

USRP 기반 다중 안테나 GPS L1 C/A RF 신호생성기 설계

박경민¹, 황동환², 서흥석³, 김영백³, 박찬식[†]

Design of a USRP-based Multi-Antenna GPS L1 C/A RF Signal Generator

Gyeongmin Park¹, Dong-Hwan Hwang², Hung Seok Seo³, Young Baek Kim³, Chansik Park^{1†}

¹Department of Intelligent Systems & Robotics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Microinfinity, Daejeon 34012, Korea

ABSTRACT

In this study, we designed a USRP-based multi-antenna GPS L1 C/A RF signal generator and verified its performance using commercial receivers. The designed RF signal generator consists of a software-based signal generation module that generates multiple GPS L1 C/A IF signals, and an RF signal transmission module that up-converts the generated IF signals to RF signals for transmission. The multi-GPS signals are generated by reflecting time delays, according to the arrangement and structure of the antennas, in the code and carrier, and each signal is transmitted through its respective RF front-end. The RF signals were verified using a commercial U-blox receiver, and the operation and performance of the multi-antenna signals were confirmed using an attitude determination system configured with two U-blox receivers. The designed signal generator can be used not only for precise navigation and attitude determination but also for the development of various array signal processing systems such as A/DOA, beamforming, and nulling.

Keywords: GPS simulator, USRP, IF signal generator, multi-antenna, array signal processing

주요어: GPS 시뮬레이터, USRP, IF 신호생성기, 다중 안테나, 배열 신호 처리

1. 서론

Global Navigation Satellite System (GNSS)은 이미 핸드폰과 차량 항법 등 많은 분야에서 활발히 사용되고 있지만 기술의 활용 범위가 점점 다양해지고 있다. 측지 측량에서 사용되는 cm급 정밀 항법 (Li et al. 2022)과 여러 개의 안테나를 이용한 정밀 자세에도 사용이 증가하고 있으며 (Park et al. 1997), 현재 활발하게 연구가 진행되고 있는 자율주행 모빌리티 분야 또는 미사일 등의 방산 분야에서 응용 (Yigit et al. 2018)도 확대되고 있다. 최근에는 다중 안테나를 사용한 Angle/Direction of Arrival (A/DOA) 또는 빔포밍, 널링 등 신호의 정확도 향상 및 항재밍 등을 위한 배열 신호 처리 기법에서도 위성 신호는 중요한 요소이다 (Choi 2016,

Goto et al. 2003). 정밀 항법, 자세 결정, 항재밍 등의 분야에서 사용을 더 확대하려면 GNSS 측정치의 하나인 반송파 위상 신호의 사용이 필수적이다 (Larsen et al. 2021).

기존의 상용 신호 생성기는 GPS L1 Coarse Acquisition (C/A) 뿐만 아니라 여러 대역의 신호를 제공하는 다양한 제품이 개발되고 있으며 (LabSat 2024, Safran 2024, Spirent 2024), 시간지연과 위상지연을 고려하는 배열 안테나 시뮬레이션 환경을 구성하기 위한 개발이 지속적으로 이루어져왔다 (Han et al. 2013). 현재는 Spirent사 GSS9000, R&S사의 SMBV-K103, IZT사의 IZT-S1000 등의 다양한 업체에서 배열 안테나 신호생성기를 제조 및 판매하고 있다 (Spirent 2024, Rohde & Schwarz 2024, IZT 2024). 그러나 상용 신호생성기는 고가의 제품이 많으며, 하드웨어 기반

Received Aug 22, 2024 Revised Sep 19, 2024 Accepted Oct 25, 2024

[†]Corresponding Author E-mail: chansp@cbnu.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

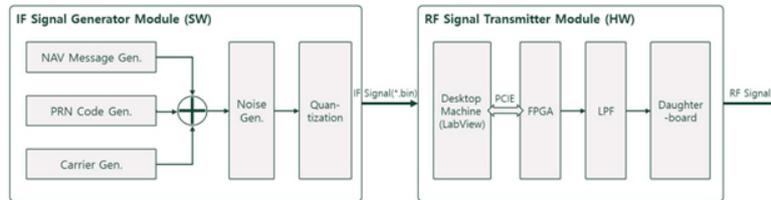


Fig. 1. Structure of a SW-based GPS RF simulator (Noh et al. 2022).

으로 제작되어 새로운 신호를 추가할 때 마다 새로 설계해야 하기 때문에 제품 개발에 많은 비용 및 시간이 소요된다는 단점이 있다. Software Defined Radio (SDR) 플랫폼을 활용하면 소프트웨어의 변경만으로 구조 변경과 기능 추가가 용이하며, 시나리오 설정에 제약이 없기 때문에 상용 시뮬레이터보다 확장성이 높다 (Wyman et al. 2010, Di 2013, Hu 2019). 국내에도 소프트웨어를 활용한 신호생성기에 대한 연구가 있었지만 시간지연과 위상 지연을 고려한 다중 안테나 신호생성기에 대한 연구는 미비하다 (Lee et al. 2013, Choi et al. 2015, Noh et al. 2022).

본 논문에서는 기존의 단일 안테나 신호생성기를 확장하여 PC에서 수행되는 다중안테나 GPS L1 C/A Intermediate Frequency (IF) 신호 생성기와 범용 SDR 플랫폼인 Universal Software Radio Peripheral (USRP)를 활용한 배열신호 처리가 가능한 다중 안테나 GPS L1 C/A Radio Frequency (RF) 신호생성기를 설계하였다. 설계한 다중 안테나 신호생성기는 상용수신기를 이용하여 동작을 확인하고, 추가로 MATLAB 자세결정 프로그램을 활용하여 자세결정 성능을 확인하였다. 이 결과는 설계한 다중 안테나 신호생성기가 정밀 항법, 자세결정 시스템 개발에 사용될 수 있으며, 더 나아가 A/DOA, 빔포밍/널링 등 다양한 배열신호처리 연구에 적용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존의 단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호생성기의 구조를, 3장에서는 안테나의 배치와 구조에 따른 시간 지연을 코드와 반송파에 반영하는 다중 안테나 GPS L1 C/A RF 신호생성기 설계를 나타낸다. 4장에서는 설계한 다중 안테나 신호생성기의 성능을 상용 수신기와 자세결정 수신기를 이용하여 검증하고, 5장에서 결론을 보인다.

2. 단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기 구조

이 장에서는 기존 단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기의 구조 (Noh et al. 2022)를 소개하고, 이를 기반으로 다음 장에서 다중 안테나 신호생성기를 설계한다.

