

# AWG を用いた低歪高周波信号生成アルゴリズム

澁谷 将平\* 小林 佑太朗 安部 文隆 小林 春夫 (群馬大学)

Low-Distortion High Frequency Phase-Switching Signal Generation Algorithm with AWG  
Shohei Shibuya\*, Yutaro Kobayashi, Fumitaka Abe, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード: ADC テスト, 任意波形発生器, 低歪信号, 高調波歪

(Keywords, Arbitrary Waveform Generator, Low Distortion Signal, Harmonics, ADC Testing)

## 1. はじめに

近年、半導体産業において製造にかかるシリコンコストが減少している一方、SoC 製造出荷時のテストコストが増加している。SoC テストにおける低コスト化によって半導体産業における製造全体の低コスト化につながる<sup>(1)-(3)</sup>。

そこで、SoC 内部における重要なアナログ部分の構成要素である ADC (Analog to Digital Converter) の線形性テストの高品質化/低コスト化手法を検討した。テスト信号発生は任意波形発生器 (Arbitrary Waveform Generator: AWG) を用いて発生させる。ADC 入力テスト信号は低歪み単一正弦波が要求されるが AWG 内部の DAC (Digital to Analog Converter) の非線形性により高調波歪み (Harmonic Distortion: HD) が発生してしまう。特に、安価な AWG を用いた場合に高調波歪みによりテスト品質が劣化する。この高調波歪みは入力信号周波数近傍に発生するためフィルタでの低減は難しい。そこで、AWG 内部の DSP 部のプログラムを工夫することでハードウェア部分の変更なしに高調波歪みを低減させる方法を提案した<sup>(4)-(6)</sup>。

先に提案した ADC テストのための任意波形発生器を使用した低歪正弦波の発生方法 (位相差切り替え信号手法) は低周波信号発生に限られていた。そこでは、3 次高調波は抑制されるが、サンプリング周波数付近にスプリアスが発生した。本論文での高周波信号生成手法では逆にサンプリング周波数付近に現れるスプリアス成分を活用して低歪の高周波信号を得る。本論文ではこの手法を発展させ高周波領域での低歪信号発生アルゴリズムを導出し、その理論解析とシミュレーション結果を示す。

## 2. AWG を用いた低周波低歪み信号の発生

AWG は DSP (波形メモリ) と DAC によって構成されている。DSP において任意のデジタル信号を発生し DAC を通すことでアナログ信号に変換する。しかしこのとき DAC の非線形性により入力信号の高調波歪みが出力信号に含まれ

る。この高調波歪が含まれると ADC の線形性の正確な測定が難しくなる。そこで先に提案した DSP 部のプログラムを変更することで高調波歪みを低減する<sup>(4)-(5)</sup>。

### 〈2・1〉 従来手法、位相差切り替え手法テスト信号の発生

AWG 内の DSP より出力する DAC へのデジタル信号を入力信号  $D_{in}$  とする。AWG より発生する従来手法のテスト信号を(1)式に示す。

$$D_{in} = A \sin(2\pi f_{in} n T_s). \quad (1)$$

ここで、 $n$  は整数。 $T_s$  はサンプリング周期である。

提案手法である、AWG の位相差切り替え信号を次式で示す。

$$D_{in} = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_0) & n: \text{偶数} \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in} n T_s + \varphi_1) & n: \text{奇数} \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi_x = \varphi_0 - \varphi_1 = (2m - 1)\pi/N. \quad (3)$$

(2)式から読み取れるように、位相差切り替え信号は位相差  $\varphi$  をもつ二つの信号を 1CLK ごとに切り替えた信号である。位相差  $\varphi$  は  $N$  次の高調波を低減する際の切り替える信号の位相差である。位相差切り替え信号の生成アルゴリズムを図 1 に、AWG から ADC へのテストの略図を図 2 に示す。

