

QoEの確率的保証を目的とする HetNet環境における最適接続先制御

関澤 和希¹, 篠原 笑子², 中平 俊朗², 福島 健², 浅井 裕介², 大平 健司³, 下西 英之³

¹大阪大学 大学院情報科学研究科

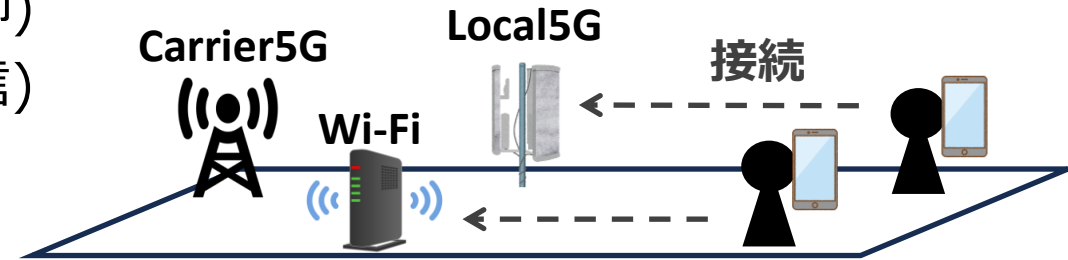
²NTT株式会社 アクセスサービスシステム研究所

³大阪大学 D3センター



研究背景と目的

- 通信需要が増大する無線通信環境下において、UEごとのアプリケーション品質を安定的に保証する必要がある[1]
 - ・ ミッションクリティカルな通信 (Ex. ロボット制御)
 - ・ 継続的な品質保証が求められる通信 (Ex. 動画配信)



- **各UEのQoE (Quality of Experience) をロバストに保証する通信制御の実現**
 - ・ Heterogeneous Networks (HetNets) の活用[2,3]
 - ・ HetNets : 異なるセルサイズや無線特性を有する基地局を協調的に運用する通信方式
 - ・ アプリケーション要求を満たす通信品質の担保
 - ・ 各UEの通信状況に応じて、適切な通信手段および接続基地局を選択

[1] NGMN, "6G requirements and design considerations," White paper, NGMNalliance - white paper, Feb. 2023. Accessed: 2026-3-18.

[2] J.Li et al., "Mobility support for millimeter wave communications: Opportunities and challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.24, no.3, pp.1816–1842, 2022.

[3] W.Tashani et al., "Mobility robustness optimization in future mobile heterogeneous networks: A survey," IEEE Access, vol.10, pp.45522 45541, 2022.

HetNetにおける既存手法と課題

- 既存制御手法

- 従来方式：観測した通信品質のみに基づいてUEが接続先を決定
 - 多数のUEが同一の基地局に集中し、共有資源の競合により性能が低下[4]
- 通信品質にバイアスを与えて接続先を決定し、負荷分散を行う手法が用いられている[5]

- 既存制御手法の課題

- 接続先決定が通信品質の代表値に基づくため、**通信品質のばらつきを十分に考慮できない**
 - 平均的に品質要求を充足しても、通信品質が悪化する場面で要求を下回る可能性がある
- 各UEが個別に接続先を決定するため、**全体最適化が保証されない**



QoEをロバストに保証することは困難

[4] P. Jia and X. Wang, "A new virtual network topology-based digital twin for spatial-temporal load-balanced user association in 6G HetNets," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.41, no.10, pp.3080–3094, 2023.

[5] I.Guvenc, "Capacity and fairness analysis of heterogeneous networks with range expansion and interference coordination," IEEE Communications Letters, vol.15, no.10, pp.1084–1087, 2011.

既存の取り組みと本研究の提案

- 確率的な電波品質分布の予測手法[6]
 - ・ 観測した電波品質のばらつきを学習し、未観測地点の電波品質を確率分布として推定
 - ・ 不利な通信条件 (分布の下側裾野) を見落としにくいロバストな評価が可能
- QoEの確率的保証を目的とした接続先制御手法の提案
 - ・ 前提：各無線 (Wi-Fi/Carrier5G/Local5G) において、確率的電波マップが得られている
 - ・ 確率的電波マップをもとに理論式から、各UEの通信品質 (スループット) 確率分布を予測
 - ・ 分布の下側裾野を考慮した全端末のスループットを最適化する、無線選択/基地局選択



