

IRIG 106 텔레메트리 표준 기반 LDPC 복호 저복잡도 알고리즘에 대한 연구

홍예권, 정현우, 이재훈, 정지원, 이태진*

한국해양대학교, *한국항공우주연구원

cl170625@g.kmou.ac.kr, gusdn0930@g.kmou.ac.kr, bear9907@g.kmou.ac.kr,

jwjung@kmou.ac.kr, *leetj0101@kari.re.kr

A Study on the Low-Complexity Algorithm of an IRIG 106 Telemetry Standard-Based LDPC decoder

Hong Ye Gwon, Jeong Hyun Woo, Lee Jae Hun, Jung Ji Won, Lee Tae Jin*

Korea Maritime and Ocean Univ., *Korea Aerospace Research Institute.

요약

LDPC 부호의 복호 방식은 비트 노드와 체크 노드의 반복적인 정보 교환으로 성능을 향상시킨다. 그러나 일정 반복 이후 비트 노드의 값과 체크 노드의 값이 일정한 값으로 유지되어 반복으로 인한 성능 향상에 영향을 미치지 못한다. 따라서 본 논문에서는 IRIG 106-23 텔레메트리 표준에 적용된 LDPC 복호기에서 목표 BER을 설정하여 복호기의 각 비트 노드 및 체크 노드의 임계값을 적용하여 다음 반복 시 계산하지 않는 early detection 알고리즘을 적용하여 계산량을 감소시켰다. 최적 채널 신뢰도를 추정하는 알고리즘을 적용하여 기존 방식 및 제안된 early detection 알고리즘을 적용한 계산량 감소 방식을 사용하여 모의 실험을 하였다. 표준에 제시된 정보 비트 크기($K=1024$)와 부호화율($R=1/2$)에서 가우시안 잡음 적용 시, 기존 방식과 동일한 SNR에서 목표 BER을 달성하며 약 53%의 계산량이 감소함을 확인하였다.

I. 서론

IRIG (Inter-Range Instrumentation Group) 106 텔레메트리 표준은 지상에서 발사체의 정보를 실시간으로 파악하기 위한 무선 통신 규격으로 이는 LDPC (Low Density Parity Check) 부호를 적용한다 [1-2]. 표준에 적용된 LDPC 부호의 복호는 행렬 $H \in \{0, 1\}^{N_c \times N_b}$ 로 표현되는 노드 연결 구조를 통하여 비트 노드와 체크노드의 반복적인 정보 교환으로 이루어진다. 이러한 반복 복호는 복호기 입력 신호에 곱해지는 채널 신뢰도가 BER(Bit Error Ratio) 성능에 중요한 요소이므로 본 논문에서는 최적 채널 신뢰도를 추정하는 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서는 가우시안 잡음이 존재하는 채널에서 최적 채널 신뢰도와 제안된 계산량 감소 알고리즘을 적용하여 표준에 제시된 정보 비트 크기($K=1024$)와 부호화율($R=1/2$)에서 성능을 분석하였다.

II. 본론

본 논문에서는 IRIG 106-23 텔레메트리 표준에 따른 모의실험 모델을 설계하여 모의실험을 통하여 계산량 감소 알고리즘의 임계값에 따른 BER 성능 및 노드 계산량을 구한다. K 의 크기를 가지는 정보 비트열을 부호화율 R 에 따라 LDPC 부호화하여 N 개의 비트를 생성 후 가우시안 잡음 채널을 통과하여 수신한다.

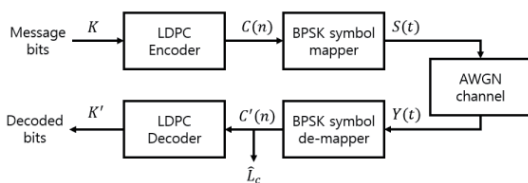


그림 1. 모의실험 모델
Fig 1. Simulation model

송신 심볼열 S 는 N 개의 LDPC 부호화 데이터에 P 개의 파일럿을 추가하여 $[-1, +1]$ 의 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 위상으로 매핑한 심볼열이다. 파일럿 심볼열은 $S_p = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_P\}$ 이며, 송신 심볼열은 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_{P+N}\}$ 이다. 수신 심볼열 Y 는 가우시안 잡음이 첨가된 송신 심볼열이며, 채널 신뢰도가 곱해진 후 LDPC 복호기에 입력된다. Y 의 파일럿 심볼열을 $Y_p = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_P\}$ 라 하면 채널 신뢰도 \hat{L}_c 은 식 (1)과 같다.

