

ユーザセントリックおよびユーザクラスタセントリック 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

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 (UC) 構成におけるアンテナクラスタリングが検討されてきた。この構成では、ユーザ毎に協調させる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考慮したポストコーディングを用いて干渉を軽減する。これに対して著者らは、ユーザ密度が高い環境下ではアンテナクラスタの重なりが増えることに着目し、近接するユーザをユーザクラスタとしてまとめ、ユーザ共通のアンテナクラスタを用いて空間多重するユーザクラスタセントリック (UCC) 構成を検討している。本稿では、上りリンク伝送に Zero-Forcing (ZF) 規範と Minimum Mean Square Error (MMSE) 規範の 2 つのポストコーディングを用いるときの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、UC 構成と UCC 構成を比較する。さらに CF-mMIMO 特有の ZF 雑音強調について考察するとともに、MMSE による雑音強調抑圧効果を明らかにする。

キーワード CF-mMIMO, ユーザセントリック, ユーザクラスタリング, ユーザクラスタセントリック, ZF, MMSE

A Study on Uplink Postcoding in User-Centric and 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, is attracting attention as a key technology for Beyond 5G systems. A user-centric (UC) approach has been considered to ensure system scalability. In this approach, antenna-clusters are formed by selecting antennas to be coordinated for each user, and the uplink postcoding is used to reduce interference by considering users whose antenna-clusters are overlapped as interfering users. Noting that the overlapping of antenna-clusters increases as the user density becomes higher, we consider a user-cluster-centric (UCC) approach in which users close to each other are grouped together as a user-cluster and are spatially multiplexed using an antenna-cluster common to them. In this paper, the user link capacity is obtained by computer simulation for two uplink postcoding schemes based on Zero-Forcing (ZF) criterion and Minimum Mean Square Error (MMSE) criterion and is compared between UC and UCC approaches. Furthermore, ZF noise-enhancement unique to CF-mMIMO is discussed, and the noise-enhancement suppression effect of MMSE is clarified.

Keywords CF-mMIMO, user-centric, user-clustering, user-cluster-centric, ZF, MMSE

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、エリア全体で均一で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 (UC) 構成におけるアンテナクラスタリングが検討されてきた [2, 3]。UC 構成では、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する。アンテナクラスタが重なるユーザを干渉ユーザとして考慮した上りリンクポストコーディング (下りリンクの場合にはポストコーディングベクトルの転置を用いるプリコーディング) を適用する。これにより、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。

著者らは、ユーザ密度が高い環境下ではアンテナクラスタの重なりが増えることから、ポストコーディングに考慮する干渉ユーザ数が増えることに着目し、近接するユーザをユーザクラスタとしてまとめ、これらユーザに共通のアンテナクラスタを形成して空間多重するユーザクラスタセントリック (UCC) 構成を検討している。文献[4]では、Zero-Forcing (ZF) 規範のポストコーディングウェイトを導出し、それをを用いたリンク容量評価により、UCC 構成の有効性を示した。

本稿では、Minimum Mean Square Error (MMSE) 規範のポストコーディングウェイトを導出し、ZF 規範と MMSE 規範の 2 つの上りリンクポストコーディングを対象に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、UC 構成と UCC 構成を詳細に比較する。さらにアンテナを分散配置する CF-mMIMO に特有の ZF 雑音強調について考察するとともに、MMSE による雑音強調抑圧効果を明らかにする。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章ではシステムモデルを示し、UC/UCC 構成のユーザクラスタ形成およびアンテナ選択 (アンテナクラスタ形成) について説明する。第 3 章では上りリンク伝送系モデルを示し、ポストコーディングウェイトを導出する。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. 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 $U (\leq A)$ 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ことと仮定する。また、 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。

2.1. ユーザセントリック構成

UC 構成の概念を図 1(a) に示す。システムのスケラビリティを確保するため、ユーザ毎に協調させるアンテナを選択してアンテナクラスタを形成する。アンテナ選択は最大チャネル利得規範で行い、異なるユーザ間での重複を許容する (すなわち、アンテナクラスタの重なりを許容する)。本稿では、各ユーザの信号処理演算量を均一にするため、ユーザ毎にチャネル利得の高い上位 A' 本のアンテナを選択する。

