

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC



平井 健士 (TAKISHI HIRAI Doctor of Informatics)

大阪大学 大学院情報科学研究科

バイオ情報工学専攻 助教

(Assistant Professor, University of Osaka, Graduate School of Information Science and Technology, Department of Department of Bioinformatic Engineering)

電子情報通信学会, IEEE

受賞: ACM MSWiM Best Paper Award (2023年), 電子情報通信学会 IN 研究会情報ネットワーク研究会研究賞 (2023年), 公益財団法人電気通信普及財団テレコムシステム技術学生賞奨励賞 (2022年) 他

著書: 自動運転車に向けた電子機器・部品の開発と制御技術, 技術情報協会 (2022年)

研究専門分野: 情報ネットワーク

### あらまし

本研究では、5G や 6G のアップリンク通信の要件の 1 つである超多数接続のために、電力軸で信号多重する grant-free non-orthogonal multiple access (GF-NOMA) の性能解析と電力リソースの選択手法を開発した。GF-NOMA では、各デバイスが、自律分散的に、電力リソースを 1 つ選択し、パケットを送信する。基地局は、逐次干渉除去技術を用いて、重畳されたパケット信号を受信する。このスループットと消費電力を高めるために、本研究では、以下の 3 つの研究を実施した。まず、未解明なスループット特性を明らかにするために、シングルセル環境において、GF-NOMA のスループット解析式を構築した。次に、マルチセル環境の GF-NOMA におけるスループット解析式を提案し、スループット特性を解析した。最後に、自律分散制御の中でも高度なパターンを構築可能な自己組織化制御に着目して、自己組織型電力リソース選択手法を提案し、その基本的な性能特性を評価した。これらの研究を通して、数%の誤差に抑えた高精度なスループット解析式、及び、集中制御手法が示すスループット

と消費電力に十分近い性能を達成できる自己組織型電力リソース選択手法を開発することができた。

### 1. 研究の背景・目的

第 5 世代移動体通信システム (5G) やその先の 6G では、重要な通信要件の 1 つとして、超多数接続 (massive machine-type communications: mMTC)\*1 が検討されている。mMTC は、主に、IoT のユースケースを想定しており、超多数の IoT デバイスが、サイズの小さいパケットを散発的に送信するという特徴がある。その結果、基地局が、超多数のデバイスの接続・管理等で制御信号が発生してしまう。そのため、mMTC では、このような制御信号を削減することを狙った grant-free (GF) アクセス方式\*2 が注目されている。この GF アクセス方式では、各デバイスは、基地局へのスケジューリング要求や基地局からの事前許可 (grant) なしに、パケットを自律分散的に送信できる。

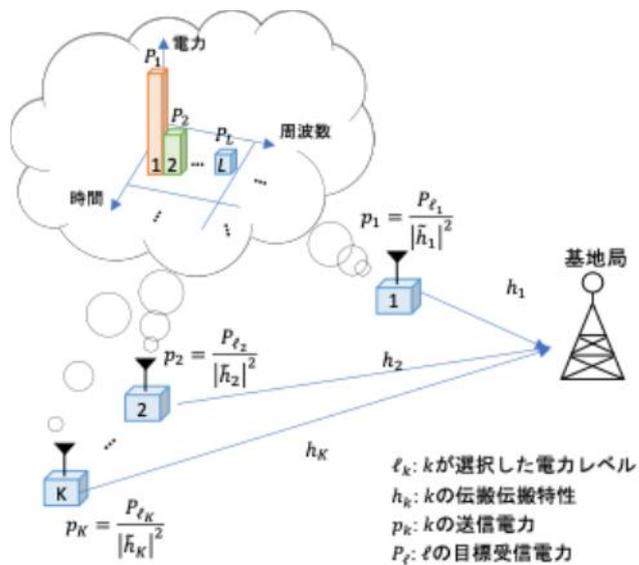


図 1 GF-NOMA とその電力レベル選択のイメージ

GF アクセス方式におけるシステムスループット (以下、単にスループット) を向上させるために、電力軸非直交多元接続 (power-domain non-orthogonal multiple access: NOMA) を用いた GF-NOMA\*3 が注目されている。GF-NOMA では、単位電力リソース (電力レベル) が事前に設計されており、各電力レベルは、目標受信電力と紐付けられている。デバイスは、電力

