

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04142

研究課題名(和文)非線形プリコーディングを用いるXOR物理層ネットワークコーディングの研究

研究課題名(英文)Research on XOR-physical layer network coding with non-linear precoding

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：高速化のために多値変調を適用した場合に発生する中継端末の演算量増大問題を解決する、新しいストリーム毎利得制御を備えた非線形プリコーディングを提案した。これにより中継局の演算量を数百分の1に低減できた。加えて、誤り訂正を導入するための新しい多値変調のための符号化変調方式も提案した。中継端末の演算量増大を抑えつつ、16QAMや256QAMの多値変調を適用した場合でも、BER=1.0E-4点において2dB程度の利得が得られた。また、物理層ネットワークコーディングのための中継端末選択法を提案した。BER=1.0E-3点で13dBの利得が得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物理層ネットワークコーディングは、原理的に過負荷通信路を無線通信システム内に形成するため、高速化のため多値変調を適用すれば、さらに中継端末での演算が増大してしまう問題があった。本研究はこの問題を解消し、高速通信実現への道を開いた。本研究で提案された新しい符号化変調方式は、類似研究のない全く新しいもので、過負荷状態である中継端末での復号を可能にする。誤り訂正は現在の無線通信では必須であることを鑑みれば、本研究成果は双方向の多値変調通信の実現に大きく寄与する。一方、IoT時代に多くの端末が設置されることが想定できるため、中継局選択法は現実のネットワーク環境において必須の技術になる。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a novel non-linear precoding with gain equalization functionality for alleviating high computational complexity caused by an application of multilevel modulations. The proposed non-linear precoding reduces computational complexity of the relays to one several hundreds of the original complexity. A new coded modulation for multilevel modulations has been proposed to improve the transmission performance. The proposed coded modulation achieves a gain of about 2dB at the BER of 1.0E-4, when the 16QAM or the 256QAM is applied. A new relay terminal selection has been proposed for maximizing the transmission performance in the channel where lots of relay terminals are scattered around the terminals. The proposed terminal selection achieves a gain of 13dB at the BER of 1.0E-3.

研究分野：無線通信

キーワード：ネットワーク符号化 マルチホップ無線 MIMO 符号化変調 プリコーディング 過負荷

## 様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 ( 共通 )

### 1 . 研究開始当初の背景

次世代のセルラー移動通信や無線 LAN(Local Area Network)等では高周波数帯の適用が検討されていた .高周波数帯の電波は伝送路で大きく減衰し ,結果として無線通信可能な範囲が縮小する .そこで ,スマートユーティリティネットワークに代表される IoT(Internet of things)用無線ネットワークでは ,デバイスとの接続率を 100%とするため ,無線中継が検討・適用されていた .物理層ネットワークコーディングは双方向 2 ホップ無線中継ネットワークの通信効率および周波数利用効率を最大 2 倍に向上させる .中でも ,中継端末において信号を復調する XOR (eXclusive-OR)物理層ネットワークコーディング (XOR-PLNC) は , Amplify-and Forward 物理層ネットワークコーディング(AF-PLNC)よりも高い通信容量を達成することが理論解析 ,および計算機実験によって確認されていた .

無線中継ネットワークの高速・大容量化のため MIMO(Multiple Input Multiple Output)中継等の研究も行われていた .更なる高速・大容量化のため非直交化アクセス ,例えば ,さらに過負荷 MIMO 等の過負荷通信技術も盛んに検討されていた .多くの場合 ,他人の無線機を中継端末として用いることが想定されているため ,何の場合でも中継端末の消費電力低減が大きな課題であった .

### 2 . 研究の目的

XOR—PLNC を用いる双方向 2 ホップ MIMO 中継ネットワークの高効率化・高速化・高品質化を図りつつ ,中継端末の演算量を低減することを目的とする .まず ,1 ホップ無線中継ネットワークを対象に多値変調の適用により高速化を図る .通信速度を従来の 2 ~ 3 倍にまで高速化しつつ ,中継端末の演算量を数百分の一程度までに低減する .1 ホップ無線中継ネットワークに加えて送信アンテナと中継端末数が不均一な MIMO 2 ホップ中継ネットワークまでも対象として ,XOR-PLNC による高速化を研究する .通常 ,MIMO 空間多重数は送信のアンテナ数あるいは ,中継端末数のない方に一致する .本研究では ,この制約を取り払いより高速な通信の達成を目的とする .

