

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04007

研究課題名(和文) 密集端末の連携によって実現するMassive MIMO最適伝送制御

研究課題名(英文) Transmission Control Schemes for Massive MIMO Systems Realized by Densely Distributed Cooperative Mobile Terminals

研究代表者

村田 英一 (Murata, Hidekazu)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：60252475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンに代表される携帯電話システムの周波数有効利用に向けて、周辺の無線端末が相互に連携して仮想的に1つの端末として機能させることに取り組んだ。これにより、多数のアンテナを備えた端末とほぼ等価となり、基地局が対応すれば空間多重伝送技術により周波数利用効率が飛躍的に高まる。連携リンクを含めた理論的取り扱い、連携プロトコルを視野に入れた特性評価ならびにフィールド実験により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

空間多重伝送の周波数利用効率拡大にはアンテナ数を増大させる必要があるが、基地局はまだしも携帯端末では困難である。移動環境においても多重数を拡大できる端末連携技術はまだほとんど研究されていないが、将来に向けて注目され始めている。特に、今後の端末が備える高周波数帯の無線機能をこの連携に活用すれば、スモールセル外において周波数利用効率を大幅に高めることができる。

研究成果の概要(英文)：User terminal collaboration can increase the effective number of available antennas of user terminals. Multi-user multiple-input multiple-output (MIMO) systems with precoding have been studied intensively. However, those systems have an issue of feedback delay that causes severe performance degradation. To cope with this problem, an MIMO system using a collaborative interference cancellation (CIC) scheme is proposed. In this scheme, received signal sharing among collaborated mobile stations is employed. In this research, we studied the performance of this system by in-lab transmission experiments using a fading emulator and field experiments in Kyoto city. Lossy collaboration and collaboration protocols are also studied.

研究分野：情報通信工学

キーワード：移動体通信 先端的通信 情報通信工学 干渉キャンセル 端末共同

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度な無線送受信機(携帯電話類・スマートフォン・モバイルルータ)が街中にあふれ、移動体通信のトラフィックが増大している。周波数の有効利用がより一層重要となっており、関係研究開発機関では、「10年で1000倍」を合い言葉に研究を活性化させている。

周波数利用効率を向上するMIMO多重伝送の実用化が携帯端末(3G HSDPA系、LTE)や無線LAN(IEEE 802.11n, 802.11ac)などで進められているが、MIMO多重伝送の周波数利用効率は送信アンテナ数が受信アンテナ数の少ない方にほぼ比例する。携帯端末において現状の2~3アンテナから大幅に増加させることは難しいため、少ないアンテナ数の携帯端末を複数同時に収容するマルチユーザMIMO(MU-MIMO)が盛んに研究されている。MU-MIMOでは携帯端末側での信号分離を補助するために基地局側において瞬時の伝搬路状況に合わせたプリコーディングが行われる。しかし、伝搬路状態を携帯端末からフィードバックするには一定の時間(現状で5ミリ秒や10ミリ秒)が必要であるため伝搬路の変化に弱く、携帯端末の移動速度が大きく制限されてしまうため、屋内での利用が主となると考えられる。

一方、今後の第5世代携帯電話システム(5G)に向けて、これまで利用されていなかった高周波数帯(議論されているが例えば6GHz以上)を利用する小型基地局である「スモールセル」を多数設置することが考えられている。しかし、高周波数帯は障害物による減衰(シャドウイング、ブロッキング)が大きく、無指向性アンテナの有効断面積が減少するため指向性アンテナによるビームを活用する必要も生じる。このため、高周波数帯のカバー範囲は見通し範囲内程度に限られ、かつ、周辺の人々の動き等で通信状況が大きく左右される。

現在多くのトラフィックが発生しているとされる「夜間の屋内から」と「都心部の限られたエリア」は上記のMU-MIMOとスモールセルで対応可能であるものスモールセルからの見通し外や移動体への通信に関して周波数利用効率を大きく高める有力な手段は知られていない状況である。

