

6G無線技術プロジェクト 端末連携技術WG

2025年9月30日

パート1

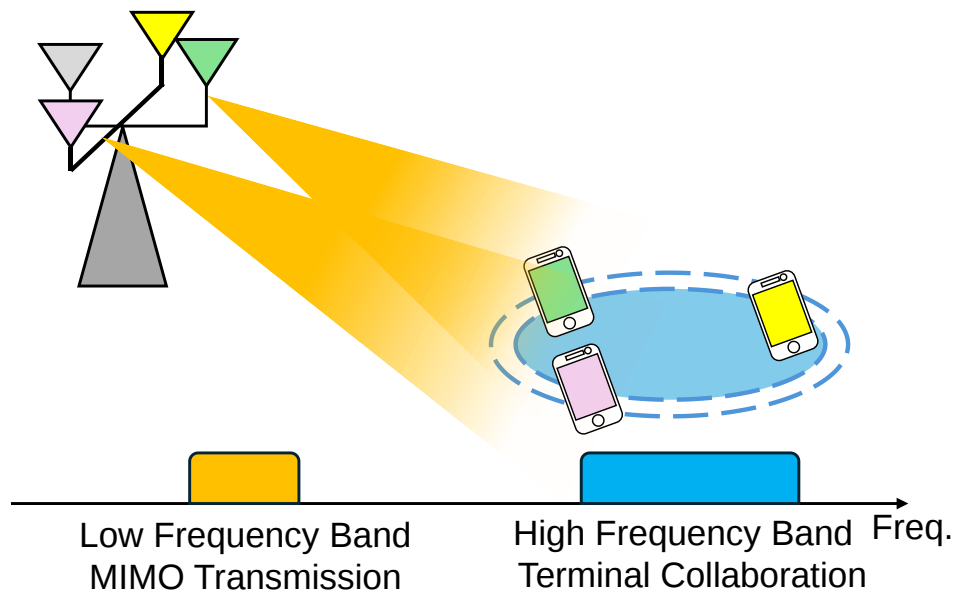
端末連携技術の研究動向

端末連携技術は、例えばサブ6GHz帯で伝送距離が長い複数の端末が協調し、ミリ波帯またはテラヘルツ帯でより広い周波数帯域幅を用いて端末間で送信信号と受信信号を交換する技術である。以下の3形態が標準モデルとして考えられている。

1. ダウンリンク端末連携MIMO信号受信
2. アップリンク端末連携MIMO信号伝送
3. アップリンク端末連携ビームフォーミング信号伝送

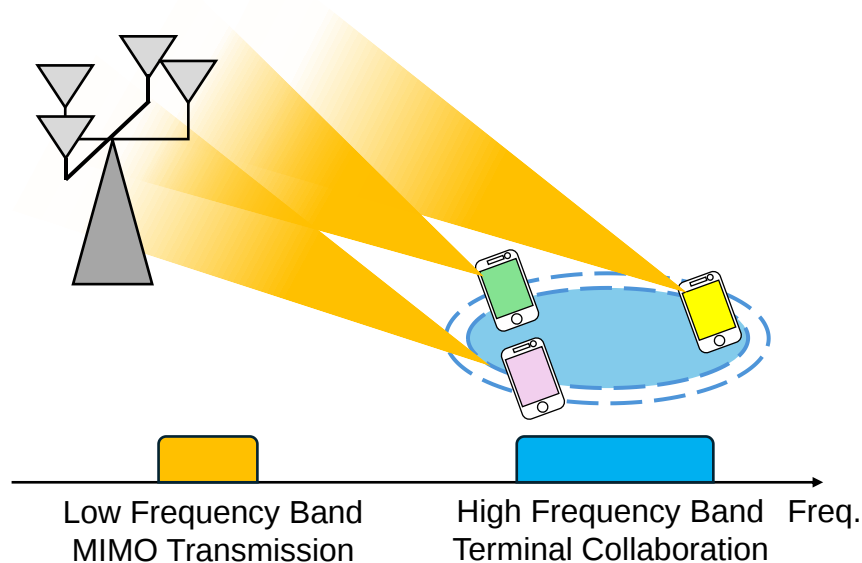
ダウンリンク端末連携型MIMO信号受信

ダウンリンク端末連携MIMO信号受信のモデル図を以下に示す。このモデルでは、基地局が低周波帯域で各端末に対し複数のアンテナから同時に信号を送信する。各端末はこれらの信号を受信し、高周波帯域で交換する。これらは仮想アンテナ素子として機能し、MIMO信号検出を実行する。



