

저궤도 위성통신 네트워크에서 단말직접 통신 용량 증대를 위한 성능 분석 Analysis of Capacity Enhancement for Direct-to-Cell Service in LEO Satellite Network

윤태훈, 강충구

고려대학교 전기전자공학부

{xogns812, ccgkang}@korea.ac.kr

요약문

본 논문은 저궤도 위성 기반 D2C 시스템에서 셀프리 매시브 MIMO 구조를 적용하여, 위성 간 협력과 사용자 중심 클러스터링을 통해 상향링크 용량을 효과적으로 증대할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 보인다.

1. 서론

저궤도 위성통신 네트워크에서 대형 안테나를 사용하지 않고 6GHz 이하 대역의 5G 표준 스마트폰과 직접 통신하는 direct-to-cell (D2C) 기술이 시연되고 있다. 이때 5G 주파수 대역의 사용으로 위성통신을 위한 기존 Ku 또는 Ka 대역의 경로 감쇄와 S 대역의 제한적인 전송률을 극복하고자 한다. 그러나, 대부분의 응용에서 수백 km에 달하는 고도는 신호 강도가 약하기 때문에 보다 높은 전송 전력 또는 높은 안테나 이득이 요구된다.

지상 영역을 다수 빔(beam)으로 분할하여 주파수를 재사용하는 다중 빔 시스템에서는 D2C 통신의 용량을 극대화하기 위해서는 빔간의 간섭에 대응할 수 있는 다양한 기술이 필요하다. 이를 위해 주파수 재사용을 사용하며, 한편으로 사용자 위치를 고려한 적응 빔포밍 기술을 고려할 수 있다. D2C 통신의 용량을 극대화할 수 있는 또 다른 접근은, 빔간 경계를 제거함으로써 빔간 간섭이 발생하지 않도록 하는 사용자 중심 cell-free massive MIMO (CF-mMIMO)를 적용하는 방법이다. 본 논문에서는 CF-mMIMO의 개념을 저궤도 위성망으로 확장했을 때, 기존의 주파수 재사용 기반 다중 빔 시스템에 대비한 용량 증대 이득을 살펴보고자 한다.

2. 시스템 모델

400km 궤도와 2GHz 대역에서 동작하는 D2C 시스템의 상향 링크를 고려한다. 하나의 위성으로 지상에 여러 개의 좁은 빔(spot beam)을 형성함으로써 동일 주파수 대역을 공간적으로 재사용하며, 이때 사용자 단말의 매우 약하고 방향성이 없는 신호를 초대형 안테나의 넓은 수신 빔으로 포착해야 한다. 이를 위해 고정 다중빔 안테나를 사용하거나 또는 대형 위상 배열 안테나를 이용하여 공간 방향성(Direction of Arrival)을 탐지하며, 좁은 폭의 적응적 빔포밍(adaptive beamforming)으로 사용자간 간섭을 완화하면서 전송률을 극대화할 수 있다.

또 다른 용량 증대 방법 중의 하나로서 다중 위성 기반의 CF-mMIMO을 고려하며, 이는 다수의 위성이 지상 단말로부터의 업링크 신호를 협력적으로 수신하고 중앙에서 처리함으로써 지상의 단말들이 사전 정의된 빔 구분 없이 공동으로 서비스하는 구조이다. 각 위성은 위상 배열 안테나를 탑재하고 있어 사용자 중심의 적응형 빔포밍이 가능하며, 여러 위성에서 수신한 상향링크 신호는 중앙 또는 분산된 중앙 처리 장치를 통해 공동 처리된다. 이때 각 사용자별로 위치, 가시성, 채널 품질 등을 기준으로 동적으로 위성의 집합(클러스터)를 결정하고, 전체 협력 구조의 이점을 유지하면서도 지역적으로 효율적인 신호 결합에 의해 수신 신호 이득을 확보하게 된다. 제한적인 수의 위성으로 클러스터를 구성하여 간섭을 완화하지만, 사용자간에 동일한 위성을 공유함으로써 사용자 간섭 발생으로 득실 관계가 고려되어야 한다.

