

저궤도 위성 기반 단말 직접 통신을 위한 자원 할당 및 빔포밍에 따른 시스템 레벨 성능 분석

System-level Performance Analysis of Resource Allocation and Beamforming for Direct-to-Cell Communications in Low-Earth-Orbit Satellite

윤태훈, 강충구

고려대학교 전기전자공학부

{xogns8120, ccgkang}@korea.ac.kr

요약문

본 논문은 저궤도 위성 기반 단말 직접(Direct-to-Cell: D2C) 통신 시스템의 하향링크에서 빔호핑에 따른 자원 할당과 사용자 위치에 따른 빔포밍을 동시에 고려할 때, 시스템 레벨 시뮬레이션을 통한 각 방식별 성능을 비교한다.

1. 서론

저궤도 위성 기반 D2C 통신은 지상 이동 단말과의 직접 연결을 제공하지만, 큰 경로 감쇄와 제한된 위성 자원으로 인해 공간적으로 효율적인 자원 할당이 필수적이다. 다중 빔 시스템에서 위성이 동시에 형성할 수 있는 빔의 수가 제한되고, 사용자의 위치에 따라 빔 방향이 성능에 직접 영향을 미칠 수 있기 때문에 이들을 동시에 고려한 최적화가 요구된다. 본 논문에서는 저궤도 다중 궤도를 고려한 D2C 시스템의 빔호핑(beam hopping) 기반 자원 할당과 단말의 위치를 고려한 빔포밍을 모델링하고, 이 구조에 따른 유통 방식 별로 주파수 효율성을 비교 분석함으로써 시스템 레벨의 최적화 이슈를 논의한다.

2. 시스템 모델

본 논문은 LEO 기반 D2C 하향링크 시스템을 고려한다. 위성은 Walker-Delta 별자리로 모델링하며, 별자리 파라미터로 $(T, P, F) = (48, 6, 1)$ 을 사용한다. 다중 빔 위성의 지상 서비스 영역(footprint)은 spot-beam에 의해 다수의 셀로 분할되고, 동시에 형성 가능한 빔의 개수가 제한되므로 시간 윈도우 단위로 활성 셀 집합을 선택하는 빔호핑이 적용된다. 이때 사용자의 트래픽 부하에 따라 시간 윈도우마다 사용 빔을 어떤 셀에 할당할지 결정해야 한다. 이를 위해 셀별 링크 품질이 유리한 셀을 우선 고려하고, 동시에 인접 빔간섭과 인접 위성 간섭을 줄이기 위해 빔 방향 유사도가 낮은 셀 조합을 선택한다. 이러한 기준에 따라 동일한 자원 제약 하에서 장기 평균 처리율을 높이는 최적 할당(optimized beam hopping)과, 활성 셀을 임의로 선택하는 랜덤 할당(random beam hopping)을 각각 비교한다. 한편 각 시간 윈도우에서 선택된 활성 셀들에 대해, 시간 슬롯 단위로 각 셀 내부의 사용자 단말을 선택하여 서비스한다. 이때 다수의 사용자가 존재할 경우에는 슬롯 단위로 라운드-로빈 형태로 선택한다. 이때 선택된 사용자 별로 최적의 위성을 선택한다. 이를 통해 장기적인 자원 분배와 단기적인 사용자 다중화가 계층적으로 결합된 운영을 고려한다.

위성은 평면 배열 안테나 기반의 하이브리드 빔포밍 송신 안테나를 탑재한다고 가정한다[2]. 빔포밍은 아날로그 단계에서 먼저 결정되며, 이를 빔 중심(beam-centric)과 사용자 중심(user-centric) 관점에서 비교한다. 빔 중심 모드에서는 시간 윈도우에서 선택된 활성 셀들의 중심 방향을 기준으로 아날로그 빔을 구성하고 해당 윈도우 동안 이를 유지한다. 각 시간 슬롯에서는 해당 빔에서 선택된 사용자를 서비스한다. 한편, 사용자 중심 모드에서는 각 시간 슬롯에서 스케줄된 사용자 집합을 기준으로 선택된 사용자 별 방향에 따라 고유한 아날로그 빔이 결정된다. 이때 선택된 사용자들 간 간섭을 완화하기 위해 디지털 단계에서 선형 프리코딩을 적용하여 동일 슬롯 내 다중 사용자 간섭을 완화한다. 빔 중심 모드는 셀 내부에서 사용자의 위치가 중심에서 멀어질수록 유효 빔 이득이 감소하여 셀 경계 사용자의 성능 열화가 예상된다. 반면 사