本研究は、このような高トラフィックを生む原因の一つである密集したユーザと、スモールセル用に装備されるようになる高周波数帯用無線機を活用してセルラ通信の周波数利用効率を画期的に改善することに取り組む。これにより、スモールセルのエリア外においても、ユーザが密集した場所や高速な移動端末への通信の周波数利用効率を画期的に改善できる。理論上は、基地局が対応する限り、連携ユーザ数に比例した改善効果が期待できることになる。

2. 研究の目的

同一周波数の複数信号を用いて通信を行うMIMO伝送は送受信アンテナ数にほぼ比例した周波数利用効率を得られるため、多数の携帯端末による連携した信号処理が可能であればその台数にほぼ比例して周波数利用効率が高まる。したがって、隣接端末は伝送上の競合相手ではなく協力すれば互いにメリットがあるWin-Winの関係となる。

しかしこれまで、現実的な連携シナリオが欠けており、この着想はほとんど注目されてこなかった(我々は2004年に提案)。ところが、近年の携帯端末は複数の無線インタフェースを備えており、これらを活用して携帯端末間の連携関係を築くことができる。また、スモールセル向けに追加される高周波数帯用無線機のスモールセル外における有効な活用手段となる。ユーザが密集している場所や電車・バス内ではユーザ間の相対位置関係に大きな変化はなく、携帯端末間には安定した通信が期待できることから、現実味が格段に増している。

このアイデアは既に基礎実験に成功しており基本動作を実証している。また、線形プリコーディングと線形干渉キャンセルの場合について新たな知見が得られており、理論解析を進めている。伝送方式の最適化すれば携帯端末グループのみならず孤立端末への伝送特性も著しく改善されることが判明している。

3. 研究の方法

移動端末に搭載できるアンテナ数が最大でも4程度に限られるとされるなか、MIMO空間多重数を増すために基地局側においてプリコーディングを行うMU-MIMOが盛んに研究されてきた。しかし、伝搬路情報のフィードバック情報を利用するため、アップリンクのトラフィックが増え、フィードバック遅延のため高速移動に対応することが難しい。この対策として近傍携帯端末との連携による等価的な携帯端末多アンテナ化を考える。技術課題を列挙する。

1. 連携する携帯端末クラスタの最適生成と受信信号の高効率交換方式
2. 安定な通信が維持できる範囲でクラスタを維持・更新する技術
3. 無線LANアドホックモードやWi-Fiダイレクト、今後のD2D通信(3GPPでProSeとして標準化中)での信号交換方式
4. サンプルされたIQデータのブロードキャストする際の伝送方式の状況に応じた最適化
5. クラスタ内での信号処理方式・共同干渉キャンセル方式
6. MMSE等の線形干渉キャンセル技術
7. MLDやQRM-MLDなどの非線形干渉キャンセル技術
8. グループ復調を前提とした場合の最適な基地局送信方式
9. グループ端末の移動速度推定(伝搬路のドップラースペクトル推定)
10. 十分な等価アンテナ数を持つグループ端末にはプリコーディング送信をしない制御

11. 孤立した、または十分な等価アンテナ数を持たない移動端末にはプリコーディング送信
12. 十分な信号処理能力を持つ(MLDを持つなど)端末には干渉を許してプリコーディング
13. 上記の各種端末が混在している場合の最適ウェイト生成・送信電力制御技術

この中で課題 1. および 2. については基本的な方式について実装を終えている。本研究は残された課題について研究を展開し、有効性をフィールド試験によって実証する。

フィールド実験

これまでも USRP を利用した屋外・屋内伝送実験を行っており、周波数同期、タイミング同期も含め、伝送実験にあたって必要となる機能は一通り実装を終えている。[招待論文、依頼講演、招待講演各 1 件]。無線免許については特定実験試験局制度を利用する。この制度は地域と期限を限って無線免許を交付するものであり、無線設備の点検を受けることにより 1 週間から 2 週間で免許状が交付される。本研究では、装置の入手性と免許される帯域幅、免許期間を考慮し基地局には 428 MHz 帯を利用する。この帯域では等価等方輻射電力(EIRP)10W までが平成 31 年 6 月末まで免許される。また、端末連携通信に関しては 12.9GHz 帯において実現した。

