

셀프리 다중안테나 네트워크에서 하위 성능 사용자를 위한 전력 재할당 기법

류종열¹ · 반태원² · 이웅섭^{1*}

Power Re-Allocation for Low-Performance User in Cell-free MIMO Network

Jong Yeol Ryu¹ · Tae-Won Ban² · Woongsup Lee^{1*}

^{1*}Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

²Professor, Department of Information and Communication Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

요 약

본 논문에서는 셀프리 다중안테나 네트워크에서 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 증대시키기 위한 전력 재할당 기법을 고려한다. AP(Access Point)는 사용자의 대규모 페이딩(large-scale fading) 채널 정보를 이용해 채널 세기에 비례하여 전력을 할당하여 전체 네트워크의 전력효율을 극대화한다. 다음으로 AP는 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 증가시키기 위해 할당전력 중 임계비율 이상의 전력을 할당받은 사용자의 전력을 임계비율과 같아지도록 줄이고, 회수한 전력을 채널이 가장 나쁜 사용자에게 추가로 할당한다. 시뮬레이션을 통해 전력 재할당 기법을 통해 증가시킬 수 있는 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 정량적으로 검증한다.

ABSTRACT

In this paper, we consider a power re-allocation technique in order to enhance the frequency efficiency of the low performance user in a cell-free multiple input multiple output (MIMO) network. The AP first allocates transmit power to the user to be proportional to the large-scale fading coefficients of the connected users. Then, the AP reduces the power of the users who were allocated power greater than the threshold ratio of total allocated power to be equal to the threshold ratio of the allocated power. Finally, the AP re-allocates the reduced power from the strong channel user to the user who has the worst channel condition, and thus, the frequency efficiency of the low performance user can be enhanced. In the simulation results, we verify the performance of the power re-allocation technique in terms of the spectral efficiency of the low performance user.

키워드 : 셀프리 네트워크, 사용자 중심 클러스터링, 다중안테나, 전력 재할당

Keywords : Cell-free network, user-centric clustering, multiple antenna, power re-allocation

Received 22 August 2022, Revised 1 September 2022, Accepted 6 September 2022

* Corresponding Author Woongsup Lee (E-mail: wslee@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9171)

Associate Professor, Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.9.1367>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

차세대 무선통신 네트워크에서는 주어진 자원을 효과적으로 활용하여 최대한 많은 사용자에게 최대한 높은 전송효율로 데이터를 서비스하는 것을 목표로 한다. 서비스 사용자 수와 전송효율을 높이기 위해서는 정해진 면적 내에 최대한 많은 수의 AP를 배치하고, AP의 송신안테나 수를 증가시켜 사용자들이 AP로부터 더 나은 상태의 무선 채널을 통해 서비스를 받을 수 있는 환경을 제공해야 한다. 다수의 AP가 존재하는 밀집 네트워크(dense network)에서 사용자는 서비스 AP로부터 수신하는 데이터 신호의 세기가 커지는 동시에 인접 AP로부터 발생하는 간섭 신호의 세기 또한 매우 증가한다. 따라서 동시에 많은 사용자에게 높은 전송효율을 제공하기 위해서는 AP 사이의 간섭 문제를 해결해야만 한다. 인접 AP 간섭 문제를 해결하기 위한 방식으로 인접 AP 간의 데이터 공유를 통해 데이터를 전송하는 분산안테나 시스템(distributed antenna system, DAS) [1], 네트워크 다중안테나(network MIMO) [2], 다중셀 CoMP (coordinated multi-point) [3] 기술이 제안되었다. 이런 협력 전송 네트워크에서 AP들은 서비스할 사용자들의 데이터를 백홀(back-haul) 링크를 통해 공유하고, 협력 빔형성 등의 기법을 통해 클러스터 내부의 간섭을 제어한다. 그러나 CoMP 등의 협력 전송 네트워크에서도 AP를 중심으로 클러스터를 구성할 경우, 클러스터와 클러스터 사이에 있는 클러스터 외곽(edge)사용자가 존재하게 되고, 클러스터 간 간섭의 영향으로 클러스터 외곽사용자의 전송효율은 보장할 수 없다. 이런 근본적인 문제를 해결하기 위해 AP가 아닌 사용자 중심으로 클러스터를 구성하는 셀프리 다중안테나 네트워크가 제안되었다. [4-8]

