

LEO 위성의 이동성에 따른 5G NR LDPC 코드 성능 분석 및 고찰

곽희주, 박소민, 최민지, 유철우*
명지대학교

wopelt8@mju.ac.kr, thalsi@mju.ac.kr, choiminji@mju.ac.kr, *cwyyou@mju.ac.kr

Impact of LEO Satellite Mobility on the Performance of 5G NR LDPC Codes

Heeju Kwak, Somin Park, Minji Choi, Cheolwoo You*
Myongji University

요약

본 논문은 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성통신 환경에서 LDPC(Low-Density Parity-Check) 채널 코딩 기법의 성능을 분석한다. TR 38.821 기술문서에 명시된 바와 같이, 차세대 6G LEO 위성통신에서는 5G New Radio(NR) 표준에서 사용되었던 LDPC 와 Polar Code를 채널 코딩 방식으로 채택하고 있다. 본 연구에서는 5G NR 표준 규격에 따른 LDPC 코딩 기법을 LEO 위성통신 환경에 적용하여, 고속 이동성을 특징으로 하는 저궤도 위성 채널 환경에서의 성능을 평가한다. 이를 통해 큰 도플러 변화율을 가진 위성통신 시스템에서 다양한 코드율을 사용한 LDPC 코딩의 오류 정정 능력을 확인 및 시스템 신뢰성을 분석한다.

I. 서론

6G 네트워크에서 저궤도 위성 통신(Low Earth Orbit, LEO)은 핵심 기술 중 하나로 주목받고 있다[1]. 저궤도 위성 통신은 기존 정지궤도 위성(Geostationary Earth Orbit, GEO)과 달리 상대적으로 낮은 고도에서 운용되어 통신 지연시간이 짧고 전파 손실이 적다는 장점을 제공하지만, 위성의 빠른 이동속도로 인해 통신 채널 환경이 급격하게 변화함에 의해 환경에서 발생하는 성능 저하 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 통신 시스템에서 채널 코딩을 통해 송수신 과정 중 손실된 데이터를 효과적으로 복원한다. 현재 6G 위성 통신 시스템에서는 5G New Radio(NR)에서 검증된 3GPP 표준 저밀도 패리티 검사(Low-Density Parity-Check, LDPC) 채널 코딩 기법이 주요 오류 정정 방식으로 채택되고 있다[2]. 본 연구에서는 Doppler shift 가 강하게 작용하는 저궤도 위성 통신 환경에서 5G NR LDPC 코딩 기법 적용 시의 성능을 심층적으로 분석하고자 한다. 지상 네트워크(Terrestrial Network, TN)와 비지상 네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN) 간 통신에서 사용되는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식[3]을 기반으로 모의 실험을 통한 성능 평가를 진행한다.

II. 본론

1. System Model

본 연구에서 사용된 LDPC 시스템은 그림 1과 같다. 5G NR 표준에 맞춰 LDPC 인코딩, 디코딩 과정을 수행하며 위성 채널 환경에 대해 8 심볼 간격으로 파일럿 심볼을 삽입하여 LS(Least Square)기반 채널 추정을 진행한다.

5G NR 3GPP 표준에서 LDPC는 그림 2과 같은 Base Matrix 표준을 정의하고 있다[5]. 정보비트 수 K 및 코드율 R 에 따라 BG1(Base Graph 1), BG2(Base Graph 2)가 결정된다. 해당 매트릭스는 Lifting 계수 Z_c 를 통해 확장 후 패리티 검사 행렬 H 를 구성한다. 정보 비트 벡터 $\mathbf{u} = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_{K-1}]^T$ 와 패리티 비트 $\mathbf{w} = [w_0, w_1, w_2, \dots, w_{N+2Z_c-K-1}]^T$ 로 생성된 코드 워드는 다음과 같은 선형 제약 조건을 만족한다[5].

