

任意波形発生器を用いた低歪み信号発生技術の実用化検討

安部 文隆* 澤田健士 小林 春夫 (群馬大学) 小林 修 (STARC)

Examination of Practical Use of Low-Distortion Signal Generation With an Arbitrary Waveform Generator

Fumitaka Abe*, Kenji Sawada, Haruo Kobayashi (Gunma University)
Osamu Kobayashi (STARC)

This paper describes experimental results of ADC dynamic performance test (or measurement) with an Arbitrary Waveform Generator (AWG) using previously proposed low-distortion sinusoidal wave generation method. Our proposed method cancels (or suppresses) 3rd order harmonics with AWG program (or waveform memory contents) change, but spurious components far from the signal band are caused which must be removed with an following analog filter. We found in simulation and experiments that a very simple passive LC analog filter is enough for this purpose because the spurious components is far from the signal band. Our measurement results show that our proposed method can be used for high precision ADC dynamic performance test.

キーワード：低歪み信号発生, 任意波形発生器, ADC テスト

(Keywords, Low distortion Signal Generation, Arbitrary Waveform Generator (AWG), ADC Testing)

1. SoC テストコスト動向と本研究概要

半導体産業においてシリコンコストが減少している一方で、SoC 製造出荷時のテストコストが増加している。半導体テストの低コスト化、高精度化は産業上重要な課題である(1)-(3)。

ここでは、SoC内でも特に重要なADCに着目し、その線形性テストの高精度化について検討を行う。テスト信号発生には任意波形発生器 (Arbitrary Waveform Generator : AWG) が用いられる(4)。AWG は任意の波形を生成することが出来るため、その用途の多様性から ATE (Automated Test Equipment) 内部に用いられている。しかし、AWG はクリーン正弦波を生成することが難しい。そのため、ADC 入力テスト信号としては単一正弦波や2 トーン信号が要求されるが、その信号を AWG により発生させた場合、高純度の信号を得ることが難しい。単一正弦波や相互変調歪みの純度を下げる要素として高調波 (Harmonic Distortion : HD) 及び相互変調歪み (Inter-Modulation Distortion : IM) が挙げられる。この高調波や相互変調歪みは入力信号周波数近傍に発生するものも多く、フィルタでの低減が難しい。そこで、AWG 内部の DSP 部のプログラムを工夫することで高調波を低減

する方法を提案した(5)-(10),(12)-(13)。そこではプログラム変更に伴い入力信号近傍の高調波が低減する一方、 $f_s/2$ の近傍 (f_s : AWG のサンプリング周波数)、つまり入力周波数から十分離れた領域にスプリアスが発生する (この機能をノイズシェーピングに対応させディストーションシェーピングと呼ぶ(4)-(9))。この成分は基本波から十分離れた位置に発生するため簡単なアナログフィルタで低減することが出来る(10)。今回、この低歪み信号発生技術を用いて ADC の線形性テストの検討を行った。

2. AWG を用いた低歪み正弦波信号の発生

AWG は主に DSP(波形メモリ)や DAC から構成される。DSPによりデジタル信号を生成し、DACによりアナログ信号に変換を行う。しかし、AWGにより正弦波を生成した場合、内部 DAC やアンプなどの非線形特性により信号に高調波が含まれてしまう。先に提案した位相差切り替え手法を用いることにより問題となる高調波を低減することができる(5)-(10),(12)-(13)。その具体的手法と効果を実機による検証も含めて説明する。

<2-1> 位相差切り替え信号による3次高調波低減

ADCテスト信号としてDSP部で(1)式で表される信号 D_{in}

を生成する。この信号 D_{in} は正弦波信号 X のみで構成される。この信号 D_{in} が DAC への入力信号となる (図 1)。

$$D_{in}(n) = X(n) = A \sin(2\pi f_{in}nT_s) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n は整数、 T_s は AWG のサンプリング周期であり、先程の f_s とは以下の関係がある。

$$T_s = 1/f_s \dots\dots\dots (2)$$

一方、低歪み信号を実現する提案手法では AWG 内部 DAC に関して 3 次非線形項が特に問題となるため(3)、(4)式で表される位相差 $\pi/3$ が異なる信号 X_0, X_1 を DAC の入力信号とする(図 1)。この手法により AWG 内部における DAC 由来の 3 次高調波を低減することが可能である(4)(5)(図 1)。

$$D_{in}(n) = \begin{cases} X_0 = A \sin(2\pi f_{in}(2m)T_s + \pi/6) \dots\dots\dots (3) \\ X_1 = A \sin(2\pi f_{in}(2m+1)T_s - \pi/6) \dots\dots\dots (4) \end{cases}$$

