

令和元年6月7日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06562

研究課題名(和文)アダプティブアレー信号処理による周波数共有

研究課題名(英文)Spectrum Sharing by Adaptive Array Signal Processing

研究代表者

丸田 一輝 (Maruta, Kazuki)

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30801170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信の普及に伴い、電波干渉がシステムの性能を制限する深刻な問題となる。本研究では、異なるシステムを含む様々な電波干渉を克服するための、アレーアンテナ信号処理技術を確立することを目的とする。その中で、どの信号が希望信号であるか、また干渉信号であるかを判別することが重要となる。研究期間において、(1)希望信号を簡易に捕捉可能なアンテナ選択方法、(2)一部の希望信号に関する既知情報を用いることでその他の未知の干渉を適応的に抑圧する手法、(3)送信信号の性質を意図的に改変することで受信側において容易に希望/干渉信号を分離可能な手法、などを提案・検討し、それらの有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、異なるシステムを含む様々な電波干渉を、複数のアンテナ(アレーアンテナ)を用いる信号処理により克服するための技術を提案・検討した。研究期間において、未知の干渉信号を、一部の事前情報を用いて、ないしは事前情報を用いることなく抑圧可能とする手法を提案し、それらの有効性を明らかにした。本成果により、異なる無線システム(例えば、携帯電話と無線LAN)が同じ周波数を共用したとしても互いの電波干渉なく通信ができるような社会に向けて技術的な進歩を遂げた。

研究成果の概要(英文)：Due to the wide and rapid diffusion of wireless communication, co-channel interference may be a serious problem limiting the system performance and user experience. This research proposed novel techniques based on the adaptive array signal processing, in order to overcome various interference problem including that from different systems. Here, the important issue is to recognize which signal is the desired or interference. Following approaches have been proposed and their effectiveness were clarified; (1) Simplified antenna selection scheme to capture the desired signal, (2) Semi-blind adaptive interference suppression exploiting a priori information of the desired signals, based on the massive MIMO systems where base station has hundreds of antenna elements, (3) Intentionally modifying the statistical inherence of the desired signal such that the receiver can easily separate the desired/interference signal.

研究分野：無線通信

キーワード：アダプティブアレー ブラインド型アルゴリズム 干渉抑圧 周波数共有 Massive MIMO

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

無線通信技術及びサービス要求の高度化に伴い、様々な無線通信システムが普及している。一般に、異なる無線通信システムにはそれぞれ異なる周波数チャンネルが割り当てられるが、周波数資源は枯渇している状況にあり、その有効利用が求められている。現実において、無線 LAN 等に割り当てられていた免許不要帯域(アンライセンストバンド)をセルラシステムが共用する動きが起こっており、両者は独立して動作することからシステム間干渉による互いの通信妨害が問題として起こり得る。これまでに、送信電力制御とアレーアンテナ信号処理を用いた周波数共用方式を提案し、その基本概念及び原理的な有効性を示した。本アプローチの有効性を真に明らかにするためには、干渉抑圧方式のさらなる性能改善ならびに様々なシナリオでの検証が必要であった。

2. 研究の目的

干渉問題は次のように分類できる。(a)複数無線通信システムの周波数共用下におけるシステム間干渉、(b)単一システムにおける異なるセル(1台の基地局がユーザ端末をカバーする領域)間干渉、である。一般に、電波干渉は信号が経由する伝搬路の情報(Channel State Information, CSI)を、送受信局が共有する既知情報を用いて推定・取得することができれば当該干渉を抑圧することは可能である。しかし前者(a)は、通信を行う送受信局のペアは異なる無線通信方式に基づくことから、互いの CSI や干渉に関する事前情報を得ることは不可能である。このような制約に基づいた干渉抑圧手法が必要である。一方、近年、基地局に 100 素子以上のアンテナを備える大規模 MIMO (Massive Multiple-Input Multiple Output)の台頭により技術的には 1 基地局が数十台ものユーザ端末を収容可能となりつつある。後者(b)においては、多数の端末が送信を行えばセル間干渉もその分増大するが、複数のセルに跨る CSI を限られた既知情報を用いて効率的に推定することは困難であり、この制約下ではセル間干渉が残存しシステム性能が制限されることが課題とされていた。本研究では、上記干渉問題を克服し、周波数利用効率を飛躍的に向上可能な通信の実現に向け、アレーアンテナを軸とした干渉抑圧方式の確立を目的とする。