단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기는 Fig. 1에 나타내었으며, 소프트웨어 IF 신호 생성 모듈과 USRP 기반 RF 신호 송신 모듈로 이루어져 있다. 두 부분은 서로 독립적으로 동작하며 IF 신호 생성 모듈에서 출력하는 IF 신호 파일은 RF 신호 송신 모듈의 입력이 된다. RF 신호 송신 모듈의 출력 RF 신호는 안테나를 거치거나 혹은 직접 상용 수신기에 연결하여 사용할 수 있다.

IF 신호 생성 모듈은 항법메시지 생성부에서 생성한 항법메시지, 코드 생성부에서 생성한 위성 별 고유 C/A 코드, 반송파 생성부에서 도플러를 반영하여 생성한 반송파를 혼합하여 신호를 생

성한다. 추가로 잡음을 더하고 양자화를 거쳐 바이너리 파일 형태의 IF 신호를 출력을 생성한다.

RF 신호 송신 모듈은 PC에서 수행되는 LabVIEW 기반의 USRP 제어 및 RF 신호 송신 프로그램에서 USRP로 보낸 IF 신호를 RF 신호로 상향 변환하여 내보낸다. PC와 USRP는 PCIe 인터페이스를 통해 연결되며, USRP에 전달된 입력한 IF 신호 데이터는 저역 통과필터를 거쳐 도터 보드로 전달되어 주파수 상향 변환 후 RF 신호로 출력된다.

2.1 소프트웨어 IF 신호 생성 모듈

IF 대역의 GPS 신호를 생성하는 소프트웨어 신호 생성 모듈의 사용자 인터페이스, 위성 궤도 생성부, C/A코드 생성부, 항법메시지 생성부, 반송파 신호 생성부, IF 신호 생성부로 구성되어 있으며 구조는 Fig. 2와 같다.

사용자 인터페이스는 신호생성을 위한 기준 시각 및 기준 위치뿐만 아니라 IF주파수, 샘플링 주파수 등을 설정할 수 있으며, 수신기의 움직임에 따른 궤적 생성과, 전리층 및 대류층 지연 반영 여부 등 오차 생성 시나리오를 설정할 수 있다.

위성 궤도 생성부는 RINEX 파일(*.nav)에서 GPS의 궤도 정보를 얻고, 신호 생성 기준 시각을 GPS 시각으로 변환한다. GPS 시각 정보와 궤도 정보를 이용해 위성의 위치 및 속도를 계산하고, 이 값과 사용자의 위치 및 속도 정보를 이용하여 각 위성 별 의사거리 및 도플러를 계산한다.

항법메시지 생성부에서는 위성 궤도 생성부에서 제공하는 궤도 및 시각 정보를 반영하여 GPS L1 C/A 신호의 항법 메시지를 생성한다. 대역확산코드 생성부에서는 의사거리를 반영하여 GPS의 C/A 코드를 생성하고, 반송파 신호 생성부에서는 도플러 주파수와 Numerically Controlled Oscillator (NCO)를 사용하여 모든 샘플에 대한 반송파 신호를 생성한다.

IF 신호 생성부에서는 항법메시지 생성부, 대역확산코드 생성부, 반송파 신호 생성부에서 생성한 가시 위성의 항법메시지, 대역확산코드, 반송파를 사용하여 가시 위성에 대한 신호를 생성한다. 생성한 모든 가시 위성의 신호를 더하여 하나의 IF 신호를 생성하고 Additive White Gaussian Noise를 더한 다음, 대역통과 필터를 거쳐 최종적으로 양자화된 IF 신호를 생성한다.

2.2 USRP 기반 RF 신호 송신 모듈

IF 신호를 RF 신호로 상향 변환하여 송신하는 RF 신호 송신 모듈은 USRP와 송신 프로그램으로 구성되어 있다. USRP는 PCIe 또는 이더넷을 사용해 PC와 연결하며 상향 변환 및 In-

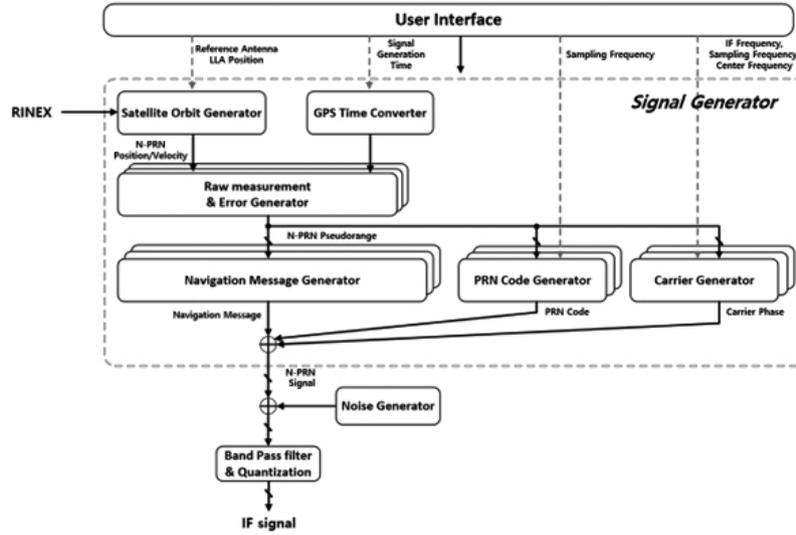


Fig. 2. IF signal generator module structure (Noh et al. 2022).

phase/Quadrature (I/Q) 데이터를 송수신한다. 송신 프로그램은 FPGA 기반의 LabVIEW 소프트웨어를 사용하여 구현되었으며 신호를 송신하기 위한 파라미터를 설정하고 USRP 하드웨어와 LabVIEW를 연동하는 USRP 설정부, 바이너리 파일을 읽고 신호 데이터를 큐에 저장하기 위한 파일 로드 및 큐 설정부, 큐에서 신호 데이터를 가져와 USRP에 전달하여 RF 신호를 내보내는 RF 신호 송신부로 구성된다. 송신 프로그램은 지속적으로 데이터의 존재 여부를 파악하여 파일의 끝에 도달하면 USRP와의 연동을 닫고 메모리를 해제한다.

3. 다중 안테나 GPS L1 C/A 신호생성기 설계

이번 장에서는 2장에서 소개한 단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기를 확장하여 배열 신호처리를 위한 다중 안테나 GPS L1 C/A RF 신호생성기를 설계한다. 다중 안테나 신호생성기는 크게 기준 안테나와 Rover 안테나로 구성된 배열안테나에 대한 GPS L1 C/A 신호를 생성하는 다중 IF 신호 생성 모듈, IF 신호를 다중 RF 신호로 변환하고 송신하는 다중 RF 송신 모듈로 구성된다.

