

# mmWave 기반 스몰 셀 네트워크를 위한 저복잡도 간섭 관리 알고리즘 개발

윤필도\*, 조윤희\*, 나지현\*, 광정호<sup>o</sup>

## A Development of Low-Complex Interference Management Algorithm for mmWave-Based Small Cell Networks

Pildo Yoon\*, Yunhee Cho\*, Jeehyeon Na\*, Jeongho Kwak<sup>o</sup>

### 요약

본 논문은 mmWave 기반의 스몰 셀 네트워크에서 발생할 높은 간섭을 효율적으로 관리하여 네트워크 성능을 향상시킬 수 있는 알고리즘을 개발한다. 먼저, 합리적인 수준의 피드백 교환과 시공간 전력 공유가 가능한 새로운 네트워크 구조를 제안하고, 제안한 구조 상에서 빔 패턴 선택과 사용자 스케줄링, 전송 전력 할당 최적화를 통해 시평균 사용자 전송 속도의 효용함수를 최대화하는 문제를 형성한다. 형성된 문제는 빔 패턴 선택 확률과 Lyapunov 최적화를 활용하여 변환하고, 변환된 문제의 복잡도를 낮추기 위해 순차적 문제 풀이 기법과 간섭 추상화 기법을 도입하여 IAM 알고리즘을 제안한다. 마지막으로, 실제 서울의 네트워크 토폴로지를 활용하여, 제안한 알고리즘이 기존 알고리즘 대비 최대 47.4% 성능 향상이 있음을 확인한다.

**키워드** : 간섭 관리, 무선 통신, mmWave, 스몰 셀, Lyapunov 최적화

**Key Words** : Interference Management, mmWave, Small Cell, Lyapunov Optimization

### ABSTRACT

In this paper, we develop an algorithm to manage interference in mmWave-based small cell networks. Initially, we propose a novel network architecture allowing reasonable feedback exchange and spatio-temporal power sharing. On the top of proposed architecture, we formulate a problem to maximize the utility of time-averaged user data rate by optimizing beam pattern, user scheduling, and power allocation. The problem is transformed by leveraging beam pattern selection probabilities and Lyapunov optimization, and to efficiently solve transformed problem with low complexity, we propose the IAM algorithm with sequential problem solving and critical user concept. Finally, with network topology deployed in Seoul, we show a 47.4% performance improvement over existing methods.

\* 이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국전자통신연구원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2018-0-01659, 5G NR 기반 지능형 오픈 스몰셀 기술 개발), 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2023-2018-0-01424)

• First Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, yoonpildo@dgist.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology, jeongho.kwak@dgist.ac.kr, 정회원

\* Electronics and Telecommunications Research Institute, yhcho@etri.re.kr, 정회원; jhna@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS202306-115-0-SE, Received May 31, 2023; Revised July 31, 2023; Accepted August 6, 2023

## I. 서론

UHD(Ultra High Definition) 비디오 스트리밍 또는 MR(Mixed Reality) 서비스와 같이 폭발적인 네트워크 트래픽을 요구하는 서비스들이 5G+/6G 에서 집중적으로 사용될 킬러 애플리케이션으로 예상되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 트래픽을 수용하기 위해서 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)와 NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access), mmWave, 스몰 셀 네트워크 등의 여러 무선 통신 기술들이 활발하게 연구되어 오고 있다.

여러 송신 안테나를 사용하여 집약적인 빔을 형성할 수 있는 MIMO 기술은 단일 송신 안테나보다 신호의 손실을 적게 하여 효율적인 통신을 가능하게 한다<sup>[2]</sup>. 이러한 MIMO 기술과 함께, NOMA 기술<sup>[3]</sup>을 활용하여 단일 빔에 여러 사용자를 서비스할 수 있다. 즉, 송신 측에서 단일 빔에 중첩 코딩으로 신호를 부호화하고 수신 측에서 여러 사용자가 부호화된 신호를 통해 순차적으로 간섭을 제거하여 더 높은 주파수 효율과 함께 자신의 신호를 추출할 수 있다. 이러한 이점에도 불구하고, 기지국은 관리해야 할 결정 변수가 추가되어 간섭 관리에 대한 복잡도는 크게 증가하게 되었다.

