

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 4 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709028

研究課題名(和文) 集中/分散ネットワークに適した大規模アレイ伝送方式に関する研究

研究課題名(英文) Co-located/Distributed Universal Signal Processing for Massive Antennas

研究代表者

杉浦 慎哉 (Sugiura, Shinya)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30394927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,200,000円

研究成果の概要(和文)：空間変調マルチアンテナ伝送方式をベースとした巨大な空間(送信アンテナ)の自由度を利用可能な高速・高信頼な大規模アレイシステムの符号設計手法を開発する。ここで、伝播路推定誤差、受信機での復号演算量、パイロットオーバーヘッドの問題を解決し、信頼性と送信レートのトレードオフを柔軟にとることができる高い通信品質を実現するシステムを開発する。特に、周波数利用効率の高い非同期検出方式を組み込んだシステムを提案する。さらに、単一基地局に多数のアンテナを備えた集中基地局シナリオだけでなく、複数基地局を協調的に制御する分散シナリオも対象としたシステムを提案する。

研究成果の概要(英文)：We have developed a novel differentially-encoded non-coherent open-loop massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems, which has the merit of a single radio frequency (RF) transmitter structure. More specifically, the proposed system is capable of attaining a high transmission rate, while attaining a low decoding complexity at the receiver. Furthermore, the receiver does not have to estimate channel state information, owing to the explicit benefit of non-coherent detection. Moreover, we extend the proposed MIMO systems to that of virtual MIMO arrangements, supporting multiple distributed nodes.

研究分野：無線通信工学

キーワード：先端的通信 符号技術 変復調 MIMO 協調通信 インデックス変調 空間変調

1. 研究開始当初の背景

移動通信の分野では、今後普及が見込まれる **internet of things (IoT)** デバイス等により急増する通信量需要を満たすために、今後10年で約100倍以上の通信高速化を実現することが重要な課題となっており、この要求を満たすための次世代ワイヤレス通信規格が鋭意検討されている。このとき、安定したアプリケーション実現のため、多重伝播路によって生じるフェージングの影響を克服しながら、高速通信を同時に実現することが不可欠である。現状では達成が困難であるこのようなターゲットに対し、最近、送受信局において極めて多いアンテナ数を用いた大規模アレイシステム、または Massive Multiple-Input Multiple-Output (M-MIMO) のコンセプトが提案され高い注目を集めている。特に、従来の MIMO システムが2~4本のアンテナの利用に限られることに対し、M-MIMO システムでは数10~数100のアンテナを用いて、利用可能な時空間次元を大幅に増加させることができる。

2. 研究の目的

M-MIMO システムにより、通信速度・信頼性において少なくとも1~2オーダーレベルの向上が原理的に可能である。しかしながら、M-MIMO システムの本格的検討は開始されたばかりであり、実用化のためにはいくつかの技術的壁がある。特に重要なものとして、以下の課題を示す：

- 巨大な空間次元を最大限に活用するための符号設計指針を明らかにする必要がある。また、M-MIMO システムの方式によっては、大幅に増加する復号演算量・演算コスト・復号遅延が問題となる。
- 増加したチャネル要素（送信アンテナ数 $M \times$ 受信アンテナ数 N ）分に対応するリアルタイム伝搬路推定が必要であり、関連する演算コストが深刻な問題となる。さらに、送信機においてトレーニング信号挿入のためのオーバーヘッドも大幅に増加するため、通信のスループットが大きく低下する。
- 初期の M-MIMO コンセプトはリンクレベルを対象としているが、多くのアプリケーションでの実用化やマルチメディア通信での利用を考慮すると、より柔軟な集中管理/分散ネットワーク適応型の M-MIMO システム構成が重要となる。

そこで本研究では、“上記記載のチャネル推定、復号演算量、パイロットオーバーヘッドの問題を解決し、信頼性と送信レートのトレードオフを柔軟にとることができる集中/分散ネットワーク適応型 M-MIMO システムおよびその設計指針の提案”を主題として実施す

る。具体的には以下の2点について着目をする：

- (1) 差動符号化・非同期検出方式：アレイ素子数に比例して増加するパイロットオーバーヘッドと伝搬路推定エラーの克服するため、受信機において伝搬路推定の不要な M-MIMO 用非同期検出方式の実現に有用である。
- (2) 分散ネットワーク協調方式への拡張：協調通信ネットワークを対象に含めることで、M-MIMO システムの巨大な空間符号の分散ノードへの効率的/有効的配分プロトコルを分散システムで実現可能となる。分散配置された基地局や移動局を仮想的にアンテナアレイとみなすことにより構成できる。

