

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06062

研究課題名(和文) シンメトリックインタラクションに基づく全二重無線通信技術のデザイン

研究課題名(英文) Design of Full-Duplex Radio based on Symmetric Interaction

研究代表者

山本 高至 (Yamamoto, Koji)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：30423015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信の常識を覆す全二重無線機や全二重中継機は、電波管理において既存の無線通信と本質的に異なる新たな競合問題を発生させる。これら競合問題を直接的に扱う数学理論であるゲーム理論を用い、制御がループを持たないための性質として知られるシンメトリックインタラクションに特に着目し、全二重通信や無線LANにおける分散的チャネル割当がシンメトリックインタラクション成立条件を満たすことを示し、その意味で本チャネル割当が収束することを証明した。加えて、正規化SNR規範のユーザスケジューリングや、物理層セキュリティやミリ波といった新たなアプリケーションの特性の解析的な導出に、確率幾何の導入により成功した。

研究成果の概要(英文)：Full-duplex radio and full-duplex relay cause new interference problems essentially different from existing wireless communications. Using game theory and symmetric interactions, decentralized channel allocation problems in full-duplex radio and wireless LAN were discussed and it was proved that channel allocation converges. Also, we successfully achieved the performance of normalized SNR user scheduling, physical layer security, and mmWave systems by introducing stochastic geometry.

研究分野：無線通信ネットワーク

キーワード：情報通信工学 全二重通信 ゲーム理論 確率幾何

1. 研究開始当初の背景

フルデュプレックス (全二重) 無線機は同一周波数帯で送受信を同時に行う無線機の概念である。受信アンテナで受信しようとしている信号に、同一局の送信アンテナから放射される信号が非常に大きな干渉 (回り込み干渉) を与えるため、非現実的と考えられてきた。しかし、送受信アンテナの設計や、アナログ、デジタル両面からの回り込み干渉キャンセラの開発が進み、実現が注目を集めている状況であった。

2. 研究の目的

通常の無線通信である半二重通信においては、電波干渉が深刻な影響を与えないよう制御が行われている。一方、フルデュプレックス無線機や、中継機のみ送受信を同時に行うフルデュプレックス中継機が混在した環境では、本質的にこれまでと異なる複雑な電波干渉管理の必要性が生じる。

電波干渉管理の本質的な難しさの 1 つは、制御が収束せずにループを持ちうることである。この問題の数学的定式化にはゲーム理論の枠組みを用いることができ、ループを持たないためにシンメトリックインタラクションという性質を持つことが望ましい。

そこで、フルデュプレックス無線機、フルデュプレックス中継機利用時を含め、干渉を解析する。この際には確率幾何解析を導入する。加えて、シンメトリックインタラクション成立の有無を明らかにする。成立しない場合は成立させるための手段を考案する。さらに、これらの検討から得られた知見を他の無線ネットワークに適用し、新たな評価、方式提案を行う。

3. 研究の方法

(1) 複数の意思決定主体間の相互作用を数学的に解析するゲーム理論における知見を、干渉という相互作用の存在する無線ネットワークに適用する。フルデュプレックス無線機によるチャンネル選択、無線 LAN によるチャンネル選択に適用する。さらに、ゲーム理論の応用分野であるメカニズムデザイン理論の適用を行う。

(2) 近年、電波干渉の解析に進展のみられる確率幾何解析を適用する。特にユーザスケジューリングや物理層セキュリティという、これまで確率幾何解析が進んでいない領域への適用を試みる。

4. 研究成果

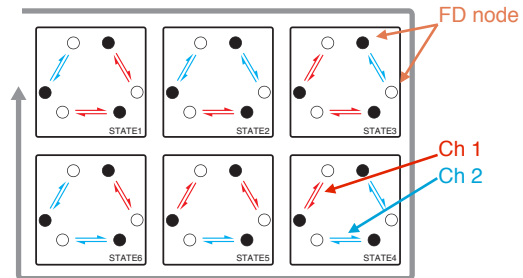
(1) フルデュプレックス通信のためのチャンネル割当方式の提案

双方向フルデュプレックス通信が多数存在する環境において、各通信が単純に被干渉電力が最小となるチャンネルを選択していくと、図のようにループが生じることを明らかにした。その上で、被干渉電力と与干渉電力の

