

量子アニーリングあるいは デジタルアニーリングを活用して 無線通信同時接続数を10倍へ

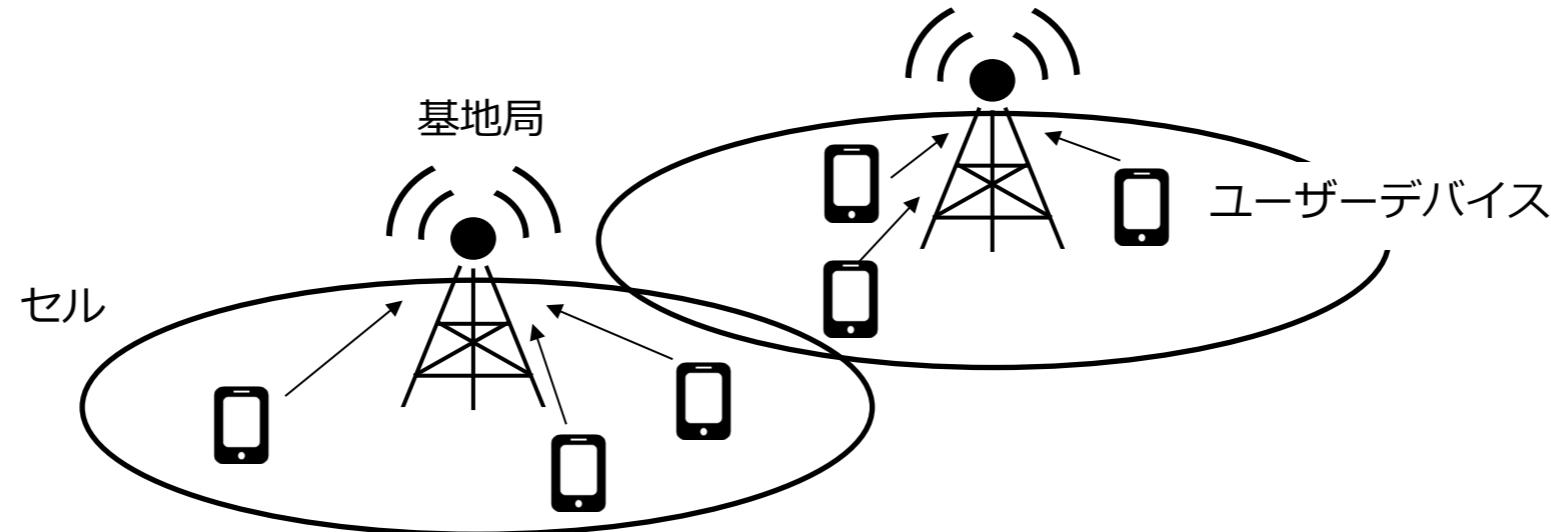
2025年10月2日

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
テニュアトラック研究員 世永 公輝

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。

技術の背景

□ 多数接続技術向上の重要性



- ✓ ドローン・ロボット・xRデバイスの急速な発展により、次世代無線通信システムでは膨大な量のデータがリアルタイムに行き交う
- ✓ 無線通信資源は有限であるため、新たな周波数帯を割り当てるることは困難
- ✓ 通信資源の効率的な利用に向けて、同一時刻・周波数において複数の端末がデータを送信するための「多数接続技術」が不可欠

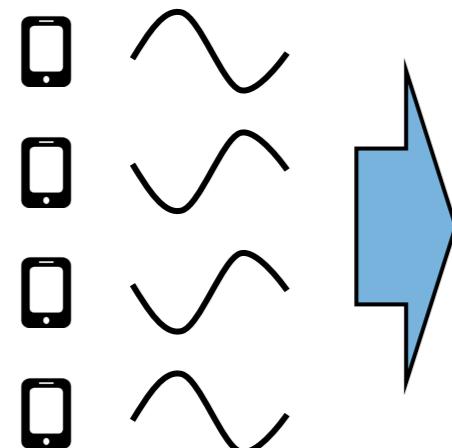
技術の背景

□ 多数接続における信号検出の難しさ

- ✓ 端末側の送信可能な信号パターン数をM・端末数をNとすると、各端末からの信号を検出するために M^N のオーダーの演算が必要
- ✓ 端末数の増加に伴い計算時間が爆発的に増加

