

ORION: Open-RAN 환경에서 비용 효율적인 RIC 기반 간섭 관리 오프로딩 구조

이소정, 곽정호*

대구경북과학기술원, *고려대학교

sojungssi0526@dgist.ac.kr, *jeonghokwak@korea.ac.kr

ORION : Opportunistic RIC-based Interference Management Offloading in Open-RAN Architecture

Lee So Jung, Kwak Jeong Ho*

DGIST., *Korea Univ.

요약

앞으로 6G 네트워크에서는 자율주행과 초고해상도 미디어 스트리밍과 같은 초저지연·고대역폭 서비스가 확산되면서 데이터 트래픽이 급격히 증가할 것으로 예상된다. 이를 지원하기 위한 기지국의 초밀집 배치는 셀 간 간섭을 심화시키고, 사용자 이동성과 트래픽 변동성으로 인해 간섭 패턴은 갈수록 불규칙해지고 있다. 이러한 복잡성은 단순한 성능 저하에 그치지 않고, 연산 자원 확충과 클라우드 사용량 증가로 이어져 네트워크 사업자의 운영 비용을 크게 높이는 문제를 낳는다. 기존 간섭 관리 기법은 분산 방식과 중앙집중식 방식으로 각각 연구되어 왔으나, 분산 방식은 전역 최적화에 한계가 있고 중앙집중식 방식은 계산량 증가와 지연으로 실시간 대응이 어렵다. 이를 해결하기 위해 우리는 ORION이라는 하이브리드 간섭 관리 프레임워크를 제안한다. ORION은 간섭이 심한 기지국들은 간섭관리계산을 중앙으로 오프로딩하고, 그렇지 않은 기지국들은 분산 제어를 통해 빠른 적응성을 유지한다. 이를 통해 제어 효율성을 높이고, 클라우드 연산 부담과 운영 비용 부담을 동시에 완화한다. 실제 네트워크 트레이스를 반영한 시뮬레이션 결과, ORION은 성능 손실을 1% 이내로 유지하면서 비용을 약 16% 절감할 수 있었다. 본 연구는 성능과 비용을 동시에 고려한 AI-Native 간섭 관리의 새로운 설계 원리를 제시하며, 차세대 6G 및 Open-RAN 상용망에서의 적용 가능성을 확인하였다.

I. 서론

6G 네트워크 환경에서는 자율주행, 고해상도 미디어 스트리밍 등 초저지연·고대역폭을 요구하는 응용 서비스가 빠르게 확산되고 있으며, 사용자가 원하는 서비스 품질이 높아져 데이터 트래픽이 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 이런 문제에 대응하기 위해 최근 삼성 갤럭시 시리즈에 On-Device AI 기능이 탑재되었지만 고도화된 서비스를 단말 단독으로 제공하기에는 단말의 연산 능력에 한계가 있다. 따라서 네트워크 사업자는 이를 지원하기 위해 기지국 밀도를 높이는 전략에 주목하고 있다.

그러나 이는 네트워크 인프라에 성능과 비용이라는 새로운 도전 과제를 야기한다. 기지국 밀도가 증가하면 전체 용량은 향상되지만, 동시에 셀 간 간섭이 커지고 간섭 패턴 또한 복잡해진다. 특히, 사용자의 이동성과 트래픽 변동성을 고려할 때 간섭 패턴이 불규칙해져 사용자의 체감 품질 저하로 이어진다. 이는 간섭을 효과적으로 제어하기 위한 연산자원 확충으로 이어져 네트워크 사업자의 운영 비용을 가중시키는 문제가 발생한다. 따라서, 기지국 밀도가 증가할수록 효율적인 지능형 간섭 관리 기술이 필수적이다.

기존 간섭 관리 기법은 크게 분산 방식과 중앙 집중식 방식으로 나눌 수 있다. 분산 방식은 적응성이 높지만 전역 최적화에 한계가 있고, 중앙 집중식 방식은 전역 제어가 가능하나 연산량이 기하급수적으로 증가하여 비용이 커지고, 실시간 대응이 어려운 문제가 있다[1]. 과거 폐쇄형 RAN에서는 표준화된 제어 인터페이스와 RIC 계층이 부재하여, 상황에 따라 두 방식을 실시간으로 전환하는 접근이 어려웠다. 반면 O-RAN은 RIC 계층과 표준화된 인터페이스(E2/A1/O1)를 정의해, 상황에 따라 분산·중앙 제어를 오가는 동적 전환을 쉽게 만들었다[2].

