

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20246067

研究課題名（和文）自律分散制御無線情報ネットワークとその展開に関する研究

研究課題名（英文）Research on Autonomous Distributed Control Wireless Information Network and Its Evolution

研究代表者

吉田 進 (YOSHIDA SUSUMU)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：50026324

研究成果の概要（和文）：

本研究成果は大きく3つに大別できる。第一は、協力中継や全二重中継などの新たな技術の生まれている中継伝送や、多数無線局による連携送信など、自律分散制御無線ネットワークに特有の無線伝送方式の基本特性の解明と、その特性を生かした高効率なスケジューリング方式の提案である。第二は、フェムトセルやピコセルなどに代表されるヘテロジニアスネットワークや、コグニティブ無線ネットワークなど、自律分散制御無線ネットワークのアプリケーションに適応した方式の提案である。第三は、上記の協力中継やコグニティブ無線ネットワークの伝送実験の成功である。

研究成果の概要（英文）：

The results can be classified into three categories. The first category includes the performance analysis and proposal of efficient scheduling for cooperative relaying, half-duplex relaying, and coordinated transmissions. These transmission techniques are essential for the autonomous distributed control wireless network. The second category includes development of control schemes for new applications of autonomous distributed control wireless network, i.e., heterogeneous networks and cognitive radio networks. The third category includes field experiments of the above-mentioned cooperative relaying and cognitive radio networks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2011年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
総計	34,500,000	10,350,000	44,850,000

研究分野：デジタル通信

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：自律分散制御、無線通信、マルチホップ、アドホックネットワーク、移動体通信、スケジューリング

## 1. 研究開始当初の背景

基地局等のインフラなしで端末同士がマルチホップ機能によりピア・ツー・ピアに通信を行う分散制御無線ネットワークは決して

新しいものではない。米国国防総省の ARPA では、二十数年以上も前に、パケット無線のプロジェクトを実施し、戦場等で兵士や戦車、戦闘機がいかなる位置に居ようとも常時相

互接続されピア・ツー・ピアに通信が行えるネットワークの研究を行っている。しかしながら、これらのネットワークでは“survivable”、すなわち常にリンクが張れること、そして張ったリンクが切れにくく、たとえ切れてもすぐに別ルートで復旧可能であることが最重要視され、周波数利用効率などはそれほど重視されていなかった。その後、90年代後半以降、改めて民生用の無線アドホックネットワークが注目を浴びるようになり、無線通信端末の小型化・低廉化に伴い、通信インフラの一翼を担うことを狙ったスイスにおける大規模な“Terminodes プロジェクト”や米国におけるセンサーネットワーク更にはメッシュネットワークなど、実用を目指した研究が盛んとなった。WWRF (wireless world research forum) のビジョン“7 trillion wireless devices serving 7 billion people by 2017”からも明らかのように、身の回りのあらゆる“もの”に無線通信機能が付与され、それらが自律分散制御型のネットによって結ばれる時代が目前に迫りつつある。しかしながら、そのようなネットワークの実現に不可欠な解決すべき課題には重要なものが少なくなかった。

## 2. 研究の目的

“自律分散制御無線ネットワーク”は、無線通信チップ搭載機器が溢れ遍在する次世代情報通信ネットワークにおいて必要不可欠な構成要素となる。従って、その基本特性の解明ならびに所望の QoS (Quality of Service) を満たす効率的なネットワーク構築手法の確立は喫緊の課題である。本研究ではアドホックネットワーク等自律分散制御無線ネットワークを特徴付けるマルチホップ伝送や周辺の無線機器アンテナが連携する協力中継伝送等の本質ならびに潜在的な可能性を解明し、それらを適材適所に活用しつつ、コア概念のプロトタイプ試作を通じて、自律分散制御無線ネットワークの理解をより一層深め、その新たな展開を図ることを目的とした。

## 3. 研究の方法

“自律分散制御無線ネットワーク”に関するこれまでの理論解析結果と物理層に関する知見を総合的に発展させ、より本質的な問題解明に向けて研究を進める。具体的な研究の遂行に当たっては代表者の吉田と、分担者で仮想的 MIMO 技術を専門とし無線実験系の経験が豊かな村田英一准教授、マルチホップ伝送のシステム展開を専門としゲーム理論解析の知見を持つ山本高至准教授が常時連携を図った。さらに大学院博士課程学生らの協力を得つつ、理論解析・計算機シミュレーション・小規模実験系を課題毎にバランス良く

