

3-6 量子アニーリングが拓くレジリエントな多数同時接続

3-6 Resilient Massive Connectivity Enabled by Quantum Annealing

世永 公輝 滝沢 賢一

YONAGA Kouki and TAKIZAWA Kenichi

災害や障害の発生時にも通信を途絶させないレジリエントな通信基盤の実現は、Beyond 5G / 6G の最重要課題の1つである。非常時には特定エリアへアクセスが集中するため、既に割当てられた限られた周波数資源の下で多数の端末を同時に収容する技術が求められる。本稿では、量子アニーリング (QA) と従来のデジタル信号処理とを組み合わせた量子アニーリング支援型マルチユーザー検出 (QA-aided MUD) を提案する。QAマシンをサンプラーとして用い、得られたサンプル集合で対数尤度比を近似することにより、端末数が増加しても計算時間がほとんど増えない高効率な信号分離を実現する。計算機シミュレーションによるブロックエラー率評価に加え、屋外及び屋内での実験を通じ、基地局アンテナ8本で20台の端末信号を誤りなく検出できることを示した。今後は、更なる大規模化と実時間処理に向けた研究開発を進める。

Realizing a resilient wireless infrastructure that keeps working during disasters and network failures is one of the key requirements for Beyond 5G / 6G, in which about ten times the connection density of 5G is targeted. In an emergency, access requests concentrate in a limited area, and a detection scheme that accommodates a large number of terminals within the already allocated bands becomes indispensable. This paper presents quantum-annealing-aided multi-user detection (QA-aided MUD), which combines quantum annealing with conventional digital signal processing. A quantum annealer is employed as a sampler, and log-likelihood ratios are approximated over the obtained sample set, so that the computation time hardly grows with the number of terminals. Block error rate simulations and over-the-air experiments conducted outdoors and indoors show that the signals of 20 terminals are detected without errors by using eight base-station antennas.

1 まえがき

災害や障害の発生時にも通信が途絶えないレジリエントな通信基盤の実現は、次世代移動通信システム (6G) における最重要課題の1つに位置づけられている [1]。また、総務省「Beyond 5G推進戦略—6Gへのロードマップ—」でも、Beyond 5Gに求められる機能として「災害や障害の発生時でもサービスが途絶えず、瞬時に復旧する超安全・信頼性」が掲げられているほか、5Gの約10倍の同時接続数の実現が目標とされている。

近年、ドローン遠隔制御やXRデバイスなどに代表される「マシンタイプ通信 (Machine-Type Communication: MTC)」の需要が急速に高まっており、これらは小容量の固定長データを周期的に送受信する特徴を持つ。マシンタイプ通信とは、人が介在せず、機器同士が自動的に行う通信を指す。ロボット端末やXRデバイス等の普及に伴い収容すべき端末数は年率30 %程度で

増加しているが、とりわけ災害・障害時には安否確認やインフラ監視、救援活動のため、特定エリアへアクセスが一斉に集中することで、周波数資源の逼迫による通信障害が発生しやすくなる。このような非常時であっても多数の端末を確実に収容し続けるためには、周波数資源の観点から端末を効率的に同時接続させる多数接続技術の向上が不可欠であり、その重要性は一層高まっている。

マシンタイプ通信の端末は、複雑な構造物の内部やウェアラブル用途など、多様な環境で使われる。こうした利用形態を踏まえると、周波数帯としては見通し外での通信に適したsub-6 (6 GHz帯以下) が適している。ただしこの帯域には既に多くの無線システムが割当てられているため、災害時のようにアクセスが集中する状況下でも、割当て済みの周波数資源をこれまで以上に使いこなして同時接続数を大幅に高め、通信の途絶を防ぎ得る技術—レジリエントな技術が不可欠となる。

