

mmWave 기반 스몰 셀 네트워크에서 빔 패턴, 사용자 스케줄링, 전송 전력 할당을 위한 저복잡도 간섭 관리 알고리즘 개발

윤필도, 조윤희*, 나지현*, 곽정호
대구경북과학기술원, *한국전자통신연구원

yoonpildo@dgist.ac.kr, *yhcho@etri.re.kr, *jhna@etri.re.kr, jeongho.kwak@dgist.ac.kr

A Development of low-complex interference management algorithm for mmWave-based small cell networks

Pildo Yoon, Yunhee Cho*, Jeehyeon Na*, Jeongho Kwak
DGIST, *ETRI

요 약

본 논문은 mmWave 기반의 스몰 셀 네트워크에서 발생될 것이라 예상되는 높은 트래픽을 수용할 수 있는 간섭 관리 알고리즘을 제안한다. 먼저, 본 논문에서는 미래 네트워크의 특징을 분석하여 합리적인 수준의 피드백 교환과 시공간 전력 공유가 가능한 새로운 네트워크 구조를 제안한다. 제안한 구조 상에서, 간섭 관리를 위해 빔 패턴 선택과 사용자 스케줄링, 전송 전력 할당을 최적화하면서 사용자의 시평균 효용함수를 최대화하는 문제를 정의한다. 정의된 문제의 계산 복잡도는 상당히 크기 때문에, 우리는 먼저 빔 패턴 선택에 대한 문제와 사용자 스케줄링/전송 전력 할당에 대한 문제로 분해하였다. 전자는 긴 시간 스케일에서 빔 패턴의 선택 확률을 목적함수가 최대화되는 방향으로 갱신하는 문제로 변형되고, 후자는 보조 변수와 Lyapunov 최적화 기법을 사용하여 짧은 시간 스케일에서 풀 수 있는 형태로 변형시켰다. 변형된 문제를 풀기 위해, 사용자 스케줄링과 송신 전력 할당을 순차적으로 푸는 방법을 채택하고, 네트워크 상의 간섭을 하나의 사용자의 간섭으로 추상화하는 크리티컬 사용자 개념을 도입하여 송신 전력 할당 문제의 계산 복잡도를 상당히 낮추어 최종적으로 CRIM(CRITICAL user based Interference Management) 알고리즘을 제안한다.

I. 서 론

UHD(Ultra High Definition) 비디오 스트리밍 또는 MR(Mixed Reality) 서비스와 같이 폭발적인 네트워크 트래픽을 요구하는 서비스들이 5G+/6G 통신에서 주요하게 다룰 킬러 애플리케이션으로 여겨진다[1]. 이러한 트래픽을 처리하기 위해서, MIMO(Multi Input Multi Output) 그리고 NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access), mmWave, small cell networks 등의 기술들이 활발하게 연구되고 있다.

여러 송신 안테나를 사용하여 집약적인 빔을 형성할 수 있는 MIMO 기술은 단일 송신 안테나보다 신호의 손실이 적게 통신이 가능해진다. 이에 더불어, NOMA 기술을 활용하여 단일 빔에 여러 사용자를 스케줄링할 수 있다. 즉, 송신 측에서 단일 빔에 중첩 코딩으로 신호를 부호화하고 수신 측에서 여러 사용자가 부호화된 신호로부터 순차적으로 간섭을 제거하여 자신의 신호만을 추출할 수 있다. 이러한 이점에도 불구하고, 기지국은 관리해야 할 결정 변수가 추가되어 간섭 관리에 대한 복잡도는 크게 증가하게 된다.

mmWave 는 높은 주파수 대역을 사용하여 많은 네트워크 트래픽을 수용할 수 있지만, 중장거리 통신에는 취약하다는 특징을 갖는다. 이런 단점을 해결하기 위해, 작은 셀을 사용하여 통신 거리를 줄이는 small cell networks 가 사용될 수 있다. 그러나, 셀의 크기가

줄어든다는 것은 결국 셀간 간섭을 높이게 되고, 많아진 기지국 수로 인해 피드백 오버헤드가 발생하게 된다.

위와 같은 상황에서, 본 논문은 합리적인 피드백 교환을 통해 효율적인 간섭 관리를 할 수 있도록 새로운 네트워크 구조를 제안하고, 제안한 구조 위에서 동작하는 CRIM(CRITICAL user based Interference Management) 알고리즘을 제안한다.

II. 본론

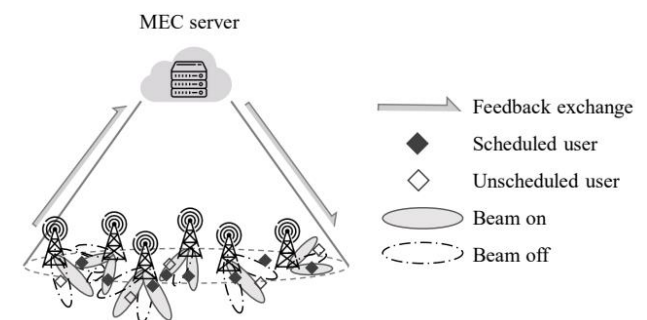


그림 1. 제안하는 네트워크 구조

2.1. 제안하는 네트워크 구조

본 논문에서 제안하고자 하는 네트워크 구조는 그림 1 과 같다. 적은 수의 기지국들이 하나의 클러스터에 포함되어, MEC 서버가 하나의 클러스터를 관리하는

구조이다. 즉, 클러스터 내에서는 기지국들이 중앙화 방식으로 관리되고, MEC 서버끼리의 피드백 교환을 통해 분산화 방식으로 관리되는 구조이다. 또한, 클러스터 내에서는 smart grid [2]를 적용하여 시공간 전력 공유가 가능하도록 한다.