高速移動対応基地局ビーム制御

基地局のビームフォーミングの新たな観点として、伝搬路変動を抑える入射角となるビームを生成することに着目した。通常は SNR が最大となるビームを生成し、移動体の位置変化をトラッキングしているが、移動方向と電波の入射方向をできるだけ直交させる、または、一方向にまとめてドップラー広がりを抑えることにより、ビームを含めた伝搬路の変動を抑えることができる。ただし、この手法は受信信号が比較的少数のパスから成ることが前提であり、ジェイクスモデルのような伝搬路モデルでは研究を行うことができない。

このため、レイラウンチングによる伝搬路予測技術を用いて仮想空間における電波伝搬を計算し、伝搬路変動を抑える基地局ビームフォーミング技術の研究を行なった。

受信フレーム転送の効率化

連携端末の高周波数帯における受信フレーム転送の効率化を目標として、最初に受信フレーム転送データの変換方式について検討した。データ変換方式として、サンプリングされた受信フレームを転送するアナログ転送方式と受信フレームを 2 進符号化したデータを転送するデジタル転送方式を検討した。さらに、デジタル転送方式については空間多重信号を 2 進値で表現するための膨大なデータ量を圧縮する方式について検討した。

その結果、転送方式には受信端末の環境に応じた優劣があり、孤立端末とグループ端末が混在するネットワークでは高周波数帯における転送方式の選択も含めた無線通信制御が要求される。その結果、高周波数帯の無線リソース制御を含めた基地局によるクロズドループ制御では基地局から宛先への無線リソースにも膨大な制御オーバーヘッドを生じる可能性があり、このオーバーヘッドが移動通信ネットワークのボトルネックになりかねない。この結果を受けて、先にドミナントパルスが観測された端末が優先されるコントローラエリアネットワークのメディアアクセス制御方式に着目して、高周波数帯における受信フレーム収集の伝送効率及びエネルギー効率を向上させる方式として成功優先の概念を入れたメディアアクセス制御プロトコルを新たに考案した。

成功優先メディアアクセス制御方式の評価を理論解析と計算機シミュレーションにより実施した。提案方式は、原理的に自律分散的なメディアアクセス制御方式であり、孤立端末とグループ端末、および、連携端末間の転送方式がヘテロジニアスなネットワーク環境においてもオープンループアクセス制御が実施可能であり、制御オーバーヘッドを大幅に低減できると期待される。

Lossy Forwarding (LF)方式の適用

高周波数帯を用いた連携端末の受信フレーム転送において、ダウンリンク信号の受信波形をデジタル中継する方式のオルターナティブ方式として、Lossy Forwarding (LF)方式の適用を重点的に検討した。

LF 方式とは：連携端末が一つの場合を考える。連携端末において一旦受信波形を復号したのちに情報部分をインターリーブし、再符号化し、デジタル中継する方式であり、復号結果の誤り検出の結果に関わらずに前述の動作を行う。宛先局では、送信局と連携端末からの 2 つの系列を受信することになるが、本来、元の情報系列は一つなので、送信局 連携端末間リンクで誤りが生じても、二つの系列間には相関がある。したがって、相関のある情報源符号のジョイント復号を行えば、元の情報が再生できる。

これによって、連携端末による中継システム全体を分散ターボ符号とみなすことができる。この方式は、共同研究者らのグループが以前から検討してきた方式で、有効な端末中継として、特に欧州の研究グループを中心に認知を得ている。また、欧州 FP7 RESCUE プロジェクト EU-FP7 project (ICT-619555 RESCUE (Links on-the-fly Technology for Robust, Efficient and Smart Communication in Unpredictable Environments)の枠組みで、研究されてきた。

