

위성 기반 항법 시스템 기술 동향

2020년 현재, 한국항공우주연구원을 중심으로 국내 관련 연구기관에서는 2034년 이후 활용을 목표로 KPS (Korean Positioning System)의 구조, 서비스, 응용 분야에 대한 기획연구를 수행하고 있다. 한국항공우주연구원에서 발표한 KPS 개발 계획에 따르면, KPS는 3기의 정지 항법 위성과 4기의 경사 항법 위성, 이상 7기의 위성체를 중심으로 이를 관제하는 지상 관측국과 제어국, 그리고 사용자 측위 단말로 구성될 예정이다. KPS의 구현과 운용은 해외 체계에 의존하지 않고, 안정적으로 전국에 항법해를 제공함으로써 안정적 국토 관리와 자주국방역량 강화는 물론 자율주행차와 드론 산업 등 4차 산업 혁명을 가속화 할 것으로 기대된다. 본 기술논문에서는 미국, 러시아, 유럽연합, 중국의 위성 기반 범역 항법 시스템 기술의 최근 개발 및 운용 동향을 살펴본다.

유승수, 이준형, 김선용 (건국대학교 전기전자공학부)

I. 서론

GSA (European Global Navigation Satellite System Agency)에서 발표한 2019년 GNSS (Global Navigation Satellite System) 시장 보고서 [1]에 따르면 주요 대륙별 GNSS 시장 규모는 그림 1과 같다. 2019년 현재 출시된 GNSS 관련 제품군은 약 64억 개이며, 약 1,507억 유로 정도로 전 세계 인구 당 0.8개의 GNSS 제품을 활용할 수 있는 규모이다. 이는 2029년에는 약 95억 개, 약 3,244억 유로, 전 세계 인구 당 1.1개 규모로 크게 확대될 예정이다.

2020년 현재, 지구 전역 어디서나 항상 활용할 수 있는 위성 기반 항법 시스템인 GNSS는 미국의 GPS (Global Positioning System), 러시아의 GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System), 유럽연합의 Galileo 시스템, 중국의 BDS (Bei-Dou navigation satellite System), 이상 4개의 체계가 개발 및 운용되고 있다. 또한, 일부 권역에서 항상 활용할 수 있는 위성 기반 항법 시스템인 RNSS (Regional Navigation Satellite System)는 인도의 IRNSS/NAVIC (Indian Regional Navigation Satellite System with operational name of NAVigation with Indian Constellation), 일본의 QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), 이상 2개의 체계가 개발 및 운용되고 있다[2].

그림 1에서 확인할 수 있는 것처럼 주요 대륙별 시장 규모에서 절반 이상을 차지하고 있는 권역은 아시아-태평양 (Asia-Pacific) 권역이다. 우리나라가 포함된 이 권역은 다른 권역에 비해 인구수와 밀도가 상당히 높고, 경제 및 군사 분야에서 전 세계적 영향력이 급속히 증대되고 있는 권역이다[1,2]. 2018년 명목 GDP (nominal Gross Domestic Product) 기준 경제 규모에 따르면 1위는 미국으로 미화 약 21.44조 달러, 2위는 중국으로 미화 약 21.31조 달러, 3위는 일본으로 미화 약 5.75조 달러, 5위는 인도로 미화 약 2.94조 달러, 11위는 러시아로 미화 약 1.64조 달러, 12위는 우리나라로 미화 약 1.63조 달러이다[3]. 2020년 GFP (Global Fire Power)의 50개 개별 지표 평가에 따른 군사력 지수(PwrIndx, Power-Index)를 기준으로 1위는 미국으로 PwrIndx 0.0606, 2위는 러시아로 PwrIndx 0.0681, 3위는 중국으로 PwrIndx 0.0691, 4위는 인도로 PwrIndx 0.0953, 5위는 일본으로 PwrIndx 0.1501, 6위는 우리나라로 PwrIndx 0.1509이다[4]. 우리나라를 둘러싼 미국, 일본, 러시아, 중국, 그리고 인도는 모두 높은 군사 및 경제적 필요에 따라 GNSS 또는 RNSS를 개발 및 운용하고 있다. 강대국에 둘러싸인 우리나라의 군사 및 경제적 조건에 따라 자체 GNSS/RNSS 개발 및 운용은 선택의 문제를 지나 언제 구현 및 운용하느냐의 문제가 되었으며, 지난 2018년 우리나라

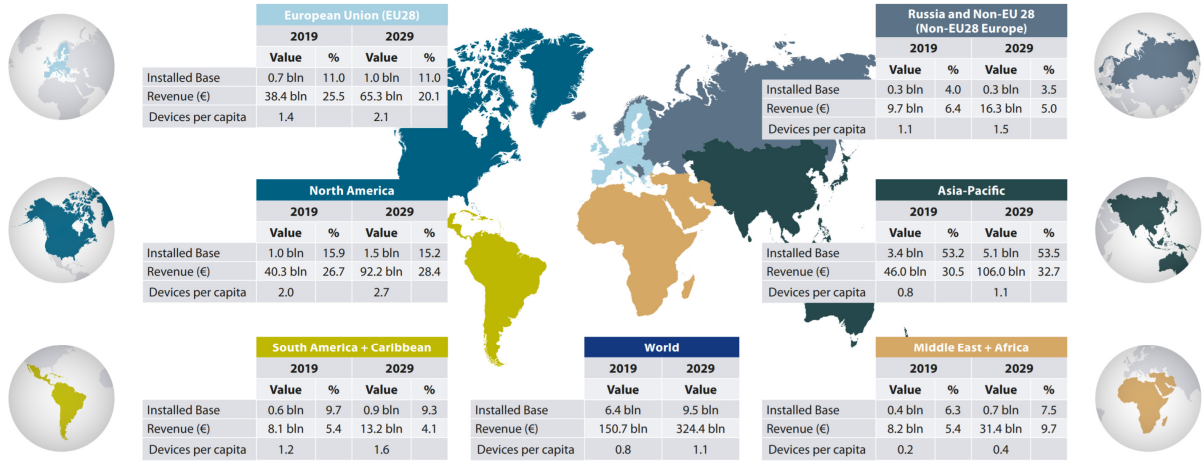


그림 1. 주요 대륙별 GNSS 시장 규모[1].

도 KPS (Korean Positioning System)의 개발 계획을 발표하고, 2020년 현재 한국항공우주연구원을 중심으로 관련 연구기관에서 체계 개발을 위한 기획연구를 진행하고 있다[5-7].

계획과 같이 KPS 개발이 진행된다면 우리나라는 2034년 이후 7번째 GNSS/RNSS 개발 및 운용국이 될 것으로 예상된다. 본 기술논문에서는 서론에 이어 2장에서는 항법 시스템에 대해 간단히 살펴본다. 이후 3장에서는 현재 개발 및 운용 중인 GNSS인 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo 시스템, 중국의 BDS의 개발 및 운용 현황을 살펴본다. 끝으로 4장에서는 개발 및 운용 중인 GNSS의 특징을 요약하고, 맺는다.

II. 항법 체계

대표적인 검색 사이트인 구글에서 항법(navigation)이란 단어를 검색해보면 그림 2와 같은 검색 결과 창이 나타난다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼 항법이란 한 위치(starting point)에서 다른 위치(destination)로 도착하기 위한 방향들(directions)을 얻는 방법이다. 사전에서 항법의 정의를 찾아보면 ‘항법이

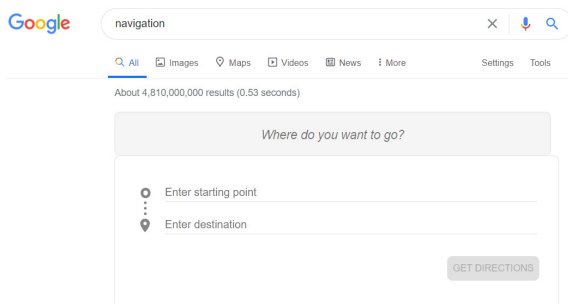


그림 2. 구글에서 'navigation'을 검색한 결과 창.

란 이동할 수 있는 물체를 출발지에서 목적지까지 안전하고, 가능하면 빠르게 도착할 수 있도록 하기 위한 지식과 기술, 방법 등을 말한다.’와 같은 정의를 확인할 수 있다. GNSS가 널리 쓰이는 지금도 항법이란 용어가 전문용어처럼 느껴지는 경우가 대부분이지만 항법이란 인류의 역사 속에서 생존을 위해 꼭 필요한 기술로 여겨졌으며, 과거로부터 지금까지, 그리고 미래에도 계속 새롭고 편리한 정확도가 높은 항법 기술이 개발되고 사용될 것으로 예상된다[8].

항법의 정의에서 확인할 수 있는 것처럼 항법의 가장 중요한 요소는 위치와 이동이다. 지구상에서 위치 특정 정보는 위도(latitude), 경도(longitude), 고도(altitude)이며, 위치 이동을 위한 노력 또는 가능성 판단을 위해 시각 정보가 꼭 필요하다. 일반적으로 항법을 위한 중요한 정보를 항법해(solution of navigation)라고 부르며, 이는 PVT (Position, Velocity, and Time) 정보로 정리할 수 있다[8].