한편, mmWave는 넓은 주파수 대역폭을 사용하여 많은 네트워크 트래픽을 수용할 수 있지만, 높은 주파수와 낮은 파장이라는 물리적 특성으로 인해 중장거리 통신에는 취약하다. 이런 단점을 보완하기 위해, 셀 크기를 줄여서 무선 채널 이득을 향상시키는 스몰 셀 네트워크가 사용될 수 있다. 동시에, 동일한 영역에 더 많은 셀을 도입함으로써, 네트워크 용량을 높일 수 있다는 이점이 있다. 그러나, 셀 간 거리가 줄어들어 간섭을 높이고, 많아진 기지국 수로 인해 네트워크 관리를 위한 피드백 교환에 오버헤드가 발생하게 된다<sup>[4]</sup>.

위와 같은 상황에서, 본 논문은 합리적인 피드백 메시지 교환과 시공간 전력 공유를 통해 효율적이고 실용적인 간섭 관리를 할 수 있는 새로운 네트워크 구조를 제안하고, 제안한 구조의 이점을 최대한 활용할 수 있는 간섭 관리 알고리즘인 IAM(Interference Abstraction for low-complex resource Management)을 제안한다.

## II. 본론

### 2.1 제안하는 네트워크 구조

본 논문에서 제안하고자 하는 네트워크 구조는 그림 1과 같다. 물리적으로 가까운 적은 수의 기지국들이 하나의 클러스터에 포함되어, MEC 서버가 하나의 클러스터를 관리하는 구조이다. 클러스터 내에서 각 기지국

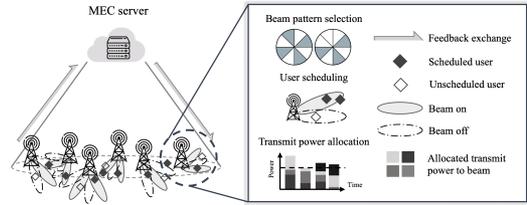


그림 1. 제안하는 네트워크 구조  
Fig. 1. The proposed network architecture.

들은 MEC 서버와 빠른 인터페이스(X2 interface)로 연결이 되어 있어, 각 기지국이 활성화한 빔의 정보, 서비스 받는 사용자 인덱스 등을 MEC 서버에게 실시간으로 전송할 수 있다. 이를 기반으로 MEC 서버는 클러스터 내에서 중앙화 관리를 할 수 있다. 또한, MEC 서버 사이에서는 비교적 느린 인터페이스(S1 interface)가 사용되며, 이를 통해 인덱스 정보와 같은 작은 양의 정보는 실시간으로 교환이 가능하지만, 전체 사용자에 대한 수신 신호 감도와 같은 대량의 정보는 간헐적으로 교환되어진다. 또한, 물리적으로 가까운 기지국을 클러스터로 묶는 개념으로 인해, smart grid 기반의 전력 사용 모니터링 및 시공간 전력 공유가 가능하다<sup>[5]</sup>.

### 2.2 시스템 모델

본 논문은 제안한 네트워크 구조 위에서 동작하는 mmWave 기반 스몰 셀 네트워크를 고려한다. 제안한 구조 상에서, 클러스터의 집합은  $\mathcal{C} = \{1, \dots, C\}$ , 클러스터 내 기지국의 집합은  $\mathcal{N}_c = \{1, \dots, N_c\}$ , 사용자의 집합은  $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ , 그리고 송신 안테나의 개수는  $L$ 개로 정의한다. 여기서, 각 기지국은 사전에 정의된 빔 프리코딩 벡터를 활용하여 서비스를 받게 될 사용자를 결정할 수 있다. 더욱이, NOMA의 특성을 활용하여 하나의 빔<sup>6)</sup>에 여러 사용자를 동시에 서비스할 수 있다. 따라서, 기지국은 매 타임 슬롯마다 어떤 빔을 활성화할 것인지, 어떤 사용자를 활성화된 빔에 서비스할 것인지, 그리고 얼마만큼의 전송 전력을 각 사용자에게 할당할 것인지를 결정해야 한다.