3 次の非線形性のみを考慮した AWG のモデル式を用いて、入力周波数  $f_{in}$  の従来信号(式(1))を出力した際のスペクトル図が図 3、式(2)、式(3)において  $\varphi_x = \pi/3$  となるように位相差を与えた位相差切り替え信号を出力し、スペクトル解析したものが図 4 である。図 3、4 を比較してみるとわか

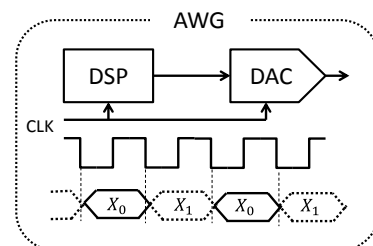


図 1 位相差切り替え信号の生成アルゴリズム  
Fig.1 Phase switching signal algorithm.

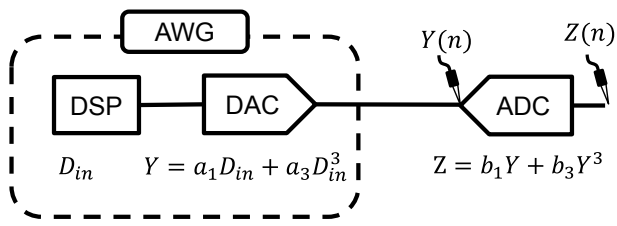


図2 ADCの線形性テストと非線形モデル

Fig2. ADC linearity testing and nonlinearity modeling.

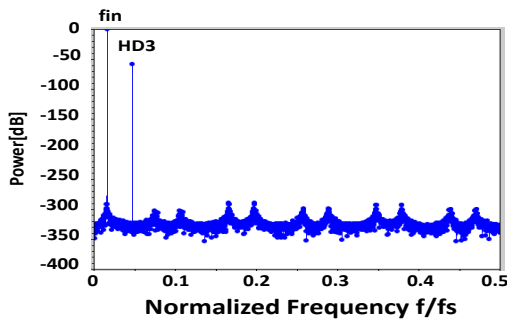


図3 正弦波入力に対するAWG出力スペクトル  
Fig3. AWG output spectrum with conventional method.

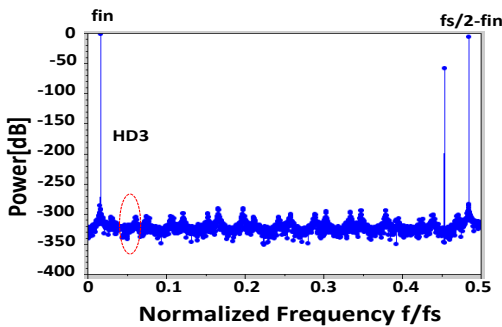


図4 位相差切り替え手法での低周波信号生成AWG出力スペクトル

Fig.4 Low-frequency AWG output signal spectrum with phase switching method.

るように、今までに提案した位相差切り替え手法は低周波の入力周波数付近のHD3をキャンセルし、サンプリング周波数付近に発生するスプリアスをLPF等で低減することで低歪みの信号を得ていた<sup>(6)</sup>。そのため入力周波数が低周波以外である場合、スプリアスの位置が低周波側に移動し扱えない。

#### 〈2・2〉 AWGを用いた低歪高周波信号の生成

AWGより発生するひずみにおいて、最も影響の大きい3次の非線形性を中心に議論する。AWGを用いてサンプリング周波数の1/2付近の周波数の信号を出力しようとするとき、AWG由来の3次高調波成分が折り返されて発生する(図5)。この成分は入力周波数付近に発生するため、フィルタによる低減が難しい。また、先に提案している位相差切り替え信号は低周波における低歪み信号の生成にしか用いることができない。低周波位相差切り替え信号に対し、高周波で用

