

Monitoring of the Jamming Environment in the GNSS L5 Band in Korea Region

Hak-beom Lee¹, Young-Jin Song¹, Dong-Hyuk Park¹, Sanguk Lee³, Jong-Hoon Won^{2†}

¹Autonomous Navigation Lab, Inha University, Incheon 22212, Korea

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

³KPS Satellite Navigation Research Center, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 14638, Korea

ABSTRACT

This paper presents the jamming effect on the L5 band of Global Navigation Satellite System (GNSS) by analyzing real data collected via measurement campaigns in Korea region. In fact, the L5 band is one of the dedicated bands for various satellite navigation systems such as Global Positioning System (GPS), Galileo, BeiDou (BDS), and Quasi Zenith Satellite System (QZSS). And this band is also allocated along with various systems used for aeronautical radio navigation systems (ARNS). Among ARNS, the Distance Measuring Equipment (DME) and the Tactical Air Navigation System (TACAN) are systems that transmit and receive strong power pulse signals, which may cause unintentional jamming in the reception of GNSS signals. In this paper, signals in the main lobe of GPS L5, Galileo E5a, BDS B2a, and QZSS L5 are collected in Korean region to confirm whether the jamming effect exists in the band. And then, the pulse blanking technique, which is a simple signal processing technique capable of responding to pulsed jamming, is applied to analyze the jamming effect of DME/TACAN on the L5 band.

Keywords: GNSS, L5, DME/TACAN, jamming

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)는 약 20,000 km 상공에 위치한 위성에서 전송하는 신호를 통해 전세계 어디서나 날씨, 시간등에 관계없이 사용자 위치 계산 및 정밀한 시각 동기화에 목적을 둔 시스템이다. 1970년대 미국 국방부에서 개발한 Global Positioning System (GPS)의 개발을 시작으로 유럽 연합의 Galileo, 러시아의 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS), 중국의 BeiDou (BDS) 등 다양한 GNSS가 개발완료 또는 현대화가 진행 중이다 (Chatre 2021, Dunn 2021, Karutin 2021, Kogure 2021, Lu 2021).

Received Nov 11, 2021 Revised Dec 01, 2021 Accepted Dec 06, 2021

†Corresponding Author

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

Tel: +82-32-860-7406

Hak-beom Lee <https://orcid.org/0000-0001-9362-2973>

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

Dong-Hyuk Park <https://orcid.org/0000-0002-8690-7249>

Sanguk Lee <https://orcid.org/0000-0002-0744-5032>

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

미국은 중심 주파수 1176.45 MHz에 GPS 현대화 계획의 일환으로 개발한 세 번째 민간 신호인 GPS L5 신호를 전송하고 있다. 유럽 연합의 Galileo는 중심 주파수 1191.795 MHz에 광대역 신호인 E5를 전송하고 있으며, 중국의 BDS 또한 같은 중심 주파수에 2세대 민간 신호인 B2a, B2b를 전송하고 있다 (BDS ICD 2017, GPS ICD 2021, Galileo ICD 2021). 한국에서 개발 예정인 Korean Positioning System (KPS) 또한 L5 주파수 대역에 신호를 송출할 계획인 것으로 알려져 있다 (Kim 2021).

L5/E5 주파수 대역은 L1/E1, L2, L6/E6 대역과는 다르게, 항공 무선항행 업무와 주파수 대역을 공유하고 있다. 항공무선항행 업무는, 항공기의 측위 및 항로 결정 및 장애물 탐지를 위한 무선 측위 업무로, very high frequency omnidirectional radio range, Distance Measuring Equipment (DME), TACTical Air Navigation system (TACAN) 등의 시스템이 사용된다. 특히 DME와 TACAN은 GNSS의 L5/E5 대역과 동시에 사용되는 대역에 강력한 펄스 신호를 전송하고 있으며, 이 펄스 신호에 의해 비 의도적인 재밍이 발생하여 신호 획득 및 추적 과정에서 성능감소가 발생할 수 있다 (Kaplan & Hegarty 2017).

DME/TACAN에 의한 비 의도적인 재밍에 방지하기 위해 GPS L5 및 Galileo E5 신호는 개발 단계에서부터 펄스 재밍에 대한

영향과 이에 대처하는 기법에 대한 연구가 이루어졌다. DME/TACAN, Joint Tactical Information Distribution System (JTIDS) 과 GPS L5/Galileo E5의 공존의 유효성에 대해 이론적으로 분석한 연구가 수 년에 걸쳐 진행되었다. 여기서 JTIDS는 Link-16의 일종이다. 1999년에는 GPS L5가 송출하려는 주파수 대역을 사용하는 다양한 시스템들의 특성을 정리하고, 이들이 GPS L5신호의 성능 감쇄를 어느정도 유발하는지에 대해 미국과 유럽 상공을 고도별로 나누어 진행하는 시뮬레이션 방법론을 제시하고, 그 결과를 확인했다 (Hegarty et al. 1999). 이에 기반하여 항공기 환경에서의 펄스 재밍이 미치는 영향에 대해 분석했다 (Erlandson et al. 2004). 실제 항공기에 하드웨어를 탑재하여 신호 샘플을 수집하고, 이를 통해 GPS L5가 해당 대역에서 제대로 동작할 지에 대한 유효성을 분석했다 (Kim & Grabowski 2003).