먼저, 기지국의 최적 빔 활성화 집합을 찾는 문제는 정수 조합 최적화 문제이기 때문에 NP-Hard이고, 따라서 빔 수가 늘어남에 따라 계산 복잡도가 기하급수적으로 상승하게 된다. 따라서, 우리는 빔 탐색 과정에서 계산 복잡도를 줄이기 위해 빔 패턴 집합  $\mathcal{A}$ 를 정의한다. 이는 그림 2와 같이 인접하는 빔이 활성화되지 않는다는 제약 조건 하에서 활성화될 수 있는 빔들의 집합이

1) 본 논문의 이후 내용에서, 빔 프리코딩 벡터를 빔이라고 칭한다.

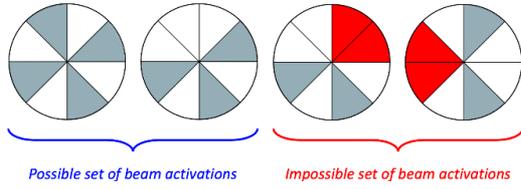


그림 2. 빔 패턴 제약 조건의 예시  
Fig. 2. Examples for beam pattern constraint.

다. 이러한 제약 조건은 빔 탐색 과정에 대한 계산 복잡도를 현저히 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 빔 간 간섭을 줄일 수 있다. 빔 패턴 선택에 대한 지표는 다음과 같다.

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} X_{n,a}(t) \leq 1, \quad \forall n. \quad (1)$$

사용자 스케줄링은 어떤 사용자가 선택된 빔 패턴에 속한 빔 중 어떠한 빔에 의해 서비스 받는지를 결정하는 것이다. 이를 나타내는 지표는  $I_{n,b}^k(t) \in \{0,1\}$ 로 정의한다. 본 논문에서는 NOMA를 활용하기 때문에 한 빔에 여러 사용자가 스케줄링될 수 있고, 따라서 빔  $b$ 에 스케줄링된 사용자의 집합을  $\mathcal{J}_{n,b}(t)$ 로 정의한다. 여기서, 집합  $\mathcal{J}_{n,b}(t)$ 는 각 사용자에게 할당된 전송 전력의 내림 차순으로 정렬된다고 가정한다. 따라서, 사용자 스케줄링은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_k I_{n,b}^k(t) = |\mathcal{J}_{n,b}(t)|, \quad \forall n, \forall b. \quad (2)$$

또한, 기지국은 스케줄링된 각 사용자  $k$ 에게 전송 전력  $p_{n_c,b}^k$ 을 할당하게 되며, 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_k p_{n_c,b}^k(t) = p_{n_c,b}(t), \quad \forall n_c, \forall b, \forall c. \quad (3)$$

더욱이, 제한한 네트워크 구조의 특징인 시공간 전력 공유를 활용하기 위해 다음과 같은 전송 전력에 대한 순시 및 시평균 제약을 형성하였다. 이를 정의하기 위해, 우리는 먼저 한 타임 슬롯에 기지국이 할당할 수 있는 최대 전송 전력을  $p_{n_c}^{max}$ , 그리고 한 빔에 할당할 수 있는 최대 전송 전력을  $p_{n_c,b}^{max}$ 로 정의한다. 그리고 클러스터에 포함된 기지국이 사용하는 전송 전력의 시평균을 네트워크 사업자가 고려하는 전력 예산인  $P_{avg}^c$ 로 정의한다.

$$\sum_b p_{n_c,b}(t) \leq p_{n_c}^{max}, \quad \forall n_c, \forall c, \quad (4)$$

$$p_{n_c,b}(t) \leq p_{n_c,b}^{max}, \quad \forall n_c, \forall b, \forall c, \quad (5)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_{n_c} \sum_b p_{n_c,b}(t) \leq P_{avg}^c, \quad (6)$$

정의된 시스템 모델에 따라, 각 사용자의 전송 속도 (bps)는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$r_k(t) = BW \log_2(1 + \mu_k(\mathbf{X}(t), \mathbf{I}(t), \mathbf{p}(t))), \quad (7)$$

$BW$ 는 동작하는 네트워크의 대역폭을 의미하고,  $\mu_k(\mathbf{X}(t), \mathbf{I}(t), \mathbf{p}(t))$ 는 주어진 결정 변수에 따른 사용자의 SINR을 의미한다.