この課題に対して本研究では、量子アニーリング (Quantum Annealing, QA) と従来のデジタル信号処理とを組み合わせた「量子アニーリング支援型マルチユーザー検出 (QA-aided MUD)」を提案する [2]。本手法は、基地局の信号処理に量子計算を組み込むことにより、従来技術では到達し得なかった高効率なマルチユーザー検出 (Multi-user Detection, MUD) を可能とし、同時接続数の拡大と周波数利用効率の改善を狙うものである。将来的には、災害時に一斉に発生する安否確認やインフラ監視の通信を、既存の周波数の中で取りこぼさずに収容できる基地局の実現を目指しており、そのための第一歩として、本稿では基地局アンテナ数を超える台数の端末を確実に分離できるかを、限られた規模の実験系で検証する段階にある。本稿では、QA-aided MUDのアルゴリズムと性能評価を述べたうえで、計算機シミュレーションと屋外・屋内での電波発射を伴うOver-the-air (OTA) 実験による検証結果を通じて、その有効性を示す。

2 モデルと手法

2.1 上り回線MIMO-OFDMシステム

本研究では、直交周波数分割多重 (OFDM) に基づく上り回線のマルチユーザ多入力多出力 (MIMO) 伝送に注目する。MIMOは送受信に複数のアンテナを使い、同じ周波数で複数の信号を同時に送る技術であり、OFDMは周波数軸上に多数の細い搬送波を並べ、それぞれにデータを載せる変調方式で、4G・5Gの基本方式となっている。基地局 (BS) には N_{BS} 本のアンテナが設置され、 N_{UE} 台の各ユーザ装置 (UE) が1本のアンテナを持つ構成を考える。以下では、システムにおけるMIMO構成は (N_{BS}, N_{UE}) と表される。また、全UEは、同一時刻・周波数の物理リソース上で同時に送信を行うとき、信号間に干渉が発生する。BS側では、この信号を分離・検出し、元の送信信号を推定することが課題となる。BSの各アンテナが受信する信号は、次式で与えられる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_{BS}}$ は受信信号をまとめたベクトル、 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times N_{UE}}$ はチャネル応答行列、 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_{UE}}$ は全端末の送信シンボルを表すベクトル、 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_{BS}}$ は平均零・雑音電力 N_0 の加法性白色ガウス雑音 (AWGN) を表す。

2.2 反復マルチユーザー検出

本研究で提案するQA-aided MUDは、反復マルチユーザー検出 (Iterative MUD) を出発点としている [3]。

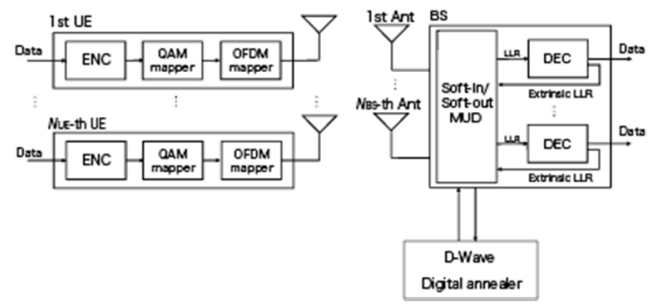


図1 QA-aided MUDを採用したMIMO-OFDM系のブロック図
(出典：文献 [4] ©2025, IEEE)

Iterative MUD は、軟入力・軟出力型の検出器 (Soft-in/Soft-out MUD) と復号器 (Soft-in/Soft-out DEC) を組み合わせた構成をとり、両者が外部対数尤度比 (extrinsic log-likelihood ratio: LLR) を繰り返し授受することで、高い検出性能を得ることができる (図1)。ここで対数尤度比とは、送られたビットが0であったか1であったかの確からしさを比の対数で表した値であり、絶対値が大きいほど確信度が高いことを意味する。このLLRを求めるには、以下で定義されるガウス分布を用いる。

$$\Pr[\mathbf{R}|\mathbf{X}] = \frac{e^{-E(\mathbf{X})/N_0}}{\sum_{\mathbf{X} \in \mathcal{X}} e^{-E(\mathbf{X})/N_0}} \quad (2)$$

