

6G 비지상 IoT 네트워크를 위한 자원 도약 기반 비허가 다중 접속 기법

송용진, 이영석, 정방철
충남대학교

yjsong@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Resource Hopping-based Grant-Free Multiple Access Technique for 6G Non-terrestrial IoT Networks

Yong-Jin Song, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 다수의 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 단말이 존재하는 저궤도(low Earth-orbit: LEO) 위성 기반 비지상망(non-terrestrial networks: NTN)에서 대규모 연결성뿐만 아니라 신뢰성과 지연 성능을 동시에 향상시키기 위해 반복(repetition) 전송을 적용한 NTN-IoT 시스템용 자원 도약 비허가 다중 접속(resource hopping-based grant-free multiple-access: RH-GFMA) 기술을 제안한다.

I. 서론

6세대(sixth-generation: 6G) 이동통신 시스템에서는 글로벌 커버리지를 포함한 서비스 품질(quality of service: QoS)을 만족시키기 위해 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT)과 비지상 네트워크(non-terrestrial network: NTN)의 통합이 활발하게 연구되고 있다. 특히, NTN 기술 중에서 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성이 낮은 지연시간, 다른 위성에 비해 상대적으로 낮은 경로 손실 및 광범위한 통신 커버리지를 제공할 수 있어, 6G 비지상 IoT 네트워크에서 대규모 IoT 단말을 효과적으로 수용할 수 있을 것으로 크게 주목받고 있다 [1]. 그러나, NTN을 활용한 IoT 네트워크는 대규모 IoT 단말의 산발적인 무선 접속, 심각한 경로 손실, 그리고 이중 통신 트래픽 등 다양한 문제를 해결할 필요가 있으며 이를 효과적으로 해결하기 위한 다중 접속 기술 연구는 아직 초기 단계에 있다. 따라서, 본 논문에서는 비지상 IoT 네트워크에서 대규모 연결성뿐만 아니라 높은 신뢰성과 낮은 지연시간을 갖도록 반복(repetition) 전송을 활용한 자원 도약 비허가 다중 접속(resource hopping-based grant-free multiple access: RH-GFMA [2]) 기법을 제안한다.

II. NTN-IoT 시스템용 반복 전송을 활용한 RH-GFMA 기술

본 논문에서는 각각 단일 안테나를 갖는 M 개의 IoT 단말이 단일 안테나를 갖는 LEO 위성과 직접 통신하는 비지상 IoT 네트워크를 고려한다. 또한, 본 논문에서는 IoT 단말의 대규모 연결성과 통신 지연을 고려해 [2]에서 제안한 RH-GFMA 기술을 비지상망에서 활용하고자 한다. 구체적으로, 자원 도약을 위한 주파수-시간 자원 블록을 나타내는 GFMA 블록은 $R \times 1$ 개의 프리앰블 부분과 $R \times R$ 개의 데이터 부분으로 구성되며, 부하율(load factor)을 나타내는 L 을 도입하면, 단일 GFMA 블록 내 최대 IoT 단말 수를 $R \times L$ 개로 정의할 수 있다. 본 논문에서는 다양한 자원 도약 패턴 중 동일한 GFMA 블록 내에선 자원 충돌이 발생하지 않고, 최대 간섭 단말의 수를 $L-1$ 개로 제한할 수 있는 라틴 방진 그룹(Latin square group: LSG) 도약 패턴을 사용한다고 가정한다. 또한, IoT 단말의 산발적인 트래픽 패턴을 고려하여 활성 확률 $\zeta (\in (0,1])$ 에 따라 IoT 단말이 활성화된다고 가정하였다.

본 논문에서는 지상과 LEO 위성 간 통신 환경을 고려할 때 심각한 경로 손실과 재전송이 어려운 문제를 해결하기 위해 반복 전송을 활용한 RH-GFMA 기술을 도입한다. 즉, 활성 IoT 단말은 LEO 위성으로 송신 신호를 n 번 반복하여 전송하고, 이때 자원 도약하며 n 번 반복 전송된 신호는 각각 다른 무선 채널을 경험하게 되어 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 예를 들어, $L=2$ 일 때, m 번째 IoT 단말의 $i (\in \{1, \dots, n\})$ 번째 반복 전송에 해당하는 수신 신호는 다음과 같이 두 가지 경우로 나타낼 수 있다.

$$y_i = \begin{cases} h_m \sqrt{E_m} s_m + w, & \text{Collision Free} \\ h_m \sqrt{E_m} s_m + h_k \sqrt{E_k} s_k + w, & \text{Collision} \end{cases}$$

여기서, h_m 과 h_k 는 각각 m 번째 IoT 단말과 간섭 IoT 단말의 LEO 위성 간 채널을 나타내며 통계적으로 독립이고 동일한 shadowed Rician 분포를 따른다고 가정하였다. 또한, E , s , w 는 각각 송신 전력, 송신 신호, 그리고 LEO 위성

에서 발생하는 부가 잡음을 나타낸다. 최종적으로, LEO 위성은 모든 반복 전송에 대해 결합 최대 우도(joint maximum likelihood) 기반 신호 검파를 채택하여 [2]와 같이 로그 우도 비율(log-likelihood ratio: LLR)을 계산함으로써 m 번째 IoT 단말이 전송한 신호를 검파할 수 있다.

III. 모의실험 결과 및 결론

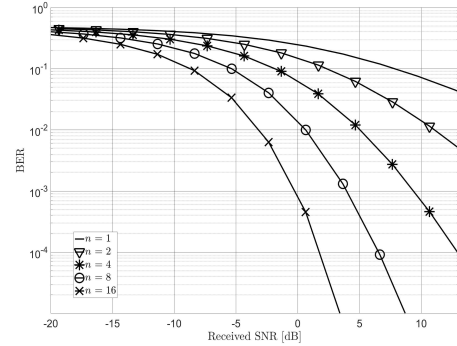


그림 1. 반복 횟수에 따른 RH-GFMA 기법의 BER 성능.

그림 1은 본 논문에서 제안한 비지상 IoT 네트워크용 반복 전송을 활용한 RH-GFMA 기법의 수신 신호 대 잡음 비 대비 BER 성능을 도시한 결과이다. 채널 파라미터는 $(b_0, m, \Omega) = (0.126, 10.1, 0.835)$ 이고, $R=17$, $L=2$ 을 고려하였으며 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 가정하였다. 또한, LEO 위성과 IoT 단말 간 거리는 600km로 설정하였으며, IoT 단말의 활성 확률은 모두 0.1로 동일하다고 가정하였다. 그림 1은 반복 횟수 n 을 각각 1, 2, 4, 8, 16으로 수행할 때의 RH-GFMA 기법의 BER 성능을 의미하며, 반복 전송을 활용한 RH-GFMA 기법이 비지상 IoT 네트워크에서도 우수한 BER 성능을 가질 수 있음을 확인하였으며, 반복 횟수가 증가할수록 다이버시티 이득을 얻어 BER 성능이 크게 향상됨을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] A. F. M. S. Shah, M. Al. 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.
- [2] H. S. Jang, B. C. Jung, T. Q. S. Quek, and D. K. Sung, "Resource-hopping-based grant-free multiple access for 6G-enabled IoT networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 20, pp. 15349-15360, Oct. 2021.