

主論文の要約

論文題目 1bit A/D 変換器に雑音を活用した受信機の
解析
(An analysis of a receiver with
noise-aided 1bit analog-to-digital
converters)

氏名 中島 康雄

論文内容の要約

本研究では、雑音によって性能が改善する現象(確率共鳴)の、通信分野への応用について検討を行う。従来の工学において雑音は特性劣化の原因とされており、雑音を排除することで性能を向上させるというアプローチが多く取られていた。それに対し、雑音を活用するアプローチでは、雑音が加わることによる性能改善を利用することで、非線形性の改善や省エネルギー化が期待できる。雑音を活用するアプローチは工学分野において広がりを見せており、通信分野においても検討が行われている。従来研究では、非線形性によって検出限界を持つ受信機において検出できない微弱な信号を、雑音を活用することによって検出することを目的としていた。しかしながら、これらの研究が想定している状況は限定的であり、応用が困難であるという問題があった。

そこで本研究では、通信システムへの利用において汎用性が高く、かつ雑音を活用できる非線形系として、分解能が 1bit のアナログ-デジタル変換器(1bit A/D 変換器, 1bit ADC)に着目する。ADC は連続時間において連続的な振幅を持つアナログ信号に対してサンプリング及び量子化を行い、離散時間において離散的な振幅を持つデジタル信号に変換する回路である。ADC の性能を特徴付けるパラメータの一つである分解能は ADC の出力であるデジタル信号における、振幅の量子化数である。ADC における量子化は振幅に対する非線形な処理であるが、分解能に応じてその非線形性による誤差の大小が決まる。分解能が 1bit の場合は特に量子化誤差が大きく、非線形系が大きい。そのため、信号処理における特性が劣化するものの、高分解能 ADC の利用が技術面や消費電力の面で困難であ

る場合において、その代替としての利用が注目されている。一方、雑音と 1bit ADC を組み合わせた場合の特性については、理論的な検討が十分になされていない。本研究では、1bit ADC 受信機の特性について、確率共鳴現象に着目した解析を目的とする。本研究で提案する、より一般的な解析手法とそれによって得られる結果は、1bit ADC 受信機における信号処理や性能評価・設計に寄与すると考えられる。本研究の目的を達成するために、以下について検討を行う。

1. 雑音を活用した 1bit ADC における入出力特性
2. 雑音を活用した 1bit ADC の出力を利用した信号復調性能

まず 1. では、1bit ADC 受信機の構成要素である、単一の 1bit ADC の出力を解析対象とする。この解析では、解析対象をその入出力特性によってモデル化することを目的とする。対象の入出力特性を明らかにすることで、雑音を活用した 1bit ADC をブラックボックスとした信号処理が可能になる。1bit ADC の出力を複数用いる受信機に対しても、単一のモデルの組み合わせとしてモデル化が可能になる。また得られた解析結果を用いて、雑音を活用した 1bit ADC と量子化に対して理想的な系である線形系とを、入出力特性を基にした比較を行う。それにより、雑音を活用した 1bit ADC の特性を、どの程度まで線形系に近づけることができるかを解明する。これらの検討は 3 章及び 4 章において行う。

次に 2. では、1bit ADC 受信機における、複数の 1bit ADC の出力を解析対象とする。この解析では 1bit ADC 受信機における信号復調性能を明らかにすることを目的とする。まず、複数の 1bit ADC の出力から復調が可能となる原理を示し、復調誤りを最小とする復調手法について述べる。次に、その復調手法を具体的な変調方式に対して適用した場合について誤り率特性を評価し、線形受信機との性能差を明らかにする。これらの検討は、5 章において行う。

1 章では本研究の背景と目的及び、位置付けについて述べた。1bit ADC の利用は、ミリ波通信におけるマルチアンテナ受信機など、高分解能 ADC の利用が技術面や消費電力の問題によって困難な場合に、その代替としての利用が期待されている。1bit ADC を用いた受信機に関する研究は 2015 年頃から増加傾向にある。一方で理論検討は少なく、従来 1bit ADC 受信機の解析に用いられていた手法である *Bussgang decomposition* は、その仮定のために、ガウス雑音加わる場合かつ、信号対雑音電力比(SNR)が $0(-\infty\text{dB})$ の場合についてしか評価できなかった。この手法に代わるより一般的な解析手法は未だ提案されておらず、1bit ADC 受信機における理論検討は未だ途中中であると考えられる。これに対して、本研究では確率共鳴を基にした、より一般的な解析手法を提案する。

2 章では、雑音を活用した 1bit ADC のシステムモデルについて述べた。まず、雑音を活用した 1bit ADC の原理について簡単に述べ、1bit ADC を用いた受信機に必要な要素について述べた。次に、1bit ADC 受信機を一般化したシステムモデルと、本論文で扱う雑音に対して理想化した解析モデルについて述べた。雑音を活用した 1bit ADC 受信機においては、適切な分布の雑音と、複数の出力値が必要である。また、受信信号における各出力値にお

いて雑音の影響が低相関であることが望ましい。解析モデルにおいては雑音が各出力値に与える影響が独立であると仮定し、1bit~ADC 受信機における理想的な特性を評価する。

