

6G 無線技術プロジェクト Advanced MIMO WG — WG活動および白書の紹介 —

2025年9月30日

Advanced MIMO Working Group

Advanced MIMO Working Groupに関する紹介

• Advanced MIMO Working Group (A-MIMO WG)

- Chair: 村岡一志 (NEC)
- Vice chairs: 内田大誠 (NTT)、神渡 俊介 (KDDI総合研究所)
- 40人 (2025年9月時点)
 - 産業界: KDDI, NTT, NTTドコモ, ソフトバンク, NEC, シャープ, エリクソン・ジャパン, パナソニック, 京セラ, ソニー, Huawei Japan, NICT, キーサイト, 大日本印刷
 - 大学: 北大、電通大、東京理科大、東北大、福岡大、東大、科学大

• WGの目的

- Advanced MIMO技術に関連する国内および国際的な技術動向、標準化活動、実用的な応用事例やシナリオに関する議論を実施
- Advanced MIMO技術の方向性を提案

• 最近の活動

- Advanced MIMO関連のトピックを含む月例会議

目次

- 白書の紹介
 - 序文
 - Section I: Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G
 - Section II: Recent Activities of Advanced MIMO Technologies in Japan



序文

• 6Gに対する期待と要求

- AI時代に、CPSやデジタルツインを構築するための基盤インフラ
- コスト効率が高く、サステナブルなネットワーク
- 各周波数帯域を効果的に活用 (Sub6 GHz、ミリ波、FR3)

• MIMO技術の進化

- シングルユーザMIMOからマルチユーザMIMOへ
- MIMOから Massive MIMOへ
- 単一TRP (Transmission and Reception Point) からマルチTRP (分散MIMO、D-MIMO)へ

• Advanced MIMOに向けて

- より多くの基地局 (BS) とユーザー端末 (UE) を含める形で Massive MIMOと分散MIMO技術の両方がそれぞれ進化・統合、最終的にはMIMOの概念はシステムの全ての空間伝送を最適化
- 本白書は、従来のMassive MIMOやマルチTRPから進化したMIMO技術を広くAdvanced MIMO技術と定義

• 日本国内のR&Dの独自性

- 様々な周波数帯 (Sub 6GHz/ミリ波/Sub THz) における分散MIMOの実証実験やアーキテクチャ検討が多数

Section I

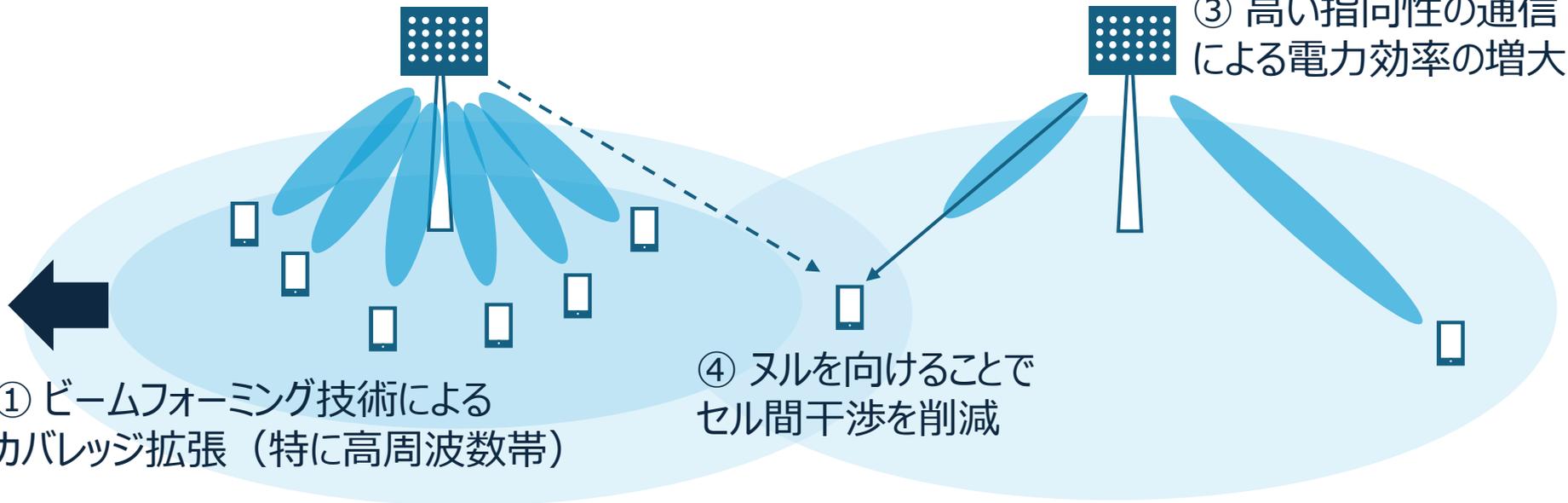
Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

I. Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

I-1. Current Status and Challenges of Massive MIMO

Massive MIMOの利点

② 多数のUEの空間多重による
システムキャパシティの増大

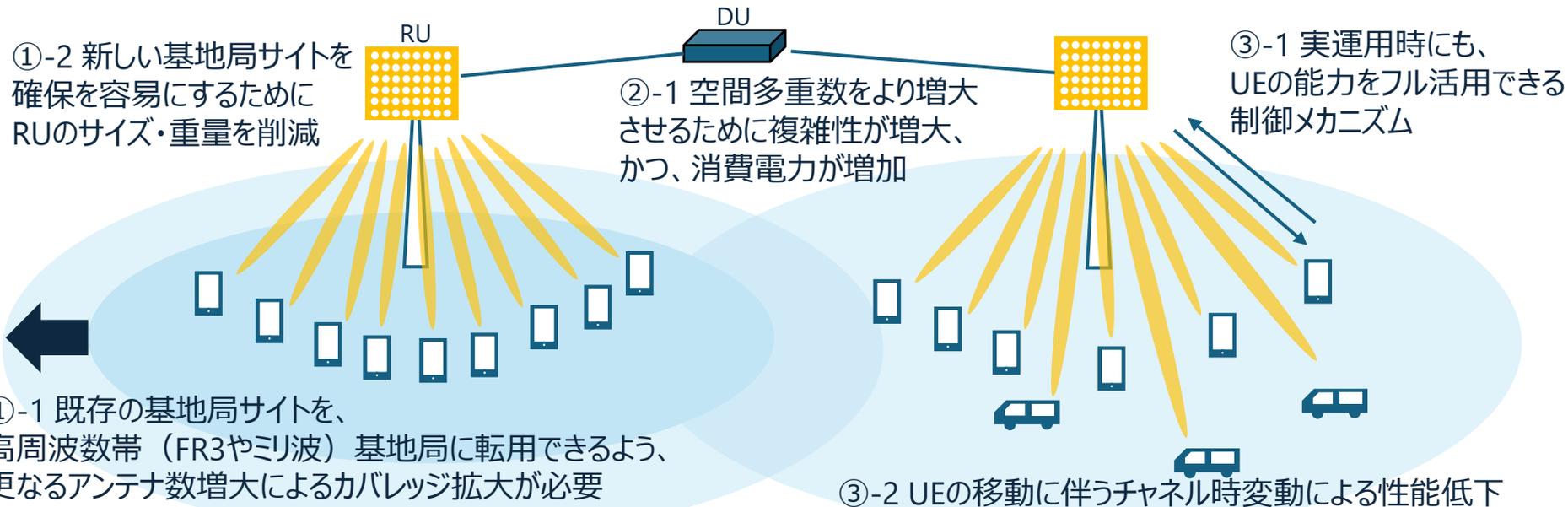


I. Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

I-1. Current Status and Challenges of Massive MIMO

Advanced Massive MIMOに向けた技術課題

- ① 基地局展開や周波数に関わる課題
- ② 基地局やユーザ端末の装置上の課題
- ③ 伝送方式上の課題

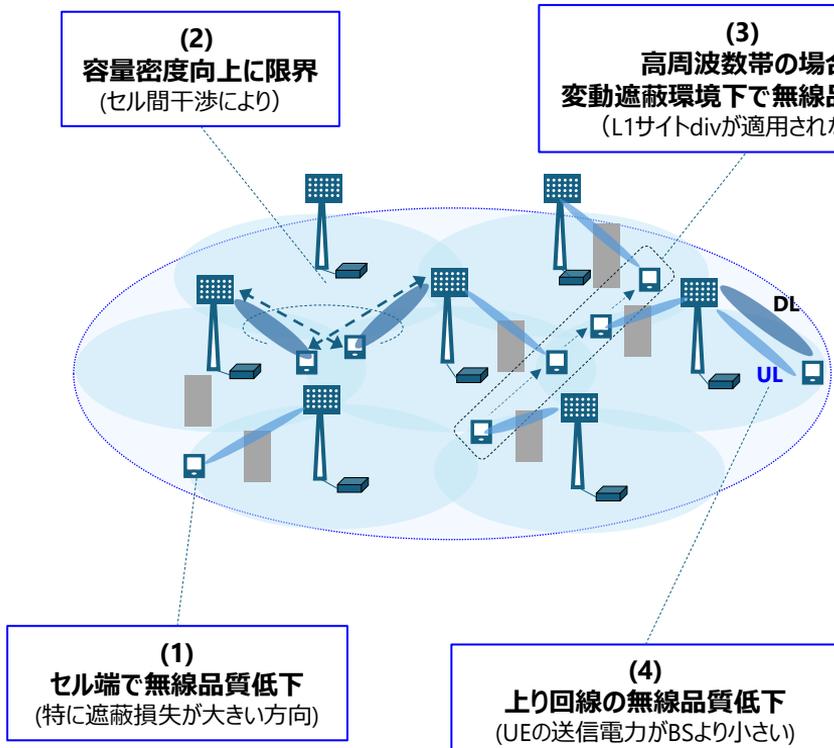


I. Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

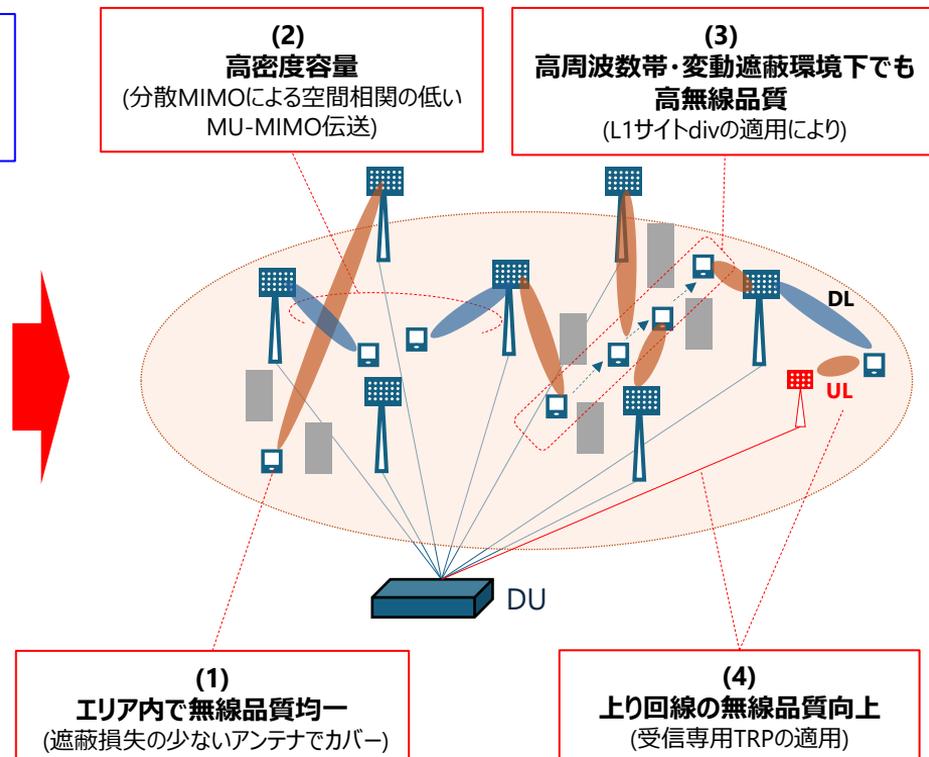
I-1. Current Status and Challenges of Distributed MIMO

Distributed MIMOの利点

セルラ構成



分散MIMO構成



I. Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

I-1. Current Status and Challenges of Massive MIMO

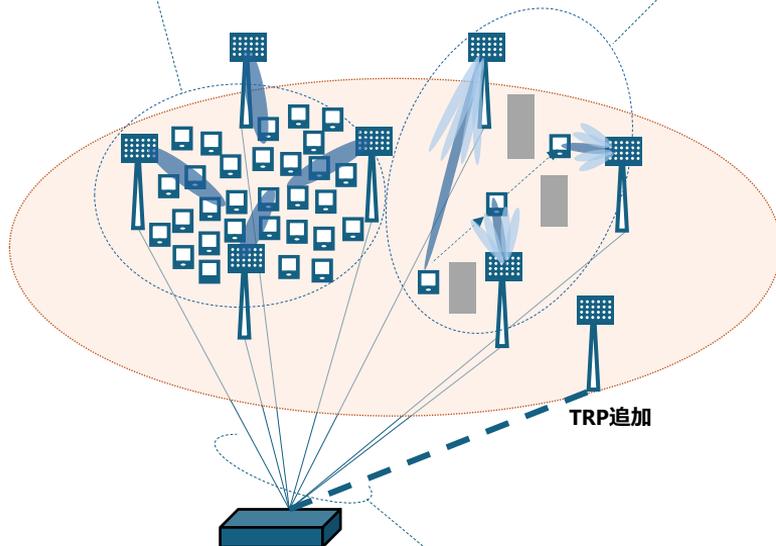
分散MIMOの技術課題

TRPという軸の空間リソースの増加：

- スケジューラが複雑化.
- 直交参照信号を柔軟に増加できる仕組み.

高周波数帯適用の場合：

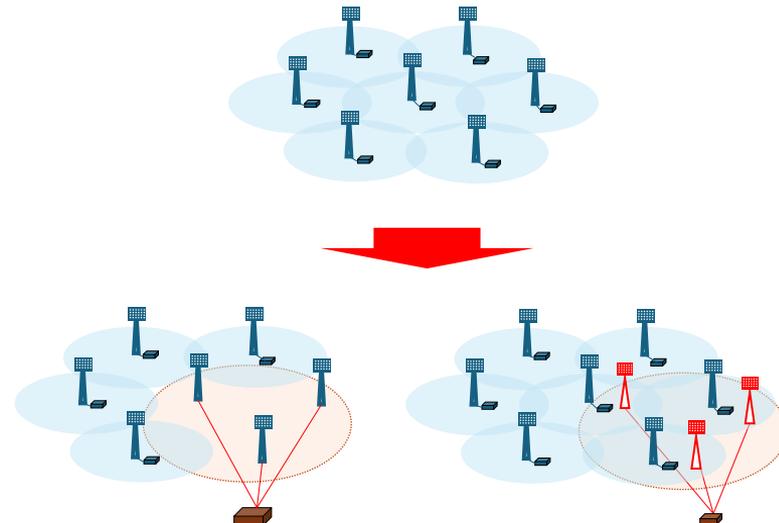
- TRP/ビームの最適組合せの高速検出
- 遮蔽前のTRPの予測選択



TRP追加:

- TRPの低コスト化（設備コスト・設置コスト・運用コスト）
- フロントホール帯域を柔軟に増加できる仕組み

現在のセルラ構成から分散MIMO構成を
どのように展開するか？



既存TRPを
分散MIMO構成

追加TRPに対して
分散MIMO構成

I. Evolution and Challenges of Advanced MIMO Towards 6G

I-3. Recent Activities related Advanced MIMO in 3GPP

5G-AdvancedにおけるA-MIMO

分散MIMOの実現

- 下りリンク Coherent Joint Transmission (Rel.18)
- TRP間のキャリブレーション方式の規格化 (Rel.19)

MIMOアンテナ/空間多重数の拡張

- DMRS (12→24) (Rel.18)
- CSI-RS (32→128) (Rel.19)

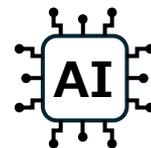
ミリ波 (FR2) 通信の安定化

- 端末主導/イベント駆動のビームマネジメント (Rel.19)
- AI/MLを用いたビームマネジメント (Rel.19)

上りリンクの拡張

- 上りリンクレイヤ数/SRS (4→8) (Rel.18)
- STxMP (Rel.18)
- UL-only TRP, 3Tx UE (Rel.19)

6Gに向けた期待



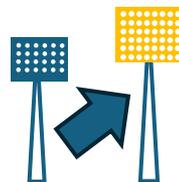
AI/MLを前提としたネットワーク

- AIを前提とした機能ブロック
- 参照信号の拡張/最適化



高エネルギー効率なネットワーク

- Network Energy Saving
- MIMOのエネルギー効率向上



更なるMIMO技術の進化

- 更なる多素子アンテナへの対応
- より実用的な分散MIMO
- サイドシステムの活用 (RIS, etc.)



新規周波数帯域の活用

- Frequency Range 3 (FR3)
- 5G周波数帯域(FR1/2)を含めた周波数の有効活用

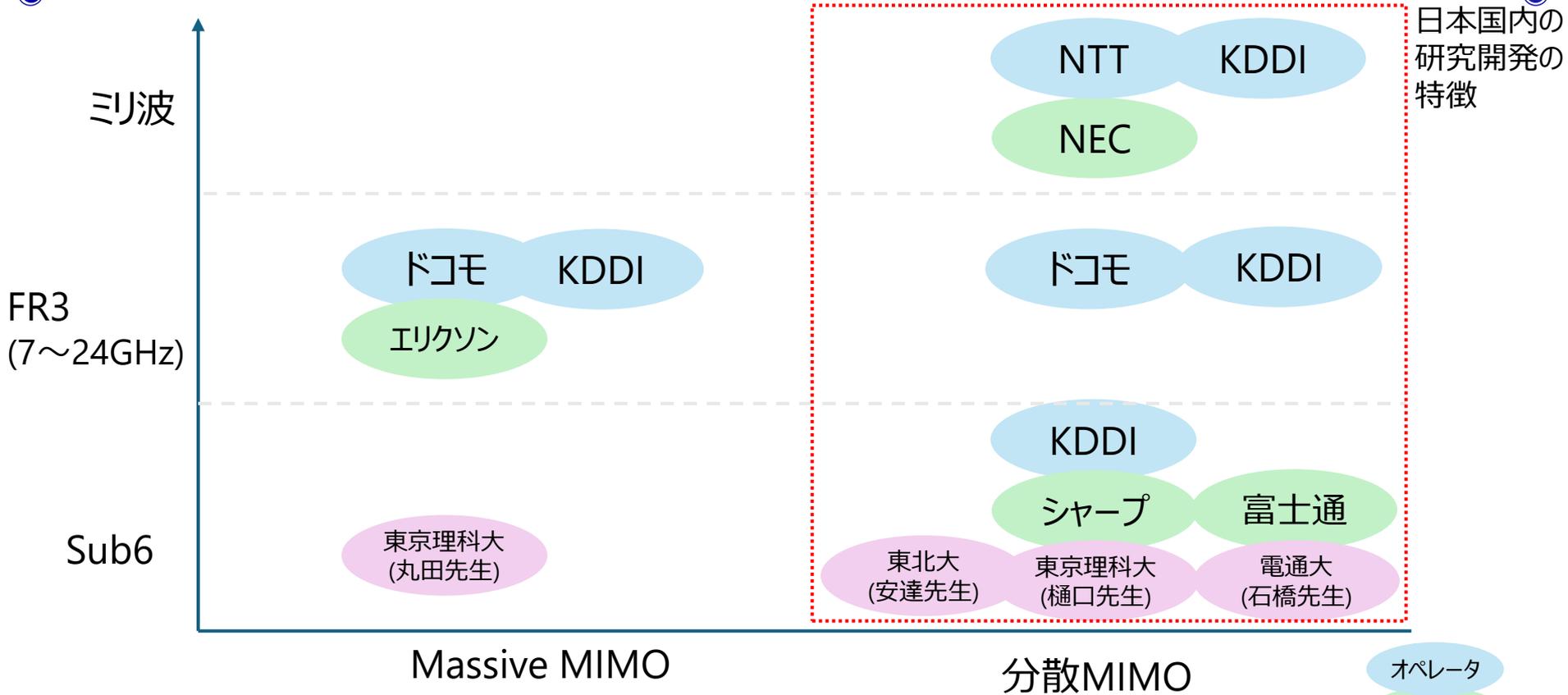
Section II

Recent Activities of Advanced MIMO Technologies in Japan

Section IIへのコントリビューション

寄稿者 (1st)	タイトル
KDDI総合研究所	Research Activities for MIMO Evolution in Each Frequency Range towards 6G
NTTドコモ	Performance Evaluation of FR3 Distributed MIMO Using 6G Simulator
NTTドコモ	Performance Evaluation of FR3 Massive MIMO in Real Urban Areas through Link-Level Simulation
NTT	High-frequency Band Distributed Antenna System
NEC	Distributed MIMO Technology for Efficient Utilization of Millimeter-Wave Bands
富士通	Distributed Antenna Technology (High-density Distributed Antenna System and Transmission Point Sharing Control)
シャープ	6G views on Coherent Joint Transmission and Multi-User MIMO
エリクソン・ジャパン	A Study on Advanced MIMO Large Arrays in the 7–15 GHz Spectrum for 6G
東北大 (安達先生)	User Cluster-centric Approach for Cell-free Massive MIMO Systems
東京理科大 (樋口先生)	Low-Complexity User-Centric TRP Clustering Method in Downlink Cell-Free MIMO with Regularized ZF-Based Beamforming
東京理科大 (丸田先生)	Robust Massive MIMO Transmission Technology in Mobile Environments
電通大 (石橋先生)	Recent R&D Activities of Distributed MIMO (D-MIMO) Technologies in Japan

