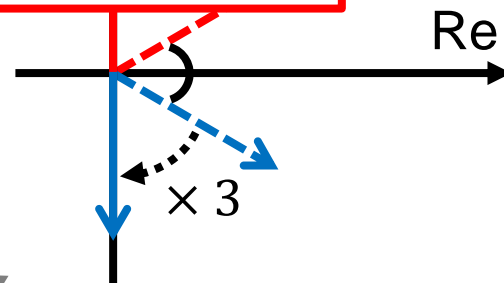
- ・DACの歪み係数 ( $a_1, a_3$ ) に依存しない  
→ 歪みの同定不要
- ・DSPのプログラム変更のみ  
→ ハードの変更が必要ない



位相差  $\pi/3$

信号成分

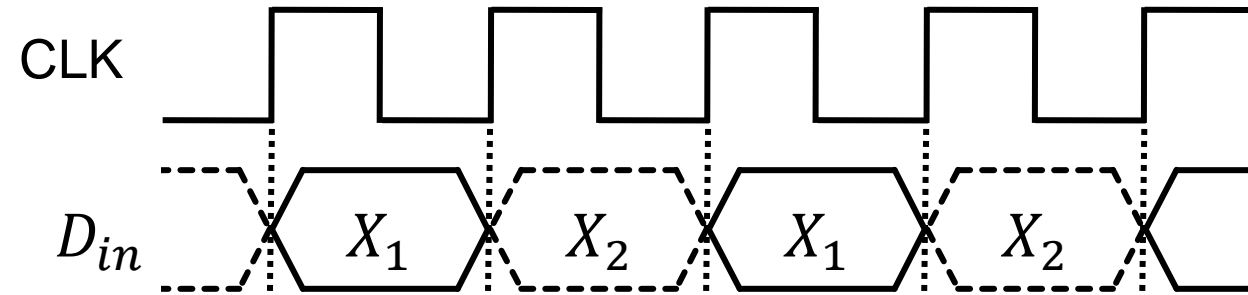
$$Y = a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3$$