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC

レベルプールの中から、1つの電力レベルを選択し、自身の電波伝搬特性から逆算して、選択した電力レベルに紐づいた目標受信電力となるように送信電力を設定し、パケットを送信する(図1)。基地局は、上記の手続きで送信されたパケット群が重畳された信号を受信して、この重畳信号に、逐次干渉除去(successive interference cancellation: SIC)<sup>\*4</sup>を適用して、各パケットの受信を狙う。

GF-NOMAでは、複数のデバイスが、同一の時間-周波数-電力リソースを選択すると、パケットエラーが発生する。このパケットエラーは、電力レベルの非直交性から、他の電力レベルにも波及する。具体的には、ある電力レベルで、パケットエラーが起こると、SICによる干渉除去ができないため、その電力レベルよりも低電力レベルで送られたパケットも受信できない。また、電力レベルへのパケット到着次第では、高電力レベルであっても、信号対干渉ノイズ比(signal-to-interference-plus-noise ratio: SINR)が低下し、パケットエラーを波及させる。GF-NOMAは、電力リソースを有効に使える反面、パケットエラーが波及して、スループットが低下するという特徴を持つ。また、GF-NOMAでは、電波伝搬特性が悪いデバイスが、高電力レベルを選択すると、設定する送信電力が高くなってしまふ。以上のことから、各デバイスは、自律分散的でありながらも、電力コリジョンを起こしにくく、電力効率の良い電力レベルを適切に選択する必要がある。

このような背景を受けて、本研究では、mMTCのためのGF-NOMAにおいて、スループットと電力効率を両立する電力レベルの自律分散的な選択手法を提案し、評価した。そのために、GF-NOMAの特徴的なパケットエラーが発生するメカニズムを解明し、その知見によって、効果的な電力レベル選択手法を提案した。具体的に、以下の3つの研究を進めた。1つ目の研究として、シングルセル環境において、GF-NOMAの本質的なスループット特性を解明し、スループット解析式を構築した[1]-[3]。2つ目の研究として、マルチセル環境のGF-NOMAにおけるスループット解析式を提案し、スループット特性を解析した[4]-[6]。3つ目の研究として、自律分散制御の中でも高度なパターンを構築可能な自己組織化制御に着目して、自己組織型

電力レベル選択手法を提案し、その基本的な性能特性を評価した[7]。

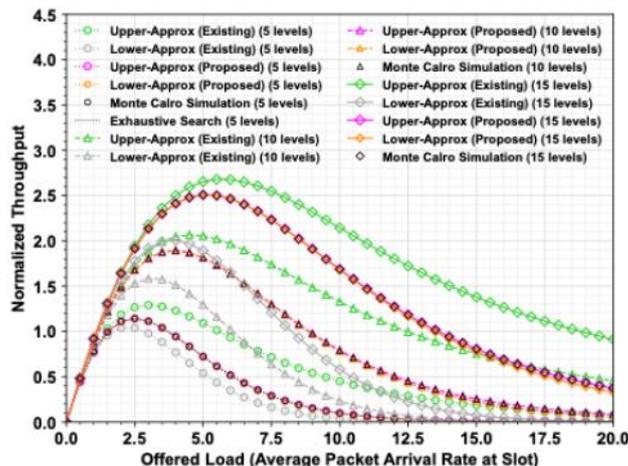


図2 シングルセル環境の電波伝搬特性を考慮しないGF-NOMAのスループット解析結果([1]の評価結果を参照)

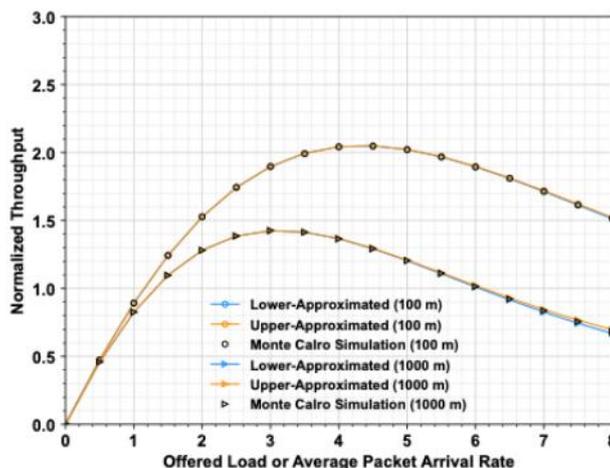


図3 シングルセル環境の電波伝搬特性を考慮したスループット解析結果([2]の評価結果を参照)

