

Design of a Fully Reconfigurable Multi-Constellation and Multi-Frequency GNSS Signal Generator

ByungHyun Choi¹, Young-Jin Song¹, Subin Lee¹, Jong-Hoon Won^{2†}

¹Autonomous Navigation Lab., Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

ABSTRACT

This paper presents a multi-frequency and multi-constellation Global Navigation Satellite System (GNSS) signal generator that simulates intermediate frequency level digital signal samples for testing GNSS receivers. GNSS signal generators are ideally suited for testing the performance of GNSS receivers and algorithms under development in the laboratory for specific user locations and environments. The proposed GNSS signal generator features a fully-reconfigurable structure with the ability to adjust signal parameters, which is beneficial to generate desired signal characteristics for multiple scenarios including multi-constellation and frequencies. Successful signal acquisition, tracking, and navigation are demonstrated on a verified Software Defined Radio (SDR) in this study. This work has implications for future studies and advances the research and development of new GNSS signals.

Keywords: GNSS augmentation, SSR, PPP-RTK, GNSS reference station

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)은 그 가치와 중요성이 지속적으로 증가하고 있으며, 현재는 미국의 Global Positioning System (GPS), 유럽의 Galileo, 러시아의 GLONASS, 중국의 BeiDou navigation Satellite System (BDS) 등이 전세계를 대상으로 서비스되고 있다. Regional Navigation Satellite System (RNSS)으로는 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), 인도의 Indian Regional Navigational Satellite System (IRNSS) 등이 서비스 중에 있으며, 대한민국 또한 독자적으로 Korean Positioning System (KPS)이라는 지역 위성 항법 시스템을 개발 중에 있다 (Ministry of Science and ICT 2021).

GNSS 신호 현대화를 통한 신호 확장은 항법 정확도 향상 등의 장점이 있으나, 제한된 신호 대역의 물리적인 한계로 인한 간

섭 가능성이 존재하며, 이에 따라서 새로운 신호를 설계할 때, 위성 발사 후 재교정의 어려움이 있으므로 사전에 설계하려는 신호와 기존 신호들 간의 정확한 분석과 검증이 필수적으로 요구된다 (Dong et al. 2004, Julien et al. 2004, Lim et al. 2008).

따라서 GNSS 신호 생성 시뮬레이터의 사용이 요구되며, 이는 하드웨어 기반의 시뮬레이터와 소프트웨어 기반의 시뮬레이터로 나뉜다. 하드웨어 기반의 시뮬레이터는 제조사에서 제공하는 Application Specific Integrated Circuit과 같은 하드웨어를 이용하면 성능면에서는 장점이 있지만, 새로운 신호의 추가나 기능의 변경을 위해서는 새롭게 하드웨어를 제작하여야 하기 때문에 비용적인 측면에서는 단점이다. 특히 KPS와 같이 현재 신호 설계가 완료되지 않은 경우 하드웨어 기반 시뮬레이터보다는 추가적인 비용 소모가 필요하지 않으며, 다양한 시나리오와 신호 확장 및 유연성에 대한 장점이 명확히 존재하는 소프트웨어 기반의 시뮬레이터 개발이 절실히 요구된다.

국외의 주요한 시뮬레이터를 보면 NavSim, Galileo Receiver ANAnalysis and Design Application (GRANADA), Galileo System Simulation Facility (GSSF) 등이 있다 (German Aerospace Centre Institut of Communications and Navigation 2023, The Navigation Applications and User Services Office of the European Space Agency 2023, Demios Space 2023). NavSim은 독일 정부의 후원으로 독일항공우주센터에서 개발하였고,

Received Jun 21, 2023 Revised Jul 14, 2023 Accepted Aug 02, 2023

†Corresponding Author

E-mail: jh.won@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7406 Fax: +82-32-863-5822

ByungHyun Choi <https://orcid.org/0000-0002-7769-0586>

Young-Jin Song <https://orcid.org/0000-0002-0253-4802>

Subin Lee <https://orcid.org/0000-0001-8807-4327>

Jong-Hoon Won <https://orcid.org/0000-0001-5258-574X>

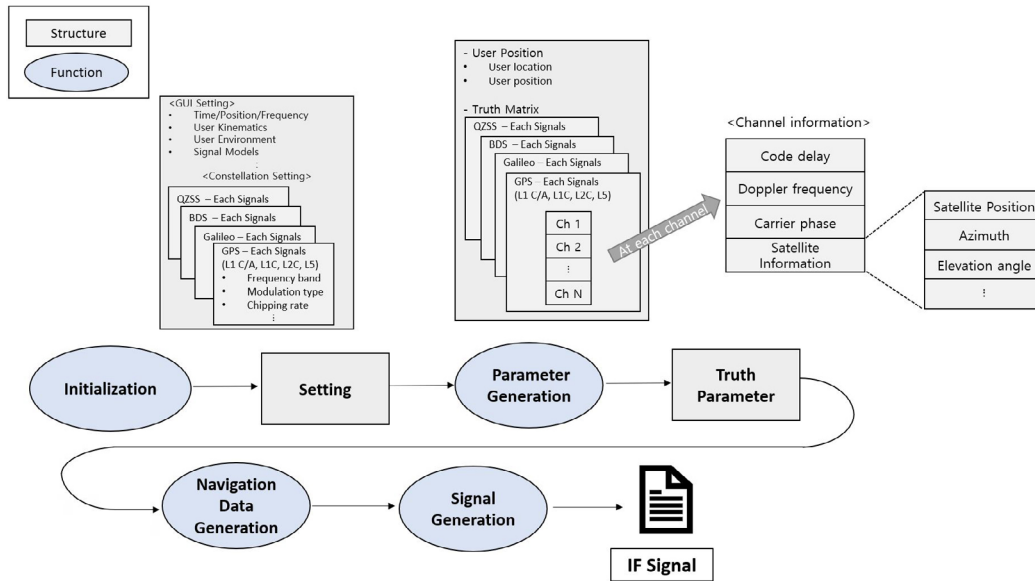


Fig. 1. An example of overall data structure of reconfigurable GNSS signal generator (e.g., multi-constellation L1 case).

GRANADA은 스페인의 Deimos Space에 의해 개발된 갈릴레오 시뮬레이션 툴이다. 또한 갈릴레오 환경에 다양한 시뮬레이션이 가능한 GSSF는 European Space Agency (ESA)의 지원을 받아 개발되었다 (Kim et al. 2009). 다만 이러한 소프트웨어 기반 시뮬레이터는 특정 GNSS 신호들에 대해서만 생성 가능하거나, Custom 형태의 신호 생성을 위한 다양한 신호 파라미터 설정 변경이 어려운 형태로 구성되어 있다는 한계가 있다.

이와는 별도로 국내에서도 KPS 후보 신호를 설계하기 위해 신호설계 매개변수 변경에 따라 다양한 Figure of Merits (FoM)을 평가하는 형태의 수치적/해석적 시뮬레이터가 개발되었다 (Shin et al. 2019, Han & Won 2019). 이는 새로운 신호의 설계단계에서 단일 위성 신호의 성능 및 특성을 평가하는 것으로서 복수의 위성의 신호를 생성, 처리, 평가하여 최종적으로 항법 성능을 평가할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필요하다.

본 논문은 Multi-constellation/Frequency를 지원하며 재구성 (reconfigurability) 가능한 특성을 포함하는 형태의 GNSS 신호 생성 시뮬레이터를 제시한다. 해당 GNSS 신호 생성기는 소프트웨어 기반으로 설계되어 Graphic User Interface (GUI) 부에서 사용자 입력 파라미터들을 입력 받아 GNSS 신호를 중간주파수 (Intermediate Frequency, IF) 수준에서 모사하여 생성한다. 이는 Multi-constellation/Frequency와 신호 특성에 대한 재구성 가능한 특성을 반영하여 다양한 환경조건 및 신호 파라미터를 변경하여 원하는 GNSS 신호를 자유롭게 생성 가능하다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 GNSS 신호 생성기의 GUI 및 구조와 이에 적용된 재구성 가능 특성에 대해 설명한다. 3장에서는 신호 생성기를 통한 위성 위치 계산과 시변 파라미터 생성과정 및 신호지연 반영 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 항법 메시지 및 IF 신호 생성과정에 대해 소개하며, 5장에서는 이를 기반으로 생성한 신호에 대한 시나리오와 신호는 Radio Frequency (RF) 수준 신호에 대한 Software Defined Radio (SDR)로 처리한 추적 및 Single Point Positioning (SPP) 결과를

제시한다. 6장에서는 이에 대한 결론을 제시한다.

