

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02345

研究課題名(和文)次世代移動通信の大容量化実現のための格子構造に基づく新しい情報伝送方式の研究

研究課題名(英文)A New Information Transmission Based on Lattice Structure for Next Generation Mobile Communication Systems

研究代表者

落合 秀樹(OCHIAI, HIDEKI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20334576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,100,000円

研究成果の概要(和文)：次世代移動通信では、限られた周波数資源でより大容量のデータを高信頼で伝送することが求められる。大容量化の実現には、ガウス分布に近い多値変調技術と強力な誤り訂正能力を有する符号化技術の組み合わせ、さらには複数送受信アンテナを用いて送信信号を伝送するMIMO空間多重技術が重要な役割を担う。また、実際の送信信号はピーク電力が制限されるため、信号のピーク電力低減もより重要となる。本研究では、格子構造に基づく新しい符号化変調方式、大容量伝送下での送信信号のピーク電力低減技術、低演算 Massive MIMO検出手法をはじめ、今後の移動通信の大容量化と高信頼化に資する数々の基礎技術を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代移動通信では、高画質動画伝送などの需要に応えるために、より高いデータ速度の達成が求められる。データ速度を上げるためには、一般に広い周波数帯域を用いて通信すればよいが、無線通信で利用できる周波数資源は既に枯渇している。そこで本研究では、今後の移動通信におけるデータ速度需要の爆発的な拡大を見据え、厳しい周波数帯域制限下において、より高いデータ速度を達成するために期待される通信技術、例えば格子構造を利用した新しい符号化および変調技術や低演算で実現できるMIMO技術などを提案した。

研究成果の概要(英文)：In order to support growing demands for wireless communications with ever-increasing data rate, next generation mobile communication systems should target ultimately high spectral efficiency without sacrificing its reliability. The key technologies that may achieve this goal is the combination of signal constellations close to Gaussian and powerful channel coding techniques as well as MIMO spatial multiplexing. Since the transmit signal is subject to peak power constraint, peak power reduction techniques also play an important role. In this research, we have developed a number of fundamental techniques that may contribute to the above-mentioned goal, including signal design based on lattice structure, peak power reduction techniques for high-data rate signals, and low-complexity signal detection techniques suitable for massive MIMO systems.

研究分野：工学

キーワード：通信路符号化 格子符号 符号化変調 MIMO伝送

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット端末に代表される小型移動無線機器の急速な普及、さらにはモバイル端末を用いた高画質動画伝送などの大容量通信を伴うアプリケーションの拡大により、移動無線通信におけるデータ量は増加の一途を辿っている。次世代移動無線通信(5G)では限られた周波数資源のさらなる有効利用を促進することで、1Gbps以上の通信速度を移動通信回線においてもシームレスに実現しつつ、さらに屋内等の良好な無線通信環境では10Gbps以上の通信速度を実現することを目標に掲げられてきた。このような大容量通信を実現するためのキー・テクノロジーとして、ミリ波帯の活用と、大規模素子数のアンテナを用いるMassive MIMO(Multiple Input Multiple-Output)技術に世界的な注目が集まってきた。

しかしながら、携帯端末に大規模なアンテナを搭載することは困難であり、またミリ波は高い直進性を有するため、適用できる環境が制限される。そこで、使用する周波数帯によらず、限られた周波数資源においてより高いデータレートを達成するための基礎技術が一層重要な役割を担う。一定の電力と帯域制限下で最大伝送レートを達成するためには、ガウス変調と最適符号、およびMIMO空間多重技術を組み合わせればよいことが情報理論により示されているが、送受信機の信号処理の限界とアナログ回路における制約から、そのような方式を実装することは困難である。そこで、実現可能な制約を満たしつつ、より大容量かつ高い信頼性を実現する、新たな伝送方式の創出が求められている。

2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では、限られた周波数帯域においてより高いデータレートおよび信頼性を達成するため、新しい概念に基づく符号化および変調技術の創出を核として、今後の移動通信の大容量化と高信頼化に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

大容量化の実現には、ガウス分布に近い多値変調技術と強力な誤り訂正能力を有する符号化技術の組み合わせ、および複数送受信アンテナを用いて送信信号を伝送するMIMO空間多重技術が重要な役割を担う。また周波数利用効率の優れた送信信号は一般に高いピーク電力を有するが、実際のシステムでは送信回路のパワーアンプにおいてピーク電力が制限されることを考慮すると、送信信号のピーク電力を予め低減することも実用化の観点から重要である。以上の視点より大容量化と高信頼化の実現を試みた。