各UEの通信品質に応じてロバストにQoEを保証

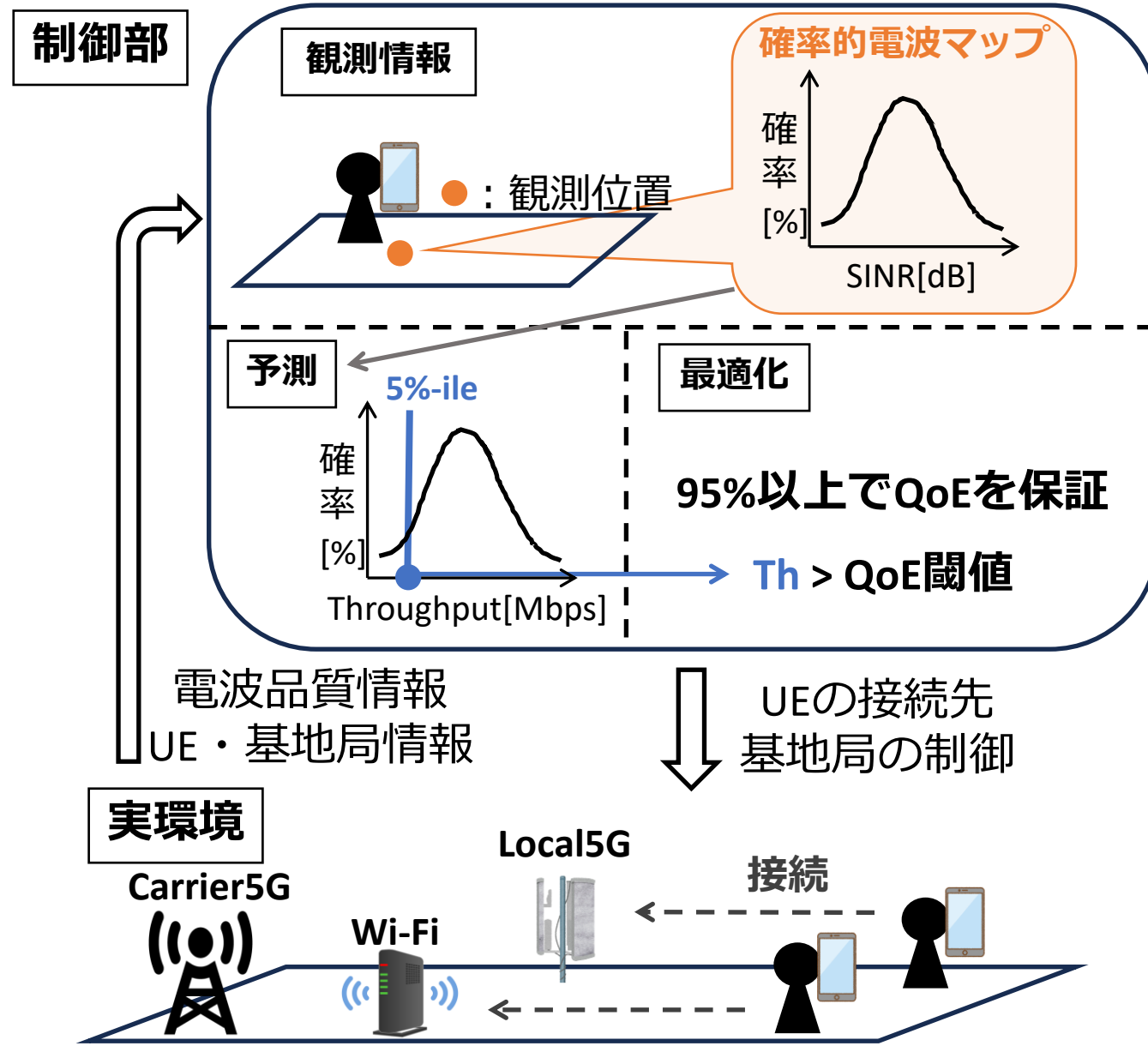
提案手法の全体像と本発表のスコープ

● 提案手法の全体像

1. 電波・UE位置の確率モデルから、各UEの通信品質を確率分布として予測
2. 一定確率以上の時間割合でのQoE保証を目的とし、最適化問題を定式化
3. 確率計画法として接続先を求解し、UEの接続先基地局を全体最適化

● 本発表のスコープ

- ・ 最適化問題の定式化
- ・ 理論式に基づくシミュレーション評価
 - ・ UEの移動を考慮しない固定環境で有効性を評価



確率的電波マップ (Local5G)

- 文献[6]の手法を用いて、Local5G (ミリ波) の確率的電波マップを作成
 - マップを細分化した各グリッド g に対し、基地局 b のRSRP確率分布 $\mathcal{D}_{g,b}^{\text{RSRP}}$ を定義
 - RSRP確率分布を基にSINR確率分布を算出

$$\xi_{g,b}^{\text{SINR}} = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{g,b}}{I_{g,b} + N_1} \right) [\text{dB}].$$

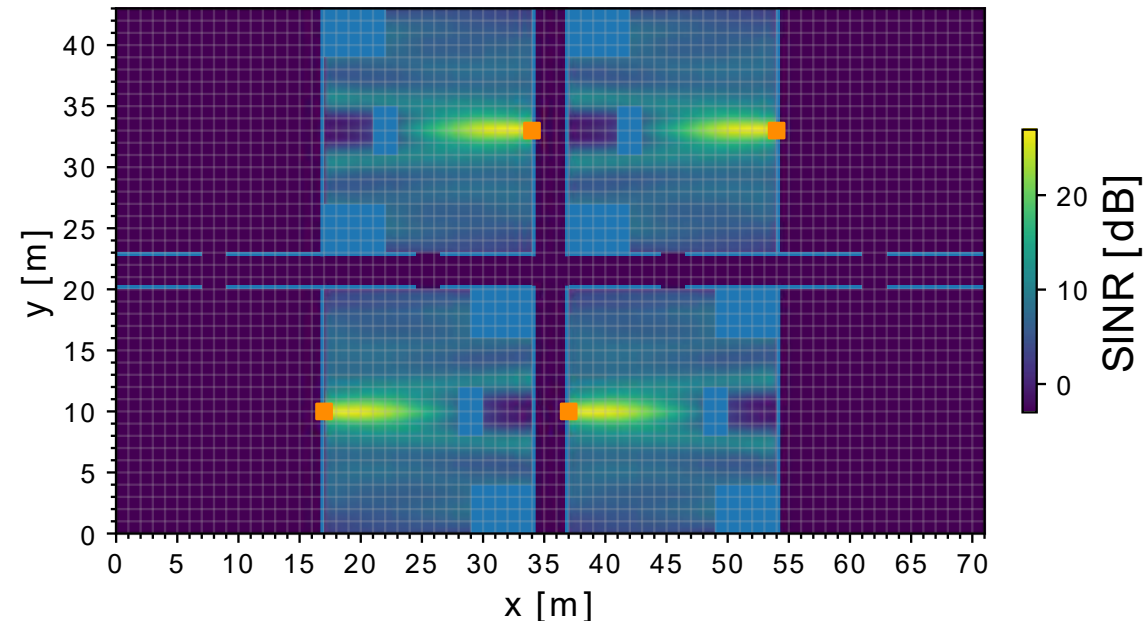
- グリッド g における基地局 b からの受信電力

$$S_{g,b} = 10^{\xi_{g,b}^{\text{RSRP}}/10} [\text{mW}].$$

隣接基地局 b_s からの受信電力 S_{g,b_s} も同様

- 干渉電力：隣接基地局からの受信電力の総和

$$I_{g,b} = \sum_{b_s \in \mathcal{B}_S, b_s \neq b} S_{g,b_s} [\text{mW}].$$



確率的電波マップ (Carrier5G, Wi-Fi)