2. RECONFIGURABILITY

2.1 Total Structure

Fig. 1은 GNSS 신호 생성기의 전체 구조의 일례로, L1 대역에서의 다중 위성군을 지원하는 형태를 보인다. 이는 다중 주파수의 확장이 가능한 형태로 구현되었으며, 사용자의 GUI 입력을 바탕으로 GNSS 파라미터 로드부에서 각 신호에 해당하는 파라미터 값을 불러오게 된다. 이를 바탕으로 신호 생성에 필요한 시변 파라미터인 코드 지연, 도플러 주파수, 반송파 위상 값을 얻게 된다. 이후, 각 신호 별로 해당하는 항법 메시지를 생성한 뒤 각 서비스(채널) 별 기저 대역 신호를 생성하며, 이를 이용하여 중간주파수 대역의 항법 신호가 생성된다. 최종적으로 각 중심주파수 대역 별로 하나의 파일로 합쳐져 생성된다.

2.2 Input Configuration File

본 연구에서 적용된 재구성 가능 특성은 GUI 입력부 및 GNSS 파라미터 로드부에 configuration 입력 파일 형태로 적용된다. 이는 소스 코드 형태로 구성되어 Table 1에 나열된 변조기법/중심주파수/항법 메시지 종류 등의 다양한 신호 관련 파라미터들을 변수로 하는 구조체로 구성되며, 별개의 configuration 입력 파일을 통해 구조체 내 변수를 설정하여 임의의 특정 신호에 대한 신호생성기를 구현한다. 즉, GNSS 신호설계 및 수신기 설계 기술에 숙련된 사용자는 configuration 입력 파일을 직접 수정하여 특정 신호에 대한 신호 생성이 가능하다. 단, 일반 사용자의 경우 사용 복잡성을 단순화하여 편의성을 증대하고자 기존 GNSS 신호에 대한 선택 사용만을 가능하도록 설계하였다.

Table 1. Reconfigurable characteristics of GNSS signals.

Parameter	Variable name	Details
GNSS signal parameter	Center frequency	L1/L2/L5/S or any frequency
	Signal component	Data/Pilot
	Modulation	BPSK/QPSK/BOC (sin, cos) / MBOC (TM, QM, C)
	Chipping rate [Mcps]	Any rate
	Primary code length[chips]	Any length (only existing signal)
	Secondary code length [bits]	Any length (only existing signal)
	Navigation message type	Any message (only existing signal)
	Data rate	Any
	Signal power split	Any

Table 2. GUI input parameters of GNSS signal generator.

Parameter	Variable name	Details
GUI input	UTC time	Signal generation start/end/sampling interval time [s]
	User location	Receiver location (static)
	Rx antenna height	Antenna of receiver height [m]
	SV elevation mask	SV cut-off angle [deg]
	Sampling frequency / IF	Sampling frequency / IF of generating signal [Hz]
	Scenario definition	Open sky/1 wall/2 wall scenario
	Reflection surface	Dry / Medium wet / Wet ground
	Ionosphere model	No delay / Klobuchar model
	Troposphere model	No delay / Saastamoinen model / Collins model
	Multipath model	No delay / Geometry-based model
	Interference model	No interference / Continuous wave / Band limited interference
	C/N ₀ model	C/N ₀ GNSS budget link / 3D elevation
	Scintillation mode	On/Off
Gaussian noise adds	On/Off	

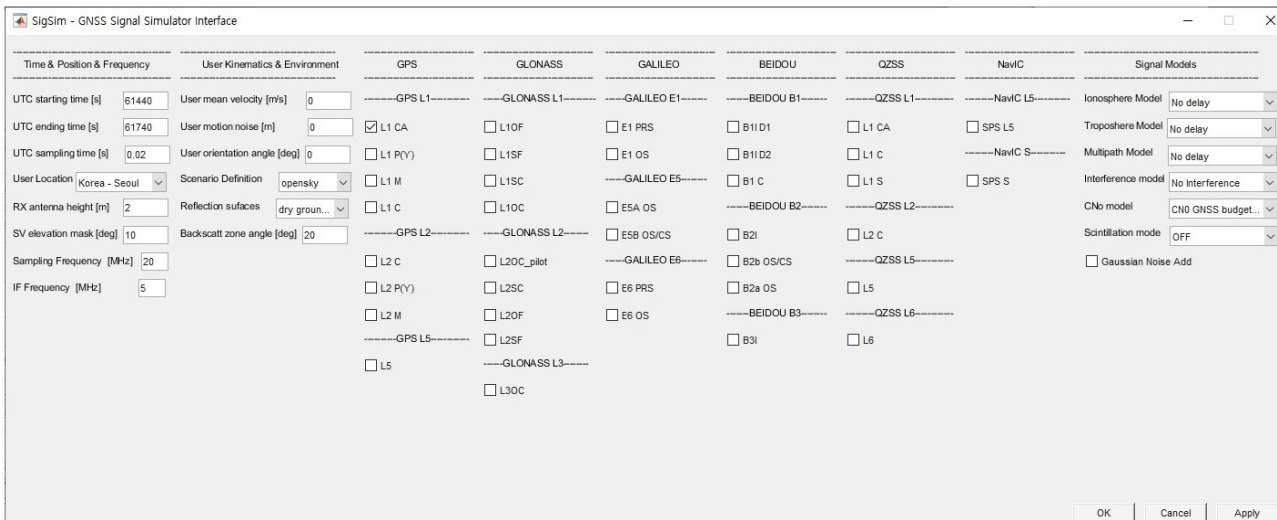


Fig. 2. Graphic user interface of GNSS signal generator.

2.3 GUI Input

Fig. 2는 본 논문에서 제시하는 신호생성기의 재구성 특성을 이용하여 기존 GNSS 신호를 생성하도록 세팅하여 구현한 GNSS 신호 생성기의 GUI 입력부이다. 이는 신호 관련 파라미터 외에 신호 생성 시간, 샘플링 주파수와 같은 수신기 설계 관련 파라미터와 사용자 위치, 동적 특징, 이온층 및 대류권 지연 모델 등과 같은 사용자 파라미터들을 자유롭게 변경 가능한 재구성 가능 특성을 포함한다. 이러한 신호 생성 관련 파라미터들은 적정 범위 내의 값을 설정하여야만 적절한 신호가 생성되므로 설계자는

파라미터 설정 시에 신호 별 특성을 고려하여야 한다. Table 2는 GUI 입력에서 변경 가능한 파라미터들에 대한 설명들이다.

3. GENERATION PROCESS

3.1 Satellite Position Calculation

본 연구에서 개발한 신호 생성기에서의 위성의 위치 계산은 주어진 신호의 Almanac 궤도 정보를 이용하여 이루어진다.

