

研究種目：特定領域研究
研究期間：2006～2009
課題番号：18079010
研究課題名(和文) 情報エントロピーの概念に基づいた情報統計力学の再構築と情報通信理論への展開
研究課題名(英文) Reconstruction of statistical mechanical informatics via the concept of information entropy and applications to information and communication theory
研究代表者
田中 利幸 (TANAKA TOSHIYUKI)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号：10254153

研究分野：情報科学
科研費の分科・細目：情報学・ソフトコンピューティング
キーワード：情報統計力学，情報エントロピー，CDMA 通信，レプリカ法，ランダム行列

1. 研究計画の概要

本研究では、情報統計力学による解析に現れる諸量、諸概念について、情報理論の立場からそれらの意義を明らかにすることで、情報通信の諸問題に対する情報統計力学からのアプローチを構成する数理的構造を明確に把握することを通じて、情報通信理論分野の方法論として情報統計力学を定着させる基礎を構築することを目指している。

ランダム拡散 CDMA 通信路モデルを含む一般の線形ベクトル通信路を主要な検討対象として取り上げ、以下の検討を行う。

(1) 解析的性能評価

様々な条件のもとでランダム通信路行列を仮定した場合の線形ベクトル通信路の情報伝送能力に関して、レプリカ法による解析的性能評価を試みる。

(2) 並列干渉除去アルゴリズムに対する外部情報伝送(EXIT)解析

低密度パリティ検査(LDPC)符号の復号アルゴリズムのダイナミクスの研究に有用な EXIT 解析を、ランダム拡散 CDMA 通信路に対する並列干渉除去アルゴリズムに適用し、(1) のレプリカ解析結果と比較検討することで、解析に現れる諸量の情報理論的な理解を目指す。

(3) ランダム行列の固有値分布

共分散型の構造をもつランダム行列の漸近固有値分布について理論的な検討を行い、ランダム通信路行列を仮定した線形ベクトル通信路の情報伝送能力の解析への

の応用を試みる。

2. 研究の進捗状況

(1) 解析的性能評価

これまでに、線形ベクトル通信路において、任意の入力分布（ブロック符号化を考慮した場合を含む）および出力の成分ごとに独立な任意の信号劣化過程を仮定した非常に一般的な条件のもとで、通信路の情報伝送能力に関する解析的性能評価を行った。

さらに、受信側で通信路行列が未知であるような場合には、パイロット信号を使用するなどして通信路推定を行う必要があるが、そのような場合に、通信路推定の誤差を考慮した情報伝送能力の解析的評価を情報統計力学的アプローチにもとづいて実施した。得られた結果にもとづいて、受信器における性能と計算複雑度とのトレードオフやパイロット信号とデータとの最適な比率などの問題に関して、定量的な議論が可能であることを示した。

(2) 並列干渉除去アルゴリズムに対する EXIT 解析

これまでの研究では、成分ごとに独立な入力分布、ならびに出力の成分ごとに独立な任意の信号劣化過程を仮定した条件のもとで、確率伝搬法にもとづく並列干渉除去アルゴリズムの定式化を行った。現在は、得られたアルゴリズムに対して EXIT 解析を試みている段階である。結果が得られた段階で、項目(1)の解析的性

能評価に関する結果との比較検討を行う予定である。

(3) ランダム行列の固有値分布

これまでに、各成分が独立同分布に従う長方形列から構成される共分散型のランダム行列の漸近固有値分布に関する解析結果を基礎として、長方形列が疎である場合の漸近固有値分布に関する解析的検討や、長方形列が回転対称な確率法則に従う場合の Itzykson-Zuber の積分公式の検討を行った。前者については、漸近固有値分布が各行/各列の非零行列要素の個数分布や非零行列要素が従う分布に依存することを見出した。

また、情報通信分野の問題への後者の結果の応用として、ランダム拡散 CDMA 通信路において大システム極限で漸近的に最適な拡散符号系列の情報統計力学的アプローチによる特徴づけに関する検討を行った。入力がガウス分布に従う場合には結果が既知であるが、実用上重要な非ガウス入力の場合は研究がほとんどなされていないので、非ガウス入力の場合について検討し、完全電力制御の場合に WBE(ウェルチ限界を達成する)拡散符号系列が漸的に最適であるという結果、ならびに、不完全電力制御の条件を含む一般の場合については、ガウス入力の場合に最適であることが知られているいわゆる GWBE(一般化 WBE)拡散符号系列が、一般に非ガウス入力の場合には漸近的最適性を喪失することを明らかにした。

3. 現在までの達成度

おおむね順調に進展している。

ランダム行列の漸近固有値分布に関する解析的検討、ならびに線形ベクトル通信路の情報伝送能力の解析への応用などを研究内容に追加した点などにおいて、実際の研究活動が当初の研究計画とは異なってきているが、本研究課題のような理論的な研究を主体とする研究においては有り得べき程度の変更であると考えている。また、以下に記載したように、学術論文ならびに国際会議での発表などの形で本研究課題の研究成果を多く公にしてきており、概ね順調に関連する学界への貢献が達成できていると判断する。

4. 今後の研究の推進方策

基本的には従前の研究計画に従って研究を遂行する予定であるが、実際的な変調方式を想定しての数値シミュレーションを新たに実施することとし、新たに竹内啓悟(電気

通信大学電気通信学部助教)を研究分担者に追加し、当該シミュレーションの実施を担当するものとする。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- (1) T. Yano, T. Tanaka, and D. Saad, "A mean field theory of coded CDMA systems," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 41, no. 32, pp. 324022-1-15, Aug. 2008. (査読あり)
- (2) K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Yano, "Asymptotic analysis of general multiuser detectors in MIMO DS-CDMA channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 3, pp. 486-496, May 2008. (査読あり)
- (3) T. Nagao and T. Tanaka, "Spectral density of sparse sample covariance matrices," *Journal of Physics A: Mathematical and General*, vol. 40, no. 19, pp. 4973-4987, May 2007. (査読あり)

[学会発表](計44件)

- (1) K. Kitagawa and T. Tanaka, "Optimal spreading sequences in large CDMA systems: A statistical mechanics approach," 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, 2008年7月9日, カナダ・トロント。
- (2) T. Ikehara and T. Tanaka, "Decoupling principle in belief-propagation-based CDMA multiuser detection algorithm," 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, 2007年6月28日, フランス・ニース。