各コントリビューションの主なターゲット



日本国内の研究開発の特徴

※ 技術的には特定周波数に限定されない技術、Massive MIMO/分散MIMOの両観点を含む技術も含まれるが、俯瞰を容易にするためにマッピングしています

オペレータ
ベンダー
大学

6Gの多様な周波数帯域と活用技術により高信頼な無線通信を提供

Frequency Ranges (FRs) in 6G

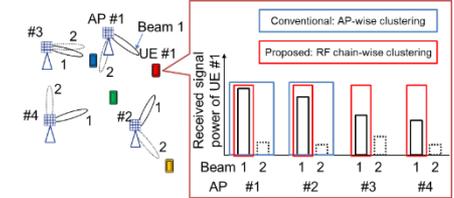
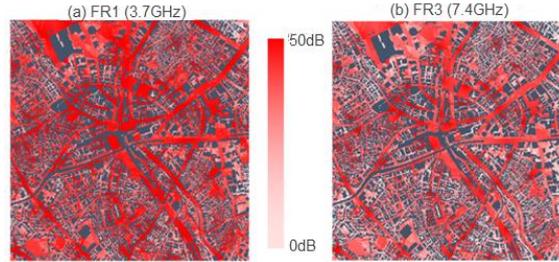
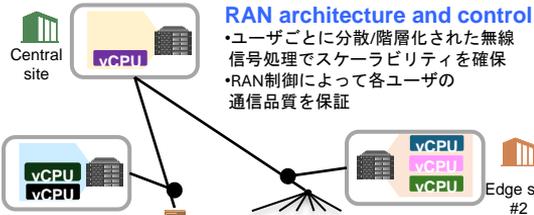
FR1: e.g., 3.5GHz
 更なる周波数利用効率の向上が
 求められる

FR3: e.g., 7, 14GHz
 新規周波数帯域の活用に向けた
 評価や新たな要素技術が必要

FR2: e.g., 28GHz
 カバレッジ改善、見通し環境下の
 大容量化が求められる

User centric RAN, I FoF フロントホールによる大規模CF-mMIMOの実現

5G周波数(FR1)とのカバレッジ比較 FR2 CF-mMIMOに適した信号処理方式

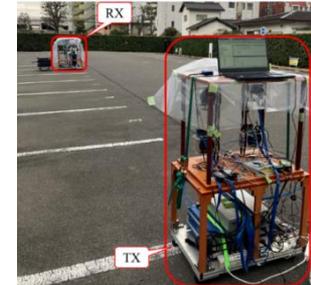
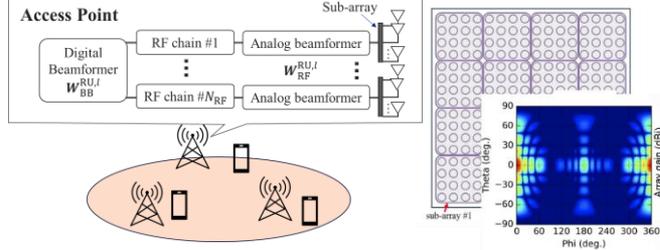


見通し環境下での高レイヤ通信を可能にするLoS-MIMO技術

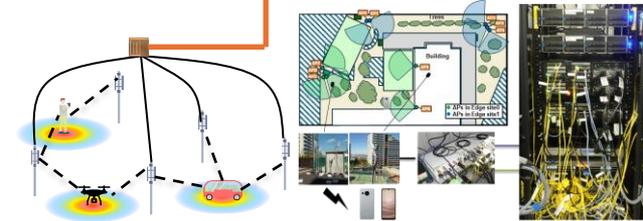
IFoF技術を用いることでフロントホール容量を拡張

User centric RANの実証実験
 4.8GHz, 100MHz BW, 10BS/20ANT, 8UE.
 上記のRAN構成/制御を用いた実証基盤で、商用BS/UEによるCF-mMIMOを実現

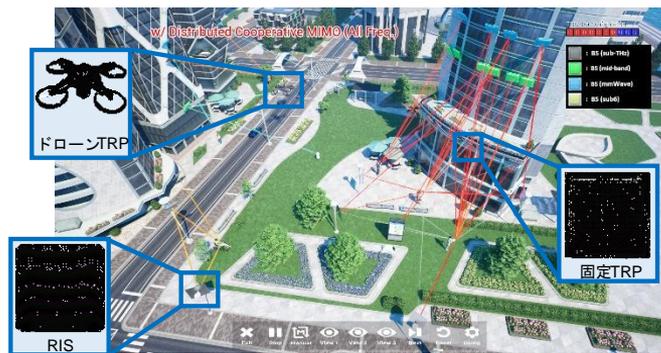
CF-mMIMO ハイブリッドBF方式の検討



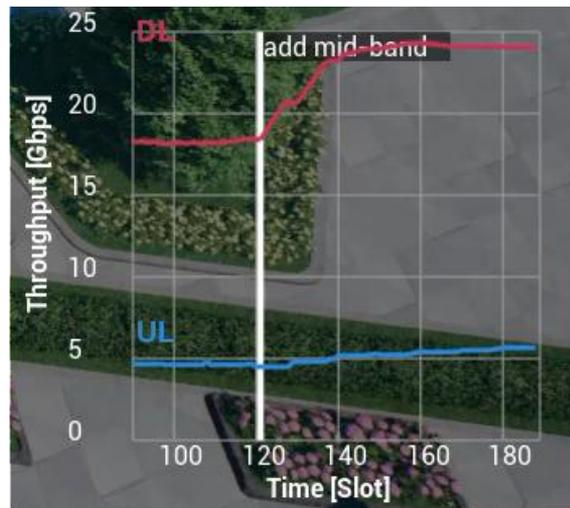
Line of Sight MIMO (LoS-MIMO)



- 6Gの候補周波数帯として、7~24 GHzのいわゆるミッドバンドと呼ばれる周波数帯 (FR3) が注目
 - 5Gで使われているSub-6よりも広い帯域幅を持つ可能性がある
 - 28 GHz帯のミリ波よりも低い周波数であるから、低伝搬損失
- 一定程度のカバレッジを確保しつつ、高速・大容量通信を達成
- 6Gシミュレータをさらに高度化して、屋外の都市環境においてミッドバンドを導入し、分散MIMO技術を適用し、評価



屋外都市環境における6Gシミュレータ



mid-bandの追加によるUEスループット

市街地におけるFR3 Massive MIMOのシミュレーションによる性能評価 (NTTドコモ)

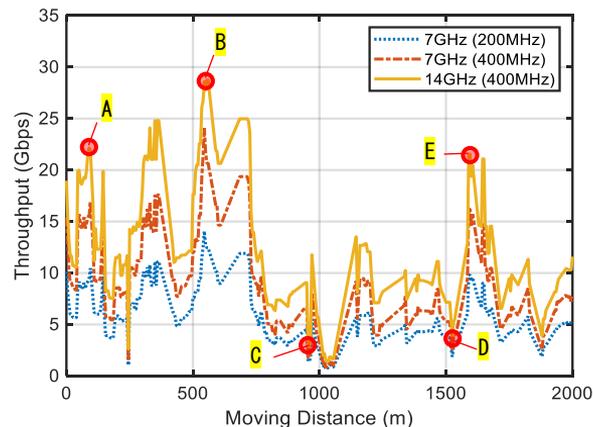
- より現実に近い条件での評価を行うため、横須賀市内を模擬したモデルに**カラーイメージ法**を適用して得た電波伝搬チャネルを用いてカバレッジ性能を評価
- 結果はFR3周波数の有用性を示す
 - ✓ アンテナ構成などによって、1) ピークデータレートは5Gの目標値を超え、2) すべての場所でGbps級通信を提供し、どこでもGbpsを実現

シミュレーション諸元

中心周波数 [GHz]	7	14
帯域幅 [MHz]	200/400	400
BSアンテナ素子数	256	1024
MSアンテナ素子数	64	256
BSデジタルポート数	64	
MSデジタルポート数	16	



MSの移動経路とBS設置位置

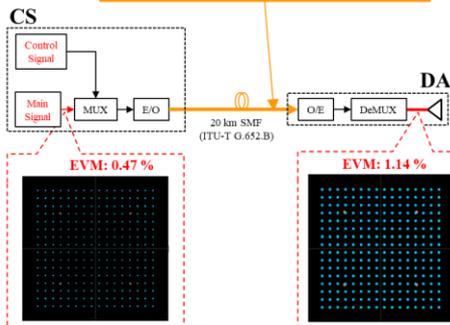
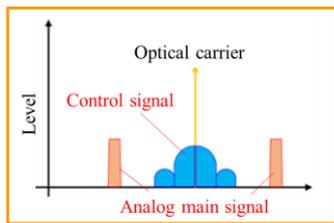


