

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330117

研究課題名(和文) コグニティブ無線最適化へのカオス理論に基づいた複雑低相関ダイナミクスの応用

研究課題名(英文) Chaotic Theory on Complex Low-Cross Correlation Dynamics and Its Application to Optimization of Cognitive Radio

研究代表者

長谷川 幹雄 (Hasegawa, Mikio)

東京理科大学・工学部電気工学科・教授

研究者番号：50358967

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信トラフィックが急増しており、無線資源の効率的利用が重要となっている。コグニティブ無線は、状況に応じた無線資源の選択・切り替えにより、無線資源の利用効率を改善する技術である。本研究では、コグニティブ無線における最適選択を効率的に行うために、カオス理論に基づく複雑性を応用する。

コグニティブ無線の選択問題は、多腕バンディット問題や組合せ最適化問題として定式化し、複数のカオス的アルゴリズムを提案した。無線LANのスループット改善法では、実験によって有効性を示し、特許出願を行った。さらに、カオス低相関複雑ダイナミクスの理論体系を固め、ネットワーク・カオスと題した著書の執筆を行った。

研究成果の概要(英文)：Mobile traffic of wireless communication systems is rapidly increasing and efficient use of radio resource is becoming very important. Cognitive radio is technique to adaptively optimize radio resource usage by dynamic selection of the spectrum. In this research, for optimization of resource selection in the cognitive radio, I have applied complex dynamics of chaotic systems to maximize the performance. I have formulated the optimal selection problems in cognitive radio as multi-armed bandit problems and combinatorial optimization problems, and have proposed several chaotic algorithms to optimize them. For throughput optimization of wireless LAN, I have shown effectiveness of the proposed method by experiments using the real implemented systems, and have applied a patent. Furthermore, I have clarified the theory of low-cross correlation theory based on chaotic dynamics and published a Japanese book entitled Network Chaos.

研究分野：無線通信, カオス, ニューラルネットワーク, 情報ネットワーク

キーワード：無線通信 情報ネットワーク カオス 最適化 複雑系 Multi-Armed Bandit 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

携帯電話や無線 LAN などの無線通信システムの普及により、いつでもどこでもインターネットに接続可能なコピキタスネットワーク環境が実現されてきた。これに伴って、無線通信への需要が高まり、無線ネットワークの混雑や容量不足が大きな問題となっている。ところが、移動通信に適した無線周波数は枯渇してきており、通信容量の増加も限界に近づいてくる。即ち、周波数利用効率を改善し、利用可能周波数資源を開拓する技術の開発が重要となっている。そのような技術の一つとして、無線環境の状態に応じて適応的に無線資源の選択・切り替えを行うコグニティブ無線技術が注目を集め、そのような無線システムを最適化するアルゴリズムやプロトコルに関する研究の重要性が高まっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、コグニティブ無線における最適資源選択の問題を効率的に解くために、カオス理論に基づく複雑性を応用する基盤技術を確立する。以前の研究において、特定のカオスによって高次選択アルゴリズムを最も理想的に複雑化させることが可能であり、それによって高効率な選択が実現可能であることを、数理理論と数値実験で示していた。本研究では、コグニティブ無線におけるチャンネル選定や経路選定の選択問題に、この複雑選択理論を応用する。数理理論に基づいて設計するアルゴリズムを、コグニティブ無線の規格に則ったプロトコルで実装し、有効性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

コグニティブ無線システムを最適に動作させ、周波数効率の最適化を行うためには、各周波数チャンネルをセンシングさせ、収集した情報に基づいて最適なチャンネルや経路を選定させる技術が必要である。大規模なスペクトラムシェアリング型コグニティブ無線ネットワークにおいては、各々のコグニティブ無線システムが自律分散的に空き周波数帯のセンシングし、そこから周波数利用効率を最も向上するチャンネルを選択させる。このような問題を定式化するために、例えば、文献(L. Lai et al., "Cognitive Medium Access: Exploration, Exploitation and Competition", IEEE Trans. Mobile Computing, Vol. 10, No. 2, pp. 239-253, 2011)では、確率的な選択問題である Multi-Armed Bandit 問題として記述できることを示し、数理的にアルゴリズムの設計を行っている。

