

量子アニーリングを用いた端末間干渉抑圧処理による超多数同時接続技術に関する研究開発 Development of Ultra-Massive Multiple Access Technology Using Quantum Annealing-Aided Multi-User Interference Suppression Method

研究代表者

世永 公輝 情報通信研究機構

Kouki Yonaga National Institute of Information and Communications Technology

研究分担者

滝沢 賢一[†]

Kenichi Takizawa[†]

[†]情報通信研究機構

[†]National Institute of Information and Communications Technology

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

本研究開発では、Beyond 5G/6G で求められる超多数同時接続の実現に向け、量子アニーリング技術を用いた無線通信基地局の信号処理に応用した「量子アニーリング支援型マルチユーザー検出法 (Quantum-Annealing-aided Multi-user Detection, QA-aided MUD)」を開発した。シミュレーション評価により、端末数が基地局アンテナ数を上回る過負荷 MIMO 環境において、従来の低演算量手法を凌駕する検出性能を達成することを確認した。さらに、5G NR 準拠の実証システムを構築し、量子コンピュータを用いた屋外空間伝搬実験において、世界で初めて同時接続 20 台での信号分離に成功した。

Abstract

This study developed a quantum-annealing-aided multi-user detection method (QA-aided MUD) that applies quantum annealing technology to base station signal processing, targeting the massive simultaneous connectivity required for Beyond 5G/6G. Simulation evaluations confirmed that the proposed method achieves superior detection performance over conventional low-complexity approaches in overloaded MIMO environments, where the number of user terminals exceeds the number of base station antennas. Furthermore, a 5G NR-compliant demonstration system was constructed, and the world's first outdoor over-the-air experiment successfully demonstrated simultaneous signal separation of 20 user terminals using a quantum computer.

1. まえがき

近年、ドローンをはじめとするロボットの遠隔制御や xR デバイスとの通信など、マシンタイプ通信の需要が急速に増加している。これらの通信は、小サイズの固定長データを周期的に送受信するという特徴を有し、ロボット端末や xR デバイスの普及に伴い、収容すべき端末数は年率 30% のペースで増加している。このような背景のもと、多数端末の同時接続を周波数資源の観点から効率的に実現する技術の重要性が高まっている。一方、マシンタイプ通信で利用される端末は複雑な構造物内やウェアラブル用途など多様な環境で利用されることから、見通し外における通信に適した sub-6 (6GHz 帯以下) の利用が有効と考えられる。しかし、sub-6 帯の周波数資源は既に多くの電波を利用したシステムに割り当てられており、新たな周波数の配分を行うことは困難である。そのため、既存の周波数資源を活用して、同時接続数を大幅に向上させることができる技術が求められている。実際に、総務省 Beyond 5G 推進戦略-6G へのロードマップにおいては、5G の約 10 倍となる同時接続数の実現が Beyond 5G における目標として掲げられた。

このような課題に対し、本研究では量子アニーリングと従来のデジタル信号処理を組み合わせた「量子アニーリング支援型」端末間干渉抑圧手法を提案する。本手法は、基地局における信号処理に量子効果を導入することで、従来技術の限界を超えた高効率なマルチユーザー検出を実現

し、同時接続数の増加と周波数利用効率の向上を目指すものである。

本稿では、提案手法のアルゴリズムおよび性能評価について述べるとともに、シミュレーションおよび実験環境における検証結果を示し、その有効性を明らかにする。

2. 研究内容および成果

2.1 研究内容

2.1.1 システムモデル

本研究で対象とするのは、直交周波数分割多重 (OFDM) を採用したマルチユーザ多入力多出力 (MIMO) システムである。基地局 (BS) には N_{BS} 本のアンテナが設置され、 N_{UE} 台のユーザ装置 (UE) がそれぞれ 1 本のアンテナを有する構成を想定する。このとき、システムにおける MIMO 構成は (N_{BS}, N_{UE}) と表される。全 UE は同一の物理リソース上で同時に送信を行うため、信号間干渉が発生し、これを分離・検出することが重要な課題となる。

送信側では、第 k 番目の UE の情報ビット系列 $b_k = [b_k(1), \dots, b_k(D)]$ を誤り訂正符号化し、符号語 $c_k = [c_k(1), \dots, c_k(N)]$ を得る。本研究では 5G NR と同様に、符号化と変調の間にインターリーブは用いない。次に、符号語を QPSK 変調により複素シンボル系列 $x_k = [x_k(1), \dots, x_k(L)]$ に変換する。ここで $L = N / \log_2(M)$ であり、 M は変調次数を表す。各シンボルは $1 \leq f \leq N_F$ のサブキャリアと $1 \leq s \leq N_s$ の OFDM シンボル

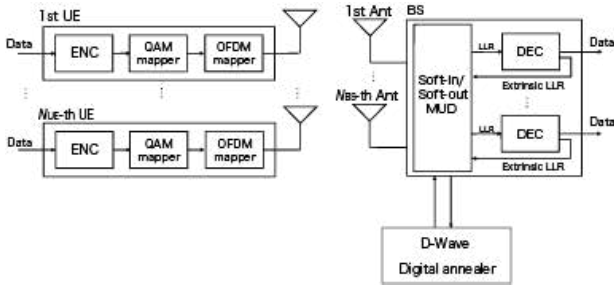


図 1 QA-aided MUD を採用した MIMO-OFDM 系のブロック図 (出典 : K.Yonaga and K.Takizawa, “Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems,” VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

からなるリソースエレメント (RE) に割り当てられ、送信シンボルは $X_k(s, t)$ と表される。

受信側では、BS の各アンテナで受信された信号は以下の式で表される。

$$R(s, t) = H(s, t)X(s, t) + W(s, t)$$

ここで、 $R(s, t) \in \mathbb{C}^{N_{BS}}$ は受信シンボルベクトル、 $H(s, t) \in \mathbb{C}^{N_{BS} \times N_{UE}}$ はチャネル行列、 $X(s, t) \in \mathbb{C}^{N_{UE}}$ は全 UE の送信シンボルベクトル、 $W(s, t) \in \mathbb{C}^{N_{BS}}$ は平均零・雑音電力 N_0 の加法的白色ガウス雑音 (AWGN) である。

