

学位論文の要旨

氏名

迫田 和之

学位論文題目

非線形力学系としての大容量無線通信 ～その特性と性能改善～

本論文は、大容量無線通信を非線形力学系として捉え、その力学系の特性の把握と通信性能改善の面から研究したものである。非線形力学系に関連する研究は多岐にわたり、理学の分野では、力学系を数理的・実験的に解析し、その特性を調べ、元の系で起こる現象を理解する研究がなされている（熱対流のモデルとしてのローレンツ方程式など）。一方、工学の分野では、意識的に非線形力学系を利用して有用な機能を実現するといった応用がなされている（ニューラルネットワークを用いた画像認識など）。また、ノイズを含むデジタル画像の修復などの推定問題では、BP（Belief Propagation）法という一定の規則による繰り返し計算を用いて、徐々にノイズの少ない元の画像を推定する方法が用いられている。この繰り返し計算は、繰り返し回数を時間、多数の画素データを状態変数とする大自由度非線形力学系と見なすことができ、状態変数が固定点に至ることが、推定問題を解くことにあたる。このような繰り返し計算を非線形力学系と見した研究は殆どなされていない。

その背景の下、本研究では、無線通信に着目する。無線通信では受信信号から送信信号を推定する復号という過程があり、通信容量を増大させた大容量無線通信（大規模MIMO）の復号法としてBP法を用いた繰り返し推定法（BP復号）が提案されつつある。BP復号を用いた大規模MIMOは、画像修復での例と同様、大自由度非線形力学系である。そこで、非線形力学系の立場からBP復号を用いた大規模MIMOを詳細に解析し、その問題点を明らかにし、その解消と性能向上の可能性を探る。

また無線通信において、通信容量に加えて重要なものは情報安全性である。無線通信では既存のセキュリティと併用できるカオス通信（カオスを示す非線形写像を用いて送信信号を暗号化する秘匿通信）が注目されている。既にカオス通信をMIMOに導入したカオスMIMOも提案されているが、先に述べたBP復号とうまく整合せず（殆ど推定することができない）、大規模MIMOでは使えない。

そこで、カオスMIMOの暗号方法を力学系の特性の視点から修正し、BP復号に適合するカオス暗号を構築する。

本論文の構成は以下の通りである。

1章では、研究背景について述べる。

2章では、本研究で取り扱う無線通信方式であるMIMOの枠組みを説明し、本研究に関連の深いカオスMIMOとBP復号について非線形力学系の視点から詳細に紹介する。

3章では、BP復号が大自由度非線形写像系であることを指摘し、先行研究でのBP復号で不完全であった点を取り除き、BP復号での問題点の解決と、繰り返し計算による状態変数の振る舞いを詳細に調べる。

BP復号の不完全な点は、繰り返し計算の際に評価する残留干渉成分の効果を見積もる方法が確立されていないことである。多くの研究では送信した信号すなわち正解の情報が用いられていて、実用できない形式である。そこで、力学系の安定固定点に至ることが復号にあたるように残留干渉成分の評価を力学系の物理量で代替することで、実際の無線通信で実現できる方法を提案し、数値実験で性能を確認する。また、BP復号の力学系を調べ、どのような種類の振る舞いがどの程度存在するかを把握し、性能との関係を探る。

4章では、カオスMIMOでのカオス暗号がBP復号で復号できないことを明らかにし、その解析に立脚してBP復号に適合するカオス暗号（BP適合カオス暗号）を提案する。ただし、提案したBP適合カオス暗号では、BP復号が機能するものの、カオス暗号化を行わない場合と比べ復号精度が低くなる。その原因を明らかにし、問題を回避する改良BP適合カオス暗号を構築する。それにより、無線通信で要求される復号精度の基準値を満たすことができ、BP復号を用いた大規模MIMOの情報安全性の向上が可能になると考えられる。

5章では、本研究の結果をまとめ、本研究の今後の課題と展望を述べる。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Nonlinear dynamics in high-capacity wireless communication systems

Name: Sakoda Kazuyuki

The purpose of this study is to understand wireless communication as a nonlinear dynamical system. By analyzing the system from the point of view of nonlinear physics, I improve the communication performance of the systems.

Nonlinear dynamical systems support a rich variety of complex behaviors in nature. The main purpose of this field is to describe such a behavior in terms of a mathematical model. The model is studied to understand its characteristics. We can thus grasp the characteristics of the complex phenomena in nature by using mathematical models.

Nonlinear physics contributes also in the engineering field. An interesting example is the iterative estimation methods, e.g., Belief-Propagation (BP) estimation and Maximization-Expectation (ME) estimation. True object is predicted by estimating iteratively in these methods. The estimation error is removed gradually, leading to precise prediction of the true object. This iterative process is generally defined by using nonlinear equations and, the process is therefore studied as a nonlinear dynamical system. The iteration is considered as a time evolution of the system. The prediction of the true object thus corresponds to the conversion of the system to a fixed point.

In this study, I focus on the wireless communication systems. In the wireless communication, the receiver estimates the transmitted signals from received signals. This process is called the decoding. The BP iterative estimation is a potential decoding technique in large-capacity wireless communication systems in which large numbers of antennas are deployed (massive MIMO, massive Multiple-Input Multiple-Output). I therefore study the decoding process in the massive MIMO system from the point of view of the nonlinear physics. I identify several open problems in the BP decoding in massive MIMO systems and solve them to improve the decoding performance.

In Chapter 1, I show the background of the research field.

In Chapter 2, I review relevant previous studies on massive MIMO systems.

In Chapter 3, I reorganize the BP decoding process as a nonlinear dynamical system. By studying the iterative estimation in the system, I show that the BP estimation has an open problem in calculation of the PIC (parallel interference canceller). I propose an alternative evaluation technique and, based on that, propose three different estimating models. I numerically compare these models. The results show that the proposed models successfully predict the transmitted signals. I also investigate mathematical structure of the BP decoding processes. I detail the dynamical behavior of the system when the decoder fails to estimate the true signals. The analysis detects the cause of the estimation failure in part.

In Chapter 4, I introduce a chaos encryption to the massive MIMO systems. Encryption protocols are

generally introduced to the wireless communication systems for enhancing the security. I study a chaos encryption method proposed previously and, show that it cannot work with the BP estimation method. I thus reconstruct the chaos encryption method so that it works with the BP estimation. Numerical results suggest that the proposed encryption method works with the BP estimation in massive MIMO systems. Note that, in the proposed framework, the decoding accuracy of the BP method exceeds the standard criteria for establishing wireless communication.

In Chapter 5, I summarize this study and future works.