

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06066

研究課題名(和文) 一般化回転行列に基づく仮想伝搬路を適用した過負荷MIMO無線通信方式の研究

研究課題名(英文) A Study on overloaded MIMO wireless systems with virtual channels based on generalized rotation matrices

研究代表者

田野 哲 (DENNO, SATOSHI)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：80378835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：無線通信では同時に送信する信号数を増やすことで通信速度を高速化できる。実際には演算量の制限から、送信信号数を受信アンテナ数以上にすることは困難であった。本研究成果では、一般化回転行列を導入することで演算量を柔軟に制御することに成功した。実際、最大演算量を従来法に比較して100分の1程度に低減できることを示した。これにより送信信号数を受信アンテナ数の3～4倍に増大できる見込みを得た。さらに繰り返し復号を導入することで伝送特性を改善できる可能性を見出した。受信アンテナ数以上の信号が受信される物理層ネットワークコーディングにおいても、低演算量で最尤検出に近い特性を達成した。

研究成果の概要(英文)：High speed wireless communication is achieved by increasing the number of transmit signal streams transmitted simultaneously. Actually, it is almost impossible to get the number of the streams more than that of the receive antennas due to prohibitive computational load of the receiver. This research project proposed generalized rotation matrices that make the complexity of the receiver flexible. In fact, the complexity can be reduced to about 1/100 of that of the original receiver by the proposed technique. The proposed technique allows the number of the simultaneously transmit signals to be three times or four times as many as that with conventional receivers. We considered iterative detection combined with the proposed technique to improve the transmission performance. We have proposed a technique to reduce the computational complexity in MIMO physical layer network coding where the number of received signals at the relay is more than that of the receive antennas.

研究分野：無線通信における主に物理層の通信理論および信号処理方式

キーワード：無線通信 物理層 過負荷 MIMO 非線型信号処理 演算量低減

1. 研究開始当初の背景

IEEE802.11ac 等の無線 LAN の仕様や、第五世代セルラーへの要求条件から明らかのように、ユーザスループットの高速化が求められている。その要求を達成する方法として、無線通信システムの搬送波周波数の高周波数化、MIMO(Multiple Input Multiple Output)空間多重や多値変調が検討されてきた。MIMO空間多重技術として様々な技術が検討されてきたが、端末に搭載可能な受信機技術を採用する限りは、空間多重化できる信号ストリーム数は受信アンテナ数以下とされていた。ところが、端末に搭載できるアンテナ数には制限があり、これら受信機を用いる限りはダウンリンクの高速化は困難である。この制限を緩和し、送信ストリーム数を受信アンテナ以上(所謂、“過負荷 MIMO”)への増加を許して、ユーザスループットの高速化を達成させる受信機が必要とされていた。

2. 研究の目的

本研究では、過負荷 MIMO システムによる更なるユーザスループット向上を狙い、これを実現する受信機の構成を明らかにする。加えて、提案法の端末への導入をより容易にするために、演算量の更なる低減も目標とする。そのため、受信機には仮想伝搬路の適用を前提とする。但し、その演算量は送信ストリーム数が決まれば、システム要求条件に無関係に一意に決定されていた。そこで、この演算量を柔軟にできる受信機構成法を見出すことを目的とする。

高速化を図るため高周波数帯を活用する時には、しばしば無線中継が利用される。物理層ネットワークコーディングは無線中継ネットワークの高速化を可能にするが、中継機受信時のチャネルモデルが過負荷 MIMO チャネルと等価となるため、中継機の演算量を増大させてしまう問題点がある。そこでこの演算量低減も目的の一つに掲げる。

3. 研究の方法

下記の計画に基づき研究を進めた。

- (1) 多値変調のための受信機
高速化のために多値変調の仮想伝搬路を適用した受信機構成を検討する。
- (2) 一般化回転行列の構成法
《基本検討》一般化回転行列の諸特性を明らかにする。
《適応化》伝送路に適応させた一般化回転行列の生成法を検討する。
《適応化の演算量低減》伝送路に適応させた場合の演算量低減法を検討する。
- (3) 繰り返し信号検出法
硬判定を基本としていた仮想伝搬路を適用した受信機を、軟入出力化する方法を検討する。さらにこれを繰り返すことで、特性改善を図る。
- (4) スループット向上のための物理層ネットワークコーディング