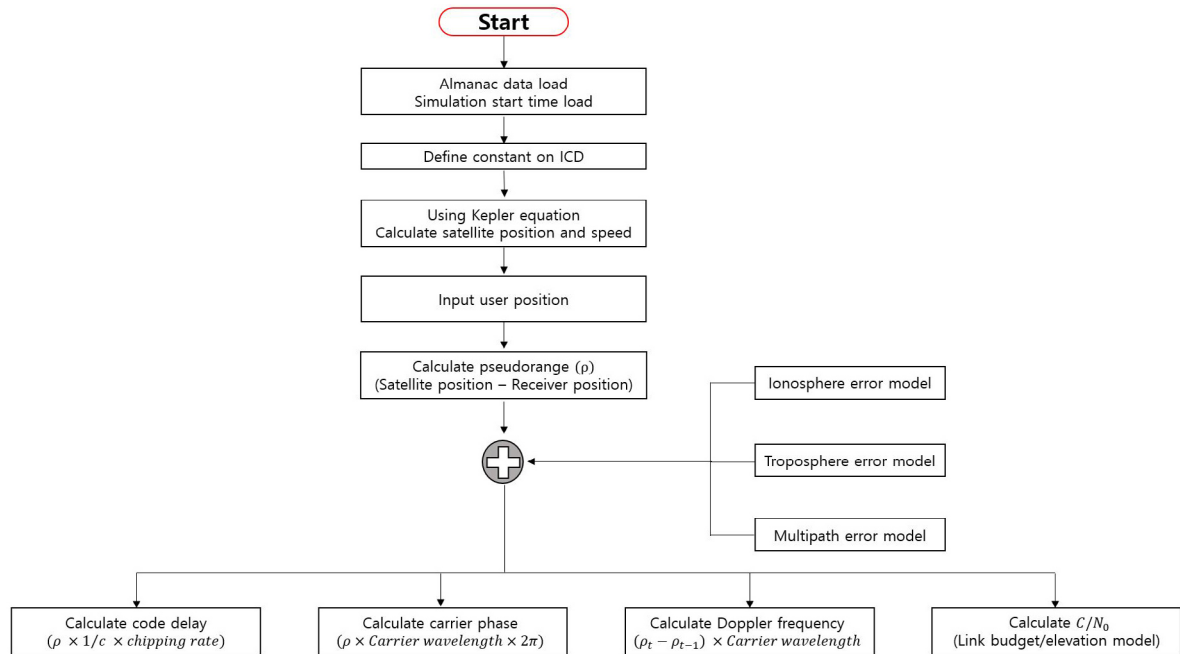


Fig. 3. Pseudorange calculation and truth parameter generation process.

Almanac 파일은 6개의 Keplerian 요소 (장반경, 이심률, 궤도경사각, 근지점인수, 승교점 적경, 평균근점이각) 및 week number, satellite health 등의 정보를 포함하고 있다. 이러한 Keplerian 정보를 이용하여 위성의 현 시간에서의 위치를 얻을 수 있다.

실제 신호에서의 Almanac 궤적 정보는 항법 메시지에 포함되어 위성으로부터 방송되며, 해당 신호 생성기에서는 각 신호별로 사전에 저장된 Almanac 파일을 이용하였다. 이 과정은 Fig. 3과 같다. SDR에서도 해당 데이터 복조 과정을 통해 항법 해를 찾는 과정에서 궤적 정보를 추출하여 같은 방법을 통해 위성 위치를 계산한다.

3.2 Time-varying Parameter Generation

이번 절에서는 IF 신호 생성에 필요한 코드 지연, 도플러 주파수, 반송파 위상과 C/N_0 값을 시변 파라미터 형태로 구하는 과정에 대해 설명한다. Eq. (1)은 위성과 사용자 위치 간의 거리를 나타낸다 (Kaplan & Hegarty 2006).

$$\rho = \sqrt{(x^s - x_u)^2 + (y^s - y_u)^2 + (z^s - z_u)^2} + d_{ion} + d_{tro} + d_{mp} + B \quad (1)$$

여기서 (x^s, y^s, z^s) 와 (x_u, y_u, z_u) 는 각각 Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) 좌표계에서의 위성위치 [m]와 사용자의 위치 [m]를, d_{ion}, d_{tro}, d_{mp} 값들은 각각 이온층, 대류권, 다중경로 지연을, B는 거리 환산 시계 오차 [m]를, ρ 는 의사거리 [m]를 나타낸다. 이 때 측위에서 이용하는 일반적인 의사거리 모델과는 다르게 측정 잡음 오차항이 제외된다. 이는 측정 잡음 오차항은 나중에 나오는 신호 모델에서 고려하기 때문이다.

위와 같이 얻어진 의사거리를 통해, Eq. (2)와 같이 시변 파라

미터 값들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_t &= \rho_t \times \frac{1}{c} \times R_c \\ \phi_t &= (\rho_t \times 1/\lambda_{carrier}) \times 2\pi \\ f_{d,t} &= (\rho_t - \rho_{t-1}) \times 1/\lambda_{carrier} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\tau_t, \phi_t, f_{d,t}$ 는 각각 시간 t 에서의 코드 지연 [m], 반송파 위상 [rad]과 도플러 주파수 [Hz] 값을 의미하며, c 는 빛의 속도 (299,792,458 [m/s]), R_c 는 칩 변화율 [cps], $\lambda_{carrier}$ 는 반송파 파장 [m]이다.

본 연구에서 적용한 C/N_0 링크 버짓 모델은 Eq. (3)과 같다. 위성에서 송신되는 신호는 지구까지 오는 동안의 매질에 의한 손실이 발생한다. 이후 수신기 RF front end와 지상 환경 조건 등에 의한 손실이 추가로 발생하게 된다 (Joseph 2010).

$$\begin{aligned} C/N_0 &= C - N_0 + G - N_f - L, \\ C &= C/N_0 + Margin + N_0 - G + N_f + L \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 C/N_0 는 pre-correlation C/N_0 [dB-Hz] 값, C는 수신된 신호 전력 [dBW], N_0 는 Noise floor [dBic], G는 안테나 이득, N_f 는 noise figure, L은 correlation implementation loss 값이다. 이 때 수신된 신호 전력 C는 위성 탑재체 송신부 전력 및 위성-수신기 간 거리에 따른 함수이다.

3.3 Delay Model

이번 절에서는 GNSS 신호 생성기에서 사용되는 지연 모델을 설명하며, 크게 거리에 따른 신호 지연과 속도에 따른 코드 도플러 적용 방법에 대해 소개한다.

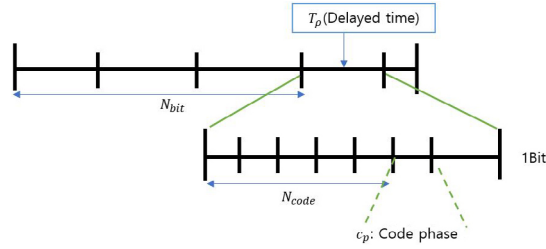


Fig. 4. Time delay model.

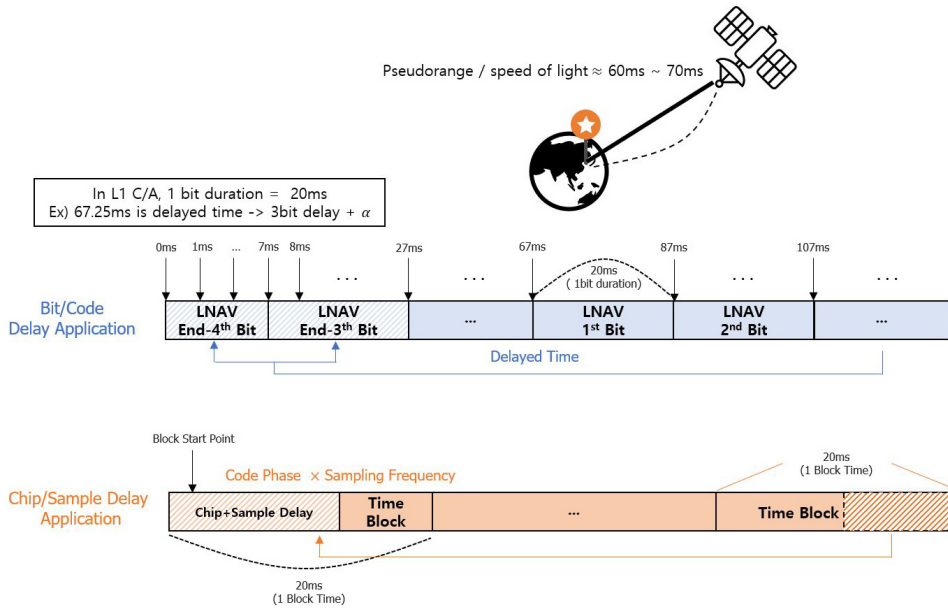


Fig. 5. Delay model application in the signal generator (e.g., GPS L1 C/A).

3.3.1 Signal delay on distance

일반적인 중궤도 위성에서의 신호가 위성에서 송신 후 수신기로 수신되기까지의 도달 지연 시간은 대략 60 ms ~ 70 ms 이내이다. 이는 매우 짧은 시간이나 항법 메시지 지연 등에 영향을 끼치므로 이를 신호 생성 과정에서 반영하여야 한다. 본 연구에서 개발한 GNSS 신호 생성기에서는 Eq. (4)와 같이 위성과 수신기 간 거리에 따른 전파지연을 비트 수, 코드 수, 칩 수 그리고 코드지연 위상 값으로 변환한다.

$$T_p = \rho/c = n_1 \cdot N_{bit} + n_2 \cdot N_{code} + c_p \quad (4)$$

여기서 T_p 는 전파 지연시간을 나타내며, ρ 는 의사 거리 [m], c 는 빛의 속도 (299,792,458 [m/s]), N_{bit} , N_{code} 는 비트 수와 코드 수를 의미하고, n_1 , n_2 는 그에 대응하는 계수이며, c_p 는 코드지연 위상 값을 의미하고, 이는 GNSS 신호 종류마다 다르다.

