

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文概要

論文題目

OAM多重伝送への複数等間隔円形
アレーアンテナの適用に関する研究

A Study on Application of Multiple Uniform Circular
Arrays to Orbital Angular Momentum Multiplexing

申請者

齋藤 周平
Shuhei SAITO

情報理工・情報通信専攻 無線信号処理研究

2020年12月

近年、移動通信システムの高度化に伴うデジタルコンテンツの大容量化や IoT (Internet-of-things) デバイスの急速な普及により、モバイルサービスの需要は、増加の一途を辿っている。我が国において 2020 年春に商用化された第 5 世代移動通信システム (5G) では、第 4 世代移動通信システム (4G) における利用シナリオを高度化させた eMBB (Enhanced Mobile Broadband) に加えて、URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communications) や mMTC (Massive Machine Type Communications) といった新たな利用シナリオが想定されており、超高精細映像伝送、スマート工場、ITS (Intelligent Transport Systems) や遠隔医療等といった多様なサービスの実現が期待されている。また、2030 年における実現を目指す第 6 世代移動通信システム (6G) では、ホログラム、無人工場の遠隔制御や自動車・船舶・航空機の完全自動運転等といった、5G におけるサービスの更なる発展を実現すべく、5G のより一層の高度化が要求されており、特に、1Tbps のピークデータレートを目標としたモバイルネットワークの高速・大容量化が期待されている。

5G の更なる高度化を着実に図るとともに、6G におけるテラビット級の無線通信を実現するには、アクセスリンク技術の高度化に加えて、バックホール回線の拡充も不可欠と考えられる。特に、スモールセルのバックホール回線を構築する際には、光ファイバー等の有線による通信だけでなく、柔軟性、スケーラビリティ及び設備コストの観点から、見通し内 (LOS : Line-of-site) 固定無線通信の適用が有力視されている。このような背景の中、近年、軌道角運動量の異なる信号が互いに直交となることを利用して、複数のモードを同時に送信できる OAM (Orbital Angular Momentum) 伝送が注目を集めている。OAM 信号の生成方法としては、ホログラフィックプレートによる方法や螺旋位相プレートによる方法が知られている。これらの方法では、3D プリンター等により各モードに対応したアンテナを簡易に製造できるものの、モード多重の際に、アンテナを離れた場所に複数設置することが必須となり、ビームスプリッターも必要となる問題がある。これに対して、等間隔円形アレーアンテナ (UCA : Uniform Circular Array) による方法では、単一の送受信アンテナ対で複数のモードを同時に送信できることから、OAM 多重伝送を実現する実用的なアプローチとして有力視されている。

UCA による OAM 多重伝送については、搬送波周波数、アンテナ素子数やアンテナ半径等といったシステムパラメータにより送信信号の空間的な位相分布及び電力分布が変化し、結果として受信電力に大きな変動が生じることから、その安定化を目的として、複数 UCA を同心円状に多重させてアンテナ半径に冗長性を与える方式が提案されており、本方式のバックホール回線への適用が検討されている。

複数 UCA による OAM 多重伝送の高度化に当たっては、各種システムパラメータと受信特性との関係を把握すべく、特性解析を進めるとともに、得られた特性

を、空間冗長性を有する信号処理に積極的に活用することが重要である。しかしながら、OAM 多重伝送の特性解析については、これまでに、単一UCAを対象とした検討に留まっており、複数UCAを対象としたものは見当たらない。また、信号処理の高度化についても、OAMとMIMO (Multiple-input and Multiple-output) を組み合わせたOAM-MIMOの提案がなされているが、簡易な線形フィルタリングに基づく信号分離に留まっており、更なる改善の余地があるものと考えられる。

以上の点に鑑み、本論文では、複数UCAによるOAM多重伝送を対象としたシステム容量解析を行うとともに、その高度化技術としてOAM-MIMOを採り上げ、OAM信号の受信特性に着目した逐次干渉除去 (SIC : Successive Interference Cancellation) に基づく特性改善法の提案を行っている。本論文は、第1章から第5章までで構成されている。以下に、各章の概要を説明する。

