

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 4 月 28 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06059

研究課題名(和文)大規模MIMO時空間符号化とリレー伝送の高機能化による超高信頼な無線通信の開発

研究課題名(英文)Development of extremely reliable wireless communication with massive MIMO, space time codes and high performance relaying

研究代表者

岩波 保則 (Iwanami, Yasunori)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40144191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代無線通信には、高速性(ビット/秒)、低遅延性(msec)、高密度性(台数/平方km)が求められる。これらを向上させるには、広い伝送帯域幅(MHz)が必要となり、ミリ波帯等のより高い周波数帯が必要になる。しかし高い周波数は距離減衰が大きくなるため、送信アンテナの鋭いビームフォーミング等により減衰を抑える必要がある。このために大規模MIMO(Massive MIMO)と呼ばれる多数のアンテナ素子を備えたアンテナ技術、多数の送信信号に対する時空間符号化技術、また電波を増幅してカバーレッジを拡げるリレー伝送技術の融合が必要で、この研究を行った。また定包絡線を有するMIMO FSKの研究も行った。

研究成果の概要(英文)：In the next generation of wireless communication, high speed (bits/sec), low transmission latency (msec) and high density of simultaneous users (users/square km) are requested. In order to fulfil those needs, the wider transmission bandwidth than today is required and it leads to the utilization of high frequency band like millimeter wave. However, as the high frequency waves like millimeter meter waves suffer from high propagation loss, the sharp beam forming of transmit antenna has to be done. In order to achieve this beam forming with very reliable transmission, massive MIMO technique which uses very large number of transmit antenna elements, space time coding technique for transmit signals emitted from antenna elements and relaying technique which amplifies the transmission signal and enlarges the coverage area are all needed. This research combined those techniques and realized very reliable high speed wireless communication. Also MIMO FSK with constant envelope was studied.

研究分野：無線通信方式

キーワード：高信頼無線通信 マルチユーザMIMO Massive MIMO 時空間符号化 LDPC符号 リレー無線伝送 分散アンテナ MIMO FSK

1. 研究開始当初の背景

次世代無線通信には、高速性(ビット/秒)、低遅延性(msec)、高密度性(台数/平方km)が求められる。これらを向上させるには、広い伝送帯域幅(MHz)が必要となり、ミリ波帯等のより高い周波数帯が必要になる。しかし高い周波数は距離減衰が大きくなるため、送信アンテナの鋭いビームフォーミング等により減衰を抑える必要がある。このために大規模 MIMO(Massive MIMO)と呼ばれる多数のアンテナ素子を備えたアンテナ技術、多数の送信信号に対する時空間符号化技術、また電波を増幅してカバーレッジを拡げるリレー伝送技術の融合が必要で、これらの個別技術及びこれらの統合的な研究を行う必要があった。また、IoT(Internet of Things)無線通信では、無線端末機器のバッテリー消費を抑えるため、電力効率の良い飽和形増幅器が利用可能な定包絡線 FSK 信号の活用が望まれる。しかし従来 FSK 信号に対しては、複数の送信アンテナと複数の受信アンテナを用いる MIMO 通信方式の研究は少なく、この研究を進展させる必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、高速伝送のために広伝送帯域幅を利用できる、高周波数帯における距離減衰を軽減するため、多数の送信アンテナ素子を活用する Massive MIMO 技術、多数の送信アンテナ素子から送信される多数の送信信号に対する誤り訂正符号化である時空間符号化技術、高周波数帯であるミリ波帯などを用いる場合に基地局のカバーレッジを拡大するための再生中継器リレー伝送技術を研究することを目的とした。また、これらの要素技術を個別に研究するとともに、これらの要素技術を統合した高速度・高信頼な無線伝送通信方式を開発することを目的とした。これらの無線伝送方式技術は、主に基地局から複数の端末ユーザへの下り回線通信であるが、近年の IoT 無線通信では、無線機器端末から集約基地局への電力効率及び周波数利用効率の高い上り回線無線通信方式技術の開発も望まれている。そこで無線端末機器で電力増幅効率の良い飽和形増幅器が利用できる定包絡線 FSK 信号を用いた上り回線用の空間多重 MIMO 無線通信方式の送受信技術の研究を進展させることも目的とした。

3. 研究の方法

近年、複数ユーザ端末と空間多重 MIMO 通信が可能なマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 技術が盛んに検討されている。下り回線の MU-MIMO 通信では、送受信機間の通信路情報(CSI: Channel State Information)を送信機と受信機で共有し、ユーザ間干渉(IUI: Inter User Interference)が予め基地局(BS: Base Station)側で取り除かれ、ユーザ端末では IUI の影響無く受信