4. 研究成果

本研究の主要成果のうち、(1)格子構造に基づく符号化変調方式、(2)大容量伝送下での信号のピーク電力低減技術、(3)低演算符号化Massive MIMO検出手法の提案、に内容を絞りその概要を以下に報告する。なおこのほか今後の移動通信の大容量化と高信頼化に資する基礎技術に関するいくつかの成果を得ており、その大半は、次項の発表論文リストに示すとおり、インパクトファクタの高いIEEE論文誌において公表しており、また著名な国際会議において発表済みである。

(1) 格子構造に基づく符号化変調方式

格子符号はユークリッド空間上で構成される線形符号であり、通信路容量を達成可能であることが理論的に証明されている。これまでは代数的な符号を用いた理論研究が中心であったが、近年、実用的な符号化および復号法を格子符号に適用する研究が注目されている。また、低遅延通信への応用を考慮すると、比較的短い符号長に対しても設計が容易であることが実用上望ましい。格子符号の生成方法は1)格子構造を持った信号点を入力として、ユークリッド空間上で直接符号化を行う手法、2)複数の線形符号から格子符号を構成する手法、に大別される。前者の代表的な手法が低密度格子符号(LDLC: Low-Density Lattice Code)や畳込み格子符号などであり、後者の代表的な手法がConstruction AおよびDである。本研究では、両者について研究成果を得ている。前者の例として、非二元畳込み符号と畳込み格子符号の縦続接続による通信路容量に近接する特性の達成[1]やRepeat-Accumulate信号符号の提案[2]、LDLCに対するシェイピングの提案[3]などの成果を得ている。本報告では後者のConstruction Dを用いた成果について記述する。具体的には、最小ハミング距離の観点から優れた巡回符号である2元拡張BCH符号とConstruction Dを組み合わせることによって格子符号を生成し、受信側では各符号を順序統計復号(OSD: Ordered Statistic Decoding)を用いて軟判定復号することで、比較的短い符号においても優れた特性を達成できることを示した[4]。

図1に提案する格子符号の符号化と復号構成を示す。まず各情報ビット列 $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{a-1}$ が、それぞれ2元拡張BCH符号(生成行列 $\mathbf{G}_0, \mathbf{G}_1, \dots, \mathbf{G}_{a-1}$)で符号化され、その各出力に整数値が足されて格子状に配置される。ここでConstruction Dの制約を満たすため、各生成行列の符号を入れ子(nested)構造をもつように設計された拡張BCH符号とする。つまり、生成行列 \mathbf{G}_n で定義される符号を C_n とすると、 $C_0 \subset C_1 \subset \dots \subset C_{a-1}$ の関係がある。受信側では、多段復号の原理に基づき、低いレベルから復号し、その結果を上位レベルの復号に反映させることで、優れた特性を得ることができる。

格子符号の理論研究では、一般に格子の体積対雑音比(VNR: Volume-to-Noise Ratio)で評価されることが多いが、本研究では実際の通信システムへの適用を考慮して、平均送信電力に制限