## 2. 従来研究

GF-NOMAに関する従来研究では、様々な解析や手法の検討が進められている。

[8]等の従来研究では、シングルセル環境におけるGF-NOMAのスループット解析が進められている。しかし、これらの従来研究では、高電力レベルに波及するパケットエラーが適切にモデル化できておらず、

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC

GF-NOMA のスループット解析は、精度が低いままだった。また、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット解析モデルは未成熟であり、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット特性は未説明のままであった。

[9][10]等の従来研究では、GF-NOMA の無線アクセス方式として、GF-NOMA で特徴的な電力レベルの選択方式が検討されている。[9]等では、選択確率としてモデル化しており、最適化問題として解いている。[10]等では、基地局からの距離と選択する電力レベルを紐づけている。これにより、電波伝搬特性までを考慮し、送信電力の上限まで考慮したモデルを検討している。しかし、これらの手法では、ユーザ分布や電波伝搬特性に対する柔軟性や適応性が低いという問題があった。

そこで、本研究では、シングルセルとマルチセルの両環境において精度の高いスループット解析式を構築し、その知見を基に、高度なパターンを柔軟に構築できる自己組織型電力レベル選択手法を提案し、その特性を評価した。

### 3. 研究の方法

本研究で実施した 3 つの研究について、それぞれ簡潔に説明する。

#### (ア) シングルセル GF-NOMA の性能解析

シングルセルシナリオでは、基地局 1 台の周辺に、IoT デバイスが分布している。各デバイスは、GF アクセスに基づき、自身のパケットを送信する前に、電力レベルを選択する。ただし、このとき、送信電力の計算に用いるチャンネル推定は誤差がないとしている。

まず、[1]を中心に、電波伝搬を考慮しないモデルにおいて、レベル別の平均パケット到着数に基づいた GF-NOMA のスループット解析手法を開発した。このモデルでは、スループットは、レベル別の平均パケット到着数にのみ依存する。ただし、従来のような直交型の多元接続とは異なり、SIC によって、各電力レベルの受信成功可否が他の電力レベルの受信成功可否に依存する電力コリジョンを適切に表現する解析式が求められる。そこで、本研究では、スループットの特性に基づき、ある電力レベルの電力コリジョンが高電力レベルのパケットエラーと低電力レベルのパケットエ

ラーを発生させる条件を明らかにした。高電力レベルのパケットエラーに関しては、条件が複雑になるため、近似式を定式化し、その近似精度を評価した。図 2 は、スループットの解析結果を示している。提案したスループット解析式は、全探索の場合と比べても、0.4%程度の誤差に抑えられることが明らかになった。

次に、[2]を中心に、電波伝搬まで考慮したモデルにおいて、送信電力の上限値、電波伝搬、及び、ユーザ分布を入力としたスループット解析手法を開発した。この解析では、ユーザの分布を空間ポアソン点過程でモデル化し、確率幾何によって、レベル別の平均パケット到着数を導出する。これによって、[1]で開発した解析式を用いることで、スループットを導出できる。本解析式は、確率幾何を用いることで、送信電力の上限値や電波伝搬によって確率的に決まる利用可能な電力レベル群を、解析的に表現できるメリットがある。図 3 は、スループットの解析結果を示している。この結果から、提案した解析式は、シミュレーション結果と比較して、2%程度の誤差に抑えることが可能であり、十分な精度を示すことが明らかになった。このモデルの発展系として、[3]にて、地上の IoT デバイスだけでなく、空中の IoT デバイス (UAV 等) までも対象にした GF-NOMA のスループット解析式も開発している。空中のデバイスは、空中に存在するため、地上のデバイスよりも、見通し通信が発生しやすい。そのため、[2]のモデルに見通し確率を組み込んだ新たな解析式を提案している。