### 3 . 研究の方法

#### (1)多値変調の適用と演算量低減 ,及び誤り低減

ストリーム毎利得制御 :中継端末が過負荷状態でも非線形信号処理を排除するため ,非線形プリコーディングにストリーム毎利得制御機能を導入する .これにより中継端末における信号検出処理の演算量を 1/100 程度までの低減を目指す .

誤り訂正符号 :XOR-PLNC では中継端末での復号特性がボトルネックとなる .そこで ,16QAM の 1/Q 信号各々に ,非 2 元誤り訂正を適用する等の誤り制御の検討を行う .

#### (2)アンテナ数が不均一な無線中継ネットワークへの拡張と高速化

中継端末選択法 :中継端末に多くのアンテナが搭載されている場合 ,あるいは多くの中継端末が存在する場合には非線形プリコーディングによる特性が劣化する .この特性劣化を回避するため ,中継端末アンテナを適応選択する .

非線形過負荷プリコーディング :中継端末のアンテナ数あるいは中継端末数が少ない場合にも高速通信を達成する非線形過負荷プリコーディングを検討する .

### 4 . 研究成果

非線形プリコーディングを適用した物理層ネットワークコーディング(XOR-PLNC)による ,2 ホップ双方向無線中継ネットワークの高速化および ,中継端末における信号検出処理の低演算量化を達成した .その詳細を以下に示す .

#### (1) 高速化のための多値変調の適用と演算量低減

ストリーム毎利得制御 :多値変調を適用しても中継端末の処理を簡易化できる新しい ,ストリーム毎利得制御を備えた非線形プリコーディングを提案した .提案法はモジュロ処理という非線形処理と線形処理で構成され ,低演算量で実現できる .このプリコーディングにより中継端末の信号検出が領域判定だけで実現でき ,演算量を数百分の 1 に低減できた .また ,図 1 に送信端末に 4 本のアンテナが搭載され ,1 本のアンテナを備えた中継端末が 4 つ存在する場合の伝送特性を示している .同図に示すように ,ストリーム利得制御により BER = 10<sup>-2</sup> 点で 8dB の特性改善を達成した .また ,様々な変調方式を適用した時の BER 特性を図 2 に示す .同図に示すように ,提案法により多値変調を適用してもフロア誤りのない優れた特性が達成できることがわかる .即ち ,提案法を適用することで多値変調による高速化が達成できることが示された .

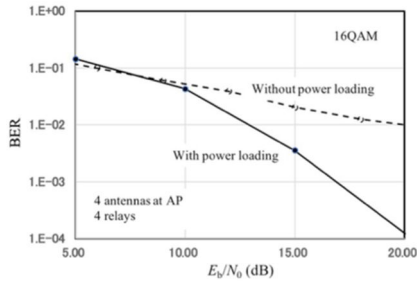


図 1. ストリーム毎制御の BER 特性

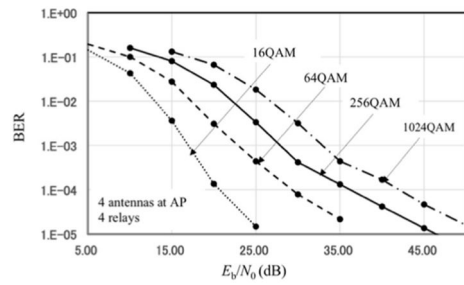


図 2. 変調多値数対 BER 特性

符号化変調：物理層ネットワークコーディングを適用した中継端末での誤り訂正復号が可能で、誤り訂正と変調を組み合わせた新しい符号化変調方式を提案した。新しい符号化変調方式では、中継端末の演算量の増大を避けるため、多値変調信号の下位ビットを符号化する。中継端末では、2つの端末から到着した信号の符号化ビットと非符号化ビットの XOR 符号化ビットを各々、独立に復号する。図3には送信端末に4本のアンテナが搭載され、1本のアンテナを備えた中継端末が4つ存在する場合の伝送特性を示している。変調方式として256QAMを適用した場合でも、BER = 10<sup>-4</sup>点において2dB程度の利得が得られた。図4には提案符号化変調のための提案した軟判定復号の特性を示す。同図に示すように、軟判定復号により、BER = 10<sup>-4</sup>点において1.5dB程度の利得が得られた。

