JPNT 13(1), 1-13 (2024)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.1.1

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

GNSS 신호 설계 동향조사

전종현[1], 이정행[1], 강정완[1], 김선우[1†], 주정민[2]

Survey of Signal Design for Global Navigation Satellite Systems

Jong Hyun Jeon[1], Jeonghang Lee[1], Jeongwan Kang[1], Sunwoo Kim[1†], Jung-Min Joo[2]

[1]Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, South Korea
[2]Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, South Korea

ABSTRACT

In this paper, we investigate the signal design of six (USA, EU, Russia, China, Japan, and India) countries for Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Recently, a navigation satellite system that is capable of high-precision and reliable Positioning, Navigation, Timing (PNT) services has been developed. Prior to system design, a survey of the signal design for other GNSS systems should precede to ensure compatibility and interoperability with other GNSS. The signal design includes carrier frequency, Pseudorandom Noise (PRN) code, modulation, navigation service, etc. Specifically, GNSS is allocated L1, L2, and L5 bands, with recent additions of the L6 and S bands. GNSS uses PRN code (such as Gold, Weil, etc) to distinguish satellites that transmit signals simultaneously on the same frequency band. For modulation, both Binary Phase Shift Keying (BPSK) and Binary Offset Carrier (BOC) have been widely used to avoid collision in the frequency spectrum, and alternating BOCs are adopted to distinguish pilot and data components. Through the survey of other GNSS' signal designs, we provide insights for guiding the design of new satellite navigation systems.

Keywords: GNSS, signal design, PRN code, modulation, navigation service
주요어: 위성항법시스템, 신호 디자인, PRN 코드, 변조 방법, 항법 서비스

1. 서론

Global Navigation Satellite System (GNSS)는 위성 신호를 사용하여 사용자에게 Positioning, Navigation, and Timing (PNT) 서비스를 제공하는 중요한 정보 인프라이다 (Yao & Lu 2021). 2023년 현재, 지구 전역에서 사용자의 위치 실시간 추적, 제공을 목표로 하는 GNSS는 미국의 Global Positioning System (GPS), 유럽 연합의 Galileo, 러시아의 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS), 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BDS)가 개발 및 운용되고 있다. 또한, 자국내 또는 주변 국가 사용자에게 최적화된 지역 서비스를 목표로 하는 Regional Navigation Satellite System(RNSS)는 인도의 Navigation Indian Constellation (NavIC), 일본의 Quasi-Zenith Satellite System(QZSS)가 개발 및 운용되고 있다.

상기 언급한 국가뿐 아니라 여러 국가에서 다양한 위성 항법 수요 충족을 위한 PNT 서비스 제공을 목표로 자국과 주변 영역에 센티미터급 위치정보 등을 제공할 수 있는 고정밀, 고신뢰성의 위성 항법 시스템 구축 개발이 이루어지고 있다. 여러 국가에서 자체적인 GNSS 운용 및 개발을 하고 있기 때문에 GNSS 시스템 신호 설계 중 상호 호환성의 중요성이 부각되고 있다. 또한 GNSS의 기능과 성능은 신호 설계에 크게 의존하므로 여러 위성 항법 시스템과 호환성, 고정밀 및 고신뢰성을 동시에 보장하는 GNSS 시스템 신호 설계가 필요하다. GNSS 시스템 신호 설계를 위한 주요 요소에는 GNSS 신호가 전송되는 반송파 주파수 대역, 대역 확산 코드, 변조 기법 등이 있다 (ESA 2014).

GNSS 시스템 신호가 전송되는 대표적인 주파수 대역으로 L1 (1,559 – 1,610 MHz), L2 (1,215.6 – 1,350 MHz), L5 (1,151 – 1,214 MHz) 대역이 있으며, 최근 L6 (1,278 MHz), S (2,492 MHz) 대역 또한 향상된 PNT 서비스를 위하여 새롭게 사용되고 있다 (Teunissen & Montenbruck 2017). GNSS의 대역 확산 코드는 주

Received Nov 10, 2023 **Revised** Nov 21, 2023 **Accepted** Nov 27, 2023
†**Corresponding Author**
E-mail: remero@hanyang.ac.kr
Tel: +82-2-2220-4822
Jong Hyun Jeon https://orcid.org/0009-0004-8873-0741
Jeonghang Lee https://orcid.org/0009-0006-7439-1261
Jeongwan Kang https://orcid.org/0000-0002-1708-1690
Sunwoo Kim https://orcid.org/0000-0002-7055-6587
Jung-Min Joo https://orcid.org/0000-0002-8256-7005

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

Table 1. GPS L1 band signals and modulation scheme.

Service	C/A code	P code	M code	L1C
Centre frequency (MHz)		1,575.42		
Signal component	Data	Data	N.A.	Data Pilot
Spreading modulation	BPSK(1)	BPSK(10)	BOCsin(10,5)	TMBOC(6,1,1/11)
PRN code length	1,023	6.19×10^{12}	N.A.	10,230
PRN code family	Gold code	Combination and short cycling of M-sequences	N.A.	Weil code
Chip rate (Mcps)	1.023	10.23	5.115	1.023
Data rate (bps)	50	50	N.A.	50

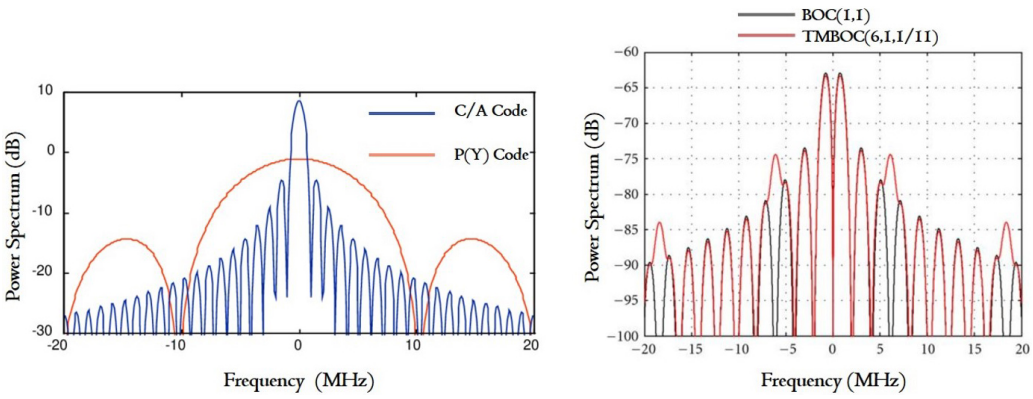

Fig. 1. GPS C/A, P code and L1C power spectral density (Raju et al. 2012).

로 Pseudorandom Noise (PRN) 코드라고 불리는 의사 난수열로 구성되며, 각국의 GNSS 신호는 대역별로 독자적인 방법을 사용한다 (Kim et al. 2019). Binary Phase Shift Keying (BPSK)는 추적 정확도 향상, 다중경로 완화 등을 위하여 GPS, GLONASS 등에 채택된 첫 번째 변조 기법이며 (Kaplan & Hegarty 2009), 각 국의 GNSS는 BPSK 또는 Binary Offset Carrier (BOC) 등 여러 변조 기법을 사용하고 있다 (Betz 2001).

여러 논문에서 기존 GNSS 시스템의 설계 및 신호 설계에 따른 성능 영향에 대한 통찰력 제공을 위하여 GNSS 시스템 신호에 대한 개요를 제공한다. Avila-Rodríguez (2008)는 Galileo E1 대역의 Open Service (OS) 신호 디자인 및 개발을 위하여 GNSS 시스템 신호 구조, 변조 및 다중화 기법에 대한 조사를 수행하였다. 특히, 신호 스펙트럼 분리계수가 GNSS 시스템 신호에 미치는 영향을 조사하였으며, 이를 반영한 이진 코드 신호의 이론적 표현 도출 및 실제 시나리오에서 도출한 표현의 유효성을 검증하였다. 하지만 QZSS와 NavIC에 대한 개요는 제공하지 않으며, BDS에 대한 개요 또한 현재 운용중인 BDS와는 다른 사양을 소개한다. Hegarty & Chatre (2008)는 GNSS 구성 요소의 상황, 미래 계획에 대한 개요와 사용자 장비 구성 및 민간 항공 응용 프로그램에 대한 개요를 제공한다. Hegarty (2012)는 GNSS 시스템 신호의 특성, 위성 궤도 및 개발 사항에 대한 개요를 제공하며, GPS, Galileo 등에 현대화 신호를 위하여 적용된 신호 구성 요소 분리 방법, 오류 정정 기법 등을 소개한다. Hegarty & Chatre (2008)과 Hegarty (2012) 모두 GPS를 제외한 다른 GNSS 시스템 신호의 PRN 코드 생성 방법에 대한 개요는 제공하지 않으며, QZSS, NavIC에 대해서는 주파수 대역과 칩 속도 등의 대략적인 개요만을 제공한다.