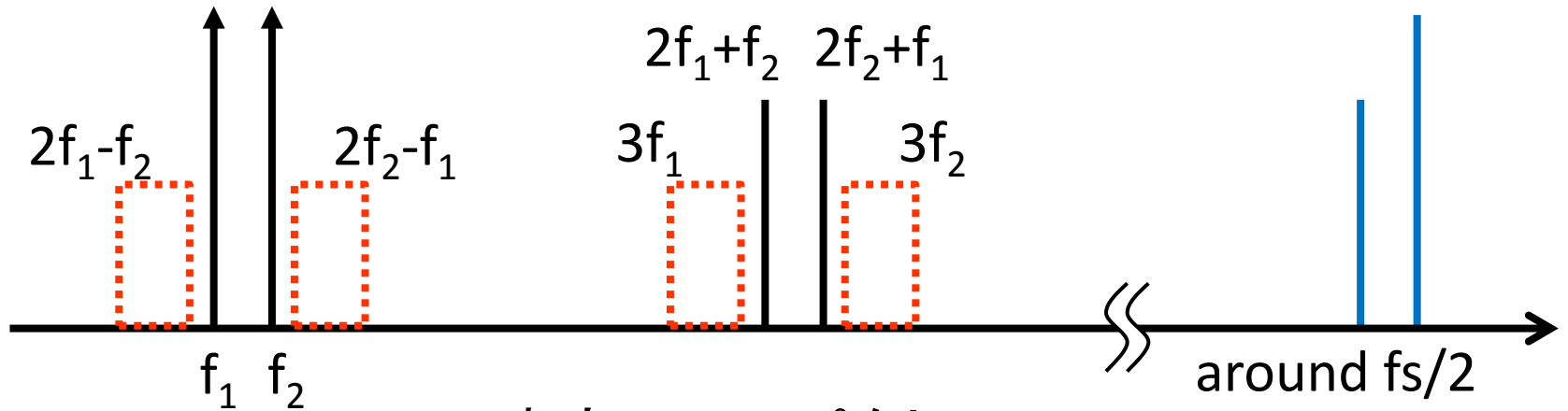
位相差  $3 \cdot \pi/3 = \pi$

歪み成分

# 位相切り替え手法 効果



切り替えによって  
スプリアス発生

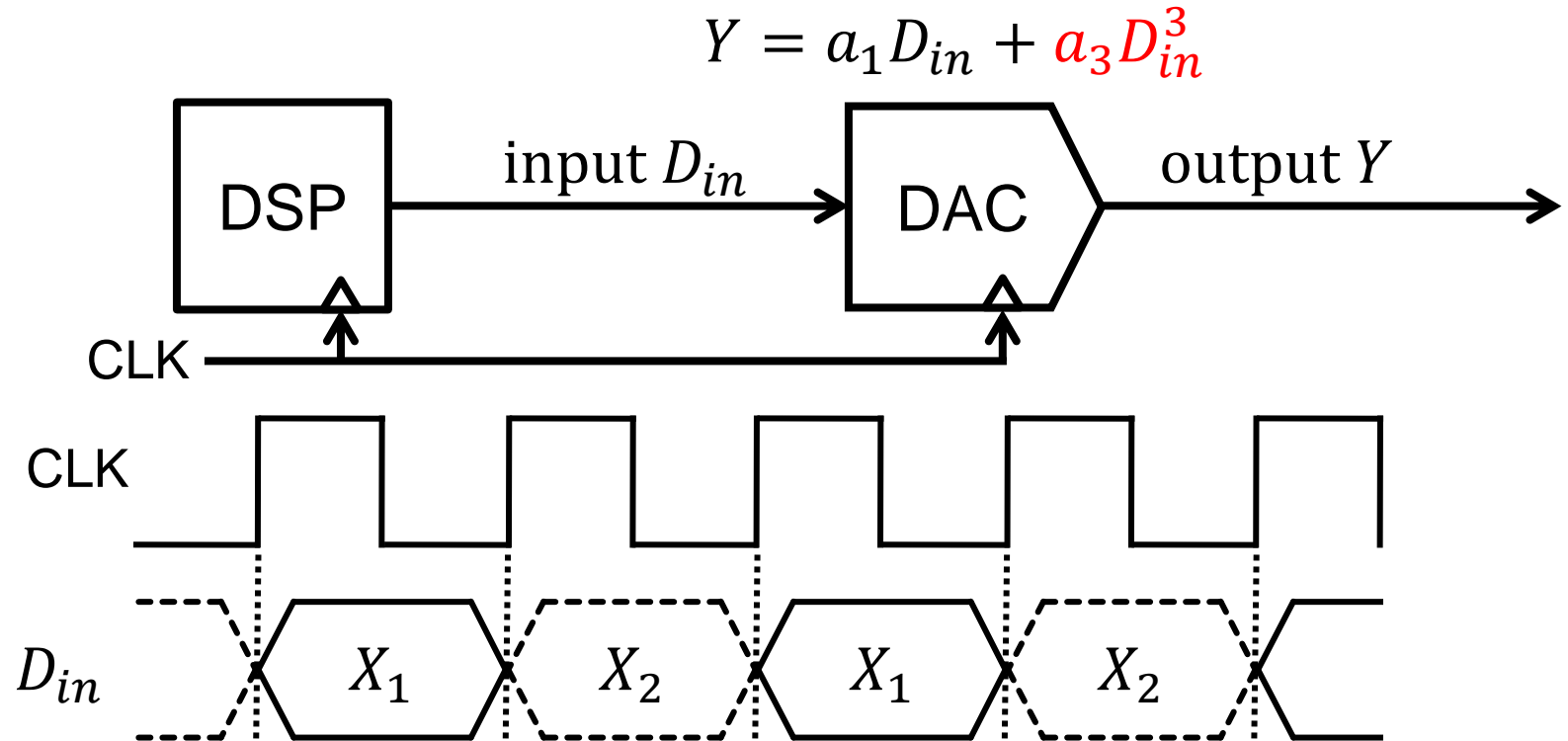


出力 Y のスペクトル

# 提案手法

- 位相切り替え手法
- 周波数切り替え手法
- 位相 & 周波数切り替え手法

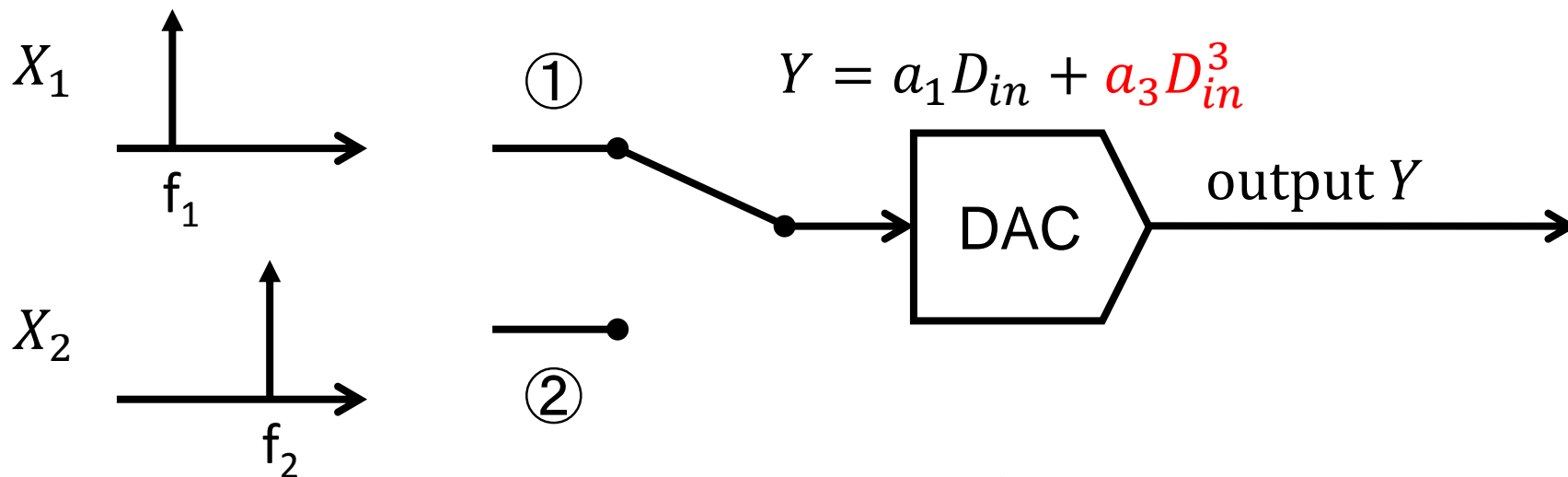
# 周波数切り替え手法



$$X_1 = A \cdot \sin(2\pi f_1 n T_s)$$

$$X_2 = B \cdot \sin(2\pi f_2 n T_s)$$

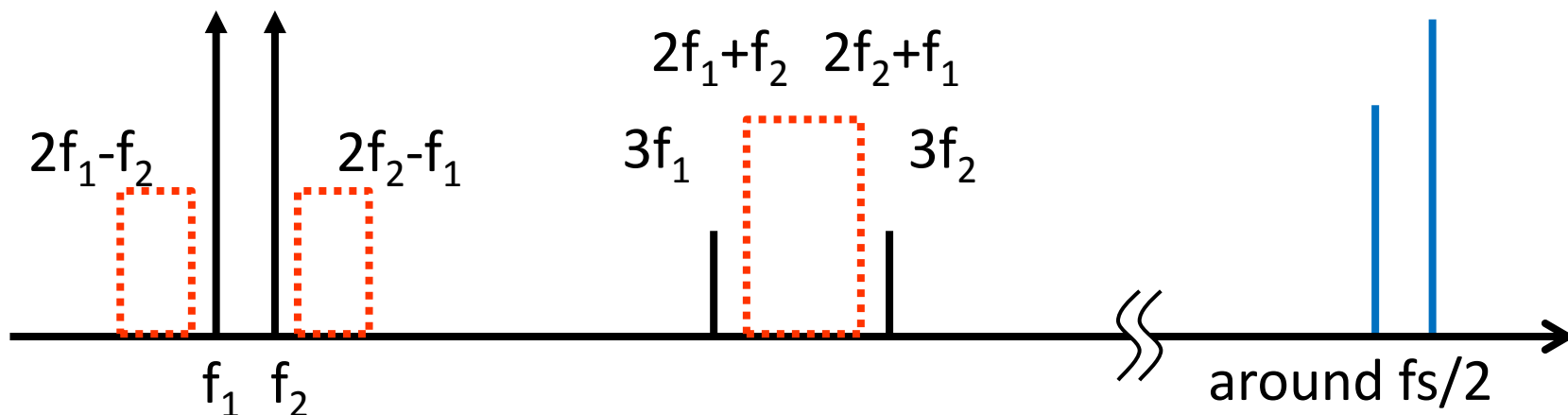
# 周波数切り替え手法 原理



1トーンずつ入力  $\rightarrow f_1, f_2$  は独立



IMD3は発生しない



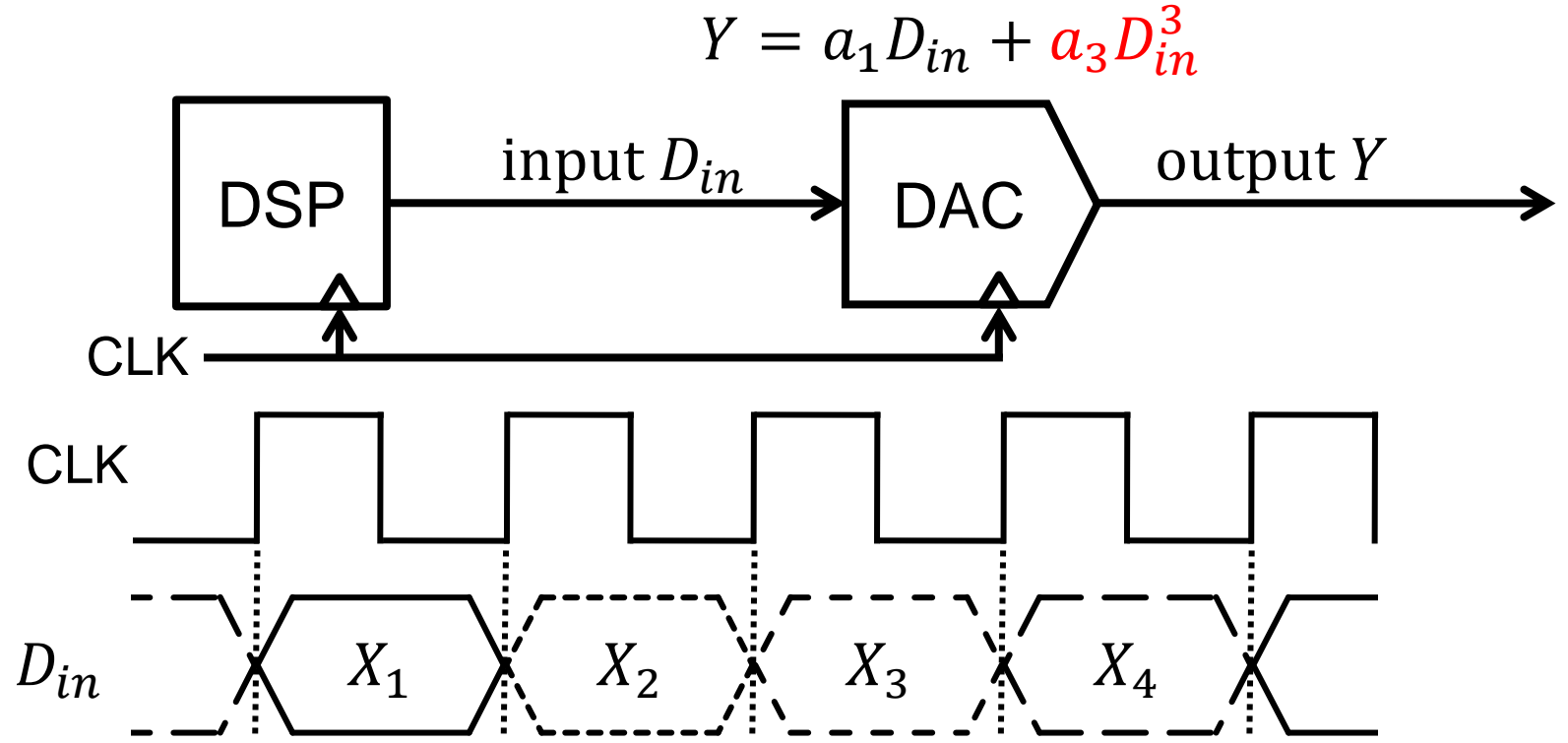
出力  $Y$  のスペクトル



# 提案手法

- 位相切り替え手法
- 周波数切り替え手法
- **位相 & 周波数切り替え手法**

# 位相 & 周波数切り替え手法

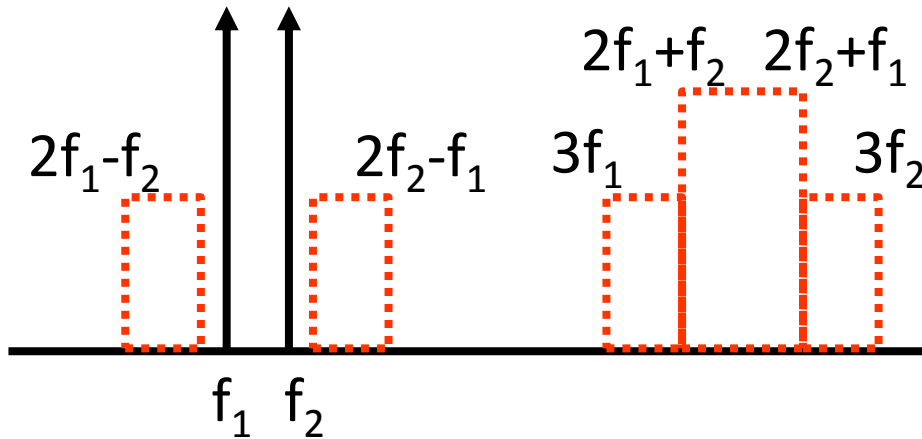


$$X_1 = A \cdot \sin\left(2\pi f_1 n T_s + \frac{\pi}{6}\right) \quad X_2 = B \cdot \sin\left(2\pi f_2 n T_s - \frac{\pi}{6}\right)$$

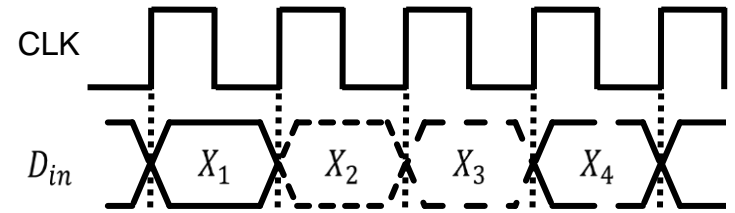
$$X_3 = A \cdot \sin\left(2\pi f_1 n T_s - \frac{\pi}{6}\right) \quad X_4 = B \cdot \sin\left(2\pi f_2 n T_s + \frac{\pi}{6}\right)$$