7

- 共通モデル

- 確率的電波マップは正規分布として簡単化

$$\xi_{g,b}^{\text{SINR}} \sim \mathcal{N} \left(\mu^{\{\text{Wi-Fi}, \text{C5G}\}}, \left(\sigma^{\{\text{Wi-Fi}, \text{C5G}\}} \right)^2 \right).$$

- Carrier5G (Sub6)

- マップ全体で同一の確率分布を仮定し、 $\mu^{\text{C5G}}, \sigma^{\text{C5G}}$ はともに固定

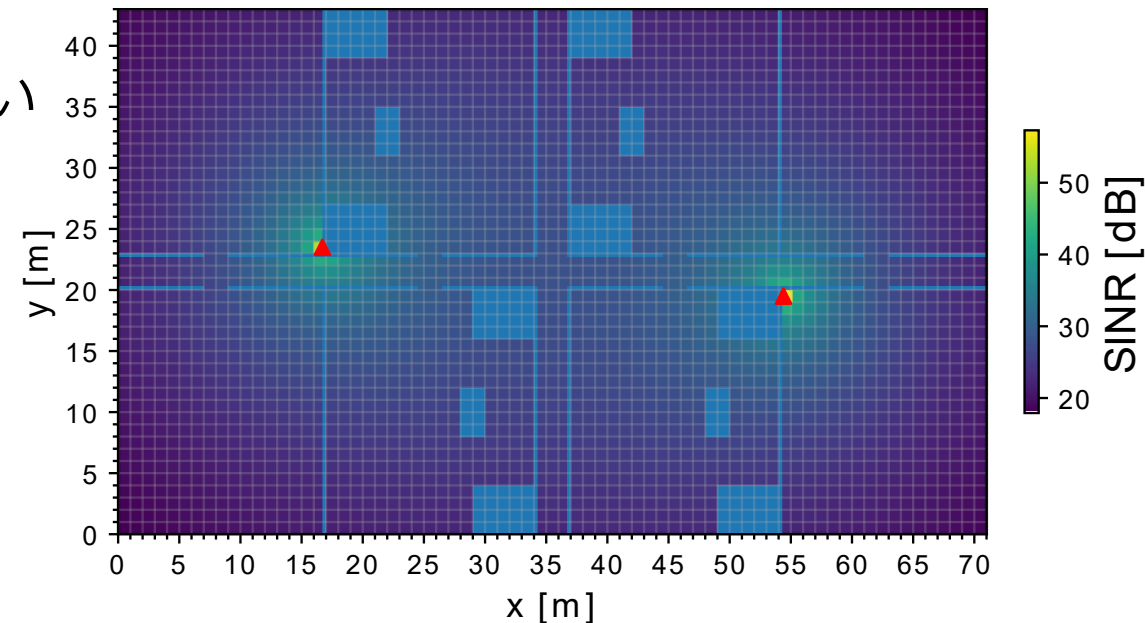
- Wi-Fi (2.4/5GHz)

- AP間でチャンネルが重複せず、干渉は発生しない
- 距離減衰を考慮して平均SINR $\mu^{\text{Wi-Fi}}$ を決定
 - 対数距離経路損失モデル[7]を導入

$$P_{g,b}^{\text{rx}} = P_b^{\text{tx}} - L_0 - 10\delta \log_{10} d_{g,b} \quad [\text{dBm}].$$

- 平均SINR : $\mu^{\text{Wi-Fi}} [\text{dB}] = P_{g,b}^{\text{rx}} - N_0.$

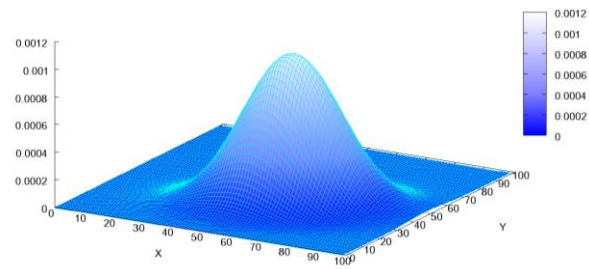
文字	内容
$P_{g,b}^{\text{rx}}$	受信電力
P_b^{tx}	送信電力
L_0	基準損失
δ	パスロス指数
$d_{g,b}$	基地局-グリッド間距離
N_0	雑音電力



UEの確率位置モデル

- UE位置を確率分布としてモデル化
 - ・ 観測した位置情報には、真の位置に対して測定誤差 ε_u が含まれる
 - ・ 測定誤差は二次元正規分布 $\mathcal{N}(0, \Sigma_u)$ に従う
- 確率的電波マップから、各UEの理想スループット確率分布を算出
 - ・ 測定誤差を考慮するため、UE位置をサンプリングして $|s|$ 点取得
 - ・ UE u のSINR確率変数 $\xi_{u,b}^{\text{SINR}}$ を混合分布として定義

$$\mathcal{D}_{u,b}^{\text{SINR}} \sim \sum_{s \in S} \frac{1}{|S|} \mathcal{D}_{g(s),b}^{\text{SINR}}, \quad \xi_{u,b}^{\text{SINR}} \sim \mathcal{D}_{u,b}^{\text{SINR}}.$$

