

위성 항법 신호의 순방향 오류 제어 분석

조 현 우*, 김 대 경*, 송 홍 엽°

Analysis of Forward Error Control on the Satellite Navigation Signals

Hyunwoo Cho*, Daekyeong Kim*, Hong-Yeop Song°

요 약

본 논문은 2023년 현재 운영 중인 다양한 위성 항법 시스템의 메시지 구조 및 순방향 오류 제어(Forward Error Control, FEC)에 대해 요약·정리하고 특히 순방향 오류 제어 시스템의 Bit Error Rate (BER) 및 Frame Error Rate (FER) 성능을 분석하여 비교한다. 오류 성능은 비트 에너지 대비 잡음 전력 밀도 비 (Bit Energy to Noise Power Spectral Density Ratio, E_b/N_0) 측면에서 보이며, 동시에 수신 전력 대비 잡음 전력 밀도 비(Carrier Power to Noise Power Spectral Density Ratio, C/N_0) 측면에서도 보인다.

키워드 : 순방향 오류 제어, 메시지 구조, 범지구 위성 항법 시스템, 국지적 위성 항법 시스템

Key Words : Forward Error Control, Message Structure, Global Navigation Satellite System, Regional Navigation Satellite System

ABSTRACT

This paper briefly summarizes the message structure and the forward error control (FEC) schemes applied to the various satellite navigation systems operating in 2023. The bit error rate (BER) and frame error rate (FER) performance of the described FEC are computer simulated and compared with each other. The error performance is plotted in terms of the bit energy to noise power spectral density ratio (E_b/N_0) as well as the carrier power to noise power spectral density ratio (C/N_0).

I. 서 론

범지구 위성 항법 시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)는 전천후 조건과 전 세계 어디에서나 민간 및 군사 사용자 모두에게 위치, 항법, 그리고 시각 정보 서비스를 제공한다^[1]. 최근 위성 항법 시스템에 기반한 다양한 서비스 성장이 활발하며, 특히 높은 데이터 전송율 및 고정밀 측위 신호에 대한

수요가 급증하고 있다^[2]. 이러한 수요에 맞게 다양한 위성 항법 시스템의 현대화 및 다양한 연구가 진행 중이다^[3,4].

GNSS는 전 지구 영역에 동일한 서비스를 제공하는 시스템으로 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽의 Galileo, 그리고 중국의 BeiDou가 있다. 그리고 특정 지역에 한정되어 서비스를 제공하는 국지적 위성 항법 시스템(Regional Navigation Satellite

※ 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, 중신회원

* Yonsei University School of Electrical and Electronic, daky33@yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202309-086-A-RN, Accepted September 19, 2023; Revised October 15, 2023; Accepted October 15, 2023

System, RNSS)은 일본의 QZSS, 인도의 IRNSS가 있으며, 그리고 현재 한국형 위성 항법 시스템(KPS)가 개발 중이다. 이 외에도 지상국을 사용하여 GNSS 위성 신호 수신에 영향을 미치는 환경 요인을 모니터링함으로써, 추가적인 위성방송 메시지를 전송하여 광범위한 지역 또는 지역적인 보강을 지원하는 위성 기반 보정 시스템(Satellite-Based Augmentation System, SBAS)이 있다.

순방향 오류 제어(Forward Error Control, FEC)는 위성 수신기 간에 전송되는 신호에서 발생할 수 있는 오류 또는 대기 간섭이나 건물이나 지형에 의한 신호 차단과 같은 요인으로 인해 신호 저하가 발생할 수 있는 환경에서 GNSS 신호의 정확성과 신뢰성을 보장하는 데 중요한 역할을 한다^[1].

본 논문에서는 운영 중인 위성 항법 시스템의 메시지 구조 및 그에 적용된 FEC에 대해 설명한다. 설명한 순방향 오류 제어에 대한 성능인 Bit Error Rate (BER) 및 Frame Error Rate (FER)을 보이며, 메시지 중요도와 순방향 오류 제어의 부호율의 관계에 대해 분석한다. 또한 수신기 성능을 측정하는 유용한 지표인 수신 전력 대비 잡음 전력 밀도 비(carrier to noise power density ratio, C/N_0) 측면에서의 성능을 보인다.

II. 위성 항법 시스템의 신호 및 FEC

이번 장에서는 현재 운용 중인 GNSS 및 RNSS의 신호의 종류, 메시지 구조, 그리고 FEC에 대해 설명한다.

