

Cell-Free MIMO 에서 물리계층보안을 위한 User-Centric UE-AP Association

강민정¹, 이정훈², 이일구³

¹ 한국외국어대학교 전자공학과 및 응용통신연구센터 박사과정

² 한국외국어대학교 전자공학과 및 응용통신연구센터 교수

³ 성신여자대학교 미래융합기술공학과 교수

love_minmin926@hufs.ac.kr, tantheta@hufs.ac.kr, iglee@sungshin.ac.kr

User-Centric UE-AP Association for Physical Layer Security in Cell-Free MIMO Systems

Min Jeong Kang¹, Jung Hoon Lee², Il-Gu Lee³

^{1,2}Dept. of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center, Hankuk University of Foreign Studies

³Dept. of Future Convergence Technology Engineering, Sungshin Women's University

요 약

Cell-Free 시스템은 각 access point(AP)들이 고정적으로 특정 cell 내에 존재하는 유저(UE)에게 서비스하지 않고 서비스 지역 내에 넓게 분산 배치되어 있어 효율적으로 각 유저들에게 서비스할 수 있는 시스템이다. 그러므로 Cell-Free 시스템에서는 최적의 성능을 갖는 UE-AP association 을 찾는 것이 중요한 요소 중 하나로 여겨진다. 따라서 본 논문에서는 User-Centric 방식을 사용하는 Cell-Free MIMO 시스템에서 물리계층보안을 향상시키는 UE-AP association 기법을 제안한다.

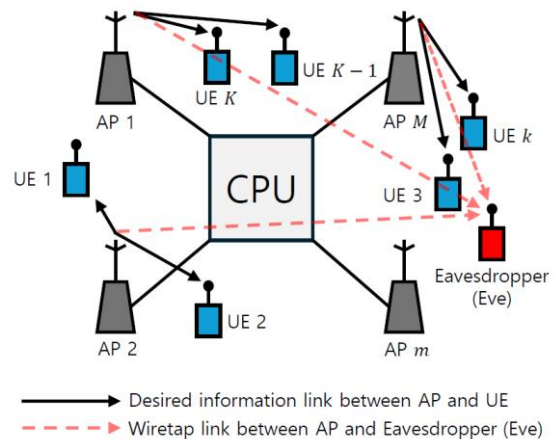
1. 서론

Cell-Free 시스템은 각 access point(AP)가 서비스하는 cell 이 고정되어 있지 않고 서비스 지역 내에 넓게 분산된 형태로 분포하고 있어 각 유저(UE)들에게 효율적으로 서비스할 수 있는 시스템이다.[1] 이러한 장점으로 인해 Cell-Free 시스템은 무선통신시스템에서 주목받는 시스템 중 하나로 여겨진다. 따라서 Cell-Free 시스템이 갖는 장점을 극대화하기 위해서는 AP 가 서비스할 최적의 유저를 유동적으로 선택하는 기준이 존재해야 한다. 그러므로 현재 여러가지 알고리즘을 활용하여 최적의 UE-AP association 기법을 찾는 연구가 활발히 이루어지고 있다.[2]

본 논문에서는 User-Centric 방식을 사용하는 Cell-Free MIMO 시스템에서 물리계층보안을 향상시키기 위해 채널 상관관계를 활용하여 총 보안 전송률(sum secrecy rate)을 최대화하는 최적의 UE-AP association 을 찾는 기법을 제안한다. 이때, 제안하는 기법의 성능은 제안하는 기법으로 얻을 수 있는 총 전송률(sum rate), 총 보안 전송률을 총 전송률을 최대화하는 기존의

UE-AP association 기법으로 얻을 수 있는 총 전송률, 총 보안 전송률과 각각 비교하여 평가한다.

2. 시스템 모델



(그림 1) 시스템 모델.

