

ユーザクラスタセントリック CF-mMIMO における プリ/ポストコーディングの演算量削減に関する一考察

高橋 領[†] 松尾 英範[†] 夏 斯傑[‡] 陳 強^{†‡} 安達 文幸[†]

[†] 東北大学 災害科学国際研究所 〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1

[‡] 東北大学 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: ryo.takahashi.b4@tohoku.ac.jp

あらまし Beyond 5G 以降の重要技術として、広い通信エリアに多数配置したアンテナを協調利用する Cell-Free massive MIMO (CF-mMIMO) が注目されている。これまでに著者らは、システムのスケーラビリティ確保と、高密度ユーザ環境におけるシステム容量増大の両方を達成可能なユーザクラスタセントリック CF-mMIMO (UCC-CF-mMIMO) を提案してきた。UCC-CF-mMIMO では、近接するユーザをユーザクラスタとしてまとめた上で、クラスタ内ユーザ共通のアンテナを複数選択して、マルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 空間多重を行う。また、ユーザクラスタ毎の MU-MIMO プリ/ポストコーディングに、そのクラスタ内のアンテナと干渉クラスタ内ユーザ間の MIMO チャネルの相関行列を直接考慮することでクラスタ間干渉を軽減する。チャネル相関行列を用いることで干渉信号の到来方向にヌルを形成できるため干渉抑圧効果は向上するが、干渉ユーザ数の増加に伴い演算量も大きくなる。本稿では、プリ/ポストコーディングの演算量削減手法として、主要な干渉ユーザについては従来通りチャネル相関行列を直接考慮し、それ以外の干渉ユーザについては等価雑音と見なすことを提案する。従来手法と提案手法により達成可能なユーザリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、干渉低減効果および演算量について考察する。

キーワード CF-mMIMO, ユーザクラスタセントリック, プリ/ポストコーディング, 低演算量

A Study on Computational Complexity Reduction of Pre/Postcoding in User-Cluster-Centric CF-mMIMO

Ryo TAKAHASHI[†] Hidenori MATSUO[†] Sijie XIA[‡] Qiang CHEN^{†‡} Fumiyuki ADACHI[†]

[†] Tohoku University IRIDeS 468-1 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8572, Japan

[‡] Department of Communications Engineering, Graduate school of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: ryo.takahashi.b4@tohoku.ac.jp

Abstract Cell-Free massive MIMO (CF-mMIMO), which cooperatively utilizes a large number of antennas deployed over a wide communication area, has been attracting attention as a key technology for Beyond 5G systems. Previously, we have proposed a user-cluster-centric CF-mMIMO (UCC-CF-mMIMO) which can both ensure the system scalability and improve the system capacity in a high user density environment. UCC-CF-mMIMO performs multi-user MIMO (MU-MIMO) spatial multiplexing by grouping neighboring users into user clusters and selecting multiple antennas common to all users in each cluster. Inter-cluster interference can be reduced by directly considering the correlation matrix of the MIMO channel between the selected antennas of user-cluster of interest and the users in the interfering clusters in the MU-MIMO pre/postcoding of user cluster of interest. The use of channel correlation matrix makes it possible to form nulls toward interfering users, thereby improving the interference suppression effect, however, the computational complexity of pre/postcoding increases as the number of interfering users increases. In this paper, we propose a low-complexity pre/postcoding in which the channel correlation matrix is directly used for the predominant interfering users, while the sum of other inter-cluster interfering signals is approximated as an equivalent Gaussian noise (therefore, the measurement of interference power is only necessary for other interfering users). The interference reduction and the computational complexity are discussed by evaluating the user link capacities achievable with the conventional and proposed pre/postcoding schemes through computer simulation.

Keywords CF-mMIMO, user-cluster-centric, pre/postcoding, low complexity

1. まえがき

近年, Beyond 5G 以降の重要技術として, Cell-Free massive MIMO (CF-mMIMO) が注目されている[1]. CF-mMIMO で

は, 広い通信エリアに分散配置した多数のアクセスポイント (あるいは分散アンテナ) を光モバイルフロントホールにより Central Processing Unit (CPU) に集約し協調利用することで, ユーザ間干渉を解消しつつ, エリア全体に均一

かつ高品質な通信を提供することができる。

これまでにシステムのスケーラビリティを確保するためにユーザセントリック CF-mMIMO (UC-CF-mMIMO) が検討されてきた[2, 3]. UC-CF-mMIMO では、ユーザ毎に協調させる分散アンテナを選択してアンテナクラスタを形成し、アンテナクラスタが重なるユーザを干渉ユーザとして判定し、協調させるアンテナと干渉ユーザ間の MIMO チャンネルの相関行列を考慮するプリ/ポストコーディングを適用することでユーザ間干渉を軽減する。協調アンテナ数と干渉ユーザ数の両方を制限することで、スケーラビリティを確保しつつ、高い通信品質を維持できる。