이와 같은 선행 연구들은 최신 GNSS 시스템에 대한 개요는 제공하지 못하며, 특정 대역 또는 특정 GNSS 시스템에 대한 정보로 한정되어 있다. 또한 기존 GNSS 시스템 신호와 상호 호환성 분석을 위하여 선행 조사되어야 하는 PRN 코드 생성 방법 및 RNSS 시스템(QZSS, NavIC)에 대한 개요는 제공하지 않는다. 따라서, 이 논문은 현재 운용중인 6국의 위성 항법 시스템의 현대화 신호를 포함한 포괄적인 개요 제공과 GNSS 시스템 호환성 분석을 위하여 각 국 GNSS 신호 생성 방법에 대한 통찰력 제공을 목적으로 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 각 국의 사용 주파수 대역과 대역 별 지원 서비스, 신호 특성 등에 대한 현황 및 개발 예정 사항을 조사한다. 또한 각 GNSS 시스템의 대역 별 신호 PRN 코드의 생성 방법 및 종류와 현대화 신호와 기존 신호의 간섭을 줄이기 위하여 제안된 변조 기법에 대한 이론적 배경 등을 살펴본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 현재 개발 및 운용중인 GNSS 신호의 대역 별 신호 및 서비스 현황을 살펴보고, 3장에서는 RNSS 신호의 대역 별 신호 및 서비스 운용 현황을 살펴본다. 마지막으로 4장에서 GNSS 신호들의 특징을 요약하고, 맺는다.

2. GNSS 시스템 대역 별 신호 설계

2.1 GPS

GPS는 미국이 운영하는 GNSS로 1978년 최초로 GPS 위성이 발사되었으며, 현재 Middle Earth Orbit 31개의 위성군 크기를 달

Table 2. GPS L2 band signals and modulation scheme.

Service	L2CM	L2CL	M code	P code
Signal component	Data	Pilot	N.A.	Data
Centre frequency (MHz)	1,227.60			
Spreading modulation	BPSK(1) result of multiplexing 2 streams		BOCsin(10,5)	BPSK(10)
PRN code length	10,230	767,250	N.A.	6.19×10^{12}
PRN code family	M-sequences from a maximal polynomial of degree 27		N.A.	Combination and short cycling of M-sequences
Chip rate (cps)	5.115×10^{3}	5.115×10^{3}	5.115×10^{6}	10.23×10^{6}
Data rate (bps)	50	-	N.A.	50

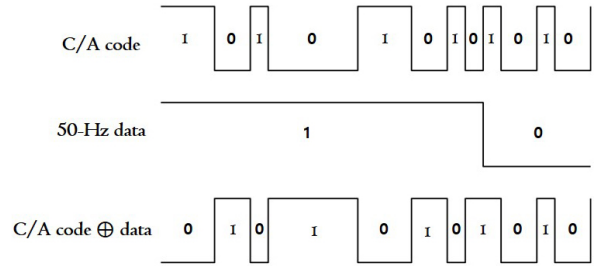

Fig. 2. Direct Sequence Spread Spectrum Modulation (Raju et al. 2012).

성하였다. 초기 GPS는 L1 및 L2 대역 신호 만을 송출하였으나, 현대화 과정이 수행되면서 L5 대역 신호도 함께 송출하고 있다 (GPS-ICD-200 2022, GPS-ICD-705 2022, GPS-ICD-800 2022).

2.1.1 L1 대역

GNSS에서 가장 기본적인 대역으로, GPS는 타 주파수 대역 (L2, L5)과 이중 주파수 신호를 지원하여 높은 측위 정확도를 가진다 (ESA 2021a). GPS는 L1 대역에서 C/A, P, M 코드 및 L1C 신호를 송출한다. Table 1은 GPS L1 대역 신호의 주요 특성을 나타내며 Fig. 1은 C/A, P, L1C 코드 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

C/A 코드는 10개의 셀을 갖는 두개의 Linear Feedback Shift Register (LFSR)에 의하여 생성되는 G1, G2 코드를 modulo-2 sum하여 생성된다. C/A 코드 신호는 BPSK(1) 변조 기법을 사용하며, BPSK(n)에서 $n=f_c/f_{ref}$의 값을 가지며, f_c는 칩 속도, f_{ref}는 참조 칩 속도를 나타낸다. C/A 코드 신호의 f_{ref}=1.023 Mcps이다. Fig. 2는 C/A 코드와 50 Hz 데이터의 Direct Sequence Spread Spectrum 생성 모식도이다.

P, M 코드 신호는 GPS 군용 신호로써 암호화되어 송출된다. P 코드가 암호화된 코드를 Y 코드라고 하며, 해당 코드를 PRN 코드로 사용한 신호를 P(Y) 코드 신호라 한다. P 코드 신호는 C/A 코드와 함께 legacy GPS 신호이며, BPSK(1)보다 각 심볼에서 나타나는 정보의 양이 많고 대역폭 효율이 좋은 BPSK(10) 변조 기법을 사용한다. P 코드는 12개의 셀을 갖는 4개의 LFSR에 의하여 생성되는 X1 코드와 지연 X2 코드의 modulo-2 sum으로 생성된다. M 코드 신호는 현대화 신호 중 하나이며, 타 BPSK 변조 신호와 간섭을 피하기 위하여 BOCsin(10,5) 변조 기법을 사용한다. BOC(m,n)에서 m,n은 Eq. (1)과 같다 (Raju et al. 2012).

$$m = \frac{f_{sc}}{f_{ref}}, \qquad n = \frac{f_c}{f_{sc}} \tag{1}$$

여기서 f_{sc}는 부반송파 주파수를 나타낸다. BOCsin 변조 기법은 확산 코드와 펄스 성분의 위상이 일치하도록 구성하며, BPSK 변조 신호보다 높은 신호 대 잡음 비를 제공한다.

L1C 신호는 데이터 성분(L1CD)와 파일럿 성분(L1CP)로 구성되어 있으므로 효율적인 전력 분배가 가능하다. 따라서 전체 신호 전력을 구성 요소 간에 다르게 나눌 수 있는 Time Multiplexing BOC (TMBOC)을 사용한다. TMBOC(m,n,p)는 칩 기반 인터리빙 변조 기법으로 Eq. (2)와 특정 시간을 선택하여 BOC(m,n)의 확산 코드를 배치하고 나머지 위치에 BOC(n,n)의 확산 코드를 배치하여 구현한다 (ESA 2011).

$$X_{MBOC(m,n,p)}(f) = (1-p)X_{BOC(n,n)}(f) + pX_{BOC(m,n)}(f) \ (0 \le p \le 1) \tag{2}$$

여기서 p는 BOC(n,n)의 가중치를 의미하며, X(f)는 각 변조 신호의 전력 스펙트럼 밀도를 나타낸다. L1C 신호에 적용되는 Chips Message Robust Authentication 기술은 신호에 암호화된 워터마크를 추가하여 스푸핑되는 시점을 알 수 있다.

