

Design of a Software-Based GPS RF Simulator

Jae Hee Noh¹, Gwang Hee Jo¹, Sung Chun Bu², Yo Han Ko², Chansik Park³, Sang Jeong Lee^{1†}

¹Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²LIG Nex1, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

³Department of Control and Robotics Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

ABSTRACT

In this paper, a low-cost, flexible GPS simulator based on USRP is designed as a general-purpose software wireless front-end. The simulator consists of a software GPS signal generator and a USRP-based RF transmitter. The simulator supports various scenarios including specified reception time, quantization bit level, I/Q data types, IF frequency, sampling frequency, SNR, ionospheric delay and user dynamics. The generated GPS RF signal is verified using the spectrum analyzer and off-the-shelf GNSS receivers such as U-blox M8T. The experimental results shows that the difference between generated and real live signal is ignorable. It is expected that designed GPS simulator can be used to GNSS signal design, receiver design and signal processing algorithms such as anti-jamming.

Keywords: GPS simulator, USRP, IF signal generator

1. 서론

다양한 분야에서 위치 및 시간 정보를 활용하면서 Global Navigation Satellite System (GNSS)에 대한 의존도가 지속적으로 증가하고 있으며, 이와 함께 GNSS 신호를 수신하기 위한 기술도 중요해졌다. 안정적인 GNSS 수신기를 설계하기 위해서는 다양한 시나리오에 대한 성능 평가가 필요하며, 실제 위성 신호를 수신할 경우에는 원하는 시나리오대로 수신하기 어렵다. 파라미터와 시나리오 설정이 자유로운 GNSS 시뮬레이터는 GNSS 수신기 개발을 가능하게 하는 중요한 요소이며, 다양한 업체에서 GNSS 시뮬레이터를 제조 및 판매하고 있다 (GPS World Staff 2021, LabSat 2021, OROLIA 2021, Spirent 2021).

상용 GNSS 시뮬레이터는 시뮬레이터 별로 전용 하드웨어를 갖고, 제작사에서 제공하는 소프트웨어를 이용하여 제어할

수 있다. 이런 형태의 시뮬레이터는 새로운 위성항법신호가 Full Operational Capability될 때마다 하드웨어 교체가 필요하고, 다중 센서를 활용한 시나리오 설계를 위해서는 시뮬레이터와 호환되는 센서의 추가 구매해야 한다는 단점이 있다. 하드웨어는 소프트웨어와 다르게 구조를 변경할 때마다 새로 설계해야 하기에 제품 개발에 많은 시간과 비용이 소요된다. 그러나, Software Defined Radio (SDR) 플랫폼을 활용하면 하드웨어를 재설계하지 않고 소프트웨어만 변경만을 통해 구조 변경과 기능 추가에 용이하고, 하드웨어 설계 대비 시간과 비용이 적게 들어가는 장점이 있다. 또한, 신호 수신 환경, 위성의 환경, 신호 송신 주파수 대역 등과 같은 시나리오 설정에 제약이 없기 때문에 상용 시뮬레이터보다 확장성이 높다 (Wyman et al. 2010, Di et al. 2012, Brown et al. 2012, 2013, Di 2013, Hu 2019). 소프트웨어 기반 GNSS 시뮬레이터는 상용 시뮬레이터보다 저렴하며 기능 추가에 용이하다는 장점이 있지만, 국내에서는 소프트웨어를 활용한 GNSS 시뮬레이터에 대한 연구가 미비하다 (Lee et al. 2013, Choi et al. 2015, Kim 2018).

본 논문에서는 National Instruments (NI)사의 범용 SDR 플랫폼인 Universal Software Radio Peripheral (USRP)를 사용하여 유연하고 확장성을 갖는 GPS 시뮬레이터를 설계한다. GPS 시뮬레이터는 수신기가 수신한 신호를 모사하기 위한 소프트웨어 Intermediate Frequency (IF) 신호 생성 모듈과 신호 생성 모듈로부터 생성한 IF 신호를 Radio Frequency (RF) 신호로 상향 변환(up-conversion)하고 송신할 수 있는 RF 송신 모듈로 구성된다.

Received Apr 12, 2022 Revised May 08, 2022 Accepted May 24, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: eesjl@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-825-3991 Fax: +82-42-823-5436