CF-mMIMO では、通信エリア内の分散アンテナ数に対してユーザ数が少ない、すなわち低密度ユーザ環境を想定することが一般的である。これに対して、著者らは、ユーザ密度に関係なく適用可能で、特に高密度ユーザ環境において高いシステム容量を達成可能なユーザクラスタセントリック CF-mMIMO (UCC-CF-mMIMO) を提案した[4, 5]. UCC-CF-mMIMO では、近接するユーザをユーザクラスタとしてまとめた上で、クラスタ内ユーザ共通の分散アンテナを複数選択して、マルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 空間多重を行う。MU-MIMO のプリ/ポストコーディングには、UC-CF-mMIMO と同様にクラスタ内分散アンテナと干渉ユーザ間のチャンネル相関行列を考慮するプリ/ポストコーディングを適用するが、クラスタ内の全てのユーザが同じアンテナを共有するため、ユーザクラスタにつき 1 回のプリ/ポストコーディングウェイトを求め、それを同じユーザクラスタ内で共有できる。このため、ユーザ毎にウェイト生成を行う UC-CF-mMIMO とシステム全体の演算量を等しくする場合、UCC-CF-mMIMO の方がより多くの分散アンテナを選択でき、ヌルを向けることができる干渉ユーザ数が増え、またダイバーシチ利得も向上し高い容量を達成できる。

プリ/ポストコーディングに干渉ユーザ毎のチャンネル相関行列を直接考慮することで干渉信号の到来方向にヌルを形成できるため、干渉抑圧効果は向上するが干渉ユーザ数の増加に伴い、求めるチャンネル相関行列の数が増えるため演算量も大きくなる。特に高密度ユーザ環境では干渉ユーザ数が増えるため問題となる。そこで、本稿では、プリ/ポストコーディングの演算量削減手法として、主要な干渉ユーザについては従来通りチャンネル相関行列を直接考慮し、それ以外の干渉ユーザについては等価雑音と見なすことを提案する。従来手法と提案手法により達成可能なユーザリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、干渉低減効果および演算量について考察する。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では想定する CF-mMIMO システムモデルを示し、UCC 構成および伝送系モデルについて概説する。第 3 章では従来のプリ/ポストコーディングウェイトと提案する低演算量ウェイトについて説明する。第 4 章で計算機シミュレーションによる評価結果を示し、第 5 章でまとめる。

2. CF-mMIMO システムモデル

通信エリア内の任意の位置に配置された A 本の分散アンテナ (以降、単純にアンテナと呼ぶ) と同エリア内の任意の位置に分布する U 台のシングルアンテナ端末 (以降ユーザと呼ぶ) から構成される CF-mMIMO システムを考える。各アンテナは光モバイルフロントホールを介して CPU に集約され、エリア内の全てのアンテナを協調利用できると

仮定する。また、上下リンクの伝送に同一搬送波周波数を利用する時分割複信 (TDD) を仮定し、 U ユーザは同じ無線リソースを用いて同時に通信することを想定する。CF-mMIMO では、低ユーザ密度 ($U \ll A$) の環境を想定することが一般的であるが、本稿では、高ユーザ密度 ($U \leq A$) を含む環境を想定する。

2.1. UCC 構成

CF-mMIMO のユーザクラスタセントリック (UCC) 構成の概念を図 1(a) に示す。比較のためユーザセントリック (UC) 構成の概念を図 1(b) に示す。UCC 構成は、ユーザクラスタリングとアンテナ選択の 2 ステップにより構築される。

ユーザクラスタリングでは、ユーザの位置情報に基づき、近接ユーザをクラスタリングする。クラスタ当たりの信号処理演算量を均一にするため、拘束条件付き K 平均法[6]を用いてクラスタ当たりのユーザ数を U' 以下に制約し、エリア内全 U ユーザを $K (= U / U')$ クラスタに重複を許さずに分類する。本稿では、ユーザクラスタ k に属するユーザ集合を $\mathcal{S}_k \subset \{1, \dots, u, \dots, U\}$ と定義し、 $|\mathcal{S}_k| = U'$ 、 $\mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_l = \emptyset$ である。

ユーザクラスタリング後、システムのスケーラビリティを確保するため、ユーザクラスタ毎に協調させる分散アンテナを選択する。なお、異なるユーザクラスタ間で選択アンテナの重複を許容する。ユーザクラスタ当たりの信号処理演算量を均一にするため、ユーザクラスタ毎にチャンネル利得の高い上位 A' 本のアンテナを選択する。クラスタ内のユーザの通信品質を公平にするため、ユーザ毎にチャンネル利得の高い上位 A' / U' 本のアンテナを選択する。このとき、同一クラスタ内のユーザ間で選択アンテナが重複するとそのクラスタの総アンテナ数が A' を下回るため、同一クラスタ内のユーザ間で選択アンテナが重複した場合は、チャンネル利得が高いユーザが優先的に選択し、チャンネル利得の低いユーザは次にチャンネル利得の高いアンテナを選択する。本稿では、ユーザクラスタ k に属するアンテナ集合を $\mathcal{M}_k \subset \{1, \dots, a, \dots, A\}$ と定義し、 $|\mathcal{M}_k| = A'$ である。

なお、ユーザクラスタ当たりのユーザ数 $U' = 1$ とした特殊ケース (すなわち、シングルユーザクラスタ) が UC 構成と言える。

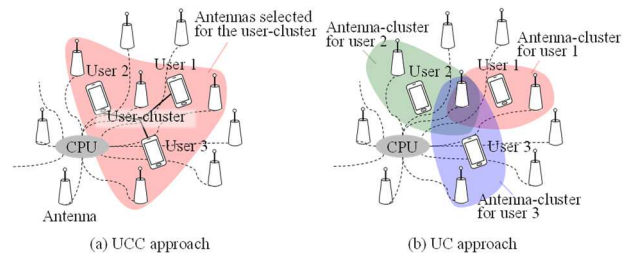


図 1 UCC 構成および UC 構成の概念

2.2. UCC 伝送系モデル

UCC-CF-mMIMO システムにおける上りリンク伝送系モデルを図 2(a) に示す。ユーザ $u (= 1, \dots, U)$ がユーザクラスタ $k (= 1, \dots, K)$ に属するとき、ユーザ u のポストコーディング後の上りリンク受信信号 $y_u^u \in \mathbb{C}$ は次式で表される。

$$y_u^u = \mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u s_u^u + \sum_{v=1, v \neq u}^U \mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v s_v^u + \mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{n} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{w}_u \in \mathbb{C}^A$ はユーザ u のポストコーディングウェイトベクトル (詳細は 3 章参照)、 $\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^A$ はユーザ u の上り