2.1 GPS

GPS는 레거시 신호인 L1 C/A가 있으며, 현대화 신호인 L2C, L5, 그리고 L1C가 있다. L1 C/A 신호는 LNAV 메시지 구조를 가진다. FEC로 (32,26,4) extended Hamming 부호가 오류 검출용으로 적용된다^[6-9].

L2C와 L5 신호는 패킷 형태인 CNAV 메시지 구조를 가지며, FEC로 그림 1과 같은 (171,133)₈ 컨볼루셔널 부호가 적용된다. 해당 주파수 대역에서 L2C와 L5는 50 sps 과 100 sps로 각각 전송된다^[7,8]. 컨볼루셔널 부호가 적용된 모든 GNSS 신호는 GPS의 컨볼루셔널 부호로 동일하다.

L1C 신호는 CNAV 메시지 구조 대비 Time-to-First-Fix (TTFF) 개선한 CNAV2 메시지 구조이며, 그림 2와 같이 3개의 서브 프레임이 결합되어 있는 형태이다. 서브 프레임1에서는 다음 메시지 시작

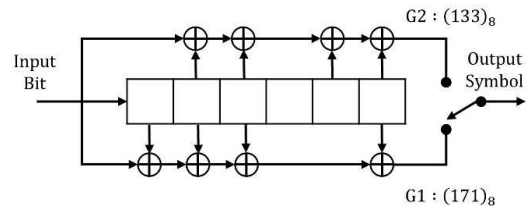


그림 1. 컨볼루셔널 부호기
Fig. 1. Convolutional encoder

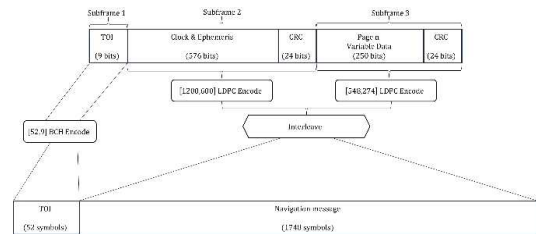


그림 2. GPS L1C 프레임 구조
Fig. 2. GPS L1C frame structure

을 나타내는 Time of Interval (TOI)가 있으며, TTFF에 중요한 영향을 끼친다. 그러므로 높은 신뢰성을 보장하기 위해 낮은 부호율의 BCH 부호화 한다. (51,8) BCH 부호화 후, TOI의 9번째 비트는 부호화된 51 심볼과 modulo-2 덧셈 통해 최종적으로 52 심볼을 생성한다. 서브 프레임2는 고정형 항법 메시지가 있으며, 이를 (1200,600) 이진 LDPC 부호화 하며, 서브 프레임3는 패킷형 항법 메시지가 있으며, 이를 (548,274) 이진 LDPC 부호화 한다. 부호화된 서브 프레임2와 3는 인터리빙 후 부호화된 서브 프레임1과 연결하며, 총 1800 심볼을 100 sps로 전송된다^[9].

2.2 Galileo

Galileo는 주파수 대역에 따라 총 4가지의 신호가 있으며, 항법 메시지 형태에 따라 3가지로 분류된다. E5a-I 신호는 F/NAV 메시지 구조, E5b-I와 E1-B 신호에 I/NAV 메시지 구조, 그리고 E6-B 신호에 C/NAV 메시지 구조가 적용된다. 모든 메시지 구조는 zero-tail 컨볼루셔널 부호가 적용되며, CRC 유무는 신호마다 다르다^[10-12].

E5a 신호는 그림 3과 같이 Page, 항법 데이터, CRC, 그리고 zero-tail을 포함한 244 비트를 컨볼루셔널 부호화를 통해 생성된 488 심볼과 Sync 12 심볼을 연결하여 총 600 심볼을 생성하며, 50 sps로 전송된다^[10].