また、[1][2]等により、上記の解析式を用いた電力レベル数や電力レベル選択確率を最適化し、そのスループット特性を評価している。特に、[1]により、スループットが最大になるのは、レベル別の平均パケット到着数が完全に均等な場合よりも、高電力レベルと低電力レベルへの平均パケット到着数が高い場合であることが明らかになっている。ただし、このときのスループット値は、レベル別の平均パケット到着数が均等な場合と比べても数%高い程度であり、レベル別の平均パケット到着数が均等になる状況を作り出せば、GF-NOMA は十分高いスループットを示すことが明らかになっている。また、この解析式を用いて、スループットを十分に保った条件の下で、消費電力を最小化す

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC

る電力レベル選択手法についても検討した。この最適化により、消費電力を抑えるためには、低電力レベルほど平均パケット到着数を高めるような電力レベル選択が最適化であることも明らかになっている。

### (イ) マルチセル GF-NOMA の性能解析

マルチセルシナリオでは、[4]–[6]で、GF-NOMA のスループット特性の解析・評価を進めた。マルチセルシナリオでは、順に以下の2種類のモデルを検討した。

まず、[4]を中心に、NOMA を用いない mMTC におけるマルチセル環境における GF アクセス方式のスループット解析式を構築した。ここでも、IoT デバイスが空間ポアソン点過程で分布していると仮定して、干渉を解析することができる。このとき、あるパケットを受信できる確率（パケット受信率）の期待値は、干渉のラプラス変換を用いて表現できる。これにより、干渉の分布を得ることが難しいながらも、パケット受信率は、計算することができる。

次に、[5][6]を中心に、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット解析式を導出した。[5]では、シミュレーションを用いて、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット特性の評価を進め、基本的な特性を理解した。電力レベル数が増加するにつれて、シングルセル環境ではスループットが単調に増加するが、マルチセル環境では、周囲からの干渉電力が増大するため、スループットは、上に凸な形状を描くことが明らかになった。

また、[6]では、GF-NOMA に焦点を当てて、具体的な解析式の構造を作り上げた。このモデルにおいて、各デバイスは、最近傍の基地局に接続する。そのため、あるデバイス A から基地局 B への干渉は、デバイス A の最近傍の基地局への電波伝搬から逆算した送信電力に対して、デバイス A から基地局 B までの電波伝搬を乗算することになる。このモデルでは、電波伝搬として、距離減衰とレイリーフェージングゲインを考えている。そのため、干渉は複雑な確率密度分布を示す。

この解析式では、シングルセル環境で構築したレベル別の平均パケット到着数を用いたスループット解析式を参考に、各レベルにおけるパケット到着数の発生確率、及び、マルチセル干渉を含む干渉に対するパケット受信率を乗算した期待値の形で表現できる。各レ

ベルにおけるパケット到着数の発生確率については、ある基地局を最近傍とするデバイス数の平均として、確率幾何を用いて計算できる。マルチセル干渉を含む干渉に対するパケット受信率に関しては、SINR の要求達成確率から、ラプラス変換系を經由して、逆ラプラス変換することで、干渉の累積分布関数を導出することで表現できる。これにより、マルチセルのスループット解析が可能であり、マルチセル環境では、シングルセル環境に比べて、スループットのピークが 92% も低下することを明らかにしている。

### (ウ) 自己組織型電力レベル選択手法の検討

本研究では、自己組織型電力レベル選択手法として、[7]の手法も提案した。この手法では、引力と斥力に基づく走性と呼ばれる生物の特徴に着想を得ている。具体的には、各デバイスは、自身が現時点で利用している電力レベル、及び、周囲のデバイスによる電力レベルの利用頻度のみを参照し、現時点で利用頻度の低い電力レベルにより強く引き寄せられるように振る舞う。ただし、このとき、基地局までの電波伝搬特性が悪いデバイスは、高電力レベルから斥力を受ける、つまり、高電力レベルを選択することに、より躊躇するように振る舞う。これにより、各電力レベルを選択するデバイス数をできる限り均等にして、電力コリジョンを減らしつつ、電波伝搬が悪いほど低電力レベルを利用できるような電力レベル選択パターンを形成することで、消費電力を抑えることができる。ここで興味深い点は、各デバイスの電波伝搬を知らずとも、このようなパターン形成が可能であることである。