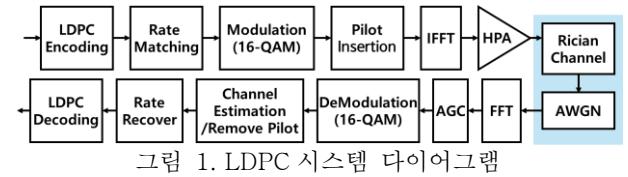


그림 1. LDPC 시스템 다이어그램

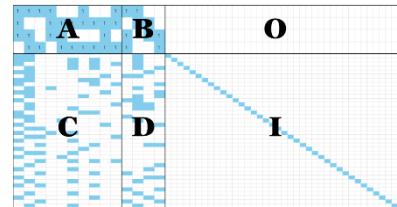


그림 2. BG2의 베이스 매트릭스 구조

$$\mathbf{H} \times \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (1)$$

위의 LDPC 인코딩 과정을 통해 생성된 코드 워드는 이후 Rate Matching 단계를 거쳐 실제 채널 전송에 적합한 길이로 조정된다. 코드율 및 전송 블록 크기에 따라 LDPC 코드 워드를 Shortening, Puncturing, Repetition 기법을 적용하여 채널 부호화 블록을 구성한다. 수신 측에서는 먼저 Rate Recovery 과정을 통해 전송 중 손실되었거나 반복된 비트를 복원하고, 이후 LDPC 디코딩을 수행한다. 본 연구에선 LOMS (Layered Offset Min-Sum) 알고리즘[6]을 사용하여 디코딩을 수행한다. LOMS는 Min-Sum 알고리즘에 비해 성능과 수렴 속도에서 개선된 방식으로, 체크 노드를 층별로 업데이트하며 계산 오프셋을 적용하여 근사화를 수행한다. LOMS 알고리즘은 연산 복잡도를 줄이면서도 일반 Min-Sum 대비 성능 열화를 최소화할 수 있으며, 5G NR 시스템에 적합한 하드웨어 효율성을 갖춘다.

LEO 위성 통신에서는 전송 환경의 특성상 Rician 페이딩 채널 환경이 형성된다. 이는 지상 기반 통신에서 흔히 나타나는 Rayleigh 페이딩 환경과 달리, LOS(Line-of-Sight) 성분을 고려해야 한다. Rician 페이딩

채널에서는 수신 신호가 강한 LOS 성분과, 다수의 반사 또는 회절로 인해 발생하는 비직접 경로(NLOS, Non-Line-of-Sight) 성분의 조합으로 모델링된다. 이때의 채널 이득 h 는 다음과 같이 표현된다.

$$h(t) = \sqrt{\left(\frac{K}{K+1}\right)} h_{LOS} + \sqrt{\left(\frac{1}{K+1}\right)} h_{NLOS}(t) \quad (2)$$

K factor는 Rician 성분을 나타내는 계수이며, h_{LOS} 는 직접 경로를 통한 신호 성분을, $h_{NLOS}(t)$ 산란에 의한 성분으로 Rayleigh 분포를 따른다.

2. Simulation Results

본 논문에서는 600 km 상공에 있는 저궤도 위성 통신 환경을 기반으로 20 GHz의 대역폭을 사용하는 Ka-band 대역의 다운링크 시나리오를 가정하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 OFDM 및 LDPC 채널 코딩에 대한 파라미터 설정 값은 Table 1에 제시된 값을 사용하였다. 이를 통해 실제 LEO 환경과 유사한 조건 하에서 코드율에 따른 5G NR 표준 기반 LDPC 코딩의 성능을 평가한다. LEO 위성 통신에선 이동 속도에 의해 ± 500 kHz 까지의 도플러 변화량을 보이며, 위성의 고도 및 사용자 단말의 고도 각(Elevation angle)에 따라 크기가 달라진다는 점을 확인하기 위해 본 연구에서는 고도각 Θ 를 $30^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 로 설정하여 각 각도에 따른 LDPC 채널 코딩의 BER(Bit Error Rate) 성능을 비교 분석하였다.

그림 3에 제시된 바와 같이, 코드율이 $1/2, 1/3, 1/4$ 로 낮아짐에 따라 전반적인 BER 성능이 개선되는 경향을 확인할 수 있다. LEO 위성통신에선 전송 신뢰도를 확보하기 위해 낮은 코드율이 사용되어야 하며, 충분한 여유 비트 확보가 요구됨을 의미한다. 또한, 고도각에 따른 실험에선 그림 4에 나타난 바와 같이, 위성의 elevation angle에 따라 링크 성능에 뚜렷한 차이가 발생함을 확인하였다. 현 실험 환경에서의 도플러 시프트의 값은 고도각 30° 에서 약 436.6 kHz, 60° 에서 약 252.1 kHz, 80° 에서 약 87.5 kHz로 나타나며 90° 에서는 상대 속도가 거의 0 m/s가 되어 도플러 시프트가 거의 발생하지 않는다. 이에 위성이 천정 방향(90°)에 위치할 때 가장 우수한 성능을 보였으며, 고도각이 낮아질수록 LDPC 코딩의 오류 정정 성능이 제한되고 전체 시스템 성능이 점진적으로 저하되는 현상이 관찰되었다.

