

通信用デバイス評価のための 非線形性補正DACの構成提案

○若林和行*1 小林修*2
小林春夫*1 松浦達治*1

*1群馬大学 電気電子工学専攻

*2半導体理工学研究センター(STARC)

1. 背景
2. シミュレーションの条件
3. 従来型AWG
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
 - DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
6. まとめ

1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG
- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

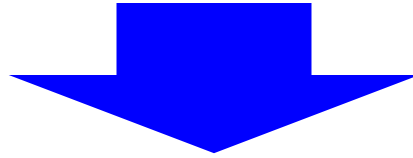
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

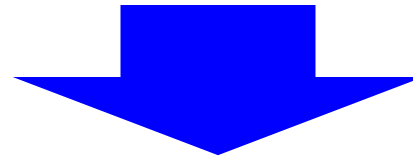
6. まとめ

背景

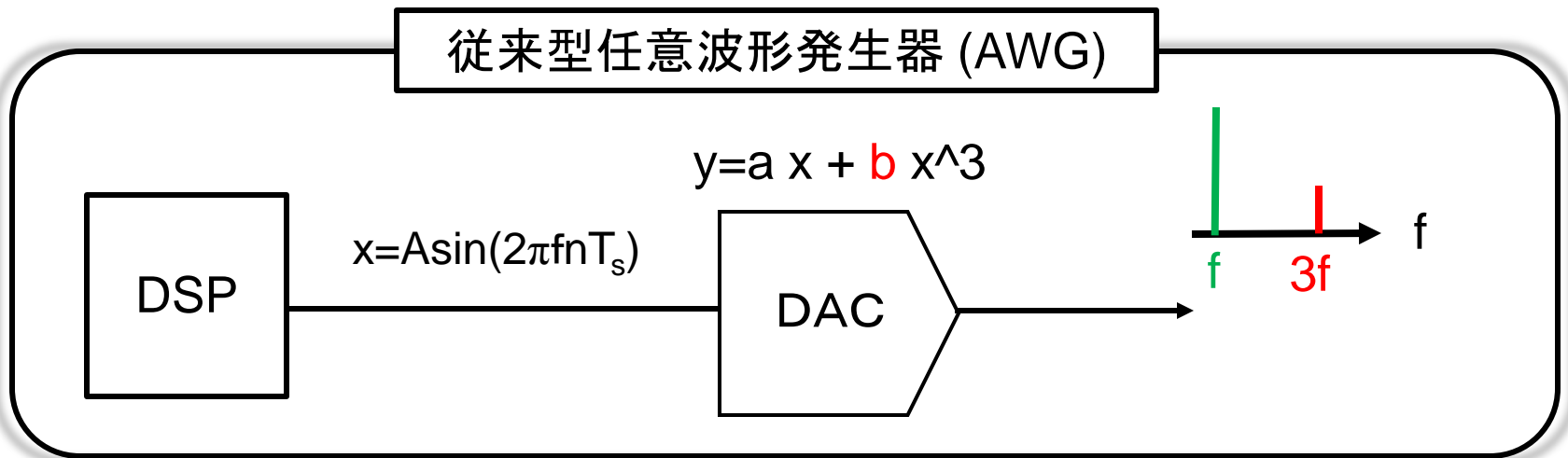
ADCの特性のテスト



AWG(DACとDSP)を利用してADCテスト入力信号を発生



非線形性補正を有する構成を2つ提案
(単一正弦波・2トーン信号発生)



1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG
- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

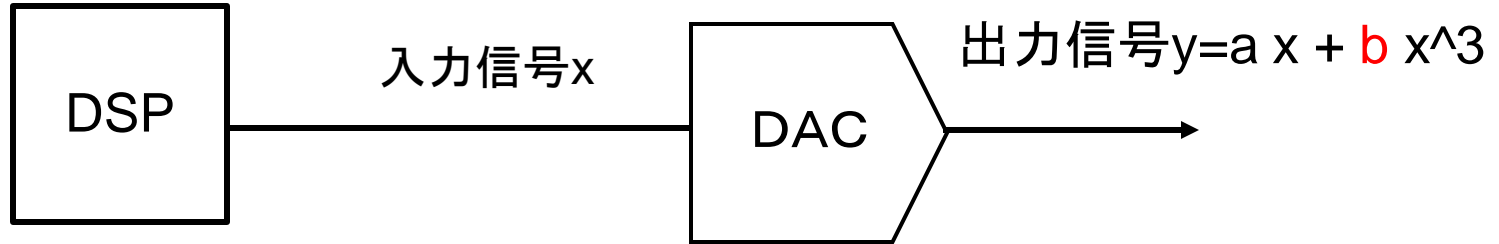
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

6. まとめ

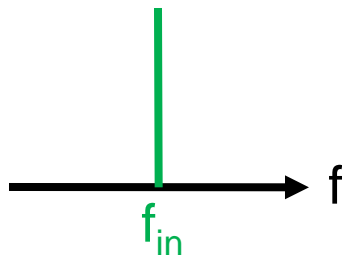
AWGの条件

前提条件 DACは3次非線形を有する



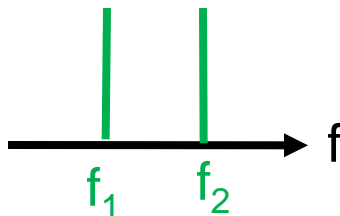
1次係数a	3次歪b
1	-0.005

単一正弦波の場合



入力信号x	周波数 f_{in}
$\sin 2\pi f_{in} nT_s$	$\frac{51}{1024} f_s$

2トーンの場合



入力信号x	周波数 f_1	周波数 f_2
$\sin 2\pi f_1 nT_s + \sin 2\pi f_2 nT_s$	$\frac{51}{1024} f_s$	$\frac{81}{1024} f_s$

1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

■ DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

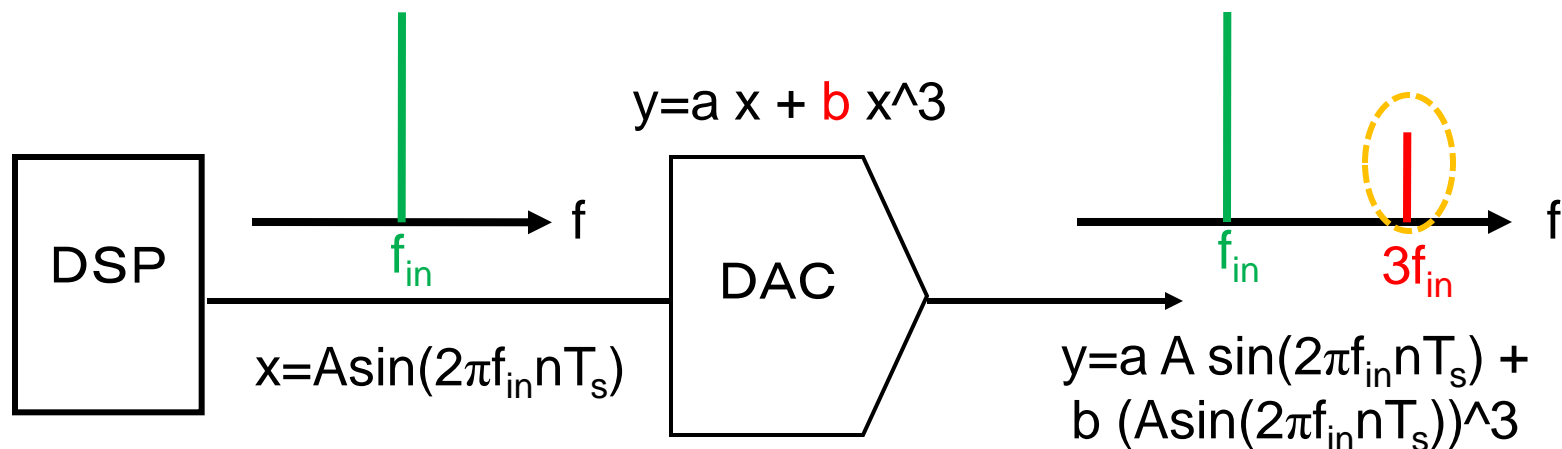
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

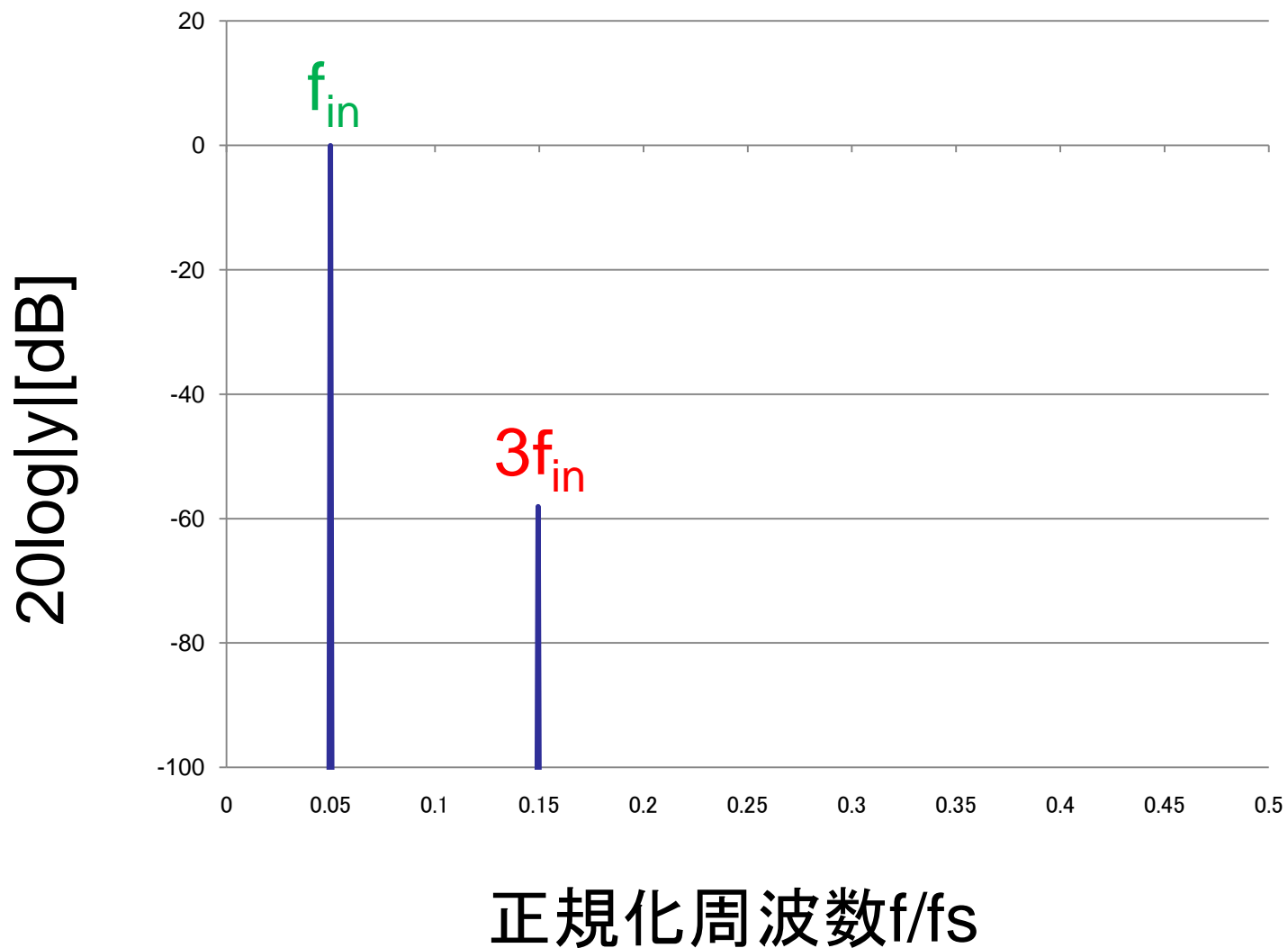
6. まとめ

単一正弦波発生AWG（従来構成）



■ $3f_{in}$ の3次高調波が発生

単一正弦波のFFTシミュレーション(従来構成)