提案手法を基礎的な評価モデルにて評価したところ、電波伝搬特性の悪いデバイスほど低電力レベルを割り当てる集中制御手法と比べて、送信電力がわずかに 0.4% 高いだけであり、自己組織的な振る舞いにより、集中制御に十分近い性能が出せることが明らかになった。また、このとき、距離が遠いデバイスほど低電力レベルを割り当てる集中制御手法と比べて、提案手法は、送信電力を 97% も抑えることが明らかになった。また、提案手法は、いずれの集中制御手法とも同等なスループットを達成できることが分かり、提案手法の有効性を示すことができた。

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC

### 4. 将来展望

本研究により、シングルセル環境における GF-NOMA のスループット解析、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット解析の基礎理論、及び、自己組織型の電力レベル選択手法の基礎理論までは、検討を進めることができた。今後の展望として、マルチセル環境における GF-NOMA のスループット解析モデルの様々な側面からの検証、及び、自己組織型の電力レベル選択の環境への耐性の検証が望まれる。加えて、GF-NOMA の更なる発展として、様々な最新の無線技術との融合が期待される。例えば、マルチアンテナ技術や反射板技術との併用システムが研究されたいくと考えられる。

### おわりに

本研究では、mMTC のための GF-NOMA におけるスループット解析と自己組織型電力レベル選択手法を開発し、GF-NOMA のスループット向上と消費電力低減を実現した。具体的には、以下の3つの研究を実施した。まず、シングルセル環境において、GF-NOMA の基本となるスループット解析式を提案した。次に、マルチセル環境の GF-NOMA におけるスループット解析式へと発展させ、マルチセル GF-NOMA のスループット解析への基礎を構築した。最後に、シングルセル環境、及び、マルチセル環境の GF-NOMA で培った知見を基に、自己組織型電力レベル選択手法を提案し、スループット向上と消費電力低減に効果的な電力レベル選択が実現できることが明らかになった。今後は、マルチセル環境の GF-NOMA のスループット解析の発展や自己組織型の電力レベル選択の発展を目指す。

### 用語解説

- \*1 mMTC: IoT のユースケースを中心に、超多数のデバイスを基地局に接続するシナリオ。6G では 1000 万台/km<sup>2</sup>のデバイスの同時接続まで考えられている。
- \*2 GF アクセス方式: 基地局による接続管理なしに、デバイスがデータを送信できるアクセス方式。
- \*3 GF-NOMA: GF アクセス方式に電力軸で信号を多重化する非直交多元接続を組み合わせた方式。

\*4 SIC: 重畳された信号から復調した信号を逐次的に干渉除去することで、複数の信号を受信する技術。

### 参考文献

- [1] T. Hirai, R. Oda, N. Wakamiya, "Power-Level-Design-Aware Scalable Framework for Throughput Analysis of GF-NOMA in mMTC," IEEE IoT Journal, vol. 11, no. 17, pp. 28227–28243, 2024.
- [2] T. Hirai, Y. Ueda, N. Wakamiya, "Stochastic-Geometry-Based Throughput Analysis of User-Specific Power-Level-Constrained GF-NOMA," IEEE IoT Journal, vol. 11, no. 18, pp. 29926–29940, 2024.
- [3] Y. Ueda, T. Hirai and N. Wakamiya, "Throughput Maximization in Grant-Free Power-Domain NOMA for 3D Distributed Users by Stochastic Geometry," IEEE VTC2024-Fall, pp. 1-6, 2024.
- [4] Yuki Ichimura, Shigeo Shioda, Takeshi Hirai, "Modeling and performance analysis of slotted ALOHA with interference cancellation for mMTC," Elsevier Computer Communications, vol. 238, pp. 108177-108177, 2025
- [5] R. Oda, T. Hirai, S. Shioda, and N. Wakamiya, "Throughput evaluation of multi-cell power-domain GF-NOMA for mMTC," KJCCS 2024, 2024.
- [6] 上田悠太, 平井健士, 塩田茂雄, 若宮直紀, "マルチセル GF-NOMA における確率幾何を用いたスループット解析モデルの提案," 信学技報, vol. 124, no. 404, CQ2024-114, pp. 129-133, 2025 年 3 月.
- [7] R. Oda, T. Hirai and N. Wakamiya, "Energy-Efficient Path-Loss-based Self-Organized Power Level Selection for GF-NOMA in mMTC," 2024 IEEE ICCE, pp. 1-6, 2024.
- [8] J. Choi, "NOMA-based random access with

# 多数端末収容のための非直交多元接続向け自己組織型無線アクセス制御

## Self-Organized Power Level Selection for Grant-Free Power-Domain NOMA in mMTC

multichannel ALOHA,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 35, no. 12, pp. 2736–2743, 2017.