《演算量低減》信号受信時のチャネルモデルが、過負荷 MIMO チャネルとなる中継機における演算量を低減する。

《高品質化》主に送信側信号処理の高度化による特性改善を図る。

4. 研究成果

(1) 多値変調用の受信機構成法

16QAM 用の仮想伝搬路を用いた受信機にトレリス符号化の適用法を検討した。単純にトレリス符号化を行うと、受信側の信号処理における演算量が膨大になる。そこで、仮想伝搬路の特徴を活かした低演算量型の受信信号処理法を見出した。加えて、OFDM (Orthogonal Frequency Division Duplexing) に適用した場合の特性も明らかにした。

(2) 一般化回転行列の構成法

《基本検討》仮想伝搬路を用いた受信機では従来、送信信号ストリーム数が N_T の場合、回転行列のサイズは $2N_T \times N_T$ であり、行列の形も固定されていた。本研究では、回転行列の定義を見直すことにより、回転行列のサイズを $2N_T \times M$ (M は任意) にできることを見出した。この回転行列を“一般化回転行列”と称することとした。一般化回転行列の列数 M を任意に決定できることは、一般化回転行列のサイズをほぼ任意に変更できることを意味している。仮想伝搬路を適用した受信機の演算量は 2^M に比例するため、一般化回転行列の列数 M を変更することで演算量を任意に変更可能になる。但し、一般化回転行列の列数 M を大きくすると伝送特性も劣化することを計算機シミュレーションにより明らかにした。

《適応化》一般化回転行列のサイズは $2N_T \times M$ であったとしても、行列の構成方には任意性がある。そこで、伝送路に適応させ適切な回転行列を選択する方法を検討した。まずは、選択のためのメトリックを導出した。特に、本研究では基底格子縮小を利用した MMSE (Minimum Mean Square) フィルタを用いているため、

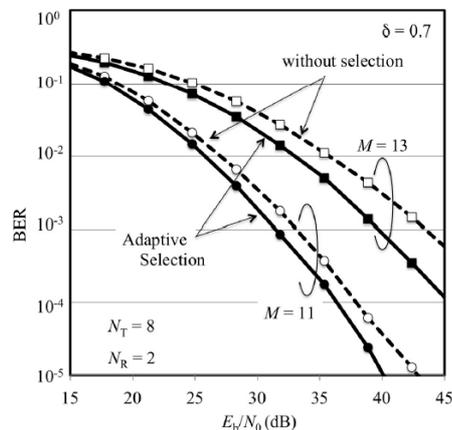


図 1. 適応的な一般化回転行列選択の効果

この受信機のためのメトリックを導出した。このメトリックを最小化する一般化回転行列を選択することで、伝送特性を改善できることを示した。シミュレーション結果の一例を図1に示す。受信アンテナ2本に対して8本の信号ストリームを送信した時の特性例である。一般化回転行列の列数 M が12の場合、 $BER=10^{-3}$ 点において3dB程度の特性改善が見られる。

但し、最適な一般化回転行列選択のためには膨大な演算が必要になり、仮想伝搬路を適用した受信機の「低演算量」という最大の特長が損なわれてしまった。そこで、演算量低減を検討した。

《演算量削減》一般化回転行列を適用した受信機の詳細に検討した。その結果、幾つかの回転行列は全く同一の伝送特性を達成させることを理論的に明らかにした。そこで、同一の特性を与える一般化回転行列を重複とみなし、重複する一般化回転行列を候補から除外することで、伝送特性の劣化なしに、大幅な演算量の削減が可能になることを示した。さらに、伝送特性の劣化を最小限に抑えつつ一般化回転行列の候補を削減する演算量削減法も考案した。その特性例を図2に示す。受信アンテナと信号ストリームの数は図1と同じである。

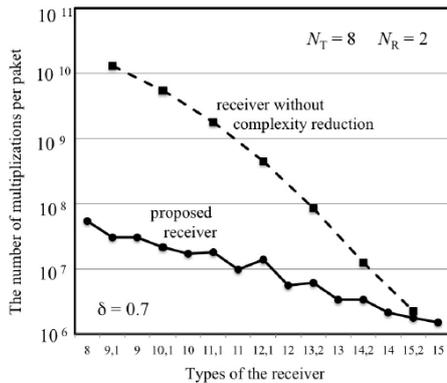


図2 演算量低減効果

同図の横軸は一般化回転行列の種類を示しており、ピリオドのないものは適応させていない受信機構成、ピリオド付きのものが適応させた構成である。比較のため、演算量低減法を用いない場合の特性も付記している。例えば、11.1の構成では提案演算量低減法により2桁演算量が低減されている。