$$\hat{L}_c = -\frac{2r}{\sigma^2} \quad (1)$$

σ^2 은 S_p 와 Y_p 의 차이로 구한 잡음 분산을 나타내며, r 은 S_p 에 대한 Y_p 의 비율을 LSE(Linear Square Error) 방식으로 측정된 것이다. 이러한 채널 추정 방식은 다중 경로 존재 시에도 신뢰성 높은 채널 추정 방식이다.

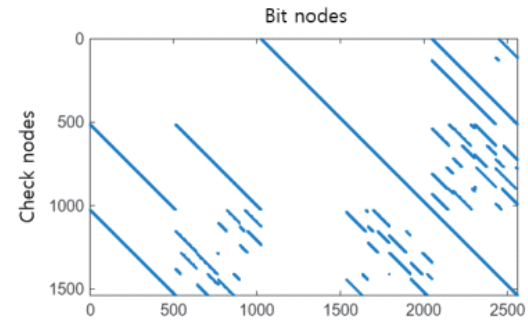


그림 2. H 행렬 ($K=1024, R=1/2$)
Fig 2. H matrix ($K=1024, R=1/2$)

그림 2는 $c = 1, 2, \dots, N_c$ 번째 체크 노드와 $b = 1, 2, \dots, N_b$ 번째 비트 노드의 연결이 참이면 1, 거짓이면 0으로 나타내는 원소 $H_{c,b}$ 로 이루어진

H 행렬을 나타낸 그림이다. 따라서 b 번째 비트 노드에 연결된 체크 노드의 집합을 $\mathcal{N}(b) = \{c | H_{c,b} = 1\}$, c 번째 체크 노드에 연결된 비트 노드의 집합을 $\mathcal{M}(c) = \{b | H_{c,b} = 1\}$ 와 같이 표현할 수 있다. H 에 따른 기존 방식의 계산량을 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, I 는 최대 반복 횟수를 의미한다.

$$\left\{ \sum_{b=1}^{N_b} (|\mathcal{N}(b)| - 1) + \sum_{c=1}^{N_c} (|\mathcal{M}(c)| - 1) \right\} \times I \quad (2)$$

본 논문에서는 i 번째 반복의 b 번째 비트 노드의 값을 $Lq_b^{(i)}$, c 번째 체크 노드의 값을 $Lr_c^{(i)}$ 라고 할 때, 두 가지 조건에 의하여 각 노드의 계산을 종료하고 다음 반복부터 현재 반복의 노드 값을 사용하여 계산량을 감소하는 early detection 알고리즘을 적용한다. 첫 번째 조건은 노드의 값이 임계값 T 를 넘으면 종료하는 조건이다. 두 번째 조건은 특정 노드에 연결된 모든 노드가 계산이 종료된 노드라면 해당 노드도 종료하는 조건이다. 두 번째 조건을 확인하기 위한 계산량 감소를 위해 이전 반복과 현재 반복의 노드 값을 비교하여 변화량 비율이 τ 를 넘지 않으면 종료하도록 하였다. 이 두 가지 조건을 사용하여 $Lq_b^{(i)}$ 를 종료하지 않는 조건 $\alpha_b^{(i)}$ 를 식 (3), $Lr_c^{(i)}$ 를 종료하지 않는 조건 $\beta_c^{(i)}$ 를 식 (4)로 표현하였다.

$$\alpha_b^{(i)} = \begin{cases} 1 & (i \leq 2) \\ \left[|Lq_b^{(i-1)}| < T \right] \left[\frac{|Lq_b^{(i-2)} - Lq_b^{(i-1)}|}{Lq_b^{(i-2)}} > \tau \right] & (i > 2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta_c^{(i)} = \begin{cases} 1 & (i \leq 2) \\ \left[|Lr_c^{(i-1)}| < T \right] \left[\frac{|Lr_c^{(i-2)} - Lr_c^{(i-1)}|}{Lr_c^{(i-2)}} > \tau \right] & (i > 2) \end{cases} \quad (4)$$