期待される効果：JSPS Kakenhi (B)15H04007 においては、この問題をさらに拡張し、(a) 連携端末が複数存在する場合の特性理論解析と Non-Orthogonal 信号を用いた Multiple Access Relay Channel (MARC)を介した伝送を行う場合への拡張、(b) 特に、特定のあて先局に対する送信局アンテナを Zero Forcing 制御し、受信波形をサンプリングしてバイナリ伝送を行う場合と、LF 方式を用いる場合の等価ダイバーシティ次数、(c) さらに、Internet-of-Things に代表されるように、センサーネットワークを介した (= 連携端末との協調) 伝送において宛先局において Lossless 再生が必要とされない Lossy 伝送の場合の劣化場所率解析を行ってきた。この方式の最大の利点は、受信信号のアナログ波形を一旦サンプリングし、さらに転送データを再び 2 進符号化して中継する必要がないので、送信局 連携端末間の信号帯域と連携端末 宛先局間の信号帯域は同一となる。このため、高周波数帯における帯域拡大を防ぐことができることにある。

4. 研究成果

フィールド実験

実際に京都市内において車両を用いたフィールド伝送実験を実施した。これには 4 ストリーム送信の基地局、高周波数帯で連携通信を行う 6 端末を用いた。連携方式は非再生中継である AF (Amplify and Forward)方式とデジタル方式 (PCM データをデジタル変調で送信) である。デジタル方式が伝送特性に優れるが、AF 方式は今回のハードウェアを利用した場合は短い連携時間で済むため、最大連携台数では AF 方式が優れた結果となった。

高速移動対応基地局ビーム制御

簡易な地図データ (仮想市街) を用いた計算機シミュレーションにより、ドップラー広がりを抑える基地局ビームフォーミングについて検討を行なった。その結果、フロア誤りを大幅に低減でき、当初の着想通りの大きな特性改善効果が得られた。ただし、レイラウンチングによる伝搬路は計算量の制約などにより現実のものに近いとは言えず、今後、より詳細な検討が必要である。

受信フレーム転送の効率化

高周波数帯における連携端末の受信フレーム転送データの変換方式において、アナログ転送方式は高周波数帯の無線リソースを削減できるものの受信データの信頼性が低減し、デジタル転送方式は高周波数帯の無線リソースを大幅に要求するものの受信データの信頼性が向上することを明らかにした。その結果、連携端末間の高周波通信環境に応じて、転送方式の選択が基地局から宛先端末への伝送容量に大きく依存することになる。また、実験結果によりアナログ転送方式はハードウェアの不完全性により大幅に性能が劣化する可能性があることが明らかになった。これにより、グループ端末においては周辺の無線通信環境および無線通信デバイスの品質も含めて転送方式を選択する必要が生じる。

このため、高周波数帯リソースを有効利用するための制御オーバーヘッドが膨大になることが懸念される。そこで、成功優先の概念を導入した自律分散制御に基づくメディアアクセス制御方式を考案し、その性能を伝送効率とエネルギー効率の観点から理論解析と計算機シミュレーションにより評価した。これらの結果から提案する成功優先メディアアクセス制御方式は、物理層の変更を伴わずにランダムアクセス性能の限界を超えることが示され、伝送効率およびエネルギー効率が高いことが明らかにされた。この成果により、孤立端末とグループ端末、および、高周波数帯のアナログ転送方式とデジタル転送方式が混在するヘテロジニアスなネットワーク環境において制御のためのオーバーヘッドを低減でき、システム全体の伝送容量が向上することが期待される。

Lossy Forwarding (LF)方式の適用

(1) 送信局におけるアンテナ制御を行わずに、複数連携端末における LF 中継を行う場合には、等価ダイバーシティ次数が連携端末数 + 1 になることを明らかにした。また、同様のことが MARC を介した伝送においても成立し、特に Non-Orthogonal 信号を用いた伝送を行う場合には、伝送スループットが 1.5 倍に改善できることを明らかにした。