MSの移動とスループットの遷移

◆技術1: DA展開にA-RoF適用技術

-A-RoFの利点 (集約局(CS) ⇄ 分散アンテナ(DA))
 . CSから信号処理、A/D、D/Aを削除できる

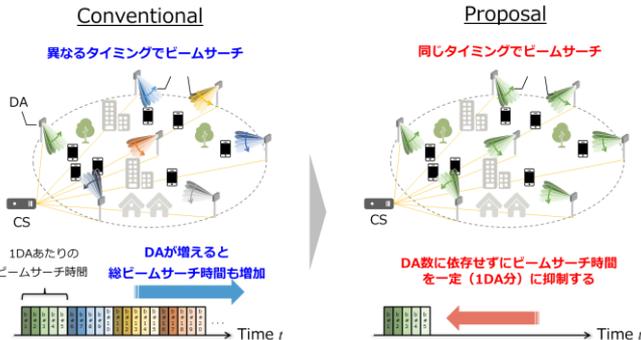
主信号と制御信号を1波長で
 光伝送多重する 技術



20kmの光伝送でもEVM1.14%

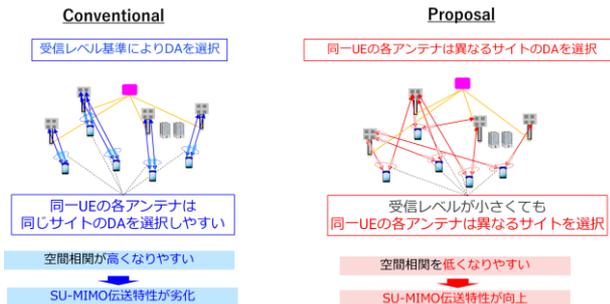
◆技術2: 最適ビーム/DAの高速検出技術

全DAを同時ビームサーチ



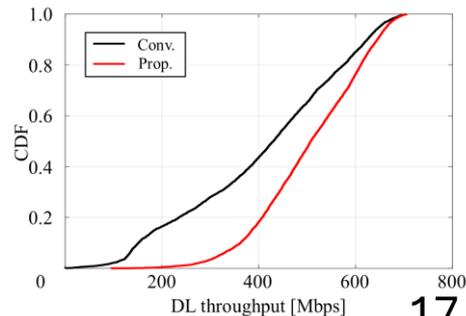
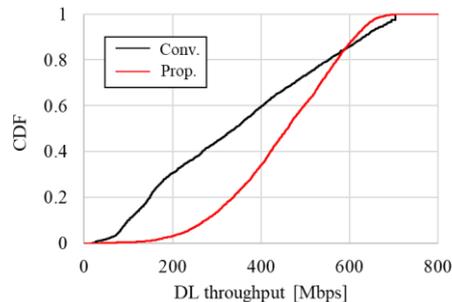
◆技術3: SU-MIMOにおけるDA選択技術

同一UEの各アンテナは異なるサイトのDAを選択
 (DAがサブアレー構成の時)



<実験結果>

周波数帯: 40GHz
 信号帯域: 100MHz
 屋内エリアに(20m x 10m)4DA設置
 UEの移動速度は約4km/h
 DA/UEともAnalog-BFを備える

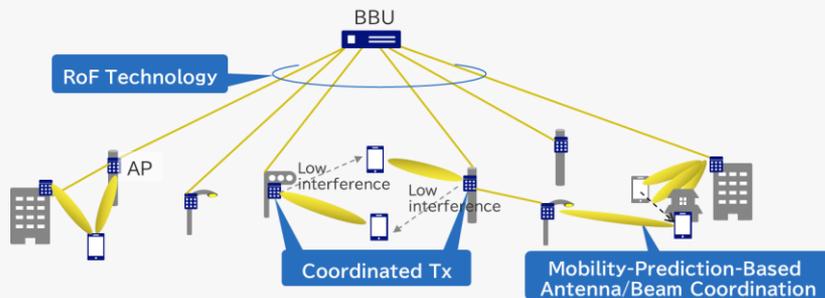


Distributed MIMO Technology for Efficient Utilization of Millimeter-Wave Bands

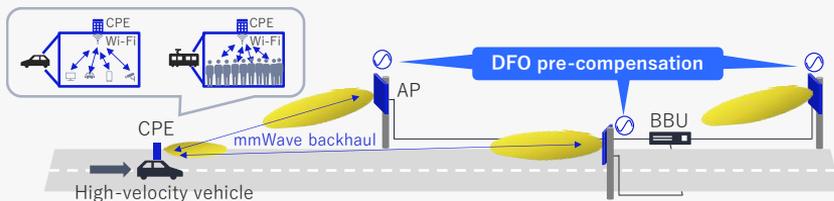
(NEC)

ミリ波分散MIMOの2つのユースケース

(a) モバイル端末向けのミリ波無線アクセスネットワーク

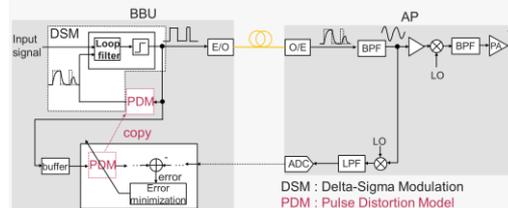


(b) 高速移動体向け（車、列車）のミリ波バックホール

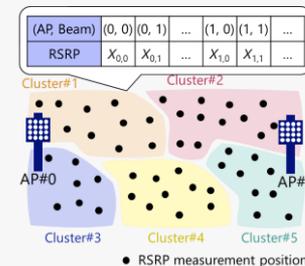


ユースケースを実現するための要素技術

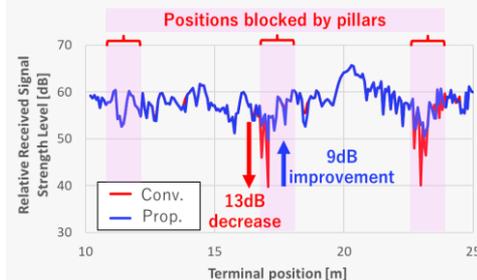
汎用光デバイスを用いたデルタシグマ RoFのパルス歪補償技術



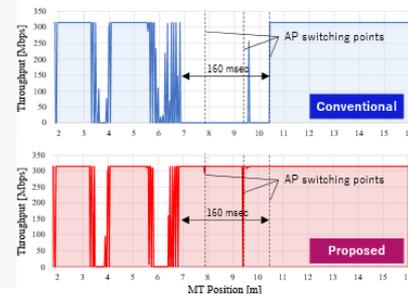
RSRPデータベースを用いた AP間協調送信による干渉低減



遮蔽回避のための移動予測に基づくアンテナ・ビーム制御



アンテナ切り替え時の通信品質安定化のためのドップラー周波数オフセットの事前補償送信



Ultra-High Density Distributed Antenna System (富士通)

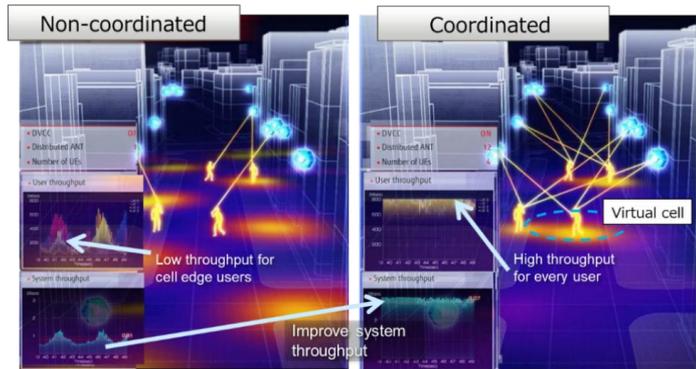
提案システム:

複数地点の張り出しTRPを集中制御局に接続し、下記の特徴を持つ動的仮想セル制御 (DVC) でエリア全体を制御

- 16地点に分散配置されたTRP全体で分散ZF/MMSE based MU-MIMO を適用
- 高性能と低演算量を両立させるチャネル電力に基づくMU-MIMO UE選択
- 高精度の位相同期を実現するTRP間信号交換によるover-the-air calibration

実際のオフィスビルディングでのフィールド実証:

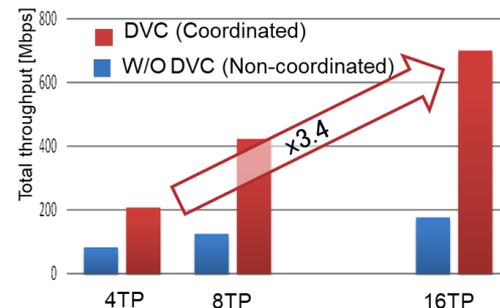
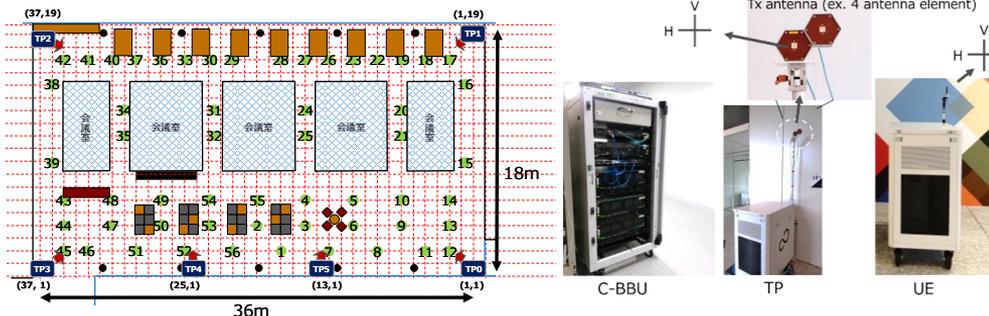
エリア内16TPを用いた結果では、各16TRPが異なるセルである場合(凡例「W/O DVC」)と、提案システム(凡例「DVC」)で、平均スループット3倍以上の向上効果を確認。



Simulation:

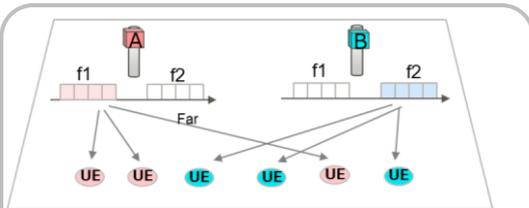
東京都心部の実際の3D地図情報を用いて、超高密度分散アンテナシステムをシミュレーション。協調なしの場合に比べた特性を評価し、以下を確認。

- 大幅な平均するプットの向上
- 非協調の場合に比べ、超高密度分散アンテナシステムでは、セル端などの特定のエリアでスループットが劣化せず、安定して高いスループットを実現