3.1 다중 안테나 GPS L1 C/A IF 신호 생성 모듈 설계

단일 안테나에 비하여 확장된 다중 안테나의 GPS 신호를 생성하기 위한 소프트웨어 IF 신호 생성 모듈의 구조는 Fig. 3과 같다. 다중 안테나 IF신호 생성 모듈은 기준 안테나를 설정하고, 기준 안테나에 대한 Rover 안테나의 상대 위치를 결정한다. 이를 이용하여 계산된 위상 지연을 각 안테나의 코드와 반송파 신호 생성에 반영한다. 위상 지연이 반영된 각 위성들의 신호를 합하여 안테나 신호를 생성한다.

따라서 다중 안테나 신호생성기는 단일 안테나 신호 생성기와 같이 파라미터 설정을 위한 파라미터 입력부, 위성 궤도 생성부, C/A 코드생성부, 항법메세지 생성부, 반송파 신호 생성부, IF 신

호 생성부로 구성되지만, 안테나 개수만큼 확장된다 (Kaplan & Hegarty 2017). 여기에 Rover 안테나 위치와, 반송파 위상 지연 계산부가 추가된다. 신호생성기에서는 배열 안테나의 수와 배치에는 제약이 없다.

Rover 안테나의 위치는 기준 안테나에 대한 상대 위치로 North East Down (NED) 좌표계에서 결정한다. 사용자가 입력한 상대위치는 Eq. (1)을 이용하여 Earth Centered Earth Fixed (ECEF)로 변환한다 (Grewal et al. 2007).

$$\begin{bmatrix} X_u^e \\ Y_u^e \\ Z_u^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r^e \\ Y_r^e \\ Z_r^e \end{bmatrix} + C_n^e \begin{bmatrix} X_u^n \\ Y_u^n \\ Z_u^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 X_u^e, Y_u^e, Z_u^e 는 Rover 안테나의 ECEF 위치, X_r^e, Y_r^e, Z_r^e 는 기준 안테나의 ECEF 위치, X_u^n, Y_u^n, Z_u^n 는 Rover 안테나의 NED 위치이다. C_n^e 는 NED 좌표계에서 ECEF 좌표계로의 좌표변환 행렬 Direction Cosine Matrix을 의미하며, Eq. (2)와 같다. 여기서 l 은 기준 안테나의 위도, L 은 기준 안테나의 경도를 나타낸다.

$$C_n^e = \begin{bmatrix} -\cos(\ell) \sin(L) - \sin(L) - \cos(\ell) \sin(L) \\ -\sin(\ell) \sin(L) \cos(\ell) - \sin(\ell) \cos(L) \\ \cos(L) & 0 & -\sin(L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

위성 궤도 정보는 기준 안테나와 Rover 안테나에서 같이 사용하며, 각 안테나에서 위성 별 의사거리 및 도플러를 계산한다. 계산한 의사거리를 사용하여 배열 안테나의 C/A 코드를 생성하고, 도플러를 반영하여 반송파 신호를 생성한다. 매 epoch마다 기준 안테나와 Rover 안테나의 신호가 동시에 생성된다.

3.2 Rover 안테나 반송파 생성

반송파 위상 지연 계산부에서는 기준 안테나에 대한 Rover 안테나의 위상 지연을 계산한다. 위성에서 송신한 신호가 도달하는 시간은 Fig. 4와 같이 안테나 입사각 θ 에서 안테나 사이의 위

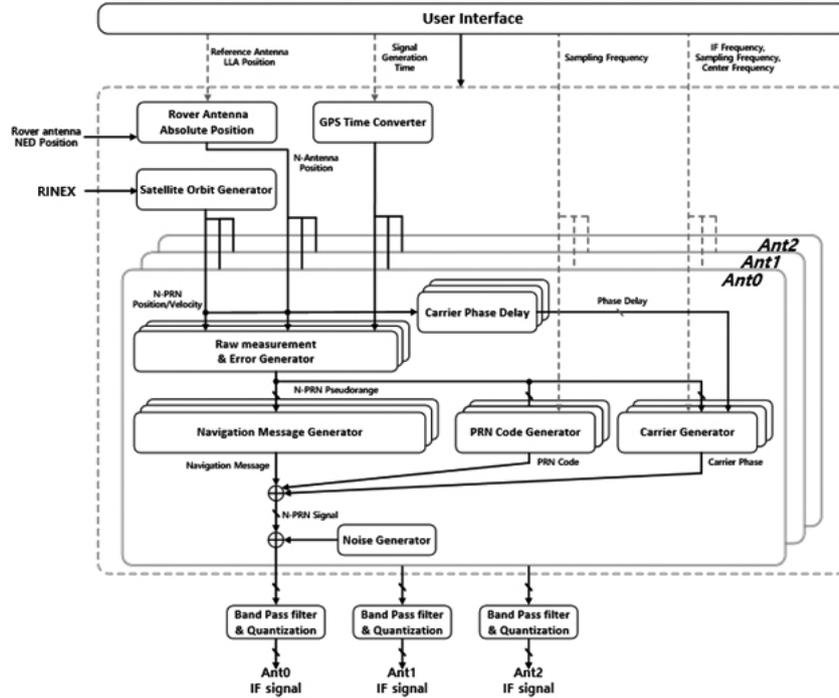


Fig. 3. Array antenna IF signal generator module structure.

치 a_k 에 의한 안테나 간의 거리 d_k 에 따라 차이가 발생하며 이를 시간 지연(τ_k)이라고 하고, 시간 지연만큼 위상 지연(φ_k)이 발생한다 (Tsuji et al. 2019, Lu et al. 2020). 이때 안테나의 위상은 위성의 Line Of Sight (LOS) 벡터 $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)^T$ 와 안테나 벡터 $\vec{a} = (x, y, z)^T$ 를 이용하여 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 기준 안테나 1(\vec{a}_1)에 대한 Rover 안테나 (\vec{a}_k)의 Steering vector α 는 Eq. (4)와 같이 나타낸다.

$$X = e^{-j(g_x x + g_y y + g_z z)} = e^{-j\vec{g} \cdot \vec{a}_k} \tag{3}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\vec{g} \cdot (\vec{a}_1 - \vec{a}_2)} \\ e^{-j\vec{g} \cdot (\vec{a}_1 - \vec{a}_3)} \\ \vdots \\ e^{-j\vec{g} \cdot (\vec{a}_1 - \vec{a}_k)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

기준 안테나 1(\vec{a}_1)에 대한 Rover 안테나 k (\vec{a}_k)의 시간과 위상 지연 차이는 Eqs. (5, 6)과 같이 계산된다. 여기서 $(-\vec{a}_k + \vec{a}_1)$ 는 기준 안테나벡터 \vec{a}_1 와 Rover 안테나벡터 \vec{a}_k 의 차이, C 는 광속, f_{L1} 는 GPS L1 신호의 주파수를 의미한다.

$$\tau_k = \frac{(-\vec{a}_k + \vec{a}_1)^T \vec{g}}{C} \tag{5}$$

$$\varphi_k = 2\pi f_{L1} \tau_k \tag{6}$$

기준 안테나와 Rover 안테나 사이의 C/A 코드와 항법메시지는 Eq. (5)의 시간 지연을 고려하여 생성한다. 단일 안테나 신호생성기에서는 수행 속도 향상을 위하여 Look

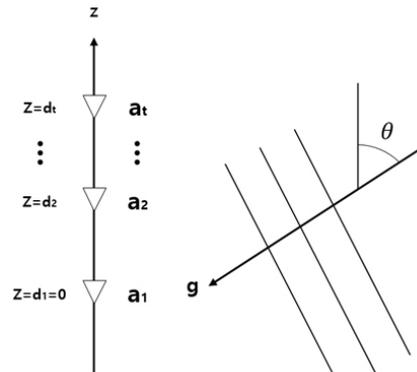


Fig. 4. Array antenna time delay and phase delay.

