

ADCテスト信号生成の ためのAWG非線形補正技術

○若林和行 上森聡史 山田貴文 小林修
加藤啓介 小林春夫 新津葵一 松浦達治

群馬大学
半導体理工学研究センター(STARC)

- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

研究背景

ADC(AD変換器)や通信用デバイスの線形性テストが必須

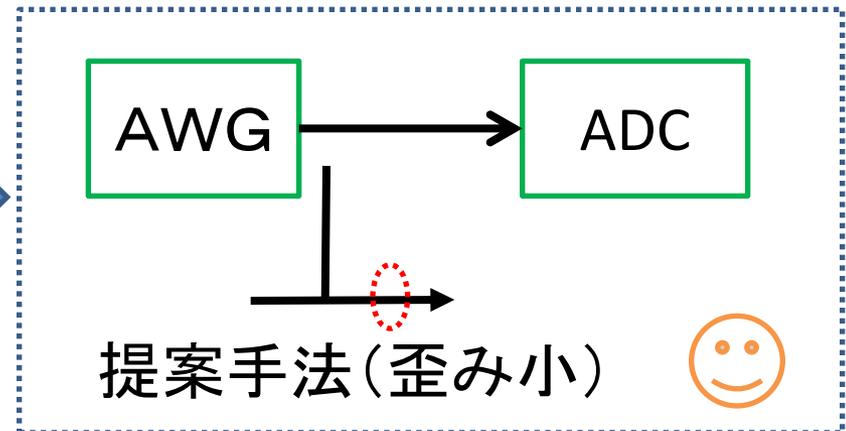
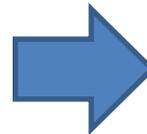
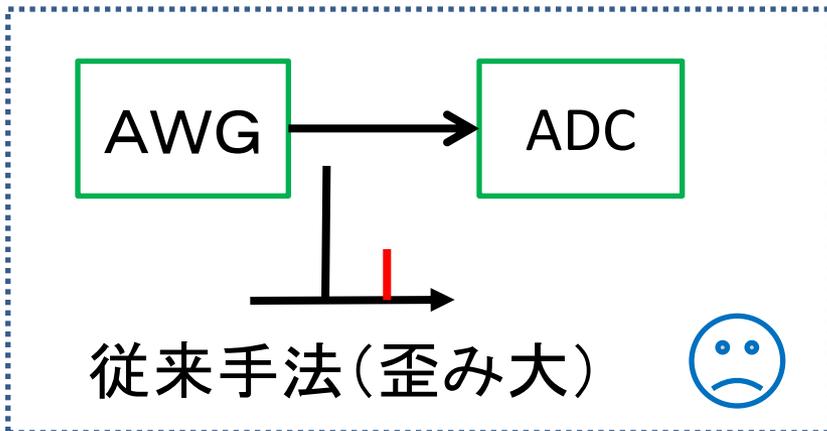
線形性テストには歪の小さい入力信号が必要



従来信号発生手法 ⇒ 歪成分も生成 



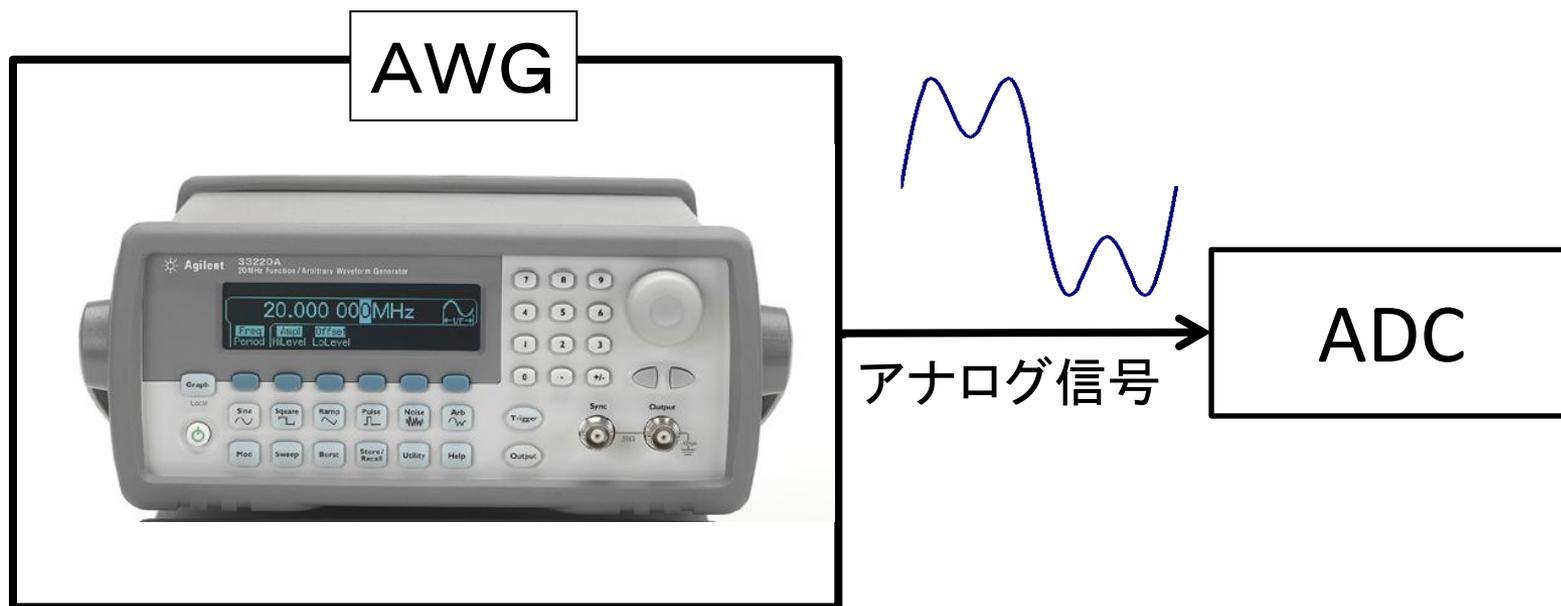
歪の小さい信号発生手法を2つ提案 



- 研究背景
- **線形性テスト**
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

AWGによるテスト信号発生

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

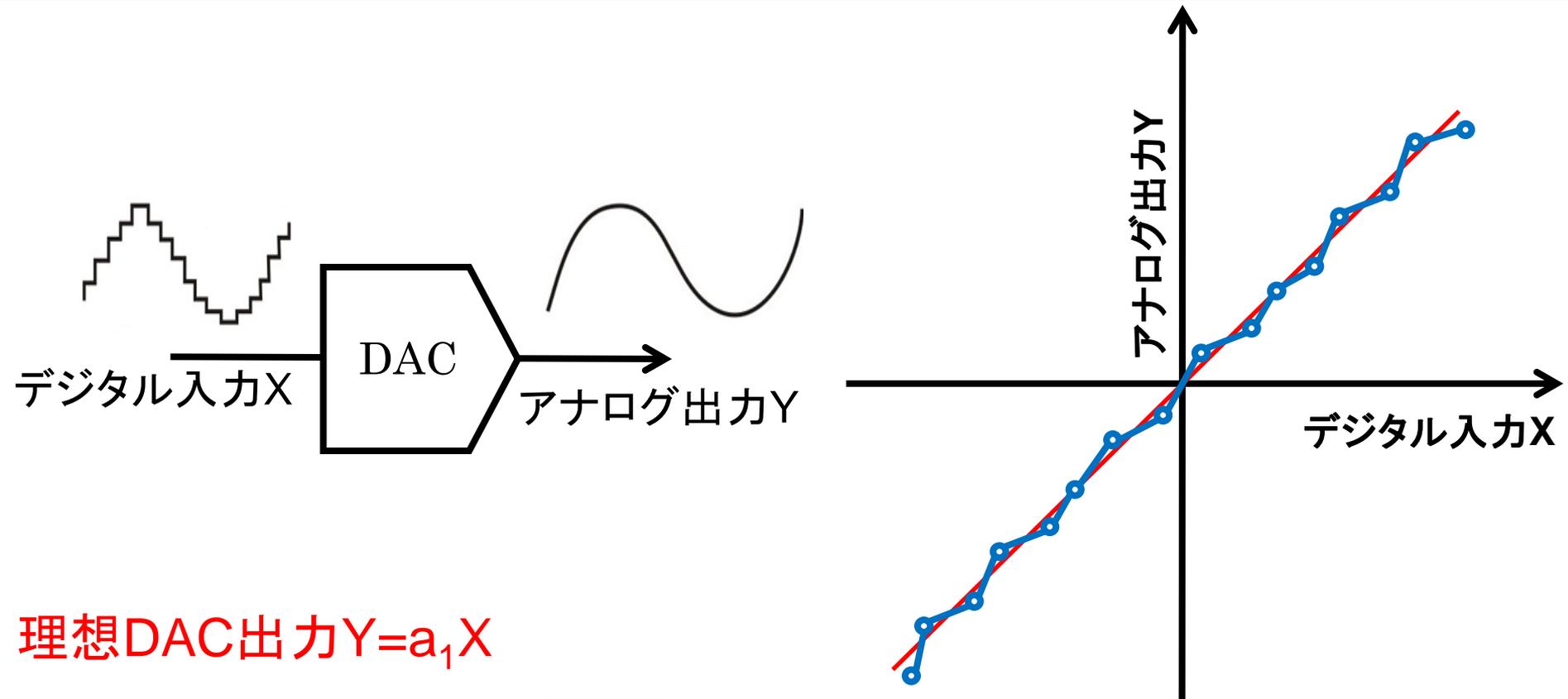


DSPでデジタル信号を生成しDACでアナログ信号に変換

テスト信号として純粋な単一正弦波・2トーン信号を発生

DACには非線形性が存在

DACの非線形性による歪の発生



理想DAC出力 $Y = a_1 X$

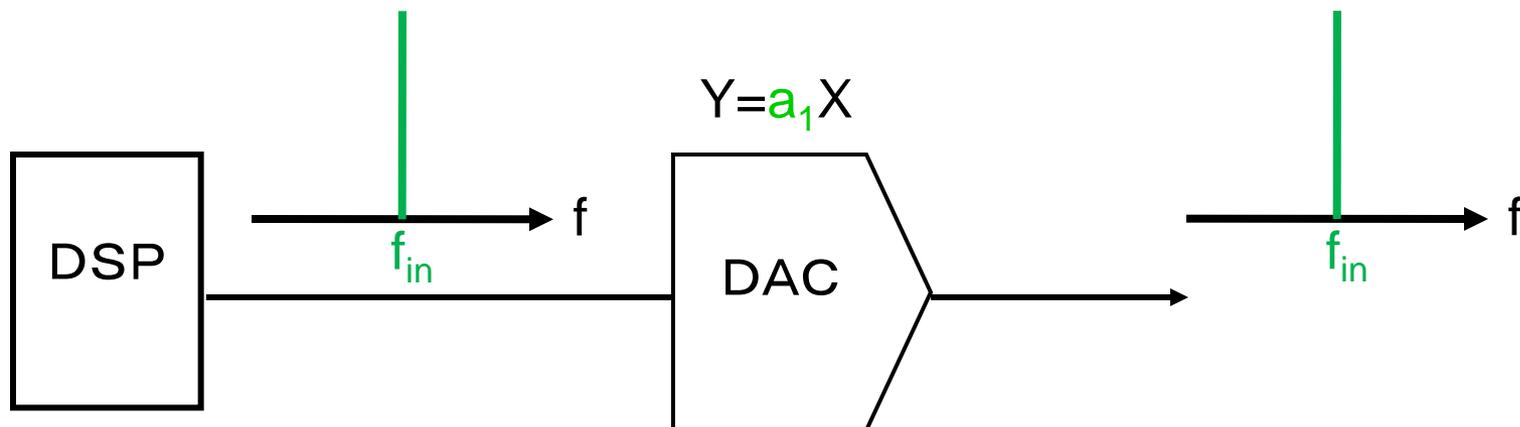
現実DAC出力 $Y = a_1 X + \boxed{a_2 X^2} + \boxed{a_3 X^3} + \boxed{a_4 X^4} \dots$
2次歪 3次歪 4次歪

素子のばらつきにより非線形



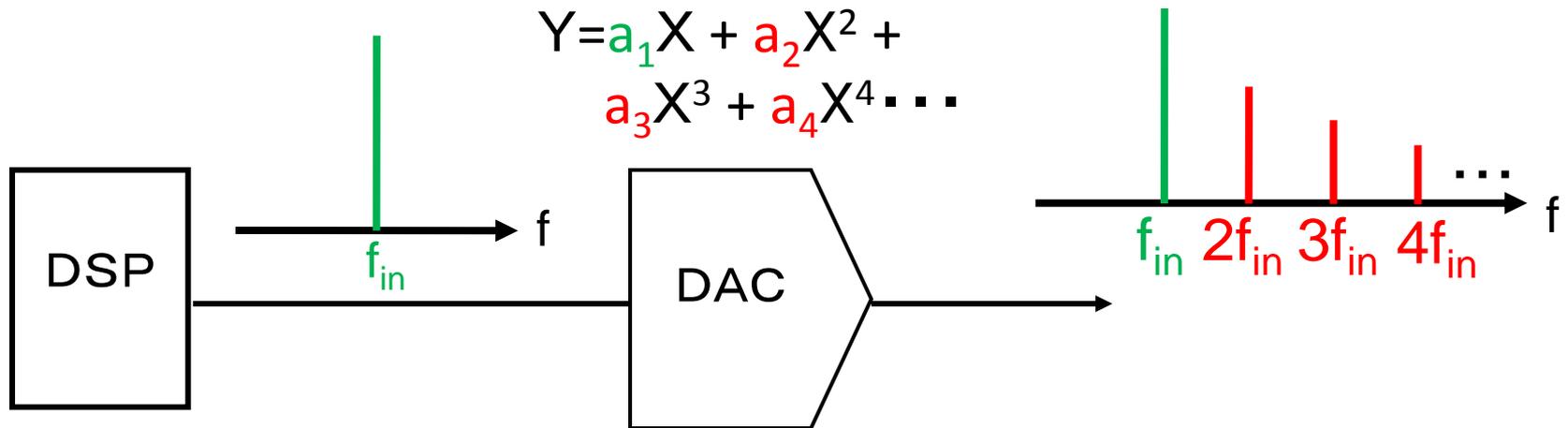
歪が発生

理想DAC(線形)



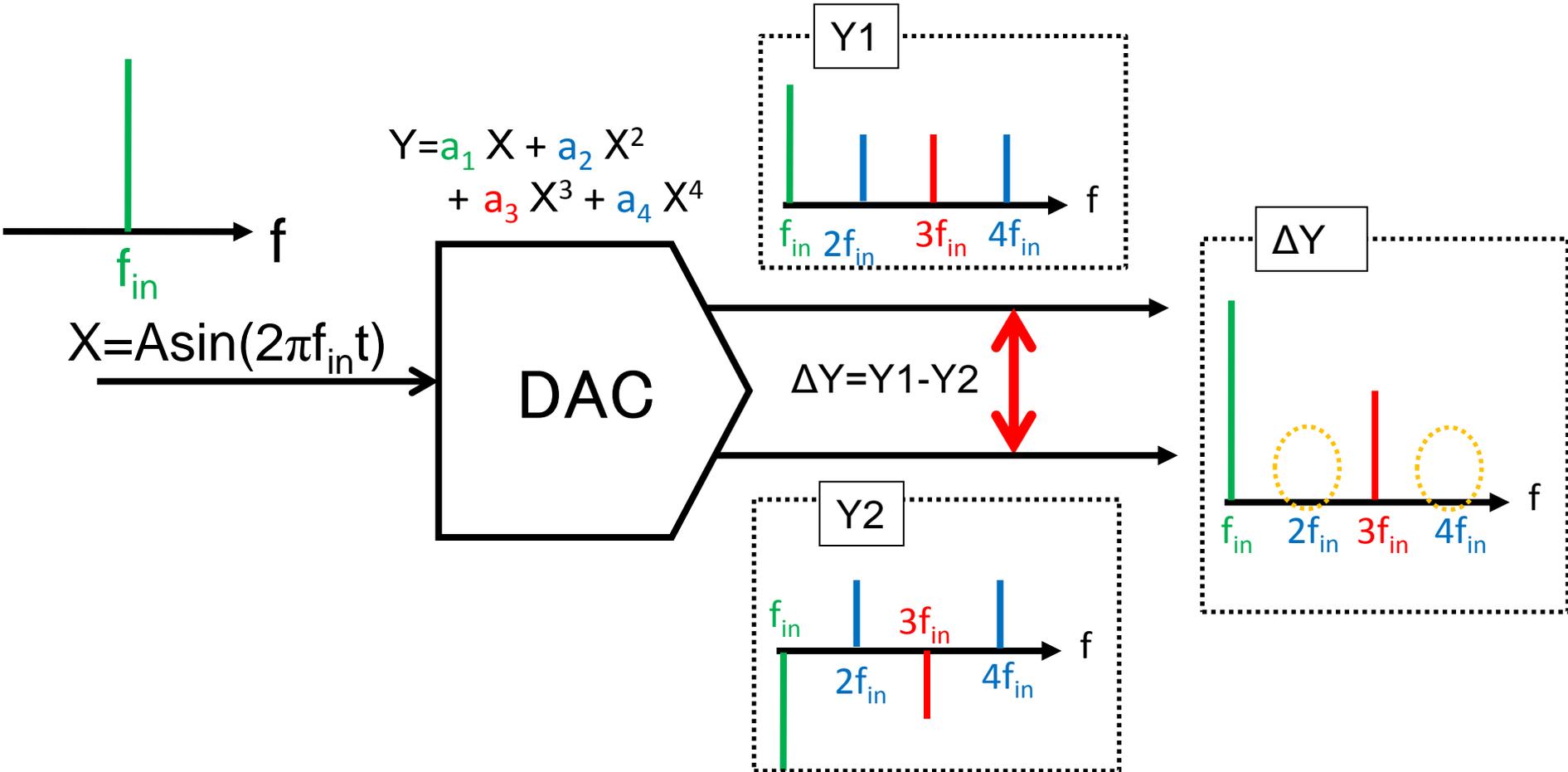
入力と出力の周波数成分が一致

現実DAC(非線形)



出力に歪成分が生じる(入力周波数 f_{in} の整数倍)

差動構成による偶数次歪の除去



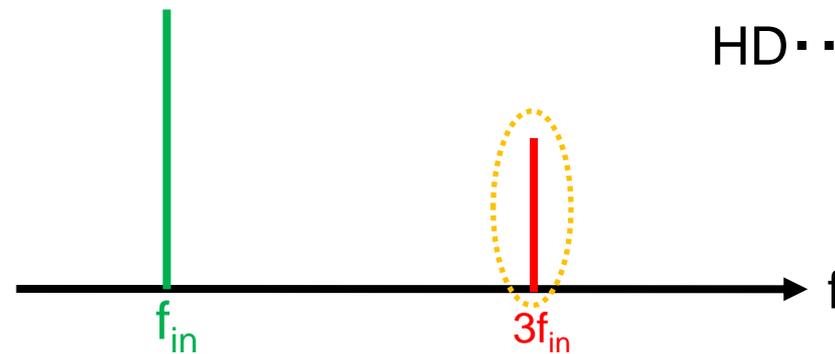
出力を完全に差動することで偶数次歪は全てキャンセル



今回は奇数次歪で最も問題となる3次歪について検証

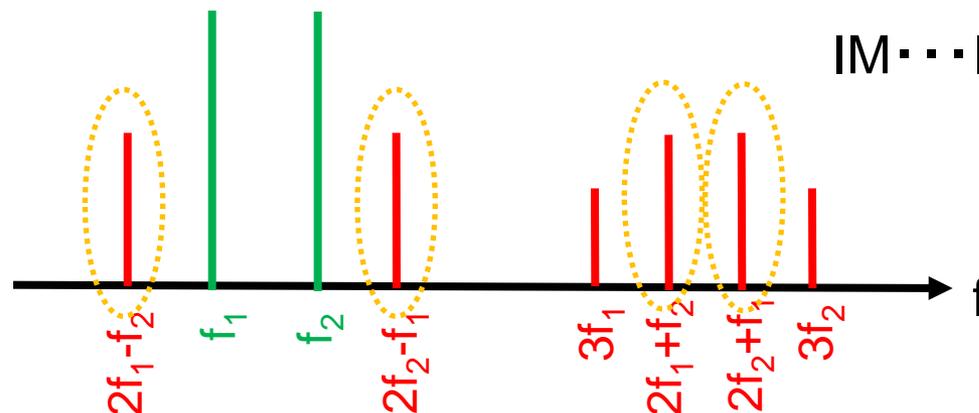
3次歪によって生成される歪成分

単一正弦波入力



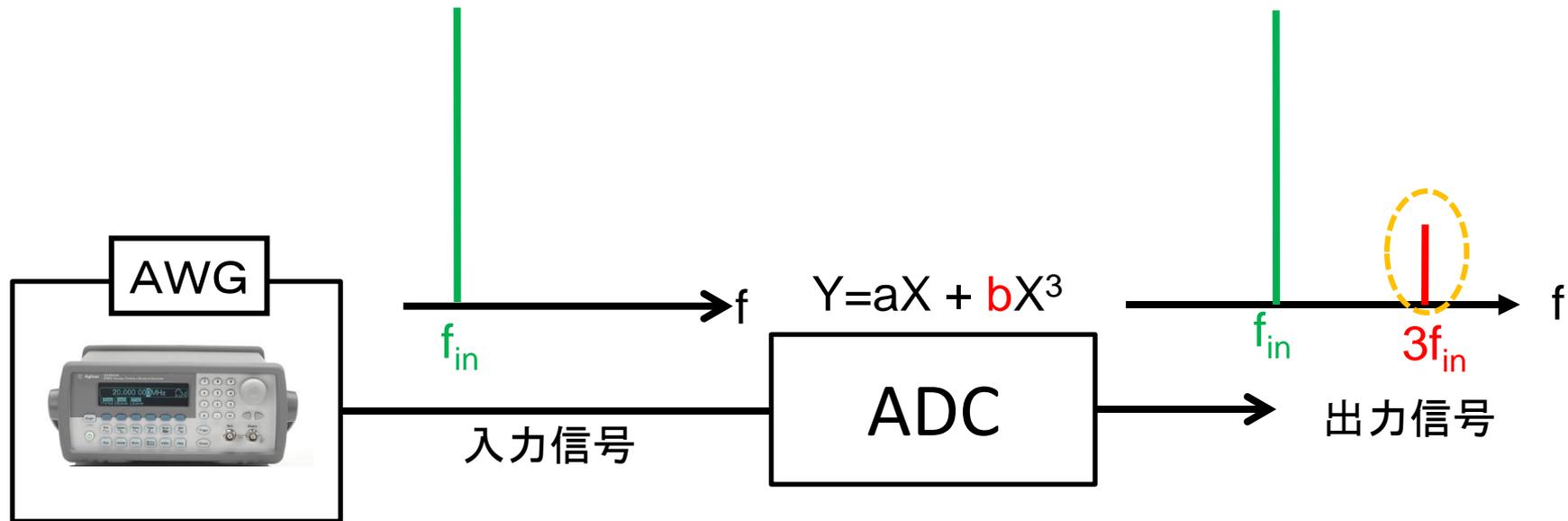
HD3(3次高調波歪) 入力周波数の3倍の周波数成分

2トーン信号入力



IM3(3次相互変調歪) HD3以外の周波数成分

(IM3は入力周波数近傍に発生するのでフィルタでの除去が困難)

