

SITAワークショップ2: 機械学習・深層展開・量子計算がもたらす 無線通信システム設計の未来

Koji Ishibashi, Ph.D.

Director and Professor
Advanced Wireless & Communication Research Center (AWCC)
The University of Electro-Communications, Tokyo Japan

This work was supported by JST, CRONOS, Japan Grant Number JPMJCS24N1

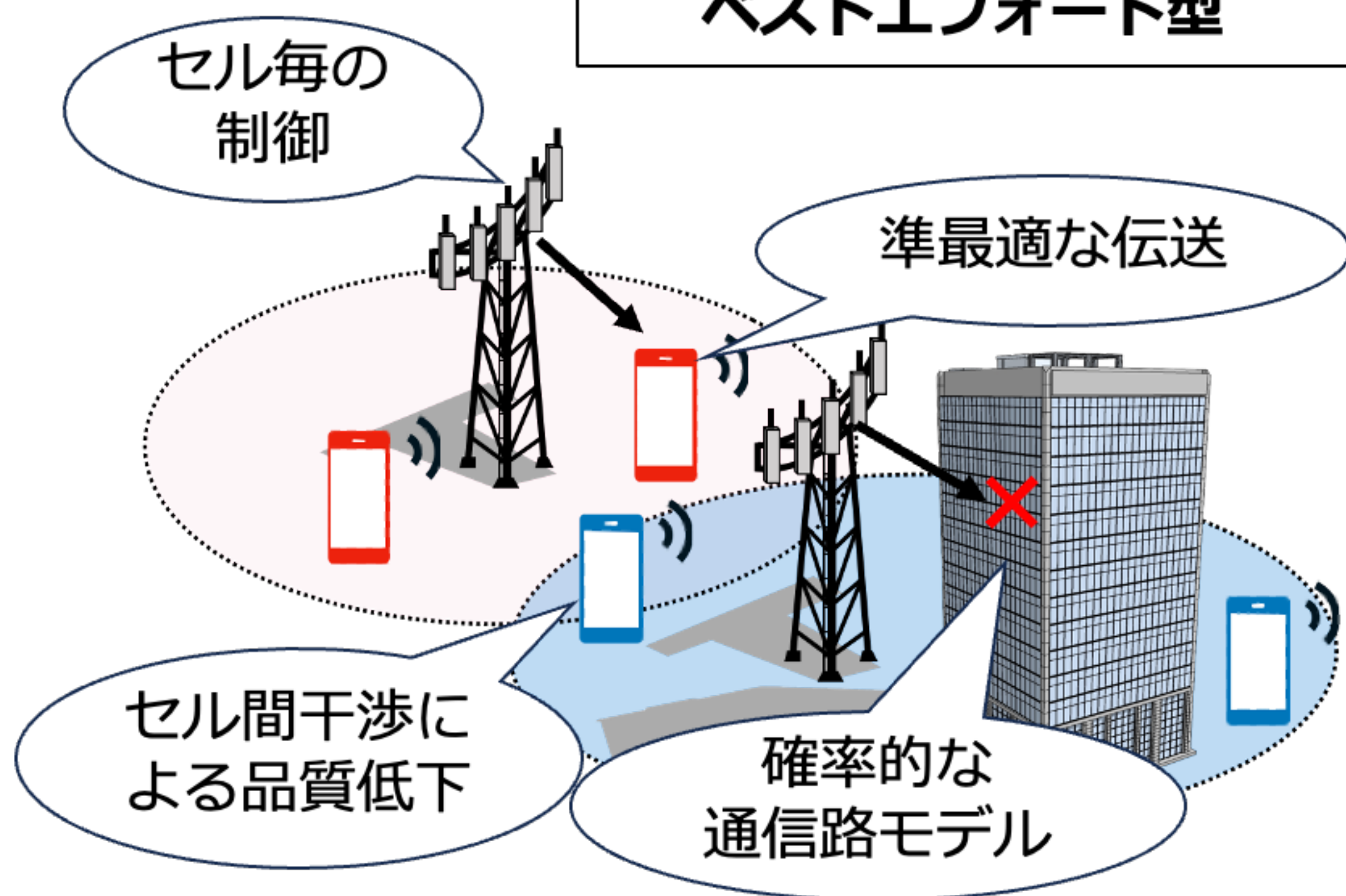
第48回情報理論とその応用シンポジウム @ 福島

5Gにおいても、各ユーザの求める伝送速度・遅延性能といった通信品質を、常に保証することはできず、ベストエフォートから脱却できていない