그림 1 은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 나타낸다. 이때 각각 N 개의 안테나를 갖는 M 개의 AP

가 하나의 안테나를 갖는 $K(\leq M)$ 명의 유저들에게 서비스를 하며, 각 AP 는 동시에 최대 N 명의 유저에게만 서비스할 수 있다고 가정한다. 이때, 시스템 내에는 한 명의 도청자가 존재한다고 가정한다. 또한 고려하는 시스템에서는 User-Centric 방식을 사용하므로 UE-AP association 은 유저가 자신 주변에 존재하는 L 개 이하의 AP 를 선택하여 형성한 AP cluster 를 토대로 진행된다. 이때, 초기에 생성된 AP cluster 집합은 $A^\circ = \{A_1^\circ, \dots, A_K^\circ\}$ 로 표현되며, A_k° 는 유저 k 가 초기에 정한 AP cluster 를 의미한다. 초기 AP cluster 집합이 형성된 후에는 초기 AP cluster 를 토대로 각 AP 의 초기 유저 그룹 집합 $U^\circ = \{U_1^\circ, \dots, U_M^\circ\}$ 가 도출된다. 여기서 U_m° 는 m 번째 AP 의 초기 유저 그룹을 의미한다. 그러나 본 논문에서는 각 AP 는 최대 N 명의 유저에게만 서비스할 수 있다고 가정하므로 $|U_m^\circ| \geq N$ 일 경우에는 주어진 UE-AP association 기법을 활용하여 초기 유저 그룹에서 서비스할 유저를 분류하는 과정을 수행하고, $|U_m^\circ| \leq N$ 일 경우에는 분류를 거치지 않고 그룹 내에 존재하는 모든 유저에게 서비스한다고 가정한다. 따라서 $U = \{U_1, \dots, U_M\}$ 는 초기 유저 그룹에서 주어진 UE-AP association 기법을 활용하여 분류된 최종 유저 그룹 집합을 의미하고, $A = \{A_1, \dots, A_K\}$ 는 최종 유저 그룹 집합 U 을 토대로 도출된 최종 AP cluster 를 의미한다. 그러므로 UE-AP association 이 완료된 다음, 유저 k 가 받는 수신신호 y_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \sum_{m \in A_k} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{x}_m + \sum_{m \in A_k^c} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{x}_m + n_{(m,k)}. \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{(m,k)} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 m 번째 AP 와 유저 k 사이에 존재하는 채널을 의미하며, $n_{(m,k)} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ 는 m 번째 AP 가 서비스할 때 유저 k 가 갖는 평균이 0 이고 분산이 1 인 백색 가우시안 노이즈를 의미한다. (즉, $n_{(m,k)} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 이다.) 이때, $\mathbf{h}_{(m,E)} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 m 번째 AP 와 도청자 사이에 존재하는 채널을 의미한다. 그리고 $\mathbf{x}_m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 m 번째 AP 가 보내는 전송신호를 의미하며 $\mathbf{x}_m = \sum_{j \in U_m} \sqrt{p_{(m,j)}} \mathbf{w}_{(m,j)} s_j$ 로 구성된다. 여기서, $\mathbf{w}_{(m,j)} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 m 번째 AP 가 유저 j 에게 서비스할 때의 빔포밍 벡터 (beamforming vector) 를 의미한다. 이때 AP 는 서비스하는 총 유저 수에 따라 서로 다른 빔포밍 벡터를 사용한다고 가정한다. 1 명에게 서비스하는 경우, maximum ratio transmission (MRT) 빔포밍 기법을 사용하고 2 명 이상의 유저에게 서비스하는 경우, zero-forcing (ZF) 빔포밍 기법을 사용한다고 가정한다. 또한 $p_{(m,j)}$ 는 m 번째 AP 가 유저 j 에게 서비스할 때의 전력을 의미하며, 각 AP 는 유저 그룹 내에 존재하는 모든 유저에게 동일한 전력을 할당한다고 가정하므로 전체 전력이 P 일 때, $p_{(m,j)} = P/|U_m|$ 가 된다. 그러므

로 유저 k 가 받는 수신신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{m \in A_k} \sqrt{p_{(m,k)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,k)} s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{m \in A_i \setminus A_k} \sqrt{p_{(m,i)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,i)} s_i + n_{(m,k)}. \quad (2)$$