# 位相 & 周波数切り替え手法 効果

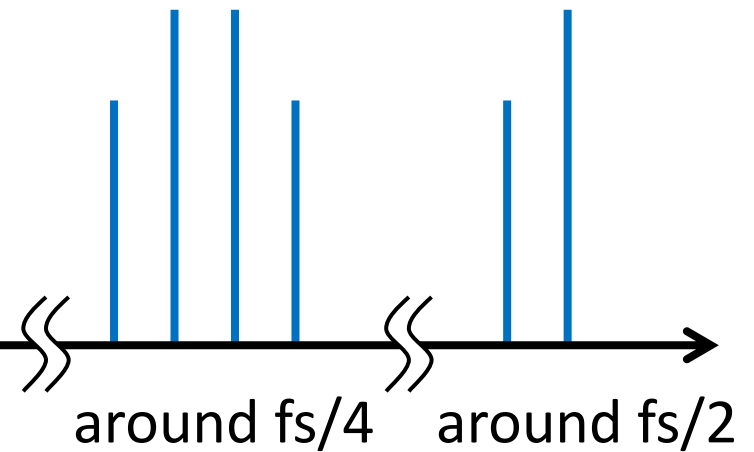
周波数切り替えでキャンセル



位相切り替えでキャンセル



信号4つの切り替えで発生



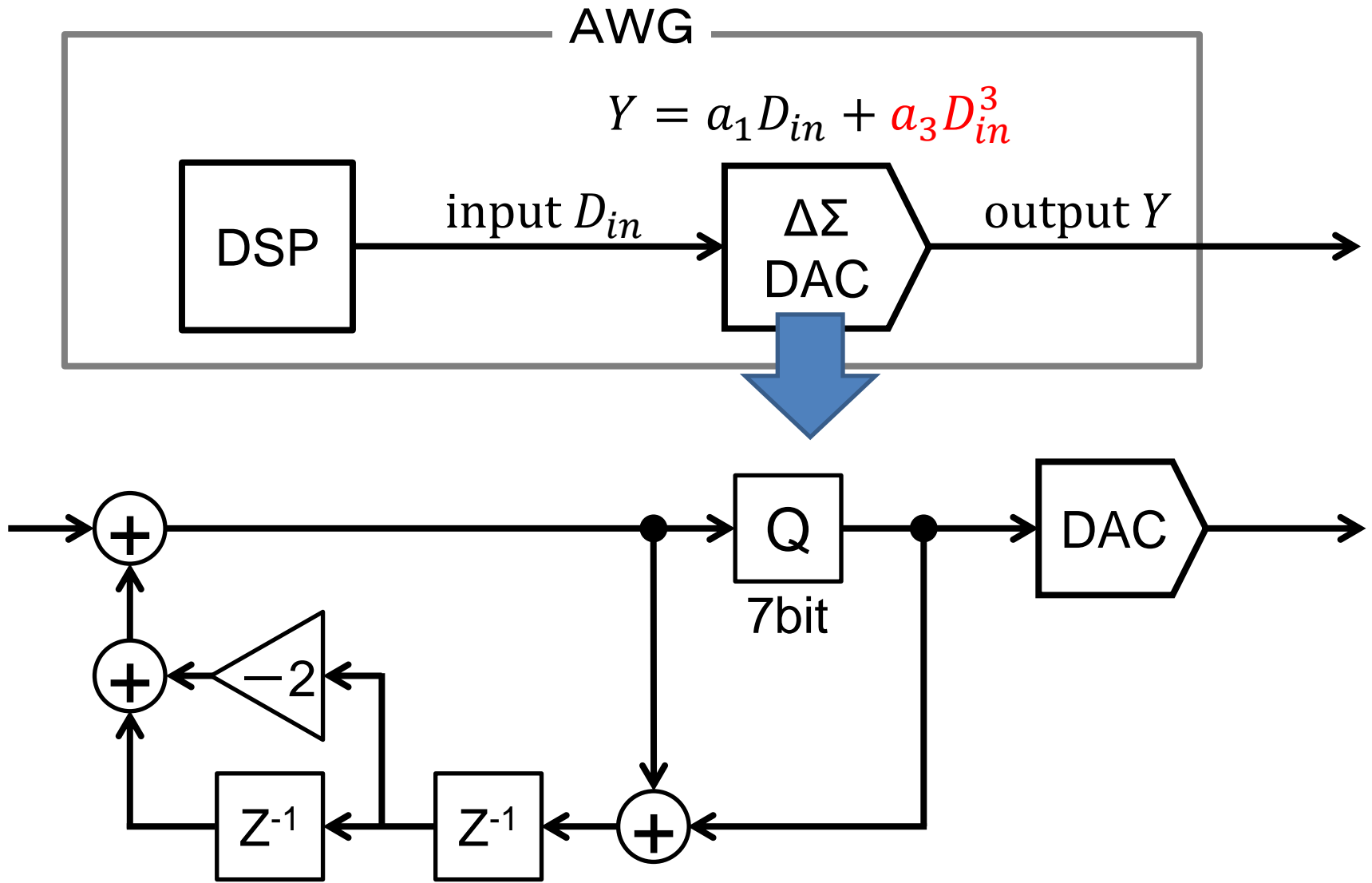
# 出力スペクトルの比較

	キャンセルされる成分	発生する成分
従来手法		$2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ $2f_1 + f_2, 2f_2 + f_1$ $3f_1, 3f_2$
位相切り替え手法	$2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ $3f_1, 3f_2$	around $f_s/2$
周波数切り替え手法	$2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ $2f_1 + f_2, 2f_2 + f_1$	around $f_s/2$
位相 & 周波数 切り替え手法	$2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ $2f_1 + f_2, 2f_2 + f_1$ $3f_1, 3f_2$	around $f_s/4, f_s/2$

# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- まとめ

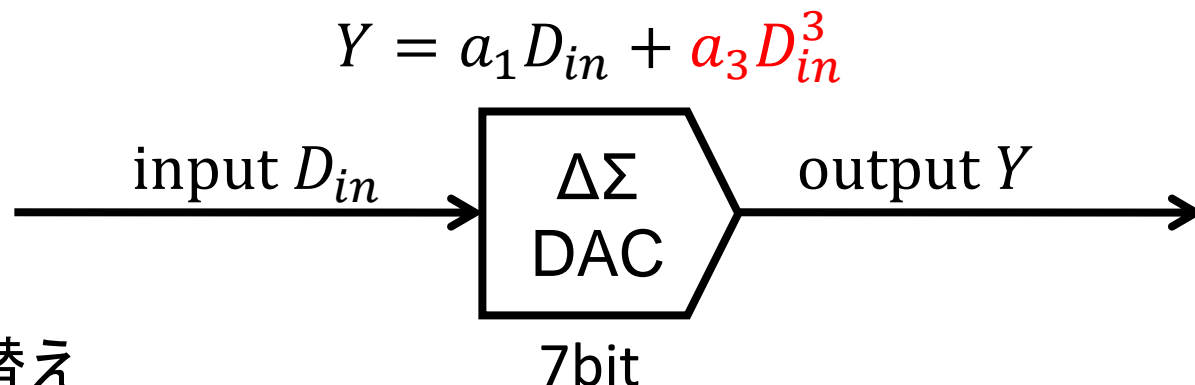
# DACの構成



2次エラーフィードバック変調器

# シミュレーション条件

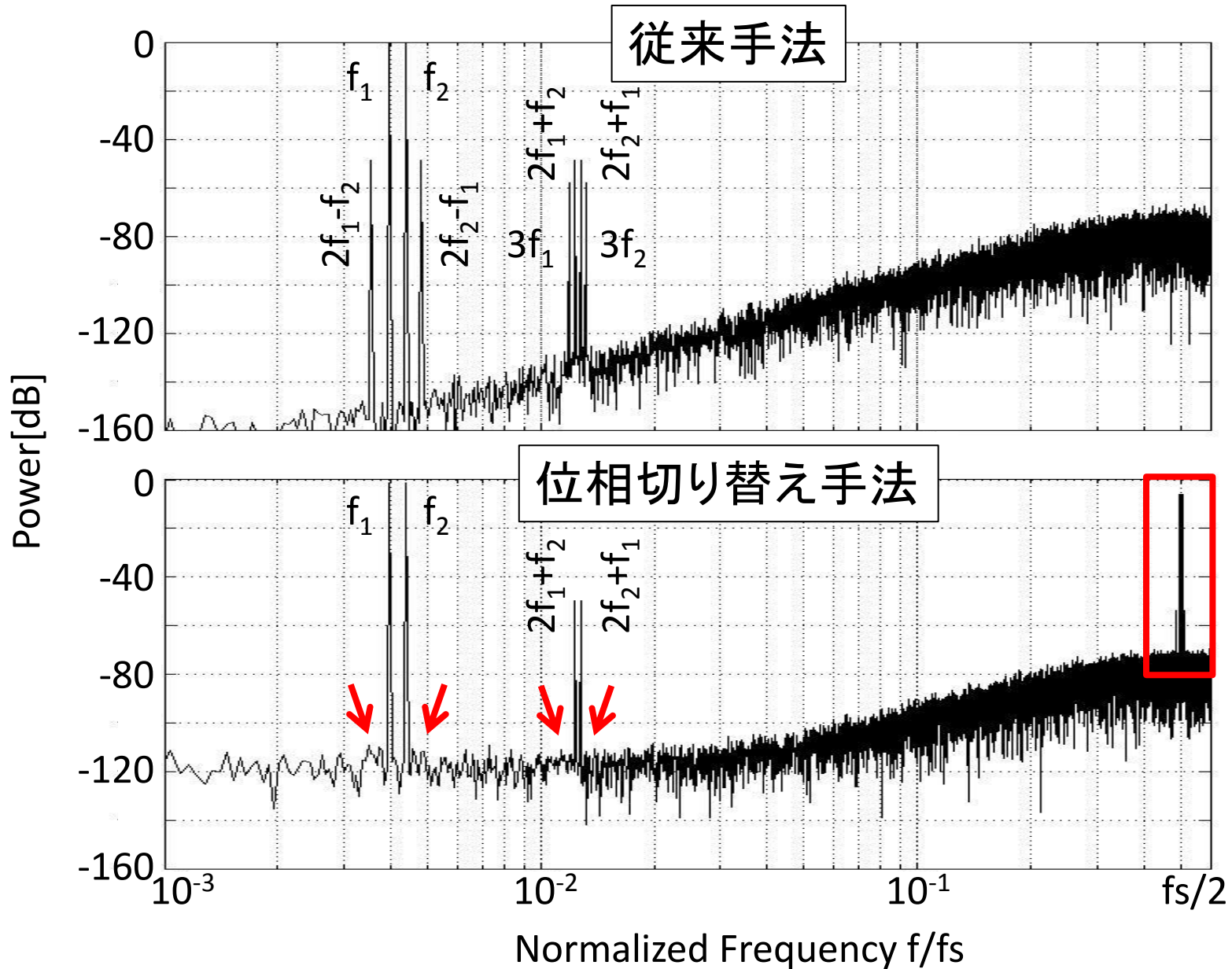
- ・従来信号
- ・提案信号
  - ▶位相切り替え
  - ▶周波数切り替え
  - ▶位相&周波数切り替え