### 2.3 문제 형성 및 알고리즘 제한.

$$(\mathbf{P}): \quad \max_{(\mathbf{X}, \mathbf{I}, \mathbf{p})} \sum_k U_k(R_k) \\ \text{s. t.}, (1), (2), (3), (4), (5), (6).$$

본 논문에서 고려하는 문제는  $(\mathbf{P})$ 와 같으며, 목적 함수  $U_k(R_k)$ 를 최대화하기 위해 빔 패턴 선택, 사용자 스케줄링, 그리고 전송 전력 할당을 최적화하게 된다. 여기서,  $R_k$ 는 각 사용자의 시평균 전송 속도를 의미하고,  $U_k(R_k) = \log(1 + R_k)$ 는 효용 함수로서 전체 사용자 전송 속도의 형평성을 고려한 목적 함수이다. 형성된 문제는 장기적인 관점에서 형평성을 고려하여 전송 속도의 평균을 최대화하는 것을 의미한다. 그러나, 이 문제를 직접적으로 푸는 것은 미래의 정보를 알아야 할 뿐만 아니라, 결정 변수가 서로 엮여 있어 매우 어려운 형태이다(NP-Hard). 따라서, 우리는 먼저 서로 엮여 있는 결정 변수를 다음과 같이 분리하였다.

$$(\mathbf{P}\text{-Pattern}): \quad \max_{(\mathbf{X})} \sum_k U_k(R_k),$$

s. t., (1).

$$(\mathbf{P1}): \quad \max_{(\mathbf{I}, \mathbf{p})} \sum_k U_k(R_k)$$

s. t., (2), (3), (4), (5), (6).

분리된 두 개의 문제는 원래 문제  $(\mathbf{P})$ 와 동일한 목적 함수를 갖지만,  $(\mathbf{P}\text{-Pattern})$ 은 빔 패턴 선택을 최적화

하고, **(P1)**은 사용자 스케줄링과 전송 전력을 최적화하는 문제이다.

2.3.1 빔 패턴 선택

비록 모든 빔을 탐색하는 것을 피하기 위해 빔 패턴을 도입하였지만, 패턴의 수가 증가하면 탐색의 계산 복잡도는 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서, 우리는 빔 패턴 선택 확률  $\pi_a^n$ 을 도입하여, 탐색 과정 없이 빔 패턴을 선택할 수 있도록 하였다.

$$\sum_a \pi_a^n = 1, \quad \forall n. \tag{8}$$

그렇다면, **(P - Pattern)**을 푸는 것은 각 기지국이 장기적인 관점에서 목적 함수가 최대화되도록 선택 확률을 최적화한다는 것과 동일하게 된다. 이는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\text{(SP - Pattern): } \max_{\pi} \sum_k \left( \sum_a \phi_{k,a} \cdot \pi_a \cdot \bar{r}_{k,a} \right),$$

$\phi_{k,a} \in [0,1]$ 는 패턴  $a$ 가 선택되었을 때, 사용자  $k$ 가 스케줄링 될 확률을 의미한다. 또한,  $\bar{r}_{k,a}$ 는 패턴  $a$ 에 대한 사용자  $k$ 의  $T_a \gg 1$  동안의 평균 전송 속도를 의미한다. 변환된 **(SP - Pattern)** 문제는 standard gradient projection<sup>[6]</sup>을 활용하여 장기적인 관점에서 빔 패턴 확률을 최적화할 수 있다. 따라서, 긴 시간 스케일(매  $T_a$  타임 슬롯)에서는 빔 패턴 선택 확률  $\pi$ 을 최적화하고, 짧은 시간 스케일(매 타임 슬롯)에서는 빔 패턴 선택 확률  $\pi$ 에 따라 빔 패턴을 선택하게 된다.