Up Table (LUT)를 사용하는 데에 비해 다중 안테나 신호생성기는 해상도 높은 반송파 지연을 사용하기 위해 LUT의 비트 수를 증가하거나 sin/cos을 직접 계산해야 한다. 다중 안테나 신호생성기에서는 반송파 NCO 증분값을 Eq. (7)과 같이 계산하고, 이를 이용하여 Eq. (8)의 IQ 신호를 직접 계산한다. 여기서 f_{NCO} 는 기준 안테나의 반송파 주파수 NCO 값, f_{IF} 는 신호의 IF 주파수, f_{dop} 는 기준 안테나의 도플러 주파수, I_k, Q_k 는 배열 안테나의 IQ 신호이다.

$$f_{NCO} = \frac{f_{IF} + f_{dop}}{f_s} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} I_k &= \cos(2\pi f_{NCO} + \varphi_k) \\ Q_k &= \sin(2\pi f_{NCO} + \varphi_k) \end{aligned} \tag{8}$$

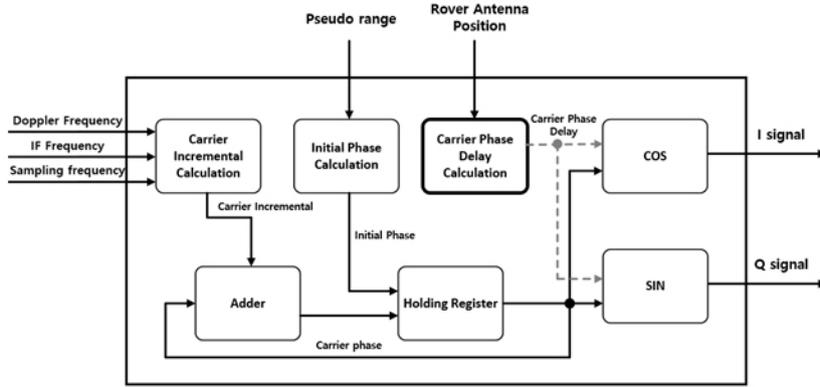


Fig. 5. Rover antenna Carrier phase generation module.

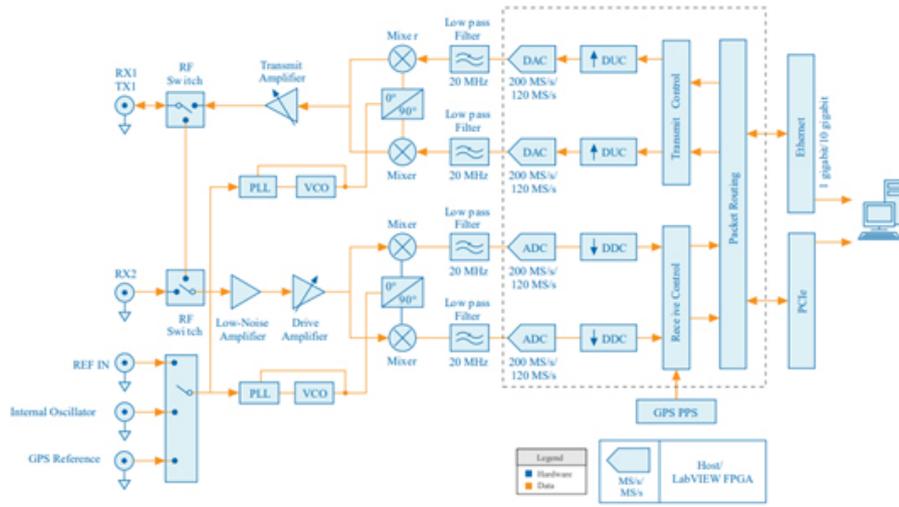


Fig. 6. USRP hardware structure.

Rover 안테나의 반송파 지연 시간을 고려한 반송파 신호 생성 구조는 Fig. 5와 같다.

3.3 RF 신호 송신 모듈 개발 도구

RF 송신 모듈은 생성된 Rover 안테나와 기준 안테나의 IF 신호를 RF 대역으로 상향변환 하여 신호를 송신한다. RF 송신 모듈의 하드웨어는 USRP를 사용하고, 개발도구는 C++ 및 USRP Hardware Driver (UHD)를 활용한다 (Park et al. 2018). 기존 단일 신호생성기에서 사용한 LabVIEW는 그래픽 기반의 프로그래밍 툴로 프로그래밍이 쉽지만 고가의 상용 프로그램이기 때문에 접근이 어렵다는 단점이 있다. UHD는 Ettus사에서 제공하는 USRP SDR 플랫폼용 무료 및 오픈소스 소프트웨어 드라이버로 C++ API를 지원하기 때문에 C언어를 사용하여 개발이 가능하며 무료로 사용할 수 있어 접근성이 좋다 (Ettus Research 2023). 송신 프로그램을 실행할 데스크탑과 USRP는 10G Ethernet을 통해 연결되며, USRP 내부에 있는 2개의 도터 보드에 전달되어 상향 변환 후 RF 신호를 출력한다.

IF 신호를 RF 신호로 상향 변환 및 송신하는 USRP 하드웨어의

구조는 Fig. 6과 같다 (National Instruments 2024). USRP 하드웨어는 고속 아날로그-디지털 변환기(Analog to Digital Converter)와 디지털-아날로그 변환기(Digital to Analog Converter, DAC)로 프론트 엔드를 구성하며, 디지털 다운 변환(Digital Down Converter)과 디지털 업 변환(Digital Up Converter, DUC)을 위한 FPGA를 갖추고 있다. Fig. 6의 위쪽 경로는 신호 송신을 나타내며 호스트 컴퓨터가 I와 Q 신호를 생성하여 Ethernet 케이블을 통해 USRP로 전달하는 것으로 시작된다. 전달된 I와 Q는 DUC를 통해 DAC를 통과할 수 있도록 준비하며, 그 이후 I-Q 믹싱이 일어나 신호를 직접 업 변환하여 RF 주파수 신호를 생성한다. 이 주파수 신호는 다시 증폭되어 송신하게 된다. USRP는 마더보드와 도터보드로 구성되어 있으며, 마더보드에서는 FPGA와 DAC가 위치해 디지털 데이터를 아날로그 신호로 변환한다. 도터보드의 상향 변환기로 입력 신호를 상향 변환하고 증폭한다.