いる低歪み信号を生成するための位相差は(4)式で示す。

$$\varphi_y = \varphi_0 - \varphi_1 = 2n\pi/N. \quad (4)$$

3次の非線形性をもつシステムの歪みを議論するために $\varphi_y = 2\pi/3$ を与える。低歪み位相差切り替え手法高周波信号は位相差切り替え信号低周波信号生成アルゴリズムと違い3次高調波のスペクトルが発生するが、3次高調波信号のイメージ信号がキャンセルされる。(図6)入力信号と入力周波数付近に現れる高調波成分をHPF(High Pass Filter)で取り除くことで $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアス成分のみの信号を出力し周波数 $f_{out}$ の低歪みの高周波信号を得ることができる。

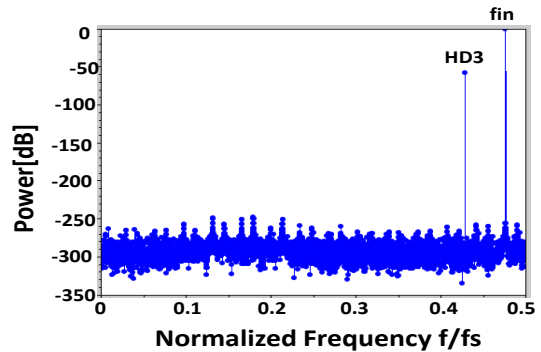


図5 高周波の正弦波のAWG出力スペクトル  
Fig5. AWG output spectrum of high frequency with conventional method.

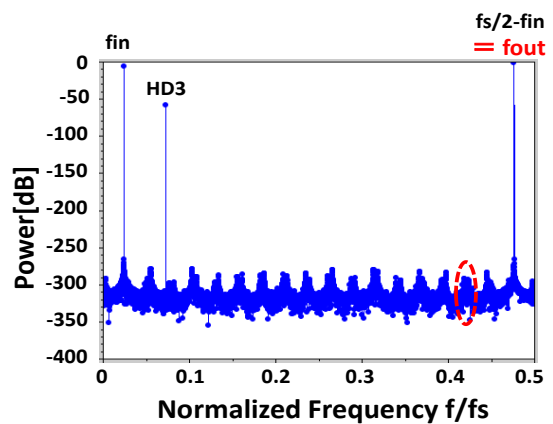


図6 提案手法のAWG出力スペクトル  
Fig6. AWG output spectrum of high frequency with phase-switching method.

#### 〈2・3〉 位相差切り替え手法による低歪高周波信号生成の原理

位相差切り替え手法による信号のキャンセルについて、説明する。位相差切り替え信号を3次の非線形システムに入力した場合、入力周波数の3倍の周波数を持つ歪み成分が発生する(HD3)。位相差切り替え手法では1クロック $T_s$ ( $T_s \equiv 1/f_s$ )ごとに振幅、周波数の等しい2つの信号を切り替えるため、周波数 $f_s/2$ で信号をサンプリングしていることに等しくなる。そのため周波数 $f_s/2$ 近傍にイメージ信号が発生する。よって入力周波数 $f_{in}$ 、3次歪み $3f_{in}$ 、入力周波数

のイメージ信号 $f_s/2 - f_{in}$ 、3次歪みのイメージ信号 $f_s/2 - 3f_{in}$ の4つの周波数成分が発生する。(図7) 低周波数低歪み信号生成では切り替える2つの3次高調波が打ち消しあうような位相差を与えることでHD3を低減できる。今回提案する高周波での低歪み信号では2つの3次高調波が重なり合うような位相差とすることで、サンプリング周波数 $f_s$ で信号をサンプリングしていることと同じになるため、 $f_s/2 - 3f_{in}$ の成分をキャンセルできる。(図8)

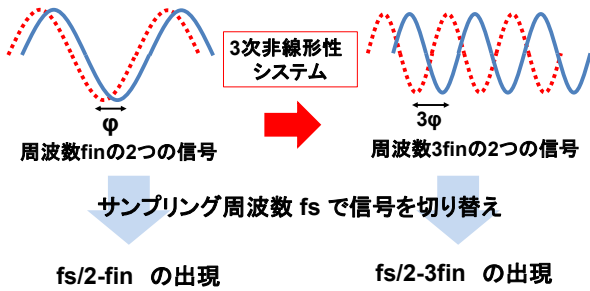


図7.位相差切り替えによって出現する周波数成分  
Fig.7. Frequency components appearing by the phase switching technique.