リンクチャネルベクトル, $s_u^{\text{dl}} \in \mathbb{C}$ はユーザ u の上りリンク送信信号 (送信電力 p_u), $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^A$ は熱雑音ベクトルで各要素は平均 0, 分散 σ^2 である. $\mathbf{D}_k = \text{diag}(d_1, \dots, d_a, \dots, d_A) \in \mathbb{C}^{A \times A}$ はユーザクラスタ k のアンテナ選択行列であり, その対角要素を次式で定義する.

$$d_a = \begin{cases} 1 & \text{if } a \in M_k \\ 0 & \text{if } a \notin M_k \end{cases} \quad (2)$$

下りリンク伝送系モデルを図 2(b)に示す. ユーザ u の下りリンク受信信号 $y_u^{\text{dl}} \in \mathbb{C}$ は次式で表される.

$$y_u^{\text{dl}} = \mathbf{h}_u^H \mathbf{D}_k \frac{\mathbf{w}_u}{\sqrt{\mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u}} s_u^{\text{dl}} + \mathbf{h}_u^H \sum_{v \in S_k \setminus u} \mathbf{D}_k \frac{\mathbf{w}_v}{\sqrt{\mathbf{w}_v^H \mathbf{w}_v}} s_v^{\text{dl}} + \mathbf{h}_u^H \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{v \in S_i} \mathbf{D}_i \frac{\mathbf{w}_v}{\sqrt{\mathbf{w}_v^H \mathbf{w}_v}} s_v^{\text{dl}} + n_u \quad (3)$$

ここで, $\mathbf{h}_u^H \in \mathbb{C}^{A \times A}$ はユーザ u の下りリンクチャネルベクトル (TDD を仮定した場合, 実際には上りリンクチャネルベクトルの転置となるが, 数式表現を簡単にするために複素共役転置を用いることに注意[2]), $\mathbf{w}_u / \sqrt{\mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u}$ はユーザ u のプリコーディングウェイトベクトル, $s_u^{\text{dl}} \in \mathbb{C}$ はユーザ u の下りリンク送信信号 (送信電力 p_u), n_u はユーザ u の熱雑音で平均 0, 分散 σ^2 である.

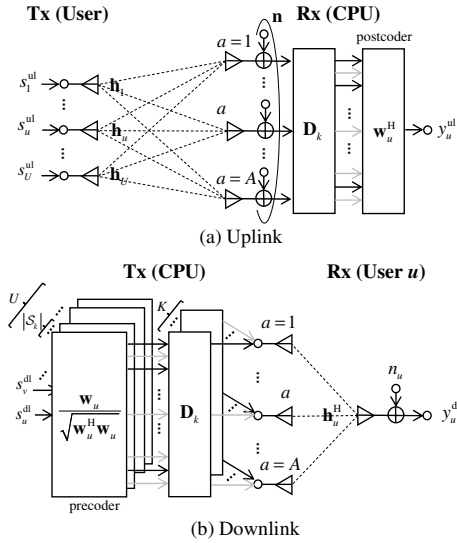


図 2 UCC 伝送系モデル

3. プリ/ポストコーディングウェイト

3.1. 従来ウェイト

ユーザクラスタ k に属するユーザ u の Minimum Mean Square Error (MMSE) 規範のポストコーディングウェイトベクトル $\mathbf{w}_u^{\text{MMSE}} \in \mathbb{C}^A$ は, 次式で与えられる[5].

$$\mathbf{w}_u^{\text{MMSE}} = p_u \left(\sum_{i=1}^K \sum_{v \in S_i} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k + \sigma^2 \mathbf{D}_k \right)^{\dagger} \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u \quad (4)$$

ここで, $\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k$ は, ユーザクラスタ k のアンテナとユーザ v 間の上りリンクチャネル相関行列である. 式(4)では, 通信エリア内の全てのユーザについてチャネル相関行列を加算し, その疑似逆行列を求めている (\dagger は疑似逆行列演算子). これにより, 主要な干渉信号の到来方向にヌルを向けることができクラスタ間干渉を軽減できる. また, 式(4)の右側から乗算される $\mathbf{D}_k \mathbf{h}_u$ はポストコーディングウェイトベクトルのエルミート転置を用いたとき (式(1)参

照)に複素共役受信ビームを形成し, 式(4)の (\dagger) 内の雑音電力 σ^2 は雑音強調を抑え受信信号対干渉および雑音電力比 (SINR) を向上させる[5, 7].