1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

■ DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

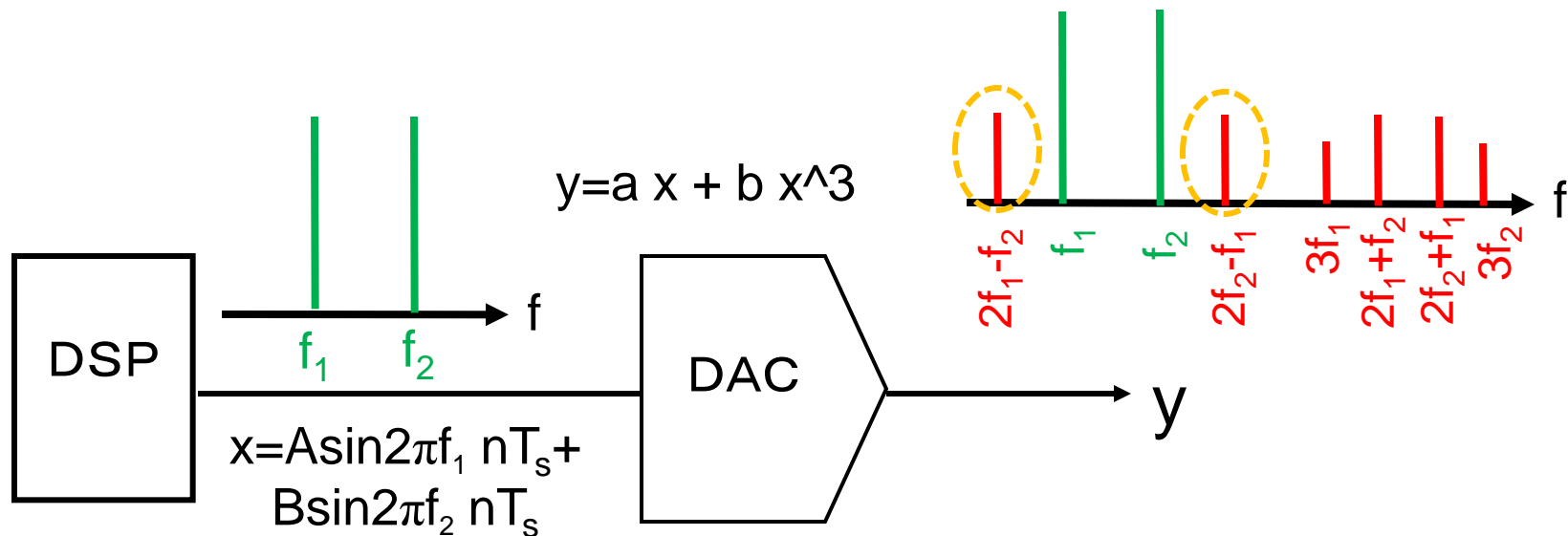
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

■ 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

6. まとめ

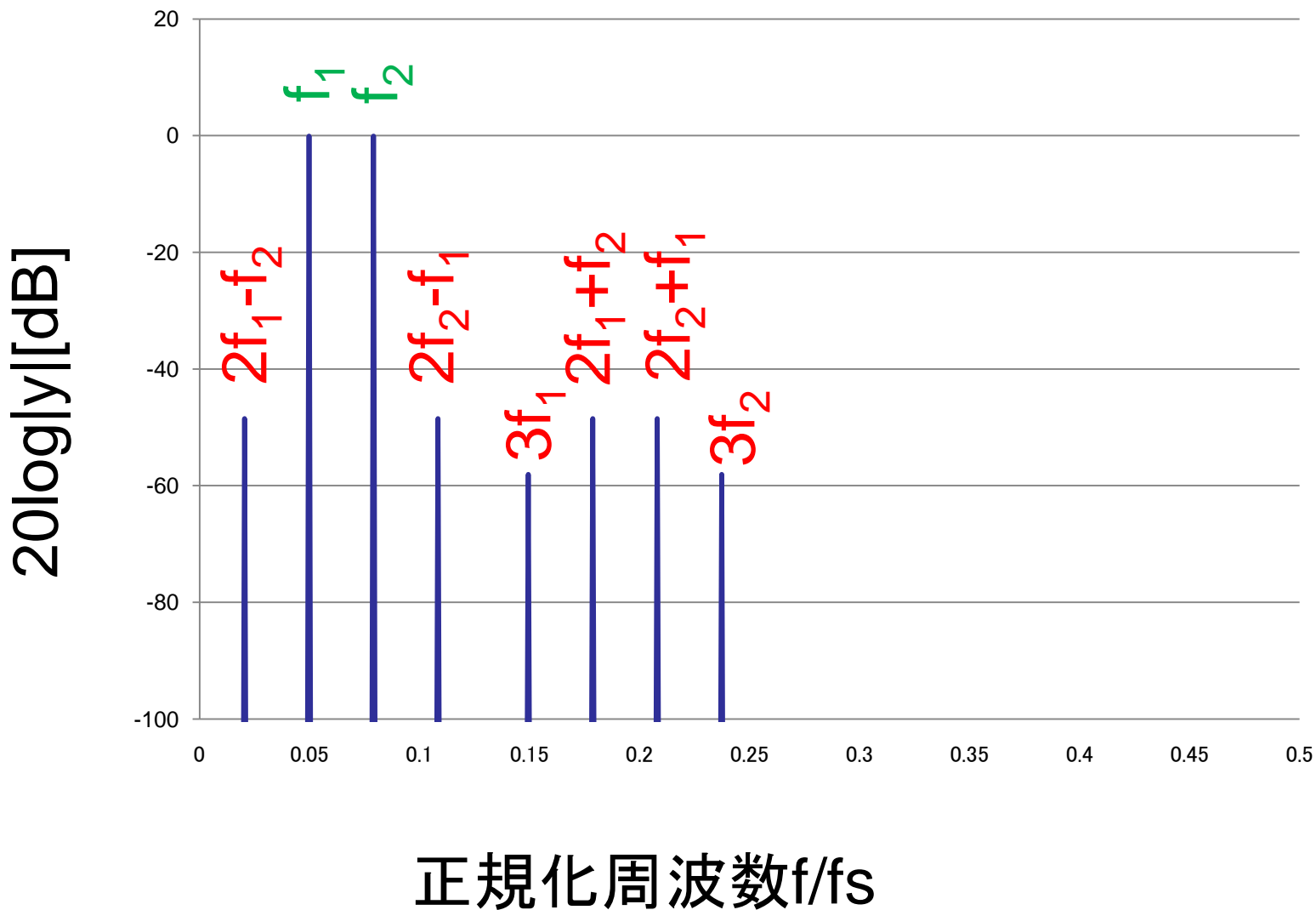
2トーン発生AWG（従来構成）



■ $2f_1 - f_2$, $2f_2 - f_1$ のIM3(3次相互変調歪)が発生

➡ 信号帯域近傍に発生するのでフィルタで除去できない

2トーンのFFTシミュレーション(従来構成)



1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG
- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

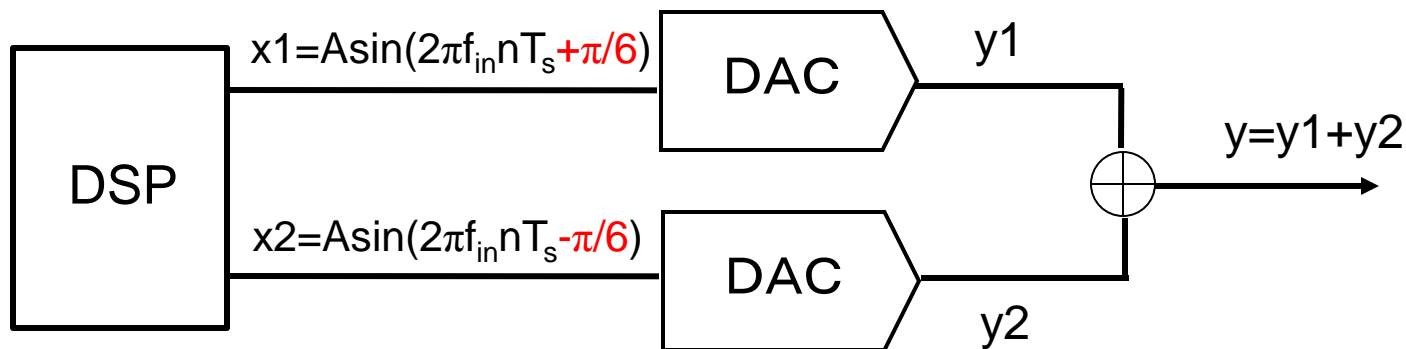
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

6. まとめ

提案型AWG(DAC2つと加算器使用) 14

前提条件 ①2つのDACの特性は同じ ②出力加算部は非線形性なし

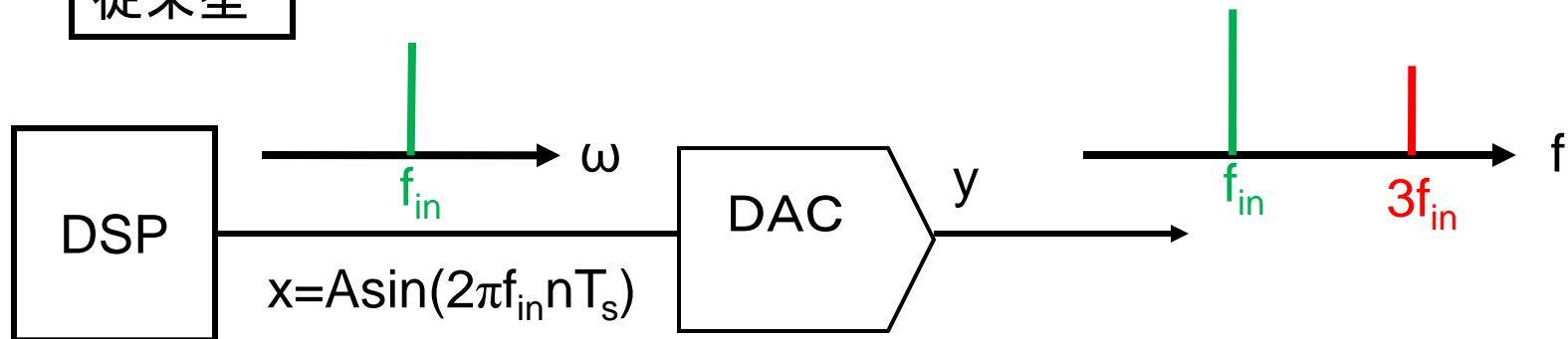


電流出力DACの場合は出力加算は比較的容易

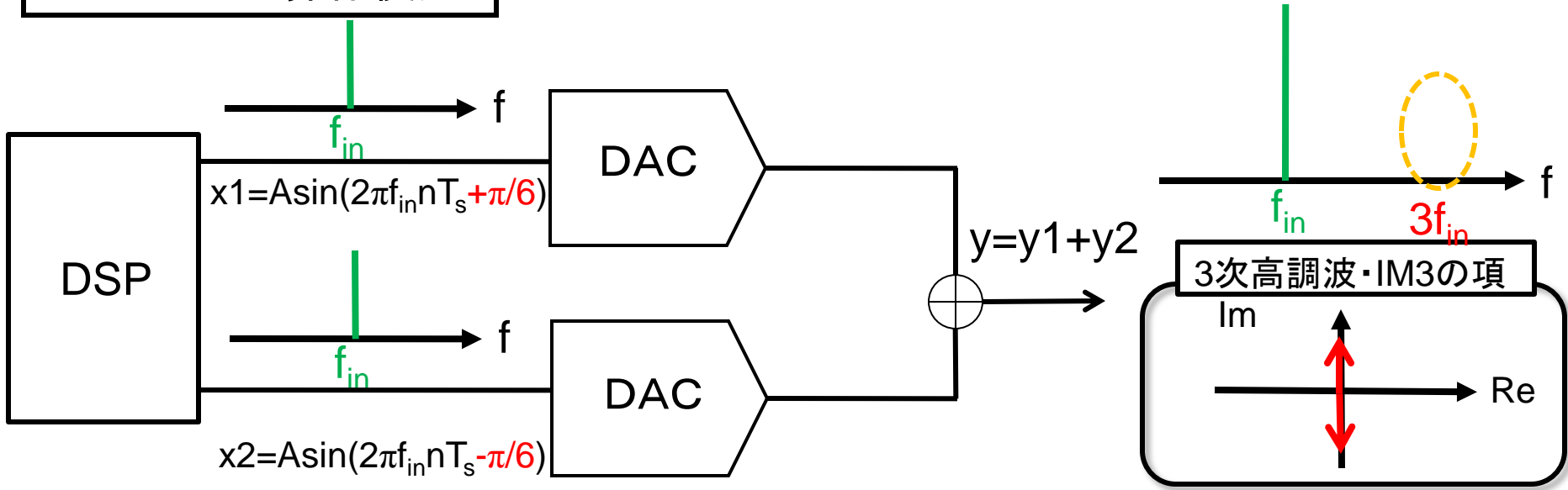
利点

- 3次高調波と信号近傍のIM3を除去することが可能(特に2トーンで有効)