항법 시스템은 기술적 전파 활용을 기준으로 전통적 항법 시스템과 전파 항법 시스템으로 구별할 수 있다. 전통적 항법 시스템은 지문 항법, 천측 항법, 추측 항법으로 구별할 수 있다. 지문 항법은 기억하는 지형지물을 활용해 위치를 특정하고, 위치 사이를 이동하는 항법으로서 좁은 영역에서 정확한 항법 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다. 그러나 해당 지역에 대한 정확한 사전 정보가 필요하다. 지문 항법은 마치 원시적인 방법처럼 여겨져 지금은 사용되지 않을 것 같지만 최신 고정밀 미사일의 최종 항법 체계로 현재도 그리고 미래에도 활용될 것으로 예상된다. 천측 항법은 태양과 달, 그리고 별자리 등 천체 운동의 규칙성을 바탕으로 현재 위치를 추측하고, 목적지를 예측해 방향을 결정하고, 이동하는 항법으로서 천체 운동

의 규칙성을 바탕으로 해서 정확한 시각 정보가 꼭 필요하다. 천측 항법은 날씨가 좋은 때에는 언제 어디서나 넓은 영역에서 활용 가능한 항법이다. 하지만 지문 및 천측 항법은 모두 안개, 구름 등으로 시야가 가려지는 경우 항법 정확도가 크게 낮아진다. 추측 항법은 가속계 및 Gyroscope 등 역학계 지식을 활용한 항법으로써 지문 및 천측 항법과 비교해 주변 정보 획득 없이 독자 항법이 가능하다. 추측 항법은 역학계 가운데 관성을 이용하기 때문에 관성 항법으로도 부르며, 전자회로를 바탕으로 한 정확도 높은 관성 센서가 개발되면서 계속 활용되고 있는 항법이다. 추측 항법은 직전 항법해와 관성 센서의 현재 측정값을 바탕으로 항법해를 도출하기 때문에 직전 항법해 또는 관성 센서의 측정값에 오차가 발생한 경우 이 오차가 계속 누적되어 정확도가 크게 떨어지는 단점을 갖고 있다[8].

음파/전파 항법 시스템은 여러 음파(acoustic wave) 또는 전파 원(electromagnetic wave source)의 전파 지연(propagation delay)을 측정해 위치를 특정하는 항법 시스템이다. 음파 항법의 가장 기본적인 실험은 직접 바로 진행할 수 있다. 훈련에 따라 정확도가 다르긴 하지만 한 사람이 눈을 감은 상태에서 다른 위치의 다른 한 사람이 소리를 내면 눈을 감은 사람은 소리의 대략적인 방향을 추측할 수 있다. 이와 같은 원리로 음파를 이용한 대표적인 방향 탐지 시스템은 수중음향탐지기(sonar)다. 전파 항법 시스템의 가장 간단한 형태는 Speed Gun이라고 부르는 속도 측정기이다. 물론 이 속도 측정기는 위치를 파악하는 것은 아니며, 특정 물체까지의 거리 또는 거리의 순간 이동, 즉 속도를 파악하는 장치이다. 이 속도 측정기를 아는 서로 다른 여러 위치에 배치하고, 동시에 같은 물체까지의 거리를 측정할 수 있다. 등대 및 항구 주변과 선박의 라디오 전파 송수신을 통한 선박 항법 시스템인 LORAN-C, 지상의 다수 레이더파를 활용한 레이더 항법, 그리고 본 기술논문에서 소개하는 GNSS/RNSS가 대표적인 전파 항법 시스템이다. 음파/전파 항법 시스템의 신호인 음파와 전파는 매질에 따른 전파 속도와 특성에는 다소 차이가 있으나 측위 원리는 같다. 음파 또는 전파를 이용한 측위 원리는 그림 3과 같다.

그림 3에서는 실선으로 표시된 세 개의 원이 있으며, 각 원의 원점에는 정확한 위치를 아는 송신기-그림 3에서는 위성의 이미지로 표현-가 있다. 아는 위치의 송신기에서 동시에 또는 구별 가능한 신호를 전 방향으로 방사한다면 평면상에서 전파는 각 송신기를 원점으로 원형으로 전파된다. 이때, 수신기는 각 송신기의 신호를 서로 거리가 가까운 신호부터 먼 신호까지 순서대로 수신하며, 이 거리 r_n , $n = 1, 2, 3$ 과 세

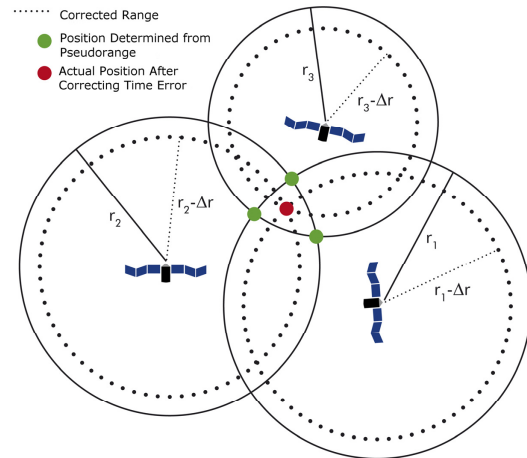


그림 3. 음파 또는 전파를 이용한 측위 원리[10].

송신기의 위치를 바탕으로 그림 3의 적색 점과 같은 교점을 수신기의 위치로 결정한다. 이때, 중요한 것은 각 송신기는 정확히 같은 시간에 서로 구별 가능한 신호를 송신해야 한다. 만약 각 송신기와 수신기의 시간 동기화가 어긋나면 그림 3의 Δr 과 같이 거리 측정에 오차가 발생하며, 이로 인해 세 녹색 점과 같이 수신기의 후보 위치만 얻을 수 있다.

위성 기반 항법 체계도 이상과 같은 측위 원리를 사용한다. 이어 기술하는 3장에서는 현재 개발 및 운용 중인 위성 기반 항법 시스템을 살펴본다. 이때, 앞서 설명한 것처럼 각 송신기에 해당하는 측위 위성이 ‘어떻게 정확히 같은 시간’에 ‘서로 구별 가능한 신호’를 송신하는지 유의해서 이해하는 것이 중요하다.

III. 범역 위성 기반 항법 시스템

GNSS는 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo 시스템, 중국의 BDS가 개발 및 운용되고 있다. RNSS를 포함해 GNSS의 신호와 대역을 정리하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 각 대역의 중심주파수를 중심으로 단일 Sinc 함수 모양의 스펙트럼은 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조된 신호이며, 중심주파수를 중심으로 좌우 대칭형으로 경계 대역으로 나누어진 스펙트럼은 [12]에서 제안한 BOC (Binary Offset Carrier) 변조된 신호이다. BPSK 신호와 BOC 신호 모두 기본 부호화율(spreading code rate)은 1.023 MHz이며, 이를 기준으로 특정 배수의 주파수로 변조한다. 그림 4에서 ‘BPSK(10)’은 기본 부호화율의 10배가 되는 주파수로 BPSK 변조한 신호라는 의미이며, BOC(5, 2.5)는 기본 주파수의 2.5배가 되는 주파