3.4 개발 도구를 사용한 다중 RF 신호 송신 모듈 설계

본 논문에서는 USRP와 C++을 사용하여 송신 모듈을 설계하였다. 송신 모듈 하드웨어는 NI사의 USRP 모델 중 2개의 이상

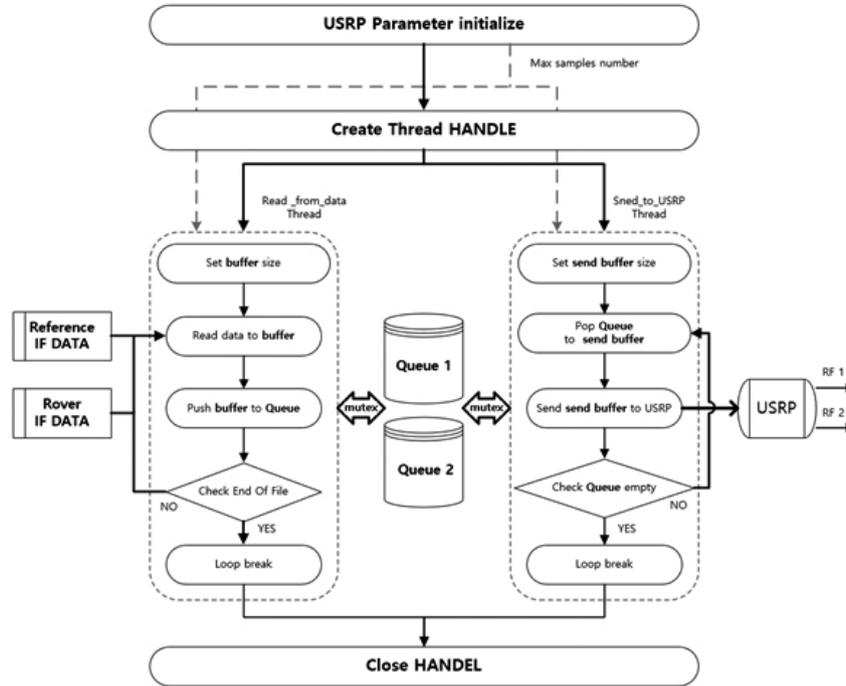


Fig. 7. Test configuration for simulator verification.

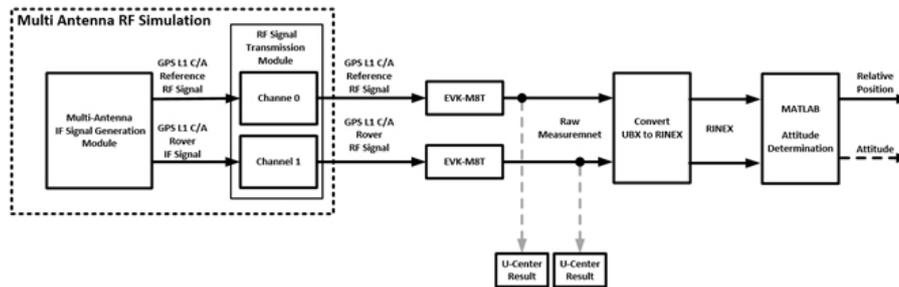


Fig. 8. Test configuration for simulator verification.

의 도터보드를 탑재하여 TX/RX 운용이 가능한 RIO 라인의 모델을 사용한다. 송신 프로그램은 USRP 및 파라미터를 설정하는 USRP 설정부, IF 신호 파일을 읽어 공유자원에 전달하는 신호 파일 read부, 공유자원의 데이터를 USRP 전달해 RF 신호를 생성하고 송신하는 RF 신호 생성부로 구성된다. 송신 프로그램은 USRP 보드에 충분히 빠르게 샘플 데이터가 전달되지 않아 발생하는 Underrun 문제를 피하기 위해 신호 파일 read부, RF 신호 생성부를 멀티쓰레드로 구성하였다. 송신 프로그램의 전체 동작 흐름도는 Fig. 7에 나타내었다.

USRP 설정부는 사용자의 입력을 통해 USRP 보드내의 2개의 도터보드 파라미터를 설정한다. USRP 보드의 파라미터는 IF 신호 샘플링 주파수, IF 신호 샘플 데이터 파일 경로, 상향 변환할 반송파 주파수, Gain, USRP의 주소이다. USRP 주소는 Ethernet으로 연결한 경우 보드의 Ip 주소를, PCIe로 연결한 경우 USRP의 이름을 입력한다. 본 논문에서는 10G Ethernet으로 연결하여 사용하였다.

IF 파일 Read부(read_from_data_thread)는 IF 파일을 읽어와

공유자원 Queue에 저장하는 쓰레드를 생성한다. USRP 설정부에서 입력 받은 2개의 안테나에 대한 IF 신호의 I/Q 데이터를 읽어와 2개의 Queue에 전달한다. 이때 읽어오는 샘플의 수는 UHD에서 설정해주는 최대 샘플 수로 설정한다. 쓰레드는 IF 파일을 모두 읽으면 종료된다.

RF 신호 생성부(send_to_USRP_thread)는 데이터를 읽어와 USRP에 전달하는 쓰레드를 생성한다. 2개의 Queue에 저장된 데이터를 읽어와 하나의 버퍼에 저장하고, UHD 내의 “send” 함수를 통해 USRP에 전달한다. 전달된 데이터는 USRP 내부에서 2개의 안테나에 해당되는 2개의 채널에 각각 할당되어 상향 변환 후 송신된다. 쓰레드는 Queue의 크기가 0이 되면 종료한다.

4. 다중 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기 검증

본 논문에서 설계한 다중 안테나 GPS IF 신호생성기의 검증 구성을 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 신호생성 모듈에서 여러 개의

Table 1. Experiment set up for the verification of a RF transmitter module.

Common set	Setting
RF-front end	NI-USRP 2952R
Intermediate frequency	5.42 MHz
LO frequency	1.57 GHz
Sampling frequency	25 MHz
Satellite signal (PRN)	GPS L1 C/A (PRN 4, 8, 9, 16, 18, 26, 27, 28, 31)
Number of generated antenna	4

Table 2. Rover antenna NED coordinate setting position and expectation attitude.

