

# CF-mMIMO 네트워크에서 95%-Likely 다운링크 성능과 K-N 스케일링에 따른 등고선 분석에 관한 연구

<sup>1,2</sup>정영균, <sup>1,2</sup>동기창, <sup>1,2</sup>최민혁, <sup>1,2</sup>정혜윤, <sup>1,2</sup>김자은, <sup>1,2</sup>송형규\*

<sup>1</sup>세종대학교 정보통신공학과, <sup>2</sup>세종대학교 지능형드론융합전공

20010892@sju.ac.kr, tongjohn@sju.ac.kr, alsgurkk@sju.ac.kr, zalfenz@sju.ac.kr,  
thinkdana@sju.ac.kr, \*songhk@sejong.ac.kr

## A Study on 95%-Likely Downlink Performance and Iso-Contour Analysis under K - N Scaling in CF-mMIMO Networks

<sup>1,2</sup>Yeong-Gyun Jung, <sup>1,2</sup>Ki-Chang Tong, <sup>1,2</sup>Min-Hyeok Choi, <sup>1,2</sup>Hye-Yoon Jeong,

<sup>1,2</sup>Ja-Eun Kim, <sup>1,2</sup>Hyoung-Kyu Song\*

<sup>1</sup>Department of Information and Communication Engineering, <sup>2</sup>Department of Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

### 요약

본 논문은 TDD 기반 셀프리 대규모 MIMO(CF-mMIMO) 네트워크에서 95%-Likely 다운링크 성능을 중심으로, 사용자 수 K와 AP 당 안테나 수 N에 따른 스케일링 특성을 정량화하고 등고선 설계도를 제시한다. 제한한 프레임워크는 파일럿 재사용 비율  $\alpha \in (0.5, 1.0)$  하에서 MMSE 추정과 MR 프리코딩을 적용한다. 시뮬레이션은  $\tau_c \in \{100, 200, 400\}$ ,  $K \in \{10, 20, 40\}$ ,  $N \in \{1, 4, 8\}$ 의 격자에서 수행하고, 각(K,N) 지점에 대해 다중 몬테카를로 표본을 수집하여 히트맵, CDF, K - N 평면 등고선을 산출한다. 결과적으로 95%-Likely 다운링크 성능은 N 증가에 따라 단조적 향상을 보이며, K 증가 시 간섭, 자원분할로 인한 저하가 관찰된다. 또한  $\alpha=0.5$ 는 혼란 오버헤드 완화 이점( $1-\tau_p/\tau_c$  증가)을 제공하나, K가 커질수록 파일럿 재사용으로 인한 추정 열화, 코히어런트 간섭이 누적되어  $\alpha=1.0$  대비 불리해지는 경향이 확인된다.

본 연구의 결과는 네트워크 용량 계획, AP 안테나 증설 타당성 평가, 파일럿 자원 설계( $\alpha$  선택) 등 시스템 차원의 설계지침으로 활용 가능하다.

### I. 서론

기존의 셀룰러 네트워크는 셀 경계에 위치한 사용자의 성능이 저하되는 문제를 안고 있다. 이를 해결하기 위해 다수의 분산된 액세스 포인트(AP)가 셀 경계 없이 모든 사용자에게 공동으로 서비스를 제공하는 셀 없는 Massive MIMO(Cell-Free Massive MIMO) 기술이 제안되었다[1]. 이 기술은 모든 사용자에게 균일하고 높은 품질의 서비스를 제공할 잠재력을 가지고 있다. 하지만 시분할 방식(TDD) 시스템에서 사용자 수가 가용 직교 파일럿의 수를 초과하면, 동일 파일럿을 여러 사용자가 재사용해야만 하고 이로 인해 발생하는 파일럿 오염(pilot contamination)은 채널 추정의 정확도를 심각하게 저하시켜 시스템 전체 성능에 영향을 끼친다.