2.3.2 사용자 스케줄링과 전송 전력 할당

빔 패턴 선택 최적화를 위해 더 긴 시간 스케일에서 빔 패턴 선택 확률을 최적화하는 방법을 사용했지만, 사용자 스케줄링과 전송 전력 할당은 매 타임 슬롯 결정이 되어야 한다. 그러나, 변환된 문제 **(P1)**은 여전히 직접적으로 풀기 위해서는 미래의 정보를 알아야 한다는 어려움이 있기에, 우리는 Lyapunov 최적화<sup>[7]</sup>와 보조 변수  $\Gamma = \{(\gamma_1, \dots, \gamma_K) | \gamma_{k,min} \leq \gamma_k \leq \gamma_{k,max}, \forall k\}$ 를 도입하여 매 타임 슬롯 풀 수 있는 문제로 변환하였다. 또한, 시평균 제약 조건과 형평성을 고려하기 위해 두 개의 가상 대기열  $Z$ 와  $W_k$ 를 정의하였다.  $Z$  가상 대기열은 시평균 전송 전력 제약을 매 타임 슬롯 고려할 수 있도록 하고,  $W_k$  가상 대기열은 사용자 간의 형평성

을 고려할 수 있도록 한다. 각 가상 대기열은 다음과 같이 매 타임 슬롯 갱신된다.

$$Z_c(t+1) = \left[ Z_c(t) - P_{avg}^c + \sum_{n_c} \sum_b p_{n_c,b}(t) \right]^+, \forall c, \tag{9}$$

$$W_k(t+1) = [W_k(t) - r_k(\mathbf{I}(t), \mathbf{p}(t)) + \gamma_k(t)]^+, \quad \forall k, \tag{10}$$

긴 시간 관점에서 각 가상 대기열을 발산시키지 않는다는 것은 결국 제약 조건을 준수한다는 것을 의미한다. 최종적으로 매 타임 슬롯 풀 수 있는 형태로 변환된 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}(t), \mathbf{I}(t), \boldsymbol{\gamma}(t)} V & \sum_k \log(1 + \gamma_k(t)) \\ & - \sum_c Z_c(t) \sum_{n_c} \sum_b p_{n_c,b}(t) \\ & + \sum_k r_k(\mathbf{p}(t), \mathbf{I}(t)) W_k(t) \\ & - \sum_k \gamma_k(t) W_k(t) \end{aligned}$$

변환된 문제는  $\boldsymbol{\gamma}(t)$ 에 대해 볼록성을 띄기 때문에 최적의  $\boldsymbol{\gamma}(t)$ 는 구해질 수 있지만,  $\mathbf{I}(t)$ 와  $\mathbf{p}(t)$ 에 대해서는 혼합 정수 비볼록 문제이기 때문에 우리는 각 변수를 순차적으로 결정하는 방식을 사용하였다. 먼저, 선택된 빔 패턴과 전송 전력이 주어진 상황에서 사용자 스케줄링에 대한 해는 다음과 같다.

$$l_{b,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } k = k(n, \mathbf{b}) = \arg \max r_k(\hat{\mathbf{p}}) W_k, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \tag{11}$$

$\hat{\mathbf{p}}$ 은 최대 전송 전력  $p_n^{max}$ 을 선택된 빔 패턴에 속한 빔의 수로 나눈 값을 의미한다. 이 때, 패턴에 속한 빔의 수를  $|a|$ , 기지국  $n$ 내 사용자 수를  $|\mathcal{K}_{n_c}|$ 라 할 때, 사용자 스케줄링을 위한 계산 복잡도는  $\mathcal{O}(|a| |\mathcal{K}_{n_c}|)$ 이다. 그러나, 빔 패턴과 사용자 스케줄링이 주어졌을지라도 전송 전력 할당 문제는 네트워크 상의 모든 사용자, 기지국, 그리고 빔에 대한 간섭을 고려해야하기 때문에 계산 복잡도가 상당히 높다는 문제점을 갖고 있다. 이를