ただし $\mathcal{X}$ は送信シンボルが取り得る組合せの集合を表す。ここでエネルギー関数は次式で与えられる。

$$E(\mathbf{X}) = \|\mathbf{R} - \mathbf{H}\mathbf{X}\|^2 \quad (3)$$

この確率分布の評価には、同時に送信する全端末のシンボル情報が必要であり、端末数を N_{UE} 、変調次数を M とすると、その複雑性は $O(4^{N_{UE}})$ になる。例えば、QPSK ($M=4$) で $N_{UE}=10$ の場合には、約100万通りの組合せのエネルギー関数を全て評価する必要がある。この計算量の急激な増大は、リアルタイム処理の実現を大きく妨げる。

2.3 量子アニーリングとQA-aided MUDの概要

QAは組合せ最適化問題を高速に解くために考案された発見的な手法であり、量子揺らぎを用いて広大な解空間を効率的に探索する。このQAのプロトコルを物理ハードウェアとして実装した装置をD-Wave量子アニーラ (以下、D-Waveと略す) と称する。D-Waveは、イジングエネルギー関数を最小にする状態、すなわち最適解を探索する。イジングエネルギー関数は、磁石のミクロなモデルに由来する式で、 ± 1 の値をとる多数の変数の組合せに対してエネルギーという数値を与えるものであり、その値を最小にする組合せが最適解に当たる。

$$E_{\text{Ising}}(\mathbf{z}) = \mathbf{z}^T \mathbf{J} \mathbf{z} + \mathbf{h}^T \mathbf{z} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{z}$ は各成分が ± 1 をとるイジング変数ベクトル、 $\mathbf{J}$ は変数間の結合を与える結合係数行列、 $\mathbf{h}$ は各変数に加わる外部磁場に対応するバイアスベクトルである。D-WaveでのQAプロセスの典型的な処理時間はマイクロ秒オーダーで、極めて高速に解を探索できる。ただし、D-Waveは厳密な最適化ソルバーではなく、サンプラーとして振る舞う点に注意を要する。ここでサンプラーとは、唯一の最適解を返すのではなく、良い解の候補を確率的に複数出力する装置や手法を指す。理想的な条件下においてQAは最適解（最低エネルギー解）への収束が保証されている。しかし、実際の量子デバイス上ではデコヒーレンスや熱雑音の影響を完全に排除することは困難である。そのため、D-Waveは最適解の近傍の近似解（低エネルギー解）を確率的に出力するサンプラーとして機能する。

このサンプラーとしての振る舞いをむしろ利点として活かし、QA-aided MUDでは、D-Waveから得られるサンプル集合 $\mathbf{Z}_{QA}$ を用いて、条件付き確率分布を次のように近似する。

$$\Pr_{QA}^{\text{Approx}}[\mathbf{R}|\mathbf{Z}] = \frac{e^{-E(\mathbf{z})/N_0}}{\sum_{\mathbf{z} \in \mathbf{Z}_{QA}} e^{-E(\mathbf{z})/N_0}} \quad (5)$$

ここでは、分母の和を送信シンボルのすべてにわたってではなく、D-Waveから得られたサンプル集合 $\mathbf{Z}_{QA}$ の範囲でのみ評価される。この集合の要素数は、一般に $|\mathbf{X}| > |\mathbf{Z}|$ である。さらにD-Waveの計算時間は、QAプロセスでのサンプリング数やアニーリング時間といったパラメータに大きく左右される。これらを調整すれば、検出精度と計算速度のバランスを柔軟に調節できる。実際、QA-aided MUDの計算時間は、端末数が増えてもほとんど変化しないことが報告されている [1]。そのため、従来のIterative MUDと比べてスケラビリティの面で本質的に優れている。

2.4 デジタルアニーリング技術の併用

無線通信システムでの性能評価では、ブロックエラー率 (BLER) 解析が広く用いられる。BLERは誤り訂正符号のブロック単位で誤りが生じる割合であり、後述するビットエラー率 (BER) とともに無線方式の性能を表す基本指標である。BLER解析では多量のモンテカルロシミュレーションが必要となる。一方で、D-Waveはカナダに設置された実機をクラウド経由で利用することが前提となる。そのため1回の実行ごとにインターネットの通信遅延やキューの待ち時間が生じるうえ、利用料金も現状で1時間あたり約30万円と高価であり、利用可能なマシンタイムに大きな制約が

