

IRIG 106 기반 LDPC 복호를 위한 최적의 채널 신뢰도 추정 연구

홍예권*, 정지원°, 한정우*

A Study on an Optimal Channel Reliability Estimation for LDPC Decoding Based on IRIG 106 Standards

Ye-gwon Hong*, Ji-won Jung°,
Jeong-woo Han*

요약

LDPC 부호와 같은 반복 복호 방식의 부호는, 채널 신뢰도의 평가가 성능에 있어서 매우 중요한 변수이며, 부정확한 채널 신뢰도는 오히려 성능을 더욱 악화시킨다. 본 논문에서는 IRIG 106 텔레메트리 표준에 적용된 SOQPSK-TG 복조부와 LDPC 복호기가 결합된 구조에서, 최적의 채널 신뢰도 값 추정 방식을 제안한다.

Key Words : IRIG 106, LDPC, SOQPSK-TG, Noise variance, Channel reliability

ABSTRACT

Channel reliability estimation for iterative codes such as LDPC codes is very important factor, an incorrect estimation of channel reliability induced performance degradation. This paper proposes optimal channel reliability estimation method for IRIG 106 standard which concatenates LDPC decoder with SOQPSK-TG demodulator.

I. 서론

IRIG (Inter-Range Instrumentation Group) 106 텔레메트리 표준은 항공 우주 분야에서 발사체에 대한 동작 정보를 송수신하는 디지털 통신 방식의 표준이다^[1]. 본 논문에서는 텔레메트리 표준에서 SOQPSK-TG (Shaped Offset Quadrature Phase Shift Keying - Telemetry Group) 복조 심볼을 입력으로 갖는 LDPC (Low Density Parity Check) 부호의 복호에 관하여 연구하였다^[2]. 일반적으로 복조 심볼과 수신단에서 추정된 채널 신뢰도를 곱하여, LDPC 복호 입력으로 하여 반복을 통해서 성능을 향상시킨다. 따라서 정확한 채널 신뢰도의 평가가 반복을 통한 성능 향상에 있어서 매우 중요한 요소이다^[3]. +1/-1을 전송하는 antipodal 변조 방식인 BPSK, QPSK와 같은 복조 모델에서는 채널 신뢰도를 간단한 구조로 추정할 수 있으나, SOQPSK-TG에서 적용된 precoder 및 CPM(Continuous Phase Modulation)의 경우에는 격자 기반으로 복조하기 때문에^[4] 복조 후 신호 성분 및 잡음 성분의 크기가 달라져 성능 열화를 초래할 수 있다. 따라서 잡음 분산 및 신호 성분 비율을 모의 실험을 통하여 추정하였으며, 추정값을 통해 최적의 채널 신뢰도를 도출하였다. 최적의 채널 신뢰도를 적용 시 IRIG 106 텔레메트리 표준에 제시된 정보 비트 크기($K=1024, 4096$)와 부호화율($R=1/2, 2/3, 4/5$)에 대하여 기존 방식과 성능 비교하였으며, 최적의 채널 신뢰도를 적용 시 성능이 우수함을 알 수 있다.

II. 채널 신뢰도 추정 방식

본 논문에서는 IRIG 106 텔레메트리 표준에 따른 모의실험 모델을 설계하여 모의실험을 통한 최적 채널 신뢰도를 추정한다. 그림 1은 IRIG 106에서 제시된 시스템 모델을 나타낸다.

K 의 크기를 가지는 정보 비트열 $D=\{d_0, d_1, d_2, \dots, d_{K-1}\}$ 를 부호화율에 따라 LDPC 부호화하여 N 개의 부호화 비트 $C=\{c_0, c_1, c_2, \dots, c_{N-1}\}$ 를 생성 후 수신단에서 패킷동기를 위한 프리앰블 비트

* 이 논문은 2024년도 한국항공우주연구원의 우주센터 신진화사업의 지원을 받아 수행된 연구임

• First Author : (0009-0003-1354-3709) Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, cl170625@gmail.com, 학생(석사), 정회원

° Corresponding Author : (0000-0002-9467-2478) Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, jwjung@kmou.ac.kr, 정교수, 정회원

* Korea Aerospace Research Institute, hjw1002@kari.ac.kr, 선임연구원(박사)

논문번호 : 202407-151-B-LU, Received July 19, 2024; Revised July 30, 2024; Accepted July 30, 2024

