

世界初、量子コンピュータを利用した 屋外多数同時接続実験に成功



国立研究開発法人情報通信研究機構
ネットワーク研究所
レジリエントICT研究センター
サステナブルICTシステム研究室
研究員

よなが こうき
世永 公輝



国立研究開発法人情報通信研究機構
ネットワーク研究所
レジリエントICT研究センター
サステナブルICTシステム研究室
室長

たきざわ けんいち
滝沢 賢一

1. 背景

第5世代移動通信システム（5G）が普及する中、次世代移動通信システムに関する国際的な議論が進んでいる。2023年11月には、ITU-R勧告 M.2160^[1]が発行され、2030年以降の移動通信システムで期待される利用シナリオや機能が示された。この勧告では、5Gにおける超高速通信、低遅延高信頼、超多数接続という3つの利用シナリオが更に拡張されるとともに、センシングと通信の統合、人工知能（AI）の活用、ユビキタスコネクティビティという新たな3つの利用シナリオが追加されることが示されている。多数接続性に関しては、接続デバイス密度が5Gでは 10^6 デバイス/km²であったのに対し、次世代移動通信システムでは 10^6 から 10^8 デバイス/km²へと向上することが示されている。この進展により、スマートシティ、交通、物流、ヘルスケア、エネルギー、環境モニタリング、農業など、様々な分野で新しいアプリケーションの創出が見込まれている。多数接続性を向上させる技術として注目されているのが、非直交多元接続（Non Orthogonal Multiple Access: NOMA）である^[2]。NOMAは時間や周波数といった無線通信リソースを複数のデバイス間で干渉を許容しながら割り当てることで、多数接続性の向上を図る技術である。NOMAを上り回線で利用する際には、基地局においてデバイス間干渉を考慮して信号分離処理が必要となり、この処理において計算量が指数関数的に増加するという課題が存在した。

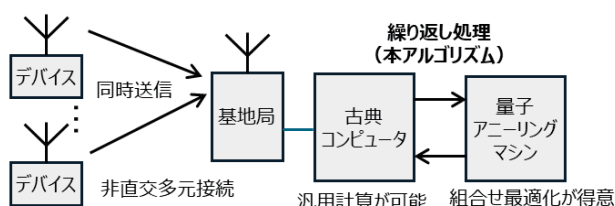
2. 量子アニーリングを利用した信号処理技術

近年、組合せ最適化問題を高速に解くことができる計算機として、注目を集めているのが量子アニーリングマシンである。量子コンピュータは、「ゲート型」と「アニーリング型」の2つに大きく分けられるが、アニーリング型の量子コンピュータのことを量子アニーリングマシンと呼ぶ。「アニーリング型」は、東京工業大学・西森秀稔教授が1998年に理

論を提唱し、カナダ・D-Wave社が2011年5月に世界で初めて商用化した。量子アニーリングは金属の焼きなまし処理（アニーリング）のアナロジーであり、量子揺らぎを用いた時間発展により最適解を求める手法である。初期過程では強い量子揺らぎにより様々な候補解を探検し、徐々に量子揺らぎを弱めていくことで1つの解を選択する。この過程を十分ゆっくり行えば、最適解を得ることができる。

量子アニーリングマシンは、組合せ最適化における計算は得意であるものの、汎用的な計算（演算）の中には苦手とするものが少なからずある。NOMAにおける信号分離処理には、大規模な組合せ最適化問題だけではなく、誤り訂正符号の復号処理等において汎用的な計算を行う必要がある。よって、NOMAへの量子アニーリングの適用には、量子アニーリングの強みを生かせる実用的な実装方法を見出す必要があった。

国立研究開発法人情報通信研究機構は、量子アニーリングマシンと古典コンピュータ（従来のコンピュータ）を併用することで、組合せ最適化を内包する様々な信号処理へ適用可能な演算法（量子・デジタルハイブリッド信号処理アルゴリズム）を開発した^[3]。本アルゴリズムでは、量子アニーリングマシンを、解の候補（正解とは限らない）を出力するサンプラーとして使用する。マイクロ秒オーダーの時間で、量子アニーリングマシンを用いて解の候補とそのエネルギー値の複数サンプルを得る。その後、古典コンピュータを用いて、サンプルに対する事後処理を行い、限られたサンプル数であっても統計分布に精度良く従う解が得られるようにする（図1）。これによって、後段の信号処理（誤り訂正符号の復号等）には、従来の古典コンピュータによる計算方法をそのまま活用できるメリットがある。また、図に示すように、量子アニーリングマシンと古典コンピュータとの間で、繰り返し処理を行うことで、逐次処理にも対応することができる。



■ 図1. 量子アニーリングを利用した信号処理
(非直交多元接続への適用例)

