

그림. 1. O-RAN 기반 네트워크 아키텍처

시스템 모델. 우리는 그림1와 같이 Open-RAN 아키텍처 기반의 6G 초밀집 네트워크 환경을 고려한다. 네트워크는 다수의 기지국과 사용자 단말로 구성되며, 각 기지국에서 RT RIC가 중앙 서버에서 Near-RT RIC가 동작한다. 각 기지국은 OFDMA 기반 서브 채널을 통해 서비스를 제공한다. 이러한 환경에서 우리는 간섭 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 간의 Trade-off를 고려하는 새로운 간섭 관리 문제로 귀결된다.

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

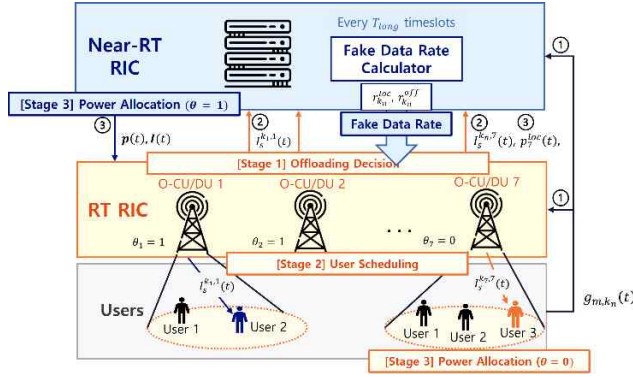


그림. 2. ORION 프레임워크

첫 번째 단계는 동적 오프로딩으로, RT RIC이 실시간으로 수집한 네트워크 상태(간섭 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. 이러한 3단계 구조를 통해 ORION은 네트워크 상황에 따라 중앙집중식 제어의 전역 최적화와 분산 제어의 빠른 적응성을 유연하게 결합함으로써, 성능과 비용의 균형을 동시에 달성한다.

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

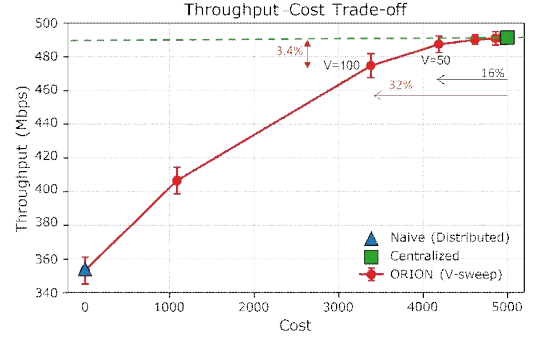


그림. 3. 기존 알고리즘과 성능 비교

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 컸다. 반면 ORION은 Trade-off 파라미터(V) 조정을 통해 성능-비용 간 균형점을 달성할 수 있음을 보였다. 예를 들어 $V=50$ 인 경우, 성능 손실 1% 미만으로 약 16% 비용 절감을 달성하였고, $V=100$ 인 경우, 성능 손실 5% 이내에서 32% 절감을 달성하였다. 또한, ORION은 두 극단 사이의 Pareto 최적점을 형성하며 성능과 비용을 동시에 고려하는 효과적인 간섭 관리 방안을 보여준다.

III. 결론

본 논문은 6G 초밀집 기지국 환경에서의 불규칙한 간섭과 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)

참고 문헌

- [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>