2.1.2 L2 대역

GPS는 L2 대역 신호와 L1 대역 신호를 함께 사용하여 신호 간섭 문제를 해결하고, 시스템 오류 문제를 보완한다. GPS는 L2 대역에서 L2C, M 코드, P 코드 신호를 송출한다. Table 2는 GPS L2 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 3은 GPS L2 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

L2C 신호는 위성 당 서로 다른 Civil Moderate (CM), Civil Long (CL) 코드 두 개를 사용한다. 각 코드는 최대 27차 다항식을 사용하는 M-시퀀스를 기반으로 하며, C/A 코드에 비해 긴 코드 길이를 가짐으로써 자기 상관 및 상호 상관 특성이 우수하여 수신기에서 신호 획득과 추적이 용이하다. CM, CL 코드는 chip-by-chip 다중화로 합쳐진다. L2C 신호에서 chip-by-chip 다중화는 서로 다른 길이의 CM, CL 코드를 시간 다중화를 통해 C/A 코드와 동일한 칩 속도를 갖도록 하며, 각 코드에 절반의 전력 할당이 가능하다.

2.1.3 L5 대역

L5 대역은 GNSS 위성이 증가하면서 민간 서비스 요구를 충족하기 위해 GPS에 추가된 송출 대역으로, GPS L5 대역 신호는 데이터와 파일럿 성분으로 구성된다. Table 3은 GPS L5 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 4는 GPS L5 대역 신호의 주파수

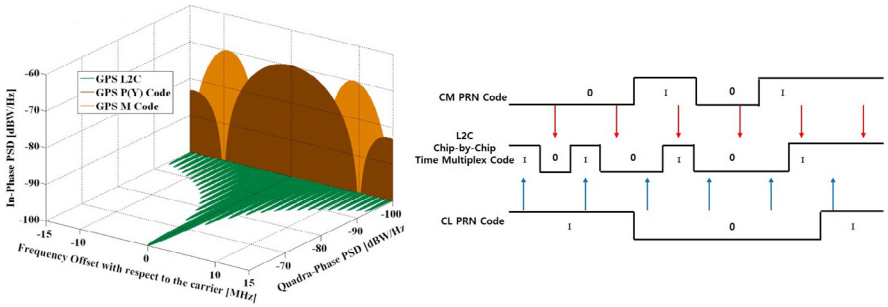

Fig. 3. GPS L2 band frequency power spectral density and CM, CL chip-by-chip multiplexing (GPS-ICD-800 2022).

Table 3. GPS L5 band signals and modulation scheme.

Service	Centre frequency (MHz)	Signal component	Spreading modulation	PRN code length	Chip rate (Mcps)	Data rate (bps)
L5I	1,176.45	Data	BPSK(10)	10,230	10.23	50
L5Q		Pilot		10,230	10.23	-

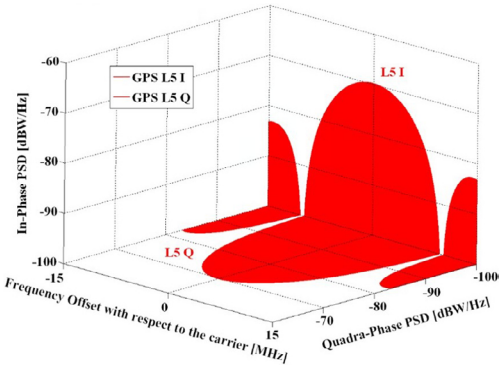

Fig. 4. GPS L5 band frequency power spectral density (ESA 2014).

스펙트럼을 나타낸다.

GPS L5I/Q PRN 코드는 XA 코드와 XB 코드를 칩 길이마다 동기를 맞추어 modulo-2 sum을 통해 생성된다. 각 코드는 노이만-호프만 overlay 코드와 1 kBd 속도로 변조되며, 1 ms마다 노이만-호프만 코드 비트가 정해진 횟수만큼 반전과 비반전을 반복하며 L5 대역 신호의 PRN 코드 칩에 추가된다. L5I/Q PRN 코드를 위한 노이만-호프만 코드의 길이는 각각 10 bits와 20 bits이다 (GPS-ICD-705 2022). GPS L5 대역 신호는 L1 대역과 떨어진 반송파 주파수 사용을 통해 이중 주파수 사용자에게 높은 성능의 측위를 제공한다. 또한 넓은 대역폭을 갖는 BPSK(10) 변조를 사용하여 L1, L2 대역 신호에 비하여 높은 PNT 서비스 성능을 제공한다.

2.2 GALILEO

Galileo는 유럽연합에서 개발된 GNSS로 GLONASS, GPS와 높은 호환성을 가지며, GPS보다 향상된 PNT 서비스를 목표로 한다. Galileo는 Cosmicheskaya Systyema Poiska Avariynich Sudov - Search and Rescue Satellite Aided Tracking 시스템과 상호 운용 가능한 Search and Rescue 서비스를 제공하기 위한 향상된 항법 신호를 제공한다. Galileo는 세 개의 주파수 대역 E1, E5, E6에 Code Division Multiple Access (CDMA) 기반 항법 신호를 제공한다. Galileo E1, E5 대역 신호는 GPS L1, L5 대역 신호와 동일한 변조 기법을 사용하므로 완전한 호환성을 가진다 (Galileo OS SIS ICD 2021).

2.2.1 E1 및 E6 대역

Galileo는 E1 및 E6 대역에서 OS, Commercial Service (CS), Public Regulated Service (PRS) 신호를 송출하며, GPS와 호환성을 가지는 동시에 독립적으로 사용된다 (ESA 2022). Table 4는 Galileo E1 및 E6 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 5는 Galileo E1 및 E6 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

Galileo E1 대역 OS 신호는 민간 서비스를 제공하며, GPS와 상호 운용성 확보를 위해 GPS L1C 신호와 동일한 Multiplexed BOC (MBOC) 신호 스펙트럼을 가지도록 설계되었다. MBOC 변조 신호는 낮은 Bit Error Rate과 높은 스펙트럼 효율 제공한다. MBOC 구현을 위해 Composite BOC (CBOC)를 사용하며, 데이터, 파일럿 성분을 각각 BOC(1,1) 및 BOC(6,1) 구성 요소를 포함한다. Galileo E1 대역 OS 신호의 PRN 코드는 11개의 셀을 갖는 LFSR을 사용하여 코드를 생성하며, 각 셀에 짧은 메모리를 저장하는 방식의 random memory code를 사용한다 (Dolinar 1988). E1-B 성분은 탐색구조 서비스의 회신링크 메시지를 제공하며, Open Service Navigation Message Authentication (OSNMA) 프로토콜을 통한 인증 서비스를 제공 예정이다.

Galileo E6 대역 CS 신호는 유료 사용자를 대상으로 높은 정확도 및 강건성을 제공하기 위한 상업적 목적으로 개발되었으나 초기 계획과 달리 무료로 제공되고 있다. CS 신호 또한 E1 대역 OS 신호와 마찬가지로 random memory code를 사용한다 (Hein et al. 2006a, Wallner et al. 2008). E6-B 성분은 센티미터급 보정정보를 전송하는 High Accuracy Service를 제공하며, 1 ksps의 높은 데이터 전송속도를 가진다. E6-C는 암호화된 확산 코드를 통해 인증 서비스인 OSNMA와 보완적인 코드 인증 서비스

Table 4. Galileo E1 and E6 band signals and modulation scheme.

Service	E1 OS		E1 PRS	E6 CS		E6 PRS
Centre frequency (MHz)	1,575.42			1,278.75		
Signal component	E1-B (Data)	E1-C (Pilot)	-	E6-B (Data)	E6-C (Pilot)	-
Spreading modulation	CBOC(6,1,1/11)		BOCcos(15,2.5)	BPSK(5)	BPSK(5)	BOCcos(10,5)
PRN code length	4,092	4,092	N.A.	5,115	5,115	N.A.
Chip rate (Mcps)	1.023		2.5575	5.115	5.115	5.115
Data rate (sps)	250	-	N.A.	1,000	-	N.A.

