

직접 위성 통신을 위한 기회적 전송 기법에 관한 연구

이채혁[§], 이시연[§], 이원호[§], 방인규[†] ■, 김태훈[§] ■[§]국립한밭대학교 컴퓨터공학과, [†]국립한밭대학교 지능미디어공학과

{20242073, 20242032, 30251273}@edu.hanbat.ac.kr, {ikbang, thkim}@hanbat.ac.kr

Research on Opportunistic Transmission Technique for Direct-to-Satellite Communications

Chaehyeok Lee[§], Siyeon Lee[§], Wonho Lee[§], Inkyu Bang[†] ■, Taehoon Kim[§] ■[§]Department of Computer Engineering, Hanbat National University[†]Department of Intelligence Media Engineering, Hanbat National University

요약

저궤도 위성을 활용한 통신 환경에서는 위성의 넓은 커버리지로 인해 다수의 단말이 동시에 접근함에 따라 충돌이 빈번하게 발생한다. 본 논문에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 기회적 전송(opportunistic transmission) 기법을 도입함으로써, 위성 직접 통신 환경에서 자원 효율성과 서비스 성능을 향상시키고자 한다. 제안 기법을 이론적으로 분석하고, 모의실험을 통해 제안 기법의 타당성을 입증하고자 하난.

I. 서론

최근 저궤도 위성(LEO, Low Earth Orbit)을 활용한 직접 위성 통신(Direct-to-Satellite Communication) 기술이 차세대 네트워크의 핵심 구성 요소로 주목받고 있다. LEO 위성은 지상 기지국보다 훨씬 넓은 커버리지를 제공하며, 지리적 제약 없이 원격 지역에서도 안정적인 통신 서비스를 제공할 수 있다 [1].

그러나 기존의 이동통신망과 동일한 허가 기반 스케줄링(grant-based scheduling) 방식을 적용할 경우, LEO 위성의 빠른 이동으로 인해 통신 서비스 제공 시간이 크게 단축되는 문제가 발생한다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 별도의 허가 절차 없이 단말이 위성에 직접 접근할 수 있는 무허가 기반(direct and grant-free) 통신 방식이 새로운 대안으로 주목받고 있다 [2]. 한편, 다수의 단말이 동일 위성에 동시에 접속을 시도할 경우 상향 링크 자원 충돌이 빈번하게 발생하여 시스템 자원의 효율적 활용이 어려운 문제가 제기되고 있다 [3]. 이에 본 연구에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 기회적 전송(opportunistic transmission) 방식을 도입하고, 이를 통해 위성 직접 통신 환경에서의 자원 효율 및 서비스 성능 향상을 달성하고자 한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 저궤도 위성 환경을 고려하며 N 개의 사용자 단말이 저궤도 위성에 데이터를 전송하고 있는 상황을 고려한다 (그림 1 참고). 각 단말은 위성과 직접 통신하며, 매 순간 p 의 확률로 데이터를 전송하여 M 개의 자원 중 임의로 하나를 선택하여 전송한다. 해당 자원을 두 개 이상의 사용자 단말이 동시에 선택하여 사용할

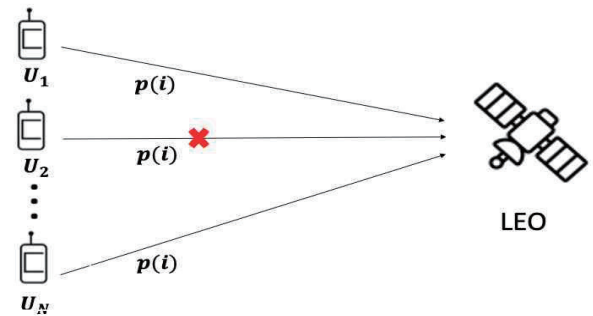


그림 1. LEO 위성 환경에서의 직접 위성 통신 시스템 모델 (Direct-to-Satellite Communication System Model in LEO Environment)

경우 무선 자원 충돌이 발생하는 것으로 가정하고, 이 경우 다음 전송 가능한 기회에서 재전송을 시도한다.