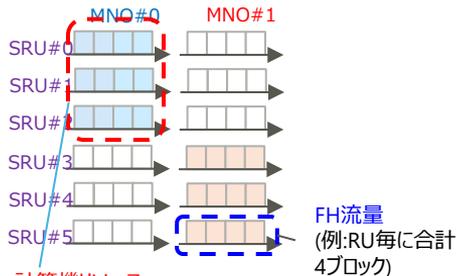


Ultra-High Density Distributed Antenna System (富士通)

従来のセル/MNO毎独立な設置

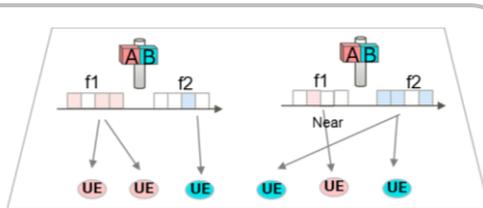


リソース配置例: 3 cells x 2MNOを各独立した場所に設置

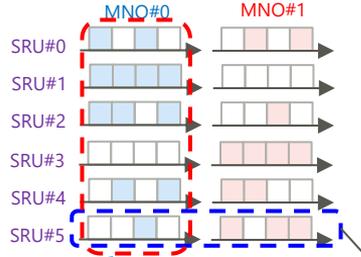


計算機リソース
(例:全地点合計12ブロック
で合計3セル相当)

BS共用システム



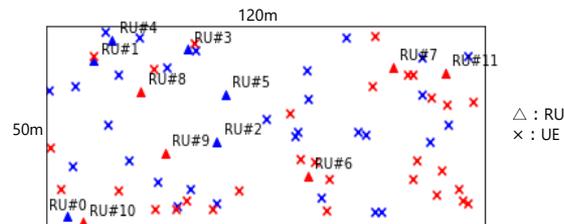
リソース配置例: 3セルのリソースを6セルに配分



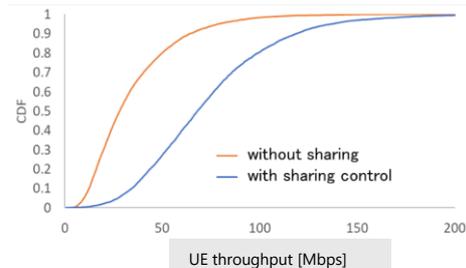
計算機リソース制約(例:全地点計12 ※共用なしと同じ)
FH制約 (例:共用RU毎に合計4ブ
ロック※共用なしと同じ)

**地点事のFH流量や所要計算機リソース
を増加させずに、エリア全体をPF規範で
最適化**

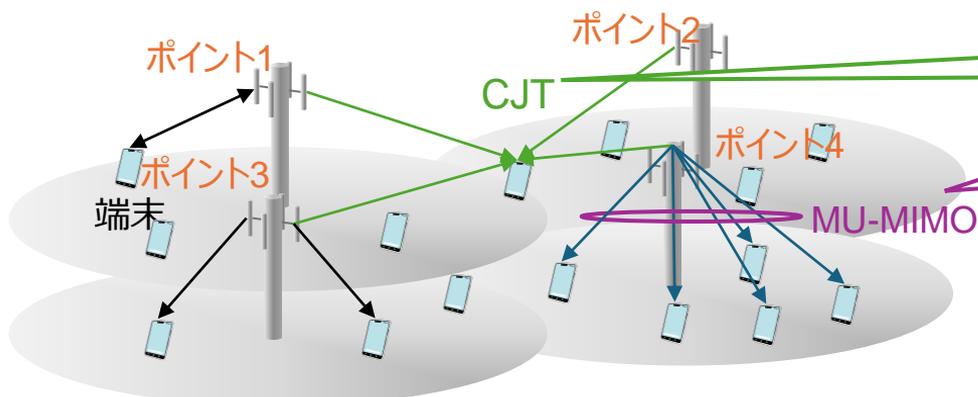
インドア環境を模擬したシミュレーション結果



Parameter	Setting
Frequency, bandwidth	3.8GHz, 100MHz/MNO
Room size	120m×50m×3m
RU distribution	Uniform, 3RU/MNO(4MNO)
UE distribution	Uniform, 30UE/MNO
Tx ant. conf., Tx power	2×2, 0.5λ space, 24dBm
Pathloss	$Pr_{Los}PL_{Los} + (1 - Pr_{Los})PL_{NLos}$



複数送受信ポイントを用いたMU-MIMOとCoherent Joint Transmission (CJT)の組み合わせ



セル間の干渉を抑制/SINRを改善

セル内のキャパシティを改善

リソース割り当て技術が課題

提案リソース割り当て技術

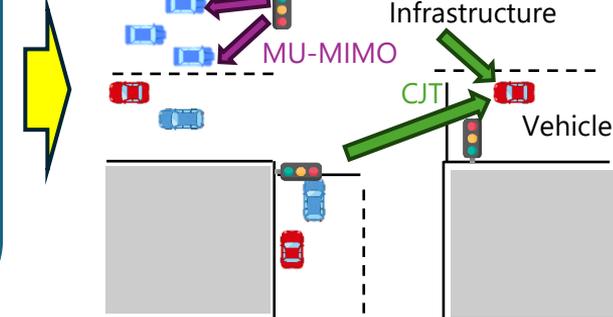
PF (Proportional Fairness)ベースのセル内リソース割り当て

ポイント#2	端末#1	端末#1	端末#3	端末#4 端末#5] $SINR_{MU-MIMO} > SINR_{SU-MIMO}$
ポイント#3	端末#7	端末#6	端末#8	端末#8	
ポイント#5	端末#12	端末#13 端末#14	端末#3	端末#15] $SINR_{MU-MIMO} < SINR_{SU-MIMO}$
ポイント#7	端末#16	端末#20	端末#3	端末#20	

← リソースブロックグループ 推定SINRベースのセル間リソース割り当て → 周波数

推定SINRベースのMIMO手法選択

Achieve

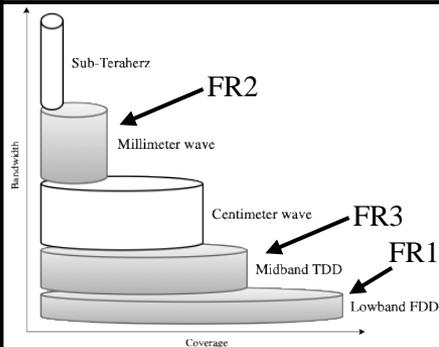


A Study on Advanced MIMO Large Arrays in the 7–15 GHz Spectrum for 6G (Ericsson)

背景

モバイルネットワーク進化による容量増大・エネルギー効率向上・コスト削減要求。5Gから6Gへのデータ需要高騰に伴う新周波数帯域必要性。センチメートル波スペクトル (FR3) が増大データ処理およびスペクトル効率向上の観点から有力候補。

6Gにおける新たな周波数帯域

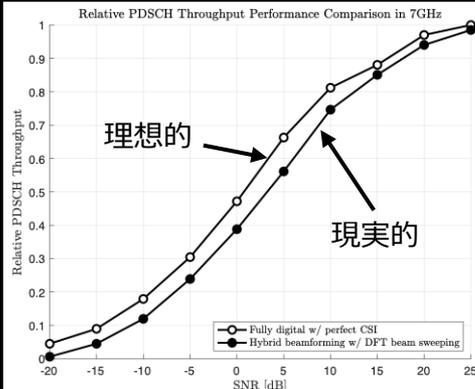


FR1は広範囲カバレッジ提供と限定的帯域幅, FR2は高データレート実現と到達距離不足が特徴。FR3は広帯域化と良好伝搬特性を両立し, 大規模MIMO統合による6G多様性要件への対応可能性。

ハイブリッドアレイ

FR3の大きなポテンシャルの一方, 非セルラー系既存利用者とのスペクトル共存, 導入に伴う複雑化・コスト増大・ビームフォーミング精度確保・CSI取得・素子間結合・eCPRIオーバーヘッドという多様な課題。本稿では, シンプルなビームスイーピング手法による課題対処可能性の提示。

シミュレーション結果



ビームスイーピングと実チャネル推定による7GHzかつNR準拠ハイブリッドビームフォーミング大規模アレイと理想的フルデジタルビームフォーミングの適応MCSを用いたPDSCHスループット性能の比較。100MHz CP-OFDM (30 kHz SCS) かつCDL-B NLoSモデル下における5スロット毎のCSI-RS活用によるアナログビーム設定と相互性に基づくSRS周波数領域重み適用。32RFチェーンを具備した256要素デュアル偏波ハイブリッドアレイが全SNR域でフルデジタル並みの性能を示すことを確認。

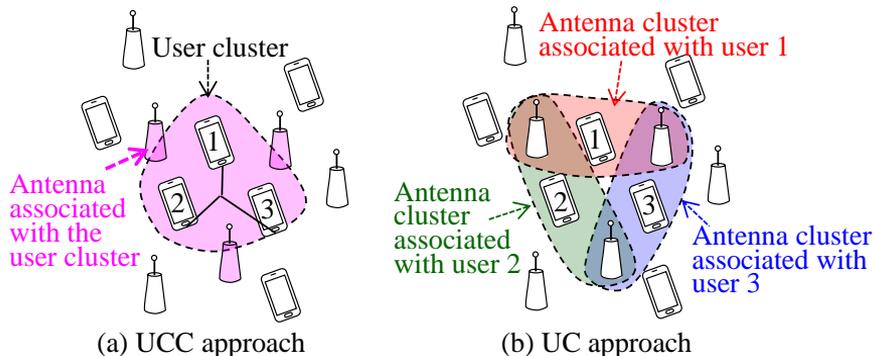
まとめ

広帯域と良好伝搬特性を両立し, sub-6 GHzとmmWaveをつなぐcmWave (FR3) スペクトル。パス損失緩和のための先進大規模アレイ技術導入必須化と, CSI取得・演算負荷・ハードウェア課題の顕在化。ハイブリッドアレイによるデジタル並み性能実現の可能性。