2.2. ユーザクラスタセントリック構成

UCC 構成の概念を図 1(b) に示す。UCC 構成では、ユーザの位置情報に基づき、近接するユーザをひとまとめたユーザクラスタを形成する。ユーザクラスタを形成することで、UC 構成により同じ数のユーザに通信サービスを提供するときよりも、後述するポストコーディングウェイトを形成する演算量を削減できる。ユーザクラスタの形成には、拘束条件付き K 平均法[5]を用いる。この手法は、クラスタ当たりのユーザ数を設定値以下に拘束した上で、クラスタ重心とクラスタ内ユーザ位置の 2 乗距離和が最小となるクラスタを形成できるため、クラスタ当たりの信号処理演算量を均一化できる。クラスタ当たりのユーザ数を U' とする

と、エリア内の U ユーザは $K = U / U'$ クラスタに分割される。本稿では、ユーザクラスタ k に属するユーザ集合を $\mathcal{S}_k \subset \{1, \dots, u, \dots, U\}$ と定義する。 $|\mathcal{S}_k| = U'$ である。また、異なるユーザクラスタ間でユーザは重複しないため、 $\mathcal{S}_k \cap \mathcal{S}_l = \emptyset$ となる。なお、 U' は CPU の信号処理能力に基づき決定する。

ユーザクラスタを形成後、システムのスケ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アンテナを選択してアンテナクラスタを形成する。ユーザクラスタ毎にアンテナクラスタを形成するため、ユーザクラスタ内の各ユーザは共通のアンテナクラスタとなる。UC 構成と同様にアンテナ選択は最大チャネル利得規範で行い、異なるユーザクラスタ間でのアンテナ重複を許容する。本稿では、各ユーザクラスタ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ネル利得の高い上位 A' 本のアンテナを選択する。また、ユーザ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、同一ユーザ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ユーザ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、チャネル利得が高いユーザが優先的に選択し、チャネル利得の低いユーザは次にチャ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 $\mathcal{M}_k \subset \{1, \dots, a, \dots, A\}$ と定義する。 $|\mathcal{M}_k| = A'$ である。

2.1 節で述べた UC 構成は、UCC 構成において、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) と言える。また、UCC 構成はユーザクラスタを仮想的な 1 ユーザと見做した UC 構成とも言える。

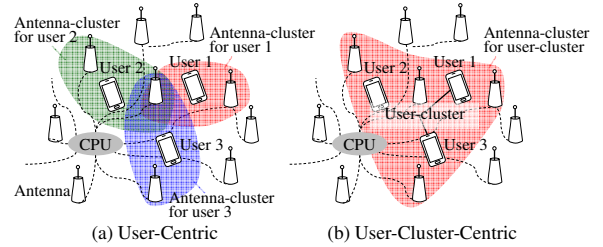


図 1 UC 構成および UCC 構成の概念

3. 上りリンク伝送系モデル

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

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

ここで、 $\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^A$ はユーザ u の上りリンクチャネルベクトル、 $s_u \in \mathbb{C}$ 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 (アンテナクラスタリングを表す) であり、その対角要素を次式で定義する。

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

式(1)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である。本稿では、文献[2]で導出された UC 構成のポストコーディングウェイトを UCC 構成に拡張する。以降でその詳細について説明する。

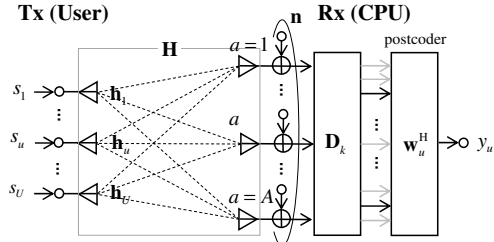


図 2 上りリンク伝送系モデル

3.1. ZF ポストコーディングウェイト

通信エリア内の全 U ユーザと全アンテナ (A 本) 間の上りリンクチャネル行列を $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{A \times U}$ 、その部分行列となるユーザクラスタ k に属する全てのユーザ (ユーザ数 U') と全てのアンテナ (A' 本) 間の上りリンクチャネル行列を $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{A' \times U'}$ と表記する。全 U' ユーザに対する ZF 規範のポストコーディングウェイト行列 $\mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{A' \times U'}$ のエルミート転置行列 $\mathbf{W}_k^H \in \mathbb{C}^{U' \times A'}$ は、 \mathbf{H}_k のランクに応じて次式で与えられる[6]。