Jae Hee Noh <https://orcid.org/0000-0002-6314-738X>

Gwang Hee Jo <https://orcid.org/0000-0001-8732-9770>

Sung Chun Bu <https://orcid.org/0000-0002-5133-4540>

Yo Han Ko <https://orcid.org/0000-0002-0379-9079>

Chansik Park <https://orcid.org/0000-0003-2650-4947>

Sang Jeong Lee <https://orcid.org/0000-0002-9400-5157>

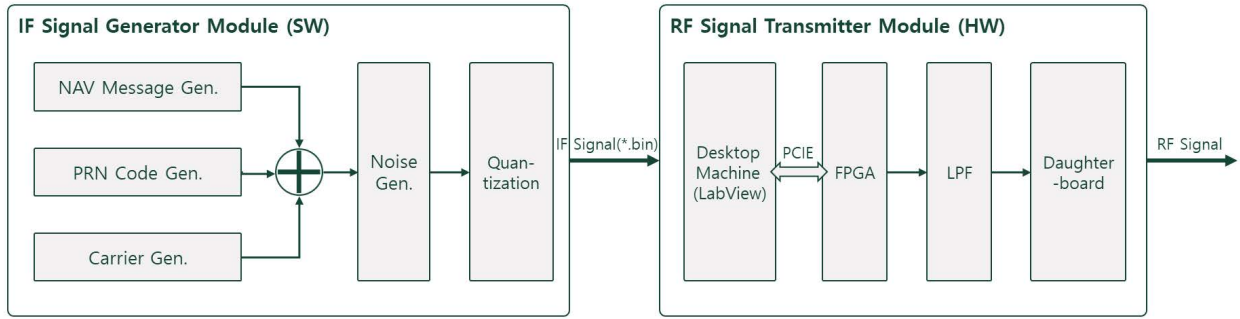


Fig. 1. Structure of a SW-based GPS RF simulator.

GPS 시뮬레이터는 특정 GPS 시간, 수신기 움직임, 전리층 지연 포함 또는 미포함과 같은 다양한 시나리오를 반영할 수 있고, RF 송신기로부터 송신된 신호를 다른 USRP RF front-end 또는 상용 수신기로 수신할 수 있도록 설계한다. 설계한 GPS 시뮬레이터는 스펙트럼 분석기를 통해 신호의 주파수 스펙트럼을 확인하고 난 후 상용 수신기를 활용하여 GPS 신호 수신 가능 여부를 확인하는 총 2단계를 거쳐 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 설계한 GPS L1 C/A SIGNAL RF 시뮬레이터의 구조를 설명하고, 3장에서 시뮬레이터의 성능을 검증하고, 4장은 결론이다.

2. GPS L1 C/A SIGNAL RF 시뮬레이터 설계

본 논문에서는 GPS L1 C/A 신호를 생성하고 L1 대역 (1575.42 MHz)에서 송신할 수 있는 GPS L1 C/A 신호의 시뮬레이터를 설계하였다. 소프트웨어 기반 GPS 신호 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 크게 IF 신호를 생성하는 신호 생성 모듈과 IF 신호를 RF 신호로 변환하고 송신하는 RF 송신 모듈로 구성된다.

신호 생성 모듈의 항법메시지 생성부에서 항법메시지를 생성하고, 코드 생성부에서 위성 별로 할당된 고유의 코드시퀀스를 생성한다. 반송파 생성부에서 도플러가 반영된 반송파를 생성하고, 신호를 혼합한다. 혼합한 신호는 잡음을 더하고 양자화를 거쳐 최종적으로 IF 신호를 바이너리 파일 형태로 생성한다.

RF 신호를 송신하기 위한 RF 송신 모듈의 하드웨어는 NI-USRP 2942R을 사용하고, 개발 도구는 LabVIEW를 활용한다. LabVIEW는 USRP를 제어하기 위한 FPGA 기반의 소프트웨어 개발 도구이며, 신호 생성 모듈에서 생성한 바이너리 파일 형태의 IF 신호는 LabVIEW 소프트웨어로 설계한 송신 플랫폼의 입력 파일로 사용한다. 송신 플랫폼을 실행할 데스크탑과 USRP는 PCI 인터페이스를 통해 연결되며, 입력한 IF 신호 데이터는 저역 통과필터를 거쳐 아날로그보드 (Daughterboard) 전달되며, 주파수 변환 후 RF 신호의 형태로 출력된다.

2.1 소프트웨어 IF 신호 생성 모듈 설계

IF 대역의 GPS 신호를 생성하기 위한 소프트웨어 신호 생성 모듈의 구조는 Fig. 2와 같다. 소프트웨어 신호 생성 모듈은 신호

생성을 위한 파라미터를 입력하는 사용자 인터페이스와 궤도 정보를 이용한 위성 궤도 생성부, 대역확산코드 생성부, 항법메시지 생성부, 반송파 신호 생성부, IF 신호 생성부로 구성되어 있다 (Kaplan 1996).

사용자 인터페이스는 수신기 동작과 관련된 파라미터와 신호 생성을 위한 기준 시각을 설정할 수 있으며, 대류층/전리층 지연 반영 여부를 선택할 수 있다. Table 1에 사용자 인터페이스에서 설정할 수 있는 주요 파라미터들을 정리하였다.

위성 궤도 생성부에서는 GPS의 궤도력 데이터가 포함된 RINEX 형태 (*.nav)의 파일을 통해 궤도 정보를 저장하고, 신호 생성 기준 시각을 GPS 시각으로 변환하는 함수를 포함한다. 위성 궤도 생성부는 GPS 시각 정보와 저장한 궤도 정보를 이용하여 위성의 위치, 속도를 계산한다.