ただし、 n は整数とし n と m 以下の関係にある。

$$n = \begin{cases} 2m \text{ (偶数)} \dots\dots\dots (5) \\ 2m+1 \text{ (奇数)} \dots\dots\dots (6) \end{cases}$$

つまり、本手法を用いることで従来と同様の AWG を用いて低歪みの信号を生成することが出来る。

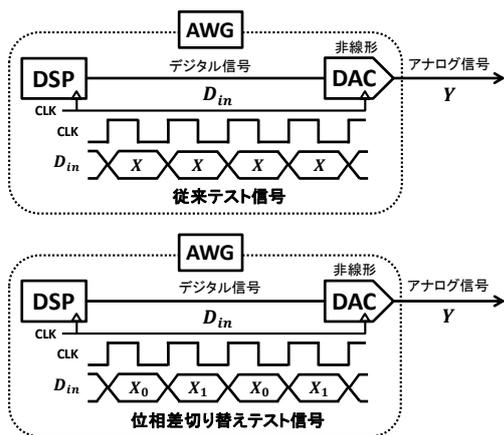


図 1 従来手法と位相差切り替え手法

Fig.1. Conventional and phase switching methods.

以上の(1) ~ (3)式で表される従来信号、位相差切り替え信号をそれぞれ実機にて発生させた。この時の発生信号を下表 1 に示す。

表 1 AWG による ADC テスト用信号

Table1. ADC test signal generated by an AWG.

基本波 f_{in}	AWG のサンプリング周波数 f_s
200kHz	10MHz

AWG は Agilent33220A を用いた。更に AWG の出力信号をオシロスコープ及びスペクトラムアナライザにて信号を観測した。その時の観測結果について、時間波形、スペクトラムをそれぞれ図 2、図 3 に示す。図 2 より、位相差切り替え信号

では位相差が $\pi/3$ 異なる 2 波が 1 サンプルポイント毎に切り替わっている。そのことにより、図 3 から 3 次高調波 (HD3) が低減されていることが確認できる。なお、位相差を切り替えたことにより図 3 の位相差切り替え信号が示すように $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアスが発生する。別の言い方をすれば、このスプリアスの発生により 3 次高調波をキャンセルしている。この信号は不要信号となるが、後段に LPF (ローパスフィルタ)を用いて低減をする。

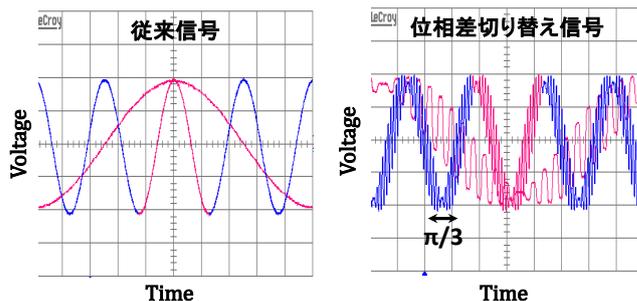


図 2 従来信号と位相差切り替え信号比較 (時間波形)

Fig.2. Comparison between conventional and phase switching signal in the time domain generated by AWG.

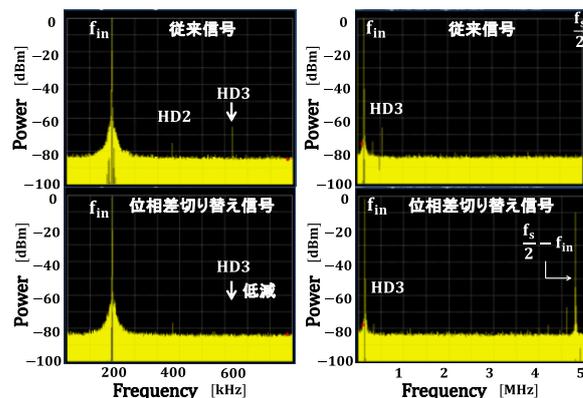


図 3 従来信号と位相差切り替え信号比較 (スペクトル)

Fig.3. Comparison between conventional and phase switching signal in the frequency domain generated by AWG (Experiment).