式(4)は, 通信エリア内の全てのユーザを干渉ユーザとして考慮しているが, 実際には, ユーザ u から遠く離れたユーザからの干渉は伝搬損失の影響で大きく減衰する. この傾向を利用し, 近傍の干渉の強いユーザのみを考慮した partial MMSE (P-MMSE) ポストコーディングウェイトベクトル $\mathbf{w}_u^{\text{P-MMSE}} \in \mathbb{C}^A$ は, 次式で与えられる[5].

$$\mathbf{w}_u^{\text{P-MMSE}} = p_u \left(\sum_{v \in \mathcal{P}_k} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k + \sigma^2 \mathbf{D}_k \right)^{\dagger} \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u \quad (5)$$

ここで, \mathcal{P}_k はユーザクラスタ k においてウェイト計算に考慮するユーザの集合 (クラスタ k 内ユーザ (多重するユーザ) と近傍の干渉ユーザ) であり, $\mathcal{P}_k = \bigcup_{v \in S_k} \mathcal{P}_v$ で与えられる. ここで \mathcal{P}_v は, UC 構成 ($k \rightarrow v$ としたシングルユーザクラスタ, 選択アンテナ数は $\lfloor A_{\text{UCC}} / \sqrt[3]{U_{\text{UCC}}} \rfloor$ 本) においてユーザ v のウェイト計算に考慮するユーザの集合で, 選択アンテナがユーザ v と重なるユーザの集合 (すなわち, $\mathcal{P}_v = \{i: \mathbf{D}_i \mathbf{D}_i \neq \mathbf{0}_A\}$) であることに注意. したがって, UCC 構成で考慮するユーザの集合は, ユーザクラスタ k 内の各ユーザが UC 構成で考慮するユーザ集合の和となる[4]. 式(5)は, 協調アンテナ数とウェイト計算に考慮するユーザ数の両方を制限するため, スケーラビリティの確保に有効である. なお, 以降では式(4)で示した全干渉ユーザを考慮したウェイトを full MMSE (F-MMSE) と表記して, P-MMSE と区別する.

F-MMSE および P-MMSE プリコーディングウェイトベクトルは, それぞれ $\mathbf{w}_u^{\text{MMSE}} / \sqrt{(\mathbf{w}_u^{\text{MMSE}})^H \mathbf{w}_u^{\text{MMSE}}}$ および $\mathbf{w}_u^{\text{P-MMSE}} / \sqrt{(\mathbf{w}_u^{\text{P-MMSE}})^H \mathbf{w}_u^{\text{P-MMSE}}}$ によって与えられる.

3.2. 提案する低演算量ウェイト

式(4)および式(5)のウェイトは, 干渉ユーザ毎のチャネル相関行列を直接考慮するため, 主要な干渉信号の到来方向にヌルを形成でき, 干渉抑圧効果が向上する. しかし, チャネル相関行列 ($\in \mathbb{C}^{A \times A}$, 協調アンテナに制限すると $\in \mathbb{C}^{A' \times A'}$) を多重ユーザ数 + 考慮する干渉ユーザ数 (式(4)は U , 式(5)は $|\mathcal{P}_k|$) の分だけ計算する必要があり, 干渉ユーザ数の増加に伴い演算量が大きくなる. また, チャネル推定の演算量も増える. 式(5)では考慮する干渉ユーザを近傍のユーザに制限するが, ユーザ分布に偏りがある場合や高密度ユーザ環境では干渉ユーザ数の増加が避けられない.

そこで, 主要な干渉ユーザについては従来通りチャネル相関行列を直接考慮してヌルを形成し, それ以外の干渉ユーザについては等価雑音と見なす低演算量ウェイトを提案する. ユーザクラスタ k においてヌルを向ける主要な干渉ユーザの集合を $\mathcal{I}_k^{\text{null}}$, 主要干渉ユーザ以外の等価雑音と見なす干渉ユーザの集合を $\mathcal{I}_k^{\text{noise}}$ と表記すると, 提案する full low-complexity MMSE (F-LC-MMSE) ポストコーディングウェイトベクトル $\mathbf{w}_u^{\text{F-LC-MMSE}} \in \mathbb{C}^A$ は次のように導出される.

$$\mathbf{w}_u^{\text{F-LC-MMSE}} = p_u \left(\sum_{v \in S_k} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k + \sum_{v \in \mathcal{I}_k^{\text{null}}} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k + \text{diag} \left(\sum_{v \in \mathcal{I}_k^{\text{noise}}} p_v \mathbb{E} \{ (\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v) \circ (\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v)^* \} \right) + \sigma^2 \mathbf{D}_k \right)^{\dagger} \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u \quad (6)$$

ここで、()[†] 内の第 1 項および第 2 項は、それぞれ多重ユーザおよびヌルを向ける主要干渉ユーザのチャンネル相関行列の総和、第 3 項はユーザクラスタ k の各アンテナにおいて雑音と等価に扱う干渉ユーザについての干渉電力の総和である。ユーザ v の上りリンクチャンネルベクトルを $\mathbf{h}_v = [h_{v1} \dots h_{va} \dots h_{vA}]^T \in \mathbb{C}^A$ と表すと、ユーザ v がクラスタ k の各アンテナに与えるクラスタ間干渉電力は $\mathbb{E}\{(\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v) \circ (\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v^*)\} = \mathbf{D}_k \left[\mathbb{E}\{|h_{v1}|^2\} \dots \mathbb{E}\{|h_{va}|^2\} \dots \mathbb{E}\{|h_{vA}|^2\} \right]^T$ と表すことができる。ここで、 $\mathbb{E}\{|h_{va}|^2\}$ は、ユーザ v とアンテナ a 間のチャンネル利得の自乗の短区間平均値（本稿では、フェージングについて平均することで伝搬損失とシャドウイング損失が電力に反映される）である。なお、短区間平均電力の代わりに瞬時の干渉電力 ($(\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v) \circ (\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v^*)$) を用いることもできる。その場合、フェージングによる干渉電力の変化をウェイトに考慮できる。