항법메시지 생성부에서는 위성 궤도 생성부에서 저장한 궤도 정보와 시각 정보를 반영하여 GPS L1 C/A 신호의 항법메시지를 생성한다. 대역확산코드 생성부에서는 GPS의 C/A 코드를 생성하고, 반송파 신호 생성부에서는 Numerically Controlled Oscillator를 사용하여 모든 샘플에서의 반송파 신호를 생성한다. 마지막으로 IF 신호 생성부에서는 가시 위성에 대해서 생성한 항법메시지, 대역확산코드, 반송파를 합치고, 여기에 잡음을 더하고 양자화된 형태의 IF 신호를 생성한다. Fig. 3에 설계한 소프트웨어 신호 생성기로 생성한 GPS L1 C/A 신호의 Power Spectral Density (PSD)를 보였다. 이때, PSD 확인을 위해 생성한 신호는 잡음을 더하지 않고 양자화된 신호이다.

2.2 USRP 기반 RF 신호 송신 모듈 설계

IF 신호를 RF 신호로 상향 변환 및 송신하기 위한 RF 송신기의 신호 처리 과정을 설명하기 위해 일반적인 USRP 하드웨어 구조를 Fig. 4에 보였다 (National Instruments 2021).

USRP는 PCI express 또는 이더넷을 통해 데스크톱과 연결되어 I/Q 데이터를 송수신할 수 있다. Fig. 4의 위쪽 경로는 송신 프론트 엔드를 나타내며, 아래쪽 경로는 수신 프론트 엔드를 나타낸다. 송신 USRP의 송신 체인은 크게 디지털 파트와 아날로그 파트로 나눌 수 있으며, 디지털 파트는 IF 신호를 상향 변환하기 위한 Digital Up Converter, 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하기 위한 Digital to Analog Converter를 포함한다. 아날로그 파트는 I/Q 데이터를 믹싱하기 위한 믹서, 신호를 증폭하기 위한 증폭

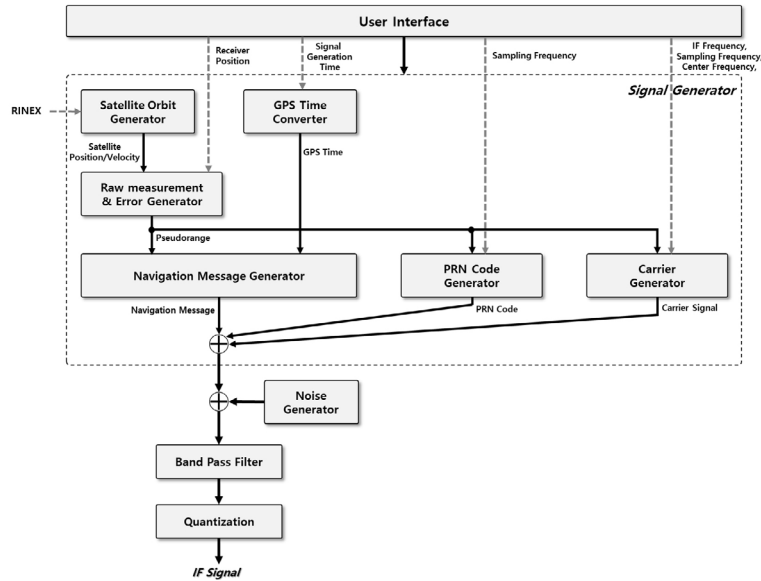


Fig. 2. Structure of GPS IF signal generator module.

Table 1. UI configuration parameters.

Parameter	Description	Unit
Simul_T	Simulation time	sec
ADC_BIT	Quantization bits	Bits
IQ	In-phase only / In-phase+Quadrature	-
IF_freq	IF frequency	Hz
Fs	Sampling frequency	Hz
Signal2Ratio	Signal-to-noise ratio	dB
M_angle	Mask angle	°
RX_lat	Receiver's position: Latitude	°
RX_lon	Receiver's position: Longitude	°
RX_hei	Receiver's position: Height	meter
MOV	Whether to move the receiver: static/dynamic	-
Year	Local time: Year	year
Month	Local time: Month	month
Day	Local time: Day	day
Hour	Local time: Hour	hour
Min	Local time: Minute	min
Sec	Local time: Second	sec
N_ch	Available channel	-
Tropo_delay	Tropospheric delay: ON/OFF	-
Iono_delay	Ionospheric delay: ON/OFF	-

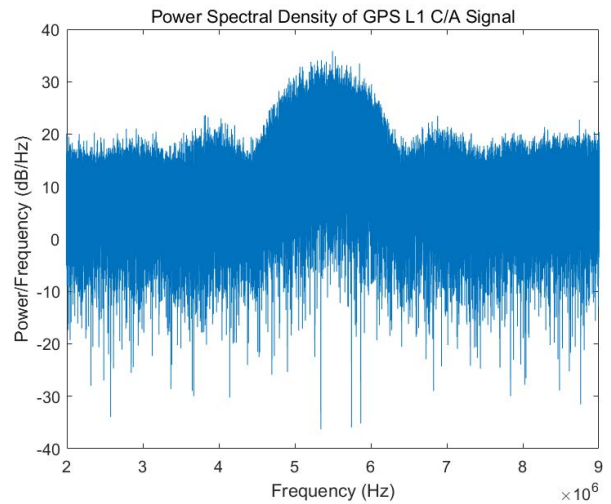


Fig. 3. GPS L1 C/A signal spectrum (sampling frequency 25 MHz).