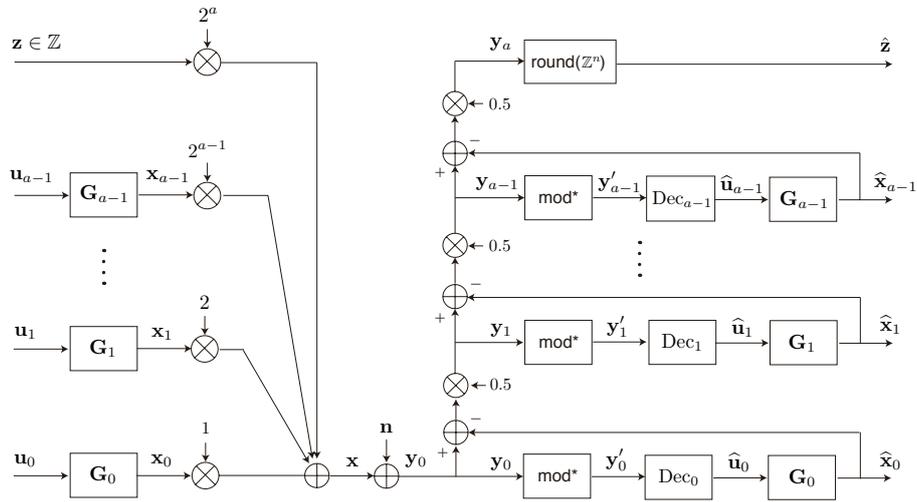


図1 Construction Dに基づく格子符号の構成

のある加法性白色ガウス雑音 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) 通信路モデルに対しても、格子符号の最適設計を試みた。一例としてレベル数を $a=2$ とした場合において、符号 C_0 を (128, 78, 16) 拡張 BCH 符号とし、 C_1 を (128, 120, 4) 拡張 BCH 符号とした。なお平均電力制限下で設計した 2 レベル格子符号の各シンボルは一次元当たりでみると 4-PAM (Pulse Amplitude Modulation) と等価な信号配置となり、128 シンボルで格子符号の 1 符号語に対応する。また 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) に換算した場合、二次元シンボル当たりの情報レートは 3.08 ビットである (符号長は 64 シンボル)。図 2 に AWGN 通信路において、提案する格子符号の信号対雑音電力比 (SNR: Signal to Noise Power Ratio) に対する符号語誤り率 (WER: Word Error Rate) 特性を示す。同図には、比較対象として同じシンボル長および同等の情報レート (3.00 ビット/シンボル) のターボ符号を要素符号としたビットインタリーブ符号化変調 (BICM: Bit-Interleaved Coded Modulation) の WER, および対応する理論限界である Gallager のランダム符号限界 (RCB: Random Coding Bound) を示した。同図より、ターボ符号を用いた BICM が高いエラーフロアを生じるのに対し、提案構成法では RCB に匹敵する傾きを有する特性を実現できていることがわかる。以上より、比較的短いシンボル長においては、適切にレート設計された BCH 符号と OSD 復号に基づく格子符号が優れた特性を達成できることを示した。

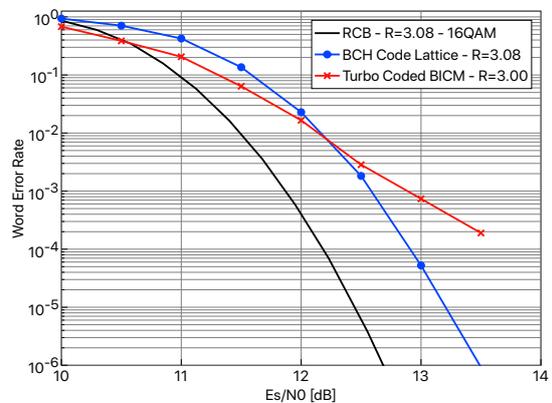


図2 AWGN 通信路での符号語誤り率の比較

(2) 信号のピーク電力低減技術

直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式は高い周波数利用効率を有するとともに周波数選択性伝搬路への耐性に優れていることから、地上波デジタル放送をはじめ、無線 LAN や WiMAX など高速無線通信システムの標準規格の多くに採用されてきた。しかし、OFDM 信号はピーク対平均電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) が大きいため、パワーアンプでの高効率な線形増幅が困難であり、結果として電力効率が極めて低いことからバッテリー駆動の携帯端末等へは適用できなかった。これを解決するためには、OFDM 信号の PAPR 低減技術が鍵となる。これまで様々な PAPR 低減手法が提案されてきたが、周波数利用効率、送受信機における所要信号処理、誤り率特性のすべての点において優れた手法は未だ提案されるに至っていない。

本研究では、研究代表者が以前より提案してきた OFDM 信号の PAPR 低減手法であるトレリスシェイピング (TS: Trellis Shaping) に着目した [5]。TS は PAPR 低減に要する送信側の信号処理が大きいことが欠点であるが、周波数利用効率の低下や誤り率特性の劣化を伴わず効果的に PAPR を低減できるという点で優れた手法である。TS では送信シンボル系列に対し PAPR が小さくなるような符号語を送信側で付加することで PAPR 低減を可能とするが、その際に畳込み符号のトレリス構造を利用し、ビタビアルゴリズムにより符号語探索を行う。したがって、TS の PAPR 低減能力はビタビアルゴリズムで用いられる PAPR の指標となるメトリックに依存する。これまでに TS の符号語探索のメトリックとして、時間領域 (TD: Time Domain) で定義されるメトリックと周波数領域 (FD: Frequency Domain) で定義されるメトリックが提案されてきた。TD メトリックは時間領域における OFDM 信号の最大瞬時電力を直接メトリックとして利用することで高い

