

GPS CNAV2에 적용된 FEC의 성능 분석 및 새로운 제안

조 현 우*, 안 재 민*, 송 홍 엽°

Performance Analysis and New Proposal of FEC Codes Applied to GPS CNAV2

Hyunwoo Cho*, Jae Min Ahn*, Hong-Yeop Song°

요 약

본 논문은 GPS CNAV2에 순방향 오류 제어(Forwarded Error Control, FEC)로 적용된 BCH 부호와 2개의 LDPC 부호의 성능 분석 및 새로운 제안을 한다. 우선, 2개의 LDPC 부호는 UEP 기법이 적용되었음을 확인하였다. 이들은 Interleaver가 묶고 있어서 전체를 수신해야 복호가 가능하므로, 이 둘을 합한 길이의 LDPC 부호의 적용을 제안한다. 이렇게 3가지 LDPC 부호를 분석한 결과, 새로 제안하는 긴 길이의 LDPC 부호가 기존의 UEP로 이원화 되어있는 LDPC 부호의 전체 성능과 비교하여 $FER=10^{-3}$ 부근에서 약 0.4 dB 정도 우수함을 확인한다.

키워드 : 저밀도 패리티 검사 부호, 순방향 오류 제어, CNAV2, GPS

Key Words : communication, signal processing, Neutral systems, Communication Sciences, Network

ABSTRACT

This paper provides the performance of the BCH and LDPC codes applied as forward error control (FEC) to GPS CNAV2 and makes a new proposal. We first investigate the performance of 2 LDPC codes and confirm that some UEP is applied. Since these two codes are combined by some interleaver, and hence they cannot be decoded unless both codewords are received. Therefore we propose to use another single LDPC codes of longer length which is equal to the sum of two lengths of these shorter LDPC codes. By investigating the performance of all these three LDPC codes, we confirm that the proposed longer length LDPC codes are better than the overall performance of 2 shorter LDPC codes by 0.4 dB at $FER=10^{-3}$.

I. 서 론

최근 위성 항법 시스템에 기반한 다양한 서비스 성장에 활발하며, 특히 높은 데이터 전송율 및 고정밀 측위 신호에 대한 수요가 급증하고 있다^[1-2]. 이러한 수요에 맞게 다양한 위성 항법 시스템의 현대화 및 다양한 연구가 진행 중이다.

Global Positioning System (GPS) 현대화 프로그램의 주요 목표는 위성군에 새로운 항법 신호 추가이다. 기존 Legacy 신호인 L1 C/A는 지속적으로 사용될 예정이며, 민간용으로 설계된 3가지 L2C, L5, 그리고 L1C가 새로운 신호이다^[3-5]. L1 C/A는 고정된 형태의 항법 메시지 구조를 채택하였으나, 현대화 신호에서는 메시지를 타입 별로 정의하고 유연하게 방송하기 위해

※ 이 (성과)는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.RS-2023-00209000).

♦ First Author : Yonsei University School of Electrical and Electronic, hyunwoo.cho@yonsei.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Yonsei University School of Electrical and Electronic, hysong@yonsei.ac.kr, 종신회원

* Chungnam National University Department of Radio Science and Information Communication Engineering, jmahn@cnu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS202310-106-A-RE, Accepted October 18, 2023; Revised October 30, 2023; Accepted October 30, 2023

패킷 단위의 메시지 구조를 도입했다. 위성 항법 시스템의 항법 메시지 구조를 결정하기 위한 세부 설계 파라미터는 메시지 내용, 메시지 프레임 구조, 데이터 전송률, 데이터 전송량이 있다. Clock Ephemeris Data (CED)는 수신기가 최초 항법 시작까지 걸리는 시각을 나타내는 Time-to-first-fix (TTFF)를 결정하는 요소 중 하나이다^[3]. 따라서 CED 파라미터의 분배 및 그에 적용된 순방향 오류 제어(Forwarded Error Control, FEC)의 성능에 따라 신호의 성능에 큰 영향을 미친다^[3]. 한국형 위성 항법 시스템을 설계하고자 다양한 노력이 있었으며, 또한 기존의 GNSS 및 지상과 항법 시스템의 다양한 FEC 부호에 대한 연구와 분석에 대한 많은 연구결과가 이어졌다^[6-11].