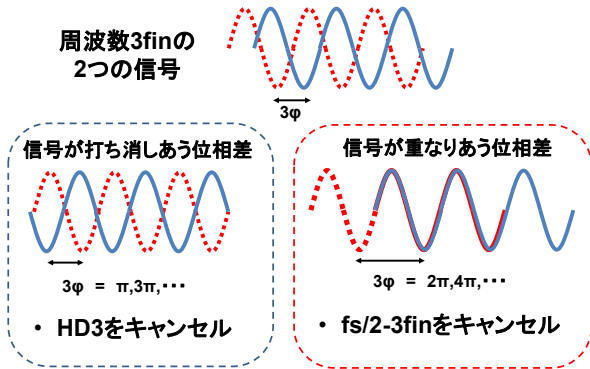


図8. 設定する位相差によるキャンセル成分  
Fig.8. Cancelled component due to the phase difference.

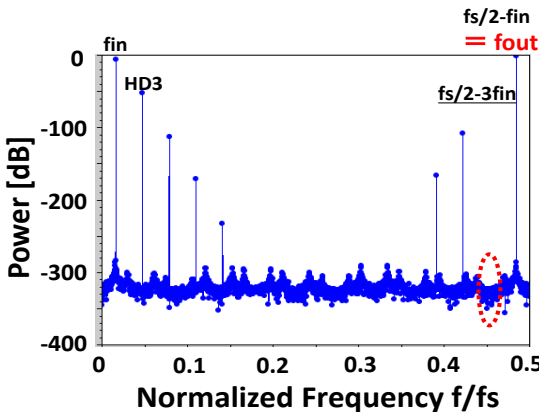


図9 提案手法のADC出力スペクトル  
Fig9. ADC output spectrum of high frequency with phase-switching method.

〈2.4〉 位相差切り替え手法によるスプリアス低減の継続  
図2のようにAWGから出力した信号を3次の非線形性を

もつシステム (ADC) に入力し、出力した結果のスペクトル解析結果が図9である。図9でもAWG出力(図6)においてキャンセルされていた $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分がキャンセルされている。このことから位相差切り替え信号の低減効果は3次の非線形システムを通す間継続していることがわかる。このキャンセル効果継続の原因および低減そのものの要因を確かめるため、数式による理論解析を次章より行う。

### 3. 高周波低歪み信号生成の理論解析

#### 〈3.1〉 AWGの出力式理論解析

位相差切り替え手法による高調波歪みの低減原因を探るため、数式モデルによる理論解析を行う。1クロックごとに信号を切り替えるため、理論解析には次式を用いる<sup>(4)</sup>。

$$D_{in} = \frac{1+(-1)^n}{2} X_0 + \frac{1-(-1)^n}{2} X_1. \quad (5)$$

$$(-1)^n = \cos(n\pi) = \cos\left(2\pi \cdot \frac{f_s}{2} \cdot nT_s\right). \quad (6)$$

式(2),(5),(6)を用いてAWGを3次の非線形性をもつシステムであるとして出力信号Yを求めると、次式の通りになる。

$$\begin{aligned} Y &= a_1 D_{in} + a_3 D_{in}^3 \\ &= \alpha * P \sin(2\pi f_{in} nT_s) \\ &\quad + \beta * Q \cos(2\pi(3f_{in})nT_s) \\ &\quad + R \cos\left(2\pi\left(\frac{f_s}{2} - f_{in}\right)nT_s\right). \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P \equiv -\frac{1}{2}\left(a_1 A + \frac{3}{4}a_3 A^3\right) \\ Q \equiv -\frac{1}{4}a_3 A^3 \\ R \equiv \frac{\sqrt{3}}{2}\left(a_1 A + \frac{3}{4}a_3 A^3\right) \end{cases}$$

