

## Cell-free Massive 다중안테나 다운링크 성능 연구

명정호, 김근영, 고영조  
한국전자통신연구원

jhmyung@etri.re.kr, kykim12@etri.re.kr, koyj@etri.re.kr

## Performance Analysis of Cell-Free Massive MIMO Downlink

JungHo Myung, Keunyoung Kim, Young-Jo Ko  
Electronics and Telecommunications Research Institute

## 요약

본 논문에서 우리는 AP 별 송신전력 할당 기법 및 지원 사용자 수 제한 따른 저복잡도 빔포밍 디자인 기법을 제안하였고, Cell-free mMIMO 다운링크 환경에서 성능 분석을 수행하였다. 제안된 송신전력 할당 방법은 각 AP에서 SLNR을 이용한 예측 전송용량을 기반으로 수행하는 것을 특징으로 한다. 제안된 기법은 네트워크가 가용할 수 있는 총 송신전력량이 작거나 동일한 주파수에서 지원하는 사용자 수가 적을 경우, 기존 기술 대비 전송용량 이득값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, AP 별 지원 사용자 수 제한에 기반을 둔 저복잡도 빔포밍 기법은 전체 사용자 수 대비 제한 수 비율에 따라 성능 손실이 존재하나, 해당 비율만큼 빔포밍 구현 복잡도를 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

## I. 서론

최근 무선통신 사용자들의 트래픽 수요 증가에 맞춰 데이터 전송 속도를 향상시키기 위한 다양한 기술들이 연구되고 있다. 그 중, Cell-free mMIMO(massive MIMO) 기술은 기존 분산 안테나 시스템, 협력 다중점 전송 기술이 가진 네트워크 동기 문제, 프론트홀 용량 문제와 같은 구현 이슈를 하나씩 극복해가면서, 차세대 무선 통신 네트워크 후보 구조로 주목받고 있다[1, 2]. Cell-free mMIMO 네트워크는 시분할 방식으로 동작하여 채널 상호성 기반으로 상하향 링크 채널 정보를 획득하며, CPU와 프론트홀로 연결된 분산된 AP(access point)가 적은 수의 사용자와 동시에 데이터를 송수신하는 구조이다. AP를 매우 많이 배치하면 기존 중앙집중형 mMIMO에서 제공하는 channel hardening 효과를 얻을 수 있어 비교적 단순한 신호 처리 기법으로 최적의 성능을 달성할 수 있으며, 모든 사용자에게 동일한 전송용량 제공할 수 있는 기술로 알려져 있다.

본 논문에서는 Cell-free mMIMO 네트워크 환경에서 AP 별 송신전력 할당 방법 및 지원 사용자 수에 따른 저복잡도 빔포밍 디자인 기법에 관한 연구를 수행하였다. 제안된 송신전력 할당 방법은 네트워크 총 송신전력량이 작거나 동시에 지원하는 사용자 수가 많을 경우, 기존 기술과 동일한 성능을 제공하는 반면, 총 송신전력량이 작거나 지원하는 사용자 수가 적을 경우 기존 기술 대비 사용자 별 평균 전송 용량이 증가하는 성능을 제공할 수 있다. 또한, AP 별 지원 사용자 수 제한에 기반을 둔 저복잡도 빔포밍 기법은 전체 사용자 수 대비 제한 수 비율에 따라 일부 구간에서 성능 손실이 존재하나, 해당 비율만큼 빔포밍 구현 복잡도를 감소시킬 수 있는 장점을 제공할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통해, 기존 전송 기술과 우리가 제안한 기술들의 성능 비교를 확인할 수 있다.

## II. 본론

$K$  명의 사용자와  $M$ 개의 AP로 구성된 Cell-free 다중 안테나 다운링크 환경에서,  $k$ 번째 사용자의 수신 신호( $y_k$ )는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{m=1}^M h_{km}x_m + w_k$$

$h_{km}, x_m, w_k$ 는 AP와  $k$ 번째 사용자의 채널,  $m$ 번째 AP 송신 신호, 잡음을 의미한다. 이때, 각 AP의 송신 신호  $x_m$ 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$x_m = \sqrt{p_d} \sum_{k=1}^K t_{mk} \bar{g}_{mk} s_k$$

$p_d, t_{mk}, \bar{g}_{mk}, s_k$ 는 AP의 송신전력,  $k$ 번째 사용자를 위한 파워 분배 계수,  $k$ 번째 사용자를 위한 크기 1의 방향성 실수값,  $k$ 번째 사용자의 데이터 심볼을 의미한다. 이때, 송신 신호의 크기는  $|x_m|^2 \leq p_d$ 의 제약 조건이 존재한다.