본 논문은 [10]의 결과를 확장한 내용이 주를 이룬다. 우선, GPS CNAV2 메시지 구조에 대한 설명 및 적용된 FEC에 대한 성능을 Frame Error Rate (FER)와 Bit Error Rate (BER) 관점에서 다시 한번 분석 및 검증한다. 여기에 적용된 2개의 Low-Density Parity Check (LDPC) 부호는 Interleaver가 묶고 있어서 전체를 수신해야 복호가 가능하므로, 이 둘을 합한 길이의 하나의 LDPC 부호의 적용을 제안한다. 이렇게 3가지 LDPC 부호를 분석한 결과, 새로 제안하는 긴 길이의 LDPC 부호가 이원화 되어있는 LDPC 부호의 전체 성능 대비 $FER=10^{-3}$ 혹은 $BER=10^{-5}$ 부근에서 약 0.4 dB 우수함을 확인한다.

II. CNAV2의 FEC

GPS L2C와 L5 신호를 설계한 이후, GPS는 더 정확하고 수신 성능이 우수한 GPS L1C 신호를 설계하였다. 그리고 TTFF 성능을 향상하기 위해 고정된 형태의 Legacy Navigation (LNAV) 메시지 구조와 패킷 형태의 Civil Navigation (CNAV)를 상호 결합한 형태의 구조인 CNAV2를 채택하였다. 하나의 Frame은 3개의 Subframe으로 나뉜다. Subframe1은 Time of Interval (TOI) 파라미터로 다음 Frame 시작을 예상할 수 있는 중요한 정보다. Subframe2는 CED 파라미터로 고정된 정보를 전송한다. Subframe3은 상황에 맞게 유연하게 다양한 항법 메시지가 전달된다^[5].

CNAV2 메시지 구조는 그림 1에 보이며, FEC로는 Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) 부호를 Subframe1에 적용되고, Subframe2와 3에는 서로 다른 길이의 LDPC 부호가 적용된다.

우선 Subframe1에 적용된 매우 낮은 부호율의 extended [52,9] BCH 부호는 다음의 생성 다항식을 이용한다.

$$f(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$$

TOI 데이터 9비트 중 앞쪽 8 비트를 [51,8] BCH 부호로 부호화 후, TOI 데이터의 마지막 비트는 부호화된 51개 비트 모두와 함께 overall parity를 계산하여 마지막 한 비트가 추가되고 이렇게 52개의 encoded bit가 생성된다.

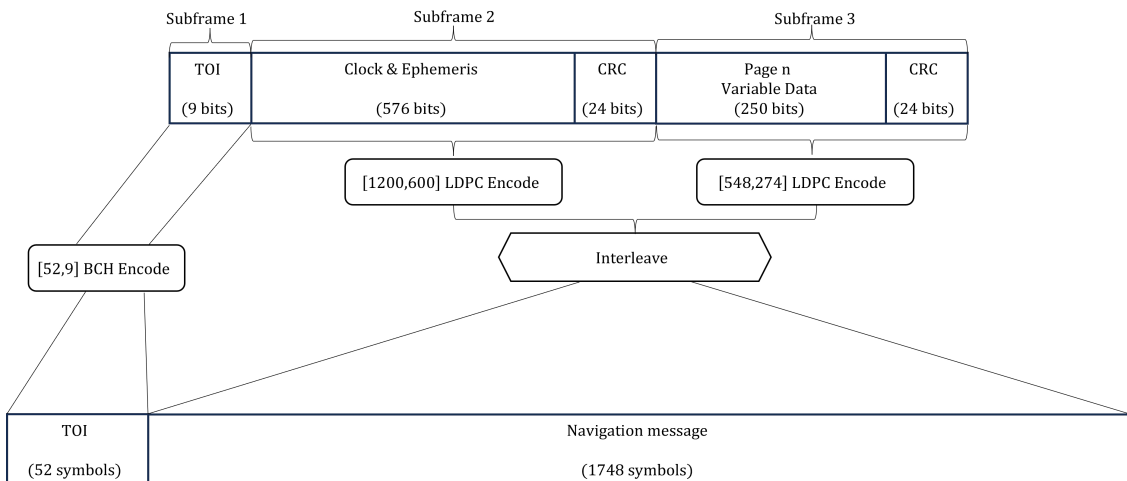


그림 1. GPS CNAV2 메시지 구조
Fig. 1. GPS CNAV2 message structure.

