

저궤도 위성통신 환경에서의 RACH-less 기반 DAPS 핸드오버 알고리즘

오하빈, 이종태, 이정훈, 김재현*

아주대학교 AI융합네트워크학과, *아주대학교 전자공학과

{habeen0727, jtlee830, geniuslee20, *jkim}@ajou.ac.kr

RACH-less Based DAPS Handover Algorithm in Low Earth Orbit Satellite Communication Systems

Habeen Oh, Jongtae Lee, Junghun Lee, Jae-Hyun Kim*

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou Univ.,

*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.

요약

본 논문에서는 저궤도 위성의 고속 이동으로 인해 발생하는 빈번한 핸드오버와 긴 전파 지연에 따른 mobility interruption time (MIT) 문제를 해결하기 위해 dual active protocol stack (DAPS) 기반 핸드오버 절차에 random access channel (RACH)-less 방식을 결합한 핸드오버 알고리즘을 제안한다.

I. 서론

Low Earth orbit (LEO) 위성 통신은 전지구적 커버리지를 제공하지만, 높은 이동 속도로 인해 빈번한 핸드오버와 긴 전파 지연으로 quality of service (QoS)를 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 3rd generation partnership project (3GPP)에서는 serving 셀과 target 셀의 연결을 동시에 유지하는 dual active protocol stack (DAPS) 핸드오버 절차를 표준에 정의하였다 [1]. 기존 DAPS 절차는 핸드오버 중 두 개의 프로토콜 스택을 동시에 유지함으로써 데이터 단절을 완화할 수 있다. 그러나 target 셀로의 초기 접속 과정에서 random access channel (RACH) 절차로 인한 추가적인 지연이 발생하며, 불필요한 데이터 중복 전송과 mobility interruption time (MIT) 감소의 한계가 존재한다.

본 논문에서는 DAPS 기반 핸드오버 절차에 RACH-less 방식을 결합함으로써, target 위성과의 초기 접속 지연을 제거하고 기존 DAPS 절차의 구조적 한계를 극복하는 핸드오버 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 LEO 위성 환경에서 핸드오버 MIT를 효과적으로 최소화한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 고도 h km에서 운용되는 M 개의 위성을 고려하며, 지상에서는 N 개의 단말이 배치된 환경을 가정한다. 각 위성은 regenerative payload를 탑재하여 기지국 기능을 직접 수행한다. 단말과 위성 간의 채널 모델은 3GPP 문서에 정의된 저궤도 위성 채널 모델을 활용한다 [2]. 위성과 단말 간의 연결은 최소 고도각 및 최소 Reference Signal Received Power (RSRP) 조건을 동시에 만족하는 경우에만 성립한다.

III. 제안하는 알고리즘

본 논문에서는 저궤도 위성 환경에서 핸드오버 과정 중 발생하는 서비스 단절을 최소화하기 위해, DAPS 기반 핸드오버 절차에 RACH-less 방식을 결합한 핸드오버 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방식은 serving 위성

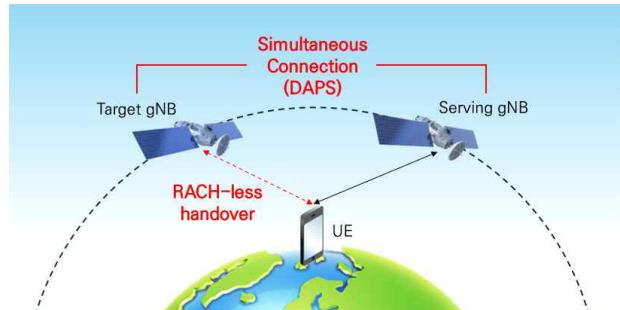


그림 1. 시스템 모델

과의 연결을 유지한 상태에서 target 위성의 프로토콜 스택을 사전에 구성한다. 그리고 random access 절차를 생략함으로써 두 링크를 동시에 활성화하는 make-before-break 방식의 핸드오버를 수행한다.

