

報告番号	甲 第 11892号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 微弱信号を想定した確率共鳴受信機の
提案と評価
(Proposal and Evaluation of a Stochastic
Resonance Receiver for Weak Signals)

氏 名 田中 裕也

論 文 内 容 の 要 旨

確率共鳴(Stochastic Resonance: SR)とは、系の雑音強度の増大に対して系の応答が向上する非線形現象のことである。線形系では、系の入力雑音強度が増大すると共に応答は劣化していく。一方、確率共鳴系においては、雑音強度の増大と共に応答が向上していき、極大に至ったのちにやがて低下していく。このように確率共鳴系では適切な雑音強度下で応答が最適化される。この特異な性質を持つことにより、確率共鳴は工学分野を含めた様々な分野で応用が期待されている。

従来、雑音は工学的には邪魔なものとしてフィルタ処理等を駆使して積極的に取り除かれてきた。しかし、それとは異なるアプローチとして雑音をあえて利用することで応答を改善できる可能性がある。例えば、生態系は雑音を巧く情報処理に活かすことで、雑音に埋もれた微弱な信号であっても感知できるしくみを有している。このしくみを工学的に応用することができれば、従来の系では感知できない、すなわち、受信機の感度以下の微弱信号でさえも受信できるようになると期待される。

本研究の目的は、確率共鳴を用いた超高感度な受信機を実現することである。確率共鳴受信機は、微弱信号を検知する高感度なセンシングやセンサノード等における消費電力の削減などへの用途に対して有効性が期待できる。

従来の受信機の感度を η として定義する。これは受信機で検出することができる最低レベルの信号強度を示している。よって、信号強度が η を超えない限り受信機は信号を検知することができない。一方、閾値以下の信号に故意に雑音を印加すると雑音の確率分布に従い確率的に η を超え、そのとき受信機は信号の有無を検知することができる。確率共鳴系を用

いた受信機では、意図的に雑音を用いることで閾値以下の信号を検知することが可能である。これが確率共鳴の簡単な原理である。

一般的に、受信機の雑音において支配的なものは熱雑音である。熱雑音は全ての電子回路で必ず発生するものであり、受信機の特性を劣化させる原因となる。このとき、熱雑音の大きさは絶対温度、帯域幅、抵抗に応じて増大することが分かっている。熱雑音の影響を低減するためには、絶対温度を下げる、帯域幅を制限する、抵抗値を下げる等との方法が考えられる。それに対して、本論文では雑音を意図的に利用して特性を改善する手法を提案する。

例えば、絶対温度が常温付近(=300K)、帯域幅 1MHz、抵抗が 50Ω のときの熱雑音の電圧を求めると、およそ $0.9\mu\text{V}$ となる。この場合において、受信信号レベルが $1\mu\text{V}$ のときを想定すると、そのときの信号対雑音比は約 0dB となる。このような環境下では信号は雑音に埋もれてしまい、後段に低ノイズアンプで信号を増幅しても雑音成分も同時に増幅されるため、信号対雑音比を改善することはできない。一方、確率共鳴系では、雑音を利用することで微弱信号を検出することができるので、このような環境下への適用に対して有効性が高いと考えられる。

本研究では、微弱信号を想定した確率共鳴受信機を提案し、その有効性を評価する。本研究の目的は以下の2つである。

- 1 確率共鳴受信機の基礎特性を明らかにし、従来の受信機との特性比較を通して、確率共鳴受信機の有効性を明らかにする。
- 2 確率共鳴受信機の設計において、確率共鳴受信機の特性を改善するための方法を検討し、最適な確率共鳴受信機の設計方法を考案する。

目的 1 については、受信機の特性の評価指標として一般的に用いられるビットエラーレート(BER)を用いて評価を行う。そのときに、確率共鳴受信機では誤り率が最適となる雑音強度が存在することを数値シミュレーションによって確認する。また、そのときの最適誤り率は従来の受信機よりも劣化するが、確率共鳴を用いることの利点は、非線形系の閾値以下の微弱な信号を検出できる点である。このときの非線形系の閾値と信号レベルの比を確率共鳴受信機の受信感度と定義し、確率共鳴受信機の有効性について議論する。

目的 2 については、確率共鳴受信機の特性を決定付ける要素として、非線形系、印加雑音、送信信号の3つの要素に着目し、それらが確率共鳴受信機の特性に与える影響について評価を行う。最適な確率共鳴受信機の設計方法について議論し、そのときの有効性を明らかにする。

本論文では、微弱信号を想定した確率共鳴受信機の提案とその評価について記した。確率共鳴受信機の基礎特性を明らかにし、従来の受信機との特性比較を通して、確率共鳴受信機の有効性を明らかにした。また、確率共鳴受信機の設計において、確率共鳴受信機の特性を改善するための方法を検討し、最適な確率共鳴受信機の設計方法について議論した。

1章では、本研究の背景と目的に加え、確率共鳴の関連研究と本研究の位置付けについて

述べた。

確率共鳴は 1981 年に Benzi らによって発見された概念である。それ以来、多くの分野でその特異な特性が注目されてきている。確率共鳴の関連研究分野は大きく分けて、生態系、物理、信号処理、デバイス応用に分けられる。