併用しながら計画を進めた。得られた知見は学会研究会や国際会議等で積極的に発表し、関連分野の研究者達とも常時意見交換を行いながら研究を進めた。

## 4. 研究成果

### (1) 双方向協力通信の特性解明と中継局選択法

双方向協力通信では、送信方向毎に容量が異なる非対称性が存在することを明らかにした。具体的には無線局  $S_1 \cdot S_2$  間の通信を中継局を介して行った際に、図 1 のようにトラフィックの比 1:10, 1:1, 10:1 に対して、最適な中継局の位置 (図中は色で違いを表現) が異なることを明らかにした。また、送信方向毎の発生トラフィックに応じて中継局を切り替えることで高いスループットが実現できることを示し、高スループット実現のための中継局選択法を提案した。

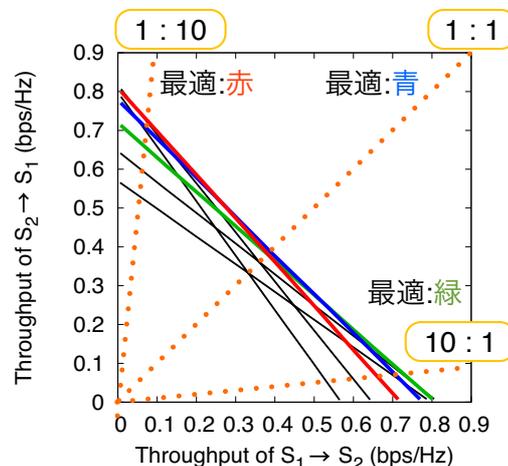


図 1 : 双方向協力通信における非対称性

### (2) 連携送信のためのチャネル割当法

複数の無線局による連携送信を単純に利用すると、他局干渉が増大する可能性がある。これを防ぐチャネル再割り当て方式を提案した。特に本方式を利用することで、FFR (Fractional Frequency Reuse) を行うセルラシステムにおいて、システム容量を増大可能であることを確認した。

### (3) FDR および HDR を用いるマルチユーザ送信スケジューリング法

中継通信において発呼局と中継局が同時送信を行う FDR (全二重中継) においては、別の直交リソースを用いる HDR (半二重中継) と組み合わせることで高い通信容量が実現される。具体的には図 2 のように、HDR に相当するフェーズ 1~3 と、FDR に相当するフェーズ 4, 5 を組み合わせることでスループットが増大する。これをマルチユーザ通信に拡張することで、システムとして高い周波数利用効率を実現することを示した。

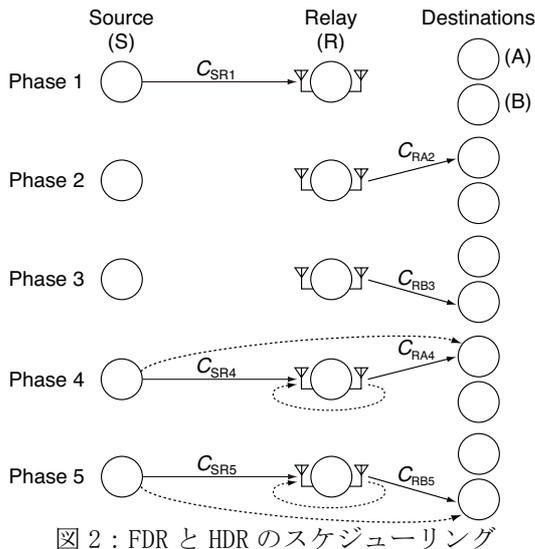


図 2 : FDR と HDR のスケジューリング

(4) 非対称双方向ネットワーク符号化マルチホップ網向けスケジューリング法  
スループット向上手法としてネットワーク符号化 (NC) が知られている。しかしながら非対称なトラフィック比率の双方向マルチホップ網には適さない。そこで、NCに加えて向きが異なる 2 種類の協力中継を合わせた 3 手法の中から適応的に選択利用する新たなスケジューリング法を提案し、双方向トラフィック比率が非対称な場合にも有効であることを示した。

