

저궤도 위성통신망에서 위치정보 기반 지상 단말 핸드오버 기법

이용화, 김성훈*, 박준환, 정건진, 최지환*

한화시스템, *한국과학기술원

{yhlee0930, wnsghks7045, gunjin.jung}@hanwha.com, *{seonghoonkim, jhch}@kaist.ac.kr

Ground Terminal Handover Method of Military Purpose LEO Satellite Networks

Yonghwa Lee, Seonghoon Kim*, Junhwan Park, Geonjin Jung and Jihwan P. Choi*

Hanwha System, *KAIST

요약

최근, Starlink를 필두로 본격적으로 저궤도 위성망이 구축되며 안정적인 링크 연결 및 서비스를 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 특히, 전통적인 정지궤도 위성과 달리 저궤도 위성의 빠른 이동과 사용자의 이동에 의한 핸드오버는 유연한 망 운용과 서비스 연속성을 제공하기 위한 필수 기술이다. 저궤도 위성망과 비지상망이 5G와 6G에서 주요 시스템으로 주목받으며 사용자의 이동이 빈번한 지상망의 핵심 기술인 핸드오버를 접목하기 위해 활발히 연구가 수행되고 있다. 따라서, 본 논문은 저궤도 위성통신 시스템에서 서비스 연속성 지원할 수 있는 핸드오버 트리거 이벤트 설계에 대해 핵심 파라미터인 offset, hysteresis 및 TTT에 따른 핸드오버 성능을 분석한다.

I. 서론

3G를 시작으로 5G까지 이동통신망은 통신기술의 세대가 변화함에 따라 엄청난 성과를 이뤄왔고 최근 지상망 중심의 구조에서 5G와 6G 기술의 발전으로 비지상망(NTN; non-terrestrial network)이 주요 시스템으로 부상하고, 위성통신 기술도 핵심 기술로 채택되어 다시 한번 기술 발전의 전성기를 맞이하고 있다[1]. 특히, 저궤도 위성망 구축의 선두주자인 Starlink를 시작으로 안정적인 통신 성능을 지원하기 위해 정지궤도 위성 통신에서 크게 고려하지 않던 기술에 대한 요구가 증가하고 있다.

대표적인 요구 기술 중 저궤도 위성망에서 신뢰성 있는 망 접속과 이동에 따른 연속성을 지원하는 핸드오버가 있다. 고정된 단말 혹은 지상국 사이에 송수신 데이터의 중계역할을 수행하는 전통적인 정지궤도 위성통신에서 단말의 이동성은 주요 고려대상이 아니었다. 또한, 저궤도 위성망의 고유특성에 의해 이동성을 갖는 대상과 핸드오버를 위한 트리거 이벤트 설계의 두 가지 관점에서 지상망과 가장 큰 차이로 저궤도 위성통신 환경에 고도화된 지상망의 기술을 적용하는 큰 도전과제를 갖는다.

저궤도 위성통신에서 이동성을 갖는 대상은 기존 지상망의 사용자 단말과 더불어 기지국 역할의 위성으로 더욱 확장되었다. 또한, 기존 지상망에서는 단말의 수신신호 세기를 핸드오버의 시작 시점을 판단하는 트리거 이벤트의 주요 파라미터로 활용하였으나, 위성의 높은 고도에 의해 셀 중심과 가장자리의 명확한 구분이 어려워 동일한 설계 방법을 적용할 수 없게 되었다[2].

유연한 핸드오버를 지원하기 위해 3GPP WG RAN2 NTN 표준에서 조건부 핸드오버(conditional handover) 기법에서 reference 위치정보를 활용한 핸드오버 트리거 이벤트 설계방안을 제시하였다[3]. 최근, NTN과 저궤도 위성망에서 위치정보를 활용하는 핸드오버 관점에서 다양한 연구가 수행되었으나, 대부분 위성이동에 따른 기술에 주목하여 저궤도 위성망에서 단말 이동에 따른 트리거 이벤트 설계 분야는 미비한 상황이다. [4],[5]의 연구는 지상 이동통신 구조의 저궤도 위성망에서 위성의 이동에 의한 단

말 핸드오버 시나리오에 관한 트리거 이벤트 성능을 분석하였다. [6]의 연구에서는 단말 위치에 기반한 성능을 분석하였으나, 정지궤도 위성통신의 단말 핸드오버를 고려하여 저궤도 위성망의 특성이 반영되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 저궤도 위성통신 시스템에서 신뢰성 있는 핸드오버 수행 기준을 제시하기 위한 초기 연구로써 위성망과 이동하는 단말의 위치정보를 활용하는 트리거 이벤트에 따른 핸드오버 성능 분석 결과를 제시한다.

