

저궤도 위성 기반 IoT 네트워크를 위한 기회적 상향링크 비직교 임의 접속 시스템

한 영 진*, 이 기 훈*, 정 방 철°

Opportunistic Uplink NORA for LEO Satellite-Based IoT Networks

Young Jin Han*, Ki-Hun Lee*,
Bang Chul Jung°

요 약

본 논문에서는 저궤도(low-earth orbit: LEO) 위성 기반 상향링크 사물인터넷(internet-of-things: IoT) 네트워크를 위한 기회적 비직교 임의 접속(opportunistic non-orthogonal random access: O-NORA) 시스템을 제안한다. 각 지상 IoT 단말은 자신의 무선 채널 이득이 특정 임계값 이상인 경우에만 활성화되어 패킷을 전송하는 기회적 전송 기술을 이용하며, 위성은 동시 비유일 복호(simultaneous non-unique decoding: SND) 기법을 통해 단말들의 신호를 복호한다. 모의 실험 결과 기존 무작위 전송 기반의 비직교 임의 접속(non-orthogonal random access: NORA) 시스템에 비해 대폭 향상된 정전 확률(outage probability) 성능을 달성하는 것을 검증했다.

Key Words : low-earth orbit (LEO) satellite, IoT network, non-orthogonal random access (NORA), opportunistic transmission

ABSTRACT

In this paper, we propose an opportunistic non-orthogonal random access (O-NORA) system for low-earth orbit (LEO) satellite-based uplink internet-of-things (IoT) networks. Each IoT device on the ground transmits a packet only when its channel gain exceeds a predefined threshold, which is determined by the transmission probability. The LEO satellite then decodes the transmitted signals using simultaneous non-unique decoding (SND) method. Simulation results show that the proposed O-NORA system significantly outperforms existing non-orthogonal random access (NORA) systems based on fully random transmission.

1. 서 론

지상 인프라로 서비스가 어려운 오지와 해상 등의 통신 사각지대를 포함하여, 글로벌 초연결 네트워크 실현을 위해 위성 통신 시스템이 차세대 네트워크의 필수 구성 요소로 주목받고 있다. 특히, 저궤도 위성은 고/중 고도 위성에 비해 경로 손실이 적고, 전파 지연 시간을 밀리초 단위로 줄일 수 있으며, 구축 및 유지보수 비용이 상대적으로 낮아 저전력·저지연·저비용 통신 성능을 확보할 수 있다는 점에서 각광받고 있다. 또한, 저궤도 위성 통신 네트워크는 로밍 과정 없이 글로벌 데이터 수집이 가능하며, 이를 통해 새로운 인프라 구축과 서비스 창출을 가능하게 한다. 이와 같은 배경에서 저궤도 위성 기반 IoT 시스템이 최근 활발히 연구되고 있다^[1].

한편, IoT 네트워크의 대규모 연결성 지원과 산발적인 트래픽 패턴을 기반으로 상향링크 비직교 임의 접속(non-orthogonal random access: NORA) 시스템이 연구되고 있다. 이는 임의 접속 과정에서 다수의 IoT 단말이 동일한 무선 자원을 통해 패킷을 전송하고, 기지국은 중첩되어 수신된 신호로부터 각 단말의 신호를 복호하는 구조를 갖는다. 특히, 위성 통신 시스템에서는 긴

※ 이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원(KRIT-CT-22-047, 우주계층 지능통신망 특화연구실) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발)을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT), gksdudwls2@krit.re.kr, 선임연구원, 정회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592) Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, bcjung@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

* (ORCID:0000-0002-0415-5603) Department of AI Convergence, Kunsan National University, kihun@kunsan.ac.kr, 조교수
논문번호 : 202503-061-B-LU, Received March 19, 2025; Revised April 16, 2025; Accepted April 16, 2025

전파 왕복 지연을 고려하여, 비허가(grant-free) 또는 자원 사전 할당에 기반한 임의의 접속 시스템이 연구되고 있다^{3,4)}.