해결하기 위해 본 논문에서는 **크리티컬 사용자 개념**<sup>2)</sup>을 도입하였다. 이는 각 기지국의 빔으로부터 나오는 모든 간섭을 하나의 값으로 추상화하는 것으로서, 내부 참조 사용자와 외부 참조 사용자 개념을 사용하여 구할 수 있다. 전자는 클러스터 내에서 가장 큰 간섭을 받고 있는 사용자를 의미하고, 후자는 클러스터 밖에서 가장 큰 간섭을 받고 있는 사용자이다. 각 사용자는 제안한 네트워크 구조의 피드백 메시지 교환 방식을 활용하여 실용적으로 구해질 수 있으며, 최종적으로 **크리티컬 사용자**는 두 참조 사용자 중 더 큰 간섭을 받고 있는 사용자로 결정된다. 도입한 **크리티컬 사용자**와 결정된 빔 패턴, 사용자 스케줄링을 기반으로 전송 전력 할당 문제는 라그랑주 승수법과 **KKT(Karush-Kuhn-Tucker)** 조건을 활용하여 실용적으로 풀 수 있다. 두 방식을 통해 파생된 라그랑지안 승수를 찾아 전송 전력을 할당하는 방법의 계산 복잡도는  $\log_2\left(\frac{P_c^{max}}{\epsilon}\right)$ 이다( $\epsilon$ 은 이분 탐색 시 허용 오차를 의미한다).

최종적으로, 우리는 제안한 문제를 그림 3에 표현된 흐름으로 효율적이고 낮은 복잡도로 풀 수 있는 **IAM** 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 긴 시간 스케일에서 빔 패턴 선택 확률을 목적 함수가 최대화되도록 업데이트 하고, 짧은 시간 스케일에서는 빔 패턴 선택, 사용자 스케줄링, 그리고 전송 전력 할당을 순차적으로 진행한다.

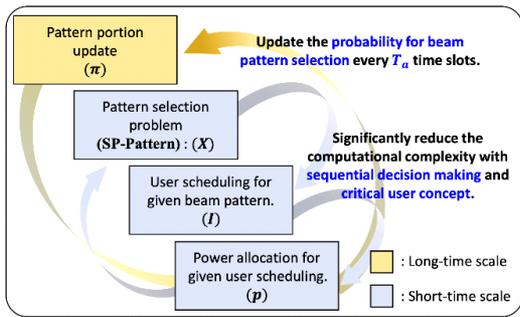


그림 3. IAM 알고리즘의 동작 과정  
Fig. 3. Operation process of the IAM algorithm.

### III. 실험

본 논문에서 제안한 **IAM** 알고리즘의 성능을 검증하고 비교하기 위해 그림 4와 같이 실제 서울 내 도입되어

2) 이는 [8]에서 제안된 참조 사용자 개념을 착안하여, 본 논문에서 제안하는 미래 네트워크 구조에 맞도록 내부 참조 사용자와 외부 참조 사용자를 활용하는 개념이다.

있는 네트워크 토폴로지 두 개, **seoul1**과 **seoul2**를 고려하였다. 각 토폴로지에 도입되어 있는 기지국의 수는 25개와 21개이며, 4개의 클러스터가 4개에서 7개의 기지국을 포함하도록 배치하였다. 또한, 사용한 네트워크 토폴로지의 도십지 특성을 반영하여 **UMI-street canyon path loss model**<sup>[9]</sup>을 사용하고, 중심 주파수는 **28GHz**로 설정하였다.