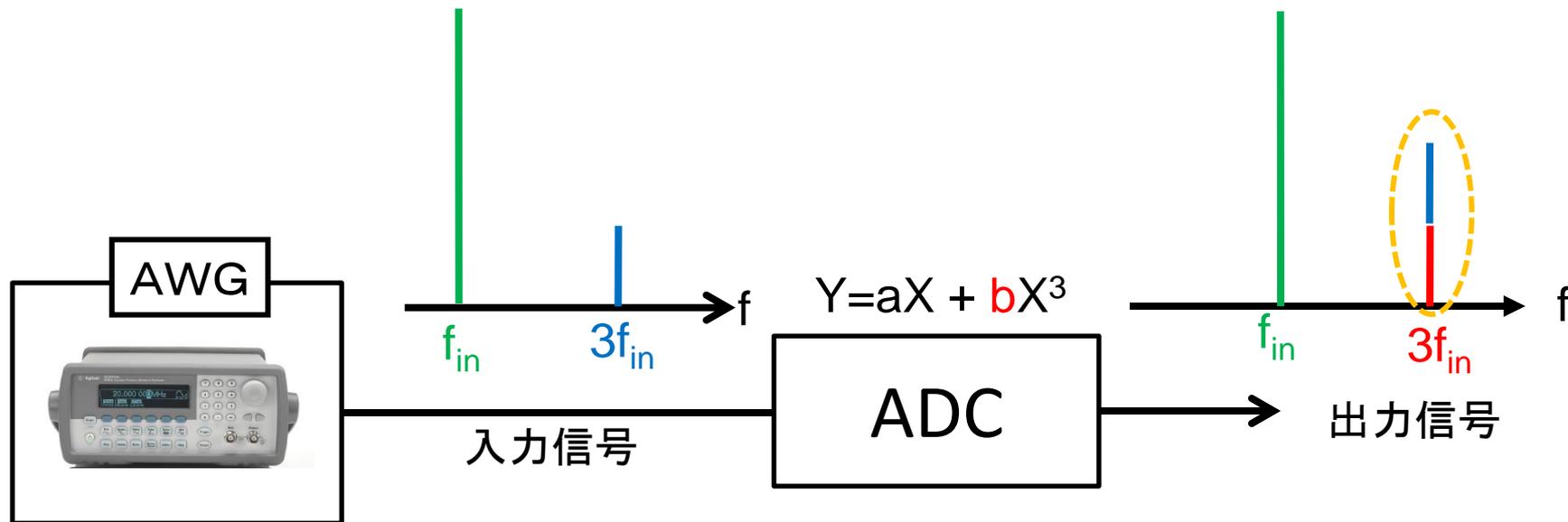


ADCに純粋な単一正弦波を入力



ADCの歪成分(HD3)の高精度な計測が可能

ADC線形性テスト(単一正弦波入力)

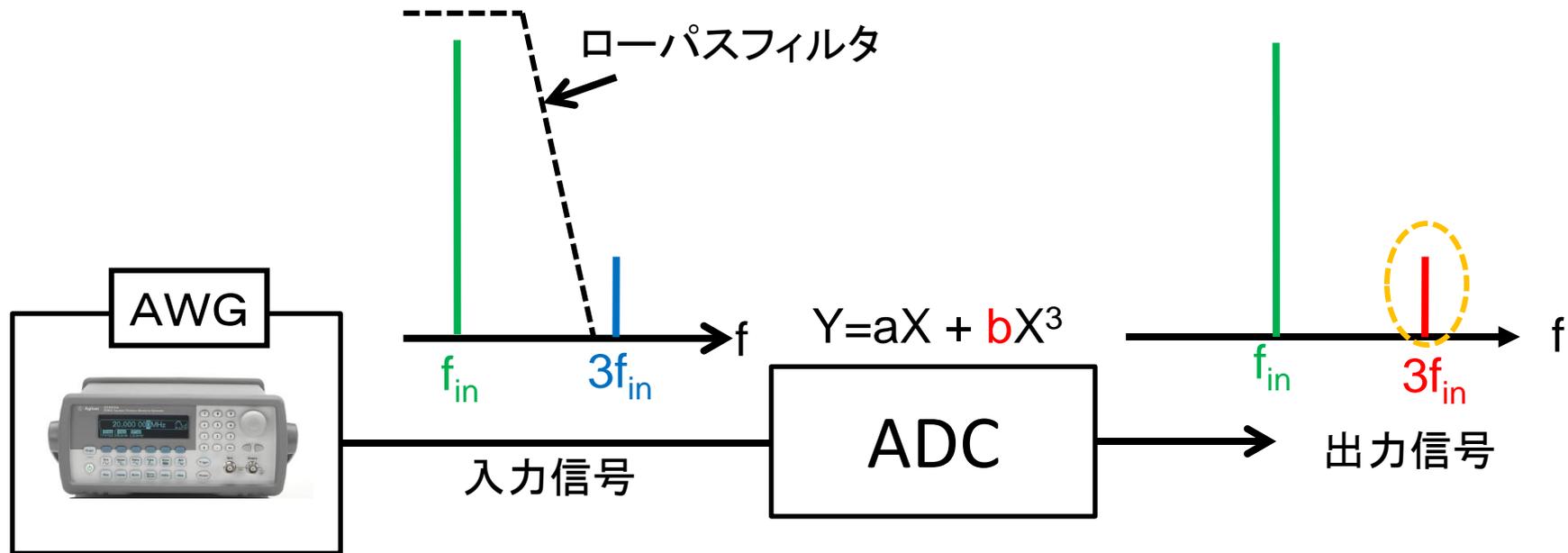


入力信号に歪成分(HD3)がある場合

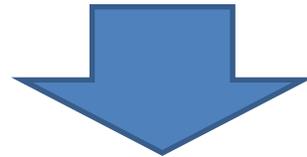


ADCの歪成分(HD3)の高精度な計測が不可

ADC線形性テスト(単一正弦波入力)

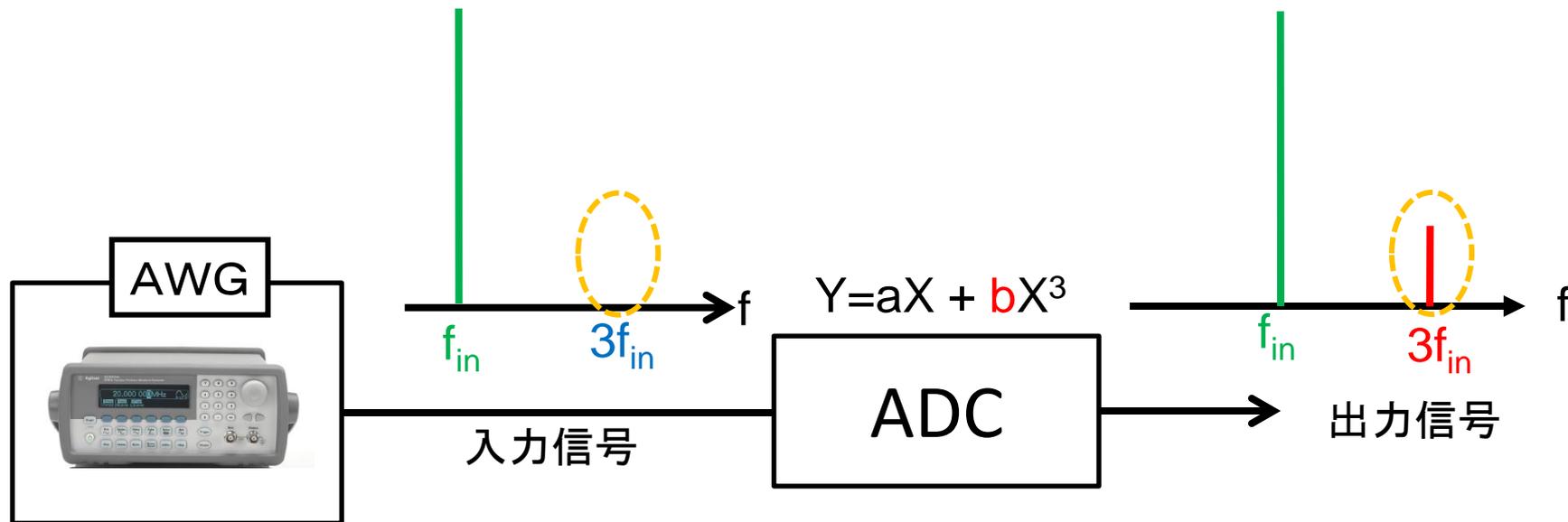


フィルタによって歪成分(HD3)をカット



ADCの歪成分(HD3)の高精度な計測が可能

ADC線形性テスト(単一正弦波入力)



提案手法により歪成分(HD3)をキャンセル可能

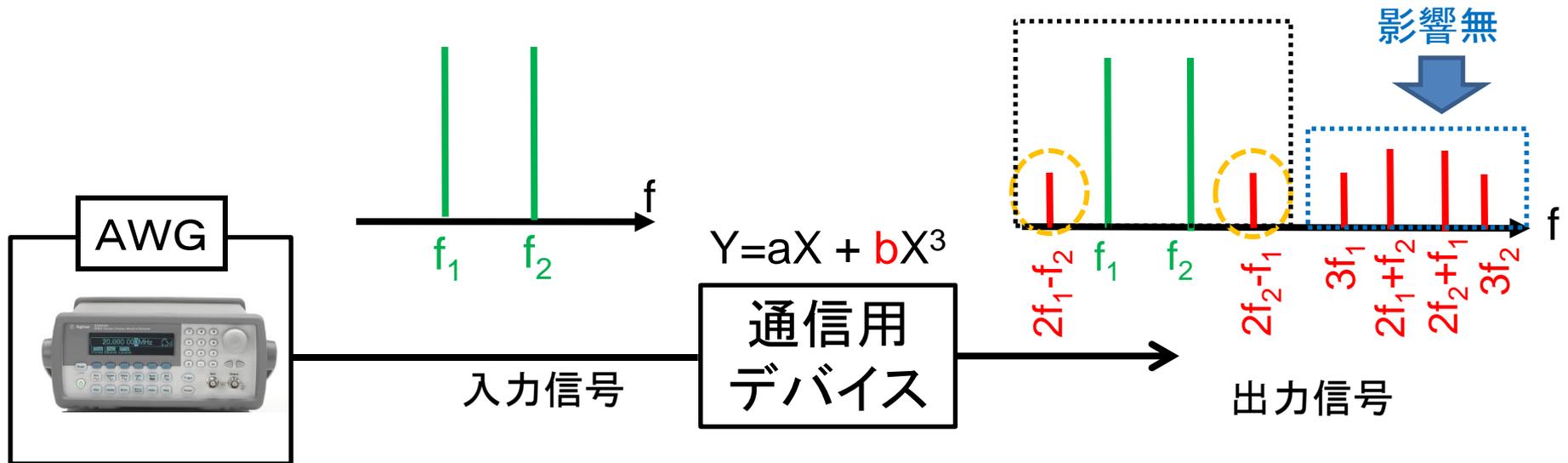


ADCの歪成分(HD3)の高精度な計測が可能



フィルタ要求が緩和

通信用デバイス⇒狭帯域・高周波信号を受信

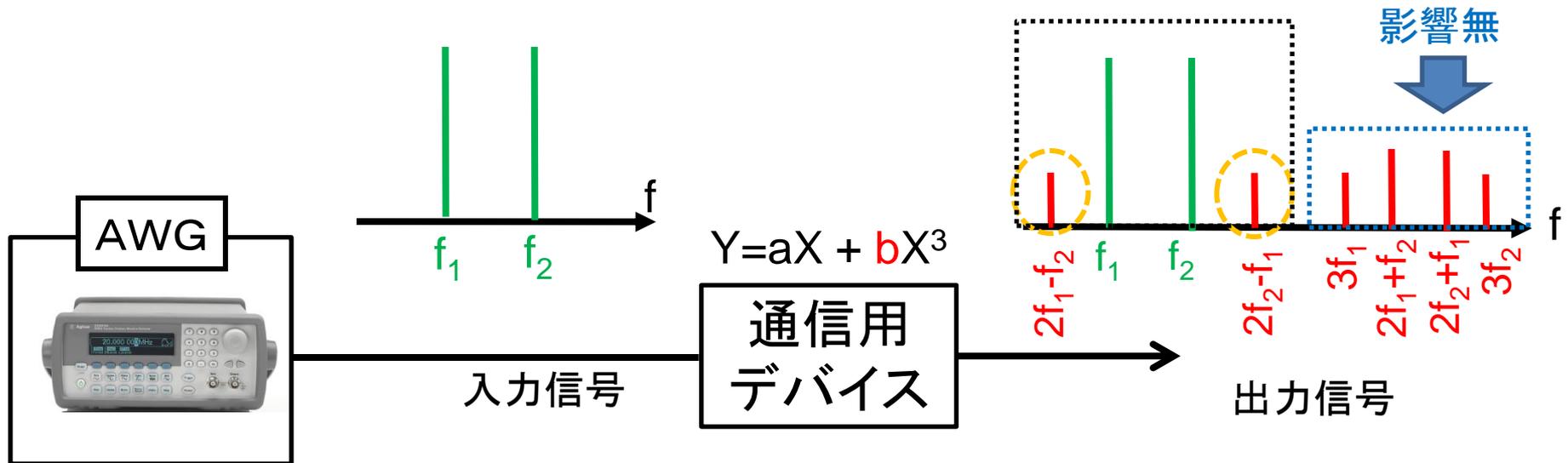


IM3($2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$)が信号帯域に発生

妨害波となる

通信用デバイスがIM3をどれだけ生成するか知る必要がある

通信用デバイス⇒狭帯域・高周波信号を受信

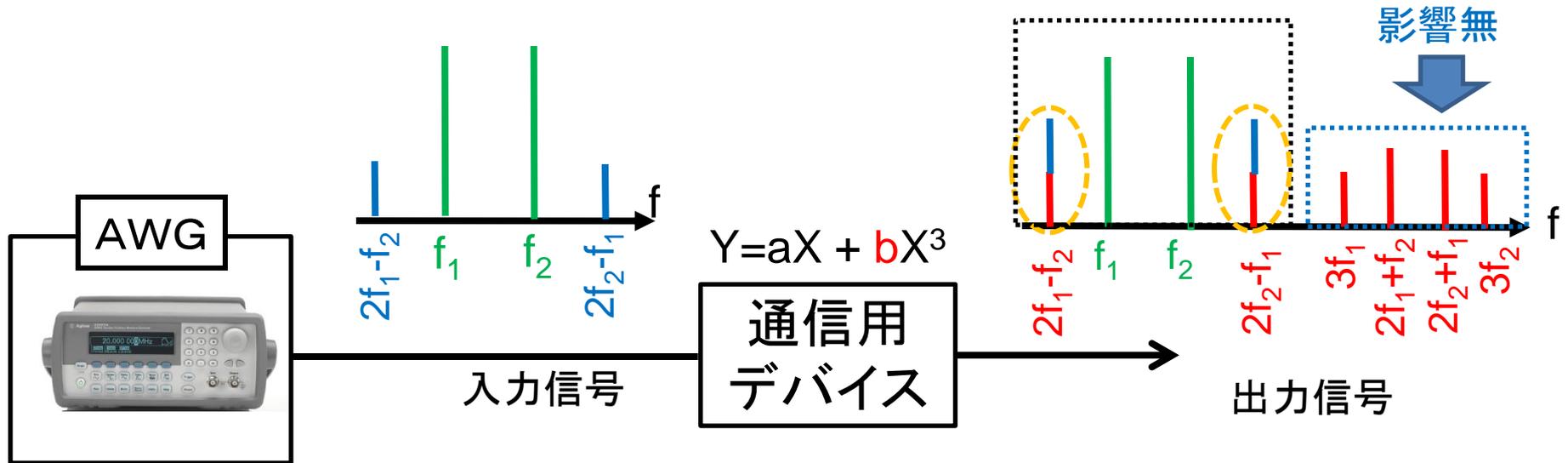


通信用デバイスに純粋な2トーン信号を入力



通信用デバイスの歪成分(IM3)の高精度な計測が可能

通信用デバイス⇒狭帯域・高周波信号を受信

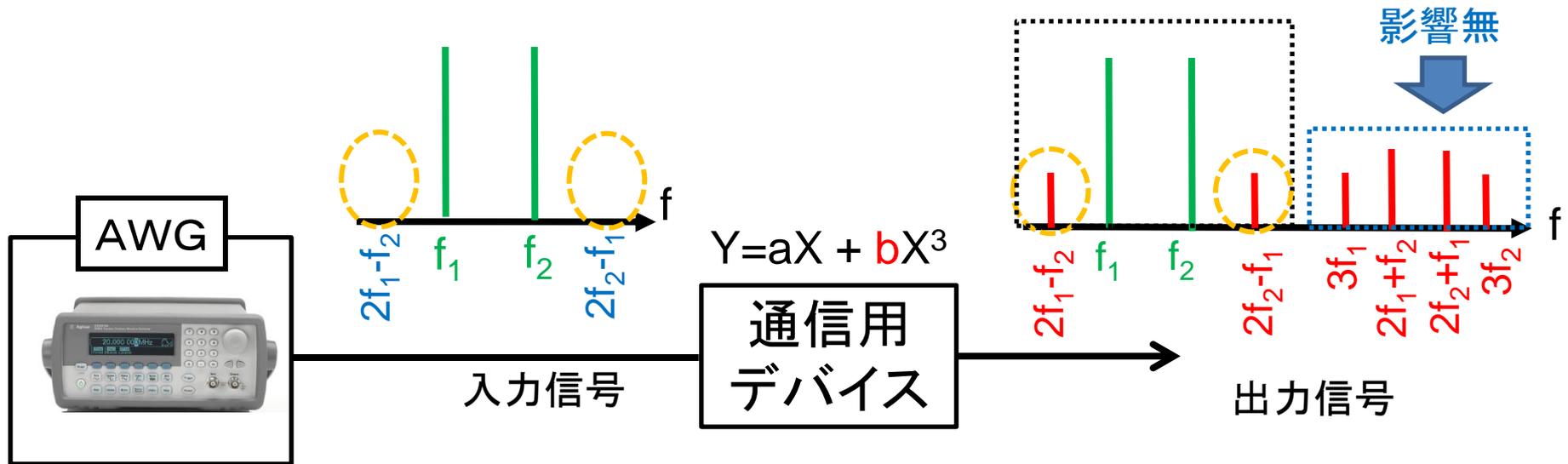


入力信号に歪成分(IM3)がある場合



通信用デバイスの歪成分(IM3)の高精度な計測が不可
(帯域近傍に発生⇒フィルタによるカットも困難)

通信用デバイス⇒狭帯域・高周波信号を受信



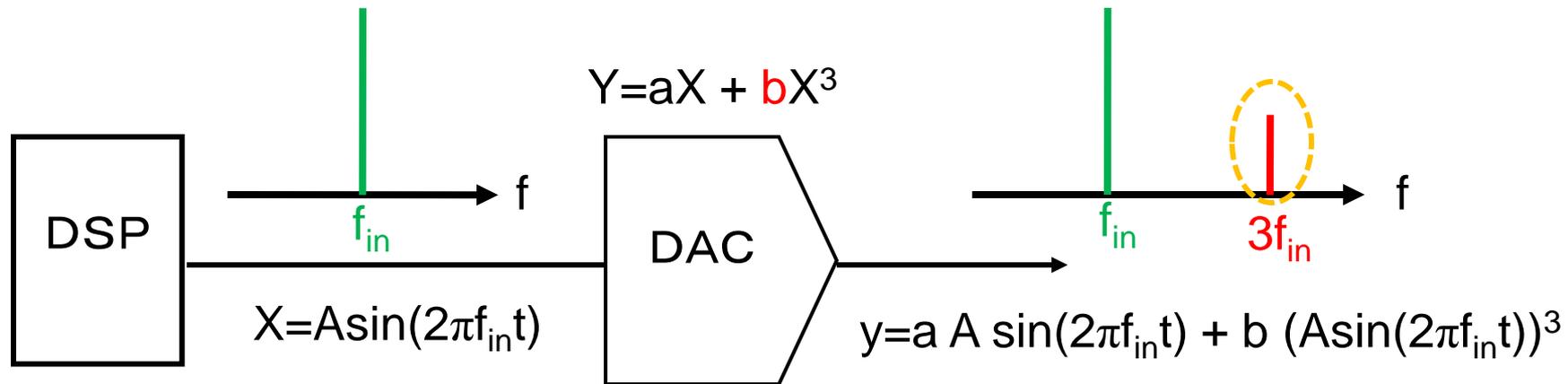
提案手法によりIM3をキャンセル可能



通信用デバイスの歪成分(IM3)の高精度な計測が可能

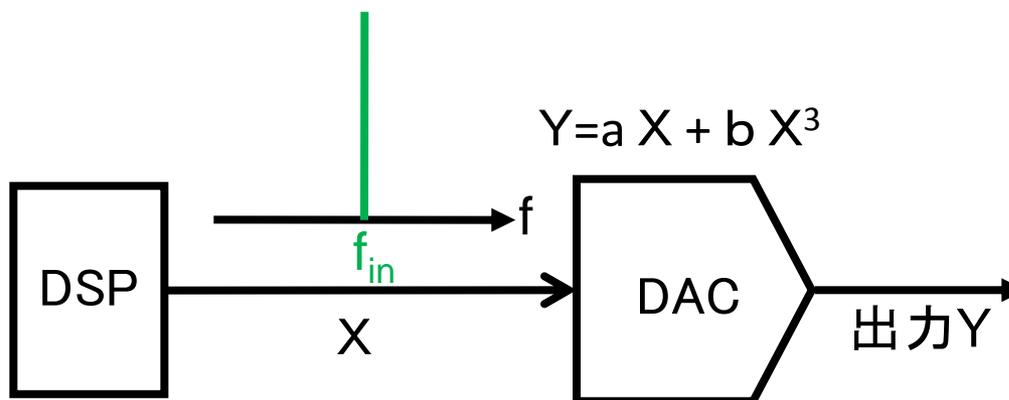
- 研究背景
- 線形性テスト
- **従来手法**
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

従来手法(単一正弦波)



