

저궤도 위성 기반 IoT 네트워크를 위한 기회적 비직교 임의 접속 시스템

한영진*, 이기훈[†], 정방철[†]

*국방기술진흥연구소, [†]충남대학교

gksdudwls2@krit.re.kr, kihun.h.lee@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Opportunistic Non-Orthogonal Random Access for LEO Satellite-Enabled IoT Networks

Young Jin Han*, Ki-Hun Lee[†], Bang Chul Jung[†]

*Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

[†]Chungnam National University

요약

본 논문에서는 저궤도(low-earth orbit: LEO) 위성 기반 IoT 네트워크를 위한 상향링크 비직교 임의 접속(non-orthogonal random access: NORA) 시스템에 무선 채널 이득 기반의 기회적 전송 기법을 적용하고 모의실험을 통해 성능을 검증한다. 구체적으로, 각 단말은 자신의 무선 채널 이득이 임의값 이상인 경우에만 활성화되어 신호를 전송하며, 위성은 결합 복호(joint decoding: JD) 기법을 통해 신호를 검파한다. 모의실험 결과 기존 무작위 전송 기반 비직교 임의 접속 대비 대폭 향상된 정전 확률(outage probability) 성능을 보이는 것을 검증했다.

I. 서론

대규모 무선 기기 수용과 범지구적 초연결 네트워크 실현을 위해 저궤도(low-earth orbit: LEO) 위성이 차세대 통신 시스템의 핵심 구성 요소 중 하나로 구축되고 있다 [1]. 특히, 위성 통신은 로밍 과정 없이 글로벌 데이터 수집이 가능하다는 점과 이를 통한 새로운 인프라 구축 및 서비스 창출을 위해 사물인터넷(internet-of-things: IoT) 분야에서 크게 활약할 것으로 전망된다 [2]. 본 논문에서는 저궤도 위성 기반 IoT 네트워크에서 단말의 대규모 연결성과 산발적 트래픽 패턴을 기반으로 한 기회적 비직교 임의 접속(opportunistic non-orthogonal random access: O-NORA) 시스템을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 검증한다 [3, 4].

II. 기회적 비직교 임의 접속 기반 상향링크 저궤도 위성 네트워크

본 논문에서는 다수의 지상 IoT 단말이 한 대의 저궤도 위성으로 신호를 전송하는 상향링크 NORA 네트워크를 고려한다. 위성과 모든 단말은 단일 안테나를 가지며, 일반성을 잃지 않고 K 개 단말이 동일한 무선 자원 블록을 공유한다고 가정한다. 위성은 문헌 [1]에서와 같이 고도 H km에서 지상에 직교하는 빔을 형성하여 단말들을 서비스하며, 각 단말은 지상에 도달하는 해당 빔의 중심을 기준으로 반지름 r km의 동심원상에 위치한다. 각 단말은 서로 독립적으로 α 의 동일한 확률에 따라 패킷을 송신하며, 위성으로 수신되는 단말 k ($\in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$)의 신호 세기 P_k^{Rx} 는 다음과 같다 [1]:

$$P_k^{\text{Rx}} = P_k^{\text{Tx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d_k} \right)^2 \frac{\sin \theta_k}{A_{\text{zen}}(f_c)} G^{\text{RX}} |h_k|^2,$$

여기서 P_k^{Tx} 는 k 번째 단말의 송신 전력을 나타내며, 본 논문에서 모든 IoT 단말은 동일한 전력 P 로 신호를 전송한다고 가정한다. 또한, c 와 f_c 는 빛의 속도(m/s)와 반송파 주파수(Hz)를 각각 나타내며, $d_k (= \sqrt{H^2 + r^2})$ 는 위성과 단말 k 사이의 거리(m)를 의미한다. 다음으로, θ_k 는 단말 k 에서 위성까지의 고도각, $A_{\text{zen}}(f_c)$ 는 대기 흡수에 의한 감쇠를 나타내며, G^{RX} 는 [1]에서와 같이 모델링되는 위성의 수신 안테나 이득을 의미한다. 마지막으로, h_k 는 위성과 단말 k 사이 소규모 페이딩 채널을 나타내며, 모든 무선 채널은 서로 독립이고 동일한 쉐도우 라이시안 페이딩 분포를 따른다고 가정한다.

한편, 기회적 전송에서 단말은 자신의 무선 채널 이득이 특정 임계값 이상인 경우 패킷을 전송하며, 본 논문에서 각 단말은 전송 확률 α 에 따라 다음 방정식을 만족하는 임계값 γ 를 기준으로 패킷을 송신한다:

$$\int_0^\gamma f_{|h_k|^2}(x) dx = 1 - \alpha,$$

여기서 $f_{|h_k|^2}(x)$ 은 채널 이득 $|h_k|^2$ 의 확률 밀도 함수를 의미한다.