2.1.2 反復マルチユーザ検出

本研究で提案する量子アニーリング支援型マルチユーザ検出 (Quantum-Annealing-aided Multi-user Detection, QA-aided MUD) は、反復マルチユーザ検出 (Iterative MUD) に基づいている。Iterative MUD は、軟入力/軟出力 MUD ブロック (Soft-in/Soft-out MUD) と復号器 (DEC) から構成され、両者の間で外部対数尤度比 (Extrinsic LLR) を反復的に交換することで検出性能を向上させる (図 1)。

第 k 番目の UE から送信された第 n 番目の符号ビット $c_k(n)$ に対する対数尤度比 (LLR) は、受信シンボルが与えられた事後確率の比として定義される。

$$L_{MUD}(c_k(n)) = \log \frac{\Pr[c_k(n) = 1 | R]}{\Pr[c_k(n) = 0 | R]}$$

ベイズの定理により、この LLR は外部 LLR (L_{MUD}^e) と事前 LLR (L_{MUD}^a) に分解される。

$$L_{MUD}(c_k(n)) = \log \frac{\Pr[R | c_k(n) = 1]}{\Pr[R | c_k(n) = 0]} + \log \frac{\Pr[c_k(n) = 1]}{\Pr[c_k(n) = 0]} \\ = L_{MUD}^e(c_k(n)) + L_{MUD}^a(c_k(n))$$

前者は受信信号から算出され、後者は復号器からのフィードバックから得られる。

$L_{MUD}(c_k(n))$ は、全 UE の送信信号の組合せを用いて以下のように書き換えることができる。

$$L_{MUD}(c_k(n)) = \log \frac{\sum_{X \in X_{k,n}^1} \Pr[R | X] \Pr[X]}{\sum_{X \in X_{k,n}^0} \Pr[R | X] \Pr[X]}$$

ここで、 $X = [x_1, \dots, x_K]$ は全 UE の送信信号の集合を表す。また、 $X_{k,n}^1$ は $c_k(n) = 1$ となる送信パターンの部分集合、 $X_{k,n}^0$ は $c_k(n) = 0$ となる部分集合である。すなわち、分子は対象ビットが 1 であるような全パターンにわたる重み付き確率の和、分母は 0 であるような全パターンにわたる和を計算している。ここで $\Pr[R | X] = \prod_{s,t} \Pr[R(s, t) | X(s, t)]$ とし、AWGN チャネルにおいて条件付き確率 $\Pr[R(s, t) | X(s, t)]$ は複素ガウス分布で記述される。

$$\Pr[R(s, t) | X(s, t)] = \frac{e^{-E(X(s, t)) / N_0}}{\sum e^{-E(X(s, t)) / N_0}}$$

ここでエネルギー関数 $E(X)$ は以下で定義される

$$E(X(s, t)) = \|R(s, t) - H(s, t)X(s, t)\|^2$$

しかし、厳密な分布の計算には全 UE の送信シンボルの組合せを列挙する必要があり、計算量は $O(M^{N_{UE}})$ と指数的に増大する。例えば、QPSK ($M = 4$)、 $N_{UE} = 10$ の場合、約 100 万通りの評価が必要となる。この計算量の爆発はリアルタイム処理における大きな課題となる。従来のアプローチでは、この計算量の課題を解決するため、線形最小平均二乗誤差 (Linear Mean Minimum Square Estimation, LMMSE) や期待値伝搬法 (Expectation Propagation, EP) などの低演算量手法が用いられてきた。しかし、端末数が基地局アンテナ数を上回る過負荷 (Overloaded) MIMO 環境では、端末間の干渉を抑圧することが困難となり、これらの低演算量手法の性能は著しく劣化する。

以上の課題に対し、QA-aided MUD は計算量の爆発を抑えつつ高精度な検出を実現する手法として位置付けられる。

2.1.3 量子アニーリングの概要

量子アニーリング (Quantum Annealing, QA) は、そのハミルトニアン (エネルギー関数) はターゲット項とドライバ項の 2 つの要素から構成される。ターゲット項は解くべき最適化問題を表し、ドライバ項は量子ゆらぎを導入することで解空間の探索を可能にする。QA のプロセスは、初期状態においてドライバ項が支配的な状態から開始され、量子重ね合わせを利用して広範な解を探索する。その後、アニーリングの進行に伴いドライバ項の影響は徐々に弱まり、ターゲット項が支配的となることで、系は最適解またはその近傍へと収束していく。この過程に要する時間はアニーリング時間 T_{anneal} と呼ばれる。 T_{anneal} が十分に長く、かつ系が外部環境からのノイズの影響を受けない理想的な条件下では、断熱定理により系は大域最適解へ収束することが保証される。

2.1.4 D-Wave 量子アニーラ

QA のプロセスを物理ハードウェア上で実現したのが D-Wave 量子アニーラ (以下、D-Wave と略す) である。D-Wave では、以下のイジングエネルギー関数の最小化を行うことができる。

$$E_{Ising}(z) = z^T J z + h^T z$$

ここで、 z は各要素が +1 または -1 をとるイジング変数ベクトル、 J は変数間の相互作用を表す結合係数行列、 h は各変数への外部磁場に相当するバイアスペクトルである。D-Wave は、エネルギー関数を最小化する最小エネルギー解 (最適解) を探索することが可能であり、QA プロセス部分の典型的な処理時間はマイクロ秒オーダーである。ただし、D-Wave は厳密な最適化ソルバーではなく、サンブラとして動作する点に留意が必要である。外部からのノイズがなく、十分長いアニーリング時間で実行した QA は最適解への収束が保障されるが、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。結果として、D-Wave は最適解の近傍にある近似解を確率的に生成するサンブラとして動作する。