主要干渉ユーザの決定方法について説明する。ヌルを形成可能ユーザ数はアンテナの自由度に依存する。ユーザクラスタ当たり A' 本のアンテナを選択する場合、クラスタ内の多重ユーザ数 U' を除く $A' - U'$ がアンテナの自由度となる。そこで、干渉ユーザをチャンネル利得が高い順にランキングし、 $A' - U'$ ユーザを上限として主要干渉ユーザとする。具体的には、 $\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$ を初期値として、次式を用いてチャンネル利得の自乗の短区間平均（ユーザクラスタ k 内のアンテナ平均）の高いユーザ v_{\max} を逐次的に検出し、主要干渉ユーザとする ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} \leftarrow \mathcal{I}_k^{\text{null}} \cup \{v_{\max}\}$)。

$$v_{\max} = \arg \max_{v \in \{S_1, \dots, S_K\} \setminus (S_k \cup \mathcal{I}_k^{\text{null}})} \mathbb{E}\{(\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v)^H (\mathbf{D}_k \mathbf{h}_v)\} \quad (7)$$

主要干渉ユーザの決定後、主要干渉ユーザ以外の等価雑音と見なす干渉ユーザの集合は $\mathcal{I}_k^{\text{noise}} = \{S_1, \dots, S_K\} \setminus (S_k \cup \mathcal{I}_k^{\text{null}}) = S_k \cup \mathcal{I}_k^{\text{null}}$ と表すことができる。これらの干渉ユーザはユーザクラスタ k からの距離が離れる傾向にあり信号レベルが小さいため、等価雑音として扱える。

なお、式(5)に示す P-MMSE ポストコーディングウェイトベクトルに対して低演算量化を図る partial low-complexity MMSE (P-LC-MMSE) ポストコーディングウェイトベクトル $\mathbf{w}_u^{\text{P-LC-MMSE}} \in \mathbb{C}^A$ は、式(7)の v_{\max} の探索範囲を $v \in \mathcal{P}_k \setminus (S_k \cup \mathcal{I}_k^{\text{null}})$ 、等価雑音と見なす干渉ユーザの集合を $\mathcal{I}_k^{\text{noise}} = \mathcal{P}_k \setminus (S_k \cup \mathcal{I}_k^{\text{null}})$ と変更することで導出できる。これまでに説明したユーザ集合の概念図を図 3 に示す。

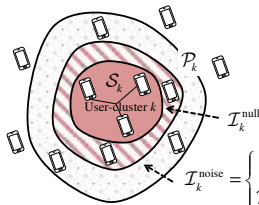


図 3 ユーザ集合の概念図

F-LC-MMSE および P-LC-MMSE プリコーディングウェイトベクトルは、それぞれ $\mathbf{w}_u^{\text{F-LC-MMSE}} / \sqrt{(\mathbf{w}_u^{\text{F-LC-MMSE}})^H \mathbf{w}_u^{\text{F-LC-MMSE}}}$ および $\mathbf{w}_u^{\text{P-LC-MMSE}} / \sqrt{(\mathbf{w}_u^{\text{P-LC-MMSE}})^H \mathbf{w}_u^{\text{P-LC-MMSE}}}$ によって与えられる。

4. 計算機シミュレーション

従来手法と提案手法により達成可能なユーザリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、干渉低減効果および

演算量について評価する。

4.1. シミュレーション条件

1×1 の正規化通信エリアに $A = 512$ アンテナをランダムに配置した上で、 $U = \{8, 16, 32, 64, 128, 256, 512\}$ ユーザをランダムに発生させた。ユーザクラスタ当たりのユーザ数を $U' = 8$ に拘束し、 $K = U / U'$ ユーザクラスタを形成した。また、ユーザクラスタ当たりのアンテナ数は $A' = 16$ とした。

全ユーザは等送信電力であるとした。送受信点間距離が正規化距離 1 のときの受信 SNR を正規化送信電力と定義し、正規化送信 SNR = $\{-60, -50, -40, -30\}$ dB とした。正規化送信 SNR に 58dB を加えると、送受信点間距離が近接アンテナ間の平均距離の 1/2 であるときの受信 SNR を与える。

伝搬チャンネルは、距離に依存する伝搬損失、対数正規分布のシャドウイング損失およびレイリーフェージングによって特徴づけられると仮定した。ユーザ u とアンテナ a 間のチャンネル利得 h_{ua} およびその自乗の短区間平均 $\mathbb{E}\{|h_{ua}|^2\}$ は次式で表される。

$$\begin{cases} h_{ua} = \sqrt{d_{ua}^{-\alpha} \times 10^{-\eta_{ua}/10}} \times g_{ua} \\ \mathbb{E}\{|h_{ua}|^2\} = d_{ua}^{-\alpha} \times 10^{-\eta_{ua}/10} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha (= 3.5)$ は伝搬損失指数、 d_{ua} および η_{ua} はそれぞれユーザ u とアンテナ a 間の距離および対数正規分布のシャドウイング損失（標準偏差 8 dB）である。また、 g_{ua} はユーザ u とアンテナ a 間のフェージングを表す平均 0、分散 1 の複素ガウス変数である。本稿では、全ユーザおよび全アンテナの位置情報とチャンネル情報は理想的に得られると仮定した。