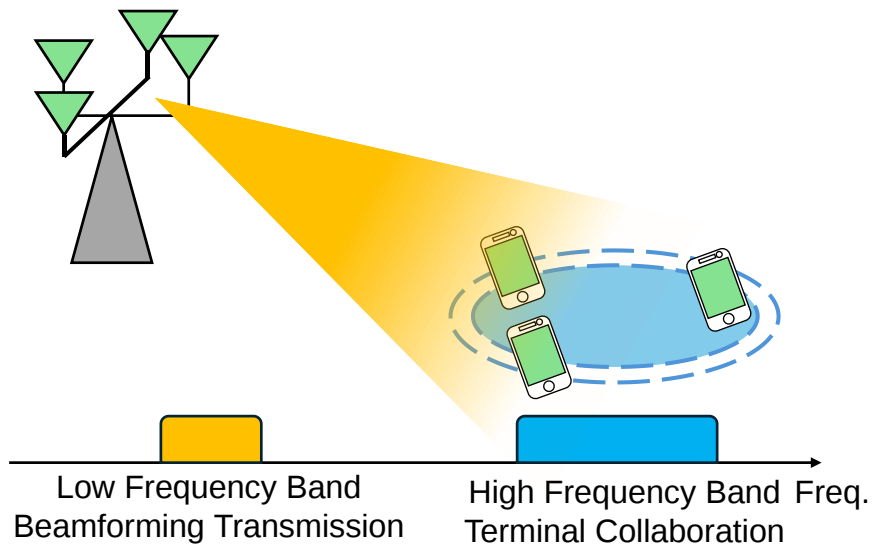
上りリンク端末連携MIMO信号伝送

アップリンク端末連携型MIMO信号伝送のモデル図を以下に示す。このモデルでは、端末はまず高周波帯域において、送信予定の信号を相互に交換する。特定の端末が他の端末に対し、自身に代わって信号を送信するよう要求することも可能である。低周波帯域では、複数の端末が同時に基地局に向けて信号を送信する。基地局は信号を受信し、MIMO信号検出を行う。



上りリンク端末連携ビームフォーミング信号伝送

アップリンク端末連携ビームフォーミング（BF）信号伝送のモデル図を以下に示す。このモデルでは、特定の周波数リソースに割り当てられた端末が、他の端末に対して自身に代わって信号を送信するよう要求する。低周波数帯域では、複数の端末が同時に基地局に向けて信号を送信する。この場合、送信信号に対して位相調整が施され、基地局で信号位相がコヒーレントに受信されるようにする。基地局は信号を受信し復調する。



技術的な課題

- I. 共通の技術的課題
 - I. 共同処理（デバイスとアシスタントのグループ化）
 - II. 無線セキュリティ
- II. ダウンリンク端末における連携型MIMO信号受信の技術的課題
 - I. アクセス制御
 - II. 端末グループ化
- III. アップリンク端末における連携MIMO信号伝送の技術的課題
 - I. 大容量データ伝送
- IV. アップリンク端末連携ビームフォーミング信号伝送における技術的課題
 - I. 端末グループ化
 - II. 信号転送処理

パート2

端末連携のフィールド実験（複数判定端末）NTT AS研と共同

- UHF帯4ストリーム基地局から送信し6端末で受信するシナリオ

- 427.2MHz特定実験試験局，8階建屋上に設置
- 143m離れた中庭で受信
 - 1アンテナ端末が6台，円周上をゆっくりと移動
 - RSSI, BERなどを取得，合わせて受信信号波形を記録

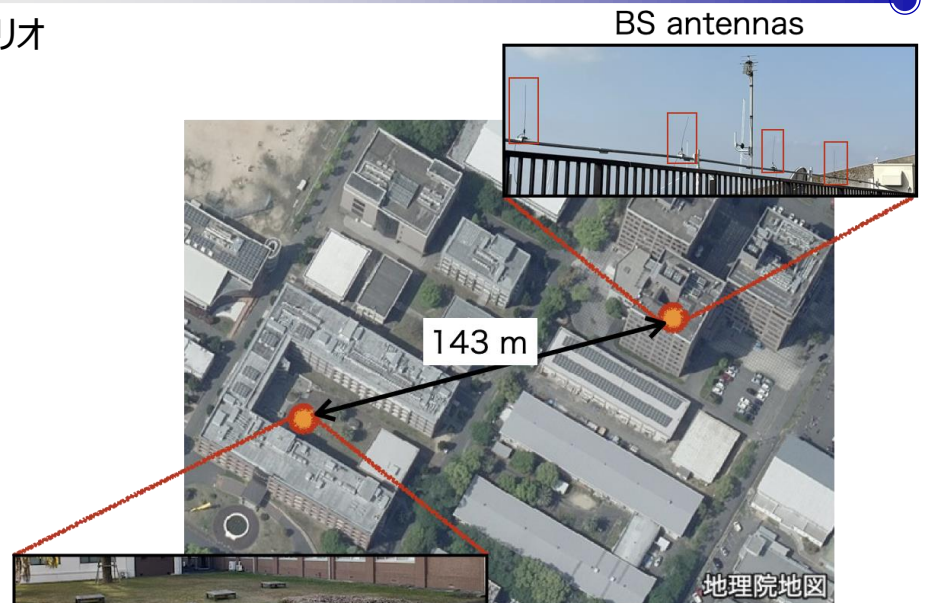
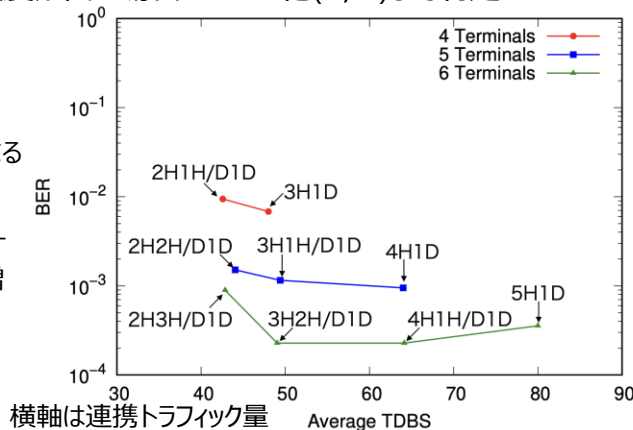
- 適応的な連携方式による特性改善効果