E5b-I와 E1-B는 동일한 메시지 구조이지만, 신호 및 모드에 따라 항법 메시지 형태와 CRC 유무가 다르다. 그림 4와 같이 항법 메시지 및 zero-tail을 포함

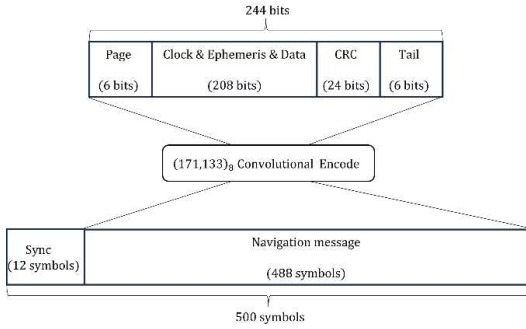


그림 3. Galileo E5a 프레임 구조
Fig. 3. Galileo E5a frame structure

한 120 비트를 컨볼루셔널 부호화를 통해 생성된 240 심볼과 Sync 10 심볼을 연결하여 총 250 심볼을 생성하며, 125 sps로 전송된다^[10].

E6-B 신호는 정밀한 위치 정보를 제공하는 신호이다. 그러므로 높은 신뢰성을 제공하기 위해 그림 5와 같이 연결 부호(concatenated code)를 적용하였으며, 외부 부호로 GF(2⁸) 상에서 정의된 (255,32,224) 리드-솔로몬 부호와 컨볼루셔널 부호를 직렬로 연결한 형태이다. 외부 부호화의 경우, 424 비트의 페이지 32개

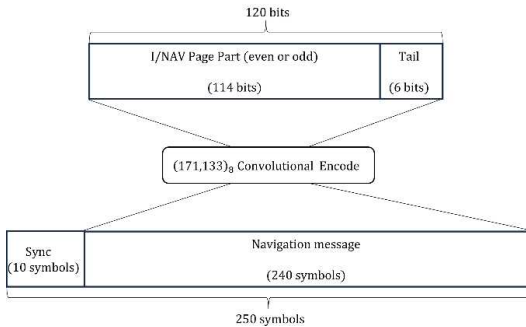


그림 4. Galileo E5b-I 및 E1-B 프레임 구조
Fig. 4. Galileo E5b-I and E1-B frame structure

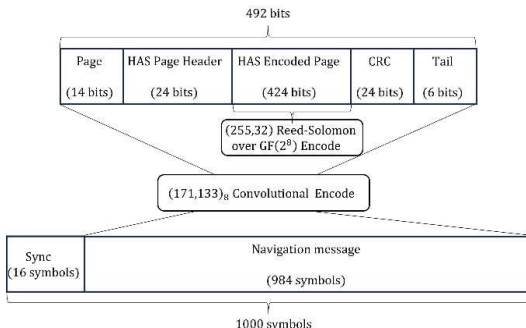


그림 5. Galileo E6-B 프레임 구조
Fig. 5. Galileo E6-B frame structure

를 행렬 형태로 병렬적으로 저장 후 각 열로 체계적 리드-솔로몬 부호화를 수행한다. 행렬 형태도 저장된 부호어의 각 행을 내부 부호인 컨볼루셔널 부호화를 순차적으로 진행 후 Sync 16 심볼을 연결하여 1000 sps로 전송한다^[11,12]. 본 논문은 컨볼루셔널 부호의 성능만 고려한다.

2.3 BeiDou

BeiDou는 GPS 신호와 유사한 메시지 구조를 보인다. B2a와 B3I는 패킷 형태이며, B1C는 L1C와 유사하게 고정형과 패킷형이 연결된 형태인 B-CNAV1 메시지 구조이다. BeiDou는 GPS의 이진 LDPC 부호와 달리 64-ary 비이진 LDPC 부호를 적용하였다^[13-15].

B1C는 3개의 서브 프레임으로 연결된 형태를 보인다. 서브 프레임1은 14 비트로 구성되며 앞쪽 PRN 6 비트는 (21,6) BCH 부호로, 다음 SOH 8 비트는 (51,8) BCH 부호로 부호화를 한다. 이때, (51,8) BCH 부호는 GPS의 (52,9) BCH 부호와 상반된 생성 다항식을 적용하였다. 서브 프레임2와 3은 각각 64-ary (200,100)과 (88,44) 비이진 LDPC 부호화 후 인터리빙을 수행한다. 최종적으로 부호화 된 1800 심볼은 100 sps로 전송된다^[13].