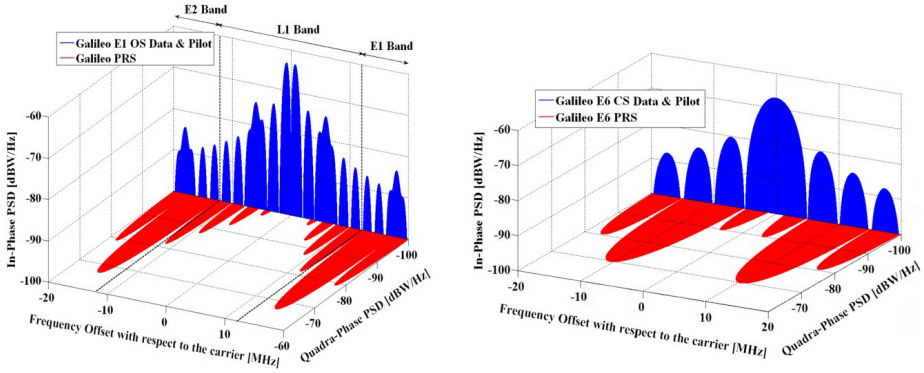

Fig. 5. Galileo E1 and E6 band frequency power spectral density (ESA 2014).

Table 5. Galileo E5 band signals and modulation scheme.

Service	E5a		E5b	
Centre frequency (MHz)	1,191.795			
Signal component	E5a-I (data)	E5a-Q (pilot)	E5b-I (data)	E5b-Q (pilot)
Spreading modulation	AltBOC(15,10)			
	BPSK(10)	BPSK(10)	BPSK(10)	BPSK(10)
PRN code length	10,230	10,230	10,230	10,230
Chip rate (Mcps)	10.23	10.23	10.23	10.23
Data rate (sps)	50	-	250	-

Commercial Authentication Service를 2025년부터 제공할 예정이다. Galileo E1 및 E6 대역 PRS 신호는 유럽 연합 회원국으로부터 허가 받은 사용자에게 향상된 PNT 서비스를 제공하는 암호화된 항법 신호이다. Galileo E1 대역 PRS 신호는 GPS P 및 M 코드 신호, Galileo E6 대역 PRS 신호는 동일 대역 CS 신호와의 스펙트럼 분리를 고려하여 설계되었다.

2.2.2 E5 대역

Galileo E5 대역은 E5a 대역과 E5b 대역으로 구분되며, Galileo E5 대역 신호는 Alternative BOC (AltBOC) 변조 기법을 활용하여 두 대역 신호를 함께 송출한다 (Hein et al. 2006b). GPS L2C 신호와 유사하게 이중 주파수 사용 및 차별화된 신호 구조에 따른 항법성능 향상을 목표로 설계되어 넓은 대역폭을 사용한다. Table 5는 Galileo E5 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 6은 Galileo E5 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

Galileo E5 대역 신호는 각각 직교 위상에 데이터, 파일럿 성분을 가지며 AltBOC 변조 기법을 사용하여 상측파대 및 하측파대를 통해 서로 다른 신호를 전송할 수 있는 장점을 가진다. E5 신호의 PRN 코드는 14개의 셀을 갖는 LFSR에 의해 생성되며,

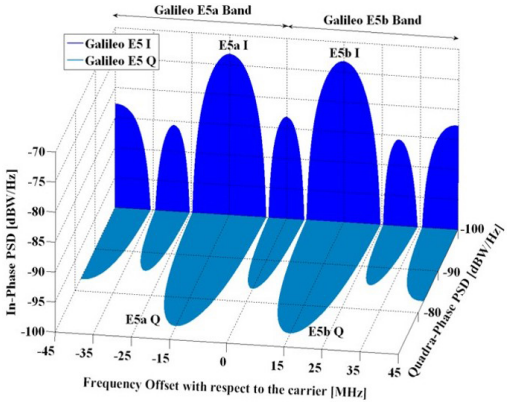

Fig. 6. Galileo E5 band frequency power spectral density (ESA 2014).

truncated 골드 코드를 사용한다.

2.3 GLONASS

초기 GLONASS 위성은 GPS, Galileo와 달리 Frequency

Table 6. GLONASS L1 band signals and modulation scheme.

Service	L1OF	L1SF	L1OC		L1SC	
Access technique	FDMA		CDMA			
Centre frequency (MHz)	1,598.0625 – 1,605.375		1,600.995			
Signal component	Data	Data	Data	Pilot	Data	Pilot
Spreading modulation	BPSK(0.511)	BPSK(5.11)	BPSK(1)	BOC(1,1)	BOC(5,2.5)	BOC(5,2.5)
PRN code length	511	N.A.	1,023	4,092	N.A.	N.A.
Chip rate (Mcps)	0.511	5.11	5.115	5.115	N.A.	N.A.
Data rate	50 bps	-	250 sps	-	N.A.	N.A.

Table 7. GLONASS L2 band signals and modulation scheme.

Service	L2OF	L2SF	L2OC		L2SC	
Access technique	FDMA		CDMA			
Centre frequency (MHz)	1,242.9375 – 1,248.625		1,248.06			
Signal component	Data	Data	Data	Pilot	Data	Pilot
Spreading modulation	BPSK(0.511)	BPSK(5.11)	BPSK(1)	BOC(1,1)	BOC(5,2.5)	BOC(5,2.5)
PRN code length	511	N.A.	10,230	10,230	N.A.	N.A.
Chip rate (Mcps)	0.511	5.11	5.115	5.115	N.A.	N.A.
Data rate	50 bps	-	50 sps	-	N.A.	N.A.

Division Multiple Access (FDMA) 신호인 Open FDMA (OF), Secured FDMA(SF) 신호 만을 송출하였다 (ICD-GLONASS 2008). GLONASS의 각 위성은 자체 반송파 주파수로 항법 신호를 전송하므로, 두 GLONASS 위성이 단일 궤도의 동일 슬롯에 위치한 경우 동일한 반송파 주파수로 항법 신호를 전송할 수 있다. 이후 현대화 과정을 거쳐 CDMA 신호인 Open CDMA (OC), Secured CDMA (SC) 신호를 개발하여 현재 일부 송출 중이다 (ICD-L1-GLONASS 2016, ICD-L2-GLONASS 2016, ICD-L3-GLONASS 2016).

2.3.1 L1 및 L2 대역

GLONASS의 L1 대역은 GPS 및 Galileo L1 대역과 일치하지 않으며, GLONASS L1/L2 대역 신호는 FDMA 신호 송출을 위하여 14개 채널을 사용한다 (ESA 2019). 각 채널의 반송파 주파수는 위성의 채널 번호에 따라 다른 값을 가지며 Eq. (3)과 같다.

$$\begin{matrix} f_{K1} = 1{,}602 + k \times 0.5625\ (\text{MHz}) \\ f_{K2} = 1{,}246 + k \times 0.4375\ (\text{MHz}) \end{matrix}, (-7 \le k \le 6) \qquad (3)$$

여기서 f_{K1}, f_{K2}는 각각 L1/L2 대역 FDMA 신호의 채널 숫자에 따른 반송파 주파수를 나타내며, k는 채널 숫자이다. GLONASS L1/L2 대역 신호의 L2 대역 FDMA 신호는 L1 대역 신호와 동일한 스펙트럼을 가지며, CDMA 신호는 코드 길이 외에 모두 L1 대역 CDMA 신호와 동일한 스펙을 가진다. Tables 6과 7은 각각 GLONASS L1, L2 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Figs. 7과 8은 각각 GLONASS L1 대역의 FDMA, CDMA 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

GLONASS L1OF 신호의 PRN 코드는 9개의 셀을 갖는 LFSR에 의해 생성되며 잡음에 강한 특성을 가진다. L1SF 신호는 GPS에서 P(Y) 코드와 유사한 용도의 군용 신호로 허가된 사용자에게 PNT 서비스를 제공한다. L1SF 신호의 PRN 코드는 모든 위성으로부터 송출되는 OF 신호와 동일하다.

GLONASS L1OC 신호는 데이터, 파일럿 성분으로 구분되며,

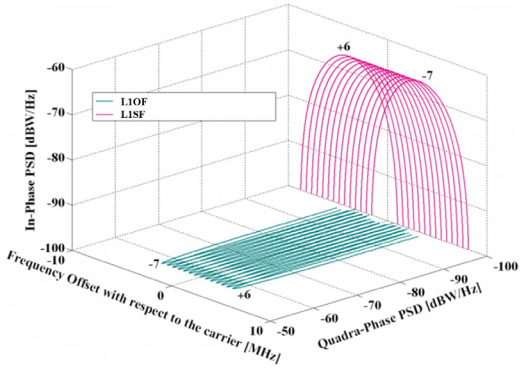

Fig. 7. GLONASS L1 band FDMA signal frequency power spectral density (ESA 2014).