PAPR 低減能力を示すが、計算量が大きいという欠点を持つ。一方、FD メトリックでは周波数領域における OFDM 信号の自己相関関数を利用することで、TD メトリックと比較して PAPR 低減性能は若干劣るが、計算量が低く、また通常の信号点シェイピング技術と同様に平均電力低減も可能である。

本研究では、時間領域における OFDM 信号の p -ノルムに基づくメトリックを新たに提案し、従来メトリックと比較してより高い PAPR 低減能力を達成できることを示した[6]。一例として、サブキャリア数 64、各サブキャリアが 256-QAM で変調された OFDM システムに対して提案 TS を適用し、計算機シミュレーションにより PAPR 特性と RCM 特性（パワーアンプへの影響度を表す指標である Raw Cubic Metric）を評価した結果を図 3 にそれぞれ示す。各図において、縦軸は PAPR および RCM の累積分布補関数 (CCDF) 特性を示しており、曲線が左にあるほど優れた PAPR 低減能力を有する、もしくは優れた電力増幅効果が期待できることを意味する。比較のため、従来の TS に用いられたメトリックに加えて、TS とほぼ同等の計算量を有するシンボル選択法 (SLM: Selected Mapping) を用いた場合の結果も示した。提案手法では、ノルムのパラメータ p を調整することで、PAPR 特性が柔軟に制御できることがわかる。特に $p=7$ とすると、従来の TD メトリック ($p=\infty$ と等価) および FD メトリック ($p=2$ と等価)、さらに SLM のいずれに対しても優れた特性を達成できていることが確認できた。ただし、RCM 特性については従来の FD メトリックが優れた特性を有することも示しており、実際にはパワーアンプの非線形特性を考慮してパラメータ p を選択することが望ましい。なお本研究では、この他にも Polar 符号の特殊な構造に着目し、サイド情報の伝送を必要とせず効果的に OFDM 信号の PAPR を低減する新たな手法についても考案した[7]。

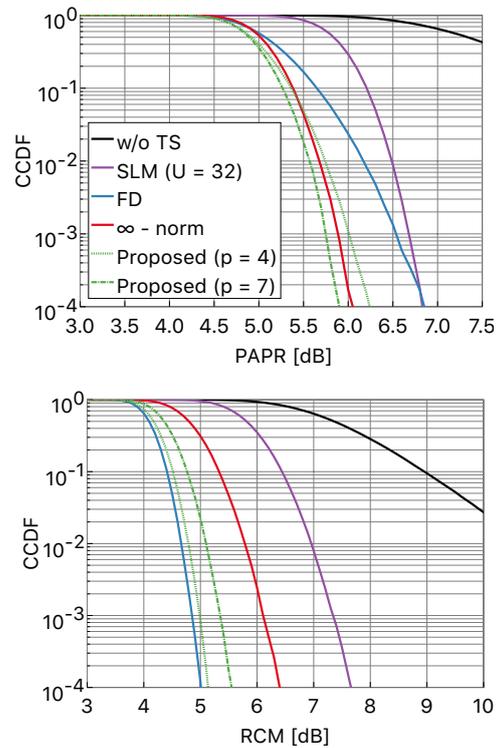


図 3 PAPR と RCM の CCDF 特性の比較

(3) 低演算符号化 Massive MIMO 検出手法の提案

送受信機で複数のアンテナを搭載した MIMO システムでは、一般に通信路容量がアンテナ本数に比例して大きくなるのが理論的に証明されている。これまでは数本程度の送信アンテナを有する MIMO システムが実用化されてきたが、次世代移動通信においては数百本程度のアンテナの搭載を想定した Massive MIMO システムの実用化研究が加速している。それらの研究の多くは、送信側で伝送路情報 (CSI: Channel State Information) が既知である場合に有効であるビームフォーミングやプリコーディング技術を対象としている。しかしこれらは、高速移動環境など、正確な CSI を送信側と共有することが困難である場合には適用できない。一方、送信側で CSI を利用しない MIMO 空間多重技術では、送信側における信号処理の負荷を抑えつつ大容量化が期待できるが、受信側で各アンテナからの送信信号を同時推定する必要があり、そのための信号検出法が重要な役割を担う。さらに Massive MIMO システムにおいては、信号検出に膨大な計算が必要となるため、より低演算かつ良好な特性を有する検出法の創出が必須である。最尤検出法 (MLD: Maximum-Likelihood Detection) は計算量がアンテナ本数の増加に対して指数関数的に増大するため、大規模なシステムに適用することは実用的観点から不可能である。また最小平均二乗誤差 (MMSE: Minimum Mean-Square Error) に基づく線形検出法も、伝送路行列の逆行列演算が必要であるため、計算量がアンテナ本数の二乗に比例して増加する。従って Massive MIMO システムへの適用には限界がある。