- 受信信号を提供するヘルパー端末(H)
- 集めた受信信号から判定する判定端末(D)
- 信頼度が低い場合は他の判定端末の判定結果を取得
- それでも信頼度が低い場合はDをH化(H/D)して判定

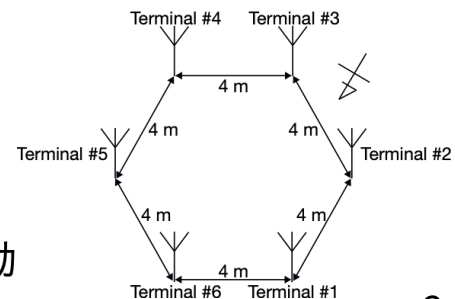
各カーブは合計端末数一定

2Hは過負荷MIMOから始まるため特性が劣化

3H構成でH/D端末を増やすとほとんど連携トラフィックが増加せずに特性を改善できる



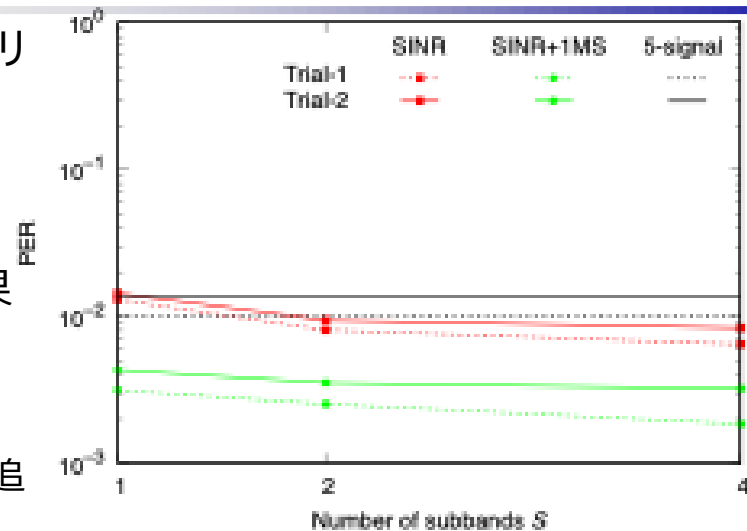
Terminal antennas
円周上を約2 km/hで移動



端末連携のフィールド実験（ヘルパー追加方式）

NTTドコモと共同

- UHF帯4ストリーム基地局から送信し6端末で受信するシナリオ
 - 427.2MHz特定実験試験局，8階建屋上に設置
 - 先ほどと同じ設定
- 必要に応じてヘルパーを追加する方式による特性改善効果
 - 4ストリームの送信信号に対して4端末連携で復号を試みる
 - この際の4台はMIMO伝搬路行列から計算されるSINRで決定
 - 復号結果を求める際の尤度情報から必要に応じてヘルパーを追加
 - 5端末連携の状態での復号を行う
 - 連携端末はサブバンド毎に選択を行う
 - 追加するヘルパーは共通



伝送実験で取得した受信信号波形を利用。
2種類，Trial-1とTrial-2

横軸は信号帯域のサブバンド分割数．増加させると特性を改善できる

提案方式であるSINR+1MS方式はSINR方式や最初から固定の5端末連携を行う方式に比べて特性を大きく改善できる

端末連携通信の周波数利用効率を向上させるフィルタリング中継法

研究の背景と目的

- 次世代セルラーシステムにおいても周波数利用効率の向上が求められる。
- 端末連携通信は高い伝送特性が達成できるが、中継方法によっては周波数利用効率が低下する問題がある。
- 周波数利用効率を向上させる新しい端末連携通信方式を提案する。

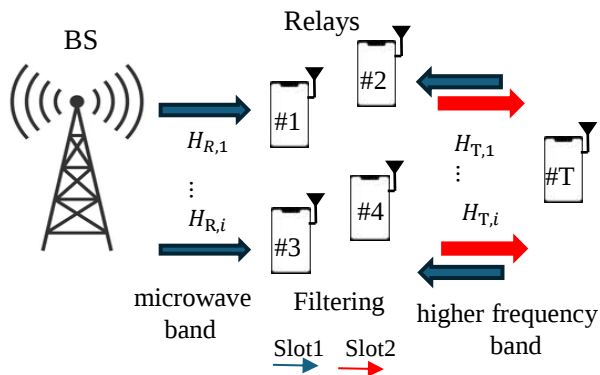


図.1 フィルタリング中継を用いる端末連携通信

提案の端末連携通信の構成

(A) 2スロット中継

- 図1に示すように、第一スロットにおいて基地局は中継器群にマイクロ波帯で信号を送信すると同時に、宛先端末も中継器に高周波数帯でパイロット信号を送信する。
- 選択された全中継器は基地局からの信号に対して周波数領域でフィルタリングを行い、端末に転送する。

(B) 分散中継器選択

- 各中継器は基地局から端末までのチャネル行列を基に、当該中継器を経た信号の端末におけるSNRを推定する。推定SNRが基準値を超えた場合にのみ、宛先に信号を転送する。

提案法の特徴

- 中継器数が幾つに増えても、2スロットで端末連携通信ができることをシミュレーションにより示した。
- 図2と図3に示すように、フィルタリング中継により高い通信品質が達成できること、提案する分散中継器選択により理論上界に近い特性が達成された。