(5) コグニティブ無線への展開  
コグニティブ無線とは、既存システムに深刻な影響を及ぼさないような制御のもと、既存システムと同じ周波数帯域を用いて新規通信システムを導入する概念である。コグニティブ無線への展開として、電力及びチャネル (周波数や時間など) からなるリソース制御方式を提案した。具体的には既存のポテンシャルゲームに基づくリソース制御方式を拡張し、特に優先度の異なる通信が共存する場合に、高優先度側に与える干渉を下げられることを確認した。

(6) ヘテロジニアスネットワークへの展開  
ヘテロジニアスネットワークとは、図 3 のようにセルラにおけるマクロセルとフェムトセルのように、大きく特徴の異なる無線局が混在するシステムである。これらのネットワークに進化ゲームやポテンシャルゲームを応用したアクセス制御方式を提案し、効果を確認した。

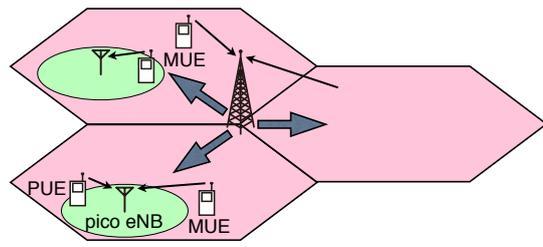


図 3 : ヘテロジニアスネットワークのためのアクセス制御方式 (MUE : マクロセル端末、PUE ピコセル端末)

(7) コグニティブ無線のフィールド実験  
コグニティブ無線においては、周辺無線環境の認知が最も重要な課題である。スペクトルセンシングによって周辺環境を認知する場合、その性能はプライマリ送信局からセンシング局までの伝搬路に大きく依存する。セカンダリ送信局は、自局の送信がプライマリ受信局に及ぼす影響を正確に把握して送信可否を判断する必要があるが、この影響の程度はセカンダリ送信局からプライマリ受信局への伝搬路に依存してしまう。加えて、スペクトルセンシングの精度改善のために多数のセンシング局を用いる場合、これらセンシング局間の通信状態にも依存することとなる。このようなシステム全体の特性を把握するには、伝搬路モデルに基づく評価だけでなくより現実に近い環境での伝送実験による検証も必要となる。

そこで、ソフトウェア無線機 USRP を用いて協力センシングを行うコグニティブ無線システムを試作し、図 4 のように屋外において実際に電波を放射する伝送実験を行った。ここでは、BPSK 信号を送信している A-TX と QPSK 信号を送信している B-TX を用意し、3 局の協力センシングを行う B-SS が場所 P1 および P2 においてこの 2 つの信号を判別する実験を行った。その結果、コグニティブ無線に不可欠である信頼性の高い送信判断が可能であることが明らかとなった。この装置は図 5 に示すように学会において公開展示を行った。