셀프리 다중안테나 네트워크에서는 각 사용자가 자신을 중심으로 서비스받을 AP를 직접 선택하여 클러스터를 구성한다. 결과적으로 모든 사용자가 자신을 중심으로 클러스터를 구성하므로 셀프리라는 이름처럼 클러스터(또는 셀) 외곽사용자가 존재하지 않는다. 셀프리 다중안테나 네트워크에서 AP들은 프론트홀(front-haul) 링크를 통해 중앙처리유닛(central processing unit, CPU)에 연결되어 있다. 사용자 중심으로 클러스터가 형성되면 AP는 서비스할 사용자들의 데이터를 CPU로부터 프론트홀 링크를 통해 공유하고, CPU에서 중앙집중

적인 방식의 설계 또는 각 AP에서 분산적인 방식의 빔형성(beamforming) 기법을 통해 데이터를 전송한다. 논문 [4]에서는 셀프리 다중안테나 네트워크에서 중앙집중적인 빔형성 기법을 통한 협력 전송으로 기존의 스몰셀(small cell) 네트워크와 비교하여 주파수 효율(frequency efficiency)을 큰 폭으로 증가시킬 수 있음을 보였다. 최근에는 셀프리 다중안테나 환경에서 협력 전송의 효율을 극대화하기 위한 다양한 빔형성 기법과 전력할당 기법이 제안되고 있다 [5-7]. 간섭 채널을 포함한 모든 채널 정보를 이용해서 CPU에서 중앙집중적으로 전송 빔과 송신전력을 설계하는 기법이 논문 [5]에서 제안되었고, 각 AP에서 자신과 연결된 제한된 채널 정보만을 이용해서 분산적으로 전송 빔을 설계하고 송신전력은 중앙집중적으로 설계하는 기법이 논문 [6]에서 제안되었다. 채널 추정 오류를 고려하여 데이터를 안정적으로 전송하기 위한 빔형성 기법이 논문 [7]에서 제안되었다. 기존 연구 [5-7]에서 제안된 중앙집중적 전력할당 기법의 복잡도(complexity)와 확장성(scalability) 문제를 해결하기 위한 사용자 중심 클러스터링 기법이 논문 [8]에서 진행되었다. 논문 [8]에서는 임계값 기반으로 사용자가 직접 클러스터링을 결정하고 결정된 클러스터에서 AP가 분산적으로 전송 빔과 전력을 설계하는 기법이 제안되었다. 그러나 논문 [8]에서는 채널 세기에 비례하는 전력할당 기법을 적용하였고, 따라서 채널의 상태가 나쁜 하위권 성능 사용자의 전송효율을 극대화할 수 없다.

본 논문에서는 AP가 제한적인 정보를 통해 분산적으로 채널이 상대적으로 좋지 않은 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 개선하기 위한 전력 재할당 기법을 제안한다. 각 사용자는 임계값을 기반으로 사용자 중심 클러스터링을 수행하고, 결정된 클러스터에서 AP는 일차적으로 대규모 페이딩 계수를 기반으로 채널 세기에 비례하여 전력을 할당한다. 다음으로 AP는 전체 할당전력 중 임계비율 이상 할당받은 사용자들의 전력을 정해진 비율로 제한하고, 잉여전력을 회수한다. 회수한 잉여전력을 채널 상태가 가장 나쁜 사용자에게 재할당함으로써 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 증가시킨다. 시뮬레이션을 통해 전력 재할당 기법의 효율성을 검증하고, 사용자 중심 클러스터링과 전력 재할당 기법의 결합을 통한 하위 사용자의 주파수 효율 향상을 검증한다.