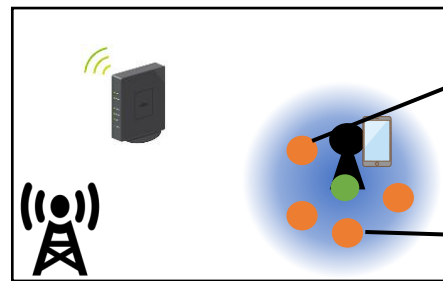


UE位置確率を、
2次元正規分布で仮定

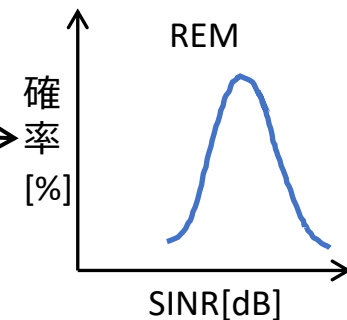
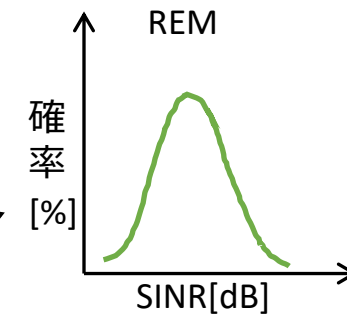
モンテカルロ法
でUE位置を取得

評価マップ

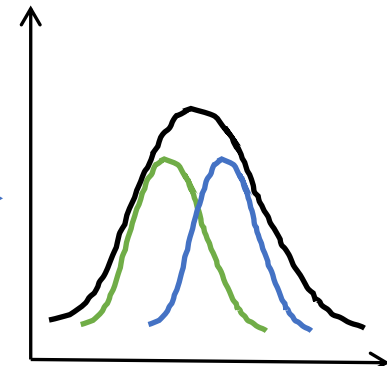
存在確率



- : 真のUE位置
- : サンプリングしたUE位置



各マップを混合し、
予測SINR分布を作成



スループット予測

- UEの接続先情報から、各UEの帯域割当を算出
 - UE u に割り当てられる帯域幅の比率 $\alpha_{u,b}$ を定義
 - 仮定：基地局 b に接続するUE間では、需要に比例して帯域が分配される

$$\alpha_{u,b} = \frac{R_u^{req}}{\sum_{u' \in \mathcal{U}_b} R_{u'}^{req}}, \quad \sum_{u \in \mathcal{U}_b} \alpha_{u,b} = 1.$$

R_u^{req} : 各UEが要求する
スループット
 $\mathcal{U}_b$: 基地局 b に接続
しているUEの集合

- UE毎のスループット確率分布 $\mathcal{D}_u^T$ を作成
 - UE u が得るスループット T_u を $\mathcal{D}_u^T$ の確率変数として、Shannon式_[8]に基づき予測
 - W_b : 基地局 b の総帯域幅 [MHz]

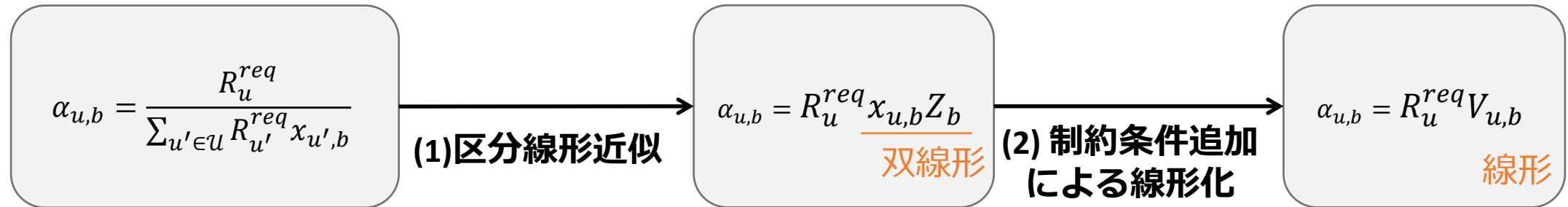
$$T_u = \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{u,b} \cdot \alpha_{u,b} W_b \cdot \log_2(1 + \xi_{u,b}^{\text{SINR}}).$$

目的関数と制約条件

- SLA (Service Level Agreement) の定義
 - ターゲットQoE : あるアプリケーションが要求するQoE水準
 - SLA : ターゲットQoEを確率 $1 - q$ 以上の時間割合で達成するという契約
 - アプリケーションがターゲットQoEを充足するために必要な無線通信の最低スループットを要求
 - 高画質ストリーミングを想定し $R_u^{req} = 20[\text{Mbps}]$ と設定
- 目的関数
 - SLAを満たすUE数の最大化 : $J = \max \sum_{u \in \mathcal{U}} \mathbf{1}! \left\{ \text{Percentile}_q(\mathcal{D}_u^T) \geq R_u^{req} \right\}.$
- 制約条件
 - 各UEはいずれか1つの基地局にのみ接続 : $\sum_{b \in \mathcal{B}} x_{u,b} = 1, \forall u \in \mathcal{U}.$
 - 各UEは期待SINRが0より大きい基地局に接続 : $E \left[\xi_{u,b}^{\text{SINR}} \right] > 0, \forall u \in \mathcal{U}.$

