

LEO 위성 시스템에서 HPA 왜곡 인지 LLR 기반 LDPC 복호 성능 분석

곽희주, 박소민, 최민지, 유철우*
명지대학교

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

Performance Analysis of LDPC Decoding using HPA-Distortion-Aware LLR in LEO Satellite Systems

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

Myongji University

요약

본 논문에서는 HPA 비선형이 존재하는 LEO 위성통신 환경에서 왜곡 통계를 반영한 LLR 계산이 LDPC 복호 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다. HPA 출력을 선형 성분과 왜곡 성분으로 모델링하고, 왜곡 통계를 유효 잡음 분산 계산에 반영하여 LLR을 구성한다. Saleh TWTA 모델 및 Rician 페이딩($K=10$) 환경에서 16-QAM 단일 반송파 전송에 대해 시뮬레이션한 결과, 왜곡 인지 LLR은 기존 LLR 대비 입력 백오프 (Input Back-Off, IBO) 감소 시 성능 이득이 증가하며, IBO=0 dB에서 0.5 dB의 SNR 개선을 달성하였다. 이는 왜곡 통계 반영을 통해 낮은 IBO 운용에서도 복호 성능을 확보하여 전력 제약이 있는 LEO 위성 시스템에서 HPA 효율 향상에 기여함을 입증한다.

I. Introduction

저궤도 위성통신(Low Earth Orbit, LEO)은 짧은 통신 지연과 광역 커버리지로 6G 네트워크의 핵심 요소로 주목받고 있으나[1], 위성 탑재 고출력증폭기(High Power Amplifier, HPA)의 비선형 특성으로 인해 신호 왜곡이 발생한다. 왜곡 억제를 위한 입력 백오프(Input Back-Off, IBO) 운용은 전력 효율을 저하시키는 트레이드오프를 발생시킨다.

일반적으로 Low-Density Parity-Check (LDPC) 부호의 복호는 Demapper 가 계산한 로그 우도비(Log-Likelihood Ratio, LLR)를 사용하는 Soft-decision 방식을 사용한다[2]. HPA 비선형 환경에서 AWGN 만을 가정한 기준 LLR은 유효 잡음 분산을 부정확하게 추정하여 복호 성능을 저하시킨다. [3]은 5G NR polar code에 대해 왜곡을 고려한 LLR 계산을 적용하였으나, LEO 환경의 LDPC 시스템 평가는 제한적이다.

본 논문에서는 HPA 비선형 환경에서 왜곡 통계를 반영한 LLR의 LDPC 복호 성능을 평가한다. IBO 변화에 따른 BER 성능 비교를 통해 왜곡 통계 반영의 효과를 정량적으로 제시한다.

II. SYSTEM MODEL

A. System Description

본 논문에서는 LDPC 부호화된 16-QAM 시스템을 고려하며, LEO 위성 링크의 HPA 비선형 및 Rician fading 채널 환경을 가정한다. 정보 비트는 LDPC 부호화 후 16-QAM 변조되어 송신 심볼 $x_n \in X$ 를 생성한다. K-factor 가 10 인 Rician fading channel 환경이며, Perfect channel estimation을 가정한다. 송신 심볼 x_n 은 HPA를 거쳐 비선형 출력 $u_n = f_{HPA}(x_n)$ 을 생성한다. 채널 계수 h_n 과 AWGN $w_n \sim CN(0, N_0)$ 을 거쳐 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

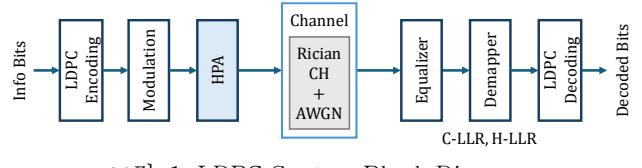


그림 1. LDPC System Block Diagram

$$y_n = h_n u_n + w_n \quad (1)$$

B. HPA Nonlinearity Modeling

HPA는 Saleh TWTA를 통해 모델링된다. 입력 $x_n = r_n e^{j\phi_n}$ 에 대해 출력은 AM/AM 및 AM/PM 특성을 가지며 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

$$u_n = f_{HPA}(x_n) = A(r_n)e^{j(\phi_n + \Phi(r_n))} \quad (2)$$

$$A(r) = \frac{\alpha_A r}{1 + \beta_A r^2}, \quad \Phi(r) = \frac{\alpha_P r^2}{1 + \beta_P r^2} \quad (3)$$