できる。基地局の送信アンテナ数を増やすことによって、下り回線の通信路品質を任意に向上させることができる。MU-MIMO 方式には、線形方式と非線形方式があるが、線形方式の方が設計や構成がより容易と考えられる。本研究では、BD(Block Diagonalization) + 固有モード(Eigen mode)伝送を用いる線形プリコーディング MU-MIMO 方式において、ユーザ毎のブロック行列のサイズが(ユーザ受信アンテナ数) × (他ユーザ行列の nullity(退化次数))になることを考慮した BD + 固有モード伝送 MU-MIMO 下り回線方式を考えた。この方式を、基地局と RoF(Radio over Fiber)を用いて繋いだ複数の RRH(Remote Radio Head)を利用する分散アンテナシステム(DAS: Distributed Antenna System)に適用し、通信品質の改善効果を示す。そして、分散送信アンテナ配置のユーザ通信品質が、集中送信アンテナ配置のユーザ通信品質より優れていることを示す。

また、MU MIMO 下り回線通信において、複数のユーザ端末へ向け、再生リレー(Detect & Forward relay)を用いた、基地局の下り回線のカバーレッジ拡大効果を研究した。MU MIMO の方式としては、やはり線形方式である BD + 固有モード伝送方式を用いた。そして基地局・リレー・端末間の回線品質が、基地局・端末間の回線品質より優れている程、リレーを用いることによる改善効果がより大きく出ること示した。

次に、FSK(Frequency Shift Keying)信号は、定包絡線を有し、電力効率の高い非線形増幅器の使用が可能であり、センサーネットワーク等の上り回線で使用される端末の無線機器の通信方式として有用と考えられる。周波数利用効率を上げるためには、空間多重の MIMO 化が必要であるが、データ伝送速度が速くなるにつれ通信路が周波数選択性となる。このような周波数選択性 MIMO 通信路における FSK の受信方式としては、基地局側でのチャネル測定に基づいた MLD(Maximum Likelihood Detection)信号分離・等化方式の適用が BER 特性を改善でき有効と考えられる。本研究では、Zadoff-Chu 系列を用いた FSK や GFSK(Gaussian filtered FSK)の伝送帯域幅におけるチャネル測定と、得られたチャネル測定結果を用いて受信レプリカを用意する最尤判定方式の研究を行った。本 FSK 及び GFSK 受信方式は LPWA(Low Power Wide Area)などの MTC(Machine Type Communication)の上り回線通信方式としての応用が考えられる。

4. 研究成果

MU-MIMO 通信は、基地局(BS)からユーザ端末(UE)への下り回線において、下り回線の通信路情報(CSI)を基地局で知ること、基地局のプリコーディングにより予めユー

ザ間干渉 (IUI) を除去して送信するものであり、5G や無線 LAN 等にとって下り回線通信路容量を向上させるために必須の技術と言える。下り回線の MU-MIMO 通信には、線形プリコーディングに基づく線形方式と Modulo 演算などに基づく非線形方式があるが、非線形方式は高い通信路容量を実現し得るものの演算量が多く、線形方式に比べ設計が難しい。一方、線形方式にはブロック対角化 (BD) 法と Channel Inversion (CI) 法があるが、BD 法は固有モード伝送 (E-SDM: Eigen beam-Space Division Multiplexing) 法との相性も良く、現実的な設計法であると考えられる。一方、MU-MIMO 下り回線通信には、基地局に多数のアンテナを集中して配置する集中送信アンテナ配置法とアナログ RoF 技術を用いて光ファイバーで分散して配置された複数の送信アンテナを用いる分散送信アンテナ配置法 (DAS: Distributed Antenna System) がある。集中送信アンテナ配置は、Massive MIMO に見られるように、ビームフォーミングにより個々の UE への下り回線利得を向上させる方法である。一方、分散送信アンテナ配置は、UE の近くに配置された分散送信アンテナからの低減衰・高利得特性を利用するものと考えられる。過去の文献では、CI 法を用いた MU-MIMO 分散アンテナシステムが検討され、集中アンテナ配置に比べ優れたスループット特性や SINR 特性を示すことが報告されている。BD+E-SDM 法を用いる線形プリコーディング下り回線 MU-MIMO 方式では、ブロック対角化後の各 UE のブロック行列のサイズが (ユーザ受信アンテナ数) \times (他ユーザ行列の nullity (退化次数)) になり、基地局の総送信アンテナ数を増やすことにより、E-SDM の固有モード利得を任意に改善できる。すなわち、全 UE の総受信アンテナ数に比べて基地局の総送信アンテナ数を十分大きく取り、各 UE のブロック行列を横長の長方形行列とし、これに E-SDM を適用することで各 UE の固有モード利得の改善が図れる。過去の文献では、やはり BD+E-SDM を用いて分散アンテナ配置を実現しているが、マルチユーザスケジューリングを用いて総送信アンテナ数と総受信アンテナ数が等しく、各 UE のブロック行列が正方行列の場合を扱っている。本研究では、(総送信アンテナ数) \gg (総受信アンテナ数) として各 UE のブロック行列は横長の長方形行列としている。複数の UE が無線 LAN 等の構内にランダムに分布するとして、集中送信アンテナ配置と分散送信アンテナ配置の通信路品質 (BER 特性) を比較した。この結果、分散送信アンテナ配置は集中送信アンテナ配置に比べ、大きな BER 特性改善効果があることを示した。

