

Dithering 技術を用いた 1-bit ADC の歪補償に関する研究

A study on Distortion Compensation of 1-bit ADC Using Dithering Technique

○松永 拓也, 布施 匡章²
*Takuya Matsunaga¹, Masaaki Huse²

Abstract: : Analyze 1-bit ADC distortion using Dithering technique. Inverse characteristics are obtained from the results of the analysis. Apply the inverse characteristic to the output signal to achieve distortion compensation.

1. まえがき

第6世代移動通信システム(6G)において大容量通信を実現するため、複数の周波数帯を利用する多くの技術が検討されている。複数の周波数帯を利用するとき、受信機の数が多く必要となるため、装置の柔軟性と小型化のための技術が求められている。特に小型化においては、1-bit ADC (Analog to Digital Converter) を用いるための検討が多く行われている⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。Dithering 技術⁽¹⁾を用いた 1-bit ADC は $\Delta\Sigma$ ADC のように複雑な回路を必要としないため、 $\Delta\Sigma$ ADC⁽²⁾と比較し簡単な構成で実現でき、ハードウェア実装時には小型化が可能であるが、受信機として用いた際に 1-bit ADC の非線形歪により受信信号に非線形歪が発生することが問題である。しかしながら、この非線形特性についてはあまり明らかにされておらず、この歪性能の補償についても検討されている例はない。

本稿では Dithering 技術を用いた 1-bit ADC の歪性能を MATLAB®を用いてシミュレーションを行い、解析し歪性能を補償する方法を検討する。

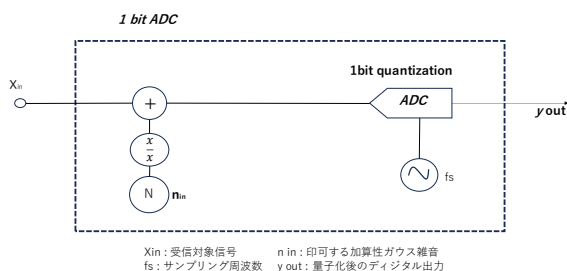


図1 1bitADCの基本構成

2. 1-bit ADC

2.1 基本原理 図1に基本的な 1-bit ADC の基本構成を示す Dithering 技術の応用として、帯域を制限したノイズ信号を入力信号に加算し、その信号に対してサンプリング周波数に従って 1-bit 量子化を行う構成である。

同図中、 x_{in} は受信対象信号、 n_{in} は印加する加算性ガウス雑音、 f_s はサンプリング周波数、 y_{out} は量子化後のデジタル出力をそれぞれ示している。1-bit ADC は入力信号が正の場合に+1、負の場合-1をそれぞれ出力する。

2.2 シミュレーション環境

入力信号 x_{in} の周波数 $f_{in}=28$ GHz、電力 $P_{in}=0$ dBm、サンプリング周波数 $f_s=512$ Gsps、印加する雑音 n_{in} の電力 $P_n=0$ dBm、帯域 BW_n は 57 GHz~251 GHz に制限した場合と帯域制限をしなかった場合、デジタル出力 y_{out} の測定を行った。

3. シミュレーション結果

1bit-ADC の歪特性を評価するために IMD3 (Third-order Intermodulation Distortion) 評価を行った。中心周波数 $f_c=28$ GHz、周波数間隔 $\Delta f = 500$ MHz の 2 トーン信号を用いた。印加する雑音の電力 P_n を 0 dBm, -10 dBm, -20 dBm に、印加する雑音の帯域を変化させシミュレーションを行った。信号と印加する雑音の帯域が被らないように帯域幅 BW_n を 57 GHz~251 GHz に制限した際の IMD3 特性を図2に、印加する雑音の帯域を正弦しなかった際の IMD3 特性を図3に示す。同図では横軸に入力信号である 2 トーン信号の平均電力 P_{ave} を、縦軸に出力された 2 トーン信号の平均電力 P_{tone} および三次相互変調歪信号の平均電力 P_{IM3} をそれぞれ青色(四角)とオレンジ色(三角)でプロットしたものである。

これらの図から IMD3 特性の形状は印加した雑音の帯域幅によって変化しないことが分かった。

帯域を制限しないと予期せぬ問題が起こる可能性があるため、これより先は帯域を制限して考える。

1 : 日本大学, Nihon University 2 : 日本大学, Nihon University

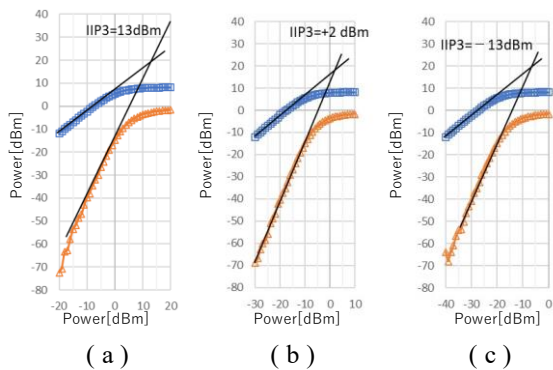


図2 IMD3 特性 (帯域制限あり)