$$\mathbf{W}_k^H = \mathbf{H}_k^\dagger = \begin{cases} \mathbf{H}_k^{-1} & \text{if rank}(\mathbf{H}_k) = A' = U' \\ (\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^H & \text{if rank}(\mathbf{H}_k) = U' < A' \\ \mathbf{H}_k^H (\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)^{-1} & \text{if rank}(\mathbf{H}_k) = A' < U' \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 \dagger は疑似逆行列演算子である。 \mathbf{H}_k がフルランクの場合、 \mathbf{H}_k の逆行列を用いて、クラスタ k 内の全ての干渉ユーザに完全なヌルを形成できる。 \mathbf{H}_k が列フルランクの場合、疑似逆行列 (最小二乗解) を用いて、複素共役受信ビームを形成した上で全ての干渉ユーザに完全なヌルを形成できる (受信ダイバーシティ利得が得られる)。 \mathbf{H}_k が行フルランクの場合、干渉ユーザ数がアンテナの自由度を超えるため、疑似逆行列 (最小ノルム解) を用いて、主要な干渉信号の到来方向にヌルを向け干渉を抑圧し、抑圧後の干渉成分に対して受信品質を最大化する[7]、すなわち受信信号対干渉電力比 (SIR) を最大化する。

文献[2]を参考に式(3)の行フルランクの形式を基本として、ユーザクラスタ k に属するユーザ u の ZF 規範のポストコーディングウェイトベクトル $\mathbf{w}_u^{\text{ZF}} \in \mathbb{C}^A$ を次式のように一般化できる (\dagger を使う理由は、アンテナ選択による行ランク落ちおよび干渉ユーザ数に依存する列ランク落ちを考慮するためである)。

$$\mathbf{w}_u^{\text{ZF}} = p_u \left(\sum_{i=1}^K \sum_{v \in \mathcal{S}_i} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k \right)^\dagger \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u \quad (4)$$

行フルランクの形式を基本としたことで、2つの利点がある。まず、 \mathbf{D}_k で制限されたチャネル相関行列 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ (すなわち $\sum_{i=1}^K \sum_{v \in \mathcal{S}_i} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k$) を空間多重する各ユーザ (ユーザ u とその干渉ユーザ) の相関行列の総和で表現することにより、考慮すべき干渉ユーザ数を柔軟に増減できる。次に、全ユーザではなく、空間多重するユーザ u のみのチャネルベクトル $\mathbf{D}_k \mathbf{h}_u$ (エルミート転置により複素共役受信ビームを形成) を \mathbf{D}_k

で制限された $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ の疑似逆行列に乗算すればよいため、受信処理を簡単化できる。

3.2. MMSE ポストコーディングウェイト

ZF ポストコーディングウェイトは、前述のアンテナ選択および干渉ユーザ数設定によるランク落ちに限らず、チャネル行列がチャネル変動によりランク落ちに近づく (チャネル行列の特異値に 0 に近いものが含まれる) とウェイトのノルムが大きくなり、雑音強調を引き起こす[6]。この問題を解決するのが雑音の影響を直接考慮した MMSE ポストコーディングウェイトであり、次式で与えられる。

$$\mathbf{w}_u^{\text{MMSE}} = p_u \left(\sum_{i=1}^K \sum_{v \in \mathcal{S}_i} p_v \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v \mathbf{h}_v^H \mathbf{D}_k + \sigma^2 \mathbf{D}_k \right)^\dagger \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u \quad (5)$$

式(5)の σ^2 は雑音電力であり、受信信号対干渉および雑音電力比 (SINR) を最大化するウェイトとなる。

3.3. partial ZF/MMSE ポストコーディングウェイト

式(4)および式(5)では、通信エリア内の全てのユーザがユーザ u に干渉を与えることを想定した。しかし実際には、ユーザ u から遠く離れたユーザの干渉は伝搬損失の影響で大きく減衰する。文献[2]ではこの傾向を利用し、UC 構成を対象に干渉の強いユーザのみを考慮した partial MMSE ポストコーディングウェイトを提案している。これにより、システム規模に対するスケラビリティを確保できる。本稿では、この考え方を UCC 構成に拡張する。UCC 構成の partial ZF[4] および partial MMSE ポストコーディングウェイトは式(4)および式(5)の $\sum_{i=1}^K \sum_{v \in \mathcal{S}_i}$ を $\sum_{v \in \mathcal{P}_k}$ に置き換える