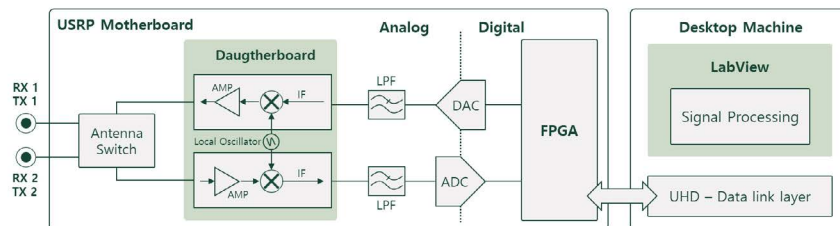


Fig. 4. Typical block diagram of a USRP device.

기, RF 신호를 송신하는 안테나를 포함한다.

본 논문에서는 FPGA 기반의 LabVIEW 소프트웨어를 사용하여 송신 플랫폼을 구현하였다. 송신 플랫폼은 USRP 설정부, 신호

파일을 읽고 쓰기 위한 파일 로드 및 큐 설정부, 저장한 신호 데이터를 송신하는 송신부로 구성된다 (National Instruments 2013). 송신 플랫폼의 전체 동작 흐름도는 Fig. 5에 보였다.

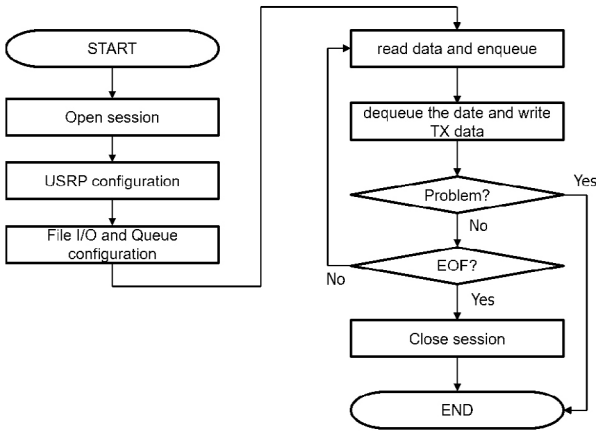


Fig. 5. GPS L1 RF transmitter: Flowchart.

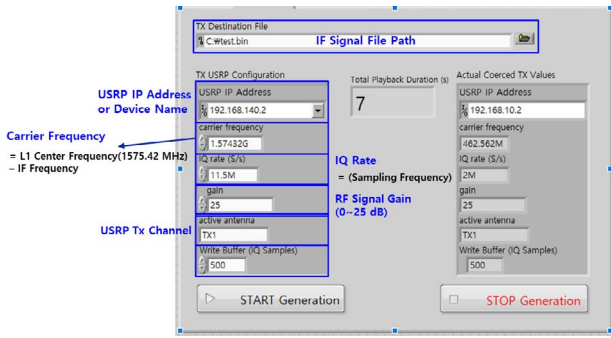


Fig. 6. Tx platform: GUI.

파라미터 설정부는 송신 플랫폼의 Graphical User Interface (GUI)를 통해 신호 송신 환경 설정하고, 입력값으로부터 USRP 하드웨어와 LabVIEW를 연동하여 신호 송신 준비를 한다. 송신 플랫폼의 GUI는 Fig. 6에 보였다. 신호를 송신하기 위한 설정 파라미터는 IF 신호 파일 경로, USRP 장치 이름, RF 신호의 반송파 주파수, I/Q 데이터 처리 속도, 신호 이득, 활성 안테나 종류, 버퍼 크기를 포함한다. 이때, RF 송신기의 입력 파일은 소프트웨어 신호 생성기를 이용하여 생성한 바이너리 파일 형태의 IF 신호이다.

파일 로드 및 큐 설정부는 바이너리 파일을 여는 함수, 파일로부터 신호 데이터를 읽어오는 함수, 신호 데이터를 큐에 저장하는 함수를 포함한다. 파일 로드 단계에서는 바이너리 형태의 IF 신호 파일을 플랫폼에서 열고, IF 신호의 I/Q 데이터를 읽는다. 이후 큐 설정 단계에서는 바이너리 파일로부터 읽어온 I/Q 데이터를 큐에 추가하고 송신부의 큐에 내보낼 준비를 한다.

RF 신호 송신부에서는 앞서 저장한 I/Q 데이터를 가져와 USRP로 내보낸다. 이때, 논문에서 설계한 플랫폼은 USRP로 I/Q 데이터를 내보내면 큐의 앞부분에서 내보낸 데이터를 제고하고, 새로운 I/Q 데이터를 추가하여 연속적인 신호 송신이 가능하도록 설계하였다. 그리고 RF 신호 송신부에서는 지속적으로 데이터 존재 여부를 확인하여 파일의 끝에 다다르면 USRP와의 연동을 닫고 메모리를 해제하는 기능을 수행한다.