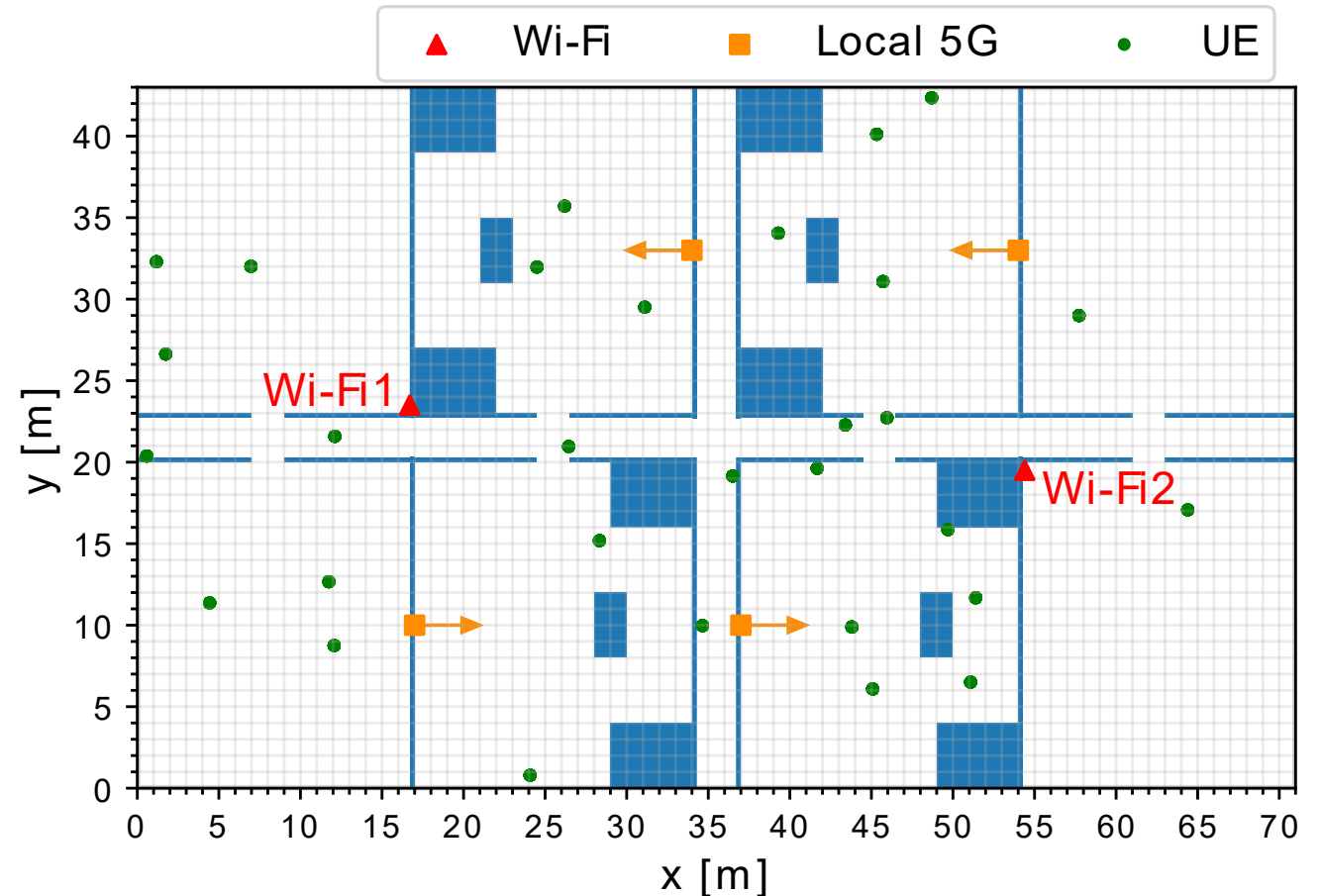
$\mathbf{1}! \{ \cdot \}$: 指示関数
 条件を満たす際に1、
 満たさない場合に0
 $\text{Percentile}_q(\mathcal{D}_u^T)$:
 確率分布の下側 q
 パーセンタイル値

- 定式化した最適化問題を線形近似し、混合整数線形計画法 (MILP) で求解
- 本定式化では非線形な箇所が2つ存在するため、それぞれ線形近似を行う
 1. 帯域割り当て (接続先基地局の決定変数に依存)



2. 目的関数 (確率分布のパーセンタイル値や指示関数に依存)
予測したスループット確率分布に対して、モンテカルロ法を用いることで線形近似
- 制約条件
 - (C1) サンプルごとのターゲットQoE達成判定: $T_{u,s}^e \geq R_u^{req} - M(1 - z_{u,s}) \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall s \in S, z_{u,s} \in \{0,1\}$.
 - (C2) SLA達成判定: $\sum_{s \in S} z_{u,s} \geq \lceil (1 - q)S \rceil y_u \quad \forall u \in \mathcal{U}, y_u \in \{0,1\}$.
 - 目的関数
 - C2の制約条件を満たすUE数の最大化: $\max \sum_{u \in \mathcal{U}} y_u$.