4.2. ユーザリンク容量

ユーザクラスタ k に属するユーザ u のリンク容量 [bps/Hz] は次式により計算した。

$$C_u = \log_2(1 + \text{SINR}_u) \quad (9)$$

ここで、 SINR_u はユーザクラスタ k に属するユーザ u の SINR であり、式(1)および式(3)より上りおよび下りリンクの SINR は次のように導出される。

$$\text{SINR}_u = \begin{cases} \frac{p_u |\mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u|^2}{\sum_{v=1, v \neq u}^U p_v |\mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v|^2 + \sigma^2 \mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u} & \text{Uplink} \\ \frac{p_u \mathbf{h}_u^H \mathbf{D}_k \frac{\mathbf{w}_u}{\sqrt{\mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u}}}{\sum_{v \in S_k, v \neq u} p_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k \frac{\mathbf{w}_v}{\sqrt{\mathbf{w}_v^H \mathbf{w}_v}} + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{v \in S_i} p_i \mathbf{h}_i^H \mathbf{D}_i \frac{\mathbf{w}_v}{\sqrt{\mathbf{w}_v^H \mathbf{w}_v}} + \sigma^2} & \text{Downlink} \end{cases} \quad (10)$$

次節で示すユーザリンク容量の累積分布は次のようにして求めた。まず、アンテナ配置を 1 パターンに固定した上で、ユーザ分布を 100 回生成し、各ユーザ分布につきシャドウイング損失とレイリーフェージングを 1 回だけ生成して、式(9)により瞬時リンク容量を求めた。そして、その累積分布関数 (CDF) を求めた。

4.3. シミュレーション結果

4.3.1. ウェイト計算に全干渉ユーザを考慮した場合のユーザリンク容量評価

ウェイト計算に通信エリア内の全干渉ユーザを考慮する場合について評価する。まず、上りリンクのポストコーディングウェイトに、式(4)および式(6)でそれぞれ与えられる、従来の F-MMSE ウェイトと提案した F-LC-MMSE ウェイトを用いた場合に達成可能なユーザリンク容量を比較する。

正規化送信 SNR をパラメータとして、CDF=50%点の上りリンクユーザ容量を通信エリア内の全ユーザ数 U の関数としてプロットした結果を図 4 に示す。比較のため、F-LC-MMSE ウェイトについては、ヌルを向ける主要干渉ユーザを決定せずに全て等価雑音と見なす結果 ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$) もプロットしている。

図 4 より、F-LC-MMSE は全ての条件において F-MMSE とほぼ同等のリンク容量が得られることが分かる。一方、F-LC-MMSE ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$) は、 U が小さい場合は F-MMSE と同等のリンク容量が得られるが、 U が大きくなるに連れて劣化が大きくなることが分かる。また、この傾向は正規化送信 SNR が高いほど顕著である。この理由は次のように考えられる。 U が大きくなるほどユーザ密度が高くなり、他クラスタのユーザが近くに存在する確率が高くなり、また、正規化送信 SNR が高くなるほど、より遠くのユーザも干渉となり、強い干渉を与えるユーザ数が増える。このような干渉ユーザには、チャンネル相関に基づくヌル形成によるクラスタ間干渉の抑圧が有効であるが、F-LC-MMSE ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$) はクラスタ外ユーザにヌルを形成できないため劣化が大きくなってしまふ。一方、F-LC-MMSE は、クラスタ外ユーザのチャンネル利得に基づき、強い干渉を与える主要干渉ユーザを検出し、アンテナの自由度の範囲内で効率的にヌルを形成できるために僅かな劣化に抑えることができる。

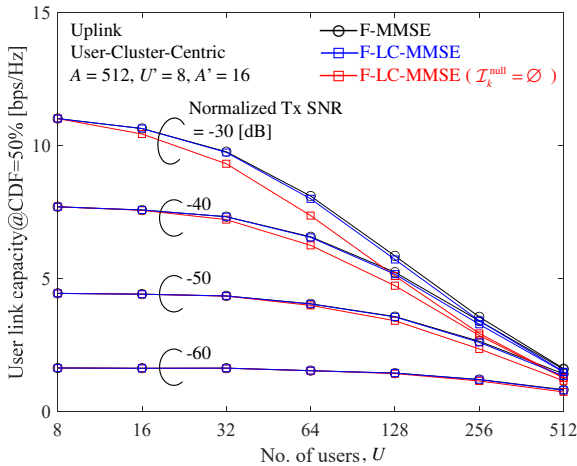


図 4 ウェイト計算に全干渉ユーザを考慮した場合の上りリンクユーザ容量

次に、下りリンクのプリコーディングウェイトに、F-MMSE ウェイトと F-LC-MMSE ウェイトを用いた場合に達成可能なユーザリンク容量を比較する。図 4 と同条件下で下りリンクのユーザ容量を評価した結果を図 5 に示す。図 5 より、下りリンクにおいても上りリンクと同様の傾向となり、F-LC-MMSE により、F-MMSE とほぼ同等のリンク容量が得られることが分かる。TDD を仮定しているため、上りリンクで強い干渉を与えるユーザは、下りリンクでは強い干渉を受けるユーザになる。下りリンクの F-LC-MMSE ウェイトは、上りリンクで検出した強い干渉を与えるユーザにヌルを向けるように送信ビームを形成するため、効率的に干渉を軽減できると言える。