※正確には送信信号の実現確率を計算し誤り訂正復号に使用する

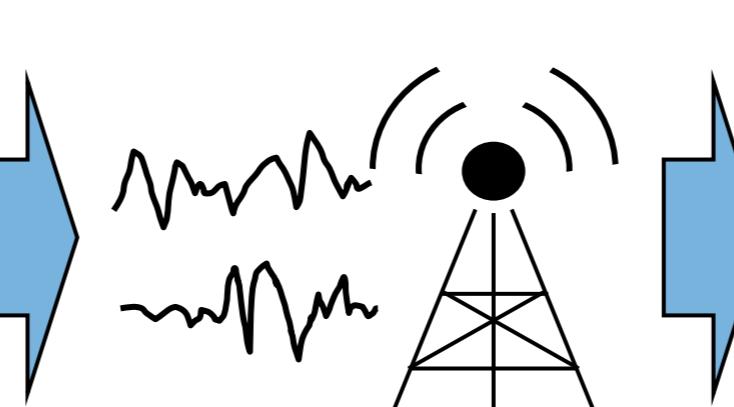
端末側が信号を送信
(下の例はM=2・N=4)



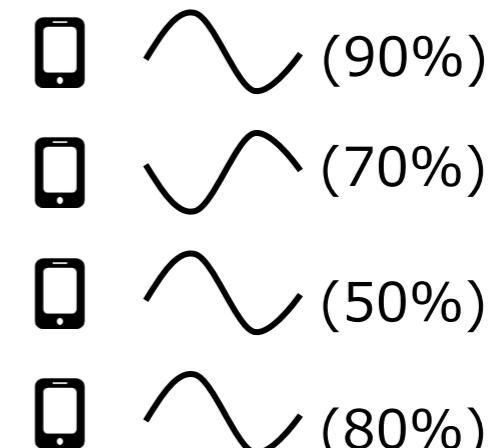
各送信信号が
通信路を伝搬



基地局アンテナが重ね合
わさった信号を受信



基地局側で送信信号を
推定（検出）



従来技術とその問題点

□ 従来技術

1. 最尤(さいゆう)検出

- ✓ 各端末の送信信号が取りうる M^N 個全パターンを計算
- ✓ 理論的には最適だが処理時間が膨大

2. 低演算量な近似的検出

- ✓ 線形最小2乗誤差や期待値伝搬などがこれまで活発に研究されている
- ✓ 演算量が N^3 オーダーになるため高速に処理可能
- ✓ ただし6Gを想定したセットアップ(基地局アンテナに対し端末数が多い場合)において、これら手法の検出性能は大きく劣化

□ 問題点

- ✓ 社会実装という点で、上記の手法が広く利用されるまでに至っていない
- ✓ 現在の5Gでは同一時刻・周波数に対し接続端末数は1台のみ

新技術の特徴

□量子アニーリング支援型信号検出

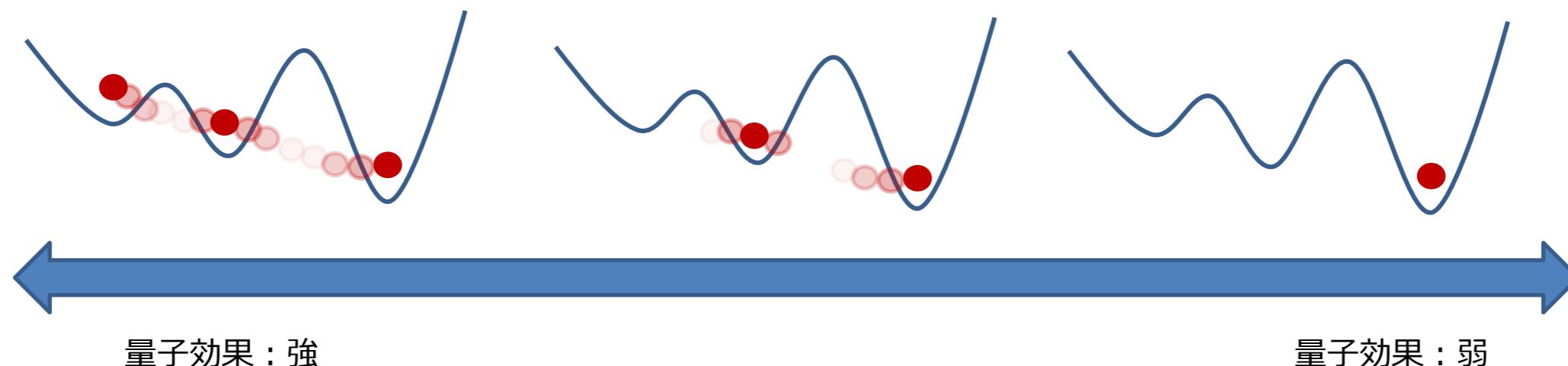
- ✓ 量子アニーリング(Quantum Annealing, QA)と従来的なデジタル通信技術を統合した信号検出手法
- ✓ QAを利用した無線通信技術はすでに先行研究はあるが、通信方式が限定されている (ex. BPSK変調、誤り訂正符号なし、など)
- ✓ QAによる高速な演算とデジタル技術の汎用性を兼ね揃え、さまざまな通信システムに適用可能
- ✓ 5Gと比較して10倍以上の多数接続に成功し、かつ処理速度は最尤検出の10倍高速化

