

Starlink Direct-to-Cell 서비스의 기술 개요 및 연구 방향

조가연, *김해정, **고형석, **신원재

아주대학교 전자공학과, *건국대학교 전기전자공학부, **고려대학교 전기전자공학부

rkdus01305346@gmail.com, *haejung138@konkuk.ac.kr, **hsko99@korea.ac.kr,
**wjshin@korea.ac.kr

Starlink Direct-to-Cell Services: Recent Trend and Research Challenges

Gayeon Cho, *Haejung Kim, **Hyungseok Ko, **Wonjae Shin

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ., *Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Konkuk Univ., **School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

Starlink Direct-to-Cell(D2C) 기술은 저궤도 위성에 탑재된 eNodeB 모뎀을 통해 LTE 스마트폰과 직접 통신을 지원하여, 3 차원 커버리지(3D Coverage) 확보를 위한 중요한 기술로써 최근 많은 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 Starlink D2C 기술의 네트워크 구조 및 안테나 등의 주요 기술에 대하여 소개하고, D2C 기술의 상용화를 위한 주요 기술적 과제 및 향후 연구 방향을 제시한다.

I. 서 론

지상 셀룰러(Cellular) 네트워크는 넓은 커버리지를 확보하기 위해 다수의 무선 기지국을 배치하여 무선 접속 네트워크(RAN, Radio Access Network)를 형성하고, RAN 을 코어 네트워크와 연결하여 음성 및 데이터 서비스를 제공한다. 그러나, 이러한 지상망은 주로 도심 지역 및 인구 밀집 지역을 중심으로 설계되기 때문에, 산간 지역, 해상, 오지 등에서는 통신 사각지대가 발생한다. 특히, 재난 발생 시 신속한 통신망 복구와 통신 사각지대의 통신 접근성 확보는 여전히 중요한 과제로 남아있다.

이러한 커버리지(Coverage)의 한계를 보완하기 위한 대안으로 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 위성 통신이 주목받고 있다. 저궤도 위성은 고도 약 200~2,000 km 에서 운용되며, 정지궤도(GEO, Geostationary Earth Orbit) 위성에 비해 지연 시간(Latency)이 짧고, 주파수 재사용 효율이 높으며, 데이터 전송 속도가 빠르다는 장점을 지닌다. 이에 따라 전 지구적 커버리지를 제공하는 저궤도 위성 네트워크가 구축되고 있으며, 저궤도 위성 통신 서비스의 확장을 위해 위성과 스마트폰 간 직접 통신을 지원하는 Direct-to-Cell(D2C) 기술의 필요성이 제기되고 있다.

SpaceX 는 D2C 기술을 활용하여 별도의 단말기 변경 없이 기존 스마트폰과 저궤도 위성 간 직접 통신을 가능하게 하는 ‘Starlink Direct-to-Cell’ 서비스를 개발 중이다 [1]. Starlink D2C 서비스는 산악, 해상, 재난 지역 등 기존 인프라로 접근이 어려운 지역에서도 안정적인 통신 서비스를 제공하는 것을 목표로 한다 [1].

본 논문에서는 Starlink D2C 기술의 개념과 네트워크 구조를 소개하고, 해당 기술의 상용화를 위해 해결해야 할 주요 기술적 과제 및 연구 방향을 제시한다.

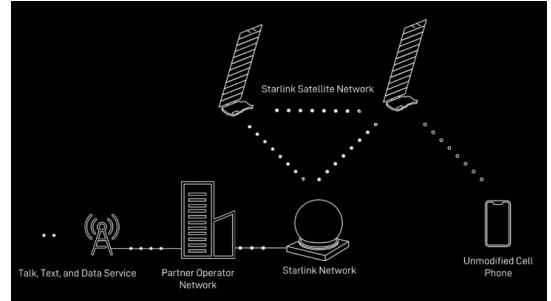


그림 1. Starlink Direct-to-Cell 네트워크 구조 [1]