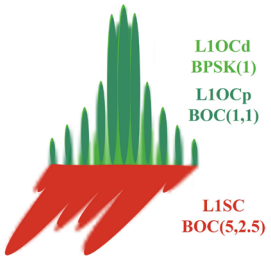

Fig. 8. GLONASS L1 band CDMA signal frequency power spectral density.

각 성분은 다른 PRN 코드 패밀리를 사용한다. 데이터 성분의 코드는 GPS와 동일하게 10개의 셀을 갖는 두 개의 LFSR에 의해 생성되는 골드 코드를 사용한다. 파일럿 성분의 코드는 카사미 코드를 사용하며 각각 12, 6개의 셀을 갖는 두 개의 LFSR에 의해 생성된다. L1OC 신호의 스펙트럼은 인접 대역의 Radio Astronomy Service 로의 대역 외 방사를 고려하여 설계되었으며, 향후 회신 링크를 포함한 탐색구조 서비스를 추가로 제공할 예정이다. L1SC 신호는 특성상 일부 정보만이 공개되어 있으며, 동일 대역 OC 신호와 비교하여 넓은 신호 대역폭을 가진다.

Table 8. GLONASS L3 and L5 band signals and modulation scheme.

Service	L3OC		L5OCM
Access technique	CDMA		
Centre frequency (MHz)	1,202.025		1,176.45
Signal component	Data	Pilot	-
Spreading modulation	BPSK(10)	BPSK(10)	BPSK(10)
PRN code length	10,230	10,230	TBD
Chip rate (Mcps)	10.23	10.23	TBD
Data rate (sps)	200	-	TBD

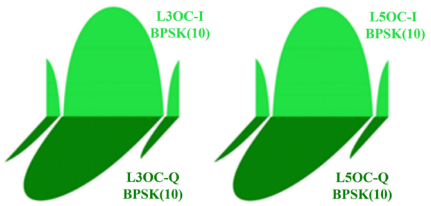

Fig. 9. GLONASS L3 and L5 band frequency power spectral density.

Table 9. BeiDou L1(B1) band signals and modulation scheme.

Service	B1I	B1A	B1C		
Centre frequency (MHz)	1,561.098				
Signal component	Data	Data	Pilot	Data	Pilot
Spreading modulation	BPSK(2)	BOC(14,2)		BOC(1,1)	QMBOC(6,1,4/33)
PRN code length	2,046	N.A.	N.A.	10,230	10,230
Chip rate (Mcps)	2.046	N.A.	N.A.	1.023	
Data rate (sps)	50	N.A.	N.A.	100	-

2.3.2 L3 및 L5 대역

GLONASS의 L3, L5 대역은 CDMA 신호만 송출하며, L5 대역의 Open CDMA Modernized (OCM) 신호 연구가 진행되고 있다. Table 8은 GLONASS L3, L5 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 9는 GLONASS L3, L5 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. L3OC 신호의 PRN 코드는 14개 셀을 갖는 하나의 LFSR과 7개 셀을 갖는 LFSR 2개, 총 3개의 LFSR에 의해 생성되며 truncated 카사미 코드를 사용한다. L3OC 신호의 데이터 성분 PRN 코드는 1,000 sps로 클럭된 Barker 코드 심볼 스트림과 200 sps로 클럭된 convolution encoder 심볼 스트림을 사용하여 부호화한다. L3OC 신호의 파일럿 성분 PRN 코드는 GPS 파일럿 성분과 다르게 10 비트 노이만-호프만 코드로 부호화한다. L5OCM 신호의 반송파 주파수는 1,176.45 MHz이며, L3OC와 동일한 BPSK(10) 변조 기법을 사용하며 현재 연구가 진행 중이다.

2.4 BDS

BDS는 중국에서 개발 및 운용중인 GNSS로 세 단계에 걸쳐 개발되었다. BDS-1의 프레임에 regional radio determination satellite service가 도입된 후, 2012년 BDS-2에 의해 RNSS가 구축되었다. 현재 개발 및 운용 중인 BDS-3에 해당하는 위성의 신호를 통하여 전 지구 사용자에게 항법 서비스를 제공하고 있으며, L1 (B1), L5 (B2), L6, S 대역에서 신호를 송출한다

2.4.1 L1 (B1) 대역

BDS 신호는 공통적으로 in-phase (B1I, B2I, B3I)에는 민간 사용자, quadrature-phase (B1Q, B2Q, B3Q)에는 허가된 사용자를 대상으로 신호를 송출한다 (ESA 2020). Table 9는 BDS L1 (B1) 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 10은 BDS L1 (B1) 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다. B1I 신호는 보정 서비스를 제공하며, B1I 신호의 보정 데이터는 master control station에서 처리된다 (Teunissen & Montenbruck 2017). B1I 신호의 PRN 코드는

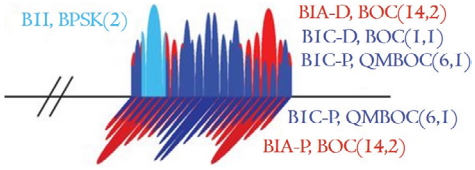

Fig. 10. BDS L1(B1) band frequency power spectral density (Montenbruck et al. 2022).

Table 10. BeiDou L6(B3) band signals and modulation scheme.

Service	B3I	B3Q	B3A
Centre frequency (MHz)	1,268.52		
Spreading modulation	BPSK(10)	BPSK(10)	BOC(15,2.5)
PRN code length	10,230	N.A.	N.A.
Chip rate (Mcps)	10.23	N.A.	N.A.
Data rate (sps)	50	N.A.	N.A.

11개의 셀을 갖는 2개의 LFSR에 의해 생성되며 truncated 골드 코드를 사용한다 (BDS-SIS-ICD-B1I 2019).

B1A 신호는 차세대 BDS 군용 항법 신호로 타 민간 사용자 신호와 간섭의 영향을 줄이기 위한 변조 기법으로 BOC(14,2) 사용한다. 특정 사용자에게 고정밀 PNT 서비스를 제공하며, 신호의 특성 상 반송파 주파수 및 스펙트럼 외에 신호 정보는 비공개이다. B1C 신호는 GPS L1C 신호와 유사하게 데이터, 파일럿 성분으로 나누어 지며, MBOC 스펙트럼 구현을 위하여 Quadrature Multiplexed BOC 변조를 사용한다 (BDS-SIS-ICD-BDSBAS-B1C 2020). PRN 코드는 웨일 코드를 사용한다.

2.4.2 L6 (B3) 대역

BDS L6 (B3) 대역 신호는 총 4개의 개별 데이터, 파일럿 성분을 갖는 B3, B3A 두 개의 신호를 송출하며, 반송파 주파수는 1286.52 MHz이다 (BDS-SIS-ICD-B3I 2018). B3I 및 B3Q 신호는 10.23 Mcps 칩 속도를 갖는 PRN 코드와 500 bps의 이진 항법 데이터를 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)로 변조한다. B3A 신호는 BOC(15,2.5) 변조를 사용하며, B3AD와 B3AP 두 가지 위

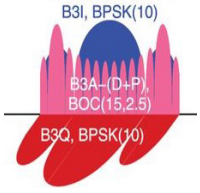

Fig. 11. BDS L6(B3) band frequency power spectral density (Montenbruck et al. 2022).

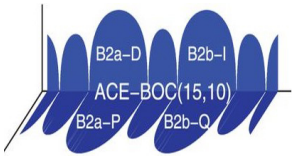

Fig. 12. BDS L5(B2) band frequency power spectral density (Montenbruck et al. 2022).

