

GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 다운링크 데이터 송수신 성능 분석

이재영, 문태한, 이재열*, 이영포**, 김재현***

아주대학교 AI융합네트워크학과, *아주대학교 우주전자정보공학과,

SK텔레콤 New Connectivity 팀, *아주대학교 전자공학과

{dlwodudd4865, *jaeyel98, ansxogks3, ***jkim}@ajou.ac.kr, **youngpo.lee@sk.com

Performance Analysis of Downlink Data Transmission in GEO Satellite-Based NB-IoT NTN System

Jaeyeong Lee, Taehan Moon, Jaeyeol Lee*, Youngpo Lee**, Jae-Hyun Kim***

Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University,

*Department of Space Electronics and Information Engineering, Ajou University,

**SK Telecom Company, Limited, Seoul, South Korea,

***Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

요약

본 논문은 geostationary (GEO) 위성을 기반으로 하는 narrowband Internet-of-things (NB-IoT) non-terrestrial network (NTN) 시스템을 3rd generation partnership project (3GPP) 표준 문서에 기반해 설계한다. 설계한 시스템의 성능을 송신 effective isotropic radiated power (EIRP) 및 전송 블록 크기에 따른 비트 오류율, 블록 오류율, 처리율로 도출하여 시스템의 구체적인 운용 성능을 분석한다.

I. 서 론

Narrowband Internet-of-things (NB-IoT)는 long-term evolution (LTE) 네트워크를 활용하여 다수의 IoT 기기들을 저전력으로 연결한다. 하지만 전쟁 상황 또는 해상, 사막 등의 오지에 통신 서비스를 제공하지 못하는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 geostationary Earth orbit (GEO) 위성 기반 NB-IoT non-terrestrial network (NTN) 시스템과 관련된 연구가 진행되고 있지만, 3rd generation partnership project (3GPP) 채널 모델을 적용하여 해당 시스템의 물리 계층 성능을 분석한 연구는 부족하다 [1]. 따라서 본 논문에서는 다운링크 데이터의 전송 블록 크기에 따른 비트 오류율, 블록 오류율, 처리율을 분석하여, GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 구체적인 운용 성능을 분석한다.

II. GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템

1. 시스템 모델

본 논문의 GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 시스템 모델은 그림 1-(a)와 같다. GEO 위성은 고도 h km에서 운용되며, 지상에는 U 개의 단말이 위치한다. GEO 위성과 단말 간의 고도각 θ 이 최소 고도각 θ_{\min} 이상이면 service link를 형성한다. 단말과 GEO 위성 간 service link가 형성되면, 다운링크 데이터의 송수신이 진행되며 그림 1-(b)와 같다. 먼저 N 개의 bits로 구성된 전송 블록 $B = [b_1, b_2, \dots, b_N]$ 을 생성한다. 생성된 B 는 오류 검출 부호화 과정을 거쳐 24 bits의 cyclic redundancy check (CRC)가 추가되고, 1/3 turbo channel 부호화 및 rate matching을 거쳐 codeword로 변환된다. 변환된 codeword에 quadrature phase shift keying (QPSK) 변조를 적용하여 심볼을 생성하고, 해당 심볼을 리소스 그리드의 narrowband physical downlink shared channel (NPDSCH) re source element에 매

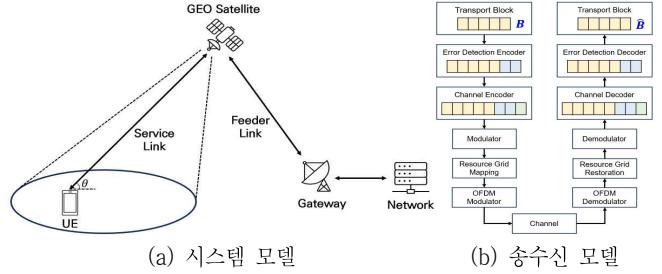


그림 1. GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템

평한다. 심볼이 매핑된 리소스 그리드는 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 변조를 통해 다운링크 파형으로 변환되고, GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 채널을 통과한 후 단말에 수신된다. 단말에 수신된 파형은 OFDM 복조 과정을 거쳐 리소스 그리드로 변환되고, QPSK 복조를 통해 codeword에 대한 심볼 정보를 복원한다. Channel decoding 과정을 통해 de-rate matching 및 turbo channel decoding이 수행되고, 오류 검출 복호화 과정에서 CRC 검사를 통해 전송 블록의 오류 여부를 확인하여 $\hat{B} = [\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_N]$ 를 복원한다.