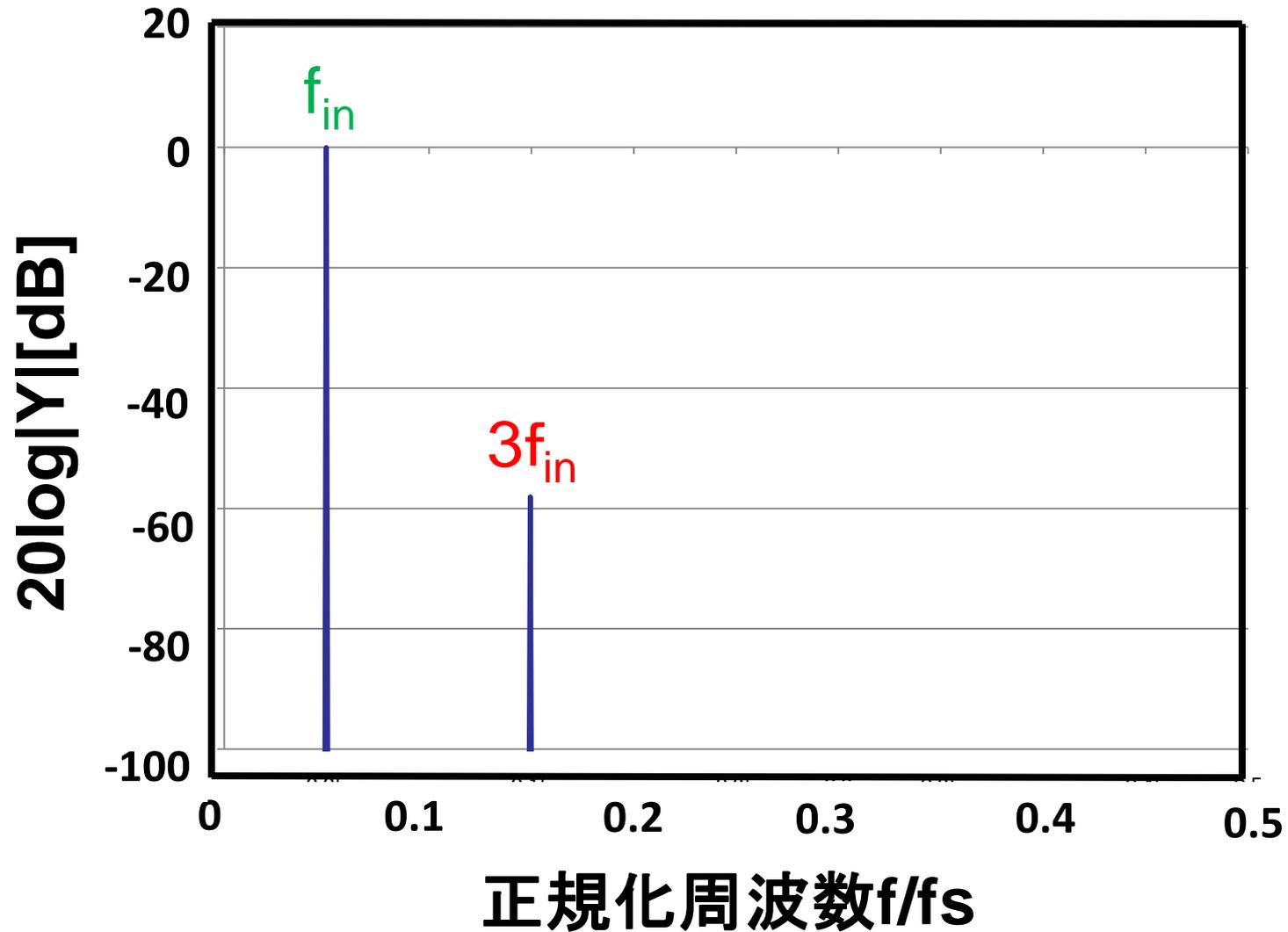
■ HD3が発生

シミュレーション条件(単一正弦波)

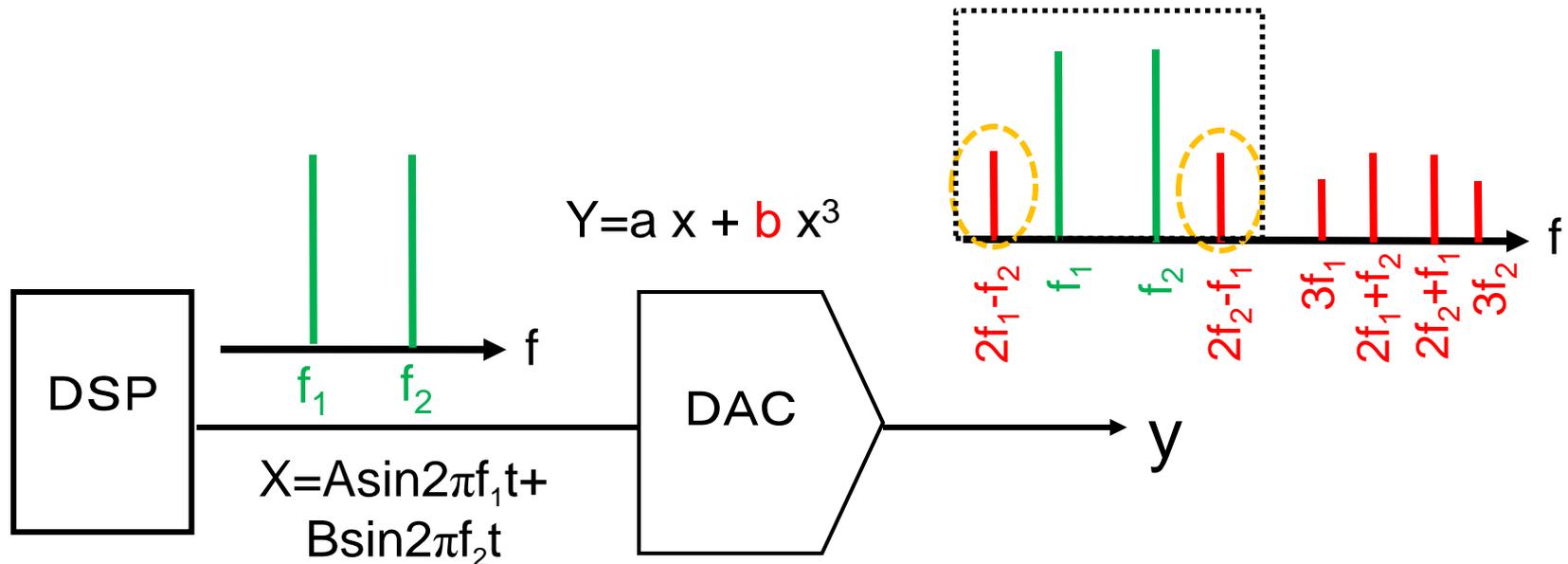


出力YのパワースペクトルをFFTで確認
(シミュレーションはexcelを使用)

入力信号X	$\sin(2\pi f_{in} t)$
1次係数a(DAC)	1
3次係数b(DAC)	-0.005
入力周波数 f_{in}	51
サンプリング周波数 f_s	1024

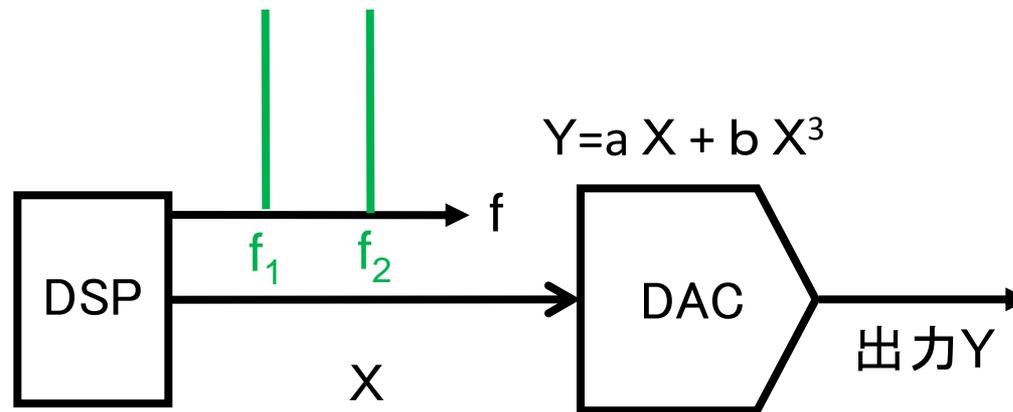


従来手法(2トーン信号)



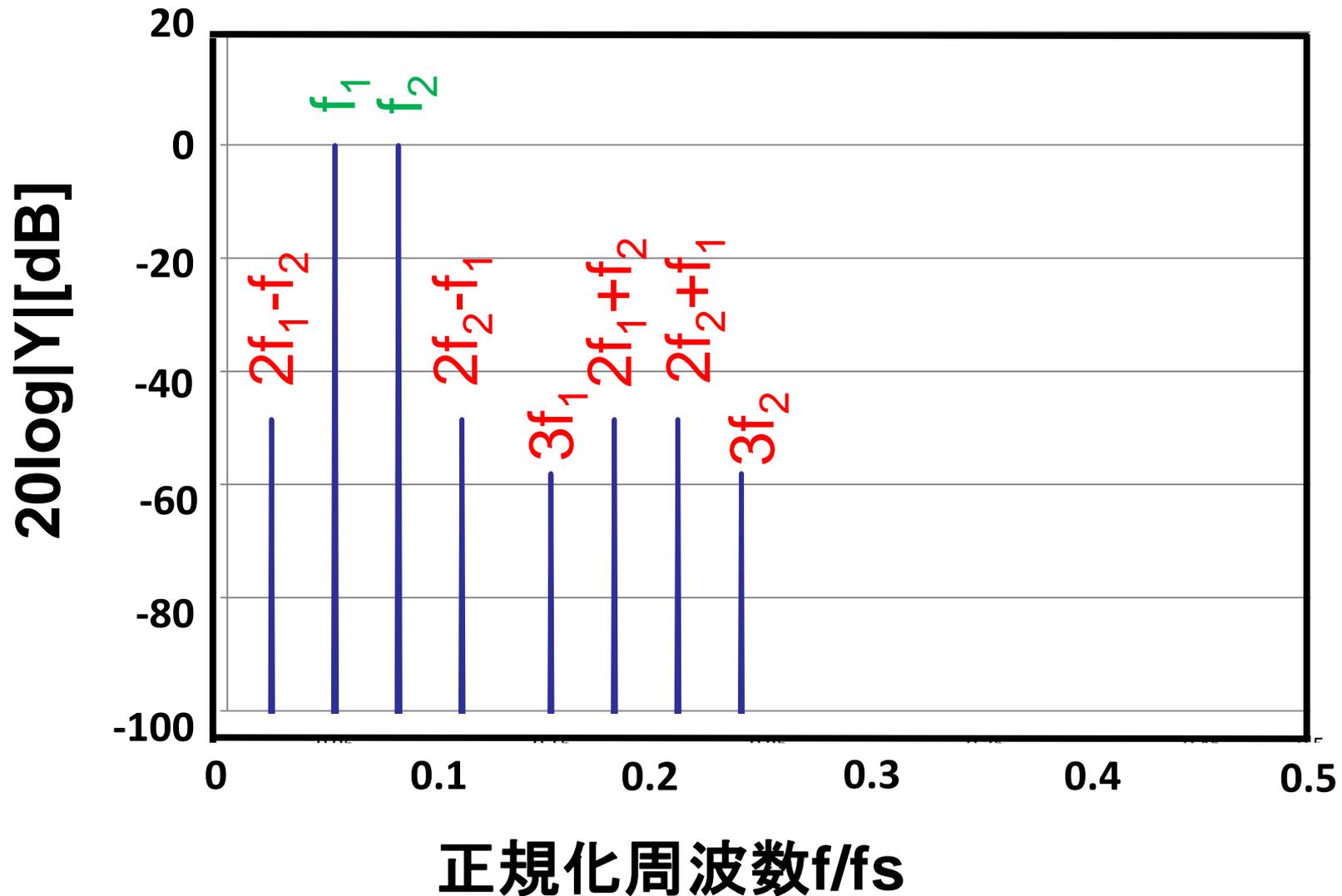
■ IM3が発生

シミュレーション条件(2トーン信号)



入力信号X	$\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t$
1次係数a(DAC)	1
3次係数b(DAC)	-0.005
入力周波数 f_1	51
入力周波数 f_2	81
サンプリング周波数 f_s	1024

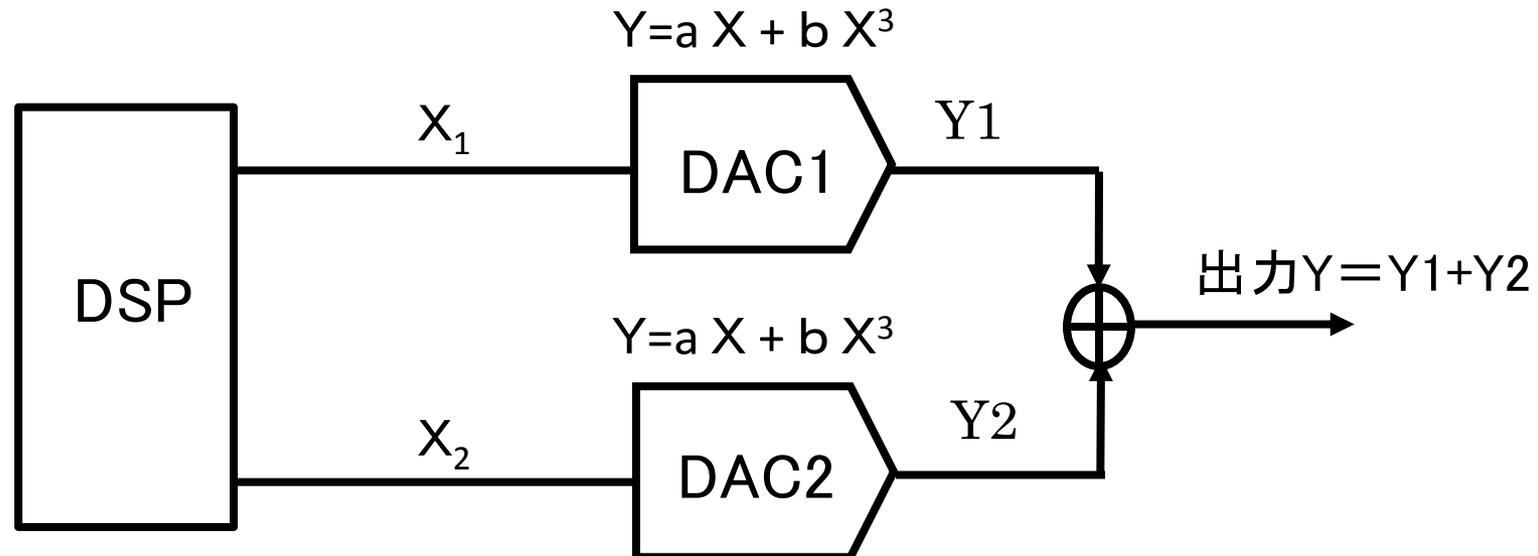
出力Yのパワースペクトル(2トーン信号)



- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- **提案手法**
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

位相差信号合成型

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



2種類の位相差を持たせたデジタル信号 $X_1 \cdot X_2$ をDACに入力

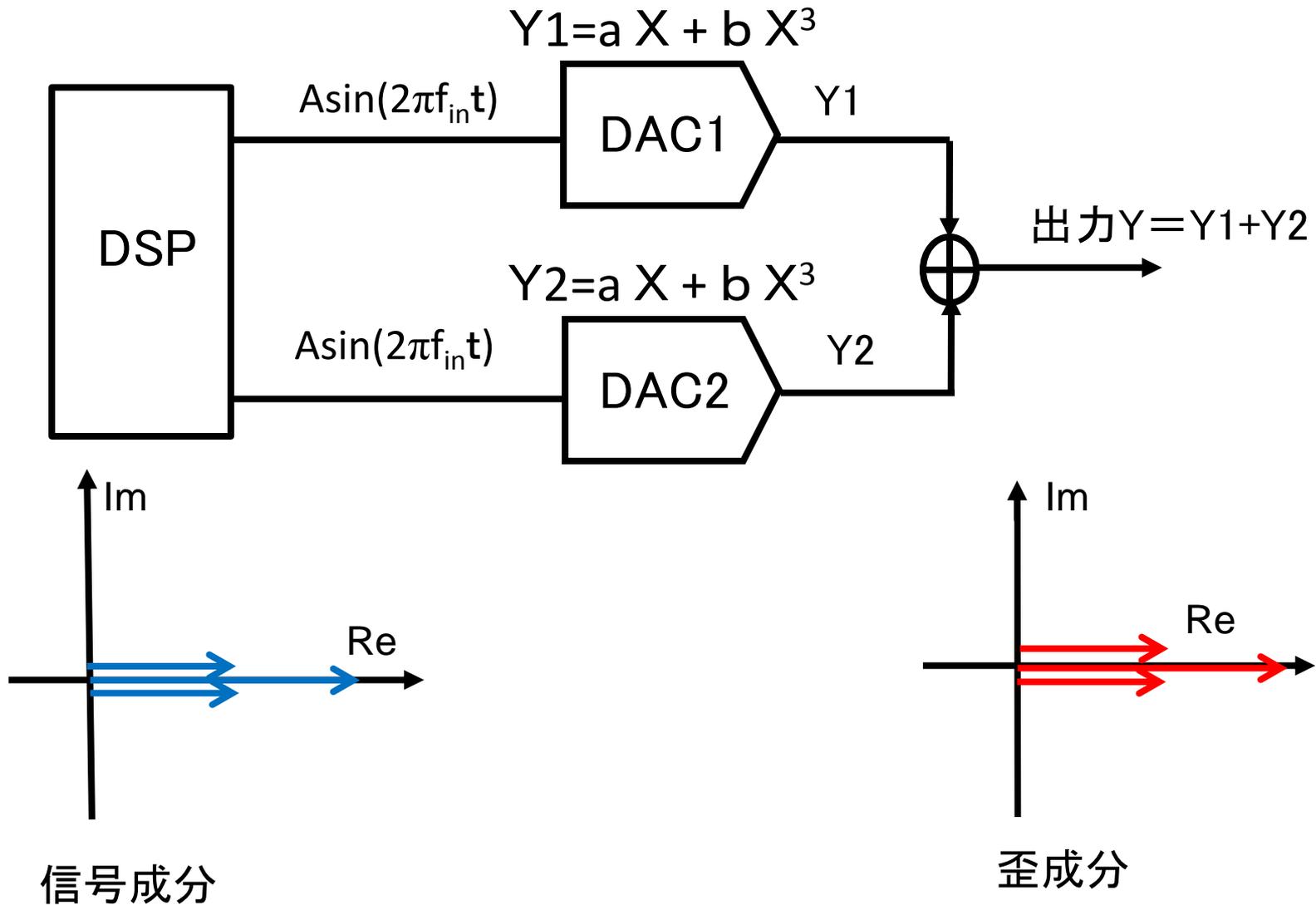


DAC出力信号 $Y_1 \cdot Y_2$ を後段の加算器で合成

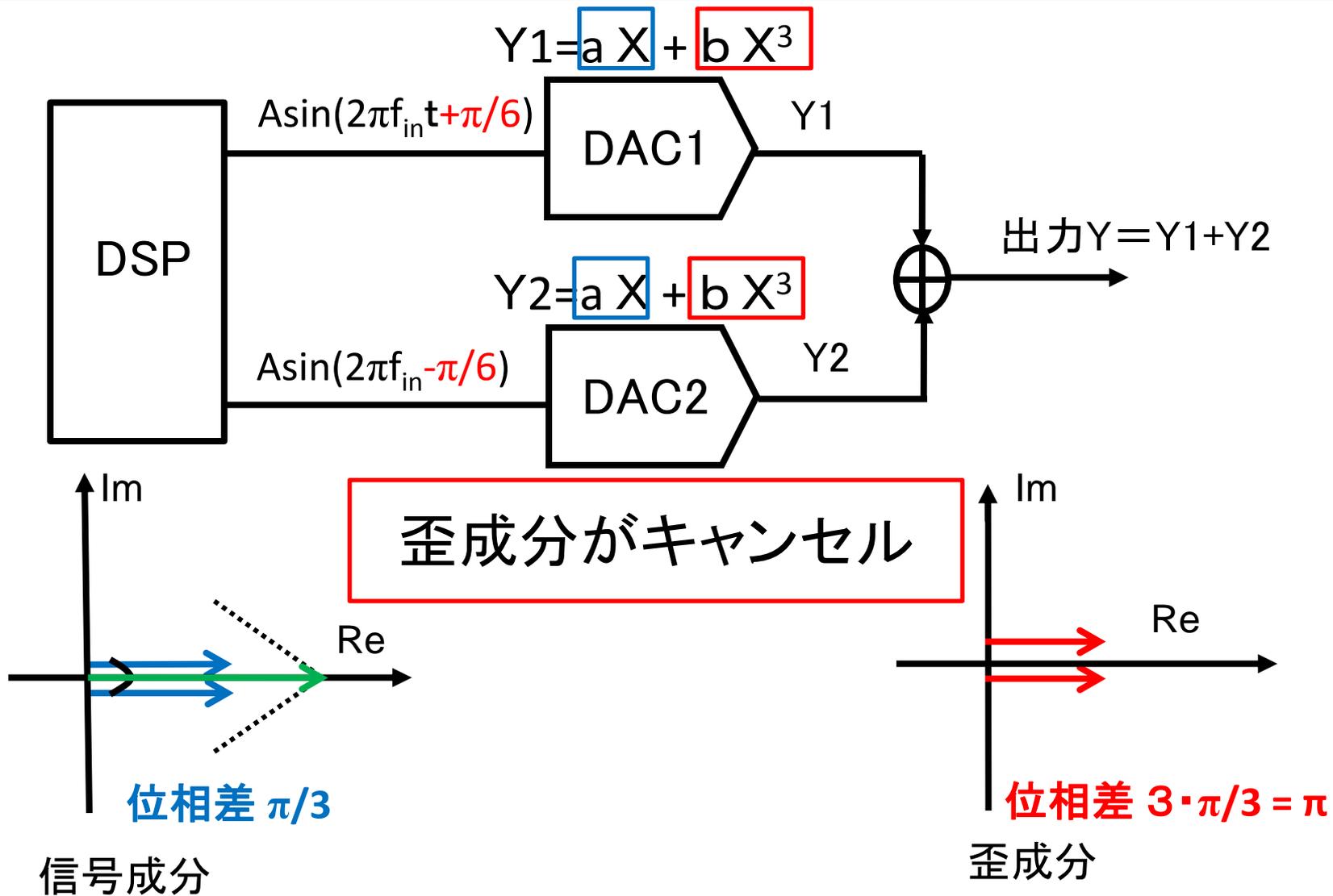


出力信号 Y の歪成分をキャンセル

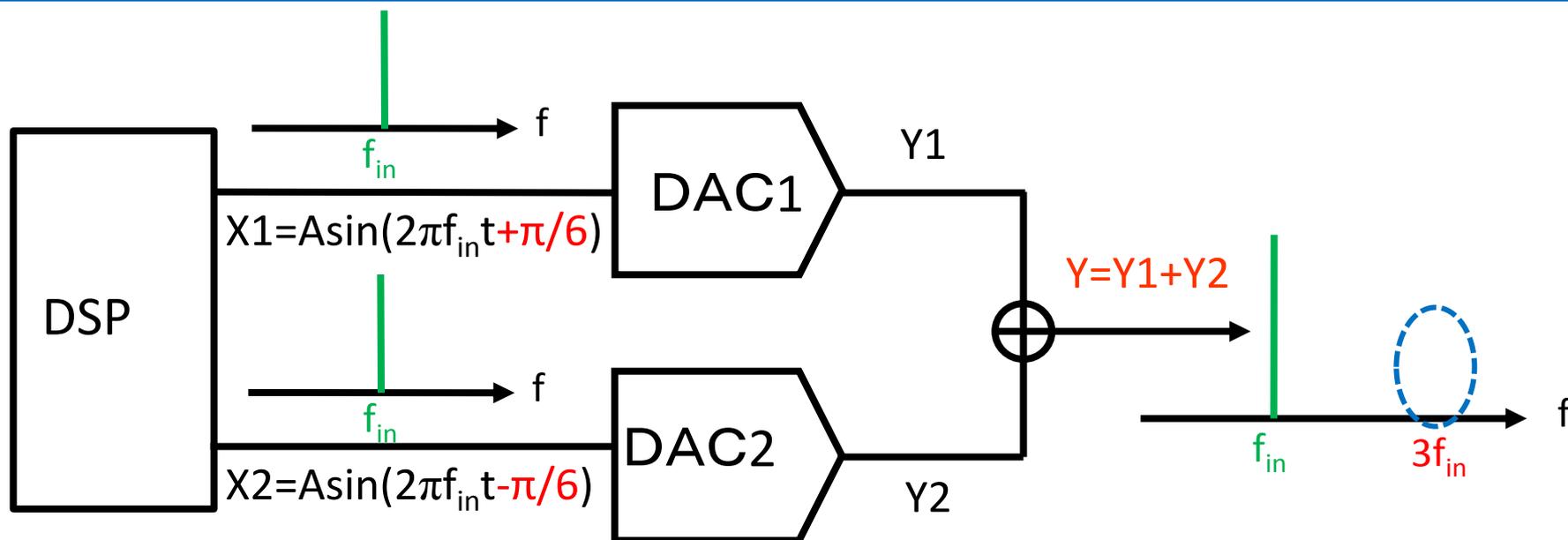
位相差信号合成型の原理



位相差信号合成型の原理



位相差信号合成型(単一正弦波)