이를 통한 신호 지연 시간 반영은 본 GNSS 신호 생성기에서 두 가지 방법을 통해 적용된다. 먼저 비트 지연시간 및 코드 지연시간을 계산하여 이에 따른 항법 메시지 지연량을 계산하여 PRN 코드와 항법 메시지를 곱하는 과정에서 지연량이 반영된다. 이

후 나머지 code phase 만큼의 지연량을 반영시키기 위해서 샘플링 주파수와 나머지 지연량인 code phase 값을 곱한다. 이는 Fig. 4와 같이 나타낸다. 이때 각각의 N 의 길이는 신호 별 비트, 코드 시간이므로, 신호 별, 샘플링 별, 주파수 별로 해당 길이는 다르게 적용된다. 예를 들어, GPS L1 C/A에서는 비트, 코드 간격이 20 ms, 1 ms가 된다.

해당 거리 지연 알고리즘은 본 신호 생성기에서는 Fig. 5와 같이 적용된다. 이는 GPS L1 C/A의 예로, 먼저 지연 시간을 계산하여 해당 시간만큼의 항법 메시지 비트를 지연시켜준다. 이 때의 지연 시간 동안 항법 메시지 비트는 미리 생성된 항법 메시지의 마지막 부분에서 가져온다. 남은 지연 시간만큼의 코드 지연량과 code phase 값은 해당 지연량 만큼의 샘플을 계산하여 첫 블록에서 지연시키고, 마지막 블록에서 보상하는 방법을 적용한다. 이러한 지연 알고리즘은 secondary code에서도 마찬가지로 적용된다. Pilot 신호에서 secondary code의 지연량을 통해 초기의 delay를 추정하는 경우(예: BDS B1C)에는 항법 메시지 지연 알고리즘과 동일하게 적용하였으며, Secondary code가 단순히 data 신호에 반영되는 경우에는 비트 지연량을 제외한 나머지 지연량만을 반영하게 된다.

Table 3. Navigation message types and encoding/parity check algorithms of GNSS signals.

Navigation message	Signal name	Encoding / Parity check algorithm
LNAV	GPS L1 C/A, QZSS L1 C/A	X / XOR parity check
CNAV	GPS L2C, L5, QZSS L2C, L5	Convolutional encoding / CRC
CNAV-2	GPS L1C, QZSS L1C	BCH(51,8), LDPC(1200,548) / CRC
FNAV	Galileo E5a	Convolutional encoding / CRC
INAV	Galileo E1B, E5b	Convolutional encoding / CRC
D1	BDS B1I, B2I, B3I	X / BCH serial convert encode parity
D2	BDS B1I, B2I, B3I	X / BCH serial convert encode parity
B-CNAV1	BDS B1C	BCH(21,6+51,8), 64-ary LDPC(200,100+88,44) / CRC
B-CNAV2	BDS B2a	64-ary LDPC(96,48) / CRC
B-CNAV3	BDS B2b	64-ary LDPC(162,81) / CRC
IRNSS	NavIC L5, S	Convolutional encoding / CRC

3.3.2 Code Doppler

자연 모델 중 다른 하나로, 도플러 시프트에 의해 발생하는 코드 주파수 변동이 만들어내는 코드 도플러가 존재한다. 이때, 의사거리에 의한 도플러 주파수 값은 Eq. (5)와 같이 반영할 수 있다 (Foucras et al. 2014).

$$f_{cd} = R_c \times \frac{f_L + f_d}{f_L} \Leftrightarrow T_{cd} = T_c \times \frac{f_L}{f_L + f_d} \quad (5)$$

여기서 f_d 는 도플러 주파수 [Hz], f_L 은 L 대역에서의 중심 주파수 [Hz], R_c 는 칩 변화율 [cps]이다. f_{cd} 는 코드 도플러 값이며, T_{cd} 는 칩 간격 [sec]으로 $1/f_{cd}$ 와 같이 주파수의 역수 값이다. 해당 수식에서 T_c 는 로컬 확산 코드를 이용하여 알고 있는 값이며, 따라서 T_{cd} 의 계산이 요구된다. 양수 코드 도플러 주파수는 확산 코드 주기를 수축시키며 ($T_{cd} < T_c$), 반대로 음수 코드 도플러 주파수는 확산 코드 주기가 확장되게 한다 ($T_{cd} > T_c$).

본 연구에서는 해당 코드 도플러 반영을 부반송파 주파수와 코드 칩 변화율을 시간에 따라 바꿔주는 방법을 통해 적용한다. 따라서, 음수 도플러는 코드 칩 변화율을 높이며 부반송파 주파수가 높아진다. 반면 양수 도플러는 코드 칩 변화율을 낮추며 부반송파 주파수가 낮아지게 된다. 이를 통해 변조 과정에서의 시간에 따라 Eq. (6)과 같이 변화하는 형태로 적용된다.

$$R_c = R_{c_origin} \times \frac{(f_{carrier} - f_d)}{f_{carrier}}$$

$$f_{sub} = f_{sub_origin} \times \frac{(f_{carrier} - f_d)}{f_{carrier}} \quad (6)$$

여기서 R_c 는 칩 변화율 [cps], R_{c_origin} 은 초기 원본 칩 변화율 [cps], $f_{carrier}$ 는 캐리어 주파수 [Hz], f_{sub} 는 부반송파 주파수 [Hz], f_{sub_origin} 은 초기 원본 부반송파 주파수 [Hz]이다.

4. SIGNAL GENERATION

신호 생성기를 통해 생성되는 중간 주파수 대역의 i번째 위성의 시각 k에서의 IF 신호 모델은 Eq. (7)과 같은 형태를 가진다. 본 연구에서 소개하는 GNSS 신호 생성기에서도 마찬가지로 해당 수식을 이용하여 신호를 생성하기 위해 Eq. (2)와 같이 얻어진

코드 지연, 도플러 주파수, 반송파 위상 값을 이용하며, 이는 변조 방식 별로 약간의 차이가 존재한다.

$$r_i(k) = \sqrt{2P_{I,I}(k)} \cdot C_i(kT_s - \tau_i(k)) \cdot D_i(kT_s - \tau_i(k)) \cdot \cos\left\{2\pi\left(f_{IF} + f_{d,i}(k)\right)kT_s + \phi_i(k)\right\}$$

$$+ \sqrt{2P_{I,Q}(k)} \cdot C_q(kT_s - \tau_i(k)) \cdot D_q(kT_s - \tau_i(k)) \cdot \sin\left\{2\pi\left(f_{IF} + f_{d,i}(k)\right)kT_s + \phi_i(k)\right\} + n_i(k) \quad (7)$$

여기서 I,Q는 Inphase, Quadrature를 의미하며, P는 신호 파워, C는 PRN 코드, D는 항법 메시지, f_{IF} 는 중간주파수 [Hz]이다. T_s 는 신호의 샘플링 시간 간격 [sec]을 나타낸다 (Betz 2015). 이때의 반송파는 개별 GNSS 신호 규격에 맞게 cos, sin 또는 cos + sin으로 할당되며, data, pilot 채널의 유무에 따라 D가 결정된다.

4.1 Binary Navigation Message Generation Process

본 연구에서 구현된 항법 메시지의 인코딩/패리티 체크 알고리즘의 종류는 Table 3과 같으며, 이는 각 신호 별 Interface Control Document (ICD)를 참고하여 Almanac 정보를 바탕으로 실제 신호와 동일하게 구현하였다. 항법 메시지는 시각정보, 궤도정보, 위성시계 정보, 타 위성 궤도 정보 등 다양한 정보들로 구성되며 이를 ICD 규격에 맞게 이진 비트(±1)로 변환한다. 이를 기반으로 오류 정정 부호를 생성하여 규정된 곳에 위치시키며 항법 메시지별 적절한 인코딩을 통해 이진 항법 메시지 시퀀스를 생성한다. 이후 이를 실제 신호 디코딩이 가능한 SDR을 이용하여 검증하였다.