II. 시스템모델

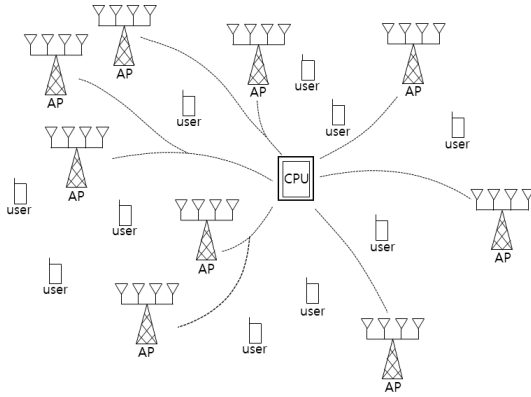


Fig. 1 Cell-free MIMO network (L APs with N antennas, K users with a single antenna)

본 논문에서는 그림 1과 같이 N 개의 안테나를 보유한 AP L 개와 단일안테나를 보유한 사용자가 K 명이 존재하는 셀프리 다중안테나 환경을 고려한다. 그림 1과 같이 셀프리 다중안테나 환경에서 AP는 프론트홀 링크를 통해 CPU에 연결되며, 이를 통해 각 사용자에게 전송할 데이터를 공유한다. 본 논문에서는 시분할 이중통신 방식(TDD)으로 동작하는 네트워크를 고려하며, 각 AP는 자신과 사용자들 사이의 채널 정보는 채널 상반성(reciprocity)를 통해 추정할 수 있는 환경을 고려한다. AP l 과 사용자 k 사이의 MISO (multiple-input single-output) 채널을 h_{lk} 라고 정의하고, 다음과 같은 독립항등(independent and identical) Rayleigh 분포를 따른다고 가정한다. $h_{lk} \sim \text{CN}(0, g_{lk}I_N)$, g_{lk} 는 경로손실 등을 포함한 대규모 페이딩 계수를 의미하고, AP l 과 사용자 k 는 자신과 연결된 채널의 대규모 페이딩 계수 g_{lk} 를 안다고 가정한다.

본 연구에서 사용자는 논문 [8]에서 제안한 사용자 중심 클러스터링을 통해 클러스터를 구성한다. 사용자 k 의 클러스터 AP 집합을 A_k 라고 정의한다. 첫 번째 단계에서 사용자 k 는 자신과 연결된 채널의 대규모 페이딩 계수가 가장 큰 AP를 클러스터 집합에 포함한다.

$$A_k = \{l \mid g_{k,\max} = \max_l g_{lk}, l = 1, \dots, L\} \quad (1)$$

두 번째 단계에서 각 사용자는 미리 설정된 임계값 Γ_k

을 기반으로 AP의 페이딩 계수의 상대적 크기가 임계값보다 큰 AP를 포함하여 다음과 같이 클러스터 집합을 결정한다.

$$A_k = \{l \mid G_{lk}^{\text{dB}} \geq \Gamma_k \text{ [dB]}, l = 1, \dots, L\} \quad (2)$$

여기서 G_{lk}^{dB} 는 AP l 과 사용자 k 사이의 페이딩 계수 g_{lk} 와 최대 페이딩 계수 $g_{k,\max}$ 의 비율을 dB 스케일로 나타낸 것으로 다음과 같다.

$$G_{lk}^{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{g_{lk}}{g_{k,\max}} \right) \quad (3)$$

사용자 중심 클러스터링의 결과로 AP l 이 서비스해야 하는 사용자의 집합 U_l 이 다음과 같이 결정된다.

$$U_l = \{k \mid G_{lk}^{\text{dB}} \geq \Gamma_k \text{ [dB]}, k = 1, \dots, K\} \quad (4)$$

III. 하위 성능 사용자를 위한 전력 재할당 기법

사용자 중심 클러스터링을 통해 사용자 k 의 클러스터 AP 집합 A_k 와 AP l 의 서비스 사용자의 집합 U_l 이 결정되면 AP l 은 U_l 에 속한 사용자들의 데이터를 CPU로부터 프론트홀 링크를 통해 전달받는다. 사용자 k 는 A_k 에 속한 AP들로부터 데이터를 수신하고, 사용자 k 가 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_k &= \sum_{l \in A_k} \sqrt{p_{lk}} h_{lk}^\dagger w_{lk} s_k + \sum_{j \neq k} \sum_{i \in A_j} \sqrt{p_{ij}} h_{ik}^\dagger w_{ij} s_j + n_k \\ &= \sum_{l \in A_k} \sqrt{p_{lk}} h_{lk}^\dagger w_{lk} s_k \\ &\quad + \underbrace{\sum_{j \neq k} \sum_{i \in A_k, i \in A_l} \sqrt{p_{ij}} h_{ik}^\dagger w_{ij} s_j}_{\text{intra-cluster interference}} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{j \neq k} \sum_{m \neq A_k, m \in A_l} \sqrt{p_{mj}} h_{mk}^\dagger w_{mj} s_j + n_k}_{\text{inter-cluster interference}} \end{aligned} \quad (5)$$