상 직교 성분으로 구성된다. B3AD 데이터 채널은 50 bps (100 sps)의 데이터 전송률을 갖는다. Table 10은 BDS L6 (B3) 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 11은 BDS L6 (B3) 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

2.4.3 L5 (B2) 및 S 대역

BDS는 L5 (B2) 대역에서 총 4개의 개별 데이터, 파일럿 성분을 갖는 B2a와 B2b 두 개의 신호를 송출한다 (BDS-SIS-ICD-B2a 2017, BDS-SIS-ICD-B2b 2020). 이 중 B2a 신호는 GPS L5와 Galileo E5 대역 신호와 호환 및 상호 운용이 가능하며, 두 신호(B2a, B2b)의 반송파 주파수는 각각 1176.45 MHz와 1207.14 MHz이다. B2a 신호의 데이터, 파일럿 성분과 B2b 데이터 성분은 BPSK(10)으로 변조되며 B2b 파일럿 성분의 변조 기법은 TBD이다. B2a 신호와 B2b 신호는 Asymmetric Constant Envelope BOC 변조로 합쳐지며, 전력 할당 및 수신 기법 측면에서 높은 유연성을 가진다 (Lu et al. 2019). B2a 신호와 B2b 신호의 PRN 코드는 13개의 셀을 갖는 총 2개의 LFSR에 의해 생성되며, 골드 코드를 사용한다. Table 11은 BDS L5 (B2) 및 S 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 12는 BDS L5 (B2) 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

BDS는 S 대역에서 Bs-D, Bs-P 두 가지 성분으로 구성된 Bs 신호를 송출한다. BDS Bs 신호는 PNT 서비스가 아닌 단문 메시지 서비스를 제공하는 신호이다. 시간 당 6,000,000회 메시지 전송이 가능하며, 메시지 당 최대 14,000 bits 전송이 가능하다. 반송파 주파수는 2,491.75 MHz이며, 칩 속도는 4.08 Mcps, Offset QPSK (OQPSK) 변조 기법을 사용한다 (Lu & Yao 2020).

3. RNSS 시스템 대역 별 신호 설계

3.1 QZSS

QZSS는 일본에서 자국 내 및 주변 국가에서 GPS 신호 보정 서비스 및 재난 안전 서비스 제공을 위하여 개발 및 운용된다. QZSS의 GPS 보정 서비스는 코드 위상 측위 사용자를 위한 Submeter Level Augmentation Service (SLAS), 반송파 위상 측위 사용자를 위한 Centimeter Level Augmentation Service (CLAS)를 제공한다 (Teunissen & Montenbruck 2017). 또한 SLAS 신호의 특정 메세지 유형을 사용한 조기 경보 서비스를 제공한다. QZSS는 L1, L2, L5 및 L6 대역에서 신호를 송출하고 있다.

Table 11. BeiDou L5(B2) and S band signals and modulation scheme.

Service	B2a		B2b		Bs	
Centre frequency (MHz)	1,191.795				1,575.42	
Signal component	Data	Pilot	Data	Pilot	I	Q
Spreading modulation	BPSK(10)	BPSK(10)	BPSK(10)	TBD	OQPSK	
PRN code length	10,230	10,230	10,230	TBD	255	$2^{21}-1$
Chip rate (Mcps)	10.23		10.23		4.08	
Data rate (sps)	200	-	1,000	TBD	16,000	

Table 12. QZSS L1 band signals and modulation scheme.

Service	C/A	L1C	L1S (L1-SAIF)
Centre frequency (MHz)		1,575.42	
Spreading modulation	BPSK(1)	BOC(1,1)	BPSK(1)
PRN code length	1,023	10,230	1,023
Chip rate (Mcps)	10.23	1.023	1,023
Data rate	50 sps	50 bps	250 bps

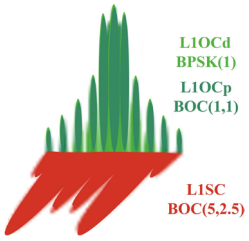

Fig. 13. QZSS L1 band frequency power spectral density (ESA 2014).

3.1.1 L1 대역

QZSS는 L1 대역에서 C/A, L1C, L1S 신호가 송출된다. QZSS C/A 신호와 L1C 신호는 GPS C/A 코드, L1C 신호와 다른 위성 식별 번호를 사용하며, 각 GPS 신호와 동일 구조 신호를 송출하여 PNT 서비스를 제공한다 (ESA 2021b). Table 12는 QZSS L1 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 13은 QZSS L1 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

QZSS C/A 신호의 PRN 코드는 GPS C/A 코드 신호와 동일하게 골드 코드를 사용하며 10개의 셀을 갖는 두 개의 LFSR에 의해 생성된다. QZSS L1C 신호는 GPS L1C 신호와 유사하게 데이터, 파일럿 성분으로 나뉘고 웨일 코드를 사용하며, 10,230 길이를 갖는 시퀀스를 특정 구간에서 잘라 PRN 코드를 생성한다. QZSS L1C 신호는 GPS-like 신호 송출로 GPS와 상호 운용성 확보하였으나 GPS L1 C/A 신호와 간섭 완화를 위하여 BOC(1,1) 변조 기법을 사용한다 (IS-QZSS-PNT-004 2021).

QZSS L1S 신호는 L1-Submeter-class Augmentation with Integrity Function (L1-SAIF) 신호라고도 불리며, 측위 성능 향상

Table 13. QZSS L2 and L5 band signals and modulation scheme.

Service	L2CM	L2CL	L5I	L5Q
Centre frequency (MHz)	1,227.60		1,176.45	
Signal component	Data	Pilot	Data	Pilot
Spreading modulation	BPSK(1)		BPSK(10)	
PRN code length	1,023	767,250	10,230	10,230
Chip rate (Mcps)	0.511	0.511	10.23	10.23
Data rate (bps)	IIF: 50, IIR-M: 25	-	50	-

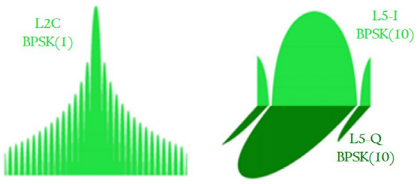

Fig. 14. QZSS L2 and L5 band frequency power spectral density (ESA 2014).

Table 14. QZSS L6 band signals and modulation scheme.

Service	L61 (Block I)		L62 (Block II)	
Centre frequency (MHz)	1,227.60		1,176.45	
Message name	L6D	-	L6D	L6E
Spreading modulation	BPSK		BPSK	
PRN code length	10,230 (code 1)	1,048,575 (code 2)	10,230 (code 1)	10,230 (code 2)
Chip rate (Mcps)	2.5575	2.5575	2.5575	2.5575
Data rate (bps)	2,000	-	2,000	2,000

을 위한 보정 정보 제공을 목적으로 설계된 신호이다 (Sakai et al. 2009). 해일이나 지진과 같은 재난 상황 발생 시 Disaster Crisis Report을 전송하는 재난 안전 서비스와 미터급 보정 서비스를 제공한다. 보정 정보 전달이 주목적이므로 C/A 코드 신호에 비해 높은 데이터 전송속도를 가진다. GPS L1 대역 C/A 코드 신호와 동일한 신호 구조를 가지며, PRN 코드는 10개의 셀을 갖는 두 개의 LFSR에 의해 생성된다 (IS-QZSS-L1S-005 2023).

3.1.2 L2 및 L5 대역

QZSS는 L2 대역과 L5 대역에서 각각 L2C 신호와 L5, L5S 신호를 송출한다. 두 대역의 신호는 각각 GPS의 각 대역 신호와 다른 위성 식별 번호를 사용하며, 각 GPS 신호와 동일 구조 신호를 송출하여 PNT 서비스를 제공한다 (IS-QZSS-PNT-005 2022). L5S 신호는 고정밀 측위 기술 등 새로운 위성 신호 검증을 위하여 추가적으로 송출하는 신호이며, QZSS L5 신호와 신호구조가 매우 유사하다. Table 13은 QZSS L2 및 L5 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 14는 QZSS L2 및 L5 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

QZSS L2C 신호는 GPS L2C 신호와 동일하게 데이터, 파일럿 성분으로 나뉘고 웨일 코드를 사용한다. Chip-by-chip Time Division Multiplex 방식으로 다중화 방식이 같으며, 동일한 스펙트럼을 가진다. QZSS L2C 신호는 송출 위성군에 따라 다른 데이터 전송률을 갖는 특징이 있다. QZSS L5 신호는 GPS L5 대역 신호와 동일하게 데이터, 파일럿 성분으로 나뉘고 truncated 골드 코드를 사용하며, 1 ms마다 각 노이만-호프먼 동기화 코드 비트가 modulo-2 sum하여 정해진 횟수만큼 반복하여 PRN 코드 칩에 추가된다.