⇒ 無線通信の歴史と発展は、**実用化の観点からの工学的妥協の賜物**

従来型セル設計における常識

ベストエフォート型



伝搬路

理想：マクスウェル方程式による厳密計算

妥協：伝搬特性をよく近似できる数理・統計的モデルを利用

基地局群制御のための近似・直交化

理想：あらゆるパラメータを全体最適化

妥協：基地局間干渉の統計的近似や周波数分割による直交化で対処

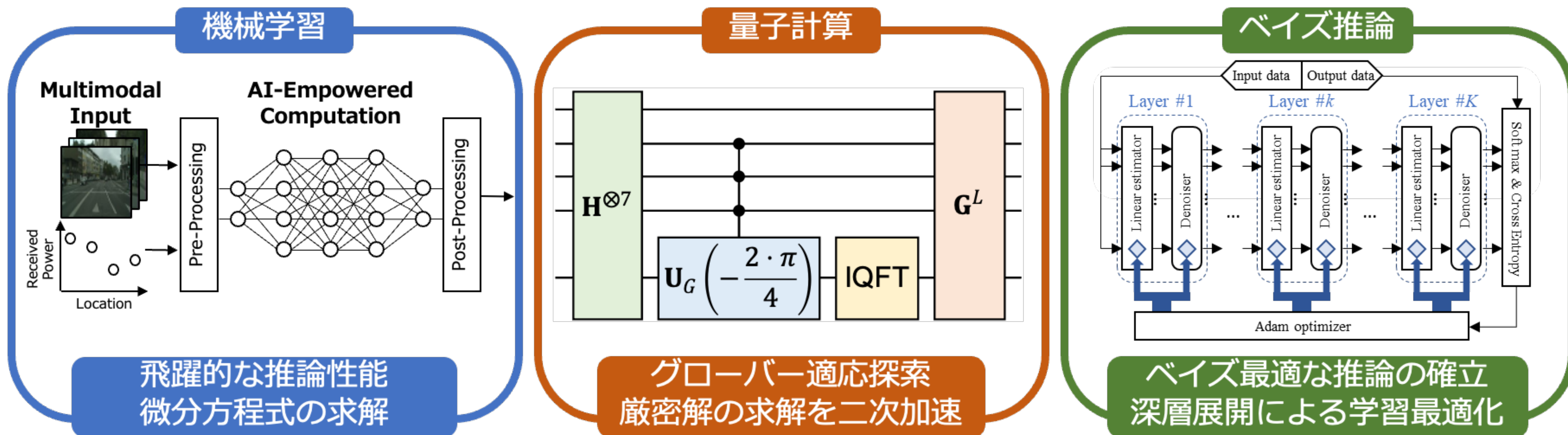
準最適な線形復調

理想：最尤復調での誤り率最小化

妥協：低負荷・低精度な線形等化

新たな技術の急速な発展

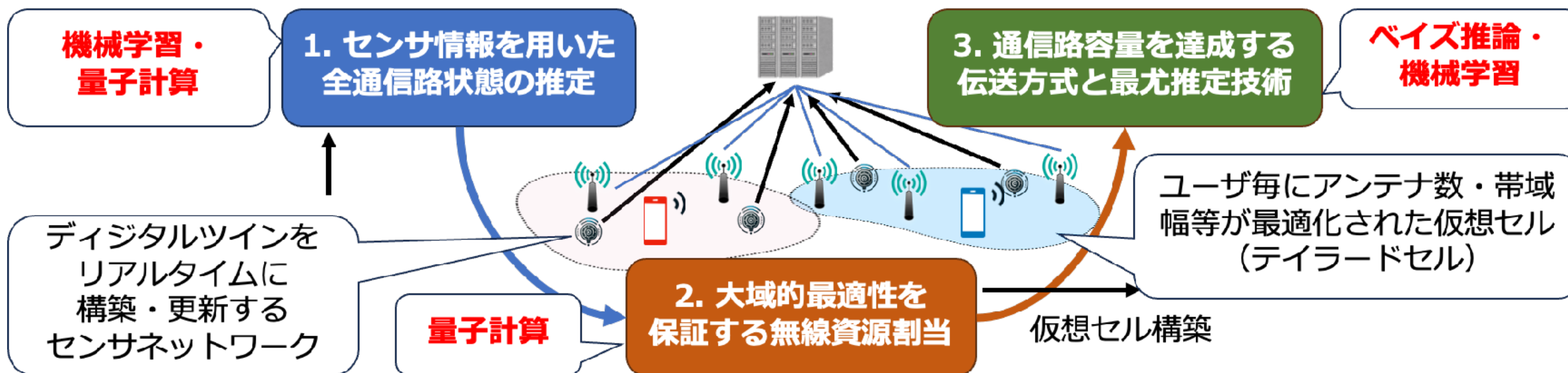
- 機械学習・量子技術・ベイズ推論など様々な技術が急速に発展



