

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760334

研究課題名(和文) フェムトセル・マクロセル共存環境での無線資源割当てに関する研究

研究課題名(英文) Radio Resource Allocation for Macrocell/Femtocell overlay Heterogeneous Networks

研究代表者

金子 めぐみ (Kaneko, Megumi)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：10595739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、次世代無線通信システムにおいて、ユーザが各家庭で自由に基地局(ホームベースステーション)を設置することが可能な環境での無線資源割当て法を確立することを目的とした。特に、無線通信の性質であるブロードキャスト性(送信された信号が広範囲に多くのノードで同時に受信可能なこと)を利用することで、貴重な無線資源の消費量を低減しつつ、システム全体の特性や各ユーザの公平性を向上する半自律分散的な無線資源割り当て法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションで確認した。

研究成果の概要(英文)：In view of the next generation wireless communication systems, we have proposed distributed resource allocation methods for a macrocell/femtocell Heterogeneous Network whereby each femtocell may be deployed by each user. In particular, our developed solutions take advantage of the broadcast nature of wireless signals for obtaining local channel state information. This enables to jointly optimize the different system performance metrics such as cell throughput and user fairness in both macrocell and femtocells, while minimizing the amount of required signalling overhead. The effectiveness of the proposed schemes against conventional solutions was confirmed through computer simulations.

研究分野：無線通信

キーワード：移動体通信 情報通信工学 先端的通信 無線資源割り当て フェムトセル マクロセル 干渉制御

1. 研究開始当初の背景

移動体通信加入者は世界中で 35 億人を超え、無線通信は生活に欠かせない技術になっている。2007 年の移動体通信のトラフィックでは、その 90% が低速度の音声通信であり、10% が高速データ通信であったが、スマートフォンの普及などにより、近い将来には莫大なデータ量の増加が予想されている。この解決策として、研究開始当初、フェムトセルのコンセプトが国内外の研究者の注目を集めていた。従来の移動体通信システムでは、各基地局が事業者によって設置され比較的広い領域(マクロセル)をサポートしていたのに対し、フェムトセルは典型的には各ユーザによって設置されたホームベースステーションでサポートされる小さなセルをいう。これにより、ユーザスループットの増加と電波不感地帯の改善などの利点が期待されていた。しかしながら、このようなフェムトセルを実現するためには多くの研究課題が残されていた。

2. 研究の目的

本研究は、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplex Access)方式を用いた次世代無線通信システムにおいて、ユーザが各家庭で自由に基地局(ホームベースステーション)を設置することが可能な環境での無線資源割当て法を確立することを目的とする。特に、無線通信の性質であるブロードキャスト性(送信された信号が広範囲に多くのノードで同時に受信可能なこと)を利用することで、貴重な周波数・エネルギー資源の消費量を低減しつつ、システム全体の特性や各ユーザの公平性を向上することを目的とした。

主には以下の 3 つの課題に取り組んだ。

- (1) フェムトセルシステムのモデル化と干渉対策
- (2) フェムトセルシステムのための現実的なプロトコル設計
- (3) 他のシステムへの汎用化

3. 研究の方法

本研究では 2. で示した課題に以下の方法で取り組んだ。協力者として、情報理論の専門家である米国・New Jersey Institute of Technology の Dr. Osvaldo Simeone や通信理論の専門家であるデンマーク・Aalborg University の Dr. Petar Popovski と議論した。定期的に電子メールや電話会議等で議論を行った。また、より低い物理層の視点では、京都大学の同研究室の林和則准教授と常に議論した。

また、国内外の本分野の主な国際会議・研究会に定期的に参加し、関連の研究動向調査を行った。国内外の多くの学会等で研究成果を発表することにより、多数の専門家からのフィードバックを元に研究を発展させた。

提案法の特性評価は主に計算機シミュレーションによって行った。

4. 研究成果

主な研究成果としては、無線通信のブロードキャスト性を利用することで制御信号や通信路情報を増やさずに、マクロセルへの干渉削減を実現するフェムトセルの電力割り当てを提案した。考案したそれぞれの無線資源割り当て法に必要な演算量、通信路情報のフィードバック量、消費電力について検討した。計算機シミュレーションにより、従来法と比べて、マクロセル及びフェムトセル両方の達成可能レートを向上することを明らかにした。また、更に複雑なピコセルを含むヘテロジニアスシステムのために提案アプローチの汎用化を行った。制御信号や通信路情報を増やさずに、マクロセルからピコセルユーザへの干渉削減を実現する半自律分散的な干渉制御法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションで確認した。

