

# Design of SDR-based Multi-Constellation Multi-Frequency GNSS Signal Acquisition/Tracking Module

Won Jae Yoo, Lawoo Kim, Yu Dam Lee, Taek Geun Lee, Hyung Keun Lee<sup>†</sup>

Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

## ABSTRACT

Due to the Global Navigation Satellite System (GNSS) modernization, the recently launched GNSS satellites transmit signals at various frequency bands of L1, L2 and L5. Considering the Korea Positioning System (KPS) signal and other GNSS augmentation signals in the future, there is a high probability of applying more complex communication techniques to the new GNSS signals. For the reason, GNSS receivers based on flexible Software Defined Radio (SDR) concept needs to be developed to evaluate various experimental communication techniques by accessing each signal processing module in detail. In this paper, we introduce a multi-constellation (GPS/Galileo/BeiDou) multi-band (L1/L2/L5) SDR by utilizing Ettus USRP N210. The signal reception module of the developed SDR includes down-conversion, analog-to-digital conversion, signal acquisition, and tracking. The down-conversion module is designed based on the super-heterodyne method fitted for MHz sampling. The signal acquisition module performs PRN code generation and FFT operation and the signal tracking module implements delay/phase/frequency locked loops only by software. In general, it is difficult to sample entire main lobe components of L5 band signals due to their higher chipping rate compared with L1 and L2 band signals. Experiment result shows that it is possible to acquire and track the under-sampled signals by the developed SDR.

**Keywords:** SDR, multi-GNSS, multi-constellation, signal acquisition, signal tracking

## 1. INTRODUCTION

1900년대 후반부터 미국을 시작으로 하여 전역위성항법시스템으로 불리는 Global Navigation Satellite System (GNSS)의 개발이 전세계적으로 이루어져 왔다. 지상으로부터 수만 km에 위치한 GNSS 위성들을 활용하여 국방, 금융, 통신, 의료분야 이외에도 근래에 들어 활발히 연구되는 자율주행에 이르기까지 다양한 분야에서 GNSS를 활용한 기술 개발이 이루어지고 있다.

GNSS 위성들에서 송출되는 신호를 지상의 GNSS 사용자들이 수신하여 활용할 수 있도록 GNSS 신호들의 Interface

Control Document (ICD)가 민간에 공개되었다. 각종 천체력 데이터 및 시간 정보, 전리층 보정 정보, almanac 정보 등을 담고 있는 항법메시지들은 GNSS의 종류에 따라 interleaving/de-interleaving, Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) 코드 또는 Convolutional 코드와 같이 Forward Error Correction (FEC)를 통한 메시지 변조가 이루어 진다. 이후, 이와 같은 항법메시지들이 반송파 주파수에 실리는 과정에서 Binary Phase Shift Keying (BPSK) 또는 Binary Offset Carrier (BOC) 기법을 통해 추가 변조되며, L 밴드로 불리는 약 1~2 GHz 반송파 주파수를 통해 직접 확산 변조 기법으로 지상으로 송출된다 (Borre et al. 2007, Bhuiyan et al. 2014). GNSS 신호는 사용 목적에 따라 민간용 신호는 L 밴드 주파수 대역 중 약 1.5~1.6 GHz 대역의 L1, 군사용 및 상업용 신호는 약 1.1~1.3 GHz 대역의 L2~L5 등으로 구분 지어 송신 중에 있다. 이들 중 L5 대역의 GNSS 신호인 GPS L5와 Galileo E5a/E5b 신호는 GNSS 현대화에 따라 보다 강건하게 신호가 전달되도록 10 MHz 이상의 높은 칩률 및 보조 코드 등 타 대역의 신호에 비해 다소 복잡하게 설계되어 위성에서 송출되고 있다. 이렇게 동일한 L 밴드 내에서 다양한 주파수를 가지는 GNSS 신호들은 외부로부터의 재밍 또는 간섭 등에 대해서 서로 보강 기능

Received Feb 03, 2021 Revised Feb 23, 2021 Accepted Feb 24, 2021

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: hyklee@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0131 Fax: +82-2-3158-5769

Won Jae Yoo <https://orcid.org/0000-0002-6683-2120>

Lawoo Kim <https://orcid.org/0000-0002-7924-5355>

Yu Dam Lee <https://orcid.org/0000-0003-2044-922X>

Taek Geun Lee <https://orcid.org/0000-0002-2330-2859>

Hyung Keun Lee <https://orcid.org/0000-0001-5210-1557>

을 수행 가능하며, 오차 요인 중 하나인 전리층 지연 오차를 효과적으로 추정하기 위해 활용 가능하다. 전 세계적인 GNSS 현대화에 맞게 현재 국내에서도 지역위성항법시스템인 Korea Positioning System (KPS) 구축 계획이 발표된 상태이며, 향후 다양한 GNSS 신호를 포함하여 KPS 신호는 현재 개발되지 않은 새로운 주파수 대역과 보다 효과적인 변조 기법 등으로 운용될 가능성이 높다 (Park et al. 2019).

향후 개발 초기 단계에서 일반적인 GNSS 수신기로 획득할 수 없는 새로운 GNSS 신호들에 대하여 다양한 신호 분석 및 검증 수행을 위해 재구성성 및 유연성을 가지는 Software Defined Radio (SDR) 기술의 적극적인 활용을 고려해볼 수 있다. 수신기의 특성을 변경 불가능한 하드웨어 수신기와는 달리, SDR 수신기는 하드웨어 내 소프트웨어를 탑재한 후, 사용자의 편의에 맞게 소프트웨어 조작을 통해 수신 특성을 변경 가능한 장점을 가진다. 따라서, SDR 기술이 접목된 GNSS 수신기를 활용하면 현재 서비스 중인 다양한 L 밴드 주파수 대역 및 향후 미래 신호의 주파수 대역, 샘플링 주파수, 각종 변조 기법 등을 소프트웨어를 통해 대처할 수 있으므로 GNSS 신호 획득, 추적, 항법메시지 해독, 위치 해 산출 등 다중 위성군 및 다중 대역의 GNSS 신호 처리를 용이하게 수행할 수 있다 (Akos 1997, Won et al. 2006, Park et al. 2019). 동일한 중심주파수의 GPS L1 및 Galileo E1를 MATLAB 소프트웨어로 신호 처리하기 위한 연구가 진행되었다 (Borre et al. 2007). L1 주파수 대역의 GPS/Galileo/BeiDou 신호를 수집하여 후처리를 통한 위치 해 결정에 관한 연구가 수행되었으며 (Söderholm et al. 2016), SDR 장비를 사용하여 L1 단일 주파수 대역 내 일부 GNSS 신호들을 수집하여 실시간 처리를 위한 연구가 수행된 바 있다 (Suzuki & Kubo 2014, Park et al. 2019). 또한 전리층 감시를 위해 L1 대역 이외에 L2 및 L5 대역 GNSS 신호를 획득하고자 하는 연구가 진행된 바 있는데, 이 중 높은 칩률을 사용하는 L5 대역 신호의 메인 로브를 전부 포함하여 샘플링 가능한 고성능 SDR 장비를 활용하여 신호 획득 연구가 수행되었다 (Linty et al. 2018). 근래에 들어 국내에서도 KPS 구축 계획이 발표됨에 따라 SDR 및 MATLAB PCT를 기반으로 한 GNSS 신호 처리 아키텍처들이 연구된 바 있다 (Lee & Won 2020, Song et al. 2020).

본 논문에서는 SDR 기반의 L1/L2/L5 주파수 대역 내 Code Division Multiple Access (CDMA) 기법으로 위성에서 송출되는 GPS/Galileo/BeiDou 민간용 신호의 획득 및 추적이 가능한 소프트웨어 모듈 설계 결과를 제시하였다. GNSS 신호 수집 과정에서 한 번에 기저대역으로 하향변환 하지 않고, 별도의 중간 주파수를 두어 하향 변환을 수행하는 슈퍼 헤테로다인 방식을 사용하였다. USRP SDR 장비로부터 수집된 GNSS 신호의 코드 시작 지점과 도플러 주파수를 탐색하기 위해 각 GNSS ICD 기반의 Pseudo Random Noise (PRN) 코드 생성 및 Fast Fourier Transform (FFT) 기반 상관기를 포함한 전반적인 신호 획득 과정을 소프트웨어로 구현하였다. 또한, 신호 획득 과정에서 탐색된 코드 위상과 도플러 측정치를 지속적으로 추적하기 위해 각종 고정 루프 판별기 및 필터 업데이트 부분의 전반적인 신호 추적 과정 또한 소프트웨어로 구현하였다. 본 논문에서 활용한 SDR 장비로는 Ettus Research 사의 Universal Software Radio Peripheral (USRP) N210을 사용하였으며, 이를 작동시키기 위한 SDR software