確率共鳴現象はヒトを含めた生態系に広く存在することが発見され、例えば生物の知覚センサでは、捕食者のセンシングに雑音が有効活用されていることが分かってきた。このとき、生物は高感度な知覚機能を低消費エネルギーで実現しており、生態系の優れた機能を工学的に利用するために、広い分野で応用が提案されつつある。特に、この生態系の特長をモデル化した並列加算ネットワークは、工学的利用に向けて有効性が高いと考えられる。さらに、物理分野においては並列加算ネットワークの他にも有効な系が考案されてきている。

デバイス応用においては、FET における現象発現や知覚センサの開発、また低消費メモリの開発など様々な分野で応用例が考案されてきている。

信号処理の分野では、例えば、信号推定やスペクトルセンシング、信号抽出といった応用例が提案されてきている。いずれの研究においても微弱な信号を対象としており、微弱信号の検出確率を向上できる点で確率共鳴が有効である。これらの関連研究の中で、著者は 2011 年頃から研究を開始し、確率共鳴の通信の応用に向けて研究を行ってきた。

2 章では、確率共鳴の理論的な枠組みについて説明した。雑音によって微弱な信号を検出するメカニズムについて、二重井戸ポテンシャル系、閾値を持つ非線形系を用いて説明した。また、確率共鳴の応答性能について、最適受信機と比較し、確率共鳴を用いたときの応答性能が最適受信機の性能を上回らないことを述べた。確率共鳴の有効性を見出すためには、最適受信機では扱うことのできない環境下での適用を検討することが必至である。すなわち、本研究で検討するような閾値以下の微小信号を対象とすることで、確率共鳴の有効性を見出すことができる。

3 章では、確率共鳴の信号処理への応用例を示し、確率共鳴の有効性について議論した。確率共鳴を有効利用できる環境は限られてはいるが、線形系では検知できない閾値以下の微弱な信号を検出する場合、非ガウス環境下の場合には確率共鳴を用いる利点があると期待できる。本論文では、前者の閾値以下の微弱信号を想定した場合に確率共鳴を用いることを検討し、確率共鳴受信機の提案と評価を行った。

4 章では、本論文で扱う確率共鳴受信機モデルを記した。確率共鳴系の重要な 3 つの要素として、非線形系、印加雑音、送信信号について述べた。

5 章では、確率共鳴受信機の基本的な特性について、ビットエラーレート(BER)の評価指標を用いて確率共鳴受信機の特性を評価した。確率共鳴受信機において、誤り率が最適となる雑音強度が存在し、雑音強度を適切に調整することで、受信機の特性を最適化することが可能であることを数値例において示した。また、確率共鳴受信機の受信感度を定義し、確率共鳴受信機の有効適用環境を示した。

6章では、確率共鳴受信機的设计について記した。確率共鳴系における重要な構成要素として、非線形系、印加雑音、送信信号の3つの要素に着目し、それらの要素が確率共鳴受信機に与える影響について評価した。

6.2節では、非線形系が確率共鳴受信機に与える影響について評価した。非線形系において、3レベル素子、コンパレータ、シュミットトリガを用いたときの確率共鳴受信機の特性比較を行い、3レベル素子を用いたときの誤り率特性が最も良いことを示した。

6.3節では、印加雑音が確率共鳴受信機に与える影響について評価した。印加雑音として非ガウス雑音を用いたときの確率共鳴受信機の誤り率特性を評価した。数値例において、2値雑音を用いたときに誤り率特性が改善されることを示した。

6.4節では、送信信号が確率共鳴受信機に与える影響について議論した。送信信号において、干渉が含まれる場合を想定し、干渉によって確率共鳴受信機の誤り率特性が改善されることを示した。さらに、マルチキャリア変調において、サブキャリア数の増大と共に誤り率が改善されていくことを明らかにした。

7章では、並列加算ネットワークを用いたとき確率共鳴受信機の特性について、入出力相関、誤り率の評価指標を用いて記した。並列加算ネットワークは確率共鳴系の応答性能を大幅に改善でき、微弱信号の検出において有効な手段であることを明らかにした。

本論文において得られた知見に基づいて、確率共鳴の適用環境の条件として、

- 信号が微弱であること
- 低データレートであること
- 誤り率の劣化を許容できること

の3つの条件が挙げられる。

確率共鳴の利点は信号の検出確率を向上できることである。従来の受信機では検出できない微弱な信号を対象としたときに、有効であると考えられる。また、広帯域な雑音を利用するために非線形素子は十分に大きな入力帯域を持つ必要があるが、実際には入力帯域は有限であるため高データレートでの通信は難しい。また、確率共鳴受信機の誤り率特性は最適受信機の特性と比べて劣化するため、誤り率の劣化を許容できる用途において、確率共鳴の適用を考慮する必要がある。

確率共鳴の応用例として、例えば、IoTにおける環境モニタリングへの適用が期待できる。生態系に倣った並列加算ネットワークを用いることによって、高感度でエネルギー効率の良いセンシングを実現可能である。このとき、環境モニタリングにおいて低データレートでかつ、誤り率をある程度許容できるのであれば確率共鳴の強みを発揮できると考えられる。確率共鳴を用いることで、センサの高感度化、消費電力の低減などの有効性が期待できる。