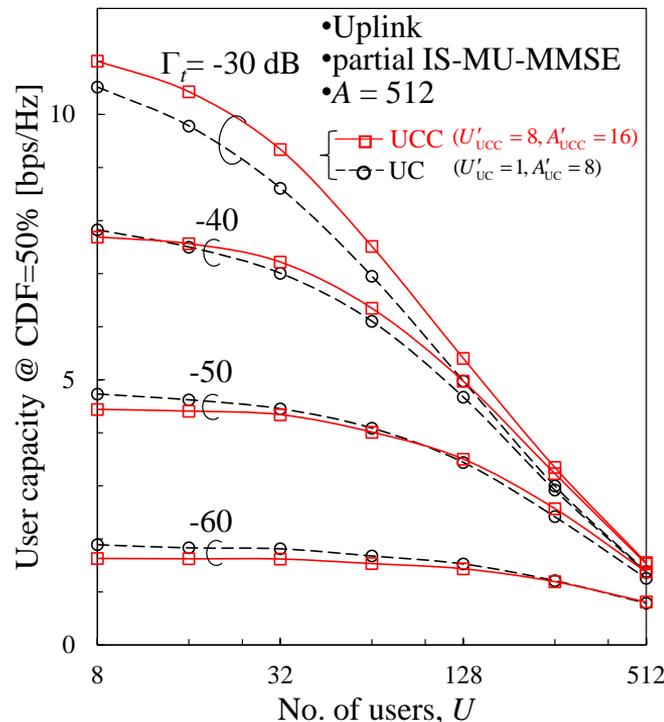
部分干渉抑圧マルチユーザMMSE/ZF(IS-MU-MMSE/ZF)を用いるマルチユーザ型ユーザクラスタ中心(UCC)手法はセルフリー大規模MIMO(CF-mMIMO)システムの容量拡大に効果的[R. Takahashi, 2023]

- 複数の近傍ユーザから成るユーザクラスタ (ユーザ中心仮想小セル) を形成し, マルチユーザ空間多重を導入
- IS-MU-MMSE/ZFは隣接ユーザクラスタからの強い干渉のみを抑圧するように設計
- マルチユーザ型UCC手法は, ユーザクラスタ内の複数分散アンテナが協調できる程度に高い送信電力のとき, シングルユーザ型ユーザ中心(UC)手法よりも高いユーザ容量を達成

□ R. Takahashi, H. Matsuo, S. Xia, Q. Chen, and F. Adachi, "Uplink Postcoding in User cluster-Centric Cell-Free massive MIMO," IEICE Trans. Commun., Vol. E106-B, No. 9, pp. 784-757, Sep. 2023.



UCCとUC手法の比較



ユーザ容量の比較

部分干渉抑圧マルチユーザMMSE/ZF(IS-MU-MMSE/ZF)を用いるマルチユーザ型ユーザクラスタ中心(UCC)手法はセルフリー大規模MIMO(CF-mMIMO)システムの容量拡大に効果的^[R. Takahashi, 2023]

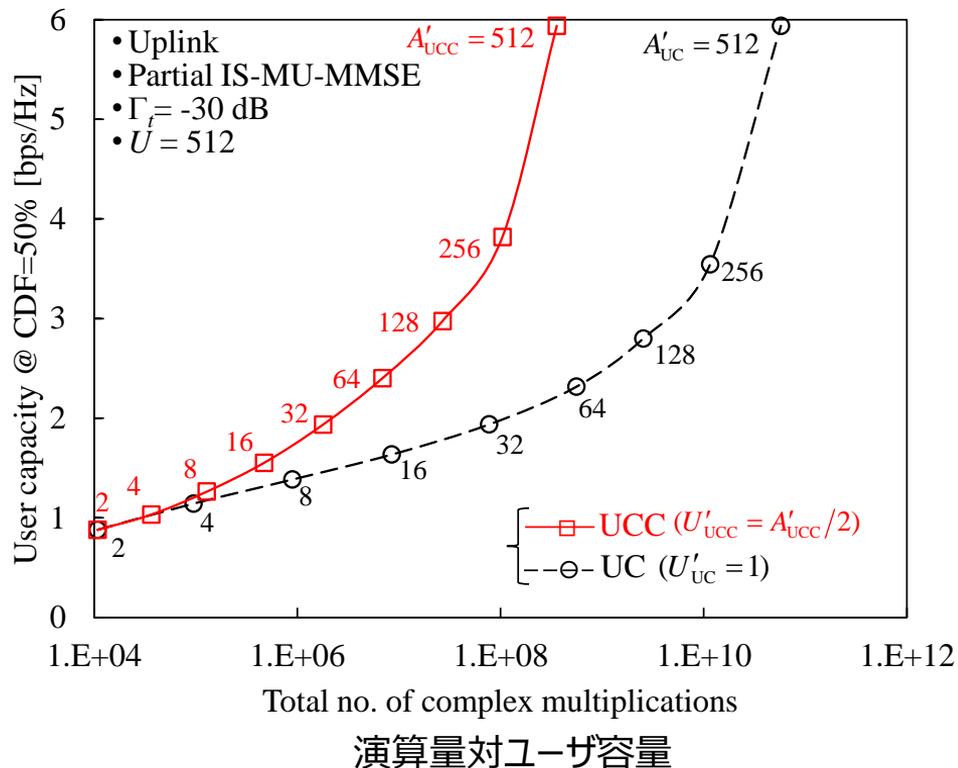
- マルチユーザ型UCC手法は、同一演算規模のシングルユーザ型UC手法よりも高いユーザ容量を達成

演算量

逆行列演算のためのLDLH分解^[Björnson, 2017]

Approach	No. of user clusters	The total no. of complex multiplications required for weight computation for all users
UC	$K = \frac{U}{U'_{uc}} = U$	$\left(\frac{A'_{uc} + A'_{uc}}{2} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k \right) + \frac{A'_{uc}{}^3 - A'_{uc}}{3} + A'_{uc}{}^2 \right) K$
UCC	$K = \frac{U}{U'_{ucc}}$	$\left(\frac{A'_{ucc} + A'_{ucc}}{2} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_k \right) + \frac{A'_{ucc}{}^3 - A'_{ucc}}{3} + A'_{ucc}{}^2 U'_{ucc} \right) K$

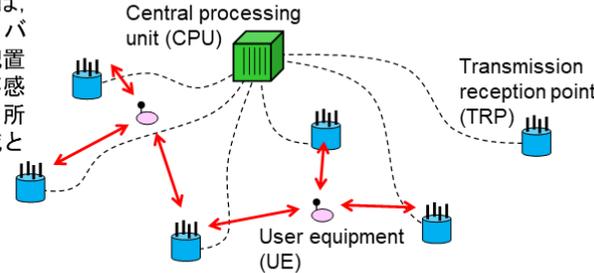
- R. Takahashi, H. Matsuo, S. Xia, Q. Chen, and F. Adachi, "Uplink Postcoding in User cluster-Centric Cell-Free massive MIMO," IEICE Trans. Commun., Vol. E106-B, No. 9, pp. 784-757, Sep. 2023.
- E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency," Foundations and Trends in Signal Processing: Vol. 11, No. 3-4, pp. 154-655, 2017.



Low-Complexity User-Centric TRP Clustering Method in Downlink Cell-Free MIMO with Regularized ZF-Based Beamforming (東京理科大)

セルフリーMIMOとユーザ毎TRP群選択

セルフリーMIMOは、TRPをシステムカバレッジ内に分散配置することにより不感地帯を減少させ、所要送信電力の低減と合計スループットの増大を実現



ユーザ毎のTRP群選択法が十分な伝送品質利得を得るために重要
本研究では下りリンク用のユーザ毎TRP群選択法について検討

従来のユーザ毎TRP群選択法

- ◆ パスロス基準法 [1, 2]
 - 各UEは独立に自身との平均パス利得が大きい順（パスロスが小さい順）にTRPを自身宛信号の送信TRP群として選択
 - 利点：複雑なビームフォーミング(BF)行列の計算を必要としないので低演算量で実現できる
 - 欠点：BF効果を十分に考慮できないため得られる伝送品質が低い
- ◆ 信号対干渉比(SLNR)基準法 [3]
 - BF後のSLNRの期待値に基づいて送信TRP群を決定
 - 利点：BF効果の考慮により高い伝送品質が得られる
 - 欠点：TRP群候補毎にBF行列を計算する必要があるため、演算処理量が多い

[1] E. Björnson and L. Sanguinetti, IEEE Trans. Commun., vol.68, no.7, pp 4247-4261, Jul. 2020.
 [2] Mojahedian and A. Lozano, in Proc. IEEE 2021 29th EUSIPCO, Ireland, 23-27, Aug. 2021.
 [3] Y. Oshima, A. Benjebbour, and K. Higuchi, IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 1, pp. 155-163, Jan. 2014.

提案法

- ◆ 目的
 - 低演算量で実現しつつ高いシステムスループット特性が得られるユーザ毎TRP群選択を実現すること
- ◆ 提案法
 - パスロス基準法と同様に平均パス利得情報のみに基づいてTRP群を選択 → TRP群候補毎のBF行列の計算を不要とし、低演算量で実現
 - 規格化ゼロフォーシング(RZF)型BFの適用を念頭に、BF行列の計算を行うことなしに、得られるBF利得と干渉電力レベルを簡易に推定しTRP群選択に反映 → 高いシステムスループット特性を実現

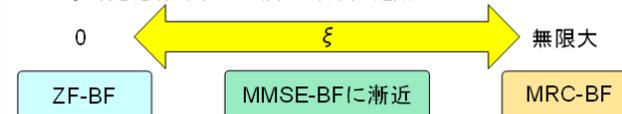
RZF規範のBF

- ◆ TRP群 \mathcal{T}_k をUE k 宛信号の伝送に用いる場合、UE k 用のBFベクトルは以下の行列の第1列ベクトルとして得られる

$$\mathbf{M}_k^{\text{RZF}}(\mathcal{T}_k) = \hat{\mathbf{H}}_k^H(\mathcal{T}_k) \left(\hat{\mathbf{H}}_k(\mathcal{T}_k) \hat{\mathbf{H}}_k^H(\mathcal{T}_k) + \xi \frac{N_0}{\rho_k} \mathbf{I} \right)^{-1}$$

雑音項に相当する規格化項

- $\hat{\mathbf{H}}_k(\mathcal{T}_k)$: TRP群 \mathcal{T}_k とUE k 及び他UEとの間のチャネルベクトルを並べたチャネル行列 (UE k のチャネルベクトルを第1行に配置)
- ρ_k : UE k への割り当て信号電力
- N_0 : 雑音電力
- ξ : 規格化項の大きさを決める非負の定数