Y の基本波 f_{in} の項

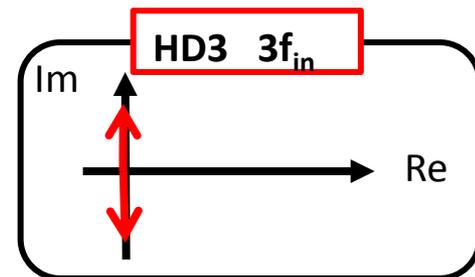
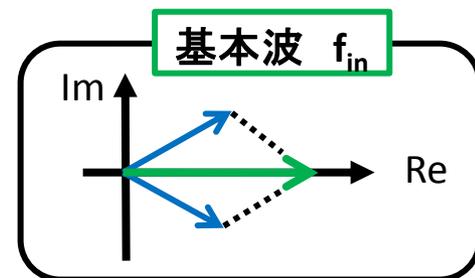
$$\sin(2\pi f_{in} t + \pi/6) + \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6) = 1.7 \sin(2\pi f_{in} t)$$

⇒ 基本波振幅は1.7倍

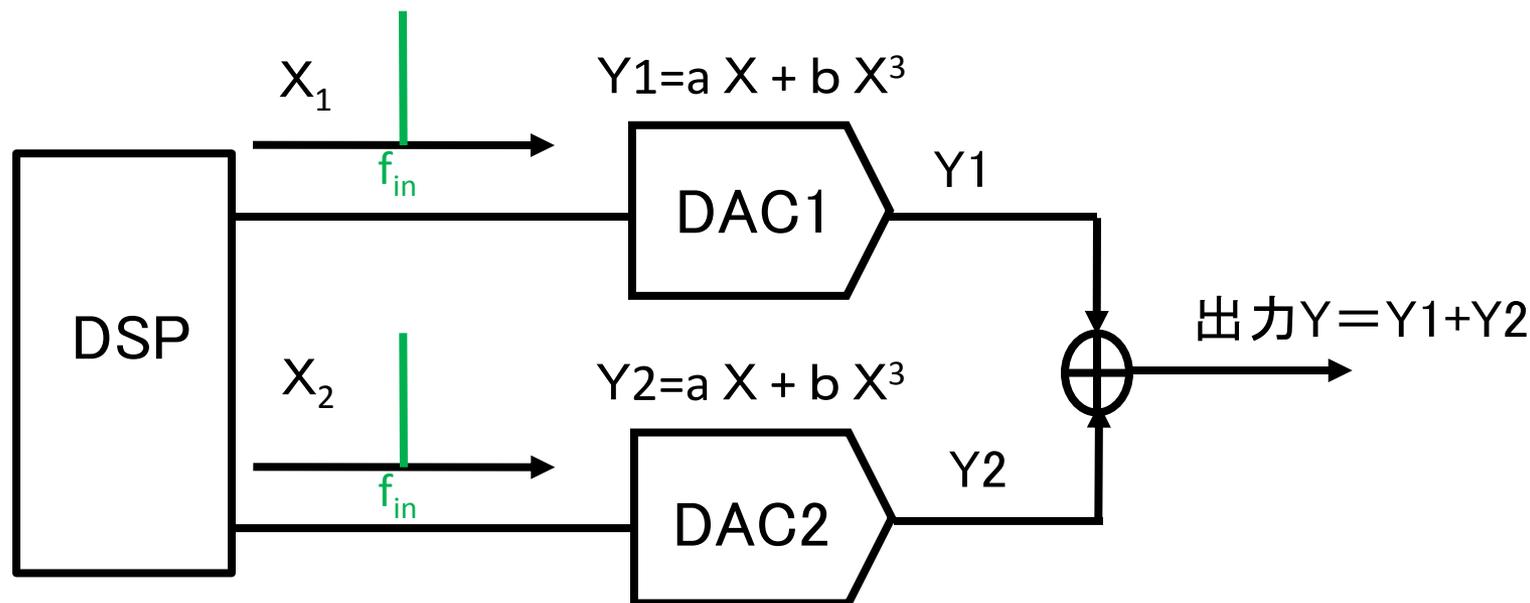
Y の HD3 $3f_{in}$ の項

$$\sin(3 \cdot 2\pi f_{in} t + \pi/2) + \sin(3 \cdot 2\pi f_{in} t - \pi/2) = 0$$

⇒ HD3がキャンセル

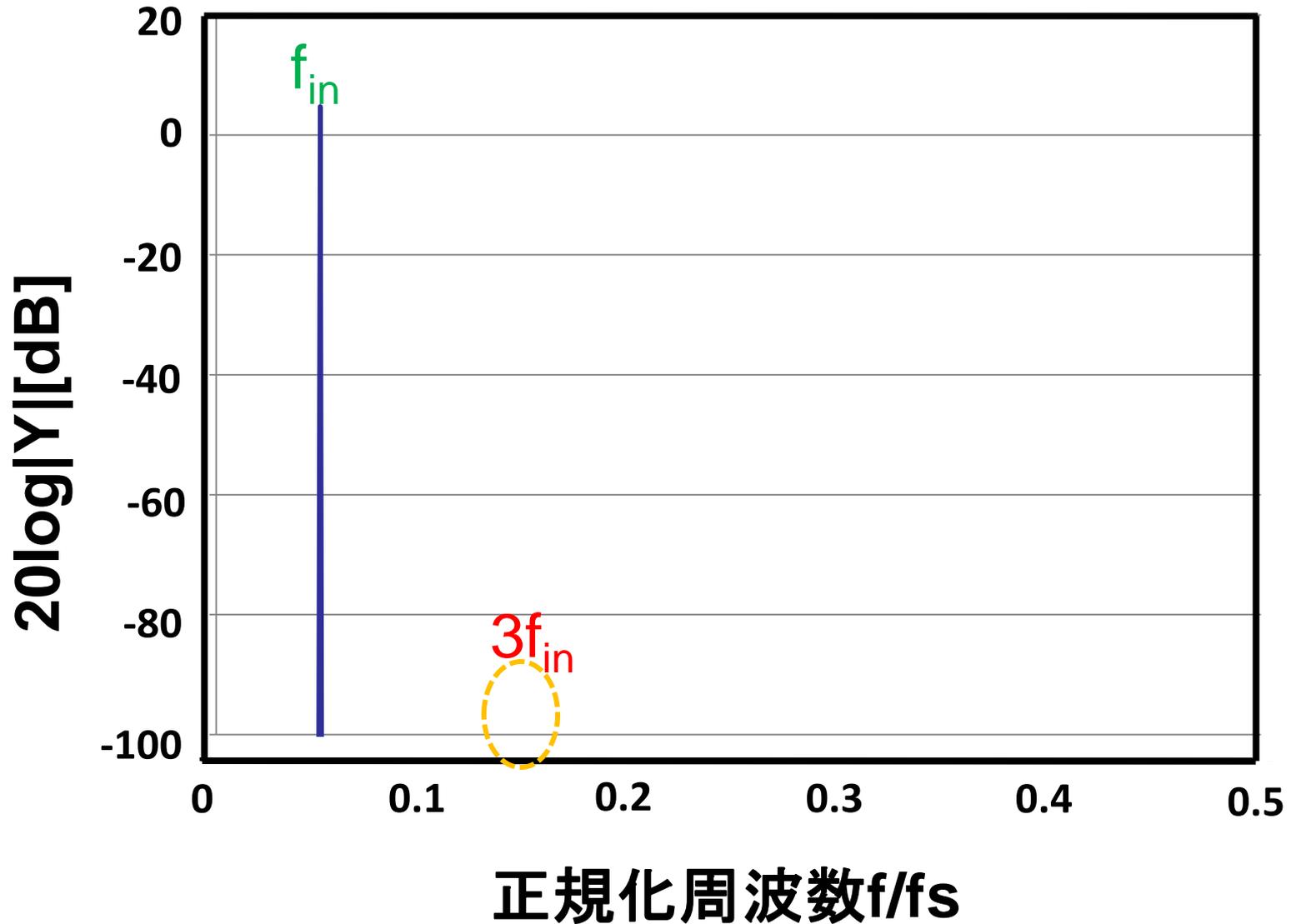


シミュレーション条件(単一正弦波)

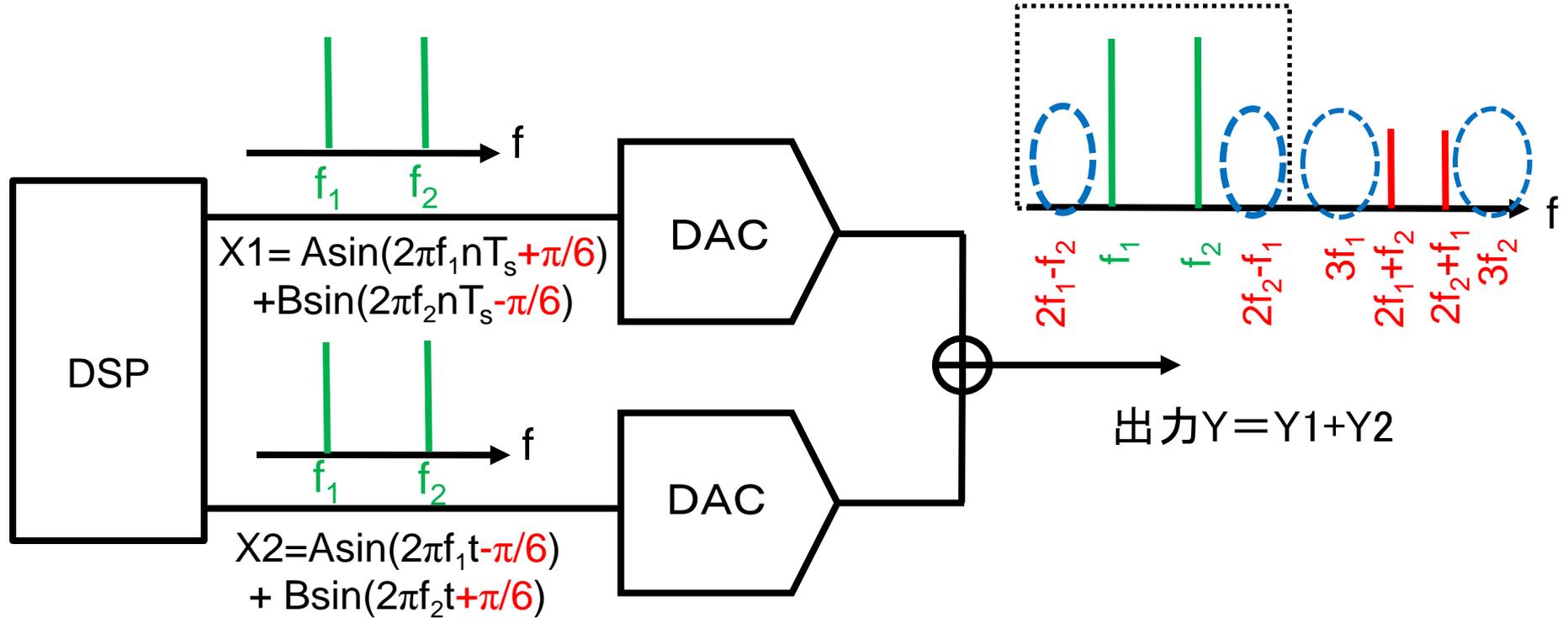


入力信号X1	$\sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$
入力信号X2	$\sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$
1次係数a(DAC)	1
3次係数b(DAC)	-0.005
入力周波数 f_{in}	51
サンプリング周波数 f_s	1024

出力Yのパワースペクトル(単一正弦波) 33



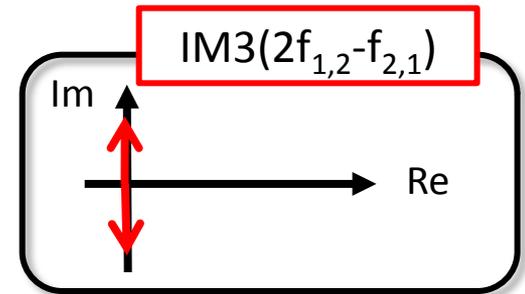
位相差信号合成型(2トーン信号)



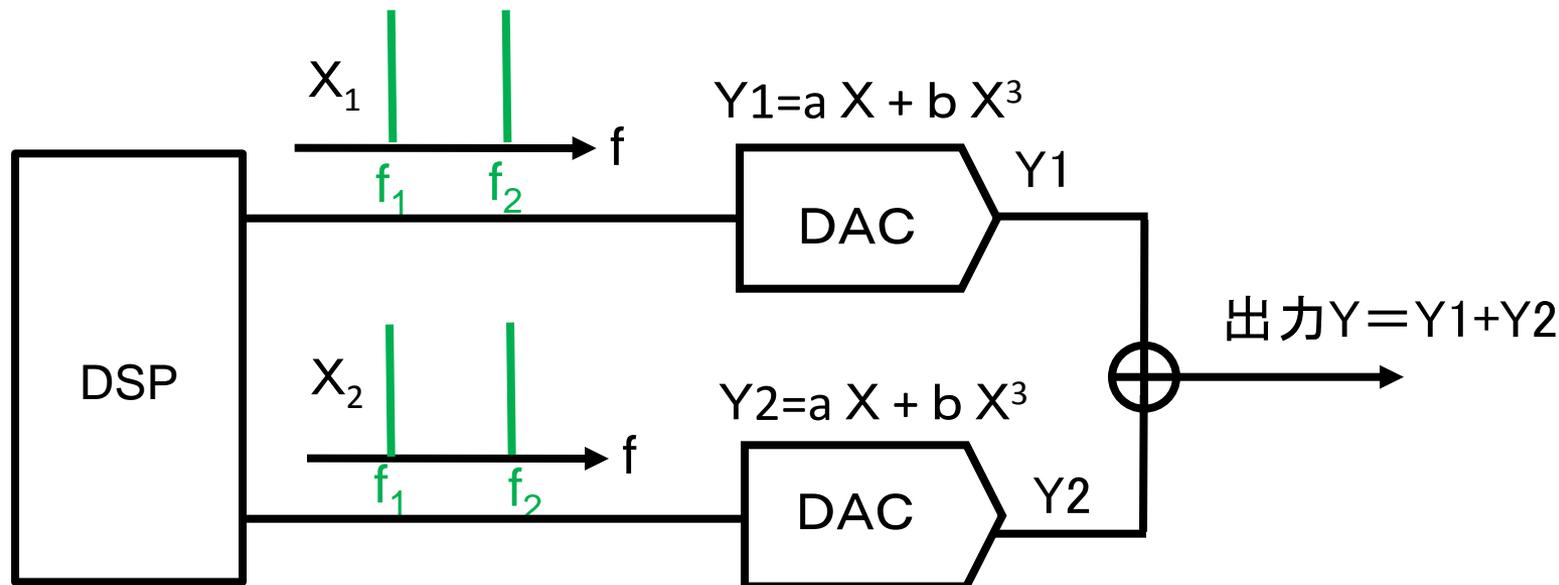
Y の IM3($2f_{1,2} - f_{2,1}$) の項

$$\sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1})t + \pi/2\} + \sin\{2\pi(2f_{1,2} - f_{2,1})t - \pi/2\} = 0$$

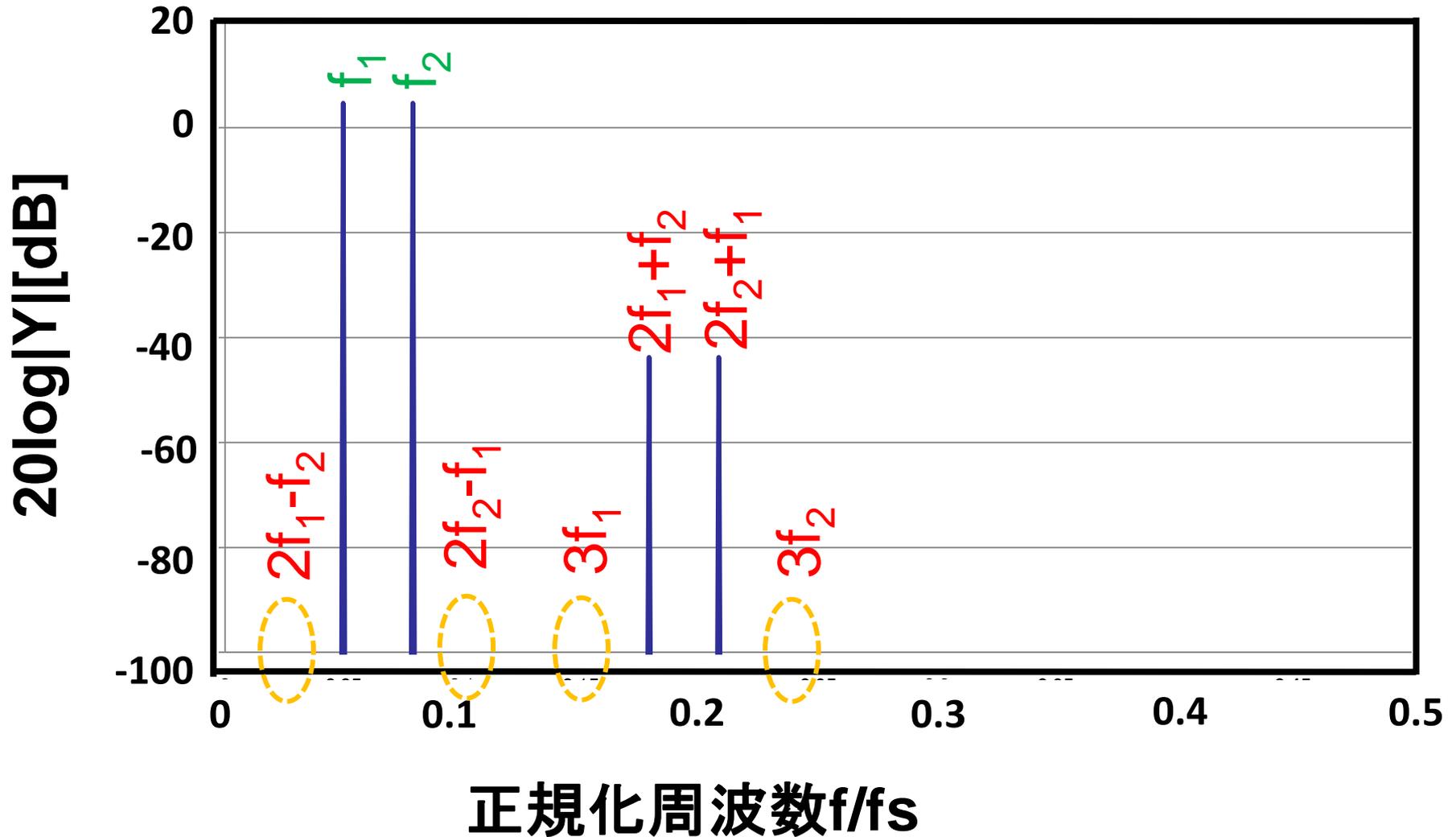
⇒ IM3($2f_{1,2} - f_{2,1}$) がキャンセル



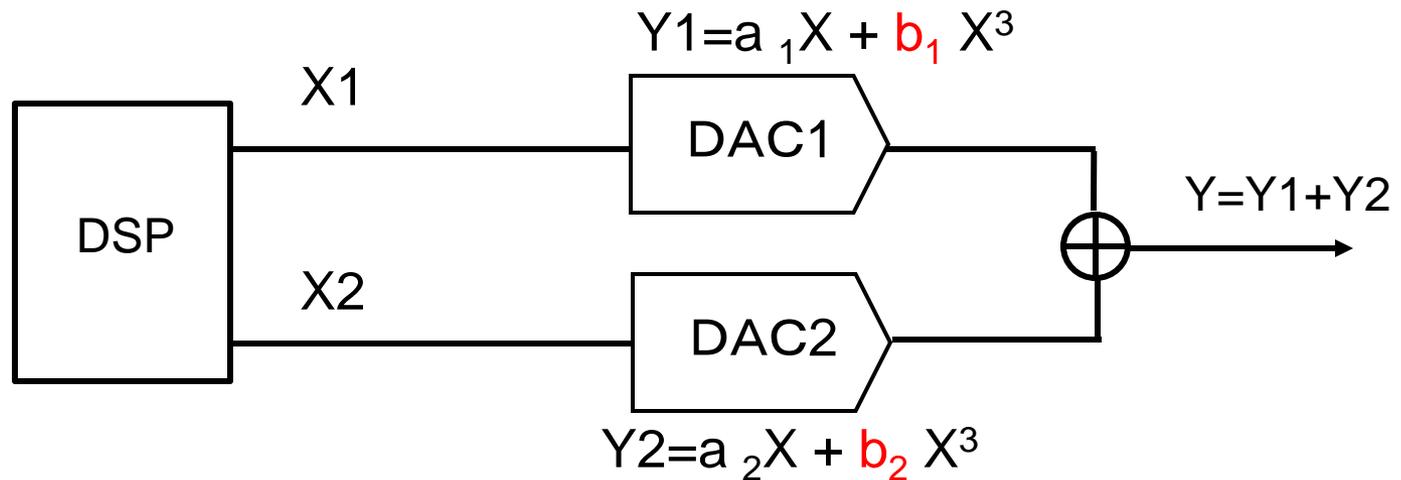
シミュレーション条件(2トーン信号)



入力信号 X_1	$\sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$
入力信号 X_2	$\sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$
1次係数 a (DAC)	1
3次係数 b (DAC)	-0.005
入力周波数 f_1	51
入力周波数 f_2	81
サンプリング周波数 f_s	1024