3. 研究の方法

以下のアプローチで検討を行った。

(1) これまでに検討してきた異なる無線通信システム間における周波数共用方式(Subcarrier Transmission Power Assignment with Blind Adaptive Array: STPA-BAA)において、信号対雑音電力比(Signal-to-Noise power Ratio: SNR)が低い状況において提案手法の通信性能を改善することを目的として、サブキャリアごとに変調多値数を可変とする手法を導入した。

(2) アレー信号処理・制御に関する基礎検討として、各種ブラインド型アルゴリズムの特性比較を行い、干渉抑圧性能・収束性に優れたアルゴリズムを模索した。

(3) ブラインドアルゴリズムは受信信号を用いた最適化処理によりウェイトを導出するものであるが、これは初期状態に大きく依存する。ブラインドアルゴリズムを安定的に動作させる初期値の与え方に関する検討を行った。

(4) 多くのブラインドアルゴリズムは動作可能な条件(信号対干渉電力比: Signal-to-Interference power Ratio, SIR)が存在する。この制約を払拭可能し、いかなる条件でも干渉抑圧を実現可能な方法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) STPA-BAA 方式の拡張

OFDM をベースとした STPA-BAA 方式(図 1)では、サブキャリア毎にレベルを増減させることで他システムへの与干渉(図 1 中のシステム B→A)を低減させることが可能である。しかし、同一システム(B)において、低レベルサブキャリアは雑音に対する耐性が劣化することからスループット特性が劣化することが課題であった。これに対し、サブキャリア毎に異なる変調多値数を適用する改良を施した。高レベルサブキャリアには QPSK(1 シンボル当たり 2 ビット)、低レベルサブキャリアには誤り耐性が向上する

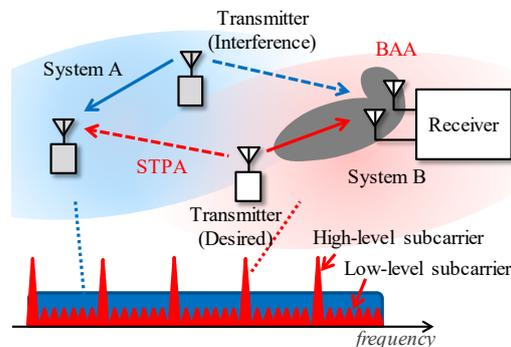


図 1: STPA-BAA 方式

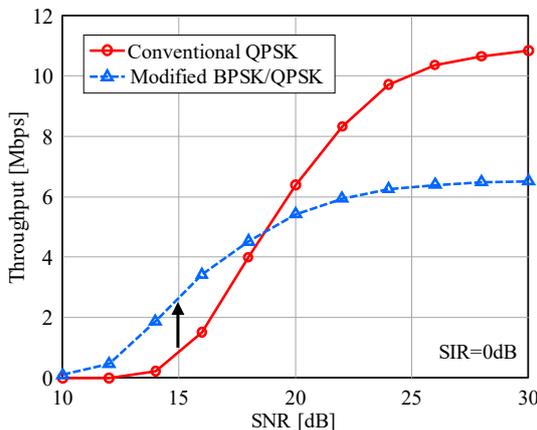


図 2: スループット特性

BPSK(1 シンボル当たり 1 ビット)を割り当てる。これにより、SNR が小さい領域におけるスループット特性を改善した。図 2 に示すように、STBA-BAA 方式により、希望信号と干渉信号が同レベルで到来する SIR=0dB の状況においてもスループットが得られており、さらに改良手法により SNR<18dB の領域において従来よりも改善が確認できる。本成果は 2018 年 3 月の電子情報通信学会 総合大会[C16]及び同年 9 月の国際会議 IEEE ISIT[C7]において発表した。なお、当初の予定では、異なる無線通信システム(例えば、LTE と WiFi)を想定した本方式の有効性の検証を進める予定であったが、新たなブラインドアルゴリズムの発見及びそのさらなる性能改善の手法を見出すことが出来たことから、それらの検討に注力することとした。

