

저궤도 위성 네트워크 시스템 수준 모델링 기반 업링크 랜덤 액세스 성능 분석

최민지, 박소민, 곽희주, 유철우*
명지대학교

choiminji@mju.ac.kr, thalsi@mju.ac.kr, wopelt8@mju.ac.kr, *cwyou@mju.ac.kr

Performance Analysis of Uplink Random Access in Low Earth Orbit Satellite Networks Based on System-Level Modeling

Minji Choi, Somin Park, Heeju Kwak, Cheolwoo You*
Myongji Univ.

요약

본 논문에서는 지상 단말에서 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성으로의 업링크 랜덤 액세스 성능 특성을 정량적으로 분석하기 위해 3GPP TR 38.821 을 기반으로 링크 레벨 및 시스템 레벨의 시뮬레이터를 구축하고 결과를 분석한다. 링크 레벨에서는 LEO 위성 채널의 경로 손실 및 페이딩 특성을 반영하고, Zadoff-Chu 시퀀스 기반 프리앰블 상관 검출 구조를 구현하여 수신 조건에 따른 프리앰블 검출 성능과 임계값 설정 영향을 분석한다. 시스템 레벨에서는 4-step 경쟁기반 랜덤 액세스 절차를 모델링하고 프리앰블 충돌, 백오프 및 재시도 과정을 포함해 접속 성공률과 랜덤 액세스 지연을 평가한다. 시뮬레이션 결과, 백오프 및 재시도 정책을 강화할수록 접속 성공률은 증가하지만 평균 접속 지연 또한 증가하는 트레이드오프가 확인되었다. 이러한 결과는 LEO 위성 환경에서 기존 지상 랜덤 액세스 운용만으로 성공률과 지연 요구를 동시에 만족시키기 어렵다는 점을 보여준다. 이는 빠르게 변화하는 LEO 위성 통신 환경에 적응하는 랜덤 액세스 파라미터 제어와 시스템 설계 연구의 필요성을 제기한다.

I. 서론

비지상망(Non-Terrestrial Network, NTN)은 지상 기지국 인프라가 부족한 지역에서도 전지구적 커버리지를 제공할 수 있어 차세대 이동통신의 핵심 구성 요소로 주목받고 있다. 특히 저궤도 (Low Earth Orbit, LEO) 위성은 전 지구적 서비스 구현에 높은 비용이 요구되어 제한적으로 논의되어 왔으나, 최근 발사 비용 절감과 소형 위성 기반 상용화가 진행되면서 Starlink, OneWeb 과 같은 LEO 위성 군집 서비스가 확대되고 있다[1]. 그러나 LEO 위성은 고속 이동으로 인해 링크 품질이 시간에 따라 빠르게 변화한다. 그 결과, 큰 경로 손실과 도플러 변화가 발생하며, 빔 커버리지가 지표면을 따라 이동하고 가시 시간도 제한되어 동일 단말이라도 시각에 따라 수신 조건이 크게 달라진다. 이러한 환경에서는 초기 접속 단계에서 신뢰할 수 있는 링크를 확보하는 것이 전체 서비스 품질을 좌우하며, 업링크(Uplink, UL) 랜덤 액세스(Random Access, RA) 절차의 성능과 안정성이 핵심 요소로 작용한다.

II. 본론

본 논문에서는 지상 단말이 LEO 위성으로 데이터를 전송하는 업링크 통신을 고려한다. 다수 단말이 제한된 PRACH(Physical Random Access Channel) 자원을 공유하는 상황에서 단말들은 프리앰블을 확률적으로 선택하는 경쟁 기반 랜덤 액세스(Contention-Based Random Access, CBRA)과 4-step RA 를 사용한다고 가정한다. 단말은 RAO(Random Access Occasion)에서 프리앰블(Msg1)을 전송하고, 위성은 프리앰블을 검출해 RAR(Random Access Response, Msg2)을 송신한다. 단말은 RAR window 내에 Msg2 를 수신해야 한다.