본 논문에서는 이러한 파일럿 재사용 환경 하에서, 시스템의 핵심 설계 변수인 AP 당 안테나 수(N)와 사용자 수(K) 사이의 성능 상호작용을 분석한다. 최소 서비스 품질 보장의 척도인 95%-Likely 을 중심으로, 시뮬레이션을 통해 두 변수의 변화가 시스템 성능에 미치는 영향을 규명하고 실용적인 시스템 설계를 위한 통찰을 제공한다.

### II. 본론

#### A. 네트워크 구조 및 채널 모델

본 논문에서는 고려하는 CF-mMIMO 시스템은 N 개의 안테나를 가진

M 개의 AP, 단일 안테나를 가진 K 명의 사용자로 구성되며 모든 AP가

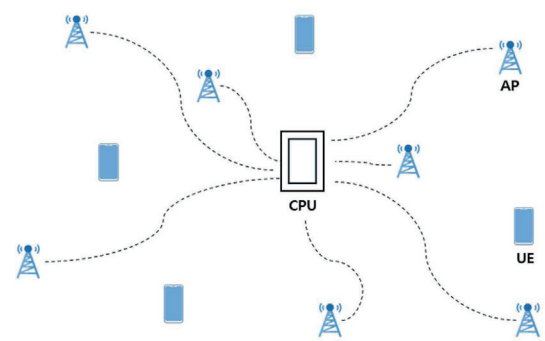


그림 1 CF-mMIMO 시스템 모델

동일한 시간-주파수 자원에서 동시에 모든 K 명의 사용자를 서비스한다. 또한, AP와 사용자는 넓은 지역에 무작위로 분포되어 있다고 가정한다. AP와 사용자 간의 채널은 대규모 페이딩과 소규모 페이딩을 모두 포함하는 블록 Rayleigh Fading 채널 모델을 가정한다. 아래의 식 (1)과 같이 채널이 모델링 된다.

$$g_{m,n,k} = \sqrt{\beta_{m,k}} h_{m,n,k} \quad (1)$$

## B. 채널 추정 및 파일럿 재사용

TDD 방식을 기반으로 사용자들은 UL 채널 추정을 위해 직교 파일럿 시퀀스를 전송한다. 직교 파일럿의 수는  $\tau_p$  개로 한정된다. 본 논문에서는 파일럿 재사용 정도를 나타내는 파라미터  $\alpha$ 를 도입하여 아래의 식 (2)와

$$\tau_p = \alpha K \quad (2)$$

같이 설정한다.  $\alpha < 1$  경우, 일부 사용자들은 동일한 파일럿을 공유하게 되어 파일럿 오염이 발생한다.

## C. Downlink 데이터 전송

채널 추정이 완료되면, 모든 AP는 각 사용자에게 데이터를 전송한다. 이때 AP들은 추정된 채널에 기반하여 최대비(Maximum-Ratio, MR) 프리코딩을 적용한다[2]. k 번째 사용자가 수신하는 신호는 원하는 신호, 사용자 간 간섭, 잡음의 향으로 구성된다. 이를 바탕으로 k 번째 사용자의 신호 대 간섭 잡음비(SINR)를 계산할 수 있으며, 파일럿 전송에 따른 오버헤드를 고려한 사용자 순 처리율(Per-User Net Throughput)은 아래의 식 (3)과 같다.

$$R_k = B \times (1 - \frac{\tau_p}{\tau_c}) \log_2(1 + SINR_k) \quad (3)$$

여기서 B는 시스템 대역폭,  $\tau_c$ 는 Coherent interval을 의미한다.

## D. 시뮬레이션

50개 AP가 1km x 1km 영역에 균일 배치되고 UE도 균일 랜덤 배치된다. 대역폭은 20 MHz, 잡음수준 9 dB, DL 전력은 AP 당 20 dBm, 파일럿 재사용 비율은  $\alpha = 0.5$ 이다.

그림 3은  $\tau_c = 200, \alpha = 0.5$ 에서  $K \in 10, 20, 40, N \in 1, 4, 8$  95%-Likely에 대한 히트맵이다. K가 커질수록 다중 사용자 간섭과 추정 열화로 인해 처리율이 감소하며, N이 커질수록 채널 하드닝 영향이 커져 Non-coherent 간섭 향이 줄어들어 처리율이 개선된다는 것을 보여준다.