(2) 新たなブラインドアルゴリズム

これまででは、干渉抑圧効果の高いブラインドアルゴリズムとして、定包絡線アルゴリズム(CMA)を用いていた。しかし、これは 16QAM のような複数の振幅値を持つ信号に対しては良好な干渉抑圧効果が得られないという課題があった。そこで、様々なブラインドアルゴリズムにおいて包括的に比較検討を行った。表 1 に各アルゴリズムの特徴をまとめる。Steepest Descendent (SD)-CMA は最急降下法に基づく基本的な CMA であり、LS-CMA はその改良により収束性を改善したもの、Beamspace (BS)-CMA は事前にビーム形成のウェイトを適用する 2 段階処理に基づく手法である。MMA は多値信号への改良として複素信号の I 相及び Q 相それぞれに CMA を適用するものである。上記いずれも信号の振幅値にのみ着目してウェイトの最適化を行うものなる。独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)は、尖度と呼ばれる指標に基づき最適化を行うものであるが、FastICA は収束性に優れるものの干渉信号を誤捕捉してしまうことが頻発することが確認された。RobustICA は最急降下法に基づき、かつ各繰返しにおいて最適なステップサイズを探索する点が特徴であるが、RobustICA がいずれの指標においても優れることがわかった。さらに、この事前処理としてビームスペース法を併用することで干渉抑圧性能および収束性ともにさらに改善されることが確認された。本成果は 2018 年 5 月のコミュニケーションクオリティ(CQ)研究会[C12][C20]及び 9 月に開催された国際会議 IEEE ISIT[C6]において発表した。また研究協力者との協働において 100 素子規模のアンテナを有する基地局にて通信を行うマルチビーム Massive MIMO システムにおいて本手法が特に有効であることを明らかにした[C15][C13][C10][C9][C8][C5]。

表 1: 各ブラインドアルゴリズムの比較

アルゴリズム	出力 SINR	収束性	多値信号	安定性
SD-CMA	△	×	△	○
LS-CMA	○	○	×	○
BS-CMA	○	○	△	○
MMA	○	×	○	○
FastICA	○	○	○	×
RobustICA	○	○	○	○
BS-RobustICA	○	○	○	◎

(3) 初期ウェイト設定法

①アンテナ選択法: CMA や ICA は、干渉抑圧性能に優れる一方で、干渉を抑圧するためには受信時の初期状態において希望信号を捕捉する必要がある。これはつまり、アンテナ入力段における SIR が 0dB よりも大きいという条件が必要であることを意味する。各受信アンテナに様々なレベルで信号が到来するフェージング環境では、平均的には SIR>0dB であったとしても、フェージングによるレベルの瞬時変動により必ずしも常に SIR>0dB とはならず、誤って干渉を補足してしまう恐れがある。所望信号を適切に捕捉するための初期ウェイトの与え方は多数検討されているが、本検討では受信レベルが最大であるアンテナを選択し、ウェイトの初期値として与えるのみという簡易な手法を提案した。これは、希望信号が平均的に大きい場合、その大きい受信レベルに寄与するのが希望信号である、という期待に基づくものである。受信アンテナ数が多いほどその期待値は高まることから、多素子アンテナを備えるシステムにおいて本手法は特に有効である。図 3 にシミュレーション結果を示す。LS-CMA は初期値を固定的に与える従来手法、BS-CMA は事前処理として希望信号にビームを形成し、適切に希望信号を補足可能とする従来手法である。提案手法は BS-CMA よりも若干多いアンテナ数 7 以上において適切に干渉信号を抑圧し、高い出力 SINR を達成していることが確認できる。本研究成果は 2017 年 12 月に開催された国際会議 NOLTA[C18]及び 2018 年 3 月の通信方式(CS)[C14]研究会にて発表した。そして 2019 年 5 月に IET Microwaves, Antennas & Propagation への掲載が決定した[J1]。