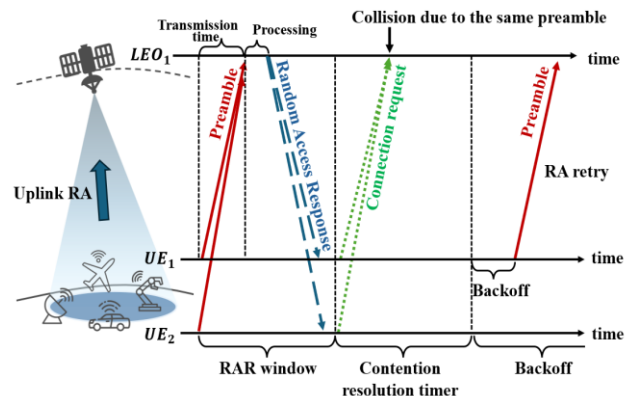


그림 1. LEO 업링크 RA 환경에서 4-step CBRA 절차

Msg2 를 수신한 단말은 Msg3(connection request)를 전송하고, 위성은 단말이 Contention resolution timer 내에 Msg4(contention resolution)를 수신하도록 하여 성공 여부를 통보한다. Msg2 또는 Msg4 를 수신하지 못한 경우에 단말은 백오프(Backoff) 이후 재시도하며 최대 시도 횟수 초과 시 RA 절차를 중단한다. 그림 1 은 LEO 위성 환경에서 동일 프리앰블 선택으로 충돌이 발생한 경우의 예시로, 4-step CBRA 절차와 RAR window, Backoff 등에 따른 재시도 흐름을 도시한다. 초기 접속 단계이므로 기지국 피드백이 제한된 상황을 반영하여 Open-loop power control(OLPC)을 가정하고, 재시도 시 송신 전력이 단계적으로 증가하는 OLPC 의 전력 램핑(Tx Power Ramping Step, TPRS) 변수를 통해 송신 전력 변화를 반영하였다. 여기서 TPRS 는 재시도 시 적용되는 송신 전력 증가량을 의미한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터들

Parameter	Value
Satellite altitude	600 km
Satellite velocity	7.56 km/s
Spot-beam coverage size	Radius 50 km
Initial Tx power	17 dBm
Maximum Tx power	30 dBm
Preamble transMax	12
TPRS candidates	{0, 2, 4, 6}
BI candidates	{80, 240, 480, 960}
RAR window	8 ms

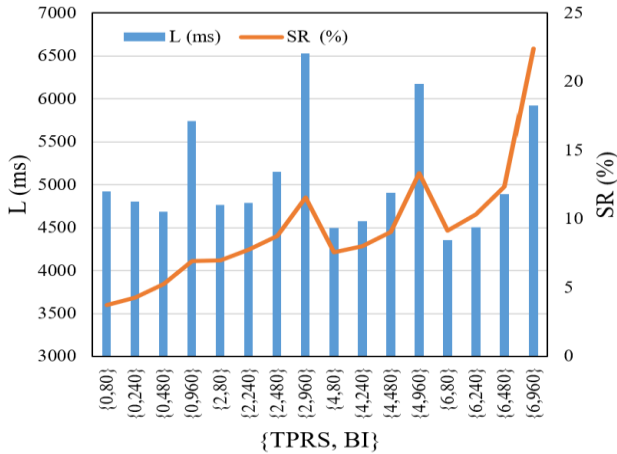


그림 2. {TPRS, BI} 조합에 따른 접속 성공률(SR)과 평균 RA 지연(L)

고려하는 LEO 위성 시스템 환경에서 프리앰블 탐지 성능을 분석하기 위한 링크 레벨 시뮬레이션을 수행하였다. 프리앰블은 Zadoff-Chu(ZC) 시퀀스(길이 139)를 사용하고 개수는 64 개로 설정하였다. 수신 전력은 -101 dBm 에서 -110 dBm 까지 변화시키며 각 경우 2,000 회 몬테카를로 실험을 수행하였다. 잡음 지수는 1.2 dB, 샘플링 주파수는 30.72 MHz 로 설정했으며 LEO 위성의 LOS(Line of Sight) 특성을 반영하기 위해 K factor 가 10 dB 인 Rician 페이딩과 위성의 속도 7.56 km/s 기반 도플러 편이를 적용하였다. 수신기는 64 개 프리앰블에 대해 병렬 상관 연산을 수행하고, 출력 진폭을 정규화하여 탐지 지표로 사용하였다. 탐지 성공은 단 하나의 상관 출력만 임계값을 초과하고 그 인덱스가 실제 프리앰블과 일치하는 경우로 정의하였다. 분석 결과, 임계값이 과도하게 낮으면 오탐지가 증가하고, 과도하게 높으면 미탐지로 인해 성능이 급격히 저하되었으며 이를 바탕으로 시스템 레벨 시뮬레이션에서는 목표 수신 전력 -107 dBm 및 탐지 임계값 0.24 를 운용점으로 사용하였다.