2.1.5 QA-aided MUD のコア技術

マルチユーザ検出問題をイジングモデルとして定式化する。QPSK 変調 ($M = 4$) の場合、第 k 番目の UE に対す

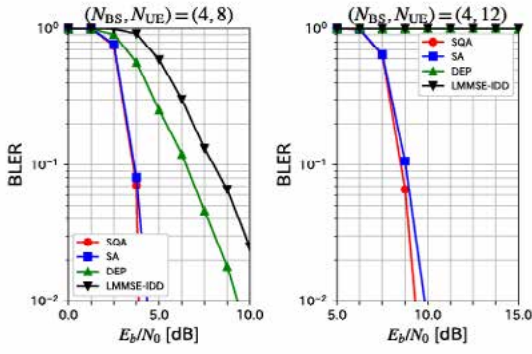


図 2 Overloaded MIMO における BLER
(出典：K.Yonaga and K.Takizawa, “Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems,” VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

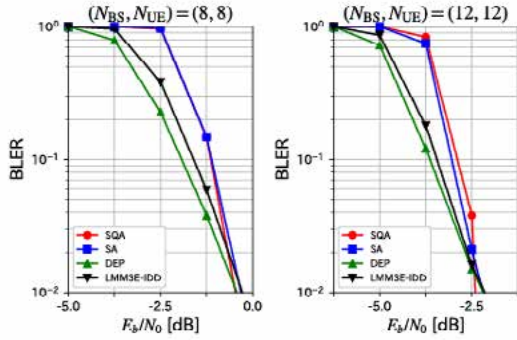


図 4 Fully-loaded MIMO における BLER
(出典：K.Yonaga and K.Takizawa, “Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems,” VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

る送信シンボル $X_k(s, t)$ は、2つのイジング変数 $z_{1,k}(s, t)$ と $z_{2,k}(s, t)$ を用いて以下のように表現できる。

$$X_k(s, t) = \frac{z_{1,k}(s, t) + j \cdot z_{2,k}(s, t)}{\sqrt{2}}$$

この表現を前節のエネルギー関数に代入することで、MIMO-OFDM システムに対応するイジングエネルギー関数が導出される。イジング変数の総数は $N_{\text{Ising}} = 2N_{\text{UE}}$ となり、各係数はチャネル行列と受信信号から算出される。

Iterative MUD の課題は、条件付き確率の計算に送信シンボルの全パターンが必要であることであった。QA-aided MUD では、全パターンの列挙ではなく、D-Wave から得られるサンプル集合 $Z_{QA}(s, t)$ を用いて条件付き確率分布を以下のように近似する。

$$\text{Pr}_{QA}^{\text{Approx}}[R(s, t)|Z(s, t)] = \frac{e^{-E(z(s, t))/N_0}}{\sum_{z \in Z_{QA}(s, t)} e^{-E(z)/N_0}}$$

この近似では、分母の総和が全パターンではなく D-Wave から得られたサンプル集合 $Z_{QA}(s, t)$ 上でのみ計算される。D-Wave はイジングエネルギー関数を入力として QA サンプルを実行し、低エネルギー解を確率的に生成する。得られた解の集合は、真の分布において高い確率を持つ領域に集中する傾向があるため、少数のサンプルでも良好な近似精度が期待できる。

この方法の重要な利点は、計算量が UE 数の指数関数ではなく、アニーリングパラメータに依存する点にある。例えば、サンプリング数 N_{samp} を増やせばサンプルの多様性が向上し近似精度は改善されるが、計算時間も増大する。同様に、アニーリング時間 T_{anneal} を長くすれば各サン

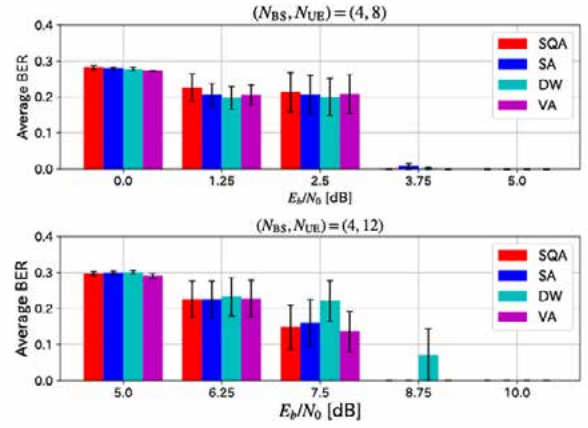


図 3 BER のアニーラー依存性
(出典：K.Yonaga and K.Takizawa, “Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems,” VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

ルの品質が向上するが、処理時間とのトレードオフが生じる。すなわち、これらのパラメータを適切に調整することで、検出精度と計算速度のバランスを柔軟に制御できる。

さらに、D-Wave のアニーリング時間はマイクロ秒オーダー（典型的には $T_{\text{anneal}} = 1\mu\text{s}$ ）であり、UE 数が増加してもアニーリング時間自体は大きく変化しない。D-Wave における計算時間は $O(N_{\text{samp}}(T_{\text{anneal}} + T_{\text{read}} + T_{\text{delay}}))$ と推定され、従来手法の $O(M^{N_{\text{UE}}})$ と比較して、UE 数に対するスケーラビリティにおいて本質的な優位性を持つ。

以上より、QA-aided MUD は量子アニーリングによるサンプリングを活用して条件付き確率分布を効率的に近似することで、従来の反復 MUD が抱える計算量の指数増大を回避しつつ、高精度なマルチユーザ検出を実現する手法である。