우리는 제안한 알고리즘의 성능 비교를 위해 다음과 같이 세 개의 비교 알고리즘을 사용하였다. 1) **IGS**<sup>[10]</sup>: 빔과 사용자 쌍을 순차적으로 선택하는 알고리즘으로서, 쌍을 선택할 때 이전에 선택된 쌍으로 인한 간섭을 고려하는 알고리즘이다. 2) **Greedy**<sup>[11]</sup>: 각 사용자가 가장 높은 성능을 달성할 수 있는 빔을 선택하는 알고리즘이다. 3) **ON/OFF**<sup>[12]</sup>: 사전에 정의된 임계 값을 기반으로 기지국의 활성화/비활성화 여부를 결정하는 알고리즘이다. 여기서, 기지국이 활용할 수 있는 빔의 수를  $|B|$ 라고 할 때, **IGS**와 **Greedy**의 계산 복잡도는  $O\left(|B||\mathcal{K}_{n_c}| + \frac{p_{n_c}^{max}}{\epsilon}\right)$ 이다. 빔 패턴은 인접한 빔이 겹치지 않는 제약 하에 생성되기 때문에  $|B| > |a|$ 이므로 **IGS**와 **Greedy** 알고리즘은 더 높은 계산 복잡도를 가진다. 그림 5는 각 네트워크 토폴로지 상에서 제안한 **IAM** 알고리즘과 비교 알고리즘의 성능을 비교한 그래프이다. 비교 척도로는 **GAT(Geometric Average Throughput)**를 사용하였으며, 이는 전송 속도의 기하 평균으로서 본 하였고 논문 목적 함수를 표현할 수 있는 척도이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 제안한 **IAM** 알고리즘이 비교 알고리즘에 비해 더 좋은 성능을 내는

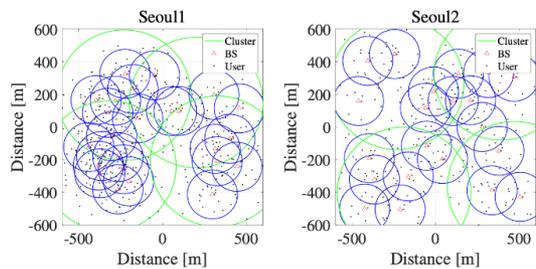


그림 4. 서울 도심의 네트워크 토폴로지  
Fig. 4. The real network topologies in Seoul.

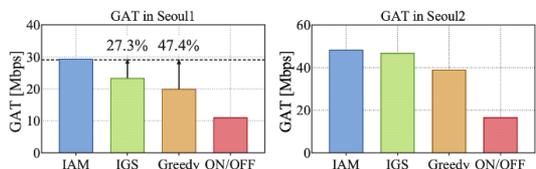


그림 5. 네트워크 토폴로지에 따른 GAT 성능 비교  
Fig. 5. GAT for different network topologies.

것을 확인할 수 있다. 더욱이, Seoul1 토폴로지에서 Greedy 알고리즘 대비 47.4%의 성능 향상을 확인할 수 있다. 이러한 성능 차이는 IAM 알고리즘이 두 가지의 가상 대기열  $Z$ 와  $W$ 과 제한한 네트워크 구조를 최대한 활용하기 때문이다. 즉, 가상 대기열  $Z$ 를 활용함으로써, 시공간 전력 공유를 통해 시공간적으로 변화하는 간섭을 효율적으로 관리할 수 있고, 가상 대기열  $W$ 를 통해 모든 사용자에게 형평성 있는 서비스를 제공하여 비교 알고리즘에 비해 높은 GAT 성능을 달성할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 mmWave 기반 스몰 셀 네트워크에서 크게 증가할 것으로 예상되는 간섭을 관리하기 위해, 미래 네트워크의 특징을 분석하여 새로운 네트워크 구조를 제안하였다. 제한한 네트워크 구조는 합리적인 피드백 교환과 시공간 전력 공유를 가능하게 하여 시공간적으로 바뀌는 간섭에 대해 적응적으로 관리할 수 있도록 한다. 동시에, 제한한 구조의 특징을 최대한 활용하는 간섭 관리 알고리즘인 IAM을 제안한다. 제안한 IAM 알고리즘은 시평균 사용자 전송 속도의 효용 함수를 최대화하면서, 두 개의 시간 스케일에서 빔 패턴 선택과 사용자 스케줄링/전송 전력 할당을 최적화하게 된다. 또한, 두 개의 시간 스케일 접근과 순차적 문제 풀이 기법, 크리티컬 사용자 개념의 도입을 통해 IAM 알고리즘이 낮은 계산 복잡도를 갖게 하였다. 또한, 미래 네트워크는 셀이 더 밀도 있게 도입하고 복잡해지는 상황이 예견되기 때문에, 본 논문은 더 효율적이고 실용적인 네트워크 구조의 제안과 그 구조 위에서 동작하는 간섭 관리 연구에 대한 새로운 방향성을 제안할 것으로 예상된다.