研究成果は国内外の本分野の主な国際会議・研究会や論文誌で発表され、とても高い評価を受けている。その一例として、大手企業に所属している主任研究者に注目され、提案法を発展させ、実用化のためのプロトタイプ設計に成功された。これがきっかけとして、FP7 の枠組みの 5G に関する EU プロジェクト等への参加にも招待された。また、本研究に取り組んでいる共著の大学院生も受賞した。このように、本研究成果はアカデミアからも事業者からも高い評価を受け、次世代(5G)移動体通信の実現に向けて研究・応用の面で大きなインパクトを与えた。

以下に研究成果の一部を説明する。

主な研究成果の一つとして、フェムトセル基地局からマクロセルユーザへのダウンリンク干渉を抑えつつ、フェムトセルのサムレートを最大化するような、フェムトセル基地局における送信電力割り当て法を提案した。提案方式では、マクロセルユーザからマクロセル基地局へフィードバックされる通信路情報を、無線通信路の放送性を利用して“盗み聞き(overhear)”することで、フェムトセル基地局はマクロセルで使用されるサブキャリアを予測し、その結果に基づいてフェムトセルユーザへのサブキャリアの送信電力割り当てを行なう。マクロセル基地局の割り当てを最大 SINR 割り当てか正規化 PFS (Proportional Fairness Scheduling) によるものと仮定し、それぞれの場合において割り当て確率の解析を行うことで、この割り当ての決定に用いている。さらに、提案法では、干渉が大きいフェムトセル基地局の近くのマクロセルユーザの利用サブキャリアは割り当てず、一方、遠くのマクロセルユーザの利用サブキャリアは再利用する方針をとっている。これにより、提案方式は干渉チャンネル情報を取得するためのオーバーヘッドを増加させることなく、マクロセルユーザへの干渉を低減することが可能である。数値シミュレーションにより、提案手法を用いた電力割り当て法がマクロセルとフェムトセルのサムレートの向上に有効であることを示

した。
 提案法で決定した電力制約によるマクロセルユーザへの与干渉抑制の効果を評価するため、数値シミュレーション結果を示す。

図 1-2 は PFS によりマクロセルユーザのサブキャリア割り当てを行った時の、干渉の影響が大きいと考えられる半径 D の円内のマクロセルユーザの達成可能レート、及びフェムトセルの達成可能サムレートを [bit/s/Hz] で示したグラフである。半径 D 円内のグラフでは、その円内にいるユーザに関して達成されるレートの平均となっている。また、横軸はフェムトセル基地局の総送信電力である。以下は提案法との比較のために示されている。

- 「ideal femto」: フェムトセルの理想特性
- 「conventional method」: 従来法の特長
- 「ideal macro」: マクロセルの理想特性

図 1 の半径 D 円内でのマクロセルのサムレート特性から、提案法は制約を置かない場合に比べ、フェムトセルの総送信電力が増加してもマクロセルユーザのサムレート劣化が小さくなっており、マクロセルユーザのサブキャリア割り当ての推定が正しく行われていることが分かる。

