

# 차폐 제약하에서 간섭 인지 이동형 AP 배치 및 자원 할당

김채연, 이기송

동국대학교

chaelsykim@gmail.com, kslee851105@gmail.com

## Interference-Aware Mobile AP Placement and Resource Allocation under Blockage Constraints

Kim Chaeyeon, Lee Kisong

Dongguk Univ.

### 요약

본 논문은 비면허 대역에서 운용되는 이중 계층 이중 네트워크의 간섭 관리를 위해, 차폐 효과를 고려한 mAP 배치 및 자원 할당 최적화 문제를 연구한다. 이를 위해 실제 건물 환경 하에서의 Line-of-Sight(LoS) 및 Non-Line-of-Sight(NLoS) 조건을 반영하는 차폐 인식 채널 모델을 수립하고, Rate-profile 기법을 통해 상·하향링크 주파수 효율(SE)의 균형을 맞춘 공통 SE 최대화 문제를 정식화하였다. 본 연구에서는 해당 문제의 해결을 위해 2단계 최적화 프레임워크를 제안한다. 1단계에서는 평균 CSI를 활용하여 mAP의 위치를 최적화하며, 2단계에서는 순시 CSI를 기반으로 스캐줄링과 전력 할당을 정교화한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법이 공통 SE 측면에서 기존 기법들을 크게 상회함을 확인하였으며, 동시에 차폐 인식 간섭 관리를 통해 견고하고 신뢰성 있는 주파수 공유를 보장함을 입증하였다.

### I. 서 론

6G 시대의 도래와 함께 폭발적인 트래픽 수요를 감당하기 위해 한정된 주파수 자원의 효율적 활용이 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라, 최근 비면허 대역을 활용한 WiFi 5G NR-U 간의 주파수 공유 기술<sup>[1]</sup>이 자원 부족 문제를 해결할 핵심 방안으로 대두되고 있다. 그러나 비면허 대역은 특정 사업자의 독점적 사용이 보장되지 않으므로, 이중 네트워크 간의 심각한 간섭 문제가 발생할 수 있다. 기존 연구들은 이러한 간섭을 완화하기 위해 주로 자원 할당 및 범포밍과 같은 신호 처리 기법에 의존해 왔다. 하지만 고정된 인프라 위주의 기존 방식은 복잡한 도심 환경에서 간섭 제어에 물리적 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 최근에는 [2]와 같은 이동성을 갖춘 Mobile Access Points (mAPs)를 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. mAPs의 성능을 극대화하기 위해서는 3차원 공간에서의 이동성을 활용하여 신호 링크는 Line-of-Sight(LoS)를 확보하고, 간섭 링크는 장애물을 이용해 Non-LoS(NLoS)로 차단하는 기하학적 배치가 필수적이다. 그러나, 기존 mAP 관련 연구들은 이러한 장애물에 의한 차폐 효과를 충분히 고려하지 않았거나 단순화된 모델을 사용하는 한계가 있었다. 차폐를 고려하지 않을 경우, 실제 환경에서는 신호 링크가 확보되지 않는 위치로 mAP가 이동하여 심각한 성능 저하를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구는 전파 환경(LoS/NLoS)을 mAP 배치에 통합한 장애물 인식 (Blockage-aware) 최적화 프레임워크를 제안하여, 이러한 기존 연구의 한계를 극복하고 시스템 성능을 극대화하고자 한다.

### II. 본론

그림 1과 같이 본 논문에서는 비 면허 주파수 대역에서 동작하는 OFDMA 기반의 이중 계층 이중 네트워크를 고려한다. 첫 번째 계층은 셀룰러 지상 기지국으로 구성되며, 각 기지국  $b \in \mathcal{B} = \{1, 2, \dots, B\}$ 는 셀룰러 사용자(cUE)  $u \in \mathcal{U} = \{1, 2, \dots, U\}$ 에게 하향링크 서비스를