2. 성능 평가

본 논문에서 GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 성능은 비트 오류율 R , 블록 오류율 R_b , 처리율 T 로 평가한다. R 은 전송 블록 비트 중 오류가 발생한 비트의 비율이며 아래 수식으로 계산한다.

$$R = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} \frac{N_e(i)}{N}, \quad (1)$$

$N_e(i)$ 는 i 번째 전송 블록의 오류가 발생한 bit 수이고, N_b 는 전체 전송한 블록 수이다. R_b 는 전체 전송 블록 수 중 성공적으로 디코딩되지 않은 블록 수 $N_{b,e}$ 의 비율이며 수식은 다음과 같다.

$$R_b = \frac{N_{b,e}}{N_b}. \quad (2)$$

T 는 전송 블록의 송수신 동안 성공적으로 디코딩된 비트의 수로 계산하며, 아래와 같이 정의한다.

$$T = \begin{cases} \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} \frac{N - N_e(i)}{T_d + T_n}, & S(i) = 1, \\ 0, & S(i) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$S(i)$ 는 i 번째 전송 블록의 decoding 성공 여부이며, decoding 성공 시 1의 값을 가지고, 실패 시 0의 값을 가진다. T_d 는 GEO 위성과 단말 간 전파 지연이고, T_n 은 송수신 과정에서 발생하는 네트워크 지연 시간이다.

III. 시뮬레이션 설계 및 결과

본 논문에서는 고도 35,794 km에서 1.5 GHz 주파수 대역을 사용하는 INMARSAT-6 F1 위성을 배치한다. 단말은 서울의 위도, 경도에 위치한다. 최소 고도각 θ_{min} 은 10° 이고, GEO 위성과 단말은 고도각 θ 는 32° 에서 service link가 형성된다 [2]. GEO 위성의 Effective isotropic radiated power (EIRP)를 25 dBW에서 50 dBW까지 증가시켜 시스템의 다운링크 데이터 송수신 성능을 분석한다. GEO 위성과 단말 간 채널은 3GPP에 명시된 NTN rural 채널 모델을 적용한다. 대역폭, subcarrier spacing (SCS), T_n 은 각각 180 kHz, 15 kHz, 5 ms로 설정한다 [3], [4]. 전송 블록 N_b 은 2,000개를 전송하며, 전송 블록 크기 N 을 72, 144, 224의 값으로 설정하여, 전송 블록 크기에 따른 시스템의 성능을 평가한다.

GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 다운링크 데이터 송수신 성능 시뮬레이션 결과는 그림 2와 같다. 그림 2-(a)와 2-(b)는 전송 블록 크기 N 과 EIRP 변화에 따른 비트 오류율 및 블록 오류율을 나타내며, N 이 증가할수록 동일한 오류율 성능을 위해 필요한 EIRP가 증가한다. N 이 72인 경우, 30 dBW부터 35 dBW 구간에서 비트 오류율과 블록 오류율이 각각 89%, 88% 개선되었다. N 이 144인 경우, 34 dBW부터 38 dBW 구간에서 비트 오류율이 80%, 블록 오류율이 79% 성능 향상되었으며, N 이 224인 경우에는 44 dBW부터 46 dBW 구간에서 두 오류율 모두 95% 개선되었다. 이는 N 이 증가하여 전송 데이터량이 늘어날수록 오류 정정 성능이 감소하므로, 동일한 오류율을 달성하기 위해 높은 EIRP가 필요하기 때문이다.