- 仮想屋内マップ : 71m × 43 m
 - ・ 8部屋 + 廊下
 - ・ 中央4部屋に障害物を配置 (青色部)
- 基地局配置
 - ・ Local5G: 4台
 - ・ 一部屋に1台、4部屋に配置
 - ・ 部屋中央から、反対側に向かってビームを放出
 - ・ Wi-Fi: 2台
 - ・ エリア全体をカバーする配置
 - ・ Carrier5G: 1台
 - ・ マップ全体を一律にカバー
- UE配置
 - ・ 障害物を除き、ランダムに配置
 - ・ 今回は移動しない前提



- シミュレーション設定
 - UE数を変数とし、各UE数に対し10回シミュレーションを行う
 - 使用ソルバ : Gurobi Optimizer[9]
- 比較手法
 - MAX-SINR
 - 期待 SINR 値が最大となる基地局に接続
 - CRE (Cell Range Expansion)
 - 各基地局に設定されたバイアス β_b により負荷分散を行う手法
$$x_{u,b} = \arg \max_{b \in \mathcal{B}} \left(\mathbb{E} \left[\xi_{u,b}^{\text{SINR}} \right] + \beta_b \right).$$
$$\beta_{L5G} = 25.0, \beta_{\text{Wi-Fi}} = 0, \beta_{C5G} = 13.5[\text{dB}]$$
 - Expected-TP
 - 提案手法に対し、スループットの期待値を使用

カテゴリ	変数	値
UE	共分散行列 Σ_u	diag(1,1) m ²
Carrier5G	平均SINR μ_{C5G}^{SINR}	15 dB
	SINR分散 σ_{C5G}^2	4 dB ²
Wi-Fi	送信電力 $P_{\text{Wi-Fi}}^{\text{tx}}$	17 dBm
	基準損失 L_0	-46 dB
	パスロス指数 δ	3.0
	雑音電力 N_0	-95 dBm
	SINR分散 $\sigma_{\text{Wi-Fi}}^2$	4 dB ²
Local5G	雑音電力 N_1	-94 dBm
帯域幅	Wi-Fi $W_{\text{Wi-Fi}}$	80 MHz
	Local5G W_{L5G}	100 MHz
	Carrier5G W_{C5G}	100 MHz

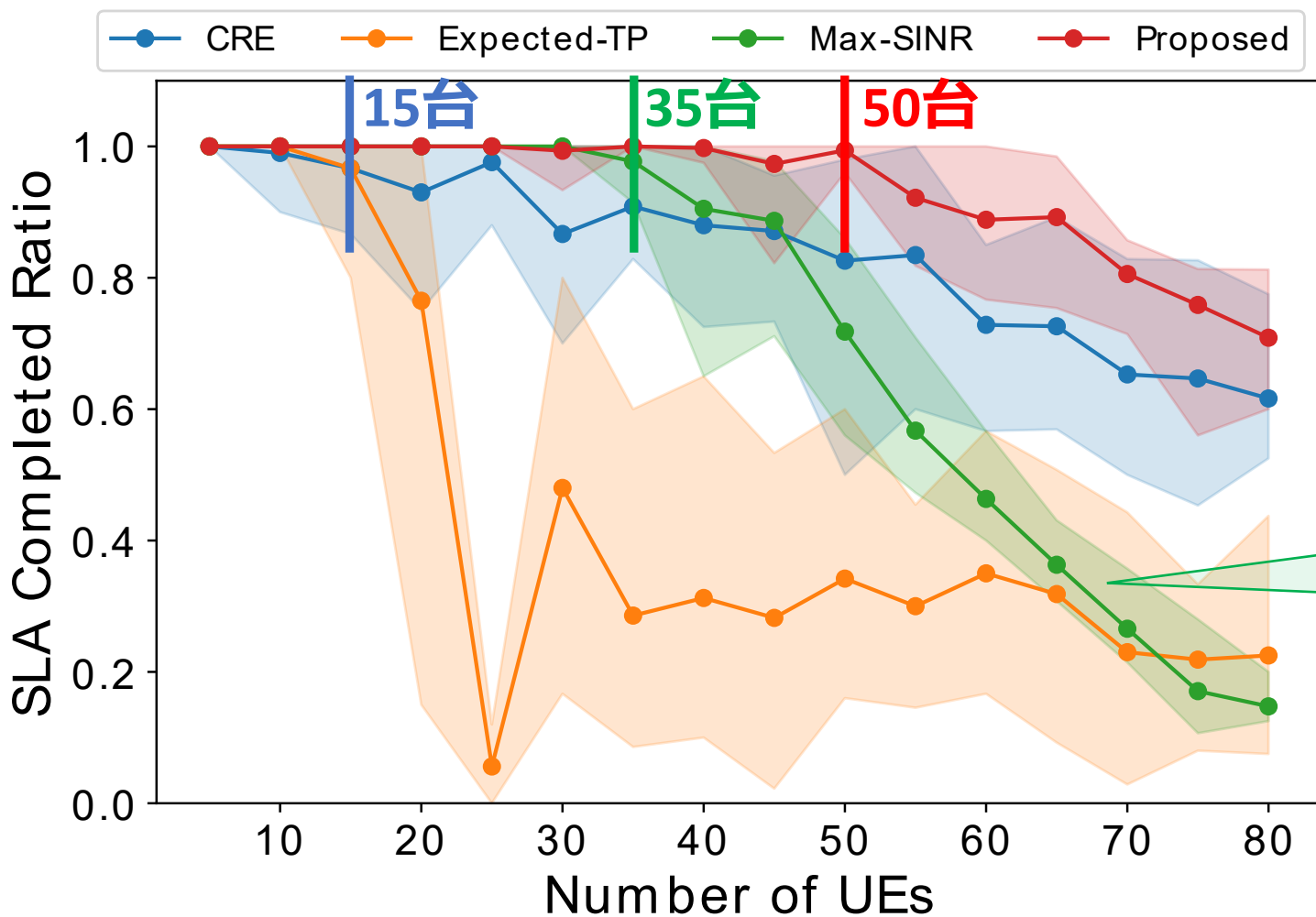
基地局への通信需要が均等化するよう事前調整

[9] Gurobi Optimization, LLC, “Gurobi Optimizer Reference Manual,” 2026. <https://www.gurobi.com>.

