



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(10), 879-882(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.10.879

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

LDPC 부호화한 SOQPSK-TG의 수신 성능 평가

구영모¹

Reception Performance Evaluation of LDPC-Encoded SOQPSK-TG

Young Mo Gu¹

Inha Technical College

ABSTRACT

The telemetry standard adopts SOQPSK-TG with excellent power and bandwidth efficiency as a modulation technique, and LDPC code with excellent performance as an error correction code. The SOQPSK-TG transmitter consists of a precoder and a CPM modulator. Rather than implementing each receiver separately, the reception performance is improved by combining the trellis and implementing it as a Viterbi decoder. In this paper, the reception performance of LDPC-encoded SOQPSK-TG was evaluated by replacing the Viterbi decoder with a max-log-map decoder capable of soft metric output. As a result of computer simulation in AWGN channel, there is an E_b/N_0 performance gain of about more than 0.7~0.8dB compared to the conventional method.

초 록

텔레메트리 표준은 전력 및 대역폭 효율이 우수한 SOQPSK-TG를 변조 기법으로, 복호 성능이 우수한 LDPC 부호를 오류 정정 부호로 채택하고 있다. SOQPSK-TG 송신기는 프리코더와 CPM 변조기로 구성되어 있는데 각각의 수신기를 따로 구현하는 것보다 트렐리스를 결합하여 하나의 비터비 복호기로 구현하면 수신 성능을 향상시킬 수 있는데 본 논문에서는 이 비터비 복호기를 소프트 메트릭 출력이 가능한 max-log-map 복호기로 대신하여 LDPC 부호화한 SOQPSK-TG의 수신 성능을 평가하였다. AWGN 채널에서 컴퓨터 모의 실험한 결과 기존의 방식보다 약 0.7~0.8dB의 E_b/N_0 성능 이득이 있다.

Key Words : Telemetry(원격 측정), SOQPSK-TG, LDPC(저밀도 패리티 검사 부호), Error Correction Code(오류 정정 부호), Max-log-map

1. 서 론

SOQPSK-TG (Shaped Offset Quadrature Phase Shift Keying-Telemetry Group)는 CPM (Continuous Phase Modulation)의 일종으로 전력 효율이 매우 우수한 변조 기법이다. 송신기는 프리코더(pre-coder)와 CPM 변조기로 구성되어 있는데 프리코더가 CPM

변조기 입력 신호의 고주파 성분을 억제하고 CPM 변조기에서 8 심벌에 걸친 올림 코사인(RC: Raised Cosine) 주파수 펄스를 사용하여 주파수 효율도 매우 우수하여[1,2] 텔레메트리 표준 106-17에 채택되었는데 수신기에서 Costas loop 또는 squaring loop와 같은 반송파 복원(carrier recovery) 장치를 사용할 경우 주파수 고정(lock)이 된 후에도 ± 90 도 또는 180도

† Received : May 3, 2021 Revised : July 23, 2021 Accepted : September 1, 2021

¹ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : ymgu@inhac.ac.kr, ORCID 0000-0002-3605-783X

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

의 위상 모호성(phase ambiguity)이 존재하므로 이를 해결하기 위해 송신기의 프리코더 앞에 차등 부호기(differential encoder)가 추가되었다[3]. 프리코더는 상태수가 4인 트렐리스 다이어그램으로 정의되는데 추가된 차등 부호기는 프리코더와 결합하여 차등 프리코더(differential pre-coder)로 구성하고 이 경우 트렐리스 상태수는 4에서 2로 감소하여 이를 비터비 복호기(Viterbi decoder)로 구현 시 수신기의 복잡도가 1/2로 감소한다[4].

SOQPSK-TG의 CPM 변조기를 상태수가 4인 트렐리스로 간략화한 후 상태수가 2인 차등 프리코더의 트렐리스와 결합하여 상태수가 8인 트렐리스로 표현하고 이를 다시 상태수가 4인 트렐리스로 축약하여 별도의 CPM 복조기 없이 상태수가 4인 간단한 비터비 복호기로 수신기를 구현하면 CPM 복조기와 차등 프리코더 복호기를 따로 구현하는 방식[5,6]보다 BER(Bit Error Rate)가 10^{-5} 일 때 약 1dB의 비트 에너지 대 잡음비(E_b/N_0) 성능 개선이 있다[7].