結果として、一般化回転行列を伝送路に適応させる構成と、一般化回転行列を伝送路に適応させない構成を組み合わせることで、よりきめ細やかな演算量と伝送特性に関する柔軟性を受信機に与えることに成功した。

(3) 繰り返し信号検出法

仮想伝搬路を適用した受信機では基底格子縮小を適用していたこともあり、誤り訂正復号器へは硬判定信号が入力されていた。原理的に、誤り訂正復号器は軟判定信号を入力することでより優れた伝送特性を達成する。そこで、仮想伝搬路に基底格子縮小を適用した受信機における低演算量型の軟入力信号生成法を考案した。考案した生成法では、誤り訂正復号器出力信号を用いて、基底格子縮小を用いたフィルタ出力における所望ビット以外の信号成分を除去することで軟判定信号を得る。さらには誤り訂正復号器の軟出力信号をも利用した繰り返し信号検出を検討した。シミュレーションによる特性例を以下に示す。

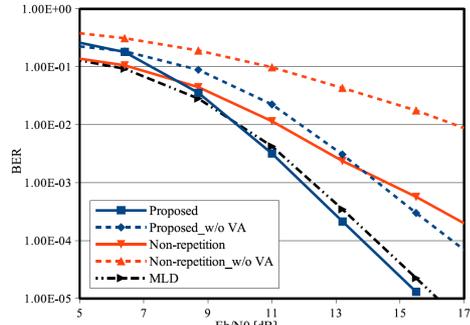


図3 繰り返し検出器の特性

図3では受信アンテナが2本に対し、6ストリームの信号を送信した場合に、一回繰り返した場合の特性である。僅かではあるが硬判定MLD (Maximum Likelihood Detection)より優れた特性を達成することを明らかにした。

(4) 物理層ネットワークコーディング

物理層ネットワークコーディングは中継機を介した双方向無線通信中継ネットワークの信号伝送効率を数倍に向上させる。特に、XOR (eXclusive OR)という符号化を中継機で施すXOR物理層ネットワークコーディングは理論上界の伝送特性を達成することが知られている。ところが、中継機では2端末からの信号が同時に受信されるため、過負荷MIMOチャネルにおける受信機と同様の処理が求められ、演算量が増大する問題があった。

《演算量低減》中継機における信号検出とXOR符号化の結合処理を簡易化する新しい物理層ネットワークコーディングシステムを提案した。提案システムでは送信側で適切にプリコーディングを行えば、中継機では受信信号を閾値と比較するだけで、XOR符号化された信号を得る。従って、中継機の演算量が大幅に低減される。

《高品質化》高品質化を図るため非線形プリコーディングの適用を検討した。低演算量で高い伝送特性が達成できるプリコーディングであるトムリンソン原島プリコーディン

グ(THP)をベースとする新しい非線形プリコーディングを提案した。提案するプリコーディングは、伝送路に適応して形を変える非線形処理部、各ストリームの振幅を同じにする等化処理部、平均の送信電力を一定に保ちつつ、利得を変える自動増幅部よりなる。2x2 MIMO 物理層ネットワークコーディングにおける特性例を図4に示す。

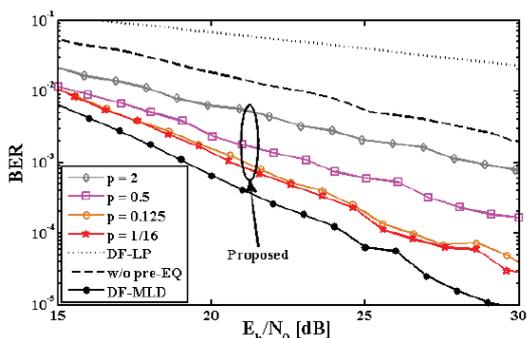


図4 提案ネットワークコーディングの中継機での特性

図4は中継機における XOR 符号化信号の誤り率特性である。同図における p は提案法の制御パラメータであり、比較のために線形プリコーディングを用いた場合、提案法で等化処理なしの場合の特性も付記してある。提案法は中継機間の信号の交換を必要としない。交換を行った場合に最大の特性が得られる MLD の特性も参考として付記している。提案法はこの MLD に匹敵する特性を達成している。

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 3 件)

Lengchi Cao, Satoshi Denno, "Nonlinear Precoding for XOR Physical Layer Network Coding in Bidirectional MIMO Relay Systems," IEICE Trans. Communications, 査読有, E100-B, 2017, 440-448.