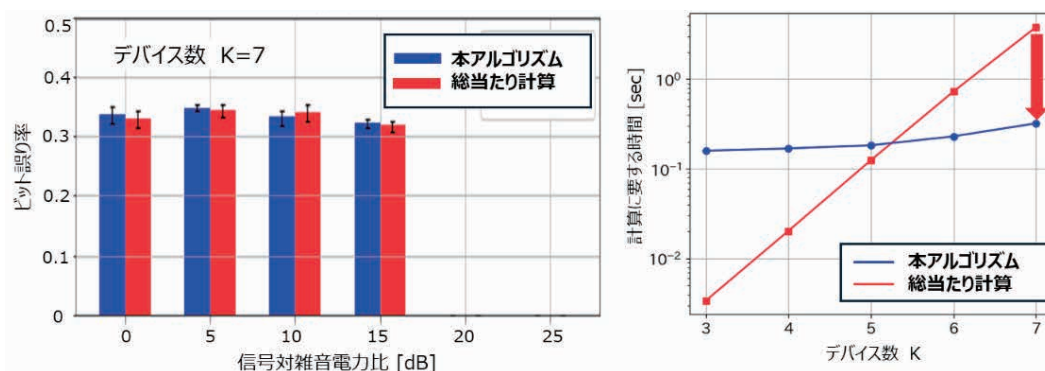
3. 実験と評価

本アルゴリズムを、上り回線NOMAにおける基地局での信号分離処理へ適用した。この処理においては、デバイスが送信する信号の変調多値数 (M) と同時接続デバイス数 (K) から、基地局における受信信号の組合せ数は M^K となるため、デバイス数の増加によって計算量が指数関数的に増加してしまう。また、基地局のアンテナ本数よりも、同時接続するデバイス数のほうが多くなることから、単純な連立方程式では解けない (過負荷状態) という課題もあった。通信信号処理への量子アニーリングの適用についての先行研究は多くあるが (例えば、[4] や [5])、提案手法は過負荷状態にも適用可能という特徴を持つ。

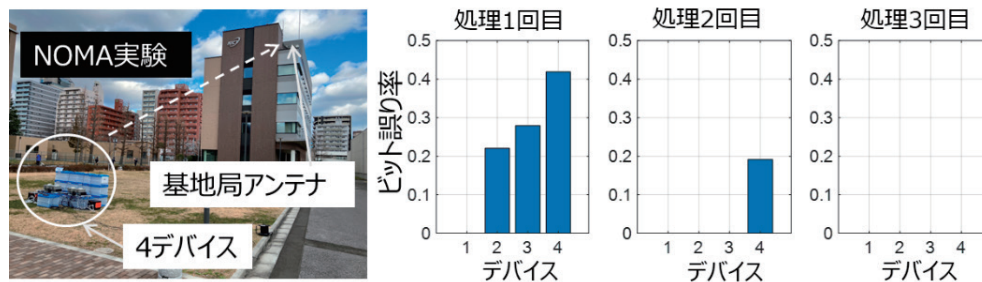
まず、計算機シミュレーションによる評価を行った。基地局で受信される複数デバイスからの送信信号を生成、重畳し、本アルゴリズムを用いた信号分離処理を適した。基地局での信号処理には、D-wave社の量子アニーリングマシンを使用し、得られたサンプルから、古典コンピュータを用いた事後処理を経て、各符号語ビットの対数尤度比を算出、デバイスごとに誤り訂正符号の復号と誤り検出を行い、信号分離を行った。誤り検出後、正しく判定されたデバイスに対する受信信号レプリカを作成し、受信信号から減算した後、再度、量子アニーリングマシンによる組合せ最適化処理を行う逐次処理を実施する。量子アニーリングマシ

ンにおけるアニーリング時間は20マイクロ秒、サンプル数は1,000とした。シミュレーションにおいて、デバイスからの送信信号はQPSK信号 ($M=4$ 、シングルキャリア変調) として、誤り訂正符号にはターボ符号を使用した。基地局のアンテナ1本当当たりの同時接続デバイス数 K は7までとした。なお、 $K=7$ のとき、受信信号の組合せ数は1万6千通り以上となる。評価の結果、古典コンピュータを用いた従来手法を適用した場合と比較して、同等の分離性能 (ビット誤り率特性) が得られることを確認した (図2左)。一方、本アルゴリズムを用いることで、信号分離処理に要する計算時間 (量子アニーリングに要する時間の積算値として計算) は、古典コンピュータと比較して、約10分の1に短縮できることを示した (図2右)。