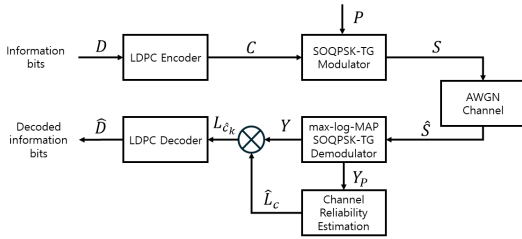


그림 1. IRIG 106 시스템 모델
Fig. 1. IRIG 106 system model

$P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{n-1}\}$ 를 연결하여 SOQPSK-TG 변조한다. SOQPSK-TG 변조는 LDPC 부호 출력 비트를 precoder를 통하여 3진 데이터(-1, 0, 1)로 변환하여, I 채널과 Q 채널을 반주기 만큼 shift하여 위상변화를 적재하는 CPM기반 변조 방식이다. $n + N$ 개의 사이즈를 가지는 변조된 신호 $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n+N-1}\}$ 는 평균이 0 이며, 분산이 σ_R^2 인 가우시안 잡음 채널을 통과한다. SOQPSK-TG의 복조 방식은 입력 비트에 따라 precoder와 CPM의 위상 변화를 이용한 격자로 구성될 수 있으며, 순방향 및 역방향 매트릭을 이용한 max-log MAP 방식으로 연관정 값으로 복조한다. 복조된 심볼에서 n 개의 프리앰블 심볼을 제거한 N 길이의 심볼열 Y 의 k 시점에서 심볼을 y_k 라 하면 $\hat{c}_k$ 에 대한 LLR(Log Likelihood Ratio)인 $L_{\hat{c}_k}$ 은 LDPC 복호기의 입력 심볼이 되며, 이는 아래 식 (1)과 같다.

$$L_{\hat{c}_k} = \log\left(\frac{P_r(y_k | c_k = 0)}{P_r(y_k | c_k = 1)}\right) = L_c \times y_k \quad (1)$$

$$L_c = -\frac{2}{\sigma_R^2} \quad (2)$$

식 (2)에서 L_c 는 채널 신뢰도를 나타내며, 잡음 분산 σ_R^2 이 작은 경우에는 수신 신호가 높은 신뢰를 가짐을, 큰 경우에는 낮은 신뢰를 가지는 의미이다. LDPC 복호기의 성능은 정확한 LLR을 입력으로 했을 때 반복으로 인한 성능 향상을 가져오며, 정확한 LLR의 추정은 정확한 채널 신뢰도의 추정과 같은 의미이다. 그러나 식 (2)는 그림 1의 수신 신호 $\hat{S}$ 에 대한 채널 신뢰도이며, 실제로 LDPC로 입력되는 Y 에 대한 채널 신뢰도와는 차이를 가져 성능 열화를 초래할 수 있다. 따라서 $\hat{S}$ 를 복조한 심볼 중 n 개의 프리앰블 심볼 Y_P 를 이용하여 복조 심볼에 대한 잡음 분산 σ_{SOQPSK}^2 을 식 (3)과 같이

구하여 식 (2)의 L_c 에 σ_R^2 대신 σ_{SOQPSK}^2 로 대체하여야 한다.

$$\sigma_{SOQPSK}^2 = \text{Var}(Y_P - rP) \quad (3)$$

식 (3)에서 $\text{Var}(x)$ 는 x 의 분산 평가 함수를 나타낸다. 그림 1과 같은 모델에서는 격자 기반의 max-log MAP 방식의 복조 이후 복조 심볼의 신호 성분 및 잡음 성분의 크기가 변하며, 채널 신뢰도 또한 값이 변하므로 본 논문에서는 송수신자가 알고있는 프리앰블 전송 심볼 대비 복조 심볼 비율인 r 을 도입하여 식 (3)에서 r 을 변화 하면서 σ_{SOQPSK}^2 가 최소가 되는 r 을 각 Es/No에서 구한다. 여기서 r 은 [0~1]의 분포를 가지며, r 값이 0.5 인 경우에는 송신 신호 대비 복조 신호의 크기가 절반의 경우에 해당된다. σ_{SOQPSK}^2 가 최소가 되는 r 을 구하는 이유는 식 (3)에서 잡음이 첨가된 복조 심볼 Y_P 에서 전송 심볼이 차지하는 비율을 P 에 곱함으로써 정확한 잡음 성분만을 추정하기 위함이다.

그림 2는 $R=1/2$, $K=4096$ 의 경우 Es/No에 따른 식 (3)을 적용하여 y 축의 r 에 따른 σ_{SOQPSK}^2 분포를 나타낸 것이다. 그림 2의 색깔은 잡음 분산 분포를 나타내며 푸른색일수록 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 각 Es/No에서 최소의 σ_{SOQPSK}^2 를 도출하는 r 을 빨간색 선으로 나타내었으며 Es/No가 증가할수록 σ_{SOQPSK}^2 가 최소가 되는 r 이 증가하는 것을 확인하였다. 이는 Es/No가 증가할수록 잡음의 영향을 덜 받아 r 이 1에 근접하므로 복조 심볼과 송신 심볼은 근사함을 의미한다. 식 (1) ~ 식(3)을 이용하여 LDPC 복호기 입력 심볼 $\hat{c}_k$ 에 대한 LLR은 식 (4)와 같다.