4.2 IF Signal Generation

본 연구에서 개발된 GNSS 신호 생성기에서 출력되는 IF 항법 신호 구조의 한 예 (L1 대역)를 Fig. 6에 나타내었다. 이는 각 중심주파수 별 하나의 파일로 Linear-sum 과정을 통해 생성된다. 먼저, 각 신호의 서비스(채널)별로 두 개의 컴포넌트 (Inphase, Quadrature)를 기저 대역에서 생성한 후 IF 신호 생성 과정에서 채널 별로 Linear-sum을 통해 하나의 IF 신호로 생성된다. 이후, 같은 주파수 대역을 사용하는 신호 별로 각각의 IF 신호가 다시 Linear-sum 과정을 통해 합쳐 만들어지는 형태로 구현하였다. L2/L5 대역 등의 신호들도 주파수 별 Linear-sum 과정을 통해 각각 하나의 파일로 생성되는 형태로 구성된다.

이 때의 채널의 개수는 신호 생성 시간대의 가시 위성의 수와

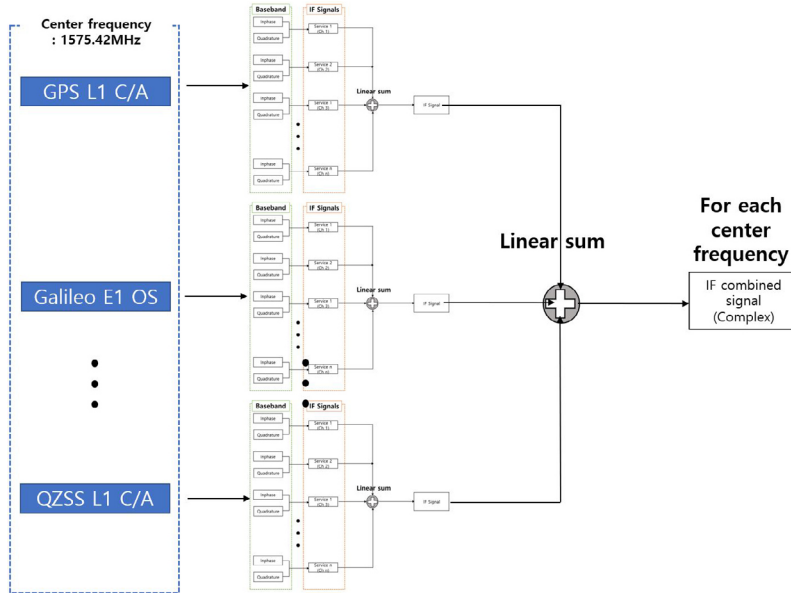


Fig. 6. IF signal combination process (e.g., center frequency 1575.42 MHz).

Table 4. List of GNSS signal parameters.

System	Signal	Modulation type	Center frequency [MHz]	Chipping rate [Mcps]	Data rate	Navigation data
GPS	L1 C/A	BPSK(1)	1575.42	1.023	50 bps	LNAV
	L1C	BOC(1,1)/TMBOC(6,1,1/11)	1575.42	1.023	100 sps	CNAV-2
	L2C	BPSK(1)	1227.60	0.5115	50 sps	CNAV
	L5	QPSK(10)	1176.45	10.23	100 sps	CNAV
Galileo	E1B	CBOC(6,1,1/11)	1575.42	1.023	250 sps	INAV
	E5a	QPSK(10)	1176.45	10.23	50 sps	FNAV
	E5b	QPSK(10)	1207.14	10.23	250 sps	INAV
BDS	B1I	BPSK(2)	1561.098	2.046	50/500 sps	D1/D2
	B1C	BOC(1,1)/QMBOC(6,1,4/11)	1575.42	1.023	100 sps	B-CNAV1
	B2a	QPSK(10)	1176.75	2.046	200 sps	B-CNAV2
	B2b-I	BPSK(10)	1207.14	10.23	1000 sps	B-CNAV3
QZSS	L1 C/A	BPSK(1)	1575.42	1.023	50 bps	LNAV
	L1C	BOC(1,1)/TMBOC(6,1,1/11)	1575.42	1.023	100 sps	CNAV-2
	L2C	BPSK(1)	1227.60	0.5115	50 sps	CNAV
	L5	QPSK(10)	1176.45	10.23	100 sps	CNAV
NavIC	L5 SPS	BPSK(1)	1176.45	1.023	50 sps	IRNSS
	SSPS	BPSK(1)	2492.028	1.023	50 sps	IRNSS

동일하며, 이후 신호 별 전력 분배와 변조 방식에 따라 적절한 IF 신호를 생성한다. 실제 RF 대역의 환경과 동일한 구성을 위한 가우시안 잡음 선택 여부에 따라 IF 신호에 잡음이 추가되며, 최종적으로 IF 신호는 각 중심주파수 대역 별로 이진 complex 파일 형태로 생성되거나 혹은 사용자의 선택에 따라 real 타입의 형태로도 생성 가능하다. 이 때, 양자화는 MATLAB 내부에서 Int 타입을 통해 자동으로 결정되며, 8 bit 혹은 16 bit 형태로 생성할 수 있다.

5. IMPLEMENTATION

5.1 Target Scenario

이번 실험은 다음과 같이 진행하였다. 먼저 기존의 GNSS 신호들을 생성하고 이를 인하대학교 자율항법연구실에서 개발된

완전 재구성 가능한 형태의 소프트웨어 기반 수신기 (Song et al. 2021)와 상용 소프트웨어 기반 수신기 (IFEN 사 SX3)를 이용하여 항법 결과를 추출하고, 원점 좌표와 비교 및 교차 검증하는 과정으로 이루어졌다. 본 연구에서는 모든 GNSS 민간 신호에 대해 연구를 수행하였으나 지면관계상 GPS L1 C/A, GPS L2C, Galileo E1 OS, NavIC L5 신호들에 대한 처리결과만을 설명한다. 각각의 신호 별 파라미터는 Table 4와 같으며, 샘플링 주파수와 중간 주파수 값은 각각 다르게 생성하였다. 이 때, 시나리오 환경으로 Reflection, Multipath, Interference 등의 요소가 존재하나 본 실험에서는 잡음의 영향을 최소화하고자 모두 존재하지 않는 조건으로 설정하였다.