DAC歪係数 $a_1$	1
DAC歪係数 $a_3$	-0.005
入力周波数 $f_1$	65
入力周波数 $f_2$	72
入力振幅	1
サンプリング周波数	$2^{14}$

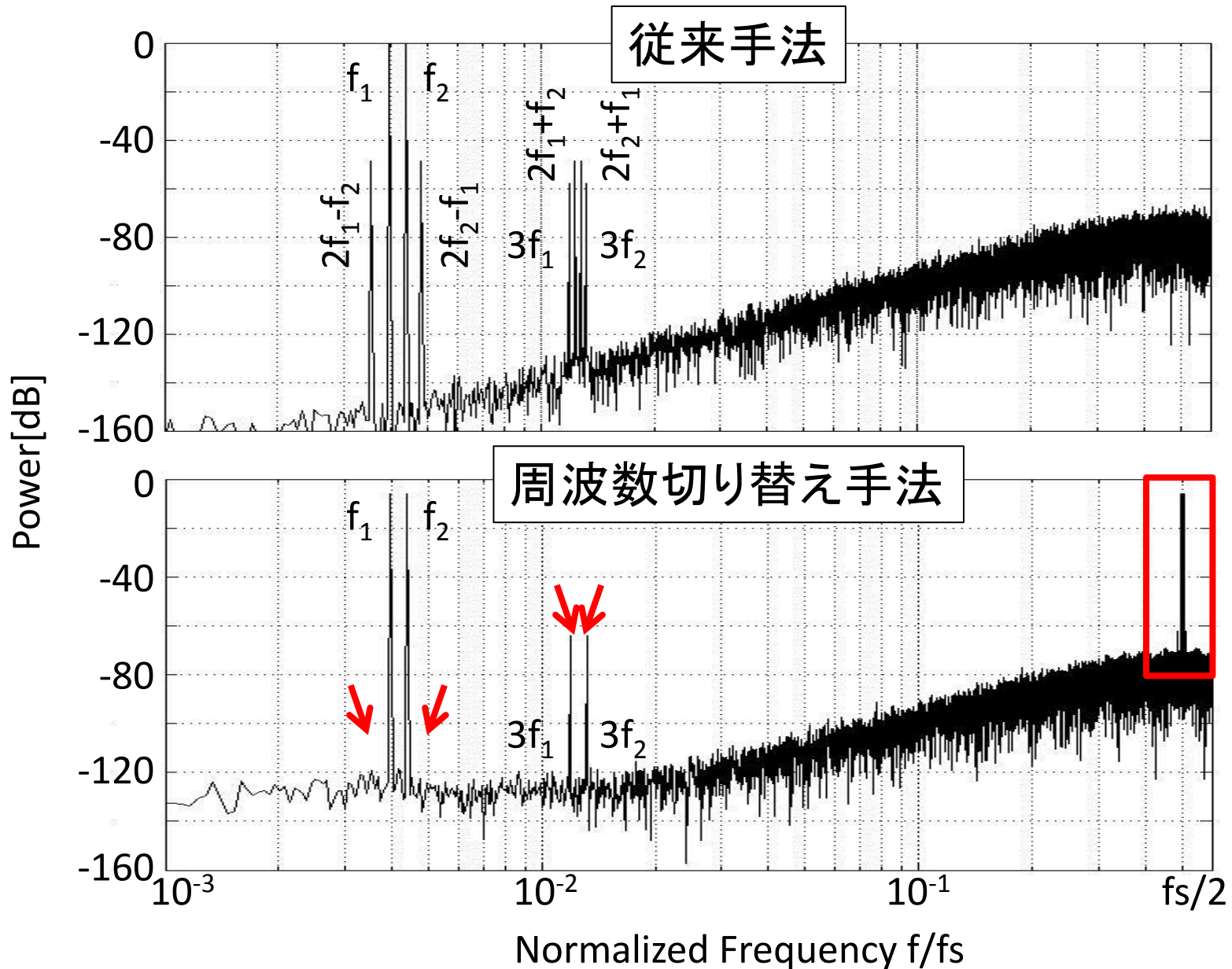
Matlabでシミュレーションを行った

# 位相切り替え手法

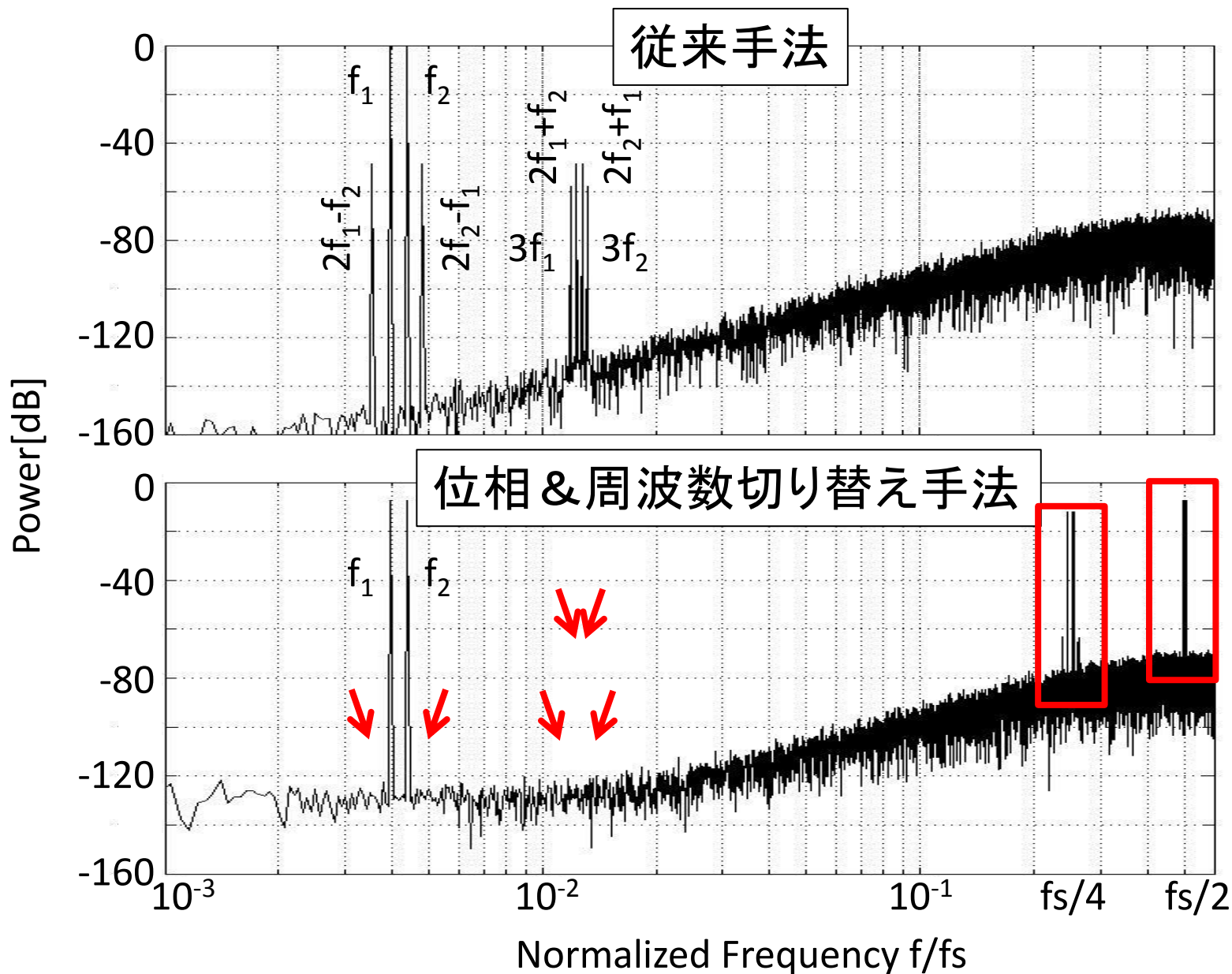




# 周波数切り替え手法



# 位相 & 周波数切り替え手法



# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- **実験結果**
- まとめ

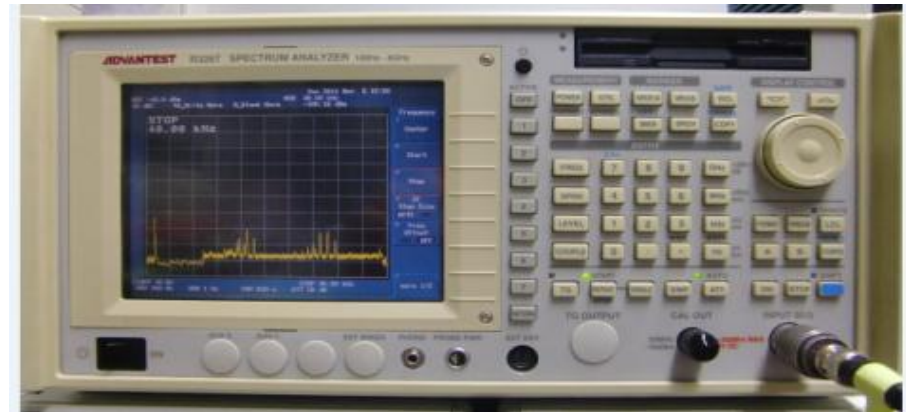
# 実験装置

AWG  
(Agilent 33220A)