〈2・2〉位相差切り替え信号による 3 次高調波低減の原理

3 次高調波は下図 4 の従来信号のように 3 次非線形システムにより発生する。一方、位相差切り替え信号では位相差が $\pi/3$ ある 2 つの信号がそれぞれ 3 次非線形システムにより 3 次高調波が発生する。しかし、この時、両者の位相差 $\pi/3$ はこの 3 次非線形システムにより位相差が 3 倍され下記の位相差を持つ。

$(\pi/3) \times 3 = \pi$ (6)
 つまり、下図4の位相差切り替え信号の3次高調波のように位相差が π あるために2信号がそれぞれ打消しあいキャンセル(低減)される。

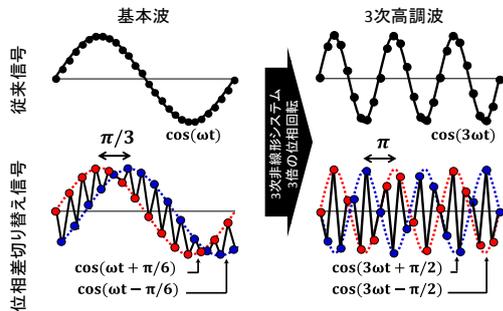


図4 3次高調波の発生と位相差信号によるキャンセル原理
 Fig.4. 3rd order harmonic generation and cancellation principle.

3. 位相差切り替え信号の不要信号低減

ここでは、位相差切り替え信号を用いたADCテストのための3次高調波測定をMATLABにより数値シミュレーションを行い、アナログフィルタの必要性を説明する。

<3・1> 位相差切り替え信号を用いたADC1テストの検討

下図5に位相差切り替え信号を用いたADCテストの様子を示す。また、その時のADCの出力信号スペクトルを示す。

前章までの議論によりDSP部で発生させた位相差切り替え信号によりDAC由来の3次高調波はキャンセルされる。しかし、本来検出すべきADC由来の3次高調波もまたキャンセルされてしまっている(図5)。これはADCに3次高調波をキャンセルする位相差切り替え信号をそのまま入力していることが原因である。そのため、位相差を切り替えている $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアスを低減することが必要になる。

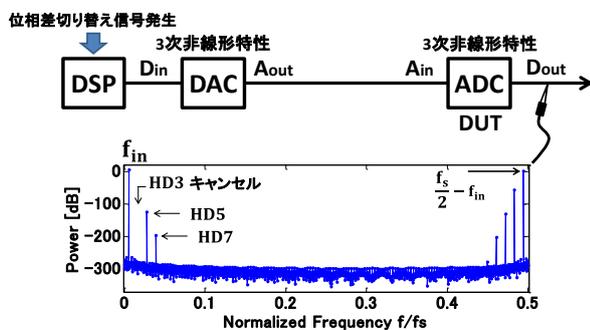


図5 位相差切り替え信号を用いたADCテストの検討
 Fig.5. ADC test using phase switching signal.

<3・2> LPFを用いた $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアス低減

LPFを用いて位相差切り替え信号により発生したスプリアスを低減する。この低減量をフィルタ特性を変化させることで調整する。下図6にシミュレーションモデルを示す。図6の上図が従来信号を用いた理想的なADCテスト系を示している。ここで言う理想的の意味はDACモデルにおいて非線形特性ではなく線形特性を仮定していることである。そのため、この系の出力はADC由来の3次高調波のみが検出される。この3次高調波のパワーを基準とする。一方、図6の下図は実際のADCテスト系を示している。ここで言う実際とはDACモデルに3次非線形項を考慮していることに相当する。しかし、この系では位相差切り替え信号をテスト信号として用いている。そのため、DAC由来の3次高調波はキャンセルされ発生しない。その後、3次高調波をキャンセルする $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアスをLPFにより十分低減することでADC由来の3次高調波の検出ができる。ここで、位相差切り替え信号の振幅を従来信号に対して $2/\sqrt{3}$ 倍してある。これは位相差を与えたことにより基本波の成分に関しても1.25dBだけ低減してしまう。そのため、その基本波の低減分のパワーを補うために信号発生時に $2/\sqrt{3}$ 倍して出力している。