III. 성능 분석

본 연구에서 고려하는 기회적 전송 기법의 성능을 평가하기 위해 접속 성공률과 충돌률을 주요 성능 지표로 사용한다. 기회적 전송 기법에서 성공적으로 데이터를 전송하기 위해서는 특정 단말 관점에서 동일한 무선 자원을 선택한 다른 단말이 없어야 한다. 이를 고려하면, n 개의 단말 중 충돌 없이 성공적으로 전송하는 단말의 수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E[S] = n \times \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{n-1}. \quad (1)$$

각 사용자 단말이 p 의 확률로 기회적 전송을 수행한다고 했을 때, 수식 (1)은 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$E[\tilde{S}] = \tilde{n} \times \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{\tilde{n}-1}. \quad (2)$$

여기서, \tilde{n} 은 $\tilde{n} = np$ 이다.

n 개의 단말이 p 의 확률로 기회적 전송을 하는 상황에서 전송 성공률을 최대화 하기 위해 $\frac{d}{dp}E[\tilde{S}] = 0$ 을 만족하는 p 값을 구할 필요가 있으며, 최적의 전송 확률 p^* 는 다음과 같이 도출된다.

$$p^* = \min\left(\frac{1}{n \times \ln\left(\frac{M}{M-1}\right)}, 1\right). \quad (3)$$

수식 (3)은 현재 접속을 시도해야 하는 단말 수가 많을 때엔, 전송 확률을 감소시키는 방향으로 동작해야, 충돌을 최소화하며 시스템 성능을 최적화할 수 있음을 의미한다.

IV. 테스트 및 결과

본 연구에서는 제안한 기회적 전송 기법의 성능을 검증하기 위해 MATLAB을 활용하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험에서 두 가지를 관찰하고자 하였는데, 첫 번째는 N 개의 단말이 모두 전송을 마칠때까지 소요되는 전송 횟수이며, 두 번째는 매 순간 잔여 단말 수 n 에 따른 p^* 값의 변화이다. 그래프에서 실선은 이론적인 분석을 적용하여 그린 결과이며, 마커(marker)는 모의실험의 결과이다.

그림 2는 전송 라운드에 따른 성공 단말 수의 누적분포함수를 보여주고 있다. 제안 기법과 정적인(static) p 를 적용한 기법의 성능을 비교하고 있으며, p 가 1일 때에는 기회적 전송 기법이 도입되지 않은 전형적인 slotted ALOHA 전송 기법으로 해석할 수 있다. $N = 200$, $M = 60$ 인 상황을 고려하였다. 기회적 전송 기법은 다른 비교 기법보다 전 구간에서 더 높은 누적 성공률을 보였다. 특히 초기 라운드에서는 $p = 1.0$ 의 경우 과도한 충돌로 인해 성공률이 낮게 나타났지만, 제안 기법은 접속 확률을 확률적으로 제어함으로써 충돌을 완화하고 빠른 수렴 속도를 달성하였다. 이러한 성능 향상은 전송 라운드별로 접속 확률이 동적으로 변화하는 과정에 의해, 시스템이 점진적으로 최적 상태로 진화하기 때문이다.

그림 3은 전송 라운드 별 전송 확률의 변화(evolution)를 보여준다. $M = 60$ 인 상황에서, N 은 50, 100, 200인 상황을 고려하였다. 전체 단말 수가 적을수록 초기 충돌 확률이 낮아 p^* 값이 상대적으로 높은 값으로 유지되며, 반대로 단말 수가 많을수록 충돌 가능성이 커져 초기 p^* 값은 작은 값으로 시작한다. 이후 전송 라운드가 진행됨에 따라 잔여 단말 수가 감소함에 따라 p^* 값이 점진적으로 증가하여 최종적으로 1에 수렴함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안 기법이 단말 밀도에 따라 접속 확률을 동적으로 조정함으로써 효율적인 자원 활용을 달성함을 보여준다.