Multi-Armed Bandit 問題の解法として、カオス理論に基づく複雑性を用いることで、アルゴリズムの性能を大きく向上可能であることを示している。これまでにカオス理論に基づく複雑性を最適化問題の探索に応用し、

様々なベンチマーク問題を対象にその有効性を示している。負の自己相関を持つカオスを用いることで、非同期ネットワークにおける各ノードダイナミクス間の相互相関を最小化できることは数学的に示すことが出来る。このカオス理論に基づく低相互相関ダイナミクスを、選択問題や組合せ最適化の高次元空間探索に適用することによって、理想的な複雑探索が行えることを理論的に説明することが出来る。

このような理論を、Multi-Armed Bandit 問題の確率的選択アルゴリズムや、組合せ最適化問題における解探索アルゴリズムに適用し、高い性能を実現できることをコンピュータシミュレーションによって示してきた。Multi-Armed Bandit アルゴリズムは、トラフィック量推定に基づくチャンネル選定に応用可能であり、また、組合せ最適化アルゴリズムはネットワーク全体のトラフィックと経路を考慮した最適化に必要となる。

提案方式は、まずコンピュータシミュレーションによってアルゴリズムの有効性と性能検証を行い、さらに、それらを実験ネットワーク上に実装し、動作の確認と評価を行う。

### 4. 研究成果

コグニティブ無線メッシュネットワークにおけるチャンネル選択や経路選択、コグニティブ無線におけるチャンネル選択などの様々な最適化問題を対象とし、最適化アルゴリズムの開発を行った。無線メッシュネットワークにおける最適化では、提案手法を実装し実験ネットワークを用いた検証を行い、有効性を示した。Device-to-Device におけるチャンネル選択や送信電力制御の最適化問題では、海外研究者とも協力し、多くの論文業績の成果が得られた。

コグニティブ無線におけるチャンネル選択の問題を、Multi-Armed Bandit (MAB) 問題として定式化し、これを効率的に解くアルゴリズムを提案した。さらに、無線 LAN におけるチャンネル空き状況の効率的な探索に応用し、実験によって提案手法の有効性を示した。本提案手法は、現在の無線 LAN にも適用可能で実用性が高いため、この提案手法については特許出願も行った。

カオス低相互相関ダイナミクスの最適化への有効性、および、低相互相関が作られるしくみについて、その数学的理論を明確に示した。この内容は、IEICE Transactions on Communications の招待論文として執筆した。さらに、ネットワーク・カオスと題した著書の執筆も行い、カオス通信、カオス CDMA、カオスによる低相互相関化の理論体系を固めた。

### 5. 主な発表論文等

(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)

Mikio Hasegawa, "Improving Performance of Heuristic Algorithms by Lebesgue Spectrum Filter," IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, Vol. E99-B, No. 11, pp. 2256-2262, 2016. (招待論文) 10.1587/transcom.2016NEI0002

Thong Huynh, Tomoyuki Onuma, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, Won-Joo Hwang, "Joint Downlink and Uplink Interference Management for Device to Device Communication Underlying Cellular Networks," IEEE Access, Vol. 4, pp. 4420-4430, 2016. 10.1109/ACCESS.2016.2603149

Minh-Thuyen Thi, Thong Huynh, Mikio Hasegawa, Won-Joo Hwang, "A Rate Allocation Framework for Multi-Class Services in Software-Defined Networks," Journal of Network and Systems Management, online, 1-20, 2016. 10.1007/s10922-016-9368-x

Hiep Nguyen, Mikio Hasegawa, Won-Joo Hwang, "Distributed Resource Allocation for D2D Communications Underlay Cellular Networks," IEEE Communications Letters, Vol. 20, No. 5, pp. 942-945, 2016. 10.1109/LCOMM.2015.2498925

Hiroyuki Yasuda, Mikio Hasegawa, "Synchronization of Chaotic Oscillators Using Natural Environmental Noises," Journal of Signal Processing, Vol. 20, No. 4, pp. 129-132, 2016. 10.2299/jsp.20.129