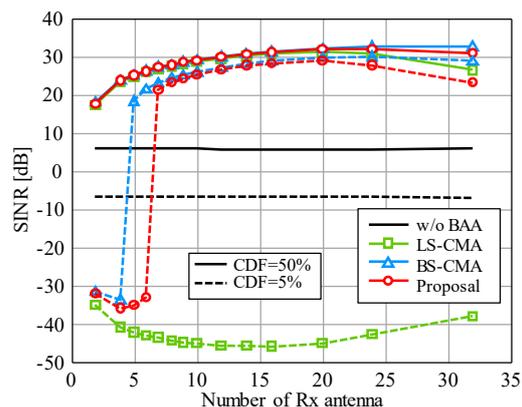


図 3: 受信アンテナ数に対する選択の効果

②伝搬路推定情報を用いたセミブラインド干渉抑圧：ブラインドアルゴリズムの応用のひとつとして、同一システム内の干渉抑圧のための検討を行った。Massive MIMO システムにおいて多数の端末と同時に通信を行う場合、既知のパイロット信号には限りがあることから同じパイロット系列を各セルで再利用しなければならず、パイロット信号間のセル間干渉が生じる。そのため CSI の精度が劣化し、セル間干渉及びセル内のユーザ間干渉ともに十分に除去できない課題があった(パイロット汚染)。これに対し、ブラインドアルゴリズムを適用することで Massive MIMO のアンテナ自由度を活用し上記の干渉を同時に抑圧可能とする手法を提案した。図 4 にそのブロック構成を示す。CSI をブラインドアルゴリズムの初期値として与えることで所望信号を捕捉し、他の干渉成分を抑圧する。これにより精度の向上したデータ部を復調し、伝搬路推定に再利用する(判定帰還)ことでその推定精度も向上する。さらにこれを再度ブラインドアルゴリズムの初期値として与える処理を繰り返すことで干渉抑圧性能を徐々に改善可能となる。図 5 に基地局(Base Station, BS)のアンテナ数(N_r)に対する誤り確率を示す。従来方式はブラインドアルゴリズムを用いず、判定帰還による CSI 推定のみを行うものである。これに対し、提案方式はより少ないアンテナ数、少ないシンボル数(図中の N_s)において優れた性能を達成可能である。本成果は、IEEE Transactions on Communications の 2018 年 12 月号に掲載され[J3]、またその改良方式は IEICE Transactions on Communications の 2019 年 8 月号に掲載が決定した[J2]。また無線通信システム(RCS)研究会等においても口頭発表を行い[C3][C4][C17][C19]、[C19]においては RCS 最優秀貢献賞を受賞した。

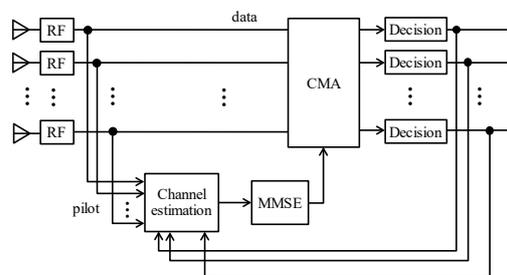


図 4: セミブラインド干渉抑圧方式の構成図

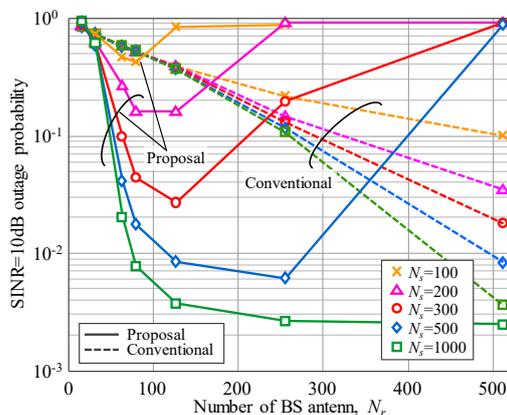


図 5: 基地局アンテナ数に対する干渉抑圧特性

(4) 動作領域の制約の克服

これまでに述べてきたように、CMA や ICA 強力な干渉抑圧性能を有する手法であるが、 $SIR > 0\text{dB}$ であることが動作のために必要な条件であった。本検討では、その動作領域の制約を克服する手法として時間領域シンボル拡散(Time-domain Symbol Spreading, TSS)の適用を提案した。図 6 にその構成を示す。送信機では所定の拡散行列を用いて時間領域に亘るシンボル系列を拡散し、送信する。この拡散行列は送受信機間において事前に共有されているものとする。受信機では当該拡散行列を用いて受信信号を逆拡散する。これにより干渉信号のみを拡散することになるが、この拡散処理は ICA においては尖度を低減し、CMA においては定包絡線性を崩す、という効果をもたらす。したがって希望信号の捕捉性能が向上し、本来は不可能であった $SIR < 0\text{dB}$ の領域での干渉抑圧が実現される。図 7 にアンテナ入力段での SIR に対するアレー出力 SINR 特性を示す。シンボル変調として 16QAM(1 シンボル当たり 4 ビット)を用いている。アレー処理を適用しない場合(w/o BAA)においては入力と出力の値が対応する。従来方式では入力 $SIR > 0\text{dB}$ の場合には出力 $SINR > 0\text{dB}$ であり、対して入力 $SIR < 0\text{dB}$ の場合には出力 $SINR < 0\text{dB}$ である。つまり大きい信号を捕捉し、小さい信号を抑圧するように動作していることがわかる。TSS を適用した RobustICA では、入力 SIR に関わらず常に 20 dB 程度の出力 SINR を維持しており、干渉信号レベルに関係なく抑圧を達成している。LS-CMA であっても、多値信号である 16QAM にもかかわらず SIR が -10dB からは有意な出力 SINR を達成しており、十分適用可能な領域と考えられる。本成果は 2019 年 3 月の RCS 研究会にて口頭発表を行った[C2]。

