

# Cell-Free Massive MIMO RAN Slicing을 위한 적응형 하이브리드 전력 예산 분배 기법

<sup>1,3</sup>김자은, <sup>1,3</sup>동기창, <sup>1,3</sup>정영균, <sup>2</sup>유현수, <sup>1,3</sup>송형규\*

<sup>1</sup>세종대학교 정보통신공학과, <sup>2</sup>세종대학교 전자정보통신공학과, <sup>3</sup>세종대학교 지능형드론융합전공

thinkdana@sju.ac.kr, tongjohn@sju.ac.kr, 20010892@sju.ac.kr, 22013457@sju.ac.kr,

\*songhk@sejong.ac.kr

## Adaptive Hybrid Power Budgeting for Cell-Free Massive MIMO RAN Slicing

<sup>1,3</sup>Ja-Eun Kim, <sup>1,3</sup>Ki-Chang Tong, <sup>1,3</sup>Yeong-Gyun Jung, <sup>2</sup>Hyeon-Su Yu,

<sup>1,3</sup>Kyoung-Kyu Song\*

<sup>1</sup>Department of Information and Communication Engineering, <sup>2</sup>Electronic Information and Communication Engineering and <sup>3</sup>Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro, 05006, Korea

### 요약

Cell-Free Massive MIMO (CF-mMIMO) 시스템은 다수의 분산된 액세스 포인트(AP)가 협력하여 사용자에게 서비스를 제공하는 구조로, 6G의 이질적인 서비스(URLLC, eMBB, mMTC)를 수용하기 위한 RAN 슬라이싱의 핵심 인프라이다. 그러나 수백 개의 AP가 넓은 지역에 분산된 환경에서, 각 슬라이스별 AP의 전력 예산을 효율적으로 배분하는 것은 어려운 문제이다. 기존의 균등 할당 방식은 AP별 트래픽 부하와 채널 환경의 불균형을 반영하지 못해 자원 낭비를 초래한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 CPU(Central Processing Unit)가 각 AP의 서비스 부하(Load)와 채널 품질(Channel Quality) 정보를 취합하여 전력 예산을 동적으로 조절하는 하이브리드 할당(Hybrid Allocation) 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 방식 대비 스펙트럼 효율(SE)의 미미한 손실만으로 시스템 전체의 에너지 효율(EE)을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### I. 서론

6G의 이질적인 서비스(eMBB, URLLC, mMTC) 지원을 위해 RAN 슬라이싱과 CF-mMIMO의 결합이 필수적으로 연구되고 있다[1]. 그러나 지리적으로 분산된 AP 환경에서 발생하는 트래픽 쏠림(Hotspot)과 채널 불균형은 자원 관리의 큰 난제이다. 기존 연구는 주로 AP 내 국소적 전력 제어에 집중하여, CPU 차원의 거시적 전력 예산(Budget) 분배에 대한 고려는 미흡했다.[2] 단순 균등 분배 방식은 유향 AP의 자원 낭비와 과부하 AP의 전력 부족을 초래한다. 이에 본 논문은 '부하(Load)'와 '채널 품질(Quality)'을 결합한 하이브리드 CPU-AP 전력 예산 분배 기법을 제안한다. 이는 트래픽 수요와 채널 이득에 기반한 차등 배분을 통해 시스템의 에너지 효율과 사용자 체감 품질을 동시에 향상시킨다.[3]

### II. 본론

#### 2.1 시스템 모델

L개의 분산된 AP와 K개의 단일 안테나 사용자가 존재하는 다운링크 CF-mMIMO 시스템을 고려한다. 각 AP는 N개의 안테나를 보유하며, CPU와 프론트홀로 연결되어 있다. 전체 사용자는 S개의 슬라이스 집합  $S = \{\text{URLLC}, \text{eMBB}, \text{mMTC}\}$  중 하나에 속하며, 각 슬라이스 s 내부에서도 요구사항에 따라 세부 프로파일(Profile)로 구분된다.[4]

대규모 페이딩(Large-scale fading)  $\beta$ 는 경로 손실과 쉐도잉을 포함하며, AP l과 사용자 k 간의 채널 벡터  $h_{lk} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 correlated Rayleigh fading 모델을 따른다.