위 수식에서 w_{lk} 와 p_{lk} 는 각각 AP l 이 사용자 k 의 데이터를 전송하기 위해 사용하는 빔형성 벡터와 전력할당을 의미한다. 위 수식 (5)에서 외부 클러스터로부터 발생하는 클러스터간(inter-cluster) 간섭은 사용자 중심 클러스터링을 통해 제어할 수 있으며, 클러스터 내부(intra-cluster)에서 발생하는 간섭은 빔형성 기법과 전

력할당 기법을 통해 제어한다. 위 수식으로부터 수신 신호 대 간섭 잡음비 $SINR_k$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$SINR_k = \frac{\left| \sum_{l \in A_k} \sqrt{p_{lk}} h_{lk}^\dagger w_{lk} \right|^2}{\sum_{j \neq k} \left| \sum_{i \in A_j} \sqrt{p_{ij}} h_{ik}^\dagger w_{ij} \right|^2 + N_0} \quad (6)$$

위 수식에서 N_0 는 잡음의 전력을 의미한다. 수신 $SINR_k$ 을 이용해 사용자 k 의 주파수 효율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SE_k = \log_2(1 + SINR_k) \quad (7)$$

3.1. 전력 재할당기법

본 장에서는 전체 사용자 중 성능 하위권에 해당하는 사용자들의 성능 향상을 위한 전력할당 기법을 제안한다. AP l 은 서비스 사용자 집합 U_l 에 속한 모든 사용자를 서비스해야 하므로 총 사용 전력 p_l 내에서 각 사용자에게 전력을 할당한다. 본 연구에서는 AP가 자신과 직접 연결된 채널 정보만을 이용할 수 있으므로 모든 채널을 고려한 복잡도 높은 전력할당 기법을 적용할 수 없다. 제안하는 전력할당 기법은 두 단계로 이루어져 있다. 먼저 첫 번째 단계에서 AP l 은 서비스 사용자 집합 U_l 에 속한 사용자들의 대규모 페이딩 계수의 크기에 비례하여 다음과 같이 전력을 할당한다 [8], [9].

$$p_{lk} = \begin{cases} p_l \frac{\sqrt{g_{lk}}}{\sum_{j \in INU_l} \sqrt{g_{lj}}}, & \text{if } k \in INU_l \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

첫 번째 단계에서 AP l 은 총 사용 전력 p_l 을 모두 사용하여 데이터를 전송하고, 각 사용자의 채널의 대규모 페이딩 계수의 상대적 크기에 비례하도록 전력을 할당함으로써 전체 네트워크의 전송효율을 향상한다. 결과적으로 대규모 페이딩 계수를 기준으로 채널이 좋은 사용자는 그만큼 더 많은 전력을 할당받고, 반대로 채널이 상대적으로 나쁜 사용자는 전력을 덜 할당받는다. 이와 같은 전력할당 기법은 전체 네트워크의 성능 관점에서는 효율적이지만, 채널이 나쁜 하위 성능 사용자는 상대적으로 적은 양의 전력을 할당받음으로써 낮은 주파수 효율을 나타낸다.