ある。そのため、BLER解析を行うことは難しい。そこで本研究ではデジタル計算機上で動作するSimulated QA (SQA)、Simulated Annealing (SA) ならびにNEC社製ベクトルアニーラ (VA、SX-Aurora TSUBASA上で動作) を使用し、提案手法の本質的な性能評価を実施する。その後、小規模なBER解析を通じ、アニーリング技術ごとの性能を比較する。

3 実験結果

3.1 MIMO-OFDM系におけるBLER評価

5G NR準拠の信号を用いる通信方式にQA-aided MUDを適用し、BLER性能を評価した。なお、基地局のアンテナ本数より多くの端末を同時に収容する状態は過負荷MIMOと呼ばれ、原理的に信号の分離が難しく、従来の線形処理では性能が大きく劣化する。D-Waveはマシンタイム制約からBLER解析が難しいため、提案手法をSQAやSAでも扱えるよう拡張し、広い条件範囲でのBLER解析を可能にした。比較対象には、低演算量手法であるLMMSEフィルタ搭載Iterative Decoding and Detection (LMMSE-IDD) および二重期待値伝搬 (Double Expectation Propagation, EP) を用いた。いずれも受信信号を少ない計算量で分離する代表的な従来手法であり、前者は線形フィルタ、後者は確率分布を近似的に伝播させる手法である。

図2に、1ビット当たりのエネルギー対雑音電力密度比 (E_b/N_0) に対するBLERの依存性を示す。図2は $(N_{BS}, N_{UE}) = (4, 12)$ の過負荷MIMO ($N_{BS} < N_{UE}$) と、 $(N_{BS}, N_{UE}) = (12, 12)$ のFully-loaded MIMO系の結果を並べて示している。提案手法はLMMSE-IDDおよびDEPを明確に上回った。他方、Fully-loaded MIMOでは、低 E_b/N_0 領域で従来手法が優位となるものの、 E_b/N_0 が高まるにつれ各手法の特性は同じ水準へ近づ

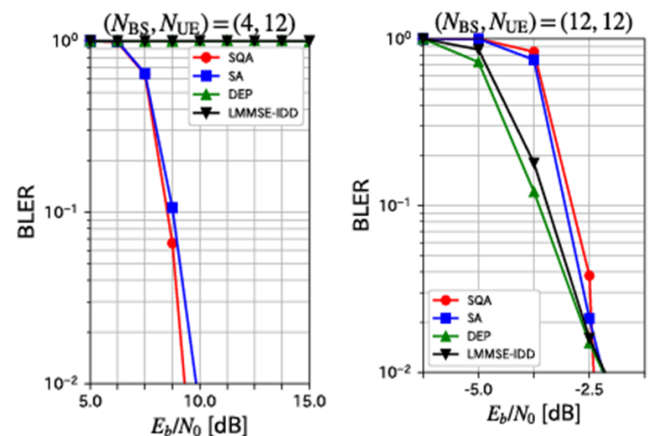


図2 MIMO-OFDMにおけるBLER解析
(出典：文献 [4] © 2025, IEEE)

いた。以上より、QA-aided MUDはとりわけ過負荷MIMO環境において、低演算量手法を明確に上回ることが確認された。

3.2 屋外および屋内OTA実験

提案手法の実環境での有効性を確かめるべく、量子アニーリング支援型の移動通信システムを構築し、OTA実験を段階的に進めた。OTA実験は実際に電波を発射して行う実証実験であり、ケーブル接続やシミュレーションでは再現しきれない実環境の影響を確認できる。基地局は二段構成とし、フレーム・シンボル同期など高いサンプリングレートを要する処理はUSRP (Universal Software Radio Peripheral) 内のFPGAに任せ、等化を含むCP-OFDM復調やLDPC復号といったシンボルレートのベースバンド処理と、各種アニーラ (D-Wave / SQA / SA / VA) への検出計算の指示と結果収集は制御用PCに担わせた。この役割分担によって、基地局の信号処理手法を柔軟に更新・改修できる。