3章では、解析モデルの一部分に着目し、雑音を活用した1bit ADC 受信機を構成する最小要素である、1bit ADC の単一の入出力特性に着目した解析について述べた。まず、雑音を活用した1bit ADC の出力の分解手法について提案した。雑音を活用した1bit ADC の出力における期待値と分散に着目することで、出力を確定信号と出力雑音に分解して表現することができる。分解後の確定信号は、入力雑音の確率密度関数に依存した入力振幅の関数となる。その関数が級数展開可能な場合、さらに線形項と高次の項に分解が可能であり、高次の項が十分に小さい場合、出力は入力に対して線形応答する。出力雑音の特徴として、その分散がシステムへの入力振幅に依存する点が挙げられる。提案した解析手法は、従来用いられていた解析手法である **Bussgang decomposition** に対して仮定が一般的である上、出力雑音における入力振幅への依存性を表現することができる。また、代表的な確率密度分布を持つ入力雑音に対して提案解析手法を適用した場合の例についても示した。雑音を活用した1bit ADC は、入力雑音の分布に応じて特性が改善する条件や、入力雑音の分散の増加に対する傾向が異なるが、提案解析手法を用いることで、どの雑音分布に対しても解析が可能になる。以上の様に、本章で提案した解析手法を用いることで、雑音を活用した1bit ADC の特性を把握・評価することが可能である。提案解析手法は1bit ADC を用いた受信機の解析・設計において有用であると考えられる。

4章では、3章で得られた解析結果を用いて、雑音を活用した1bit ADC と線形系の性能を、出力の二乗誤差の面から比較を行った。比較において、解析モデルを拡張し、独立な複数点のサンプル点の平均から入力振幅を区別する場合を扱った。先述したように、雑音を活用した1bit ADC の特性は入力雑音に依存して決定される。入力雑音がガウス雑音の場合は、出力期待値が高次の項を含むため、出力における確定信号と線形関数の二乗誤差と出力雑音の分散の両方を用いて比較を行う必要がある。ガウス雑音の場合は、1bit ADC の出力分散が線形系より小さくなる範囲で出力期待値の線形関数との誤差が大きくなるため、出力全体の二乗誤差が線形系の出力の二乗誤差を下回ることはない。また、SNR の観点から見ると入力 SNR が0に近づくにつれて1bit ADC の出力 SNR の劣化は約-1.96dBへと漸近していく。入力雑音が一様雑音の場合においても同様に評価が可能である。提案解析手法を用いることで各状況における、雑音を活用した1bit ADC と線形系の比較を行うことができる。

5章では、雑音を活用した1bit ADC 受信機における信号復調手法と、それらの性能について述べた。まず、雑音を活用した1bit ADC 受信機のシステムモデルと、この受信機における一般的な復調手法について示した。本受信機においては2通りの信号復調手法が考えられる。一つ目は1bit ADC の出力値をそのまま用いてシンボル推定を行う方法、二つ目は1bit ADC の出力値から信号・シンボルを再生した後にシンボル推定を行う方法である。前者の手法は誤り率を最小とすることができる。後者の手法は誤り率を最小にするとは限ら

ないが、他の信号処理との組み合わせや、推定における計算量の削減が期待できる。また、雑音を活用した 1bit ADC の出力値を線形結合して再生した信号・シンボルも確定信号と出力雑音に分解でき、その確定信号は入力雑音に応じて信号・シンボルに対する線形性を持つ。その後の節では、雑音を活用した 1bit ADC 受信機を具体的な変調信号に適用した場合の特性について数値例を示した。AWGN チャネルの場合、本受信機は最小で 1.96dB 差まで線形受信機の性能に迫ることができる。本受信機と線形受信機の性能差は低 SNR になるほど小さくなっていく。本受信機での復調に用いる独立なサンプル点数を多くすることで、より高い SNR に対しても線形受信機との差を縮めることができる。また、低 SNR 下においては、本受信機の出力における確定信号の線形化範囲が拡大するため、線形系における理論を用いた信号復調や、信号の直交性の利用が可能になる。これらが可能な SNR の範囲は、3 章での解析結果を用いることで求めることができる。また、狭帯域雑音と広帯域雑音が混在する場合における、受信機の特性についても述べた。これらの場合は 1bit ADC 受信機にとって雑音が理想的ではないが、各サンプル点における相関が低い、広帯域雑音のみが改善に寄与し、復調が可能になることがわかった。以上の様に、本章では雑音を活用した 1bit ADC 受信機によって、各種変調信号が復調である可能なことを示した。また、各パラメータの影響や、線形系との性能差について数値例を示した。

6 章では、本論文の総括と今後の展望について述べた。本論文では、雑音を活用した 1bit ADC 受信機の解析を行い、その特性について定式化した。この検討により、1bit ADC を用いた受信機が、線形受信機の持つ性能に最大限近づく条件及び、その時の性能について示した。本論文で扱ったシステムモデルは、基本的なものであり、解析を行うために単純化・理想化した部分がある。今後の展望として、本論文で得られた解析手法を、パラメータ推定を含めた復調手法や、他の信号処理・解析手法との組み合わせることが検討課題として挙げられる。この様な応用的な検討に適用することで 1bit ADC 受信機の進展に寄与し、ミリ波を用いた通信システムなどの高分解能 ADC では実現が困難な通信システムの実現に寄与することが期待できる。