Rover antenna	Set position			Expected attitude	
	North (m)	East (m)	Down (m)	Yaw (°)	Pitch (°)
Rover1	1	0	-1	0	45
Rover2	1	1	0	45	0
Rover3	-1	1	1	135	-35.2644

Table 3. Generated antenna LLA position.

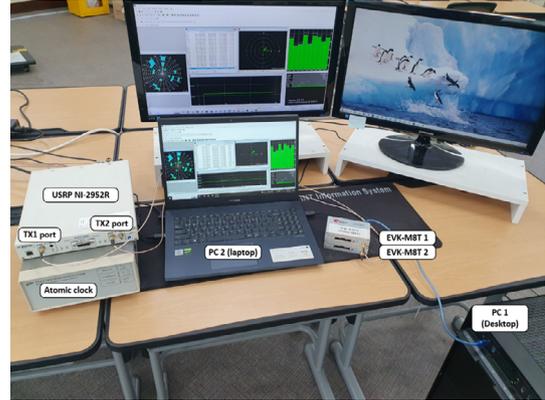
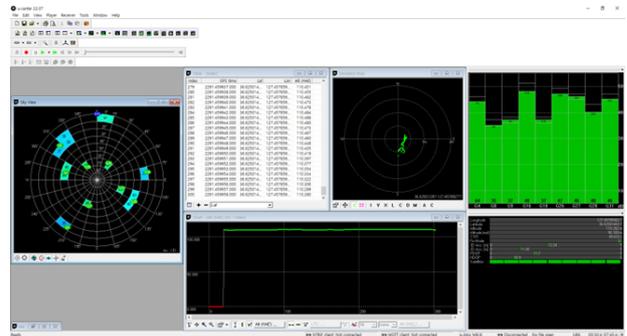
Antenna	LLA		
	Latitude	Longitude	Altitude
Reference	36.62501335	127.45785677	110.30397442
Rover1	36.62502236	127.45785677	111.30397449
Rover2	36.62502236	127.45786795	110.30397457
Rover3	36.62500434	127.45786795	109.30397457

안테나 신호를 생성하고, USRP 기반 RF 송신 모듈을 사용하여 2개의 안테나 신호를 RF 대역으로 상향 변환 및 송신한다. 다중 안테나의 반송파 신호 생성을 검증하기 위해 두 대의 상용수신기를 사용하여 의사거리와 반송파 위상의 원시 측정치를 획득 후, MATLAB을 이용한 자세결정 시스템 (Chae et al. 2014)을 이용하여 검증하였다.

4.1 실험 구성

Table 1에 검증을 위한 파라미터 구성을 나타내었다. RF 신호 송신을 위한 하드웨어는 NI사의 NI USRP-2952R 모듈을 사용하였다. 생성한 신호는 기준 안테나 신호와 Rover 안테나 신호로 나뉜다. 위치를 알고 있는 기준 안테나 신호는 배열 안테나 신호 처리에서 기준이 되는 안테나 신호이다. Rover 안테나 신호는 기준 안테나 신호에 시각 지연과 위상 지연을 반영한 신호이다. 기준 안테나의 위치는 충북대학교 전자정보2관 옥상으로 설정하였으며, 기준 안테나에 대한 3개의 Rover 안테나의 상대 위치와 자세를 Table 2에 정리하였다. Table 3에는 생성한 모든 안테나의 경위도 좌표를 정리하였다. USRP의 Local Oscillator (LO) 주파수는 생성한 신호의 IF 주파수와 GPS L1 C/A 주파수를 고려하여 1.57 GHz로 설정하였다.

Fig. 9에 신호생성기 검증 실험을 위한 하드웨어의 구성을 보였다. 신호 생성 모듈에서 생성한 바이너리 형태의 IF 파일은 RF 신호 송신 프로그램과 10G Ethernet에 의해 USRP로 전달되며, USRP에서 상향 변환된 RF 신호를 2개의 TX/RX 포트를 통해 2개의 상용 수신기로 송신한다. 상용수신기로는 U-blox사의 EVK-M8T 모델 (ublox 2024)을 사용하였다. PC1과 PC2는 각각 2개의 U-blox 수신기에 연결되어 항법 수행과 원시 측정치 수집에 사용된다.

**Fig. 9.** Hardware configuration for validation.**Fig. 10.** Snapshot of U-center.

4.2 두 개의 상용수신기를 이용한 다중 안테나 생성 신호 성능 검증

본 논문의 다중 안테나 신호생성기는 위상 지연을 고려하여 설계하였으며, 해당 신호생성기의 반송파 측정치의 타당성은 정밀 항법 혹은 자세결정 등을 통하여 검증할 수 있다.

다중 안테나의 반송파 측정치를 검증하기 위해, RF 신호 송신 모듈에서 송출한 신호를 2개의 상용수신기(EVK-M8T)로 동시에 수신하고, U-blox사에서 제공하는 GNSS 평가 소프트웨어 프로그램인 U-center를 사용하여 항법을 수행한다. 동시에 코드 의사거리와 반송파 위상의 원시 측정치를 저장한다. Fig. 10의 U-center에서 코드 의사거리를 이용한 항법 결과로부터 코드 측정치의 동작을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 11a의 신호생성기의 출력 창과, Fig. 11b의 U-center의 Signal to Noise Ratio (SNR) 정보를 비교하면 신호생성기가 정상적으로 동작함을 확인할 수 있다.

저장한 코드 의사거리와 반송파 위상의 원시 측정치 파일 (*.ubx)을 RINEX 파일로 변환해 (Zheng et al. 2023) 기존의 자

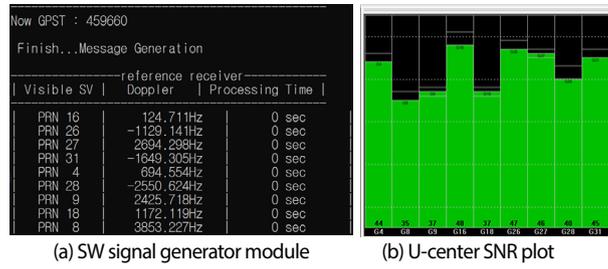


Fig. 11. Screenshot of signal generator module and U-center SNR plot.

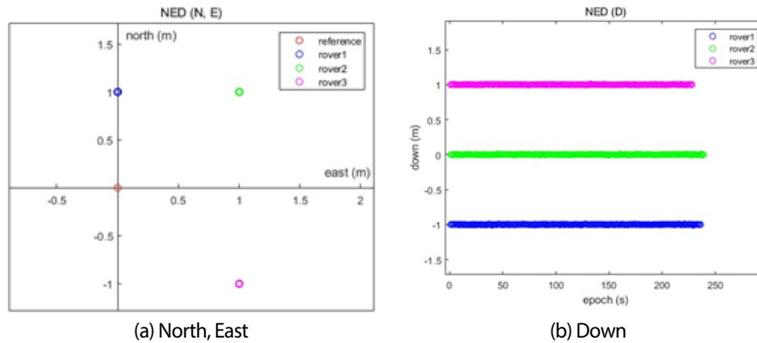


Fig. 12. NED coordinates rover antenna result.