III. 결론

본 논문에서는 5G NR 표준에서 정의된 LDPC(Low-Density Parity-Check) 코딩 기법을 기반으로, 저궤도(LEO) 위성 통신 환경에서의 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 5G NR 기반 LEO 위성 통신 환경에서 LDPC 부호가 일정 수준 이상의 SNR 조건에서는 우수한 오류 정정 성능을 보이며, 그 실효성이 확인되었다. 그러나 LEO 위성의 고속 이동으로 인해 발생하는 도플러 효과는 LDPC 복호 성능에 부정적인 영향을 주며, 이에 따라 안정적인 통신을 위해 더 높은 전력 소모가 요구됨을 확인하였다. 이는 기존 지상 통신 환경을 기반으로 설계된 LDPC 체계가 도플러가 지배적인 위성 환경에서는 한계가 있음을 시사한다.

따라서, 6G LEO 위성 통신 시스템에서 신뢰성 있는 통신을 확보하기 위해서는 도플러 변화에 강인한 채널 추정 및 복호 기법의 개발이 필수적이다. 향후 이러한

Table 1. 실험 파라미터

Info Len K	2048
Code Rate R	1/2, 1/3, 1/4
Max Iteration	50 Iterations
Decoding	Layered Offset Min-Sum
Offset	0.3
FFT 수	1024
Subcarrier spacing	120kHz
Modulation	16-QAM
Channel	Rician Fading(K=15dB), AWGN

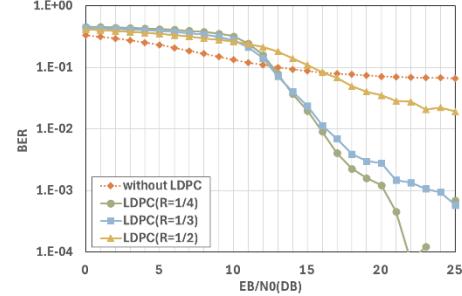


그림 3. R 에 따른 LDPC 성능 ($K=2048, \Theta=80^\circ, BG2$)

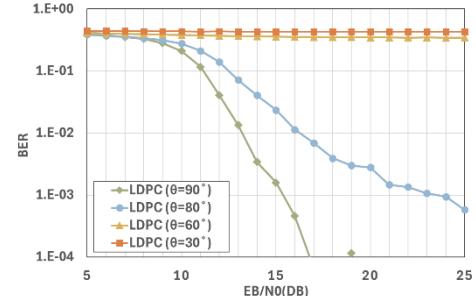


그림 4. Θ 에 따른 LDPC 성능 ($K=2048, R=1/3, BG2$)

기술에 대한 심화 연구를 통해, 차세대 위성통신 시스템의 통신 안정성과 효율성을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00335012).

참 고 문 헌

- [1] 최가은, 송영근, "저궤도 위성통신의 활용과 주요 사업자의 서비스 전개 현황," 국가전략기술 분야 동향과 이슈, 제 39 권 제 3 호, pp. 36~47, 2024.06.01. (<http://doi.org/10.22648/ETRI.2024.J.390304>)
- [2] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, "Solution for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)," 3GPP TR 38.821, Rel. 16, Mar. 2023.
- [3] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks," 3GPP TR 38.811, Rel. 15, Sep. 2020.
- [4] Yang, M., Kim, K., Han, C., and Kim, J., "ML Detection and PAPR Reduction of NC-OFDM Signals Based on Clipping Noise Suppression for Cognitive Radio," IEIE Trans. on Smart Proc. & Com., vol. 6, no. 6, pp. 466~472, 2017.
- [5] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, "NR; Multiplexing and channel coding," 3GPP TR 38.212, Rel. 18, March. 2025.
- [6] Kumar, N., Khorchani, T., and Bouallegue, R., "A review of channel coding schemes in the 5G standard," Telecommunication Systems, vol. 83, pp. 423~448, 2023.