3. 研究の方法

研究課題は以下に示す3項目(1)-(3)により構成される。

- (1) 伝搬路推定に関連するパイロットオーバーヘッドや推定誤差が M-MIMO システムに多大な影響を与えることを考慮し、伝搬路推定自体を不要にする非同期検出型 M-MIMO 方式の開発を行う。ここで、従来の差動符号型非同期検出 MIMO 方式を利用した場合、信頼性向上には寄与するものの、大幅な送信レートの向上は見込めない。ここでは、近年注目を集めている空間変調と呼ばれる MIMO コンセプトに対して作動符号化を検討することで、情報ビットを効率的に配置しながら送信レートと信頼性のバランスをとることができる差動符号化 M-MIMO 送信方式を提案する。
- (2) 本項目では、集中管理型 M-MIMO システムを拡張し、多数の分散ノードによって構成される分散ネットワーク型 M-MIMO システムを開発する。特に、ノード数、信頼性に対して柔軟かつ、可能な限りロスが少ない分散ネットワークを実現するため、データバッファを活用した方式を検討する。これにより各ノード間の伝搬路状況に応じたロスが少ない情報伝送が期待できる。
- (3) 本研究課題の最終年度に、実施した研究を総括し、総合的に評価する。また、巨大信号空間を利用した M-MIMO は比較的新しい技術であるため、これまでに提案されてきた方式との特性比較が十分であるとは言えない。そこで本項目では、数値解析によって提案方式の優位な条件を明らかにすると同時に、実用化を検討する際に産業界にとって重要なシステムパラメータの設計指針を示すことを目的とする。

4. 研究成果

(1) 集中管理 M-MIMO 方式について検討した。雑誌論文(11)において、空間変調という R F 1 系統の MIMO 方式をベースとして、高速かつ受信機にて伝播路推定の不要な M-MIMO 方式を提案した。特に、従来の非同期方時空間符号が正方行列に基づくことに対して、提案方式は非正方行列を利用した符号を設計したことにより、送信レートのロスをも最小限に抑えることに成功した。このことは、アンテナ数の増加に対してより効果的に送信レートを向上させることにつながる。

さらに、雑誌論文(4)において、従来の差動符号化手法が送信機にて無限の変調点をとるために量子化誤差の影響を受ける課題に対して、変調点を有限にするような差動符号設計指針を提案した。

また、雑誌論文(19)において、空間変調に基づく M-MIMO では従来のマルチキャリア通信では有意な利得が得られないことを明らかにした上で、シングルキャリア通信のための実用的な低演算量検出器を考案した。

図 1 に雑誌論文(11)で考案した送信機構成を示す。入力ビットに応じて複数の分散ベクトルからひとつを選び、差動符号化を実施する。この際、選択されたベクトルを正方行列に射影してから差動符号化を行い、再びベクトルに射影することでブロックごとに必要な送信シンボル数を削減し、高い送信レートを維持することができる。さらに、図 2 に誤り率 10^{-4} を実現する signal-to-noise ratio (SNR) と送信アンテナ数の関係を示す。このとき、送信アンテナ数が 4 から 1024 へと増加するにつれて、送信レートが 4 bps/Hz から 12 bps/Hz に増加すると仮定した。また、図 2 (a)、図 2 (b) はそれぞれ受信アンテナ数が 4 と 8 の場合である。結果より、いずれのシナリオにおいても提案方式が高いアンテナスケールラビリティがあることを示している。また、パイロットが不要である非同期検出方式の中では、もっともよい性能が得られることがわかった。

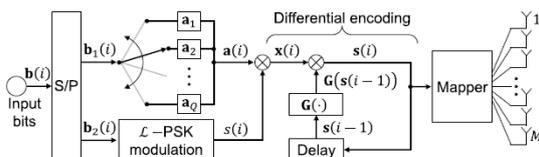
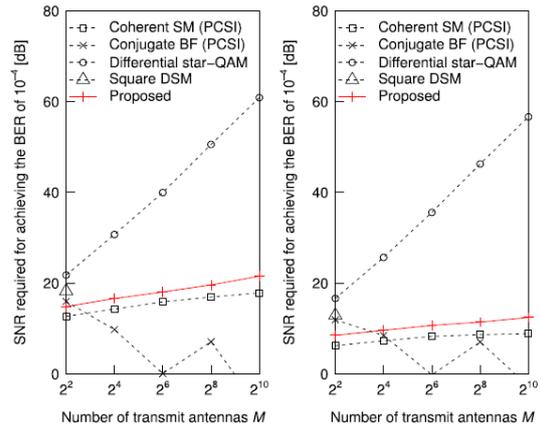