ことで与えられる。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 (自ユーザクラスタ内ユーザ (多重するユーザ) と近傍の他ユーザクラスタユーザ (干渉ユーザ)) である。本稿では、 $U' = 1$ のシングルユーザクラスタ (すなわち UC 構成) の場合は、文献[2]に従い、アンテナクラスタが重なる (同じアンテナを共有する) ユーザの集合を $\mathcal{P}_{k=u} = \{i : \mathbf{D}_{k=u} \mathbf{D}_i \neq \mathbf{0}_A\}$ とした。一方、 $U' > 1$ のユーザクラスタ (すなわち UCC 構成) の場合の \mathcal{P}_k は、シングルユーザクラスタにおいて考慮したユーザの集合 $\mathcal{P}_k = \bigcup_{u \in \mathcal{S}_i} \mathcal{P}_u$ とした。

3.4. UC 構成と UCC 構成のウェイト演算量比較

ポストコーディングウェイトの演算量は、チャネルの相関行列の逆行列演算の占める割合が高く、その演算量は $O(A^3)$ である[2]。UCC 構成は、クラスタ内ユーザの空間多重を前提としており、式(4)から分かるように同一ユーザクラスタ内の全てのユーザが同じアンテナクラスタを用いるため、ユーザクラスタにつき 1 回逆行列を求め、それを同じユーザクラスタ内ユーザで共有できる。一方、UC 構成はシングルユーザクラスタとなるため、ユーザ毎に異なるアンテナクラスタを用いることになり、ユーザ毎に逆行列を求める必要がある。したがって、UCC 構成における逆行列演算量を UC 構成のそれと等しくさせる場合、UCC 構成のユーザクラスタ当たりで選択可能なアンテナ数 A'_{UCC} は、次のように概算できる。

$$A'_{\text{UCC}} = \left\lceil \sqrt[3]{U'_{\text{UCC}} A'} \right\rceil \quad (6)$$

ここで、 A'_{UC} は UC 構成のユーザクラスタ当たりアン

テナ数, U_{UCC} は UCC 構成のユーザクラスあたりユーザ数, $[\cdot]$ は床関数である. ユーザクラスあたりのアンテナ数が増えるほど, ヌルを向けられる干渉ユーザ数が増え, またアンテナダイバーシチ利得の向上も期待できるため, この特徴は UCC 構成の利点と言える.

4. 計算機シミュレーション

ZF 規範と MMSE 規範の 2 つのポストコーディングを対象に上りリンクユーザ容量を計算機シミュレーションにより求め, UC 構成と UCC 構成を比較する.

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. UCC 構成では, ユーザクラスあたりのユーザ数を $U' = 8$ に拘束し, $K = U / U'$ ユーザクラスを形成した. そして, ユーザクラス内の全ユーザの干渉除去に必要な最小アンテナ数となる $A' = 8$ アンテナを各ユーザクラスで選択することを基本とした. UC 構成では, $U' = 1$ とし, $K = U / U' = U$ シングルユーザクラスを形成し, UCC 構成と同数の $A' = 8$ アンテナを選択した. また, UC 構成と UCC 構成のポストコーディングウェイトの演算量を等しくする目的で, 式(6)に基づき UCC 構成では $A' = \sqrt[3]{8 \times 8} = 16$ アンテナを選択した場合も評価した.

各ユーザは等送信電力とし, 送信電力は正規化送信 SNR で定義した. これは送受信点間距離が正規化距離 1 のときの受信 SNR と同義である. 評価に用いた正規化送信 SNR = -60, -50, -40, -30 dB は, 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 に換算すると約 -2, 8, 18, 28 dB に相当する.