従来型



DAC2つと加算器使用



3次高調波・IM3がキャンセル可能な位相差を与えて加算

1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

■ 単一正弦波発生AWG

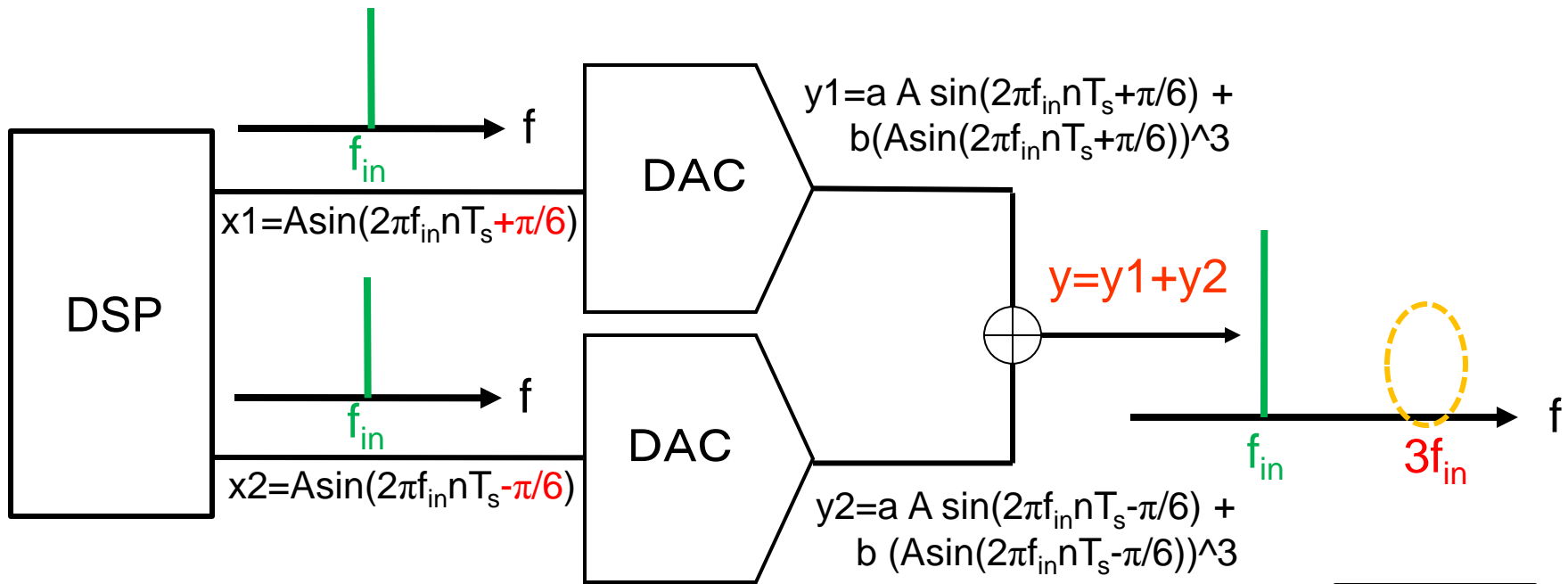
- 2トーン発生AWG
- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

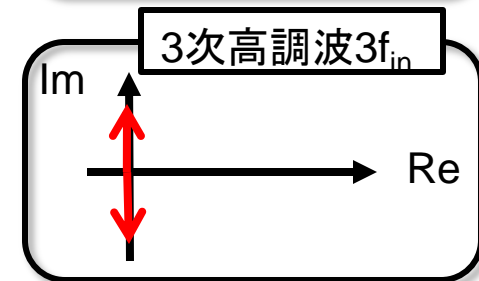
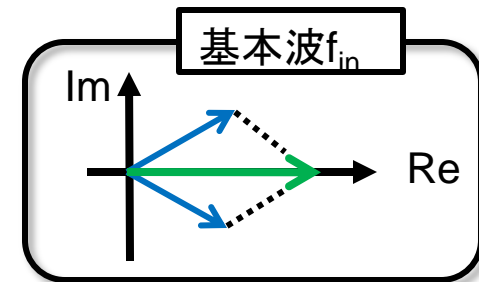
6. まとめ

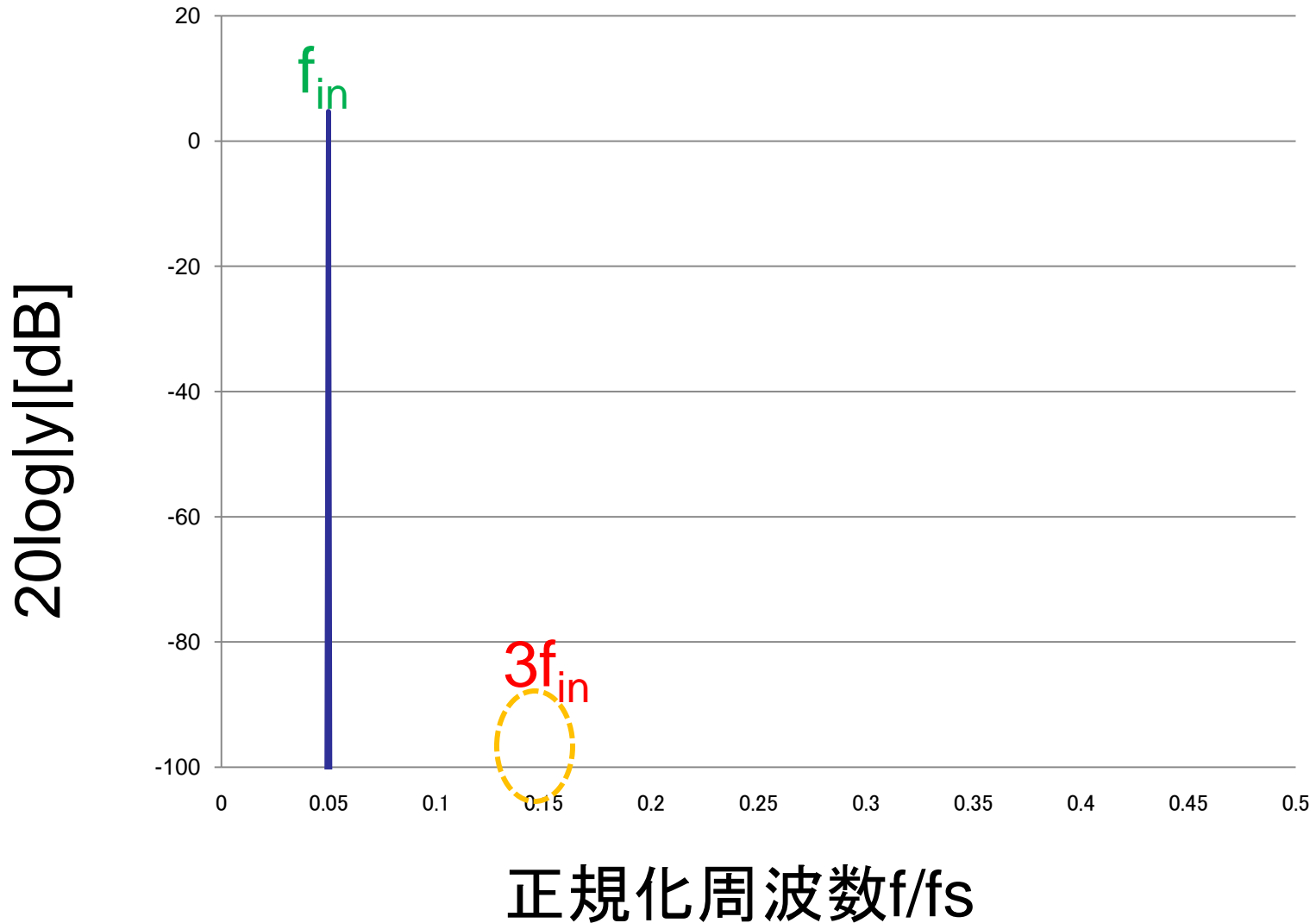
単一正弦波発生AWG (DAC2つと加算器使用)



- y の f の項: $\sin(2\pi f_{in} n T_s + \pi/6) + \sin(2\pi f_{in} n T_s - \pi/6) = 1.7 \sin(2\pi f_{in} n T_s)$
 ⇒ 基本波振幅は1.7倍

- y の $3f$ の項: $\sin(3 \cdot 2\pi f_{in} n T_s + \pi/2) + \sin(3 \cdot 2\pi f_{in} n T_s - \pi/2) = 0$
 ⇒ 3次高調波がキャンセルできる





1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

- 単一正弦波発生AWG

■ 2トーン発生AWG

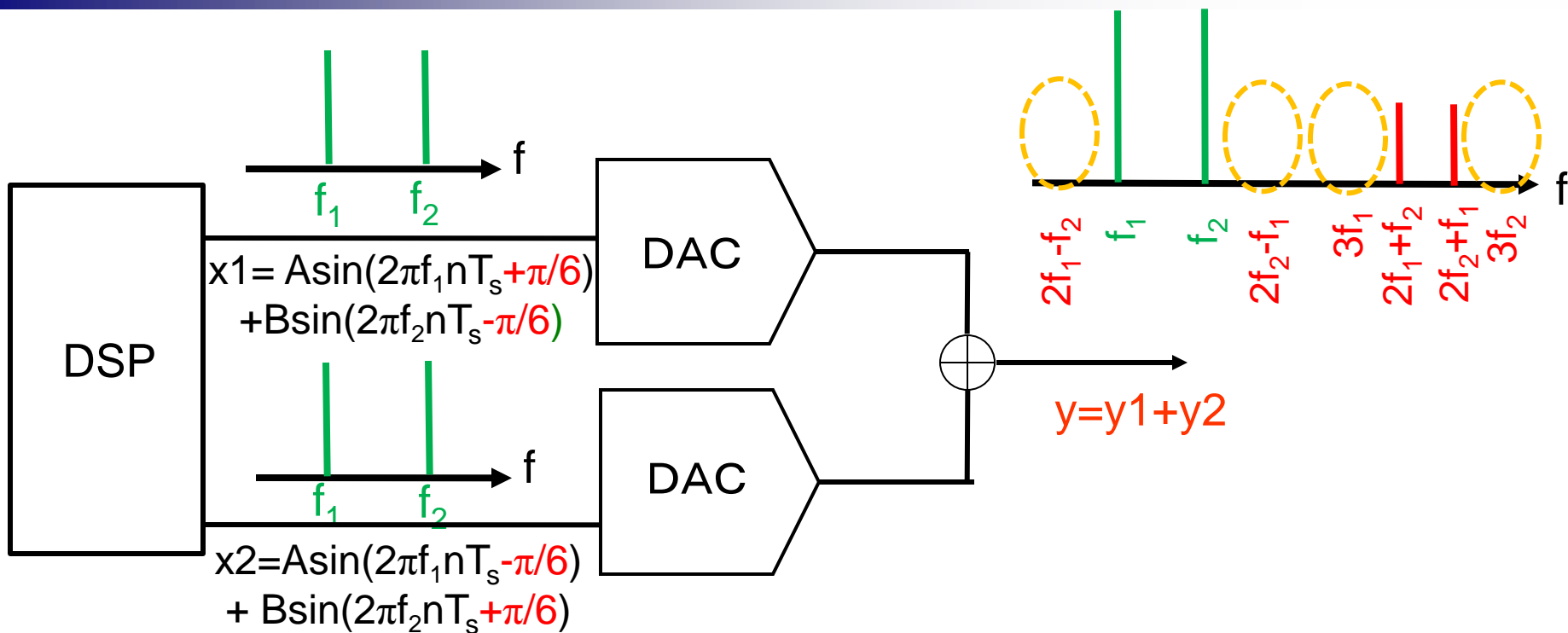
- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

