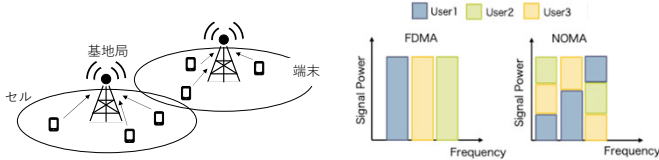


量子アニーリングマシン支援型多数接続技術 ～6G時代の多数接続性を量子のチカラで実現！～

6G時代に求められる多数接続性の実現へ

- ドローン・ロボット・IoT機器の発展に伴い、膨大な量のデータがリアルタイムに行き交う。総務省Beyond5G推進戦略では、現在の接続数の10倍が求められている(現在は1つのリソースに対して1台のみ)
- しかし無線通信資源は限られており、新たな周波数帯を割り当てていくことは困難
- 上り回線非直交多数接続 (UL-NOMA) ・6Gで期待される多数接続技術：
 - 同一時刻・同一周波数を用いて複数の端末がデータを基地局に送信することで、周波数の利用効率改善
 - 基地局で受信した信号から、各ユーザー端末からの送信信号を正しく推定 (マルチユーザー検出, MUD) をしなければならない
- MUDを正確に実行する場合、ユーザー数の増加に伴い計算時間が爆発的に増加してしまう。そのためNOMAにMUDを適用することは困難



提案：量子アニーリング支援型MUD

- 基礎となる技術・反復型MUD (Wang and Poor, 1999)。検出器と復号器間で対数尤度比を反復的に交換することで、高い検出性能を誇る
- 検出器では以下の確率分布の計算が必要であるため、計算量困難が生じる(QPSKの場合、 $O(4^N)$)

$$\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in \mathcal{Z}} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$$

エネルギー関数：
 $E(X) = \|R - HX\|^2$

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(z_{1,k} + jz_{2,k}) \quad z_{1,k}, z_{2,k} = \{+1, -1\} \quad \mathcal{Z} = \{+1, -1\}^{2N}$$

- 量子アニーリング(QA)：
 - 量子効果により組合せ最適化問題を効率的に解く手法↔エネルギーが最小となるXを高速に探索
 - D-Wave Systemsが実際の量子デバイス上でQAを再現。しかし実デバイス上ではノイズが無視できず、解が揺らいでしまう
- コア技術・QAを高速なサンプラーとして用いて、上記確率分布を精度よく近似 (QA以外のアニーラーでも動作可能)

$$\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in \mathcal{Z}_{QA}} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$$

全シンボルのパターンではなく、QAにより得られた解だけで確率を計算

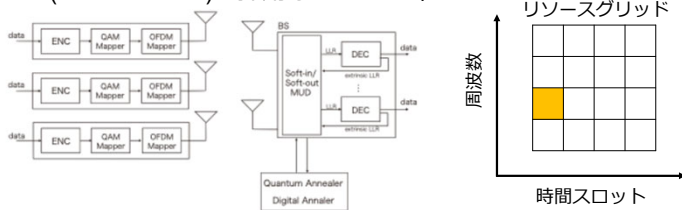
計算時間の大幅短縮

目的と貢献

- 量子アニーリングを利用した新たな多数接続技術の開発・同時接続数を5Gと比較して10倍以上を目指す
- シミュレーションで最大同時接続12台での同時接続に成功
- 量子アニーリングマシンを用いた実フィールド下でのOver-the-Air (OTA) 実験に世界で初めて成功

想定するシステム構成

多数入力多数出力-直交周波数分割多重 (MIMO-OFDM)を採用したNOMA系



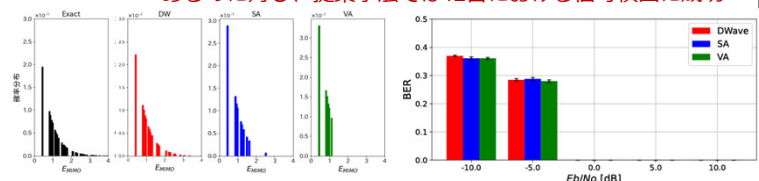
5G NRでも採用されているMIMO-OFDM構成を想定

- リソース1つあたりに対する信号モデル： $R = HX + W$
 - M ：基地局アンテナ数・ N ：ユーザー端末数
 - $X \in \mathbb{C}^N$ ：送信シンボル
 - 例：quadratic phase-shift keying (QPSK) シンボルの場合
 $X = [X_1, X_2, \dots, X_N]$, 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
 - $W \in \mathbb{C}^M$ ：加法的白色雑音 ($W_i \sim N(0, N_0)$, N_0 はノイズ電力密度)
- ※ 詳細は K.Yonaga and K.Takizawa, VTC 2025 Spring.

成果

1. 近似手法の検証

- 左図・確率分布の比較 ($N=4, M=2$)：
 - 厳密な分布(Exact), DW(D-Wave), SA(Simulated Annealing), VA(NEC社 Vector Annealer)
- 右図・3GPP UMAモデルでのビットエラー率(BER)の比較 ($N=12, M=8$)：
 - 従来の反復型MUDでは12台における信号検出の実行は困難であるのに対し、提案手法では12台における信号検出に成功



詳細は K.Yonaga and K.Takizawa, VTC 2025 Spring.

2. 屋外におけるOTA実験

- D-Waveを用いたリアルタイムなOTA実験を実施・4台までの信号検出に世界で初めて成功：K.Yonaga and K.Takizawa, IEEE Access (2025)
- 上記の実験はシングルアンテナ・シングルキャリアでの結果であるため、実験系を5G NR信号 (IoT向けの2GHz帯) にむけて改修
- 5G NRを想定したMIMO-OFDM系でのOTA実験においても、提案手法は10台の信号検出に成功



5G NR信号でも有効性を確認

まとめ

世界初のオンライン実証

- QA支援型MUD方式を提案し、従来のMUDを高精度に近似できることを実証
- シミュレーションを通じて12端末からの信号検出可能であることを確認し、屋外実験によるOTA実証にも成功

謝辞：本研究の一部は総務省 SCOPE (受付番号 JP235003004) の委託を受けたものです