toolkit으로는 Linux 오픈 소스 기반 GNU Radio를 활용하였다. 실험을 통해 실제 운용 중인 다중 위성군 및 다중 대역의 민간용 GPS/Galileo/BeiDou 신호를 SDR 장비로 수집하였으며, 설계한 소프트웨어 GNSS 수신 모듈을 활용한 신호 획득 및 신호 추적 결과를 별도 기준 수신기와와의 결과 비교를 통해 정상적으로 GNSS 신호들이 획득되고 추적되었음을 확인하였다. 논문에서 활용한 USRP N210으로는 다른 대역 GNSS 신호보다 높은 칩률로 생성되는 GPS L5 및 Galileo E5a/E5b 신호의 메인 로브를 온전히 샘플링하기에 요구되는 최소 샘플링 주파수 이상의 안정적인 데이터 수집이 불가하다. 따라서, 본 논문에서는 기 수행된 연구와 유사하게 온전히 샘플링 된 L1 및 L2 대역의 신호들의 획득 및 추적이 가능함을 확인하였다. 추가로, 언더샘플링 관련 내용을 다루지 않은 기 연구와 대비하여 충분치 않은 샘플량을 통해 신호 획득 및 추적을 수행한 L5 대역의 결과를 통해 낮은 샘플링 주파수를 활용하여도 높은 감도의 GNSS 신호를 적절히 획득하고 추적할 수 있음을 확인하였으며, 나아가 향후 추가될 높은 칩률 및 복잡한 변조 기법을 사용하게 될 미래 GNSS 신호를 고성능이 아닌 SDR로도 신호 처리가 충분히 가능함을 확인하였다.

## 2. SDR-BASED GNSS SIGNAL RECEPTION MODULE

### 2.1 GNSS Signal

GNSS는 크게 우주 부분, 사용자 부분, 제어 부분으로 나눌 수 있다. 이 중 우주 부분인 지상으로부터 수만 km 상공에 위치한 GNSS 위성들은 지상의 다수 사용자들이 사용할 수 있도록 약 1~2 GHz 대역인 L 밴드를 통해 GNSS 신호를 수십 Watt의 세기로 송출한다. 송출되는 GNSS 신호는 용도에 따라 민간용, 군사용, 상업용 등으로 구분되며 L 밴드 중 상위 L 밴드(L1 밴드)인 1.5 GHz 부근과 하위 L 밴드(L2, L5 밴드)인 1.2 GHz 부근에 일반 사용자가 무료로 사용 가능한 민간용 GNSS 신호가 송출되고 있다. 일반적으로 상위 L 밴드인 L1 대역이 주요 민간용 GNSS 신호로 사용된다 (Ko 2010, Kaplan & Hegarty 2017). 각종 재밍 혹은 신호 간섭 등의 영향을 최소화하기 위해 하위 L 밴드인 L2 및 L5 대

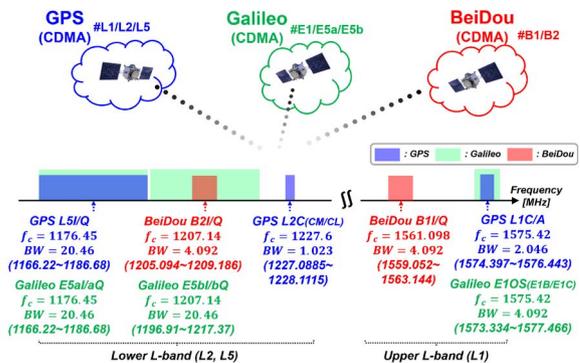


Fig. 1. Frequency distribution of GPS/Galileo/BeiDou signals in L-band.

**Table 1.** Characteristics of GPS/Galileo/BeiDou signal using data channel on L1/L2/L5 frequency band (Yoo et al. 2020).

GNSS	GPS				Galileo		BeiDou	
Signal	L1C/A	L2CM	L5I	E1B	E5bI	E5aI	B1I	B2I
Center frequency (MHz)	1575.42	1227.6	1176.45	1575.42	1207.14	1176.45	1561.098	1207.14
Code rate (MHz)	1.023	0.5115	10.23	1.023	10.23		2.046	
Main lobe bandwidth (MHz)	2.046	1.023	20.46	2.046	20.46		4.092	
Code period (ms)	1	20	1	4	1		1	
Modulation type	BPSK(1)	BPSK(1)	BPSK(10)	CBOC(6,1,1/11)	AltBOC(15,10)		BPSK(2)	
Secondary code (ms)	-	-	10 (NH code)	-	4	20	20 (NH code)	-
Navigation data type	LNAV	CNAV		INAV		FNAV	D1NAV / D2NAV	

역에서 보강 신호의 역할을 수행하며, 다중 주파수 사용으로 인한 전리층 지연 오차 보상 등의 효과 또한 얻을 수 있다. 본 논문에서 다룰 예정인 L 밴드 내 민간용 GNSS 신호 중 CDMA 기법을 사용하는 GPS/Galileo/BeiDou 신호들의 주파수 분포를 Fig. 1에 나타냈다.

Fig. 1에서  $f_c$ 는 GNSS 신호들의 중심 주파수이며,  $BW$ 는 GNSS 신호의 메인 로브 대역폭을 의미한다. 중심 주파수와 코드 의 반복 주기, secondary code 사용 유무 등이 각 GNSS에 따라 다르며, 미리 정해진 신호 생성 기법 및 항법메시지 변조 기법 등은 GNSS ICD를 통해 공개 되어있다. 따라서, 지상의 사용자들은 이를 기반으로 신호 획득 및 추적 후 항법메시지 해독 등의 전략을 수립할 수 있으며, 이를 통해 사용자의 위치 해를 산출해 낼 수 있다. Table 1에 L 밴드 대역 내 GPS/Galileo/BeiDou 신호에 대한 특징을 간략히 요약하였다.

### 2.2 GNSS Signal Acquisition

GNSS 위성으로부터 송출된 신호가 지상의 사용자 수신기에 도착할 때, 신호를 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = a(t) \cdot d(t - \tau(t)) \cdot e^{j2\pi(f_c - f_d)t + \phi(t)} + n(t) \quad (1)$$

여기서  $r(t)$ 는 지상의 수신기에 도달한 GNSS 신호,  $a(t)$ 는 신호의 진폭,  $d(t)$ 는 PRN 코드 및 항법메시지 합산 성분,  $\tau(t)$ 는 위성에서 수신기까지 신호 이동에 따른 시간 지연,  $f_d$ 는 도플러 천이 주파수 성분,  $\phi(t)$ 는 반송파 위상 천이 성분,  $n(t)$ 는 수신 과정에서 포함되는 가우시안 형태의 랜덤 오차 성분이다. 위와 같은 아날로그 신호의 형태로 수신되는데, 수신기에서는 RF Front-end 단에서 중간 주파수 영역으로 하향 변환을 수행한 후 정해 놓은 샘플링 주파수에 의해 아날로그 신호를 샘플링하여 최종적으로 기저대역 디지털 신호로 변환한다. 위와 같이 샘플링 된 기저대역 디지털 GNSS 신호는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$r[k \cdot T_s] = a[k \cdot T_s] \cdot d([k \cdot T_s] - \tau[k \cdot T_s]) \cdot e^{-j2\pi f_d[k \cdot T_s] + \phi[k \cdot T_s]} + n[k \cdot T_s] \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 샘플링 인덱스,  $T_s$ 는 시간 단위의 샘플링 주기이다. 위와 같이 디지털 샘플링 된 GNSS 신호의 시작 지점을 찾기 위하여 사용자는 GNSS ICD를 통해 코드 한 주기 이내의 코드 지연 시간과 도플러 주파수 후보군들에 대하여 PRN 코드를 생성한 후, 식 (2)의 샘플링 된 GNSS 신호와 상관을 수행한다. 모든 후보

군에 대해 상관 시, 결과값 계산 연산 량을 감소시키기 위해 시간 성분에서 상관인 주파수 성분에서 곱의 특성을 가지는 FFT를 통한 상관 방법이 널리 활용되고 있다 (Pany 2010).

만약, 시간 지연  $\tau$ 과 도플러 주파수 성분  $f_d$ 이 모두 정확하게 생성되었다면 모든 후보군의 상관 결과 값들과 비교하여 첨두 값을 가지게 된다. FFT 상관 첨두 값 이외 계산된 두번째 첨두 값을 통해 두 상관 결과 값 간 비율을 계산하여 미리 정해진 임계 값을 초과하면 신호 획득, 초과하지 못하면 신호 비획득으로 나눌 수 있다. 식 (3)은 임계 값을 초과 여부에 대한 신호 판별식을 나타내며,  $|S_{main, peak}|^2$ 는 상관 결과 첨두 값,  $|S_{second, peak}|^2$ 는 상관 결과 첨두 값 외의 두번째 첨두 값,  $\gamma$ 는 미리 정해진 상관 비율 임계 값을 나타낸다 (Borre et al. 2007).

$$\frac{|S_{main, peak}|^2}{|S_{second, peak}|^2} > \gamma \quad (3)$$

여기서 상관 비율 임계 값을 초과하여 최종 신호 획득되었을 때의 시간 지연  $\tau$ 를 코드 위상, 주파수 성분  $f_d$ 를 도플러 주파수로 하여, 이를 지속적으로 추적하기 위한 신호 추적 단계로 전달하는 과정을 수행한다.