5.2 Processing Result

먼저, 인하대학교 자율항법연구실에서 개발된 완전 재구성 가

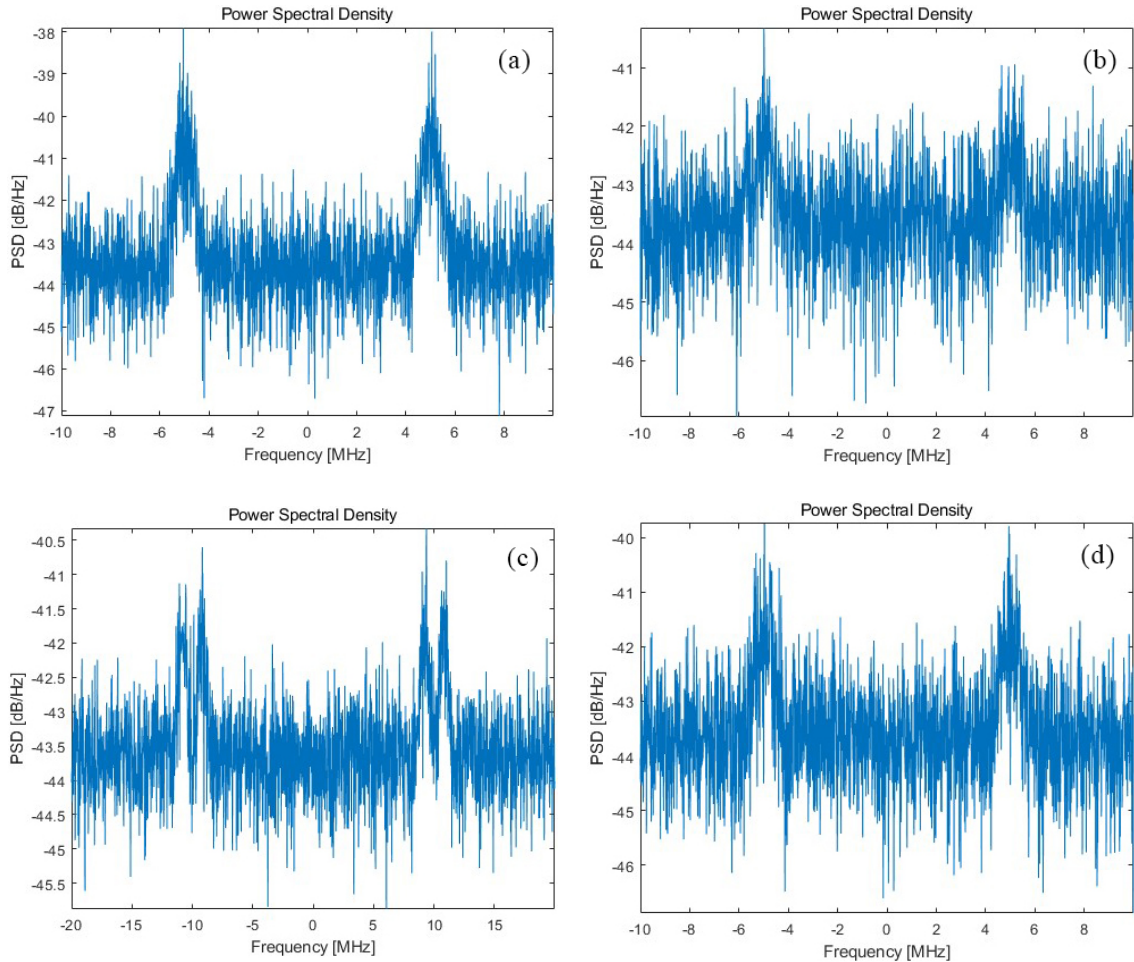


Fig. 7. Power spectral density of GNSS signals: (a) GPS L1 C/A, (b) GPS L2C, (c) Galileo E1 OS, and (d) NavIC L5.

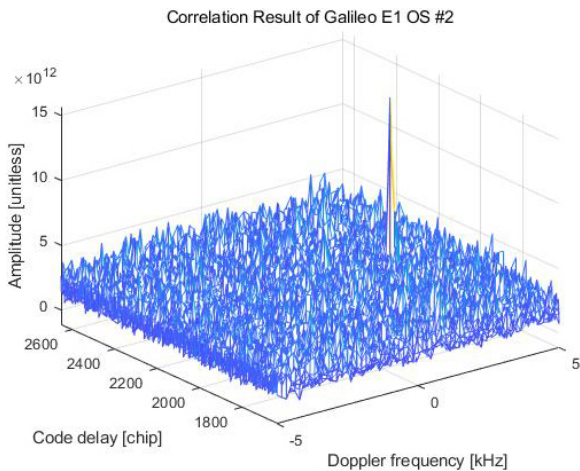


Fig. 8. Acquisition result of Galileo PRN 2.

능한 형태의 소프트웨어 기반 수신기를 이용하여 Power Spectral Density (PSD), 포착 결과, IQ Diagram, C/N_0 등의 값을 확인하였다. Fig. 7은 생성한 각 신호 별 PSD를 나타낸다. 이 때 선택한 중간 주파수를 기준으로 신호의 적절한 PSD 결과가 나타나는 것

을 확인할 수 있다. Fig. 8은 생성한 신호들 중 Galileo PRN 2번에 대해 포착한 결과로, 해당 과정이 적절히 이루어진 것을 확인할 수 있다. 포착 이후 추적 과정을 통해 코드 지연, 도플러 주파수 값이 신호 생성 시 만들어진 참값과 동일한 것을 확인하였다. 이후, Fig. 9와 같이 GPS L1 C/A 신호에 대해 생성한 참값의 C/N_0 와 추적 시간 동안의 C/N_0 값을 나타내었으며, 이는 신호 생성 시 설정한 값과 유사하게 따라가는 것을 볼 수 있다. Fig. 10은 생성한 각 신호의 신호 추적에 따른 상관기 출력에서의 Inphase, Quadrature prompt 값을 보이며 (1,0)과 (-1,0) 두 지점에 값들이 모여 있는 형태로 수렴하게 된다.

5.3 Navigation Solution

이번 실험에서는 NavIC 신호는 위성 가시성을 고려하여 이란의 테헤란 지점 (위도 35.6973도, 경도 51.3341도, 고도 1194.57 m)을 수신기 위치로 설정하였으며, 이를 제외한 다른 신호들은 인천 인하대학교 위치를 수신기 위치로 설정하여 위도 37.450727도, 경도 126.657019도, 고도 23 m의 값을 갖도록 설정하였다. Fig. 11은 각 수신기의 위치에서 해당 시간에 관측되는 위성들의 스카이 플롯을 나타낸다. 최종적으로 구해지는 SPP 결과는 Fig. 12와

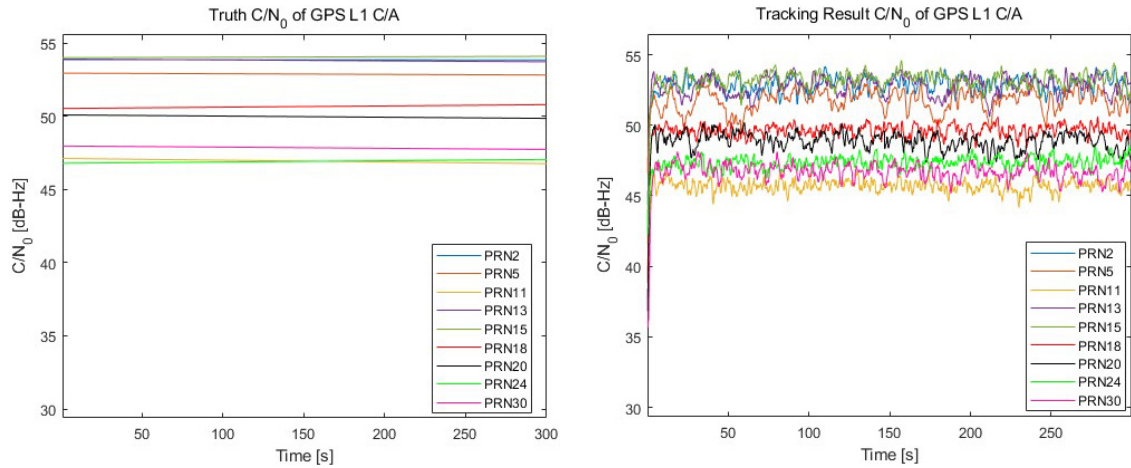


Fig. 9. C/N_0 vs time in tracking process (left: truth, right: tracked).