Mikio Hasegawa, Hiroshi Hirai, Kiyohito Nagano, Hiroshi Harada, Kazuyuki Aihara, "Optimization for Centralized and Decentralized Cognitive Radio Networks," PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol. 102, No. 4, pp. 574-584, 2014. (招待論文) 10.1109/JPROC.2014.2306255

Wataru Kurebayashi, Tsubasa Ishii, Mikio Hasegawa and Hiroya Nakao, "Design and control of noise-induced synchronization patterns," EUROPHYSICS LETTERS (EPL), Vol. 107, 10009, 2014. 10.1209/0295-5075/107/10009

Kyohei Shibano, Reo Kontani, Hiroshi Hirai, Mikio Hasegawa, Kazuyuki Aihara, Hisao Taoka, David McQuilkin, and Rikiya Abe, "A Linear Programming Formulation for Routing Asynchronous Power Systems of the Digital Grid," EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL - Special Topics, Vol. 223, pp. 2611-2620, 2014. 10.1140/epjst/e2014-02277-8

Kazuyuki Aihara, Mikio Hasegawa, "Optimization, Chaotic Neural

Networks, and Coherent Ising Machines," PROCEEDINGS OF THE IEEE, Vol. 102, No. 4, pp. 585, 2014. 10.1109/JPROC.2014.2308602

Masahiro Kazama, Wataru Kurebayashi, Takahiro Tsuchida, Yuta Minoshima, Mikio Hasegawa, Koji Kimura, Hiroya Nakao, "Enhancement of noise correlation for noise-induced synchronization of limit-cycle oscillators by threshold filtering," NONLINEAR THEORY AND ITS APPLICATIONS, Vol. 5, No. 2, pp. 157-171, 2014. 10.1587/nolta.5.157

〔学会発表〕(計 20 件)

長谷川幹雄, "コグニティブ無線ネットワークにおける機械学習と最適化," 電子情報通信学会技術研究報告(スマート無線研究会), Vol. 116, No. 409, pp. 33 - 36, 2017. 愛媛県松山市 2017年01月19日 ~ 2017年01月20日 (招待講演)

Aunee Azrina Zulkifli, Thong Huynh, Kaori Kuroda, and Mikio Hasegawa, "Channel and Power Allocation for Device-to-Device (D2D) under Multi-channel of Cellular Networks," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 165 - 168, 2017. Guam, USA 2017年02月28日 ~ 2017年03月03日

長谷川幹雄, "情報ネットワーク科学とカオス," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, BI-3-4, 2016. 北海道札幌市 2016年09月20日 ~ 2016年09月23日 (招待講演)

Kaori KURODA and Mikio Hasegawa, "Performance Evaluation and Analysis of Chaotic CDMA Considering Synchronization Acquisition," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 300 - 303, 2016. Yugawara, Japan 2016年11月27日 ~ 2016年11月30日

Huynh Luong Huy Thong, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, "User Association for Massive MIMO Cellular Networks with Small Cell Wireless Backhaul," Proceedings of 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2016. Shenzhen, China 2016年11月14日 ~ 2016年11月16日

Aunee Azrina Zulkifli, Huynh Luong Huy Thong, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, "Interference Management Under Multi-channel for Device-to-Device Underlying Cellular Networks,"

Proceedings of 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2016. Shenzhen, China 2016年11月14日~2016年11月16日

Aunee Azrina Zulkifli, Thong Huynh, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, "Interference Coordination for Device-to-Device (D2D) under Multi-channel of Cellular Networks," Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences, 2016. Busan, Korea 2016年10月20日~2016年10月23日

Kohei Ito, Thong Huynh, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, "Performance Evaluation and Analysis on Chaotic CDMA with Including Effects of Synchronization Acquisition," Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences, 2016. Busan, Korea 2016年10月20日~2016年10月23日

Thong Huynh, Tomoyuki Onuma, Kaori Kuroda, Mikio Hasegawa, "Resource allocation for Device-to-Device Underlying Cellular Networks," Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences, 2016. Busan, Korea 2016年10月20日~2016年10月23日

Takahiro Mitsuoka, Thong Huynh, Kaori Kuroda and Mikio Hasegawa, "A Flow-Based Resource Allocation Algorithm for LTE Downlink Networks," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 542 - 545, 2016. Honolulu, USA 2016年03月06日~2016年03月09日