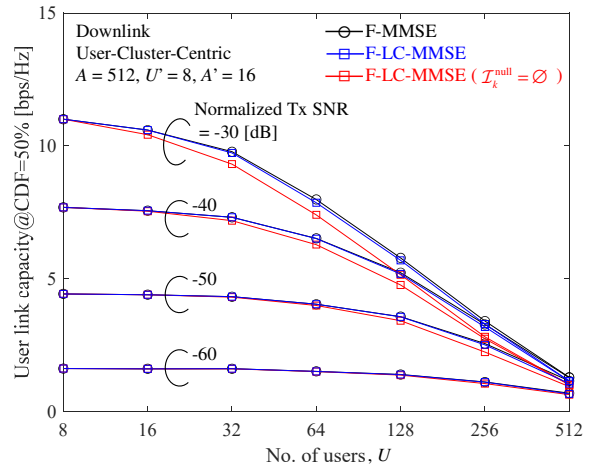


図 5 ウェイト計算に全干渉ユーザを考慮した場合の下りリンクユーザ容量

4.3.2. ウェイト計算の干渉ユーザを制限した場合のユーザリンク容量評価

ウェイト計算に考慮するユーザを \mathcal{P}_k に制限する場合 (partial) について評価する。上りリンクのポストコーディングウェイトに、式(5)で与えられる従来の P-MMSE ウェイトと提案する P-LC-MMSE ウェイトをそれぞれ用いて、図 4 と同条件で評価を行った結果を図 6 に示す。図 6 より、P-LC-MMSE は全ての条件において P-MMSE とほぼ同等のリンク容量が得られることが分かる。本稿では、下りリンクの評価結果を省略するが、図 6 と同様の傾向が得られることを確認しており、提案手法は P-MMSE ウェイトの演算量削減にも有効と言える。なお、F-MMSE ウェイトと P-MMSE ウェイトの性能比較は文献[5]を参考にされたい。

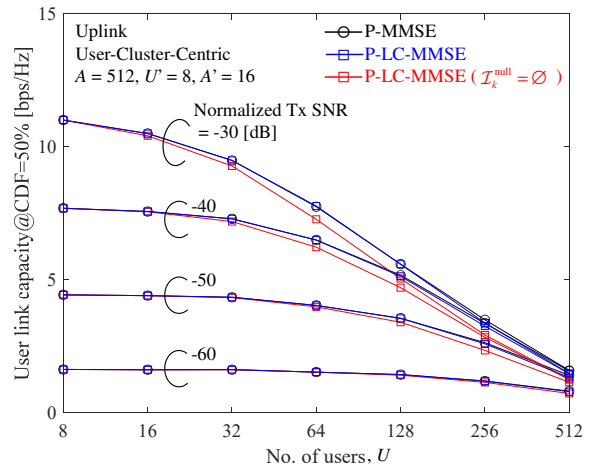


図 6 ウェイト計算の干渉ユーザを制限した場合の上りリンクユーザ容量

4.3.3. 演算量評価

式(4)、式(5)および式(6)で与えられる F-MMSE、P-MMSE、F/P-LC-MMSE ポストコーディングウェイトの複素乗算回数の計算式[2]とチャンネル推定対象ユーザ数についてまとめた結果を表 1 に示す。ここでは、チャンネル相関行列の計算が必要なユーザ数をチャンネル推定対象ユーザ数として定義する。

表 1 ポストコーディングウェイトの演算量

方式	チャネル推定対象ユーザ数	ポストコーディングウェイトの複素乗算回数
F-MMSE	U	$\frac{(A')^2 + A'}{2}U + (A')^2 + \frac{(A')^3 - A'}{3}$
P-MMSE	$ \mathcal{P}_k $	$\frac{(A')^2 + A'}{2} \mathcal{P}_k + (A')^2 + \frac{(A')^3 - A'}{3}$
F-LC-MMSE P-LC-MMSE	$U' + \mathcal{I}_k^{\text{null}} $	$\frac{(A')^2 + A'}{2}(U' + \mathcal{I}_k^{\text{null}}) + (A')^2 + \frac{(A')^3 - A'}{3} + A' \mathcal{I}_k^{\text{noise}} $

表 1 に基づき、チャネル推定対象ユーザ数を比較した結果を図 7 に示す。比較のため、F/P-LC-MMSE ウェイトについては、ヌルを向ける主要干渉ユーザを決定せずに全て等価雑音と見なす結果 ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$) もプロットしている。なお、P-MMSE および P-LC-MMSE の場合、ユーザクラス毎に $|\mathcal{P}_k|$ が異なるため 100 回のクラスタリングの平均値としている。図 7 より、 U が大きいほど F/P-LC-MMSE ではチャネル推定対象ユーザ数が大きく削減され、 $U = 512$ において F-MMSE と F-LC-MMSE、P-MMSE と P-LC-MMSE を比較するとそれぞれ 1/32、約 1/6 に削減されることが分かる。チャネル推定対象ユーザ数を削減することでチャネル推定の演算量だけではなく、推定のためのパイロット信号のオーバーヘッドも削減できるため、F/P-LC-MMSE は実用的と言える。ただし、F/P-LC-MMSE では、主要干渉ユーザを決定する際に、各ユーザのチャネル利得の測定が必要となる。この演算量を削減するためには、高送信電力および高ユーザ密度におけるリンク容量の低下と引き換えに主要干渉ユーザを決定せずに全て等価雑音と見なす F/P-LC-MMSE ($\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \emptyset$) を用いることも選択肢として考えられる。