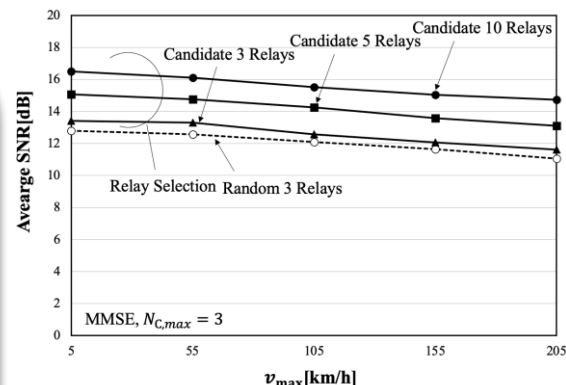


図.2 フィルタリング中継における中継器選択の理論上界

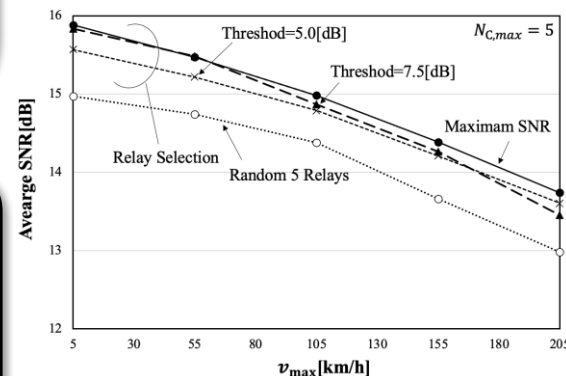


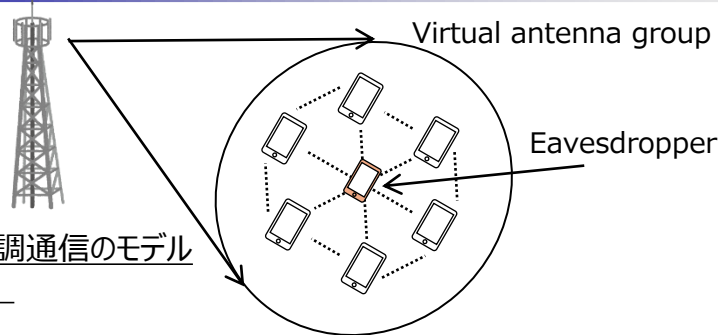
Fig.3 分散中継器選択の特性

端末間協調システムにおける物理層グループセキュリティ

目的

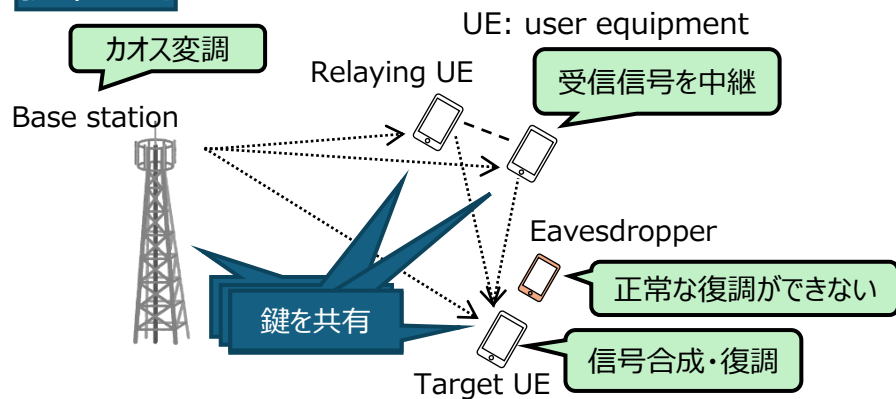
Base station

端末間連携協調通信のモデル
(盗聴者有り)



- 端末間連携協調通信システムにおいて, Virtual Antenna Groupに盗聴者が存在してもグループセキュリティが確保される伝送手法を構築する.
- システムに電波暗号化変調方式と協調リレー伝送方式を適用することで, 物理層秘匿性確保と同時に情報伝送性能も向上させる.

提案手法



下りリンクにおける端末間協調通信モデル

カオスを用いた電波暗号化変調を適用することにより
通信路符号化効果と**物理層秘匿性**を得る

- 共通鍵信号をグループ内で共有する. IDや事前認証等を想定.
 - 基地局はtarget UEへの送信信号をカオス変調しSub6帯で送信.
 - Relaying UEは基地局からの受信信号をミリ波帯でリレー伝送.
 - Target UEは基地局およびrelaying UEからの受信信号を合成し, 共通鍵を用いて最尤系列推定により復調を行う.
- ↓
- カオス変調の通信路符号化効果, 物理層秘匿効果, 協調リレー伝送のダイバーシチ効果によりグループセキュリティと品質向上が両立される.

検討項目:

グループセキュリティの安全性, 伝送性能, 上りリンク伝送システムへの適用, 共通鍵信号共有手法および配送コスト

高周波数帯を活用した端末連携に基づく協調位置推定技術

- 近接する複数の端末が互いに協調して送受信処理を行う**端末連携MIMO通信技術**が検討されている。
- 端末連携通信技術を位置推定に拡張することで通信性能だけでなく、屋内等の多様なシナリオにおける**位置推定精度**を大きく改善することが期待できる。
- 高周波数帯での直接通信により隣接端末間で情報共有を行う**端末協調通信システム**において、各端末の位置推定精度を大きく向上させる技術（**端末連携位置推定**）について検討する。