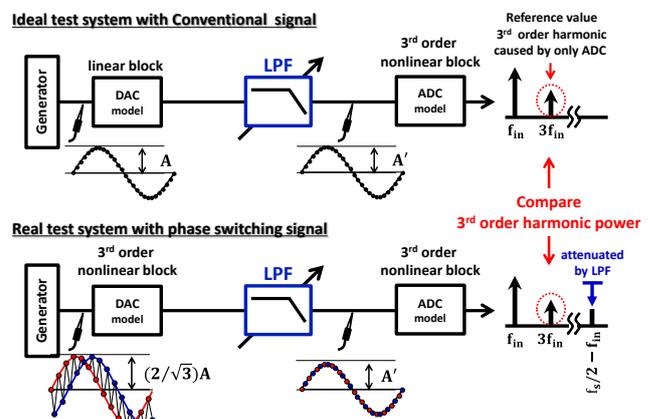


図6 $f_s/2 - f_{in}$ のスプリアス低減量とADC由来の3次高調波パワーの関連検討のためのMATLABシミュレーションモデル

Fig.6. MATLAB simulation model for correlation between spurious@ $f_s/2 - f_{in}$ attenuation with a LPF and a 3rd order harmonic generated by ADC.

上図6において従来信号を用いた理想的なADCテスト系

と位相差切り替え信号を用いた実際の ADC テスト系において系の出力で観測される 3 次高調波を比較し、ADC 由来の 3 次高調波の検出誤差を求めた。この時、LPF の特性を調整し、 $f_s/2 - f_{in}$ のスピリアスの低減量を変化させた。下図 7 に $f_s/2 - f_{in}$ のスピリアスの低減量と 3 次高調波の検出誤差の相関関係を示す。

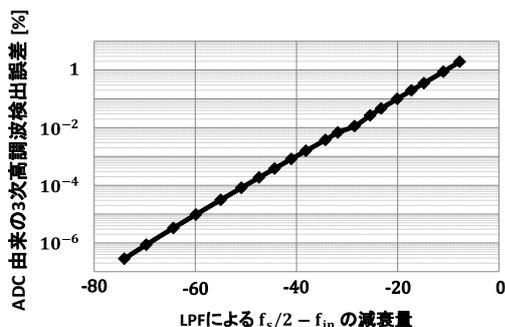


図 7 位相差切り替え手法における $f_s/2 - f_{in}$ のスピリアスの低減量と ADC 由来の 3 次高調波の検出誤差の関係

Fig.7. Correlation between spurious@ $f_s/2 - f_{in}$ attenuation and 3rd order harmonic generated by ADC power.

図 7 より $f_s/2 - f_{in}$ を 20dB 低減させることで ADC の 3 次高調波検出誤差を 0.1%, 更に 30dB 低減させることで 0.01% の誤差で検出できる。

4. 位相差切り替え信号を用いた ADC 性能の測定

ここでは、位相差切り替え信号に LPF を適用し、位相差切り替え信号を用いた ADC の 3 次高調波測定について検証する。

<4-1> アナログフィルタの作成

まず、位相差切り替え信号により発生する $f_s/2 - f_{in}$ のスピリアスに関して、表 1 及び図 3 より $f_s/2 - f_{in}$ のスピリアスは 4.8MHz の位置に発生する。この信号をアナログフィルタを用いて低減をする。下図 8 に LC バタワース LPF を示す。更に、その試作 LPF の周波数特性を周波数特性分析器(FRA)を用いて測定した。その測定結果を図 9 に示した。図 9 より今回低減のターゲットとしている 4.8MHz スピリアスに関しては図 8 に示すフィルタを用いることで、図 9 から約 60dB 程低減されることが確認できる。