和が小さくなるようなチャンネル選択は、シンメトリックインタラクション条件が成立しており、ポテンシャルゲームとなることを証明した。すなわち、このようにすることで、有限回数でチャンネル選択が収束することを示した。

Problem for applying earlier works to FD networks

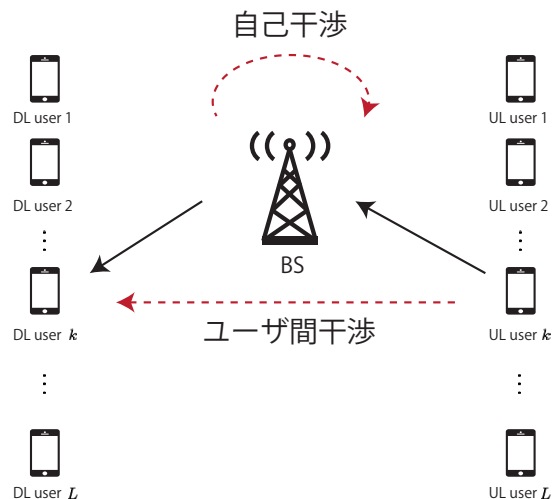
In some cases, channel allocation process may cycle  
→ Unfortunately process **never** converge



(2) フルデュプレックスセルラネットワークにおけるユーザスケジューリング

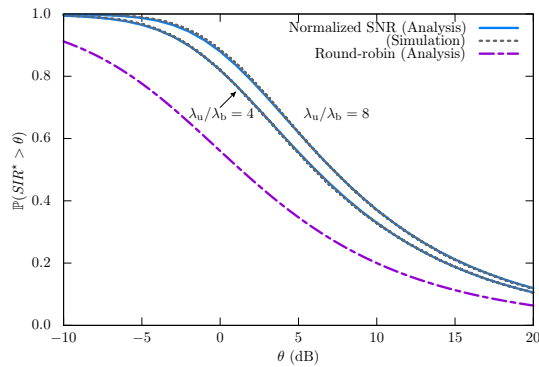
基地局が同一周波数で送信と受信を同時に行う図のようなフルデュプレックスセルラネットワークでは、自己干渉とユーザ間干渉が通信品質に与える影響を考慮し、下り回線ユーザだけでなく上り回線ユーザのスケジューリングを行う必要がある。特に自己干渉とユーザ間干渉が FDC に与える影響を調べるために、レイリーフェージング環境下のフルデュプレックスセルラネットワークにおけるユーザスケジューリングの特性解析を行った。

下り回線と上り回線の SINR の和を最大化するスケジューリングと、正規化した SINR の和を最大化するスケジューリングを検討した。特に後者は 3G 以降のセルラネットワークで用いられるプロポーショナルフェアスケジューリングに基づいている。それぞれのスケジューリングについて、あるユーザが選択される確率、システム容量、ユーザ間の公平性を定式化し。数値評価により、ユーザ数が多いほど、FDC ネットワークのシステム容量が高いことを示した。



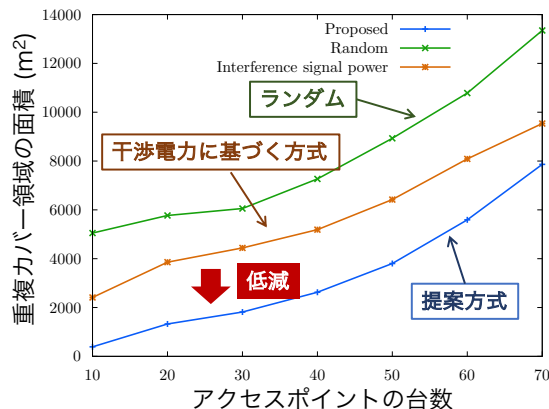
### (3) チャンネル適応型マルチユーザスケジューリングの確率幾何解析

セルラシステムの干渉の評価をモンテカルロシミュレーションによらずに解析的に行う手法として、2011年以降、確率幾何解析手法が発達してきた。一方、解析を可能とする際に、通信ユーザは一様ランダムに選ばれと仮定することが多く、プロポーションアルファスケジューリングなど、実際に使われるマルチユーザスケジューリングとは乖離がある。そこで、解析が比較的容易と考えられる正規化SNRスケジューリングを下り回線で行った際の干渉は確率幾何解析可能であることを示し、その際の相補累積分布関数を図のように明らかにした。