2.1.6 デジタルアニーリング技術

D-Wave の計算リソースには制約があるため、本研究では D-Wave に加え、デジタル計算機上で動作する複数のアニーリング手法を併用して動作実証を行う。シミュレーテッド量子アニーリング (SQA) は、量子アニーリング過程をデジタル計算機上で模擬する手法であり、経路積分モンテカルロ法に基づいて量子系を古典系へ写像し、モンテカルロアルゴリズムにより解を探索する。本研究では、写像精度を制御する Trotter 数 N_{Trotter} を 2~4 に設定した。SQA の計算量は $O(N_{\text{samp}} \cdot N_{\text{sweep}} \cdot N_{\text{Trotter}} \cdot N_{\text{Ising}}^2)$ である。シミュレーテッドアニーリング (SA) は、焼きなまし過程に着想を得た古典的最適化手法であり、温度を徐々に低下させながら確率的に解を更新することで、低エネルギー解を探索する。計算量は $O(N_{\text{samp}} \cdot N_{\text{sweep}} \cdot N_{\text{Ising}}^2)$ であり、SQA から Trotter 項を除いた形となる。ベクトルアニーラ (VA) は、NEC 社が開発した量子インスパイアード型デジタルアニーラであり、ベクトル型計算機「SX-Aurora TSUBASA」上で動作する。基本原理は SA に類似するが、独自のアルゴリズムにより大規模問題への適用が可能である。

2.2 研究成果

本節では、量子アニーリング支援型マルチユーザ検出法 (QA-aided MUD) および量子アニーリング支援型移動通信システムの研究成果を示す。

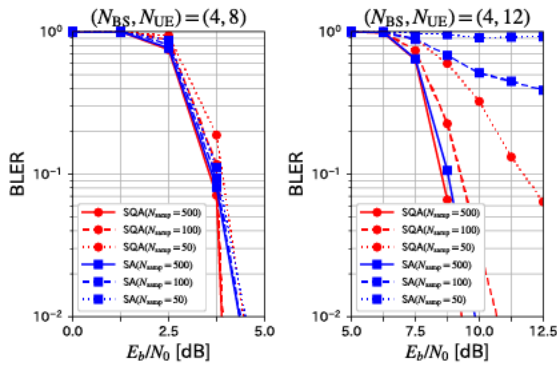


図 5 BLER のサンプル数依存性
(出典 : K.Yonaga and K.Takizawa, "Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

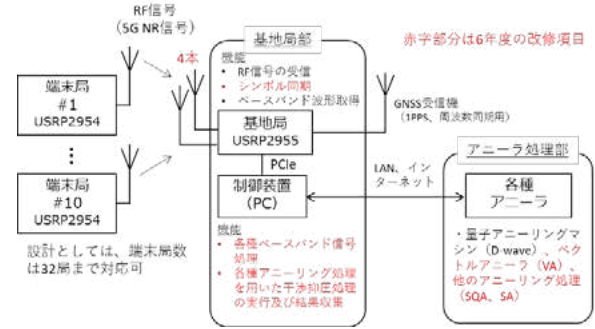


図 7 OTA 実験用システム構成の概要図

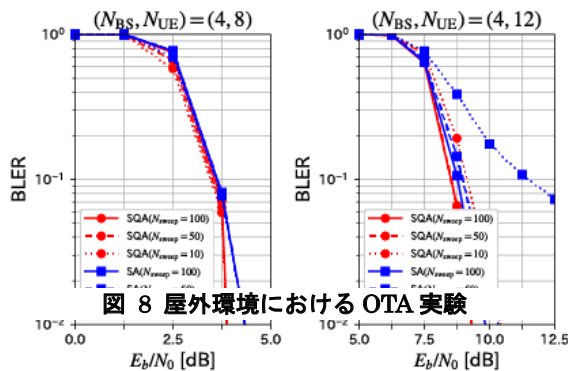


図 8 屋外環境における OTA 実験

図 6 BLER のスイープ数依存性
(出典 : K.Yonaga and K.Takizawa, "Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," VTC2025-Spring, © 2025, IEEE))

2.2.1 MIMO-OFDM における QA-aided MUD の性能評価と低演算量手法との比較

5G NR を想定した通信方式 (CP-OFDM、MIMO、LDPC 符号等) に QA-aided MUD を拡張し、その性能を評価した。現在利用可能な D-Wave は発展途上であり、利用可能なマシンタイムに制限があるため、無線通信分野における一般的なブロックエラー率 (Block Error Rate: BLER) の評価が困難であった。そこで、検出法を改修し SQA および SA 等のデジタルアニーリング技術に適用可能とし、QA-aided MUD の BLER 解析に成功した。さらに、低演算量手法である LMMSE-IDD (LMMSE フィルタ搭載の Iterative Decoding and Detection) および Double EP (DEP) との比較を行い、提案手法の特長を明らかにした。

図 2 および図 3 に、QA-aided MUD (SQA・SA)、LMMSE-IDD、および Double EP (DEP) による BLER の比較を示す。ここで、基地局アンテナ数を N_{BS} 、端末数を N_{UE} 、 E_b/N_0 はビット当たりエネルギーと雑音電力密度の比を表す。図 2 は Overloaded MIMO ($N_{BS} < N_{UE}$) における BLER 比較であり、(N_{BS}, N_{UE})=(4,8) および (4,12) のいずれにおいても、提案手法が LMMSE-IDD および DEP を上回る性能を示した。一方、図 3 は Fully-loaded MIMO (N_{BS}, N_{UE})=(8,8)、(12,12) の結果であり、低 E_b/N_0 領域では従来手法が優位であるものの、 E_b/N_0 の増加に伴い、各手法



の性能が同等に収束することを確認した。

以上より、QA-aided MUD は特に Overloaded MIMO

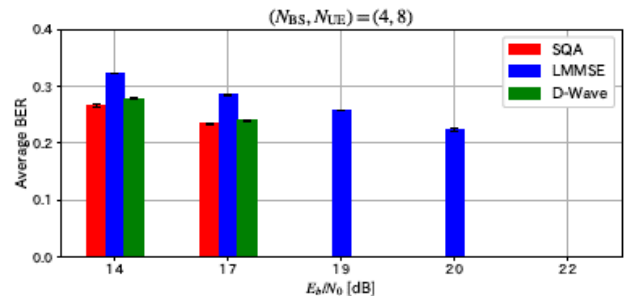


図 9 同時接続 8 台に対する BER 解析
(出典 : K.Yonaga and K.Takizawa, "Over-the-air Demonstration of Quantum-Annealing-Aided Multi-user Detection in MIMO-OFDM Systems," CCNC2026, © 2026, IEEE))