본 논문에서는 저궤도 위성 기반 IoT 네트워크의 주파수 효율 및 신뢰성 성능 향상을 위해, 기존 비직교 임의의 접속(NORA) 시스템에 기회적 전송 기법(opportunistic transmission)을 결합한 기회적 상향링크 비직교 임의의 접속(opportunistic NORA: O-NORA) 시스템을 제안한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 지상에 배치된 다수의 IoT 단말이 한 대의 저궤도 위성으로 신호를 송신하는 상향링크 NORA 네트워크를 고려한다. 위성은 고도 H km에서 지상에 직교하는 빔을 형성하여 단말들을 서비스하며, 각 단말은 지상에 도달하는 해당 빔의 중심을 기준으로 반지름 D km의 동심원상에 위치하는 토폴로지를 고려한다. 위성과 모든 단말은 단일 안테나를 가지며, 일반성을 잃지 않고 U 개 단말이 동일한 무선 자원 블록을 공유한다고 가정한다. IoT 단말은 서로 독립적으로 동일한 확률 α 에 따라 패킷을 전송하며, 이에 따라 위성에 수신되는 단말 u ($u \in \mathbb{U} = \{1, \dots, U\}$)의 수신 신호 세기 P_u^{Rx} 는 다음과 같이 정의된다⁵⁾:

$$P_u^{\text{Rx}} = P_u^{\text{Tx}} \left(\frac{c}{4\pi f_c d_u} \right)^2 \frac{\sin \theta_u}{A_{\text{zen}}(f_c)} G^{\text{RX}}(\zeta_u) |h_u|^2, \quad (1)$$

여기서 P_u^{Tx} 는 단말 u 의 송신 전력을 의미하며, 본 논문

에서 모든 IoT 단말은 동일한 전력 P 로 신호를 전송한다고 가정한다. 나아가, c 와 f_c 는 각각 빛의 속도(m/s) 및 반송파 주파수(Hz)를, $d_u (= \sqrt{H^2 + r_u^2})$ 는 위성파와 u 번째 단말 사이 거리(m)를 나타내며, r_u 는 지상에 도달하는 위성의 빔 중심으로부터 단말 u 까지의 거리이다. 또한, θ_u [°]는 단말 u 에서 위성까지의 고도각, $A_{\text{zen}}(f_c)$ 는 반송파 주파수에 따른 천정 대기 감쇠(zenith attenuation), $G^{\text{RX}}(\zeta_u)$ 는 위성의 빔 중심 방향과 위성에서 단말 u 방향으로의 사잇각 차 ζ_u [°]에 따른 저궤도 위성의 수신 안테나 이득을 나타낸다. 위성 수신 안테나 이득은 다음과 같이 주어진다:

$$G^{\text{RX}}(\zeta_u) = \begin{cases} 1, & \text{when } \zeta_u = 0, \\ 4 \left| \frac{J_1(ka \sin(\zeta_u))}{ka \sin(\zeta_u)} \right|^2, & \text{when } 0 < |\zeta_u| \leq 90, \end{cases}$$

여기서 $J_1(\cdot)$ 은 제1종 제1차 베셀함수를, a 와 k ($= 2\pi/\lambda$)는 각각 파라볼릭 안테나의 반지름과 파수를 나타내며, $\lambda (= c/f_c)$ 는 반송파 파장을 의미한다. 한편, 모든 IoT 단말에 대해서는 전방향 안테나를 가정한다. 마지막으로, h_u 는 위성파와 단말 u 사이의 소규모 페이딩 채널을 나타내며, 모든 무선 채널은 서로 독립이고 동일한 쉐도우 라이시안(shadowed Rician: SR) 페이딩 분포를 따른다고 가정한다. 즉, $h_u \sim \text{SR}(b, m, \Omega)$ 이며, 여기서 $\{b, m, \Omega\}$ 각각은 쉐도우 라이시안 파라미터를 나타낸다.

