

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14268

研究課題名(和文)空間分割多重信号を共有するための空間相関を利用したデータ圧縮

研究課題名(英文)Data Compression Using Spatial Correlation to Share Spatial Division Multiplexing Signals

研究代表者

梅原 大祐(UMEHARA, Daisuke)

京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・教授

研究者番号：50314258

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文):多数アンテナを有する基地局から少数アンテナを有する移動端末群に向けて空間分割多重信号を送信する。端末共同干渉キャンセラでは、宛先端末が周辺の連携端末群の受信信号データを高周波数帯を用いて共有することで受信アンテナの自由度を向上させて空間分割多重信号を信頼性高く復号する。本研究では、受信信号のPCMデータを転送するPCM-RoHRにおいて空間相関を利用したデータ圧縮を施したとしても、受信信号の量子化振幅を転送するPAM-RoHRがその連携端末数を追加することにより高周波数帯におけるフレーム転送時間の圧縮効率と受信空間多重信号の復号信頼性をより向上させることが可能であることを明らかにしている。

研究成果の概要(英文):Let us consider that spatial division multiplexing (SDM) signal is transmitted at a base station (BS) with a number of antennas to a mobile terminal (MT) with fewer antennas. It will be intractable for the MT to demultiplex the received SDM signal by spatial linear filtering in the case of less degrees of freedom at the MT. Multiple-input and multiple-output with collaborative interference canceller (MIMO CIC) is applied to demultiplex the received SDM signal frame with the enhancement of degrees of freedom at the MT by sharing the other SDM signal frames received at the surrounding MTs with higher-frequency radio forwarding called radio over higher-frequency radio (RoHR). Even if pulse-code-modulated RoHR (PCM-RoHR) conducts data compression using spatial correlation, pulse-amplitude-modulated RoHR (PAM-RoHR) can achieve higher compression efficiency of the frame transfer time and higher decoding reliability of the SDM signal by adding a few MTs to the group of cooperating MTs.

研究分野：情報通信工学

キーワード：空間分割多重 端末共同干渉キャンセラ PCMデータ転送 PAMデータ転送 SDM信号相関 分散情報量圧縮 誤り訂正符号 ビット対数尤度比

1. 研究開始当初の背景

複数の送受信アンテナを用いる MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 技術のセルラーシステムへの導入により、今後、大容量伝送が可能な多数のアンテナを有する基地局 (Base Station, BS) の設置が期待される。一方、移動端末 (Mobile Terminal, MT) は小型及び省電力であることが望まれるため、多数のアンテナを搭載することは困難である。そこで、基地局からのビームフォーミングにより、特定の移動端末に干渉波が抑圧されるような空間分割多重 (Spatial Division Multiplexing, SDM) 信号を送信するマルチユーザ MIMO、基地局側に大規模なアンテナアレーを搭載した Massive MIMO が注目を集めている。このとき、基地局では SDM 信号を送信する移動端末群に向かう全チャネル情報を、事前に取得して適切なプリコーディングを施す必要がある。しかし、移動端末から基地局へのフィードバックチャネルを利用してそれらのチャネル情報 (Channel State Information, CSI) を推定するクロズドループ制御が要求されるため、制御のためのオーバーヘッドが大きくなり、基地局からのダウンロードリンクの伝送効率が低下することが懸念されている。特に、CSI の時間変動が高い高速移動時の移動端末では、伝送効率の低下が顕著となる可能性がある。また、次世代セルラーシステムの 5G ネットワークでは、広い周波数帯を利用可能なミリ波によるシステムスループットの増大を図る検討がされているが、ミリ波のカバーエリアは小さくなることが予想され、スモールセル構成となり、現状のセルラーシステムのサービスエリアをミリ波のスモールセル群で覆うことには経済コスト的に困難を伴う。そのため、基地局に搭載された多数のアンテナ、及び、移動端末のミリ波帯用の無線インタフェースが有効に活用されない可能性がある。