단말은 A3 이벤트 조건이 충족되면 serving 위성으로 Measurement Report (MR)를 전송한다. 이때 MR에는 serving 위성과 target 위성에서 측정된 RSRP 값과 함께, RACH-less 핸드오버 수행을 위해 단말이 선택한 physical RACH preamble ID가 포함된다. A3 이벤트 트리거 조건은 아래와 같이 정의된다.

$$RSRP_T > RSRP_S + offset, \quad (1)$$

$RSRP_T$ 와 $RSRP_S$ 는 target 위성과 serving 위성에서 측정된 RSRP 값이며, $offset$ 은 핸드오버 결정을 위한 오프셋 값이다. MR을 수신한 serving 위성은 핸드오버를 수행 여부를 결정한 후, 단말의 context 정보를 포함한 Handover Request를 target 위성으로 전달한다. Target 위성은 admission control을 수행하여 DAPS 핸드오버에 필요한 무선 리소스 및 프로토콜 설정을 준비한다. 이후 target 위성은 RACH-less를 위해

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
위성 고도	600 km
위성 속도	7.56 km/s
중심 주파수	2.6 GHz
단말의 송신 파워	47.0103 dBm
최소 고도각	25°
RSRP 임계값	-110 dBm

uplink (UL) grant를 사전에 할당하고, 이를 포함한 Handover Request Acknowledge를 serving 위성으로 전송한다. Serving 위성은 단말에게 Handover Command를 전송하여 target 위성의 무선 설정 정보와 사전에 할당된 UL grant를 포함한 핸드오버에 필요한 제어 정보들을 제공한다. 단말은 Handover Command를 수신한 이후에도 serving 위성과의 연결을 즉시 해제하지 않고 유지하며, 동시에 target 위성과 연결함으로써 dual connectivity 상태로 진입한다. 이 과정에서 단말은 serving 위성을 통한 데이터 수신을 지속하면서, target 위성과의 링크가 형성될 때 까지 두 링크를 동시에 유지한다. 사전에 할당된 UL grant를 이용하여 단말은 random access 과정을 생략하고, target 위성으로 Radio Resource Control Connection Reconfiguration Complete를 전송한다. Target 위성은 해당 메세지를 수신함으로써 핸드오버 성공을 확정하며, 이후 단말의 UL 및 DL 데이터 전송은 target 위성을 통해 수행된다. Serving 위성과의 연결은 DAPS 타이머에 따라 일정 시간 유지된 후 해제되며, 단말은 target 위성과의 단일 연결 상태로 전환되어 핸드오버 절차를 종료한다.

IV. 성능 분석

본 논문에서는 network simulator-3 (ns-3) 시뮬레이터를 활용하여 DAPS 기반 핸드오버 절차에 RACH-less 방식을 결합한 핸드오버 알고리즘의 성능 분석을 진행한다. 시뮬레이션 환경은 2기의 regenerative 위성과 1개의 단말을 배치한다. 3GPP의 system level simulation (SLS)의 study case 9을 기반으로 시스템 모델을 구성한다 [2]. 단말과 위성 간의 채널 모델은 3GPP 문서에 정의된 rural 채널 환경을 활용한다 [3]. 제안한 알고리즘은 성능 분석을 위해 time-to-trigger (TTT) 값을 {0, 64, 128, 256, 512, 1024} ms로 구성한다. 성능 지표로는 핸드오버 과정에서 발생하는 MIT를 사용한다. MIT는 단말이 serving 위성으로부터 마지막 데이터 패킷을 수신한 시점부터, target 위성을 통해 첫 번째 데이터 패킷을 성공적으로 수신하기까지의 시간까지로 정의한다.