※5Gでは1つのリソースに対し接続数1台なので接続台数10台以上が目標

新技術の特徴 - 原理①

□ QA…量子トンネル効果を利用した発見法的最適化アルゴリズム

- ✓ 目的…関数の値が最も小さくなる解の組み合わせを探索
- ✓ 初期段階：量子効果を強くしさまざまな解を参照
- ✓ 終状態：徐々に量子効果を弱めていき1つの解に収束
- ✓ このプロセスを十分ゆっくり行えば最適解に到達
- ✓ いくつかの古典的なアルゴリズムと比較し、量子効果により効率的に最適解の探索が可能であることが実証(PRE, 58,5355, 1998)



新技術の特徴 - 原理②

□ D-Wave量子アニーリングマシン (D-Waveマシン)

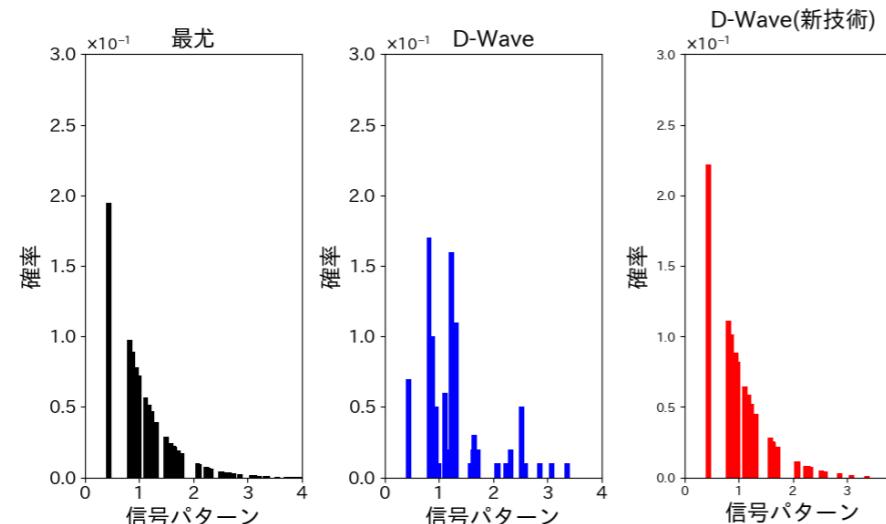
- ✓ 組み合わせ最適化用の特化型計算機
※ゲート型量子コンピュータは万能計算機
- ✓ 典型的にマイクロ秒オーダーで求解が可能
- ✓ 量子プロセッサー部分の消費電力はフェムト(10^{-15})ワットオーダー
- ✓ 二次計画問題における任意の組み合わせ最適化を実行可能

