

6G 저궤도 위성 IoT 네트워크에서 IDMA 시스템의 성능 분석

송용진, 이영석, 정방철
아주대학교

wiclyjsong@ajou.ac.kr, youngseoklee@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Performance Analysis of IDMA System for 6G LEO Satellite-Based IoT Networks

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

요약

본 논문에서는 저궤도(low Earth-orbit: LEO) 위성 기반 비지상망(non-terrestrial networks: NTN)에서 다수의 사물인터넷(Internet-of-Things: IoT) 단말이 존재하는 통신환경을 가정한다. 이와 같은 환경에서 대규모 연결성뿐만 아니라 신뢰성과 저지연 성능을 동시에 향상하도록 반복(repetition) 전송을 적용한 NTN-IoT 시스템용 인터리브 분할 다중 접속(interleave division multiple access: IDMA) 기법을 제안한다.

I. 서론

6세대(sixth-generation: 6G) 이동통신 시스템에서는 글로벌 커버리지를 실현하기 위한 방안으로 비지상 네트워크(non-terrestrial networks: NTN)가 활발히 논의되고 있으며, 특히 저궤도(low-Earth orbit: LEO) 위성은 낮은 지연 시간, 넓은 통신 커버리지 및 낮은 경로 손실 등의 장점으로 인해 각광받고 있다 [1]. 이러한 특성은 지상 통신 인프라가 부족한 지역에서 사물인터넷(Internet of Things: IoT) 단말의 직접 접속을 가능하게 하여 대규모 IoT 네트워크 구현의 핵심 기반이 된다. 그러나 LEO 위성을 활용한 IoT 통신 환경에서는 단말의 동시 접속, 높은 도플러 효과, 빠른 채널 변화 등 여러 기술적 과제가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 기존의 지상망에서 제안되었던 인터리브 분할 다중 접속(interleave division multiple access: IDMA [2]) 기법을 6G NTN-IoT 네트워크에 적용하는 방안을 제안한다. 모의 실험을 통해 제안하는 기법이 다수의 IoT 단말이 동시에 접속하는 환경에서도 단일 사용자 시스템과 유사한 성능을 유지함을 검증한다.

II. NTN-IoT 시스템용 반복 전송을 활용한 IDMA 기술

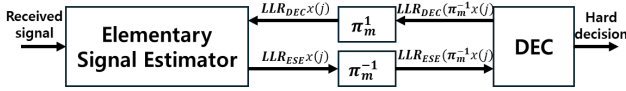


그림 1. 수신단 m 번째 유저에 대한 반복 디코딩 과정

본 논문에서는 단일 안테나를 갖는 LEO 위성과 각각 단일 안테나를 갖는 M 개의 IoT 단말 간 직접 상향링크 통신이 이루어지는 비지상 IoT 네트워크를 고려한다. 본 논문에서 IoT 단말은 [2]와 같이 단말 별 고유한 인터리버(interleaver, π_m)를 사용하여 네트워크에 다중 접속한다고 가정한다. 이때, 경로 손실이 큰 NTN-IoT 네트워크 환경을 고려하여, 각 단말은 전송할 정보 비트 시퀀스에 대해 부호율 R_c 의 전진 오류 정정(forward error correction: FEC) 부호와 n 회 반복 부호를 함께 적용해 부호화 시퀀스를 생성한다. 생성된 부호화 시퀀스는 앞서 기술한 바와 같이 단말 고유의 인터리버를 통해 비트 단위 인터리빙을 수행한 후, 심볼 변조와 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 방식을 통해 신호를 송신한다.

순환 접두사(cyclic prefix: CP) 제거 후 이산 푸리에 변환을 마친 수신 신호 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(j) = \sum_{m=1}^M h_m x_m(j) + w(j), j = 1, 2, \dots, J,$$

여기서 h_m 는 m 번째 단말과 LEO 위성 간 주파수 영역 무선 채널을 나타내며, x_m 는 m 번째 단말의 송신 신호, w 는 LEO 위성에서 발생하는 부가 열잡음을 나타내고, J 는 프레임 길이를 의미한다.

제안하는 NTN-IoT 시스템용 IDMA 기법의 복호 과정은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 구체적으로, m 번째 단말에 대해 초기 신호 추정기에서는 수신 신호로부터 로그-우도 비율(log-likelihood ratio: LLR)을 계산한다. 각 단말에 대해 계산된 LLR 값은 역 인터리빙을 거쳐 채널 복호화에 입력된다. 채널 복호화 과정에서는 각각 반복 부호와 FEC 부호에 대한 복호화를 수행하며 이를 통해 연판

정(soft decision)값을 계산하게 된다. 이 연판정 결과는 다시 부호화와 인터리빙을 거쳐, 초기 신호 추정기로 전달되며 이때 내부 정보(intrinsic information)는 제외된다. 초기 신호 추정기는 해당 연판정 결과를 바탕으로 모든 단말에 대한 LLR을 재계산하고 해당 과정을 반복하게 된다. 이후, 정해진 수신기 복호 횟수(i)가 완료되면 경판정(hard decision)하여 각 IoT 단말의 최종 비트를 결정한다.

III. 모의실험 결과 및 결론

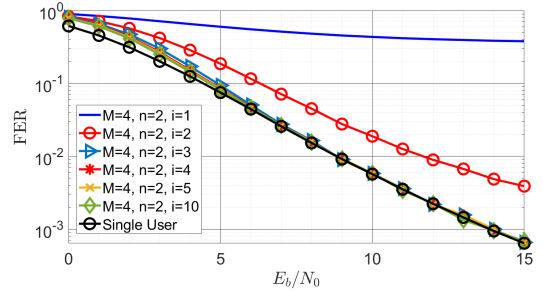


그림 2. 수신기 복호 횟수에 따른 IDMA 기법의 FER 성능

그림 2는 본 논문에서 고려하고 있는 NTN-IoT 네트워크에서 IDMA 기법을 적용할 때 비트 에너지 대비 잡음 비(E_b/N_0)에 따른 프레임 오류율(frame error rate: FER) 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험은 3GPP의 NTN-TDLC5 채널 모델을 사용하였으며, 이진 위상 천이 변조(binary phase shift keying: BPSK)를 가정하였다. 또한, LEO 위성과 IoT 단말 간 거리는 600km로 설정하였으며, $M=4$ 의 IoT 단말이 IDMA를 통해 LEO 위성에서 동시 접속한다고 가정하였다. FEC 부호로는 $R_c=1/3$, 구속 길이 9인 [557 663 711]₈ 길쭉 부호(convolutional code)를 사용하였고, $n=2$ 반복 부호를 사용하였다. 그림 2는 수신기 복호 횟수 i 를 각각 1, 2, 3, 5, 10으로 수행할 때의 제안하는 IDMA 기법의 FER 성능을 나타내며, NTN-IoT 네트워크에서 다수의 단말이 동시에 접속하더라도 제안하는 IDMA 기법을 적용하였을 때 단일 사용자 시스템과 유사한 FER 성능을 유지할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터 사업의 지원(IITP-2025-RS-2024-00436406)과 저궤도 위성통신 핵심기술 기반 큐브위성 개발 과제의 지원(RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] T. T. T. Le, et al., "A survey on random access protocols in direct-access LEO satellite-based IoT communication," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 27, no. 1, pp. 426-462, Feb. 2025.
- [2] L. Ping, Q. Guo, and J. Tong, "The OFDM-IDMA approach to wireless communication systems," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 14, no. 3, pp. 18-24, Jun. 2007.