III. 제안하는 기회적 비직교 임의의 접속 시스템

본 장에서는, 제안하는 O-NORA 시스템을 소개한다. 기회적 전송 기술에서 송신 단말은 자신의 무선 채널 이득이 특정 임계값 이상일 때만 신호를 전송한다. 즉, 각 IoT 단말은 산발적인 트래픽 패턴을 기반으로, 전송 확률 α 에 따라 다음 방정식을 만족하는 임계값 γ 를 정의하여 신호를 송신한다:

$$\int_0^\gamma f_X(x) dx = 1 - \alpha, \quad (2)$$

여기서 $f_X(x)$ 은 무선 채널 이득 $|h_u|^2$ 을 랜덤 변수 $X := |h_u|^2$ 로 정의했을 때, X 의 확률 밀도 함수를 나타낸다. 참고문헌 [7]에서 제안된 바와 같이, 각 IoT 단말은 사전에 알려진 위성의 궤도 정보를 기반으로 시간에

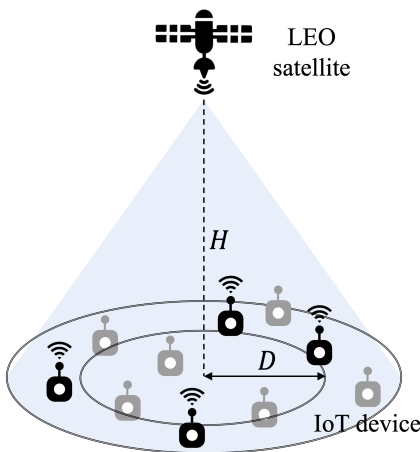


그림 1. 저궤도 위성 기반 IoT 네트워크 시스템 모델
Fig. 1. System model of LEO satellite-based IoT network

다른 위치 정보를 수집하고, 이로부터 레이 트레이싱(ray tracing)을 수행하여 저재도 위성과의 채널 상태 정보를 획득한다. 본 논문에서는 모든 단말이 추정 오류 없이 채널 상태 정보를 확보한다고 가정한다.

무선 채널 이득이 (2)에서 정의된 임계값 γ 이상인 단말들은 동일한 무선 자원을 통해 패킷을 송신하며, 위성은 동시 비유일 복호(simultaneous non-unique decoding: SND) 기법을 통해 다수의 단말로부터 전송된 신호를 복호한다. 이때, u 번째 단말의 정보 이론적 정전 확률(outage probability)은 다음과 같이 주어진다⁶⁾:

$$P_u^{\text{out}} = \sum_{\mathbf{A} \in \mathcal{P}_u(\mathbf{U})} \alpha^{|\mathbf{A}|} (1-\alpha)^{U-|\mathbf{A}|} \times \Pr \left[\bigcup_{\mathbf{T} \in \mathcal{P}(\mathbf{A})} \left\{ \log_2 \left(1 + \sum_{u \in \mathbf{T}} \frac{P_u^{\text{RX}}}{N_0 W} \right) < \sum_{u \in \mathbf{T}} R_u \right\} \right. \\ \left. \cap \log_2 \left(1 + \frac{P_u^{\text{RX}}}{\sum_{v \in \mathbf{A} \setminus u} P_v^{\text{RX}} + N_0 W} \right) < R_u \right] \quad (3)$$

여기서 $P_u(\mathbf{A})$ 는 집합 $\mathbf{A}$ 에서 원소 u 를 포함하는 멱집합을, $\mathcal{P}(\mathbf{A})$ 는 집합 $\mathbf{A}$ 의 모든 멱집합을 나타낸다. 아울러, $N_0(-174 \text{ dBm/Hz})$, W , R_u 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도, 채널 대역폭, 단말 u 의 요구 데이터 전송률을 의미한다.

IV. 모의실험 결과

그림 2는 제안한 O-NORA 시스템과 기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템에서, 임의의 단말 u 에 대한 송신 전력 대비 정전 확률(outage probability) 모의실험 결과를 나타낸다. 모의실험 파라미터는 표 1과 같이 정의했으며, 쉐도우 라이시안 파라미터 $\{b, m, \Omega\}$ 는

표 1. 모의실험 시스템 파라미터
Table 1. System parameters of simulations

Parameter	Value
Number of IoT devices, U	5
Height of LEO satellite, H	500 km
Radius of IoT device location, D	10 km
Carrier frequency, f_c	2 GHz
Radius of the satellite parabolic antenna, a	0.15 m
Zenith attenuation, $A_{\text{zen}}(f_c)$	0.99
Channel bandwidth, W	90 kHz
Satellite antenna gain, $G^{\text{RX}}(0)$	38.45 dBi