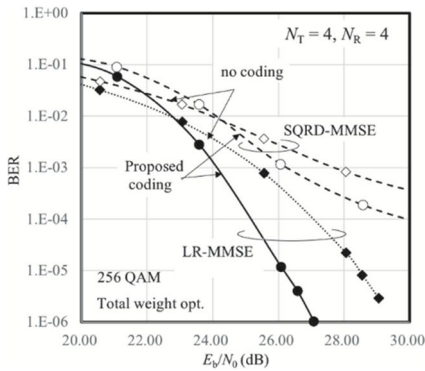


図 3. 提案符号化変調の BER 特性

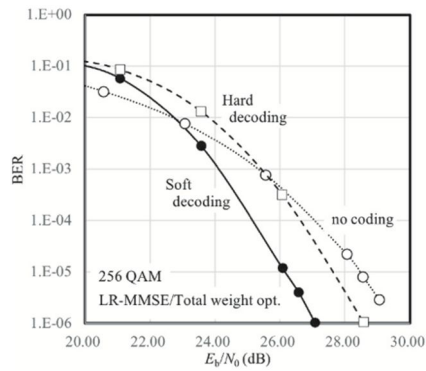


図 4. 提案符号化変調のための軟判定復号特性

- (2) 中継端末数と端末アンテナ数が不均一な無線中継ネットワークへの拡張と高速化  
 中継端末選択法：中継端末が分散しており、相互の信号交換が困難な無線中継ネットワークを対象に、物理層ネットワークコーディングに適した中継端末選択法を提案した。提案法は2つの端末と中継端末間の、2つの通信路に着目した。この2つの通信路行列の全て固有値の積を最大化する中継端末を選択することで、最大の特性が達成できることを理論的に示した。計算機シミュレーションによる特性評価を図5に示す。同図では端末のアンテナ数2本、1本のアンテナを有する中継端末が10台存在する場合に、2端末を選択する場合の特性を表している。ランダム選択と比較して提案法は、BER = 10<sup>-3</sup>点で13dBの利得が得られた。図6に接続可能な中継端末の数に対する伝送特性を示す。但し、選択する中継端末数は2とした。中継端末の数が増えるにつれて、優れた伝送特性を達成できることがわかる。