B2a는 B-CNAV2 메시지 구조이며, 그림 7과 같이

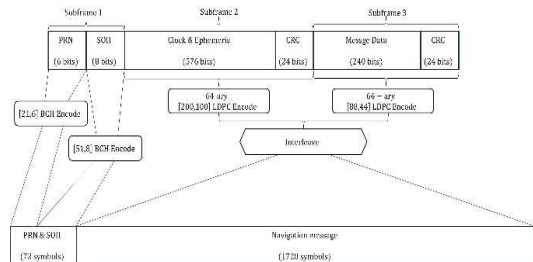


그림 6. BeiDou B1C 프레임 구조
Fig. 6. BeiDou B1C frame structure

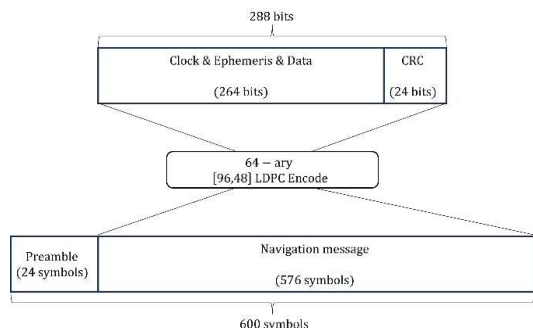


그림 7. BeiDou B2a 프레임 구조
Fig. 7. BeiDou B2a frame structure

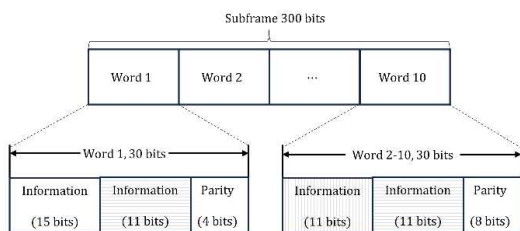


그림 8. BeiDou B3I 프레임 구조
Fig. 8. BeiDou B3I frame structure

CRC 포함 288 비트 항법 데이터를 64-ary (96,48) 비이진 LDPC 부호화 후 Preamble 24 심볼을 접하여 총 600 심볼을 200 sps로 전송한다^[14].

그림 8과 같이 B3I 신호의 서브 프레임은 총 10개의 워드로 구성되며, 첫번째 워드를 제외한 나머지 워드는 동일 한 형태이다. 첫번째 워드의 항법 메시지 중 마지막 11 비트를, 나머지 워드의 22 비트 항법 메시지를 11 비트씩 나눠 (15,11) BCH 부호화 한다. 최종적으로 300 비트의 서브 프레임은 50 sps로 전송된다^[15].

2.4 IRNSS

인도의 IRNSS 주파수 대역에 따라 SPS-L5와 SPSS신호가 있으며, 그림 9와 같은 메시지 구조로 동일하다. CRC 포함 292 비트의 항법 메시지를 zero-tail 컨볼루션 부호화를 통해 584 심볼을 생성한 뒤 Sync 16 심볼을 연결하여 총 600 심볼을 50 sps로 전송된다^[16].

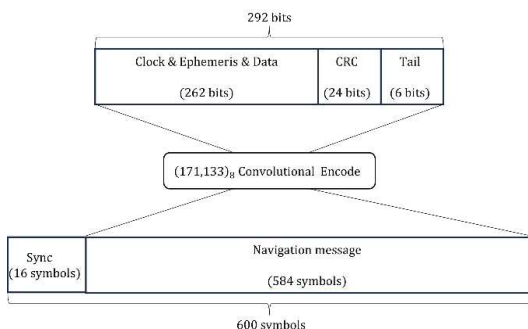


그림 9. IRNSS 프레임 구조
Fig. 9. IRNSS frame structure

2.5 QZSS

QZSS는 센티미터 단위의 정확도를 시간으로 제공하는 시스템이다. 그러므로, 기존 위성 항법 신호 대비 높은 데이터 전송률을 가진다. 부호화 과정은 그림 10과 같이, 앞 32 비트를 제외한 Header와 항법 메시

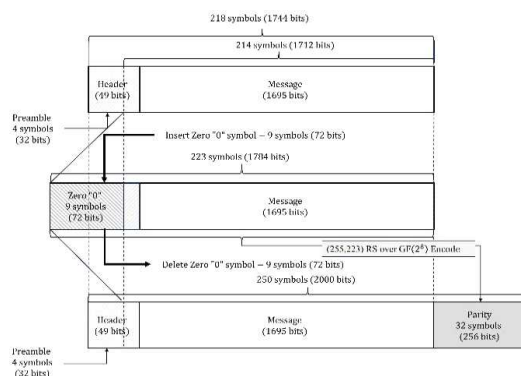


그림 10. QZSS L6 프레임 구조
Fig. 10. QZSS L6 frame structure

지를 포함한 총 1712 비트를 GF(2⁸)상에서 정의된 (255,223,33) 리드-솔로몬 부호를 쇼트닝 기법을 적용하여 부호화를 진행한다. 최종적으로 앞 32 비트 Header와 부호화된 1968 비트를 연결한 2000 심볼을 2000 sps로 전송한다^[17].