□ 現在の技術水準で大規模系が実現可能・約15年に及ぶ運用実績

- ✓ Advantage2: 約7000量子ビット・IBM Condor : 約1000量子ビット

新技術の特徴 - 原理③

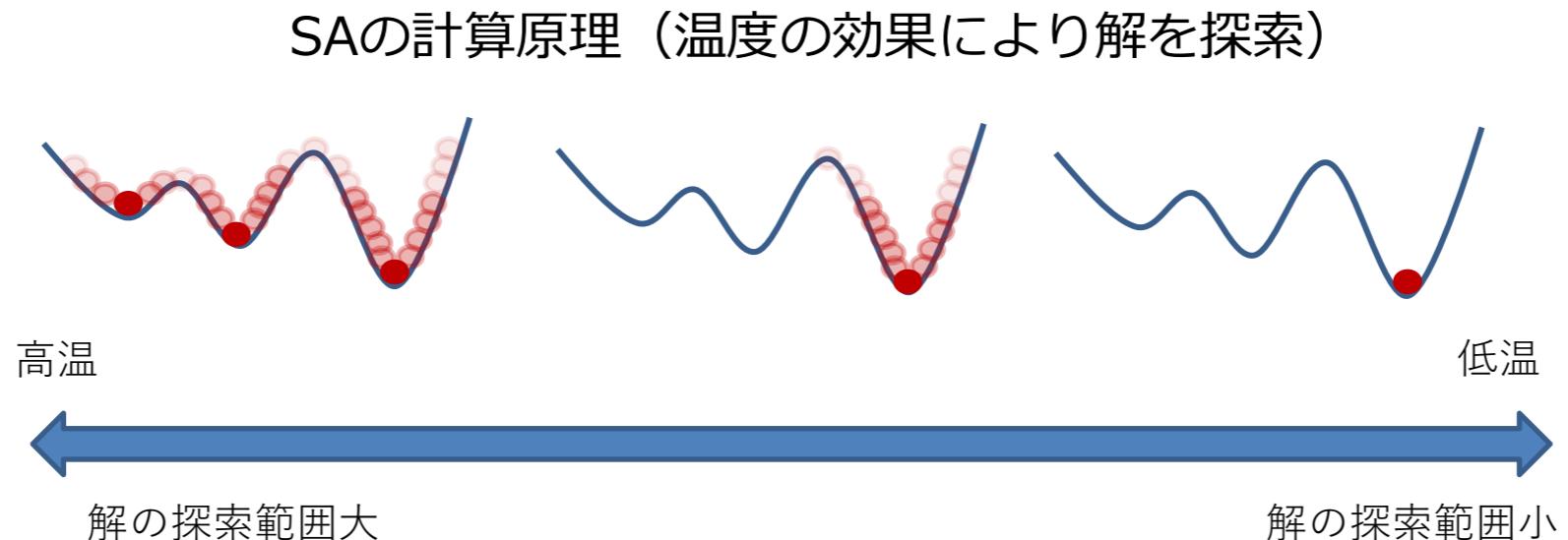
- コアとなる技術：QAをサンプラーとして活用し送信信号の実現確率を効率的に計算
 - ✓ 量子デバイスでは必ずノイズが存在・そもそもアニーリング自体が確率的なアルゴリズム
 - ✓ しかしD-Waveマシンのサンプリング結果を直接用いるだけでは、人間が所望の確率分布を再現することはできない
 - ✓ **新技術ではD-Waveのサンプリング結果にデジタルPC上での後処理を用いることで、所望の分布を高速・高精度に計算可能**