### 2.3 GNSS Signal Tracking

신호 획득의 결과 값으로 전달된 코드 위상과 도플러 주파수 값은 높은 정확도를 가지는 값이 아니기 때문에, 이를 정확히 추적하기 위한 다음의 고정 루프들이 필수적으로 요구된다. 시간 지연을 추적하기 위한 지연 고정 루프 (Delay Locked Loop; DLL), 위상을 추적하기 위한 위상 고정 루프 (Phase Locked Loop; PLL), 주파수를 추적하기 위한 주파수 고정 루프 (Frequency Locked Loop; FLL)의 3 가지로 나눌 수 있다. 신호 획득 결과 값인 코드 위상에서의 생성된 코드를 Prompt라고 하였을 때, 일반적인 BPSK 신호에서는 코드 내 -0.5칩만큼 이전의 코드를 Early, +0.5칩만큼 이후의 코드를 Late라고 한다. Prompt 신호가 GNSS 수신기에서 획득된 신호와 정확히 일치할 경우 Prompt 신호에서 상관 값이 최대가 계산되며, BPSK 신호에서는 Early와 Late 신호의 상관 값은 Prompt 신호의 절반이 계산된다 (Misra & Enge 2011). BPSK 신호가 아닌 BOC 변조된 신호는 BPSK와 자기 상관 함수(Auto Correlation Function; ACF)의 형태가 다르게 나타나는 데, BPSK와 같이 -0.5칩과 +0.5칩이 아닌 다른 지점을 Early와 Late 지점으로 지정해야 한다 (Fernández-Prades et al. 2012). Fig. 2에 일반적인 BPSK 신호 중 GPS LIC/A

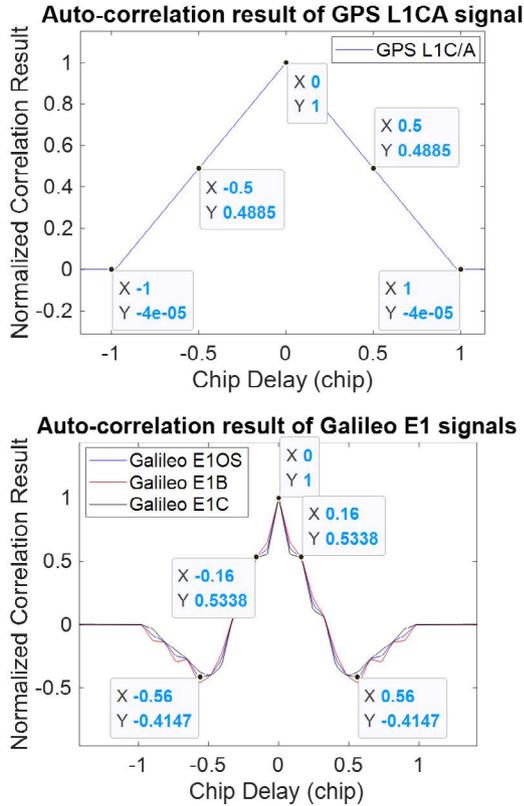


Fig. 2. Comparison of auto-correlation result between GPS L1C/A signal and Galileo E1 signals.

의 정규화 된 ACF와 BOC 변조를 사용하는 Galileo E1 신호의 정규화 된 ACF를 비교해서 나타냈다.

Fig. 2와 같이 BPSK 변조 신호는 시작 지점을 찾기 위해 ±0.5 칩을 사용하는 Early-Prompt-Late (EPL) 신호를 사용하며, BOC 변조 신호 중 Galileo E1 신호는 ±0.2칩 부근에서 EPL 및 ±0.6칩 부근에서 Early 보다 더 이르고 Late 보다 더 늦은 지점을 칭하는 Very Early (VE) 및 Very Late (VL) 신호를 사용한다. Galileo E5 신호들은 AltBOC 변조 기법이 적용되었으나, 1칩 이내에서는 BPSK와 매우 유사하여 BPSK의 EPL 기법을 사용한다.

Numerical Controlled Oscillator (NCO)로부터 90도 위상차를 두고 생성된 Inphase (I)와 Quadrature (Q) 신호의 EPL 혹은 EPL+VE/VL 신호를 각각 계산한 후, 이를 각 고정 루프 내 판별기에서 입력 값으로 사용한다. 판별기는 현재 신호 상태 또는 수신기의 상태 여부에 따라 다르게 적용될 수 있으나, 일반적으로 DLL에 사용되는 판별기로는 Early-Minus-Late-Power (EMLP) 판별기가 있으며, PLL에 사용되는 판별기로는 two-quadrant arctangent를 사용하는 Costas 판별기가 있다. 정규화 된 판별기 값  $D_{EMLP}$  과 VE/VL 신호를 사용하는 경우의 판별기 값  $D_{VEMLP}$  을 각각 식 (4)와 (5)에 나타냈으며, two-quadrant arctangent 판별기  $D_{atan}$  는 식 (6)에 나타내었다 (Jovanovic et al, 2012).

$$D_{EMLP} = \frac{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} - \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}}{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} + \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}} \quad (4)$$

$$D_{VEMLP} = \frac{\sqrt{I_{VE}^2 + Q_{VE}^2 + I_E^2 + Q_E^2} - \sqrt{I_{VL}^2 + Q_{VL}^2 + I_L^2 + Q_L^2}}{\sqrt{I_{VE}^2 + Q_{VE}^2 + I_E^2 + Q_E^2} + \sqrt{I_{VL}^2 + Q_{VL}^2 + I_L^2 + Q_L^2}} \quad (5)$$

$$D_{atan} = \arctan\left(\frac{Q_p}{I_p}\right) \quad (6)$$

식 (4)~(6)에서,  $\{I_m, Q_m\}_{m=VE,E,P,L,VL}$  은 각각 Inphase/Quadrature VE, E, P, L, VL 신호의 상관기 결과 값이다. 식 (4)와 (5) 이외에도 Dot product, High-resolution correlator와 같은 다양한 DLL 판별기가 존재하며, PLL 또한 four-quadrant arctangent 판별기가 존재한다 (Kaplan & Hegarty 2017). 위상 고정 루프에서 위상을 정확히 추적하는 경우, 위상을 미분하게 되면 주파수 성분이 되므로 주파수 고정 루프의 사용 없이 주파수에 대한 추적이 가능하다. 따라서, 판별기에서 각 성분들의 오차 값을 계산한 후 루프 필터의 업데이트를 통해 NCO들에서 다음 시점의 신호를 추적할 수 있도록 지속적인 업데이트를 수행하는 방법을 사용하였다.

## 2.4 Design of SDR-based GNSS Signal Acquisition and Tracking Module

기존의 하드웨어 수신기들은 한 번 제작하게 되면 수신 특성 변경이 불가능하기 때문에 수신하고자 하는 신호 이외의 다른 신호 처리가 원천적으로 불가능하다. 다른 신호를 수신하려면 해당 규격에 맞게 새로 설계 제작해야 하므로 경제적으로 비효율적일 뿐만 아니라 유연하지 못한 작동 특성이 존재한다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 근래에 들어 하드웨어 수신기의 유연성 및 생산성 증대를 위해 하나의 하드웨어 내에 소프트웨어를 탑재하여 이를 조작함으로써 수신 특성 변경이 가능한 SDR 기술이 접목된 GNSS 수신기들이 활발히 연구 중에 있다.

본 연구에서는 SDR을 기반으로 하는 Table 1에 도시된 L1/L2/L5 대역의 다중 위성군 신호들을 획득 및 추적하기 위해서 소프트웨어 조작 용도의 사용자 입력 모듈, 사용자 입력을 기반으로 수신 특성을 변경시켜 데이터를 수집하기 위한 RF Front-end 모듈, 신호 획득 모듈, 신호 추적 모듈과 같이 총 4가지의 모듈로 구분하여 설계하였다.

사용자 입력 모듈에서는 각기 다른 3 개의 모듈에서 각 GNSS의 입력을 받을 수 있도록 설계하였다. 단일 SDR 장비에서 다중 위성군 신호를 수신하기 위해 RF Front-end 모듈에서는 해당 GNSS 신호 수신을 위한 중간주파수 및 샘플링 주파수를 사용자 입력 모듈에서 입력 받는다. 입력 받은 변수들로 SDR 장비에서 수신 특성을 변화시켜가며, GNSS 안테나로부터 직접 신호를 수신 받아 원하는 GNSS 신호를 수집하여 주파수 하향 변환 과정을 거친 이후, 최종적으로 기저대역의 디지털 신호로 변환시킨다.