周波数範囲 (Hz)	1u—6.0M
電圧範囲 ( $V_{pp}$ )	10m—10
分解能	14bit , 50MSa/s

Spectrum Analyzer  
(ADVANTEST R3267)

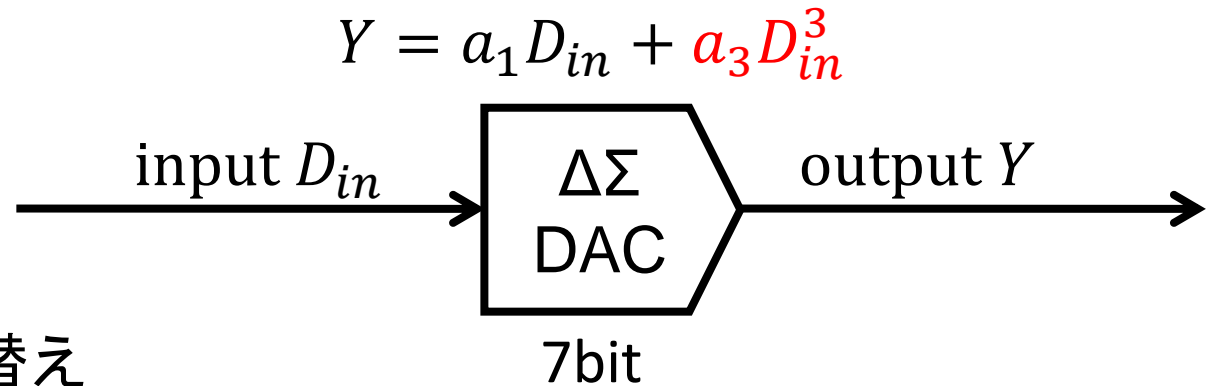


周波数範囲 (Hz)	100—8G
分解能帯域幅 (Hz)	10—30M

# 実験条件

- ・従来信号
- ・提案信号

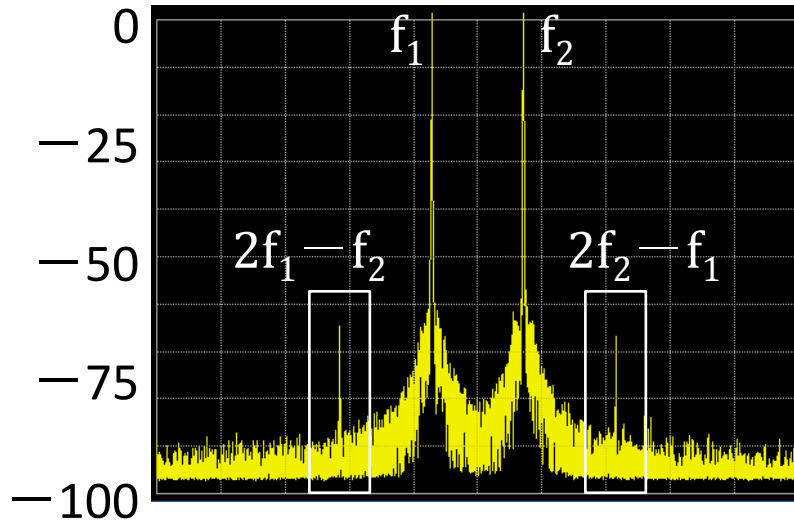
- 位相切り替え
- 周波数切り替え
- 位相 & 周波数切り替え



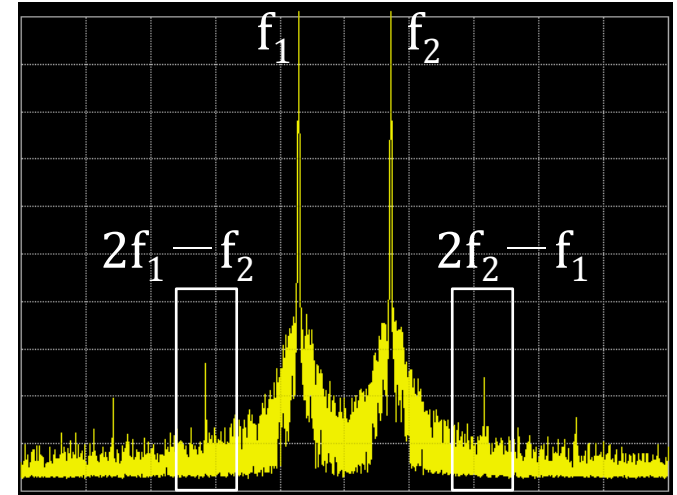
入力周波数 $f_1$ (Hz)	1.0M
入力周波数 $f_2$ (Hz)	1.1M
入力振幅 ( $V_{pp}$ )	2
サンプリング周波数 (Hz)	50M

# 実験画像(信号付近)

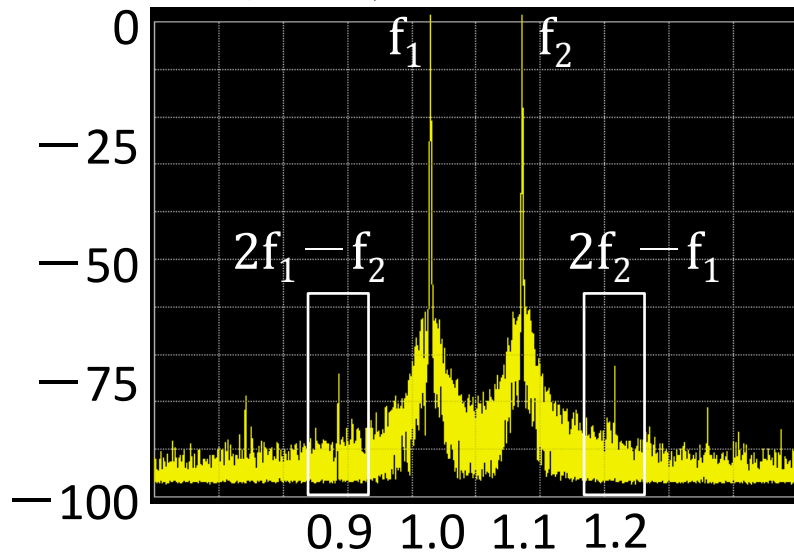
従来手法



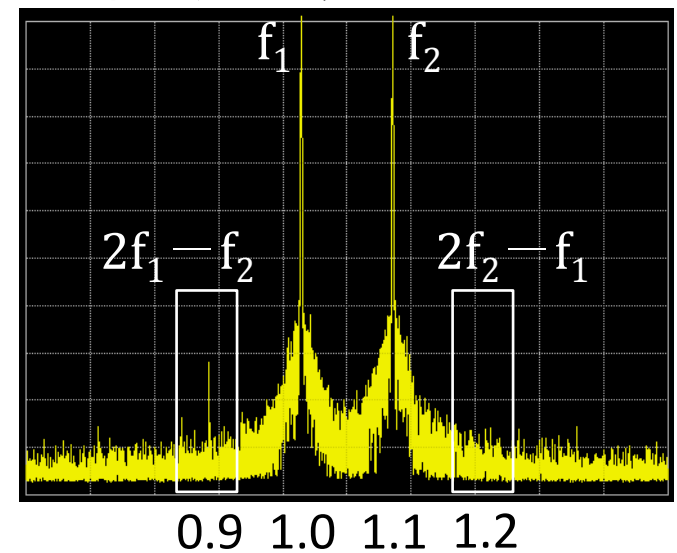
位相切り替え手法



周波数切り替え手法



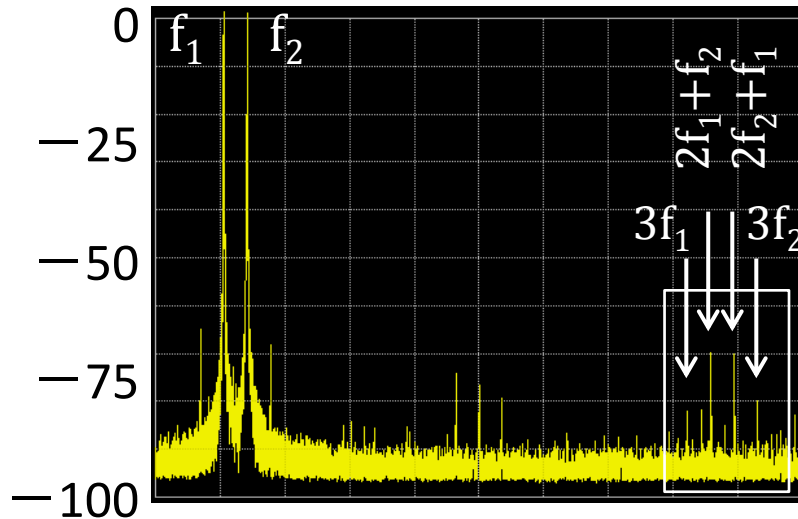
位相&周波数切り替え手法



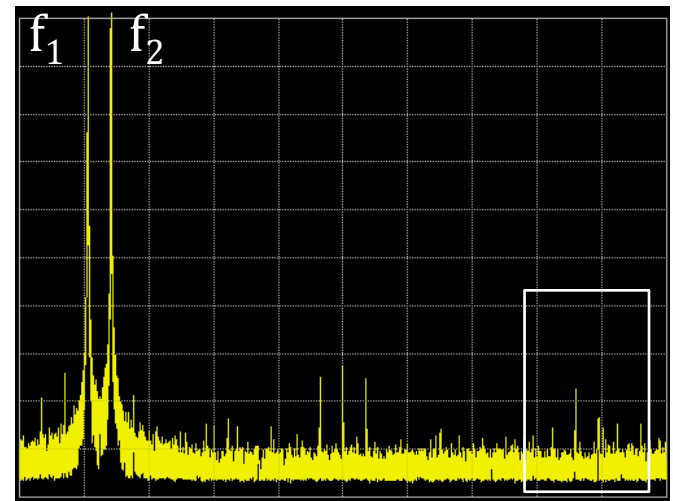
Frequency [MHz]