そこで、我々のグループは基地局に搭載された多数のアンテナと移動端末のミリ波帯用の無線インタフェースを有効に活用した端末共同干渉キャンセラ (Collaborative Interference Canceller, CIC) を提案してきた。MIMO CIC では少数アンテナを有する移動端末が互いに基地局からの受信 SDM 信号をミリ波帯などの高い周波数帯を利用して共有するオープンループ制御により仮想的な MIMO 受信を実現する。しかしながら、受信振幅変動が少ないと考えられる 4-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 信号を採用した送信アンテナが 2 本である MIMO CIC においても、受信ベースバンド信号の 1 複素サンプル当たり 12 ビットの PCM (Pulse Code Modulation) データが必要となり、受信信号共有のための高周波数帯において SDM 信号周波数帯と比較して極めて広い周波数帯幅が必要となる。そこで、MIMO CIC に効率的な受信信号共有の方法が望まれる。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、MIMO CIC における高周波数帯での受信信号共有方式の効率化である。高周波数帯での受信信号共有方式が効率化されれば、MIMO CIC システムにより多くの移動端末が収容できるため受信ダイバーシチ効果の向上、すなわち、復号データの信頼性の向上が期待できる。また、複数の送信ストリームを 1 台の移動端末で受信可能な柔軟性を有するため、システムスループットの向上だけでなく特定のユーザスループットを向上させる無線リソース制御も可能となる。また、一定の移動端末数のもとで、受信信号共有が効率化されれば、受信信号共有のための時間が短縮化され、受信信号共有以外の時間は高周波数帯の無線インタフェースをスリープさせることができ、移動端末の消費エネルギーの削減に繋がる。したがって、本研究課題では、受信信号データの情報圧縮の提案、及び、受信信号共有プロトコルの効率化が目的となる。この 2 つの目的のうち、受信信号データの情報圧縮方式について主に取り組んだ。

3. 研究の方法

基地局から移動端末への SDM 信号の周波数帯を R バンド、移動端末群が互いに受信信号を共有するための高周波数帯を HR バンドと呼ぶ。基地局から移動端末への信号伝送における変調方式は、これまで検討されてきた振幅変動が少ない 4-QAM の代わりに、ピーク電力と平均電力との比が大きいという欠点を有するが LTE (Long-Term Evolution) で採用されている OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 変調を用いた。本研究の研究開始以前より、各移動端末が HR バンドで転送するデータとして受信信号の PCM データを用いる PCM-RoHR (Pulse Code Modulated Radio over Higher frequency) と受信信号の量子化振幅を用いる PAM-RoHR (Pulse Amplitude Modulated RoHR) を提案してきた。また、MIMO CIC 用にキャリアセンス可能であることを前提としたコリジョンフリーのメディアアクセス制御 (Medium Access Control, MAC) プロトコルである SSR-TDMA (Short Slot Reservation Time Division Multiple Access) を提案してその伝送効率を評価してきた。SSR-TDMA は信号共有に効率的なプロトコルであるため、受信信号データの情報圧縮方式の検討においても SSR-TDMA の利用を前提とした。