DAC特性にばらつきがある場合



$a_1 \neq a_2, b_1 \neq b_2$ の場合

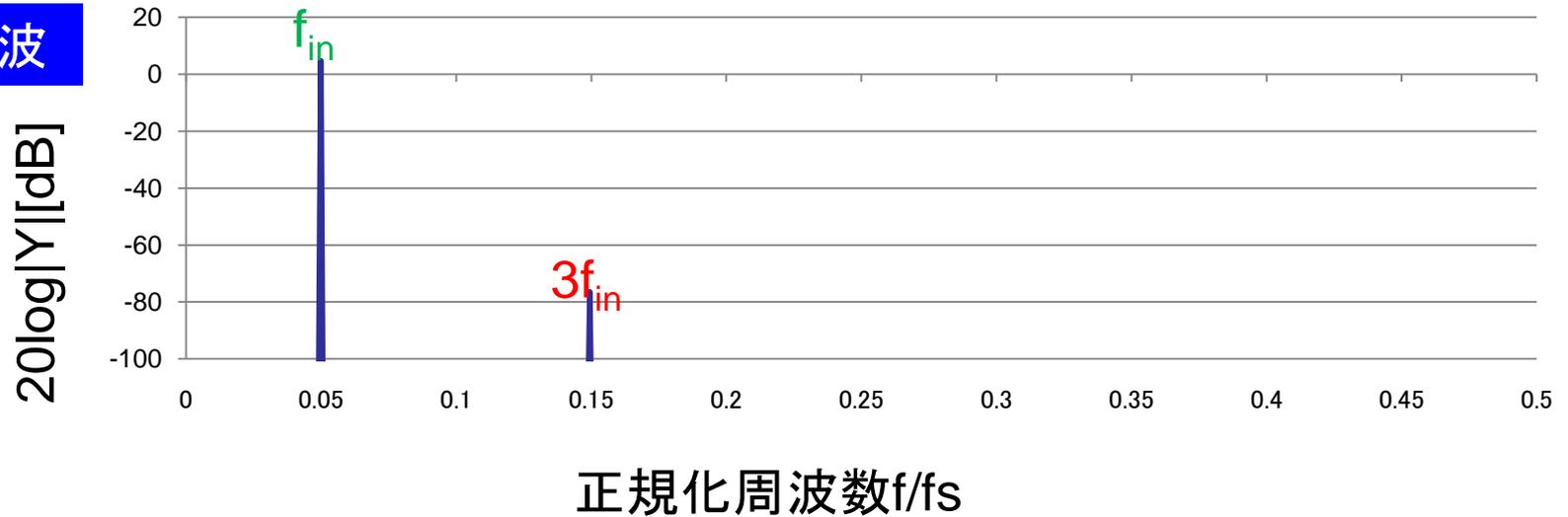


歪成分のキャンセルが不可

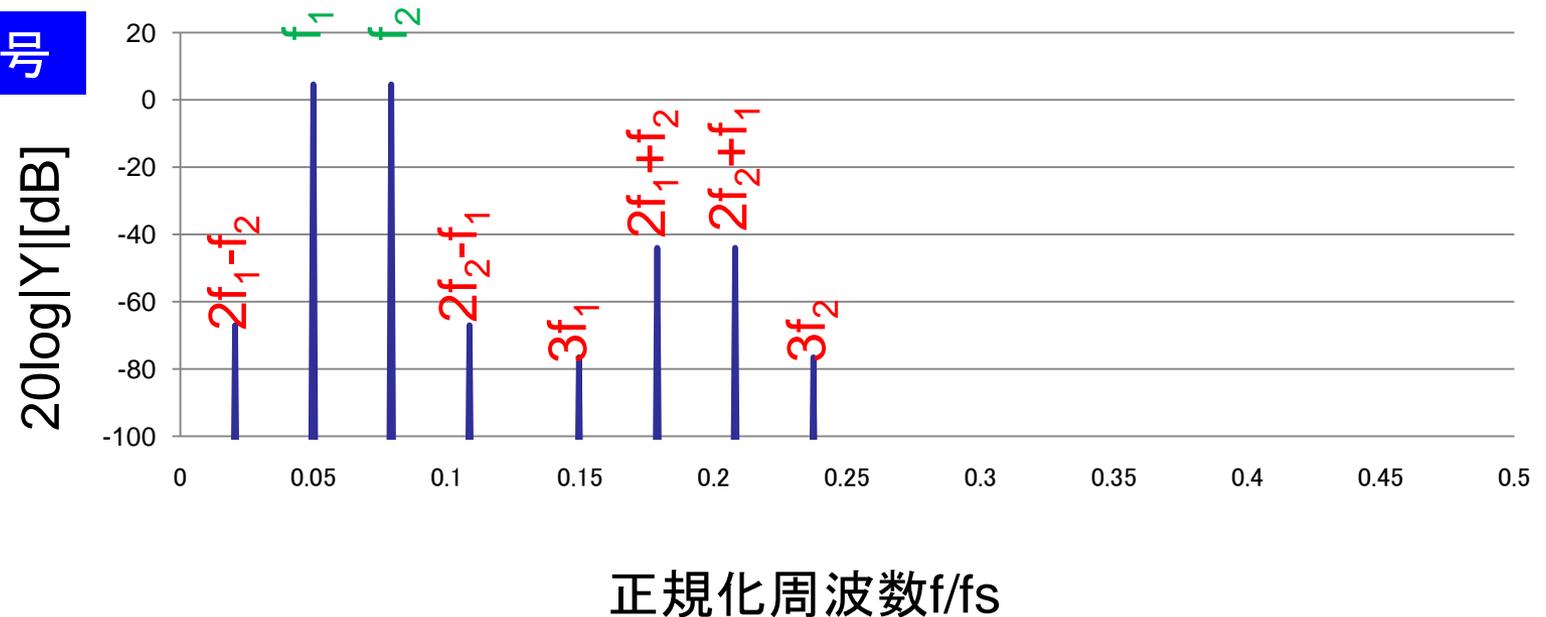
1次係数 a_1 (DAC1)	1.001
3次係数 b_1 (DAC1)	-0.0046
1次係数 a_2 (DAC2)	0.998
3次係数 b_2 (DAC2)	-0.0052

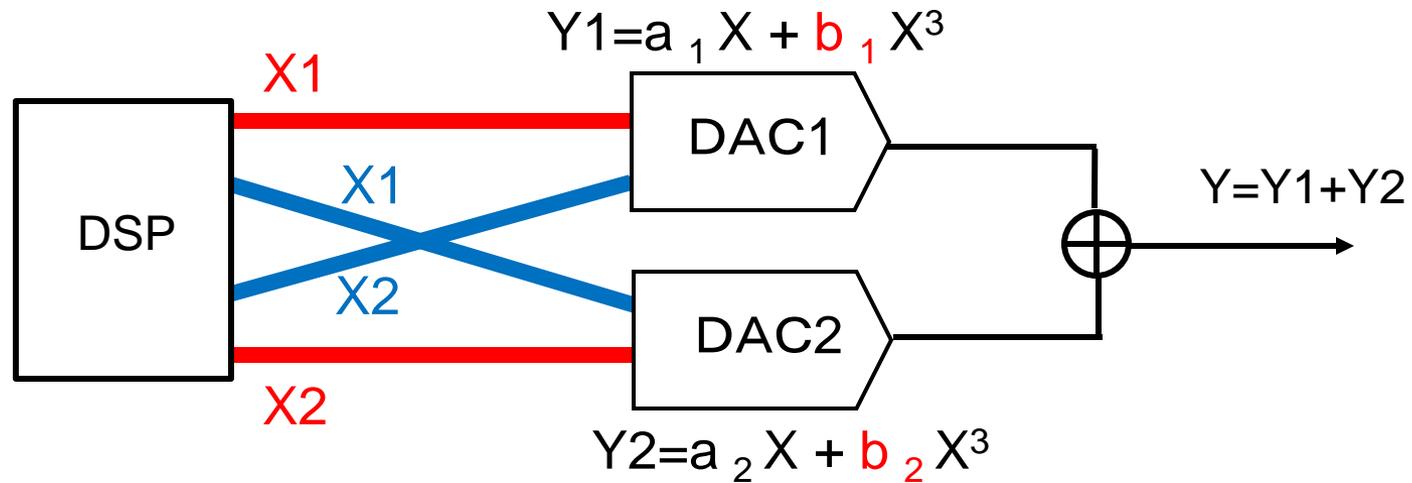
出力Yのパワースペクトル(ばらつきがある場合)

単一正弦波



2トーン信号





■ 1クロック毎に信号の経路を変更

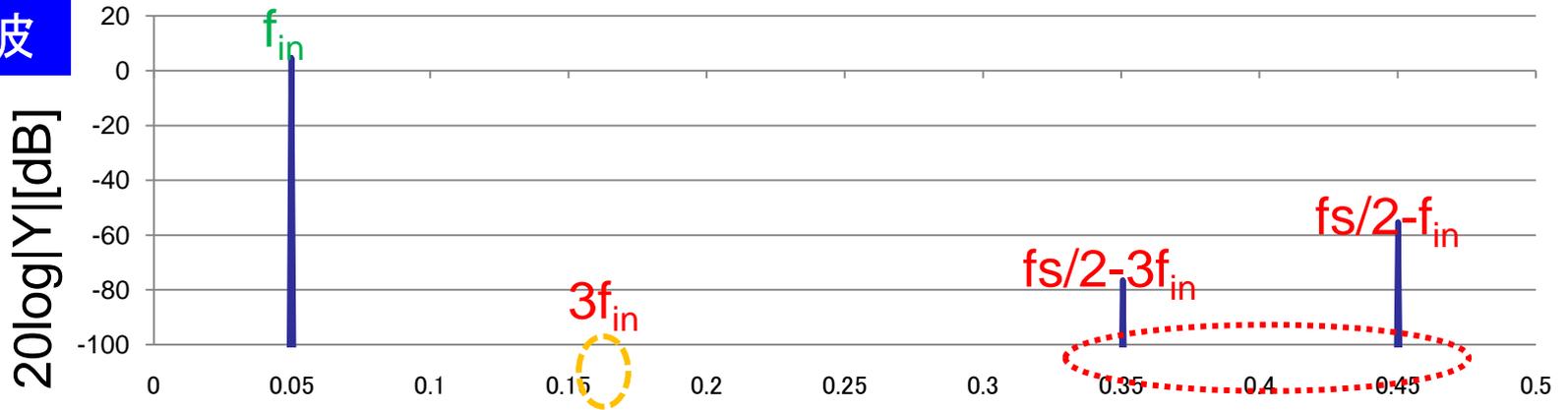
(DAC特性のばらつきが時間平均化)

■ DAC特性にばらつきがあっても出力 Y の歪成分をキャンセル可能

■ 経路切り替えにより歪が発生

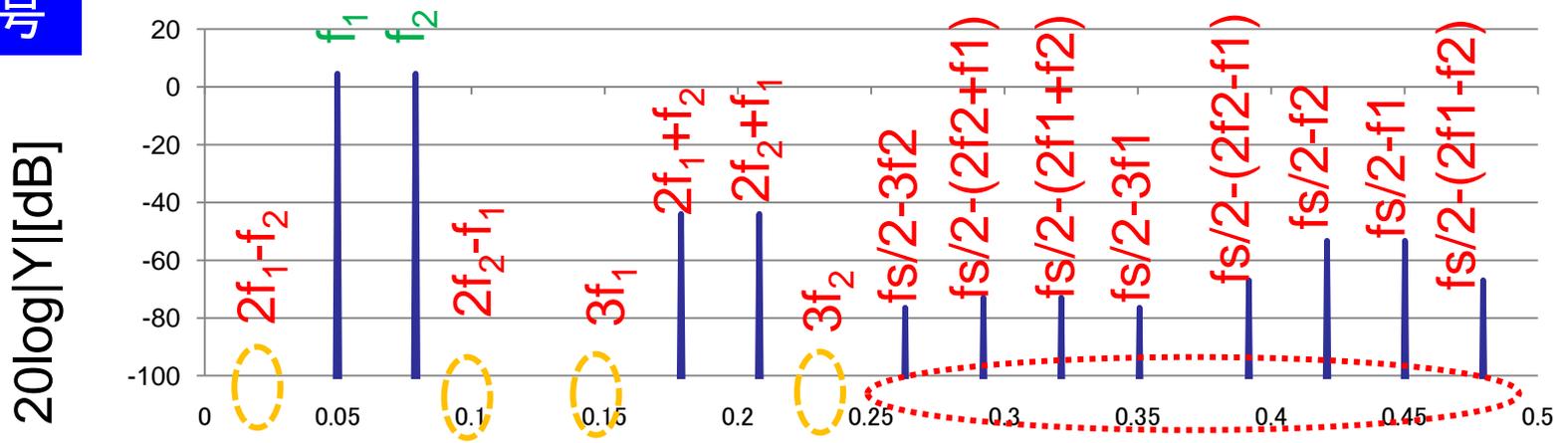
(パワーが小さく信号帯域から十分離れているので除去可能)

単一正弦波



経路切り替えにより発生した歪(パワー小)

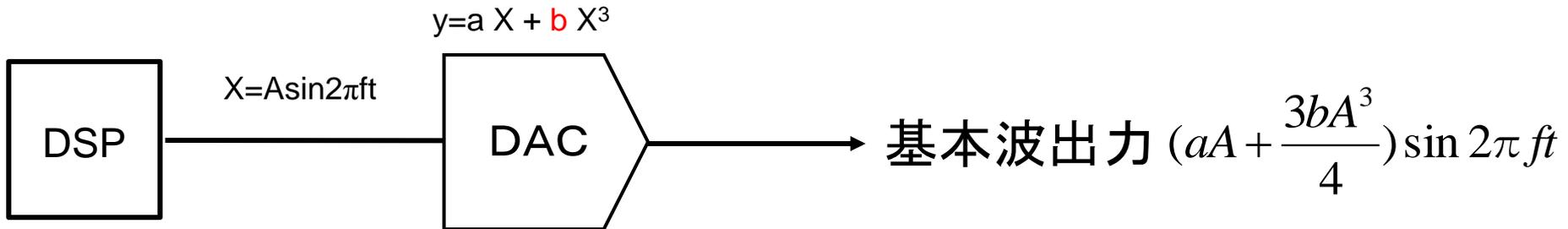
2トーン信号



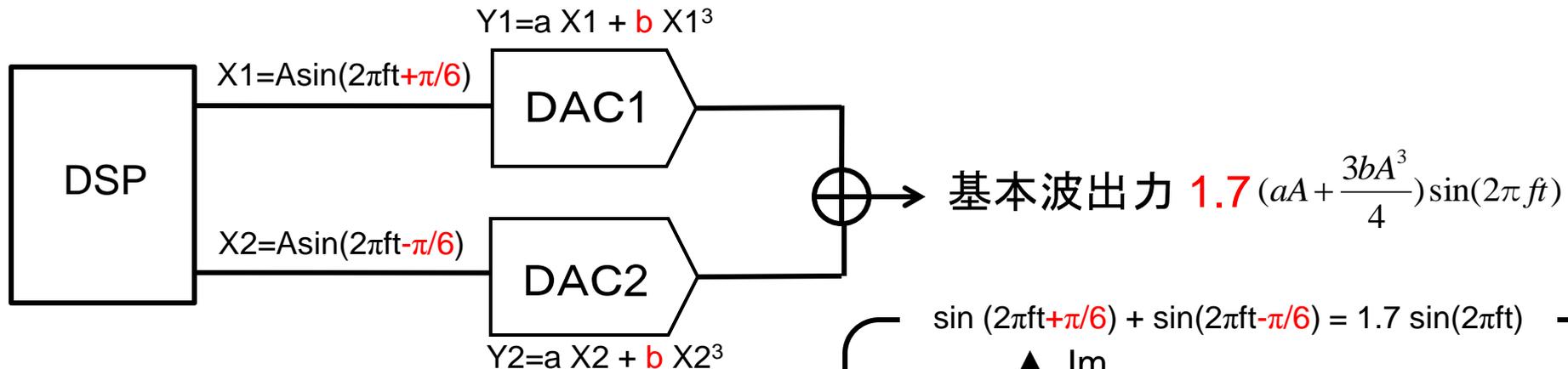
経路切り替えにより発生した歪(パワー小)

DACを2つ使用する影響① 消費電力

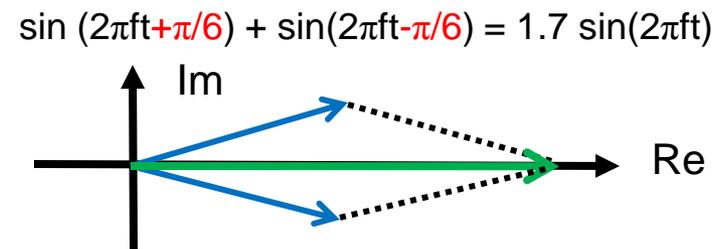
DAC一つの場合



DAC二つの場合

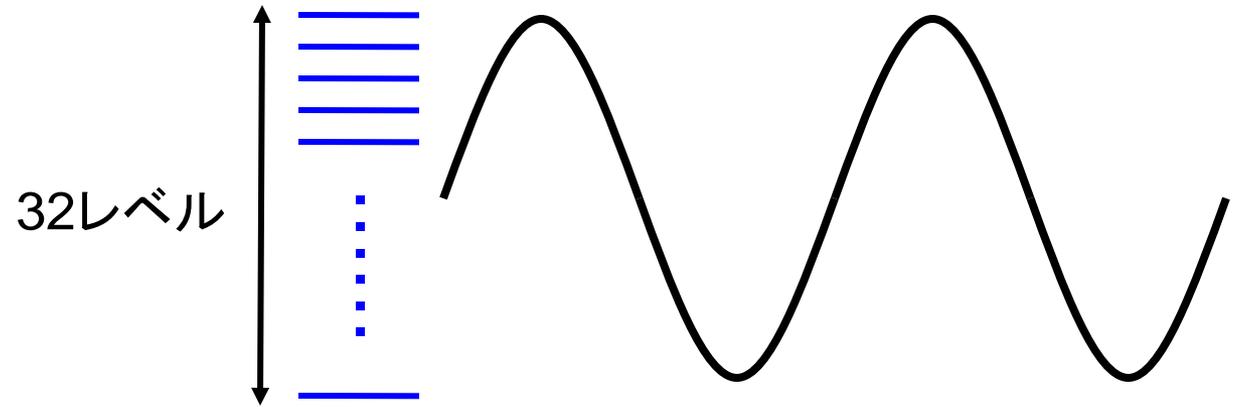


消費電力は2/1.7倍程度

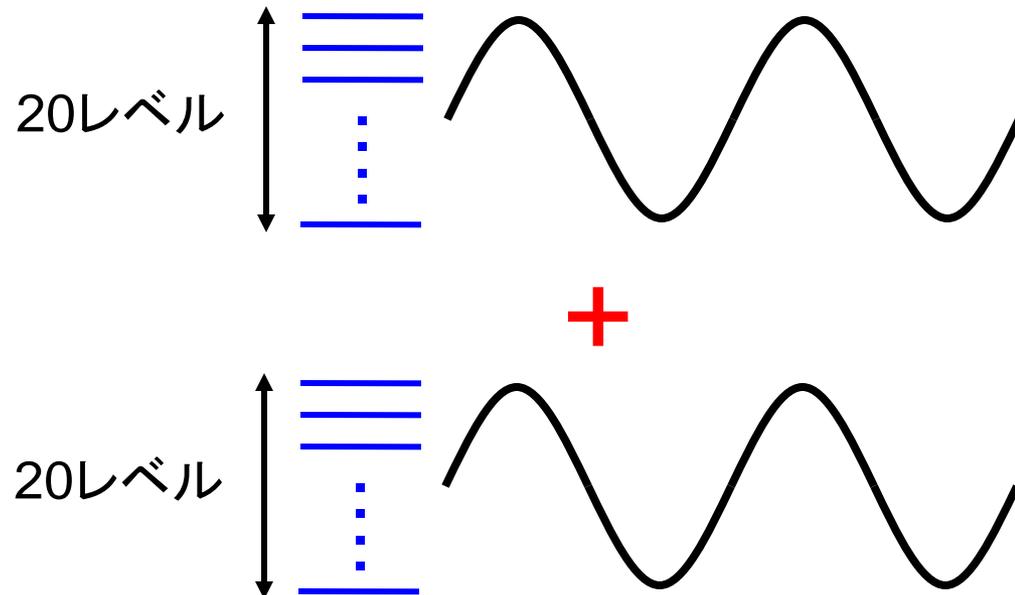


DACを2つ使用する影響② 分解能

DAC一つの場合

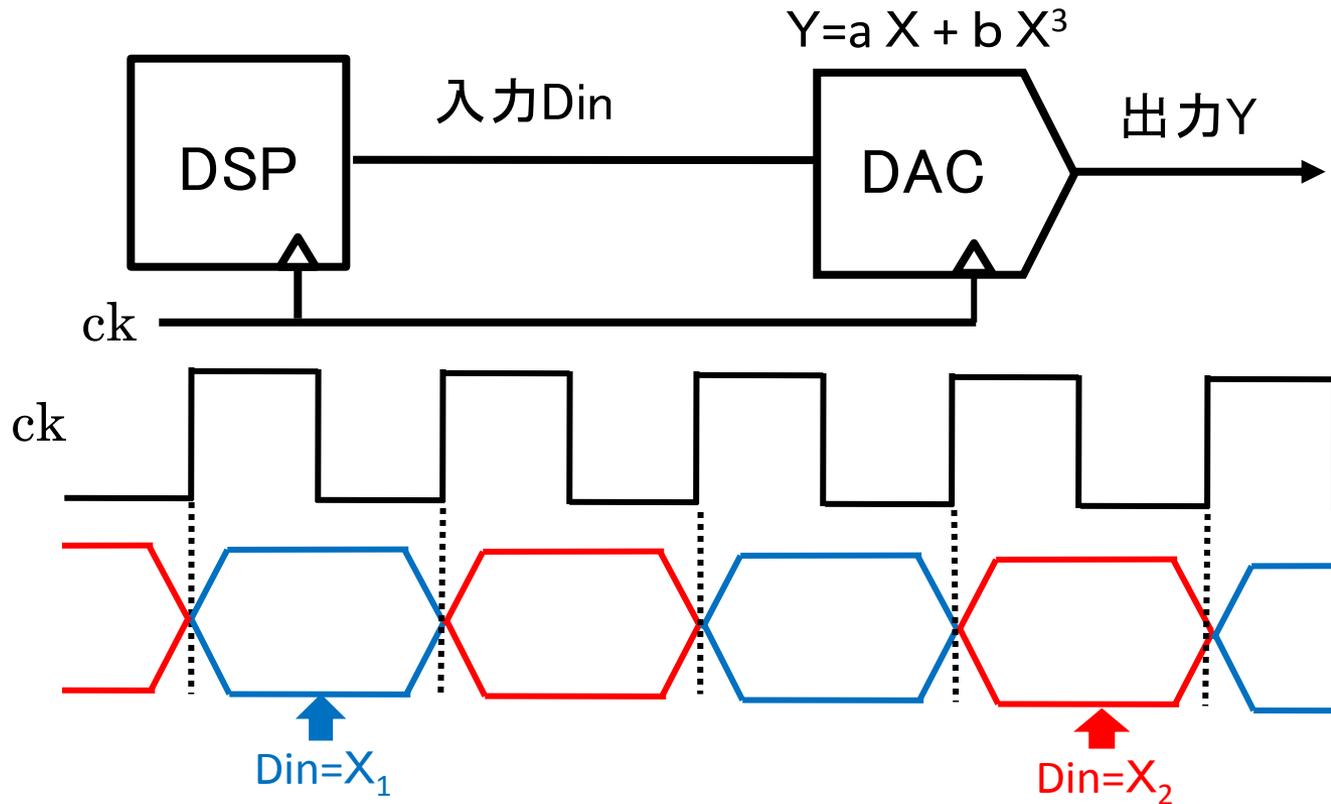


DAC二つの場合



- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- **提案手法**
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