송신기에 차등 부호기가 없고 프리코더만 있는 경우에도 참고문헌 [7]과 유사한 방식으로 CPM 변조기와 프리코더를 상태수가 16인 트렐리스로 결합한 후 다시 상태수가 4인 트렐리스로 축약하면 수신기를 상태수가 4인 비터비 복호기로 구현할 수 있는데 참고문헌 [7]의 차등 부호기가 있는 경우와 비교하면 BER이 낮은 즉, 높은 E_b/N_0 영역에서는 성능 차이가 거의 없지만 BER이 10^{-2} 보다 큰 즉, 낮은 E_b/N_0 영역에서는 약 1dB 이상 성능이 더 우수하다[8].

텔레메트리 표준은 복호 성능이 우수하고 고속 복호가 가능한 LDPC (Low Density Parity Check) 부호를 오류 정정 부호로 채택하고 있는데 LDPC 부호를 동작시킬 경우에는 차등 부호기의 동작을 중지시킨다[3]. 이는 차등 부호기의 특성상 수신기에서 오류가 발생할 경우 오류 전파(error propagation)가 발생하여 LDPC 복호기의 성능을 저하시키기 때문인 것으로 추정된다. 낮은 E_b/N_0 영역에서는 차등 부호기가 없는 경우가 SOQPSK-TG 수신기 성능이 더 우수한다[8] LDPC 부호화한 SOQPSK-TG 시스템은 낮은 E_b/N_0 영역에서 동작하므로 송신기의 차등 부호기 존재 유무가 수신기의 LDPC 복호 성능에 큰 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 송신기에 차등 부호기가 없는 시스템에서 참고문헌 [8]을 기반으로 컴퓨터 모의실험을 통해 수신기의 LDPC 복호 성능을 평가하고 기존의 결과와 비교한다.

II. LDPC 복호기 성능 평가

2.1 송신기

LDPC 부호화한 SOQPSK-TG 송신기는 Fig. 1과 같이 LDPC 부호기, 프리코더, CPM 변조기로 구성

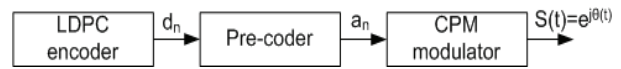


Fig. 1. Transmitter block diagram

Table 1. Telemetry standard 106-17 LDPC code length N per information length K

K	N		
	r=1/2	r=2/3	r=4/5
1,024	2,048	1,536	1,280
4,096	8,192	6,144	5,120

된다. 텔레메트리 표준은 우주 통신을 위한 표준인 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems)[9]에서 채택하고 있는 LDPC 부호의 일부를 그대로 채택하고 있는데 정보 비트 수 K와 부호율 $r(=K/N)$ 에 따른 부호 비트 수 N은 Table 1과 같다. LDPC 부호는 1의 밀도가 매우 낮은 패리티 체크 행렬 H 에 의해 정의되는데 부호 행렬 $c = [c_0, c_1, \dots, c_{N-1}]$ 와 식 (1)의 관계가 성립한다. Fig. 2는 $N=8192$, $K=4096$, $r=1/2$ 인 패리티 체크 행렬이다. 빗금 친 실선 부분은 행렬 원소 값이 1이고 여백은 0이다. 식 (1)에서 c^T 는 행렬 c 의 전치행렬(transposed matrix)를 의미한다. LDPC 부호기는 식 (1)로부터 패리티 생성 행렬을 유도하여 구현할 수 있다[3,9,10].

$$Hc^T = 0 \quad (1)$$

LDPC 부호기의 출력 d_n 은 $\{0,1\}$ 의 이진수인데 프리코더에서 $\{-1,0,+1\}$ 의 삼진수 a_n 으로 변환된다. 프리코더는 Fig. 3과 같이 상태수가 4인 트렐리스 다이어그램으로 정의되는데 출력 신호 a_n 이 +1에서 -1로 또는 -1에서 +1로 급격히 변화하지 않고 반드시 0을 거치게 하여 고주파 성분을 억제한다. Fig. 3의 트렐리스 다이어그램에서 실선 가지(branch)는 입력 d_n 의 값이 0일 때, 점선 가지는 1일 때이다.