これらの新しい技術をベースに既存無線通信における**工学的妥協を見直し**、周波数を時間的・空間的に極限まで活用したらどうなるのか？

分散MIMOに基づく極限的設計

- 固定的なセル構成の限界を打破するために、分散アンテナがユーザの要求に応じて有機的に連携し、**仮想セル（テイラードセル）**を構成
- 実現のためには、以下の3つの技術が必要
 - センサ情報を用いたX-to-X通信路の高精度推定技術
 - 大域的最適性を保証可能な量子最適化技術に基づく無線資源割当
 - 通信路容量を達成する伝送方式と実時間演算可能な大規模最尤推定技術



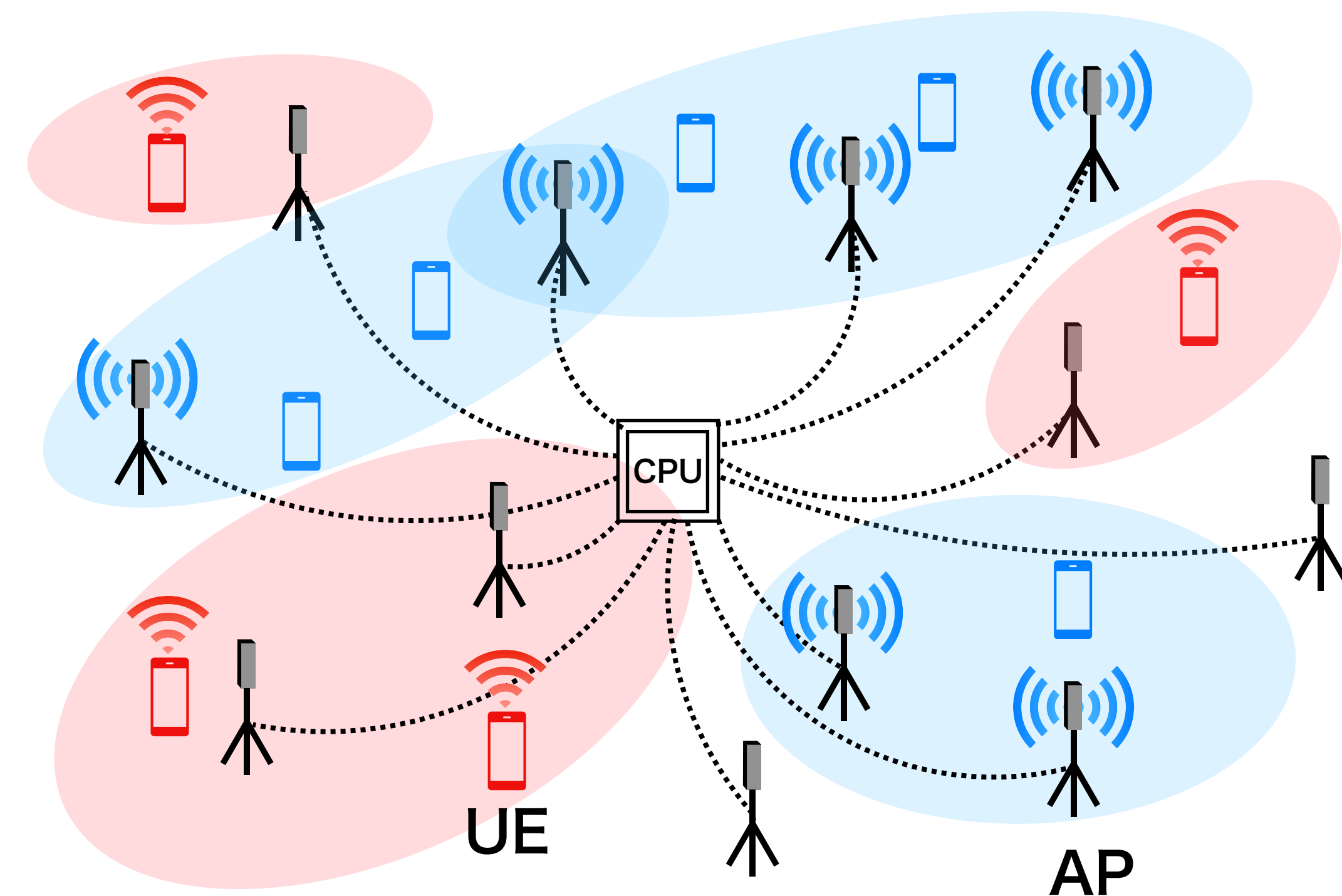
□ 全リソースを同時最適化は難しい

- 空間軸上のみの分散アンテナ最適化
- ネットワーク全二重通信セルフリー大規模MIMO (NAFD CF-mMIMO)