일반적으로 Cell-free mMIMO에서 사용되는 켈레 빔포밍 기법에서는  $t_{km}$ 는 사용자의 채널 크기에 비례하여 설정,  $\bar{g}_{mk}$  채널의 켈레에 해당하게 설정, AP 별 송신 전력은 동일하다고 가정하고 전송하는 것을 특징으로 한다.

## A. SLNR(Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio)기반 송신 파워 조절 기법

본 기법에서는 일반적인 켈레 빔포밍 기법에서, 전체 네트워크에서 가용 가능한 총 송신전력으로 제약 조건을 완화하여 AP 간 전력 할당하는 것을 특징으로 한다.

송신 전력 할당을 위하여, 각 AP에서는 자신의 쓸 수 있는 최대 파워 기반 사용자 별 SLNR 및 예상 전송 용량, 그리고 그 합( $r_m$ )을 아래와 같이 계산한다.

$$r_m = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{|\sqrt{p_{d,max}} h_{km} t_{mk} \bar{g}_{mk}|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\sqrt{p_{d,max}} h_{jm} t_{mk} \bar{g}_{mk}|^2 + \sigma^2} \right)$$

각 AP는 계산된 전송 용량의 합을 CPU로 전송하고, CPU에서는 전체 AP에서 받은  $M$ 사이즈의 예상 전송용량 값을 이용하여, water-filling 기반 송신 전력 분배를 수행한다. CPU에 의해 결정된 AP 파워는 각 AP에게 전달 및 송신전력으로 설정되어 다운링크 신호를 전송한다.

본 기법을 이용하면, 사용자와 멀리 떨어진 AP의 경우에는 예상 전송용량 합이 낮아지고 그에 따른 분배 전력이 적게 할당되어 효율적인 전력 할당을 수행할 수 있다.

### B. AP 별 지원 사용자 수 제한 기법

본 기법에서는 각 AP에서 계산해야 하는 사용자 별 파워 분배계수 및 방향성 값 등을 적게 계산하기 위하여, 지원 사용자 수( $N$ )라는 개념을 도입한다. 이때,  $m$ 번째 AP에서 수행되는 송신 신호는 아래와 같다.

$$x_m = \sqrt{p_d} \sum_{k=1}^N t_{mk} \bar{g}_{mk} s_k$$

즉, 전송되는 신호 성분의 개수가  $K$ 에서  $N(\leq K)$ 으로 변하게 되면서 저복잡도 송신 신호 빔포밍 디자인이 가능해진다.  $N$ 의 수가 커질수록 기존 기법과 동일한 동작을 수행하게 되며, 값이 작을수록 전송용량에서 손실이 발생할 수 있지만, 저복잡도로 빔포밍을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

제안한 기법에서 지원 사용자 수 결정은 사용자의 채널 크기의 순서에 따라 가장 큰 사용자부터 선택되는 것을 특징으로 하며, 특정 임계값보다 작을 경우에는 선택되지 않을 수 있게 구현하였다. 여기서 임계값은 AP 배치 및 UE 배치에 따라 가변할 수 있으며, 본 연구에서는 사전 실험을 통해 얻은 임계값을 적용하여 전송용량 분석을 수행하였다.

### C. 성능분석

성능 분석을 위해 시뮬레이션에서 사용한 채널 모델은 ITU-R indoor hotspot 모델(28GHz)을 사용하였다 [3]. 실험을 위해 단일 안테나를 가진 AP를 균일하게 배치하였고, UE는 랜덤 위치를 가정하여 생성 및 실험하였다. 시뮬레이션에서 기존 기술은 'Equal', 제안된 SLNR 기반 송신전력할당은 'SLNR-based', 지원자 수 제한 기법은 'SLNR+Candi( $N$ )'으로 표현하였다.

