

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, *cwyoo@mju.ac.kr

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

Minji Choi, Somin Park, Heejoo 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 시뮬레이터들을 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 시작에 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)를 송신한다. 단말은 RAR window 내에 Msg2 를 수신해야 한다.

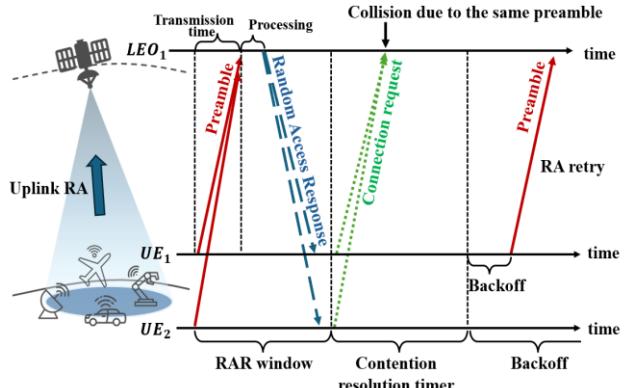


그림 1. LEO 업링크 RA 환경에서 4-step CBRA 절차

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 램프ing(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