DOI: 10.1587/transcom.2016EBP3236

田野 哲, 田谷 昭仁, 村田 英一, 梅原大祐, 山本 高至, 吉田 進, 守倉 正博, "フィードバック情報量低減を可能にする基地局協調システムのための線形プリコーディング," 電子情報通信学会論文誌, 査読有, J100-B, 2017, 270-279.

DOI: 10.14923/transcomj.2016JBP3048

Satoshi Denno, Daisuke Umehara, "Simplified Maximum Likelihood Detection with Unitary Precoding for XOR Physical Layer Network Coding," IEICE Trans. Communications, 査読有, E100-B, 2017, 167-176.

DOI: 10.1587/transcom.2016EBP3064

〔学会発表〕(計 16 件)

長井 勇人, 田野 哲, "非線形プリコーディングを適用した 16QAM -PLNC におけるパワーローディング法に関する検討," 電子情報通信学会 総合大会, 2018.

Tomoyuki Baba and Satoshi Denno, "A Near Optimum User Selection Criterion for Uplink and Downlink Non-Linear Spatial Filters," The 9th international conference on signal processing and communication systems, 2017.

Yuto Nagai and Satoshi Denno, "Non-linear Precoding with Per-stream Power Control for 16QAM Physical Layer Network Coding in MIMO Relay Channels," The 14th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications symposium, 2017.

Tomoyuki Baba and Satoshi Denno, "A Near Optimum User Selection Criterion for Uplink and Downlink Non-Linear Spatial Filters," The 14th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications symposium, 2017. Satoshi Denno, "XOR Physical Layer Network Coding in MIMO Bidirectional Relay Systems," Japan-China Workshop on the Next Generation Mobile Communication Technology and Application, 2017.

長井 勇人, 田野 哲, "非線形プリコーディングを適用した 16QAM -PLNC におけるパワーローディング法に関する検討," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2017.

馬場 智之, 田野 哲, "非線形フィルタリングを用いた上下マルチユーザ伝送のための端末選択方式," 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会, 2017.

長井 勇人, 田野 哲, "非線形プリコーディングを適用した 16QAM 用物理層ネットワークコーディング," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2017.

馬場 智之, 田野 哲, "順序付けコレスキー分解を用いた THP のための端末選択方法," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2016.

Yuto Nagai and Satoshi Denno, "Non-linear Precoding Using Ordered Cholesky Factorization for Physical Layer Network Coding," the IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications symposium, 2016. Satoshi Denno, "XOR Physical Layer Network Coding with Precoding and its Application to MIMO Bidirectional Relay Systems," 2016 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation, 2016.

澤田 亮介, 田野 哲, "拡張回転行列を用いた仮想伝搬路に基底格子縮小を適用する過負荷 MIMO 受信機における軟判定復調法," 電子情報通信学会短距離無線

通信研究会, 2016.

Satoshi Denno and Hidenori Ohsai, " A Trellis-Coded 16QAM Receiver With Virtual Channels in Overloaded MIMO," The 9th international conference on signal processing and communication systems, 2015.

Satoshi Denno and Akihiro Kitamoto, " An Overloaded MIMO Receiver with Extended Rotation Matrices for Virtual Channels," The 21st Asia Pacific Conference on Communications, 2015.

北本 暁裕, 田野 哲, " 伝送路に適應する拡張回転行列を用いた MIMO 受信機." 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2015.

澤田 亮介, 田野 哲, " 過負荷 MIMO-OFDM のための仮想伝搬路を適用した 16QAM 用受信機構成法," 電子情報通信学会 総合大会, 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〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田野 哲 (DENNO Satoshi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 80378835

(4) 研究協力者

北本 暁裕 (KITAMOTO Akihiro)

曹 冷馳 (Cao Lengchi)

澤田 亮介 (SAWADA Ryosuke)

長井 勇人 (NAGAI Yuto)