□ 最適化には全通信路応答の知識が必要

- どうやって必要な変数を知るか？
- 微分可能レイトレーシング

- アクセスポイント (AP) に上り・下りを排他的に割り当て
- 空間自由度を活用することで和容量を増加
- AP割り当て・ビームフォーミングをどう設計すべきか？



凸最適化による設計

□ 古典的な最適化で、できる限り頑張ってみる。

$$\text{maximize}_{\mathbf{w}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{D}_k} \left(\prod_{k \in \mathcal{K}} \log_2(1 + \eta_k) \right)^{\frac{1}{K}} \quad \leftarrow \text{Objective Function (Geometric Mean Maximization)}$$

$$\text{subject to } d_{mk} \in \{0, 1\}, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K} \quad \leftarrow \text{AP Clustering Variable}$$

$$1 \leq \sum_{m \in \mathcal{M}} d_{mk} \leq T, \forall k \in \mathcal{K} \quad \leftarrow \text{Constraints on the number of APs}$$

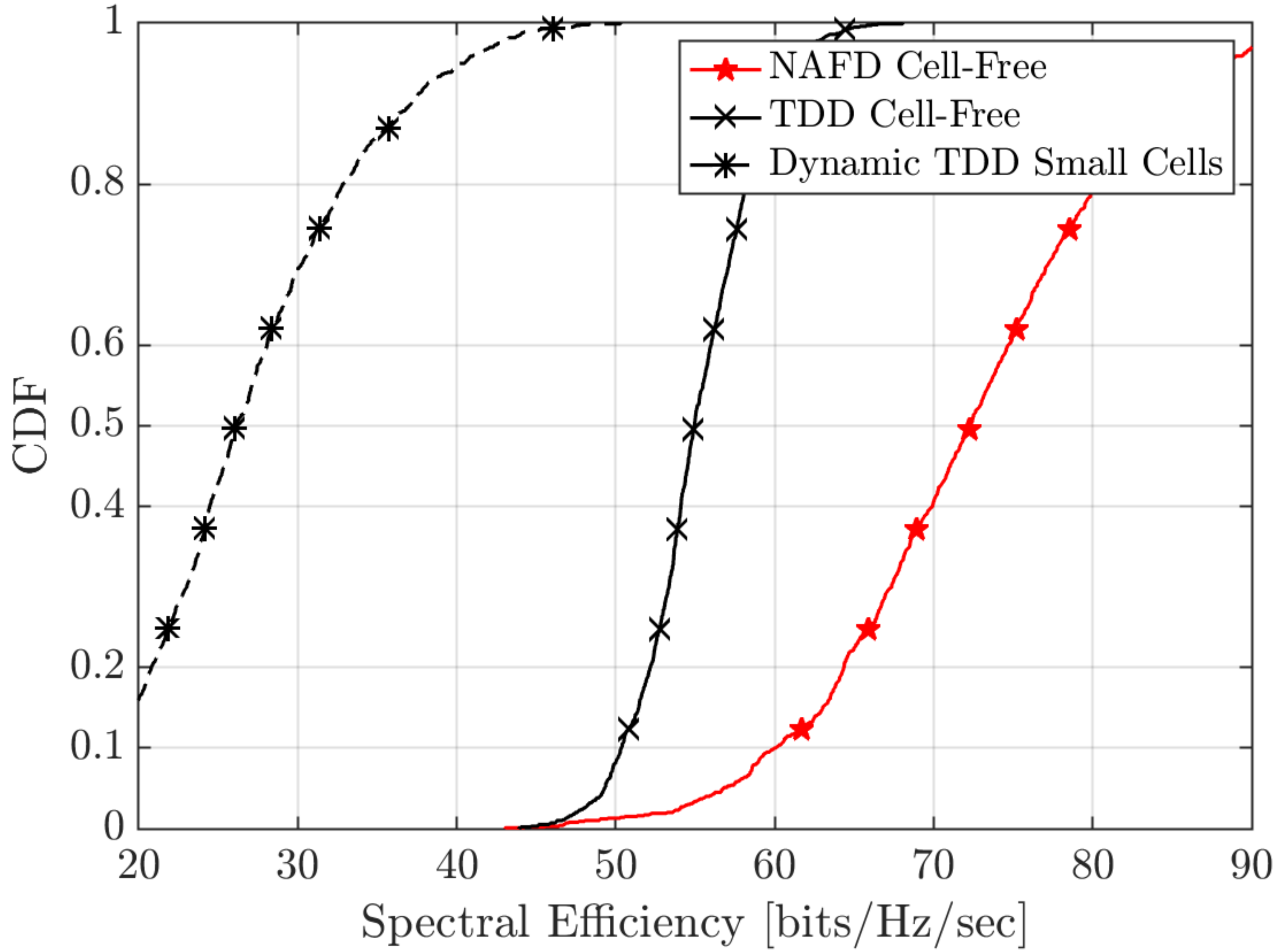
$$d_{mk_{ul}} + d_{mk_{dl}} = 1, \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K} \quad \leftarrow \text{Constraints for NAFD}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_{ul}} |v_{mk} d_{mk}|^2 \leq 1, \forall m \in \mathcal{M}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_{dl}} |w_{mk} d_{mk}|^2 \leq P_{\max}, \forall m \in \mathcal{M}$$