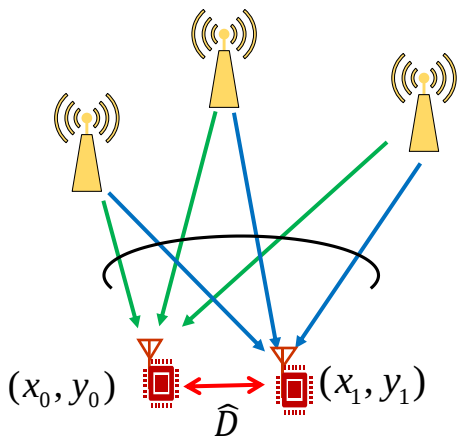


Fig1: 端末連携位置推定の原理

- AP-端末の距離情報から端末位置座標 (x_0, y_0) 、 (x_1, y_1) を推定することで、それらの端末間距離 $D = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$ を求めることができる。一方、端末間の直接通信時の受信電力強度から端末間距離 $\hat{D}$ を推定できる。
- $|D - \hat{D}|^2$ を最小化するように端末の位置を推定することで、端末間連携のない場合に比べて、位置推定精度を高めることができる。
- 種々の評価シナリオにおける計算機シミュレーション結果 (Fig.2) から、端末間連携のない場合に比べて、端末連携位置推定を用いることにより位置推定精度を大きく改善できることを示す^{[1][2]}。

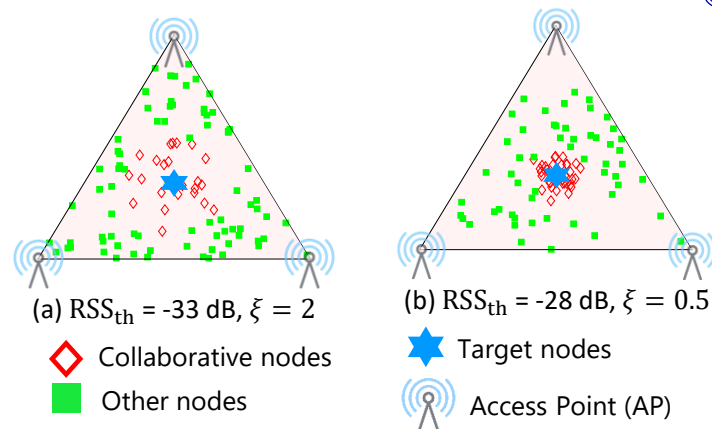


Fig. 2: AP位置とユーザ分布

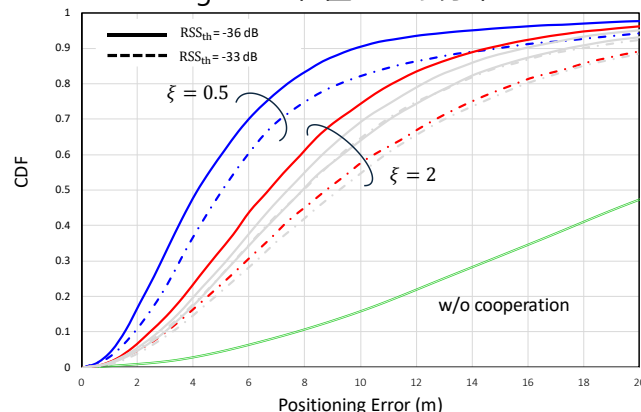


Fig. 3: 端末連携位置推定時の測位誤差CDF

[1] Z. Li, et al., "Performance Evaluation of Cooperative Positioning with User-Terminal Collaboration," Prof. JAC-ECC2023, Dec. 2023.

[2] Z. Li, et al., "Performance of RSS-Based Indoor Cooperative Positioning with Weighted User-Terminal Collaboration," Prof. JAC-ECC2024, Dec. 2024

CTFI-OFDMにおける時間窓平均を用いた位相雑音の補償

□ 目的:

- 近年の主要技術であるOFDMにおいて, サブキャリアは狭帯域に配置されるため, 局部発信器の位相ズレによる位相雑音の影響を受け易い.
- 高周波数帯において位相雑音の影響は顕著であり, 端末連携にも影響.
- 複素時間周波数補間(CTFI)によるパイロット信号を用いた時間窓平均による補償.

□ 提案法:

□ TFI:

1と0のサブキャリアを交互に配置

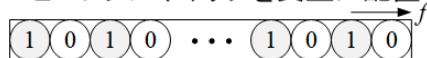


図: TFI

□ CTFI:

1とjのサブキャリアを交互に配置

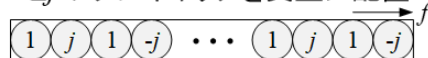


図: CTFI

● チャンネル推定 (TFI):

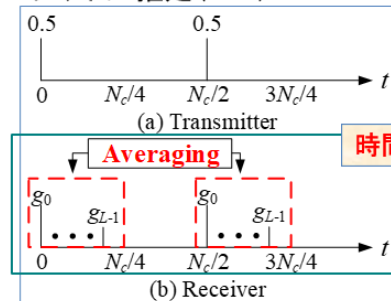


図: TFI (時間領域)

● チャンネル推定 (CTFI):

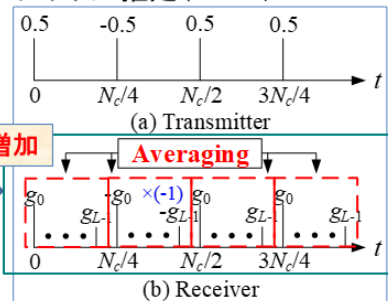


図: CTFI (時間領域)