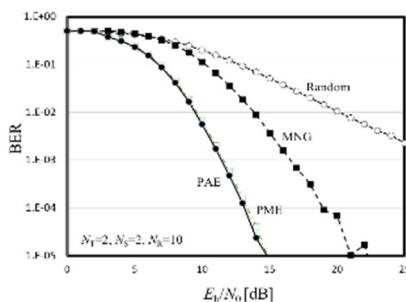


図 5. 提案選択法の BER 特性

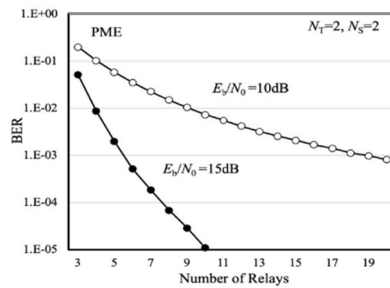


図 6. 中継端末数に対する BER 特性

非線形過負荷プリコーディング：アンテナ数に依存しない MIMO 空間多重化 XOR-PLNC:  
上記とは逆に中継端末のアンテナ数が少ない場合にも高速化を達成する XOR-PLNC のための過負荷プリコーディング法を提案した。提案法では、中継端末に空間フィルタを適用し仮想的に中継端末アンテナ数を増大させる。これにより、中継端末アンテナ数に依存せず空間多重化数を増大させることに成功し、高速通信を達成した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Satoshi Denno, Ryoko Sasaki, and Yafei Hou	4. 巻 E104-B
2. 論文標題 Non-Orthogonal Packet Access Based on Low Density Signature With Phase Only Adaptive Precoding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Communications	6. 最初と最後の頁 328, 337
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBP3066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Denno, Kazuma Yamamoto, and Yafei Hou	4. 巻 E104-B
2. 論文標題 Precoded Physical Layer Network Coding With Coded Modulation in MIMO-OFDM Bi-Directional Wireless Relay Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Communications	6. 最初と最後の頁 99, 108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBP3045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Denno, Yuta Kawaguchi, Tsubasa Inoue, and Yafei Hou,	4. 巻 E102-B
2. 論文標題 A Novel Low Complexity Lattice Reduction-aided Iterative Receiver for Overloaded MIMO	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Communications	6. 最初と最後の頁 1045-1054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2018EBP3215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Satoshi Denno, Tomoyuki Baba, Kenta Asaka, and Yafei Hou,	4. 巻 4
2. 論文標題 Near Optimum User Selection for MMSE-based Tomlinson Harashima Precoding,	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computer & Software Engineering	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15344/2456-4451/2019/142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Denno, Yuto Nagai, and Yafei Hou,	4. 巻 E102-B
2. 論文標題 XOR Physical Layer Network Coding with Non-linear Precoding for Quadrature Amplitude Modulations in Bi-directional MIMO Relay Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transaction on Communications	6. 最初と最後の頁 2073-2081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2018EBP3346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Denno, Tomoyuki Baba, Kenta Asaka, and Yafei Hou	4. 巻 4
2. 論文標題 Near Optimum User Selection for MMSE-based Tomlinson Harashima Precoding,"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Computer & Software Engineering	6. 最初と最後の頁 1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15344/2456-4451/2019/142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Satoshi Denno, Tomoya Tanikawa, Hideaki Tsugita, and Yafei Hou
2. 発表標題 Low Complexity Soft Decoding For Physical Layer Network Coding With Coded Modulation
3. 学会等名 the 14th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Denno, Ryoko Sasaki, and Yafei Hou
2. 発表標題 Low Density Signature based Packet Access with Phase Only Adaptive Precoding
3. 学会等名 the IEEE 89th Vehicular Technology Conference: VTC2019-Spring (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuma Yamamoto, Satoshi Denno, and Yafei Hou,
2. 発表標題 Relay Selection for Bi-directional Relay Systems with XOR-Physical Layer Network Coding
3. 学会等名 the 16th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Denno, Tsubasa Inoue, Takuya Fujiwara, and Yafei Hou
2. 発表標題 Iterative Soft Input Decoding With Assistance of Lattice Reduction For Overloaded MIMO
3. 学会等名 the IEEE 90th Vehicular Technology Conference: VTC2019-fall, (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Denno, Kazuma Yamamoto, and Yafei Hou
2. 発表標題 Coded Quadrature Amplitude Modulations For XOR Physical Layer Network Coding With Precoding
3. 学会等名 the 22th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷川智也、田野 哲、侯 亜飛
2. 発表標題 過負荷物理層ネットワークコーディングの構成法
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田野 哲、侯 亜飛
2. 発表標題 物理層ネットワークコーディングを用いた双方向無線中継のための多値QAM変調用の符号化変調方式
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田野 哲
2. 発表標題 適応プリコーディングを用いたXOR物理層ネットワークコーディングとその特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤原拓也、田野 哲、侯 亜飛
2. 発表標題 多値QAMのための過負荷MIMO線形受信機における繰返し硬判定復号法
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuya Kimura, Satoshi Denno, and Yafei Hou
2. 発表標題 Adaptive Sideband Selection for Periodic Interference Cancellation
3. 学会等名 the 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 山本和菜、田野 哲、侯 亜飛
2. 発表標題 XOR物理層ネットワークコーディングにおける中継局選択法
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会技術報告
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本和菜、田野 哲、侯 亜飛
2. 発表標題 XOR物理層ネットワークコーディングにおける中継局選択法
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会技術報告
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関