本研究では、線形検出法のなかでも計算量がアンテナ本数倍に抑えられる Matched Filter (MF) 法に着目した。MF 法は受信側で信号対雑音電力比 (SNR) を最大化できるが、他のアンテナからの信号が干渉として残るため、エラーフロアを生じることが知られているが、干渉成分が雑音成分と同等のレベルである低 SNR 環境であれば、その影響は無視できる。よって強力な誤り訂正符号と MF 法の組み合わせは、Massive MIMO システムを低演算で実現するための有効なアプローチと考えられる。MF 法を適用した際の MIMO システムの理論特性解析や誤り訂正復号に必要なメトリックの導出は、これまでガウス近似に基づき行われてきた。一方、本研究では、近似によらない厳密なモデルに基づいた理論解析により MF 法の特性評価と最適なメトリックの導出を行った。これにより MF 法に基づく MIMO システムの理論限界を明らかにした[8]。

送信アンテナ数を N_t 、受信アンテナ数を N_r とした $N_t \times N_r$ MIMO システムにおいて、MF 法を適用した場合の信号検出器の出力値の確率密度関数 (PDF) を図 4 に示す。同図では、厳密に導出した PDF とそのガウス近似、およびシミュレーションにより得られた結果を比較している。導出した PDF がシミュレーション結果と一致しているのに対し、ガウス近似による PDF は、特にアンテナ