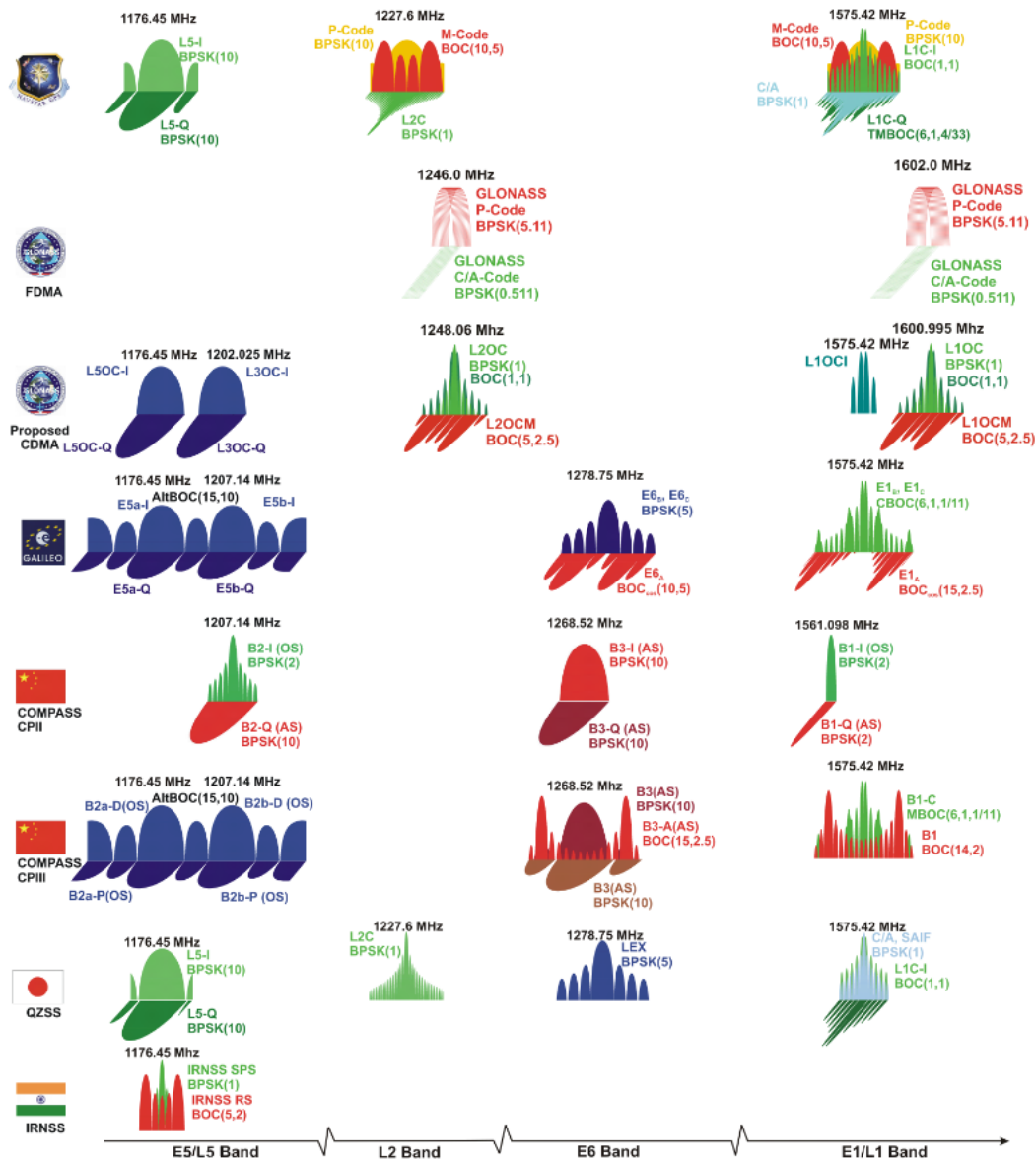


그림 4. GNSS/RNSS의 대역별 신호들[11].

수로 BPSK 변조한 후 기본 주파수의 5배가 되는 주파수로 BOC 변조한 신호라는 의미이다. ‘I’는 동위상(In-phase) 채널, ‘Q’는 직교위상(Quadrature) 채널을 각각 의미한다. 그림 4에서 특별히 구별하지 않은 신호들은 모두 다중접속 방식으로 CDMA (Code Division Multiple Access) 방식을 사용한다. 지금 설명하지 않은 그림 4의 세부 의미는 이후 해당 시스템에 대한 각 절에서 자세히 설명한다.

1. 미국의 GPS

GNSS 가운데 가장 널리 사용되고 있는 시스템은 미국의

GPS이다. 미국 우주군(US Space Force)에서 운용하고 있으며, 정식 명칭은 NAVSTAR GPS이다. 1973년 미국 DoD (Department of Defense)가 주도해 연구개발을 시작했으며, 1978년 첫째 시험 위성을 궤도에 발사했고, 1993년 24개의 위성을 계획한 궤도에 모두 위치시킨 후 시험 운용을 거쳐 1995년 FOC (Full Operational Capability)를 선언했다. GPS의 초기 개발 및 운용 목적은 냉전 시대에 대륙간 탄도미사일의 항법 유도였으나 FOC 선언 전인 1983년 대한항공 007기가 기체 내 관성 항법장치의 오류로 구조선 현 러시아의 사할린 영공을 침범한 것으로 오인되어 피격되어 대한항공 007기에 탑승

한 269명 전원 사망한 대한항공 007기 피격 사건이 있었다. 이후 미국 정부는 항공기의 안전한 항행을 위해 GPS L1 대역에서 보조 신호로 사용하던 C/A (Coarse/Acquisition) 신호를 민간에 일부 공개하고, 활용하도록 하였으며, 이후 2000년 의도적 오차 요소인 SA (Selective Availability) 신호를 GPS 신호에서 비활성화시켜 지금까지 이를 계속 유지하고 있다. 하지만 민간용 신호의 이름인 GPS L1 C/A 신호의 이름 자체에서도 쉽게 알 수 있는 것처럼 해당 신호는 대략적인 획득을 위한 신호로 설계된 신호로서 GPS L1 C/A 신호의 정확도가 너무 낮았다. 미국 정부도 이를 충분히 인지하고 있었으며, 이를 바탕으로 2000년대부터 GPS 현대화(modernization) 프로젝트를 진행하였다[2].

그림 4의 가장 위쪽에 정리된 대역별 신호는 미국의 NAVSTAR GPS에서 사용하는 신호들이다. 최신 GPS ICD (Interface Control Documents)는 [13]에서 확인할 수 있다. 그림 4의 GPS 신호들을 다시 정리하면 표 1과 같다.

표 1에서 L1/L2 P(Y) 신호, L1 C/A 신호, L2C 신호는 [14]에 정리되어 있다. L5 SoL (Safety of Life) 신호는 [15]에 정리되어 있다. L1C 신호는 [16]에 정리되어 있다. L3 대역의 NUDET/NDS (NUclear DETonation/NU Detection System) 신호는 군사용 신호로서 세부 사양이 공개되어 있지 않다.

표 1에서 P(Y) 신호는 P(Precision) 코드(code)에 암호화된 W 코드를 곱해 생성한다. P(Y) 신호는 BPSK(10) 변조된 신호이다. P 코드의 SV ID (Satellite Vehicle IDentification)는 1부터 37, 그리고 65부터 69이며, 칩 율(chipping rate)은 10.23Mbps이고 주기는 7일이다. 7일 주기의 P 코드는 15,353,000 칩(chip) 길이의 X1 코드와 15,345,037 칩 길이의 X2 코드를 상호 배타적 OR (exclusive-OR) 연산을 취해 생성한다. 이때, X2 코드의 지연을 1부터 37 칩까지 선택적으로 생성해 SV ID에 따른 적절한

P 코드를 생성한다[14]. 이전 버전의 문서에서는 GPS PRN (Pseudo-Random Noise) 신호 번호 33번부터 37번은 다른 용도로 사용했으나 최근 [14] 버전과 같이 개정되었다. 상위 SV ID인 GPS PRN 번호 35와 36, 그리고 38부터 63은 P(Y) 코드의 초기 Almanac 정보에 활용된다. GPS의 항법 데이터는 주요 내용은 Almanac 정보와 Ephemeris 정보가 있으며, Almanac 정보에는 모든 위성에 대한 위치 및 보정 정보가 포함되어 있으며, Ephemeris에는 해당 SV ID 위성의 정밀한 위치와 보정 정보가 포함되어 있다. GPS 현대화에 따라 확장된 P 코드가 GPS III부터 적용되었다. 26 P 코드의 확장 세트는 하루 치 코드 합산으로 37개 다른 코드를 26 순환 자리 이동(circularly shifting)을 통해 확장 생성한다. P(Y) 신호는 L1과 L2 대역을 통해 모두 전송하기 때문에 이온층과 대류권에 의한 오차를 서로 상쇄할 수 있어 더욱 정확한 측위해를 얻을 수 있다. 항법 데이터는 NAV (NAVigation) 데이터를 사용한다.

표 1에서 C/A 신호는 BPSK(1) 변조된 신호로서, 1,023 Kbps의 칩 율을 갖는 Gold 부호인 G1과 G2 신호를 상호 배타적 OR 연산을 취해 생성한다. 이때, G2 코드의 지연을 조절해 SV ID 1부터 32, 그리고 65부터 69에 맞는 신호를 생성한다. C/A 신호의 원래 설계 당시 목적은 당시 신호 처리 기술과 컴퓨터 연산 능력의 한계로 인해 7일 길이의 P(Y) 코드를 직접 획득(direct acquisition)할 수 없어 P 코드의 X1 코드와 Gold 코드의 동기를 정확히 맞춰 발생 및 송신한 후 먼저 C/A 신호 획득을 진행해 초기 추적 정보를 얻고, 이를 활용해 P(Y) 신호를 추적하는 순서로 신호 처리를 진행했다. P(Y) 신호와 마찬가지로 C/A 신호도 상위 SV ID인 GPS PRN 번호 35와 36, 그리고 38부터 63은 P(Y) 코드의 초기 Almanac 정보에 활용된다. GPS III부터는 G2 코드의 지연과 초기 G2 설정에 따른 확장된 C/A 신호를 추가 할당해 활용한다. 표 1처럼 C/A 신호는 GPS L1 대역을 통해 송출되며, 현재 가장 많은 GNSS 신호에서 활용되는 신호이다. 이 신호는 대역과 함께 GPS L1 C/A 신호로도 부른다. 항법 데이터는 NAV 데이터를 사용한다.

표 1에서 L2C (Civil in L2 Band) 신호는 BPSK(1) 변조된 신호로서, GPS L1 C/A 신호 이후 설계된 민간용 측위 신호이다. L2 CM (Civil Moderate in L2 Band) 부호와 L2 CL (Civil Long in L2 Band) 부호를 상호 배타적 OR 연산을 취해 생성한다. L2 CM 부호와 L2 CL 부호 모두, 부호율은 511.5 Kbps이며, L2 CM 부호는 주기 20 ms이고, 길이는 10,230 칩, L2 CL 부호는 주기 1.5 s이고, 길이는 767,250 칩으로 각각 구성되어 있다. L2 CM과 L2 CL 부호 모두 P 코드의 X1 주기에 동기되어 있다. 특히, L2 CM 부호는 칩은 GPS 시스템의 주 단위 시작과 끝에 동기되어

표 1. GPS의 주파수별 신호들 [4], [11], [13-16]

대역	주파수 [MHz]	신호, 변조 방식, 활용	
		군용	민간용
L1	1575.42	P(Y), BPSK(10) M, BOC(10,5)	L1 C/A, BPSK(1) L1C Data: BOC(1,1) Pilot: TMBOC(6,1,4/33)
L2	1227.60	P(Y), BPSK(10) M, BOC(10,5)	- L2C 신호, BPSK(1)
L3	1381.05	NUDET NDS	-
L4	1379.91	추가적인 전리층 보정치 관측	
L5	1176.45	-	SoL신호, BPSK(10)

있다. L2 CM 신호는 Block IIR-M, Block IIF, 그리고 이후 GPS 위성에서 송신하며, 50 bps, 부호율 1/2의 길쌈(convolution) 부호화된 FEC (Forward Error Correct) 부호를 사용하는 CNAV (Civil-NAV) 데이터틀 항법 데이터로 사용한다. L2 CL 신호는 긴 주기 비동기 적산(non-coherent integration) 등을 위한 파일럿(pilot) 신호로 활용한다.