본 논문에서는 $\alpha_A = 2.1587, \alpha_P = 4.0033, \beta_P = 9.1040$ 을 사용하며, β_A 는 Target IBO에 따라 결정된다.

비선형 출력 u_n 은 Bussgang-type 분해를 통해 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_n = ax_n + d_n \quad (4)$$

d_n 은 입력 x_n 과 비상관인 왜곡 성분으로 $E[d_n x_n^*] = 0$ 을 만족한다. 여기서 a 는 선형 이득이며, σ_d^2 은 비선형 왜곡 분산이다.

C. Receiver Processing

수신단은 채널 h_n 및 이득 계수 a 를 이용해 등화를 수행한다. 등화 심볼은 식 (5)으로 정의된다.

$$z_n = \frac{y_n}{ah_n} = x_n + \frac{h_n d_n}{ah_n} + \frac{w_n}{ah_n} = x_n + \frac{d_n}{a} + \frac{w_n}{ah_n} \quad (5)$$

Soft demapper는 LDPC 복호를 위한 LLR을 계산하며, 이때 유효 잡음 분산 $\sigma_{z,n}^2$ 의 구성 방식이 복호 성능에 영향을 미친다.

III. LLR COMPUTATION

n 번째 등화 심볼 z_n 에 포함된 j 번째 비트 $b_{n,j}$ 에 LLR은 다음과 같이 계산된다.

$$LLR(b_{n,j}) = \frac{\ln \left(\sum_{x \in X_j^0} \exp \left(-\frac{|z_n - x|^2}{\sigma_{z,n}^2} \right) \right)}{\sum_{x \in X_j^1} \exp \left(-\frac{|z_n - x|^2}{\sigma_{z,n}^2} \right)} \quad (6)$$

여기서 X_j^0 및 X_j^1 은 각각 j 번째 비트가 0 또는 1인 성상점들의 집합이며, $\sigma_{z,n}^2$ 는 등화 도메인의 유효 잡음 분산이다. LLR 계산은 등가 잡음이 가우시안 분포를 따른다고 가정하며, 유효 잡음 분산 $\sigma_{z,n}^2$ 의 구성 방식에 따라 복호 성능이 달라진다. 기존 방식(Conventional LLR, C-LLR)은 HPA 왜곡을 고려하지 않고 AWGN 만 존재하는 선형 채널을 가정하여, 유효 잡음 분산을 AWGN 분산 N_0 만을 고려하여 계산한다. 반면, 왜곡 인지 방식(Distortion-aware LLR, D-LLR)은 HPA 비선형 왜곡 d_n 을 등가 잡음으로 유효 잡음 분산을 보정한다. 이는 채널 특성을 고려하여 왜곡의 영향을 LLR 계산에 반영하는 방식이다. 본 논문에서는 이 두 가지 접근의 성능을 비교하여 HPA 비선형 환경에서 왜곡 통계 반영의 효과를 분석한다.

IV. SIMULATION RESULT

본 논문에서는 고도 600 km의 LEO 위성 하향링크 환경에서 Ka-band (20 GHz)를 사용하는 단일 반송파 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 5G NR LDPC 부호를 사용하며, 세부 파라미터는 Table I에 제시하였다.