伝搬チャネルは, 距離に依存する伝搬損失(指数 3.5), 対数正規分布のシャドウイング損失(標準偏差 8 dB) 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. また, 全ユーザおよび全アンテナの位置情報とチャ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 k に属するユーザ u の上りリンク容量 [bps/Hz] は次式により計算した.

$$C_u = \log_2(1 + \text{SINR}_u) \quad (7)$$

ここで, SINR_u はユーザクラス k に属するユーザ u の SINR であり, 式(1)より次のように導出される.

$$\text{SINR}_u = \frac{P_u |\mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_u|^2}{\sum_{v=1, v \neq u}^U P_v |\mathbf{w}_u^H \mathbf{D}_k \mathbf{h}_v|^2 + \sigma^2 \mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u} \quad (8)$$

次節で示す上りリンクユーザ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, 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 回変更して, 式(7)により瞬時リンク容量を求めた. そして, その累積分布 (CDF) を求めた.

4.3. シミュレーション結果

まず, ZF/MMSE ポストコーディングウェイト生成に当たって考慮する干渉ユーザ数が上りリンクユーザ容量に与える影響について評価した. 式(4)および式(5)で与えられるエリア内の全ての干渉ユーザを考慮した ZF/MMSE (ZF/MMSE(full)と表記), 干渉の強いユーザ

のみを考慮した partial ZF/MMSE (ZF/MMSE(partial)と表記), そして干渉ユーザの範囲を自ユーザクラス内のユーザのみに制限した ZF (ZF(own cluster only)と表記) を比較する.

正規化送信 SNR をパラメータとして, ユーザクラスあたりのアンテナ数 $A' = 16$ の UCC 構成における CDF = 50% 点のユーザリンク容量を全ユーザ数 U の関数としてプロットした結果を図 3 に示す. 全体的な傾向として, U が大きくなるほどユーザ容量が減少し, その減少率は正規化送信 SNR が高いほど顕著であることが分かる. これはユーザ密度が高くなるとユーザ間の距離が近づき, 干渉ユーザ数が増え, また送信電力が高いほど遠くのユーザも干渉を与えるようになるためである.

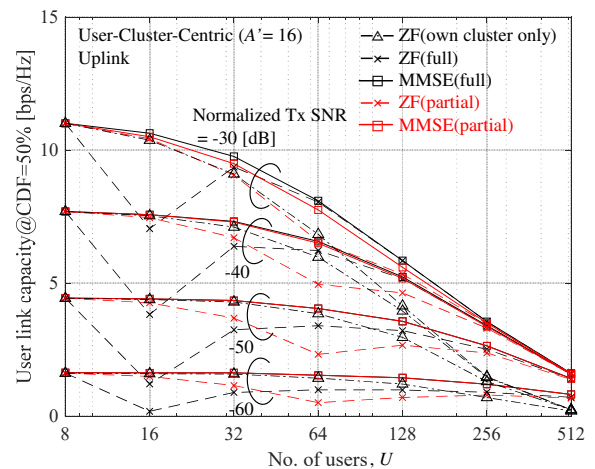


図 3 UCC 構成 ($A' = 16$) の上りリンクユーザ容量

ZF(own cluster only)と ZF(full)を比較すると, U が小さいときは, ZF(full)の方が低い容量となるが, U が大きくなると ZF(own cluster only)の方が低い容量となる. U が小さいときに ZF(full)が低い容量になる理由は雑音強調が生じるためである(詳細は後述). U が大きいときに ZF(own cluster only)が低い容量となるのは, 干渉ユーザをどの範囲まで考慮するかの違いである. ZF(full)はすべての干渉ユーザを考慮するため, ユーザクラス内の干渉ユーザにのみヌルを形成するのではなく, SIR を最大化するような受信ビームを形成できる. これに対して, ZF(own cluster only)では, 考慮する干渉ユーザの範囲を自ユーザクラス内に制限するため, 自ユーザクラス内の各ユーザに対する干渉ユーザには完全なヌルを形成するが, 他ユーザクラスからの干渉が残ってしまうからである.

ZF(full)と MMSE(full)を比較すると MMSE(full)の方が常に高い容量を得られることが分かる. これは, ZF(full)は SIR を最大化するのに対して MMSE(full)は雑音も含めた SINR を最大化するため, 雑音強調を回避できるからである.