표 1에서 L1C (Civil in L1 Band) 신호는 가장 최근 설계한 민간용 측위 신호이며, I 채널 신호는 NAV 또는 CNAV 신호를 포함한 데이터 채널로서 BOC(1,1) 변조된 신호이며, Q 채널 신호는 TMBOC(6,1,3/44) 변조된 파일럿 신호이다. TMBOC (Time-Multiplexing BOC) 신호는 MBOC (Multiplexing BOC) 신호 가운데 정해진 시간 슬롯(slot)에 각기 다른 BOC 신호를 정의해 다중화한 신호이다. TMBOC(6, 1, 4/33) 신호는 BOC(6,1) 신호의 전력 4/33을 0번부터 32번 시간 슬롯 가운데 0, 4, 6, 29번 슬롯에 각각 배치하고, BOC(1,1) 신호의 전력 29/33를 0번부터 32번 시간 슬롯 가운데 나머지 슬롯에 각각 배치한 신호이다. L1C 신호는 1.023 Mbps의 칩율을 가지며, 10,230 칩 길이를 갖는 Truncated Weil 코드를 사용한다. 항법 데이터는 NAV와 CNAV, CNAV-2 데이터를 모두 사용할 수 있다. C-NAV2 데이터는 가장 최신 항법 데이터로서 주요 데이터를 생성 다항식 (generation polynomial) 8진수 763인 BCH (51, 8) 부호, 24비트 길이의 CRC (Cyclic Redundancy Check) 부호, 그리고 [17]에서 제안한 부호율 1/2인 LDPC (Low Density Parity Check) 부호를 데이터 보호를 위한 FEC 기법으로 사용한다. 다양한 FEC를 사용함으로써 다른 항법 데이터와 비교해 오류 검출 및 정정 능력이 크게 향상된 항법 데이터이다. 이 신호는 Block III GPS SV (Satellite Vehicle)부터 송신한다.

표 1에서 L5 SoL (Safety of Life in L5 band) 신호는 BPSK(10) 변조된 민간용 신호로서 구조 탐색을 위한 공공용 신호이다. 8,190 칩 길이의 XA 신호와 SV 별로 할당된 8,191 칩 길이의 XB 신호를 10,230 칩 길이마다 동기를 맞춰 발생 및 상호 배타적 OR 연산을 취해 생성한다. 항법 데이터로 CNAV 데이터를 사용한다. GPS Block IIF와 Block II SV에서 송신한다.

2020년 8월 현재, 운용 중인 GPS SV의 상태는 [18]처럼 미국 DHS (Department of Homeland Security)에서 운용하는 Navigation Center 홈페이지에서 확인할 수 있다. [18]에 공개된 2020년 8월 27일 GPS SV 상태는 표 2와 같다. 표 2처럼 GPS SV의 궤도(plane)는 지상 약 20,180 Km 상공의 MEO (Medium Earth Orbit)에 A, B, C, D, E, F, 총 6개이며, 궤도별 최대 6개의 SV 슬롯(slot)이 있어 최대 32개의 위성이 궤도 위에 위치할 수 있다. 각 궤도

표 2. GPS SV 상태, 2020년 8월 27일 기준

Plane	Slot	SVN	PRN	Block Type	Clock	Outage Date
A	1	65	24	IIF	CS	
A	2	52	31	IIR-M	RB	
A	3	64	30	IIF	RB	
A	4	48	7	IIR-M	RB	
A	6	74	4	III	RB	13 JAN 2020
B	1	56	16	IIR	RB	
B	2	62	25	IIF	RB	
B	3	44	28	IIR	RB	
B	4	58	12	IIR-M	RB	
B	5	71	26	IIF	RB	
C	1	57	29	IIR-M	RB	
C	2	66	27	IIF	RB	
C	3	72	8	IIF	CS	
C	4	53	17	IIR-M	RB	
C	5	59	19	IIR	RB	
D	1	61	2	IIR	RB	
D	2	63	1	IIF	RB	
D	3	45	21	IIR	RB	
D	4	67	6	IIF	RB	
D	5	46	11	IIR	RB	
D	6	75	18	III	RB	01 APR 2020
E	1	69	3	IIF	RB	
E	2	73	10	IIF	RB	
E	3	50	5	IIR-M	RB	
E	4	51	20	IIR	RB	
E	6	47	22	IIR	RB	
F	1	70	32	IIF	RB	
F	2	55	15	IIR-M	RB	
F	3	68	9	IIF	RB	
F	5	41	14	IIR	RB	
F	6	43	13	IIR	RB	21 AUG 2020

의 승교점(ascending node)은 60도씩 떨어져 있으며, 적도 면과 궤도면의 경사각(inclination angle)은 55도이다. ‘SVN’은 ‘SV Number’, ‘PRN’은 Pseudo-Random Noise 신호의 번호를 의미한다. GPS SV는 최초 Block I을 시작으로 Block II, Block IIA, Block IIR, Block IIR-M, Block IIF, Block IIIA, Block IIIF로 개량되어가고 있다. Block I/II/IIA는 모두 수명이 완료되어 폐기되었으며, 2020년 8월 27일 현재에는 표 2처럼 총 31기의 궤도 위 SV는 Block IIR 10기, Block IIR-M 7기, Block IIF 12기, Block III 2기이다. GPS SV를 포함한 모든 GNSS SV는 정확한 시각 정보 생성 및 동기 유지가 필요하다. GPS SV는 동기 유지를 위해 원자시계(atomic clock)를 탑재하고 있으며, 표 2에서 ‘CS’는 세슘(cesium, 원자기호 Cs) 원자시계, ‘RB’는 루비듐(rubidium, 원자기호 Rb) 원자시계를 탑재하고 있음을 의미한다. 표 2의 ‘Block Type’과 ‘Clock’ 비교를 통해 확인할 수 있는 것처럼 최신 SV들은 루비듐 원자시계를 탑재하고 있다. 세슘 원자시계는 세슘

-113을 활용한 원자시계로서 SI (International System of Unit) 단위계의 시간 단위인 초를 정의하기 위해 사용되었으며, 현재에도 표준시간 정보 생성을 위해 계속 사용하고 있다. 그러나, 세슘 원자시계와 비교해 루비듐 원자시계가 저비용, 소형이며, 단기 안정성이 높아서 위성체에 탑재하기 수월하다. 우리나라는 세계 아홉 번째 원자시계 자체 개발 및 보유국으로 한국표준과학연구원에서 2008년 개발한 광 펌핑(light pumping)을 활용한 세슘 원자시계 KRISS-1을 개발 및 운용하고 있다. KRISS-1은 일반 세슘원자시계보다 10배 이상 높은 정확도를 갖고 있다 [19]. 2기의 Block III SV는 궤도 위에 위치 후 시험을 진행 중이며, SVN 43은 2020년 8월 21일 교체를 위해 신호 송출을 중지하고, 궤도 조정 중이다.

GPS는 GNSS 가운데 가장 먼저 개발 및 운용을 시작했으며, FOC 선언 후 지금까지 계속 정상 운용되고 있다. 2020년 현재, 오차는 약 5 - 0.3 m이다. 또한, 한국과 미국의 군사 및 민간 분야 우호 협력에 따라 이후에도 각종 무기체계 및 사회 기간망, 그리고 다양한 민간 분야 장치에도 계속 활용될 것으로 예상된다.

2. 러시아의 GLONASS

GPS와 GLONASS는 미소 냉전의 산물이다. 1973년 GPS의 개발에 뒤이어 1976년 구소련에서 체계 개발을 시작했다. 1982년부터 1995년까지 설계한 궤도에 GLONASS SV를 위치시키고, FOC를 선언했으나 구소련의 붕괴로 인한 정치경제 혼란으로 인해 정상 운용되지 않다가 GPS의 활용성이 높아지고, 동시에 러시아의 정치경제 상황이 호전되면서 2011년 10월, FOC를 다시 선언하였다[4].

그림 4의 둘째와 셋째 행처럼 GLONASS는 FDMA (Frequency Division Multiple Access)와 CDMA 방식의 신호를 모두 사용한다. GLONASS의 주파수별 신호들은 표 3과 같다.