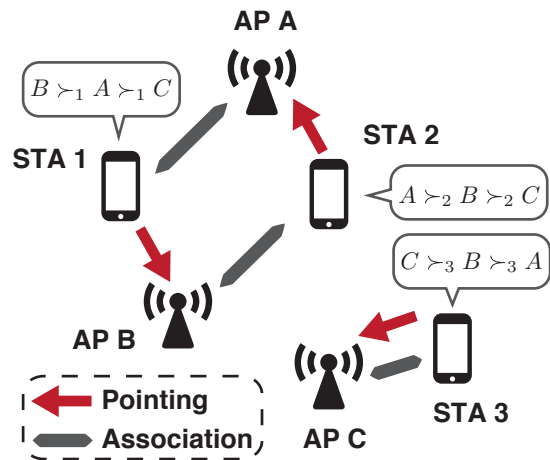
### (4) 高密度無線 LAN におけるチャンネル割当

高密度無線 LAN における送信局同士のチャンネル競合を緩和するため、アクセスポイント間のカバー領域の重複を低減する分散的チャンネル制御法を提案した。本方式は、ポテンシャルゲームと呼ばれる理論的枠組みに基づいており、分散的に利得関数を最大化する制御の収束性が得られるようデザインされている。また、アクセスポイント同士のカバー領域の重複を自律分散的に低減する送信電力制御も組み合わせられており、これにより従来の干渉信号電力に基づくゲーム理論的な割当に比べて、高いパフォーマンスが得られることを示した。本方式の評価は、シミュレーションに加えて、実環境における実験によっても評価しており、実環境における提案方式の収束性を示している。



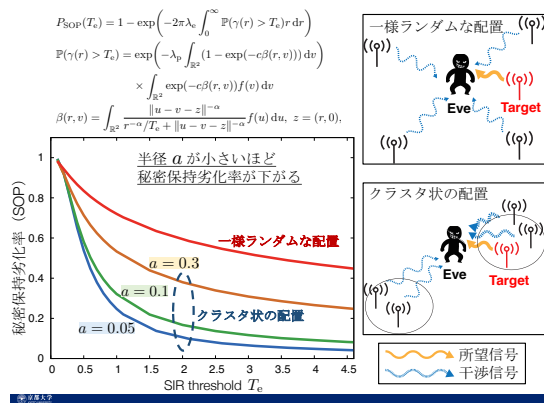
### (5) メカニズムデザインを応用したアソシエーション制御

非分割財の交換モデルを応用した、無線 LAN におけるアソシエーション制御法を検討した。基本的なアイデアは、異なるアクセスポイントに帰属する端末間でアソシエーション先を交換することによる、通信品質の改善である。メカニズムデザイン理論における選好の概念を用いることにより、通信速度、遅延などの要求に基づく端末ごとのアクセスポイントに対する好ましさを柔軟に定式化し、それに基づいたアソシエーション制御を可能としている。提案するアルゴリズムは、TTC アルゴリズムに基づいており、得られるアソシエーションはメカニズムデザイン理論における望ましさの尺度である個人合理性、パレート効率性を満たす。



### (6) 物理層セキュリティの確率幾何解析

無線通信では、電波の同報性による盗聴者への情報漏洩が懸念される。その対策として暗号化などの上位レイヤの技術ではなく、電波の性質を用いてセキュリティを確保する物理層セキュリティが注目されている。特に送信局の配置方法は盗聴局への干渉電力の大きさを左右するため、物理層セキュリティの特性に大きく影響すると考えられる。そこで、送信局が所々に局所的に（クラスタ状に）配置される状況における物理層セキュリティ特性を確率幾何学により解析した。送信局を一樣クラスタ点過程にしたがって配置することでクラスタ状の配置を実現し、物理層セキュリティの指標である秘密保持劣化率を導出した。導出した秘密保持劣化率から、一樣ポアソン点過程に従った一樣ランダムな送信局の配置と比べて、送信局をクラスタ状に配置することでセキュリティ性能の向上が可能であることを示した。これは、送信局のクラスタ状な配置が効率的に盗聴局に干渉を与え、盗聴局における SINR が低下したためだと考えられる。