그림 2-(c)는 N 과 EIRP 변화에 따른 처리율을 나타낸다. EIRP 25 dBW부터 30 dBW 구간에서는 N 크기의 전송 블록 전체에 오류가 발생하여 유효한 처리율이 발생하지 않았다. 이후 EIRP가 30 dBW 이상으로 증가하면서 비트 및 블록 오류율이 감소하여, N 이 72인 경우는 31 dBW, 144인 경우에는 34 dBW, 224인 경우에는 37 dBW에서 처리율이 발생하기 시작한다. 또한 처리율은 N 의 값에 따라 특정 EIRP 이상에서 최대 처리율로 수렴하는데, N 이 72일 때 35 dBW에서 579 bps, N 이 144일 때 45 dBW에서 1,158 bps, N 이 224일 때 48 dBW에서 1,801 bps의 최대 처리율로 수렴한다. 따라서 N 이 커질수록 전송 데이터량이 증가하여 처리율이 증가하지만, 전송 데이터량 증가에 따라 오류 정정 능력이 감소하여, 최대 처리율에 수렴에 도달하기 위해 요구되는 EIRP가 증가한다.

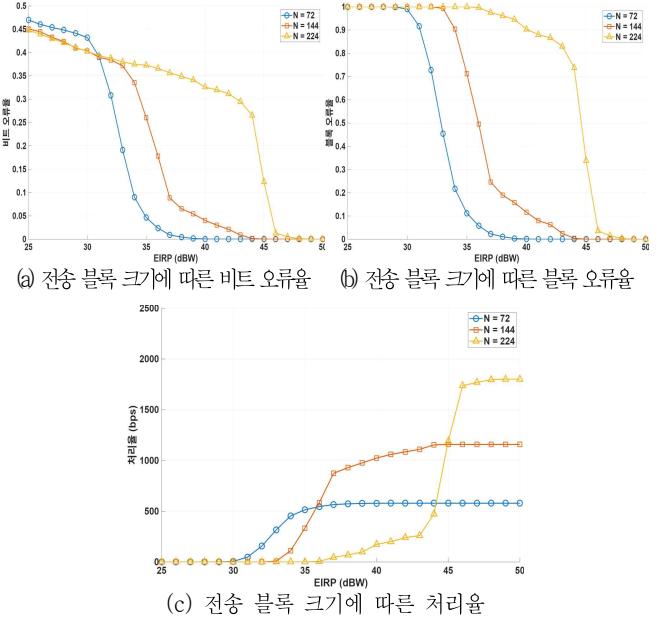


그림 2. GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 시스템의 송수신 성능 결과

IV. 결론

본 논문에서는 GEO 위성 기반 NB-IoT NTN 다운링크 시스템을 3GPP 표준 문서에 기반하여 설계했다. 설계한 시스템의 성능을 송신 EIRP 및 전송 블록 크기에 따른 비트 오류율, 블록 오류율, 처리율을 통해 분석했다. 분석 결과, 전송 블록 크기가 작을수록 낮은 EIRP에서 최소 오류율 성능을 보이며 처리율 수렴 지점에 도달하였으나, 달성 가능한 최대 처리율은 낮게 나타났다. 반면, 전송 블록 크기가 커질수록 오류율 개선을 위해 높은 EIRP가 요구되지만, 충분한 EIRP가 확보된 환경에서는 작은 크기의 전송 블록 대비 높은 최대 처리율을 확보할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 SK 텔레콤 산학협력과제 (6G 확장기술: 위성 시뮬레이터 고도화 및 VSAT 실증)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00396992, No. RS-2024-59330030).

참 고 문 헌

- [1] Z. Zhang, P. Chen, L. Ma, J. Zhao, and M. Yang, “Performance evaluation and application exploration of NB-IoT-based IoT-NTN,” In proc. 2024 IEEE 12th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), pp. 388-394, 2024.
- [2] 3GPP TR 38.821 v16.2.0, “Solutions for NR to support non terrestrial networks (NTN) (Release 16),” Apr. 2023.
- [3] 3GPP TS 36.211 v17.4.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17),” Sep. 2023.
- [4] 3GPP TR 22.887 v20.0.0, “Feasibility Study on satellite access - Phase 4 (Release 20),” Jun. 2025.
- [5] 3GPP TS 36.213 v17.7.0, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 17),” Dec. 2024.