신호 획득 모듈에서는 GNSS ICD를 기반으로 PRN 코드를 생성한다. 생성하려는 PRN 코드 종류, 코드 칩률, 코드 길이, 코드 반복 주기, 코드 누적 시간, 도플러 탐색 범위 및 탐색 간격, 파일럿 신호 사용 여부, 상관기 결과 값을 통해 신호의 획득 여부를 판단하는 상관 첨부 비율 임계 값들을 입력 받는다. 입력 값들로 코드 재 샘플링하여 생성 및 누적 시간에 따른 코드 누적, 탐색 조건

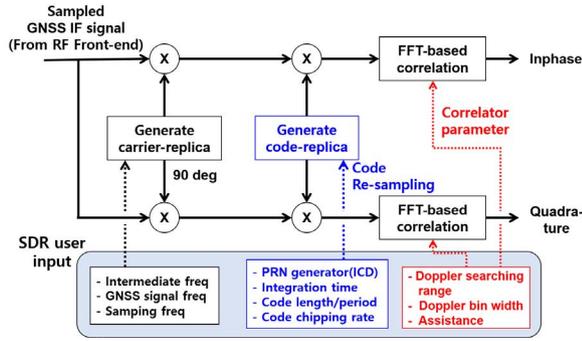


Fig. 3. Operational flow of designed GNSS signal acquisition module.

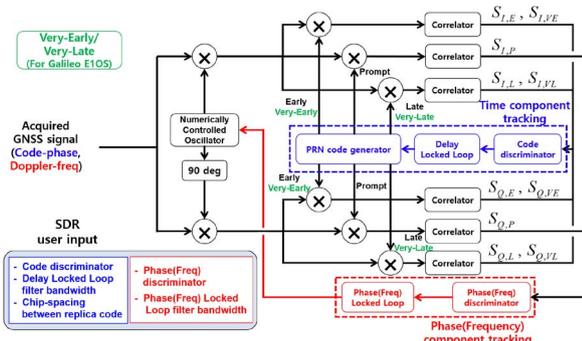


Fig. 4. Operational flow of designed GNSS signal tracking module.

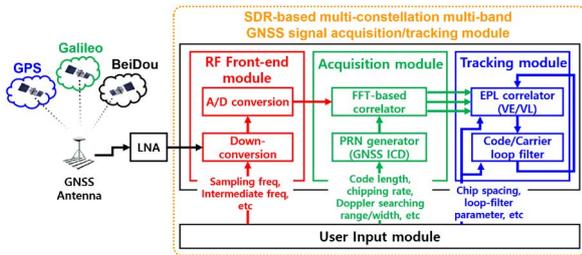


Fig. 5. Operational flow of designed SDR-based multi constellation multi-band GNSS signal acquisition and tracking module.

을 만족하도록 신호 획득 수행 결과, 입력 받은 임계 값을 초과하는 신호에 대해서 시간 성분인 코드 위상과 주파수 성분인 도플러를 신호 추적 모듈로 전달한다. GNSS 신호 획득 모듈에 대한 상세 동작 개형도는 Fig. 3과 같다.

신호 추적 모듈에서는 전달받은 코드 위상과 도플러를 코드/반송파 루프 필터에서 지속 추적하기 위한 변수들을 사용자로부터 입력 받는다. 각종 고정 루프들에 사용할 판별기 종류를 입력 받고, 신호 추적에 사용되는 데이터 길이, 루프 필터 차수, 필터의 잡음 대역폭, Early-Prompt-Late 나 VeryEarly-VeryLate 신호 생성 시 요구되는 Prompt 신호 기준 코드 간 칩 간격을 입력 받아 replica 신호를 지속적으로 생성하면서 코드의 시작 지점과 도플러 주파수를 정확히 추적해 나갈 수 있도록 설계하였다. GNSS 신호 추적 모듈에 대한 상세 동작 개형도는 Fig. 4와 같으며, 제안

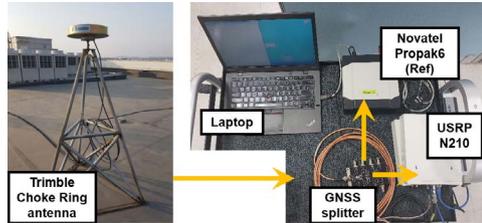


Fig. 6. The schematic diagram of the experiment and a photograph of the appearance of the experimental equipment.

Table 2. A total 5 scenarios for multi-constellation multi-frequency GNSS data collection.

Content	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Target GNSS signal	GPS L1C/A + Galileo E1B	BeiDou B1I	GPS L2CM	Galileo E5b1 + BeiDou B2I	GPS L5I + Galileo E5aI
Center frequency (MHz)	1575.42	1561.098	1227.6	1207.14	1176.45
Intermediate frequency (MHz)	1575	1561	1227.5	1207	1176.3
Sampling frequency (MHz)	5	5	2	10	10
Data collection time (sec)	60				
Correlation peak ratio threshold	2.5				

된 다중 위성군/다중 주파수 신호 획득 및 추적 모듈에 대한 전체적인 흐름도는 Fig. 5와 같다.

### 3. EXPERIMENT

본 논문에서 설계한 다중 위성군/다중 주파수 신호 획득 및 설계 모듈 작동 기능을 검증하기 위해 실제 데이터를 수신하여 실험을 수행하였다. 실험은 논문에서 대상으로 하는 L1/L2/L5 대역 내의 민간용 GPS/Galileo/BeiDou 신호 (GPS L1C/A, GPS L2CM, GPS L5I, Galileo E5B, Galileo E5bI, Galileo E5aI, BeiDou B1I, BeiDou B2I)에 대한 검증을 수행하였다. GNSS 데이터를 수집하기 위한 SDR 장비로는 Ettus Research 사의 USRP N210 모델을 사용하였으며, 이를 작동시키기 위한 Software Toolkit으로는 오픈소스 기반의 GNU Radio가 사용되었다. 실험에 사용된 USRP N210은 범용으로 사용 가능한 SDR 장비이므로 RF Front-end 내 특정 대역의 신호 증폭을 위한 별도의 저잡음 증폭기가 미탑재 되어 있다. 따라서, 안테나로부터 수신되는 미약한 GNSS 신호들을 증폭하기 위해서 약 14 dB 증폭이 가능한 GPS Networking 사의 ALDCBS1x8 GNSS 신호 증폭분배기를 별도로 설치하여 실험을 수행하였다. 실험은 한국항공대학교 연구실험동 옥상에 설치된 Trimble Choke Ring 안테나를 통해 2021년 1월 12일 16:12~16:19 사이에 총 5 가지의 데이터 수집 시나리오를 수립하여 1 대의 USRP N210으로 각 시나리오 별 GNSS 데이터들을 수집하였으며, 약 1분씩 데이터를 수집하는 과정에서 기준 시각에 동기하기 위해 OCXO나 고성능 원자시계와 같은 별도의 외부 oscillator는 사용하지 않고 자체 탑재된 2.5 ppm 정확도의 TCXO

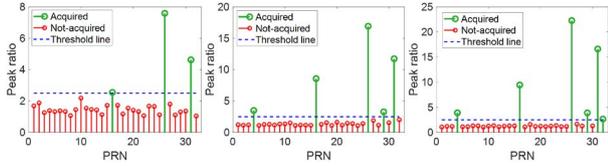


Fig. 7. Correlation peak ratio of GPS L1C/A signal on scenario 1 (left: 1 ms integration time; center: 10 ms integration time; right: 20 ms integration time).

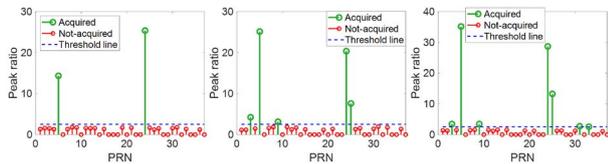


Fig. 8. Correlation peak ratio of Galileo E1OS (E1B:data+E1C:pilot) signal on scenario 1 (left: 4 ms integration time; center: 12 ms integration time; right: 20 ms integration time).

를 사용하였다. 또한, 수집된 데이터의 비교 분석을 위해 Novatel Propak6 모델을 별도의 기준군 수신기로서 사용하여 동시에 데이터를 수집하였다. Fig. 6은 실험 장비 개형도 및 외관 사진을 나타내며, Table 2는 SDR 장비로 GNSS 데이터를 수집하기 위한 총 5 가지의 시나리오를 나타낸다.