計算機シミュレーションによる検証後、本アルゴリズムを基地局信号処理として実装した無線通信実験系を開発し、実フィールドにおける原理検証を行った。この実験系では、複数デバイスからQPSK信号 ($M=4$ 、シングルキャリア変調) を同一時間・同一周波数で送信し、基地局では重畳して受信した複数デバイスからの信号をベースバンド信号へ変換した。その後、リファレンス信号を用いて推定した電波伝搬特性 (複素数) を用いてイジングモデルへ写像し、量子アニーリングマシン (D-wave社) によって解のサンプルを得た。アニーリング時間は20マイクロ秒、サンプル数は1,000とした。原理検証を目的としていることから、デバイス数は4台 ($K=4$) に制限して実施した。基地局アンテナ数は1本とした。結果、4台のデバイスからの送信信号を、古典コンピュータと量子アニーリングマシンとの間で3回の繰り返し処理を行うことで、誤りなく信号分離できることを確認した (実験時の信号対雑音電力比は約26dB) (図3)。この実証は、上り回線NOMAにおける量子アニーリングマシンを用いた信号分離処理に関して、実フィールドにおけるオンライ



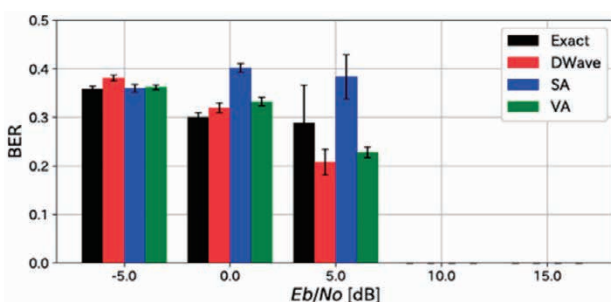
■ 図2. 計算機シミュレーションによる評価結果



■図3. 実フィールドにおける原理検証の概要 (デバイス数K=4)

ン実験としては世界で初めての成功となる^[6]。

さらに、5G NR信号へ本アルゴリズムを適用することで、多数接続性能の向上に関する検討を進めている^[7]。5G NR信号に対応するよう、送信信号をCP-OFDMに、基地局アンテナ数も複数 (MIMO) に対応するよう、イジングモデルの更新を行った。計算機シミュレーションによる評価 (基地局アンテナ数2、同時接続デバイス数4、サブキャリア間隔15kHz、誤り訂正符号はLDPC) の結果 (図4)、すべての組合せを厳密に計算する場合 (図中、Exact) と比較して、D-waveを用いた提案手法 (図中、D-wave) は、同等のBER (ビット誤り率) 特性を示すことを確認した。また、異なるアニーリング手法として、ベクトルアニーラ (図中、VA) とシミュレーテッドアニーリング (図中、SA) を利用した場合も信号分離が行えることを示した。よって、様々なアニーリングを利用することが可能であり、アニーリングの進化に対応できる。今後、実フィールドでの試験も行う計画である。



■図4. 5G NR信号への適用例
(計算機シミュレーション、デバイス数K=4)

4. 今後の展望

本研究で提案されたアルゴリズムは、次世代移動通信システムを支える基盤技術として期待されるものである。また、多元接続技術以外にも、大規模ビームフォーミングやネット

ワーク最適化など、組合せ最適化計算が課題となる様々な分野への応用が見込まれる。今後は、実フィールドでの試験や更なるアルゴリズムの改良を通じて、技術の実用化を目指す。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0120319794の助成と総務省SCOPE (受付番号 JP235003004) の委託を受けたものである。

参考文献

- [1] ITU-R M.2160 "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," 2023.
- [2] ITU-R M.2516 "Future technology trends of terrestrial International Mobile Telecommunications systems towards 2030 and beyond," 2022.
- [3] K. Yonaga and K. Takizawa, "Quantum Annealing-Aided Multi-User Detection: An Application to Uplink Non-Orthogonal Multiple Access," Proc. of IEEE ICC 2023, 2023.
- [4] M. Kim, D. Venturelli and K. Jamieson, "Leveraging quantum annealing for large MIMO processing in centralized radio access networks MIMO," Proc. of the ACM Special Interest Group on Data Communication, 2019.
- [5] S. Kasi, A. K. Singh, D. Venturelli and K. Jamieson, "Quantum Annealing for Large MIMO Downlink Vector Perturbation Precoding," the Proc. of IEEE ICC 2021, 2021.
- [6] 情報通信研究機構, "世界初、量子コンピュータを利用した屋外多数同時接続実験に成功〜量子とデジタルをハイブリッドしたアルゴリズムの開発と実証〜," プレスリリース, 2024年.
- [7] 世永, 滝沢, "量子アニーリング支援型マルチユーザー検出に関する一検討," 信学技報, vol. 123, no. 434, RCS2023-294, 2024年.