(a) Pn=0dBm (b) Pn= - 10 dBm (c) Pn= - 20 dBm

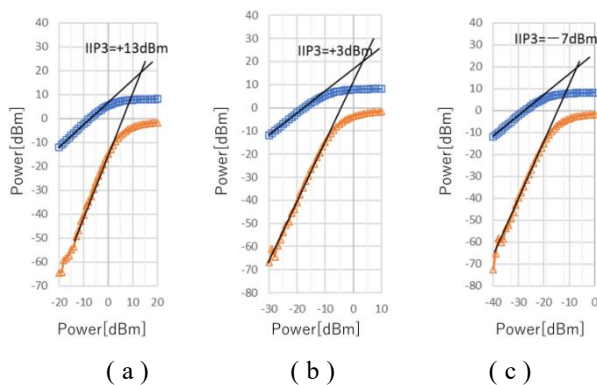


図3 IMD3 特性 (帯域制限無し)

(a) Pn=0dBm (b) Pn= - 10 dBm (c) Pn= - 20 dBm

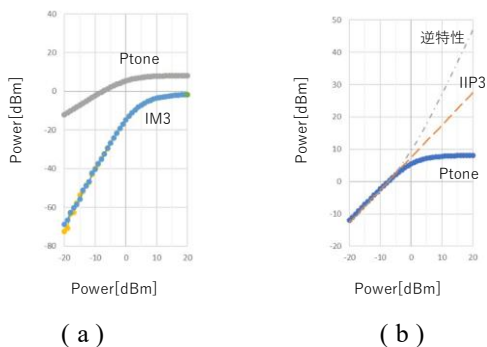


図4 (a)IMD3 特性 (帯域制限あり)

(図2(b), (c)を右方向にシフト)

(b) 逆特性

図2の(b), (c)をそれぞれ P_{ave} を+10 dBm, +20 dBmし、右方向にシフトすると図4の(a)のようになる。このことから印加する雑音の電力が変化しても特性が変わらないことが分かる。これより IIP3 値の式は以下の式(1)によって表される。

$$IIP3 = P_{ave} + 7.5 - P_n \quad (1)$$

この式(1)によって得られる直線を中心とし、 P_{ave} の線対称となる逆特性を表す式は

$$逆特性 = 2 \times IIP3 - P_{tone} \quad (2)$$

となる。

4. まとめ・今後の展望

本稿では Dithering 技術を用いた 1-bitADC の歪特性が帯域幅によって変化しないことを確認することが出来た。今後はこの歪特性を解析し、式(2)のような逆特性を出力信号に印加し、歪を補償する回路を構成、MATLAB®を用いてシミュレーションを行い歪特性を確認し、Dithering 技術用いた歪補償回路を検討・提案する。

5. 参考文献

- [1] R.M.Gray,T.G.Stockham : "Dithered quantizers",IEEE Transactions on Information Theory, Vol.39,Issue 3,pp.805-812(1993)
- [2] P.M.aziz,H.V.Sorensen,and J.vn der Spiegel : "An overview of sigma-delta converters"IEEE Signal Processing Magazine, Vol.1m3,Issue 1(1996)
- [3]大田黒拓斗・齋藤将人・山里敦也:「広帯域雑音と 1bit ADC を用いた 16QAM-OFDM 信号受信実験」, 信学技報, RCS2022-247(2020)
- [4]H.S.Hussein,S.hussein and E.M.Mohamed : "Efficient channel estimation techniques for MIMO systems with 1-bit ADC",China Communications,Vol.17, Issue 5(2020)
- [5]齋藤将人・山里敦也 :「1bitADC を用いた OFDM 信号受信実験」通信技報, RCS2022-64(2022)
- [6]H.S.hussein : "Sparse MLD Decoder for 1-bit ADMIMO Constant Envelope Modulation", IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking(2018)
- [7]Y.Nakashima, T.Yamazato, S.Arai, H.Tanaka and Y.Tadokoro : "Noise-Aided Demodulation With One-Bit Comparator for Multilevel Pulse-Amplitude-Modulated Signals", IEEE Wireless Communications Letters, Vol17, Issue5(2018)
- [8]J.Mo and R.W.Heath : "Capacity Analysis of One-Bit Quantized MIMO Systems With Transmitter Channel State Information", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol63, Issue20(2015)
- [9]布施 匡章 :「ブラインド非線形補償による 1-bitADC 受信機の性能改善」電気学会論文誌 A, Vol.143,No.9,pp301-306,(2023)