評価結果：SLA達成割合

14

- 提案手法はより多くのUEに対してQoEを安定的に保証できる



UE数に対するSLA達成割合の推移

スループット確率分布の下側裾野を十分に考慮できない

➤ 通信品質が不安定な基地局への接続を誘導してしまう

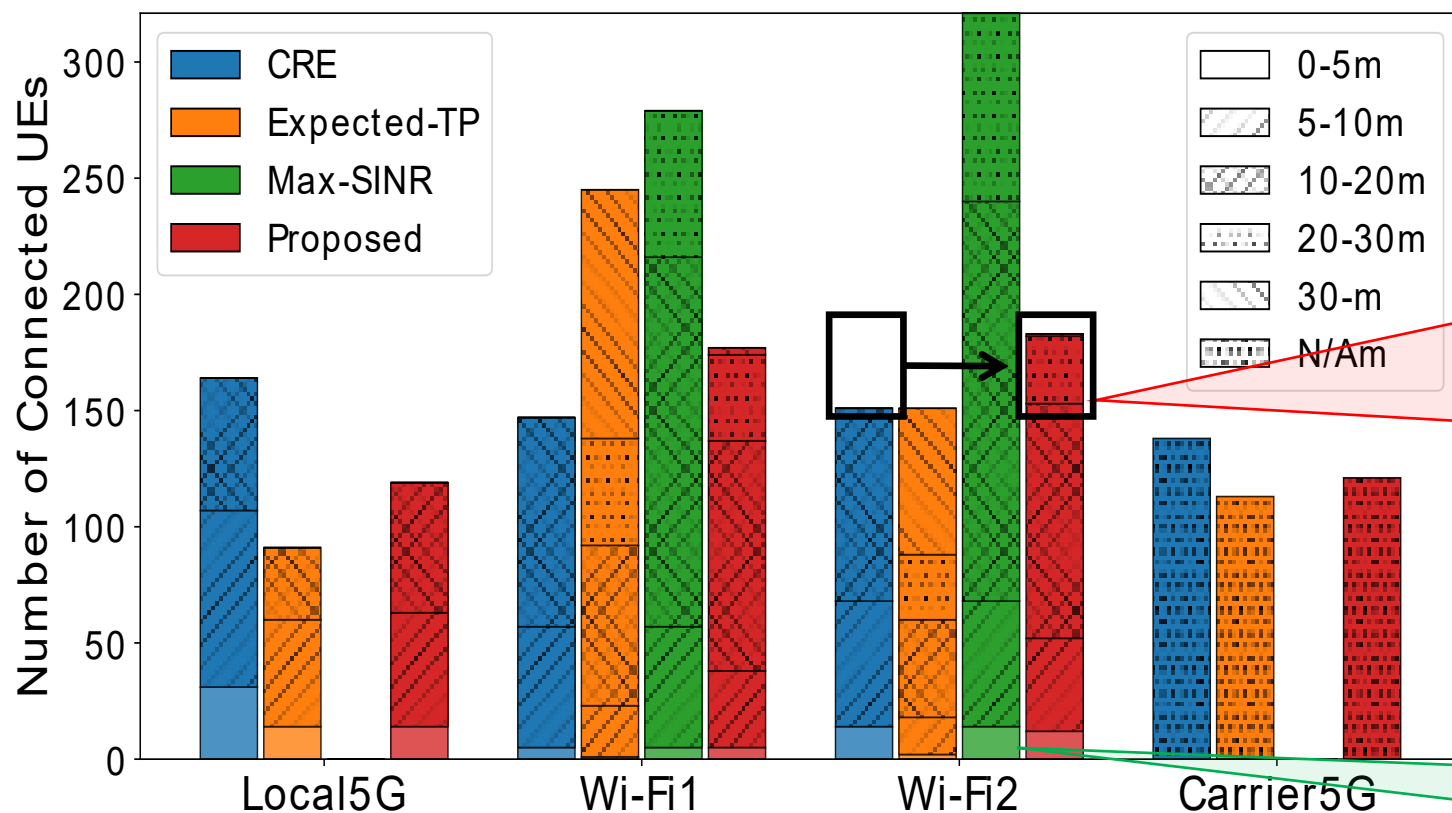
同一基地局への接続集中により、共有資源が競合し、性能劣化

期待値に基づく制御では低品質側の通信品質を十分に評価できない

評価結果：基地局からの距離による接続傾向

15

- 提案手法は通信品質分布の不確実性を考慮しつつ接続先を選択
 - ・ 不安定なUEを無理にLocal5Gへ割り当てることなく、Wi-Fiへの過集中も抑制



UEとの距離が近い基地局間での負荷分散ができています

20m以上離れたUEもWi-Fiに接続
➤ 単に強い電波の基地局に対して負荷分散的に接続するのではなく、通信品質分布の不確実性を考慮して接続先を選択

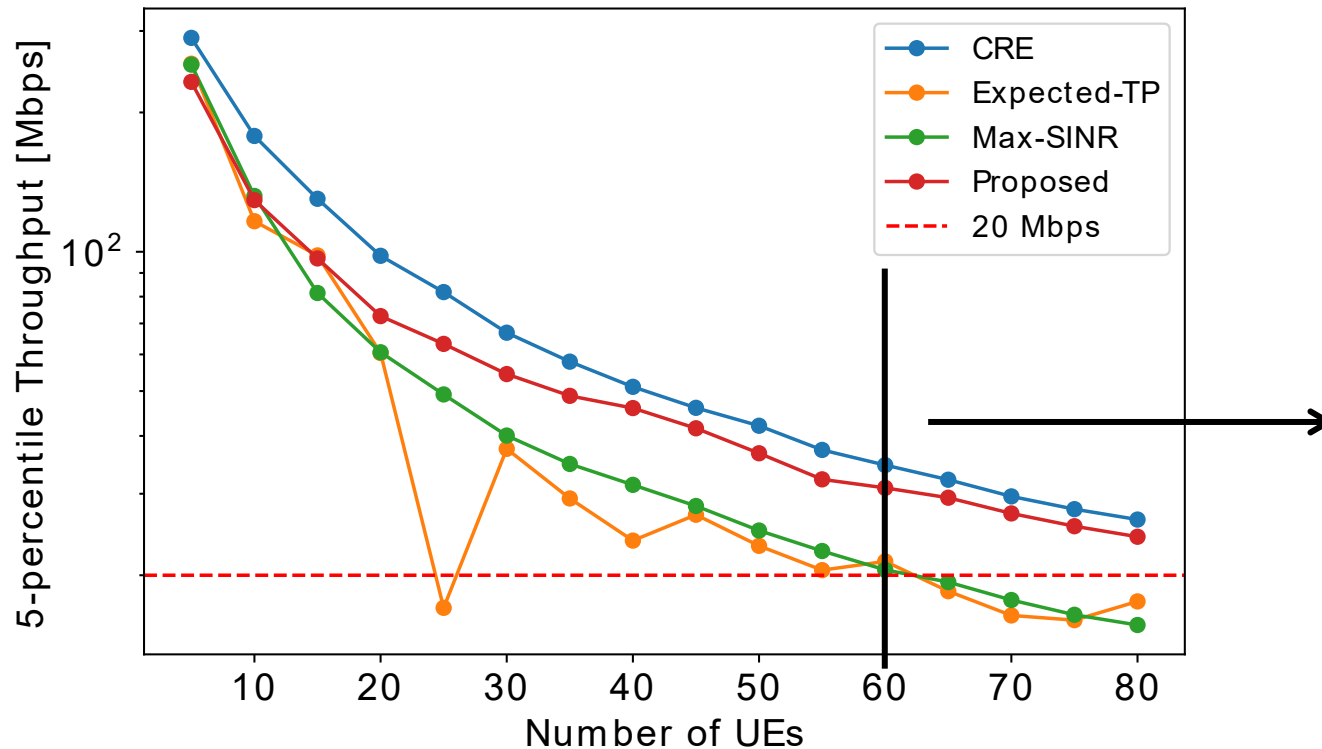
電波が安定するWi-Fi AP へ接続が集中