두 번째 단계에서 AP l 은 하위 성능 사용자의 성능 향상을 위한 전력 재할당을 수행한다. 전력 재할당은 채널 크기가 일정 수준 이상으로 많은 양의 전력을 할당받은 사용자들의 전력을 줄이고, 그만큼의 전력을 채널이 약한 사용자에게 재할당하는 방식으로 진행된다. 먼저 AP l 은 사용자 집합 U_l 에 속한 사용자 중 대규모 페이딩 계수를 기준으로 채널의 크기가 큰 사용자들의 집합을 강한 채널(strong channel) 사용자 집합 $U_s^{(l)}$ 로 정의한다. 강한 채널 사용자는 채널의 크기가 나머지 모든 사용자 채널 크기의 합보다 일정 비율 ($0 \leq \Gamma_p'$) 이상인 사용자로 다음과 같이 정의된다.

$$U_s^{(l)} = \left\{ k \mid \sqrt{g_{lk}} \geq \Gamma_p' \left(\sum_{j \in INU_l, j \neq k} \sqrt{g_{lj}} \right), k \in U_l \right\} \quad (9)$$

위 수식 (9)의 강한 채널 사용자 집합은 수식 (8)을 이용해 다음과 같이 다시 표현된다.

$$U_s^{(l)} = \{ k \mid p_{lk} \geq \Gamma_p' p_l, k \in INU_l \}, \quad (10)$$

$$\Gamma_p' = \frac{\Gamma_p}{1 + \Gamma_p} \quad (11)$$

위 수식 (10)을 보면 결과적으로 강한 채널 사용자는 첫 번째 단계에서 AP l 의 총 사용 전력 p_l 중 일정 비율 ($0 \leq \Gamma_p < 1$) 이상 할당받은 사용자로 정의된다. 예를 들어, $\Gamma_p = 0.5$ 인 경우, 첫 번째 단계 전력할당 결과 전체 전력 p_l 중 절반 이상의 전력을 할당받은 사용자가 강한 채널 사용자로 결정된다. 다음으로 전력을 재할당 받을 약한 채널(weak channel) 사용자는 채널의 총합이 가장 작은 사용자로 다음과 같이 결정된다.

$$U_{\min}^{(l)} = \left\{ k \mid \arg \min_{k \in INU_l} \left(g_k = \sum_{l \in A_k} \sqrt{g_{lk}} \right) \right\} \quad (12)$$

마지막으로 강한 채널 사용자에게 할당되는 전력은 $\Gamma_p p_l$ 로 제한하고, 이때 발생한 잉 전력은 약한 채널 사용자에게 다음과 같이 재할당한다.

$$p_{lk}^* = \begin{cases} p_{lk} - p_{lk}^m, & \text{if } k \in INU_s^{(l)} \\ p_{lk} + p_{lk}^m, & \text{if } k \in INU_{\min}^{(l)} \\ p_{lk}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

위 수식에서 p_{lk}^m 는 강한 채널 사용자 k 의 전력을 재할

당을 통해 줄임으로써 얻어지는 잉여전력이고, p_i^m 은 이렇게 얻은 잉여전력의 총합으로 다음과 같이 정의된다.

$$p_i^m = \sum_{k \in \text{INU}_s^{(i)}} p_{ik}^m = \sum_{k \in \text{U}_s^{(i)}} (p_{ik} - \Gamma_p p_i) \quad (14)$$

강한 채널 사용자 집합과 약한 채널 사용자에게 해당하지 않는 나머지 사용자들은 첫 번째 단계에서 할당받은 전력을 그대로 할당받는다.

결과적으로 첫 번째 단계에서 채널의 상대적 크기가 매우 커서 전체 전력 p_i 중 일정 임계비율 Γ_p 이상의 전력을 할당받은 사용자들의 전력을 $\Gamma_p p_i$ 로 줄이고, 이를 통해 얻은 잉여전력을 상대적으로 채널이 가장 나쁜 사용자에게 추가로 할당한다.

3.2. 빔형성 기법

본 연구에서는 각 AP가 자신과 직접 연결된 채널의 정보만을 이용한 분산적 빔형성 기법을 고려하고 있으므로 Minimum Mean Square Error (MMSE) 빔형성 기법을 사용한다. 3.1 절에서 제안한 전력할당 기법의 결과를 이용하여 다음과 같이 MMSE 빔을 설계한다 [10].

$$\tilde{w}_{ik}^{\text{MMSE}} = \left(\sum_{j \in \text{INU}_i} h_{ij} h_{ij}^\dagger + \frac{N_0}{p_{ik}} \mathbf{I} \right)^{-1} h_{ik} \quad (15)$$

$$w_{ik}^{\text{MMSE}} = \frac{\tilde{w}_{ik}^{\text{MMSE}}}{\| \tilde{w}_{ik}^{\text{MMSE}} \|} \quad (16)$$