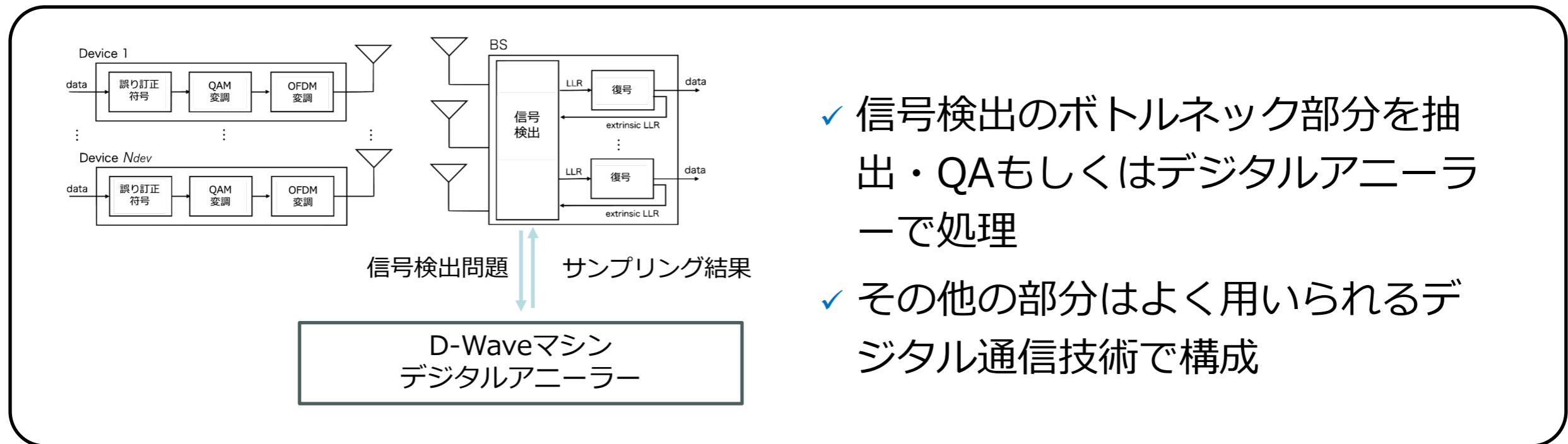
計算結果の例：接続数4・基地局アンテナ数2
縦軸：確率
横軸：送信信号のパターン
Exact…最尤検出に基づく計算結果
D-Wave…D-Waveマシンによる計算結果
D-Wave(新技術)…新技術を用いた計算結果

新技術の特徴 - 原理④

- D-Waveマシンをはじめ、量子コンピュータはまだ発展途上
 - ✓ 計算精度のためにはいくつかの前処理・後処理が必要
 - ✓ クラウドサービスなので遅延・キュー待ちが生じる
- アニーリング技術 자체が確率的なアルゴリズム探索なのでサンプラーとして利用
- シミュレーテッドQA(Simulated QA, SQA)・シミュレーテッドアニーリング(Simulated Annealing, SA)・NEC社の量子インスピア型デジタルアニーラー(Vector Annealer, VA)も活用することで、早期の社会実装を可能とする



新技術の特徴 - 原理⑤



- ✓ 信号検出のボトルネック部分を抽出・QAもしくはデジタルアニーラーで処理
- ✓ その他の部分はよく用いられるデジタル通信技術で構成

- QAの実行時間はマイクロ秒オーダー。さらに全計算時間がかつアニーリングパラメータに依存するのでユーザーが制御可能→**計算時間の大幅な短縮が可能**
- サンプリングできれば良いのでQAに限らず**各種アニーリング技術が利用可能**
- 確率分布の計算以外は従来のシステムと同じ→**任意の通信方式に応用可能**

従来技術との比較

□ 従来技術

➤ 最尤検出

- ✓ 確率分布を厳密に計算することにより最適な性能を持つ
- ✓ 端末数の増加に伴い処理時間は爆発的に増加してしまう

➤ 低演算量検出

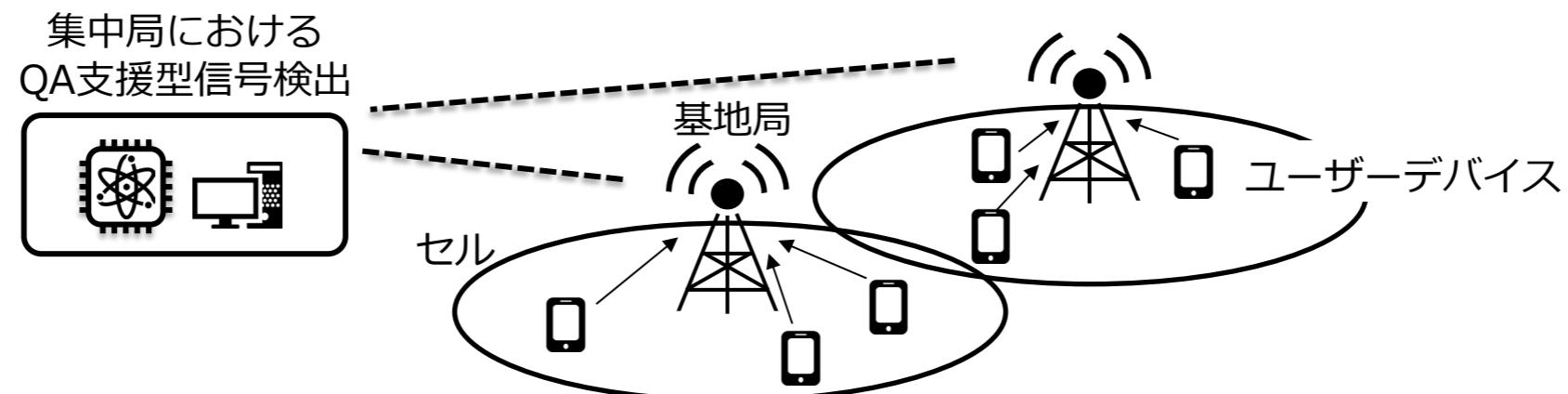
- ✓ 確率の計算部分を大きく近似することで高速な処理が可能
- ✓ 基地局アンテナ数に対し端末数の方が大きい過負荷システムにおいて、検出性能が大幅に劣化