실험에 사용된 USRP N210 모델은 Host PC와 최대 1기가 비트 이더넷 방식으로 연결되며, 제품 규격상 16 bit I/Q 복소 데이터를 수신 시 최대 25 MHz의 샘플링 주파수 및 8 bit I/Q 복소 데이터 수신 시 50 MHz의 샘플링 주파수를 통해 이론적으로 데이터 수집이 가능하다 (Ettus Research 2021). 하지만, 실제로는 데이터 수집 시 20 MHz 이상의 샘플링 주파수를 사용하였을 때 간헐적인 데이터 오버플로우 현상이 발생하여 지속적으로 신호 추적을 수행하는 중에 신호가 끊겨 추적이 중단되기 때문에 20 MHz 이상의 높은 샘플링 주파수를 활용할 수 없었다. 따라서 GPS L5 및 Galileo E5a/E5b 신호를 온전히 수신하여 신호 획득 및 추적을 하는 데에 있어서, Nyquist 이론 대비 낮은 샘플링 주파수를 사용하는 언더샘플링을 통해 데이터를 수집하였다.

### 3.1 Signal Acquisition

각 시나리오 별로 GNSS 신호들을 수집한 후, Non-coherent 방식의 신호 획득을 통해 수행하였다. 신호 획득 모듈에서 코드의 누적 시간에 따라 보다 약한 감도 신호의 획득 가능성이 증가하기 때문에, 코드 누적 시간에 따른 상관 결과 변화를 검증하기 위한 분석을 수행하였다. GNSS 신호 메인 로브의 대역폭 이상으로 샘플링 한 경우와 대역폭 미만으로 샘플링 한 언더샘플링의 경우로 구분하여 검증하였다.

Figs. 7과 8은 메인 로브의 대역폭 이상으로 샘플링 한 시나리오 중 시나리오 1에서의 GPS L1C/A 신호와 Galileo E1 신호의 누적 시간 변화(1ms /10 ms /20 ms)에 따른 상관 척도 비율 변화 및 획득된 신호들을 각각 나타낸다. 항법메시지가 포함된 Galileo E1B 신호의 획득은 파일럿 신호로서 Galileo E1C 신호가 동일한

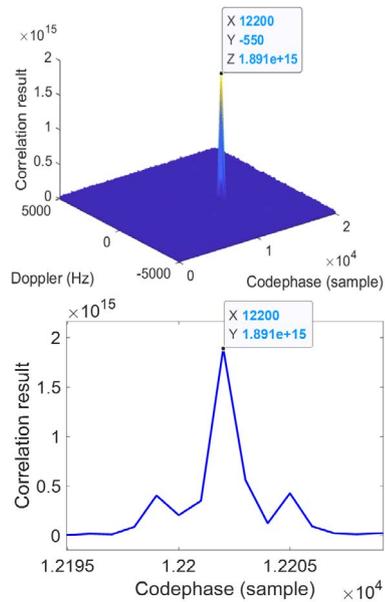


Fig. 9. Correlation result of Galileo E1OS PRN 24 signal on scenario 1 using 20 ms integration time (top: correlation result and the highest peak corresponding to codephase (12200 sample) and doppler (-550 Hz); bottom: correlation result around 12200 sample on -550 Hz doppler bin).

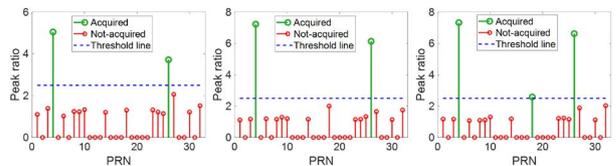


Fig. 10. Correlation peak ratio of GPS L5 (I:data+Q:pilot) signal on scenario 5 (left: 10 ms integration time; center: 15 ms integration time; right: 20 ms integration time).

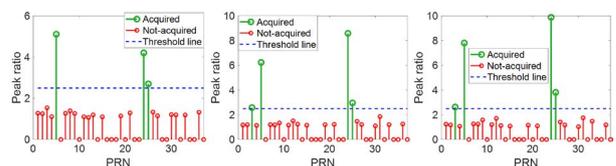
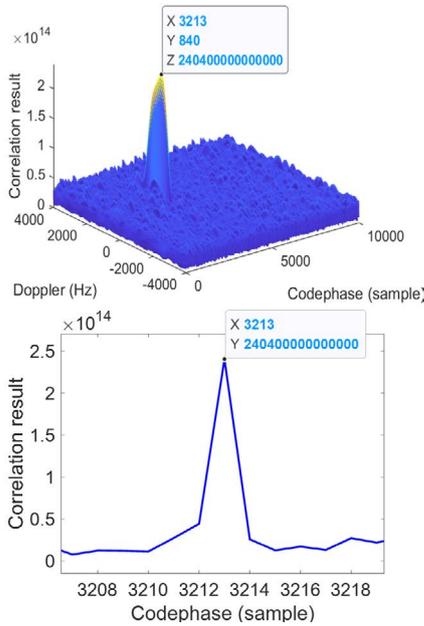


Fig. 11. Correlation peak ratio of Galileo E5a (I:data+Q:pilot) signal on scenario 5 (left: 10 ms integration time; center: 15 ms integration time; right: 20 ms integration time).

주파수 대역, 시작 지점 및 코드 길이를 가지고 Galileo 위성에서 동시 송출된다. 낮은 감도의 신호를 획득하기 위하여 CBOC 변조를 통해 Galileo E1B 및 E1C 신호의 합산인 Galileo E1OS replica를 생성하였으며, 이를 수집된 데이터들과 상관함으로써 Galileo E1 신호의 시작 지점인 코드 위상과 도플러 천이 주파수 성분을 획득하였다. Fig. 9의 위 그림은 Galileo E1 PRN 24 신호에 대해 20 ms 시간을 누적했을 때 상관 척도 값에서의 코드 위상, 도플러 주파수, 상관 결과를 3차원으로 나타낸 그림이며, 아래 그림은 상관 척도 값일 때의 해당 도플러 주파수 내에서 상관 척도 값 주위의 상관 결과를 나타낸 그림이다.



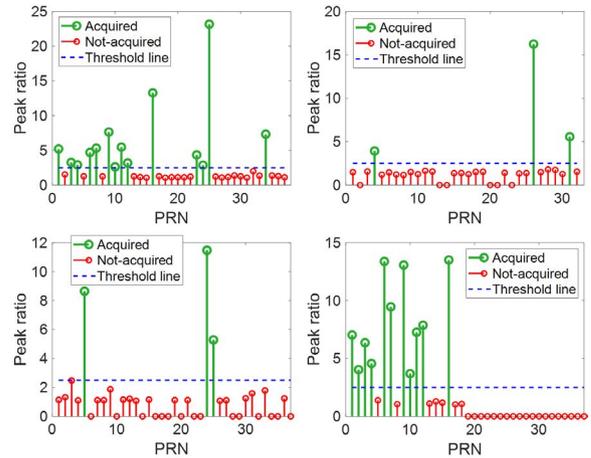
**Fig. 12.** Correlation result of GPS L5 PRN 4 signal on scenario 5 using 10 ms integration time (top: correlation result and the highest peak corresponding to codephase (3213 sample) and doppler (+840 Hz); bottom: correlation result around 3213 sample on +840 Hz doppler bin).

Figs. 10과 11은 언더샘플링 한 시나리오 5의 GPS L5I 신호와 Galileo E5aI 신호의 누적 시간 변화(10 ms /15 ms /20 ms)에 따른 상관 첨두 비율 변화 및 획득된 신호들을 각각 나타낸다. GPS L5I 신호와 Galileo E5aI 신호 모두 항법메시지가 포함되어 송출되는 I 채널과 더불어, 항법메시지는 미포함 되었으나 파일럿의 기능을 하는 Q 채널이 동시에 송출된다. 따라서, 약한 감도의 신호를 획득하기 위해 I 채널과 Q 채널의 코드를 하나의 replica로 생성한 후 상관을 수행하였다. Fig. 12의 위 그림은 GPS L5 PRN 4 신호에 대해 10 ms 시간을 누적했을 때 상관 첨두 값에서의 코드 위상, 도플러 주파수, 상관 결과를 3차원으로 나타낸 그림이며, 아래 그림은 상관 첨두 값일 때의 해당 도플러 주파수 내에서 상관 첨두 값 주위의 상관 결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 13은 Figs. 5~10에서 다루지 않은 시나리오 2~4에서 대상으로 하는 GNSS 신호들의 replica를 생성한 후 동일하게 20 ms를 누적하여 상관한 결과를 나타낸다. Fig. 13의 왼쪽 위 그림은 BeiDou B1I, 오른쪽 위 그림은 GPS L2CM, 왼쪽 아래 그림은 Galileo E5b, 오른쪽 아래 그림은 BeiDou B2I 신호의 상관 첨두 비율 및 신호 획득 임계 값을 초과한 신호에 대한 획득 여부를 나타낸다. Galileo E5b 신호는 Fig. 11과 마찬가지로 항법메시지가 담긴 Galileo E5b의 I 채널 신호와 파일럿 기능의 Q 채널 코드를 하나의 replica로 합산 및 생성하여 상관을 수행하였다.