Low-Complexity User-Centric TRP Clustering Method in Downlink Cell-Free MIMO with Regularized ZF-Based Beamforming

提案TRP群選択法のメトリック

□ 提案法では、以下のメトリックを最大とするTRP群をUE k のTRP群として選択

$$\lambda_k^{\text{Prop}}(\mathcal{T}) = \beta \lambda_k^{\text{Prop,ZF}}(\mathcal{T}) + (1 - \beta) \lambda_k^{\text{Prop,MRC}}(\mathcal{T})$$

\mathcal{T} : 候補TRP群
 β : 0から1の範囲の値をとる重み係数

提案法は用いるBF法に応じて β を調整することにより適切なメトリックに基づくTRP群選択を実現できる

✓ それぞれZFとMRC型BFを想定した2つのメトリックは次式に基づいて定義される

$$\lambda_k^{\text{Prop,ZF}} = \frac{\text{Expected received signal power after BF}}{\text{Interference power + Noise power}}$$

提案法は平均パス利得情報だけを用いてRZF型BF時に適したユーザー毎のTRP群選択を実現できる

□ ZF型BFに適したTRP群選択メトリック $\lambda_k^{\text{Prop,ZF}}(\mathcal{T})$

ユーザー間干渉のスリング後に残るMIMOチャネルの自由度

$$\lambda_k^{\text{Prop,ZF}}(\mathcal{T}) = \frac{\{(T - U^{\text{null}}) / T\} \sum_{l=1}^T g_{k,l} p_k}{\frac{1}{U} \sum_{j=1}^U \sum_{l \in \mathcal{T} \setminus S_j} g_{j,l} (g_{k,l} / \sum_{l=1}^T g_{k,l}) p_k + \alpha N_0}$$

CSI不明のUEに与える干渉電力の見込み値 雑音電力
 T : TRP群に含まれるTRP数
 U^{null} : スリングするUE数
 U : 干渉電力を考慮するUE数
 $g_{k,l}$: UE k とTRP l の間の平均チャンネル利得
 S_j : UE j の瞬時CSIが既知のTRP群
 α : 正の値をとる調整パラメータ
 N_0 : 雑音電力

□ MRC型BFに適したTRP群選択メトリック $\lambda_k^{\text{Prop,MRC}}(\mathcal{T})$

$$\lambda_k^{\text{Prop,MRC}}(\mathcal{T}) = \frac{\sum_{l=1}^T g_{k,l} p_k}{\frac{1}{U} \sum_{j=1}^U \sum_{l \in \mathcal{T}} g_{j,l} (g_{k,l} / \sum_{l=1}^T g_{k,l}) p_k + \alpha N_0}$$

TRP群 S_j からUE j に干渉を与える 雑音電力

シミュレーション結果

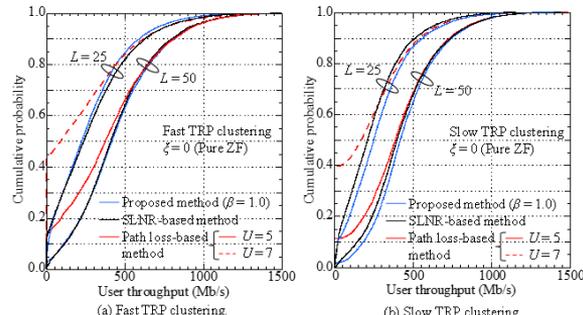


図1: ユーザスループットの累積分布 ($\xi=0$ としてZF型BFを使用)

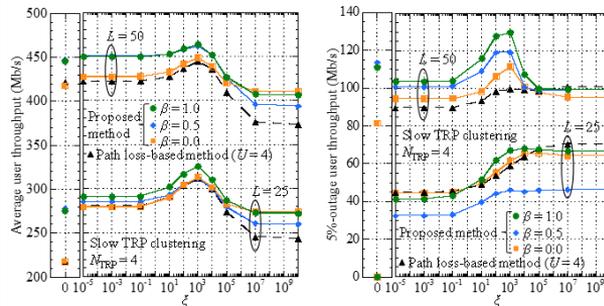


図2: ξ に対する平均及び5%アウトージュースループット

まとめ

- ◆ 提案法は、現実的な環境において、従来のパスロス基準法やSLNR基準法に比較して高いシステムスループット特性を実現
- ◆ 一方で、提案法の複雑さは、複雑なBF行列の計算を伴わないため、十分小さなレベルを維持

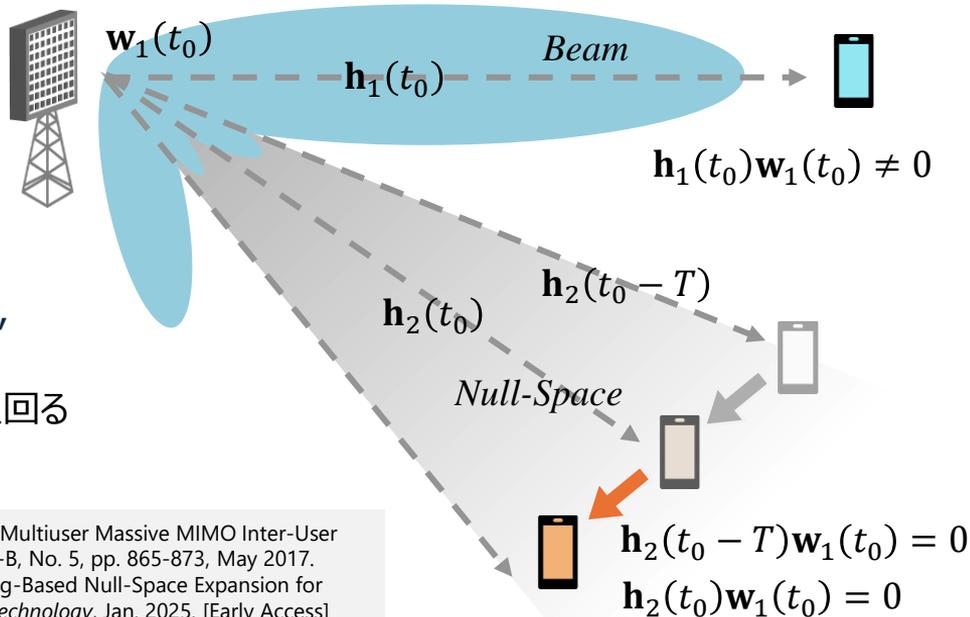
ヌル空間拡張 (Null-Space Expansion)

現在及び過去のチャネル推定値に対して同時にヌルを形成することにより、変動後のチャネル状態に対しても干渉抑圧を実現、高速移動環境においても効果的にユーザー間干渉を抑制する

$$\mathbf{W}_1(t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1(t_0) \\ \mathbf{h}_2(t_0) \\ \mathbf{h}_2(t_0 - T) \end{bmatrix}^{-1}$$

過去のCSIを利用可能

$$= [\mathbf{w}_1(t_0) \quad \mathbf{w}_2(t_0)]$$



- ✓ Massive MIMOの膨大な空間自由度を活用
- ✓ ユーザのモビリティ等に起因するチャネル時変動により、干渉が漏洩するMU-MIMOの性能劣化を補償
- ✓ チャネル予測に基づく既存のプリコーディング方式を上回る性能を実現可能

[a] T. Iwakuni, K. Maruta, A. Ohta, Y. Shirato, T. Arai, M. Iizuka, "Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO Inter-User Interference Suppression in Time Varying Channels," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E100-B, No. 5, pp. 865-873, May 2017.

[b] Y. Sasaki, K. Arai, J. Nakazato, K. Maruta, "Receiver Maximum Eigenmode Beamforming-Based Null-Space Expansion for Multi-user Massive MIMO in Time-Varying Channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jan. 2025. [Early Access]

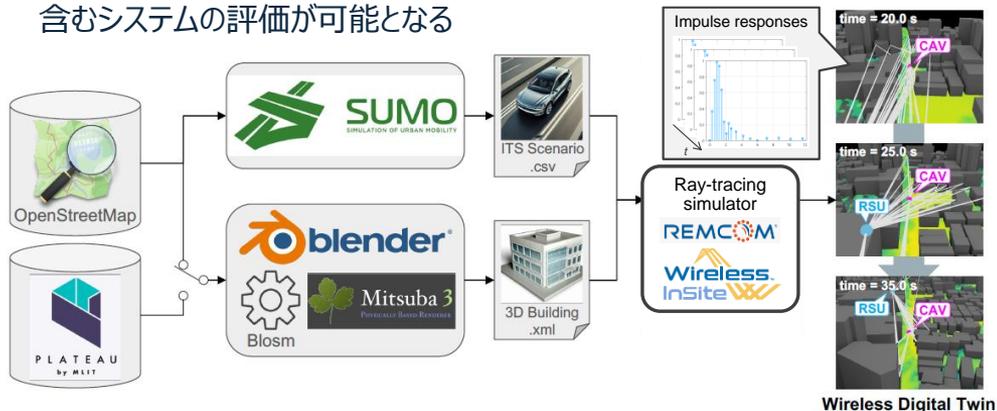
移動環境に耐性のあるMassive MIMO伝送技術

(東京理科大)

ミリ波V2Xへの応用 (総務省FORWARD)

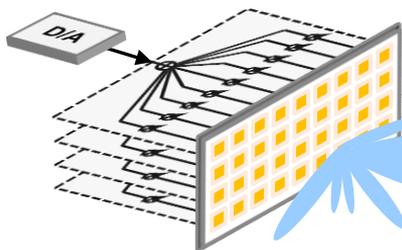
w/KKE

- ✓ 高周波帯では、サイト特有のモデルが要求される
⇒ オープンプラットフォームを用いた無線デジタルツイン (OWDT) の構築
- ✓ 三次元空間および時間領域の統合により、移動環境のMIMO伝送を含むシステムの評価が可能となる