UE数60における各手法の接続結果
ただし、Carrier5Gはマップで一様なため、距離は定義されない

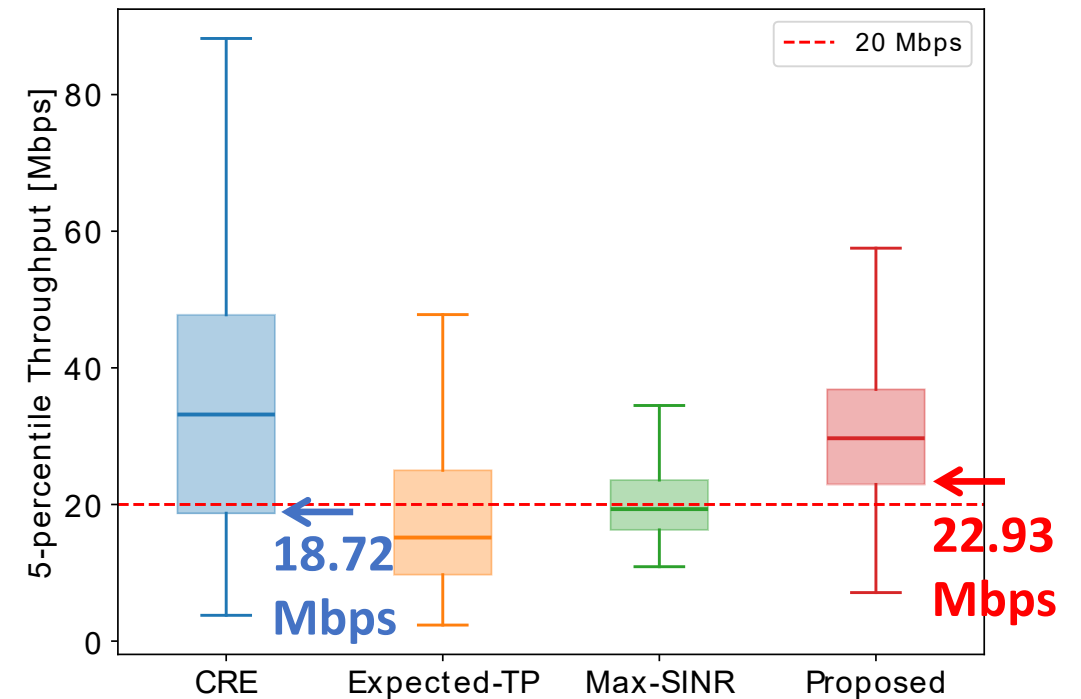
評価結果：5%-ileスループット値の比較

16

- 左図：CREは提案手法に比べ、平均には良好な性能を示す
- 右図：一方で、不利な通信条件に置かれたUEのQoEを安定して保証できない



UE数に対する5パーセンタイルの平均スループット値の推移



UE数60における5パーセンタイルのスループット値

- QoEの確率的保証を目的としたHetNet環境における接続制御手法を提案
 - ・ 観測情報から通信品質を確率的に推測し、分布の下側裾野まで考慮
 - ・ 提案手法は既存手法に比べて、**より多くのUEに対して安定したQoE保証が可能**
- 今後の課題
 - ・ 端末の移動モデルを導入し、シミュレーションに時間軸を導入
 - ・ ハンドオーバー制御やセルエッジ付近での挙動を検証
 - ・ 環境あるいは実環境に近いネットワークシミュレータへ適用し、提案方式の有効性を検証