[9] T. Hirai, R. Oda, and N. Wakamiya, “Power level design-aware throughput analysis of grant-free power-domain NOMA in mMTC,” IEEE GLOBECOM, pp. 105–110, 2022.

[10] H. Jiang, Q. Cui, Y. Gu, X. Qin, X. Zhang, and X. Tao, “Distributed layered grant-free non-orthogonal multiple access for massive MTC,” IEEE PIMRC 2018, pp. 1–7, 2018.

### 関連文献

#### 国際会議発表

[A] Takeshi Hirai, Taisuke Izumi, Naoki Wakamiya, “Power-Collision-Based 2-Shot Grant-Free NOMA with Cross-Slot SIC for mMTC,” IEEE GLOBECOM 2023, pp. 6261–6266, 2023.

[B] T. Hirai, N. Komuro, and N. Wakamiya, “Reservation-based Grant-Free/Hybrid-Grant Power-Domain Channel-Inverted NORA for Multi-Sized Packets in mMTC,” IEEE SmartGridComm 2024, pp. 213-219, Sep. 2024.

#### 国内会議発表

[C] 小田怜, 平井健士, 塩田茂雄, 若宮直紀, “[ショートペーパー] mMTCのためのGF-NOMAにおけるセル間干渉を考慮したスループット評価,” 信学技報, vol. 122, no. 341, SeMI2022-71, pp. 3-8, Jan. 2023.

[D] 小田怜, 平井健士, 若宮直紀, “mMTCのためのGF-NOMAにおける自己組織型電力選択の送信電力制限を考慮したスループット評価,” 信学技報, vol. 122, no. 453, CCS2022-76, pp. 75-80, Mar. 2023.

[E] 平井健士, Lu Chen, 若宮直紀, “mMTCのためのセミグラントフリー電力軸 NOMA のスループット最大化,” 信学技報, vol. 123, no. 110, SeMI2023-23, pp. 13-18, Jul. 2023.

[F] 平井健士, 小田怜, 若宮直紀, “mMTCのためのグラントフリー電力軸 NOMA におけるスループットを保証する電力レベル数の最適化,” 信学技報, vol. 123, no. 148, IN2023-27, pp. 58-63, Aug. 2023.

[G] 上田悠太, 平井健士, “3次元空間に分布するユーザのためのGF NOMAにおける電力レベル選択確率の解析,” 学生によるモビリティとネットワークの技術シンポジウム, 2023年10月.

[H] 上田悠太, 平井健士, “3次元空間に分布するユーザのためのGF-NOMAにおける電力レベル選択確率の解析”, Massive Connect IoT時代の無線通信システムとハードウェアの統合設計研究会, 2023年11月.

[I] 上田悠太, 小田怜, 平井健士, 若宮直紀, “ユーザが3次元空間に分布する環境でのGF-NOMAにおける電力レベル選択確率の最適化”, 信学技報, vol. 123, no. 345, SeMI2023-66, pp. 88-93, 2024年1月.

[J] 平井健士, “[依頼講演] グラントフリー電力軸 NOMA におけるスループット解析と最適化,” 信学技報, vol. 124, no. 90, CQ2024-32, pp. 53-53, 2024年6月.

[K] 平井健士, Lu Chen, 若宮直紀, “[依頼講演] mMTCのためのセミグラントフリー電力軸 NOMA のスループット最大化,” 信学技報, vol. 124, no. 109, SeMI2024-27, pp. 75-75, 2024年7月.

[L] Y. Ueda, T.Hirai, and N. Wakamiya, “Optimizing Power Level Selection Strategy in Grant-Free Power-Domain NOMA for 3D Distributed Users by Stochastic Geometry,” SeMI Vietnam Workshop, Oct 2024.

この研究は、令和3年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和4~6年度に実施されたものです。