# 実験画像 (3次高調波まで)

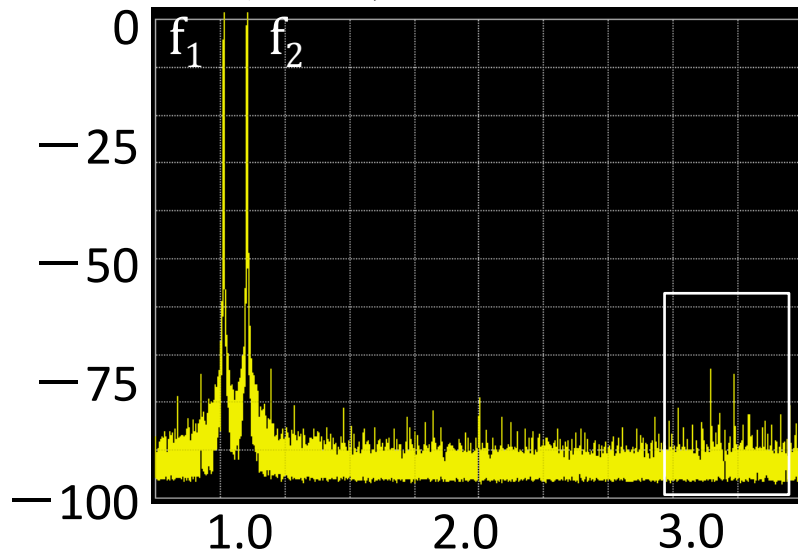
従来手法



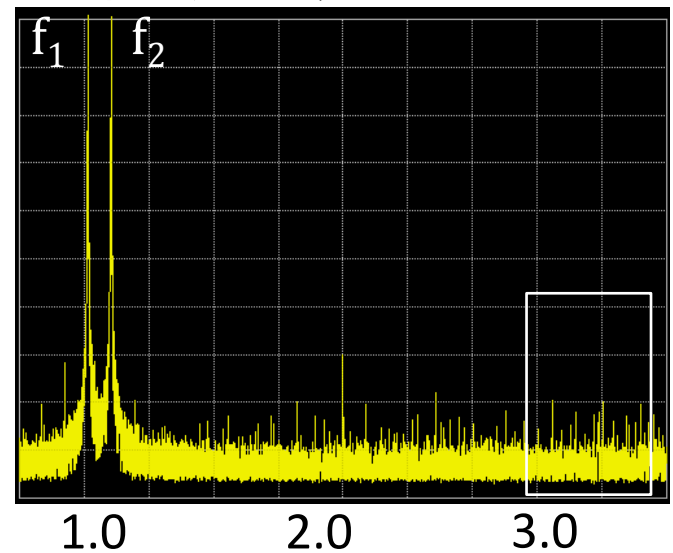
位相切り替え手法



周波数切り替え手法

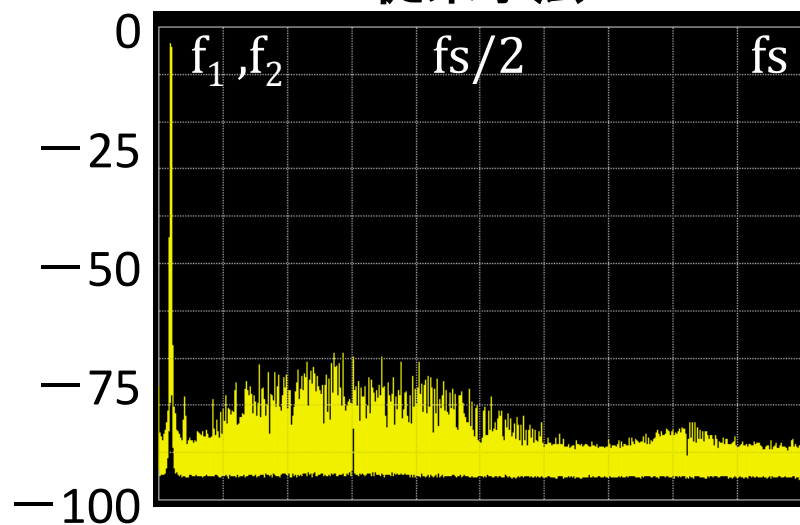


位相 & 周波数切り替え手法

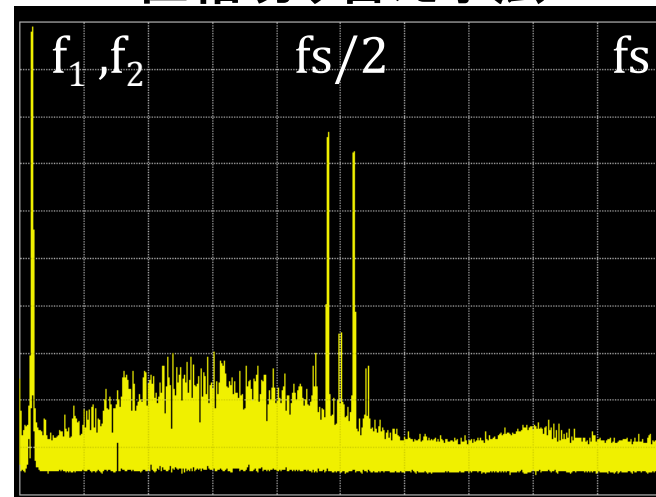


# 実験画像 (fsまで)

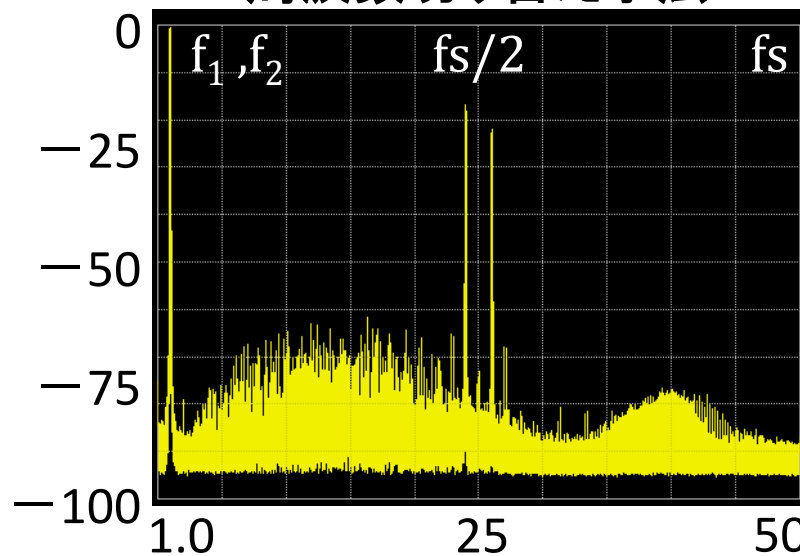
## 従来手法



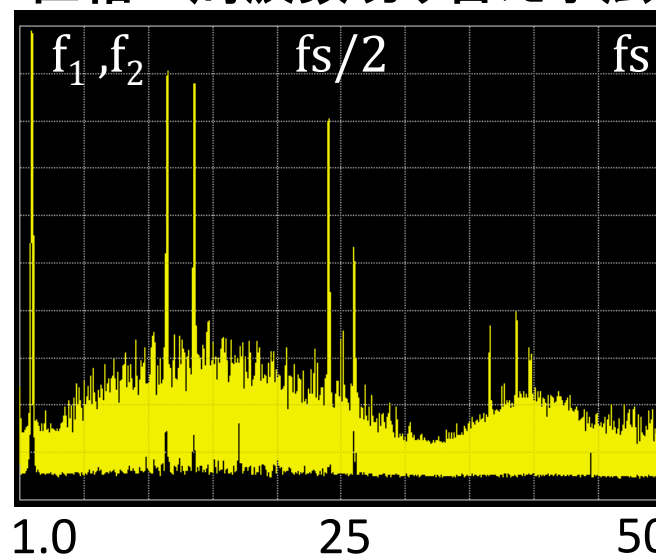
## 位相切り替え手法



## 周波数切り替え手法



## 位相 & 周波数切り替え手法



Power [dBm]

Frequency [MHz]