III. 실험

앞 장에서 설명한 위성 항법 시스템의 신호에 적용된 FEC의 성능을 도출한다. AWGN 채널 및 BPSK 변조를 가정한다. 컨볼루셔널 부호와 리드-솔로몬 부호의 경우 Viterbi 복호기와 Berlekamp-Massey 복호기로 각각 성능을 도출하였다. LDPC 부호의 경우 Sum-product 복호기로 최대 반복 회수를 50으로 설정 후 성능을 도출하였다. GPS와 Beidou에서 적용된 BCH 부호의 경우, 각 ICD에서 설명된 복호 방식으로 수행한다.

Beidou B3I 신호에 적용된 (15,11,1) BCH의 경우 그림 11와 같이 설명되어 있다^[15]. LFSR을 통해 연속적으로 수신된 15 비트를 입력 후, 최종 레지스터의

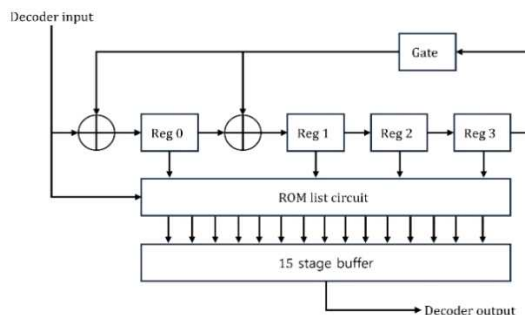


그림 11. BeiDou B3I 신호의 BCH 부호 복호기
Fig. 11. BCH decoder for BeiDou B3I signal

값에 해당하는 15 비트의 정보를 ROM을 통해 출력한다. GPS 및 BeiDou에 적용된 (51,8) BCH 부호의 경우, 생성 가능한 모든 부호어의 수는 $2^8 = 256$ 개다. 길이 51 수신 신호와 수신 가능한 길이 51의 256개의 부호어와 상관 값을 계산하여, 제일 유사한 부호어에 해당하는 8 비트 정보를 복호하는 방식이다.

그림 12와 13은 각각 GPS와 QZSS의 신호에 적용된 FEC의 E_b/N_0 대비 BER과 FER 성능을 보여준다. 그리고 그림 14와 15는 Galileo와 BeiDou의 신호에 적용된 FEC의 E_b/N_0 대비 BER과 FER 성능을 보여준다. 대부분 항법 메시지의 경우 부호율 0.5의 FEC를 적용하였으며, 중요도가 높은 항법 메시지의 경우 낮은 부호율의 FEC를 적용함을 알 수 있다. 또한, 수신기 성능을 측정하는 유용한 지표인 반송파 수신 전력 대비 잡음 전력 밀도 비 (C/N_0) 관점에서 성능을

분석할 필요가 있다. 그림 16과 17은 데이터 전송률을 적용한 C/N_0 대비 FER 성능을 보여준다.