수식 (16)에서 $\| \cdot \|$ 는 Euclidean norm을 의미하고, 빔의 크기를 1로 정규화하는 과정이다. 수식 (15)에서 p_{ik}^* 가 크면 클수록 MMSE 빔은 클러스터 내부 사용자들의 간섭을 줄이는 방향으로 설계된다. 앞 절에서 약한 채널 사용자는 추가적인 전력을 할당받은 만큼 클러스터 내부의 다른 사용자들에게 더 큰 간섭을 발생시킬 수 있지만, 빔형성을 통해 클러스터 내부 사용자들의 간섭을 줄이는 방향으로 빔을 설계함으로써 이를 상쇄할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 하위 성능 사용자의 성능 향상을 위한 사용자 중심 클러스터링 기법과 전력

할당 기법의 성능을 주파수 효율 관점에서 검증한다.

시뮬레이션을 위해 1000×1000 제곱미터의 면적에 25개의 AP($L=25$)와 25명의 사용자($K=25$)가 존재하는 환경을 고려하며, AP의 송신안테나 수는 4개($N=4$)로 가정한다. AP와 사용자의 위치는 정해진 면적 내에서 균일 분포(uniform distribution)를 통해 랜덤하게 생성되며, AP간 거리를 보장하기 위해 AP간 최소거리를 100m로 유지하며 생성된다. 이 같은 환경을 500번 이상 생성하여 주파수 효율의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)를 구한다.

시뮬레이션에서 사용하는 대규모 페이딩 계수는 2GHz 대역의 3GPP Urban microcell model을 사용하여 다음과 같이 생성한다 [9].

$$g_{ik} = 10^{\frac{g_{ik}^{\text{dB}}}{10}}, \quad (17)$$

$$g_{ik}^{\text{dB}} = -30.5 - 36.7 \log_{10} \left(\frac{d_{ik}}{1\text{m}} \right) + F_{ik} \text{ [dB]} \quad (18)$$

위 수식에서 d_{ik} 는 AP I 와 사용자 k 사이의 거리를 의미하고, $F_{ik} \sim \mathcal{N}(0, 10^2)$ 는 쉐도우 페이딩(shadow fading)을 의미한다.

사용자 중심의 클러스터링 기법과 전력할당, 빔형성 기법의 성능 검증을 위한 비교 기법으로, AP 중심의 클러스터링 기법과 MRT(maximal ratio transmission) 빔형성 기법을 고려한다. AP 중심의 클러스터링 기법에서는 다음과 같이 AP I 에서 임계값 Γ_I 이상의 페이딩 계수를 갖는 사용자들을 서비스 사용자 집합으로 클러스터링한다.

$$U_I^{\text{AP}} = \{k \mid \sqrt{g_{ik}} \geq \Gamma_I, k = 1, \dots, K\} \quad (19)$$

MRT 빔형성 기법은 사용자 간 간섭을 고려하지 않고, 수신 신호의 세기를 최대화하며 다음과 같이 설계한다.

$$w_{ik}^{\text{MRT}} = \frac{h_{ik}}{\|h_{ik}\|} \quad (20)$$

MRT 빔형성 기법의 경우 최소한의 복잡도로 설계할 수 있다는 장점이 있지만, 간섭을 고려하지 않아 클러스터 내부 간섭으로 인한 성능 저하가 발생할 수 있다.

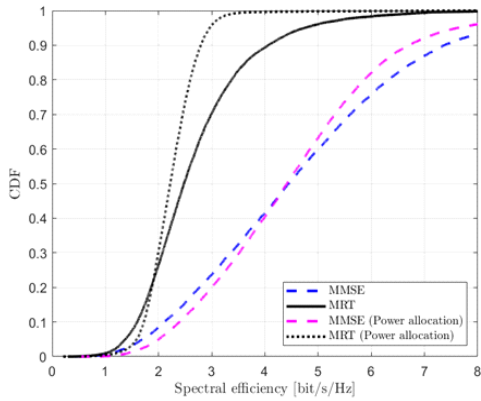


Fig. 2 CDF of Spectral efficiency for power re-allocation ($\Gamma_k=-20\text{dB}$, $\Gamma_p=1/3$)