위성은 결합 복호(joint decoding: JD) 기법을 통해 단말들의 신호를 동시에 복호하며, 이때 k 번째 단말의 정보이론적 정전 확률(outage probability)은 다음과 같이 정의된다:

$$P_{o,k} = \sum_{\mathcal{A} \in \mathcal{P}_k(\mathcal{K})} \alpha^{|\mathcal{A}|} (1 - \alpha)^{K - |\mathcal{A}|} \cdot \Pr \left[\bigcup_{\mathcal{T} \in \mathcal{P}(\mathcal{A})} \left\{ \log_2 \left(1 + \sum_{u \in \mathcal{T}} \frac{P_u^{\text{RX}}}{N_0} \right) < \sum_{u \in \mathcal{T}} R_u \right\} \right],$$

여기서 $\mathcal{P}_k(\mathcal{K})$ 는 집합 \mathcal{K} 에서 원소 k 를 포함하는 멱집합, $\mathcal{P}(\mathcal{A})$ 는 집합 \mathcal{A} 의 모든 멱집합을 나타낸다. 또한, N_0 와 R_u 는 채널 대역폭에 따른 잡음 전력과 요구 데이터 전송률을 각각 의미한다.

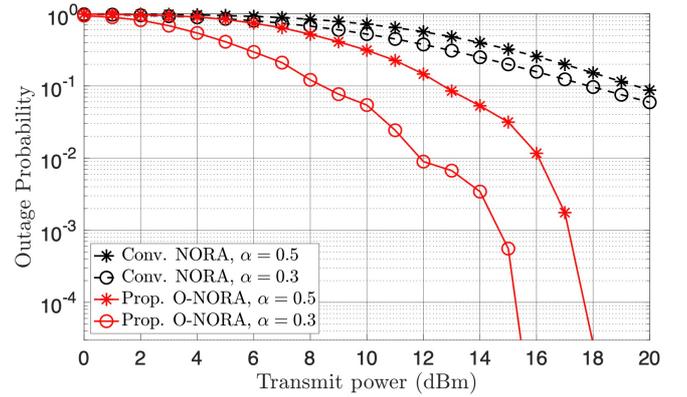


그림 1. 제안한 O-NORA 시스템의 정전 확률 모의실험 결과

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 1은 본 논문에서 제안한 저궤도 위성 기반 IoT 네트워크에서의 기회적 비직교 임의 접속(O-NORA)과 기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템의 단말 k 에 대한 송신 전력 대비 정전 확률 모의실험 결과를 나타낸다. 모의실험 파라미터로는 $K=5$, $H=500$, $r=10$, $f_c=2$ GHz, $G^{\text{RX}}=38.45$ dBi 및 채널 대역폭이 90 kHz인 네트워크 토폴로지를 고려하며, 쉐도우 라이시안 파라미터 $\{b, m, \Omega\}$ 는 Heavy shadowing 환경을 가정하여 각각 $\{0.063, 0.739, 0.000897\}$ 로 정의했다. 각 단말은 확률 $\alpha \in \{0.3, 0.5\}$ 에 따라 패킷을 송신하며, 이때 기회적 전송을 위한 단말의 임계 무선 채널 이득은 $\gamma \in \{0.0767, 0.0442\}$ 로 각각 주어진다. 또한, 각 단말의 요구 전송률은 $R_k=1.5$, $\forall k \in \mathcal{K}$ 이며, 위성은 결합 복호 기법을 통해 단말의 신호를 복호한다. 결론적으로, 기회적 전송 기법을 적용함에 따라 무작위 전송 기반의 기존 NORA 시스템 대비 신뢰성 성능이 대폭 향상될 수 있음을 검증했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발) 및 한국연구재단의 지원(No. RS-2024-0042001)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. S. Ryu, Y. -J. Song, K. -H. Lee, and B. C. Jung, "Low-complexity beam selection technique for multi-beam LEO satellite communications," in *Proc. ICTC 2024*, Jeju Island, Korea, Republic of, Oct. 2024, pp. 1817-1818.
- [2] A. F. M. S. Shah, M. A. Karabulut, and K. Rabie, "Multiple access schemes for 6G enabled NTN-assisted IoT technologies: Recent developments, prospects and challenges," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 48-54, Jan. 2024.
- [3] J. B. Seo, B. C. Jung, and H. Jin, "Performance analysis of NOMA random access," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 2262-2265, Nov. 2018.
- [4] H. W. Nam, K. S. Ko, I. Bang, and B. C. Jung, "Achievable rate analysis of opportunistic transmission in bursty interference networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 526-529, Mar. 2018.