MMSE(full)と MMSE(partial)を比較すると, 正規化送信 SNR が高いときに MMSE(partial)の容量が僅かに劣化することが分かる. 本稿では partial の場合, ウェイト形成に考慮する干渉ユーザの範囲を自ユーザクラス近傍の干渉の強いユーザ(シングルユーザクラスにおいてアンテナクラスが重なるユーザ)に制限し

ている。正規化送信 SNR が高いと、より遠いユーザからの干渉が無視できなくなるが、考慮する干渉ユーザに含まれないため劣化してしまう。しかし、自ユーザクラス近傍の干渉の強いユーザだけを考慮しても容量劣化が僅かであることから、演算量削減の観点において partial MMSE が有効と言える。

ZF(full/partial)と MMSE(full/partial)を比較すると、ZF は雑音強調の影響により full/partial とともに容量が劣化するが、容量が最小となるユーザ数が full は $U = 16$ 、partial は $U = 64$ と異なることが分かる。これは、考慮する干渉ユーザ数が異なるためである。full の場合、 $U = 16$ のとき自ユーザクラス以外の全てのユーザ、すなわち $8 (= U - U')$ ユーザを必ず干渉ユーザとして考慮する。一方、partial の場合、全てのユーザを干渉ユーザとして考慮しないため、 $U = 16$ のときに 8 ユーザを干渉ユーザとして考慮するとは限らない。検証のため、図 4 に partial の場合に考慮する他ユーザクラスに属する干渉ユーザ数の確率分布を示す。図 4 より、full のときと同じ 8 ユーザを干渉ユーザとして考慮する確率が最も高いのは $U = 64$ のときと分かる。図 3 と図 4 の結果より、ZF において雑音強調の影響が大きくなるのは干渉ユーザ数が 8 の場合であると言える。

この傾向について詳細に確認するため、 $U = 64$ において干渉ユーザ数をパラメータとして容量を評価した結果を図 5 に示す。干渉ユーザはチャネル利得のアンテナ総和が高い順に選択した。図 5 より、干渉ユーザ数が 8 の場合が最小となることが明確に分かる。この理由について $A' = 16$ におけるアンテナ自由度の観点から考察する。アンテナに 8 本の余裕があるため、自ユーザクラス以外に最大 8 ユーザまで完全なヌルを向けることができる。ただし、 $A' = 16$ 本のアンテナ全てに対して離れたユーザにヌルを向けようとするとき、そのユーザは伝搬損失が大きく全てのアンテナに対するチャネル利得が低くなり、チャネル行列がランク落ちに近づく。このとき、チャネル行列の特異値に 0 に近いものが含まれるためウェイトのノルム 2 乗 (式(8)の $\mathbf{w}_u^H \mathbf{w}_u$) が大きくなり雑音強調を引き起こす [6]。

図 5 より、干渉ユーザ数を 8 から減らしていくと容量が向上し、3 ユーザのときに極大点がある。これは、雑音強調を起こすことなくヌルを向けられるユーザ、すなわち自ユーザクラス近傍のユーザが平均 3 ユーザしかいないことを意味する (互いに干渉を与えにくいユーザクラスを形成できているとも言える)。よって 4 ユーザ目以降は徐々に強い雑音強調を引き起こし、アンテナの自由度と同じ 8 ユーザ目までヌルを向けたときに最も雑音強調が大きくなる。

一方、図 5 より、干渉ユーザ数を 8 から増やしていくと容量が向上し、全干渉ユーザを考慮した場合 (すなわち ZF(full)) が最大となることが分かる。これは、干渉ユーザ数がアンテナの自由度を超えると SIR を最大化するようなウェイトに切り替わることで雑音強調の影響が弱まるためである。そして、考慮する干渉ユーザ数が増え干渉電力の精度が向上すると最大容量になると言える。24 ユーザ以上では向上が緩やかになるため、24 ユーザを干渉ユーザとして考慮すればよく、高い容量を維持したまま演算量を削減できる。

以上をまとめると、ZF でアンテナ自由度に余裕があ

る場合において、自由度の範囲内で干渉ユーザにヌルを向けるときは、自ユーザクラス近傍のユーザを対象とする必要があり、自由度を超えて干渉を抑圧する場合は、エリア全体の干渉電力を近似可能な干渉ユーザ数までを考慮すると良いと言える。また、干渉リミテッドな環境でなければ MMSE を用いることで上記問題を解決できると言える。