位相差切り替え型

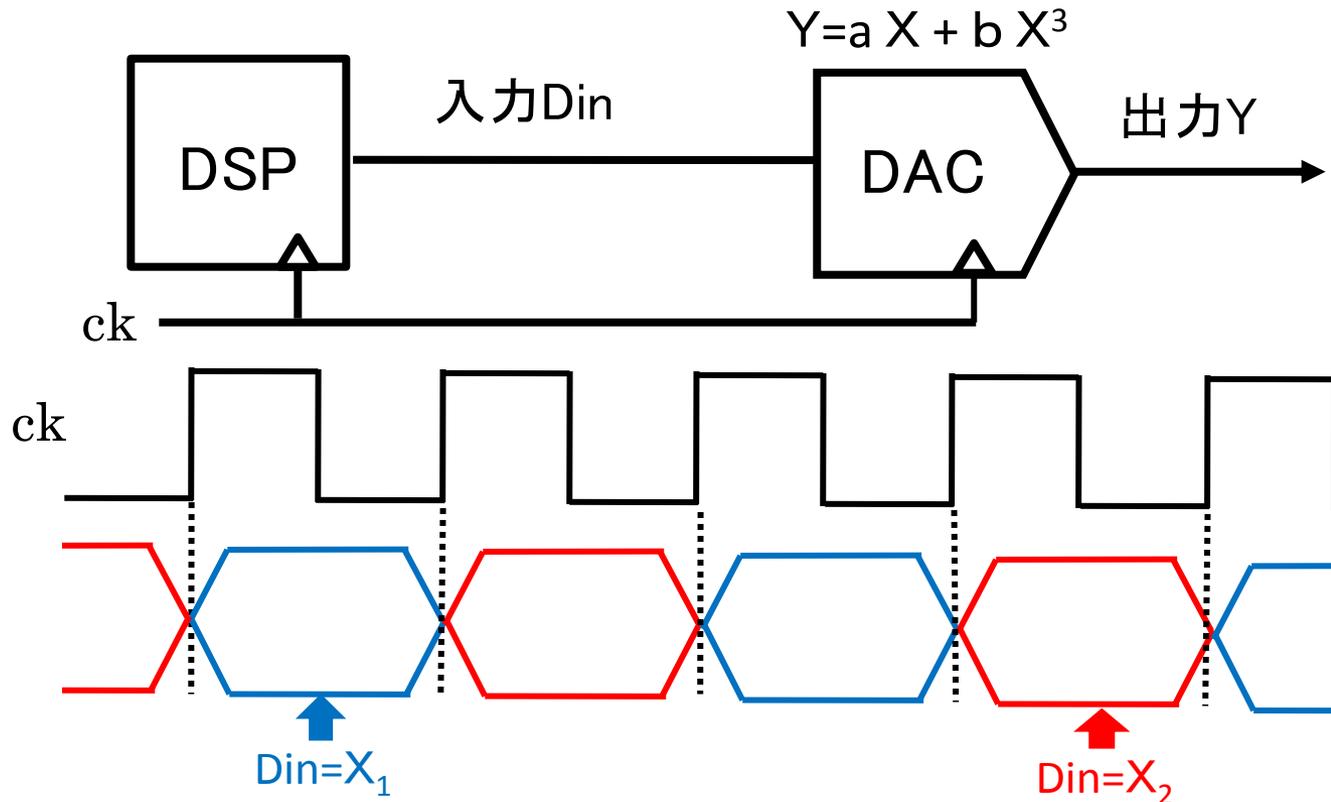


位相の異なる信号 X_1 、 X_2 を1クロック毎に切り替えることで信号 D_{in} を生成

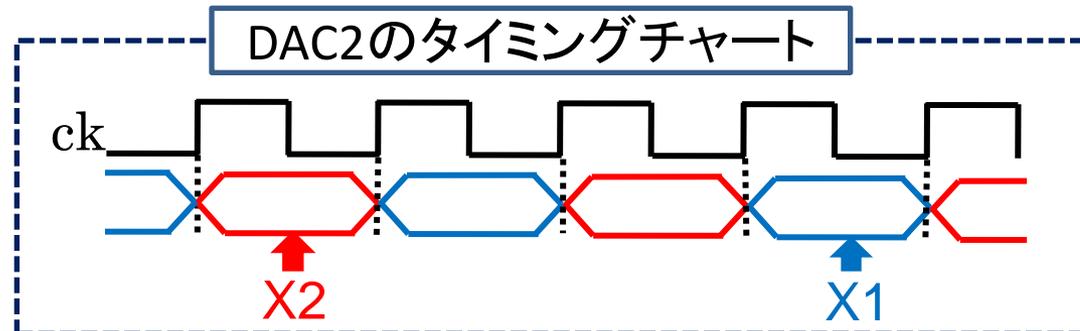
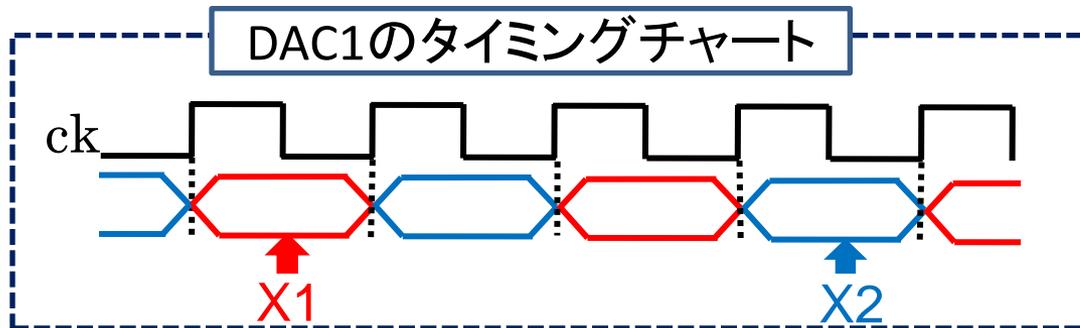
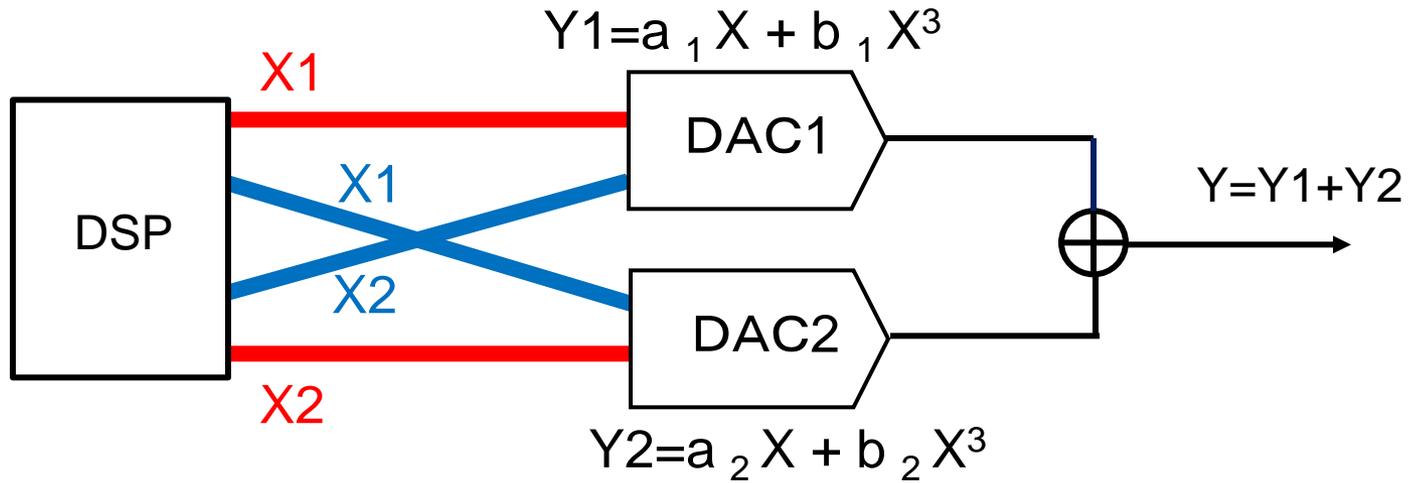
↓
信号 D_{in} をDACへ入力

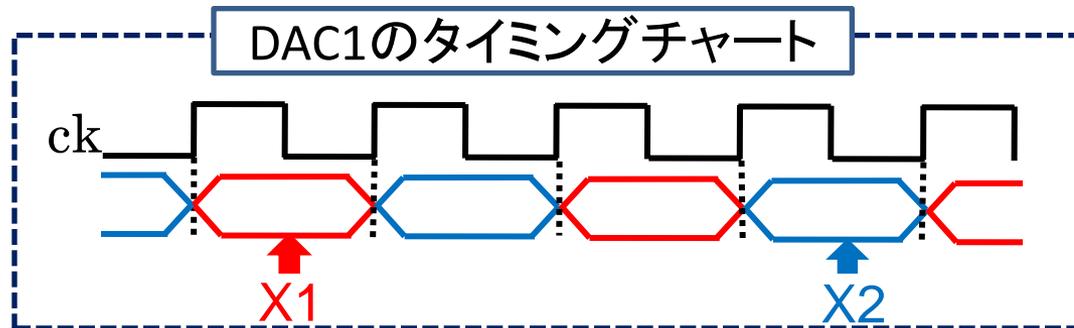
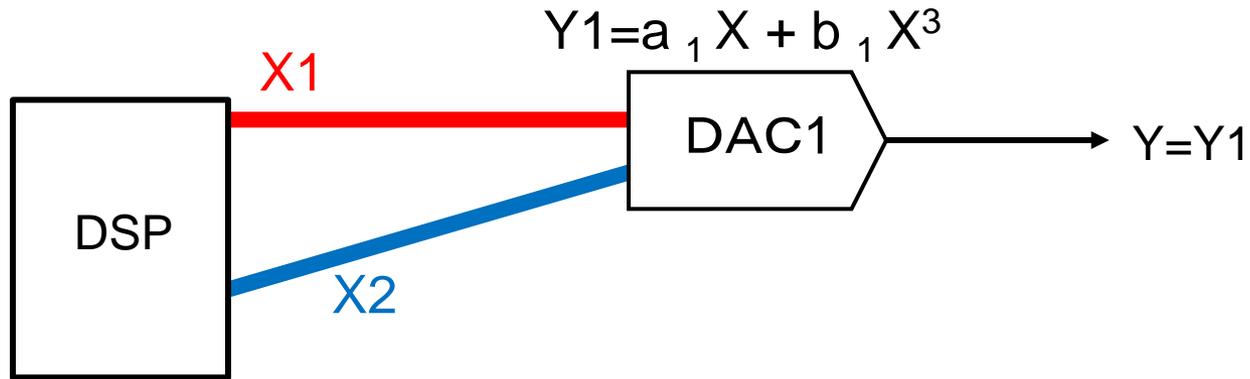
↓
出力 Y の歪成分をキャンセル

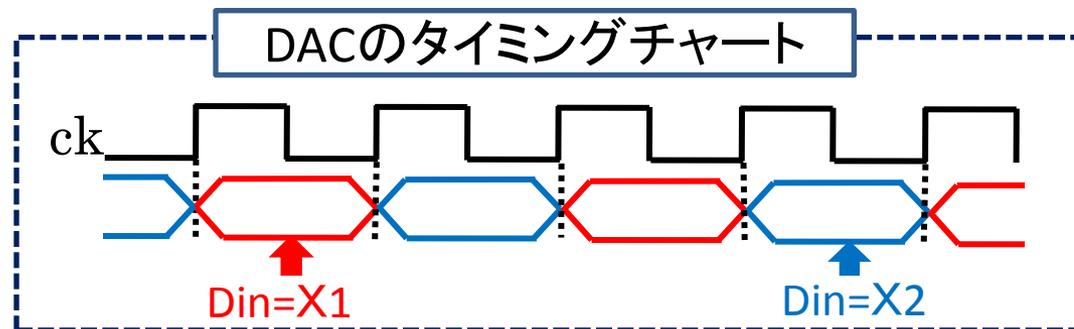
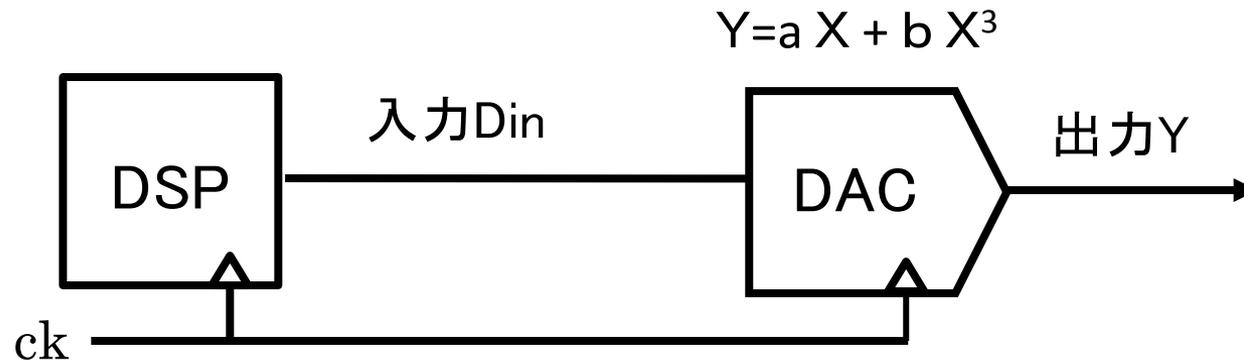
位相差切り替え型



- 従来のAWGと同じ構成で実現可能
- 信号の切り替えで歪が発生
(信号帯域から十分離れているので除去可能)

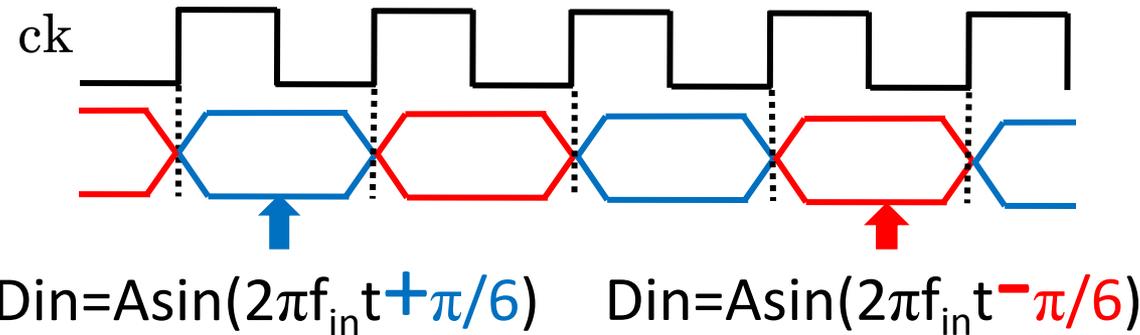
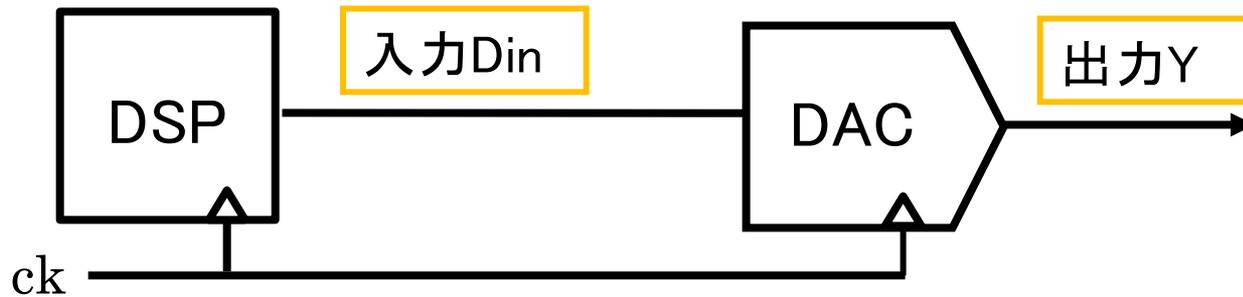




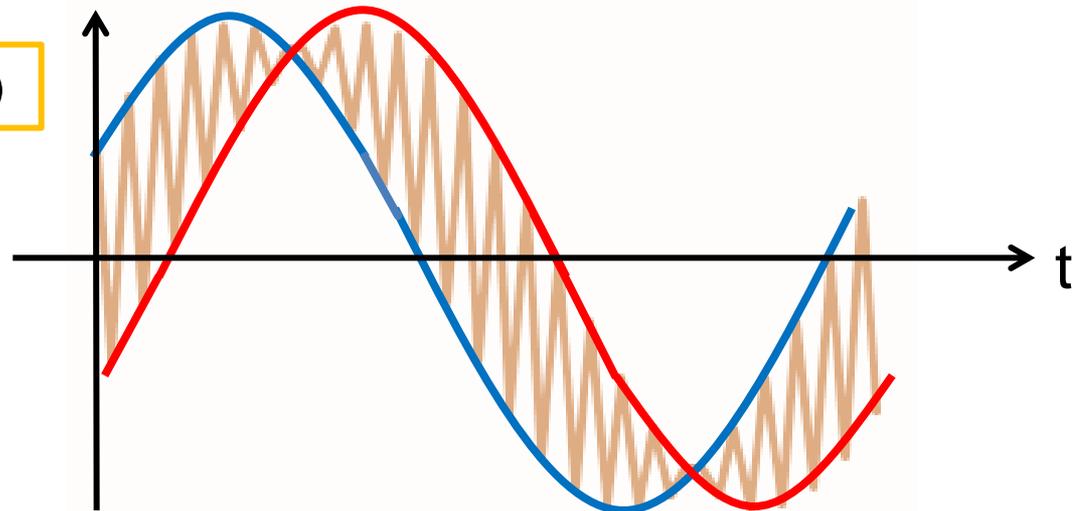


- 位相差切り替え型はダイナミックエレメントマッチング構成からDAC1つと加算器を除いた方式

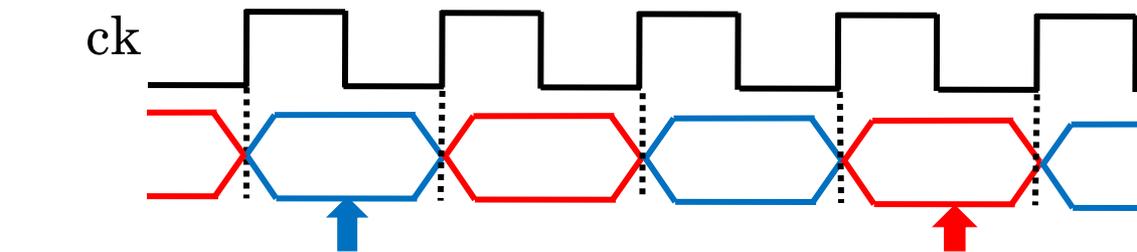
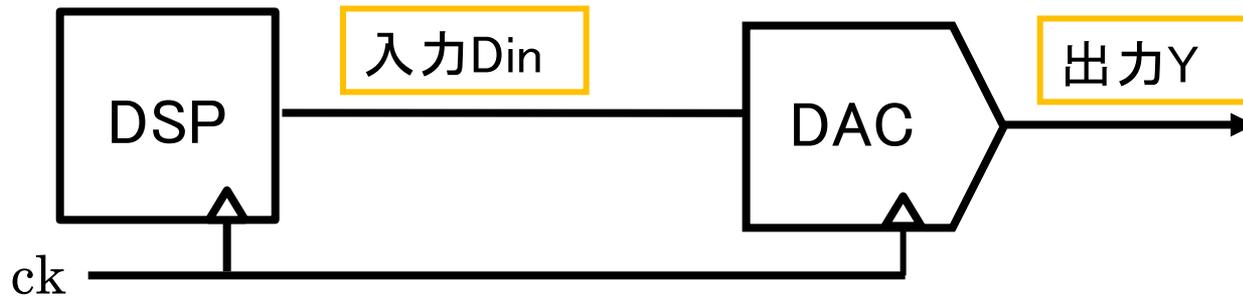
位相差切り替え型の原理



入力Din(波形)



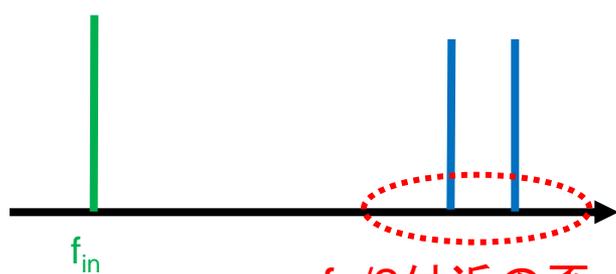
位相差切り替え型の原理



$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$$

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$$

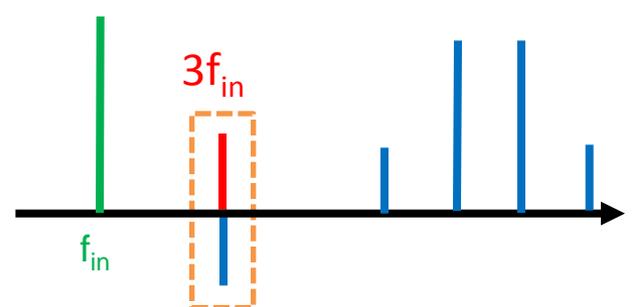
入力Din



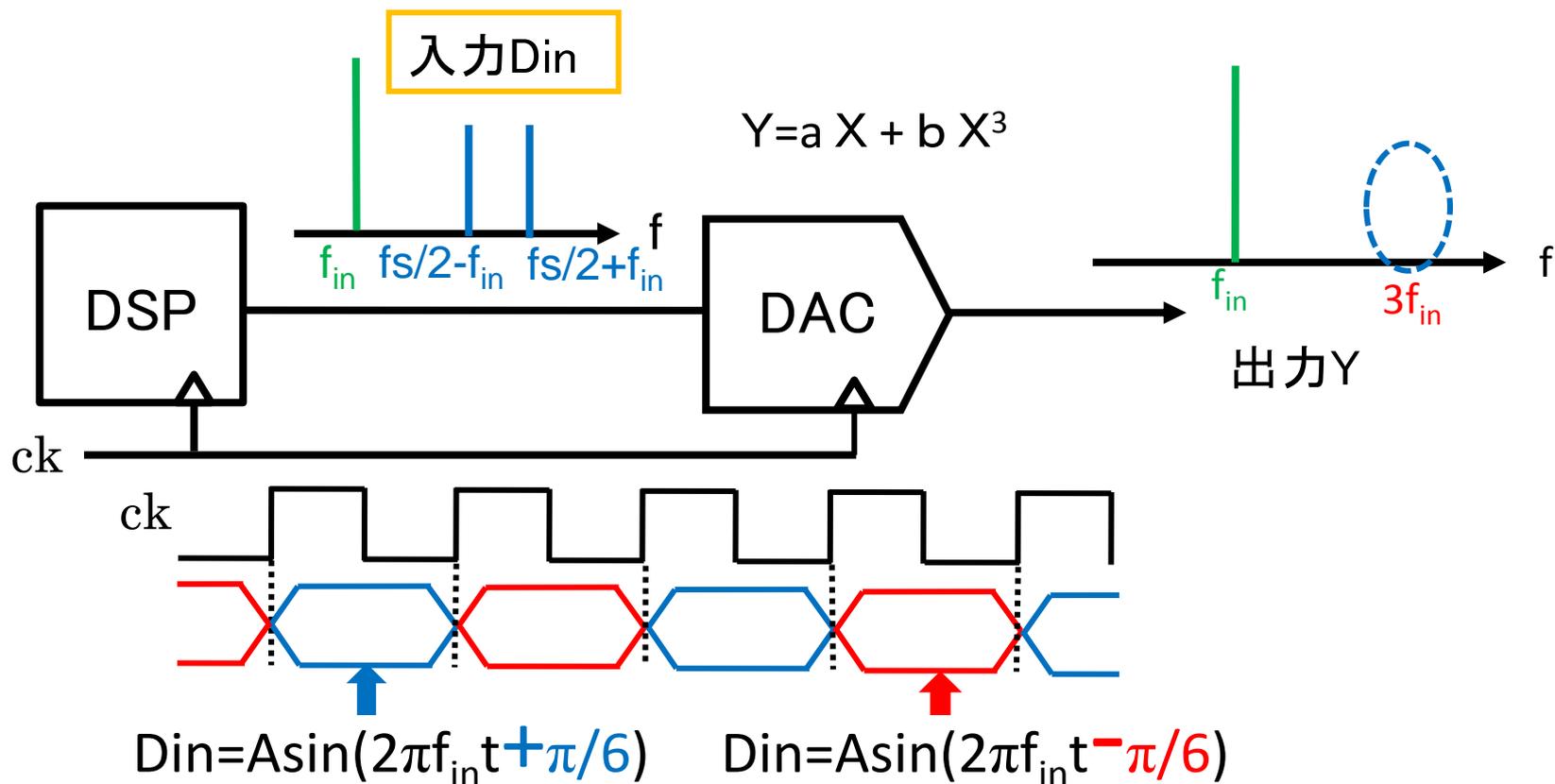
$f_s/2$ 付近の歪
(位相差切り替えにより発生)