2.1. 제안하는 간섭 관리 알고리즘

제안한 구조 위에서 효율적으로 간섭을 관리하기 위해, 우리는 시평균 전송 전력에 대한 제약 하에서 사용자의 시평균 효용함수를 최대화하도록 빔 패턴 선택 (\mathbf{X}) 과 사용자 스케줄링 (\mathbf{I}), 전송 전력 할당 (\mathbf{p}) 을 최적화하는 문제를 형성하였다.

$$(\mathbf{P}): \max_{(\mathbf{X}, \mathbf{I}, \mathbf{p})} \sum_{k \in \mathcal{K}} U_k(R_k) \\ \text{s.t.} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \sum_n \sum_b p_{n,b} \leq P_{avg}^c.$$

하지만, 이 문제는 모든 시간대에 해당하는 정보를 알아야 풀 수 있기 때문에, 우리는 위 문제 (\mathbf{P})를 결정 변수 간의 연결성을 끊어 변형한 긴 시간 스케일에서의 빔 패턴 선택 문제 (\mathbf{SP} -Pattern)와 Lyapunov 최적화 기법[3]을 적용하여 짧은 시간 스케일(매 타임 슬롯)에서의 풀이로 변형된 사용자 스케줄링/전송 전력 할당 문제 ($\mathbf{SP2}$)로 분해하였다.

$$(\mathbf{SP}\text{-Pattern}): \max_{\pi} \sum_{k \in \mathcal{K}} \left(\sum_{a \in \mathcal{A}} \phi_{k,a} \cdot \pi_a \cdot \bar{r}_{k,a} \right) \\ (\mathbf{SP2}): \max_{(\mathbf{I}(t), \mathbf{p}(t))} \sum_k r_k(I(t), p(t)) W_k(t) - \sum_n \sum_b p_{n,b}(t) Z_c(t)$$

문제 (\mathbf{SP} -Pattern)의 경우, 긴 시간 스케일에서 효용 함수의 최대화를 달성할 수 있도록 빔 패턴 선택 확률을 갱신하는 standard gradient projection[4]을 적용하여 풀 수 있다.

문제 ($\mathbf{SP2}$)의 경우, 사용자 스케줄링과 전송 전력 할당이라는 결정 변수가 엮여 있어, 우리는 순차적으로 각 결정 변수를 푸는 방법을 채택하였다. 여기서, 전송 전력이 균일하게 주어진 상황에서 사용자 스케줄링 문제는 다음과 같이 풀릴 수 있다.

$$I_{b,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } k = k(n, \mathbf{b}) = \arg \max_k r_k(p_{uni}) W_k, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

그러나, 사용자 스케줄링이 주어졌다 해도 전송 전력 할당 문제는 모든 사용자에게 대한 간섭을 고려해야하기 때문에 여전히 높은 계산 복잡도를 가진다. 따라서, 우리는 크리티컬 사용자($\text{cri}_{n,b}$) 개념을 도입했다. 이 개념은 각 기지국의 빔이 주고 있는 간섭 중 가장 큰 간섭을 받는 사용자의 그것으로 추상화하는 개념이다. 이는 전송 전력 할당에서 계산 복잡도를 상당히 낮출 수 있고, 최종적으로 매 타임 슬롯 할당되는 전송 전력은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$p_{k(n,b)} = \left[\frac{W_{n,b} \ln 2}{\lambda_n + \text{tax}_{n,b} + Z_c} - \frac{\eta_{k(n,b)} + \sigma_{k(n,b)}}{|h_{n,k(n,b)} \mathbf{b}|^2} \right]_0^{p_n^{\max}}$$

III. 결론

본 논문에서는 미래 네트워크의 특징을 분석하여 새로운 네트워크 구조를 제안함과 동시에, 제안한 구조 상에서 동작하는 간섭 관리 알고리즘인 CRIM 을 제안한다. 제안하는 네트워크 구조는 기지국 간 합리적인 피드백 교환과 시공간 전력 공유를 가능케 하여 시공간적으로 바뀌는 간섭에 대처할 수 있도록 한다. 제안한 CRIM 알고리즘은 시평균 사용자의 효용 함수를

최대화하면서, 두 개의 시간 스케일에서 빔 패턴 선택과 사용자 스케줄링, 전송 전력 할당을 최적화하게 된다. 또한, 두 개의 시간 스케일 접근과 크리티컬 사용자 개념의 도입을 통해 CRIM 알고리즘은 매우 낮은 계산 복잡도를 갖게 된다. 또한, 미래 네트워크는 셀이 더 밀도 있게 분포하고 복잡해지는 상황이 예견되기 때문에, 본 논문은 더 효율적이고 실용적인 네트워크 구조의 제안과 구조 위에서 동작하는 간섭 관리 연구에 대한 새로운 방향성을 제안할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국전자통신연구원의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2018-0-01659, 5G NR 기반 지능형 오픈 스텔셀 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] (Mar. 2020). Cisco Annual Internet Report (2018-2023). Cisco Public White Paper. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internetreport/white-paper-c11-741490.pdf>
- [2] J. Liu, M. Sheng, L. Liu, and J. Li, "Interference management in ultra-dense networks: Challenges and approaches," IEEE Netw., vol. 31, no. 6, pp. 70-77, Nov. 2017.
- [3] M. J. Neely, "Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems," Synth. Lectures Commun. Netw., vol. 3, no. 1, pp. 1-211, Jan. 2010.
- [4] 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.