식 (2)에서 $\sum_{m \in A_k} \sqrt{p_{(m,k)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,k)} s_k$ 는 유저 k 가 받고자 하는 신호를 의미하고, $\sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{m \in A_i \setminus A_k} \sqrt{p_{(m,i)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,i)} s_i$ 는 다른 유저 그룹으로부터 오는 간섭을 의미한다. 식 (2)를 토대로 유저 k 의 signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) 은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{SINR}_k = \frac{\left| \sum_{m \in A_k} \sqrt{p_{(m,k)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,k)} \right|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \left| \sum_{m \in A_i \setminus A_k} \sqrt{p_{(m,i)}} \mathbf{h}_{(m,k)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,i)} \right|^2 + 1}, \quad (3)$$

또한 도청자의 SINR 은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{SINR}_k^E = \frac{\left| \sum_{m \in A_k} \sqrt{p_{(m,k)}} \mathbf{h}_{(m,E)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,k)} \right|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \left| \sum_{m \in A_i \setminus A_k} \sqrt{p_{(m,i)}} \mathbf{h}_{(m,E)}^\dagger \mathbf{w}_{(m,i)} \right|^2 + 1}, \quad (4)$$

그러므로 유저 k 의 보안 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_k^{\text{SEC}} = \log_2(1 + \text{SINR}_k) - \log_2(1 + \text{SINR}_k^E). \quad (5)$$

따라서 총 보안 전송률은 $R_{\text{SUM}}^{\text{SEC}} = \sum_{k=1}^K R_k^{\text{SEC}}$ 가 된다.

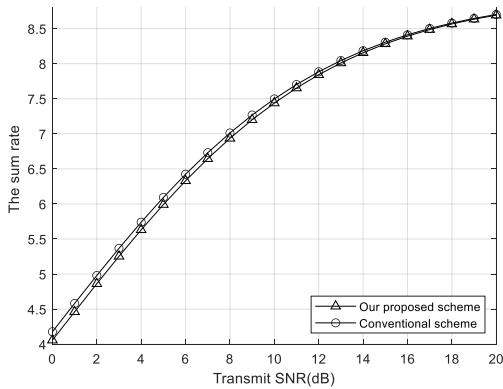
3. 제안하는 UE-AP association 기법

본 논문에서 제안하는 UE-AP association 기법은 $|U_m^\circ| \geq N$ 일 경우에 유저와 도청자 간의 채널 상관관계를 비교하여 초기 유저 그룹에서 총 보안 전송률을 최대화하는 최적의 UE-AP association 을 찾는 기법이다. 이때 제안하는 기법은 총 두 단계로 동작하며, 첫 번째 단계에서는 MRT 빔포밍을 사용하였을 때의 초기 유저 그룹 내에 존재하는 각 유저들과 도청자의 채널 방향을 각각 구한 다음, 각 유저들과 도청자의 채널 상관관계를 구하는 과정을 수행한다. 먼저 m 번째 AP 의 초기 유저 그룹 U_m° 에서 i 번째 요소에 해당하는 유저의 채널을 \mathbf{h}_m^i 이라고 정의하면, i 번째 요소에 해당하는 유저의 채널 방향과 도청자의 채널 방향은 각각 $\check{\mathbf{h}}_m^i \triangleq \mathbf{h}_m^i / \|\mathbf{h}_m^i\|$ 와 $\check{\mathbf{h}}_{(m,E)} \triangleq \mathbf{h}_{(m,E)} / \|\mathbf{h}_{(m,E)}\|$ 로 표현된다. 이때, 각 유저들의 채널 방향과 도청자의 채널 방향을 활용하여 첫 번째 단계에서 최종적으로 얻는 각 유저와 도청자 간의 채널 상관관계 집합은 $S = \{s_1, \dots, s_{|U_m^\circ|}\}$ 로 표현된다. (즉, s_1 은 U_m° 에서 첫 번째 요