また、BS (基地局やアクセスポイント) の送信アンテナ数を増やすことにより、周波数帯域幅を増加させることなく周波数利用効率を向上させ、複数のユーザ端末とユーザ間干渉無しで空間多重通信を可能にするマル

チユーザ MIMO (MU-MIMO) ダウンリンク技術において、データレートを高め、カバーレッジを拡大する手段としてリレー伝送方式がある。本研究では、ユーザ間干渉の除去を BS でのブロック対角化 (BD) で行い、各ユーザ端末 (UE) では、直接リンクの受信信号と、リレー局経由の受信信号をビット LLR 合成する MU-MIMO DF (Detect & Forward) リレー伝送方式を研究した。そして BS の送信アンテナ数の増減に対する DF リレー局設置の効果を検討した。この結果、BS の送信アンテナ数が少ない場合は、リレー設置の効果があるが、送信アンテナ数が多い場合は、リレーを用いても用いなくても BER 特性はあまり変わらないことが判った。これは、BS の送信アンテナ数が増加するにつれ、BS とユーザ間の直接リンクの伝送品質が改善され、最終的にリレーリンクの品質よりも良くなるためと考えられる。したがって、基地局で送信アンテナ数を十分確保できれば、リレー局の設置を省ける状況が存在し得ると考えられる。

次に、シングルキャリアを用いる FSK や GFSK 信号などの CPM (Continuous Phase Modulation) 信号は、定包絡線性を有し、電力効率の高い非線形増幅器の使用に有利である。この特徴は無線センサーネットにおける電池駆動の無線 IoT デバイス等からのデータ信号を上り回線で集約基地局に向け送信する LPWA (Low Power Wide Area) における MTC (Machine Type Communication) 方式などに有効と考えられる。個々の無線 IoT デバイスからの上りリンクデータ量は比較的小さいとは言え、周波数利用効率を高めるためには複数の IoT 無線デバイスからの上りリンクのマルチユーザ MIMO 空間多重化が必要である。また今後さらなる無線 IoT デバイスの上りリンクデータ速度の高速化が求められる場合、シングルキャリアの FSK や GFSK などの CPM 信号に対し、上りリンクの無線通信路が周波数選択性となる。このような上りリンク周波数選択性 MIMO 空間多重通信路で FSK や GFSK 通信方式を利用する場合、集約基地局での MIMO 空間多重分離及び等化処理方式の選定が重要である。しかし、FSK や GFSK 方式は非線形変調方式であるため、BPSK、QPSK や QAM 変調などの線形変調方式における周波数領域等化 (FDE) 等の線形行列処理による受信信号処理は基本的に難しい。FSK 等の CPM 信号を MIMO 通信路に用いる研究は、過去の研究で行われて来ている。MIMO CPM に BLAST 受信機の構造を取り入れて計算量の削減を図った研究が行われている。また MIMO CPM や MSK に受信側で通信路情報 (CSI) の不要な非同期的遅延検波を用いた ML (Maximum Likelihood) 受信方式の研究も行われている。MIMO CPM に STBC (Space Time Block Code) を適用した研究も行われた。CPM 信号の分解 (Laurent decomposition) を用いて MIMO 受信機の演算量の削減を図った研究も行われた。しかし、これらの過去の研究では、いずれも