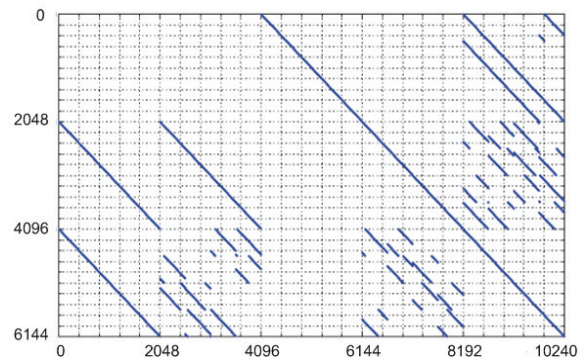


Fig. 2. Parity check matrix H for $N=8192$, $K=4096$, $r=1/2$ [4,9]

CPM 변조기는 a_n 과 올림 코사인(raised-cosine) 함수와 구형파의 윈도우 함수를 곱한 형태인 8 심벌 구간의 주파수 펄스(frequency pulse) $f(t)$ 를 곱하여 더한 결과를 식 (2)와 같이 적분한 누적 위상 $\theta(t)$ 를 $S(t)=e^{j\theta(t)}$ 의 형태로 출력한다[2].

$$\theta(t) = 2\pi h \int_{-\infty}^t \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n f(\tau - nT) d\tau \quad (2)$$

2.2 수신기

SOQPSK-TG 수신기에서 동기(coherent) 복조한 수신 신호를 심벌 간격 T 로 표본화할 경우 CPM 변조기는 Fig. 4와 같이 근사할 수 있고 수신 신호도 간섭 신호가 더해진 8-PSK(Phase Shift Keying)로 볼 수 있다[7]. Fig. 3의 프리코더 트렐리스 다이어그램은 상태수가 4이고 Fig. 4의 메모리가 있는 CPM 변조기도 상태수가 4인 트렐리스로 표현할 수 있으므로 둘을 상태수가 16인 트렐리스로 결합할 수 있는데 이를 다시 Fig. 5와 같은 상태수 4인 트렐리스 다이어그램으로 축약할 수 있다[8]. Fig. 5에서 각 가지에는 CPM 변조기의 8-PSK 출력 신호 $i(\Theta_n = \pi/4)$ 를 표시하였다.

Figure 5를 기반으로 하는 비터비 복호기로 SOQPSK-TG 수신기를 구현하면 CPM 복조기와 프리코더 복호기를 따로 구현하는 방식[5,6]보다 BER이 10^{-5} 일 때 약 1dB의 E_b/N_0 이득이 있다[7,8].

LDPC 복호기 입력 m_n 은 {0,1}의 판별값(hard decision)이 아닌 소프트 메트릭(soft metric)이어야 하므로 비터비 복호기를 MAP (Maximum A Posteriori) 복호기를 간략화한 Max-Log-MAP 복호기[11]로 대신하였