# アウトライン

- 研究背景・目的
- テスト信号の発生
- 従来手法
- 提案手法
- シミュレーションによる効果確認
- 実験結果
- **まとめ**

# まとめ

## 低コストテスト実現のために

### ○低歪み信号発生アルゴリズムの提案

- ・DACの歪み係数に依存しない  
→ 歪みの同定不要
- ・DSPプログラムの変更のみで可能  
→ ハードの変更が不要

### ○効果を確認

- ・シミュレーションで効果確認
- ・実機測定で効果確認  
→ IMD3減少

## 今後の課題

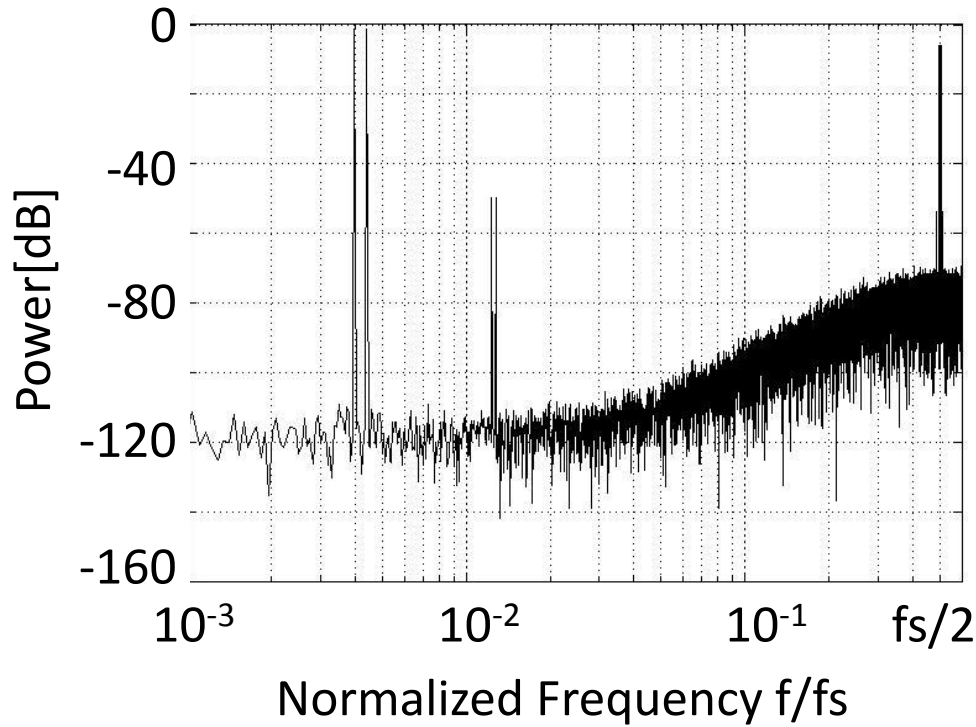
- ・実際にテスト信号として使えるかの評価

---

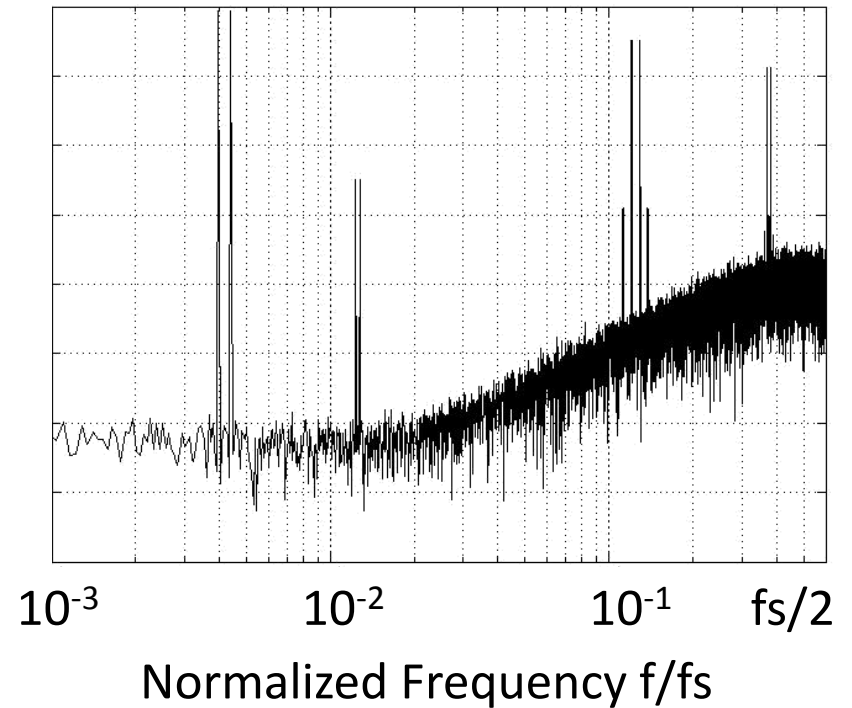
# Appendix

# 位相切り替え 切り替え回数 1/8

位相切り替え手法

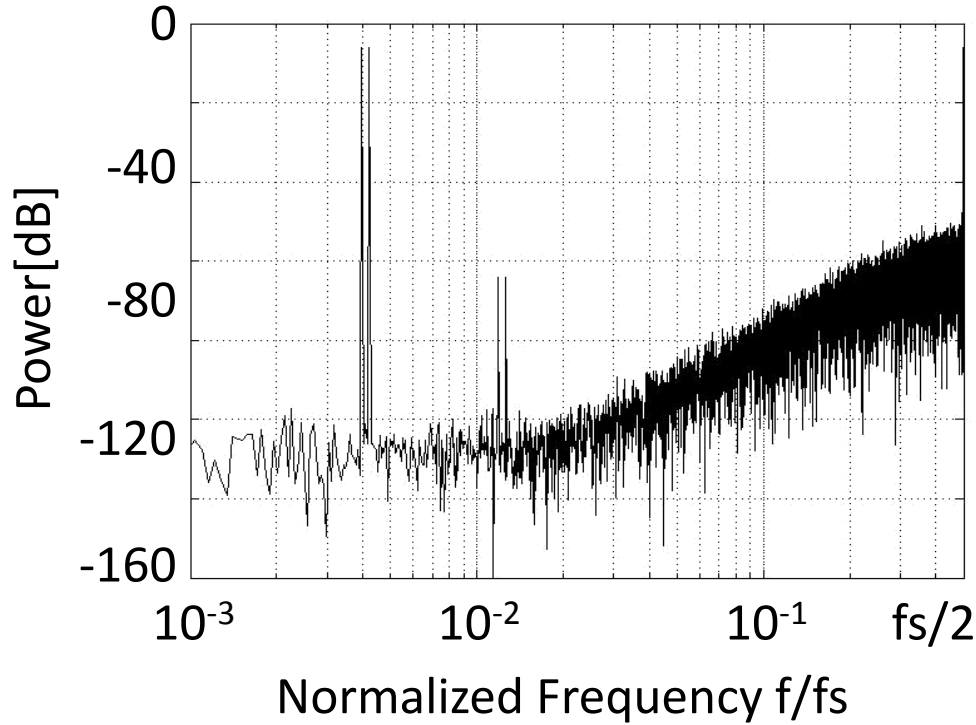


切り替え回数 1/8

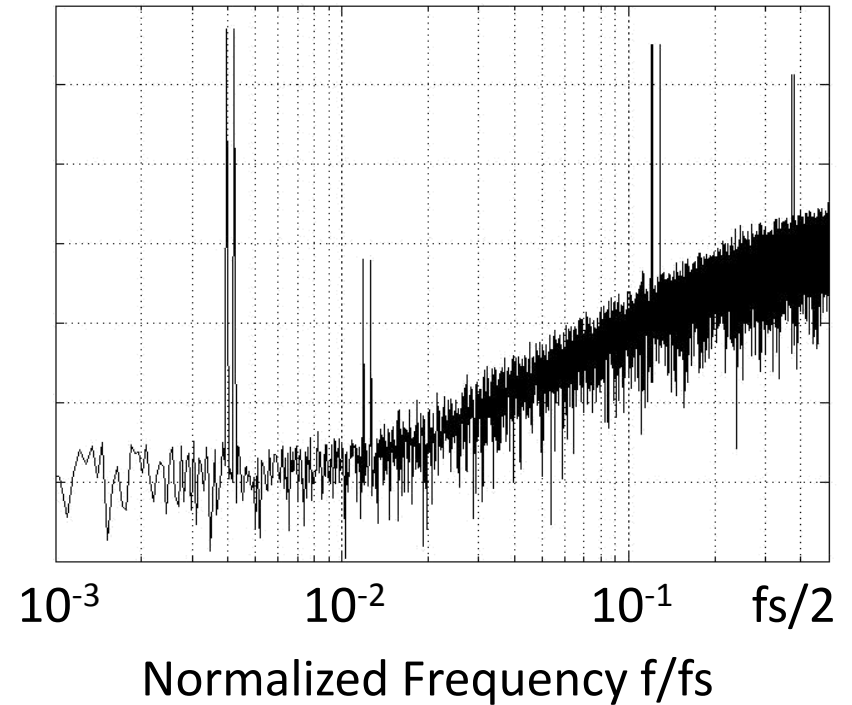


# 周波数切り替え 切り替え回数1/8

周波数切り替え手法

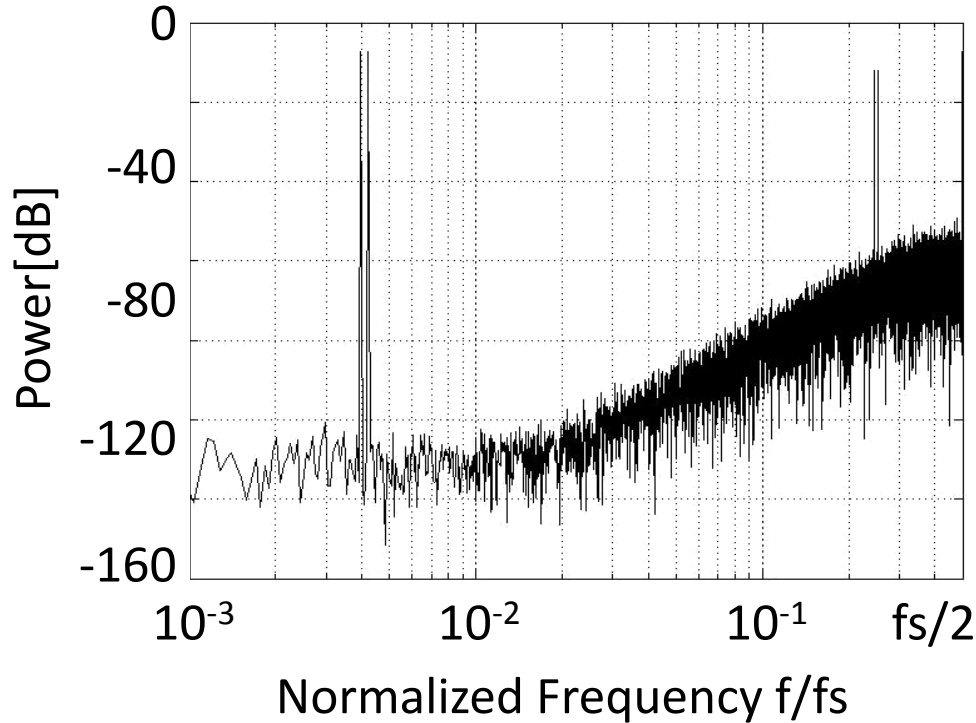


切り替え回数 1/8

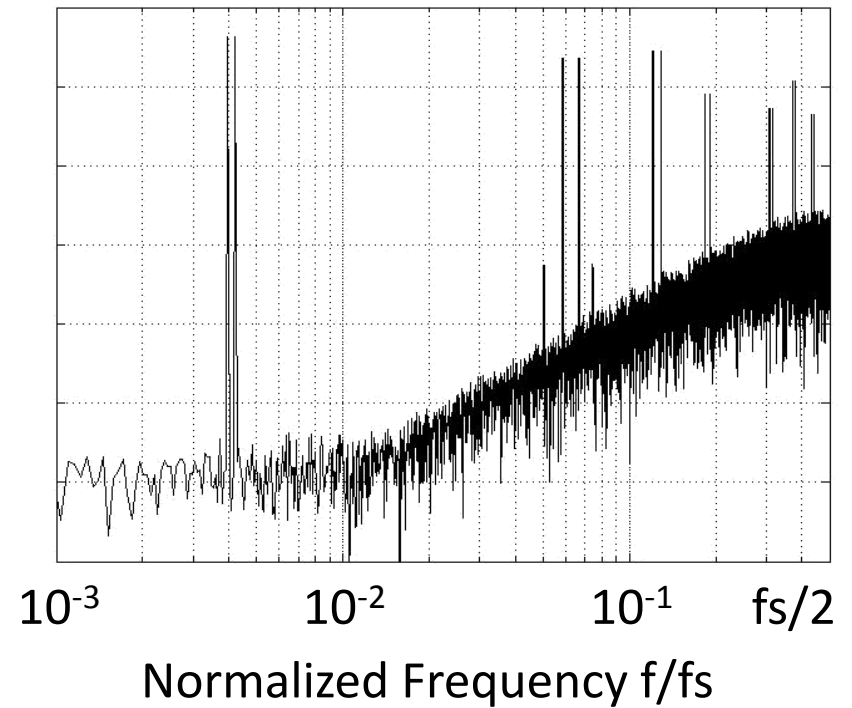


# 位相＋周波数 切り替え回数1／8

位相＋周波数切り替え手法

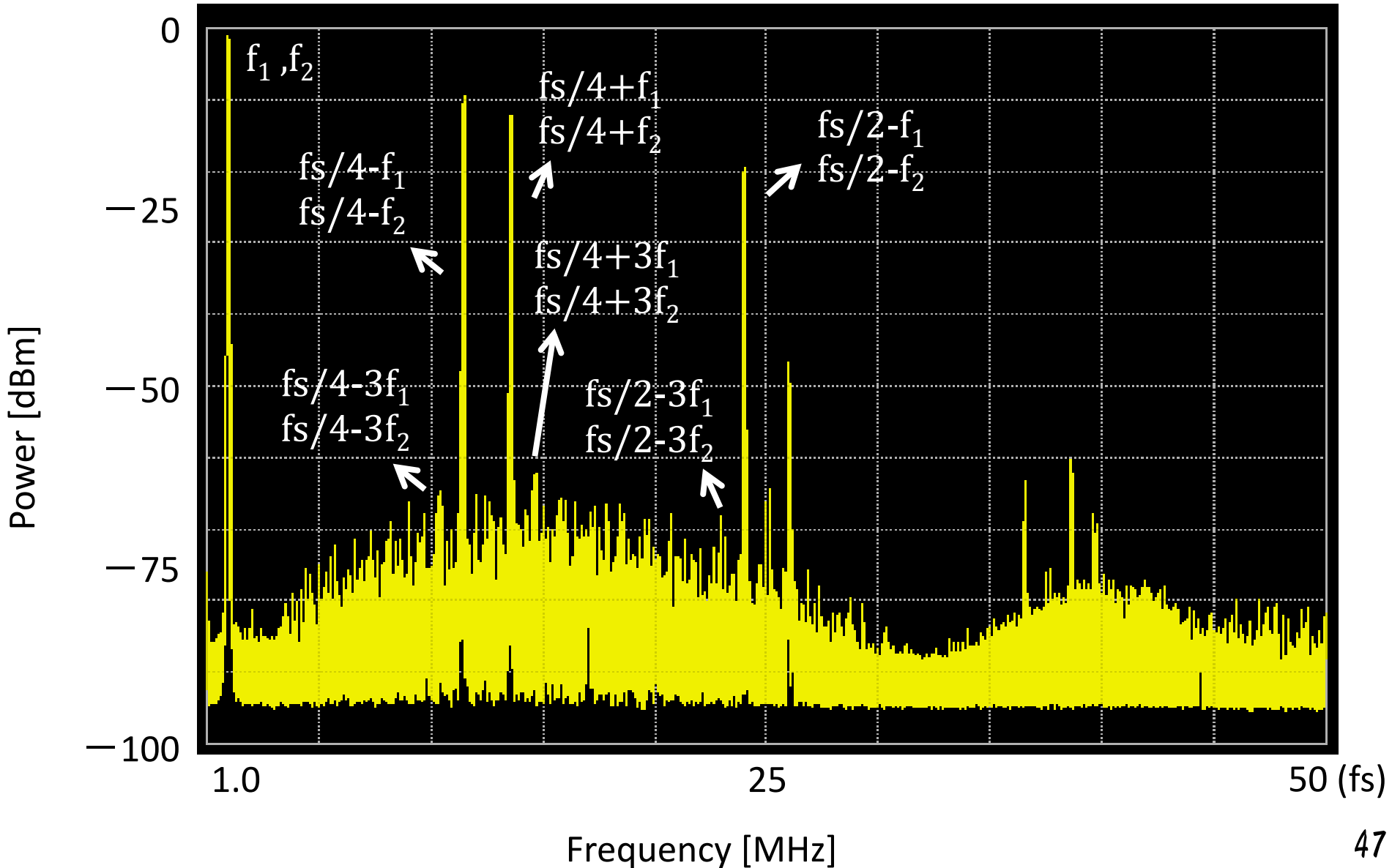


切り替え回数 1／8



# AWG出力の歪み成分

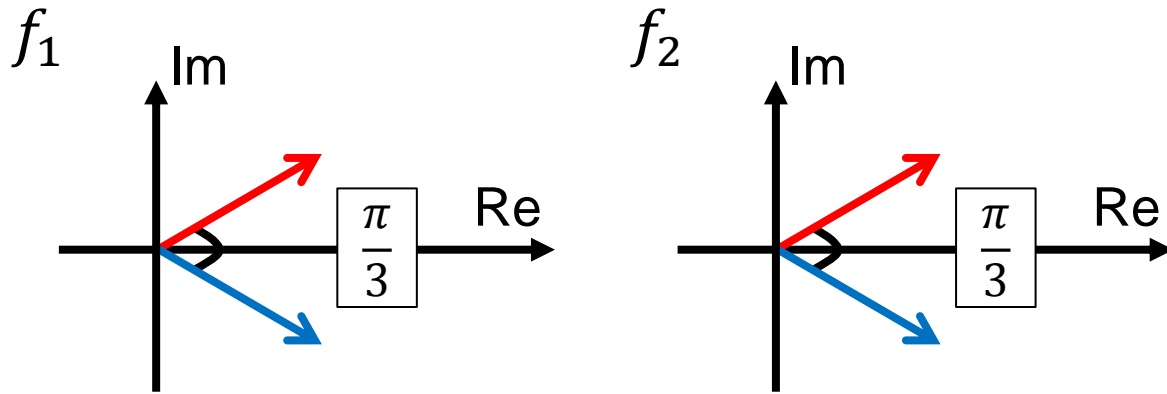