屋外OTA実験では、 $(N_{BS}, N_{UE}) = (4, 8)$ とし、搬送波周波数2.295 GHz、サブキャリア数64、変調はQPSK、誤り訂正符号には5G NR LDPC (符号化率0.5) を用いた (図3)。端末側はUSRPで送信信号を生成し、基地局側は信号分析器で受信信号を取り込む。USRPは、送受信処理をソフトウェアで柔軟に定義できる無線機であり、LDPCは5Gで採用されている誤り訂正符号、CP-OFDMはシンボル間干渉を防ぐ冗長区間を付加したOFDMである。QAにはD-Wave Advantage2 System 1.1を、SQAにはOpenJijを用いた。あわせて図3に、平均的なビットエラー率 (Bit Error Rate, BER) 解析の結果も示す。D-WaveおよびSQAを用いたQA-aided MUDは $E_b/N_0 \geq 19$ dBでエラーフリー (誤りのない) 伝送性能に達し、同じ性能に約22 dBを要する従来のLMMSE検出器に対して約3 dBの利得を得た。さらに、D-WaveとSQAはほぼ同等の性能を示し、SQAがD-Waveの代替として十分に機能することも確認された。

続いて実験系を改修し、基地局アンテナ最大8本・

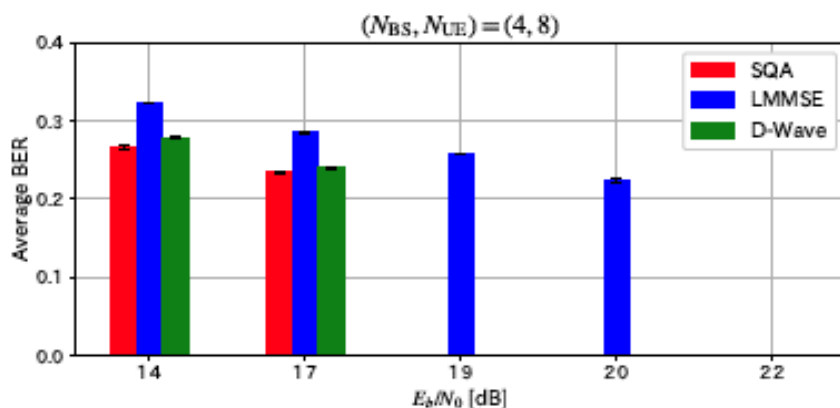


図3 同時接続8台における屋内OTA実験 (左: 実験の構成、右: BER解析) (出典: 文献 [5] © 2026, IEEE)

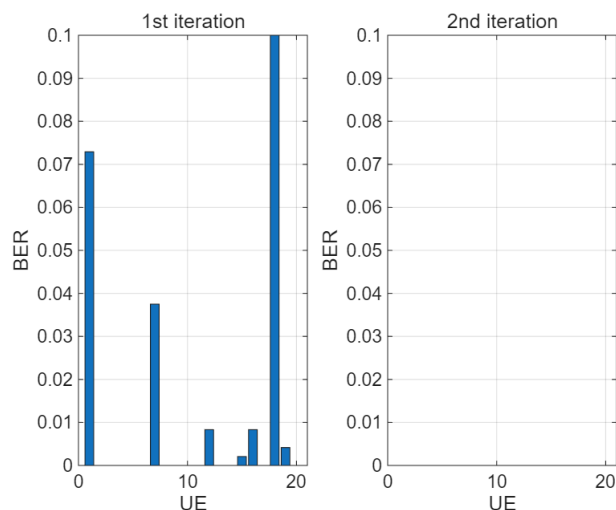
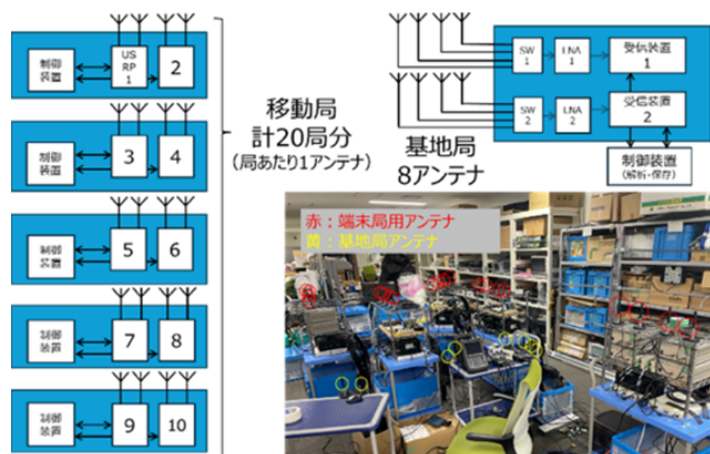