第1章では、本研究の位置付け及び目的について述べている。まず、UCAによるOAM多重伝送について、各種システムパラメータにより受信特性が大きく変動することやOAM多重伝送を現実的に適用する場合に想定されるアンテナ軸ずれの問題について指摘している。次に、受信特性を安定化できる複数UCAによるOAM多重伝送を採り上げ、複数UCAの適用効果とアンテナ軸ずれの影響を考慮したシステム容量解析の意義について述べている。更に、複数UCAによるOAM多重伝送の高度化技術であるOAM-MIMOを採り上げ、OAM信号の受信特性に着目したSICに基づく特性改善法の提案について概説している。

第2章では、複数UCAによるOAM多重伝送のシステム容量を、単一UCAによる場合を比較対象にとって解析・評価している。具体的には、まず、本方式における送信UCA選択と最大比合成 (MRC : Maximal Ratio Combining) による空間ダイバーシチ効果の獲得の有効性について述べるとともに、それを考慮したシステム容量の導出を行っている。更に、一定の送信電力とアンテナ素子数を想定し、UCA多重数や通信距離を変化させたときのシステム容量を注水定理に基づき取得するとともに、それらパラメータの変化に対する複数UCAの適用効果について解析・評価している。特性評価の結果、システム容量の観点からは、通信距離に関わらず、高次モードまで適用可能となる単一UCAが複数UCAよりも有効となることを明らかにしている。一方、複数UCAでは、送信UCA選択及びMRCによる空間ダイバーシチ効果を獲得できることから、通信距離の変化に伴うシステム容量の変動を軽減できることを明らかにしている。

第3章では、第2章の発展として、アンテナ軸ずれ存在下における複数UCAによるOAM多重伝送のシステム容量を解析・評価している。具体的には、まず、OAM多重伝送を現実的に適用する場合、風等による振動によりアンテナ軸ずれが生じ、それに起因したモード間干渉により受信特性が大幅に劣化することから、アンテナ軸ずれの影響を考慮した特性解析の重要性を指摘している。また、アン

テナ軸ずれに起因したモード間干渉の影響を第 2 章で述べた複数 UCA による OAM 多重伝送のシステム容量解析に反映するとともに、アンテナ軸ずれに対する複数 UCA の適用効果について解析・評価している。特性評価の結果、アンテナ軸ずれが存在しない場合には、第 2 章で述べたように、単一 UCA の信号対干渉及び雑音電力比 (SINR : Signal to Interference-plus-noise Power Ratio) が複数 UCA の場合よりも良好となる一方で、モード間干渉の生じるアンテナ軸ずれが存在する場合には、送信 UCA 選択による空間ダイバーシチ効果を獲得できる複数 UCA の SINR が単一 UCA の場合よりも良好となることを明らかにしている。このことから、システム容量について、アンテナ軸ずれが存在しない場合には、単一 UCA が複数 UCA よりも通信距離に関わらず有効となり、アンテナ軸ずれが存在する場合には、複数 UCA が単一 UCA よりも有効となることを明らかにしている。

第 4 章では、複数 UCA による OAM 多重伝送の高度化技術である OAM-MIMO を対象として、OAM 信号の受信特性に着目した SIC に基づく特性改善法の提案を行うとともに、その有効性を明らかにしている。提案方式は、異なるアンテナ半径で受信した OAM 信号間に大きな受信電力差が生じることに着目し、それら複数の OAM 信号を SIC に基づき信号分離することにより、受信特性の向上を図るものである。また、第 3 章で述べたアンテナ軸ずれの影響も考慮して、提案方式の有効性を、SIC を適用しない通常方式を比較対象にとって評価している。特性評価の結果、アンテナ軸ずれが存在しない場合には、MIMO の適用により、OAM 多重伝送と比較してシステム容量を向上できることを明らかにしている。また、提案する OAM 信号の受信特性に着目した SIC の適用により、通常の OAM-MIMO よりも良好なシステム容量が得られることを明らかにしている。更に、アンテナ軸ずれが存在する場合には、特に比較的長い通信距離において、ストリーム間干渉により、OAM-MIMO のシステム容量に劣化が生じるものの、提案する SIC の適用により、システム容量の劣化を軽減できることを明らかにしている。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章までで得られた結果をまとめるとともに、今後の研究課題について述べている。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 齋藤 周平

