

令和元年5月31日現在

機関番号：25403

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07036

研究課題名（和文）大規模アンテナアレイによる高速かつ非同期な広帯域通信方式の確立

研究課題名（英文）A study on nonsquare differential space-time coding for massive MIMO-OFDM communications

研究代表者

石川 直樹 (Ishikawa, Naoki)

広島市立大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：00801713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：大規模アンテナアレイシステムにおいて、高いスループットを維持したまま非同期検出を可能とする差動符号化方式について研究した。拡大体と順列行列による差動空間変調に基づき、制限付き通信路容量、濃度、復号演算量、信頼性の観点から基礎的な特性を明らかにした。また、「正方・非正方射影」と命名した独自のコンセプトにより、従来の差動符号化方式の欠点であった送信レートの低下問題を解決した。これにより、送信アンテナ数がM本の場合は送信レートを最大M倍まで改善できる。IEEE国際誌における5件の論文発表を通して、高速かつ非同期な広帯域通信方式の基礎理論を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は過去20年間に渡って研究されてきた差動符号化方式の課題を解決する唯一の方式である。直交性のある正方行列（ユニタリ行列）を非正方行列に射影し、非直交にも関わらず直交しているかのようにチャネル推定不要の非同期検出を可能とする点が特に独創的だと考えている。送信レートが非常に高く通信オーバーヘッドが小さいという利点を活かし、無線通信デバイスのバッテリー消費削減に加え、モノのインターネットや小型ドローンの無線制御などへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research topic, I have established a basic concept that converts the conventional square-matrix-based differential family into a high-rate nonsquare counterpart, where a novel square-to-nonsquare projection is invoked. I, Dr. Xu Chao, and Dr. Rakshith Rajashekar have analyzed this family in terms of the constrained capacity, cardinality, detection complexity, and reliability. The transmission rate of the conventional square differential scheme decays as the number of transmit antennas increases, which has been a well-known open issue since 2000. The proposed unique projection method solves this issue and achieves a significantly higher transmission rate than the conventional reference scheme. As a result, I have succeeded in establishing the basic framework of the nonsquare differential space-time coding concept.

研究分野：無線通信

キーワード：大規模アンテナアレイ 情報理論 差動符号化 非同期検出 空間変調 インデックス変調 順列変調 非正方射影

1. 研究開始当初の背景

第4世代移動通信システム（LTE-Advanced / WiMAX2）に続く第5世代移動通信システムなどの次世代無線通信において、大規模アンテナアレイシステムが有望視されている。同方式は基地局やアクセスポイントなどに備え付けられるアンテナ本数を従来の100倍程度に増やすことで、送信する電波をユーザ端末に局所照射し、軽量の信号検出アルゴリズムにも関わらず高い信頼性を達成する [TWC. 2010. 092810. 091092]。最初のコンセプトが提案された2010年以来、数万件の関連論文が発表されるなど、国際的な注目を集めてきた。大規模アンテナアレイシステムでは、送信機におけるアンテナ数の増加に伴い種々の課題が生じる。例えば、各アンテナに一对一対応する信号処理回路が増えて消費電力が悪化する。また、一般的には時分割複信が仮定され、電波伝搬環境を表す複素係数（以降チャネル係数と呼ぶ）は完璧に推定可能であると仮定される。ここで、周波数分割複信を用いる高速移動環境においてはチャネル係数の推定が特に難しく、実効スループットが低下するという課題がある。

チャネル推定を不要とする無線物理層技術として差動符号化とその非同期検出方式が挙げられる。ユニタリ行列と呼ばれる直交性のある正方行列を用いて、送信する符号間に相関を持たせ、受信機におけるチャネル推定を不要にする。しかし、送信アンテナ数と等しい数の送信タイムスロット全てを対象とした密なユニタリ行列を生成するため、大規模アンテナアレイシステムへの適用は困難である。アンテナ数の増加とともに指数関数的に時間計算量と空間計算量の双方が悪化する課題は、差動符号化が提案された2000年当初から指摘されてきた [18. 825818]。