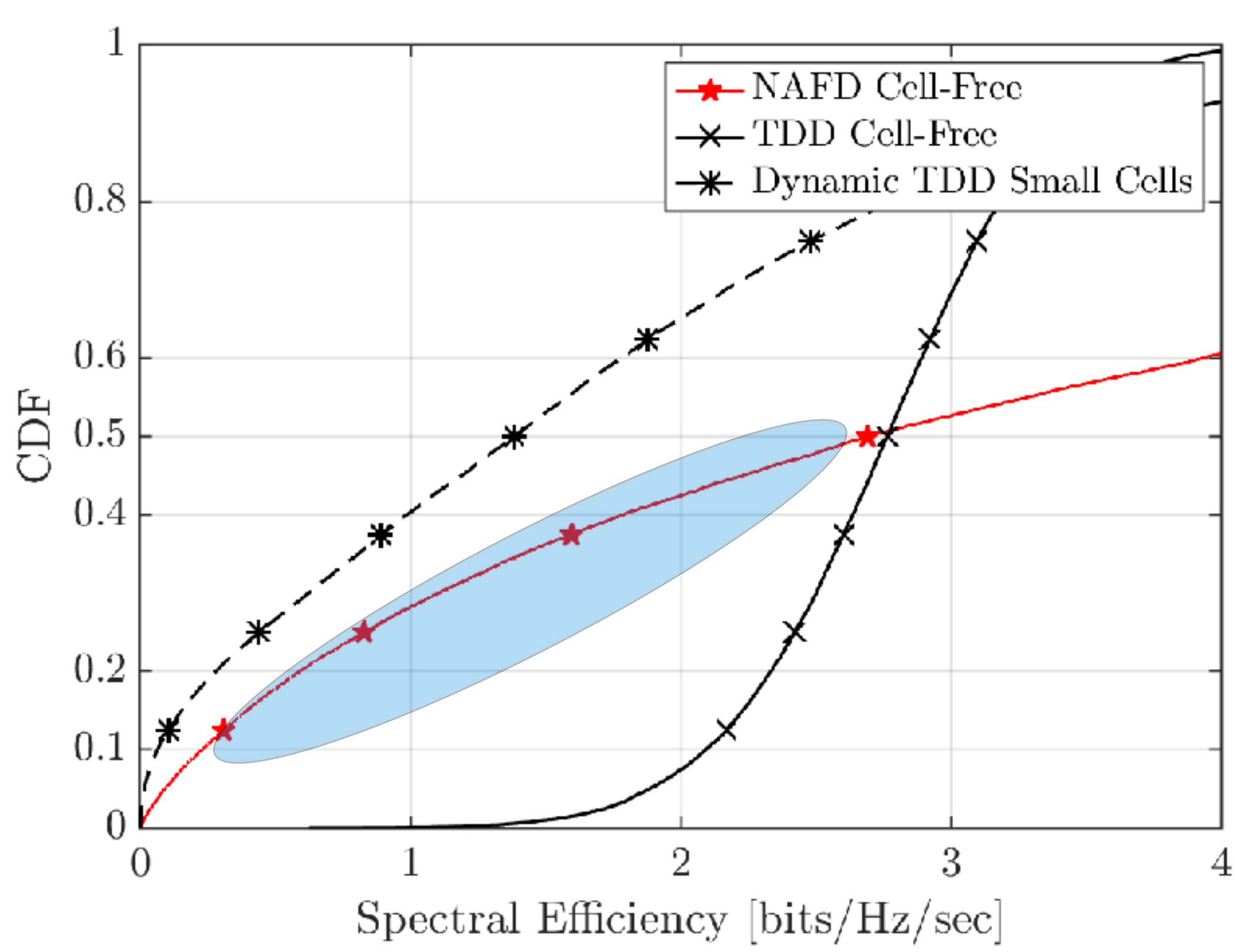
Power constraints for beamforming

数值結果：和容量