용자 중심 모드는 스케줄된 사용자의 유효 이득을 직접적으로 증가시키지만, 선택된 사용자들 간 간섭이 미미하다면 빔 중심 모드와 대비하여 이득이 크지 않을 수 있다.

3. 성능 비교 분석

주어진 모델의 서비스 영역에 900 명의 사용자를 균일하게 배치하고, 위성이 100 초 동안 이동하는 동안 최대 16 개 빔을 동시에 형성하는 상황을 고려한다. 또한 빔 1 개가 셀 1 개를 서비스하는 1:1 매핑을 적용한다. 시간 윈도우 길이는 3 sec, 시간 슬롯 길이는 1ms를 사용한다. 본 논문에서는 상이한 빔포밍 방식(bean-centric vs. user-centric)과 상이한 빔호핑 방식(optimized vs. random)간의 조합에 따른 시스템 레벨 성능을 분석하며, 그림 1에서 평균 대역 효율성을 비교하고 있다. 이때 랜덤 방식은 활성 셀 선택이 링크 품질과 무관하게 이루어지므로 상대적으로 불리한 셀이 빈번하게 포함될 수 있고, 그 결과 사용자 처리율에서 성능 저하가 두드러진다. 한편, 빔호핑이 최적화되었을 때는 빔포밍 방식에 따른 차이는 크게 나지 않는다(case 1 & case 3). 이는 윈도우 단위 셀 선택이 최적화된 경우에는 간섭이 작은 셀 조합을 우선적으로 구성하여 빔간 간섭을 선제적으로 완화하여 빔 중심과 사용자 중심 빔포밍으로 인한 이득이 제한적이기 때문이다. 한편, 랜덤 빔호핑의 경우에는 사용자 중심 빔포밍(case 2)에 따른 이득이 명확해지고 있는 것을 알 수 있다.

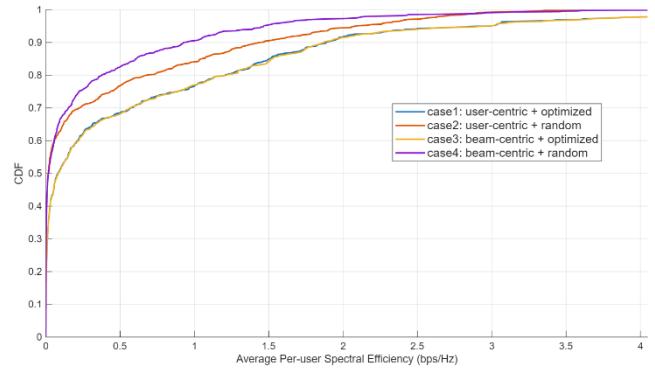


그림 1. 빔호핑 및 빔포밍 방식별 대역효율성 비교

4. 결론

기존 연구에서는 시스템 전반에 걸친 자원 할당 차원의 빔호핑을 고려하지 않고 빔포밍 관점에서의 최적화만 고려되었지만, 본 분석을 통해 서로 다른 시간 단위로 상호 작용하는 빔호핑과 빔포밍을 동시에 고려할 때는 또 다른 차원의 최적화 관점이 부각되는 것을 확인할 수 있다.

참조문헌

- [1] S. Kim, J. Wu, B. Shim and M. Z. Win, "Cell-Free Massive Non-Terrestrial Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 43, no. 1, pp. 201-217, Jan. 2025, doi: 10.1109/JSAC.2024.3460080.
- [2] X. Zhang, S. Sun, M. Tao, Q. Huang and X. Tang, "Multi-Satellite Cooperative Networks: Joint Hybrid Beamforming and User Scheduling Design," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 7, pp. 7938-7952, July 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3346463.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00517140).