II. 시스템 모델

저궤도 군집 위성망을 활용한 한반도에 위성통신 서비스를 제공하는 시나리오를 사용한다. 위커-델타 모델로 저궤도 위성망을 구축하고, 특정 지역에 고정적으로 빔을 조향할 수 있는 위성 탑재 안테나를 통해 지상에 형성하는 footprint는 3dB 빔 폭의 반경을 갖는 빔을 가정한다. 마지막으로 한반도 육지 내에서 이동하는 지상 단말을 배치한다. 단말의 이동 경로는 Great-circle navigation 방식으로 출발지와 목적지 사이의 구면 최단 경로를 도출한다.

3GPP 표준은 Offset, hysteresis 및 TTT(time-to-trigger)의 파라미터를 활용한 단말의 수신신호 세기와 단말의 위치와 기준 위치정보를 활용한 트리거 이벤트의 기준을 제시하고 있다[2],[3]. 지상망에서 제시된 트리거 이벤트 설계 방식을 기반으로 저궤도 위성망 내 단말 이동에 의한 핸드오버 환경에서 거리 기반의 트리거 이벤트를 설계한다.

핸드오버 트리거를 시작과 종료 기준 설계에 사용되는 offset과 hysteresis를 통합하여 서빙 빔과 타겟 빔 사이의 거리에 대한 파라미터인 handover margin(HOM)과 단말의 이동속도에 따라 상이한 TTT의 적용 가능성을 차단하고 통합된 기준을 제시하기 위해 이동속도를 거리에 대한 파라미터로 표현하는 DTT(distance-to-trigger)를 제안한다.

HOM과 DTT 파라미터를 통해 entering region($d_n + HOM < d_s$)

과 leaving region($d_n + HOM > d_s$)을 정의할 수 있다. d_s 과 d_n 은 각각 위성의 안테나에 의해 지상에 형성된 서빙 빔 및 인접 빔과 지상 단말 사이의 거리를 나타낸다. 저궤도 위성망에서 설계된 트리거 이벤트에 따른 entering region과 leaving region 및 DTT 파라미터에 대해 지상 단말이 이동함에 따라 각 조건의 만족 여부를 확인하여 핸드오버 여부 및 수행 과정을 제어할 수 있다.

핸드오버의 성능 분석을 위해 매 연결 당 단말이 전송할 수 있는 데이터의 처리량, 핸드오버 시작 지점을 확인할 수 있는 단말과 서빙 빔 사이의 평균 거리와 단위 시간 동안 핸드오버의 발생율의 세 가지 측면에서의 성능 지표를 활용하여 제시한 파라미터에 대한 핸드오버 트리거 이벤트의 성능을 분석한다.

III. 시뮬레이션 결과

저궤도 위성망에서의 핸드오버 성능을 분석하기 위해 Starlink의 Phase1의 1,100km 고도와 53.8도의 경사도에서 1,600기의 위성이 32개의 궤도면을 따라 이동하는 하는 군집 저궤도 위성 모델을 사용한다. 충분한 위성-지상 간 연결 시간을 제공할 수 있도록 최소 고각(minimum elevation angle)은 3GPP NTN 표준에 제시된 10도를 적용한다. 이 때, 위성이 지상에 형성하는 footprint는 120km 직경의 hexagonal 형태의 다중빔 배치 구조를 사용한다. 단순한 단말 이동 환경을 구축하기 위해 위성 다중빔 구조에서 서로 다른 임의의 10개 지점을 순차적으로 이동하는 시나리오를 사용한다. 단말은 1,000km/h의 속력으로 설정하여 핸드오버 시나리오 상 최악의 경우를 고려하고 핸드오버 수행을 위한 트리거 이벤트를 위해 매 1초 단위로 단말의 위치를 관찰한다.

핸드오버 수행을 위한 트리거 이벤트 및 기준에 따른 성능 평가를 위해 HOM은 빔 간 경계 지점을 기준으로 [-10km ~ +10km]의 값을 1km 간격으로 변경하고 DTT는 단말의 속도에 따라 이동 거리를 [0km ~ 10km]의 값을 2km 간격으로 변경하여 각 성능 지표의 결과를 확인한다. 서로 다른 임의의 출발지와 목적지를 갖는 시나리오 50개의 시뮬레이션을 수행하여 산술 평균을 도출하여 그림 1에 (a)서빙 빔과의 거리, (b)단위 시간 당 핸드오버 발생률 및 (c)연결 당 단말의 최대 처리량 결과를 도식화하였다.