그림 2는 기존의 하드 핸드오버, RACH-less 핸드오버, 제안하는 DAPS 기반 RACH-less 방식을 결합한 핸드오버의 MIT 성능을 비교하여 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 기존의 하드 핸드오버 방식은 LEO 위성의 긴 전파 지연 환경에서 RACH 절차를 완료될 때까지 데이터 전송이 완전히 중단되므로 평균 53.35 ms의 높은 MIT가 측정되었다. RACH 절차를 생략한 RACH-less 핸드오버 방식은 target 위성으로의 접속 시간을 단축시켜 평균 MIT를 16.10 ms까지 감소시켰으나, serving 위성과의 연결을 끊고 target 위성으로 전환하는 과정에서 여전히 데이터 중단이 발생한다.

기존 방식들은 TTT 256 ms 지점에서 MIT가 급감하는 비선형적 특성을 보이는데, 이는 해당 시점이 단말과의 거리가 가까워지는 최대 고도각 지점으로 접속 지연이 최소화되는 최적의 실행 지점이기 때문이다. 그러나 TTT가 이보다 짧거나 길어지면 단말과의 거리가 멀어져 다시 MIT가 증가하는 성능 편차가 나타난다.

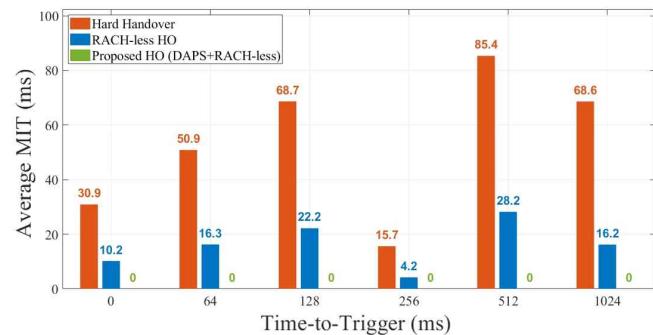


그림 2. 핸드오버 방식에 따른 mobility interruption time 분석 결과

반면, 본 논문에서 제안하는 DAPS 기반 RACH-less 방식을 결합한 핸드오버는 target 위성과의 접속 절차 동안에도 serving 위성과의 데이터 링크를 유지하는 dual active 동작과 random access 절차를 생략하는 RACH-less 방식을 동시에 적용한다. 제안 기법은 핸드오버 구간에서의 데이터 전달을 연속적으로 보장함에 따라 모든 시뮬레이션에서 0 ms의 MIT가 측정되었다. 이는 각각 기존의 방식 대비 평균 53.35 ms, 16.10 ms 감소시킨 결과이다. 제안하는 방식은 LEO 위성 통신 환경에서도 끊김 없는 데이터 전송을 제공함으로써 위성 통신 서비스에 최적화된 핸드오버 성능임을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 통신 환경의 긴 전파 지연과 높은 이동성으로 인해 발생하는 빈번한 핸드오버 및 서비스 중단 문제를 해결하기 위해 DAPS 기반의 RACH-less 방식을 결합한 핸드오버 알고리즘을 제안하고, 기존의 방식과 비교하여 MIT 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과, 기존의 하드 핸드오버와 RACH-less 핸드오버 방식은 각각 평균 53.35 ms, 16.10 ms의 높은 데이터 중단 시간을 보인다. 반면, 제안하는 방식은 target 위성과 연결하는 과정에서도 serving 위성과의 데이터 링크를 유지함으로써, 모든 시뮬레이션 환경에서 MIT 0 ms를 달성하였다. 이를 통해 제안하는 방식이 LEO 위성 통신 환경에서 데이터 전송의 연속성을 보장하며, 빈번한 핸드오버 상황에서도 실시간 QoS를 효과적으로 유지할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획 평가원과 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00396992, No. RS-2024-59330030).

참 고 문 헌

- [1] 3GPP TS 38.331 v17.1.0, “5G; NR; Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 17),” Aug. 2022.
- [2] 3GPP TR 38.821 v16.2.0, “Solution for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16),” Mar. 2023.
- [3] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, “Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15),” Sep. 2020.