그림 2에서는 하위 성능 사용자를 위한 전력 재할당 기법의 성능을 주파수 효율의 CDF를 통해 보여준다. 사용자 중심 클러스터링의 임계값은 논문 [8]의 결과를 이용해서 최적의 성능을 나타낸 $\Gamma_k = -20\text{dB}$ 로 설정했다. 전력할당 임계값은 $\Gamma_p = 1/3$ 로 설정하여 첫 번째 전력 할당 단계에서 수식 (8)을 통해 전체 전력의 1/3 이상 할당받은 사용자의 전력을 제한하고, 잉여전력을 약한 채널 사용자에게 재할당한다. 비교 대상은 수식 (8)을 통해 전력을 할당하고, 하위권 사용자를 위한 전력 재할당을 수행하지 않은 기법으로 한다. 그림 2를 통해 MMSE와 MRT 빔형성 모두 전력 재할당을 통해 상위 성능 사용자 (e.g. MMSE: 상위 50% 이상, MRT: 상위 20% 이상)의 주파수 효율을 줄이는 대신 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 증가시키는 것을 볼 수 있다. 특히 MMSE 기법의 경우 하위 사용자가 추가로 전력을 할당받은 만큼 다른 사용자의 간섭을 줄이는 방향으로 빔을 설계하므로, 상위 사용자의 성능 열화가 MRT 기법의 경우보다 작다. MMSE 기법에서 주파수 효율 하위 10% 사용자는 전력 재할당을 통해 약 20%의 성능을 향상시킬 수 있고, 하위 5%의 경우 약 30%의 성능 향상을 가져올 수 있다.

그림 3에서는 사용자 중심 클러스터링 기법과 전력 재할당 기법의 결합을 통해 달성할 수 있는 주파수 효율의 CDF를 보여준다. 비교 대상은 AP 중심 클러스터링 기법을 통해 클러스터를 구성하고, 수식 (8)을 통해 전력을 할당하는 기법으로 한다. 사용자 중심 클러스터링의 임계값과 전력할당 임계값은 각각 $\Gamma_k = -20\text{dB}$ 그리

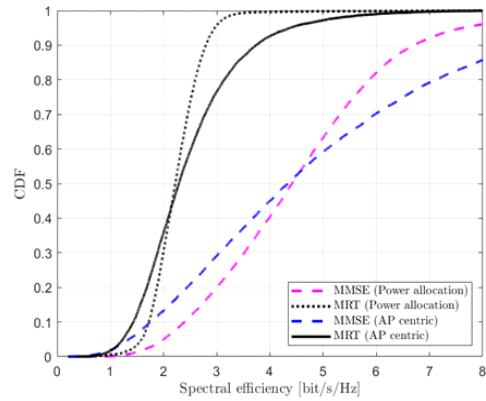


Fig. 3 CDF of Spectral efficiency for user-centric clustering and power re-allocation ($\Gamma_k=-20\text{dB}$, $\Gamma_p=1/3$)

고 $\Gamma_p = 1/3$ 로 설정한다. 비교 대상인 AP 중심 클러스터링에서 사용하는 임계값 Γ_k 은 하위 성능 10% 사용자의 성능을 최대화하는 값으로 최적화한다. 그림 3에서도 그림 2의 결과와 마찬가지로 상위 성능 사용자의 주파수 효율을 희생하는 대신 하위 성능 사용자의 주파수 효율 향상을 가져올 수 있다. MMSE 기법의 경우 주파수 효율 하위 10% 사용자는 사용자 중심 클러스터링과 전력 재할당을 통해 주파수 효율을 약 45% 증가시킬 수 있었고, 하위 5%의 경우 약 54%의 성능 향상을 가져올 수 있었다. 제안된 기법에서 사용자 중심 클러스터링으로 클러스터간 간섭을 우선으로 제어하고, 전력 재할당 기법과 MMSE 빔형성 기법을 통해 클러스터 내부 간섭을 제어함으로써 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 45% 이상 향상할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 셀프리 다중안테나 환경에서 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 증가시키기 위한 기법을 고려했다. 먼저 사용자는 사용자 중심 클러스터링 기법을 통해 서비스받을 AP를 직접 선택한다. 그리고, 전력 할당의 첫 번째 단계로 AP는 서비스할 사용자들의 채널 상태에 비례하여 전력을 할당한다. 다음으로 AP는 채널의 상태가 매우 좋아서 전체 전력 중 일정 비율 이상 할당받은 사용자들의 전력을 정해진 비율로 제한하고, 그