• 位相雑音: $\theta_i = \theta_{i-1} + w$

• w はガウス分布に基づく $\Rightarrow$ 時間窓平均 $\Rightarrow$ CSIの精度向上

• |(時間窓平均前のCIR)-(時間窓平均後のCIR)| = 位相雑音の大きさ $\Rightarrow$ MMSEの重み

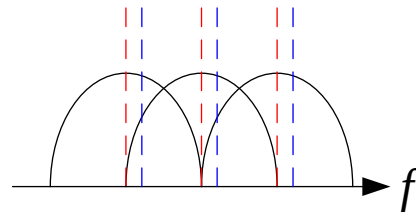
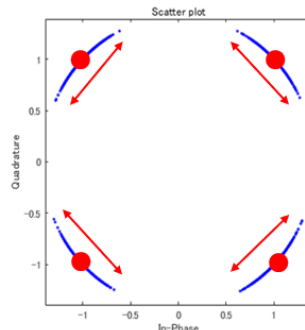
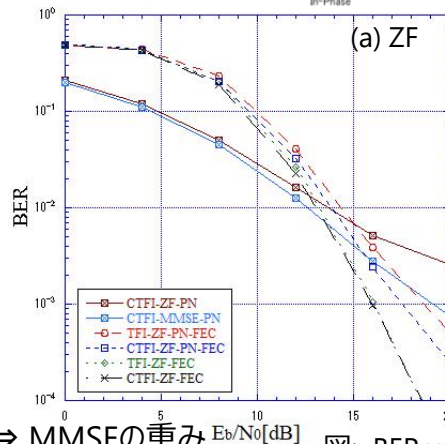
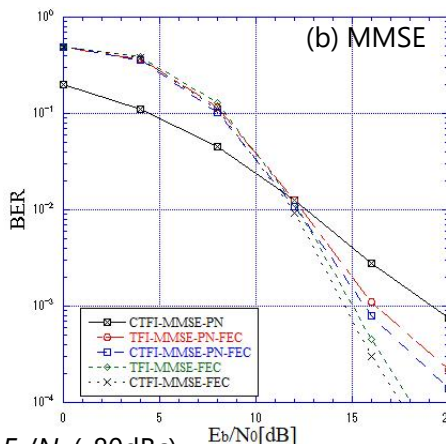


図: 位相雑音の影響



(a) ZF



(b) MMSE

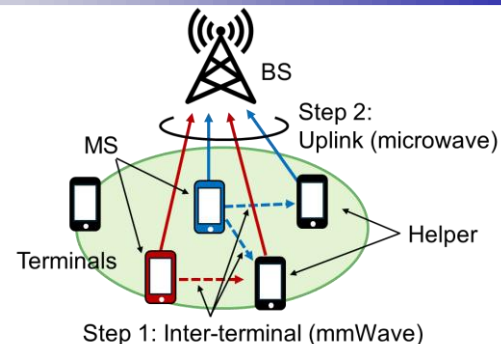
図: BER vs. E_b/N_0 (-80dBc)

[1] S. Okamoto, et al., "Phase Noise Compensation with Time Window Averaging for WHT-CTFI-OFDM," Proc. IEEEGCC2024, pp. 1392-1393, Oct. 2024.

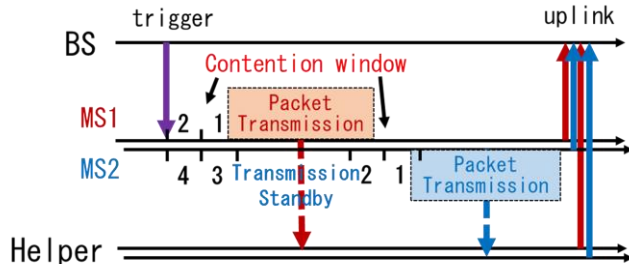
[2] 岡本 他, "アダマール拡散CTFI-OFDMにおける時間窓平均を用いた位相雑音の補償," 信学技報, CS2024-10, pp. 13-14, 2024年7月.

端末協調通信システムにおけるアクセス制御

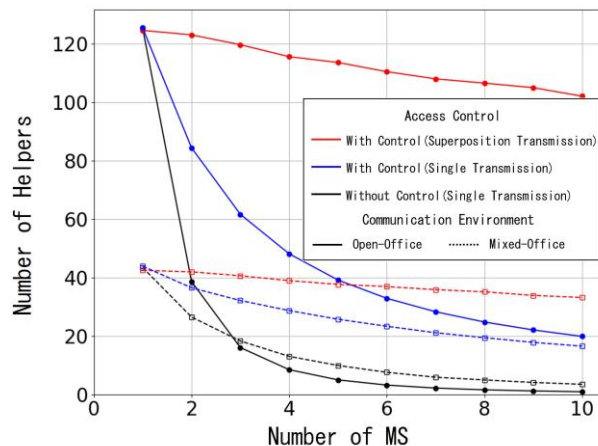
- アップリンク端末協調通信システム
 - アップリンク通信はマイクロ波帯，端末間通信はミリ波帯を使用
- 端末間通信
 - MSはBSへ伝送するデータ情報を他の端末へブロードキャスト
 - データ情報の受信に成功した端末はHelperとしてアップリンク通信で協力
- 検討内容
 - アップリンク通信の性能に大きく影響を与える協調端末数の評価
 - ミリ波帯電波伝搬環境を想定した性能評価
 - 干渉回避のためにアクセス制御の導入



アップリンク端末協調通信システム



アクセス制御のタイミングチャート



ミリ波帯屋内伝搬環境における協調端末数^[1]

[1] Y. Li, et al., "Evaluation of access control mechanisms within inter-terminal cooperation...", IEICE ICETC, 2024.