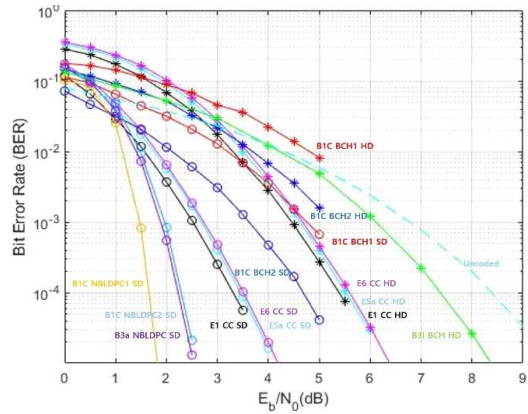


그림 14. Galileo 및 BeiDou의 FEC 성능
Fig. 14. FEC performance Galileo and BeiDou

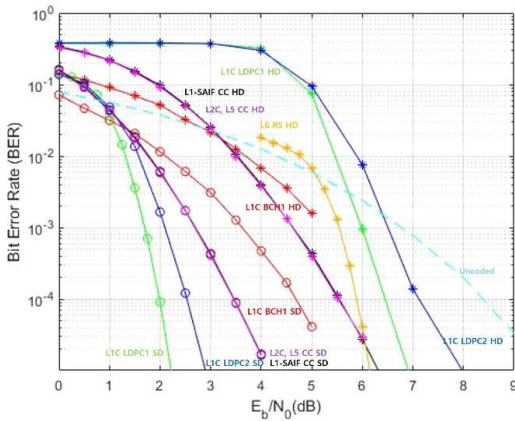


그림 12. GPS 및 QZSS의 FEC 성능
Fig. 12. FEC performance of GPS and QZSS

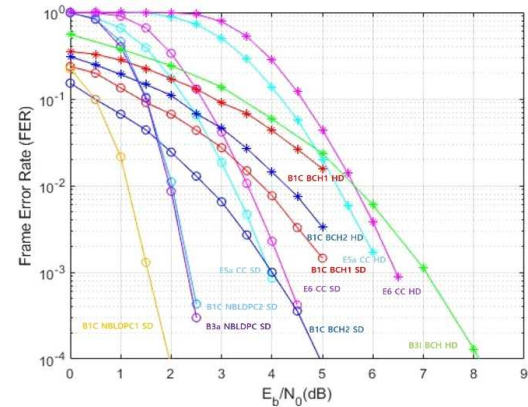


그림 15. Galileo 및 BeiDou의 FEC 성능
Fig. 15. FEC performance Galileo and BeiDou

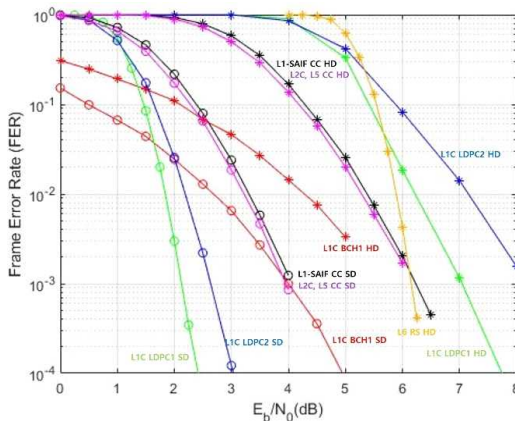


그림 13. GPS 및 QZSS의 FEC 성능
Fig. 13. FEC performance of GPS and QZSS

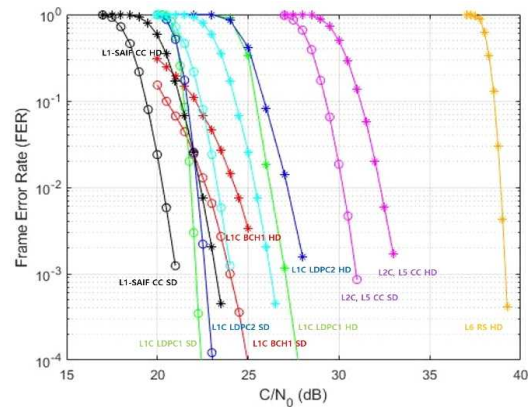


그림 16. GPS 및 QZSS의 FEC 성능
Fig. 16. FEC performance of GPS and QZSS

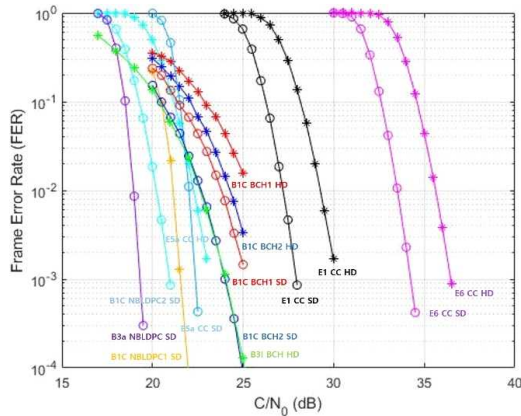


그림 17. Galileo 및 BeiDou의 FEC 성능
Fig. 17. FEC performance Galileo and BeiDou

IV. 결 론

본 논문에서는 현재 운영 중인 위성 항법 시스템의 신호, 메시지 구조, 그리고 그에 적용된 FEC에 대해 설명하였다. 설명된 FEC에 대하여 성능을 E_b/N_0 대비 BER 및 FER 성능을 보였다. 대부분 항법 메시지의 경우 부호율 0.5의 FEC를 적용하였으며, 중요도가 높은 항법 메시지의 경우 낮은 부호율의 FEC를 적용함을 알 수 있다. 추가적으로 신호 별 데이터 전송률을 반영하여 수신기 성능을 측정하는 유용한 지표인 C/N_0 대비 FER 성능을 보였다. 본 논문의 결과가 위성 항법 시스템을 연구하는데 있어서 중요한 기초 자료가 되기를 기대한다.