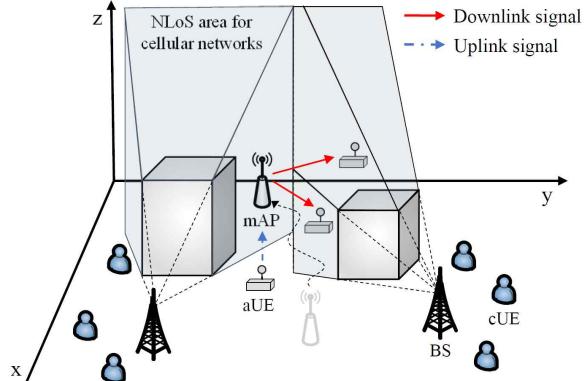


Fig. 1. 시스템 모델

그림 1. system model

제공한다. 여기서  $u(b, n)$ 은 기지국  $b$ 가 서브 채널  $n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 을 통해 서비스를 제공하는 cUE를 나타낸다. 두 번째 계층은 mAP로 이루어지며, 각 mAP  $m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$ 는 자신에게 접속된 사용자(aUE)  $k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 에게 서비스를 제공한다. 본 연구에서는 셀룰러 네트워크의 하향링크 구성이 고정되어 있다는 전제하에, mAP 네트워크의 운영 최적화를 목표로 한다. 제안하는 최적화 프레임워크는 건물에 의한 차폐 효과를 간섭 관리의 핵심 요소로 반영한다. 구체적으로, 신뢰성 있는 주파수 공유를 보장하기 위해 cUE에게 미치는 계층 간 간섭을 허용 임계값 이하로 유지하면서, mAP의 배치, 상·하향 링크 스케줄링, 그리고 송신 전력을 동적으로 최적화한다. 건물의 위치와 크기가 고정되어 있다고 가정할 때, 위치  $\mathbf{q}$ 에 있는 mAP가 건물  $l \in \mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$ 에 의해 다른 노드  $z \in \mathcal{K} \cup \mathcal{B} \cup \mathcal{U}$ 로부터 차폐되는 영역은 [3]과 같이 일련의 초평면으로 구성된 다면체로 모델링할 수 있다. 이 초평면의 부호는 mAP의 위치  $\mathbf{q}$ 가 해당 반공간의 내부에 속하는지 여부

를 판별하는 기준이 된다. 구체적으로, 해당 값이 음수이면  $\mathbf{q}$  가 반공간의 내부에 위치함을, 양수이면 외부에 위치함을 의미한다. 위치  $\mathbf{q}$  가 차폐 영역 내에 존재하는지 여부를 판단하기 위해, 초평면의 부호에 따라 결정되는 이진 변수를 시그모이드 형태 함수로 근사하여 도입한다. 건물  $I$ 을 구성하는 초평면 집합 중 하나에 대해서라도 이 함수값이 1이 된다면 노드  $z$ 가 건물  $I$ 에 대해서 차폐되지 않고 LoS 관계에 있음을 의미한다. 최종적으로 모든 건물에 대해서 이 조건을 만족하도록 LoS 지시함수를 정의한다. 이 건물 차폐 채널 모델을 기반으로, mAP  $m$ 과 aUE  $k$  사이의 달성 가능한 하향링크 및 상향링크 spectral efficiency(SE)를 Rate-profile<sup>[4]</sup> 기법을 이용하여 균형을 맞춘다. 그러나 이 문제는 정수형 변수와 연속 변수가 결합되어 MINLP 문제로 공동으로 볼록하지 않다. 또한 현실적으로 mAP의 위치를 단기 페이딩에 맞춰 매번 최적화하거나 모든 지점에서의 완벽한 CSI를 획득하는 것은 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 전체 문제를 두 단계로 분리하여 접근한다.

1단계에서는 장기적인 채널 통계를 기반으로 mAP의 위치를 최적화 한다. 목적함수와 제약조건의 비볼록성은 1차 테일러 전개, 슬랙 변수 도입을 적용하여 각 변수에 대한 볼록 함수 형태로 근사된다. 변환된 문제는 Successive Convex Approximation(SCA) 기법 하에서 반복적으로 갱신되어 국소 최적해로 수렴한다.

2단계에서는 1단계에서 결정된 위치를 고정한 상태에서, 페이딩이 포함된 순서 채널을 반영하여 스케줄링과 송신 전력을 최적화한다. 변수가 서로 결합되어 있으므로, 이를 효율적으로 풀기 위해 Block Coordinate Descent(BCD) 방식을 적용하여 두 변수를 교대로 갱신한다. 각 내부 단계에서는 1단계와 마찬가지로 SCA를 통해 볼록 근사 해를 도출한다.