Kohei Ito, Hiroki Kato, Thong Huynh, Kaori Kuroda, and Mikio Hasegawa, "Improving Chaotic CDMA for Mobile Ad Hoc Network," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 638 - 641, 2016. Honolulu, USA 2016年03月06日~2016年03月09日

Hiroyuki Yasuda and Mikio Hasegawa, "Synchronization of Chaotic Oscillators by Natural Environmental Noises," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 654 - 657, 2016. (Student Paper Award) Honolulu, USA 2016年03月06日~2016年03月09日

Hiroki KATO, Thong HUYNH, Kaori KURODA and Mikio Hasegawa, "Improving

Performance of CSMA/CA by Optimizing Temporal Structure of Back-off Time," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 751 - 754, 2016. Honolulu, USA 2016年03月06日~2016年03月09日

Masaki SATOH, Thong HUYNH, Kaori KURODA and Mikio Hasegawa, "Design and Implementation of Optimization Scheme for Wireless LAN Networks using Cognitive Cycle," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 763 - 766, 2016. Honolulu, USA 2016年03月06日~2016年03月09日

Kohei Hayashi, Hiroyuki Yasuda, Yozo Shoji and Mikio Hasegawa, "Optimization of Computational Resource Allocation for Virtualized Mobile Core Network," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 427 - 430, 2015. Kuala Lumpur, Malaysia 2015年2月27日~2015年3月2日

Masaki Satoh, Mikio Hasegawa, "Design and Implementation of Wireless Networks Optimized by Cognitive Radio Functions," Proceedings of International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, pp. 393 - 396, 2015. Kuala Lumpur, Malaysia 2015年2月27日~2015年3月2日

Ryo Kikuchi, Kohei Hosaki, Mikio Hasegawa, "Implementation and Evaluation of A Combined Optimization Scheme for Routing and Channel Assignment in Wireless Mesh Networks," Proceedings of IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2015. Las Vegas, USA 2015年01月09日~2015年01月12日

Mikio Hasegawa, "Optimizing heterogeneous cognitive radio networks by rigorous algorithms and neural networks," Proceedings of the 8th International Conference on Bioinspired Information and Communications Technologies, pp. 364-371, 2015. Boston, USA 2014年12月01日~2014年12月03日 (招待講演)

Yoshimasa Narumiya, Mikio Hasegawa, "Mathematical analysis on effectiveness of SS code having negative autocorrelation," Proceedings of IEEE International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2014.

Gold Coast, Australia 2014年12月15日～2014年12月17日  
Hiroki Katoh, Yoshimasa Narumiya, Mikio Hasegawa, "Implementation and Evaluation of Chaos-Based Communication System," Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp. 787-790, 2014. Luzern, Switzerland  
2014年09月14日～2014年09月18日

〔図書〕(計3件)

合原一幸, 長谷川幹雄, 阿部力也, ほか  
“暮らしに生きる数学の最先端,” 総ページ数 280, ウェッジ, 2015.  
長谷川幹雄, 合原一幸, “複雑系理論と情報ネットワーク,” 「情報ネットワーク科学入門」第4章 pp. 31-52, コロナ社, 2015.  
長谷川幹雄, 中尾裕也, 合原一幸, “ネットワークカオス,” コロナ社, 2017. (2017年9月出版予定)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: チャネル選択方法  
発明者: 金成主, 長谷川幹雄, 黒田佳織, 加藤拓樹  
権利者: 国立研究開発法人物質・材料研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願 2016-008521  
出願年月日: 2016年01月20日  
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: 無線通信ネットワークにおけるネットワーク選択方法及び、無線通信ネットワークシステム  
発明者: 長谷川幹雄, 松井琢己  
権利者: 国立研究開発法人科学技術振興機構  
種類: 特許  
番号: 6008518  
取得年月日: 2016年10月19日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等  
haselab.ee.kagu.tus.ac.jp/~hasegawa

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 幹雄 (HASEGAWA, Mikio)  
東京理科大学・工学部・教授  
研究者番号: 50358967