만큼의 잉여전력을 채널 상태가 가장 나쁜 사용자에게 재할당함으로써 하위권 성능 사용자의 주파수 효율을 증가시킨다. 시뮬레이션을 통해 전력 재할당 기법의 효율성을 검증하고, 사용자 중심 클러스터링과 전력 재할당 기법의 결합을 통해 네트워크 하위 성능 사용자의 주파수 효율을 45% 이상 개선할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 제안한 사용자 중심 클러스터링과 전력 재할당 기법의 결합을 통해 셀프리 네트워크 내의 모든 사용자에게 일정 수준 이상의 서비스를 안정적으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.2018-0-00218, Speciality Laboratory for Wireless Backhaul Communications based on Very High Frequency).

REFERENCES

[1] S. Zhou, M. Zhao, X. Xu, J. Wang, and Y. Yao, "Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 108-113, Mar. 2003.

[2] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. S. Shitz, O. Simeone, and W. Yu, "Multi-Cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1380-1408, Dec. 2010.

[3] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck, H. -P. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel, "Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 2, pp. 102-111, Feb. 2011.

[4] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, Mar. 2017.

[5] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, H. Yang, and B. D. Rao, "Precoding and Power Optimization in Cell-Free Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Wireless*

Communications, vol. 16, no. 7, pp. 4445-4459, Jul. 2017.

[6] G. Interdonato, M. Karlsson, E. Bjornson, and E. G. Larsson, "Local Partial Zero-Forcing Precoding for Cell-Free Massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 7, pp. 4758-4774, Jul. 2020.

[7] V. M. T. Palhares, A. R. Flores, and R. C. de Lamare, "Robust MMSE Precoding and Power Allocation for Cell-Free Massive MIMO Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 5, pp. 3523-3537, May. 2021.

[8] J. Y. Ryu, W. Lee, and T. -W. Ban, "Threshold based User-centric Clustering for Cell-free MIMO Network," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 114-121, Jan. 2022.

[9] O. T. Demir, E. Bjornson, and L. Sanguinetti, "Foundation of User-Centric Cell-Free Massive MIMO," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 14, no. 3-4, pp. 162-472, Jan. 2021.

[10] D. H. N. Nguyen, L. B. Le, and T. Le-Ngoc, "Multiuser MISO precoding for sum-rate maximization under multiple power constraints," in *Proceeding of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans: LA, USA, pp. 729-734, 2015.

류종열(Jong Yeol Ryu)



2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 학사
 2014년 2월 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2014년 4월~2016년 8월 싱가포르기술디자인대학교 박사후 연구원
 2016년 9월~국립경상대학교 지능형통신공학과 부교수
 ※관심분야: 보안 통신 시스템, 차세대 이동통신 시스템, 셀프리 다중안테나 통신 등

반태원(Tae-Won Ban)



1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사
 2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사
 2010년 2월 KAIST 전기및전자공학 박사
 2009년 6월~2010년 10월 KT 연구 엔지니어
 2011년 2월~2012년 8월 KT Project Manager
 2012년 9월~현재 경상대학교 지능형통신공학과 교수
 ※관심분야: 차세대 이동통신, 무선 자원 관리, Cognitive Radios, Relay Systems, OFDM/MIMO

이웅섭(Woongsup Lee)



2006년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사
 2011년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사
 2012년 2월~2013년 2월 한국과학기술원 박사후 연구원
 2013년 2월~2014년 2월 독일 FAU 박사후 연구원
 2014년 3월~ 현재 경상대학교 지능형통신공학과 부교수
 ※관심분야: 차세대 이동통신 시스템, 인지라디오 시스템, 스마트 그리드, 빅데이터 분석, 딥러닝