표 3처럼 GLONASS 신호는 FDMA 신호와 CDMA 신호를 송신한다. FDMA 신호는 표준 정밀도(standard-precision)를 갖는 L1OF 신호 (FDMA Open service signal in L1 Band) 와 고정정밀도(high-precision)를 갖는 L1SF 신호(FDMA Secured service signal in L1 Band)이다. L1 대역의 FDMA 신호의 중심주파수는 $(1602 + n \times 0.5625)$ MHz이며, 여기서, $n = 0, \dots, 13$ 을 최초로 사용했으나 다른 신호와 간섭을 줄이기 위해 $n = -7, -6, \dots, 0, \dots, 6$ 로 수정해 현재 사용하고 있다. L2 대역의 FDMA 신호의 중심주파수는 $(1246 + n \times 0.4375)$ MHz이며, n 은 L1과 같이 사용하고 있다. [23]처럼 최초에는 L1OF 신호

표 3. GLONASS의 주파수별 신호들[4], [20-23]

대역	주파수 [MHz]	신호, 변조 방식, 활용	
		군용	민간용
FDMA 방식			
L1	1602 + n×0.5625	L1SF, BPSK(5.11)	L1OF, BPSK(0.511)
L2	1246 + n×0.4375	L2SF, BPSK(5.11)	L2OF, BPSK(0.511)
CDMA 방식			
L1	1575.42	-	L1OCM, BOC(1,1)
	1600.995	L1SC, BOC(5, 2.5)	L1OC Data: BPSK(1) Pilot: BOC(1,1)
L2	1227.60	L2SC	L2OC, BPSK(1)/BOC(1,1)
L3	1207.14	-	L3OCM, BPSK(10)
L5	1176.45	-	L5OCM, BPSK(10)

만 설계 및 사용했으나 GNSS의 시장이 확대되면서 2003년부터 운용한 GLONASS-M SV부터는 L1OF와 중심주파수와 나머지 신호 사양은 모두 같은 L2OF 신호를 추가로 정의 및 사용하고 있다. L1OF와 L2OF 신호는 모두 BPSK(0.511) 변조된 511 Kbps의 확산 신호를 사용하며, 50 bps의 항법 데이터와 100 bps의 사행(meander) 부호인 Manchester 코드를 상호 배타적 OR 연산을 취해 생성한다.

2008년부터 GNSS의 상호 운용성을 향상하기 위해 표 3의 CDMA 방식을 사용하는 신호가 설계 및 운용되고 있다. [22]와 [23]처럼 CDMA 신호는 개방형 L1OC, L2OC, L3OC 신호, 이상 3개 신호와 제한된 L1SC와 L2SC 신호, 이상 2개 신호, 총 5개 신호가 설계 및 운용되고 있다. L1OC 신호와 L1SC 신호의 중심주파수는 1600.995 MHz이며, L2OC와 L2SC 신호의 중심주파수는 1248.06 MHz이다. L1OC 신호와 L2OC 신호는 TDMA (Time Division Multiple Access) 방식으로 데이터와 파일럿 신호를 전송하며, 데이터는 BPSK(1) 변조, 파일럿은 BOC(1,1) 변조를 사용하며, L1SC와 L2SC 신호는 데이터와 파일럿 신호 모두 BOC(5, 2.5) 변조를 사용한다. L1OC 신호의 항법 데이터는 100 bps로 전송되며, 한 ‘String’의 길이는 250비트이며, 길이는 2.5 s이다. ‘Pseudo-frame’의 길이는 1,500비트이며, 길이는 15 s이다. ‘Super-frame’의 길이는 12,000비트이며, 길이는 120 s이다. L2OC 신호는 별도의 항법 데이터를 전송하지 않으며, PRN 신호만 전송한다.

L3OC 신호의 중심주파수는 1202.025 MHz이며, 데이터 및 파일럿 채널 모두 BPSK(10) 변조된 신호이다. 확산 코드율은

1.023 Mcps이며, 항법 데이터는 5비트 Barker 부호화된 신호를 사용한다. GPS 파일럿 신호와 다르게 파일럿 신호 또한 10비트 Neumann-Hoffman 코드로 부호화한다. 항법 메시지는 100 bps로 전송되며, 'String'의 길이는 300비트이고, 길이는 3 s이다. 'Pseudo-frame'은 6개의 'String'을 묶어 1,800비트이고, 길이는 18 s이다. 'Super-frame'은 8개의 'Pseudo-frame'을 묶어 14,400비트이고, 길이는 144 s이다.

L1OCM, L3OCM, L5OCM 신호(CDMA Open Modernized signal in L1, L3 and L5 bands)는 모두 다른 GNSS와 상호 운용성을 고려해 설계한 신호이다. L1OCM 신호는 GPS L1C, Galileo E1 BDS B1C 신호와 상호 운용성을 고려해 중심주파수 1575.42 MHz에 설계한 BOC(1,1) 변조된 신호이다. L3OCM 신호는 Galileo E5b 신호와 BDS B2b 신호와의 상호 운용성을 고려한 신호로써 중심주파수 1207.14 MHz에서 BPSK(10) 변조된 신호이다. L5OCM 신호는 GPS L5 SoL 신호와 Galileo E5a 신호, 그리고 BDS의 B2a 신호와 상호 운용성을 고려한 신호로써 중심주파수 1176.45 MHz에서 BPSK(10) 변조된 신호이다.

2020년 8월 현재, 운용 중인 GLONASS SV의 상태는 [24]처럼 러시아 IAC (Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing)에서 운용하는 홈페이지에서 확인할 수 있다. [24]에 공개된 2020년 8월 28일 GLONASS SV 상태는 표 4와 같다.

표 4에서 'Orbit slot'은 GLONASS FOC 확보를 위해 설계한 24개 GLONASS SV에 대한 정보이며, 표 4와 같이 유지 보수를 위해 중복된 번호를 갖는 위성들이 있다. 'Orbit slot'에서 확인할 수 있는 것처럼 GPS와 다르게 GLONASS는 지상 약 19,130 km 상공에 총 3개의 MEO 궤도에 궤도 별 약 8개 내외의 GLONASS SV를 배치 및 운용하고 있다. 2020년 8월 현재, 총 27개의 위성을 발사해 운용하고 있으며, 이 가운데 표 4처럼 2개의 위성은 유지 보수 중이고, 1개의 위성은 예비 위성으로 운용 중이며, 1개의 위성은 비행 점검 중이다. 궤도별로는 1번 궤도에 8개, 2번 궤도에 9개, 그리고 3번 궤도에 10개 위성을 각각 운용하고 있다. 'GLONASS Number'는 일반적으로 GLONASS SV 발사 순서에 따라 711번을 시작으로 연번으로 붙여졌으며, 해당 번호의 GLONASS SV가 교체된 경우 등 특별한 경우 711번 이후 순서와 어긋난 번호를 사용하기도 한다. 가장 최근에 발사한 위성은 'GLONASS Number' 760번 위성으로 3번 궤도에서 'RF Channel' 02번으로 FDMA 신호를 송출하고 있다. 이 위성은 2020년 3월에 Soyuz-2.1b Fregat-M 발사체에 실려 궤도로 발사된 바 있다[24].

표 4. GLONASS SV 상태, 2020년 8월 28일 기준[24, 25]

Orbit Slot	Orbit Plane	RF Channel	GLONASS Number	SV Type	Status
1	1	01	730	M	In operation
2	1	-4	747	M	In operation
3	1	05	744	M	In operation
4	1	06	759	M	Maintenance
5	1	01	756	M	In operation
6	1	-4	733	M	In operation
7	1	05	745	M	In operation
8	1	06	743	M	In operation
9	2	-2	702	K1	In operation
10	2	-7	723	M	In operation
11	2	00	753	M	In operation
12	2	-1	758	M	In operation
13	2	-2	721	M	In operation
14	2	-7	752	M	In operation
15	2	00	757	M	In operation
16	2	-1	736	M	In operation
17	3	04	751	M	In operation
18	3	-3	754	M	In operation
19	3	03	720	M	In operation
20	3	02	719	M	In operation
21	3	04	755	M+	In operation
22	3	-3	735	M	In operation
23	3	03	732	M	In operation
24	3	02	760	M	In operation
15	2		716	M	Spares
22	3		731	M	Maintenance
20	3	-6	701	K1	Flight tests

GLONASS SV는 1982년부터 2005년까지 배치한 GLONASS-GNSS인 GLONASS와 혼동을 피하려고 이하 GLONASS-I으로 적는다., 2003년부터 2016년까지 배치한 GLONASS-M, 2011년부터 2018년까지 배치한 GLONASS-K, 2017년부터 GLONASS-K2를 배치하고 있다. 표 4와 같이 GLONASS-I은 현재 모두 퇴역했으며, L1OF, L1SF, L2SF 신호를 송출하였다. GLONASS-M은 현재 27기 중 25기를 운용하고 있는 주력 SV이며, L1OF, L2OF, L1SF, L2SF 신호를 송출하고 있다. L3OC 신호는 표 4에서 'M+'로 표시한 'GLONASS Number' 755번 이후 SV부터 송출하고 있다. GLONASS-K는 L1OF, L2OF, L3OC, L1SF, L2SF 신호를 송출하고 있으며, L2OC와 L2SC 신호는 'GLONASS Number' 701번과 702번, 총 2기의 SV가 현재 궤도에서 운용 중이다. GLONASS-K2는 2022년 발사를 목표로 현재 개발 중이며, L1OF, L2OF, L1OC, L2OC, L3OC, L1SF, L2SF, L1SC, L2SC 신호를 모두 송출할 예정이다.