Figs. 7~13을 통해 GNSS 신호의 메인 로브 대역폭 이상으로 샘플링한 경우는 비교적 낮은 감도 또한 신호를 감지 및 획득하였으나, 언더샘플링의 경우는 온전한 신호로 복원이 되지 못하기 때문에, 신호 상관 시 계산되는 적은 양의 샘플로 인해 누적 시간을 길게 하여도 일정 수준 이상의 감도를 가지는 신호만 획득할 수 있음을 확인하였다.

Table 3은 본 논문에서 설계한 신호 획득 모듈(Designed; Des)



**Fig. 13.** Correlation peak ratio of GNSS signals on scenario 2~4 using 20 ms integration time (upper left: BeiDou B1I on scenario 2; upper right: GPS L2CM on scenario 3; lower left: Galileo E5b (I+Q;pilot) on scenario 4; lower right:BeiDou B2I on scenario 4).

을 통해 총 5개의 모든 시나리오에서 20 ms 누적 시간으로 획득된 GNSS 신호들과 별도의 기준국(Reference; Ref)에서 수신한 해당 GNSS 신호들의 감도( $C/N_0$  [dB-Hz]) 비교를 나타낸다. 비교 결과, 기준국에서 수신 중인 GNSS 신호 대부분을 수신할 수 있었으나 기준국 수신기에서는 20 MHz의 샘플링 주파수로 상관을 수행하고 수신기 내부에 전용 증폭기들이 탑재되어 있는 반면 시나리오에서는 수 MHz에서 10 MHz의 비교적 낮은 샘플링 주파수로 상관을 수행하여 전반적인  $C/N_0$ 가 기준국에 비해 낮게 계산됨을 확인할 수 있다.

### 3.2 Signal Tracking

3.1에서 획득된 GNSS 신호들이 지속적으로 추적됨을 확인하기 위하여 검증 실험을 수행하였다. 3.1과 마찬가지로 GNSS 신호의 메인 로브 대역폭 이상으로 샘플링한 경우와 언더샘플링의 경우로 구분하여 검증하였다. GNSS 신호들의 주파수 대역 및 위성 움직임에 따라 신호 추적 관련 변수들을 이에 상응하도록 설정하였다. 각 시나리오에서 사용한 신호 추적 관련 변수들을 Table 4에 나타냈다.

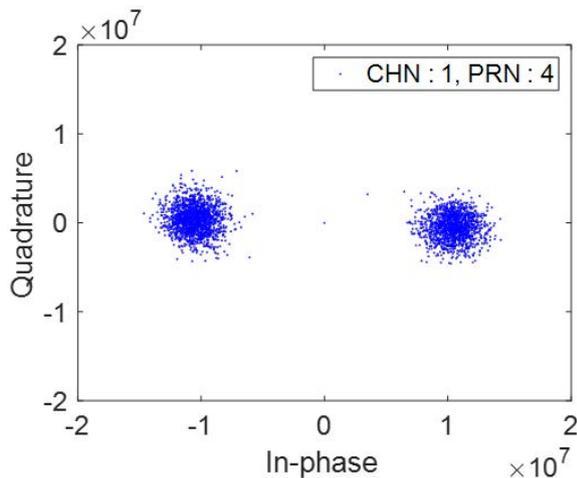
Figs. 14~16은 각각 순서대로 시나리오 3의 GPS L2CM PRN 4에 대한 신호 추적 I-Q (Inphase-Quadrature) 결과, 코드/반송파 판별기 결과값, 항법메시지가 포함된 I 채널의 Early-Prompt-Late 상관기 결과 값이다. Fig. 17은 시나리오 3에서 설계한 모듈에서 GPS L2CM 신호를 지속 추적한 도플러 주파수와 기준 수신기에서 추적한 도플러 주파수를 비교한 결과이다. USRP 및 기준 수신기에서 추적된 도플러 주파수들 간 일정한 크기의 편차가 발생한다. 실험 내 데이터 수집 장비인 USRP와 기준 수신기는 각각 별도의 oscillator를 탑재하고 있다. 기준 수신기는 항법메시지 해독 이후 산출된 사용자 위치 해를 통해 추정된 수신기 시계 오차를 보상하여 GPS 시간에 oscillator가 정확히 동기 되어 있는 반면, 실험에 사용된 USRP는 신호 추적만 수행하였기 때문에 기준 수신기와 동기되지 않고 자체 oscillator를 통해 편류하게 되므로 약 1분의 단 시

**Table 3.** Carrier-to-noise-density-ratio ( $C/N_0$ ; dB-Hz) comparison of acquired GNSS signal by designed module and reference station on total 5 scenarios.

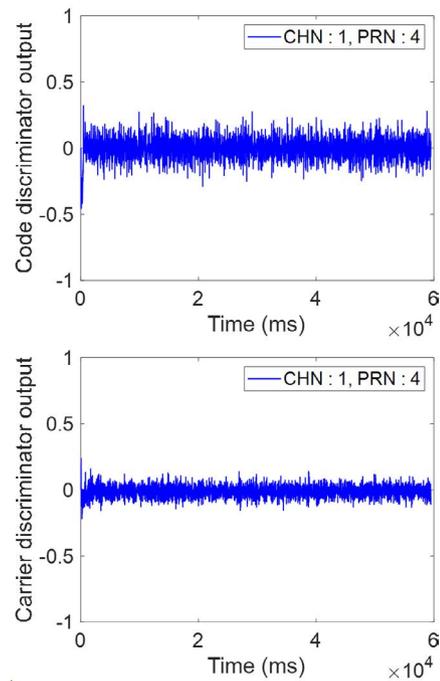
GNSS : PRN	SCN1		SCN2		SCN3		SCN4		SCN5					
	Des	Ref	GNSS : PRN	Des	Ref	GNSS : PRN	Des	Ref	GNSS : PRN	Des	Ref			
GPS 4	39.2	45.1	BDS 1	40.3	46.6	GPS 4	33.2	43.7	GAL 5	42.7	52.0	GPS 4	41.3	49.8
GPS 16	43.7	49.3	BDS 3	38.8	40.1	GPS 26	39.7	50.9	GAL 24	44.2	52.6	GPS 18	37.4	44.3
GPS 26	47.0	50.9	BDS 4	37.9	43.5	GPS 31	34.8	50.1	GAL 25	40.5	50.3	GPS 26	40.3	52.7
GPS 29	39.4	46.1	BDS 6	40.0	48.6	-	-	-	BDS 1	41.9	45.7	GAL 3	37.7	50.2
GPS 31	45.2	50.0	BDS 7	40.4	48.0	-	-	-	BDS 2	39.1	42.8	GAL 5	42.5	51.1
GPS 32	37.2	41.5	BDS 9	41.8	48.6	-	-	-	BDS 3	41.1	45.0	GAL 24	43.9	53.0
GAL 3	41.6	49.0	BDS 10	37.3	44.7	-	-	-	BDS 4	39.6	44.0	GAL 25	39.2	50.8
GAL 5	51.1	52.1	BDS 11	40.7	46.2	-	-	-	BDS 6	44.3	49.1	-	-	-
GAL 9	41.4	47.9	BDS 12	38.7	46.7	-	-	-	BDS 7	43.0	48.8	-	-	-
GAL 24	50.5	52.6	BDS 16	44.2	49.8	-	-	-	BDS 9	44.4	49.4	-	-	-
GAL 25	47.1	50.6	BDS 23	39.3	47.8	-	-	-	BDS 10	38.8	45.3	-	-	-
GAL 31	40.6	48.6	BDS 24	37.8	46.8	-	-	-	BDS 11	42.1	47.2	-	-	-
GAL 33	39.8	47.4	BDS 25	46.6	51.1	-	-	-	BDS 12	42.6	48.3	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	BDS 16	45.5	49.0	-	-	-

**Table 4.** Parameters for multi-constellation multi-frequency GNSS signal tracking on total 5 scenarios.

Content	Scenario 1		Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4		Scenario 5	
Target GNSS signal	GPS LIC/A	Galileo E1B	BeiDou B1I	GPS L2CM	Galileo E5bI	BeiDou B2I	GPS L5I	Galileo E5aI
DLL discriminator	EPL	EPL+ VE/VL			EPL			
PLL discriminator	two-quadrant arctangent	four-quadrant arctangent			two-quadrant arctangent			
DLL noise bandwidth (Hz)	4	5	6 (D1NAV) 1.2 (D2NAV)	1.5	6	6 (D1NAV) 1.2 (D2NAV)	6	5
PLL noise bandwidth (Hz)	30	10	50 (D1NAV) 15 (D2NAV)	3	50	50 (D1NAV) 15 (D2NAV)	50	40
Chip spacing	0.5	0.6 (VE/ VL) 0.2 (EPL)			0.5			
Correlation data (ms)				1				



**Fig. 14.** I-Q scatter plot of tracked GPS L2CM PRN 4 signal on scenario 3.



**Fig. 15.** Code (top) / Carrier (bottom) discriminator output of tracked GPS L2CM PRN 4 signal on scenario 3.

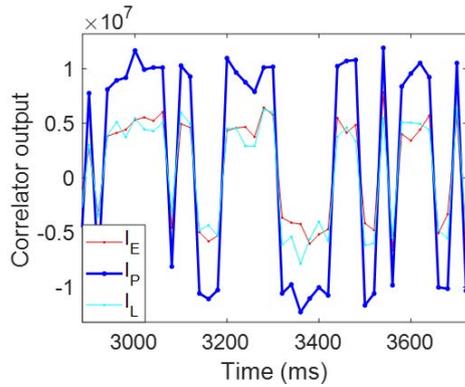


Fig. 16. Early-Prompt-Late correlator output of tracked GPS L2CM PRN 4 signal on scenario 3.