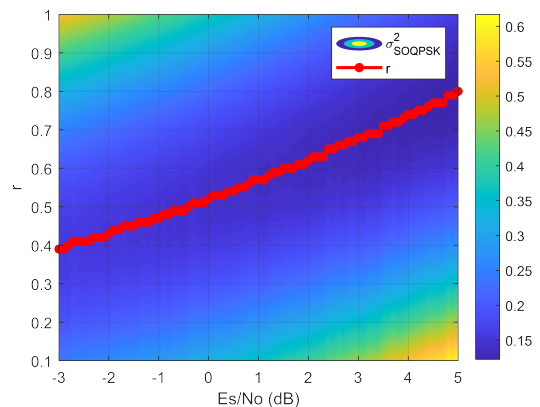


그림 2. 분산 추정에 따른 비율 곡선 ($R=1/2$, $K=4096$)
Fig. 2. Ratio curve according to variance estimation

$$L_{c_k} = \hat{L}_c \times y_k \quad (4)$$

$$\hat{L}_c = -\frac{2r}{\sigma_{SOQPSK}^2} \quad (5)$$

식 (5)는 복조 후 식 (3)을 이용한 최적의 채널 신뢰도 $\hat{L}_c$ 를 나타낸다. 식 (4)와 식 (5)는 σ_{SOQPSK}^2 를 적용하였기 때문에 복조기 출력 신호 성분 y_k 에서 r 을 곱함으로써 실제 복조 성분을 의미한다. 기존의 $\hat{L}_c$ 를 추정하는 과정은 특정한 Es/No에서 L_c 를 변화하면서 가장 낮은 오류율을 갖는 $\hat{L}_c$ 를 추정하였으나, 본 논문에서 제시한 추정 방식은 모든 Es/No의 영역에서 최적의 추정 방식이다.

식 (2)과 식(3), 그림 2를 기반으로 r 과 σ_{SOQPSK}^2 , σ_R^2 를 그림 3에 나타내었다. Es/No값이 증가할수록 수신 신호 분산 σ_R^2 은 작아짐을, r 은 커짐을 알 수 있으며, 두 개의 분산 값의 격차는 줄어들음을 알 수 있다. 부호화율이 낮은 경우 작은 Es/No에서, 부호화율이 높은 경우 큰 Es/No에서는 오류 정정이 이루어지므로, 그림 3에서 부호화율이 낮은 경우에는 σ_R^2 과 σ_{SOQPSK}^2 에 대한 차이가 커짐으로 성능 영향이 클 수 있으며, 부호화율이 높은 경우는 r 이 1에 근접하고 σ_R^2 과 σ_{SOQPSK}^2 의 값은 거의 같으므로 식 (2)를 적용하더라도 성능 변화가 거의 없으리라 사료된다. 이는 III장의 모의 실험 결과를 통하여 증명한다.

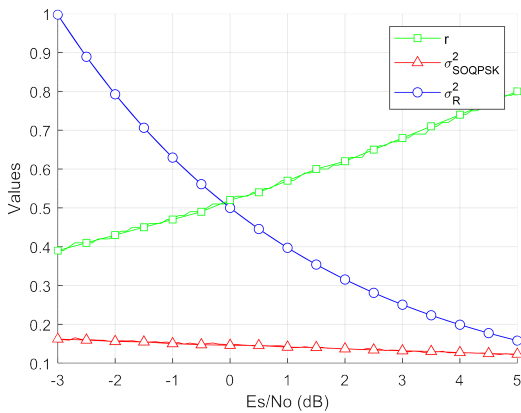


그림 3. 채널 신뢰도 파라미터 추정 곡선 ($R=1/2$, $K=4096$)
Fig. 3. Channel reliability parameters estimation curve

III. 모의 실험 결과

본 논문에서 IRIG 106 표준안에 제시된 표 1과 같은 모의 실험 파라미터를 적용하였다. LDPC 복호 반복 횟수는 30회로 설정하였다.