2. 研究の目的

本研究課題では大規模アンテナアレイシステムに適用可能な差動符号化技術について研究する。ここで、送信レートは従来から提案されている代表的な空間多重化技術と同等の水準とする。この非同期検出がもし可能となれば、過去20年間に渡って研究されてきた差動符号化の課題を解決する唯一の方式となる。

3. 研究の方法

疎ベクトルを疎行列に射影することで非同期検出を可能とする独自の差動符号化方式を研究代表者は博士後期課程在学中に提案している [TWC. 2017. 2657497]。これは見方を変えると、疎行列を疎ベクトルに射影しているとも捉えられる。疎行列を用いる差動空間変調という方式が Bian らによって2015年から提案されており [TVT. 2014. 2348791]、これにユークリッド空間の正規直交基底を掛け合わせる操作と等価であることを発見した。また、射影前の行列はユニタリ行列であればどんな方式でもよく、過去20年弱にわたって提案されてきた数々の財産を再利用できる。応募時に詳しい条件は不明であったが、射影の非ゼロ成分密度を自由に調整できる場合がある。これら一連のアイデアを「非正方差動符号化」と名付け、以下に挙げる三つの素朴な疑問を解消することにした。

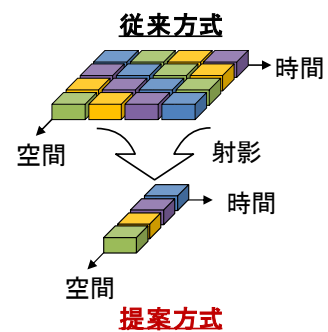


図1 提案の非正方射影

- ・ どのような非正方行列が射影として利用可能か？
- ・ 非正方差動符号化は対応する同期検出方式の性能に漸近可能か？
- ・ 射影により冗長シンボルが減って高速移動環境では信頼性が低下するのではないか？（もし高速移動環境で性能が悪化したら本末転倒である）

得られた研究成果は無線通信分野を代表する IEEE（米国電気電子学会）の国際誌に投稿する。ネットワークの重要性を顧み、国際会議においても発表すべきだが、講義と予算の都合上参加は困難である。本研究の独自性を強みとして、同世代の仲間に関心を持ってもらい、国際共同研究の枠組みの中で研究を進める。また、世界各国から届く問い合わせに関しては、アウトリーチ活動の一部と位置付けその全てに可能な限り時間をかけて対応し、献身的に協力することで共同研究者を積極的に増やす。IEEE と論文購読契約を交わしていない大学・研究機関に所属する研究者のために、発表論文は原則オープンアクセスとする。

4. 研究成果

本研究課題では以下五つの成果が得られた。なお、論文[1, 2]は研究代表者が主体的に実施し、論文[3, 4, 5]は共同研究者であるサウサンプトン大学 Research Fellow の Rajashekar 博士および Xu 博士が主体的に実施した。各成果の番号は「5. 主な発表論文等」と対応している。

[1] 独自の提案コンセプトである非正方差動符号化の達成性能限界を解析

従来のユニタリ行列による差動時空間ブロック符号に対して「正方・非正方射影」と名付けた基底を掛け合わせることで非正方行列に変換する方式を提案した。これにより、実効スループットを線形に改善でき、高速かつ非同期な広帯域通信の基礎理論を確立できた。ここで、射影前のユニタリ行列は拡大体に基づく差動空間変調により構成される。ユニタリ行列の部分行

列であればその直交性を利用して基底を構成できることを明らかにした。これを踏まえ、ランダム基底、スパース基底、離散フーリエ基底、ハイブリッド基底の四つを新規に考案し、それぞれのトレードオフを解析した。ランダムに生成したエルミート行列をケラー変換によりユニタリ行列に射影し、その部分行列をランダム基底とする。スパース基底は単位行列の部分行列であり、離散フーリエ基底はDFT行列の部分行列である。ハイブリッド基底は与えるパラメータによってスパース基底や離散フーリエ基底に変化し、それらの中間状態を表現できる。