측위 오차는 GPS보다 조금 큰 7.38 - 2.8 m이다. GLONASS

는 러시아 국토의 위도가 다소 높은 것을 고려해 설계했기 때문에 GPS보다 북반구 고위도 영역에서의 측위 정확도가 높다. 또한, 다른 GNSS와의 상호 운용성을 높이기 위한 연구개발을 활발히 진행 중이며, 2022년 이후 현재 주로 운용 중인 GLONASS-M이 GLONASS-K2로 모두 대체되면 GNSS 상호 운용성이 상당히 높아 현재처럼 대체 GNSS가 아닌 주력 GNSS로써 활용될 것으로 예상된다.

3. 유럽연합의 Galileo 시스템

Galileo 시스템은 1999년 독일, 프랑스, 이탈리아, 3국이 주도하여 유럽연합 중심의 공동 개발 및 운용 GNSS로 개발이 시작되었다. 2003년 Galileo 시스템 개발에 대한 유럽연합 내 협정이 체결되면서 개발 프로그램이 본격적으로 시작되었다. GPS 및 GLONASS와 가장 큰 차이점은 단일 국가가 아닌 유럽연합이 개발을 주도하면서 군사적 용도보다는 민간 용도를 주로 고려해 설계, 및 운용되고 있다. Galileo 시스템의 운용 주체는 GSA (European GNSS Agency)와 ESA (European Space Agency)이다.

그림 4의 넷째 행처럼 Galileo 시스템은 E1, E5, E6 대역을 사용한다. Galileo 시스템의 주파수별 신호들은 표 5와 같다. 표 5와 같이 상업/공공용 신호와 민간용 신호로 각 신호가 구별된다. GPS L1 대역을 포함하고 있는 E1 대역은 코사인 위상의 BOC 신호인 BOCcos(15, 2.5) 신호를 PRS (Public Regulated Service) 신호로 사용하며, 데이터만 전송한다. 이외 세부 사양은 공개되어 있지 않다. OS (Open Service) 신호는 다른 신호처럼 E1 OS 신호로 주로 적는다. E1 OS 신호는 MBOC 변조 방식 중 CBOC (Composite BOC) 변조 방식을 사용해 변조한 신호로서 CBOC(6, 1, 1/11) 신호로 변조된 신호를 사용한다. 데이터 채널은 4,092 칩 길이의 주 PRN 부호만 사용하며 250 sps의 항법 데이터를 전송한다. 파일럿 채널은 4,092 길이의 주 PRN 부호와 주 PRN 부호 주기만큼의 칩 폭을 갖는 25 칩 길이의 부 PRN 부호를 추가로 사용한다.

E5 대역은 1191.795 MHz를 중심주파수로 사용하며, AltBOC(15, 10)으로 변조된다. E5 대역 내에서 중심주파수 1176.45 MHz인 대역을 E5a 대역, 1207.14 MHz인 대역을 E5b 대역으로 구별해 사용한다. E5a 대역과 E5b 대역의 신호를 각각 BPSK(10)으로 변조해 생성할 수도 있으나 AltBOC(15,10) 변조를 활용하면 E5a 대역과 E5b 대역 신호를 함께 변복조할 수 있다. GPS L5 대역은 E5a 대역을 함께 사용한다. E5 대역의 주 PRN 부호 길이는 10,230 칩이며, E5a 대역의 데이터와 파일럿 채널은 각각 20칩 길이와 100칩 길이의 부 PRN 부호, E5b 대역의 데이터와 파일럿 채널은 각각 4칩 길이와 100칩

표 5. Galileo 시스템의 주파수별 신호들[4], [26, 27]

대역	주파수 [MHz]	신호, 변조 방식, 활용	
		상업/공공용	민간용
E1	1575.42	PRS, BOCcos(15,2.5)	OS, CBOC(6,1,1/11)
E5	1191.795	AltBOC(15,10)	
E5a	1176.45	CS/HAS	OS
E5b	1207.14	SAR SoL/ARAIM CS/HAS	OS
E6	1278.75	PRS, BOCcos(10,5) CS, BPSK(5)	-

길이의 부 PRN 부호를 사용한다. E5a 데이터는 50 sps, E5b 데이터는 250 sps로 전송된다.

E6 대역의 중심주파수는 1278.75 MHz이며, E6 CS/HAS (Consumer Service/High Accuracy Service) 신호는 데이터와 파일럿 채널 각각 BPSK(5) 변조된 신호로서, 데이터와 파일럿 채널의 주 PRN 부호 길이는 5,115 칩이며, 데이터 채널의 데이터율은 1 Ksps이며, 파일럿 채널의 경우 길이 100칩의 부 PRN 부호를 추가로 사용한다.

Galileo 시스템은 다른 GNSS와 다르게 대역별로 신호를 최대한 다중화해 전송한다. 따라서 대역별로 신호를 구별하지 않고 서비스별로 신호를 구별하는 것이 일반적이다. OS 신호는 GPS L1 C/A 신호처럼 별도의 비용 지급 없이 누구나 사용 가능한 공개된 신호로서 1 m 이하의 측위 정확도를 제공하는 것을 목표로 설계 및 운용되는 신호이다. CS/HAS 신호는 처음에는 CS 신호로 명명되었으나, 이후 HAS 신호로 수정되었다. 초기에는 상업적 용도로 사용하기 위한 유료 신호로 기획 및 설계되었으나 현재는 무료로 사용할 수 있으며, 측위 정확도는 0.01 m 이하이다. PRS 신호는 공공용으로 사용되는 신호로서 암호화된 신호이다. 이에 대한 세부 사양은 공개되어 있지 않다. SAR (Search and Rescue Service) 신호는 탐색구조용 신호로서 원활한 탐색구조 지원을 위해 구조 Beacon과 양방향 통신이 가능한 신호로 설계되어 있다. SoL 신호는 ARAIM (Advanced Receiver Autonomous Integrity Monitoring) 신호로 개편되어 활용되고 있다. Galileo 시스템은 다른 GNSS와 달리 국가 연합이 개발 및 유지 보수를 진행하기 때문에 필요에 따라 신호의 수정이 잦은 편이다.

2020년 8월 현재, 운용 중인 Galileo SV의 상태는 [27]처럼 GSA에서 운용하는 홈페이지에서 확인할 수 있다. [27]에 공개된 2020년 8월 Galileo SV 상태는 표 6과 같다.

표 6에서 'SV ID'는 Galileo 시스템의 Ranging code와 같은 번호를 사용하며, 'E'는 Galileo 시스템의 구분자이다. 'Clock'은

SV별로 ‘RAFS (Rubidium Atomic Frequency Standard)’와 ‘PHM (Passive Hydrogen Maser)’를 사용한다. Galileo SV는 상공 23,222 Km의 MEO 궤도 3개에 각각 8개씩, 총 24기의 위성 배치를 FOC 선언 목표로 설계하였으며, 정상적인 운용을 위해 궤도별 예비 SV 2기씩, 총 30기의 SV 배치 및 운용을 목표로 하고 있다. 궤도별로 A, B, C 궤도로 구별하며, 궤도별 승교점이 120도씩 벌어져 있고, 적도를 기준으로 약 56도 기울어져 있다. 표 6처럼 2020년 8월 현재, 총 26기의 위성이 각 궤도의 슬롯에 있으며, 이 가운데 IOV (In-Orbit-Validation) 위성이 4기, FOC 위성이 22기 배치되어 있고, 22기는 ‘USABLE’로 표시한 것처럼 정상 운용 중이며, ‘TESTING’으로 상태 표시된 E18과 E19 SV는 2014년 8월 5일, Soyuz ST-B로 함께 발사했으나 정상 궤도 진입에 실패하여 각각 2014년 12월과 2015년 3월 최대한 활용 가능한 궤도로 이동시켰으며, 해당 궤도에서 시험 신호를 방출하고 있다. ‘NOT AVAILABLE’ SV인 E20과 E22는 SV 자체가 정상 동작하지 않아 사용 불가로 판정하고, 현재 사용하지 않고 있는 SV이다. IOV SV는 시

표 6. Galileo SV 상태, 2020년 8월 기준[26,27]

SV ID	Clock	Slot	SV Type	Status & Note
E11	RAFS	B05	IOV	USABLE
E12	PHM	B16		USABLE
E19	PHM	C04		USABLE
E20	RAFS	C05		NOT AVAILABLE
E18	PHM	Ext01	FOC	TESTING
E14	PHM	Ext02		TESTING
E26	PHM	B08		USABLE
E22	RAFS	B03		NOT AVAILABLE
E24	PHM	A08		USABLE
E30	PHM	A05		USABLE
E07	PHM	C06		USABLE
E08	PHM	C07		USABLE
E09	PHM	C02		USABLE
E01	PHM	A02		USABLE
E02	PHM	A06		USABLE
E03	PHM	C08		USABLE
E04	PHM	C03		USABLE
E05	PHM	C01		USABLE
E21	PHM	A03		USABLE
E25	PHM	A07		USABLE
E27	PHM	A04		USABLE
E31	PHM	A01		USABLE
E36	PHM	B04		USABLE
E13	PHM	B01		USABLE
E15	PHM	B02		USABLE
E33	PHM	B07		USABLE

험 위성으로 FOC 선언을 위해 설계 및 운용 중인 위성은 아니다. 현재 FOC 형 SV는 총 19기이며, 2020년 12월에 2기, 2021년에 2기, 그리고 2022년에 총 8기, 이상 12기를 발사 및 궤도에 위치시켜 FOC 선언 및 정상 운영할 예정이다. 다만, 기존 Galileo 시스템의 개발 및 운용 진행 상황을 볼 때, 2020년 현재 코로나 19로 인한 경제 상황이 좋지 않아 FOC 선언 및 정상 운용이 다소 연기될 가능성도 있다.