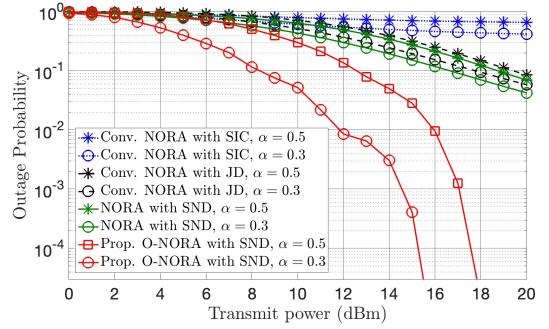


그림 2. 기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템과 제안한 O-NORA 시스템의 정전 확률 모의실험 결과
Fig. 2. Simulation results of the outage probability of the conventional NORA systems based on random transmission and the proposed O-NORA system

heavy shadowing 환경을 가정하여 각각 $\{0.063, 0.739, 0.000897\}$ 로 정의했다⁵⁾. 각 단말은 동일한 확률 $\alpha \in \{0.3, 0.5\}$ 에 따라 패킷을 송신하며, (2)로부터 기회적 전송을 위한 각 단말의 임계 무선 채널 이득은 $\gamma \in \{0.0767, 0.0442\}$ 로 각각 주어진다. 마지막으로, 모든 단말에 대해 동일한 요구 전송률 1.5 bps를 고려했다.

기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템에서는 각 단말이 전송 확률 α 에 따라 무작위로 신호를 송신하며, 위성은 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 또는 결합 복호(joint decoding: JD)를 통해 각 단말의 신호를 검출한다. 본 모의실험에서는 이러한 기존 NORA 시스템에 동시 비유일 복호 기술을 적용한 경우(NORA with SND)를 추가로 고려했다. 우선, 동시 비유일 복호 기술을 적용한 경우 기존의 결합 복호 방식을 포함하므로 정전 확률 성능이 다소 향상되는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로, 기회적 전송과 동시 비유일 복호 기술을 함께 적용한 O-NORA 시스템은 기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템 대비 신뢰성 성능이 대폭 향상됨을 검증했다.

V. 결 론

본 논문에서는 저재도 위성 기반 상향링크 IoT 네트워크의 대규모 연결성과 신뢰성 성능 향상을 위한 O-NORA 시스템을 제안했다. 각 지상 IoT 단말은 자신의 무선 채널 이득이 임계값 이상인 경우에만 활성화되어 패킷을 전송하며, 위성은 비유일 동시 복호 기법을 통해 수신 신호를 복호한다. 모의실험 결과, 제안한 O-NORA 시스템이 기존 무작위 전송 기반 NORA 시스템 대비 매우 향상된 정전 확률 성능을 보이는 것을 검증했다.

References

- [1] M. Centenaro, C. E. Costa, F. Granelli, C. Sacchi, and L. Vangelista, "A survey on technologies, standards and open challenges in satellite IoT," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 23, no. 3, pp. 1693-1720, 3rd Quart. 2021.
- [2] A. K. Dwivedi, S. Chaudhari, N. Varshney, and P. K. Varshney, "Performance analysis of LEO satellite-based IoT networks in the presence of interference," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 5, pp. 8783-8799, Mar. 2024.
- [3] M. B. Shahab, R. Abbas, M. Shirvanimoghaddam, and S. J. Johnson, "Grant-free non-orthogonal multiple access for IoT: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 22, no. 3, pp. 1805-1838, 3rd Quart. 2020.
- [4] T. T. T. Le, N. U. Hassan, X. Chen, M.-S. Alouini, Z. Han, and C. Yuen, "A survey on random access protocols in direct-access LEO satellite-based IoT communication," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 27, no. 1, pp. 426-462, Feb. 2025.
- [5] 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*, pp. 1812-1813, Jeju Island, Korea, Oct. 2024.
- [6] B. Bandemer, A. El Gamal, and Y. H. Kim, "Optimal achievable rates for interference networks with random codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 12, pp. 6536-6549, Dec. 2015.
- [7] S. Kang, G. Geraci, M. Mezzavilla, and S. Rangan, "Terrestrial-satellite spectrum sharing in the upper mid-band with interference nulling," in *Proc. 2024 IEEE ICC*, pp. 5057-5062, Denver, CO, USA, 2024.