그림 4와 그림 5는 식 (2)의 기존 채널신뢰도 L_c 와 식 (5)에서 제안한 $\hat{L}_c$ 의 적용 여부에 따른 R 및 K 사이즈에 대한 BER 성능 곡선이다. 모의 실험 결과 L_c 를 적용하였을 때 대비 $\hat{L}_c$ 를 적용하였을 때 $R=1/2$ 의 경우 0.8dB~1.0dB, $R=2/3$ 의 경우 0.1dB~0.4dB의 부호화 이득을 얻을 수 있으며, $R=4/5$ 의 경우에는 거의 비슷한 성능을 보였다. 또한 각 부호화율에 대해서, K 사이즈가 1024인 경우에 비해 4096인 경우 $\hat{L}_c$ 적용에 따른 부호화 이득이 크다. 따라서 부호화율이 낮을수록, 정보 비트열 크기가 클수록 채널 신뢰도 $\hat{L}_c$ 의 적용이 BER 성능 향상에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 채널 신뢰도는 반복 복호 과정에서 입력 신호가 각 노드간 업데이트에 반영되는 정도를 결정짓는 중요한 요소이며, 본 논문에서 제안하는 $\hat{L}_c$ 가 기존 L_c 대비

표 1. 모의 실험 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Modulation	SOQPSK-TG
Channel coding	LDPC
Coding rate R	1/2, 2/3, 4/5
Information bit size K	1024, 4096
Iteration	30
Channel	AWGN

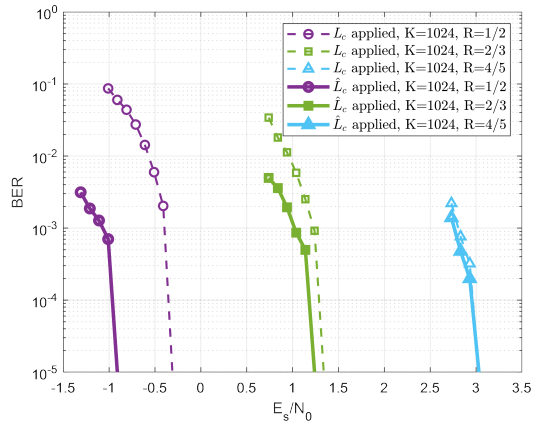


그림 4. BER 성능 비교 ($K=1024$)
Fig. 4. BER performance comparison

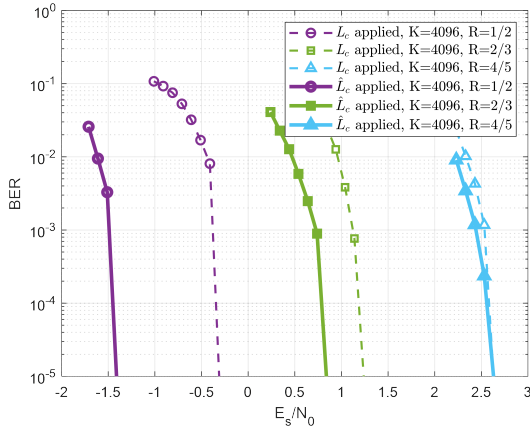


그림 5. BER 성능 비교($K=4096$)
Fig. 5. BER performance comparison

더욱 정확한 채널신뢰도임을 모의 실험 결과를 통해 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 IRIG 106 표준에 제시된 LDPC 복호기와 SOQPSK-TG 복조기가 연결된 시스템에서 반복을 통한 LDPC 복호의 성능을 향상시키기 위해 최적의 채널 신뢰도를 추정하는 알고리즘을 제시한다. 모의 실험 결과 낮은 부호화율 및 큰 정보 비트 크기에서 최적 신뢰도 적용에 따른 성능 이득이 커짐을 알 수 있었다. 복잡도 측면에서는, 구현 시 모의 실험에서 구한 수신 E_s/N_0 와 비율에 최적 채널 신뢰도를 LUT(Look Up Table)로 간단히 구현할 수 있다. 향후, 채널 신뢰도를 요하는 반복 부호와 연결된 부호가 적용되는 시스템일 경우, 복호 성능을 향상시키기 위해서는 반복 복호기의 전단에 존재하는 복호기 및 복조기의 출력에 대한 채널 신뢰도 추정이 중요함을 알 수 있으며, 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 단순한 가우시안 채널뿐만 아니라 도플러 및 multi-path가 포함된 non selective fading 채널에서도 적용가능한 방식이다.

References

- [1] Telemetry Standards, *IRIG-106 Standard 106 Chapter 2*, Jul. 2023.
- [2] Y. M. Gu, S. Kim, and B. Kim, "Telemetry standard 106-17 LDPC decoder design using HLS" *J. Korean Soc. for Aeronautical & Space Sci.*, vol. 49, no. 4, pp. 335-342, Apr. 2021.
(<https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.4.335>)
- [3] D. J. C. Mackay and R. M. Neal, "Near shannon limit performance of low-density parity-check codes," *Electr. Lett.*, vol. 32, pp. 1645-1646, Aug. 1996.
(<https://doi.org/10.1049/el:19961141>)
- [4] C. Sahin and E. Perrins, "The capacity of SOQPSK-TG," *2011-MILCOM IEEE*, Nov. 2011.
(<https://doi.org/10.1109/MILCOM.2011.6127730>)