AWGからの出力式(7)式と図6から $f_s/2 - 3f_{in}$ の成分がキャンセルされていることが見て取れ、式と出力結果が一致していることがわかる。(7)式における $\alpha, \beta$ はそれぞれの周波数成分を低減するフィルタの係数である( $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ )。

#### 〈3.2〉 スプリアス低減理由理論解析

AWGからの出力結果(7)式を再度3次の非線形性を持ったシステム $Z(nT_s)$ に入力した結果が次の(8)式である。

$$\begin{aligned} Z(nT_s) &= b_1 Y + b_3 Y^3 \\ &= (b_1 R + \frac{3}{2}\alpha^2 b_3 P^2 R + \frac{3}{2}\beta^2 b_3 Q^2 R \\ &\quad + \frac{3}{4}b_3 R^3) \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - f_{in}\right)nT_s\right\} \\ &\quad + \frac{1}{4}b_3 R^3 \cos\left\{2\pi\left(\frac{3}{2}f_s - 3f_{in}\right)nT_s\right\} \\ &\quad + \left(-\frac{3}{4}\alpha^2 b_3 P^2 R + \frac{3}{2}\alpha\beta b_3 PQR\right) \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - 3f_{in}\right)nT_s\right\} \\ &\quad - \frac{3}{2}\alpha\beta b_3 PQR \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - 5f_{in}\right)nT_s\right\} \\ &\quad - \frac{3}{4}\beta^2 b_3 Q^2 R \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - 7f_{in}\right)nT_s\right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left( -\frac{3}{4}\alpha^2 b_3 P^2 R + \frac{3}{2}\alpha\beta b_3 PQR \right) \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} + f_{in}\right)nT_s\right\} \\
& - \frac{3}{2}\alpha\beta b_3 PQR \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} + 3f_{in}\right)nT_s\right\} \\
& - \frac{3}{4}\beta^2 b_3 Q^2 R \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} + 5f_{in}\right)nT_s\right\} \\
& + \left( ab_1 P + \frac{3}{4}\alpha^2 b_3 P^2 R - \frac{3}{4}\alpha^2\beta b_3 P^2 Q + \frac{3}{2}\alpha\beta^2 b_3 P Q^2 \right. \\
& \quad \left. + \frac{3}{2}ab_3 P R^2 \right) \sin\{2\pi(f_{in})nT_s\} \\
& + \left( -\frac{1}{4}\alpha^3 b_3 P^3 + \beta b_1 Q + \frac{3}{2}\alpha^2\beta b_3 P^2 Q + \frac{3}{4}\beta^3 b_3 Q^3 \right. \\
& \quad \left. + \frac{3}{2}\beta b_3 Q R^2 \right) \sin\{2\pi(3f_{in})nT_s\} \\
& + \left( -\frac{3}{4}\alpha^2\beta b_3 P^2 Q + \frac{3}{4}b_3 P Q^2 \right) \sin\{2\pi(5f_{in})nT_s\} \\
& - \frac{3}{4}\alpha\beta^2 b_3 P Q^2 \sin\{2\pi(7f_{in})nT_s\} \\
& - \frac{1}{4}\beta^3 b_3 Q^3 \sin\{2\pi(9f_{in})nT_s\} \\
& + \frac{3}{4}ab_3 P R^2 \sin\{2\pi(f_s - f_{in})nT_s\} \\
& - \frac{3}{4}ab_3 P R^2 \sin\{2\pi(f_s - 3f_{in})nT_s\} \\
& - \frac{3}{4}\beta b_3 Q R^2 \sin\{2\pi(f_s - 5f_{in})nT_s\} \\
& + \frac{3}{4}\beta b_3 Q R^2 \sin\{2\pi(f_s + f_{in})nT_s\}.
\end{aligned} \tag{8}$$