먼저, 그림 1(a)를 통해 핸드오버 트리거는 설정된 DTT 값과 1:1 매핑되는 HOM 지역에서 발생하고 서빙 빔의 중심점과 근접한 지역에서 각 파라미터 별 최솟값을 갖음을 확인할 수 있다. 그림 1(b)를 통해 모든 경우에 대해 타겟 빔과 근접한 위치에서 핸드오버를 수행하는 환경에서 핸드오버 발생 빈도가 감소하는 결과가 도출되었다. 이를 통해 타겟 빔과 근접할수록 핸드오버 성능을 저하의 주된 요인인 ping-pong의 발생 가능성도 함께 감소함을 확인할 수 있다. 마지막으로 그림 1(c)는 핸드오버 발생 빈도와 밀접한 연관성으로 핸드오버와 ping-pong 발생 빈도가 감소하는 환경에서 더 높은 성능의 처리량을 제공할 수 있음을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 고정된 서비스 지역에 저궤도 위성통신망을 운용하는 환경에서 단말의 이동에도 안정적인 통신을 지원할 수 있는 핸드오버 기술에 대해 분석하였다. 종래의 저궤도 위성망의 특성을 반영하여 단말의 위치와 서비스 지역의 셀 중심위치에 대한 reference 위치정보를 활용한 트리거 이벤트를 설계했다. 또한, MATLAB을 활용한 시뮬레이션으로 설계된 파라미터의 변화에 따른 핸드오버 성능의 경향성을 파악해보았다. 시뮬레이션 결과를 통해 트리거 이벤트 설정에 대한 서빙 빔의 위치와의 관계 및 처리량에 대한 trade-off를 확인할 수 있었다. 그러나, 단순히 거리

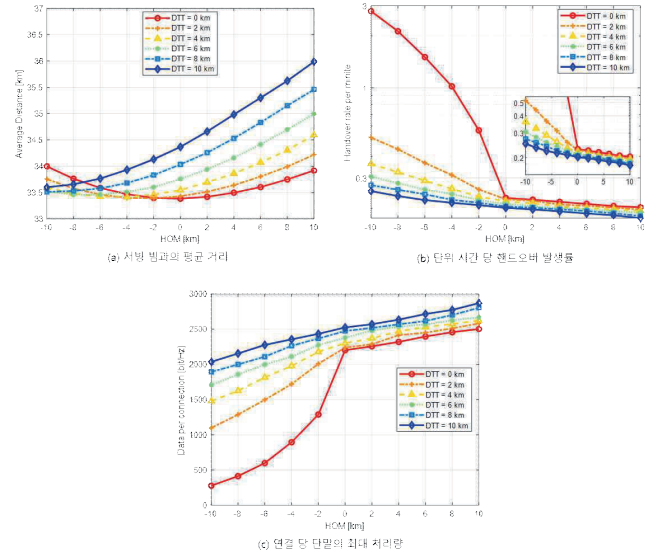


그림 1. 성능 지표별 분석 결과. (a)서빙 빔과의 평균 거리, (b)단위 시간당 핸드오버 발생률, (c)연결 당 단말 최대 처리량

정보만 활용한 트리거 이벤트 성능 평가 결과를 통해 단일 해를 도출할 수 없다. 따라서, 트리거 이벤트 설계 방식을 확장하여 ping-pong 및 단말의 처리량 등의 성능지표를 통합한 최적 핸드오버 트리거 이벤트를 설계하고 성능을 평가할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-079)

참고 문헌

- [1] F. Wang, D. Jiang, Z. Wang, J. Chen and T. Q. S. Quek, "Seamless handover in leo based non-terrestrial networks: Service continuity and optimization", IEEE Transactions on Communications, vol. 71, no. 2, pp. 1008-1023, 2023.
- [2] 3GPP TR 38.821 "Study for NR to support non-terrestrial network (NTN) (Rel. 16)," v.16.2.0, Mar. 2023.
- [3] 3GPP TR 38.331 "NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Rel. 18)," v.18.5.1, Mar. 2025.
- [4] E. Juan, M. Lauridsen, J. Wigard, and P. Mogensen, "Performance evaluation of the 5G NR conditional handover in LEO-based non-terrestrial networks," IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC), Apr. 2022.
- [5] E. Juan, M. Lauridsen, J. Wigard, and P. Mogensen, "Location-based handover triggering for low-Earth orbit satellite networks," IEEE Veh. Technol. Conference(VTC-Spring), Jun. 2022.
- [6] 장희연, 정소이, 조인섭, 김준영, "위성 네트워크를 위한 위치 정보 기반 빔 간 핸드오버 이벤트 성능 분석," 한국전자통신학회 논문지, 제19권, 제3호, 2024 pp. 483-496.