環境において、低演算量手法よりも優れた BLER 性能を示すことが明らかとなった。

2.2.2 各アニーリングマシンの BER 性能比較

D-Wave と NEC 社の VA も用いて、小規模ビット数におけるビットエラー率 (Bit Error Rate: BER) の比較を行った。シミュレーション設定は前述の BLER 解析と同一とし、Overloaded MIMO 環境で評価した。図 4 に、SQA・SA・VA (ベクトルアニーラ)・D-Wave により得られた BER の E_b/N_0 依存性を示す。(N_{BS}, N_{UE})=(4,8) では全てのアニーリングマシンで同等の BER 性能を示した。一方、(N_{BS}, N_{UE})=(4,12) では一部条件で D-Wave が検出に失敗するケースが見られたが、高 E_b/N_0 領域では全てのアニーラがエラーフリーに到達した。これらの結果は、デジタルアニーリング (SQA・SA・VA) を用いた QA-aided MUD が同等の性能を有すること、ならびにアニーリング技術の進化に伴って本成果の展開余地が広いことを示している。なお、D-Wave によるアニーリ

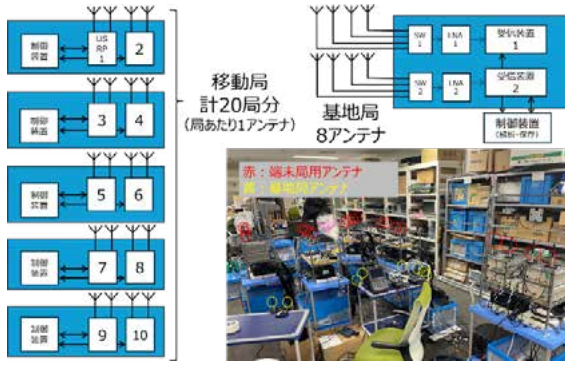


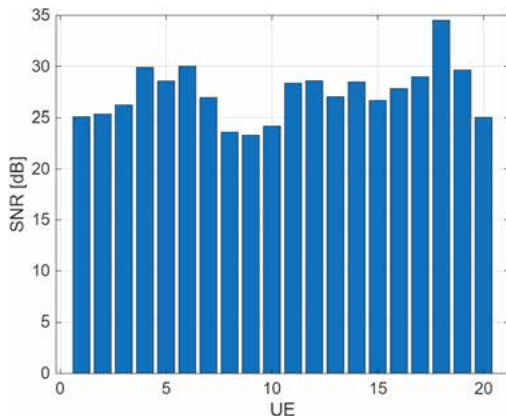
図 10 実験系の構成及び外観写真

ングは量子演算とデジタル計算機による前処理・後処理から構成されるため、BER 性能改善にはシステム全体のパラメータチューニングが重要になると考えられる。

2.2.3 アニーリングパラメータ依存性解析

アニーリング技術において、サンプリング数やアニーリング時間（スイープ数等）は計算精度と計算時間を制御する主要パラメータである。そのため、要求遅延と BLER 性能に対して適切なパラメータを選択することが重要である。本研究では、LMMSE-IDD・DEP・提案手法（SQA・SA・VA・D-Wave）に対して、マルチユーザー検出ブロックの計算複雑性を解析した。なお、D-Wave は量子計算機であるため、正味のアニーリング時間、結果読み込み時間、初期化時間等を含めた実行時間で評価した。SQA、SA、VA の計算量は端末数とアニーリングパラメータに依存するため、従来手法より低演算量とするにはパラメータ調整が必要である。一方で、D-Wave の実行時間は端末数に依存しないと見込まれ、接続台数が増加しても計算時間は一定であると予想できる。

図 5 および図 6 に、Overloaded MIMO 環境における QA-aided MUD のアニーリングパラメータ依存性を示す。ここで、サンプリング数 N_{samp} およびスイープ数 N_{sweep} はアニーリング時間に影響し、スイープ数の増加に伴いアニーリング時間も増加する。 $(N_{\text{BS}}, N_{\text{UE}})=(4,8)$ ではパラメータ依存性が小さい一方、 $(N_{\text{BS}}, N_{\text{UE}})=(4,12)$ では各パラメータを小さくすると BLER 性能が劣化することが確認された。これらの結果にもとづき、計算時間を抑制しつつ同時接続 10 台以上で所望の BLER を満たすために必要なアニーリングパラメータを決定した。



2.2.4 量子アニーリング支援型移動通信システムの開発と OTA 実証

MIMO-OFDM システムにおける QA-aided MUD の実環境での有効性を検証するため、量子アニーリング支援型移動通信システムを構築した。段階的に端末台数を増加させながら、(i) 同軸ケーブルを用いた有線接続環境での静特性評価、(ii) 実験試験局免許に基づく屋外環境での動作試験を実施した。図 7 にシステム構成の概要を示す。基地局ハードウェアは最大 4 本のアンテナまで対応可能な構成とし、PCIe 経由で制御用 PC へ接続した。基地局信号処理のうち、高速サンプリングレートでの動作が必要な処理（フレーム・シンボル同期等）は USRP 内 FPGA で実行し、シンボルレートで動作するベースバンド信号処理（等化を含む CP-OFDM 復調、誤り訂正符号の復号等）は制御用 PC で実行する構成とした。これにより、基地局信号処理手法の更新・改修を柔軟に行える。制御用 PC は、ベースバンド信号処理に加え、D-Wave 量子アニーリングマシンを含む各種アニーリング処理（SQA、SA、VA）へのマルチユーザー検出計算指示と結果収集を担う。

実験では、 $(N_{\text{BS}}, N_{\text{UE}})=(4,8)$ の構成とし、搬送波周波数 2.295 GHz、サブキャリア数 $N_F=64$ 、変調方式 QPSK、誤り訂正符号に 5G NR LDPC（符号化率 0.5）を使用した。UE 側では USRP により信号を生成し、基地局側では信号分析器で受信信号を取得した。量子アニーリングには D-Wave Advantage2 System 1.1 を、シミュレーテッド QA（SQA）には OpenJij を使用した。図 8 と図 9 に、屋外環境における実験環境と 8 台 OTA 実験で得られた BER 結果を示す。D-Wave および SQA による QA-aided MUD は E_b/N_0 が 19 dB 以上でエラーフリー性能を達成した。一方、従来の LMMSE 検出器では同等性能に約 22 dB を要し、QA-aided MUD が約 3 dB の優位性を示した。また、D-Wave と SQA の性能はほぼ同等であり、SQA が D-Wave の代替として有効に機能することを確認した。