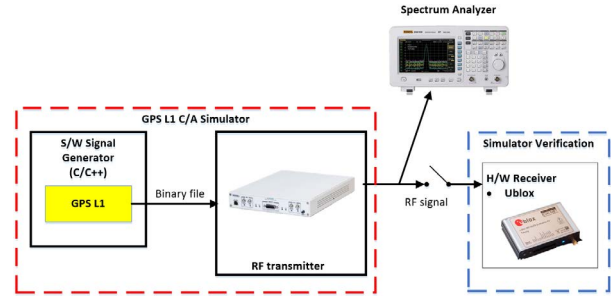


Fig. 7. Test configuration for simulator verification.

3. GPS L1 C/A SIGNAL RF 시뮬레이터 검증

본 논문에서 설계한 GPS RF 신호 시뮬레이터의 검증은 스펙트럼 분석기를 통해 RF 신호의 송신 파형을 확인하고, 상용 수신기를 활용하여 GPS 신호 수신 가능 여부를 확인하는 총 2단계를 거쳐 수행하였다. 이때, 상용 수신기는 U-blox 사의 U-blox M8T 수신기를 이용하였고, 시뮬레이터 검증을 위한 테스트 구성은 Fig. 7에 보였다.

3.1 실험 구성

소프트웨어 기반 GPS L1 C/A 신호 RF 시뮬레이터의 동작 검증은 2단계로 거쳐 수행하였다. 첫 번째 검증 방법은 스펙트럼 분석기를 활용하여 L1 대역에 올바른 전송 파형을 형성하는지 확인하는 것이고, 두 번째 검증 방법은 L1 대역의 GPS L1 C/A 신호를 수신할 수 있는 U-blox M8T 수신기를 이용하여 송신한 신호를 수신할 수 있는지 확인하는 것이다. Table 2에 시뮬레이터를 검증하기 위한 실험 구성을 정리하였다.

RF 신호를 송신하기 위한 하드웨어는 USRP 2942R 모델을 사용했으며, 수신기의 위치는 충남대학교 공과대학 2호관 옥상으로 설정하였다. GPS L1 C/A 신호를 송신하기 위한 반송파 주파수는 생성한 신호의 IF 주파수와 GPS L1 C/A 신호의 중심 주파수를 고려하여 1.57 GHz로 설정하였다.

Fig. 8에 시뮬레이터를 검증하기 위한 장비의 구성을 보였으며, RF 신호 송신 모듈의 입력 파일은 소프트웨어 신호 생성 모듈로 생성한 바이너리 형태의 IF 신호 파일이다. 신호 데이터 파일은 USRP 2942R로 로드되어 RF 신호로 상향 변환되고, USRP의 출력 포트는 직류 블록에 연결된다. 신호 분배기는 신호를 스펙트럼 분석기와 40 dB 감쇠기가 연결된 U-blox M8T 수신기에 각각 연결한다.

3.2 송신 신호의 신호 파형 및 수신 검증

신호 분배기로부터 분배한 RF 신호는 각각 스펙트럼 분석기와 U-blox M8T 수신기로 전송되며, 이를 이용하여 신호의 파형과 수신 가능 여부를 검증할 수 있다. Fig. 9에 설계한 GPS 신호 시뮬레이터의 출력 포트와 스펙트럼 분석기를 RF 케이블로 연결하였을 때 관측한 신호 파형을 도시한 것이다.

스펙트럼 분석기에 나타난 신호의 중심 주파수는 GPS L1 C/A

Table 2. Experiment set up for the verification of a RF transmitter module.

Common Set	Setting
RF-Front end	USRP 2942R
Receiver position (Longitude, Latitude, Height)	36.364194°, 127.345633°, 93.7988 m
Intermediate frequency	5.42 MHz
Carrier frequency	1.57 GHz
IQ rate	25 MHz
Satellite signal (PRN)	GSP L1 C/A (PRN 4, 7, 8, 9, 16, 21, 26, 27)
Path delay (Tropospheric+Ionospheric)	ON/OFF

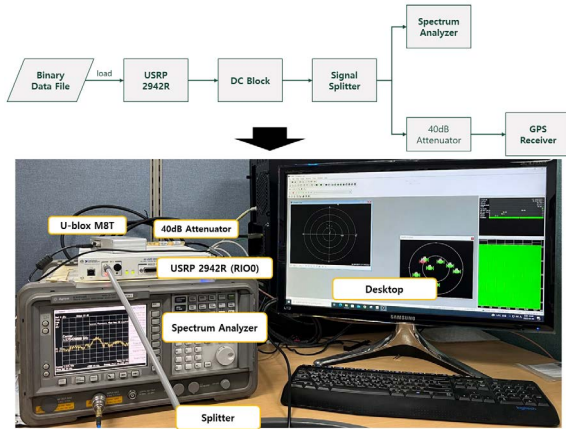


Fig. 8. Devices connection for the verification of a RF transmitter module.