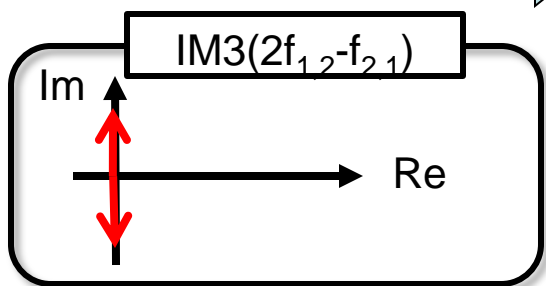
6. まとめ

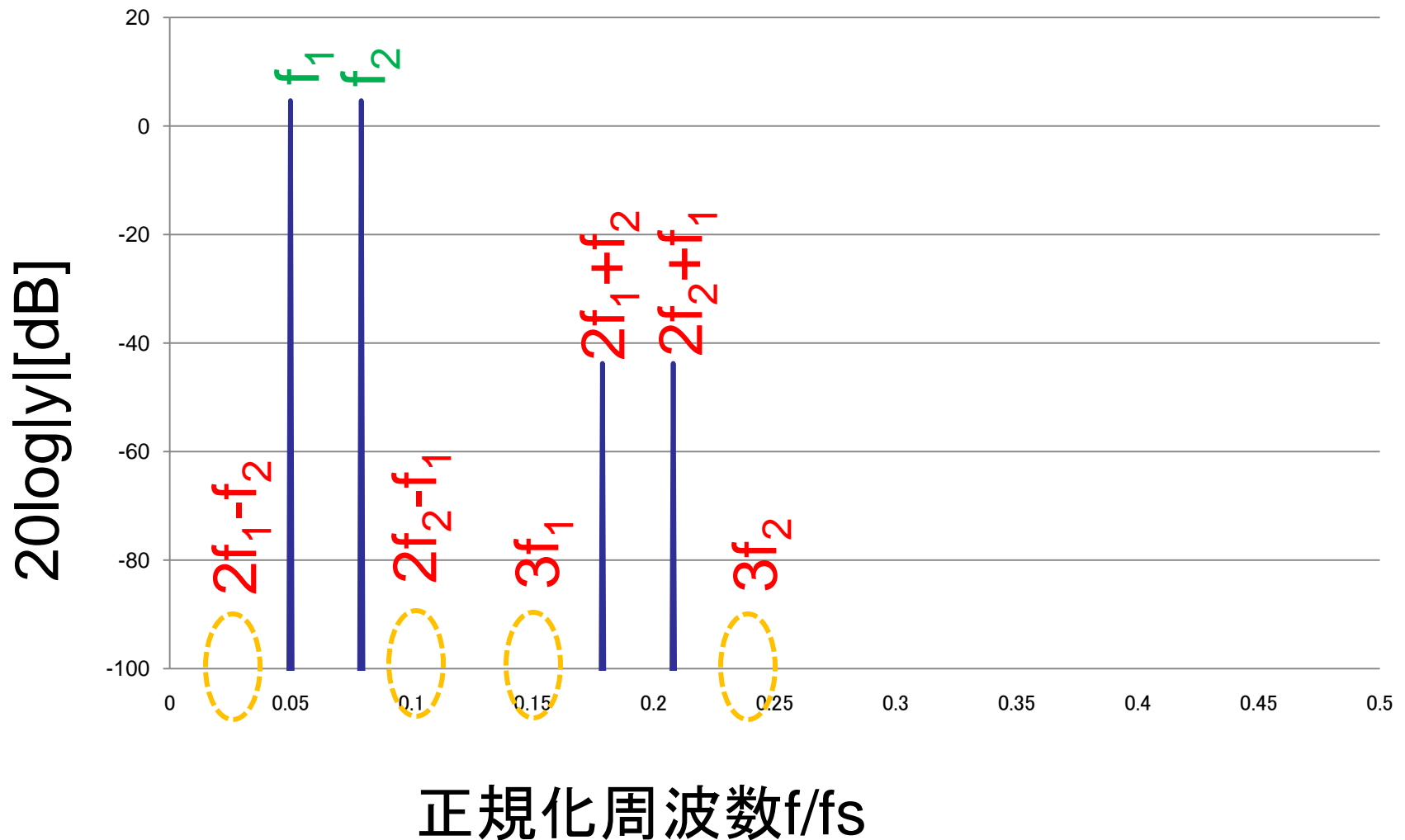
2トーン発生AWG（提案構成）



■ y の $2f_{1,2} - f_{2,1}$ の項: $\sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1}) nT_s + \pi/2\} + \sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1}) nT_s - \pi/2\} = 0$

IM3($2f_{1,2} - f_{2,1}$)がキャンセルできる





1. 背景

2. シミュレーションの条件

3. 従来型AWG

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

- DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響

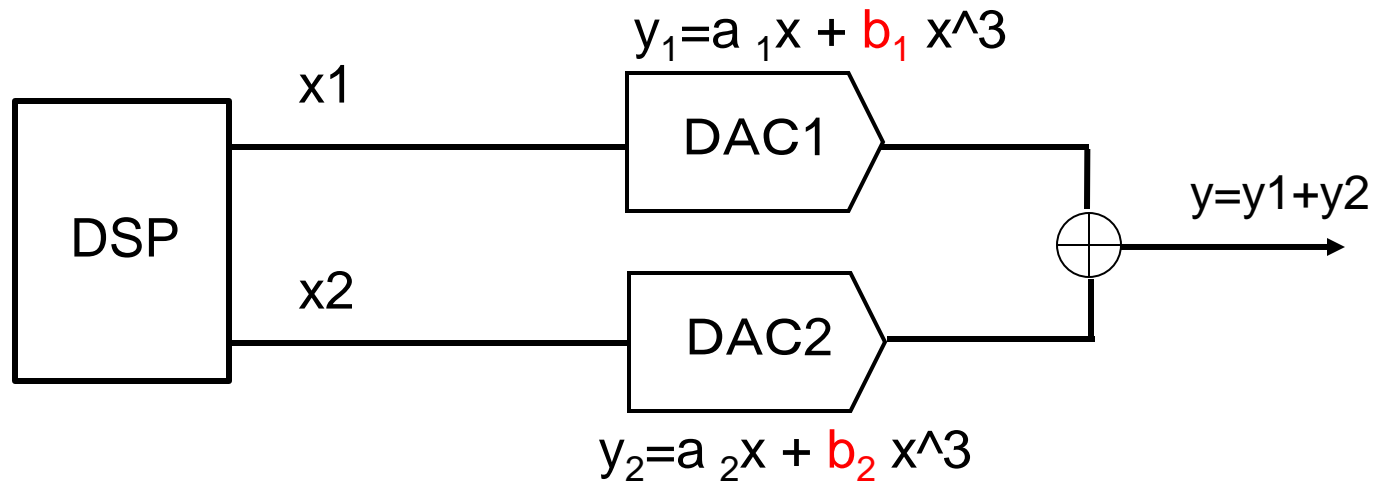
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)

- 単一正弦波発生AWG
- 2トーン発生AWG

6. まとめ

DAC特性にばらつきがある場合

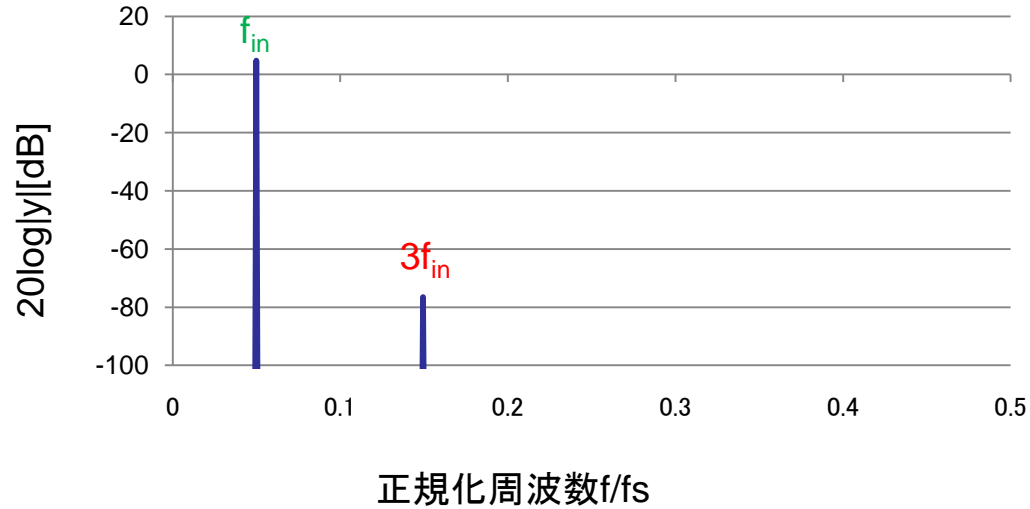
23



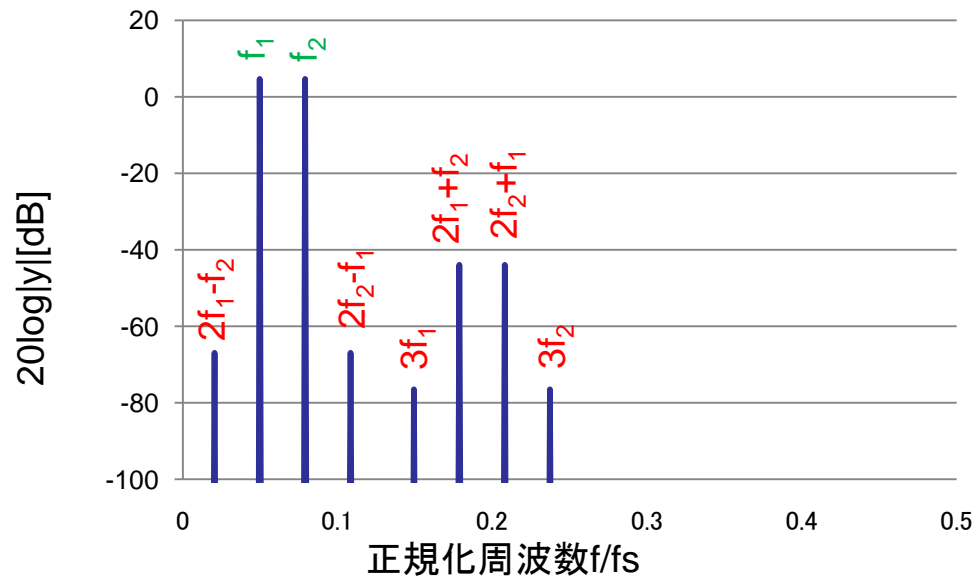
DAC1	
1次係数 a_1	3次歪 b_1
1.001	-0.0046

DAC2	
1次係数 a_2	3次歪 b_2
0.998	-0.0052

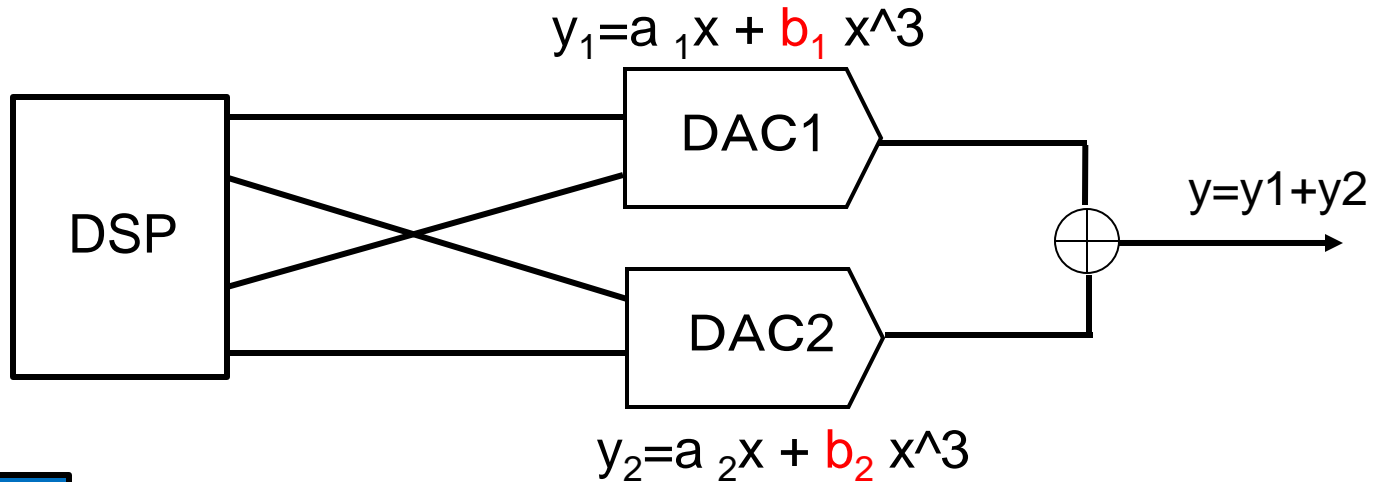
単一正弦波



2トーン



前提条件 1クロック毎に信号の経路を変更



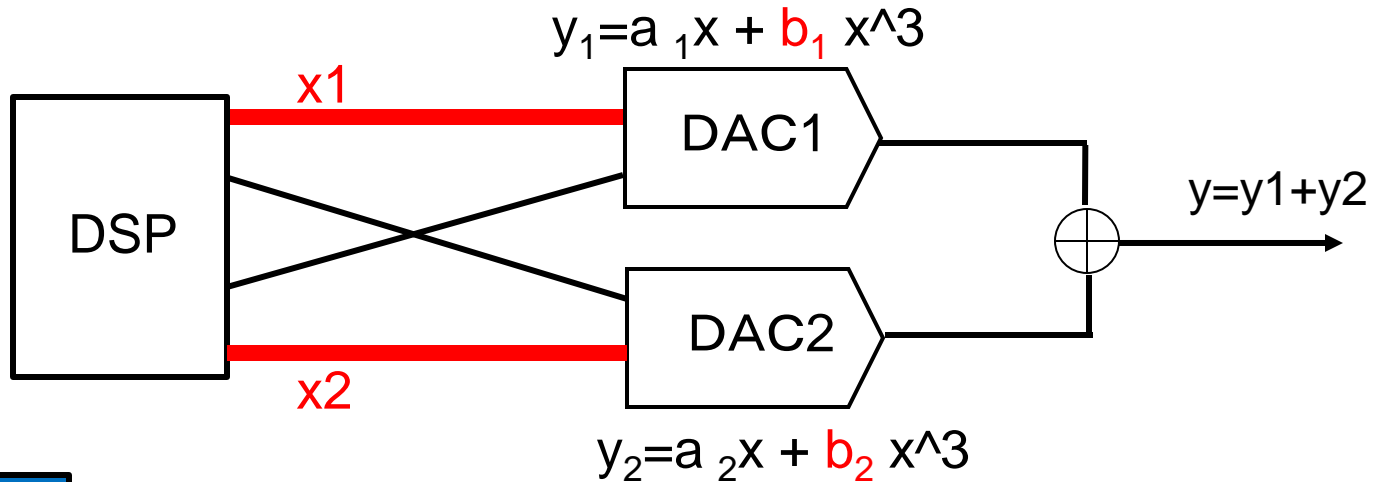
利点

- 3次歪みにばらつきがあっても3次高調波と信号近傍のIM3を除去することが可能

問題点

- 経路切り替えのため、 $f_s/2$ に関係した歪が生じる(ローパスフィルタで除去可能)