Subframe2와 3에는 각각 [1200,600] LDPC 부호와 [548,274] LDPC 부호가 적용된다. 이때, 두 LDPC 부호는 선형 시간 부호화가 가능하다^{5,13)}. 부호화된 Subframe2와 Subframe3은 38×46 block interleaver를 거치며, 최종적으로 Subframe1과 함께 1800 개의 encoded bit로 이루어진 CNAV2 메시지 구조가 완성된다.

GPS L1 C/A 신호를 제외하고 대부분 위성 항법 시스템의 FEC 부호율은 0.5이지만, GPS L1C의 Subframe1의 BCH 부호는 약 0.17의 매우 낮은 부호율을 갖고 있다. 또한 블록 부호의 경우 길이와 성능이 비례 하다고 알려져 있는데, 이러한 관점에서 Subframe2는 Subframe3 보다 더 성능이 좋은 FEC를 채택했다고 예상할 수 있다. 즉, 메시지 중요도에 따라 성능을 다르게 적용한 Unequal Error Protection (UEP) 기법이라고 추측된다^{6,12)}.

III. 분석 및 새로운 제안

본 논문은 CNAV2에 적용된 FEC인 BCH 부호와 LDPC 부호의 성능을 우선 분석한다. 이 결과를 기반으로, 동일한 파라미터로 생성한 LDPC 부호와 성능을 비교하고 이를 적용한 FEC 기법의 적절함과 개선점에 대해 논의한다.

실험 환경은 AWGN 채널 및 BPSK 변조를 가정한 다. LDPC 부호는 soft-decision 방식의 Sum-product 복호기로 최대 반복 횟수를 50회로 설정하였다. Subframe1의 [52,9] BCH 부호에 대한 복호 방식의 경우, Interface Control Document에 명시된 복호 방식을 적용한다⁵⁾. 부호화된 TOI 심볼은 $2^8=256$ 가지의 부호어를 가질 수 있으며, 수신된 심볼은 수신 가능한 256가지 부호어와 모두 상관 값을 계산한다. 이 중 상관 값이 큰 부호어에 대응되는 9비트를 수신 TOI로 복호 한다.

앞서 말한 대로, [52,9] BCH 부호의 경우 중요한 정보를 보호하기 위해 약 0.17의 부호율을 적용하므로 낮은 SNR에서 좋은 성능을 보인다. 그림 2와 3에서 CNAV2의 세 가지 FEC 성능을 보여준다. [1200,600] LDPC 부호와 [548,274] LDPC 부호의 성능을 비교하면 CED 파라미터가 포함된 Subframe2의 FEC가 Subframe3 대비 0.5 dB 정도의 이득을 보장하므로 이를 통해 UEP 기법이 적용됨을 확인할 수 있다^{6,12)}.

CNAV2의 그림 1와 같이, Subframe2와 Subframe3은 각각 [1200,600] LDPC 부호와 [548,274] LDPC 부호로 부호화 후 interleaver를 거친다. 그러므로 수신 측에서는 Subframe1의 TOI 52심볼은 별도로 복호가 가

능하지만, 부호 길이 1200과 548의 두 부호어가 interleave 되었기 때문에 어차피 이 둘을 모두 수신해야 복호가 가능하다. 그렇다면 이를 합한 데이터 길이인 874비트를 1748비트로 한꺼번에 encoding/decoding을 수행한다면 이득이 있을지 궁금해진다. 길이가 길어지는 효과로 LDPC 부호의 성능이 좋아질 거라는 예측이다. 즉, [1748,874] LDPC 부호를 적용하기 위해 부호율을 맞추고 적당히 Progressive Edge-Growth (PEG) 알고리즘으로 만들어 실험해 보았다. 비교 대상은 Subframe2와 Subframe3 전체를 수신하여 복호한 결과에 대한 오류율이다. 결과는 놀라웠다. 대충 설계했어도 우리가 사용한 [1748,874] LDPC 부호가 CNAV2의 항법 메시지 부분의 성능 대비 $FER=10^{-3}$ 혹은 $BER=10^{-5}$ 부근에서 약 0.4 dB 정도 우수함을 확인할 수 있다. 이를 그림 4와 5에 보인다. LDPC 부호를 조금만 더 최적화한다면 0.5~1.0 dB 정도의 이득도 예상이