本稿では、 $A' = 8$ の UC 構成および UCC 構成における ZF 規範と MMSE 規範のポストコーディングの比較は省略したが、UC 構成の場合はアンテナの自由度が $7 (= A' - U')$ となるため、ZF では干渉ユーザ数が 7 のときに大きな雑音強調を引き起こすことをシミュレーションにより明らかにした。また、UCC 構成の場合はアンテナの自由度に余裕がないため雑音強調が生じないことも明らかにした。

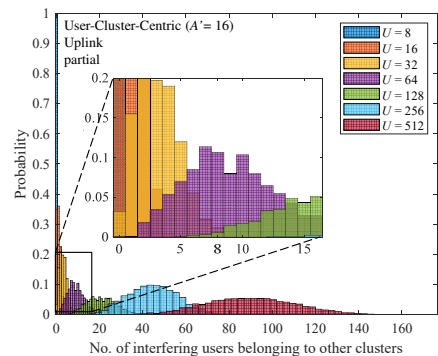


図 4 ウェイト計算に考慮する干渉ユーザ数の確率

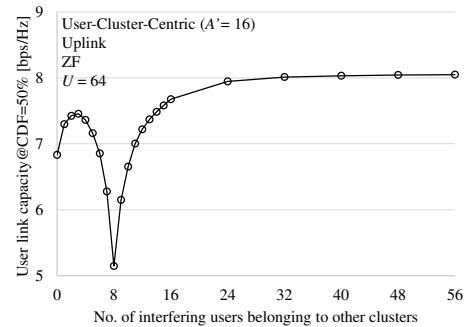


図 5 ウェイト計算に考慮する干渉ユーザ数の影響

次に、ユーザクラス当たりのアンテナ数を同数とした場合 (UC/UCC 構成ともに $A' = 8$) とポストコーディングウェイトの逆行列演算量を同じとした場合 (UC 構成は $A' = 8$ 、UCC 構成は $A' = 16$) について、partial MMSE ポストコーディングウェイトを用いるときの UC 構成と UCC 構成の上りリンクユーザ容量を比較する。

正規化送信 SNR をパラメータとして、CDF = 50% 点のユーザリンク容量を全ユーザ数 U の関数としてプロットした結果を図 6 に示す。まず、クラスタ当たりのアンテナ数を同数 ($A' = 8$) とした場合について、UC 構成と UCC 構成を比較する。図 6 より、正規化送信 SNR = -30 dB でかつ U が小さい場合を除いて UC 構成の方が高い容量となることが分かる。UC 構成の方が高い容量となる理由は、ユーザ近傍の選択アンテナ数の違いにより説明できる。 $A' = 8$ の UCC 構成の場合、 $A' = U'$ となるためユーザクラス内の各ユーザ近傍に

は、自ユーザクラスタの選択アンテナが 1 本しかない。したがって、例えば他ユーザクラスタとの境界に位置するユーザは、他ユーザクラスタのユーザが近傍にいてもヌルを向ける余裕がない。一方、UC 構成では、シングルユーザクラスタとなるため、そのユーザの近傍に $A' = 8$ 本のアンテナがあり、他ユーザクラスタと接していてもヌルを向ける余裕があり、干渉による容量低下が少ないからである。