前提条件 1クロック毎に信号の経路を変更



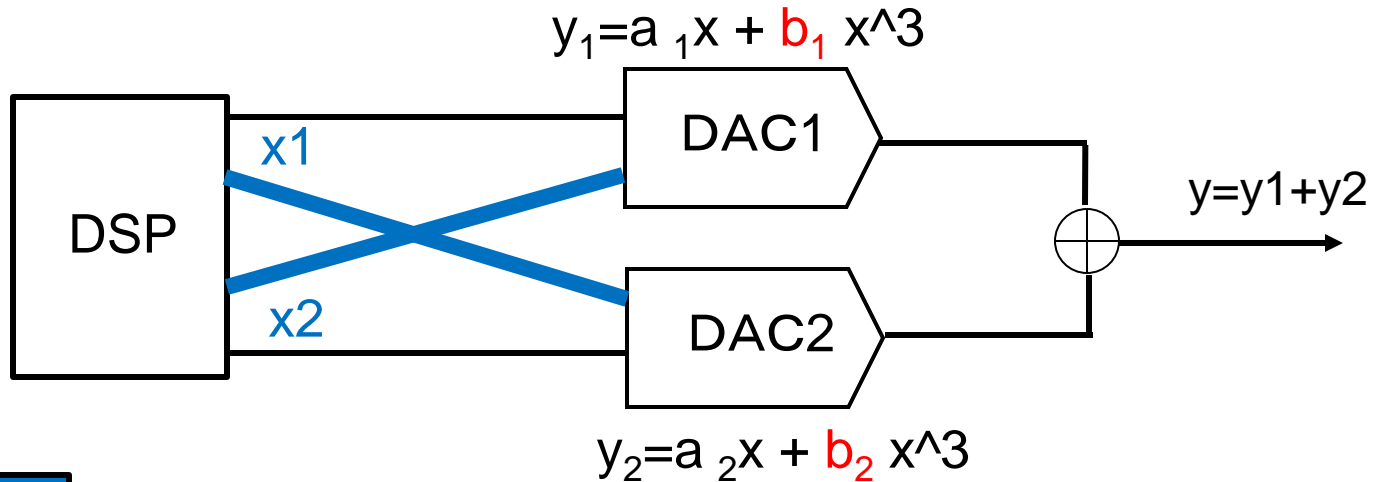
利点

- 3次歪みにばらつきがあっても3次高調波と信号近傍のIM3を除去することが可能

問題点

- 経路切り替えのため、 $f_s/2$ に関係した歪が生じる(ローパスフィルタで除去可能)

前提条件 1クロック毎に信号の経路を変更



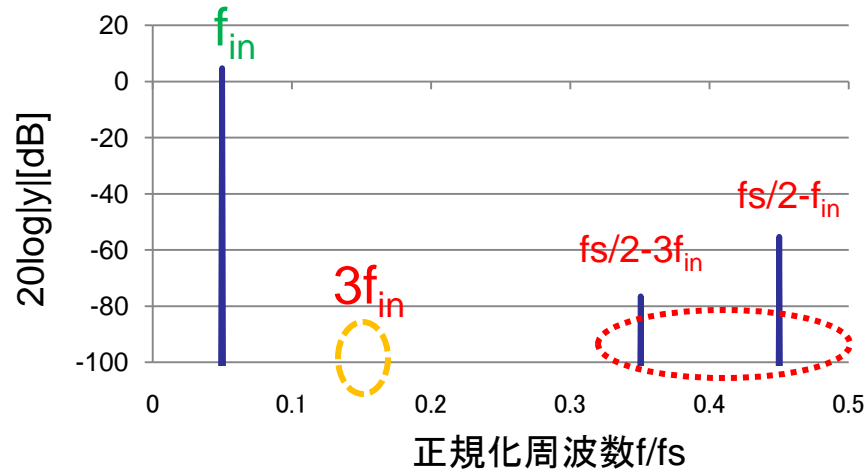
利点

- 3次歪みにばらつきがあっても3次高調波と信号近傍のIM3を除去することが可能

問題点

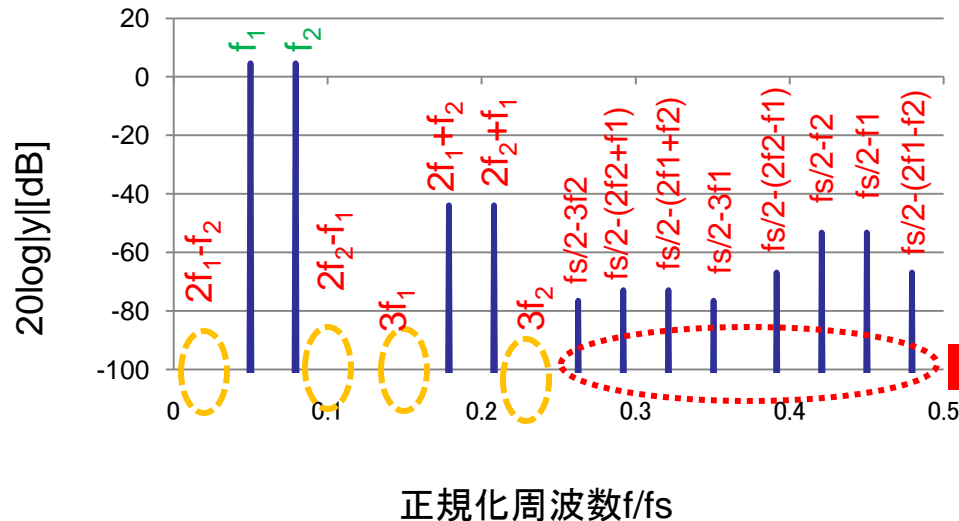
- 経路切り替えのため、 $f_s/2$ に関係した歪が生じる(ローパスフィルタで除去可能)