그림 1은 총 송신전력 크기에 따른 사용자 별 주파수 이용효율을 보여준다. 모든 영역 중 특히 송신 전력이 작을 경우 SLNR 기반 송신전력할당은 기존 기법보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 제안한 기법을 사용하면, 사용자와 멀리 떨어진 AP에 적은 파워가 할당되고, 가까운 AP에 많은 파워가 할당되기 때문이다. 사용자 수 제한( $=3$ )이 들어간 경우, 기존 기법 대비 성능 저하가 발생하나, 경향은 비슷한 것을 확인할 수 있다.

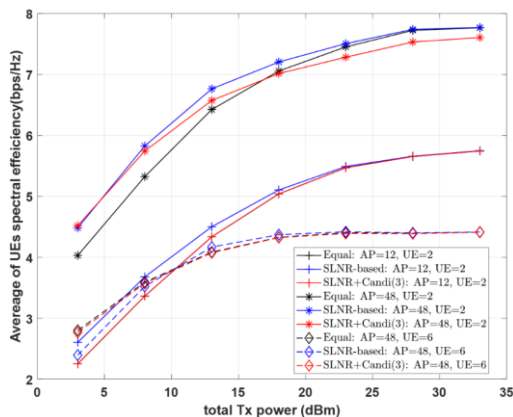


그림 1. 총 송신전력 크기 vs. 주파수 이용 효율

그림 2는 사용자 수가 20명일때의 각 기법의 주파수 이용효율 CDF를 보여준다. 실험을 통해 컬러 빔포밍을 사용할 경우, 주파수 이용효율을 증가시키기 위해서는 송신 전력을 키우는 것보다 안테나 수를 늘리는 것이 더 효율적인 것을 알 수 있다. 셀 경계 사용자를 반영한 하위 5% 성능 입장에서 AP가 144개인 경우, 2.5bps/Hz 정도 달성 가능한 것을 확인할 수 있다.

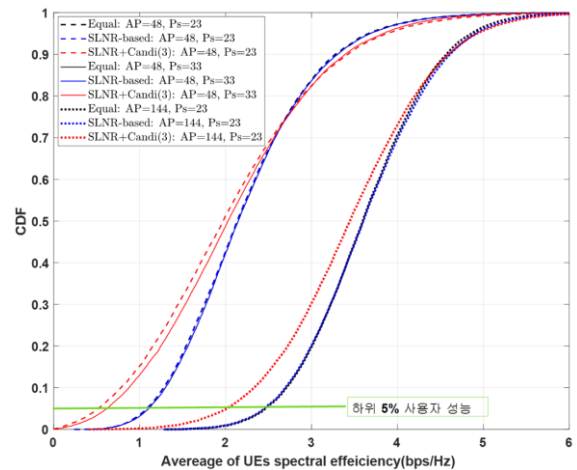


그림 2. UE=20 환경 주파수 이용효율 CDF

### III. 결론

본 연구에서는 cell-free mMIMO 환경에서 새로운 송신전력 할당 기법 및 저복잡도 빔포밍 구현 기술을 제안하였다. SLNR 기반 송신전력 할당 방법은 총 송신전력량이 작거나 지원하는 사용자 수가 적을 경우 기존 기술 대비 전송 용량이 증가하는 성능을 제공한다. 또한, 지원 사용자 수 제한을 통한 저복잡도 빔포밍 기법은 전체 사용자 수 대비 지원 수 비율에 따라 일부 구간에서 성능 손실이 존재하나, 해당 비율만큼 빔포밍 구현 복잡도를 감소시킬 수 있는 장점 제공한다. 본 실험 결과를 토대로 cell-free mMIMO에서 AP 별 송신전력 할당이 용량에 도움이 될 수 있음을 확인하였고, 지원 사용자 수 조절과 같은 간단한 기법으로도 저복잡도 빔포밍 구현이 가능할 수 있음을 확인하였다. 우리는 이러한 연구결과를 확장하여, 추후 간섭 제어를 고려한 송신전력 할당 기법 및 채널 측정오차를 고려한 최적의 지원자 수 계산 기법과 같은 연구를 진행할 예정이다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

### 참고 문헌

- [1] J. Zhang et al, "Cell-Free Massive MIMO: A New Generation Paradigm," IEEE Access, vol. 7, pp. 99878-99888, Aug. 2020.
- [2] G. Interdonato et al., "Ubiquitous Cell-free Massive MIMO Communications," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Aug. 2019.
- [3] Report ITU-R M.2410-0, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, 2017년 10월.