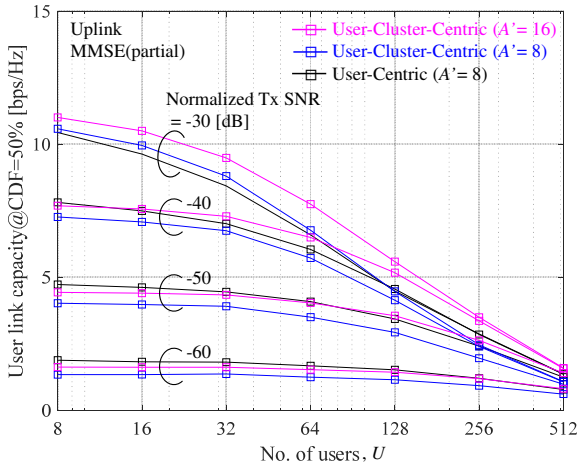


図 6 UC/UCC 構成の上りリンクユーザ容量比較

しかし、正規化送信 SNR = -30 dB としたとき、 U が小さいと UC 構成の容量が UCC 構成よりも劣化することが図 6 より分かる。この理由は、partial MMSE を用いたためである。partial MMSE では、選択したアンテナが重なる（同じアンテナを共有する）ユーザをウェイト形成に考慮する干渉ユーザとしている。正規化送信 SNR = -30 dB では、遠くからの干渉を無視できないにもかかわらず、対象 1 ユーザの近傍のアンテナを選択する UC 構成では、 U が小さい（ユーザ密度が低い）場合、選択したアンテナが重なりあうユーザが少ないため、遠くから強い干渉を与えるユーザをウェイト形成に考慮できないからである。

次に、ポストコーディングウェイトの逆行列演算量を同じとする場合（UC 構成は $A' = 8$ 、UCC 構成は $A' = 16$ ）について、UC 構成と UCC 構成を比較する。図 6 より、正規化送信 SNR が -30 dB および -40 dB と高い場合、UCC 構成の方が高い容量となることが分かる。この理由について考察する。送信電力が高い場合、遠くのユーザからも干渉を受けるため、遠くのユーザにもヌルを向ける必要がある。UC 構成では、ユーザ近傍にアンテナが集中しているため、遠くのユーザにヌルを向けようとすると雑音強調が生じてしまう。一方、UCC 構成では、複数のユーザでクラスタを形成しているため、選択したアンテナが空間的に広がっており、遠くのユーザにも雑音強調を起こすことなくヌルを向けることができる。なお、 $A' = 8$ 本の場合には UCC 構成の方が劣化するが、逆に $A' = 16$ 本の場合には向上する。これは、 $A' = 16$ 本の場合、アンテナ自由度がクラスタ内ユーザ数の 2 倍であるため、遠くのユーザにヌルを向ける余裕ができるからである。一方、正規化送信 SNR が低い場合でも U が大きいと UCC 構成の方が高容量になることが分かる。これは、ユーザ数が増

えユーザ密度が高くなると近い距離のユーザ同士でユーザクラスタを形成するようになるため、選択したアンテナ間距離も短くなり、低い送信電力でもアンテナ間協調ができるからである。

ところで、分散配置したアンテナを協調利用する UCC 構成および UC 構成のようなシステムの場合には、複数アンテナが協調可能な送信電力に設定すべきである。UCC 構成では、選択したアンテナ間の距離が長いいため、UC 構成より高い送信電力を必要とする。図 6 で考慮した最も高い送信電力である正規化送信 SNR = -30 dB は、送受信点間距離が平均アンテナ間距離の半分の距離における受信 SNR に換算すると 28 dB となり、一見高い電力という印象を受けるが、アンテナを高密度に分散配置する構成では、従来の局所集中型のアンテナ配置構成と比較し、アンテナ間の距離が近いため、十分低い送信電力にできると言えるのではないだろうか。

5. むすび

本稿では、CF-mMIMO の上りリンクを対象に ZF 規範と MMSE 規範のポストコーディングを用いるときのユーザ容量を計算機シミュレーションにより求め、CF-mMIMO 特有の ZF 雑音強調について考察するとともに MMSE による雑音強調抑圧効果を明らかにした。また、UC 構成と UCC 構成で達成可能な容量を比較し、高送信電力および高ユーザ密度における UCC 構成の有効性を示した。

今後は、下りリンク容量の評価や干渉電力測定およびチャネル推定の影響評価を行う予定である。また、アンテナ選択をチャネル利得に対する閾値処理に変更した評価や偏りのあるユーザ分布における UC 構成と UCC 構成のハイブリット構成の検討なども予定している。

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」(JPI000254) 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] P. Bradley, K. Bennett and A. Demiriz, "Constrained K-means clustering", Microsoft Research Technical Report, May 2000.
- [6] 林 和則, "初学者のための無線信号処理入門," RCS 研究会主催 第 5 世代移動通信システムの根幹をなす無線通信技術に関する基礎ワークショップ, 2016 年 10 月.
- [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.