印

(2021年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	Y. Ito, S. Saito , H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Effectiveness evaluation of polarization in OAM multiplexing," <i>IEICE Communications Express</i> , vol. 10, to appear, 2021.
○論文	齋藤周平 , 伊藤有希, 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, "アンテナ軸ずれ存在下における複数UCAを用いたOAM多重伝送のシステム容量評価," 信学論(B), vol. J104-B, no. 2, Feb. 2021 (掲載決定).
論文	菅沼碩文, 齋藤周平 , 丸小倫己, 前原文明, "MU-MIMO-OFDMにおける理論システム容量を用いたガードインターバル長制御法," 信学論(B), vol. J102-B, no. 8, pp. 659–668, Aug. 2019.
論文	S. Saito , H. Suganuma, and F. Maehara, "Theoretical derivation method of bit error rate for coded SC-FDE transmission," <i>IEICE Communications Express</i> , vol. 6, no. 5, pp. 182–187, May 2017.
国際会議	H. Suganuma, S. Saito , K. Ogawa, and F. Maehara, "Mode group selection method for inter-mode interference suppression in OAM multiplexing," <i>Proc. 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2020)</i> , pp. 355–356, Jan. 2021.
国際会議	H. Suganuma, S. Saito , K. Ogawa, and F. Maehara, "Performance analysis of OAM multiplexing employing SC-FDE in the presence of ground reflection," <i>Proc. 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2020)</i> , pp. 1–6, Dec. 2020.
国際会議	S. Saito , H. Suganuma, K. Kuriyama, Y. Ono, H. Fukuzono, M. Yoshioka, and F. Maehara, "Performance analysis of single-carrier modulation with frequency domain equalization in millimeter-wave and terahertz broadband communications," <i>Proc. 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020)</i> , pp. 1–4, Dec. 2020.
国際会議	Y. Ito, S. Saito , H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Effectiveness evaluation of polarization in UCA-based OAM multiplexing," <i>Proc. 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020)</i> , pp. 1–4, Dec. 2020.
国際会議	S. Saito , Y. Ito, H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Performance analysis of polarized OAM multiplexing considering the effect of polarization interference," <i>Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2020)</i> , pp. 1–6, June 2020.
国際会議	H. Suganuma, S. Saito , K. Ogawa, and F. Maehara, "Inter-mode interference suppression employing even-numbered modes for UCA-based OAM multiplexing," <i>Proc. 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps 2019)</i> , pp. 1–6, Dec. 2019.
○国際会議	S. Saito , H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Performance analysis of OAM-MIMO using SIC in the presence of misalignment of beam axis," <i>Proc. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops 2019)</i> , pp. 1–6, May 2019.
○国際会議	S. Saito , H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Performance enhancement of OAM-MIMO using successive interference cancellation," <i>Proc. 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC 2019-Spring)</i> , pp. 1–5, Apr. 2019.
○国際会議	S. Saito , H. Suganuma, K. Ogawa, and F. Maehara, "Influence of the number of uniform circular arrays on system capacity in OAM multiplexing," <i>Proc. 2018 21st International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2018)</i> , pp. 268–272, Nov. 2018.
国際会議	H. Suganuma, S. Saito , T. Maruko, and F. Maehara, "Inter-symbol interference suppression scheme employing periodic signals in coded network MIMO-OFDM systems," <i>Proc. 2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2017)</i> , pp. 42–44, Jan. 2017.
講演	S. Saito , H. Suganuma, K. Kuriyama, Y. Ono, H. Fukuzono, M. Yoshioka, and F. Maehara, "A study on performance analysis of single-carrier modulation with frequency domain equalization in millimeter-wave and terahertz broadband communications," <i>IEICE Technical Report</i> , RCS2020-143, Dec. 2020.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, "OAM多重伝送への偏波多重の適用効果に関する検討," 信学技報, SRW2020-32, Nov. 2020.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 齋藤 周平