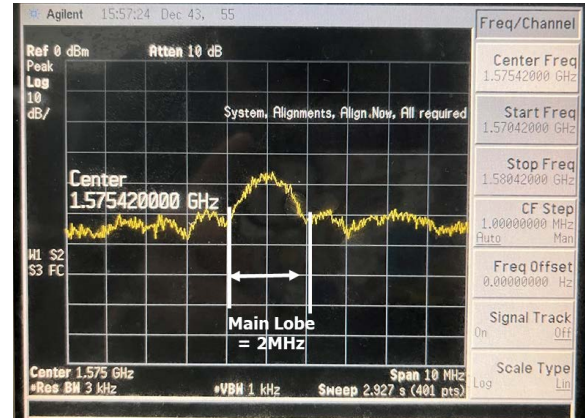


Fig. 9. Spectrum analyzer monitoring result of GPS L1 C/A signal.

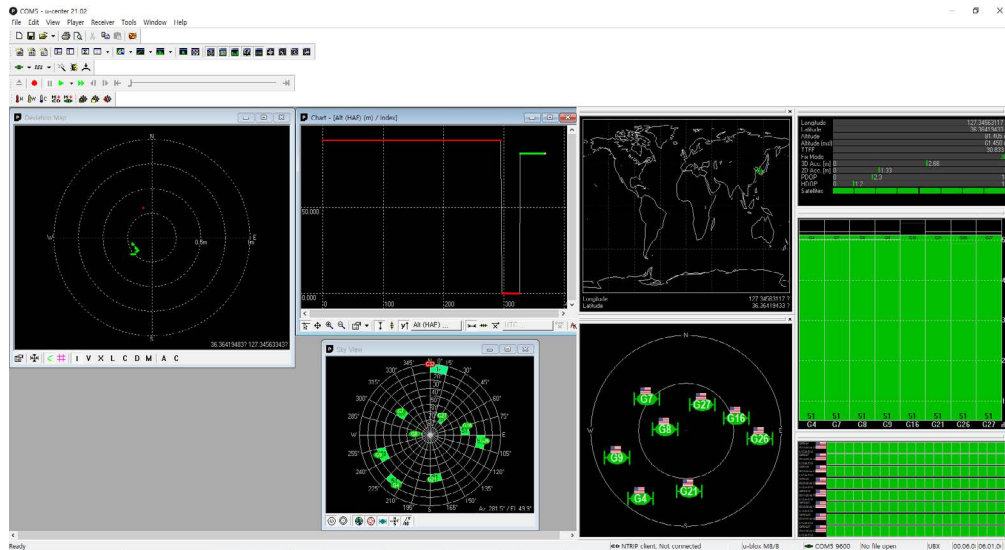


Fig. 10. Snapshot of U-center software.

의 중심 주파수인 1575.42 MHz와 일치하며, 중심 주파수에 존재하는 주 로브 (Main lobe)가 약 2 MHz로 Fig. 3에 도시한 결과와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

스펙트럼 분석기를 통해 신호 파형을 검증한 이후 GPS 시뮬레이터에서 송신한 신호가 상용 수신기 (U-blox M8T 수신기)를 통해 수신 가능한지 검증하였다. U-blox 사의 수신기를 이용하여 신호 수신을 검증하기 위해 U-blox 사에서 제공하는 신호 수집 소프트웨어 프로그램인 U-center를 사용하였다. Fig. 10에 설계한 RF 송신기로부터 송신한 신호를 U-blox M8T 수신기로 수신

한 결과를 보였다.

Fig. 10의 결과를 통해 송신한 신호가 상용 수신기에서 문제없이 수신하는 것을 확인하였다. 상용 수신기를 통해 수신한 신호가 GPS 생성 모듈에서 생성한 신호와 일치하는지 확인하기 위해 Fig. 11에 U-center에서 제공하는 위성 위치와 신호의 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 모니터링 결과를 보였다. Fig 11을 통해 8개의 위성 (PRN 4, 7, 8, 9, 16, 21, 26, 27)이 획득되었음을 알 수 있고, 이는 Fig. 12에 도시한 신호생성기에서 신호 생성에 활용한 위성 PRN과 일치함을 확인하였다. U-center는 위성 위치와 신호의

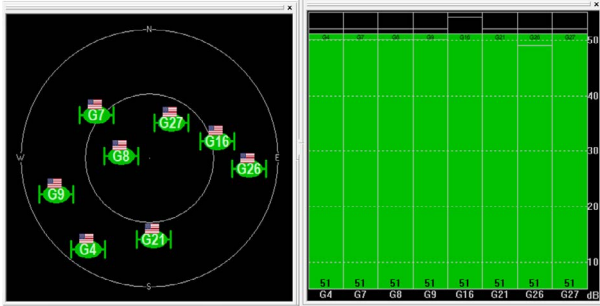


Fig. 11. SNR and sky plot monitored by U-blox M8T receiver.

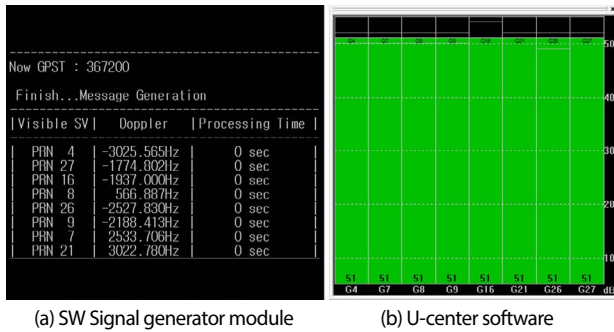


Fig. 12. Screenshot of a SW signal generator module and U-center software.