(2) 特定のあて先局に対する送信局アンテナを Zero Forcing 制御し、受信波形をサンプリングしてバイナリ伝送を行う場合、Zero Forcing によって、既に特定のあて先局に対して割り当てられる信号部分空間がすでに限定されている。このために、等価ダイバーシティ次数が割り当てられるアンテナの本数に限定される。これに対して、LF 方式では、連携端末において一旦復号を行うので、等価ダイバーシティ次数は、Minimum-Cut-Maximum-Flow 定理で与えられる。検討の結果、等価ダイバーシティ次数は割り当てられる送信アンテナ数 × 宛先局アンテナ数 + $\min(\text{送信アンテナ数} \times \text{連携端末数}, \text{連携端末数} \times \text{宛先局アンテナ数})$ となることを明らかにした。

(3) Lossy 中継、Lossy 伝送の場合の理論的基盤は分散マルチターミナル有歪情報源符号化問題に帰着する。この問題は、一部にネットワーク情報理論でも未解決な問題を含むため、困難を極めた。まず、速度歪領域の解析からレート領域を求め、これをさらに各連携端末から得られる信号から、送信信号と受信信号の間の相互情報量を最大とする最適化問題に帰着させた。

これによって、任意の最終的な歪（＝誤り率）を端末連携によって達成するための伝送速度が求まり、また、劣化場所率と等価ダイバーシティ次数の関係が明らかになった。なお、多くの論文発表を行ったが記述スペースが不足するため、下記の IEEE Survey and Tutorial 論文 (IF=20.23)だけを記述する。この中に上述の関連論文の内容が記述されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

Jiguang He, Valtteri Tervo, Xiaobo Zhou, Xin He, Shen Qian, Cheng, Meng, Markku Juntti, Markku, Tad Matsumoto “A Tutorial on Lossy Forwarding Cooperative Relaying”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 査読有, Vol.21, Issue 1, 2019, 66-87, DOI: [10.1109/COMST.2018.2866711](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2866711)

D. Umehara, T. Shishido, Controller Area Network and Its Reduced Wiring Technology, IEICE Transactions on Communications, 査読有, E102-B, 2019, 印刷中
<http://doi.org/10.1587/transcom.2018ANI0004>

S. Denno, D. Umehara, Adaptive Configuration of Forward Channels for Terminal Collaborative Reception, ITE Transactions on Media Technology and Applications, 査読有, 6, 2018, 82-90, <http://doi.org/10.3169/mta.6.82>

上野 修平, 梅原 大祐, 田野 哲, 端末共同干渉キャンセラにおける PCM-RoHR とその性能評価, 映像情報メディア学会, 査読有, 71, 2017, J74-J79, <http://doi.org/10.3169/itej.71.J74>

D. Umehara, H. Murata, S. Denno, Success Prioritized Distributed Coordination Function, IEEE Communications Express, 査読有, 5, 2016, 303-308
<http://doi.org/10.1587/comex.2016XBL0083>

新田 慎吾, 梅原 大祐, 水間 源季, 若杉 耕一郎, 短パルス伝送路符号による CAN の高速・大容量化, 電子情報通信学会 B, 査読有, J99-B, 2016, 193-205

〔学会発表〕(計3件)

Ilmiawan Shubhi, Hidekazu Murata, Dynamic Precoder for Massive MIMO in The Presence of Large Doppler Spread, The 6th International Workshop on High Mobility Wireless Communications (HMWC), Sydney (Australia), 査読有, 2017.

Ilmiawan Shubhi, Hidekazu Murata, Recursive Power Allocation with Interference Minimization for Time Varying Massive MIMO, IEEE Vehicular Technology Conference, 査読有, 2017.

Masahiro Arai, Hidekazu Murata, Experimental study of inter-terminal communications for terminal collaborated MIMO reception using higher-frequency band in vehicle, IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC2018-Spring), 査読有, 2018.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：松本 正

ローマ字氏名：MATSUMOTO, Tadashi

所属研究機関名：北陸先端科学技術大学院大学

部局名：先端科学技術研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：40452114

(2)研究分担者

研究分担者氏名：梅原 大祐

ローマ字氏名：UMEHARA, Daisuke

所属研究機関名：京都工芸繊維大学

部局名：情報工学・人間科学系

職名：教授

研究者番号(8桁)：50314258

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。