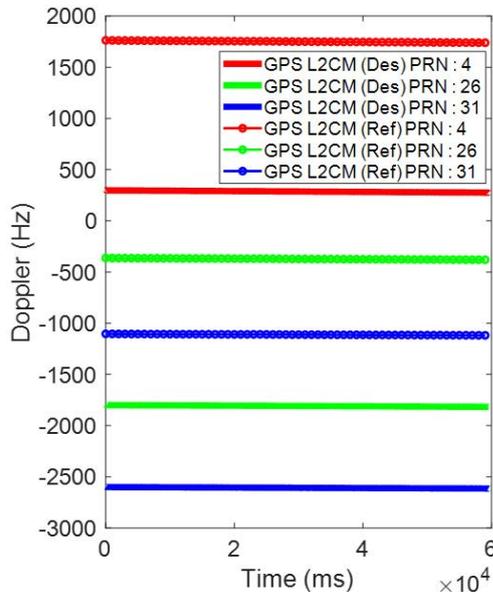


Fig. 17. Comparison of GPS L2CM doppler frequency tracked by the designed module (Des) and the reference station (Ref) on scenario 3.

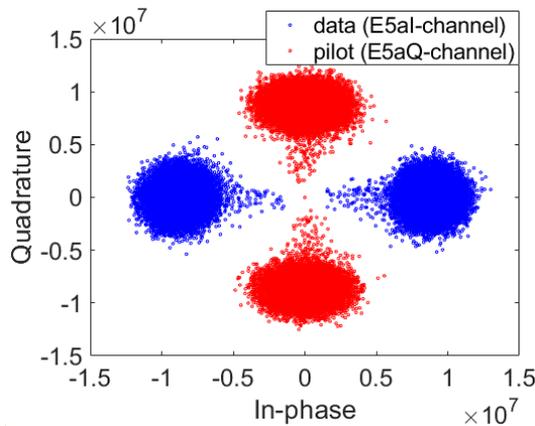


Fig. 18. I-Q scatter plot of tracked Galileo E5a(I:data, Q:pilot) PRN 24 signal on scenario 5.

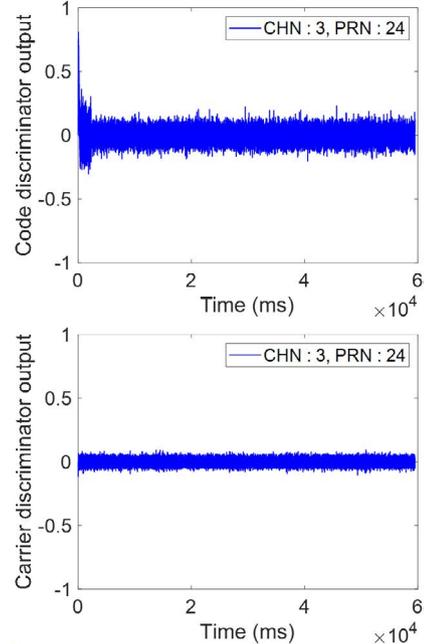


Fig. 19. Code (top) / Carrier (bottom) discriminator output of tracked Galileo E5aI PRN 24 signal on scenario 5.

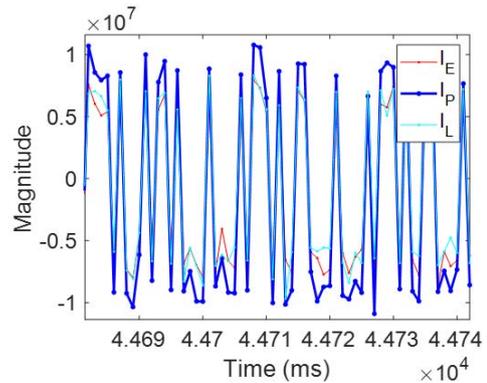


Fig. 20. Early-Prompt-Late correlator output of tracked Galileo E5aI PRN 24 signal on scenario 5.

간의 실험 결과에서는 일정한 크기의 주파수 편이 값으로 측정된다. 이와 같은 이유로, 실험에 사용된 USRP가 기준 수신기와 주파수 편이 변화량이 없기 때문에 USRP로 수집한 신호가 설계한 신호 추적 모듈을 통해 정상적으로 추적이 되었다고 판단할 수 있다.

언더샘플링으로 GNSS 데이터를 수집하는 시나리오 4의 Galileo E5b와 시나리오 5의 GPS L5 및 Galileo E5a의 경우, 이들의 메인 로브 대역폭보다 절반 이하의 낮은 샘플링 주파수가 사용된다. 이 때, Early-Prompt-Late replica를 생성 시에 샘플의 개수가 부족하기 때문에 생성하려는 정확한 칩 간격으로 replica를 생성하는 것이 불가능하다. 따라서, 신호 추적 루프 필터 내 상관기 값에서 정확하지 않은 Early-Prompt-Late replica를 상관하여 판별기 값에 일부 오차가 추가될 수 있으며, 이를 통해 정확한 코드의 시작 지점을 찾는 데에 모호함이 발생할 수 있다.

Figs. 18~20은 각각 순서대로 시나리오 5의 Galileo E5a PRN

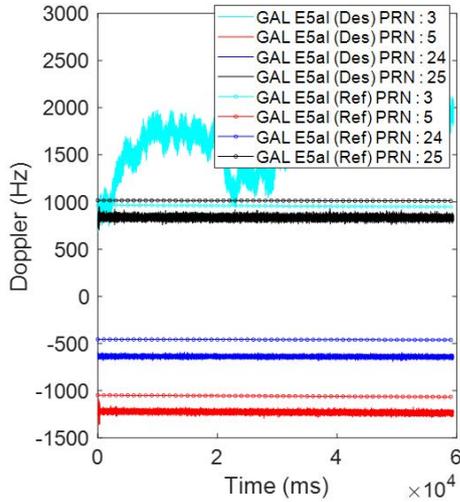


Fig. 21. Comparison of Galileo E5a doppler frequency tracked by the designed module (Des) and the reference station (Ref) on scenario 5.

24에 대한 데이터 신호 및 파일럿 신호의 추적 I-Q (Inphase-Quadrature) 결과, 코드/반송파 판별기 결과값, 항법메시지가 포함된 I 채널의 Early-Prompt-Late 상관기 결과 값이다. Fig. 21은 설계한 모듈과 기준 수신기에 의해 지속 추적된 도플러 주파수의 비교를 나타낸 그림이다. Fig. 17과 마찬가지로 두 장비 간 동기가 미수행되어 일정 크기의 주파수 편이가 발생하였다. 따라서, 기준 수신기와의 도플러 주파수 비교를 통해 USRP 수집 신호가 정상 추적이 되었음을 확인할 수 있으나 Galileo E5a PRN 3의 경우는 신호 획득 시 상관 척도 비율이 임계 값을 초과하였지만 언더샘플링으로 인해 정확한 코드의 시작점을 지속 추적하지 못하여 추적 실패함을 확인하였다.