#### 2.2 하이브리드 전력 예산 분배 기법

제안 기법은 CPU가 AP l의 전력 예산  $\rho_{l,s}$ 를 결정하기 위해 서비스 부하  $N_{l,s}$ 와 채널 품질  $G_{l,s}$ 을 도입한다.  $N_{l,s}$ 는 유효 사용자 수를 통해 트래픽 밀집도를 반영하며,  $G_{l,s}$ 는 채널 이득의 제공된 합인 식 (1)으로 정의되어 스펙트럼 효율(SE) 이득이 높은 AP를 식별하는 데 사용된다.

$$G_{l,s} = \sum_{k \in K_s} \sqrt{\beta_{lk}} \quad (1)$$

단일 지표만을 고려할 경우 발생할 수 있는 전력 낭비나 셀 경계 사용자의 소의 문제를 방지하기 위해, 본 제안 기법은 이 두 지표를 정규화하여 가중 결합한 하이브리드 가중치  $w_{l,s}$ 를 산출한다. 가중치 산출식은 식 (2)와 같다.

$$w_{l,s} = \alpha \cdot \frac{N_{l,s}}{\sum_{j=1}^L N_{j,s}} + (1 - \alpha) \frac{G_{l,s}}{\sum_{j=1}^L G_{j,s}} \quad (2)$$

여기서 설계 파라미터  $\alpha$  부하 분산과 채널 효율성 간의 균형을 조절하며, 분모는 전체 AP에 대한 정규화 과정을 나타낸다. 최종적으로 CPU는 슬라이스 s에 할당된 총 전력 예산  $\rho_{tot}^{(s)}$ 를 계산된 가중치  $w_{l,s}$ 에 비례하여 식(3)과 같이 각 AP에 분배한다.

$$\rho_{l,s}^{budget} = \rho_{tot}^{(s)} \cdot w_{l,s} \quad (3)$$

이러한 과정을 통해 트래픽 수요가 높거나 채널 환경이 우수한 AP는 더 많은 가용 전력을 확보하게 되며, 각 AP는 할당받은 예산 범위 내에서 개별 사용자를 위한 로컬 전력 할당(예: Max-Min Fairness)을 수행함으로써 전체 시스템의 효율성과 공정성을 동시에 달성한다.

### 2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

제안 기법의 성능 검증을 위해 MATLAB을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 주요 파라미터는  $L=100$ ,  $K=90$ ,  $N=4$ 이며, 슬라이스는 URLLC ( $U\_Crit$ ,  $U\_Norm$ ), eMBB( $E\_stream$ ,  $E\_peak$ ), mMTC( $M\_Crit$ ,  $M\_Batt$ )로 구성하였다.

[Fig. 1]은 제안 기법(Proposed)과 기존 균등 할당 방식(Conventional)의 프로파일별 평균 스펙트럼 효율을 비교한 것이다. eMBB 프로파일( $E\_Peak$ ,  $E\_Stream$ )의 경우 약 1% 내외의 미미한 SE 감소가 관찰되나, 이는 잉여 자원을 다른 슬라이스로 재배분한 결과이다. 반면, 자원이 절절한  $U\_Norm$ (+8.1%)과  $M\_Batt$ (+11.2%)의 성능은 크게 향상되어 슬라이스 간 공정성이 개선되었음을 확인할 수 있다.

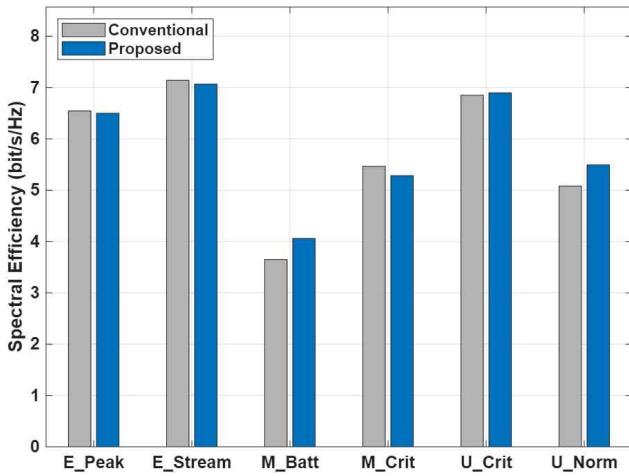


Fig 1. Profile-wise Spectral Efficiency Comparison

본 논문의 핵심 성과는 에너지 효율의 비약적인 향상이다. [Fig. 2]는 프로파일별 에너지 효율(Mbit/J)을 비교한 결과이다. 제안 기법은 모든 프로파일에서 에너지 효율을 크게 개선하였으며, 특히  $U\_Norm$ (47.3% 증가)과  $U\_Crit$ (45.2% 증가)에서 가장 큰 이득을 보였다. 이는 사용자가 없거나 채널이 열악한 AP에 불필요한 전력 예산을 할당하지 않고, 이를 효율이 높은 AP로 집중시켰기 때문이다.