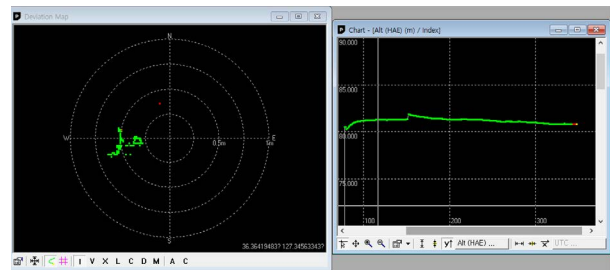


Fig. 13. Deviation map and chart map (height) monitored by U-blox M8T receiver - Path delay OFF.

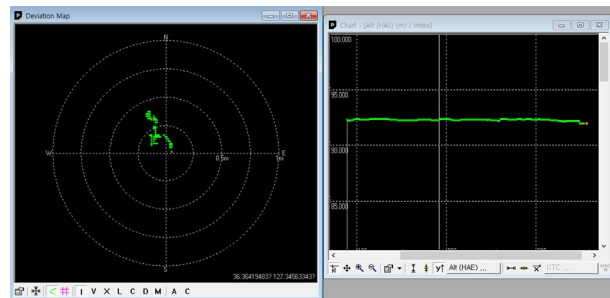


Fig. 14. Deviation map and chart map (height) monitored by U-blox M8T receiver - Path delay ON.

SNR 정보뿐만 아니라 수신기가 추정한 사용자의 3D 위치도 제공해주며, U-blox 수신기를 통해 수신한 신호를 통해 계산한 사용자 위치 정보는 Fig. 13에 보였다.

U-center에서 추정한 사용자의 수평 위치는 1 m 이내로 추정이 가능하나, 실제 위치 (36.36419483°, 127.34563343°, 93.7988 m)와 비교하였을 때, 0.5 m 정도의 오차가 발생하였고, 수직 오차도 10 m 수준으로 발생하였다. 논문에서 설계한 소프트웨어 신호생성 모듈은 위성 신호 전파 과정에서 발생하는 오차 요인들을 반영하지 않았으나, U-center에서는 사용자 위치 추정 시에 프로그램 내에 기본적으로 설정된 알고리즘으로 오차 요인들을 보정하고 있기 때문에 이러한 오차가 발생하게 되었다.

이에 본 논문에서는 GPS 시뮬레이터의 정확한 성능 검증을 위해 대류층 지연 오차와 전리층 지연 오차를 반영하여 신호를 생성한 후, 항법 성능을 재 검증하였다. 그 결과는 Fig. 14에 보였다. 대류층 지연 오차와 전리층 지연 오차를 반영한 신호로부터 항법을 수행한 결과, 수평 위치 오차를 1 m 이내로 유지하며, 바이어스 오차도 0.3 m 이내로 줄어드는 것을 확인하였다. 수직 오차도 평균 92.8 m 수준으로, 실제 위치와 1 m 이내의 오차를 유지하는 것을 확인하였다. 상용 수신기를 이용한 신호 검증 결과를 통해, 논문에서 설계한 GPS 시뮬레이터가 GPS L1 C/A 신호를 문제없이 모사할 수 있다고 판단하였다.

4. 결론

본 논문에서는 소프트웨어 IF 신호 생성 모듈과 USRP 기반 RF 송신 모듈로 구성된 GPS L1 C/A 신호 시뮬레이터를 설계하고 동작을 검증하였다. GPS L1 C/A 신호 시뮬레이터는 신호 생성 기준 시간, I/Q 데이터 유형, IF 주파수, 샘플링 주파수, 양자화 비트 레벨, 수신기 움직임과 전리층 지연을 포함한 다양한 시나리오를 지원한다. IF 신호 생성 모듈은 사용자 설정에 맞춰 측정치를 생성하며 이를 기반으로 반송파, PRN 코드, 항법메시지를 생성하고, IF 신호 생성부에서 잡음을 더해 양자화된 형태의 IF 신호를 생성할 수 있도록 설계하였다. RF 송신 모듈은 PCI express 통해 데스크톱과 연결하고, 소프트웨어 프로그램을 이용하여 USRP를 제어하였다. 이때, RF 송신 모듈에서 송신한 신호는 다른 USRP RF front-end 또는 상용 수신기로 수신할 수 있도록 설계하였다.

논문에서 설계한 GPS 시뮬레이터는 스펙트럼 분석기와 상용 수신기를 이용하여 검증하였다. 최종적으로 RF 송신 모듈로 송신한 신호가 수평 위치 오차와 수직 위치 오차 모두 1 m 이내를 유지하며, 설계한 시뮬레이터가 정적인 환경에서 안정적으로 동작함을 확인하였다. 검증 결과를 통해, 논문에서 설계한 프로토타입의 RF 신호 생성 시뮬레이터는 하드웨어의 구조 변경없이 소프트웨어를 통한 기능 추가만으로 GPS 신호 시뮬레이션이 가능함을 확인하였다.