受信信号データの情報圧縮方式として次の 3 つの提案方式を検討した。

- (1) 空間相関を利用した線形予測符号化
- (2) チャネル推定を利用した差動符号化
- (3) 量子化振幅を転送する PAM-RoHR

方式(1)は、SDM 信号自体に空間相関があることが期待されるため、先に連携端末群から転送された受信信号群から得られる空間相関

係数に基づいた線形予測信号と自身が転送する受信信号との差分信号を送ることにより情報圧縮を実現する方式である。この方式の検証は、通信路容量ベースで性能解析することとソフトウェア無線機による空間ストリーム間の相関を実測することで進めてきた。しかしながら、空間相関の向上により同じ通信路容量を達成するための転送 PCM ビット数が低減できる可能性は示したものの、MIMO CIC では連携端末群が位置的に離れているため、受信アンテナ間の空間相関係数は低いものと予想され、MIMO CIC システムにおいて観測される空間相関係数は低く転送データフレームに対して十分な情報圧縮ができなると見込まれる。そこで、方式(2)を考案してその情報圧縮特性を検討することにした。方式(2)は、各連携端末でチャンネル推定値を導出することにより連携端末が転送するごとに受信信号に含まれる送信ストリームを減らしていくことで情報圧縮を実現する方式である。分散的に空間線形フィルタリングを実施していると考えてもよい。この方式では、チャンネル推定値を利用して仮想的に各連携端末の受信信号間の空間相関係数を高めることで情報圧縮をする方式と見ることができ。この方式では、各連携端末で加わる R バンド雑音の振る舞いの解析が難しいため、計算機シミュレーションによる性能評価を検討した。しかしながら、方式(2)の検討を進めていくところで方式(3)において受信 SDM 信号の復号データの信頼性が十分に確保できると判明したため、時間圧縮効率の高い方式(3)について検討を進めることにした。方式(3)は研究開始以前に提案した方式であり、受信ベースバンド信号の 1 複素サンプルをそのまま 1 複素サンプルとして HR バンドで転送する方式であるため、1 複素サンプルから 12 ビット PCM データを生成する PCM-RoHR 方式よりも 1/4 以下の時間圧縮率が得られることが示されていた。しかしながら、R バンドにおける受信 SDM 信号と雑音に対して HR バンドのフェージング係数が掛かるため、復号データの信頼性が確保できるかどうかは未知数であった。方式(1)と(2)の検討と平行して方式(3)の復号データの信頼性を検討した結果、ビットの尤度情報が復号器に正しく入力されれば PCM-RoHR の復号データの信頼性より劣るものの、その劣化は連携端末の追加で補償できることが明らかになった。特に、方式(1)と(2)では最初に転送する連携端末のデータフレームがほぼ圧縮できないのに対して、方式(3)では方式(1)と(2)の最初の転送データフレーム時間内で連携端末数 4 台分の転送データフレームを入れることが可能である。さらに、方式(2)で 2 番目以降の転送データフレームが理想的に圧縮できたとしても方式(3)で連携端末を追加したほうが時間圧縮効率と復号データの信頼性の双方で優れる結果が得られた。そのため、3 節の研究成果では、方式(3)の検討結果であ

る転送データフレーム時間とそのビット誤り率特性について記述する。

4. 研究成果

現状の LTE システムを想定して、基地局からの送信信号は OFDM 信号とする。評価用スケールモデルのパラメータ値は、R バンドは LTE Release 8, HR バンドは IEEE 802.11 のパラメータ値を考慮して与えた。特に、HR バンドの OFDM 信号は、IEEE 802.11ac におけるチャンネル帯域幅 $B = 20/40/80/160$ MHz 及びショートガードインターバル $0.4 \mu\text{s}$ の OFDM 信号と同等である。ただし、PAM-RoHR のチャンネル帯域幅は $B = 20$ MHz のみである。一方、R バンドの OFDM 信号は、HR バンドの OFDM 信号の $1/B$ スケールである。サブフレーム長 1 ms は LTE のサブフレーム長と同等であり LTE ではサブフレーム単位で、誤り訂正、CRC (Cyclic Redundancy Check)、HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest)などが行われ、このサブフレーム長が TTl (Transmission Time Interval)として定義されている。また、1 フレームは 10 サブフレームで構成される。ここでは、M サブフレームをまとめたものを RoHR フレームと呼び、HR バンドでの受信フレーム共有の時間単位とし、PCM-RoHR では M サブフレームをまとめて転送するフレームアグリゲーションが適用可能である。一方、PAM-RoHR では転送するのがデジタルデータでないため、 $M = 1$ のみである。