두 번째 반복까지는 모든 노드를 계산하도록 하였다. Early detection 알고리즘을 적용하였을 때 계산량은 식 5와 같다.

$$\sum_{i=1}^I \left\{ \sum_{b=1}^{N_b} \alpha_b^{(i)} (|\mathcal{N}(b)| - 1) + \sum_{c=1}^{N_c} \beta_c^{(i)} (|\mathcal{M}(c)| - 1) \right\} \quad (5)$$

모의 실험을 통하여 기존 방식을 사용하였을 때 목표 BER을 달성하는 SNR을 설정하였으며, 표 1에 따라 파라메타를 설정하여 모의 실험을 진행하였다.

표 1. 모의실험 파라메타

Table 1. Simulation parameters

Channel coding	LDPC ($R=1/2$)
Information bit size K	1024
Early detection algorithm	applied, not applied
Iteration	30
Channel	AWGN
Channel reliability	\hat{L}_c
τ	0.01
T	$10^{1.9}, 10^{1.7}, 10^{1.5}, 10^{1.3}$

그림 3은 T 에 따른 BER 성능이다. 기존 BER 성능에서 목표 BER을 10^{-5} 로 설정하여 Es/No 가 -1dB일 때 목표 BER을 달성하는 반복 횟수

에서의 평균 노드 값이 약 $10^{1.9}$ 임을 확인하였다. 따라서 T 를 $10^{1.9}$, $10^{1.7}$, $10^{1.5}$, $10^{1.3}$ 으로 감소하며 성능을 확인한 결과 $T=10^{1.3}$ 인 경우 목표 BER을 달성하지 못하였으므로, 모의 실험 결과 최적 T 는 $10^{1.5}$ 임을 확인하였다.

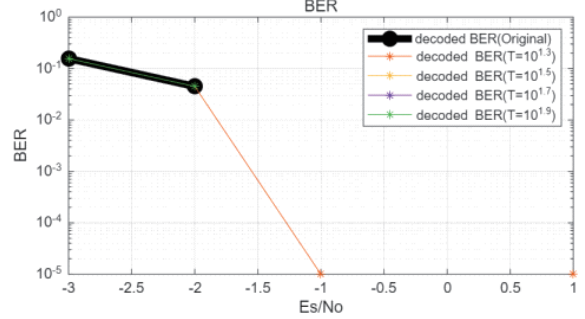


그림 3. T 에 따른 BER 성능

Fig 3. BER Performance according to T

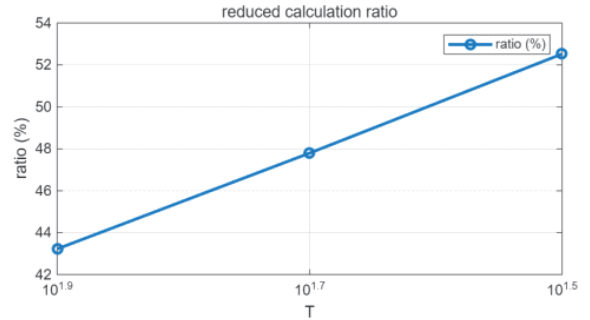


그림 4. T 에 따른 계산량 감소 비율

Fig 4. Calculation reduce ratio according to T

그림 4는 T 에 따라 노드 계산량이 기존 대비 얼마나 감소하였는지 나타내는 그림이다. $T=10^{1.9}$ 의 경우 약 43%, $T=10^{1.7}$ 의 경우 약 48%, 최적 임계값인 $T=10^{1.5}$ 의 경우 약 53%의 계산량 감소를 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 지상국과 발사 간 무선 통신 시 가우시안 잡음이 존재하는 채널을 구성하여 제안된 계산량 감소 알고리즘과, 최적 채널 신뢰도를 적용하여 모의 실험을 진행하였다. 표 1에 제시된 정보 비트 크기($K=1024$)와 부호화율($R=1/2$)에서 기존방식 대비 동일 목표 BER을 달성하면서 43 ~ 53%의 계산량 감소를 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 한국항공우주연구원의 우주센터 선진화사업의 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Telemetry Standards, IRIG-106 Standard 106-23 Chapter 2, July 2023.
- [2] CCSDS 131.1-O-2 Experimental Specification, September 2007.