4. 중국의 BDS

BDS는 우리말 북두로 부르는 북두칠성을 뜻하는 중국어 北斗[중국어 발음 Běidǒu]를 이름으로 사용하고 있는 네 개의 개발 및 운용 중인 GNSS 가운데 가장 나중에 설계가 시작된 GNSS이다. 2003년 중국은 유럽연합의 Galileo 시스템 개발에 참여하면서, 2억 3천만 유로를 투자할 계획이었다. 이에 따라 2004년 10월 GJU (Galileo Joint Undertaking)와 NRSCC (National Remote Sensing Center of China) 간의 Galileo 시스템 개발 협력에 관한 협정에 서명하여 Galileo 시스템 개발을 함께 진행하였다. 그러나 유럽연합의 정치 경제적 문제로 Galileo 개발이 지연되면서 해당 협정을 파기하고, 독자적으로 BDS를 GNSS로 완성해 나가고 있다. 2020년 현재에는 공식적으로 BDS라고 부르고 있으나 러시아와 마찬가지로 정보 공개를 중국어로 진행한 후 상당한 시간 이후에 영문으로 제한적인 정보만을 공개하고 있어 북두의 의미를 영문으로 옮긴 COMPASS 또는 BeiDou-2 등 다양한 이름으로 불리고 있다. BDS 개발 주체는 CNSA (China National Space Administration)이며, 2020년 6월 23일 35기의 위성을 모두 궤도에 배치하면서 GNSS 중세 번째로 FOC 선언을 하고, 현재 정상 운용 중이다.

그림 4의 다섯째와 여섯째 행처럼 BDS는 COMPASS로 표기되어 있으며, BDS-I, BDS-II, BDS-III 순으로 시험용 RNSS, RNSS, GNSS로 순차 개발을 진행하였다. 그림 4의 다섯째는 BDS-II, 여섯째는 BDS-III에 해당하는 신호 대역과 신호에 대한 정의이다. 2020년 현재는 BDS-I으로 부르지만, 최초 이름은 BeiDou-1으로 명명되었다. 시험용 GNSS로 설계되었으며, 동경 70도부터 140도, 북위 5도부터 55도 영역에 중심주파수 2491.75 MHz의 시험 신호를 전송하는 SV 3기와 예비 SV 1기, 총 4기의 GEO (Geostationary Earth Orbit) SV로 구성하였다. 해당 SV는 통신 위성에서 해당 신호를 송출하도록 추가 기능을 설계한 형태이며, 이를 통해 BDS 구현 가능성을 판단하였다. BDS-I은 2012년 종료하고, 이후 BDS-2, 실제 명칭 BeiDou-2가 진행되었다.

BDS-2는 COMPASS 로도 알려진 RNSS로서 BeiDou-1을

확장한 시스템이 아니라 새로 설계한 RNSS로서 2012년 12월, 동경 55도부터 180도, 남위 55도부터 북위 55도 사이에서 측위가 가능했으며, 이후 GNSS인 BDS-3로 확장 설계되었다. BDS-2에서는 GEO SV 5와 MEO와 IGSO (Inclined Geo-Synchronous Orbit) 30기로 설계했으나 BDS-3로 확장되면서 GEO 3기와 IGSO 3기, 그리고 24기의 MEO SV로 구성하였다.

그림 4의 다섯째와 여섯째 행의 대역과 신호처럼 Galileo 시스템의 대역 및 신호 사양을 최대한 채택하고, 여기에 필요한 신호들을 더해 신호를 구성하였다. BDS-2/3의 신호 대역은 Galileo E1, E2, E5b, E6 대역과 대부분 겹치는 대역으로 설계하였다. 2007년 Galileo 시스템의 시험 위성인 GLOVE (Galileo In-Orbit-Validation Element)와 유사한 BDS-2 시험 위성으로 Compass-M1 SV를 지상 21,150Km 상공에 55도의 경사각을 갖고 거의 원형으로 공전하도록 궤도 위에 배치했다. 이후 2019년까지 20기를 모두 궤도 위에 성공적으로 배치했으며, 2020년 6월 현재, 15기가 정상 운용되고 있다. BDS-2의 주파수별 신호들은 표 7과 같다. 표 7의 신호들 가운데 B1I/Q 대역은 Galileo 시스템의 E2 대역과 같은 대역을 사용하며, B1A/C 대역은 GPS L1과 Galileo E1 대역과 같은 대역을 사용하며, B2 대역은 Galileo E5 대역과 같은 대역을 사용하고, B3I/Q 대역은 Galileo E6 대역과 같은 대역을 사용하고 있다. BDS-2/3의 B1I 신호는 BPSK(2) 변조 방식을 사용하며, 2,046 칩 길이의 2.046 Mcps의 확산 부호율을 갖는 확산 신호를 사용한다. 항법 데이터의 심볼율은 50 sps이다. B1C 신호는 QMBOC(6,1,4/33) 신호로 설계되었으며, QMBOC (Quadrature MBOC) 신호는 GPS의 MBOC 신호인 TMBOC 신호와 Galileo 시스템의 MBOC 신호인 CBOC 신호와의 특허 분쟁 소지를 없애기 위해 동위상에는 BOC(1,1) 신호, 직교위상에는 BOC(6,1) 신호를 각각 29대 4의 전력비로 설계한 신호이다. 10,230 길이의 Weil 코드를 사용하며, 기본 사양은 GPS L1C 신호와 거의 유사하다. B1I/Q 신호는 BPSK(10) 변조된 신호로서 B2I 신호는 2,046 칩 길이의 2.046 MHz 부호율을 갖는 확산 신호를 사용하며, B1I 신호와

표 7. BDS-2/3의 주파수별 신호들[4], [28-32]

대역	주파수 [MHz]	신호, 변조 방식, 활용	
		공인(authorized) 신호	공개(open) 신호
B1	1575.42	B1A, BOC(14,2)	B1C, QMBOC(6,1,4/33)
	1561.098	B1Q, BPSK(2)	B1I, BPSK(2)
B2	1207.14	B2Q, BPSK(10)	B2I, BPSK(2) B2a/b, AltBOC(15,10)
B3	1268.52	B3Q, BPSK(10) B3A, BOC(15,2.5)	B3I, BPSK(10)

같은 항법 데이터를 사용한다. B3I 신호는 BPSK(10) 변조된 신호이며, 10,230 칩 길이의 20.230 MHz 부호율을 갖는 신호이다. B1Q, B1A, B2Q, B3Q 신호는 신호 사양이 비공개된 신호이다.

2020년 8월 현재, 운용 중인 BDS-2/3 SV의 상태는 [32]처럼 CSNO (China Satellite Navigation Office)의 TARC (Test and

표 8. BDS-2/3 SV 상태, 2020년 8월 28일 기준[32]

PRN	SVN	SV Type	Clock	Status	Service Signal
01	GEO-8	BDS-2	Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
02	GEO-6		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
03	GEO-7		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
04	GEO-4		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
05	GEO-5		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
06	IGSO-1		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
07	IGSO-2		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
08	IGSO-3		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
09	IGSO-4		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
10	IGSO-5		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
11	MEO-3		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
12	MEO-4		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
13	IGSO-6		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
14	MEO-6		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
16	IGSO-7		Rubidium	Operational	B1I/B2I/B3I
19	MEO-1	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
20	MEO-2	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
21	MEO-3	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
22	MEO-4	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
23	MEO-5	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
24	MEO-6	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
25	MEO-11	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
26	MEO-12	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
27	MEO-7	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
28	MEO-8	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
29	MEO-9	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
30	MEO-10	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
31	IGSO-15	BDS-3S	Hydrogen	Experiment	--
32	MEO-13	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
33	MEO-14	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
34	MEO-15	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
35	MEO-16	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
36	MEO-17	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
37	MEO-18	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
38	IGSO-1	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
39	IGSO-2	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
40	IGSO-3	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
41	MEO-19	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
42	MEO-20	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
43	MEO-21	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
44	MEO-22	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
45	MEO-23	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
46	MEO-24	BDS-3	Rubidium	Operational	B1I/B3I/B1C/B2a/B2b
56	IGSO-25	BDS-3S	Hydrogen	Experiment	--
57	MEO-15	BDS-3S	Rubidium	Experiment	--
58	MEO-25	BDS-3S	Rubidium	Experiment	--
59	GEO-1	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I
60	GEO-2	BDS-3	Hydrogen	Operational	B1I/B3I
61	GEO-3	BDS-3	Hydrogen	Testing	B1I/B3I

Assessment Research Center)에서 운용하는 홈페이지에서 확인할 수 있다. [32]에 공개된 2020년 8월 BDS-2/3 SV 상태는 표 8과 같다.