図 2 のフェムトセルのサムレート特性から、提案法はフェムトセルの理想サムレートも大きく低下させていないことも確認できる。

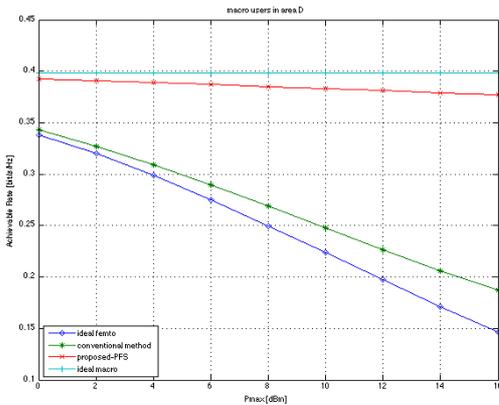


図 1: 半径 D 円内でのマクロセルユーザの達成可能レート

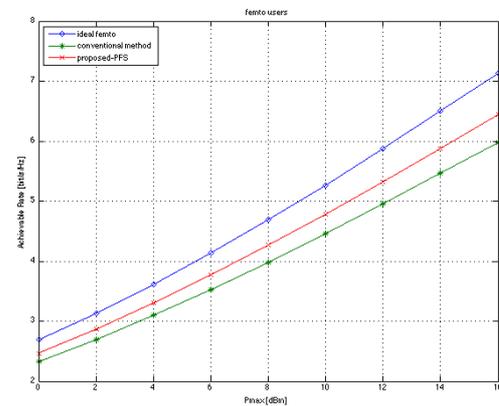


図 2: フェムトセルユーザの達成可能レート

更に、CRE (Cell Range Expansion) を適用したピコセル・マクロセルのヘテロジニアスネットワークへ、提案アイデアの汎用化を行った。具体的には、CRE を適用したマクロセル・ピコセル共存環境の下リリンクを対象に、通信路情報フィードバックに基づき自律分散的な干渉制御を実現するためのマクロ基地局の電力割り当て法について提案した。Expanded ピコセルユーザ (ePUE) は本来マクロ基地局と通信を行う UE であるため、提案法では、ePUE がマクロ基地局に届く程度の電力で通信路情報フィードバックを行うことを仮定する。フィードバックされた通信路情報に基づき、マクロ基地局がピコセルにおける ePUE へのリソースブロック割り当てを予測し、ePUE が割り当てられる確率が高いリソースブロックにおいて送信電力を低減することで ePUE への干渉を抑制する。計算機シミュレーションにより、ABS (Almost Blank Subframes) を用いた従来法と提案法の特長を比較することで、提案法の有効性を明らかにした。

図 3 に割り当て閾値 p を横軸にとった時の全 UE の達成可能サムレートを示す。提案法 p の値に関わらず、従来法と比べて大きくサムレートを向上している。また、マクロユーザや ePUE 等、それぞれの UE あたりの達成可能レートも向上することを確認した。最後に UE の公平性を比較するため、図 4 に JFI (Jain's fairness index) 特性を示す。公平性の観点でも、提案法は広範囲で従来法より優れていることが確認できる。

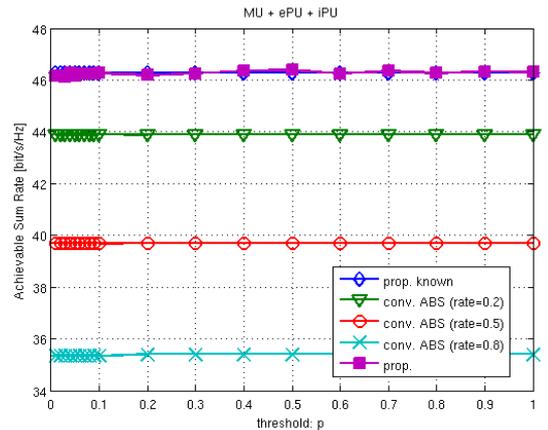


図 3: 全ユーザの達成可能サムレートの比較

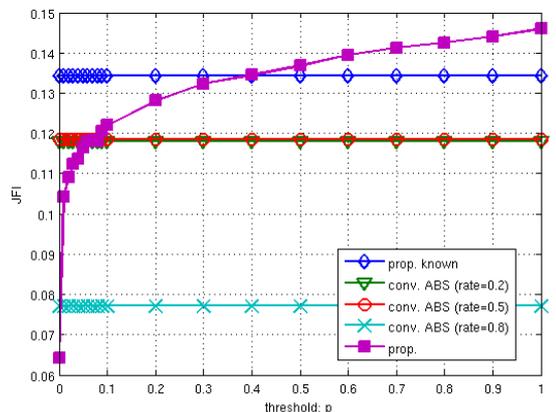


図 3: ユーザの公平性 (JFI) の比較

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 14 件)

R. Kurda, L. Boukhatem and M. Kaneko, "Femtocell Power Control Methods based on Users' Context Information in Two-Tier Heterogeneous Networks", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking* vol. 2015:129, pp. 1-17, May 2015 査読有
DOI:10.1186/s13638-015-0328-z
M. Kaneko, K. Hayashi and H. Sakai, "Superposition Coding based User Combining Schemes for Non-Orthogonal Scheduling in a Wireless Relay System", in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, issue 6, pp. 3232-3243, June 2014 査読有
M. Kaneko and K. Al Agha, "Compressed Sensing based Protocol for Interfering Data Recovery in Multi-Hop Sensor Networks", *IEEE Communication Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 42-45, Jan. 2014 査読有
M. Kaneko, K. Hayashi, P. Popovski and H. Sakai, "Proportional Fair Scheduling with Superposition Coding in a Cellular Cooperative Relay System", *Springer Annals of Telecommunications*, vol. 68, issue 9-10, pp. 525-537, Oct. 2013 査読有
DOI 10.1007/s12243-012-0337-4
H. Yamaura, M. Kaneko, K. Hayashi and H. Sakai, "Adaptive Hierarchical Modulation and Power Allocation for Superposition-Coded Relaying", *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013:233, pp. 1-18, Sept 2013 査読有
C.T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko, P. Popovski and H. Sakai, "Probabilistic Dynamic Framed Slotted ALOHA for RFID Tag Identification", *Springer Wireless Personal Communications*, Volume 71, Issue 4, pp. 2947-2963, Aug. 2013 査読有
DOI:10.1007/s11277-012-0981-z
C.T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko, P. Popovski and H. Sakai, "Maximum Likelihood Approach for RFID Tag Set Cardinality Estimation with Detection Errors", *Springer Wireless Personal Communications*, Volume 71, Issue 4, pp. 2587-2603, Aug. 2013
DOI:10.1007/s11277-012-0956-0
C.T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko and H. Sakai, "Maximum Likelihood Approach for RFID Tag Cardinality Estimation under Capture Effect and Detection Errors",