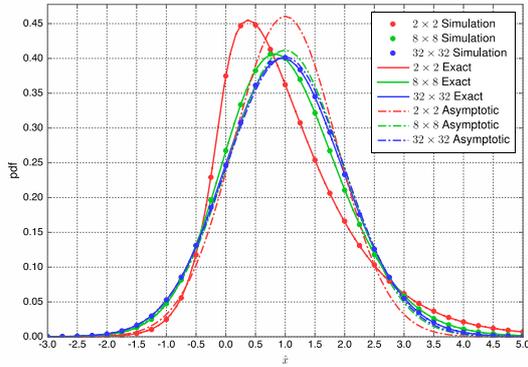


図4 MF信号検出器出力の確率密度関数の比較

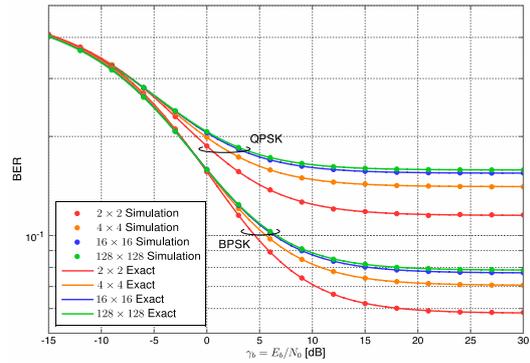


図5 MF-MIMOシステムのビット誤り率特性

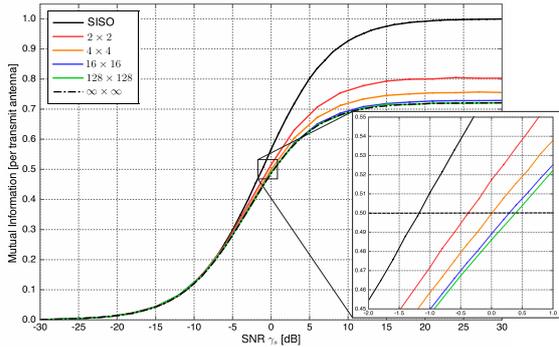


図6 MF-MIMOのアンテナ当たりの相互情報量

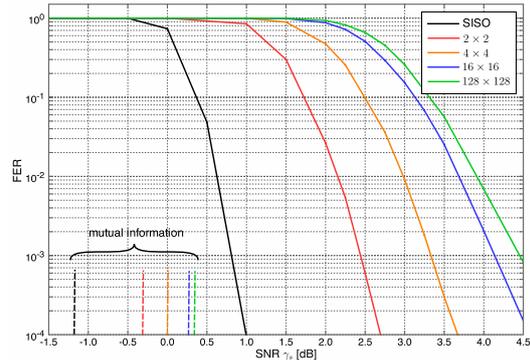


図7 LDPC符号化MF-MIMOの誤り率特性

数が小さい場合に顕著な差を示している。本結果を用いてMFを適用した無符号化MIMOのビット誤り率(BER: Bit Error Rate)の理論値を導出した結果をシミュレーション結果とあわせて図5に示す。同図より、MF法では異なるアンテナからのシンボルの干渉が除去できないため、高いエラーフロアを有することが確認できる。よって、無符号化ではMF法の適用は実用的でないといえる。一方、理想符号化MIMOにおいて、各送信アンテナからBPSKシンボルを送信する場合に、受信側でMF信号検出法を用いて達成できる送信アンテナあたりの相互情報量を図6に示す。同図より、送受信アンテナ数が等しい条件下では、アンテナ数が増えるほど特性が劣化し、また達成できる最大値も0.7ビット/シンボル程度で頭打ちとなることがわかるが、これはMF信号検出法が符号化によっても他の送信アンテナからの干渉シンボルを除去できないことによる。しかしながら相互情報量が0.5ビット/シンボルにおける所要SNRの劣化量に着目すると、最大でも1.5dB程度に抑えられることがわかる。この理論解析結果の妥当性を確認するため、実際にLDPC符号化(符号化率0.5, 符号長4128ビット)したMIMOシステムにおいて、MF信号検出法および理論導出した最適メトリックに基づいて復号した場合のフレーム誤り率特性の計算機シミュレーション結果を図7に示す。同図より、誤り率特性が相互情報量の結果と同様の傾向を示していることがわかる。以上より、符号化Massive MIMOにおいてはMF信号検出法が実用的アプローチの一つであることが理論およびシミュレーションにより明らかになった。

<引用文献>

- [1] T. Matsumine and H. Ochiai, "A serial concatenation of binary-input nonbinary-output convolutional code and recursive convolutional lattice code," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70952-70963, May 2018.
- [2] M. Takai and K. Ishibashi, "Repeat-accumulate signal codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 4, pp. 2607-2619, Apr. 2019.
- [3] F. Zhou and B. M. Kurkoski, "Shaping LDLC lattices using convolutional code lattices," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 730-733, Apr. 2017.
- [4] T. Matsumine, B. M. Kurkoski, and H. Ochiai, "Construction D lattice decoding and its application to BCH code lattices," in *Proc. 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec. 2018.
- [5] H. Ochiai, "A novel trellis shaping design with both peak and average power reduction for OFDM systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 11, pp. 1916-1926, November 2004.
- [6] S. Takizawa and H. Ochiai, "PAPR reduction of OFDM with trellis shaping based on p -norm minimization," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 988-991, Aug. 2019.
- [7] T. Matsumine and H. Ochiai, "A novel PAPR reduction scheme for polar-coded OFDM systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 12, pp. 2372-2375, Dec. 2019.
- [8] Y. Hama and H. Ochiai, "Performance analysis of matched-filter detector for MIMO spatial multiplexing over Rayleigh fading channels with imperfect channel estimation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 5, pp. 3220-3233, May 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 6件）