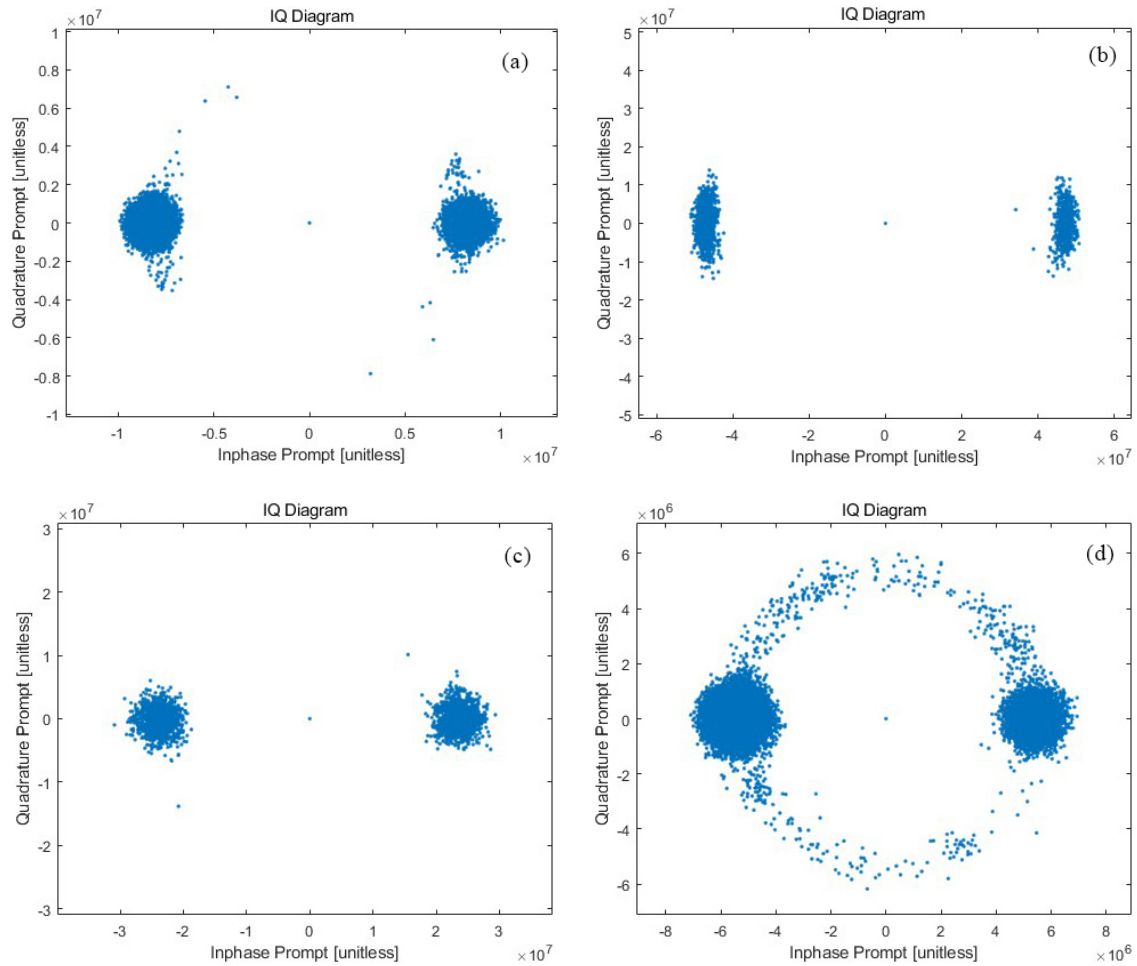


Fig. 10. IQ diagram of GNSS signals: (a) GPS L1 C/A, (b) GPS L2C, (c) Galileo E1 OS, and (d) NavIC L5.

같으며, 해당 결과는 참값과의 ± 20 m 이내의 오차를 가진다. 이를 SX3 상용 수신기를 이용하여 GPS L1 C/A, Galileo E1 OS 신호에 대해 교차 검증을 진행하였다. Figs. 12 a,c에서 보듯, SDR과 상용 수신기를 이용한 추정 결과의 오차가 ± 10 m 이내임을 확인

할 수 있다.

GPS L2C와 NavIC L5 신호 또한 SDR을 이용하여 검증하였으며, 모두 유사한 오차 내의 추정 결과를 확인하였다. 다만 이는 실제 신호와의 circular error probability와는 차이가 존재한다. 이

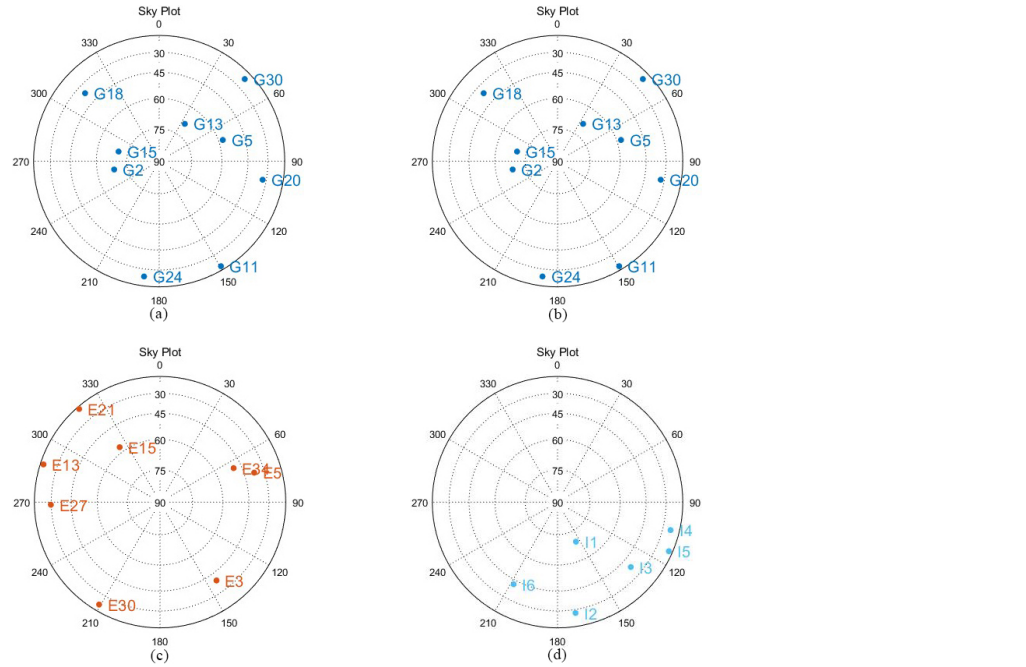


Fig. 11. Skyplot of GNSS signals: (a) GPS L1 C/A, (b) GPS L2C, (c) Galileo E1 OS, and (d) NavIC L5.

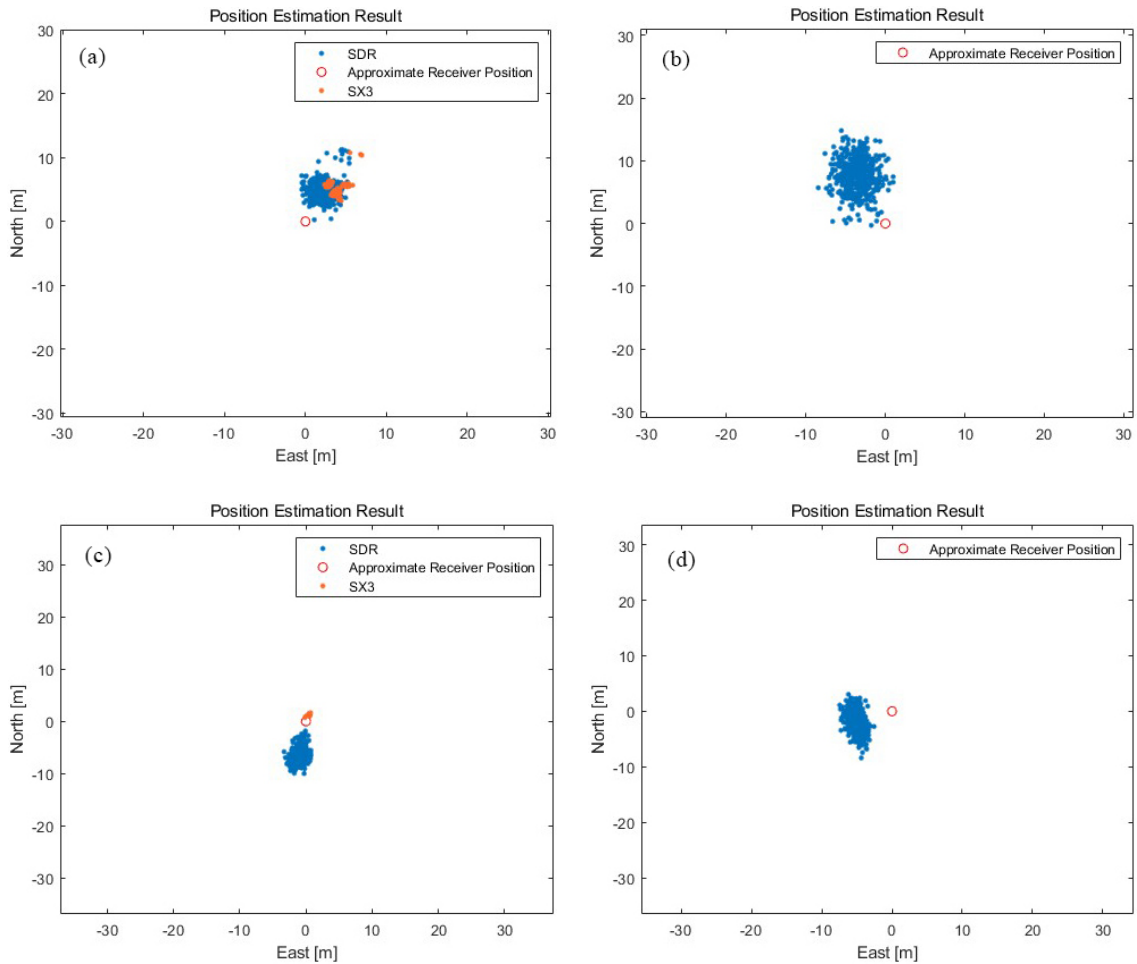


Fig. 12. SPP results of GNSS signals: (a) GPS L1 C/A, (b) GPS L2C, (c) Galileo E1 OS, and (d) NavIC L5.