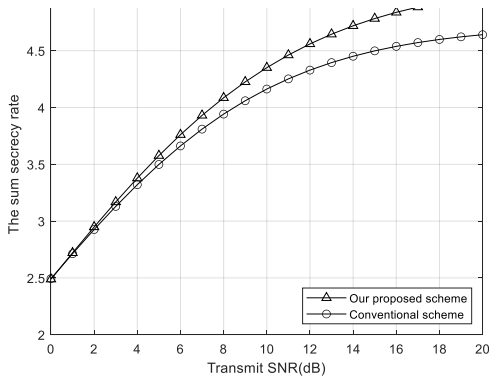
소에 해당하는 유저와 도청자 간의 채널 상관관계 $|\hat{\mathbf{h}}_m^\dagger \cdot \hat{\mathbf{h}}_{(m,E)}|^2$ 을 의미한다.) 두번째 단계에서는 첫번째 단계에서 구한 집합 S 를 오름차순으로 정렬한 집합 $S' = \{s'_1, \dots, s'_{|U_m^*|}\}$ 에서 첫번째 요소부터 N 번째 요소에 해당하는 값을 갖는 유저들을 m 번째 AP가 서비스할 유저들로 분류하는 과정을 수행한다. 따라서 $|U_m^*| \geq N$ 일 경우, 최적인 m 번째 AP의 최종 유저 그룹 U_m^* 은 다음과 같이 표현된다.

$$U_m^* = \{s'_1, \dots, s'_N\}, \quad (6)$$

4. 성능평가



(그림 2) 총 전송률.



(그림 3) 총 보안 전송률.

본 논문에서는 각각 $2(N=2)$ 개의 안테나를 갖는 $3(M=3)$ 개의 AP가 하나의 안테나를 갖는 $3(K=3)$ 명의 유저들에게 서비스하고, 한 명의 도청자가 있는 시스템에서 제안하는 기법의 성능을 평가하였다. 이때, 본 논문에서는 각 AP가 최대로 서비스할 수 있는 유저수는 안테나 수와 동일하다고 가정하였다. 따라서 $|U_m^*| \geq 3$ 일 경우에만 제안하는 기법을 사용하여 AP가 서비스할 유저를 선별하였다. 그리고 각 유저들은 초기 AP cluster를 구성하는 과정에서 자신의 주변에 존재하는 $2(L=2)$ 개의 AP를 선택하여 초기 AP

cluster를 형성한다고 가정하였다. 여기서 제안하는 기법의 성능은 제안하는 기법으로 구한 총 전송률, 총 보안 전송률을 반복적인 계산을 통해 총 전송률을 최대화하는 UE-AP association을 찾는 기존의 UE-AP association 기법(conventional scheme)으로 구한 총 전송률, 총 보안 전송률과 각각 비교하여 평가하였다. 이때, 그림 2와 그림 3은 성능 평가를 통해 얻은 두 기법의 총 전송률과 총 보안 전송률을 비교한 결과를 나타낸다. 그림 2와 그림 3을 통해 제안하는 기법으로 구한 UE-AP association으로부터 얻은 총 전송률이 기존의 기법으로 구한 UE-AP association으로부터 얻은 총 전송률보다 상대적으로 낮은 값을 갖지만 총 보안 전송률은 상대적으로 높은 값을 가짐을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 User-Centric 방식을 사용하는 Cell-Free MIMO 시스템에서 유저와 도청자의 채널 상관관계를 활용하여 총 보안 전송률을 최대화하는 최적의 UE-AP association을 찾는 기법을 제안하였다. 또한 성능평가를 통해 제안하는 기법으로 구한 UE-AP association이 기존의 기법으로 구한 UE-AP association보다 낮은 총 전송률을 갖지만 총 보안 전송률 측면에서는 더 좋은 성능을 가짐을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 산업혁신인재성장지원사업 (RS-2024-00415520)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재 4.0 사업의 연구결과로 수행되었음 (No. IITP-2022-RS-2022-00156310).

참고문헌

- [1] X. Gao, Y. Li, W. Cheng, L. Dong, and P. Liu, "Secure Optimal Precoding for User-Centric Cell-Free Massive MIMO System," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 31-35, Jan. 2023.
- [2] C. D'Andrea and E. G. Larsson, "User Association in Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems," *2020 54th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, 2020, pp. 826-830.