単一正弦波



経路切り替えにより発生した歪

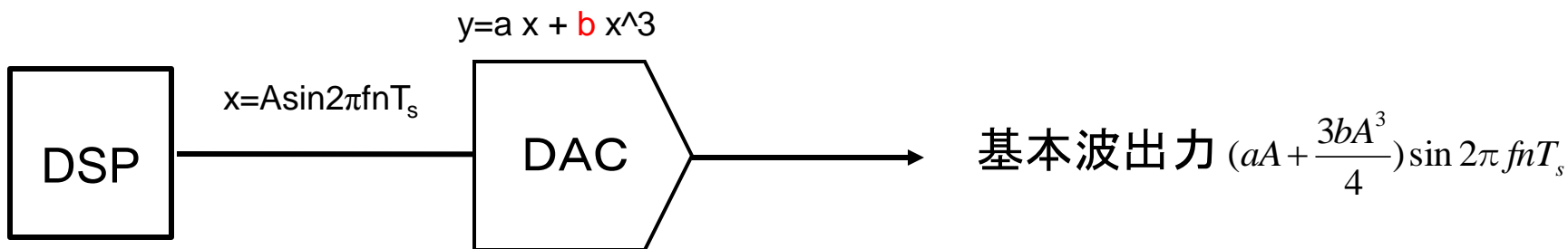
2トーン



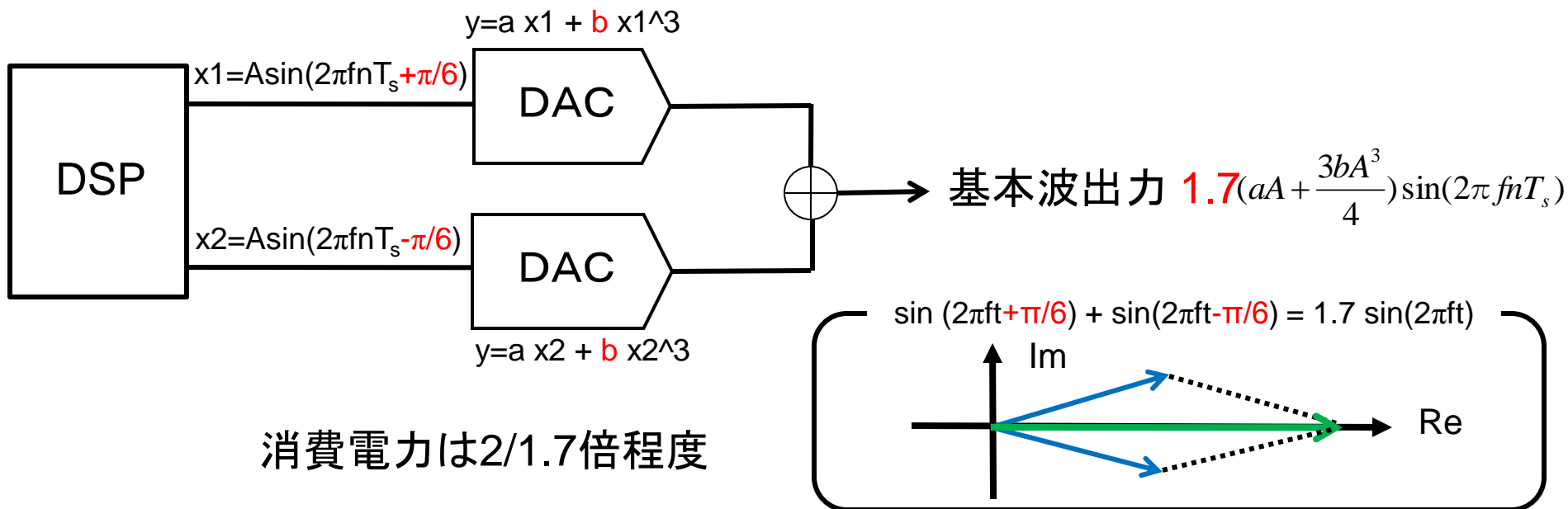
経路切り替えにより発生した歪

DACを2つ使用する影響① 消費電力 29

DAC一つの場合

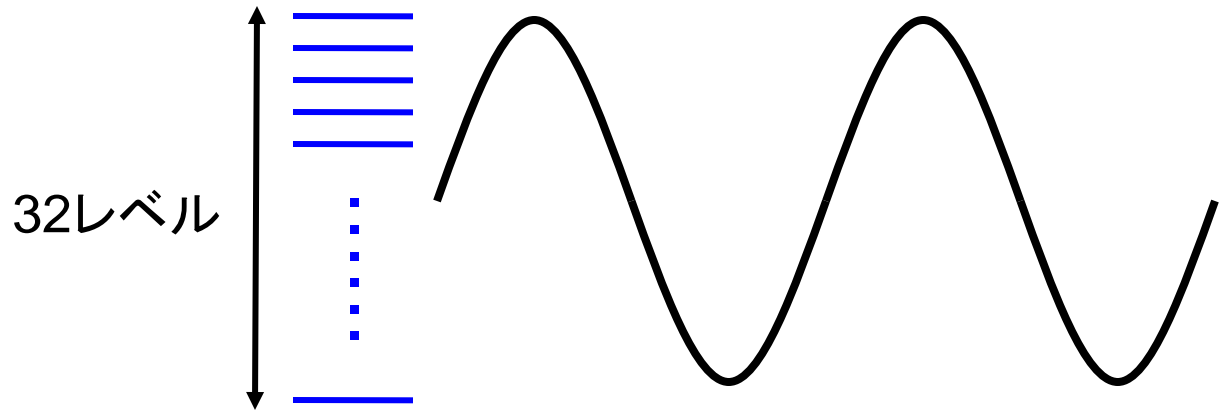


DAC二つの場合

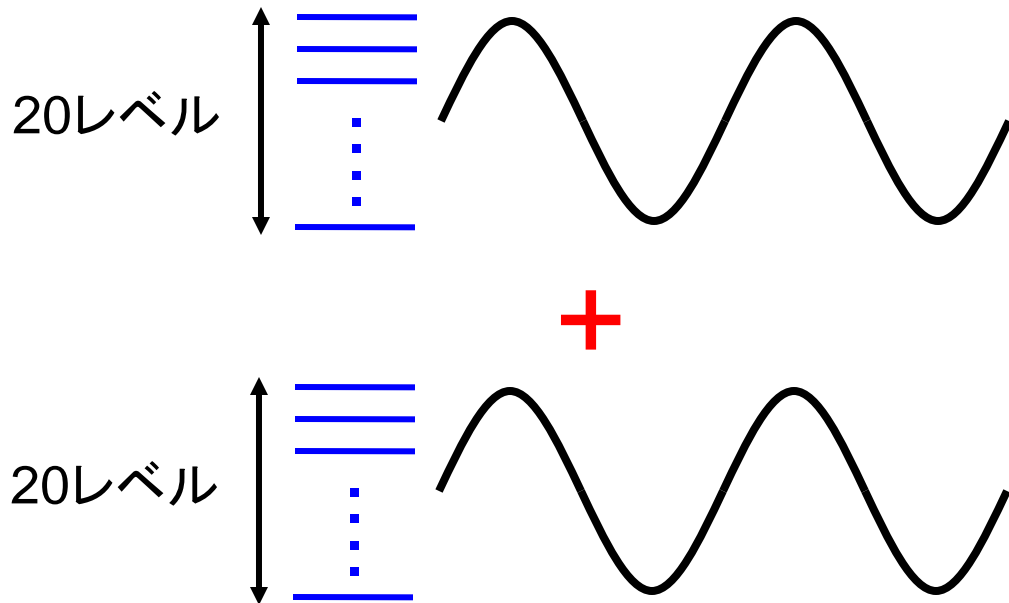


DACを2つ使用する影響② 分解能 30

DAC一つの場合



DAC二つの場合

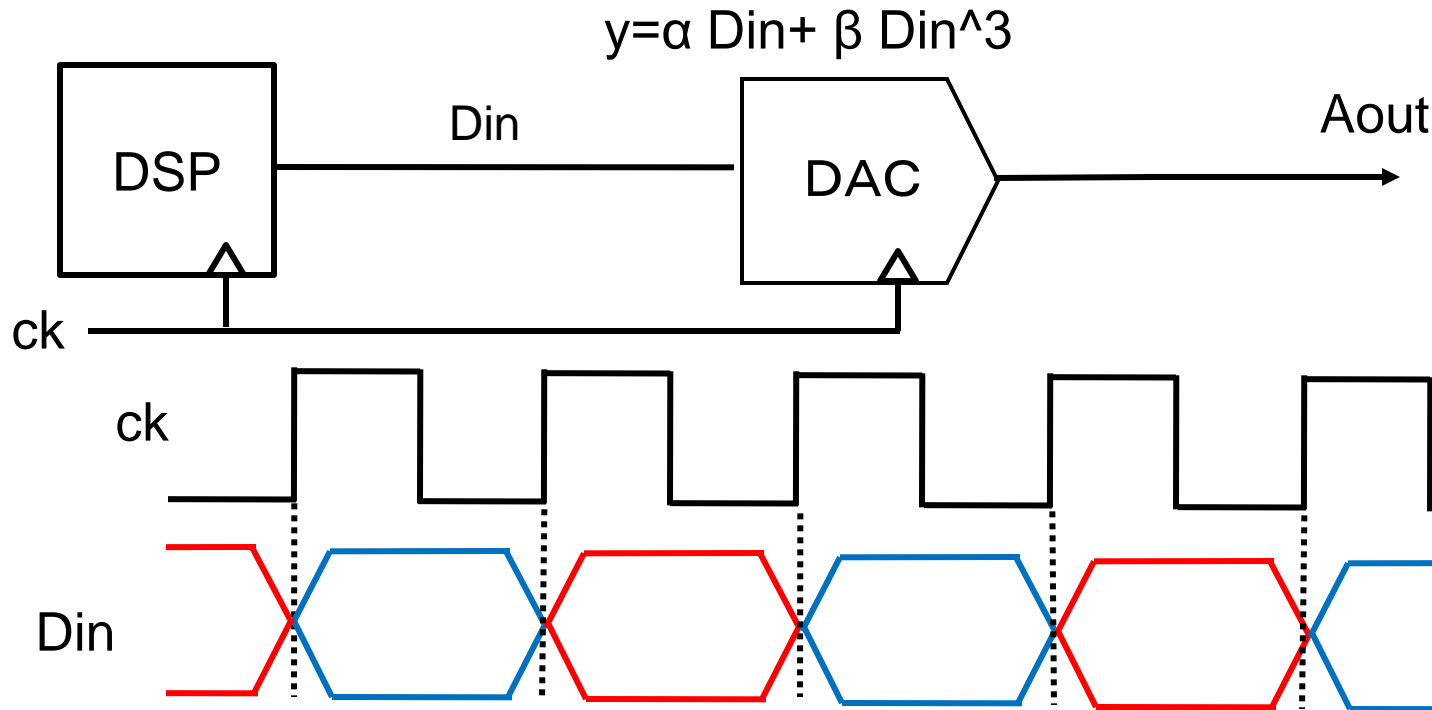


1. 背景
2. シミュレーションの条件
3. 従来型AWG
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
 - DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響
- 5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)**
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
6. まとめ

提案型AWG(位相差切り替え)

32

前提条件 1つのDACで1クロック毎に信号の位相差を切り替える



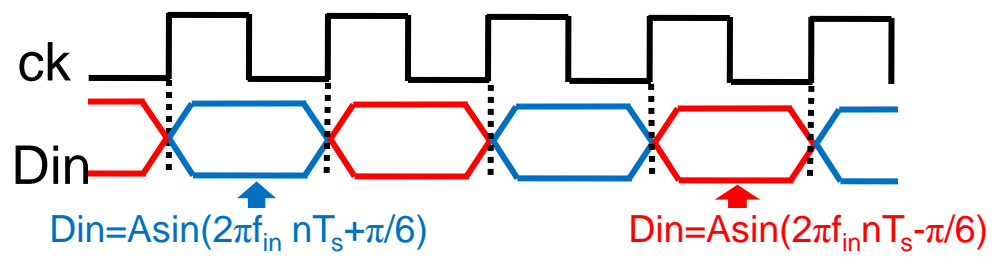
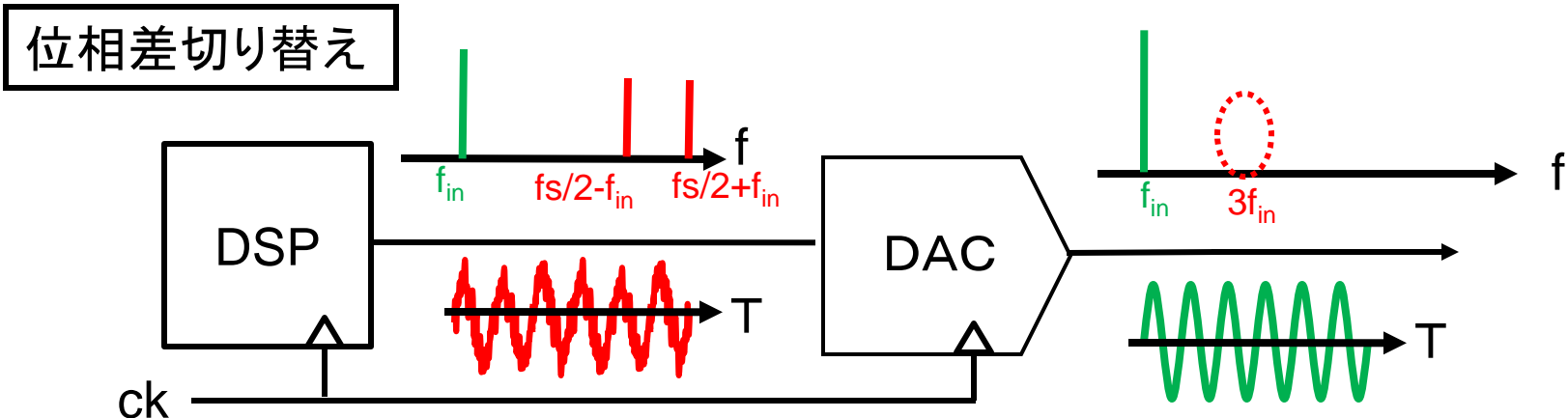
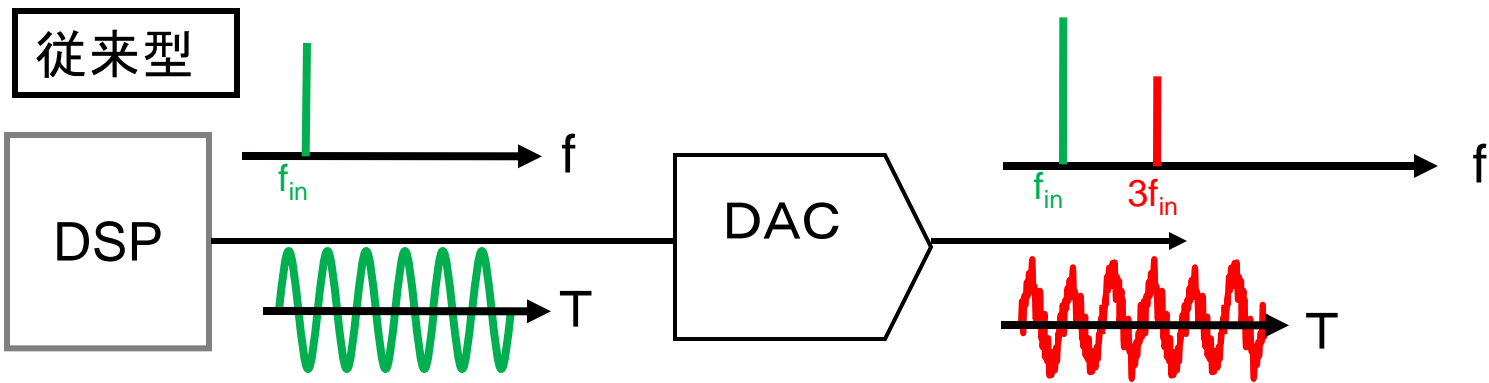
利点

- 3次高調波と信号近傍のIM3を除去することが可能
- DACや加算器を追加する必要がない。

問題点

- 位相差を切り替えのため、 $f_s/2$ に関係した歪が生じる (ローパスフィルタで除去可能)

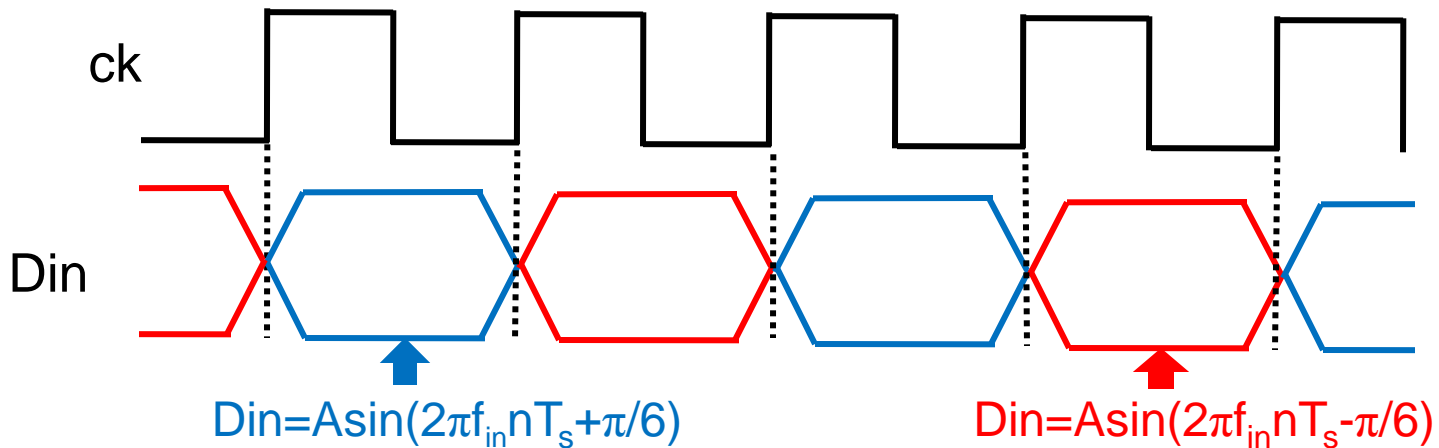
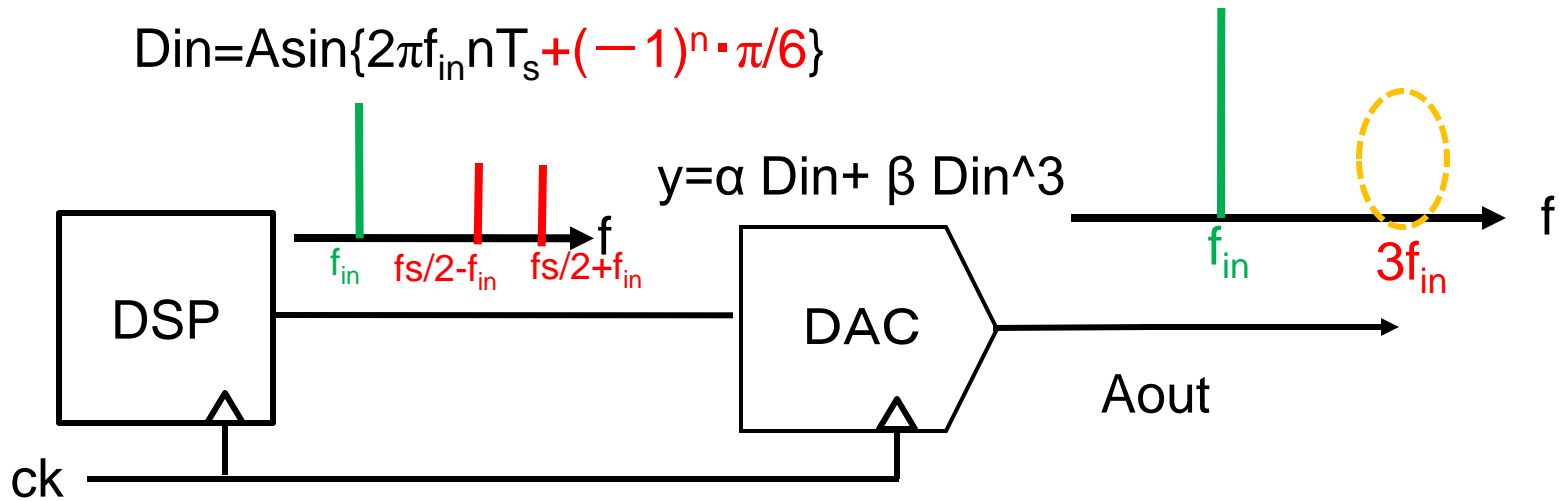
提案型AWG(DAC2つと加算器使用)の原理