## 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6件)

- ① Y. Oguma, T. Nishio, K. Yamamoto, and M. Morikura, ``Joint deployment of RGB-D cameras and base stations for camera-assisted mmWave communication system,`` IEICE Trans. Fundamentals, vol. E100-A, no. 11, pp. 2332--2340, Nov. 2017.  
DOI: 10.1587/transfun.E100.A.2332
- ② T. Ohto, K. Yamamoto, S.-L. Kim, T. Nishio, and M. Morikura, ``Stochastic geometry analysis of normalized SNR-based scheduling in downlink cellular networks,`` IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 6, no. 4, pp. 438--441, Aug. 2017.  
DOI: 10.1109/LWC.2017.2701381
- ③ S. Kamiya, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and T. Sugihara, ``Spatial co-channel overlap mitigation through channel assignment in dense WLAN: Potential game approach,`` IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 7, pp. 1094--1104, July 2017.  
DOI: 10.1587/transcom.2016SCP0013
- ④ 大戸琢也, 山本高至, 羽田勝之, 西尾理志, 守倉正博, ``セルラネットワークにおける双方向全二重とユーザ多重全二重の適応的スケジューリング,`` 映像学誌, vol. 71, no. 2, pp. J61--J67, Feb. 2017.  
DOI: 10.3169/itej.71.J61
- ⑤ S. Kamiya, K. Nagashima, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and T. Sugihara, ``Self-organization of coverage of densely deployed WLANs considering outermost APs without generating coverage holes,`` IEICE Trans. Commun., vol. E99-B, no. 9, pp. 1980--1988, Sept. 2016.

DOI: 10.1587/transcom.2016SNP0020

- ⑥ K. Yamamoto, ``[Invited Survey Paper] A comprehensive survey of potential game approaches to wireless networks,`` IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 9, pp. 1804--1823, Sept. 2015.

DOI: 10.1587/transcom.E98.B.1804

<http://hdl.handle.net/2433/200768>

[学会発表] (計16件)

- ① K. Yamamoto, ``[Invited Paper] SIR distribution and scheduling gain of normalized SNR scheduling in Poisson networks,`` Proc. the Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWiN 2018) in conjunction with WiOpt 2018, Shanghai, China, May 2018.
- ② M. Iwata, K. Yamamoto, T. Nishio, and M. Morikura, ``Dependent interferer arrangement for physical layer security: Secrecy outage probability in clustered wireless networks,`` Proc. the 28th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2017), Montreal, Canada, Oct. 2017.
- ③ 山本高至, ``[Invited Lecture] セルラネットワークの確率幾何解析の基礎,`` 信学技報, vol. 117, no. 185, CQ2017-57, pp. 37-42, 2017年8月.
- ④ 山本高至, ``[Invited Lecture] セルラネットワークの確率幾何解析の基礎,`` 信学技報, vol. 117, no. 22, RCS2017-46, pp. 91-96, 2017年5月.
- ⑤ T. Ohto, K. Yamamoto, K. Haneda, T. Nishio, and M. Morikura, ``Capacity and fairness analysis of user scheduling in full-duplex cellular networks,`` Proc. the 13th IEEE Vehicular Technology Society Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS 2016), pp. 391--395, Tokyo, Japan, Aug. 2016.
- ⑥ T. Ohto, K. Yamamoto, K. Haneda, T. Nishio, and M. Morikura, ``Generalized PF scheduling for bidirectional and user-multiplexing unidirectional full-duplex links,`` Proc. the 21st Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2015), pp. 359--363, Kyoto, Japan, Oct. 2015.
- ⑦ K. Sakaguchi, K. Yamamoto, T. Nishio, and M. Morikura, ``Symmetric interaction in channel allocation for bi-directional in-band full-duplex network,`` Proc. the 26th IEEE International Symposium on Personal

Indoor and Mobile Radio  
Communications (PIMRC 2015), pp.  
1734--1739, Hong Kong, Sept. 2015.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.imc.cce.i.kyoto-  
u.ac.jp/ja/research/full-duplex/](http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/research/full-duplex/)  
[http://www.imc.cce.i.kyoto-  
u.ac.jp/ja/research/application\\_of\\_game  
theory/](http://www.imc.cce.i.kyoto-<br/>u.ac.jp/ja/research/application_of_game<br/>theory/)  
[http://www.imc.cce.i.kyoto-  
u.ac.jp/ja/research/tpc/](http://www.imc.cce.i.kyoto-<br/>u.ac.jp/ja/research/tpc/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者