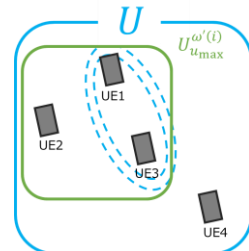
端末グループ構成

・ダウンリンク端末連携MIMO

- 連携UEのグルーピングにおいて瞬時スループットを考慮
⇒スループットを1.13倍改善

Index m	Subgroup	Th	FI
1	(UE1, UE2, UE3)	$\sum T_u^{i(1)}(t)$	$F_{ms}^{i(1)}$
2	(UE1, UE2), UE3	$\sum T_u^{i(2)}(t)$	$F_{ms}^{i(2)}$
3	(UE2, UE3), UE1	$\sum T_u^{i(3)}(t)$	$F_{ms}^{i(3)}$
4	(UE3, UE1), UE2	$\sum T_u^{i(4)}(t)$	$F_{ms}^{i(4)}$
5	UE1, UE2, UE3	$\sum T_u^{i(5)}(t)$	$F_{ms}^{i(5)}$

瞬時スループットを考慮した
評価関数とグルーピング



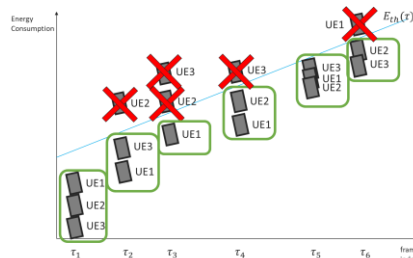
グループ内UE数を制限した
グルーピング

・アップリンク端末連携ビームフォーミング

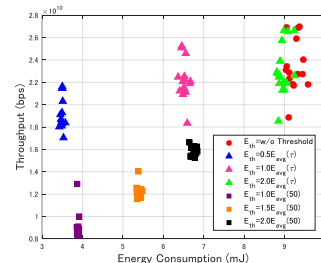
- 連携UEのグルーピングにおいてグループ内UE数を上限値に制限
⇒スループットを維持しセルサイトのUEが他のアシストする
確率を1/5に低減

・累積消費エネルギーを考慮したグルーピング

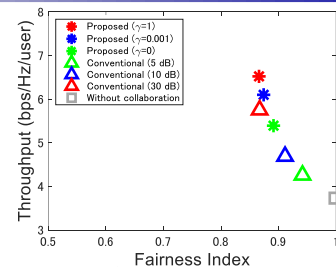
- 各端末の累積消費エネルギーに対する閾値を設定
 - サブフレーム数に比例した制限
 - 消費電力が閾値以下の場合連携
 - 閾値を上回るときグループ離脱
 - 消費電力が閾値以下になったら再度連携
- ⇒アップリンクとダウンリンクにおいて
エネルギー消費を約40%改善



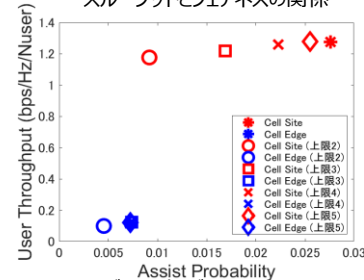
サブフレーム数に比例した消費電力制限



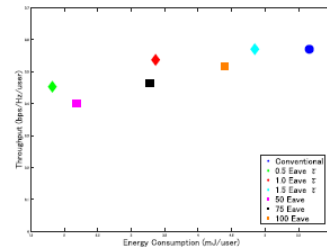
累積消費エネルギー閾値を用いた場合の
ダウンリンクのスループットと消費エネルギー



提案グルーピングを用いた場合の
スループットとフェアネスの関係



提案グルーピングを用いた場合の
他のUEをアシストする確率



累積消費エネルギー閾値を用いた場合の
アップリンクのスループットと消費エネルギー

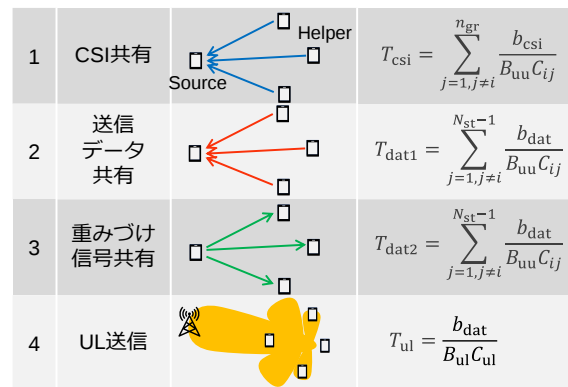
端末グループ構成（2）

目的

- ❑ 連携通信において**情報共有のためのオーバーヘッド**を考慮した有効性を検証する
- ❑ **多数の端末を対象とし**，スループットが最大化されるように複数のグループを構成する

研究の方向性

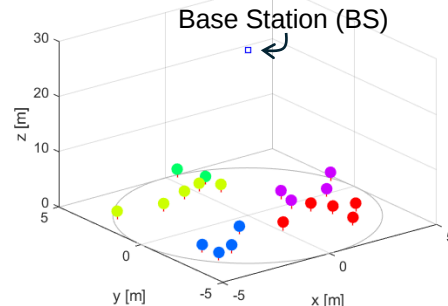
- ❑ オーバーヘッドを考慮した端末連携アップリンクMIMO伝送の定式化
- ❑ クラスタリング（k-means）によるグループ化
- ❑ 端末間，端末－基地局間のチャネル状態を考慮した連携端末選択，公平性，リソース制御