例えば送信アンテナ数 $M = 256$ かつ送信レート $R = 10$ [bit/symbol] の場合、従来方式は 2^{2560} 個の 256×256 複素行列を用意する必要があり、実デバイスへの実装は極めて困難である。一方で、提案方式は 2^{10} 個のベクトルを用意するのみでよいため、送信機及び受信機の負担が $1/2^{256}/2^8$ のオーダーで軽減される。計算機シミュレーションにより、提案方式は完璧なチャネル推定を仮定する同期検出とほぼ同等の性能を達成できることが分かった。この原因を究明するため、雑音電力を中心に解析した。また、送信レートの高いシナリオにおいて、従来の正方向行列に基づく方式は動作しない一方で、提案方式は高い信頼性を達成でき、これらの傾向は送信アンテナ数を $M = 1024$ 本まで増やしても変わらないことを確認した。つまり、提案方式は送信アンテナ数を増やしても性能が劣化しない高いスケラビリティを有している。ドップラースフトを無視できない高速移動環境において性能が劣化する可能性を否定できないと考えていたが、提案の適応検出器が位相ずれを緩和することも実験的に明らかになった。

[2] 関連研究すべてを1960年代まで遡り網羅するチュートリアル論文を発表

本研究課題に関連する研究すべてを1960年代まで遡り包括的に調査し、類似方式が過去に提案されていないことを確認した。この調査結果は、246件の文献を体系的に分類・紹介するチュートリアル論文として発表した。第三者による追試を容易にするため、簡易的なシステムモデルに限り解説した。本論文により差動符号化や空間変調およびインデックス変調に興味を持つ研究者が増えれば嬉しい。

本論文では非正差動符号化の非同期検出による復号演算量と、従来から提案されてきた九つの方式の演算量を比較した。この比較の結果、非正差動符号化を用いることで、同期検出の場合とほぼ同等までに演算量を削減可能であることを再確認した。

調査の過程で、2013年に初めて提案されたと考えていた差動空間変調と同等の方式が、実は2007年時点でOggierにより提案されていたことが分かった [[TIT.2007.903152](#)]。同様に車輪が再発明されてきた様々な経緯が明らかとなったため、本論文ではこれらの事実について包み隠さず報告した。

本成果の一部を国内研究会（ワイドバンドシステム研究会、スマート無線研究会）において発表し、経験豊富な研究者の方々から有益なフィードバックを多く得ることができた。

[3] 拡大体に基づく差動空間変調を提案

本論文では代表者らが提案してきた差動空間変調を拡張し、複数系列の独立処理が可能となる軽量検出器を提案した。2014年に代表者らが提案した差動空間変調では、高い信頼性を達成可能な一方で、通信モジュールへの実装前に一度だけ高負荷な探索を必要とするという欠点があった [[LWC.2014.2315635](#)]。この探索空間は送信アンテナ数が増えるほど指数関数的に大きくなり、送信アンテナが16本以上の場合に実質的に探索が不可能になるという課題を抱えていた。そこで本研究では、拡大体と順列行列を利用することでこの探索を不要とした。なお、本研究は共同研究者であるRajashekar博士が主体的に実施した。

[4] 差動符号化方式一般の制限付き通信路容量を導出

本論文では非同期検出を前提とする差動符号化方式一般について、誤り訂正符号を用いた場合の達成性能限界を推定するため、制限付き通信路容量を導出した。一般的な通信路容量の導出において、入力信号は連続的な複素正規分布に従うと仮定される。これに対して本研究では、入力信号はユニタリ行列による時空間ブロック符号と仮定した上で、非同期検出によって引き起こされる雑音増加の影響も考慮した。これにより、より現実的な達成性能限界が明らかになった。なお、本研究は共同研究者であるXu博士が主体的に実施した。