II. Starlink Direct-to-Cell 기술 개요 및 현황

Starlink D2C 기술은 SpaceX 의 군집 저궤도 위성을 통해 기존 LTE 스마트폰과의 직접 연결을 지원함으로써, 지상 셀룰러 네트워크의 공백 지역에서도 통신 서비스를 가능하게 한다. Starlink D2C 시스템은 그림 1 과 같이 저궤도 위성에 탑재된 Regenerative eNodeB 모뎀을 통해 표준 LTE 스마트폰과 직접 통신하며, 이동통신사가 보유한 1.6~2.7 GHz 주파수 대역을 사용하여 서비스 링크(Service Link)를 형성한다 [2]. 위성 간 트래픽은 레이저 링크(Optical Inter-Satellite Link)를 통해 중계되어 지상 게이트웨이(Gateway)로 전달된다 [2]. 현재 Starlink D2C 서비스는 미국 T-Mobile, 일본 KDDI, 뉴질랜드 One NZ 등 다수의 글로벌 이동통신사와 파트너십을 통해 확대되고 있으며, 각 통신사는 자사 주파수를 Starlink 위성에 할당하는 방식으로 협력하고 있다 [2].

Starlink D2C 서비스의 핵심 하드웨어는 Starlink 위성의 D2C 페이로드(Payload)와 지상 게이트웨이이다. D2C 기능을 제공하는 Starlink Version 2 위성은 고출력 대형 위상 배열 안테나(Phased Array Antenna)와 Regenerative eNodeB 모뎀을 탑재한 전용 페이로드를

포함하고 있다. 2024년부터 Falcon 9 로켓을 통해 발사된 Starlink V2 Mini 위성은 크기 약 $4.1\text{ m} \times 2.7\text{ m}$, 무게 약 800 kg를 가지며, $2.7\text{ m} \times 2.3\text{ m}$ 크기의 대형 위상 배열 안테나를 탑재하고 있다 [3]. 이 위상 배열 안테나는 수백~수천 개의 방사 소자(Radiating Elements)로 구성되며, 각 소자의 위성과 진폭을 독립적으로 제어함으로써 특정 방향으로 전자적으로 빔을 형성할 수 있다 [2][3].

Starlink V2 Mini는 기존 V1.5 위성에 비해 향상된 전력 효율 및 데이터 처리 능력을 제공하며, 3GPP에서 정의한 Regenerative NTN(Non-Terrestrial Network) 구조를 기반으로, 위성 내에서 직접 신호의 복조, 디지털 처리 및 범포밍을 수행한다 [3]. Regenerative 구조는 위성이 단순히 신호를 증폭·증계하는 Transparent 구조와 달리, 위성 내부의 eNodeB 모뎀이 직접 신호를 복조·처리하므로, 위성은 자체적으로 빔을 형성하고 관리할 수 있으며, 주파수 재사용 최적화에 유리하다 [3]. 즉, 위성 내부의 eNodeB 모뎀이 지상 단말과의 직접 통신을 처리함으로써 지상의 셀룰러 네트워크와 유사한 동작이 가능해진다.

위상 배열 안테나는 기계적 회전 없이 빠른 전자식 빔 조향(Beam Steering)을 지원하므로, 고속 이동 중인 위성과 지상의 스마트폰 간 실시간 연결 유지에 효과적이다. 또한, 하나의 위성에서 다중 좁은 빔(Narrow Beams)를 동시에 생성해 주파수 재사용 이득(Frequency Reuse Gain)을 실현할 수 있으며, 이는 고밀도 지역에서의 통신 용량 증가에 기여한다. 다만, 동일한 주파수 대역에서 다수의 빔을 동시에 송출하면 간섭(Interference)이 발생할 수 있으므로, 미국 FCC(Federal Communications Commission)는 동일 지역 내 하나의 위성에서 하나의 빔만 사용할 수 있도록 주파수 간섭을 제한하고 있다.

Starlink 지상 게이트웨이는 위성에서 수신된 데이터를 지상의 인터넷 백본망(Backbone Network) 또는 이동통신사의 코어 네트워크(Core Network)로 전달하는 역할을 한다. 위성은 지상의 스마트폰과 통신한 후, 해당 데이터를 지상 게이트웨이를 통해 인터넷망 또는 각국 이동통신사의 네트워크로 연동함으로써 독립적인 end-to-end 통신을 실현한다.

III. 주요 기술적 과제 및 연구 방향

Starlink 와 같은 저궤도 위성을 이용한 D2C 통신에서는 해결해야 할 여러 기술적 과제가 존재한다.