さらに実験系を改修し、20 台までの接続実験が可能な構成へ拡張した（図 10）。基地局および端末局における処理は従来と同様とし、基地局アンテナ本数 N_{BS} は最大 8 本まで対応可能とした。周波数帯は 6G における評価条件に基づき 2.295 GHz とし、特定実験試験局として開局した。この実験系を用いて、見通し外環境を含む屋内通信実験を実施し、当初目標であった同時接続 10 台を超える 20 台における信号検出に成功した。実験結果例を図 11 に示す。図には各 UE からの受信信号の併平均 SNR および反復処理回数に対する BER を示しており、

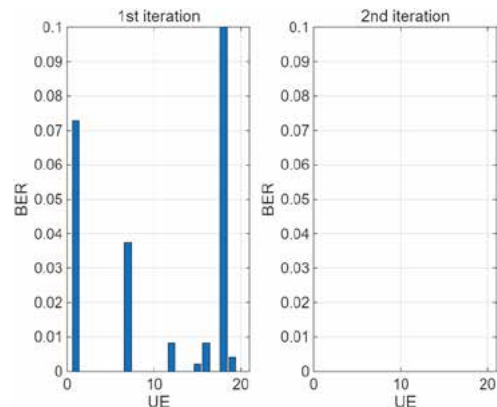


図 11 実験結果の一例（左：各 UE からの受信信号の平均 SNR、右：繰り返し処理回数に対する BER の変化）

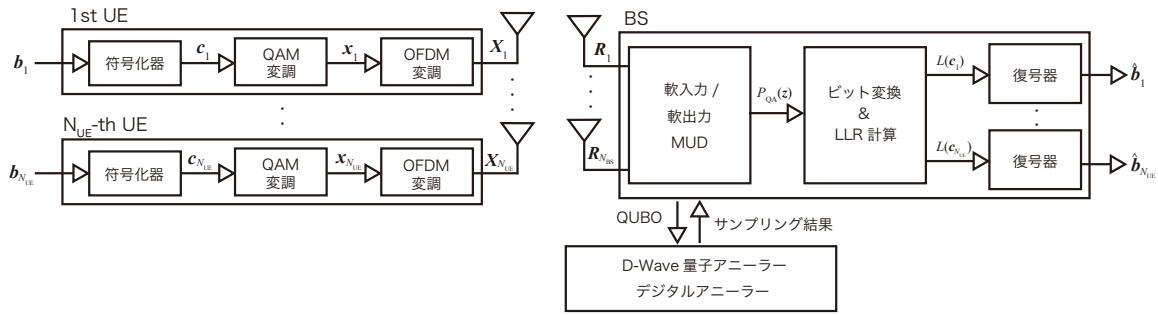


図 12 QAM 方式に対応可能な量子アニーリング支援型マルチユーザー検出

2 回の反復処理によって 20 台の UE から送信された信号を誤りなく分離できることを確認した。本成果により、周波数資源逼迫時における周波数共用の課題に対して、量子アニーリング技術の適用可能性が実証された。

2.2.5 提案手法の性能限界解析と高速化に向けた取り組み

提案する QA-aided MUD について、厳密な最尤検出器に対してどの程度性能的に漸近可能であるかを明らかにするため、性能限界の詳細解析を行った。本解析では、D-Wave における主要制御パラメータ（サンプリング数、アニーリング時間、チェーン強度）に加え、前処理および後処理を含めた処理全体を対象として包括的に評価した。具体的には、ランダム生成した通信モデルに対し、厳密計算で得られる事後分布と提案手法で得られる近似分布との乖離をカルバック・ライブラー情報量

(KLD) で定量化し、推定精度を評価した。併せて実用化を見据え、計算時間も評価した。その結果、サンプリング数の増加に伴い提案手法の分布が厳密分布へ漸近し、検出精度が向上することを確認した。一方で、アニーリング時間の影響は限定的であり、必ずしも長時間設定が必要ではないことが明らかとなった。さらに、チェーン強度を適切に設定することで、従来必要とされていた後処理を省略しても高精度推定が可能であることを示した。特に、後処理不要の構成により処理全体の計算時間を大幅に削減でき、従来手法と比較して最大約 100 倍の高速化を達成した。

2.2.6 実装に向けたパラメータ自動チューニング手法

実環境への適用を見据え、量子アニーリングにおける各種パラメータを効率的に最適化する手法として、ベイズ最適化に基づく自動チューニング手法を提案した。本手法では、ランダム生成した通信路に対する平均 KLD をコスト関数として定義し、サンプリング数やチェーン強度等のパラメータをベイズ最適化により自動決定する。数値実験により、従来のランダムサーチと比較して少ない試行回数で高精度なパラメータ群を発見可能であることを確認した。さらに、(i) SNR 条件ごとに事前学習した最適パラメータをルックアップテーブルとして保持する方式、(ii) 通信路変動に応じてオンラインでベイズ最適化を適用し動的にパラメータを決定する方式、の 2 ユースケースを検討し、実装に向けたパラメータ設計指針を提示した。

2.2.7 QA-aided MUD の QAM 方式への拡張

これまでの QA-aided MUD は、マシントイブ通信を想定し、主に QPSK 変調を対象として設計されてきた。本

研究では、より広範な応用への展開を目的として高次変調方式である QAM への拡張を行った。QAM で一般的な Gray 符号化は量子アニーリングで扱う 2 値変数表現と直接一致しないため、量子アニーリングで得た解を Gray 符号に対応するビット列へ変換する bit-conversion 処理を導入した (図 12)。数値実験では、過負荷 MIMO 環境においてデジタルアニーラを用いた BLER 評価を実施し、QPSK および 16QAM のいずれでも、提案手法が従来の低計算量検出法 (LMMSE や EP) に対して優れた BLER 性能を示すことを確認した。一方で、高次変調ではアニーリングパラメータ（サンプリング数やスイープ数）への依存性が増大し、所望性能の確保により多くの計算資源が必要となることも明らかとなった。