R バンド SDM 信号に対するサブキャリア変調と通信路符号化をそれぞれ、4-QAM 及び拘束長 7、符号化率 $1/2$ のたたみ込み符号とする。このときの R バンドの PHY レートは 1.4 Mbps である。PCM-RoHR のサブキャリア変調と通信路符号化はそれぞれ、16-QAM 及び拘束長 7、符号化率 $1/2$ のたたみ込み符号とする。PCM-RoHR における 1 複素サンプル当たりの PCM ビット数 12 とする。また、通信路符号化の復号は軟判定ビタビ復号である。

4.1. 正規化フレーム転送時間

基地局が $N_t = 2$ 本の送信アンテナを有し、シングルアンテナの連携端末が $N_r = 4$ 台の MIMO CIC システムを考える。RoHR フレーム長で図 1 に正規化した HR バンド連携に要する時間を正規化フレーム転送時間 (Normalized Frame Transfer Time)として評価する。PCM-RoHR は $M = 1, 5, 10$ と $B = 40$ MHz、PAM-RoHR は $M = 1$ と $B = 20$ MHz を評価している。図 1 の結果から、PAM-RoHR の正規化フレーム転送時間は PCM-RoHR の正規化フレーム転送時間の半分以下であり、PAM-RoHR の周波数帯域幅は PCM-RoHR の半分である。すなわち、PAM-RoHR の無線リソースは PCM-RoHR の無線リソースの $1/4$ 以下にできることを意味している。特に、4 台連携時に正規化フレーム転送時間は 0.4 未満であるため、PAM-RoHR では RoHR フレーム内に 10 台の移動端末が連携可能である。

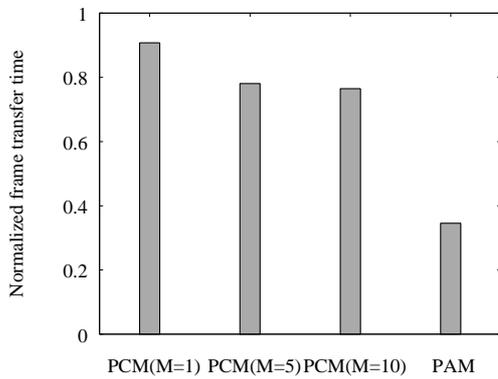


図1. PCM-RoHR (B = 40 MHz)とPAM-RoHR (B = 20 MHz)の正規化フレーム転送時間

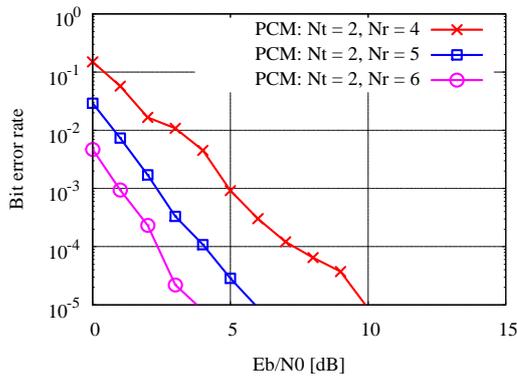


図2. Eb/NO に対する PCM-RoHR のビット誤り率

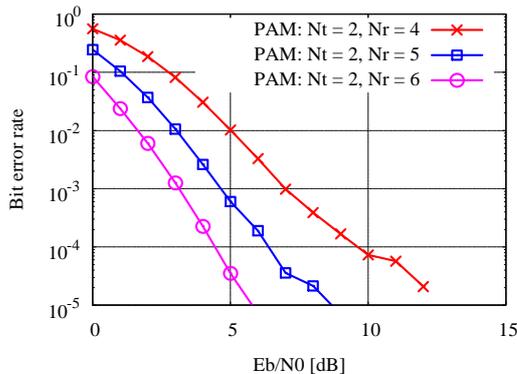


図3. Eb/NO に対する PAM-RoHR のビット誤り率

4.2. ビット誤り率特性の評価

基地局が $N_t = 2$ 本の送信アンテナを有し、シングルアンテナの連携端末が $N_r = 4 \sim 6$ 台である、HRバンド帯域幅 $B = 20$ MHzのMIMO CICシステムを考える。Rバンド通信路とHRバンド通信路は共に、3パス等利得レイリーフェージング通信路とする。図2と図3にそれぞれ、モンテカルロシミュレーションによるPCM-RoHRとPAM-RoHRのビット誤り率特性を示す。横軸がビットエネルギー対雑音電力密度比 E_b/N_0 、縦軸がビット誤り率である。同一の連携端末数に対しては、PCM-RoHRはPAM-RoHRに対して2 dBほどの利得を有する。しかしながら、 $N_r = 4$ のPCM-RoHRと $N_r = 6$