IEICE Trans. on Communications, vol.E96-B, no.5, pp.1122-1129, May 2013 査読有

DOI:10.1186/1687-1499-2013-233

C.D.T. Thai, P. Popovski, M. Kaneko and E. de Carvalho, "Multi-flow scheduling for coordinated direct and relayed users in cellular systems", *IEEE Trans. on Communications*, vol.61, no.2, pp.669-678, Feb. 2013 査読有

[学会発表](計 35 件)

T. Kamenosono, M. Kaneko, K. Hayashi and M. Sakai, "Compressed Sensing-based Channel Estimation Methods for LTE-Advanced Multi-User Downlink MIMO System", in *Proceedings of IEEE VTC-Spring 2015*, Glasgow, Scotland, May 2015 査読有

R. Kurda, L. Boukhatem, M. Kaneko and T. Ali Yahya, "Mobility-Aware Dynamic Inter-Cell Interference Coordination in HetNets with Cell Range Expansion", in *Proceedings of IEEE PIMRC 2014*, pp. 1-5, Washington DC, USA, Sept. 2014 査読有

R. Kurda, L. Boukhatem, T. Ali Yahya, and M. Kaneko, "Power adjustment mechanism using context information for interference mitigation in two-tier heterogeneous networks", in *Proceedings of IEEE ISCC 2014*, pp. 1-6, Madeira, Portugal, June 2014 査読有

T. Nakano, M. Kaneko, K. Hayashi and H. Sakai, "Interference Mitigation based on Partial CSI Feedback and Overhearing in an OFDMA Heterogeneous System", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, pp. 1-5, Dresden, Germany, June 2013 査読有

T. Nakano, M. Kaneko, K. Hayashi and H. Sakai, "Downlink Power Allocation with CSI Overhearing in an OFDMA Macrocell/Femtocell Coexisting System", *IEEE International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1-5, Sydney, Australia, Sept. 2012 査読有

H. Yamaura, M. Kaneko, K. Hayashi and H. Sakai, "Superposition Coding Scheme for Wireless Relay Systems with Adaptive Modulation and Coding", *IEEE Asia-Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS '12)*, Kyoto, Japan, Aug. 2012 査読有

C. T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko and H. Sakai, "Radio Frequency Identification Tag Cardinality Estimation Under Capture Effect and Detection Errors", in *IEEE APWCS 2012*, Kyoto, Japan, August 2012

C. T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko and S. Sakai, "Maximum A Posteriori Approach for Anonymous RFID Tag Cardinality Estimation", in IEEE ICASSP, Kyoto, Japan, March 2012 査読有

C. T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko, P. Popovski and S. Sakai, "Maximum Likelihood Method for RFID Tag Set Cardinality Estimation using Multiple Independent Reader Sessions", in APSIPA ASC 2011, Xi'an, China, October 2011 査読有

M. Kaneko, K. Hayashi, P. Popovski and H. Sakai, "Fairness-Constrained Rate Enhancing Superposition Coding Scheme for a Cellular Relay System", in IEEE WPMC 2011, Brest, France, October 2011 査読有

H. Yamaura, M. Kaneko, K. Hayashi and S. Sakai, "Superposition Coding Scheme with Discrete Adaptive Modulation for Wireless Relay Systems", in IEEE VTC-Fall 2011, San Francisco CA, USA, September 2011 査読有

C. T. Nguyen, K. Hayashi, M. Kaneko, P. Popovski and S. Sakai, "RFID Tag Identification with Probabilistic Dynamic Framed Slotted ALOHA", in IEEE APWCS 2011, Singapore, August 2011 査読有

C. Thai, P. Popovski, M. Kaneko, and E. de Carvalho, "Coordinated Transmissions to Direct and Relayed Users in Wireless Cellular Systems", in IEEE ICC 2011, Kyoto, Japan, June 2011 査読有

6 . 研究組織

(1)研究代表者

金子めぐみ (Kaneko, Megumi)
京都大学大学院情報学研究科・助教
研究者番号：10595739

(2)研究協力者

林和則 (Hayashi, Kazunori)
京都大学大学院情報学研究科・准教授
研究者番号：50346102

Popovski, Petar
デンマーク・オールボー大学・教授

Simeone, Osvaldo
ニュージャージー工科大学・准教授