さらに、D-Wave 量子アニーラを用いた BER 評価を行った結果、 $(N_{BS}, N_{UE})=(4,4)$ および $(4,6)$ の構成ではデジタルアニーラと同等の検出性能を達成した。一方、 $(4,8)$ のような過負荷条件では、デジタルアニーラがエラーフリーに到達したのに対し、D-Wave では同等性能に至らなかった。以上より、提案手法は高次変調を含む実用的通信方式への適用可能性を示す一方で、高負荷環境では量子ハードウェアの精度向上やパラメータ最適化の検討が重要である。

2.2.8 システムレベル評価に向けたシミュレーション環境の構築

QA-aided MUD を基地局に実装した際のシステムレベル性能評価に向け、シミュレーション環境を構築した。評価では、リソース割り当てやセル間干渉等の影響を考慮し、スループット・遅延・周波数利用効率等の観点も含めて検討した。評価条件は、3GPP TR 38.914 (Study on 6G Scenarios and requirements) におけるユースケース「Urban coverage for massive connection」に準じて設定した。

シミュレータ構成を図 13 に示す。セル/セクタ構成をモデル化し、隣接セル干渉を含む評価が可能となるように

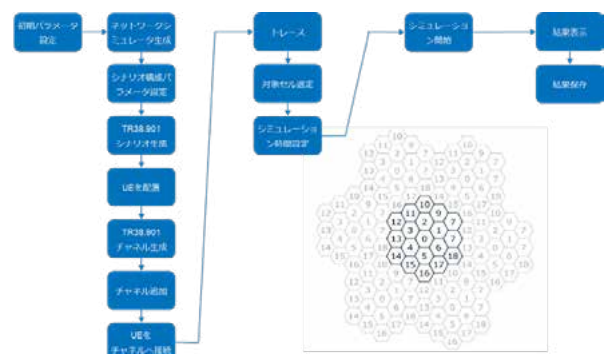


図 13 システムレベルシミュレータの構成

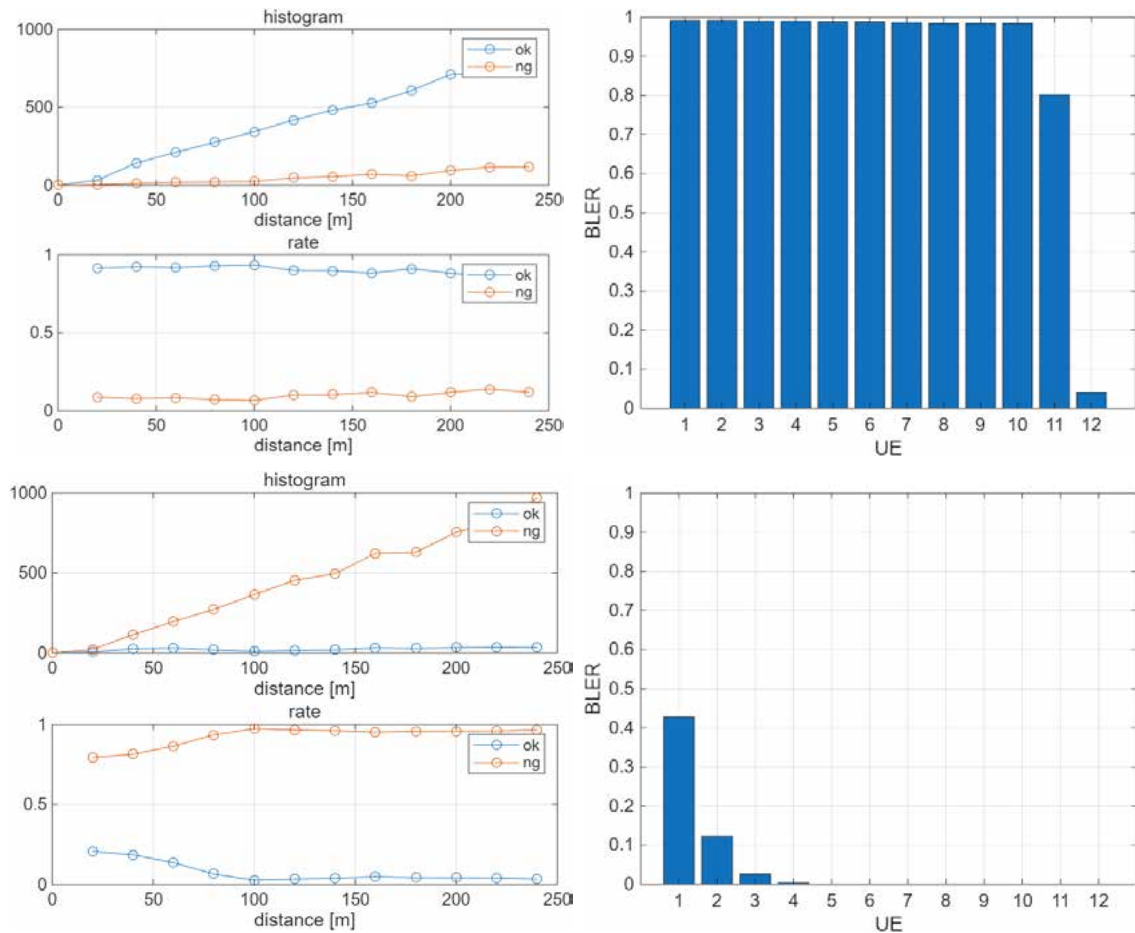


図 14 システムレベルシミュレーション結果の例
(上段：UE 送信電力制御あり、下段：UE 送信電力制御なし(常時最大))