印

(2021年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	中村敦也, 新保薫子, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 前原文明, “端末移動度情報を必要としないSC-FDE判定帰還型伝搬路推定に関する一検討,” 信学ソ大, B-5-3, Sept. 2020.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “OAM多重伝送への偏波多重の適用効果に関する基礎的検討,” 信学ソ大, B-5-8, Sept. 2020.
講演	齋藤周平 , 伊藤有希, 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “UCAを用いたOAM多重伝送におけるシステム容量向上とモード間干渉抑圧に向けた取り組み,” 信学ソ大, BS-3-4, Sept. 2020.
講演	中村敦也, 新保薫子, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 前原文明, “端末移動性を用いたSC-FDE判定帰還型伝搬路推定の特性改善に関する一検討,” 信学総大, B-5-1, Mar. 2020.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “OAM多重伝送における偏波干渉の影響,” 信学総大, B-5-47, Mar. 2020.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “OAM多重伝送における偏波干渉の影響評価,” 信学技報, RCS2019-402, Mar. 2020.
講演	中村敦也, 新保薫子, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 前原文明, “端末移動性を用いたSC-FDE判定帰還型伝搬路推定の特性改善に関する検討,” 信学技報, RCS2019-405, Mar. 2020.
講演	菅沼碩文, 齋藤周平 , 小川賀代, 前原文明, “OAM多重伝送における偶数モードを用いたモード間干渉抑圧法に関する検討,” 信学技報, RCS2019-213, Nov. 2019.
講演	齋藤周平 , 伊藤有希, 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “複数UCAを用いたOAM多重伝送において搬送波周波数がシステム容量に与える影響,” 信学技報, SRW2019-38, Nov. 2019.
講演	菅沼碩文, 齋藤周平 , 丸小倫己, 前原文明, “ネットワークMIMO-OFDMにおける理論システム容量を用いたGI長制御法,” 信学ソ大, B-5-27, Sept. 2019.
講演	齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “UCAによるOAM-MIMO伝送においてアンテナ軸ずれがシステム容量に与える影響,” 映情学技報, BCT2019-61, July 2019.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “複数のUCAを用いたOAM多重伝送においてアンテナ軸ずれがシステム容量に与える影響に関する検討,” 信学技報, RCS2019-101, July 2019.
講演	伊藤有希, 齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “複数のUCAを用いたOAM多重伝送においてアンテナ軸ずれがシステム容量に与える影響,” 信学総大, B-5-106, Mar. 2019.
講演	齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “UCAによるOAM-MIMO伝送への逐次干渉除去の適用に関する一検討,” 信学技報, RCS2018-221, Dec. 2018.
講演	齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “OAM多重へのUCA多重数がシステム容量に与える影響,” 信学技報, SRW2018-31, Nov. 2018.
講演	齋藤周平 , 菅沼碩文, 小川賀代, 前原文明, “UCAによるOAM伝送においてモード多重数がシステム容量に与える影響,” 信学ソ大, BS-4-9, Sept. 2018.
講演	栗原直己, 齋藤周平 , 小川賀代, 前原文明, “UCAアンテナによるOAM信号の受信特性に関する一検討,” 信学総大, AS-1-4, Mar. 2018.
講演	菅沼碩文, 齋藤周平 , 丸小倫己, 前原文明, “MU-MIMO-OFDMにおけるISIを許容した伝送効率向上に関する一検討,” 信学総大, B-5-40, Mar. 2018.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 齋藤 周平

印

(2021年 2月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	齋藤周平, 菅沼碩文, 前原文明, “システムレベルにおけるOFDMとSC-FDEの理論通信路容量比較評価に関する検討,” 信学技報, SRW2016-87, Mar. 2017.
講演	齋藤周平, 菅沼碩文, 前原文明, “SC-FDEにおける誤り訂正を考慮した理論ビット誤り率の解析に関する検討,” 信学技報, WBS2016-42, Oct. 2016.
講演	齋藤周平, 菅沼碩文, 前原文明, “誤り訂正を考慮したSC-FDEのビット誤り率の理論解析に関する検討,” 信学ソ大, B-5-23, Sept. 2016.
講演	菅沼碩文, 齋藤周平, 丸小倫己, 前原文明, “ネットワークMIMO-OFDMにおけるシンボル間干渉抑圧に関する検討,” 映情学技報, BCT2016-62, July 2016.