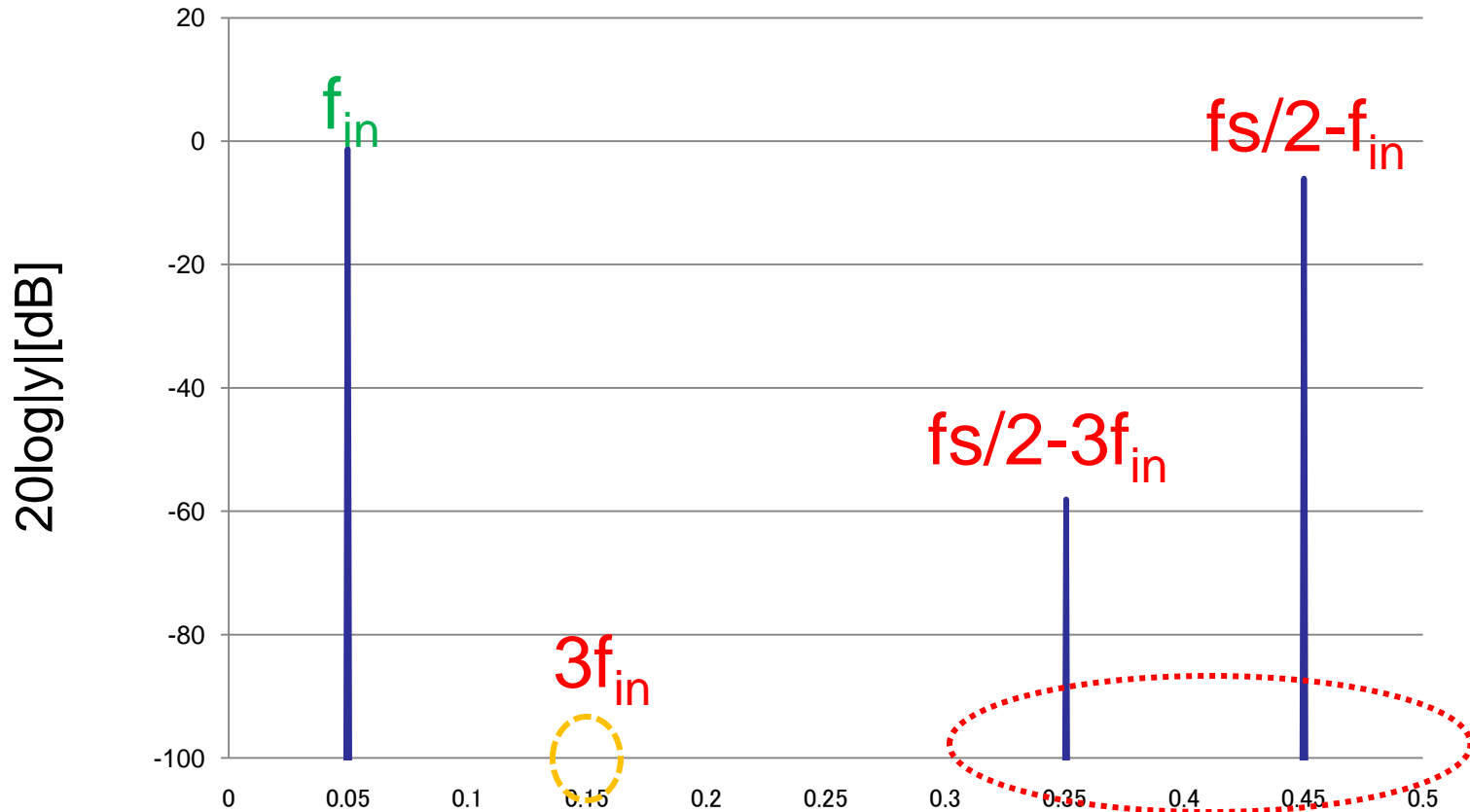


位相差切り替えで、3次高調波・IM3がキャンセル可能な歪を持つ入力信号を生成

1. 背景
2. シミュレーションの条件
3. 従来型AWG
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
 - DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響
- 5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)**
 - 単一正弦波発生AWG**
 - 2トーン発生AWG
6. まとめ

単一正弦波発生AWG（位相差切り替え）





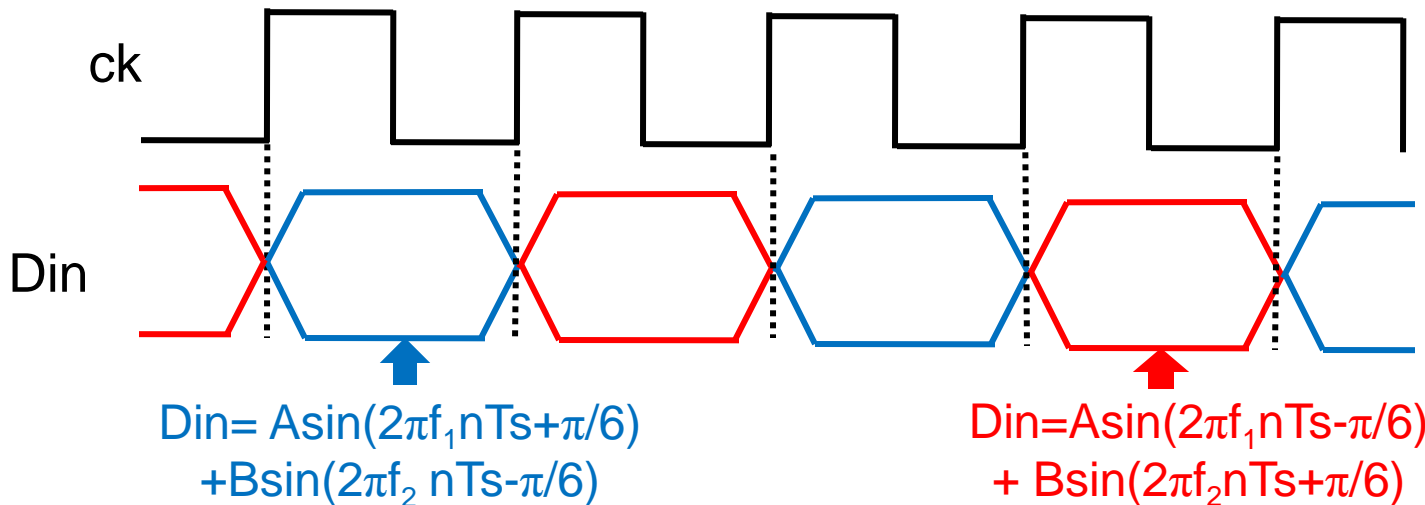
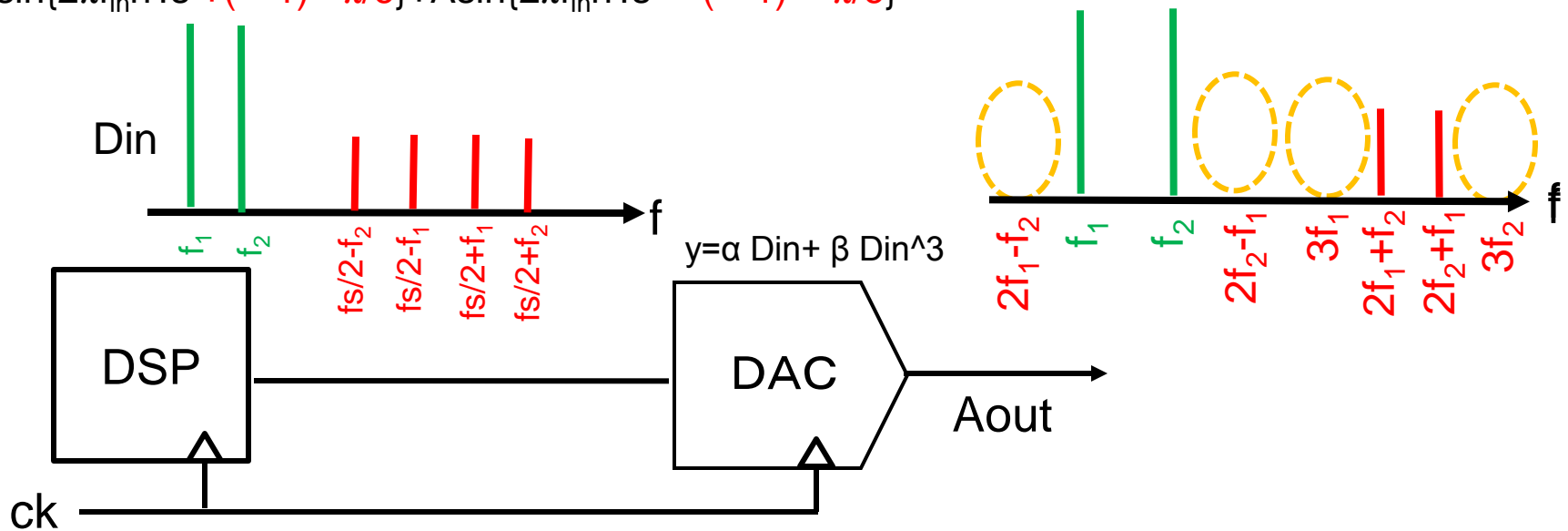
正規化周波数 f/f_s