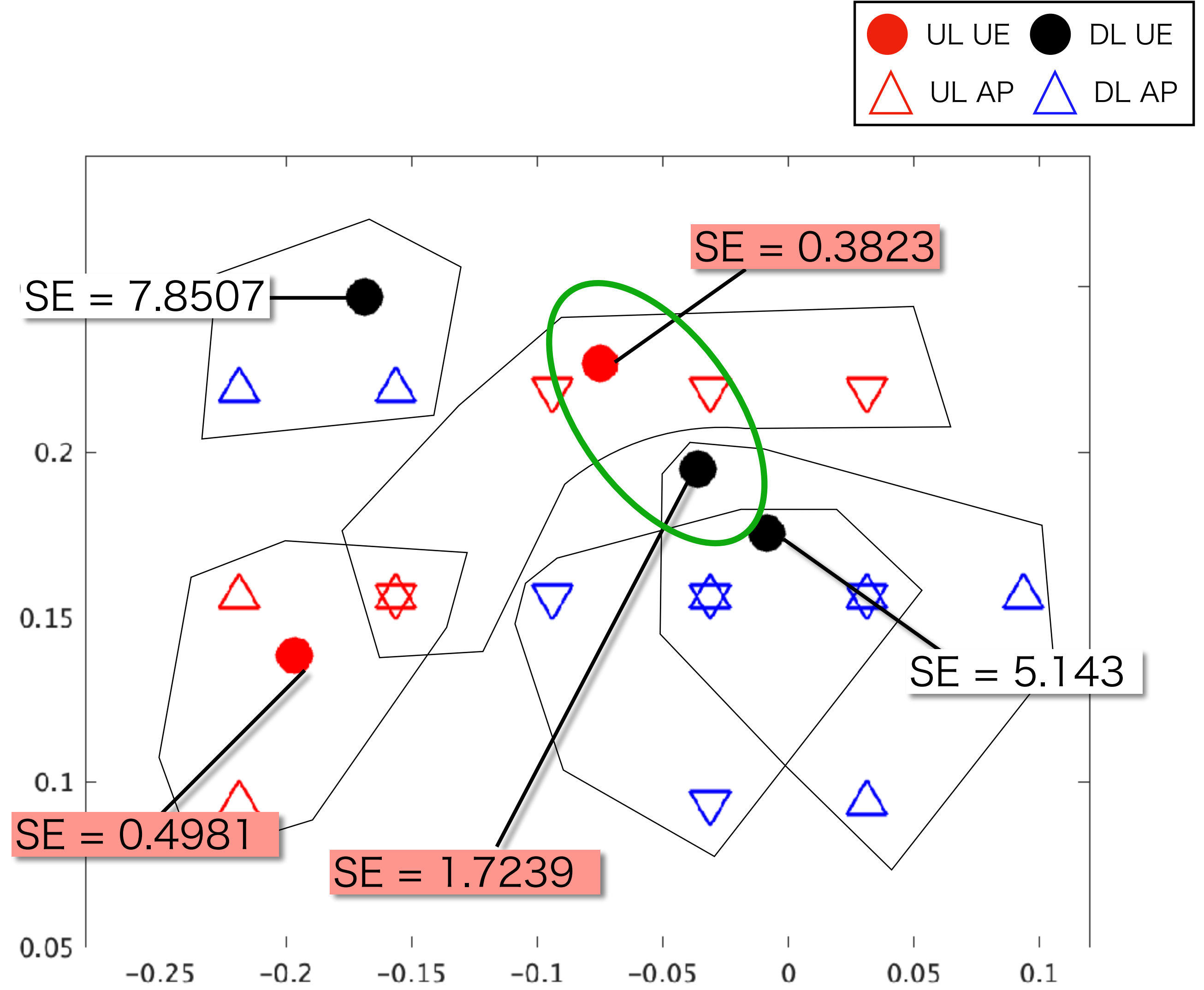


Carrier frequency : 1.9 [GHz]
Number of APs : 50
Number of UEs : 20 (UL:DL = 1:1)