## Phase and Frequency switching



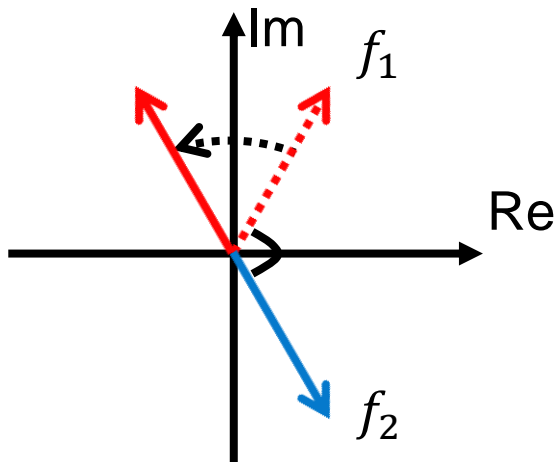
# 位相切り替え手法 原理

$$X_1 = A \cdot \sin(2\pi f_1 n T_s + \pi/6) + B \cdot \sin(2\pi f_2 n T_s - \pi/6)$$

$$X_2 = A \cdot \sin(2\pi f_1 n T_s - \pi/6) + B \cdot \sin(2\pi f_2 n T_s + \pi/6)$$



IMD3  $2f_1 - f_2$  : 位相  $2 \times \left(+\frac{\pi}{3}\right) - \left(-\frac{\pi}{3}\right) = +\pi$



IMD3成分をキャンセル



# 質疑応答

- Q. シミュレーション結果で従来より提案の方がノイズフロアが上がっているのはなぜか？
- A. 切り替えすることによってフロアが上がっているのではないか
- C. どこから雑音が上がっていくか興味がある
- Q. AWGの入力は差動になっているのか？なっているとは思えない
- A. Agilentの方に聞いたところ差動のような構成を用いているので偶数次は考えなくてもよいとのこと
- C. 1MHzと1.1MHzの2トーンでは11周期ごとにもとに戻るようになる。その時に切り替えの点が大きく飛ぶ。初期位相をもっと上手く調整することでノイズフロアを下げるができるかもしれない。
- Q. 提案手法を用いることでDUTのノイズもキャンセルしてしまうのではないか？
- A. そのままだとそうなる。現在、AWGの出力にアナログフィルタを用いて $f_s/2$ 当たりのスプリアスを減少させることを考えている。