1단계에서 위치를 최적화할 때, 초기 설정된 스케줄링과 송신 전력 값이 간섭 임계값  $I_{th}$ 를 만족하지 못할 수 있다. 이를 방지하고자 간섭 제약 조건을 목적 함수에 반영하는 Exact penalty method<sup>[5]</sup>를 도입한다. 이 기법은 반복 계산 중에 일시적인 제약 위반을 허용하되, 페널티 파라미터 값을 점진적으로 증가시키면서 수렴 시점에서는 간섭 제약이 최종적으로 충족되도록 한다.

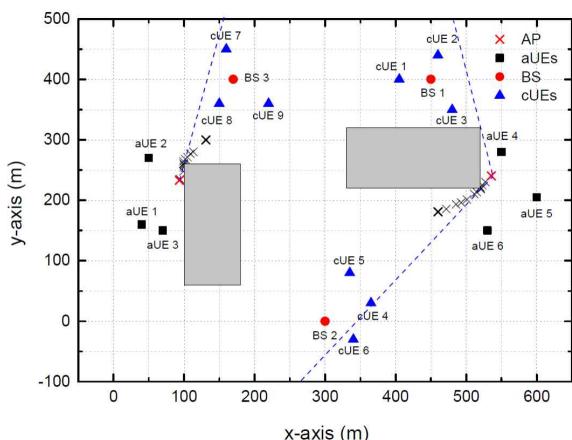


Fig. 2.  $\omega = 0.75$  및  $I_{th} = -80$  dBm 일 때 제안 방안의 mAP 위치  
그림 2. mAP positions of proposed scheme when  $\omega = 0.75$  and  $I_{th} = -80$  dBm

본 시뮬레이션 환경은 2개의 건물, 2개의 mAP, 그리고 3개의 BS로 구성되며, 총 6명의 aUE와 9명의 cUE가 배치되었다. 그림의 'x' 표시는 알고리즘 반복 과정에서의 mAP 위치  $\mathbf{Q}$ 를 나타내며, 굵은 검은색 표시는 초기 위치를, 빨간색 표시는 최적화가 완료된 최종 수렴 위치를 의

미한다. 초기 위치에서 mAP 1은 오직 aUE 2와, mAP 2는 aUE 5, 6과만 LoS 관계에 있어 연결 상태가 열악함을 알 수 있다.

본 실험에서는 하향링크 성능을 우선시( $w=0.75$ ) 하면서도 심각한 간섭 환경( $I_{th} = -80$  dBm)을 가정하였다. 최적화 결과, mAP는 채널 이득을 극대화하기 위해 할당된 모든 aUE와 LoS를 확보할 수 있는 위치로 이동하는 경향을 보인다. 동시에, mAP는 엄격한 간섭 임계값을 만족시키기 위해 건물 뒤편의 차폐 영역으로 진입함으로써, 대부분의 cUE와 NLoS 관계를 유지하여 간섭을 효과적으로 회피함을 확인할 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 비면허 대역 기반의 이중 계층 이중 네트워크 환경에서, 장애물 차폐 효과를 고려한 mAP 배치 및 자원 할당의 결합 최적화 문제를 다루었다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 Rate-profile 방식을 통해 상·하향링크 전송률의 균형을 맞춰 공통 주파수 효율을 향상시킬 뿐만 아니라, 장애물을 활용한 간섭 제어를 통해 신뢰성 있는 주파수 공유를 보장함을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00343262).

### 참 고 문 헌

- [1] G. Naik, J.-M. Park, J. Ashdown, and W. Lehr, "Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153027 - 153056, 2020.
- [2] O. Alp Topal, O. Tuġfe Demir, E. Bjȯrnson, and C. Cavdar, "A novel access point deployment framework for mmWave cell-free massive MIMO networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 6, pp. 4581 - 4597, Jun. 2025
- [3] P. Yi, L. Zhu, L. Zhu, Z. Xiao, Z. Han, and X.-G. Xia, "Joint 3-D positioning and power allocation for UAV relay aided by geographic information," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 10, pp. 8148 - 8162, Oct. 2022.
- [4] R. Zhang, Y.-C. Liang, C. C. Chai, and S. Cui, "Optimal beamforming for two-way multi-antenna relay channel with analogue network coding," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 699 - 712, Jun. 2009.
- [5] A. H. Phan, H. D. Tuan, H. H. Kha, and D. T. Ngo, "Nonsmooth optimization for efficient beamforming in cognitive radio multicast transmission," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 6, pp. 2941 - 2951, Jun. 2012.