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] R. Chauvat, et al., "Ultra-sparse binary LDPC codes with CSK signals for increased data rates in future GNSS," in *2018 9th ESA Wkshp. Satellite Navig. Technol. and Eur.*
- [4] H. Cho, H.-Y. Song, J. M. Ahn, and D. W. Lim, "Some new rs-coded orthogonal modulation schemes for future GNSS," *Inf. & Commun. Technol. Express*, vol. 7, no. 4, pp. 530-534, Dec. 2021.
- [5] A. E. Süzer and H. Oktal, "A comparison analysis on forward error correction technology: A future perspective for GNSS," *Aircraft Eng. and Aerospace Technol.*, vol. 95, no. 8, pp. 1311-1320, May 2023.
- [6] J. H. Noh et al., "Design considerations for KPS navigation message," *J. PNT*, vol. 9, no. 4, pp. 305-317, Dec. 2020.
- [7] IS-GPS-200, *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, Revision N*, 2022(Sep. 13, 2023). (<https://www.gps.gov/technical/icwg/ISGPS-200N.pdf>)
- [8] IS-GPS-705, *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L5 Interfaces*, 2022(Sep. 13, 2023). (<https://www.gps.gov/technical/icwg/ISGPS-705J.pdf>)
- [9] IS-GPS-800, *NAVSTAR GPS Space Segment/User Segment L1C Interfaces, Revision J*, 2022(Sep. 13, 2023). (<https://www.gps.gov/technical/icwg/ISGPS-800J.pdf>)
- [10] Galileo, *GALILEO Open Service Signal-In-Space Interface Control Document (OS SIS ICD), Issue 2.0*, 2021(Sep. 13, 2023). (<https://galileoignss.eu>)
- [11] E. Göhler, et al., "A Galileo E6-B/C Receiver: Signals, prototype, tests and performance," in *Proc. 29th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Inst. of Navig.(ION GNSS+ 2016)*, pp. 486-496, Portland, Oregon, USA, Sep. 2021. (<https://doi.org/10.33012/2016.14828>)
- [12] Galileo, *GALILEO High Accuracy Service*

Signal-In-Space Interface Control Document (HAS SIS ICD), Issue 1.0, 2022(Sep. 13, 2023). (<https://galileognss.eu>)

- [13] China Satellite Navigation Office, *Open Service Signal BIC (Version 1.0)*, 2018(Sep. 13, 2023).
(<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/>)
- [14] China Satellite Navigation Office, *Open Service Signal B2a (Version 1.0)*, 2017(Sep. 13, 2023).
(<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/>)
- [15] China Satellite Navigation Office, *Open Service Signal B3I (Version 1.0)*, 2018(Sep. 13, 2023).
(<http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/>)
- [16] ISRO Satellite Centre, *ISRO-IRNSSICD-SPS-1.1*, 2017(Sep. 13, 2023).
(<https://www.isro.gov.in>)
- [17] Cabinet Office, *IS-QZSS-L6-005*, 2022(Sep. 13, 2023). (<https://qzss.go.jp/en/index.html>)

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, 위성 항
법, 부호이론

[ORCID:0009-0009-0174-0514]

김 대 경 (Daekyeong Kim)



2021년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학부 졸업
2023년 2월 : 연세대학교 전기
전자공학과 석사
2023년 3월~현재 : 연세대학교
전기전자공학과 박사과정

<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론
[ORCID:0009-0008-3115-9985]

송 홍 엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업
1986년 5월 : University of
Southern California Dept.
of EE. System 석사
1991년 12월 : University of
Southern California Dept. of EE. System 박사
1992년 1월~1993년 12월 : University of Southern
California 박사 후 연구원
1994년 1월~1995년 8월 : Qualcomm, San Diego,
Senior Engineer
1995년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 전임
교수
<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론
[ORCID:0000-0001-8764-9424]