通信路は周波数非選択性のフラットフェージングを仮定している。そこで本研究では、マルチパス遅延波が存在する周波数選択性通信路において、受信 MIMO FSK 信号に対し、受信基地局側で周波数同期及び位相同期のとれたコヒーレントな受信レプリカ信号を発生させ、受信信号とレプリカ信号間の信号間距離を最小とする MLD 受信方式の適用を考えた。また過去の判定結果を用いる ISI キャンセラーや球内復号(SD, Sphere Decoding)法を適用し、MLD の演算量の削減を図った。しかしこれらの本研究では、受信基地局側で CSI であるチャネルインパルス応答が既知(カンニング)であるとし、また受信機の受信 I-Q 複素ベースバンド信号のオーバーサンプリングレートの最小化がなされていなかった。そこで本研究では新たに、IoT 無線デバイスである複数の無線端末を想定し、これら端末から Zadoff-Chu 系列を用いたチャネル測定用の定包絡線パイロット信号を送出することで、基地局側で MIMO 上り通信路の FSK や GFSK 信号伝送帯域幅における等価チャネルインパルス応答を測定した。また通信路測定用のパイロット信号を含めた FSK や GFSK 信号の 99%電力帯域幅が $B(\text{Hz})$ のとき、基地局受信機における I-Q 複素ベースバンド信号のサンプリングレートを $1/B(\text{sec})$ と最小化することで、受信機演算量の削減を図った。本 MLD 受信方式の基地局での計算量は、端末無線 IoT デバイスの送信アンテナ数が 1 本のとき、上りリンクの同時 IoT デバイス数である空間多重数 N_u と上りリンク周波数選択性通信路の最大遅延時間 $(L-1)T_s$ (L は整数, T_s は FSK や GFSK 信号のシンボル時間) に対し、 M を FSK の変調多値数として、(M の $N_u L$ 乗) と指数関数的に増加するが、 N_u , L , M を適切に選択することや、基地局側で MLD の復号に ISI キャンセラーや球内復号(SD)を用いることで十分実用に供し得ると考えられる。

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)

Sho KATO, Yasunori IWANAMI, "On Type II Hybrid-ARQ with Decode and Forward Relay using Non-Binary Rate-Compatible Punctured LDPC Code on MIMO Frequency Selective Channels," International Journal on Advances in Telecommunications, vol.8, no. 1&2, pp.74~83, June 2015. 査読有
Rio Abe, Yasunori Iwanami, "Coherent MFSK detection on MIMO frequency selective channels," IEEE fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC2015), pp.77~82, Oct. 2015. 査読有

Yasunori Iwanami, Kentaro Iida, "A Regenerative Relay Transmission in Linearly Precoded MU-MIMO Downlink," AICT 2016, pp.51~56, May 2016. 査読有

Kazuki Yoshida, Yasunori Iwanami, "Coherent GFSK Receiver on MIMO Frequency Selective Channels," IEEE TENCON 2016, 4 pages, Nov. 2016. 査読有

Nobuaki Shimakawa, Yasunori Iwanami, "A diversity order design of linearly precoded MU-MIMO downlink system," IEEE TENCON 2016, 4 pages, Nov. 2016. 査読有

Nobuaki Shimakawa, Yasunori Iwanami, "A Regenerative Detect & Forward Relay Transmission in Linearly Precoded MU-MIMO Downlink," International Journal on Advances in Telecommunications, vol.10, no. 3&4, pp.85~95, Dec. 2017. 査読有

[学会発表](計 10 件)

加藤 祥, 岩波保則, "Non-Binary Rate-Compatible-Punctured LDPC 符号化 MIMO-OFDM Type II Hybrid-ARQ 複数リレー伝送方式の検討", 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 1 頁, 2015 年 9 月.

飯田健太郎, 岩波保則, "線形プリコーディング MU-MIMO 下り回線再生リレー伝送方式の検討", 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, RCS2015-396, pp.369-374, 2016 年 3 月.

張国玉, 岩波保則, "線形プリコーディングマルチユーザ MIMO 下り回線通信方式におけるユーザ通信品質の設計に関する考察", 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, RCS2015-395, pp.363-368, 2016 年 3 月.

阿部理生, 岩波保則, "周波数選択性 MIMO 通信路における GFSK 信号のコヒーレント受信に関する検討", 2016 年電子情報通信学会総合大会, B-5-94, p.487, 2016 年 3 月.

吉田和輝, 岩波保則, "周波数選択性 MIMO 通信路における同期復調 G4FSK 方式に関する検討", 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 1 頁, 2016 年 9 月.

島川展明, 岩波保則, "MU-MIMO 通信路における再生 Relay による BER 特性改善の検討", 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 1 頁, 2016 年 9 月.

島川展明, 岩波保則, "MU-MIMO DF リレー伝送方式における BS 送信アンテナ数に関する検討", 2017 年電子情報通信学会総合大会, B-5-140, p.476, 2017 年 3 月.

島川展明, 岩波保則, “分散アンテナ配置 MU-MIMO ダウンリンク通信におけるRRHの配置位置に関する一検討”, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 1頁, 2017年9月.

吉田和輝, 岩波保則, “通信路測定を用いた上りリンク MIMO-FSK 最尤受信方式の検討”, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, RCS2017-329, pp.69-74, 2018年2月.

島川展明, 岩波保則, “線形プリコーディングを用いたマルチユーザ MIMO 下り回線分散アンテナシステムの検討”, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, RCS2017-317, pp.1-6, 2018年2月.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩波 保則 (IWANAMI, Yasunori)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40144191

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()