□ 新技術 (QA支援型検出)

- ✓ QAおよびデジタルアニーリングにより確率分布を再現
- ✓ **最尤検出に匹敵する性能を示しつつ計算時間は10倍もの高速化** (K.Yonaga and K.Takizawa, ICC2023, IEEE Access 2025)
- ✓ **過負荷システムにおいて、低演算量検出を大きく凌ぐエラー率性能を誇る**(K.Yonaga and K.Takizawa, VTC-Spring 2025)

想定される用途

- 集中型無線アクセスネットワーク(Centralized Radio Access Network, C-RAN)構成を持つ移動通信システムへの採用
 - ✓ 各基地局で受信された上り回線を集中基地局において分離処理を行うシステム
 - ✓ 基地局で受信した上り回線NOMA信号を集中処理拠点でQAによる検出処理→各基地局に高性能な信号処理能力を持たせる必要がないため基地局の小型・低コスト化が可能
 - ✓ QAは発展途上であるがVAをはじめとするデジタルアニーリング技術を用いることで早期の社会実装が期待できる



企業への貢献・PRポイント

- 量子アニーリングおよびデジタルアニーリングを用いた無線通信技術について企業との共同研究の実績があり、本技術の社会実装に向けた技術相談が可能
- 本技術以外にもアニーリング技術に関する研究開発を実施しており、それらを組み合わせた展開も可能
- 本技術の活用を検討するために必要な追加実験、解析は共同研究として実施可能

実用化に向けた課題

□ QAを使用する場合

- ✓ D-Waveマシン自体が発展途上
- ✓ 計算精度を維持するためにはいくつかの前処理・後処理が必要
- ✓ クラウドサービスなので遅延・キュー待ちが生じる

□ デジタルアニーリングを使用する場合

- ✓ 多くのデジタルアニーラーは大規模な問題を高速に解くことを前提としている
- ✓ 無線通信の問題では小規模な問題を高速(1sec以下)に処理することが求められている
- ✓ スループット・処理速度などを考慮したデジタルアニーラーを含めたシステム全体の最適化が必要

企業への期待

- 新技術を社会へ普及させるため、課題の洗い出しと更なる技術開発に協力してくださる企業・団体を募集しております

- 新たなユースケースの発見やアプリケーションの創造に協力してくださる企業・団体を募集しております

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：無線信号処理システム及び無線信号処理方法
 - 出願番号：特願2025-041450
 - 出願人：国立研究開発法人 情報通信研究機構
 - 発明者：世永公輝、滝沢賢一
-
- 発明の名称：無線信号処理システム及び無線信号処理方法
 - 出願番号：特願2022-144865
 - 出願人：国立研究開発法人 情報通信研究機構
 - 発明者：世永公輝、滝沢賢一

产学連携の経歴

- 2023年：総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE) フェーズⅠに採択
- 2024年-2025年：総務省 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE) フェーズⅡに採択

お問い合わせ先

国立研究開発法人 情報通信研究機構
イノベーション推進部門
知財活用推進室

TEL 042-327-6950
e-mail: ippo@ml.nict.go.jp