이러한 결과를 통해, 제안된 기회적 전송 기법은 다른 비교 기법 대비 접속 성공률을 효과적으로 향상시킴을 확인할 수 있었다.

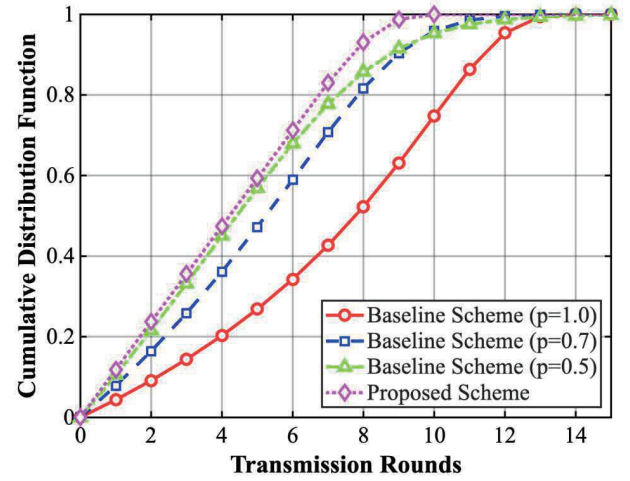


그림 2. 전송 라운드에 따른 성공 단말 수의 CDF

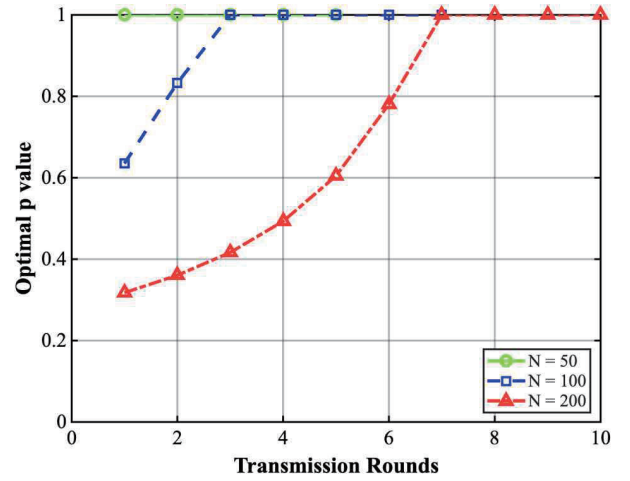


그림 3. 전송 라운드에 따른 p^* 의 변화 양상

V. 결론

본 논문에서는 직접 위성통신을 위한 기회적 전송 기법을 제안하고 단말 수에 따른 최적의 전송 확률을 이론적으로 도출하였다. 모의 실험을 통해 이론적 분석의 타당성을 검증하였으며, 제안 기법을 활용할 경우 다른 비교 기법 대비 우수한 전송 성능을 달성할 수 있음을 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2025년 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW 중심대학사업의 연구결과 (2022-0-01068) 및 2025년도 교육부 및 대전광역시 지원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과임 (2025-RISE-06-002)

참 고 문 헌

- [1] B. Shen et al., "LEO Satellite-Enabled Random Access With Large Differential Delay and Doppler Shift," IEEE Transactions on Communications, vol. 73, no. 1, pp. 621 - 636, Jan. 2025.
- [2] E. Testi and E. Paolini, "Packet Collision Probability of Direct-to-Satellite IoT Systems," IEEE Internet of Things Journal, vol. 12, no. 2, pp. 1843-1855, Jan. 15, 2025, doi:10.1109/JIOT.2024.3470113.
- [3] J. Jeong, H. Lee, and D. Hong, "Enhanced Early Preamble Collision Detector for LEO Satellite-Based NTN IoT Random Access," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 3, pp. 2901 - 2915, Mar. 2025.