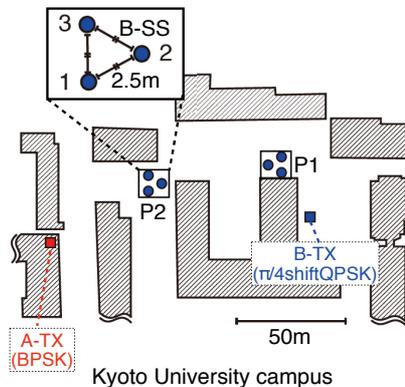


図 4 : コグニティブ無線のフィールド実験



図 5 : コグニティブ無線システムの学会展示

## 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 12 件)

- ① Lin Shan, Hidekazu Murata, Sonia Aissa, Susumu Yoshida, “Opportunistic scheduling for hybrid network coding and cooperative relaying techniques in wireless networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E95-B, no. 5, pp. 1751-1760, May 2012. 査読有 . DOI:10.1587/transcom.E95.B.1751
- ② Ippei Aoki, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Evolutionary game based access control protocol in wireless networks with mobile routers,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E94-B, no. 8, pp. 2225-2234, Aug. 2011. 査読有 . DOI:10.1587/transcom.E94.B.2225
- ③ Koji Yamamoto, Katsuyuki Haneda, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Optimal transmission scheduling for a hybrid of full- and half-duplex relaying,” *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 305–307, March 2011. 査読有 . DOI:10.1109/LCOMM.2011.011811.101925
- ④ I Wayan Mustika, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Potential game approach for spectrum sharing in distributed cognitive radio networks,” *IEICE Transactions on Communications*, Special Issue on Wireless Distributed Networks, vol. E93-B, no. 12, pp.3284-3292, Dec. 2010. 査読有 . DOI: 10.1587/transcom.E93.B.3284
- ⑤ Takaaki Saeki, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Impact and use of the asymmetric property in bi-directional cooperative relaying under asymmetric traffic conditions,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E93-B, no. 8, pp. 2126–2134, Aug. 2010. 査読有 . DOI: 10.1587/transcom.E93.B.2126
- ⑥ Liang Xu, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Cell edge capacity improvement by using adaptive base station cooperation in cellular networks with fractional frequency reuse,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E93-B, no. 7, pp. 1912–1918, July 2010. 査読有 . DOI:10.1587/transcom.E93.B.1912
- ⑦ 村田 英一, 大野 卓人, 山本 高至, 吉田 進, “協力スペクトルセンシングを用いたコグニティブ無線システムの開発と屋外伝送実験,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J93-B, no. 7, pp. 928–936, July 2010. 査読有 . [http://search.ieice.org/bin/pdf\\_link.php?category=B&lang=J&year=2010&fname=j93-b\\_7\\_928](http://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=J&year=2010&fname=j93-b_7_928)
- ⑧ Stepan Kucera, Sonia Aissa, Susumu Yoshida, “Adaptive channel allocation for enabling target SINR achievability in power-controlled wireless networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 2, pp. 833-843, Feb. 2010. 査読有 . DOI: 10.1109/TWC.2010.02.090574
- ⑨ Kunihiko Teshima, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Capacity analysis of cooperative relaying networks with adaptive relaying scheme selection,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E92-B, no. 12, pp. 3744–3752, Dec. 2009. 査読有 . DOI: 10.1587/transcom.E92.B.3744

[学会発表] (計 98 件)

- ① Makoto Miyagoshi, Koji Yamamoto, Katsuyuki Haneda, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Multi-user transmission scheduling for a hybrid of full- and half-duplex relaying,” *ICICS 2011*, Singapore, 2011 年 12 月 16 日.
- ② I Wayan Mustika, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, “Potential game approach for self-organization scheme in open access heterogeneous networks,” *ICST CrownCom 2011*, Osaka, 2011 年 6 月 2

- 日.
- ③ I Wayan Mustika, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Potential game approach for self-organized interference management in closed access femto-cell networks," IEEE VTC 2011-Spring, Budapest, Hungary, 2011年5月16日.
  - ④ Yuki Saito, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Robust interference management to satisfy allowable outage probability using minority game," IEEE PIMRC 2010, Istanbul, Turkey, 2010年9月29日.
  - ⑤ I Wayan Mustika, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Spectrum sharing with interference management for distributed cognitive radio networks: A potential game approach," IEEE VTC 2010-Spring, Taipei, 2010年5月18日.
  - ⑥ Susumu Yoshida, "[invited] Recent technical trends and research issues towards next generation wireless communication systems," ICICS 2009, Macau, 2009年12月9日.
  - ⑦ Takatoshi Kihara, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "Distributed joint antenna-pattern and channel selection in wireless ad hoc networks," IEEE PIMRC 2009, Tokyo, 2009年9月14日.
  - ⑧ Kazuya Kimura, Koji Yamamoto, Hidekazu Murata, Susumu Yoshida, "End-to-end throughput aware adaptive channel and route selection for enhancing system throughput in multi-hop radio networks," IEEE PIMRC 2008, Cannes, France, 2008年9月17日.

[その他]

ホームページ

<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/modules/project1/kiban08a.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 進 (YOSHIDA SUSUMU)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：50026324

### (2) 研究分担者

村田 英一 (MURATA HIDEKAZU)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号：60252475

山本 高至 (YAMAMOTO KOJI)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号：30423015

(H20：連携研究者)

### (3) 連携研究者

なし