[5] 有限濃度の差動時空間ブロック符号を提案。

本論文では、正方向行列による差動時空間ブロック符号の濃度（基数）が、タイムスロット数に応じて指数関数的に増える問題を解決した。研究代表者らの既存研究 [[LWC.2014.2315635](#)] では信号の位相を細かく調整する方式を提案している。これにより信頼性が最大限改善される一方で、差動符号化の操作により時空間ブロック符号をかけ合わせる度に任意の位相を持つシンボルが生成されてしまうという欠点があった。この問題を解決するため、生成する時空間ブロック符号の位相に厳しい制限を加え、差動符号化前のシンボル集合と差動符号化後のシンボル集合が同じになるように工夫した。これらの工夫により演算処理回路の単純化が期待できる。なお、本研究は共同研究者であるXu博士が主体的に実施した。

その他

本研究課題の支援を受けた2017～2018年度にIEEE国際誌に投稿された論文49報を査読した。この活動が認められ、IEEE Transactions on Communicationsの模範的査読者(exemplary reviewer)として認定された。また、非正方差動符号化の基礎となった論文に対して東京電機大学基金の丹羽保次郎記念論文賞が授与された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- [1] Naoki Ishikawa, Rakshith Rajashekar, Chao Xu, Shinya Sugiura, and Lajos Hanzo, “Differential space-time coding dispensing with channel-estimation approaches the performance of its coherent counterpart in the open-loop massive MIMO-OFDM downlink,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 12, pp. 6190-6204, Dec. 2018.
国際共著 / オープンアクセス / <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2867528>
- [2] Naoki Ishikawa, Shinya Sugiura, and Lajos Hanzo, “50 years of permutation, spatial and index modulation: From classic RF to visible light communications and data storage,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1905-1938, Mar. 2018.
国際共著 / オープンアクセス / <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2815642>
- [3] Rakshith Rajashekar, Chao Xu, Naoki Ishikawa, Shinya Sugiura, K. V. S. Hari, and Lajos Hanzo, “Algebraic differential spatial modulation is capable of approaching the performance of its coherent counterpart,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4260-4273, Oct. 2017.
国際共著 / <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2720170>
- [4] Chao Xu, Rakshith Rajashekar, Naoki Ishikawa, Shinya Sugiura, and Lajos 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.
国際共著 / <https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2768019>
- [5] Chao Xu, Peichang Zhang, Rakshith Rajashekar, Naoki Ishikawa, Shinya Sugiura, Li Wang, and Lajos Hanzo, “Finite-cardinality single-RF differential space-time modulation for improving the diversity-throughput tradeoff,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 1, pp. 318-335, Jan. 2019.
国際共著 / オープンアクセス / <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2869812>

〔学会発表〕(計4件)

1. 石川 直樹, 杉浦 慎哉, “大規模アンテナアレイ OFDM システムに適した低密度差動ブロック符号の提案,” 電子情報通信学会 信号処理シンポジウム, 2017/11/08-10.
<http://www.ieice.org/ess/sip/symp/2017/?cmd=program>
2. 石川 直樹, “〔奨励講演〕空間変調のミリ波・可視光・マルチキャリア通信応用,” 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会, 2017/12/14-15.
<https://www.ieice.org/ken/paper/20171214n1a1/>
3. 石川 直樹, “〔招待講演〕空間変調の流行と50年間の研究変遷,” 電子情報通信学会スマート無線研究会, 2018/01/25-26.
<https://www.ieice.org/ken/paper/20180125D1bD/>
4. 石川 直樹, “非正方差動符号化方式の適応的検出アルゴリズムと大規模ミリ波 MIMO-OFDM 通信への適用,” 電子情報通信学会 信号処理シンポジウム, 2018/11/06-08.
<http://www.ieice.org/~sip/symp/2018/?cmd=program>

〔その他〕

ホームページ等

- ・ <https://researchmap.jp/naoki-ishikawa/>
- ・ <http://rsw.office.hiroshima-cu.ac.jp/Profiles/14/0001365/profile.html>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。