그러나, GPS 시뮬레이터를 수신기 성능 검증, 항재밍과 같은 다양한 연구와 기술 개발에 활용하기 위해서는 더 다양한 시나리오 수립이 필요하다. 이에 새로운 위성 신호 추가와 다중 센서를 활용한 시나리오 설계에 더 유연하게 대응하기 위해 설계한 프로토타입의 RF 신호 생성 시뮬레이터를 기반으로 동적 환경, 다중 대역 신호 생성, 재밍/기만 환경과 같은 다양한 신호 생성 시나리오를 구현할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research is performed based on the cooperation with Chungnam National University – LIG Nex1.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The Manuscript with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “conceptualization, C.S. and S.J.; methodology, J.H.; software, J.H.; validation, J.H., G.H. and Y.H.; formal analysis, G.H.; investigation, G.H.; resources, S.C.; data curation, Y.H.; writing—original draft preparation, J.H.; writing review and editing, S.C.; visualization, J.H.; supervision, S.J.; project administration, C.S.; funding acquisition, S.J.”. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work reported.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Brown, A., Redd, J., & Dix, M. 2013, Open Source Software Defined Radio Platform for GNSS Recording, Simulation, in the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013), Nashville, TN, 16-20 September 2013, pp.1508-1516.
- Brown, A., Redd, J., & Hutton, M. 2012, Innovation: Simulating GPS, *GPS World*, [Internet], cited 2012 May 1, available from: <https://www.gpsworld.com/simulating-gps-signals/>
- 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, 38-43.
- Di, R. 2013, A USRP-Based Flexible GNSS Signal Recording and Playback System: Performance Evaluation and Study, Master Thesis, Miami University.
- Di, R., Peng, S., Taylor, S., & Morton, Y. 2012, A USRP-Based GNSS and Interference Signal Generator and Playback System, in 2012 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), Myrtle Beach, SC, USA, 23-26 April 2012, pp.470-478. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236916>
- GPS World Staff 2021, 2021 Simulator Buyers Guide, [Internet], cited 2021 March 5, available from: <https://www.gpsworld.com/2021-simulator-buyers-guide/>
- Hu, Y. 2019, GNSS SDR Signal Generator Implementation Based on USRP N210, *Journal of Physics: Conference Series*, 1314. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1314/1/012016>
- Kaplan, E. D. 1996, *Understanding GPS Principles and Applications*, 2nd Ed. (London: Artech House)
- Kim, W. & Seo, J. 2018, Low-Cost Software-Defined GPS Simulator with the Capability of Time Synchronization, in 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), PyeongChang, South Korea, 17-20 Oct. 218, pp. 1087-1090.
- LabSat, LabSat3 Wideband Data sheet [Internet], cited 2021 May, available from: <https://www.labsat.co.uk/downloads/product-info/Flyers/LabSat-3-Wideband-Flyer.pdf>
- 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.
- National Instruments 2013, An Introduction to Software Defined Radio with LabVIEW and NI USRP, [Internet], cited 2015 July 21, Revised 2017 January 30, available from: <https://forums.ni.com/t5/Past-NIWeek-Sessions/Hands-On-An-Introduction-to-Software-Defined-Radio-With-LabVIEW/ta-p/3521570?profile.language=ko>
- National Instruments 2021, What is NI USRP Hardware?, [Internet], cited 2021 March 5, available from: <https://www.ni.com/ko-kr/innovations/white-papers/11/what-is-ni-usrp-hardware-.html>
- OROLIA, BroadSim Datasheet, [Internet], cited 2021 June 17, available from: <https://docs.talen-x.com/ODS/DataSheets/BroadSim.pdf>
- Spirent, GSS9000 Series Datasheet, [Internet], cited 2021 April 11, available from: <https://www.spirent.com/assets/u/datasheet-gss9000-series>
- Wyman, G. C., Swaszek, P. F., & Hartnett, R. J. 2010, A USRP-Based Testbed for Navigation Education, Research, and Development, in the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 25-27 January 2010, pp.618-626.



Jae Hee Noh is a Ph.D. candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. She received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. Her research interests include GNSS receiver, anti-spoofing techniques and message authentication.



Sang Jeong Lee is a professor in the Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Korea. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Seoul National University, Korea, in 1979, 1981, and 1987, respectively. His research interests include GNSS receiver design and robust control.



Gwang Hee Jo is a Ph.D. candidate in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University in Korea. He received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University, Department of Electronic Engineering in 2017 and 2019. His research interest includes GNSS receiver, digital signal processing.



Sung Chun Bu is a chief research engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. He received B.S. and M.S. degrees from Konkuk University, Department of Electronic Information and Communication Engineering in 2002 and 2004. His research interests include GNSS receiver and GNSS signal processing algorithm.



Yo Han Ko is a chief research engineer in LIG Nex1 Co., Ltd. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chung-Ang University, Korea, in 2005, 2007, and 2011, respectively. His research interests are in the area of GNSS, digital signal processing, and multiple-input multiple-output systems.



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.