3.1.3 L6 대역

QZSS L6 대역에서는 위성군에 따라 L61 (Block I), L62 (Block II, III) 신호가 송출된다. QZSS L6 신호는 L1S 신호와 함께 측위 성능 향상을 위한 보정 정보 제공을 목적으로 설계된 항법 신호로 CLAS를 제공한다 (IS-QZSS-L6-005 2022). Table 14는 QZSS L6 대역 신호의 주요 특성을 나타낸다.

QZSS L6 대역 신호 L6I/2의 PRN 코드는 두개의 카사미 코드 시리즈(code 1, code 2)를 사용하며, code 2 코드 신호에는 데이터가 포함되지 않는다. 각 신호의 PRN 코드는 20개의 셀을 갖는 LFSR 2개와 10개의 셀을 갖는 LFSR 1개에 의해 생성된다. QZSS L6 대역 신호는 L6D/E 두 종류의 메시지를 전송한다. L6D 메시지는 일본 국내 대상으로 Precise Point Positioning Real-Time Kinematic 기반의 CLAS를 제공하며, L6E 메시지는 Multi-GNSS Advanced Orbit and Clock Augmentation를 제공하여 보다 넓은 영역을 대상으로 한다. QZSS L6 대역 신호의 각 성분은 Code Shift Keying 변조를 사용하며, 높은 데이터 전송속도(2,000 bps)를 가진다.

3.2 NavIC

NavIC 또는 Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS)는 인도에서 자국내 및 secondary 서비스 지역 (위도: -30°~50°, 경도: 30°~130°)에 GPS 의존도를 낮춘 PNT 서비스 제공을 목표로 개발되었다. 기존 NavIC은 L5, S 대역 신호만을 송출하였으나, 최근 L1 대역 신호를 추가로 송출하고 있다 (ESA 2021c).

3.2.1 L1 대역

NavIC은 L1 대역에서 L1 Standard Positioning Service (SPS) 신호를 송출하며, GPS C/A 코드 신호와 유사한 특징을 갖는다 (ISRO-IRNSS-ICD-SPS-L1 2022). Table 15는 NavIC L1 대역 신호의 주요 특성을 나타내며, Fig. 15는 NavIC L1 대역 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

NavIC L1 대역 SPS 신호는 데이터, 파일럿 성분으로 나뉘고 각 성분은 BOC(1,1) 및 BOC(6,1) 요소를 포함하여 Synthesized BOC (SBOC)로 변조된다. 전력 스펙트럼 밀도를 충족하면서 각 성분 신호를 합치기 위하여 MBOC 변조를 사용한다. SPS 신호

Table 15. NavIC L1 band signals and modulation scheme.

Service	Centre frequency (MHz)	Signal component	Spreading modulation		PRN code length	Chip rate (Mcps)	Data rate (sps)
L1 SPS	1,176.45	Data	MBOC(6,1,1/11)	SBOC data	1.023	10,230	100
		Pilot		SBOC pilot	1.023	10,230	-

Table 16. NavIC L5 and S band signals and modulation scheme.

Service	L5 SPS	L5 RS		S SPS	S RS	
Centre frequency (MHz)		1,176.42			2,492.028	
Signal component	-	Data	Pilot	Data	Data	Pilot
Spreading modulation	BPSK(1)	BOC(5,2)	BOC(5,2)	BPSK(1)	BOC(5,2)	BOC(5,2)
PRN code length	1,023	N.A.	N.A.	1,023	N.A.	N.A.
Chip rate (Mcps)	1.023	N.A.	N.A.	1.023	N.A.	N.A.
Data rate	50 bps	N.A.	N.A.	50 sps	N.A.	N.A.

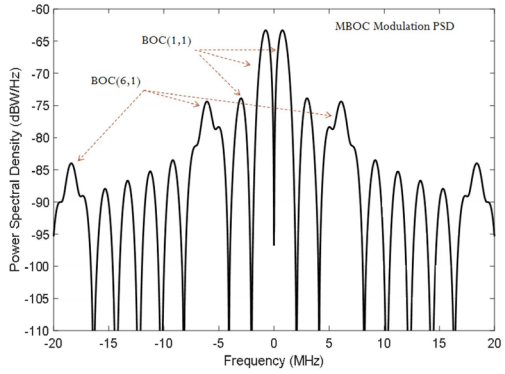

Fig. 15. NavIC L1 band frequency power spectral density (Upadhyay & Bhadouria 2021).

의 PRN 코드는 Interleaved Z4-linear (IZ4) 코드를 사용하며, 55개의 셀을 가지는 2개의 Shift Register (SR)과 5개의 셀을 가지는 Feedback Shift Register로 구성된 3개의 비선형 SR을 사용하여 생성한다. SPS 신호의 프레임은 3개의 서브 프레임으로 구성되며, 1개의 서브 프레임은 9비트 Bose-Chaudhuri-Hocquenghem 코드로 2개의 서브 프레임은 Low Density Parity Check 코드로 인코딩하여 부호화한다.

3.2.2 L5 및 S 대역

NavIC은 L5 및 S 대역에서 민간 사용자 대상 SPS 신호와 허가된 사용자 대상의 Restricted Service (RS) 신호를 송출하며, 두 대역의 신호 구조는 동일한 특징을 가진다 (ISRO-IRNSS-ICD-SPS-1.1 2017). Table 16은 NavIC L5 및 S 대역 신호의 주요 특성을 나타낸다.

NavIC L5, S 대역 SPS 신호는 해상지역이나 오지의 사용자에게 단문 메시지를 사용하여 태풍, 해일 경보 등의 재해 경보 메시지 방송하는 Indian Nation Centre for Ocean Information Services, 즉 재난 안전 서비스를 제공한다. 두 신호의 PRN 코드는 GPS C/A 코드와 동일하게 골드 코드를 사용하며, 10개의 셀을 갖는 두 개의 LFSR에 의해 생성된다. RS 신호는 허가된 사용자에게 SPS 신호 대비 향상된 PNT 성능 제공을 목표로 하며, 접근 제한 신호의 특성 상 주파수 및 스펙트럼 외에 다른 신호 정보는 공개되어 있지 않다. NavIC의 S 대역 신호는 가용 대역폭이 좁은 S 대역(16.5 MHz)의 특성상 타 신호에 비하여 좁은 신호 대역폭을 가진다.

4. 결론

본 논문은 현재 운용 중인 각 국의 대역 별 GNSS 송출 신호와 지원 서비스에 대하여 기술하였다. 공통적으로 접근 제한 PNT 서비스의 경우 넓은 신호 대역폭이 특징이며, 공개 PNT 서비스 신호와의 간섭 완화를 위하여 BOC 기반 변조 기법을 사용하는 것을 확인하였다. BDS 경우 B3 대역에서 QPSK 변조 기법을 사용한다는 특징이 있다. GLONASS의 일부 FDMA 신호를 제외한 모든 신호들이 CDMA 방식을 사용하는 것을 확인하였다. Galileo, QZSS와 NavIC은 각각 대역확산 코드로 memory 코드, 카사미 코드와 IZ4 코드를 자체적으로 개발하여 다른 GNSS 신호의 대역확산 코드와 간섭을 완화한다. QZSS, NavIC은 공통적으로 GPS 신호 기반 PNT 서비스 성능 향상을 위하여 일부 신호가 GPS 신호 구조와 동일한 것을 확인하였다. 이와 같은 기존 GNSS 시스템 신호 설계 조사는 향후 새로운 위성 항법 시스템의 신호 설계 가이드라인에 대한 통찰력을 제공한다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J. Jeon and J. Lee; methodology, J. Jeon, J. Lee, J. Kang and S. Kim; software, J. Jeon and J. Lee.; validation, J. Jeon, J. Lee, J. Kang and S. Kim; formal analysis, J. Jeon, J. Lee, J. Kang and S. Kim; investigation, J. Jeon, J. Lee and J. Joo; resources, J. Jeon and J. Lee; data curation, J. Jeon, J. Lee, J. Joo and S. Kim; writing—original draft

preparation, J. Jeon; writing—review and editing, J. Jeon, J. Lee, J. Kang and S. Kim; visualization, J. Jeon, J. Lee, J. Kang and S. Kim; supervision, S. Kim; project administration, S. Kim; funding acquisition, S. Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

Avila-Rodríguez, J. A. 2008, On generalized signal waveforms for satellite navigation, PhD Dissertation, München, University.