Table 5. List of processable signals by the proposed signal generator.

System	Signal	Acquisition	Tracking	Demodulation	Navigation
GPS	L1 C/A	O	O	O	O
	L1C	O	O	O	O
	L2C	O	O	O	O
	L5	O	O	O	O
Galileo	E1B	O	O	O	O
	E5a	O	O	O	O
	E5b	O	O	O	O
BDS	B1I - D1	O	O	O	O
	B1I - D2	O	O	O	O
	B1C	O	O	O	O
	B2a	O	O	O	O
	B2b-1	O	O	O	O
QZSS	L1 C/A	O	O	O	O
	L1C	O	O	O	O
	L2C	O	O	O	O
	L5	O	O	O	O
NavIC	L5 SPS	O	O	O	O
	S SPS	O	O	O	O

는 지구 자전 영향 등의 오차 성분이 반영되지 못하여 발생하는 오차로 판단되며, 신호 생성기의 목표가 실제 신호와 유사한 신호를 생성하는 것이므로, 추후 이러한 오차 성분을 명확히 분석하여 Bias 값을 줄일 수 있도록 개선하여야 할 것이다.

6. CONCLUSIONS

본 논문에서는 완전 재구성 가능한 특성을 가지는 Multi-constellation/Frequency 형태의 GNSS 신호 생성기에 대해 소개하였다. 먼저 신호 생성기가 가지는 재구성 가능 특성 구조에 대해 설명하고, 구조들과 변경 가능한 파라미터들에 대해 소개하였다. 이러한 특성은 다양한 신호 생성 시나리오에 대해 구조 변화 없이 사용자의 목적에 맞춰 사용할 수 있다는 장점이 있다.

이후 본 논문에서 소개한 GNSS 신호 생성기를 이용하여 기존 GNSS 신호들을 생성하고, 이를 통한 신호 획득, 추적 및 항법 결과에 대해 제시하였다. 이는 기존의 상용 수신기와 개발한 SDR을 통하여 이루어졌으며, 이 SDR 또한 재구성 가능 특성을 포함하여 원하는 시나리오에 적절하게 적용 가능한 장점이 있다. 이는 Table 5와 같이 현재 처리 가능한 신호 목록을 나타낼 수 있다. 신호 생성 시 사용한 PRN 번호와 파라미터가 SDR 상에서의 얻어진 값과 동일함을 통해 포착 및 추적 결과를 확인, 얻어진 궤도 정보 값을 비교하여 복조 과정을 통해 검증을 진행하였으며, 항법 결과를 통해 신호 별 항법 결과를 확인하였다.

이번 연구에서 제시한 신호 생성기는 재구성 가능 특성을 포함하여 추후 설계할 KPS 후보 신호 선정 시 확장성을 통해 다양한 시나리오 환경에서 용이하게 활용 가능할 것으로 기대된다. 다만, 이번 연구에서 개발한 신호 생성기는 코드 의사거리 수준의 시뮬레이션만이 가능하며, 반송파 위상화를 이용하는 정밀 측위까지를 포함하려면 보다 정확한 신호 생성 알고리즘에 대한 연구가 필요하다. 또한, 현재는 정적 사용자 위치에 대해서만 고려한 형태로 구성되었으나, 추후 실제 사용자의 동적인 특성을 고려하여, 동적 사용자 위치를 고려할 수 있는 형태로 개발하여야 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C2013091).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Choi, B.-H. and Won, J.-H.; methodology, Choi, B.-H. and Won, J.-H.; software, Choi, B.-H. and Lee, S.; validation, Choi, B.-H., Song, Y.-J., Lee, S. and Won, J.-H.; formal analysis, Choi, B.-H. and Song, Y.-J.; investigation, Choi, B.-H. and Song, Y.-J.; resources, Choi, B.-H. and Won, J.-H.; data curation, Choi, B.-H. and Song, Y.-J.; writing—original draft preparation, Choi, B.-H.; writing—review and editing, Choi, B.-H., Song, Y.-J. and Won, J.-H.; visualization, Choi, B.-H.; supervision, Won, J.-H.; project administration, Won, J.-H.; funding acquisition, Won, J.-H.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Betz, J. W. 2015, *Engineering Satellite-Based Navigation and Timing: Global Navigation Satellite Systems, Signals, and Receivers* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.)
- Demios Space, GRANADA Bit-True Simulator [Internet], cited 2023 Mar 17, available from: http://ww1.deimos-space.com/granada/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=27
- Dong, L., Ma, C., & Lachapelle, G. 2004, Implementation and Verification of a Software-Based IF GPS Signal Simulator, *Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 26-28 January 2004*, pp.378-389. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5514>
- Foucras, M., Julien, O., Macabiau, C., & Ekambi, B. 2014, Detailed Analysis of the Impact of the Code Doppler on the Acquisition Performance of New GNSS Signals, *ION ITM 2014, International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 27-29 Jan 2014*, pp.513-524. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=11520>
- German Aerospace Centre Institut of Communications and Navigation, NAVSIM [Internet], cited 2023 Mar 17, available from: <http://www.kn.nz.dlr.de/satnav/flyer.pdf>

Han, K. & Won, J.-H. 2019, Development of MATLAB-based Signal Performance Analysis Software for New RNSS Signal Design, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 8, 139-152. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.139>

Joseph, A. 2010, GNSS Solutions: Measuring GNSS Signal Strength, *Inside GNSS*, pp.20-25. <https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2018/01/novdec10-Solutions.pdf>

Julien, O., Zheng, B., Dong, L., & Lachapelle, G. 2004, A Complete Software-Based IF GNSS Signal Generator for Software Receiver Development, *Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, CA, 21-24 September 2004, pp.2146-2157. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5899>

Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)

Kim, T.-H., Lee, J.-E., Lee, S.-U., Kim, J.-H., & Hwang, D.-H. 2009, Study on for Simulation of GNSS Signal Generation, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 37, 1148-1156. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2009.37.11.1148>

Lim, S., Lim, D. W., Liu, M., Moon, S. W., Park, C., et al. 2008, Design of a software-based multi-channel GNSS IF signal generator, 2008 International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, Korea, 14-17 October 2008, pp.754-758. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2008.4694599>

Ministry of Science and ICT 2021, Korean Satellite Navigation System (KPS) Development Project - Preliminary Feasibility Study Pass [Internet], cited 29 Jul. 2022, available from: <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156458458>

Shin, H., Han, K., & Won, J.-H. 2019, Development of End-to-end Numerical Simulator for Next Generation GNSS Signal Design, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 8, 153-164. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.153>

Song, Y. J., Lee, H. B., & Won, J. H. 2021, Design of Multi-Constellation and Multi-Frequency GNSS SDR with Fully Reconfigurable Functionality, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 10, 91-102. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.91>

The Navigation Applications and User Services Office of the European Space Agency, Galileo System Simulation Facility [Internet], cited 2023 Mar 17, available from: https://www.esa.int/Applications/Navigation/Software_facilities



ByungHyun Choi is a M.S. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, South Korea. He received B.S. degree from the same university in 2021. His research interests are GNSS signal generator, USRP.



Young-Jin Song received his M.S. degree in electrical and computer engineering at Inha University, South Korea, in 2022. Currently, he is a Ph.D. student at the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, South Korea. His research interests are GNSS software receivers, FPGA-based real-time simulators/receivers, and weak signal processing.



Subin Lee is a Ph.D. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, South Korea. She received B.S. and M.S. degrees from the same university in 2020 and 2022. Her research interest is GNSS signal design.



Jong-Hoon Won received the Ph.D. degree in the Department of Control Engineering from Ajou University, Korea, in 2005. After then, he had worked with the Institute of Space Application at University Federal Armed Forces (UFAF) Munich, Germany. He was nominated as Head of GNSS Laboratory in 2011 at the same institute, and involved in lectures on advanced receiver technology at Technical University of Munich (TUM) since 2009. He is currently an associate professor of the Department of Electrical Engineering at Inha University. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target tracking systems and self-driving cars.