表 1 に基づき、ポストコーディングウェイトの複素乗算回数を比較した結果を図 8 に示す。図 8 より、 U が大きいほど F/P-LC-MMSE による複素乗算回数の削減効果は大きく、 $U = 512$ において F-MMSE と F-LC-MMSE、P-MMSE と P-LC-MMSE を比較するとそれぞれ約 1/6、1/3 に複素乗算回数が削減されることが分かる。

5. むすび

本稿では、UCC-CF-mMIMO のプリ/ポストコーディングの演算量削減手法として、主要な干渉ユーザについてはチャネル相関行列を直接考慮し、それ以外の干渉ユーザについては等価雑音と見なすことを提案した。計算機シミュレーションによるユーザリンク容量の評価結果と演算量についての考察より、提案手法は従来手法とほぼ同等の容量を達成しつつ、ウェイト計算の演算量を低く抑えられることを明らかにした。なお、提案手法は UC-CF-mMIMO にも適用可能である。

今後は、チャネル推定誤差や電力測定誤差の影響を評価する予定である。ユーザクラスから離れた干渉ユーザのチャネル推定精度が低下することから、本稿で提案した等価雑音と見なす方法が有効に機能すると予想される。

また、ユーザクラス k の P-MMSE と P-LC-MMSE ウェイト計算に考慮するユーザの集合 \mathcal{P}_k の判定方法の高度化も興味深い課題である。 \mathcal{P}_k に含まれるユーザ数がアンテナの自由度と同程度となるよう、アンテナの重なる判定方法を工夫することで、ユーザ毎のチャネル利得の測定を行うことなく、 $\mathcal{I}_k^{\text{null}} = \mathcal{P}_k \setminus \mathcal{S}_k$ 、 $\mathcal{I}_k^{\text{noise}} = \{\mathcal{S}_1, \dots, \mathcal{S}_K\} \setminus \mathcal{P}_k$ とする単純な制御で演算量を削減することができる。

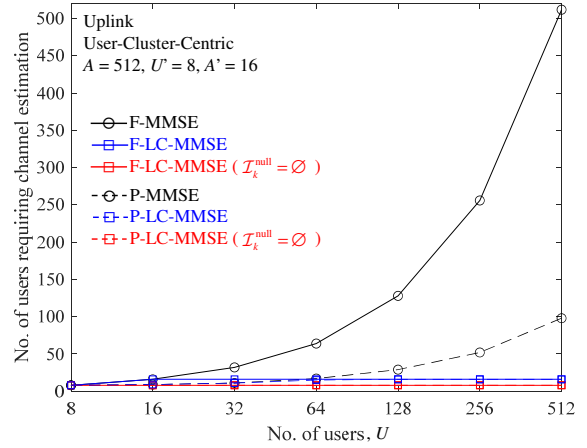


図 7 チャネル推定対象ユーザ数

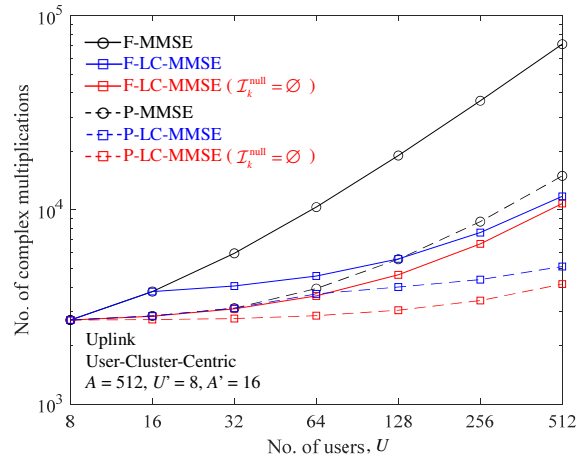


図 8 ポストコーディングウェイトの複素乗算回数

謝 辞

本研究は総務省委託研究「第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発」(JPJ000254) の成果の一部である。

文 献

- [1] H. I. Obakhena, A. L. Imoizel, F. I. Anyasi and K. V. N. Kavitha, "Application of cell-free massive MIMO in 5G and beyond 5G wireless networks: A survey," J. Eng. Appl. Sci., Vol. 68, No. 13, Oct. 2021.
- [2] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems," IEEE Trans. Commun., Vol. 68, Issue 7, pp. 4247 - 4261, July 2020.
- [3] 塚本, 菅野, 村上, 新保, "ユーザセントリック RAN における CF-mMIMO のための AP クラスタ基礎実験," 信学技報, vol. 121, no. 391, RCS2021-268, pp. 90-95, 2022 年 3 月.
- [4] S. Xia, C. Ge, R. Takahashi, Q. Chen and F. Adachi, "Incorporation of MU-MIMO Technology into User-centric Cell-Free mMIMO System," IEICE Technical Report, vol. 122, No. 49, RCS2022-14, pp. 7-12, May 2022.
- [5] 高橋, 松尾, 夏, 陳, 安達, "ユーザセントリックおよびユーザクラスセントリック CF-mMIMO における上りリンクポストコーディングに関する一考察," 信学技報, vol. 122, no. 73, RCS2022-26, pp. 13-18, 2022 年 6 月.
- [6] P. Bradley, K. Bennett and A. Demiriz, "Constrained K-means clustering", Microsoft Research Technical Report, May 2000.
- [7] NTT DoCoMo, "LTE/LTE-Advanced のさらなる発展—LTE Release 10/11 標準化動向—," NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル Vol.21 No.2, pp. 26-29, Jul. 2013.