図 1 提案非同期 M-MIMO 送信機. © 2017 IEEE. Reprinted, with permission, from 雑誌論文(11).



(a) (b)

図 2 有効 SNR と送信アンテナ数の関係. © 2017 IEEE. Reprinted, with permission, from 雑誌論文(11).

(2) 分散ノード協調方式について検討した。雑誌論文(3)において、分散ノードのデータバッファを利用することでより高い利得を得られる方式を提案した。さらに、分散ノードを協調的に仮想的な MIMO 端末として動作させることで、より高い信頼性が得られることを明らかにした。特にここでは、バッファを備えた複数の中継端末が協調ビームフォーミングを実施することで中継フェーズにおいて高い信頼性を実現することが可能となった。

図 3 に、不稼働率と SNR の関係を示す。ここでは、協調ノード数を 6、各ノードでのデータバッファを 10 として、各方式と比較を行った。図より、提案方式がもっとも高い信頼性を示すことが確認できた。

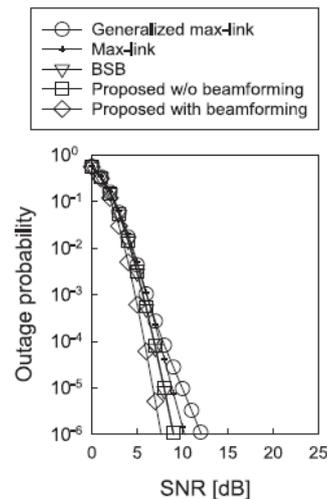


図 3 バッファ利用協調 MIMO システムの信頼性比較. © 2018 IEEE. Reprinted, with permission, from 雑誌論文(3).

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 20 件)

- (1) N. Ishikawa, S. Sugiura, and L. Hanzo, "50 years of permutation, spatial and index modulation: From classic RF to visible light communications and data storage," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, in press. (査読あり, 採録決定済み)
DOI: 10.1109/COMST.2018.2815642
- (2) T. Ishihara and S. Sugiura, "Differential faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 4199-4206, Feb. 2018. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2800002
- (3) R. Nakai, M. Oiwa, K. Lee, and S. Sugiura, "Generalized buffer-state-based relay selection with collaborative beamforming," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1245-1257, Feb. 2018. (査読あり)
DOI: 10.1109/TVT.2017.2751582
- (4) C. Xu, R. Rajashekar, N. Ishikawa, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Single-RF index shift keying aided differential space-time block coding," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp. 773-788, Feb. 2018. (査読あり)
DOI: 10.1109/TSP.2017.2768019
- (5) M. Nakao, T. Ishihara, and S. Sugiura, "Dual-mode time-domain index modulation for Nyquist-criterion and faster-than-Nyquist single-carrier transmissions," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27659-27667, Dec. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2768539
- (6) S. Sugiura, T. Ishihara, and M. Nakao, "State-of-the-art design of index modulation in the space, time, and frequency domains: Benefits and fundamental limitations," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21774-21790, Nov. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763978
- (7) C. Xu, S. Sugiura, S. X. Ng, P. Zhang, L. Wang, and L. Hanzo, "Two decades of MIMO design tradeoffs and reduced-complexity MIMO detection in near-capacity systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18564-18632, Oct. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2707182
- (8) M. Oiwa, R. Nakai, and S. Sugiura, "Buffer-state-and-thresholding-based amplify-and-forward cooperative networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 674-677, Oct. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/LWC.2017.2729547
- (9) T. Ishihara and S. Sugiura, "Faster-than-Nyquist signaling with index modulation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 630-633, Oct. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/LWC.2017.2724517
- (10) T. Ishihara and S. Sugiura, "Iterative frequency-domain joint channel estimation and data detection of faster-than-Nyquist signaling," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 9, pp. 6221-6231, Sept. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/TWC.2017.2721367
- (11) N. Ishikawa and S. Sugiura, "Rectangular differential spatial modulation for open-loop noncoherent massive-MIMO downlink," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1908-1920, Mar. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/TWC.2017.2657497
- (12) M. Nakao, T. Ishihara, and S. Sugiura, "Single-carrier frequency-domain equalization with index modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 2, pp. 298-301, Feb. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2626447
- (13) N. Ishikawa, R. Rajashekar, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Generalized spatial modulation based reduced-RF-chain millimeter-wave communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 879-883, Jan. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/TVT.2016.2555378
- (14) R. Rajashekar, N. Ishikawa, S. Sugiura, K. V. S. Hari, and L. Hanzo, "Full-diversity dispersion matrices from algebraic field extensions for differential spatial modulation,"

IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 1, pp. 385-394, Jan. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/TVT.2016.2536802

- (15) M. Oiwa, C. Tosa, and S. Sugiura, "Theoretical analysis of hybrid buffer-aided cooperative protocol based on max-max and max-link relay selections," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 11, pp. 9236-9246, Nov. 2016. (査読あり)
DOI: 10.1109/TVT.2016.2521062
- (16) P. Yang, Y. Xiao, K. V. S. Hari, A. Chockalingam, S. Sugiura, H. Haas, M. Di Renzo, Z. Liu, L. Xiao, S. Li, and L. Hanzo, "Single-carrier spatial modulation: A promising design for large-scale broadband antenna systems," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1687-1716, Aug. 2016. (査読あり)
DOI: 10.1109/COMST.2016.2533580
- (17) M. Oiwa and S. Sugiura, "Reduced-packet-delay generalized buffer-aided relaying protocol: Simultaneous activation of multiple source-to-relay links," IEEE Access, vol. 4, pp. 3632-3646, July 2016. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2585662
- (18) N. Ishikawa, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Subcarrier-index modulation aided OFDM - will it work?" IEEE Access, vol. 4, pp. 2580-2593, June 2016. (査読あり)
DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2568040
- (19) S. Sugiura and L. Hanzo, "Single-RF spatial modulation requires single-carrier transmission: Frequency-domain turbo equalization for dispersive channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 10, pp. 4870-4875, Oct. 2015. (査読あり)
DOI: 10.1109/TVT.2014.2370679
- (20) N. Ishikawa and S. Sugiura, "Maximizing constrained capacity of power-imbalanced optical wireless MIMO communications using spatial modulation," Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 2, pp. 519-527, Jan. 2015. (査読あり)
DOI: 10.1109/JLT.2015.2391198
- [学会発表] (計 21 件)
- (1) M. Oiwa and S. Sugiura, "Generalized virtual full-duplex relaying protocol based on buffer-aided half-duplex relay nodes," in IEEE Global Communications Conference, Singapore, 4-8 Dec. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254954
- (2) 中尾美裕, 杉浦慎哉, "マルチ変調モードを利用した時間領域インデックス変調," 第 32 回 信号処理シンポジウム, 盛岡、マリオス盛岡地域交流センター, 2017 年 11 月 8-10 日, p. 67.
- (3) 大岩美春, 杉浦慎哉, "仮想全二重バッファ利用無線ネットワークにおけるブロードキャスト型中継プロトコル," 第 32 回 信号処理シンポジウム, 盛岡、マリオス盛岡地域交流センター, 2017 年 11 月 8-10 日, p. 74.
- (4) 中井 陵太, 大岩美春, 杉浦慎哉, "バッファ状態に基づく中継ノード選択と協調ビームフォーミング," 第 32 回 信号処理シンポジウム, 盛岡、マリオス盛岡地域交流センター, 2017 年 11 月 8-10 日, pp. 75-76.
- (5) M. Nakao and S. Sugiura, "Dual-mode time-domain single-carrier index modulation with frequency-domain equalization," in IEEE 86th Vehicular Technology Conference, Toronto, Canada, 24-27 Sep. 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/VTCSFall.2017.8287922
- (6) R. Nakai, M. Oiwa, and S. Sugiura, "Generalized buffer-state-based relay selection for fixed-rate buffer-aided cooperative systems," in IEEE 85th Vehicular Technology Conference, Sydney, Australia, 4-7 June 2017. (査読あり)
DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108243
- (7) 中井陵太, 大岩美春, 杉浦慎哉, "バッファ状態に基づいた中継ノード同時利用による協調通信手法," 総合大会, 名古屋, 名城大学, 2017 年 3 月 23 日, B-5-65.
- (8) 杉浦慎哉, "[招待講演] 時間・空間・周波数領域インデックス変調の基礎と動向," 電子情報通信学会技術報告書ワイドバンドシステム研究会, 東海大学 高輪キャンパス, 2017 年 3 月 10 日.
- (9) 熊田哲志, 杉浦慎哉, "MIMO 受信機に