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Hasan Mohammad Nur、Kurkoski Brian M.、Sakzad Amin、Viterbo Emanuele | 4. 巻 19 |
| 2. 論文標題 Steepest Gradient-Based Orthogonal Precoder for Integer-Forcing MIMO | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications | 6. 最初と最後の頁 942～955 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TWC.2019.2950010 | 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 該当する |
| 1. 著者名 Matsumine Toshiki、Ochiai Hideki | 4. 巻 23 |
| 2. 論文標題 A Novel PAPR Reduction Scheme for Polar-Coded OFDM Systems | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Communications Letters | 6. 最初と最後の頁 2372～2375 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LCOMM.2019.2943334 | 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 Oinaga Masaru、Ogata Shun、Ishibashi Koji | 4. 巻 7 |
| 2. 論文標題 Design of Coded ALOHA With ZigZag Decoder | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Access | 6. 最初と最後の頁 168527～168535 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2954163 | 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 Takizawa Shun、Ochiai Hideki | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 PAPR Reduction of OFDM With Trellis Shaping Based on $\{p\}$ -Norm Minimization | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters | 6. 最初と最後の頁 988～991 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LWC.2019.2903247 | 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 Hama Yuto, Ochiai Hideki | 4. 巻 67 |
| 2. 論文標題 Performance Analysis of Matched-Filter Detector for MIMO Spatial Multiplexing Over Rayleigh Fading Channels With Imperfect Channel Estimation | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications | 6. 最初と最後の頁 3220 ~ 3233 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2019.2892758 | 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 Matsumine Toshiki, Ochiai Hideki | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Capacity-Approaching Non-Binary Turbo Codes: A Hybrid Design Based on EXIT Charts and Union Bounds | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Access | 6. 最初と最後の頁 70952 ~ 70963 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2881243 | 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 Kurkoski Brian M. | 4. 巻 64 |
| 2. 論文標題 Encoding and Indexing of Lattice Codes | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory | 6. 最初と最後の頁 6320 ~ 6332 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2018.2839181 | 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 Takai Manato, Ishibashi Koji | 4. 巻 67 |
| 2. 論文標題 Repeat-Accumulate Signal Codes | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications | 6. 最初と最後の頁 2607 ~ 2619 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2018.2889066 | 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 Yoda Daiki, Ochiai Hideki | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Decision Region Optimization and Metric-Based Compensation of Memoryless Nonlinearity for APSK Systems | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Broadcasting | 6. 最初と最後の頁 1-12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TBC.2017.2781128 | 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 Matsumine Toshiki, Ochiai Hideki | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 A Serial Concatenation of Binary-Input Nonbinary-Output Convolutional Code and Recursive Convolutional Lattice Code | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Access | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2831255 | 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 Zhou Fan, Kurkoski Brian M. | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Shaping LDLC Lattices Using Convolutional Code Lattices | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Communications Letters | 6. 最初と最後の頁 730 ~ 733 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2017.2647922 | 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 R. Yoshizawa and H. Ochiai | 4. 巻 66 |
| 2. 論文標題 Trellis-assisted constellation subset selection for PAPR reduction of OFDM signals | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology | 6. 最初と最後の頁 2183-2198 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2016.2572139 | 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 - |

[学会発表] 計55件(うち招待講演 3件/うち国際学会 29件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hama, H. Ochiai, |
| 2. 発表標題 Performance of polar coded MIMO systems with matched-filter detector and interference cancellation |
| 3. 学会等名 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 M. N. Hasan, B. M. Kurkoski, A. Sakzad, E. Viterbo |
| 2. 発表標題 Orthogonal Precoder for Integer-Forcing MIMO |
| 3. 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 J. Watanabe and H. Ochiai |
| 2. 発表標題 A new low-complexity trellis shaping design based on clipping for PAPR reduction in BICM-OFDM system |
| 3. 学会等名 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2018) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y. Hori and H. Ochiai |
| 2. 発表標題 Uplink multiple access based on MIMO-OFDM with adaptive super-orthogonal convolutional codes for ultra reliable and low latency communications |
| 3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC 2018 Workshops) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 T. Matsumine, B. M. Kurkoski, and H. Ochiai |
| 2 . 発表標題 Construction D lattice decoding and its application to BCH code lattices |
| 3 . 学会等名 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 R. Ngeth, Y. Lim, B. M. Kurkoski, and Y. Tan |
| 2 . 発表標題 A design of overlapped chunked code over compute-and-forward in multi-source multi-relay networks |
| 3 . 学会等名 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2018) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 T. Murata and H. Ochiai |
| 2 . 発表標題 On design of CRC codes for polar codes with successive cancellation list |
| 3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2017) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Y. Hama and H. Ochiai |
| 2 . 発表標題 Performance analysis of matched filter detector for MIMO systems in Rayleigh fading channels |
| 3 . 学会等名 2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kurkoski Brian M., Yagi Hideki |
| 2. 発表標題 Single-bit quantization of binary-input, continuous-output channels |
| 3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hasan Mohammad Nur, Kurkoski Brian M. |
| 2. 発表標題 Practical compute-and-forward approaches for the multiple access relay channel |
| 3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (ICC 2017) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | KURKOSKI Brian (KURKOSKI BRIAN) (80444123) | 北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授 (13302) | |
| 研究分担者 | 石橋 功至 (ISHIBASHI KOJI) (80452176) | 電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・准教授 (12612) | |