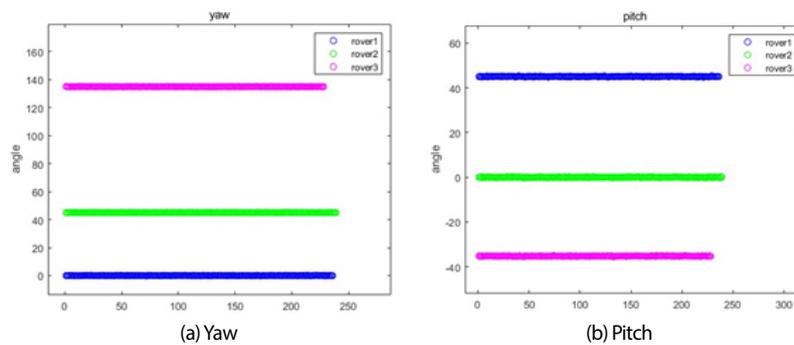


Fig. 13. Rover antenna attitude determination result.

Table 4. Rover antenna LLA coordinate positioning result.

Rover antenna	North		East		Down	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
Rover1	0.9997	0.0013	8.003e-6	0.0014	-0.9997	0.0033
Rover2	0.9997	0.0015	1.000	0.0014	-4.7183e-6	0.0034
Rover3	-1.0002	0.0014	1.0001	0.0013	0.9999	0.0031

Table 5. Rover antenna attitude determination result.

Rover antenna	Yaw		Pitch	
	Mean	STD	Mean	STD
Rover1	4.3454e-4	0.0805	45.0016	0.1124
Rover2	45.0091	0.0542	0.0020	0.1390
Rover3	135.0036	0.0612	-35.2573	0.0926

세결정 프로그램에 입력하여 검증한다. MATLAB 자세결정 프로그램은 반송파 위상 측정치를 사용해 정밀항법 및 자세결정을 수행하는 프로그램으로 이중차분된 반송파 위상 측정치와 BC-LAMBDA 기법을 사용해 미지정수를 결정하여 Rover 안테나의 정밀한 상대 위치와 자세를 결정한다 (Chae et al. 2014). 신호생성기에서 생성한 상대위치와 자세의 참 값과, 자세결정 프로그램에서 구한 상대위치와 자세를 비교함으로써 다중 안테나 신호가 정상적으로 생성되었다는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 기준안테나에 대한 Rover1, Rover2, Rover3 안테나의 상대위치와 자세를 구하여 생성한 코드 의사거리와 반송파 위상 측정치를 검

증하였다. NED 좌표계에서의 측위 결과와 자세결정 결과를 Figs. 12와 13에 나타내었으며, 평균 (Mean) 값과 표준편차 (Standard Deviation, STD) 값을 Tables 4와 5에 정리하였다. Table 2에서 설정한 신호생성기의 Rover 안테나의 참 상대위치와 비교했을 때

North, East, Down의 평균값이 각각 소수점 아래 4번째 자리 수준의 오차를 보여준다. 표준편차는 N-축과 E-축으로 약 1.5 mm, D-축으로 3.3 mm으로 나타났다. 또 자세결정 프로그램에서 구한 Yaw와 Pitch의 평균값이 소수점 아래 3번째 자리 수준의 오차를 보여준다. 표준편차는 Yaw 0.06도, Pitch 0.1도 정도로 나타나 기존의 수신기와 유사한 성능을 보였다.

이상의 결과로 논문에서 설계, 구현한 다중 안테나 신호생성기가 정상적으로 동작함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 단일 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기를 확장하여 USRP 기반 다중 안테나 GPS L1 C/A RF 신호 생성기를 설계하였다. 기존 신호 생성기와 비교하여 다중 안테나 신호 생성기는 기존 안테나와 Rover 안테나의 배치와 구조를 고려하여 신호의 시간 지연과 위상 지연을 반영한 코드 의사거리와 반송파 위상 측정치를 생성하였다. 이를 위하여 기준안테나와 Rover 안테나에서 계산한 steering vector로부터 시간과 위상 지연을 계산하는 부분이 추가되었다. 또한 반송파 출력의 해상도 향상을 위해 기존의 LUT 대신 cos/sin 직접 계산으로 반송파 위상을 생성하도록 변경하였다. 또한 다중 채널 USRP를 이용하여 안테나 별로 따로 RF 신호를 송신하도록 구성하였다.

설계한 신호 생성기는 상용수신기를 이용하여 동작과 성능을 확인하였다. 먼저 상용수신기의 신호 획득과 추적이 신호생성기와 일치함을 확인하였으며, 두 개의 상용 수신기에서 얻은 코드 의사거리와 반송파 위상 원시 측정치를 자세결정 시스템에 적용하여 모든 측정치가 정상적으로 생성이 되고 있음을 확인하였다.

설계한 다중 안테나 신호생성기가 정밀 항법, 자세결정 시스템 개발에 사용될 수 있을 정도의 성능을 보여주었으며, 더 나아가 A/DOA, 빔포밍, 널링 등의 다양한 배열신호 처리 시스템 개발에 사용될 수 있음을 보여준다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, G. Park, D.-H. Hwang and C. Park; methodology, G. Park and C. Park; software, G. Park.; validation, G. Park; formal analysis, G. Park. and C. Park.; investigation, G. Park.; resources, G. Park.; data curation, G. Park.; writing—original draft preparation, G. Park; writing—review and editing, G. Park. and C. Park.; visualization, G. Park., H. S. Seo and C. Park; supervision, C. Park; project administration, C. Park, D.-H. Hwang and Y. B. Kim; funding acquisition, D.-H. Hwang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Chae, J. G., Lee, D. S., Kang, I. S., & Park, C. 2014, Design and Evaluation of Real-time GNSS Attitude Determination Systems using Low Cost Receivers, *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 63, 1259-1265.
- Choi, C.-M. 2016, GPS Anti-Jamming Using Beamforming Technique, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 20, 451-456. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.2.451>
- Choi, J. H., Kim, Y. G., & Ahn, M. S. 2015, An Implementation of a GPS Signal Generator based on FPGA and Indoor Positioning System, *Journal of Satellite, Information and Communications (KOSST)*, 10(3), 38-43. <https://www.koreascience.kr/article/JAKO201571360572766.page>
- Di, R. 2013, A USRP-Based Flexible GNSS Signal Recording and Playback System: Performance Evaluation and Study, Master Thesis, Miami University. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=miami1377279204
- Ettus Research 2023, USRP Hardware Driver and USRP Manual, [Internet], cited 2023 July, available from: https://files.ettus.com/manual/page_capi.html
- Goto, Y., Iwata, T., Yamashina, K., Susaki, H., & Arai, O. 2003, Estimation of High Precision Carrier-Phase by Accumulated-Delta-Range (ADR) Data for Reduction of the Multipath Problem and Evaluation by 2D-MUSIC, *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*, Portland, OR, Sep 9-12, 2003, pp.1908-1913. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=5377>
- Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. 2007, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, 2nd Ed. (NY: Wiley)
- Han, Q., Li, P., Nie, J., Huo, S., & Wang, F. 2013, Recent Development and Analysis of GNSS Array Signal Simulators, 2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Shenyang, China, 21-23 Sep 2013, pp.1386-1389. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2013.309>
- Hu, Y. 2019, GNSS SDR Signal Generator Implementation Based on USRP N210, *Journal of Physics: Conference Series*, Computer Engineering 9-11 August 2019, Guizhou, China, 1314, 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012016>
- IZT innovationszentrum 2024, IZT S1000 GNSS, [Internet], cited 2024 August 16, available from: <https://www.izt-labs.de/izt-s1000-gnss/>

- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2017, *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*, 3rd Ed. (MA: Artech House).
- LabSat, LabSat 4 [Internet], cited 2024 August, available from: <https://www.labsat.co.uk/index.php/en/products/labsat-4>
- Larsen, S. S., Jensen, A. B. O., & Olesen, D. H. 2021, Characterization of Carrier Phase-Based Positioning in Real-World Jamming Conditions, *Remote Sensing*, 13, Article 2680. <https://doi.org/10.3390/rs13142680>
- Lee, S. W., Kim, T. H., Joo, I. O., Sin, C. S., & Kim, J. H. 2013, Software Based GPS Signal Generation Simulator, in 2013 KSAS Fall Conference, JeJu Island, South Korea, 13-15 Nov. 2013, pp.499-502.
- Li, X., Huang, J., Li, X., Shen, Z., Han, J., et al. 2022, Review of PPP-RTK: achievements, challenges, and opportunities, *Satellite Navigation*, 3, 28. <https://doi.org/10.1186/s43020-022-00089-9>
- Lu, Z., Chen, F., Xie, Y., Sun, Y., & Cai, H. 2020, High Precision Pseudo-Range Measurement in GNSS Anti-Jamming Antenna Array Processing, *Electronics*, 9, 412. <https://doi.org/10.3390/electronics9030412>
- National Instruments 2024, How Does NI USRP Hardware Work?, [Internet], cited 2024 July 1, available from: <https://www.ni.com/ko/shop/wireless-design-test/what-is-a-usrp-software-defined-radio/what-is-ni-usrp-hardware-.html>
- Noh, J. H., Jo, G. H., Bu, S. C., Ko, Y. H., Park, C., et al. 2022, Design of a Software-Based GPS RF Simulator, *JPNT*, 11, 127-134. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.2.127>
- Park, C., Lee, J. G., Jee, G.-I., & Lee, Y. J. 1997, Precise Attitude Determination using GPS Carrier Phase Measurements, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 3, 602-612. <https://koreascience.or.kr/article/JAKO199711919669436.page>
- Park, K. W., Yang, J.-M., & Park, C. 2018, A Design and Implementation of Software Defined Radio for Rapid Prototyping of GNSS Receiver, *JPNT*, 7, 189-203. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.4.189>
- ROHDE & SCHWARZ 2024, R&S®SMBV-K44/-K65/-K66/-K67/-K91/-K92/-K93/-K94/-K95/-K96/-K101/-K102/-K103/-K105/-K107/-K110 Satellite Navigation Operating Manual, [Internet], cited 2024 August 20, available from: https://www.rohde-schwarz.com/kr/manual/r-s-smbv-k44-k65-k66-k67-k91-k92-k93-k94-k95-k96-k101-k102-k103-k105-k107-k110-manuals_78701-28844.html
- Safran, Skydel GSG-8, [Internet], cited 2024 July, available from: <https://www.safran-group.com/products-services/skydel-gsg-8-advanced-gnss-simulator>
- Spirent 2024, GSS9000 GNSS simulator, [Internet], cited 2024 August 20, available from: <https://www.spirent.com/products/gnss-simulator-gss9000>
- Tsuji, T., Yonebayashi, K., Fujiwara, T., & Ohsawa, S. 2019, GNSS array antenna for mitigating multipath errors in urban environment, *E3S Web of Conferences*, 94, 03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199403009>
- ublox 2024, EVK-M8, [Internet], cited 2024 August 9, available from: <https://www.u-blox.com/en/product/evk-8evk-m8>
- Wyman, G. C., Swaszek, P. F., & Hartnett, R. J. 2010, A USRP-Based Testbed for Navigation Education, Research, and Development, *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, 25-27 January 2010, pp.618-626. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8844>
- Yigit, O., Ascı, Y., & Yegin, K. 2018, Dual band GNSS antenna for missile applications, 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, Poland, 14-17 May 2018, pp.149-150. <https://doi.org/10.23919/MIKON.2018.8405160>
- Zheng, H., Atia, M., & Yanikomeroğlu, H. 2023, Real GPS Data collected in Downtown Ottawa, *IEEE Dataport*. <https://doi.org/10.21227/5v28-w131>



Gyeongmin Park is M.S. student in the Department of Intelligent Systems & Robotics, Chungbuk University, Cheongju, Korea. He received B.S. degrees in Electrical Engineering from Chungbuk National University in 2023. His research interests include GNSS, SDR, Precise positioning.



Dong-Hwan Hwang is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S. degree from Seoul National University, Korea in 1985, and his M.S. and Ph.D. degrees from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea in 1987 and 1991, respectively. His research interests include GNSS/INS integrated navigation system design and GNSS applications.



Hung Seok Seo received the Doctor of Engineering degree in Electronics from Chungnam National University in 2003. He joined Navicom Co., Ltd. in 2002 and has 21 years of experience in satellite navigation. He has been working as a Director of Research Institute for Microinfinity since 2024.



Young Baek Kim received B.S. and M.S. degree in Electrical Engineering from Pusan National University in 1982, 1984 respectively and Ph.D. degree in Electronics Engineering from Chungnam National University in 1998. Since joining ADD in 1984, he has been working for the development of navigation and communication systems for critical mission applications. He has been working as the head of Daejeon Office of Microinfinity since 2021. His research interests include Anti-jamming/Anti-spoofing/Multi-GNSS, GNSS/INS, LEO PNT and Alternative PNT Technology.



Chansik Park received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Seoul National University in 1984, 1986 and 1997, respectively. He has been a Professor with the School of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, since 1997. His research interests include GNSS, PNS, SDR, integer ambiguity resolution algorithm and Error Analysis.