#### References

- [1] "Cisco Annual Internet Report (2018-2023)," Cisco Public White Paper, Mar. 2020. (<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>)
- [2] S. B. Eom, J. S. Park, and I. K. Lee, "Analog beamforming designs for millimeter-wave systems," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 260-261, Gangwon-do, Korea, Feb. 2020.
- [3] "5G Radio Access: Requirements Concept and Technologies," DOCOMO 5G White Paper, Jul. 2014. ([https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper\\_5g/DOCOMO\\_5G\\_White\\_Paper.pdf](https://www.docomo.ne.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_Paper.pdf))
- [4] J. Liu, M. Sheng, L. Liu, and J. Li, "Interference management in ultra dense networks: Challenges and approaches," *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 70-77, Nov. 2017. (<https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1700052>)
- [5] J. Liu, H. Guo, and L. Zhao, "Resilient and low-latency information acquisition for FiWi enhanced smart grid," *IEEE Network*, vol. 31, no. 5, pp. 80-86, Sep. 2017. (<https://doi.org/10.1109/MNET.2017.1600285>)
- [6] K. Son, Y. Yi, and S. Chong, "Utility-optimal multi-pattern reuse in multi-cell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 142-153, Jan. 2011. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2010.110310.091778>)
- [7] M. Neely, "Stochastic network optimization with application to communication and queuing systems," *Synthesis Lectures on Commun. Netw.*, pp. 1-211, 2010. (<https://doi.org/10.1007/978-3-031-79995-2>)
- [8] K. Son, S. Lee, Y. Yi, and S. Chong, "REFIM: A practical interference management in heterogeneous wireless access networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 1260-1272, Jun. 2011. (<https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.110613>)
- [9] "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz," 3GPP TR 38.901, Jun. 2018. ([https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38\\_series/38.901/38901-f00.zip](https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.901/38901-f00.zip))
- [10] Z. Jiang, S. Chen, S. Zhou, and Z. Niu, "Joint user scheduling and beam selection optimization for beam-based massive mimo downlinks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2190-2204, Apr. 2018. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2789895>)
- [11] R. Pal, A. K. Chaitanya, and K. V. Srinivas, "Low-complexity beam selection algorithms for millimeter wave beamspace MIMO

systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 768-771, Apr. 2019.

(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2902147>)

- [12] “*Study on Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN-Physical-layer aspects; (Release 12)*,” 3GPP TR 36.872, Dec. 2013. (<https://www.3gpp.org/release-12>)

**윤 필 도 (Pildo Yoon)**



2022년 2월 : 국립한밭대학교 컴퓨터공학과 졸업

2022년 3월~현재 : 대구경북과학기술원 석사과정

<관심분야> 간섭 관리, 강화 학습

**조 윤 희 (Yunhee Cho)**



1999년 2월 : 한동대학교 전산전자공학부 졸업

2001년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

2014년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

2001년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동 통신, 5G 스몰셀, SON, 셀간 간섭관리 기술

**나 지 현 (Jeehyeon Na)**



1989년 2월 :전 남대학교 전산통계학과 졸업

2000년 2월 : 충남대학교 컴퓨터과학과 석사

2008년 8월 : 충남대학교 컴퓨터과학과 박사

1989년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 재직, 지능형스몰셀연구실장

<관심분야> 5G 스몰셀, SON, O-RAN, vRAN, 5G/6G 무선 액세스 네트워크 기술

**곽 정 호 (Jeongho Kwak)**



2008년 8월 : 아주대학교 전자공학부 학사

2011년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

2015년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사

2015년~2017년 : 캐나다 INRS-EMT 박사후 연구원

2017년~2019년 : 아일랜드 Trinity College Dublin Computer Science Marie-Curie Fellow

2019년 : 대구대학교 전자전기공학부 조교수

2020년~현재 : 대구경북과학기술원 조교수, 부교수

<관심분야> 6G 컴퓨팅, 스토리지, 네트워킹 자원관리, 모바일 인공지능, 저궤도 위성 엣지 컴퓨팅