NAFDの限界



UEの50%は、TDDのSEより低い

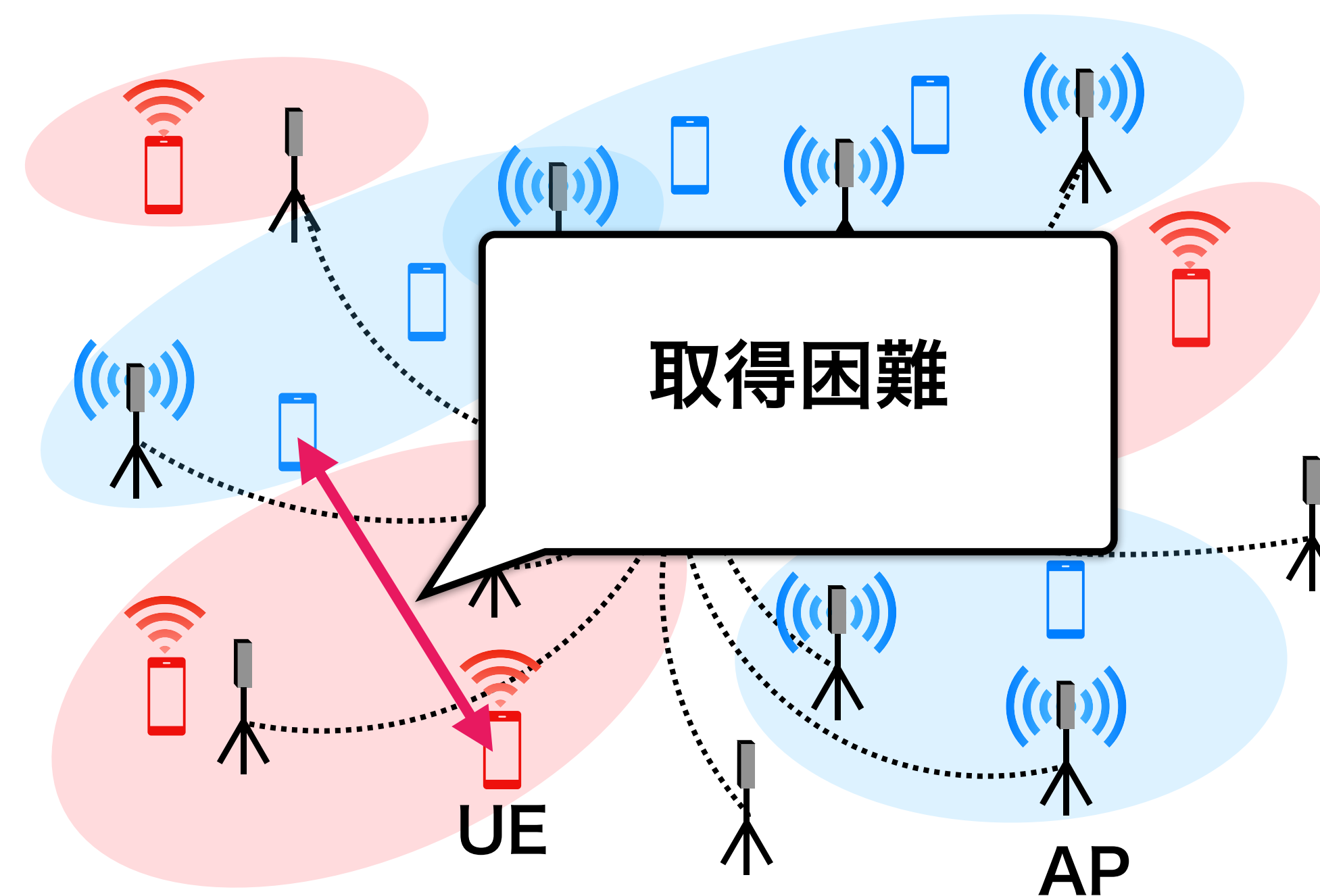


Carrier frequency : 1.9 [GHz]
 Number of APs : 50
 Number of UEs : 20 (UL:DL = 1:1)

- NAFDは優れた手法だが、空間次元の活用だけでは不十分
- 時間・周波数・空間を同時最適化したい
 - 現状手詰まり（気味）
- さらにユーザのレート制約を満たしたい
 - 良い初期解を見つける方法がなく、やっぱり手詰まり（気味）

NAFDにおける通信路推定問題

- NAFDでは空間領域において干渉の制御を行う
 - 設計には, AP-AP間, UE-AP間に加えて, UE-UE間の通信路応答が必須
 - UE-UE間の通信路をどう取得するか?
- UE-UE間を長期統計で設計しても, 性能劣化は小さい [10]
 - 微分可能レイトレーシング