位相制御アナログビームフォーミングへの適用

w/KWIC

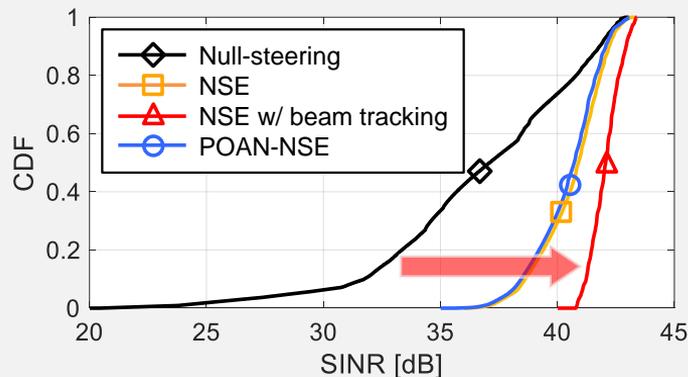
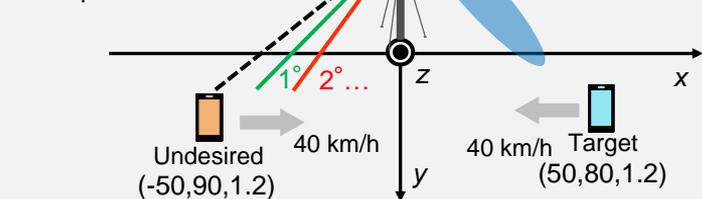


- ✓ 実装の観点からはアナログ制御の方が実用的
- ✓ nul空間拡張を位相のみの制御という制約下で実現：Phase Only Adaptive Nulling (POAN)

シミュレーション例

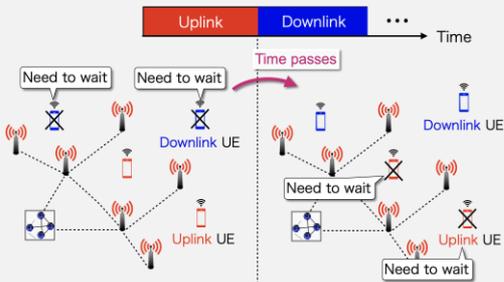
BS: 48×4
(x,y,z)=(0,0,15)
Tx Power: 30 dBm
(Feeder loss: 3 dB)
Free-space propag.

CSI update interval: 200ms
BF tracking interval: 20 ms
Null-space dimension: 5



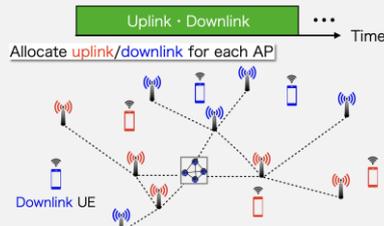
- ✓ 各種nul空間拡張はSINR性能を大きく改善
- ✓ ビーム追従 + nul空間拡張が最良のSINR分布
- ✓ 位相制御のみでも従来のnul空間拡張とほぼ同等

時分割複信 (TDD: Time Division Duplex)



- 上り通信もしくは下り通信のどちらかに限定される

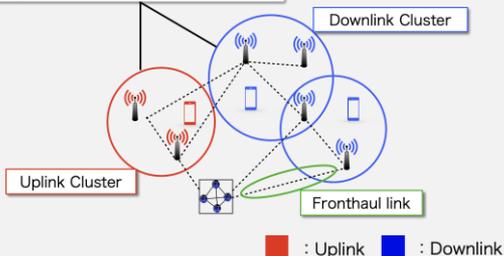
ネットワーク全二重複信 (NAFD: Network-Assisted Full-Duplex) [1,2]



- ネットワーク内で全二重通信を実現
- 高い周波数利用効率を達成
- フロントホール容量制約やスケーラビリティを考慮する必要

フロントホール容量制約を考慮したスケーラブルNAFD [3]

Uplink & downlink clusters are exclusive



ビームフォーミングとAPクラスタリングの同時設計

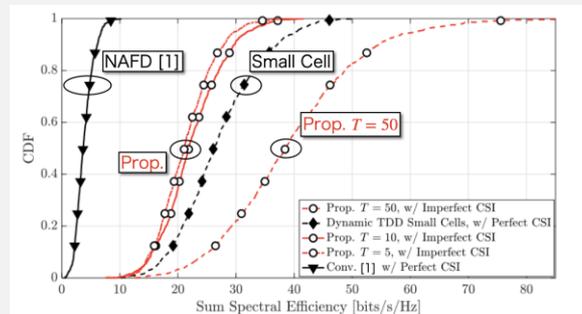
- 高いスケーラビリティと周波数利用効率を達成
- フロントホール容量制約に対して高い堅牢性を有する

[1] S. Fukue, et. al., IEEE Access, 2022.
 [2] D. Wang, et. al., IEEE TCOMM 2019
 [3] K. Okui, et.al., IEEE VTC-fall 2023

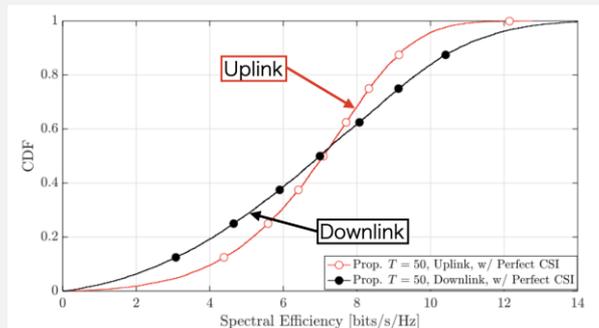
数値結果

AP数 50, 上りUE数 10, 下りUE数 10,
 フロントホール容量 2bits/s/Hz, クラスタサイズ $T=5, 10, 50$

● 総和周波数利用効率



● ユーザあたりの周波数利用効率



① フロントホール容量制約下における上りリンク信号検出 [4]

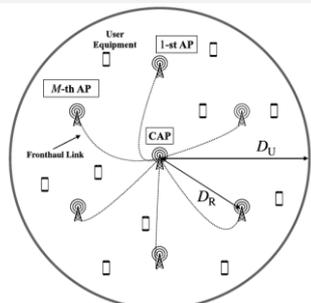


FIGURE 1. Illustration of a local cluster in a scalable CF-mMIMO uplink system, where a common CAP, supported by multiple APs, serves multiple single-antenna UEs distributed within a circle of radius D_U [m].

<貢献>

I. 期待値伝播法に基づくロバスト受信機:

通信路の強い相関およびフロントホールのリンク容量制限を考慮した効率的な検出方式。ただし、適用範囲は実用可能なシステム規模に限られる。

II. 低演算量なロバスト受信機 (PDAZF):

離散性を考慮したGLS (一般化最小二乗法) ベースの受信機であり、近接勾配法 (proximal gradient) を用いることで計算複雑度を大幅に低減しつつ、ほぼ同等の性能を達成する。

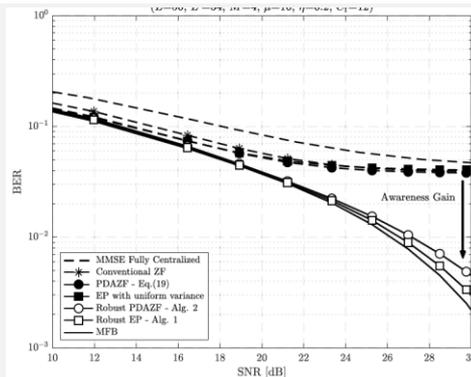


FIGURE 2. BER performances of CF-mMIMO systems with proposed and SoTA receivers as a function of SNR, with $L=50$, $L'=34$, $M=4$, $\mu=10$, $\eta_t=0.2$ and $C_f=12$.

② 低分解能ADCを用いたベイズ受信機設計 [5]

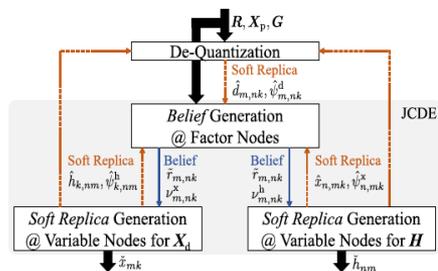


Fig. 2. Schematic of the belief propagation process employed in the proposed DQ-aided BiGaBP algorithm.

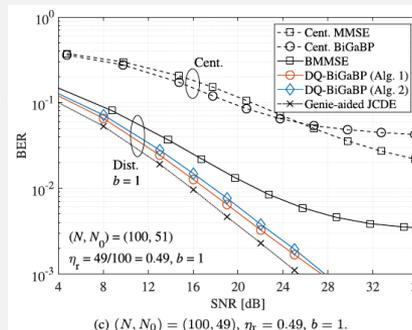
<貢献>

I. DQ-aided BiGaBP:

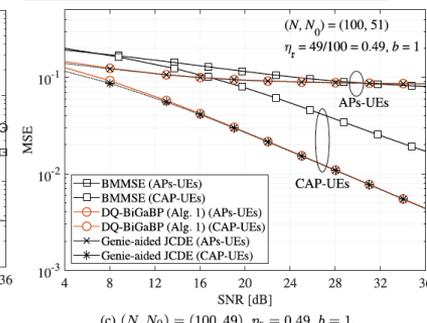
多次元量子化観測信号に対して双線形メッセージ伝播法を適用した、新たな通信路とデータの同時推定アルゴリズム (JCDE: Joint Channel and Data Estimation) を提案。

II. DoF-ADC分解能のトレードオフに関する洞察:

スケーラブルセルフリー大規模MIMOに関して、集中型アンテナと分散型アンテナの最適比率がADCの分解能に依存することを示す新たな洞察を提示。



(c) $(N, N_0) = (100, 49)$, $\eta_t = 0.49$, $b = 1$.



(c) $(N, N_0) = (100, 49)$, $\eta_t = 0.49$, $b = 1$.

[4] K. Ando, H. Iimori, T. Takahashi, K. Ishibashi, and G. T. F. de Abreu, "Uplink Signal Detection for Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems With Robustness to Rate-Limited Fronthaul," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102770 – 102782, July 2021.

[5] T. Takahashi, H. Iimori, K. Ando, K. Ishibashi, S. Ibi, and G. T. F. de Abreu, "Bayesian Receiver Design via Bilinear Inference for Cell-Free Massive MIMO with Low-Resolution ADCs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 7, pp. 4756–4772, July 2023.

まとめ

- Advanced MIMO (A-MIMO) WGを紹介
 - 産業界・大学から多数の機関が参加
- Advanced MIMO技術に関する白書の概要を、簡単に紹介
 - Massive MIMO、分散MIMOに関する技術
 - Sub6、FR3、FR2にわたる幅広い周波数帯に対する検討

- **技術の詳細を知りたい方は、ぜひ白書をご覧ください**
- **Advanced MIMOに関する議論や情報収集に興味がある方は、ぜひ本WGにご参加ください**