시스템 레벨 시뮬레이션에서는 3GPP TR 38.821 을 참조하여 위성 고도 600 km, 공전 속도 7.56 km/s, spot beam 크기 100 km 를 가정하고 빔 중심을 프레임마다 갱신하여 커버리지가 연속적으로 이어지도록 모델링하였다[2]. 지상 영역은 가로 300 km, 세로 100 km 로 설정하였고, 단말 수는 40,000 개를 고려하였으며 단말의 최초 접근 시점은 Beta(3,4) 분포를 따른다고 가정하였다. OLPC 의 전력 램핑(TPRS) 후보 {0, 2, 4, 6} dB 와 백오프 지시자(Backoff Indicator, BI) 후보 {80, 240, 480, 960} ms 로 구성된 16 개 조합을 평가하였다.

[3][4]. 그 외 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 표 1 에 요약하였다.

그림 2 는 {TPRS, BI} 조합에 따른 접속 성공률(Success Rate, SR)과 RA 지연 성능(Latency, L)을 제시한다. 실험 결과, TPRS 또는 BI 가 커질수록 SR 이 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 반면 BI 가 커질수록 재시도 간 대기 시간이 길어져 평균 지연 L 또한 함께 증가하였다. 즉, 높은 SR 을 달성하는 조합일수록 지연이 커지는 트레이드오프가 확인되었으며, 이는 LEO 위성 통신 환경에서 기존 지상 네트워크에서 사용하는 고정 파라미터 기반 RA 운용만으로 성공률과 지연 요구를 동시에 만족시키기 어렵다는 점을 시사한다. 또한 예를 들어 단말이 URLLC(Ultra-Reliable Low Latency Communication)와 같은 초저지연을 요구하는 단말일 경우, 성공률과 지연 사이의 트레이드오프가 따를 수 있다. 따라서 LEO 위성 통신 환경에서는 단말 특성 및 혼잡도 변화에 따라 TPRS 와 BI 를 적응적으로 조정하는 파라미터 제어 기법에 대한 연구가 필요하다.

III. 결론

본 논문에서는 LEO 위성을 고려한 UL RA 환경에서 성능 특성을 정량적으로 분석하기 위해, 링크 레벨에서 프리앰블 탐지 성능을 평가하고 시스템 레벨에서 4-step CBRA 절차를 모델링하여 접속 성공률과 RA 지연을 분석하였다. 링크 레벨 결과를 바탕으로 시스템 레벨 운용점을 설정하고, OLPC 의 전력 램핑 스텝(TPRS)과 백오프 지시자(BI) 조합에 따른 성능 변화를 비교하였다. 분석 결과, TPRS 또는 BI 를 크게 설정할수록 RA 접속 성공률은 향상되는 반면, 재시도 대기 시간이 누적되면서 평균 RA 지연이 함께 증가하는 트레이드오프가 확인되었다. 이는 LEO 환경의 채널 및 혼잡도 변동성 하에서 기존 지상망의 RA 운용만으로 성공률과 지연 요구를 동시에 만족시키기 어렵다는 점을 시사한다. 향후 연구에서는 LEO 위성 통신의 변화하는 채널 상태와 지상의 단말 혼잡도를 반영하는 TPRS 및 BI 를 포함한 RA 파라미터를 적응적으로 조정하는 파라미터 제어 기법을 설계하고, 다양한 운용 제약을 포함한 분석으로 확장할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00335012). 또한, 본 과제(결과물)는 2025 년도 교육부 및 경기도의 재원으로 경기 RISE 센터의 지원을 받아 수행된 경기 지역혁신중심 대학지원체계(경기 RISE 사업)의 연구 결과임(2025-RISE-09-A15).

참고 문헌

- [1] Kotheli, Oltjon, et al. "Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges." IEEE Communications Surveys & Tutorials 23.1 (2020): 70-109.
- [2] 3GPP, "Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)," TR 38.821, V16.2.0, Release 16, ETSI, 2023.
- [3] 3GPP, "NR; Radio Resource Control(RRC) Protocol Specification,"TS 38.331, V17.1.0, Release 17, ETSI, 2022.
- [4] 3GPP, "NR; Medium Access Control(MAC) Protocol Specification,"TS 38.321, V17.1.0, Release 17, ETSI, 2022.