DAC

出力Y



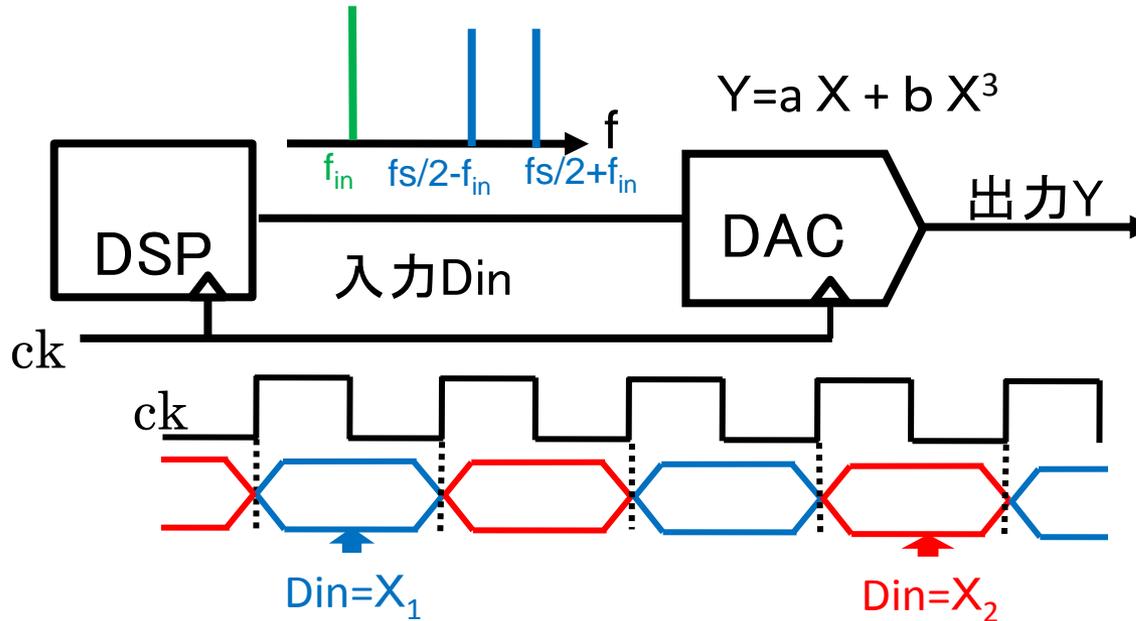
位相差切り替え型(単一正弦波)



$$\begin{aligned} \text{入力 } D_{in} &= A \sin(2\pi f_{in} t \pm \pi/6) \\ &= 0.87A \sin 2\pi f_{in} t + 0.25A \{ \cos 2\pi(1/2fs - f_{in})t + \cos 2\pi(1/2fs + f_{in})t \} \end{aligned}$$

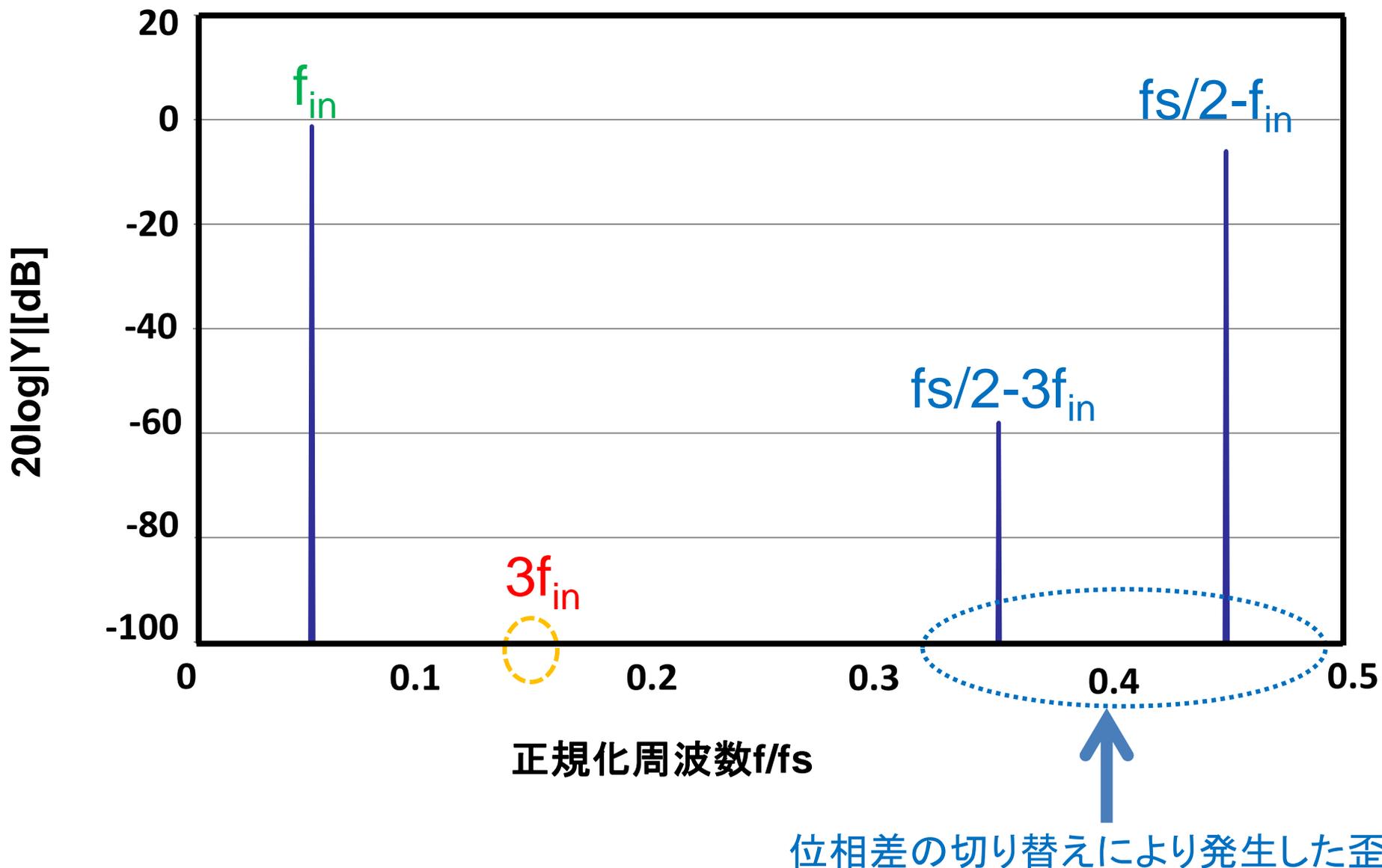
基本波 f_{in} は 1.25dB 減少

シミュレーション条件(単一正弦波)

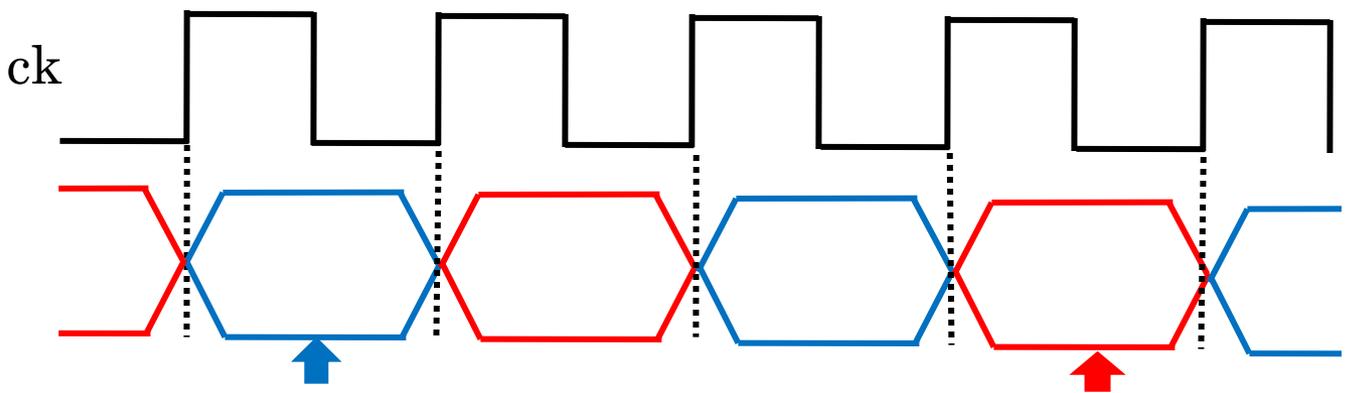
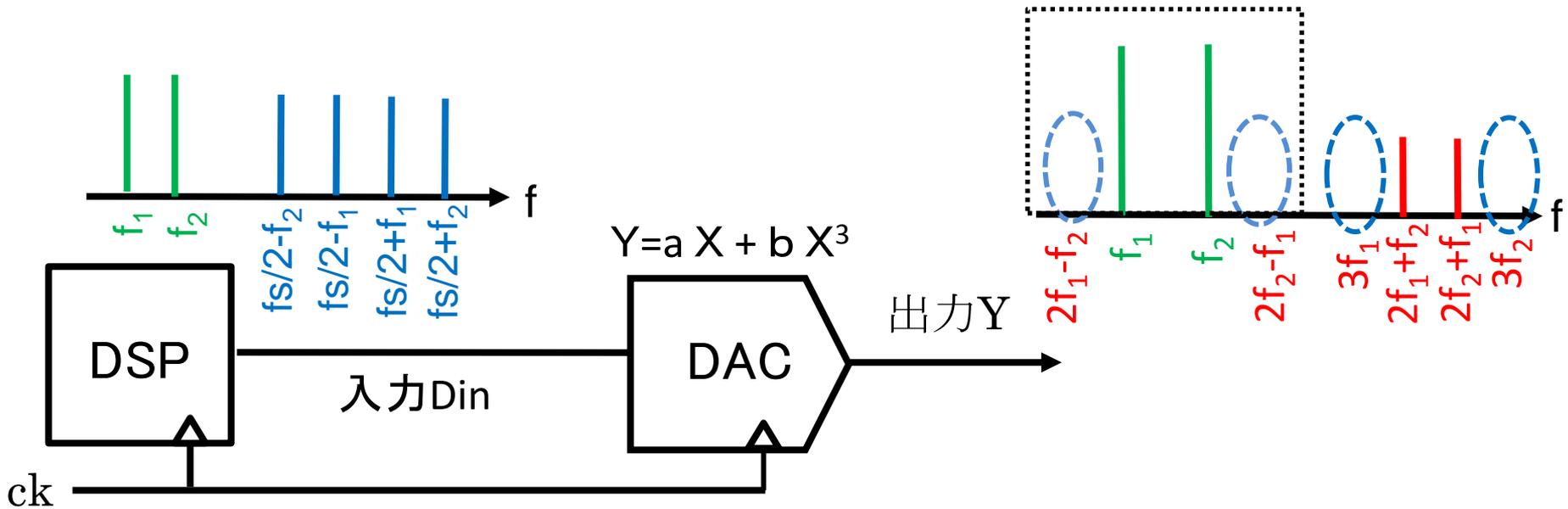


入力信号X1	$\sin(2\pi f_{in} t + \pi/6)$
入力信号X2	$\sin(2\pi f_{in} t - \pi/6)$
1次係数a(DAC)	1
3次係数b(DAC)	-0.005
入力周波数 f_{in}	51
サンプリング周波数 f_s	1024

出力Yのパワースペクトル(単一正弦波)



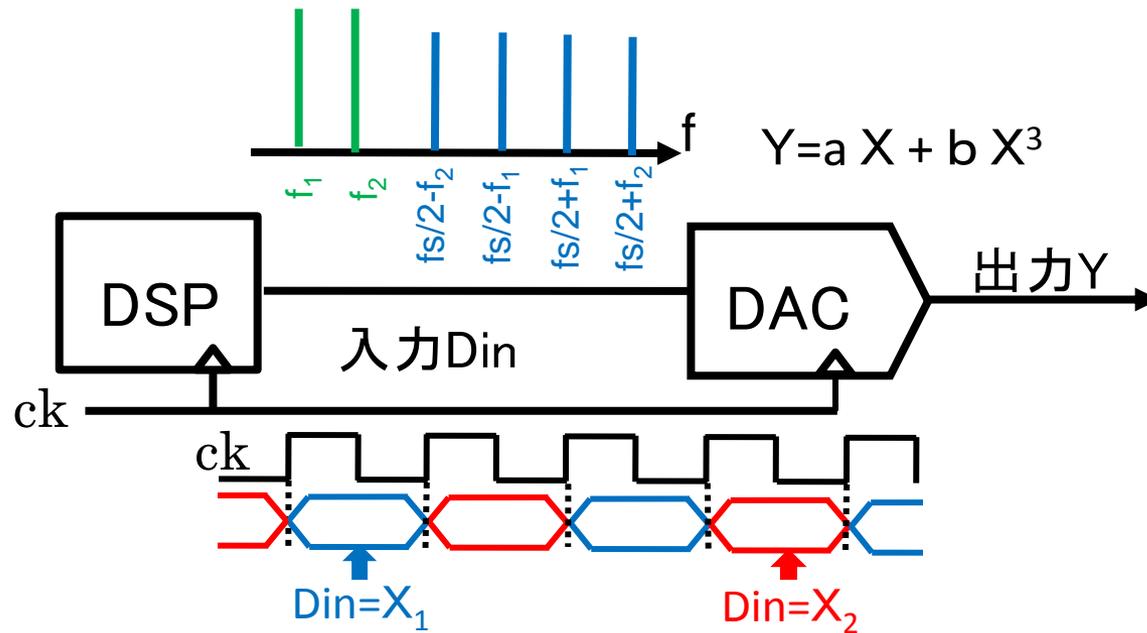
位相差切り替え型(2トーン信号)



$$Din = A \sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$$

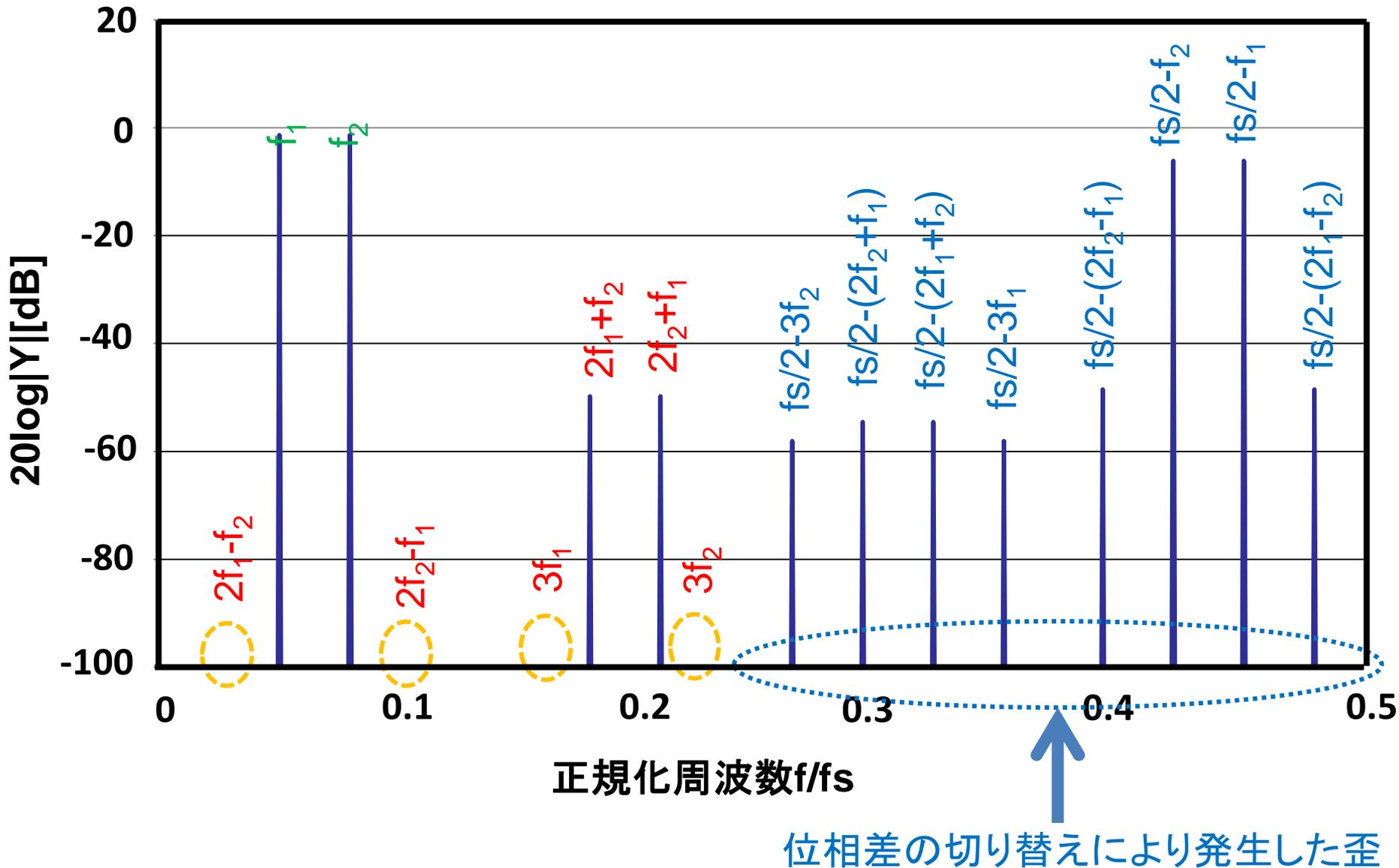
$$Din = A \sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$$

シミュレーション条件(2トーン信号)



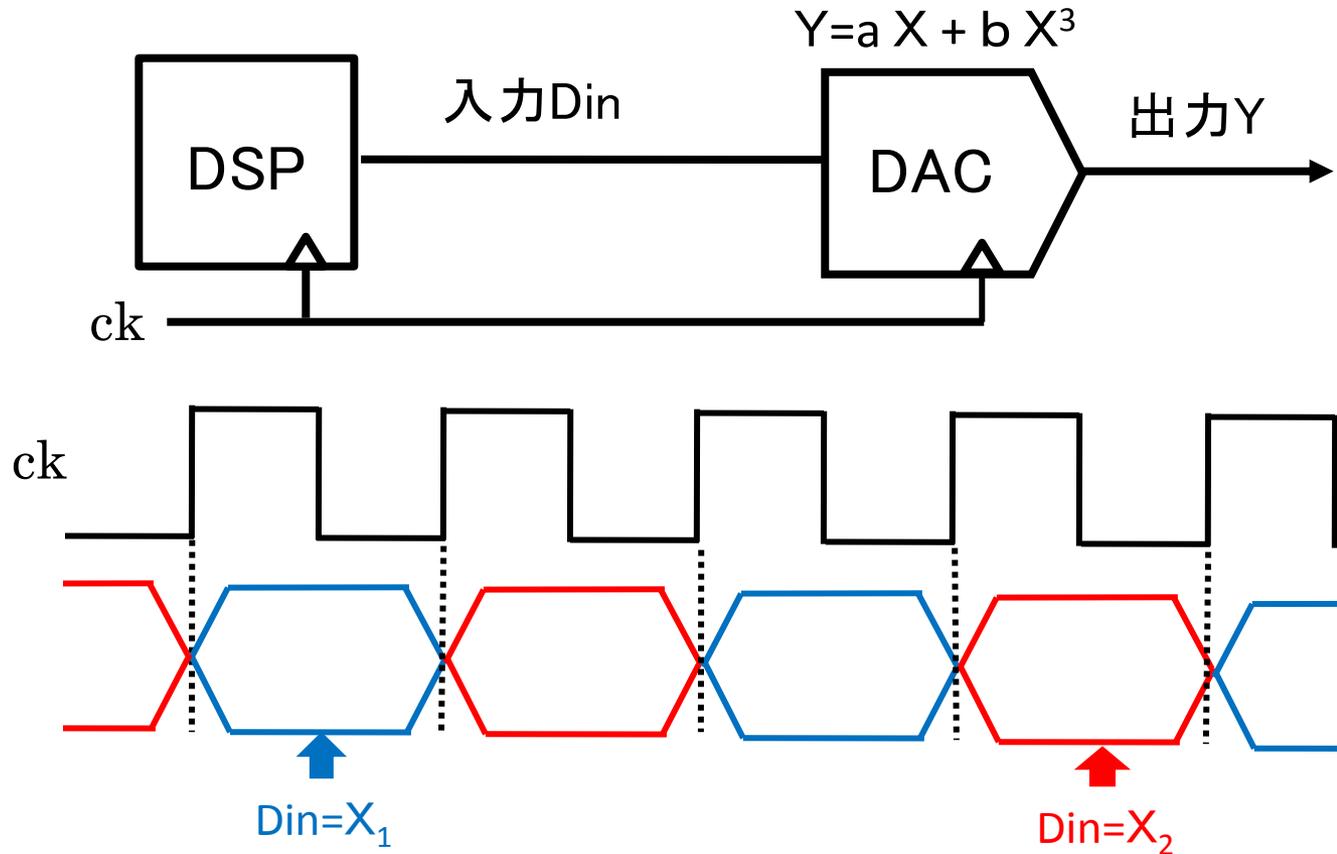
入力信号X1	$\sin(2\pi f_1 t + \pi/6) + \sin(2\pi f_2 t - \pi/6)$
入力信号X2	$\sin(2\pi f_1 t - \pi/6) + \sin(2\pi f_2 t + \pi/6)$
1次係数a(DAC)	1
3次係数b(DAC)	-0.005
入力周波数f1	51
入力周波数f2	81
サンプリング周波数fs	1024

出力Yのパワースペクトル(2トーン信号)



- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- **実験結果(位相差切り替え型)**
- まとめ

位相差切り替え型の実機検証



入力アルゴリズムの変更だけなので従来のAWGで検証可能

実験②の実験装置

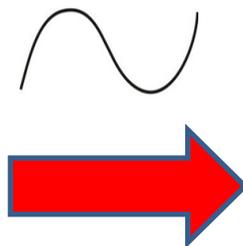
AWG
(Agilent 33120A)



最大サンプリング 周波数(Hz)	40M
---------------------	-----

振幅分解能(bit)	12
------------	----

歪性能	Δ
-----	----------



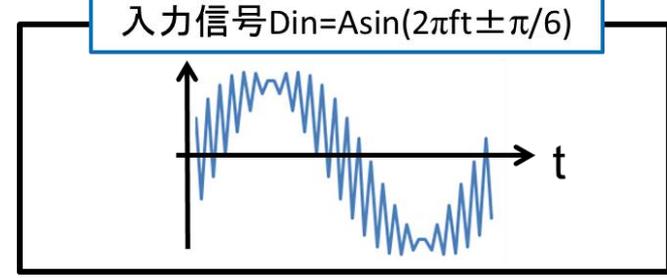
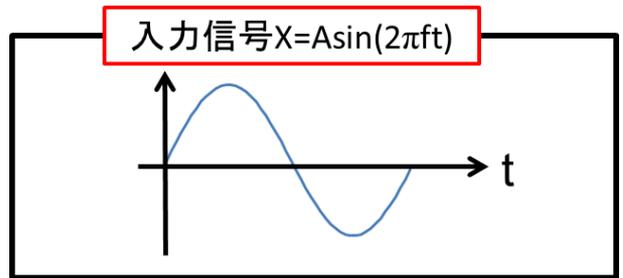
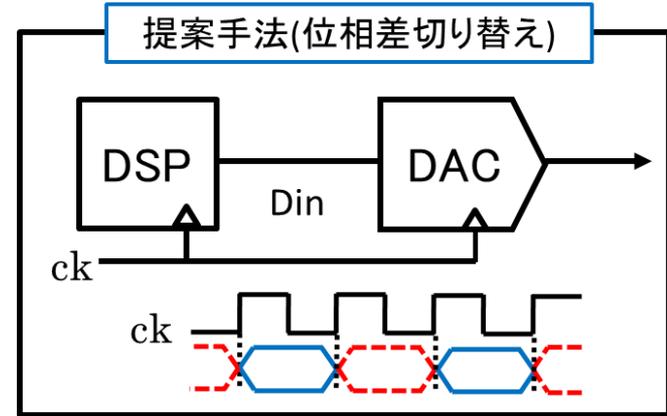
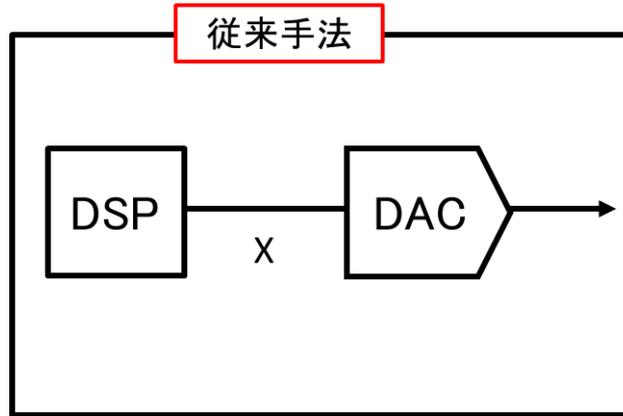
スペクトラムアナライザ
(HP ESA-L1500A)



周波数測定範囲(Hz)	9k~1.5G
-------------	---------

振幅測定範囲(Vpp)	19.8
-------------	------

実験条件



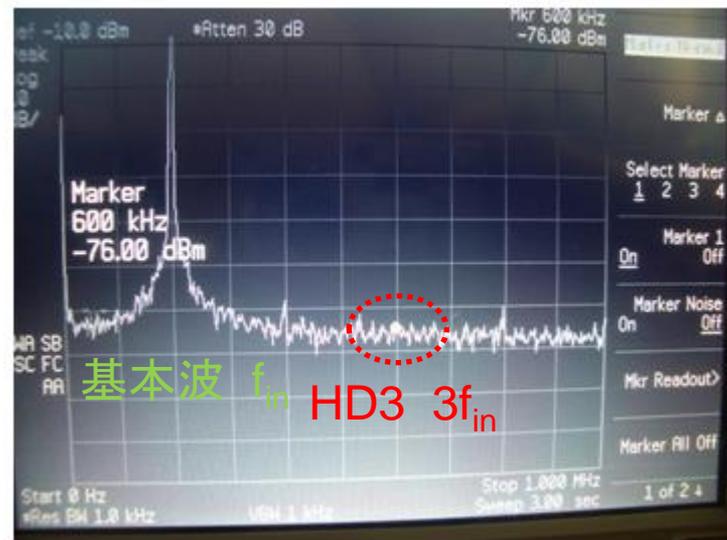
1	入力周波数(Hz)	サンプリング周波数(Hz)	入力振幅(Vpp)
	200k	40M	1.3~2.0

2	入力周波数(Hz)	サンプリング周波数(Hz)	入力振幅(Vpp)
	200k	10M	1.3~2.0

従来手法



提案手法(位相差切り替え)



基本波(1MHz) : 6.31dBm

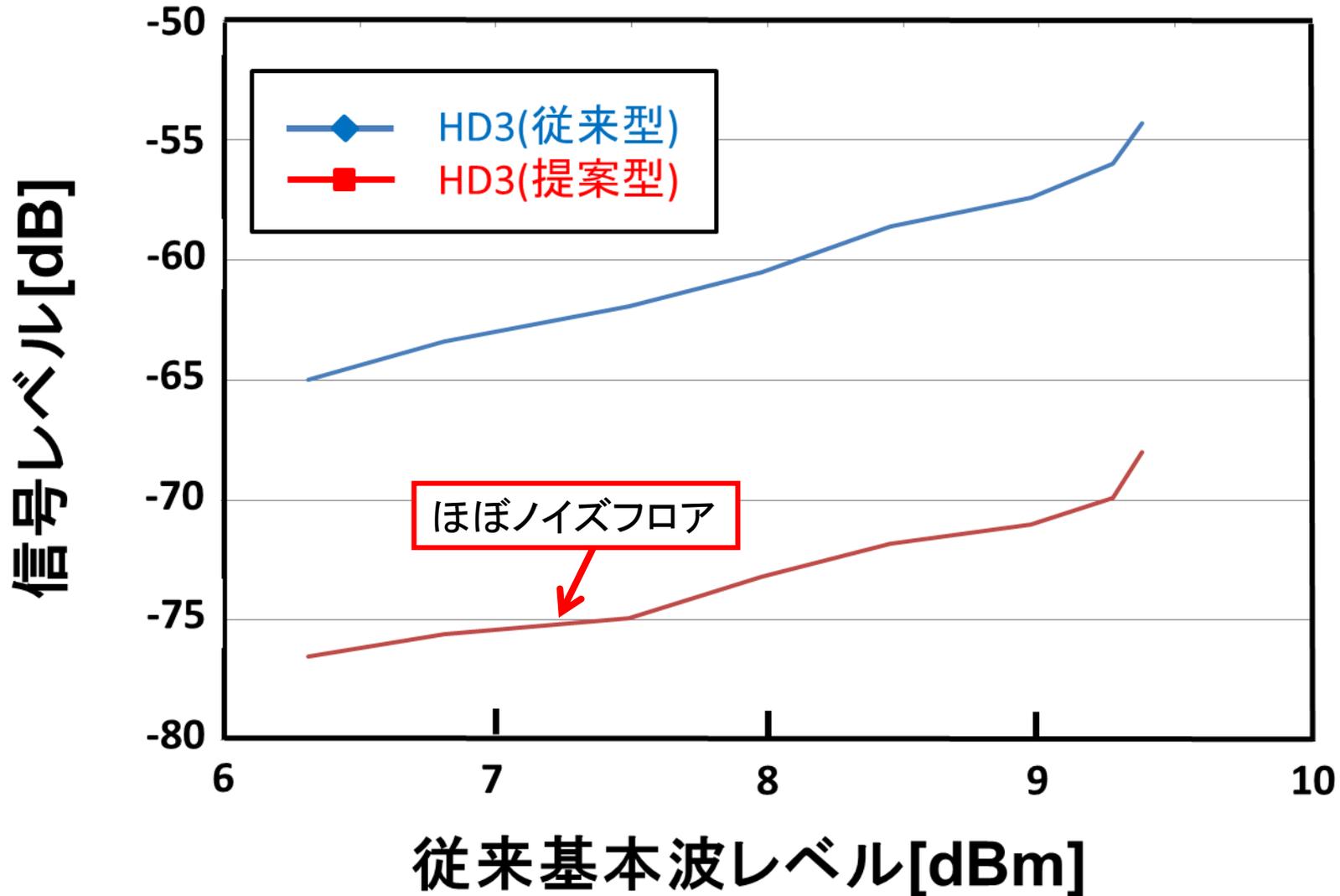
1.09dB低下

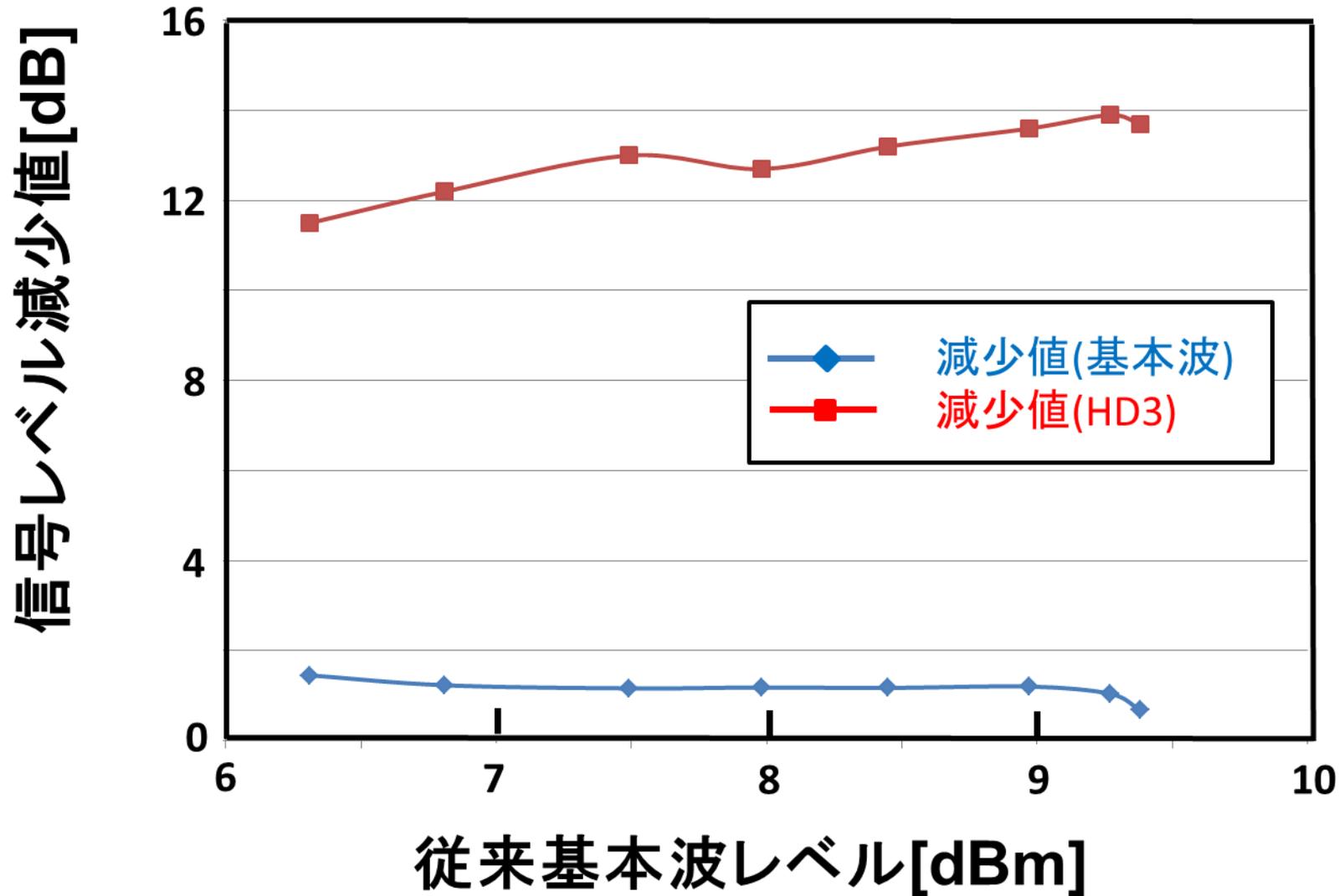
基本波(1MHz) : 1.45dBm

HD3(3MHz) : -65dBm

11.5dB低下

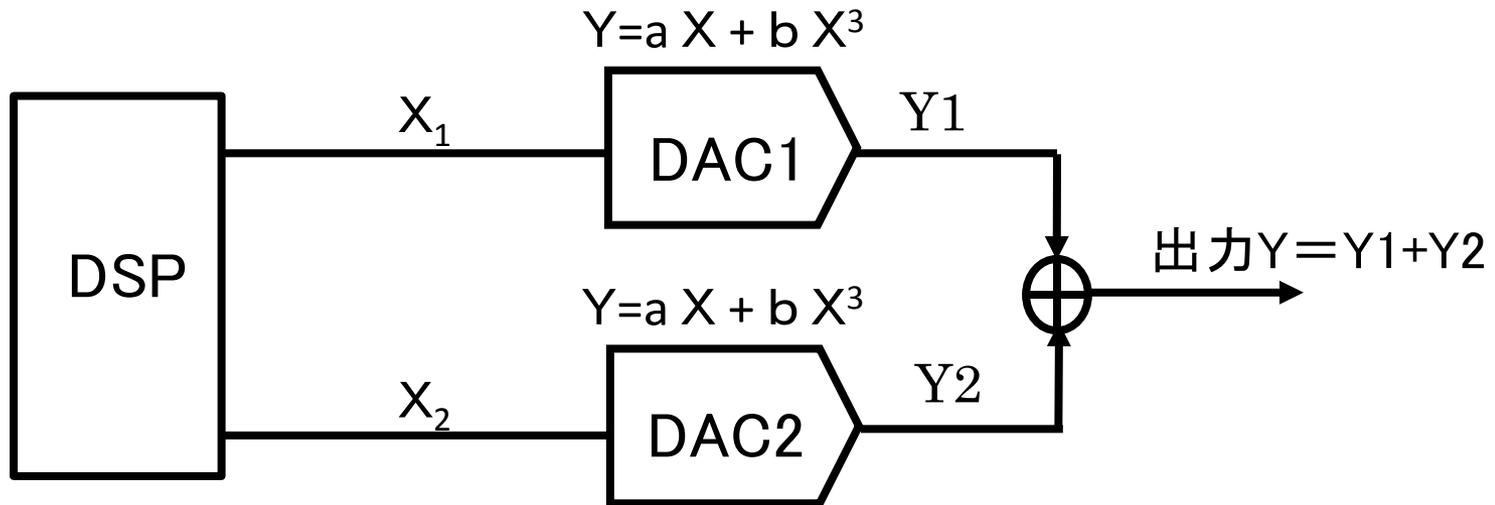
HD3(3MHz) : -76.5dBm
(ノイズフロア)





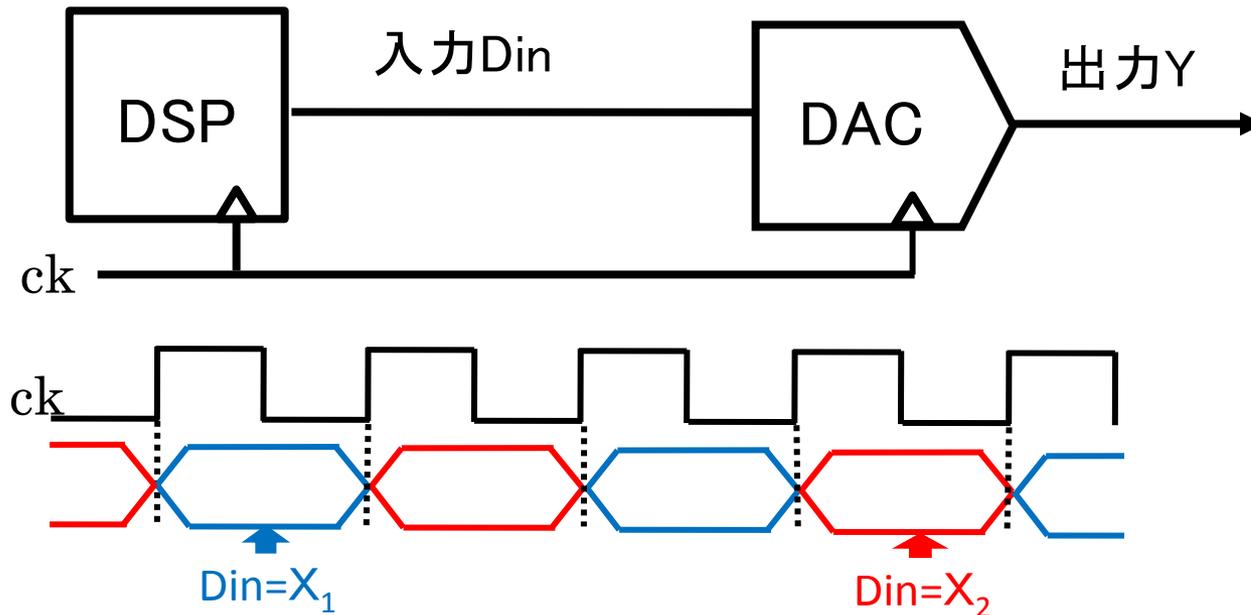
- 研究背景
- 線形性テスト
- 従来手法
- 提案手法
 - 位相差信号合成型
 - 位相差切り替え型
- 実験結果(位相差切り替え型)
- まとめ

AWGによる非線形補正技術の提案①

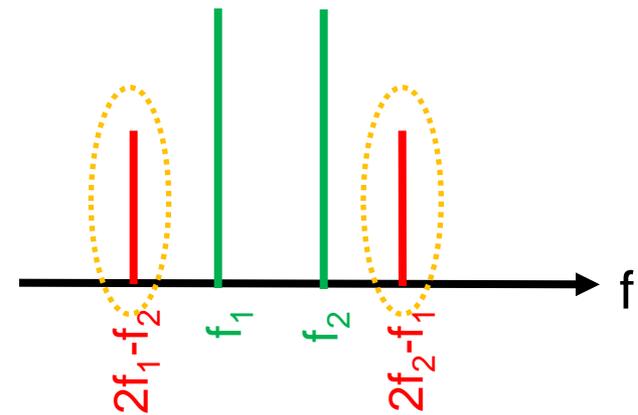


- シミュレーションにより歪成分のキャンセル効果を確認
- DAC特性のばらつきによりキャンセルが不可
⇒ダイナミックエレメントマッチング構成で解決
- DACを2つ使うが2倍の負担にはならない

AWGによる非線形補正技術の提案②



- シミュレーションにより歪成分のキャンセル効果を確認
- 従来のAWGと同じ構成で実現可能
- $f_s/2$ 付近に歪成分が発生
 - ⇒ 信号帯域より十分離れているためフィルタでカット可能
- 実験により、単一信号ではHD3が減少することを確認



実験により①②③を検証していく

- ①提案手法を位相差 $\pm\pi/4$ で適用 \Rightarrow HD2のキャンセル(シングルエンドで可)
- ②提案手法を位相差 $\pm\pi/12$ & $\pm5\pi/12$ で適用 \Rightarrow HD2・HD3両方の減少
- ③2トーン信号のIM3のキャンセル

有意義なご討論を頂きました

宮下博之氏、矢野雄二氏、力野邦人氏、岸上真也氏、
我毛辰弘氏、山口隆弘氏

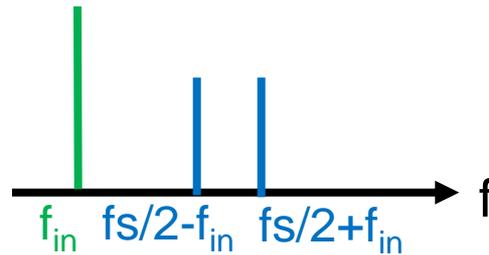
実験に協力して頂きました

高井伸和先生、石川信宣先生

およびこの研究をご支援いただいています
STARCCに感謝の意を表します。

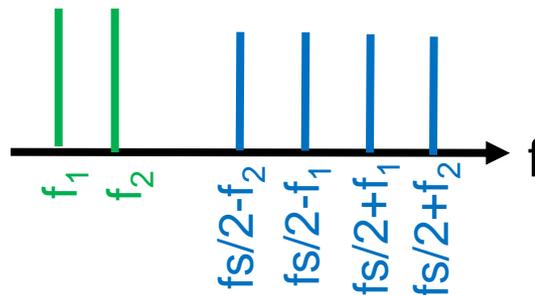
位相差切り替え型の入力Din

単一正弦波



$$\begin{aligned} D_{in} &= A \sin(2\pi f_{in} t \pm \pi/6) \\ &= 0.87A \sin 2\pi f_{in} t + 0.25A \{ \cos 2\pi(1/2fs - f_{in})t + \cos 2\pi(1/2fs + f_{in})t \} \end{aligned}$$

2トーン信号入力



$$\begin{aligned} D_{in} &= A \sin(2\pi f_1 t \pm \pi/6) + B \sin(2\pi f_2 t \mp \pi/6) \\ &= 0.87A \sin 2\pi f_1 t + 0.87B \sin 2\pi f_2 t \\ &\quad + 0.25A \{ \cos 2\pi(1/2fs - f_1)t + \cos 2\pi(1/2fs + f_1)t \} \\ &\quad + 0.25B \{ \cos 2\pi(1/2fs - f_2)t + \cos 2\pi(1/2fs + f_2)t \} \end{aligned}$$

Q1(スライド64). キャンセル効果は10dBがピークなのか？

A1. データが不十分のため断言できない。理論上は振幅に関係なく歪成分を完全にキャンセル可能。

Q2(スライド15). フィルタが完全にいらなくなるわけではないのか？

A2. 遮断周波数が緩和されるが、いらなくなるわけではない。

Q3. どのくらいの周波数帯での適用を考えているか？

A3. 現在検討中。しかし、理論上は周波数帯に関係なくキャンセル可能。

Q4. 位相差切り替え型はDSPのプログラムだけで可能なのか？

A4. 可能。

Q5. 2つの提案方式でどちらの方が有効か？

A5. 従来の構成で実現可能な位相差切り替え型がより有効だと思われる。(fs/2付近の歪を除きたい場合は位相差信号合成型が有効)

Q6. ジッタは影響するか。

A6. 影響する。実験結果において提案型でも完全にキャンセルできなかったのはジッタが影響した可能性もある。

Q7(スライド62). ジッタ以外にHD3がキャンセルできない理由はあるか？

A7. 現在検討中。

Q8.HD3を完全にキャンセルできていなくても計測可能なのか？

A8.デバイスによって、どのくらいの精度が必要かわるので、計測が不可能なわけではない。少なくともHD3が減少するので高精度な計測は可能となる。

Q9.HD3・IM3はどれくらい減少させればよいのか？

A9.デバイスによって変わる。