그림 4는 K-N 평면에서의 95%-Likely 등고선을 나타낸다. 선은 p5 = 5, 10, 20Mbps를 각각 의미하며, 시뮬레이션 격자점을 바탕으로 보간해 표시하였다. 안테나 확대가 하위 사용자 품질을 개선시키며 K가 증가할수록 등고선이 빠르게 오른쪽(큰 N)으로 이동한다는 것을 보여준다. 또한, K=40일 때는 안테나 증설만으로는 한계가 있어 목표 95%-Likely을 보장하려면 파일럿 수 확대, 전력 최적화와 같은 시스템 차원의 보조 수단을 병행해야 한다.

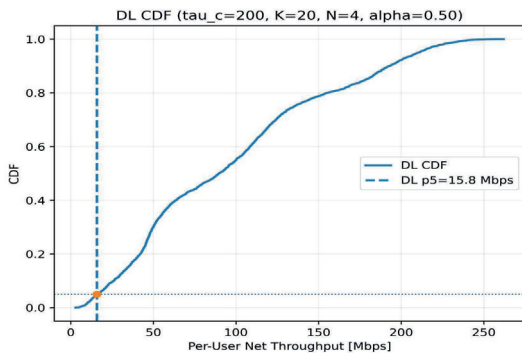


그림 2 ( $\tau_c, K, N, \alpha$ ) = (200, 20, 4, 0.5) DL CDF

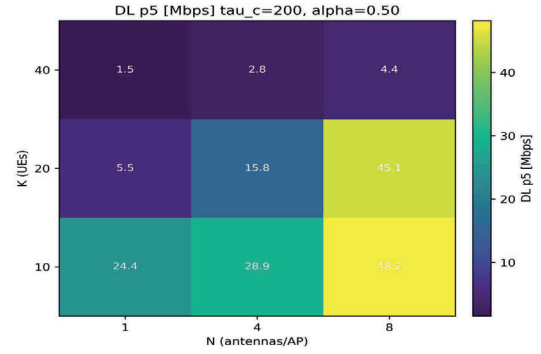


그림 3  $\tau_c = 200, \alpha = 0.5$ 에서 K와 N에 따른 히트맵

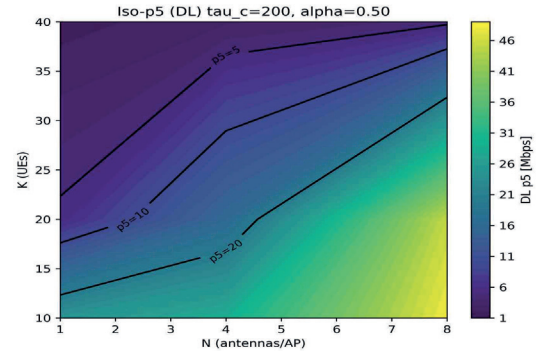


그림 4 목표 QoS 유지를 위한 K-N 평면 등고선

## III. 결론

본 논문에서는 파일럿 재사용 환경에 놓인 CF-mMIMO 다운링크 시스템의 성능을 분석했다. 시뮬레이션 결과, AP 당 안테나 수의 증가는 성능 개선에 효과가 있으며 사용자 수 증가는 파일럿 오염을 심화시켜 시스템 성능을 저하시키는 핵심 요인이다. 본 연구에서 제시된 안테나 수와 사용자 수의 상충 관계 분석은, 향후 제한된 자원 환경에서 특정 서비스 품질을 보장해야 하는 무선 통신 시스템을 설계하는 데 있어 실용적인 가이드라인을 제공할 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540),

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2023-00254529)

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2024-RS-2024-00437191)

## 참고 문헌

- [1] H. Q. Ngo, et al., "Cell-Free Massive MIMO versus Small Cells," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017.
- [2] E. Nayebi, et al., "Precoding and Power Optimization in Cell-Free Massive MIMO Systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017.