따라서, 본 연구에서는 Open-RAN의 계층적 제어 구조를 활용해 상황에 따라 분산 제어와 중앙 제어를 동적으로 전환하는 ORION 프레임워크를 제안한다. ORION은 네트워크 상황에 따라 각각의 기지국이 제어 방식을 유연하게 전환한다. 성능 보장이 필요한 경우에는 중앙으로 간섭제어를 오프로딩하여 전역 데이터와 풍부한 연산 자원을 활용하고, 그렇지 않은 경우에는 분산 제어를 적용하여 불필요한 연산을 줄이고 운영 비용을 절감한다.

이 논문은 다음의 기여들을 하는 것으로 정리할 수 있다.

- 제안한 ORION 프레임워크는 Open-RAN 환경에서 중앙 집중식 제어와 분산 제어를 기지국이 상황에 따라 동적으로 전환하는 하이브리드 간섭 관리 방법으로, 기존 방식의 한계를 보완하였다.
- ORION이 시간이 지남에 따라 오프라인 최적 성능에 수렴함을 이론적으로 증명하였다.
- 실제 네트워크 환경을 반영한 시뮬레이션 결과, ORION은 성능 손실을 1% 이내로 유지하면서 비용을 약 16% 절감할 수 있었고, 성능 손실을 5%까지 허용할 경우 비용 절감 효과는 약 32%까지 확대됨을 확인하였다.

II. 본론

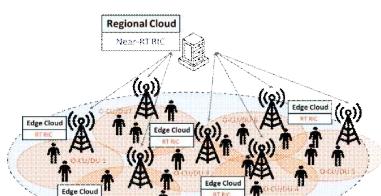


그림. 1. O-RAN 기본 네트워크 아키텍처

시스템 모델. 우리는 그림1와 같이Open-RAN 아키텍처 기반의6G 초밀집 네트워크 환경을 고려한다. 네트워크는 다수의 기지국과 사용자 단말로 구성되며, 각 기지국에서RT RIC가 중앙 서버에서Near-RT RIC가 동작한다. 각 기지국은OFDMA 기반 서브 채널을 통해 서비스를 제공한다. 이러한 환경에서 우리는 간접 제어의 중앙 오프로딩 여부, 사용자 스케줄링, 전송전력 할당이라는 세 가지 제어 변수를 중심으로 문제를 정의한다. 우리의 최적화 목표는 모든 사용자에게 유한 시간 내에 안정적인 서비스 품질을 보장하면서, 평균 처리량을 최대화하고 동시에 클라우드 연산 사용량을 줄여 운영 비용을 절감하는 것이다. 따라서 본 연구의 문제는 성능과 비용 간의Trade-off를 고려하는 새로운 간접 관리 문제로 귀결된다.

알고리즘.ORION 프레임워크는 그림2와 같은 세 단계(동적 오프로딩, 사용자 스케줄링, 전력 제어)로 동작한다.

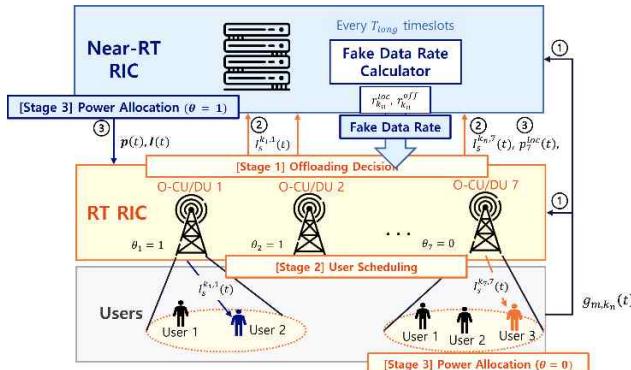


그림. 2. ORION 프레임워크

첫 번째 단계는 동적 오프로딩으로, RT RIC이 실시간으로 수집한 네트워크 상태(간접 수준, 사용자 밀도, 트래픽 부하)를 기반으로 제어를 로컬(RT RIC)에서 수행할지 혹은 중앙(Near-RT RIC)으로 오프로딩할지를 결정한다. 성능 보장이 필요한 경우에는 중앙집중식 제어를 적용해 전역 최적화를 달성하고, 그렇지 않은 경우에는 분산 제어를 통해 비용을 줄이고 응답성을 확보한다.