그림 2는 단일 반송파 시스템에서 IBO 별 HPA 왜곡 반영 여부에 따른 BER 성능을 나타낸다. IBO 가 감소할수록 HPA 비선형 왜곡이 증가하며, C-LLR 대비 D-LLR의 성능 이득이 증가한다. IBO=6 dB에서는 두 기법 간 성능 차이가 미미하나, IBO 가 감소함에 따라 성능 격차가 확대된다. BER= 10^{-3} 기준으로 IBO=2 dB에서 약 0.1 dB, IBO=3 dB에서 약 0.2 dB, IBO=0 dB에서 약 0.5 dB의 SNR 이득을 보인다. 이는 HPA 왜곡이 강할수록 왜곡 오차 통계를 LLR 연산 시 반영하는 것이 LDPC 복호 성능 개선에 효과적임을 입증한다.

V. CONCLUSION

본 논문에서는 HPA 비선형이 존재하는 LEO 위성통신 환경에서 Bussgang 이론 기반 D-LLR의 LDPC 복호 성능을 평가하였다. Saleh TWTA 모델 및 Rician fading ($K=10$) 환경에서 시뮬레이션 결과, D-LLR은 C-LLR 대비 IBO가 낮을수록 성능 이득이 증가하며, IBO=0 dB에서 최대 0.5dB의 SNR 이득을 보였다. 이러한 결과

Table 1. 실험 파라미터

Info Len K	1024
Code Rate R	1/3
Max Iteration	20 Iterations
Decoding	Layered Offset Min-Sum
Offset	0.3
Modulation	16-QAM
Channel	Rician Fading($K=10$ dB), AWGN

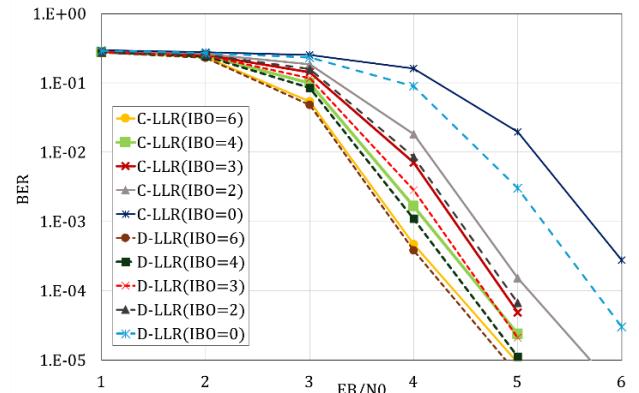


그림 2. Single Carrier 전송에서 IBO 조건에 따른 C-LLR과 D-LLR BER 성능 비교

는 HPA 왜곡이 클수록 왜곡 오차 분산 σ_d^2 를 LLR 계산에 반영하는 것이 LDPC 복호 성능 개선에 효과적임을 입증한다.

제안한 방식은 송신단(Gateway)에서 계산한 σ_d^2 정보를 하향링크 제어 채널을 통해 수신단(Gateway)으로 전달함으로써 구현 가능하다. 수신단은 개선된 복호 성능을 기반으로 링크 품질을 모니터링하고, 상향링크 피드백을 통해 송신단에 적정 IBO 제어 파라미터를 전송할 수 있다. 이를 통해 불필요한 HPA back-off 사용을 감소시키고 HPA 전력 효율을 증대시키는 Cross-layer 최적화가 가능하다.

수신단-송신단 간 피드백 루프를 구현하여 링크 품질 기반 적응적 IBO 제어를 통해 복호 성능과 HPA 전력 효율을 동시에 최적화하는 실용적인 위성통신 시스템 설계가 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

- [1] Ren J., Sun D., Pan D., Li M., and Zheng J., "Cost-Efficient LEO Navigation Augmentation Constellation Design under a Constrained Deployment Approach," International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2021, Art. no. 5042650, pp. 1-18, 2021.
- [2] 3GPP, "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN)," 3GPP TR 38.821, v16.0.0, Dec. 2019.
- [3] Al-Rubaye G. A., "Performance of 5G NR-polar QAM-OFDM in Nonlinear Distortion plus Non-Gaussian Noise over Rayleigh Fading Channel," AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2023.