おける周波数オフセット推定可能範囲の拡大,” 第31回 信号処理シンポジウム, 大阪、関西大学千里キャンパス, 2016年11月8-10日, pp. 107-108.

- (10) 石原拓実, 杉浦慎哉, “Faster-than-Nyquist 信号伝送のための繰り返し周波数領域チャネル推定,” 第31回 信号処理シンポジウム, 大阪、関西大学千里キャンパス, 2016年11月8-10日, pp. 109-110.
- (11) 石川直樹, 杉浦慎哉, Lajos Hanzo, “サブキャリア選択変調を用いた広帯域通信方式の設計指針,” 第31回 信号処理シンポジウム, 大阪、関西大学千里キャンパス, 2016年11月8-10日, pp. 111.
- (12) 大岩美春, 杉浦慎哉, “データバッファを利用した協調中継伝送におけるパケット遅延の低減,” ソサエティ大会, 北海道大学, 札幌, 2016年9月23日, B-5-67.
- (13) 中尾美裕, 石原拓実, 杉浦慎哉, “インデックス変調を用いたシングルキャリア周波数領域等化,” ソサエティ大会, 北海道大学, 札幌, 2016年9月20日, A-8-3.
- (14) M. Oiwa and S. Sugiura, “On the simultaneous exploitation of multiple source-to-relay channels in buffer-aided two-hop cooperative networks,” in IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, Nanjing, China, 15-18 May 2016. (査読あり)
DOI: 10.1109/VTCSpring.2016.7504380
- (15) 熊田哲志, 石川直樹, 杉浦慎哉, “二重差動符号化空間変調MIMO伝送方式,” 第30回 信号処理シンポジウム, いわき, 2015年11月4-6日.
- (16) 大岩美春, 土佐智恵, 杉浦慎哉, “中継ノードにバッファを用いた二段階リンク選択型協調通信の理論解析,” 第30回 信号処理シンポジウム, いわき, 2015年11月4-6日.
- (17) 石川直樹, Rakshith Rajashekar, 杉浦慎哉, Lajos Hanzo, “空間変調方式によるミリ波MIMO送信機の高周波回路数削減,” 電子情報通信学会総合大会, 九州大学, 2016年3月15日, B-5-133.
- (18) N. Ishikawa and S. Sugiura, “EXIT-chart-based design of irregular precoded power-imbalanced optical spatial modulation,” in IEEE 82nd

Vehicular Technology Conference, Boston, USA, 6-9 Sep. 2015. (査読あり)
DOI: 10.1109/VTCFall.2015.7390941

- (19) S. Soeno and S. Sugiura, “Speed-dependent autonomous beamwidth variation for VANET safety applications,” in IEEE Vehicular Networking Conference, Kyoto, Japan, 16-18 Dec. 2015, pp. 131-134. (査読あり)
DOI: 10.1109/VNC.2015.7385558
- (20) 石橋功至, 杉浦慎哉, “帯域制限通信路における空間変調に関する一検討,” 電子情報通信学会技術報告書, 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, 名古屋工業大学, 2014年5月15-16日.
- (21) 石川直樹, 杉浦慎哉, “Maximizing constrained capacity in optical wireless communication systems using spatial modulation,” 第29回 信号処理シンポジウム, 京都, 2014年11月11-14日, B1-1, pp. 138-143.
- (22) 杉浦慎哉, “空間変調通信方式,” 電子情報通信学会総合大会, 立命館大学, 草津, 2015年3月10-13日, AT-2-1.

[その他]

ホームページ等

- http://www.tenure-track-tuat.org/scholar/technology/post_20.html
- <http://web.tuat.ac.jp/~sugiura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉浦 慎哉 (SUGIURA, Shinya)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 30394927

(2) 研究協力者

ハンゾー ラヨシュ (HANZO, Lajos)
School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, U.K.