のPAM-RoHRを比較すると、PAM-RoHRの復号データの信頼性が高く、図1からPCM-RoHRの半分の帯域幅で正規化フレーム転送時間が短い。このことから、PAM-RoHRのMIMO CICシステムはPCM-RoHRのMIMO CICシステムと比較してHRバンドにおけるフレーム転送時間の圧縮効率及びRバンドにおけるSDM信号の復号信頼性が高いと結論される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Daisuke Umehara, Rieko Saiki, Receiver cooperative MIMO-OFDM capacity with quantization error and spatial correlation, Proceedings of ICSPCS 2017, 査読有, 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICSPCS.2017.8270514

Daisuke Umehara, Shuhei Ueno, Ryota Akagi, Receiver cooperative MIMO-OFDM with higher-frequency radio forwarding, Proceedings of ICSPCS 2017, 査読有, 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICSPCS.2017.8270479

Yuto Katayama, Daisuke Umehara, Koichiro Wakasugi, A mathematical model of access control to allocate downlink bandwidth in high-density wireless LAN, Proceedings of ICSPCS 2017, 査読有, 1-7, 2017, DOI: 10.1109/ICSPCS.2017.8270501

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誌, 査読有, vol. 71, no. 2, 2017, J74-J79, DOI: 10.3169/itej.71.J74

Tatsuki Matsushita, Daisuke Umehara, Koichiro Wakasugi, Poster: Power over Data Lines for CAN using AMI code, Proceedings of IEEE VNC 2016, 査読有, 1-2, 2016, DOI: 10.1109/VNC.2016.7835948

Natsumi Sato, Daisuke Umehara, Koichiro Wakasugi, Poster: Symbol detection with OR rule for CAN FD, Proceedings of IEEE VNC 2016, 査読有, 1-2, 2016, DOI: 10.1109/VNC.2016.7835949

Daisuke Umehara, Hidekazu Murata, Satoshi Denno, Success prioritized distributed coordination function, IEICE Communications Express, 査読有, vol. 5, no. 9, 2016, 303-308, DOI: 10.1587/comex.2016XBL0083

〔学会発表〕(計10件)

田中 祐大, PAM-RoHRによる端末共同干渉キャンセラにおける送受信アンテナ数の影響評価, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2018

梅原 大祐, [Invited Talk] Design and analysis of success prioritized slotted ALOHA with sleep function, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2018
山本 拓真, 成功優先 CSMA/CA におけるコンテンツンウィンドウの特性評価, 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, 2017
片山 雄斗, 稠密無線 LAN におけるダウンリンク帯域割当のためのアクセス制御の数理モデル, 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, 2017
佐伯 理英子, 量子化誤差と空間相関を含む端末共同干渉キャンセラの性能評価, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2017
北山 嗣也, 端末共同干渉キャンセラのための移動端末デュアルバンドアンテナの開発, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2017
梅原 大祐, 端末共同干渉キャンセラのキャパシティ: 量子化誤差と空間相関, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2017
梅原 大祐, A study of received signal sharing schemes for collaborative interference canceller, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2017
梅原 大祐, スリープモードを有する成功優先スロットアロハのエネルギー解析, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2017
梅原 大祐, 成功優先ランダムアクセスプロトコル ~ スロットアロハが $1/e$ を越える ~, 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅原 大祐 (UMEHARA, Daisuke)
京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・教授
研究者番号: 50314258