3. 성능 비교 분석

안테나 구조와 사용자별 신호 처리 방식에 따른 용량을 비교하기 위한 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하고, 그 성능을 비교한다. 이때 다중 빔은 19 개의 정육각형 셀

구조로 모델링되며, 각 빔 별로 하나의 사용자에게 자원이 할당된다. 위성 링크의 short-term 채널은 직진파와 비직진파 성분으로 구성된 Rician-K fading을 가정하며, long-term 채널은 경로 감쇄와 더불어 양각에 의해 분산값이 결정되는 shadow fading을 가정했다. 이때 각 위성은 평판 위상배열(uniform plane array: UPA) 안테나를 사용하며, 다수의 고정 빔으로 영역 별로 사용자를 접속하는 fixed beamforming과 사용자의 위치에 따라 빔 방향을 동적으로 결정하는 adaptive beamforming 방식을 기본적인 동작 모드로 한다. 이때 사용자들의 위치는 서비스 영역에 걸쳐 균일 분포를 가지며, 이때 간단한 수준의 용량 증대 이득 효과를 확인하기 위해 모든 이상적인 조건들과 모든 사용자의 동일한 전송 전력을 가정하였다. 한편, CF-mMIMO(위성 clustering 기반 협력) 방식의 경우에는 모든 사용자에게 대해 동일한 크기의 클러스터를 가정하고(N 개의 위성을 선택), long-term fading에 따라 전력분배와 handover를 고려하지 않고 가장 좋은 링크를 갖는 위성 N 개를 선택한다.

그림 1은 UPA의 안테나 구조가 3x3와 6x6일 때 각 방식별 용량을 비교한 것이다. 이때 단일 위성의 경우에 주파수 재사용 효율성 1/3을 가정한 것이다. 이때, CF-mMIMO의 경우에는 공정한 비교를 위해 위상배열 안테나 소자의 수와 동일한 수의 위성을 가정한 것이며, 이때 각 위성은 하나의 안테나를 갖고 일정한 거리로 분포한다. 한편, 클러스터의 크기는 4로 가정했다. 이 결과에서 보는 바와 같이 CF-mMIMO 방식에 의해 주파수 효율성이 증대하며, 또한 안테나 소자의 수(또는 위성의 수)가 증가하면서 이득은 더욱 향상되는 것을 확인할 수 있다.

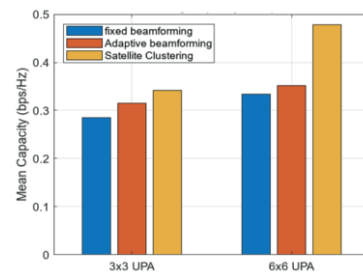


그림 1. 안테나 구조에 따른 다중빔 시스템의 용량 비교

4. 결론

매우 이상적이고 단순한 시스템 구조에서 다중 위성간의 협력을 통해 빔간 간섭을 완화하면서 D2C 서비스의 용량 증대 가능성을 확인하였다. 향후에는 보다 정확한 비교를 위해서는 클러스터 및 전송 전력의 최적화와 더불어, 위성의 이동성 등을 고려한 정교한 성능 분석이 요구된다.

참조문헌

- [1] M. Y. Abdelsadek, H. Yanikomeroglu and G. K. Kurt, "Future Ultra-Dense LEO Satellite Networks: A Cell-Free Massive MIMO Approach," 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473753.
- [2] D. -H. Jung, G. Im, J. -G. Ryu, S. Park, H. Yu and J. Choi, "Satellite Clustering for Non-Terrestrial Networks: Concept, Architectures, and Applications," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 29-37, Sept. 2023, doi: 10.1109/MVT.2023.3262360

감사의 글

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