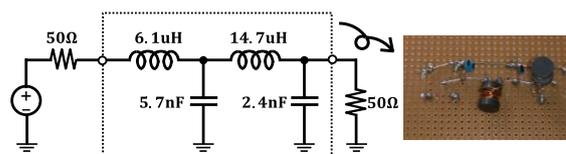


図 8 遮断周波数 1MHz, LC4 次バタワース LPF

Fig.8. Cutoff frequency 1MHz, 4th order LC Butterworth low pass filter (LPF)

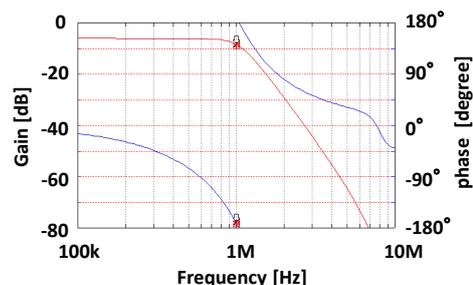


図 9 図 8 に示した試作フィルタの周波数特性

Fig.9. Frequency response the 4th Butterworth LPF shown in the Fig.8

<4-2> ADC の 3 次高調波の測定

下図 10 に示すと通り、AWG により従来信号、位相差切り替え信号を発生させ、LPF を通過させ、出力信号に含まれる 3 次高調波について検討を行う。

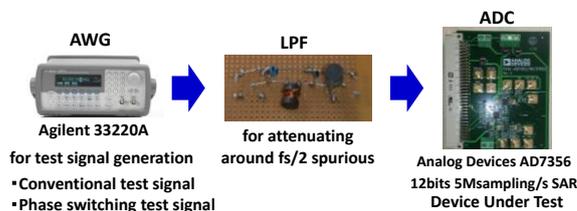


図 10 従来手法、位相差切り替え手法用いた ADC テスト

Fig.10. ADC test using conventional and phase switching signal generated by the same AWG

図 10 の系において、AWG により(1)~(3)式で表される従来信号、位相差切り替え信号の信号発生条件を下表 2 に示す。

表 2 ADC テスト時の(1)~(3)式に示す従来信号と位相差切り替え信号のパラメータ条件

Table2. Conventional and Phase switching test signal shown in (1) ~ (3) parameter values.

	周波数	振幅[Vpp]	AWGサンプリング周波数
従来信号	200kHz	2.0Vpp	10MHz
位相差切り替え信号	200kHz	2.3Vpp	10MHz

更に、図 10 の系の出力信号を下図 11 に示す。3 次高調波のパ

ワーに関して従来信号を用いた場合-86.24dB, 一方位相差切り替え信号を用いた場合-89.39dBである。これは従来手法ではAWGとADC由来の3次高調波を検出しているのに対し, 位相差切り替え手法ではその3次高調波低減原理からAWGの3次高調波を低減することでADC由来の3次高調波をメインに検出していると考えられる。

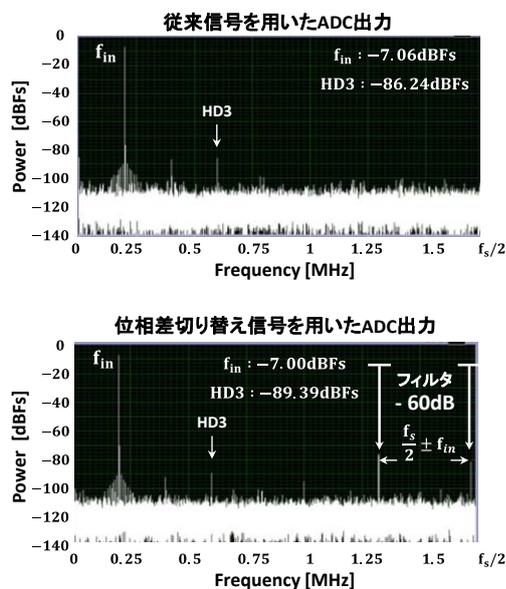


図 11 従来信号, 位相差切り替え信号による ADC 出力信号スペクトル

Fig.11. ADC output signal spectrum using conventional and phase switching signal.