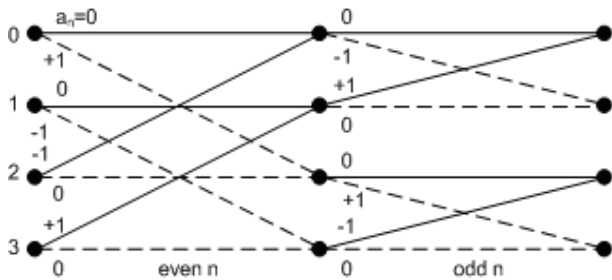


Fig. 3. Trellis diagram of pre-coder

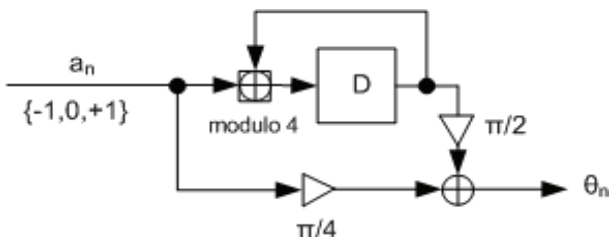


Fig. 4. Approximated CPM modulator[7]

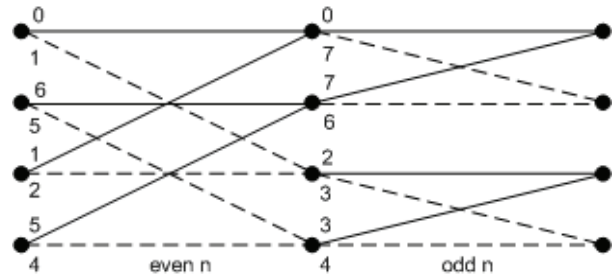


Fig. 5. Combined 4-state trellis diagram [8]

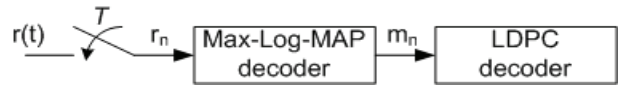


Fig. 6. Receiver block diagram

다. LDPC 복호기는 Fig. 2의 패리티 체크 행렬에서 행단위로 차례로 복호를 수행하는 layered-decoding 알고리즘을 적용하였고 최대 반복 복호 회수는 30으로 제한하였다[12]. Fig. 6은 수신기 블록 다이어그램이다.

2.3 LDPC 복호기 성능 평가

LDPC 복호기를 포함한 수신기의 BER 성능을 Table 1에 정의된 K와 r에 따라 AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널에서 컴퓨터 모의실험으로 평가한 결과는 Fig. 7과 같다. SOQPSK-TG 송수신장비를 제작 판매하고 있는 Quasonix사의 LDPC 복호기 성능(참고문헌 [13]의 Fig. 1)과 비교하면 BER이 10^{-5} 일 때 K와 r에 관계없이 약 0.7~0.8dB의 E_b/N_0 성능 이득이 있다. Fig. 8은 K=4096, r=2/3일 때 기준의 결과[6,13]와 BER 성능을 비교한 것이다.