표 8처럼 BDS-2는 GEO SV 5기, IGSO SV 7기, MEO SV 3기, 총 15기의 SV가 정상 운용되고 있다. BDS-2의 기본 SV 구성은 GEO SV 5기, IGSO 4기, MEO 4기로서, IGSO 3기가 예비기로 구성되었으나 현재는 BDS-3 SV 배치 및 운용에 따라 함께 활용되고 있다. BDS-2의 15기 SV 모두 루비듐 원자시계를 사용하며, B1I, B2I, B3I 신호를 정상 서비스하고 있다.

표 8처럼 BDS-3는 GEO SV 3기, IGSO SV 5기, MEO SV 26기, 총 34기로 구성 및 운용되고 있다. BDS-3의 기본 구성은 GEO SV 3기, IGSO SV 3기, MEO SV 24기이므로 현재 IGSO SV 1기와 MEO SV 2기는 예비용 SV로 활용하고 있음을 알 수 있다. 원자시계는 루비듐과 수소 원자시계를 각각 사용하고 있으며, SVC101 - C104, 총 4기의 SV는 실험용으로만 활용 중이며, SV C230 1기는 2020년 6월 23일 발사한 후 궤도에 정상 위치하여 현재 정상 동작을 시험 중이다. BDS-3 SV는 B1I, B3I, B1C, B2a, B2b 신호를 정상 송출하고 있다. SV C217, C229, C230은 GEO SV로서 동경 140도, 80도, 110.5도에 각각 있으며, 고정밀도 신호인 B2b 신호를 송출하고 있다. 또한, 같은 GEO 위성 3기는 위성 기반 보강항법 시스템(Satellite-Based Augmentation System, SBAS) 서비스 제공을 위한 SV로도 함께 활용되고 있다.

2020년 현재 중국은 총 49기의 RNSS/GNSS SV를 운용하고 있으며, 이를 통해 BDS-2 서비스 지역에는 BDS-2 신호만을 단독 사용할 때 각각 10 m 이하의 위치 정확도, 초당 0.2 m 이하의 속도 정확도, 50 ns 이하의 시각 정확도를 갖고 있다. BDS-3는 지구 전역에서 0.5 m 이하의 위치 정확도를 제공하며, 다른 GNSS에 비해 GEO, IGSO, MEO의 3가지 궤도의 SV를 사용하기 때문에 수직 정확도가 더 높을 것으로 예상된다.

IV. 결론

본 기술논문에서는 항법 체계에 대해 간단히 살펴보고, 2020년 현재 개발 및 운용 중인 GNSS, 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo 시스템, 중국의 BDS의 시스템 개요와 최신 운용 현황을 살펴보았다. 2020년 8월 현재, GPS는 최신 신호를 모두 방송할 수 있는 GPS Block III SV 배치를 시작하였다. GPS는 가장 먼저 민간용 신호를 공개하고, 현대화까지 체계적으로 진행 및 관련 주요 정보를 신속하게 공개하고 있어 GNSS 시장의 대부분을 점유하고 있다. 러시아는 FOC를 재선언 이후 GNSS 시장 점유율을 높여가고 있

으며, 특히 북반구 고위도 지역에서 GLONASS SV의 가시성과 측위 정밀도가 높은 장점을 갖고 있어 북극해 항해를 위한 주요 항법 체계로 주목을 받고 있다. 또한, 다른 GNSS와의 상호 운용성을 최대화하기 위한 신호 설계를 진행하고 있다. Galileo 시스템은 FOC 선언이 계속 지연되고 있으나 다수의 SV를 정상 궤도 위에 배치 및 운용하고 있다. 그러나 2020년 현재, 코로나 19로 인한 정치 경제적 어려움이 반영되어 이후 FOC 선언이 지연될 우려가 상당히 큰 것으로 예상된다. GNSS 가운데 가장 늦게 개발을 시작했으나 세 번째로 FOC 선언을 위한 SV 발사 및 궤도 배치를 마친 중국의 BDS는 세계 2위의 경제력을 바탕으로 무려 49기의 SV를 궤도 위에 배치 및 운용하고 있다. 특히, 다른 GNSS 대부분이 GNSS용 MEO SV만을 설계하고, 배치 및 운용하는 데 반해 BDS는 GEO/IGSO/MEO SV를 배치하고, GNSS와 SBAS에 통합 활용함으로써 GNSS를 비롯한 종합적인 항법 체계로서 자리매김하고 있다.

또한, 본 기술논문에서는 살펴보지 못했지만, RNSS인 QZSS는 1기의 GEO SV와 3기의 GSO (Geo-Synchronous Orbit)를 배치하는 것을 목표로 관련 설계 및 개발을 진행하였으며, 2010년 9월 1기의 GSO SV를 궤도 위에 배치하였고, 이후 정치 경제적 문제로 인해 개발이 지연되다가 2017년 6월과 10월에 GSO SV 2기, 같은 해 8월에 GEO SV 1기를 궤도 위에 배치하였다. 2020년 현재, 1단계 구축을 마치고, 일본 및 주변 지역에 10 m 이내의 측위 정확도를 제공하는 신호를 송출하고 있다. 특히, 동경 상공에 최소 1개의 GSO SV가 위치하도록 설계했기 때문에 빌딩이 밀집된 지역의 가청성(hearability)이 높은 장점을 갖고 있다. 이후 QZSS는 2단계를 진행하면서 올해는 2010년 발사한 첫째 GSO SV를 대체할 SV를 발사할 예정이며, 이후 2023년에 GSO SV 3기를 추가 발사해 총 7기로 2단계 RNSS 구성을 마칠 예정이다.

2020년 현재, 우리나라는 2034년부터 활용하는 것을 목표로 자체 RNSS인 KPS 연구개발을 시작하였다. KPS는 3기의 GEO SV와 4기의 IGSO SV, 이상 7기의 SV로 구성할 계획하고 있다. KPS의 성공적 개발 및 운용을 위해서는 최신 GNSS/RNSS 개발 사례, 특히 최근 두각을 나타내고 있는 BDS와 QZSS에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] European Global Navigation Satellite Systems Agency, *GSA GNSS Market Report: GNSS and New space, Issue 6*, Office

of the European Union, Luxembourg, 2019.

[2] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*, 3rd Edition, Artech House, Norwood, England, 2017.

[3] <https://www.investopedia.com/insights/worlds-top-economies/>

[4] <https://www.globalfirepower.com/countries-listing.asp>

[5] <https://www.gpsworld.com/korea-will-launch-its-own-satellite-positioning-system/>

[6] https://www.kari.re.kr/kor/sub03_06.do

[7] <https://m.post.naver.com/viewer/postView.nhn?volumeNo=28760293&memberNo=35002835&vType=VERTICAL>

[8] B. Hofmann-Wellenhof, K. Legat, and M. Wieser, *Navigation: Principles of Positioning and Guidance*, Springer-Verlag Wien, Vienna, Austria, 2003.

[9] L. Tetley and D. Calcutt, *Electronic Navigation Systems*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, U.K., 2001.

[10] <https://insights.globalspec.com/article/10315/how-does-gps-work>

[11] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GNSS_signal

[12] J. Betz, "Binary Offset Carrier Modulations for Radionavigation," *Journal of the Institute of Navigation*, vol. 48, no. 4, pp. 227-246, Winter 2001.

[13] <https://www.gps.gov/technical/icwg/>

[14] <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200K.pdf>

[15] <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705G.pdf>

[16] <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-800G.pdf>

[17] T. Richardson and R. Urbanke, "Efficient encoding of low-density parity-check codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, No. 2, pp. 638-656, Feb. 2001.

[18] <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>

[19] <http://www.kriss.re.kr/eng/file/4news.pdf>

[20] <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/glonass/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument/>

[21] http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/1_CD_GLONASS_eng_v5.1.pdf

[22] http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/1_CD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf

[23] <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>

[24] <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>

[25] <http://www2.unb.ca/gge/Resources/GLONASSConstellationStatus.txt>

[26] <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>

[27] <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

[28] <http://en.beidou.gov.cn/>

[29] <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803539206360377.pdf>

[30] <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803538771492778.pdf>

[31] <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/202008/P020200803538292532733.pdf>

[32] <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>

저자약력



유 승 수

- 2003년 건국대학교 전자정보통신공학부 졸업.
- 2005년 동 대학원 공학석사.
- 2010년 동 대학원 공학박사.
- 2010년~2011년 건국대 2단계 BK21 위성항법 시스템 수신기 기술 연구팀 박사후연구원.
- 2011년~현재 건국대학교 전기전자공학부 조교수.
- 2019년 제어·로봇·시스템학회 학술활동상 (ICROS19-157호).
- 관심분야는 GNSS 신호처리, 기계학습 기반 신호 검출 및 추정.



이 준 형

- 2015년~현재 건국대학교 전자공학과 재학.
- 관심분야는 기계학습 기반 GNSS 수신기 신호 처리, GNSS 항재밍 신호처리 등.



김 선 용

- 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(최우등).
- 1993년 동 대학원 공학석사. 1995년 동 대학원 공학박사.
- 1996년~2001년 한림대학교 정보통신공학부 조교수.
- 2001년~현재 건국대학교 전자정보통신공학부 교수.
- 관심분야는 통계학적 신호처리, 이동통신시스템, 통신이론, GPS 항재밍 신호처리 등.