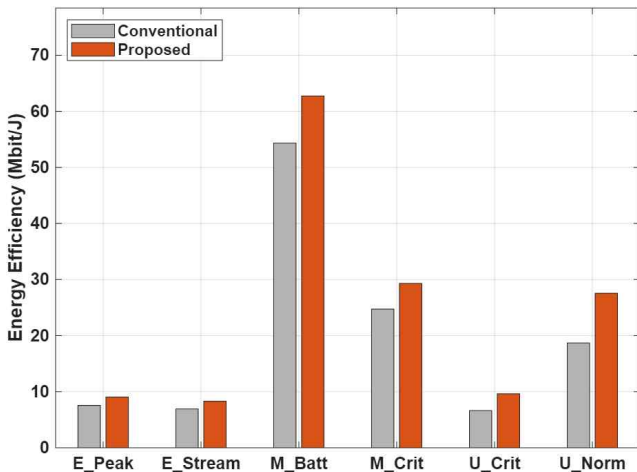


Fig 2. Profile-wise Energy Efficiency Comparison

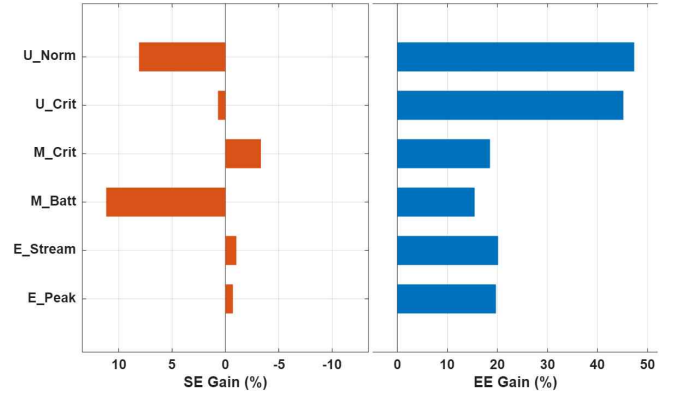


Fig 3. Performance Trade-off Analysis (Dynamic)

[Fig. 3]은 SE 변화율(좌측)과 EE 변화율(우측)을 대비하여 보여준다. 좌측의 SE 변화는 0 근처에서 미미한 변동(Trade-off)을 보이지만, 우측의 EE 변화는 모든 프로파일에서 막대 길게 뻗어 있어 15~47%에 달하는 이득을 시각적으로 입증한다. 결론적으로 제안 기법은 "SE의 미세한 양보를 통해 네트워크 전체의 에너지 효율성을 극대화"하는 6G 그린 네트워크의 요구사항을 만족시킨다.

### III. 결론

본 논문에서는 CF-mMIMO RAN 슬라이싱을 위한 부하 및 채널 적응형 하이브리드 전력 예산 할당 기법을 제안하였다. 제안 기법은 CPU가 네트워크 전역 정보를 활용하여 AP별 전력 예산을 지능적으로 조절함으로써, 단순 균등 할당 방식의 비효율성을 극복하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 사용자 분포가 불균일한 환경에서도 슬라이스별 QoS를 보장하며 에너지 효율을 획기적으로 개선함을 확인하였다.

### 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-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2021-II211816).

### 참 고 문 헌

- [1] H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1834 - 1850, Mar. 2017.
- [2] E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, H. Yang, and B. D. Rao, "Precoding and Power Optimization in Cell-Free Massive MIMO Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 4445 - 4459, July 2017.
- [3] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Scalable Cell-Free Massive MIMO Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 7, pp. 4247 - 4261, July 2020.
- [4] P. Popovski, et al., "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 55765 - 55779, 2018.