位相差の切り替えにより発生したパワーの大きい歪

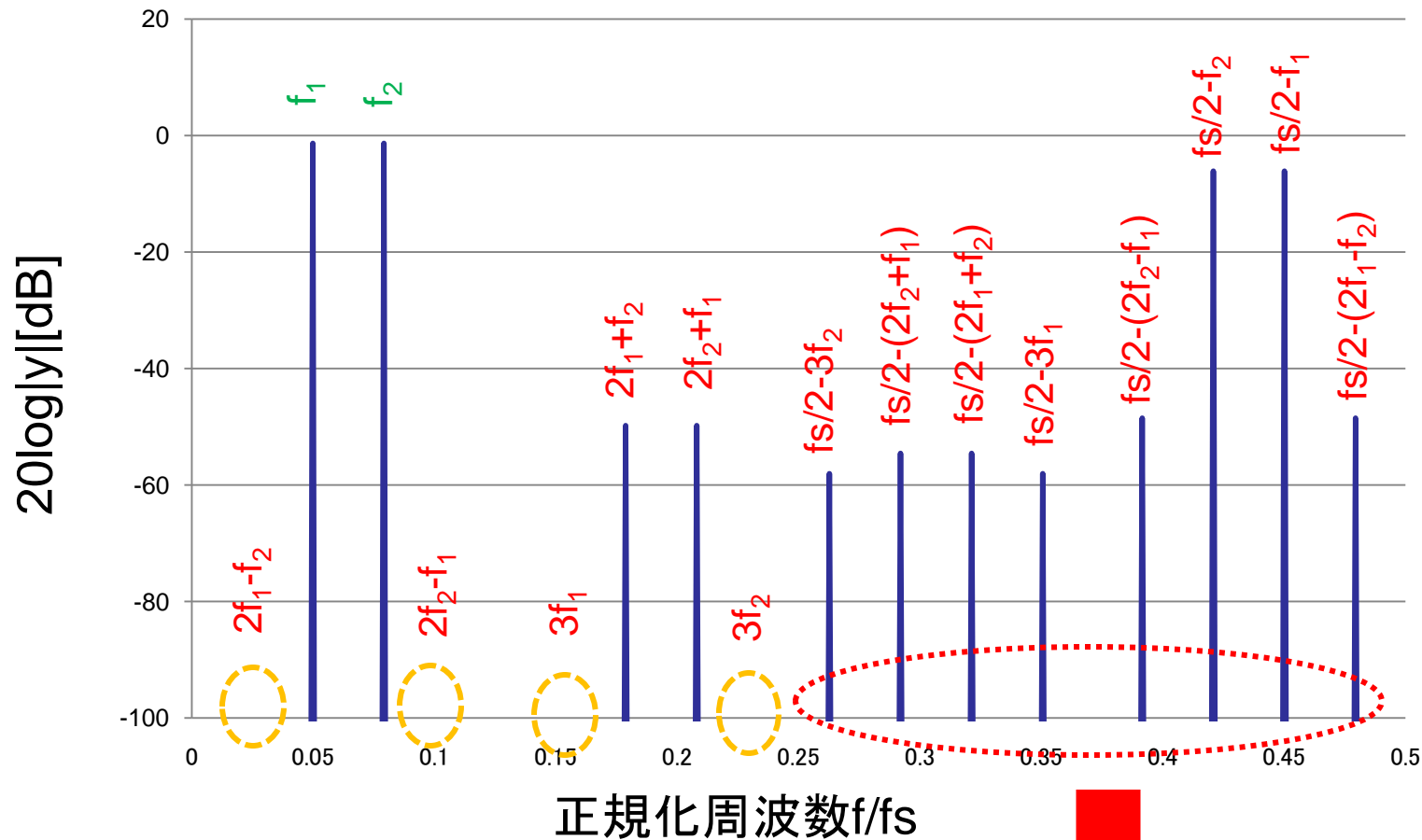
1. 背景
2. シミュレーションの条件
3. 従来型AWG
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
 - DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響
- 5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)**
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG**
6. まとめ

2トーン発生AWG（位相差切り替え） 38

$$D_{in} = A \sin\{2\pi f_{in} n T_s + (-1)^n \cdot \pi/6\} + A \sin\{2\pi f_{in} n T_s - (-1)^n \cdot \pi/6\}$$



2トーンのFFTシミュレーション(位相差切り替え) 39



位相差の切り替えにより発生したパワーの大きい歪

1. 背景
2. シミュレーションの条件
3. 従来型AWG
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
4. 非線形歪補正AWG(DAC2つと加算器使用)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG
 - DACにばらつきがある場合・DACを2つ使用する影響
5. 非線形歪補正AWG(位相差切り替え)
 - 単一正弦波発生AWG
 - 2トーン発生AWG

6. まとめ

非線形性補正AWGについて提案・検証を行った

- 非線形補正AWGは3次高調波と信号近傍のIM3を除去可能
- 提案構成1 (DAC2つと加算器を使用した場合)
 - ・ $f_s/2$ に関連した歪を生成しない
 - ・ DAC特性にばらつきがある場合、3次高調波とIM3が残る
⇒ ダイナミックエレメントマッチング構成でキャンセル可能
- 提案構成2 (位相差切り替えの場合)
 - ・ DACと加算器等の追加が必要ない。
 - ・ $f_s/2$ に関連した歪を生成する⇒ フィルタでカット可能

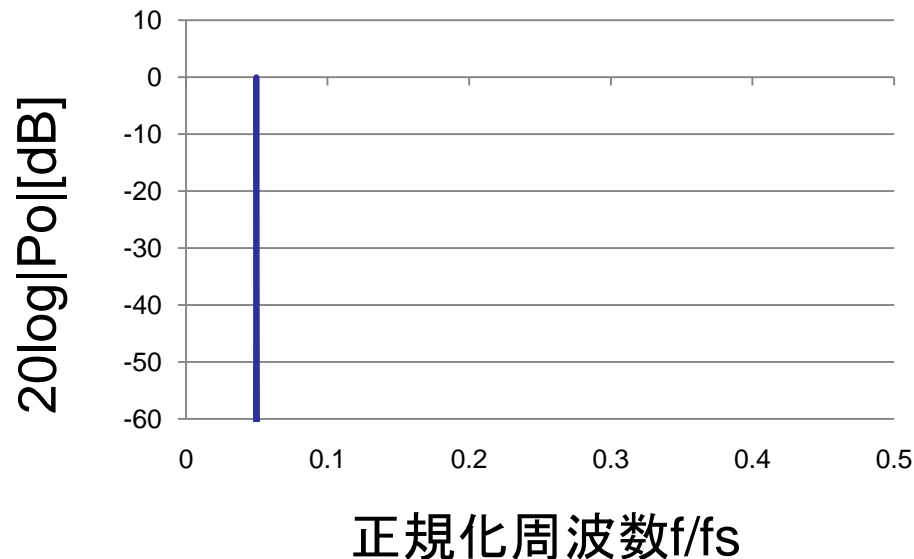
FFTシミュレーションの条件

42

点数	サンプリング周波数 f_s	FFTの周波数範囲 $0 \sim f_s/2$ (正規化)
1024	1024[Hz]	$0 \sim 0.5[f/f_s]$

例 $y = A \sin 2\pi f$ のパワースペクトラム

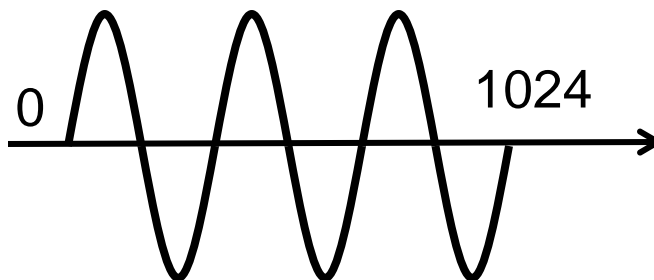
($A = 1, f = 51[\text{Hz}]$)



通常の場合

点数

1024



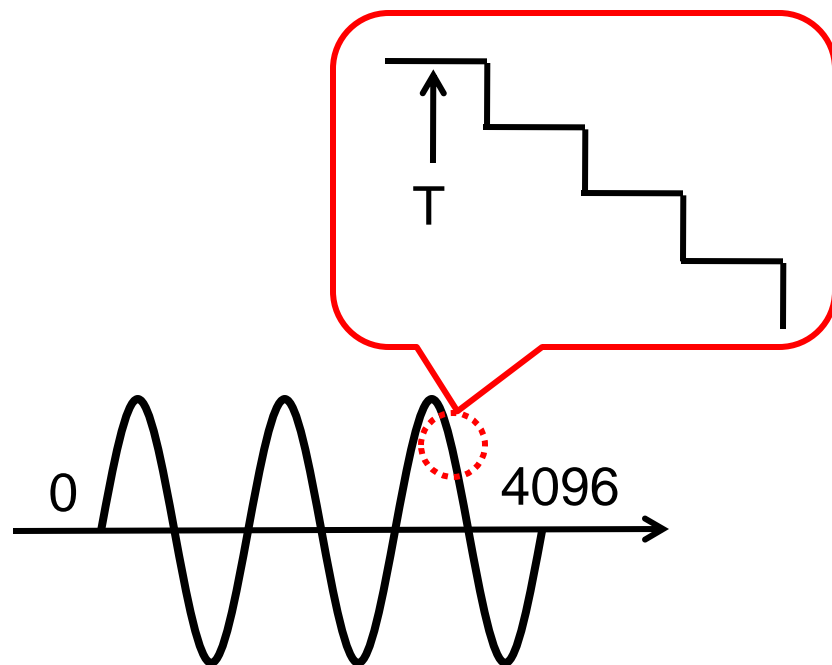
ゼロ次ホールドの場合

点数

4096

データ保持期間T[s]

0.04[s]



單一正弦波(從來構成)~計算結果

44

$$y = aA \sin(\omega t) + b(A \sin(\omega t))^3$$
$$= \left(aA + \frac{3bA^3}{4}\right) \sin(\omega t) - \frac{bA^3}{4} \sin(3\omega t)$$

振幅 $A = 1$, 一次係數 $a = 1$, 三次歪 $b = -0.005$

$$= \sin(\omega t) - 1.25 \times 10^{-3} \sin(3\omega t)$$

2トーン(従来構成)～計算結果

45

$$y = a\{A\sin(\omega_1 t) + B\sin(\omega_2 t)\} + b\{(A\sin(\omega_1 t) + B\sin(\omega_2 t))\}^3$$
$$= (aA + \frac{3}{4}bA^3 + \frac{3}{2}bAB^2)\sin(\omega_1 t) + (aB + \frac{3}{4}bB^3 + \frac{3}{2}bA^2B)\sin(\omega_2 t) - \frac{1}{4}bA^3\sin(3\omega_1 t) - \frac{1}{4}bB^3\sin(3\omega_2 t)$$
$$- \frac{3}{4}bA^2B\sin(2\omega_1 + \omega_2)t + \frac{3}{4}bA^2B\sin(2\omega_1 - \omega_2)t - \frac{3}{4}bAB^2\sin(2\omega_2 + \omega_1)t + \frac{3}{4}bAB^2\sin(2\omega_2 - \omega_1)t$$

振幅 $A = 1$, 振幅 $B = 1$, 一次係数 $a = 1$, 三次歪 $b = -0.005$

$$= 0.99\sin(\omega_1 t) + 0.99\sin(\omega_2 t) + 1.25 \times 10^{-3}\sin(3\omega_1 t) + 1.25 \times 10^{-3}\sin(3\omega_2 t)$$
$$+ 3.75 \times 10^{-3}\sin(2\omega_1 + \omega_2)t - 3.75 \times 10^{-3}\sin(2\omega_1 - \omega_2)t$$
$$+ 3.75 \times 10^{-3}\sin(2\omega_2 + \omega_1)t - 3.75 \times 10^{-3}\sin(2\omega_2 - \omega_1)t$$

$$y = aA \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) + b(A \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}))^3$$

$$+ aA \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) + b(A \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}))^3$$

$$= 1.7(aA + \frac{3bA^3}{4}) \sin(\omega t)$$

振幅A = 1, 一次係数a = 1, 三次歪b = -0.005

$$= 1.69 \sin(\omega t)$$

2トーン(DAC2つと加算器使用)~計算結果

$$\begin{aligned}y &= a\left\{A \sin\left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right) + B \sin\left(\omega_2 t - \frac{\pi}{6}\right)\right\} + b\left\{\left(A \sin\left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right) + B \sin\left(\omega_2 t - \frac{\pi}{6}\right)\right)\right\}^3 + \\ & a\left\{A \sin\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{6}\right) + B \sin\left(\omega_2 t + \frac{\pi}{6}\right)\right\} + b\left\{\left(A \sin\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{6}\right) + B \sin\left(\omega_2 t + \frac{\pi}{6}\right)\right)\right\}^3 \\ &= 1.7\left(aA + \frac{3}{4}bA^3 + \frac{3}{2}bAB^2\right) \sin(\omega_1 t) + 1.7\left(aB + \frac{3}{4}bB^3 + \frac{3}{2}bA^2B\right) \sin(\omega_2 t) \\ & \quad - 1.7 \frac{3}{4}bA^2B \sin(2\omega_1 + \omega_2)t - 1.7 \frac{3}{4}bAB^2 \sin(2\omega_2 + \omega_1)t\end{aligned}$$

振幅 $A = 1$, 振幅 $B = 1$, 利得 $a = 1$, 三次歪 $b = -0.005$

$$= 1.68 \sin(\omega_1 t) + 1.68 \sin(\omega_2 t) - 6.38 \times 10^{-3} \sin(2\omega_1 + \omega_2)t - 6.38 \times 10^{-3} \sin(2\omega_2 + \omega_1)t$$

Q1

ダイナミックエレメントマッチング構成はDACの3次歪の差分の値を考慮しているのか？ (東工大 松澤昭先生)

A

3次歪みの差分を考慮しているわけではない。そのため、3次歪の差分が異なってもキャンセル可能となる。

Q2

2トーン発生の場合、周波数間隔によってはキャンセルできないのではないかと？ (座長 広島大 吉田毅先生)

A

提案した2つの方式は周波数間隔に関係無くキャンセルできるはずである。

アドバイス

3次歪は分解能のレベルによって異なるのでそれも考慮した方がいいのではないかと。(東工大 松澤昭先生)