

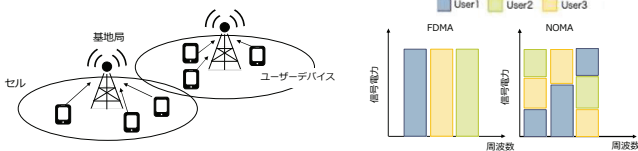
量子アニーリングを用いた端末間干渉抑圧処理による 超多数同時接続技術に関する研究開発

世永 公輝 (yonaga@nict.go.jp)、滝沢 賢一
国立研究開発法人 情報通信研究機構 (NICT)

本研究は総務省 SCOPE (受付番号 JP235003004) の委託を受けたものです

研究の背景

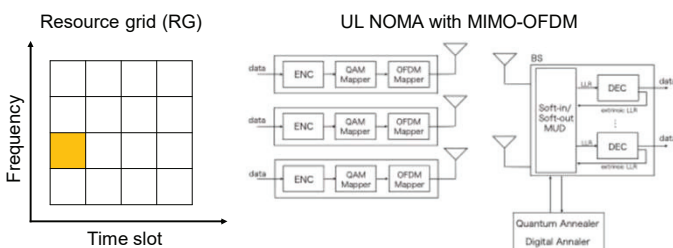
- ドローン・ロボット端末・IoTデバイスの急速な普及に伴い、リアルタイムデータ量の今後の大幅な増加が見込まれる状況 → 限られた無線リソースをより効率的に活用するための新技術創出の必要性が急務。
- 上りリンク非直交多元接続 (UL-NOMA) は、複数デバイスが同一の周波数・時間スロットを共有することを可能にする、次世代無線通信における有望な多元接続技術
- UL-NOMAでは、基地局が複数ユーザーからの重畳信号を受信し、各ユーザーの送信信号を正確に分離・検出するマルチユーザー検出 (MUD) 処理が不可欠
- しかし、接続端末数の増加に伴いMUDの計算量が指数的に増大するという深刻な課題が存在。大規模同時接続を想定した6G時代において、計算効率と検出精度を両立する手法の確立が急がれる状況。



研究の目的

- 量子アニーリングを活用した次世代多数同時接続技術 (QA-aided MUD) の開発
- 5Gにおける1リソースあたり接続数1台に対し、同時接続数10台以上 (10倍超) の実現を目標と周波数利用効率の向上
- 実フィールド下でのOver-the-Air(OTA) 実験を実施し、開発技術の有効性を実環境において検証

システムモデル



※右図の典拠: K.Yonaga and K.Takizawa, "Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," VTC2025-Spring, © 2025, IEEE

- RGにおける信号モデル: $R = HX + W$
 - M, N : 基地局側アンテナ数・端末数(アンテナ1本)
 - $X \in \mathbb{C}^N$: 送信信号Quadratic phase-shift keying (QPSK)信号の時:
 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, where $X_k = \{e^{j\pi/4}, e^{j3\pi/4}, e^{j5\pi/4}, e^{j7\pi/4}\}$
 - $H \in \mathbb{C}^{M \times N}$: チャネル行列
 - $R \in \mathbb{C}^M$: 受信信号
 - $W \in \mathbb{C}^M$: AWGN ($W_i \sim N(0, N_0)$, where N_0 means the noise power density.)

- 基地局構成・反復型マルチユーザー検出
 - ✓ Soft-in/Soft-out MUD: 対数尤度比 (LLR) の算出による雑音重畳信号からの送信信号推定。
 - ✓ 復号器 (DEC): LLRを入力とした反復処理による元メッセージの高精度復元。

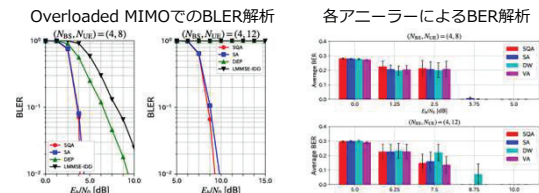
QA-aided MUD

- k番目の端末のQPSKシンボルを2つのイジング変数で表現:
 $X_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(z_{1,k} + jz_{2,k})$, where $z_{1,k}, z_{2,k} = \{+1, -1\}$
- X_k を $\|R - HX\|^2$ に代入し、イジングエネルギー関数を得る:
 $E(z) = h_1^T z_1 + h_2^T z_2 + z_1 J_{11} z_1 + z_1 J_{12} z_2 + z_2 J_{21} z_1 + z_2 J_{22} z_2$ ($z = \{z_1, z_2\}$)
- LLRには以下で定義される条件付き確率を計算 → 全てのイジング変数の組み合わせが必要
 $\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in \mathcal{Z}} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$, where $\mathcal{Z} = \{+1, -1\}^{2N}$
- 提案手法では、D-Wave量子アニーレーをサンプラーとして利用・上記のガウス分布を以下のように近似:
 $\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in \mathcal{Z}_{QA}} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$
 \mathcal{Z}_{QA} : Spin patterns obtained by QA sampling
- シミュレーテッドアニーリング (SA) やベクトルアニーラ (VA) 等のデジタルアニーリング技術への応用も可能

成果

① 5G NRを想定した通信システムでのエラー率解析

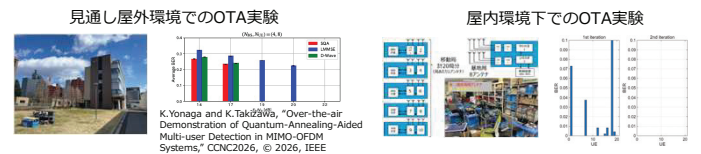
- Overloaded MIMO ($N_{BS} < N_{UE}$) で、提案手法が従来の低演算量種法(LMMSE-IDD・DEP)を大きく上回るBLER性能
- 少数インスタンスでのBER解析。SQA・SA・VAは同等のBER性能を示し、D-Waveも高 E_b/N_0 領域で全端末の信号検出に成功



※出典: K.Yonaga and K.Takizawa, "Quantum-Annealing-Aided Multi-User Detection in Overloaded MIMO-OFDM Systems," VTC2025-Spring, © 2025, IEEE

② 量子アニーリング支援型移動通信システムの構築とOTA実験による実証

- 見通しあり屋外実験において、QA-aided MUDは $E_b/N_0 > 19$ dBで8台の信号検出に成功・最大で同時接続10台まで実証
- 屋内環境において、当初目標の同時接続10台を超える20台における信号検出に成功・2回の反復処理で全端エラーフリーに到達



③ 6Gユースケースを想定したシステムレベルシミュレーションによる性能評価

- 隣接セル干渉・トラヒックモデル・UE配置等を考慮したシステムレベルシミュレータを構築
- 電力制御によるセル間干渉削減および信号分離性能向上により、概ね同時接続10台程度が可能 → 約150万台/km²のデバイス密度が達成可能

まとめ

- 5G NRを想定した通信方式において、Overloaded MIMOでQA-aided MUDの有効性を実証
- 屋外OTA実験で同時接続10台を達成・さらに当初目標を大幅に超える20台同時接続において信号検出に成功
- 発展的取り組み: QAM変調への拡張・アニーリングパラメータ自動調整手法の開発・システムレベルシミュレーションを実施