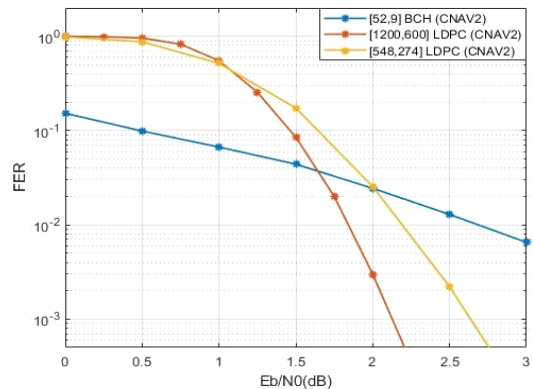


그림 2. CNAV2의 FEC 성능
Fig. 2. FEC Performance of CNAV2

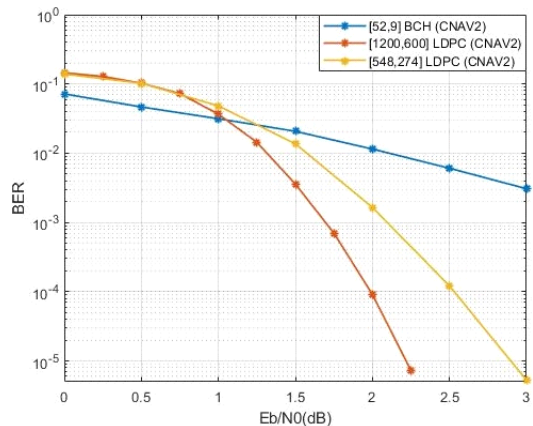


그림 3. CNAV2의 FEC 성능
Fig. 3. FEC Performance of CNAV2

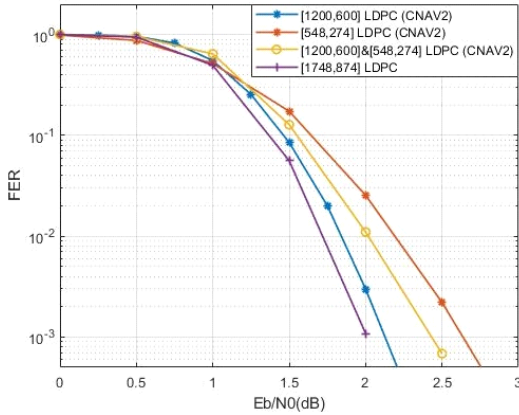


그림 4. CNAV2 FEC 및 [1748,874] LDPC 성능
Fig. 4. Performance of CNAV2 FEC and [1748,874] LDPC

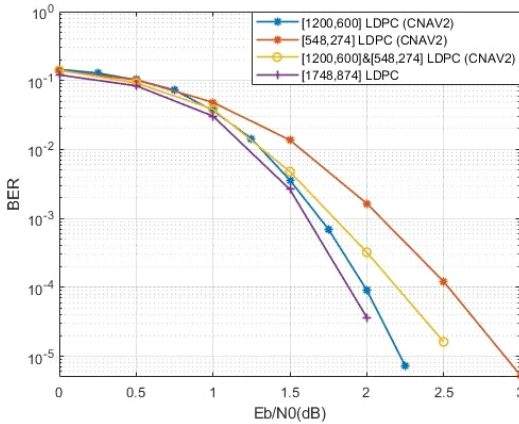


그림 5. CNAV2 FEC 및 [1748,874] LDPC 성능
Fig. 5. Performance of CNAV2 FEC and [1748,874] LDPC

가능한 상황이다. 물론 이 길이의 LDPC 부호도 선형 시간 부호화는 얼마든지 가능하다.