(8)式において、AWGと後段の非線形システム(ADC)のサンプリング周波数が等しく、 $f_s/2$ で折り返すエイリアシングが起きるとすると $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分は

$$\cos\left\{2\pi\left(\frac{3}{2}f_s - 3f_{in}\right)nT_s\right\} = \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - 3f_{in}\right)nT_s\right\}. \tag{9}$$

$$\cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} + 3f_{in}\right)nT_s\right\} = \cos\left\{2\pi\left(\frac{f_s}{2} - 3f_{in}\right)nT_s\right\}. \tag{10}$$

(9),(10)式の2つの周波数成分が重畳するため、HPFを通じた場合の $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分の振幅は次式の通りとなる。

$$\begin{aligned}
& \left( -\frac{3}{4}\alpha^2 b_3 P^2 R + \frac{3}{2}b_3\alpha\beta PQR \right) + \frac{1}{4}b_3 R^3 - \frac{3}{2}\alpha\beta b_3 PQR \\
& = -\frac{3\sqrt{3}}{32}b_3 A^2 \left( a_1 A + \frac{3}{4}a_3 A^3 \right) (\alpha^2 - 1).
\end{aligned} \tag{11}$$

(11)式から読み取れるように位相差切り替えによる3次高調波歪みのイメージ信号 $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分は $\alpha$ によって出現する量の変動する。 $\alpha = \beta = 1$ とし、スプリアスを低減せず折り返し成分を考慮し $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分の振幅を計算すると

$$\left( -\frac{3}{4}b_3 P^2 R + \frac{3}{2}b_3 PQR \right) + \frac{1}{4}b_3 R^3 - \frac{3}{2}b_3 PQR = 0. \tag{12}$$

(12)式のとおりエイリアシングによって重畳される成分に

よって $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分はキャンセルされる。(11),(12)式から $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分は入力周波数成分を低減するほど出現し、低減しない場合はキャンセルされ続けるといえる。

入力周波数 $f_{out}$ の正弦波を、3次非線形性をもつシステム(ADC)に入力した際のHD3と提案信号の $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分は同一の周波数成分として検出される。周波数 $f_{out}$ の信号の振幅が等しくなるように入力した際のフィルタの低減量による、周波数 $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分の検出誤差を図10に示す。図10より $f_{in}$ の信号成分を1/10にすることで検出誤差を1.7[%]程度にできる。

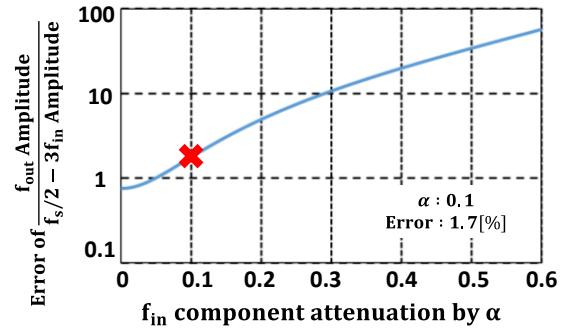


図10 正弦波入力と比較した、提案手法における $f_{in}$ 成分低減による $f_s/2 - 3f_{in}$ 成分検出誤差

Fig.10. Error of the measurable  $f_{out}$  and 3rd order spurious amplitude ratio with phase switching method.

#### 4. まとめ

- 低周波での使用を目的とした位相差切り替え信号を高周波で使用する方法を示した。
- 理論解析により、位相差切り替えのキャンセル効果はフィルタ等による低減なしであれば継続し、低減することで検出誤差を改善できる。

**謝辞** 有意義な御討論をいただきました、浅見幸司氏、本研究を支援して下さった半導体理工学研究センター(STARC)に感謝いたします。

#### 文 献

- (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 Generator", 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).