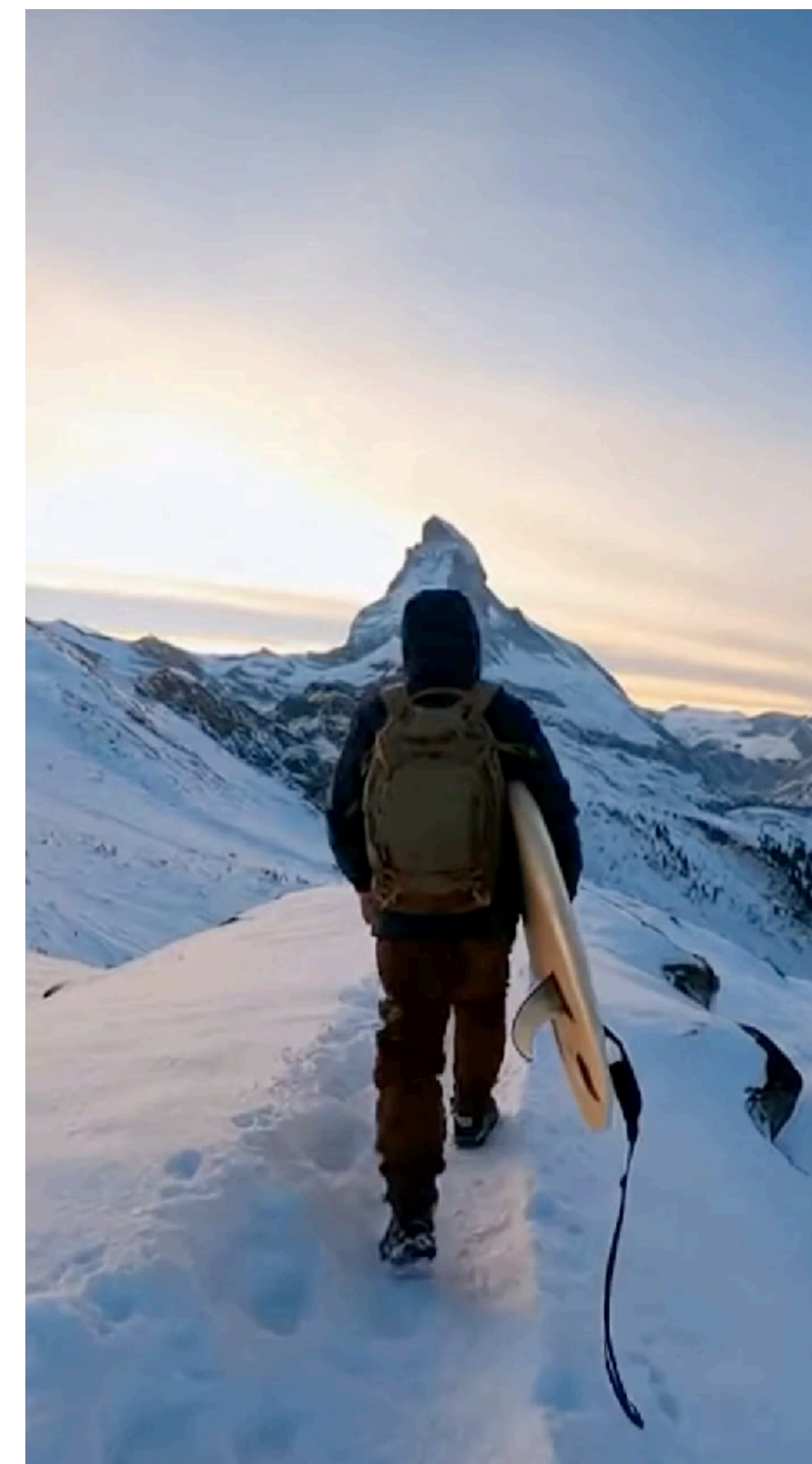


[10] S. Fukue, G. T. F. de Abreu, and K. Ishibashi, "Network-Assisted Full-Duplex Millimeter-Wave Cell-Free Massive MIMO with Localization-Aided Inter-User Channel Estimation," ICOIN 2023, Bangkok, Kingdom of Thailand, pp.13-18, (2023.1)

- なんか、それっぽいものを学習できることはわかった
 - 学習できたものは決して真値ではない（モデル誤差を埋めてるだけ）
- 二次統計量までが予測できるなら多くの場合には十分
- 推定情報がどこまで設計に使えるかは今後の課題

まとめ：とにかく高い山を目指す

- 工学とは、結局「美しき妥協の産物」
- 色々妥協しても、解ける問題の方が少ない
 - 道具不足
 - やることが一杯
 - 人が足りない
- **新技術の波に乗って、高い山と一緒に目指したい。**
 - このあと 空中計算、量子、深層展開



“サーフィン抱えて雪山登山”