첫째, 전파 경로 손실(Path Loss) 문제이다. 저궤도 위성 통신 환경에서는 수백 km 거리로 인해 위성과 지상 단말기 간 전파 경로 손실이 수백 dB 수준에 달할 수 있다. 이러한 손실을 보완하기 위해 고이득 안테나를 사용하여 전파를 집중시키거나, 전송 전력을 상황에 따라 조절하는 전력 제어 기술이 필요하다.

둘째, 도플러 효과(Doppler Effect) 문제이다. 약 7.5 km/s의 고속으로 이동하는 저궤도 위성은 지상 단말에 대해 최대 $\pm 50\text{ kHz}$ 수준의 도플러 편이(Doppler Shift)를 유발한다. 이는 5G 지상 네트워크에서 일반적으로 허용되는 도플러 편이 범위보다 약 50배 이상 큰 값으로, 통신 링크의 주파수 동기화 및 채널 추정 정확도에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 또한, 지상 단말기의 위치에 따라 저궤도 위성의 빔 커버리지 내에서 차등 도플러 편이가 발생할 수 있다 [4]. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 도플러 보상 기술이 필수적으로 요구된다. 구체적으로, 빔 중심에서의 도플러 편이와 사용자 단말기 위치와 빔 중심 간의 차이로 인한 잔여

도플러 편이(RDS, Residual Doppler Shift)에 대해 사전 보상을 수행하는 방안이 연구되고 있다 [4].

셋째, 위성 간 간섭(Inter-Satellite Interference) 문제이다. 저궤도 위성군은 수백 기 이상의 위성이 동일한 주파수 대역에서 통신하므로, 인접한 위성 간 또는 빔 간 커버리지가 겹칠 경우, 동채널 간섭(Co-Channel Interference)이 발생할 수 있다. 특히, 지상 단말 입장에서는 다수의 위성으로부터 동일 주파수의 신호가 도달할 수 있어, 수신 품질 저하가 발생할 가능성이 높다. 이러한 간섭을 완화하기 위해 인접 위성 또는 인접 빔에 서로 다른 주파수 채널을 할당하거나 시간·공간 차원 기반의 자원을 분할하는 방식이 요구된다. 또한, 위성 간 협력 네트워킹을 통해 간섭을 사전에 예측하고 동적으로 대응하는 분산 간섭 관리 방식도 연구 주제로 떠오르고 있다.

넷째, 주파수 관리 및 이종망(Heterogeneous Network) 간 간섭 문제이다. 위성-스마트폰 간 통신 시나리오에서는 위성 신호가 지상 통신망과 동일한 주파수 대역을 사용할 수 있으므로 NTN과 TN(Terrestrial Network) 간 간섭도 고려해야 한다. NTN과 TN의 공존으로 인한 간섭을 관리하기 위해 공간 기반 다중 접속 방식인 SDMA(Space Division Multiple Access), 전송 전력과 코드 간섭을 조절하는 NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access), 그리고 사용자 간 동적 전송률을 분할하는 RSMA(Rate-Splitting Multiple Access)과 같은 고급 다중접속 기술을 도입하는 방안도 제안되고 있다 [4].

IV. 결론

Starlink D2C 기술은 기존 셀룰러 인프라가 부족한 지역에 통신 커버리지를 제공할 수 있는 솔루션이다. SpaceX는 기존 Starlink 위성에 특수 페이로드를 장착하고, 기존 스마트폰과의 직접 통신을 가능하게 하는 위상 배열 안테나 기술을 도입함으로써 기존 LTE/4G 주파수 대역을 통해 서비스 제공을 목표로 하고 있다. 그러나 전파 경로 손실, 도플러 편이, 간섭 등 여러 기술적 과제를 해결해야 하며, 향후 5G 및 6G 기술과의 통합을 통해 서비스 확장이 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-00562095)과 정보통신기획평가원(RS-2024-00436887, RS-2024-00359235, RS-2022-0-00704, and RS-2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] <https://www.starlink.com/business/direct-to-cell>
- [2] SpaceX, "Direct to Cell First Text Update," Online Report, SpaceX, Jan. 2024. [Online]. Available: https://www.starlink.com/public-files/DIRECT_TO_CELL_FIRST_TEXT_UPDATE.pdf.
- [3] 3GPP, TR 38.821 v16.0.0, "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)," Jan. 2020.
- [4] M. Toka et al., "RIS-Empowered LEO Satellite Networks for 6G: Promising Usage Scenarios and Future Directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 11, pp. 128-135, Nov. 2024.