#### 4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 유연성 및 재구성성을 가지는 SDR을 기반으로 다중 위성군 및 다중 대역 GNSS 신호를 탐지 및 획득하고 이를 지속적으로 추적하기 위한 연구를 수행하였다. 다양한 GNSS 신호들을 유연하게 수집하기 위해 수신기의 특성을 변경하고자 사용자로부터 별도의 입력을 받을 수 있도록 사용자 입력 모듈을 설계하였으며, 이를 통해 SDR 장비의 RF Front-end 처리 과정, 신호 획득 및 신호 추적의 전반적인 과정을 소프트웨어로 자동되도록 설계하였다. 실제 GNSS 신호를 수집하여 신호 처리 관련 변수들을 사용자로부터 입력 받아 PRN 생성, 누적 시간 적용, FFT 상관기를 소프트웨어로 구현하여 신호 획득 결과인 코드 위상과 도플러 측정치를 획득하였다. 이후, 연속적으로 추적되며 업데이트 되는 고정 루프 필터를 통해 EPL 및 VE/VL 상관기의 결과값을 계산하였다. 실험에 사용된 USRP N210의 20 MHz 이상 높은 샘플링 주파수로 안정적인 데이터 수집이 불가능한 성능 한계로 인해 GNSS L5 대역 신호는 Nyquist 대비 낮은 언더샘플링을 활용하였으나, 온전히 메인 로브를 샘플링한 GNSS L1 및 L2 대역의 신호는 동시간대 별도로 설치한 기준 수신기와 유사한 신호 획득 결

과를 보였으며 언더샘플링 된 GNSS L5 대역 신호는 기준 수신기와 비교하여 약 50 dB-Hz 이상의 강한 감도를 가지는 신호를 충분히 탐지, 획득 및 추적을 충분히 수행할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 수신하고자 하는 다중 위성군 다중 주파수 민간용 GNSS 신호들의 추적이 적절히 수행되었음을 확인하였다. 또한, 향후 추가될 KPS 신호와 더불어 미래 GNSS 신호들의 신호 획득 및 추적 가능성 또한 충분히 존재함을 확인하였다.

실제 GNSS 수신기에서는 신호 획득, 추적 이후 적절히 추적된 데이터 채널의 Prompt 상관 결과 값을 통해 항법메시지를 GNSS 신호에 맞게 복조하여 해독하고 이를 기반으로 한 사용자의 위치 해 계산 과정이 필수적이다. 따라서, 향후 연구로는 신호 추적 모듈 내 파일럿 신호를 적극적으로 사용 및 결합하여 향상된 감도로 신호 추적을 수행하는 부분과 이후 항법메시지 해독 모듈 및 이를 통한 사용자 위치 해 추정을 필수로 하여 Graphic Processing Unit 과 결합한 실시간 다중 위성군 다중 주파수 GNSS 수신기에 관한 연구가 진행될 예정이다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF2016RID1A1B01009881)에 의하여 수행되었음.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, W. J. Yoo; methodology, W. J. Yoo, L. Kim; software, W. J. Yoo, Y. D. Lee; validation, W. J. Yoo, T. G. Lee; formal analysis, W. J. Yoo, H. K. Lee; investigation, W. J. Yoo, Y. D. Lee; resources, H. K. Lee; data curation, W. J. Yoo, L. Kim; writing, W. J. Yoo; review and editing, H. K. Lee; supervision, H. K. Lee.

#### CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### REFERENCES

- Akos, D. M. 1997, A software radio approach to global navigation satellite system receiver design, PhD Dissertation, Ohio University
- Borre, K., Akos, D. M., Bertelsen, N., Rinder, P., & Jensen, S. H. 2007, A software-defined GPS and Galileo receiver: a single-frequency approach (Berlin: Springer Science & Business Media). <https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4540-3>
- Bhuiyan, M. Z. H., Söderholm, S., Thombre, S., Ruotsalainen,

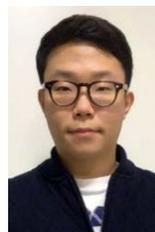
- L., & Kuusniemi, H. 2014, Implementation of a software-defined BeiDou receiver, in China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings, 1, pp.751-762, Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-54737-9\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54737-9_65)
- Ettus Research, USRP N210 datasheet [Internet], cited 2021 Feb 23, available from: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/>
- Fernández-Prades, C., Arribas, J., Esteve, L., Pubill, D., & Closas, P. 2012, An open source Galileo E1 software receiver, in 2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 1-8. <https://doi.org/10.1109/navitec.2012.6423057>
- Jovanovic, A., Mongrédien, C., Tawk, Y., Botteron, C., & Farine, P. A. 2012, Two-step Galileo E1 CBOC tracking algorithm: when reliability and robustness are keys!, International Journal of Navigation and Observation. <https://doi.org/10.1155/2012/135401>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2017, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, 3rd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Ko, K. S. 2010, A Basic Study on the Jamming Mechanism and Characteristics against GPS/GNSS Based on Navigation Warfare. Korea Institute of Navigation and Port Research, 34, 97-103. <https://doi.org/10.5394/kinpr.2010.34.2.097>
- Lee, H.-B., & Won, J.-H. 2020, A Structural Approach for Design of Matlab-based SDR-type Multi-frequency GPS Receiver Architecture, in 2020 IPNT conference, 11-13 Nov 2020, Yeosu, Korea, pp.345-348. <http://ipnt.or.kr/2020proc/4>
- Linty, N., Correia, E., Hunstad, I., & Kudaka, A. S. 2018, Installation and Configuration of an Ionospheric Scintillation Monitoring Station Based on GNSS SDR Receivers in BRAZIL, Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, 18, 8-24.
- Misra, P. & Enge, P. 2011, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance, revised 2nd ed. (Lincoln: Ganga-Jamuna Press)
- Park, K.-W., Seo, B.-S., Suh, J.-W., & Park, C. 2019, A method of Channel Selection for Multi-GNSS Receiver, in 2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), 22-25 Jan. 2019, Auckland, New Zealand, pp.1-3. <https://doi.org/10.23919/elincom.2019.8706422>
- Pany, T. 2010, Navigation signal processing for GNSS software receivers (Boston: Artech House Inc.)
- Söderholm, S., Bhuiyan, M. Z. H., Thombre, S., Ruotsalainen, L., & Kuusniemi, H. 2016, A multi-GNSS software-defined receiver: design, implementation, and performance benefits, Annals of Telecommunications, 71, 399-410. <https://doi.org/10.1007/s12243-016-0518-7>
- Song, Y.-J., Han, K., & Won, J.-H. 2020, Design of a USRP-based Parameterized GNSS/KPS Signal Processing, in 2020 IPNT conference, 11-13 Nov 2020, Yeosu, Korea, pp.349-353. <http://ipnt.or.kr/2020proc/8>
- Suzuki, T. & Kubo, N. 2014, GNSS-SDRLIB: An open-source and real-time GNSS software defined radio library, in Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Sep 8-12, 2014, Tampa, Florida, pp.1364-1375.
- Won, J.-H., Pany, T., & Hein, G. W. 2006, GNSS software defined radio, Inside GNSS, 1, 48-56.
- Yoo, W.-J, Kim, L., Lee, Y.-D., Lee, T.-G., & Lee, H.-K. 2020, Implementation of Multi-Constellation Multi-Band (L1/L2/L5) GNSS Signal Acquisition and Tracking Utilizing SDR, in 2020 IPNT conference, 11-13 Nov 2020, Yeosu, Korea, pp.405-408. [http://ipnt.or.kr/2020proc/73?sfl=wr\\_3](http://ipnt.or.kr/2020proc/73?sfl=wr_3)



**Won Jae Yoo** received the B.S. and M.S. degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University in 2014 and 2016, respectively. He is Ph.D. candidate at Navigation and Information Systems Laboratory (NISL), Korea Aerospace University. His research interests include Coarse-time positioning, Assisted GNSS, software GNSS receiver, Software Defined Radio and its applications.



**Lawoo Kim** is a Ph.D. candidate in Electronics and Information Engineering at Korea Aerospace University, South Korea. He obtained his B.S. and M.S. degrees from the same university in 2015 and 2017, respectively. His research focuses on urban positioning with multi-GNSS, INS, multi-sensors, and position-domain Hatch filter.



**Yu Dam Lee** received the B.S. and M.S. degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University in 2016 and 2018 respectively. He is a doctoral course student at Navigation and Information Systems Laboratory (NISL), Korea Aerospace University. His research

interests include geospatial information, visual-aided GNSS/INS navigation, and its applications.



**Taek Geun Lee** received the B.S. degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University in 2020. He is a Master course student at Navigation and Information Systems Laboratory (NISL), Korea Aerospace University. His research interests include multi-GNSS positioning, integrity, and its applications.



**Hyung Keun Lee** is a professor of Electronics and Information Engineering at Korea Aerospace University, South Korea since mid 2003. He obtained his Ph.D. in Electrical Engineering and Computer Science from Seoul National University, South Korea, in 2002. He was a Post- doctoral Research Fellow in Satellite Navigation and Positioning (SNAP) group at the University of New South Wales (UNSW), Australia, from 2002 to 2003. He was at the Central Research Institute, Hyundai Space and Aircraft Corporation, South Korea, from 1994 to 1998. His research interests include positioning and navigation systems, sensor networks, and avionics systems.