BDS-SIS-ICD-B2a 2017, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608518432765621.pdf

BDS-SIS-ICD-B3I 2018, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608516798097666.pdf

BDS-SIS-ICD-B1I 2019, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf

BDS-SIS-ICD-B2b 2020, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803539206360377.pdf

BDS-SIS-ICD-BDSBAS-B1C 2020, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803538292532733.pdf

Betz, J. W. 2001, Binary Offset Carrier Modulations for Radionavigation, Navigation, 48, 227-246. https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2001.tb00247.x

Dolinar, S. 1988, A new code for Galileo, TDA Progress Report, Jet Propulsion Laboratory.

ESA, Multiplexed_BOC_(TMBOC) [Internet], cited 2011 Nov. 25, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Time-Multiplexed_BOC_(TMBOC)

ESA, Navipedia BeiDou signal [Internet], cited 2020 Jan. 13, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=BeiDou_signal

ESA, Navipedia Galileo signal [Internet], cited 2022 Mar. 1, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Galileo_signal

ESA, Navipedia GLONASS signal [Internet], cited 2019 Oct. 30, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GLONASS_signal

ESA, Navipedia GNSS signal [Internet], cited 2014 May 30, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GNSS_signal

ESA, Navipedia GPS signal [Internet], cited 2021a Jan. 29, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=GPS_signal

ESA, Navipedia IRNSS signal [Internet], cited 2021b Apr. 22, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=IRNSS_signal

ESA, Navipedia QZSS signal [Internet], cited 2021c Sep. 30, available from: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=QZSS_signal

Galileo OS SIS ICD 2021, https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf

GPS-ICD-200 2022, https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf

GPS-ICD-705 2022, https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705J.pdf

GPS-ICD-800 2022, https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800J.pdf

Hegarty, C. J. 2012, GNSS signals—An overview, In Proceedings of the 2012 IEEE International Frequency Control Symposium, Baltimore, USA, 21-24 May 2012, pp.1-7. https://doi.org/10.1109/FCS.2012.6243707

Hegarty, C. J. & Chatre, E. 2008, Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS), Proceedings of the IEEE, 96, 1902-1917. https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006090

Hein, G. W., Avila-Rodriguez, J. A., & Wallner, S. 2006a, The Galileo code and others, Inside GNSS, 1, 62-73.

Hein, G. W., Avila-Rodriguez, J. A., Wallner, S., Pratt, A. R., Owen, J., et al. 2006b, MBOC: The New Optimized Spreading Modulation Recommended for Galileo L1 OS and GPS L1C, In Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium, San Diego, CA, USA, 25-27 April 2006, pp.883-892. https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650688

ICD-GLONASS 2008, http://gauss.gge.unb.ca/GLONASS.ICD.pdf

ICD-L1-GLONASS 2016, http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L1.-Edition-1.0-2016.pdf

ICD-L2-GLONASS 2016, http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L2.-Edition-1.0-2016.pdf

ICD-L3-GLONASS 2016, http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-L3.-Edition-1.0-2016.pdf

ISRO-IRNSS-ICD-SPS-1.1 2017, https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/SateliteNavigation/irnss_sps_icd_version1.1-2017.pdf

ISRO-IRNSS-ICD-SPS-L1 2022 https://www.isro.gov.in/media_isro/pdf/SateliteNavigation/Draft_NavIC_SPS_ICD_L1_Oct_2022.pdf

IS-QZSS-L1S-005 2023, https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_l1s_005_agree.html

IS-QZSS-L6-005 2022, https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_l6_005_agree.html
IS-QZSS-PNT-004 2021, https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_pnt_004_agree.html
IS-QZSS-PNT-005 2022, https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_pnt_005_agree.html
Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2009, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
Kim, G., Song, H. Y., & Lim, D. W. 2019, Some constructions of truncated Gold codes for GNSS, In Proceedings of the 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju, Korea (South), 16-18 Oct. 2019, pp.1231-1233. https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8939739
Lu, M., Li, W., Yao, Z., & Cui, X. 2019, Overview of BDS III new signals, Navigation, 66, 19-35. https://doi.org/10.1002/navi.296
Lu, M. & Yao Z. 2020, Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications, vol.1 (Hoboken: Wiley)
Montenbruck, O., Steigenberger, P., Wang, N., & Hauschile, A. 2022, Characterization and Performance Assessment of BeiDou-2 and BeiDou-3 Satellite Group Delays, Journal of the Institute of Navigation 69. https://doi.org/10.33012/navi.526
Raju, K. S., Pratap, Y., Patel, V., Naidu, S. M. M., Patwardhan, A., et al. 2012, Gps signal generation for l1 frequency using model based design tools, In Proceedings of the Second International Conference on Computational Science, Engineering and Information Technology, Coimbatore, UNK India, 26-28 Oct. 2012, pp.743-748. https://doi.org/10.1145/2393216.2393340
Sakai, T., Fukushima, S., & Ito, K. 2009, Development of QZSS L1-SAIF augmentation signal, In Proceedings of the ICCAS-SICE, Fukoka, Japan, 18-21 Aug. 2009, pp.4462-4467.
Teunissen, P. J. H. & Montenbruck, O. 2017, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, vol.10 (Switzerland: Springer International Publishing)
Upadhyay, D. & Bhadouria, V. S. 2021, Overview of new NavIC L1 SPS signal structure & SBOC modulation and modified-CEMIC multiplexing scheme, Fifteenth Meeting of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems (ICG) organized by the United Nations Officefor Outer Space Affairs (UNOOSA), Vienna, Austria, 27 Sep.-1 Oct. 2021. https://www.unoosa.org/documents/pdf/ icg/2021/ICG15/WGS/icg15_wgs_01.pdf
Wallner, S., Avila-Rodríguez, J. A., Won, J. H., Hein, G. W., & Issler, J. L. 2008, Revised PRN code structures for Galileo E1 OS, In Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, USA, 16-19 Sep. 2008, pp.887-899.
Yao, Z. & Lu, M. 2021, Next-Generation GNSS Signal Design (Singapore: Springer).

Jong Hyun Jeon received his B.S. degree from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2022, where he is currently pursuing the master's degree with the Department of Electronics and Computer Engineering. He participates in GNSS development research projects and 3GPP standard patent. His research interests include Near-field communication localization research and reinforcement learning based beam tracking.

Jeonghang Lee received his B.S. degree from Chungnam National University in 2019. He is currently pursuing master's degree at the Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include, but are not limited to, GNSS Signal Modulation and Positioning.

Jeongwan Kang received the B.S. degree in electronic engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 2017, where he is currently pursuing the combined master's and Ph.D. degree with the Department of Electronics and Computer Engineering. His current research interests include millimeter-wave communi-cations, beam management, MIMO systems, and 5G and B5G communications.

Sunwoo Kim received his B.S degree from Hanyang University, Seoul, Korea in 1999, and his Ph.D. degree, in 2005, from the Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara. Since 2005, he has been working in the Department of Electronic Engineering at Hanyang University, Seoul, Korea, where he is currently a professor. He was also the director of the 5G/Unmanned Vehicle Research Center, funded by the Ministry of Science and ICT of Korea. He was a visiting scholar to the

Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology from 2018 to 2019. He is an Associate Editor of IEEE Transactions on Vehicular Technology and a senior member of the IEEE. His research interests include wireless communication/positioning/localization, statistical signal processing.

Jung-Min Joo received Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. His research interests include GNSS, SBAS, GBAS, and Ionosphere monitoring.