IV. 결 론

본 논문은 GPS의 CNAV2 메시지 구조에 대한 간략한 설명 및 적용된 FEC에 대한 성능을 보였다. 또한 CNAV2의 FEC 경우, UEP 기법이 적용됨을 확인하였다. 분석된 내용을 기반으로 이원화된 LDPC 대신, 동일한 긴 길이의 LDPC 부호를 제안 및 설계하여 비교함으로써, 성능 개선의 가능성을 보였다.

References

- [1] J. Ha and S. Chun, "Current status and development plan of global navigation satellite system," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 8, no. 2, pp. 46-53, 2010.
- [2] C.-D. Gi, D.-Y. Kim, and D.-H. Yun, "Future battlefield core infrastructure: Satellite navigation system - Focusing on the current status and our measures," *The Mag. IEIE*, vol. 37, no. 11, pp. 77-92, 2010.
- [3] J. H. Noh, D. W. Lim, M. B. Heo, G. H. Jo, and S. J. Lee, "Design considerations for KPS navigation message," *JPNT*, vol. 9, no. 4, pp. 305-317, Dec. 2020.
(<http://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.305>)
- [4] P. J. G. Tenunissen and O. Montenbruck, *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, Springer Cham, 2017.
(<https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>)
- [5] IS-GPS-800, *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment LIC Interfaces*, Revision J, 2022.
- [6] H. Cho, G. Kim, H. Song, and S. Lee, "A study on the message structure and UEP technique of IRNSS," *KICS Summer Conf.*, pp. 337-338, Aug. 2020.
- [7] G. Kim, I. Kim, H. Cho, H.-Y. Song, J. M. Ahn, and Y. Park, "Analysis of LDPC/Polar codes with mismatched SNR for GNSS," *IPNT 2021*, Gangneung, Korea, Nov. 2021.
- [8] H. Cho, G. Kim, Z. Jing, H.-Y. Song, and J. B. Kim, "Practical consideration for reed-solomon encoder/ decoder in Eurofix," *IPNT 2021*, Gangneung, Korea, Nov. 2021.
- [9] H. Cho, J. M. Ahn, and H.-Y. Song, "An analysis of satellite navigation signals for a high accuracy," *KICS Fall Conf. 2021*, Yeosu, Korea, Nov. 2021.
- [10] H. Cho, J. M. Ahn, J. J. Min, and H.-Y. Song, "Analysis of the forward-error control of GPS signal," *KICS Fall Conf. 2022*, Gyeongju, Korea, Nov. 2022.
- [11] H. Cho, D. Kim, and H.-Y. Song, "Analysis

of forward error control on the satellite navigation signals,” *J. KICS*, Oct. 2023. Accepted.

- [12] S. Borade, et al., “Unequal error protection: An information-theoretic perspective,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 12, pp. 5511-5539, 2009.
(<https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2032819>)
- [13] S. J. Johnson, *Iterative Error Correction: Turbo, Low-DensityParity-Check and Repeat-Accumulate Codes*, Cambridge University Press, Nov. 2009.
(<https://doi.org/10.1017/CBO9780511809354>)

조 현 우 (Hyunwoo Cho)



2014년 8월 : 창원대학교 전기
전자제어공학부 졸업
2017년 2월 : 경북대학교 전자
공학부 석사
2017년 9월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 박사과정
<관심분야> 통신공학, 부호이론

[ORCID:0009-0009-0174-0514]

안 재 민 (Jae Min Ahn)



1987년 2월 : 서울대학교 전자공
학과 졸업
1989년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사
1994년 8월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사
1999년 3월~현재 : 충남대학교
전파정보통신공학과 교수

<관심분야> 항법 시스템, 통신공학, 정보이론
[ORCID:0000-0002-6261-0010]

송 홍 엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자공
학과 졸업
1989년 2월 : University of
Southern California Dept. of
EE. System 석사
1994년 8월 : University of
Southern California Dept. of
EE. System 박사

1992년 1월~1993년 12월 : University of Southern
California Dept. of EE. System 박사후 연구원
1994년 1월~1995년 8월 : Qualcomm, San Deigo,
Senior Engineer
1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 전임
교수

<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론
[ORCID:0000-0001-8764-9424]