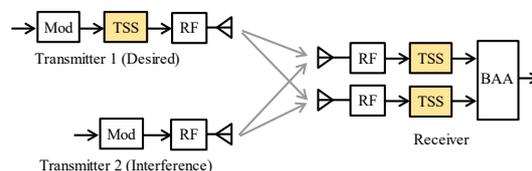


図 6: 提案方式の構成

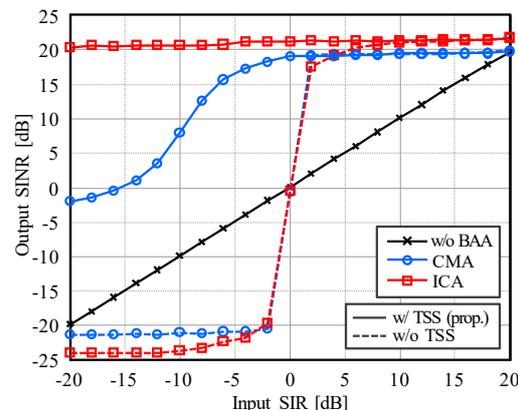


図 7: 入力 SIR に対する干渉抑圧特性(中央値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 7 件)

- [J1] K. Maruta, C-J. Ahn, “Stabilized Blind Interference Suppression of Constant Modulus-based Adaptive Array over Rayleigh Fading Channels by Initial Antenna Selection,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 査読有, 2019. [掲載決定] DOI: [10.1049/iet-map.2018.5795](https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5795)
- [J2] K. Maruta, C-J. Ahn, “Improving Semi-Blind Uplink Interference Suppression on Multicell Massive MIMO Systems: A BeamSpace Approach,” *IEICE Transactions on Communications*, 査読有, Vol.E102-B, No. 8, pp.-, August 2019. DOI: [10.1587/transcom.2018TTP0005](https://doi.org/10.1587/transcom.2018TTP0005)
- [J3] K. Maruta, C-J. Ahn, “Uplink Interference Suppression by Semi-Blind Adaptive Array with Decision Feedback Channel Estimation on Multicell Massive MIMO Systems,” *IEEE Transactions on Communications*, 査読有, vol. 66, no. 12, pp. 6123-6134, Dec. 2018. DOI: [10.1109/TCOMM.2018.2863679](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2863679)
- [J4] K. Maruta, “Dynamic Clustering and Coordinated User Scheduling for Cooperative Interference Cancellation on Ultra-High Density Distributed Antenna Systems,” *Entropy*, 査読有, Vol. 20, No. 8: 616, August 2018. DOI: [10.3390/e20080616](https://doi.org/10.3390/e20080616)

〔学会発表〕 (計 30 件)