5. まとめと今後の課題

今回従来信号, 位相差切り替え信号を用いて ADC の 3 次高調波の測定を行った。従来信号に対して位相差切り替え信号を用いた 3 次高調波の検出の方が小さいという測定結果を得た。位相差切り替え信号を用いることで AWG の 3 次高調波を低減し ADC 由来の 3 次高調波を検出しているためであると予想される。

今後, 純粋な正弦波を用いることで, ADC の 3 次高調波パワーを測定し, 位相差切り替え信号を用いた場合との比較検討を行う。このための純粋な正弦波発生 (高調波除去) や高感度の 3 次高調波パワー測定にはバンドパスフィルタやノッチフィルタの技術が重要である。(14)

謝辞 有意義な御討論をいただきました, 松浦達治氏, 山口隆弘氏, 辻将信氏, 梅田定美氏, 土橋則亮氏, 塩田良治氏, 渡邊雅史氏, 荒川隆彦氏, 遠坂俊昭氏, 高井伸和氏, 新津葵一氏 に感謝致します。

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) Akinori Maeda, Verigy, "A Method to Generate a Very Low Distortion, High Frequency Sine Waveform using an AWG" International Test Conference 2008
- (5) K. Wakabayashi, T. Yamada, S. Uemori, O. Kobayashi, K. Kato, H. Kobayashi, K. Niitsu, H. Miyashita, S. Kishigami, K. Rikino, Y. Yano, T. Gake, "Low-Distortion Single-Tone and Two-Tone Sinewave Generation Algorithms Using an Arbitrary Waveform Generator", IEEE International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, Santa Barbara, CA (May 2011)
- (6) T. Yamada, O. Kobayashi, K. Kato, K. Wakabayashi, H. Kobayashi, T. Matsuura, Y. Yano, T. Gake, K. Niitsu, N. Takai, T. J. Yamaguchi, "Low-Distortion Single-Tone and Two-Tone Sinewave Generation Using Σ DAC", IEEE International Test Conference (poster session), Anaheim, CA (Sept. 2011).
- (7) 安部文隆, 加藤啓介, 若林和行, 小林修, 小林春夫, 新津葵一「インターリーブを用いた低歪み2トーン信号発生技術」電気学会電子回路研究会, ECT-11-084, 長崎 (2011年10月20日).
- (8) K. Kato, F. Abe, K. Wakabayashi, T. Yamada, H. Kobayashi, O. Kobayashi, K. Niitsu, "Low-IMD Two-Tone Signal Generation for ADC Testing", IEEE International Mixed-Signals, Sensors, and Systems Test Workshop, Taipei, Taiwan (May 2012).]
- (9) K. Kato, F. Abe, K. Wakabayashi, C. Gao, T. Yamada, H. Kobayashi, O. Kobayashi, K. Niitsu, "Two-Tone Signal Generation for Testing of Communication Application Devices", 第25回 回路とシステムワークショップ, 淡路島 (2012年7月).
- (10) 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 : Theory and Applications, Special Issue on Analog, Mixed-Signal, RF, and MEMS Testing, Springer, Vol.28, no2, pp.152-163 (April, 2012).
- (11) 安部文隆, 加藤啓介, 小林春夫, 小林修, 高井伸和, 新津葵一「任意波形発生器を用いた低歪み信号発生技術でのアナログフィルタ要求性能」電気学会電子回路研究会, ECT-12-075, 熊本 (2012年10月4日).
- (12) 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 Electrics, Special Section on Analog Circuits and Related SoC Integration Technologies, Vol. E96-C, no.6, pp.850-858 (June 2013).
- (13) K. Kato, F. Abe, K. Wakabayashi, C. Gao, T. Yamada, H. Kobayashi, O. Kobayashi, K. Niitsu, "Two-Tone Signal Generation for Communication Application ADC Testing" The 21st IEEE Asian Test Symposium, Niigata, Japan (Nov.2012).
- (14) T. Komuro, S. Sobukawa, H. Sakayori, M. Kono, H. Kobayashi, "Total Harmonic Distortion Measurement System for Electronic Devices up to 100MHz with Remarkable Sensitivity", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Volume 56, Issue 6, pp. 2360 - 2368 (Dec. 2007).