図4 同時接続20台における屋内OTA実験 (左: 実験の構成、右: 繰り返し処理回数に対するBERの変化)

端末最大20台の接続実験に対応できる構成へと拡張した。実験条件は屋外の場合と同一とし、見通し環境を含む屋内OTA実証を行った(図4)。その結果、当初の目標であった同時接続10台を大きく上回る20台の信号検出に成功した。図4は各端末のBERをQA-aided MUD内部の反復回数に対してプロットしたものであり、2回の反復処理で20台すべての端末の信号を誤りなく検出できることを確認した。

4 まとめ

本稿では、量子アニーリングを活用したQA-aided MUDを提案し、その端末間干渉抑圧処理への有効性を検証した。数値評価とOTA実験を通じて、提案手法は従来の低演算量手法を上回るBLER性能を示し、限られた周波数資源の下でも多数同時接続を実現できることが確かめられた。こうした能力は、災害・障害の発生時にアクセスが集中し周波数資源が逼迫する状況下でも、多数の端末を確実に収容し続け、通信の途絶を防ぐレジリエントな通信基盤の構築に寄与する。以上より、量子アニーリング技術は、Beyond 5G / 6G時代の周波数共用と高密度デバイス接続、さらには非常時における通信のレジリエンス確保を支える有望な基盤技術となり得ることが示された。

今後は、実用化に向けて、実時間処理への展開であり、クラウド経由の量子アニーラの遅延を避けるため、同等の性能を示したSQAやベクトルアニーラなどの量子インスパイアード技術を用いた実装、さらには専用ハードウェア化を検討する。あわせて、本手法の中核である組合せ最適化の枠組みは無線通信以外にも適用可能であり、他分野への波及も期待される。

謝 辞

本研究の成果の一部は総務省 SCOPE (受付番号 JP235003004) の委託を受けたものである。

【参考文献】

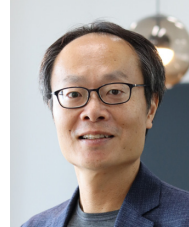
- 1 P. Jain, R. Borsato, and P. Schmitt, "Chair's summary of 3GPP workshop on 6G," 6GWS-250238, March 2025.
- 2 K. Yonaga and K. Takizawa, "Quantum Annealing-Aided Multi-User Detection: An Application to Uplink Non-Orthogonal Multiple Access," ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023.
- 3 H. V. Poor, "Iterative multiuser detection," IEEE Signal Processing Magazine, vol.21, no.1, pp.81-88, Jan. 2004.
- 4 K. Yonaga and K. Takizawa, "Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," VTC2025-Spring, 2025.
- 5 K. Yonaga and K. Takizawa, "Over-the-air Demonstration of Quantum-Annealing-Aided Multi-user Detection in MIMO-OFDM Systems," CCNC 2026, 2026.



世永 公輝 (よなが こうき)

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
主任研究員
博士(理学)
量子コンピュータ、量子機械学習
【受賞歴】

2017年 東北大学 総長賞
2014年 東北大学 専攻長賞



滝沢 賢一 (たきざわ けんいち)

レジリエントICT研究センター
研究センター長/
サステナブルICTシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、信号処理、レジリエントICT基盤技術
【受賞歴】

2021年 電子情報通信学会論文賞
2006年 電子情報通信学会学術奨励賞