した。波形は 5G NR をベースラインとして、電波伝搬モデルは 3GPP TR 38.901 (UMa 等) を使用した。各種システムパラメータ設定、トラフィックモデル (Non-full buffer 等) 設定、UE 配置、上りリソース割り当て (MCS およびリソースブロックごとの重畳数) 等を行い、基地局側で QA-aided MUD を適用して UE ごとの SINR および通信成否を記録する。また UE 位置情報も保存し、通信成功率の累積分布を評価可能とした。

シミュレーション結果の一例を図 14 に示す。隣接セル干渉がある条件において (N_{BS} , N_{UE})=(4,12) とし、送信電力制御の有無による結果を比較した (単位リソースブロック帯域幅：360 kHz)。基地局からの距離が増加するにつれて通信失敗端末が増加する傾向が確認された。送信電力制御によりセル間干渉の削減および電力差による信号分離性能向上が期待でき、概ね同時接続 10 台程度が可能であることを確認した。さらに、利用可能帯域幅を 100 MHz、上り 4 スロットで当該技術を利用可能と仮定し、0.1 秒間隔で送信するデバイスを想定すると、6G における目標端末密度 100 万台/km² を満たす、およそ 150 万台/km² のデバイス密度を達成可能と見積もられる。

3. 今後の展開

本研究開発で得られた成果は、工場内部におけるセンサーやロボットを対象としたローカルネットワークへの社会実装が期待される。特に、多数の端末が同時接続する環境においても高い周波数利用効率を維持できることから、スマートファクトリーの高度化や生産性向上に貢献する

ことが見込まれる。今後は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) が開催する新技術説明会での発表を通じて技術の普及を図るとともに、実装を担うパートナー企業の探索を進め、実証および製品化に向けた取り組みを推進する。また、本成果は移動通信分野における周波数利用効率の大幅な改善につながり、xR デバイスなど大規模接続を必要とする 6G サービスへの応用が期待される。さらに、量子アニーリングと通信信号処理の融合という新たな研究領域を開拓することで、関連分野への波及効果も見込まれる。

4. むすび

本稿では、Beyond 5G/6G における超多数同時接続の実現を目指し、量子アニーリングを無線基地局の信号処理に応用した QA-aided MUD の研究開発成果を報告した。シミュレーション評価により、端末数が基地局アンテナ数を上回る過負荷 MIMO 環境において、QA-aided MUD が LMMSE-IDD および EP といった従来の低演算量手法を凌駕する BLER 性能を示すことを確認した。また、D-Wave 量子アニーラ、SQA、SA、VA を含む複数のアニーリング技術を横断的に評価し、デジタルアニーリングが D-Wave の有効な代替手段となることを明らかにした。さらに、ベイズ最適化に基づくパラメータ自動チューニング手法の提案や 16QAM への拡張を通じ、実環境適用に向けた設計指針を確立した。

実証実験においては、5G NR 準拠のシステムを構築し、屋外 OTA 実験にて 8 台同時接続で D-Wave による QA-

aided MUD が従来の LMMSE 検出器に対して優位性を示した。さらに、実験系を拡張することで 20 台の同時接続信号の誤りなき分離に成功し、量子アニーリング技術の実用的有効性を実証した。

今後は、本成果のスマートファクトリーや 6G サービスへの社会実装に向けて、パートナー企業との連携のもと実証・製品化を推進するとともに、量子ハードウェアの進化と歩調を合わせた継続的な性能向上を図る予定である。

【査読付き口頭発表論文】

- [1] K. Yonaga and K. Takizawa, "Quantum-Annealing-aided Multi-user Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC2025-Spring), Oslo, Norway, June 17-20, 2025.
- [2] K. Yonaga and K. Takizawa, "Over-the-air Demonstration of Quantum-Annealing-aided Multi-user Detection in MIMO-OFDM Systems," IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC2026), Las Vegas, USA, Jan. 9-12, 2026.

【その他の誌上発表】

- [1] 世永公輝、滝沢賢一、"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"、ITU ジャーナル 3 月号 (2025 年 3 月 3 日)
- [2] K. Yonaga and K. Takizawa, "World's First Successful Experiment Using a Quantum Computer for Future Massive Connectivity," New Breeze 春号 (2025 年 4 月 1 日)
- [3] 滝沢賢一、"災害に素早く気づき、途切れない通信でつなぐ～AI と通信で社会を守る～"、NICT News (2026 年 3 月 1 日)

【口頭発表】

- [1] 世永公輝、滝沢賢一、"量子アニーリングマシンを利用した超多数接続技術"、WTP2025、東京ビッグサイト (2025 年 5 月 29 日)
- [2] 世永公輝、滝沢賢一、"量子アニーリングマシンを利用した多数接続技術" (展示)、WTP2025、東京ビッグサイト (2025 年 5 月 28 日～30 日)
- [3] K. Yonaga and K. Takizawa, "Application of Quantum Annealing to Massive Radio Communications Toward 6G," AQC2025, The University of British Columbia, June 9-12, 2025.

【誌上発表リスト】

- [1] 著者名、"タイトル"、掲載誌名 Vol.00 No.00 pp000-000 (発表年月日)
- [2] 著者名、"タイトル"、掲載誌名 Vol.00 No.00 pp000-000 (発表年月日)
- [3] 著者名、"タイトル"、掲載誌名 Vol.00 No.00 pp000-000 (発表年月日)

【申請特許リスト】

- [1] 世永公輝、滝沢賢一、無線信号処理システム及び無線信号処理方法、日本、2025 年 3 月 14 日
- [2] 世永公輝、滝沢賢一、パラメータ設定装置、パラメータ設定方法及び通信装置ならびに通信システム、日本、2025 年 3 月 16 日

【報道発表リスト】

- [1] "6G 時代に求められる多数接続性能を実証 ～量子コンピュータを利用した同時通信に成功～"、2026 年 1 月 15 日
- [2] "Demonstration of Massive Connectivity for the 6G

Era - Successful Simultaneous Communications Using a Quantum Computer", 2026 年 3 月 15 日