두 번째 단계는 사용자 스케줄링으로, 각 기지국 내 사용자와 서브채널을 매핑한다. 분산 제어 모드에서는 채널 상태 기반의 경량화된 스케줄링을 수행해 지연을 최소화하며, 중앙 제어 모드에서는 전역 채널 정보를 기반으로 정교한 최적 스케줄링을 수행한다.

세 번째 단계는 전력 제어로, 서브채널별 전송 전력을 조정한다. 분산 모드에서는 계산 복잡도가 낮은 근사 최적화 기법을 적용하고, 중앙 모드에서는 심층 강화학습(DQN)을 기반으로 전역 전력 제어를 수행한다. 이러한3단계 구조를 통해ORION은 네트워크 상황에 따라 중앙집중식 제어의 전역 최적화와 분산 제어의 빠른 적용성을 유연하게 결합함으로써, 성능과 비용의 균형을 동시에 달성한다.

성능 평가. 그림3은 제안한ORION 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 현실적인 네트워크 환경을 반영해 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

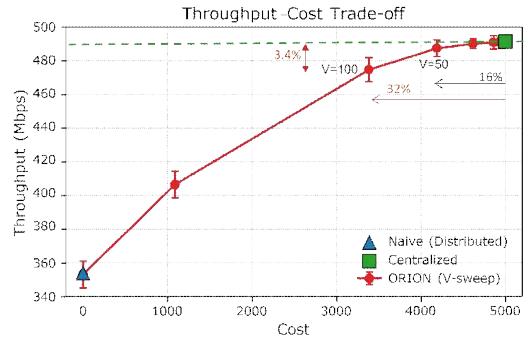


그림. 3. 기존 알고리즘과 성능 비교

비교 대상으로는 중앙 집중식 제어와 분산 제어(라운드로빈)를 고려했다. 중앙 집중식 제어는 높은 처리량을 제공했으나 비용이 크게 증가했고, 분산 제어는 비용은 낮았으나 성능 저하가 커다. 반면 ORION은Trade-off 파라미터(V) 조정을 통해 성능-비용 간 균형점을 달성할 수 있음을 보였다. 예를 들어V=50인 경우, 성능 손실1% 미만으로 약16% 비용 절감을 달성하였고, V=100인 경우, 성능 손실5% 이내에서32% 절감을 달성하였다. 또한, ORION은 두 극단 사이의Pareto 최적점을 형성하며 성능과 비용을 동시에 고려하는 효과적인 간접 관리 방안임을 보여준다.

III. 결론

본 논문은 6G 초밀집 기지국 환경에서의 불규칙한 간접과 이에 따른 비용 증가 문제를 해결하기 위해 ORION 프레임워크를 제안하였다. ORION은 Open-RAN 구조를 활용해 상황에 따라 중앙집중식 제어와 분산 제어를 동적으로 전환함으로써, 성능을 사실상 유지하면서 비용을 유의미하게 절감한다. 향후 연구에서는 이론 분석을 보강하고 다양한 네트워크 시나리오로 확장해 일반성과 실효성을 추가 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00398157)

참 고 문 헌

- [1] J. Chen, X. Liang, J. Xue, Y. Sun, H. Zhou and X. Shen, "Evolution of RAN Architectures Toward 6G: Motivation, Development, and Enabling Technologies." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 3, pp. 1950–1988, April. 2024.
- [2] "O-RAN WhitePaper – Building the next generation RAN,"O-RAN Alliance, Alfter, Germany, White Paper, Oct. 2018. [Online]. Available:<https://www.o-ran.org/resources>