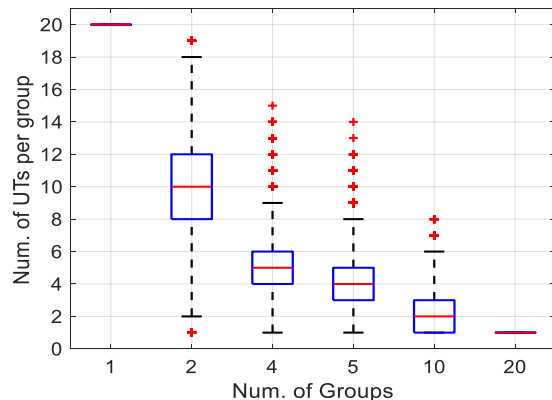
連携伝送のフロー

$$TP = \frac{N_{\text{st}} b_{\text{dat}}}{T_{\text{csi}} + T_{\text{dat1}} + T_{\text{dat2}} + T_{\text{ul}}}$$

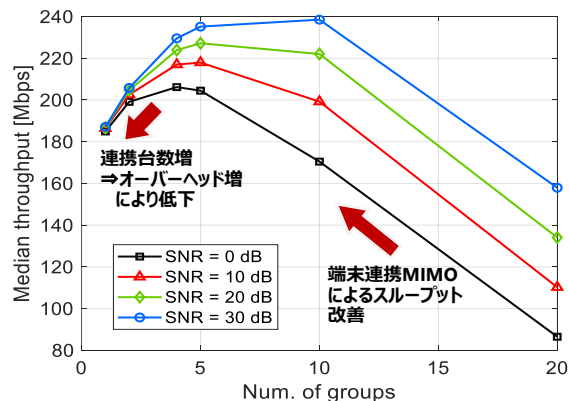
端末－端末：ミリ波
端末－基地局：Sub6



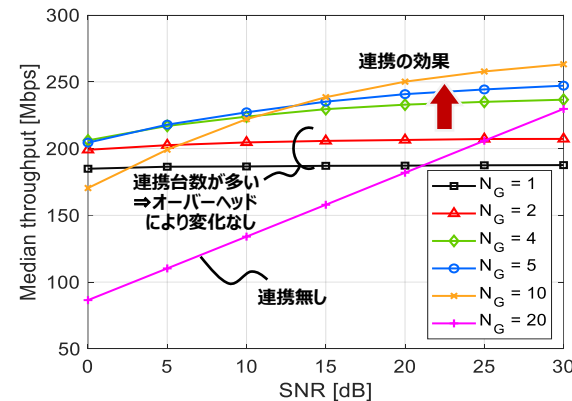
クラスタリングの例



グループごとの端末数(20端末からクラスタリング)



20端末をグループ化したときのスループット中央値



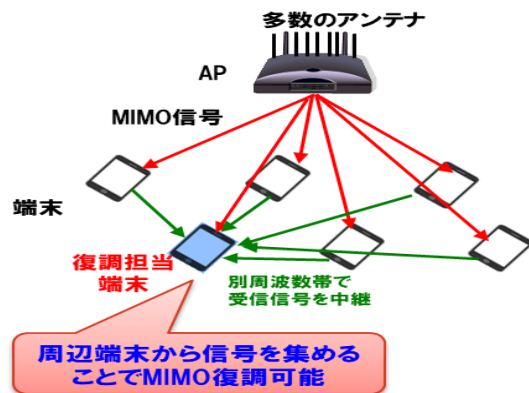
基地局－端末間SNRに対するスループット中央値

課題：複数端末が連携して受信した信号を集めて空間多重伝送を行う無線通信システムにおいて、通信品質を維持しつつ、連携端末群の選択とMIMOに対して繰り返し等化処理を行う際の繰り返し処理回数の低減を同時に行うことは考えられていなかった。

方法：MIMO復調における繰り返し等化による復調を行う際の「残留干渉係数」に着目し、残留干渉係数が閾値以下の連携端末群に絞り、その中から最小の連携端末群を選択して必要な処理を行う。また、閾値以下の連携端末群が存在しない場合は、条件数（伝搬路行列の固有値の最大値/最小値）に注目し、最小となるパターンを選択し、残留干渉係数が閾値以下になるまで必要な処理を行う。

効果：受信誤り率を保ちつつ繰り返し処理回数を削減

【システムモデル】



- 送信側でのチャネル情報取得が不要。
オーバーヘッドが少ないため、MU-MIMO
に比べて効率が高い

【従来法におけるMIMO復調処理】

- 信号組み合わせパターンから1つを選んで復調処理
- 予め定めた回数、復調処理を繰り返し

【提案法におけるMIMO復調処理】

- 複数の信号組み合わせパターンに対して並列で復調処理の一部を実施
- MIMO復調における繰り返し等化による復調を行う際の「残留干渉係数」に着目し、残留干渉係数が閾値以下になる連携端末群が存在するか判定
- 存在する場合は、残留干渉係数が最小のものを選択し、受信信号処理を行う
- 存在しない場合は、条件数（伝搬路行列の固有値の最大値/最小値）に注目し、最小となるパターンを選択。残留干渉係数が閾値以下になるまで受信信号処理を行う

→BERを保ちつつ繰
返し処理回数を削減

仮想化端末技術

- 周辺にあるデバイスにミリ波アンテナを搭載させてユーザ端末との間をテラヘルツ帯の超広帯域リンクで接続することで、仮想的にアンテナ数を増大