- [C1] K. Nishimori, K. Maruta, T. Hiraguri, “Blind Adaptive Array by Constant Modulus with Variable Step Size for Multi-beam Massive MIMO”, Proc. *the 23rd International ITG Workshop on Smart Antennas*, Vienna, Austria, April 2019.
- [C2] 丸田一輝, 西森健太郎, 中山悠, 安昌俊, “時間領域シンボル拡散を用いたブラインド型アダプティブアレー,” 信学技報, vol. 118, no. 474, RCS2018-296, pp. 77-82, 2019年3月. [依頼講演]
- [C3] 丸田一輝, 安昌俊, “マルチセル Massive MIMO におけるセミブラインド MMA 及び MMSE-SMI による多値信号適用時の動作改善,” 2019年電子情報通信学会総合大会, B-5-42, 2019年3月.
- [C4] 丸田一輝, 安昌俊, “マルチセル Massive MIMO システムにおけるパイロット汚染除去のための干渉抑圧方式,” 信学技報, vol. 118, no. 254, RCS2018-177, pp. 143-148, 2018年10月. [奨励講演]
- [C5] 小川翔太, 西森健太郎, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, “ICA を用いた上り回線マルチビーム Massive MIMO の性能評価,” 信学技報, vol. 118, no. 246, AP2018-96, pp. 41-46, 2018年10月.
- [C6] K. Maruta, K. Nishimori, C-J. Ahn, “Constant Modulus and Kurtosis based Blind Adaptive Array Interference Suppression: Comparisons and New Approach,” Proc. *The 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2018)*, Bangkok, Thailand, September 2018. DOI: [10.1109/ISCIT.2018.8587976](https://doi.org/10.1109/ISCIT.2018.8587976)
- [C7] K. Senoo, T. Akao, K. Maruta, C-J. Ahn, “Improvement and Expansion of Operational Range for STPA-BAA Spectrum Superposing Scheme Using Subcarrier Adaptive Modulation,” Proc. *The 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2018)*, Bangkok, Thailand, September 2018. DOI: [10.1109/ISCIT.2018.8587852](https://doi.org/10.1109/ISCIT.2018.8587852)
- [C8] S. Ogawa, K. Nishimori, R. Taniguchi, K. Maruta, T. Hiraguri, “Multi-beam Massive MIMO Using Robust ICA,” Proc. *2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM)*, Nagoya, Japan, August 2018.
- [C9] 西森健太郎, 小川翔太, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, “マルチビーム Massive MIMO に適したブラインド型アダプティブアレーの比較検討,” 信学技報, vol. 118, no. 191, AP2018-79, pp. 67-72, 2018年8月.
- [C10] 西森健太郎, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, 満井勉, “可変ステップサイズ型 SD-CMA を用いたマルチビーム Massive MIMO,” 信学技報, vol. 118, no. 134, AP2018-51, pp. 55-60, 2018年7月.
- [C11] 西森健太郎, 小川翔太, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, “ビームスペース型 Robust ICA の特性解析,” 信学技報, vol. 118, no. 103, AP2018-40, pp. 15-20, 2018年6月.
- [C12] 丸田一輝, 西森健太郎, 安昌俊, “ブラインド型アダプティブアレーによる干渉抑圧: アルゴリズムの特性比較と応用について,” 信学技報, vol. 118, no. 71, CQ2018-22, pp. 25-30, 2018年5月. [招待講演]
- [C13] 小川翔太, 西森健太郎, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, “Robust ICA を用いたマルチビーム Massive MIMO,” 信学技報, vol. 118, no. 71, CQ2018-30, pp. 73-78, 2018年5月.
- [C14] 丸田一輝, 安昌俊, “フェージング環境におけるアンテナ選択による CMA/MMA アダプティブアレーの干渉抑圧特性安定化,” 信学技報, vol. 117, no. 504, CS2017-114, pp. 151-155, 2018年3月.
- [C15] 小川翔太, 西森健太郎, 谷口諒太郎, 丸田一輝, 平栗健史, “Robust ICA と LS-CMA によるマルチビーム Massive MIMO の比較検討,” 信学技報, vol. 117, no. 490, AP2017-201, pp. 51-

56, 2018 年 3 月.

- [C16] 妹尾克哉, 赤尾貴志, 丸田一輝, 安昌俊, “サブキャリア送信電力制御及びブラインドアダプティブアレーによる周波数共用方式における適応変調を用いた動作領域の拡大,” 2018 年電子情報通信学会総合大会, B-5-16, 2018 年 3 月.
- [C17] 丸田一輝, 安昌俊, “マルチセル Massive MIMO アップリンクにおけるセミブラインド干渉抑圧のビームスペース法を用いた特性改善,” 信学技報, vol. 117, no. 456, RCS2017-346, pp. 167-172, 2018 年 2 月.
- [C18] K. Maruta, C-J. Ahn, K. Hashimoto, “Stabilized Interference Suppression by Initial Antenna Selection for CMA Adaptive Array over Rayleigh Fading Channels,” *The 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2017)*, Cancun, Mexico, Dec. 2017. URL: <http://www.ieice.org/nolta/symposium/archive/2017/articles/5060.pdf>
- [C19] 丸田一輝, 安昌俊, “マルチセル Massive MIMO アップリンクにおける判定帰還型チャネル推定を用いたセミブラインド干渉除去,” 信学技報, vol. 117, no. 246, RCS2017-194, pp. 143-148, 2017 年 10 月. [依頼講演] [RCS 最優秀貢献賞]
- [C20] 丸田一輝, 安昌俊, “ブラインド型アダプティブアレーアルゴリズムの干渉抑圧特性比較,” 第 4 回コミュニケーションクオリティ (CQ) 基礎講座ワークショップ, 2017 年 10 月.

〔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 : <https://maltakazki.neko9.org/>

researchmap : <https://researchmap.jp/marutakazuki/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 西森 健太郎

ローマ字氏名 : Kentaro Nishimori

所属研究機関名 : 新潟大学

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。