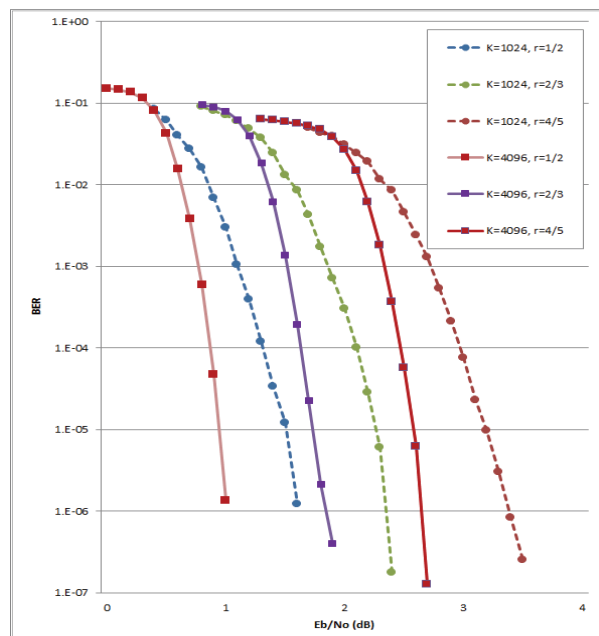


Fig. 7. BER performance

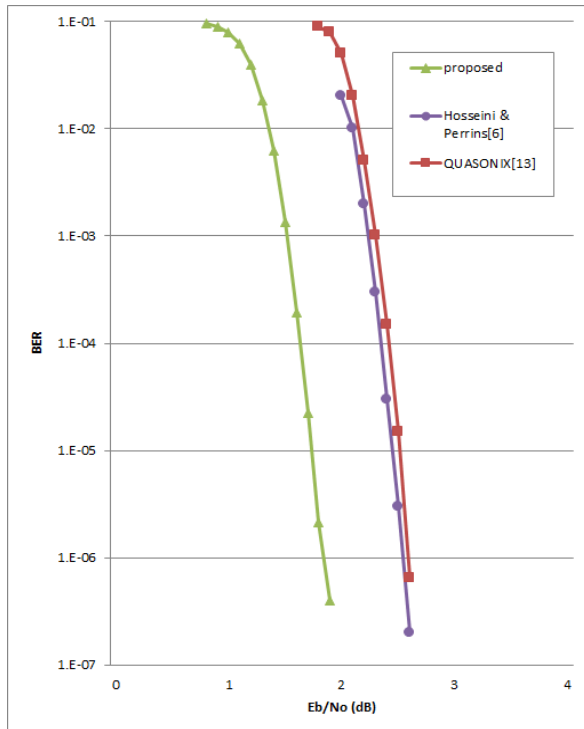


Fig. 8. BER performance comparison (K=4096, r=2/3)

III. 결 론

본 논문에서는 Fig. 5의 결합 트렐리스를 max-log-map 복호기로 구현하고 layered-decoding LDPC 복호 알고리즘을 적용하여 LDPC 부호화한 SOQPSK-TG 시스템의 수신기 성능을 평가하였다. AWGN 채널에서 컴퓨터 모의 실험한 결과 BER이 10^{-5} 일 때 기존의 방식보다 약 0.7~0.8dB의 E_b/N_0 성능 이득이 있다.

References

- 1) Hill, T., "An Enhanced, Constant Envelope, Interoperable Shaped Offset QPSK (SOQPSK) Waveform For Improved Spectral Efficiency," *Proceedings of the International Telemetry Conference*, San Diego, CA, USA, 2000.
- 2) Balasubramanian, U., Pacharne, P. R. and Radhakrishna, P., "Telemetry Applications of

SOQPSK and GMSK Based Modulation for Airborne Platform," *International Conference on Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS)*, 2012, pp. 17~20.

- 3) Telemetry Standards, *RCC Standard 106-17*, July 2017, p. D-1.

- 4) Perrins, E. and Kumaraswamy, B., "Decision Feedback Detectors for SOQPSK," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 57, No. 8, August 2009, pp. 2359~2368.

- 5) Perrins, E. and Rice, M., "PAM representation of ternary CPM," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 56, December 2008, pp. 2020~2024.

- 6) Hosseini, E. and Perrins, E., "FPGA implementation of a coherent SOQPSK-TG demodulator," *Military Communications Conference, MILCOM 2011*, pp. 471~476.

- 7) Gu, Y. M., Boo, J. and Kim, B., "SOQPSK-TG Receiver using Trellis State Combining," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 47, No. 3, March 2019, pp. 240~244.

- 8) Gu, Y. M., "Evaluation of the Effect of Differential Encoder on SOQPSK-TG Receiver Performance," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 7, July 2021, pp. 589~592.

- 9) CCSDS 131.1-O-2 *Experimental Specification*, September 2007.

- 10) Gu, Y. M., Lee, W. and Kim, B., "Telemetry standard 106-17 LDPC encoder design using HLS," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, No. 10, October 2020, pp. 831~835.

- 11) Vucetic, B. and Yuan, J., *Turbo codes principles and applications*, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 149~151.

- 12) Gu, Y. M., Kim, S. J. and Kim, B., "Telemetry Standard 106-17 LDPC Decoder Design Using HLS," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 4, April 2021, pp. 343~354.

- 13) *Technical Guide: LDPC*, Quasonix, Inc., September 2019, p. 3.