GPS L5 뿐만 아니라 Galileo E5a/E5b 신호에 대해서도 유사한 연구가 있었다 (Bastide et al. 2004). DME/TACAN 등의 강한 펄스 신호는 GNSS 수신기의 증폭기에 포화를 유발하여 수신을 방해할 수 있으나, 이에 수신기가 대응할 수 있는 신호처리 기법인 Pulse Blanking (PB)이 제안되었다 (Hegarty et al. 2000). 제안된 PB의 성능 분석 및 성능 향상을 위해 몇 가지 연구가 이루어졌다. 디지털 PB를 사용했을 때의 수신기 성능에 대해 분석했고 (Grabowski & Hegarty 2002), 일반적으로 사용하는 극복 방법인 PB와 notch filtering의 단점을 보완한 hybrid blanking을 제안했으며, 각 방법을 40,000ft 상공에서 테스트하여 성능을 비교하기도 했다 (Gao et al. 2013). 디지털 수신기에서 양자화 비트에 따른 PB 성능을 분석했으며 (Borio & Cano 2013), 주변에 DME/TACAN 비콘이 여러 개 있을 때의 PB 효과에 대해 실험적 시뮬레이션을 진행한 사례도 있다 (Musumeci et al. 2014). 최근에는, 최신 DME/TACAN 시나리오를 적용하여 다양한 수신 환경과 PB 문턱 값에 따른 수신기에서의 이론적 성능 분석이 이루어졌으며 (Garcia-Pena et al. 2020), 효율적인 PB 방법에 대해서도 연구되었다 (Garcia-Pena et al. 2019). 이와 같은 선행 연구들은 미국, 유럽 지역의 40,000 ft 상공 시나리오를 기반으로 진행되었으며, 대한민국 지상 환경에서의 신호 실측 실험은 아직 보고되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 대한민국 지상 환경에서 실제 방송 중인 신호를 수집하고, DME 펄스 신호의 영향에 대한 분석을 진행한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 한국 내륙지역, L5/E5a 대역 내에 채널이 할당된 DME 비콘의 위치와 채널 주파수 할당을 분석한다. 3장에서는 이를 기반으로 일반적인 환경과 비콘 주변에서 신호 샘플을 수집하여 이를 GNSS 수신기 신호 획득 및 추적 관점에서 분석하고, 수신기에 간단한 대응 알고리즘을 구현하여 영향 감소를 분석한다.

2. L5 대역 환경

GPS L5/Galileo E5a의 mainlobe가 송출되고 있는 1166.45 MHz ~ 1186.45 MHz 대역은 대한민국 주파수 할당표에 따르면, 항공무선항행에 사용되는 DME/TACAN과 함께 할당되어 있다 (MSIT 2021). DME/TACAN 시스템은 강력한 펄스파를 사용하는

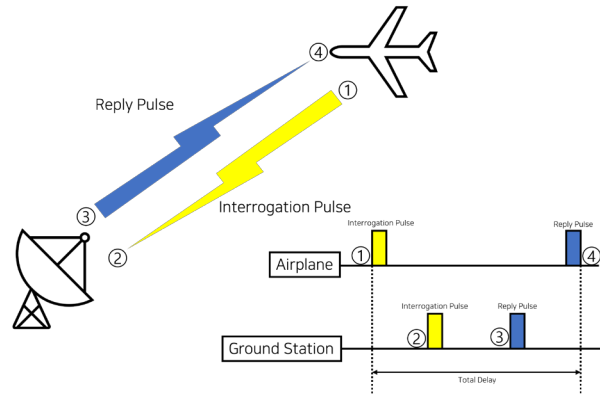


Fig. 1. Operation method of DME/TACAN system.

시스템으로, GNSS에 비의도적 재밍을 유발할 수 있다.

2.1 DME/TACAN

DME와 군용 DME인 TACAN은 펄스파의 송·수신으로 공항 및 항로 주변에 설치된 비콘으로부터 항공기까지의 거리를 계산하여 항공기가 올바른 항로로 비행할 수 있도록 보조하는 시스템이다. Fig. 1은 DME/TACAN 시스템의 동작 개략도를 나타낸다. 항공기에서 지상의 비콘에 질문 (interrogation) 펄스를 송신하면 비콘에서 펄스를 수신하여 50 μs 뒤에 응답 (reply) 펄스를 항공기에 송신한다. 질문 펄스의 송신 시각으로부터 응답 펄스의 수신 시각의 차이인 전체 지연 시간으로 항공기와 비콘 사이의 거리를 계산한다. 각 비콘 및 동작 모드 마다 대역폭 1 MHz를 갖는 채널이 할당되어 있으며, 채널 및 모드 별 주파수가 국제민간항공기구에서 발행한 문서에 정의되어 있다 (ICAO 2018). 특히 GPS L5, QZSS L5, Galileo E5, BDS B2a의 mainlobe와 주파수를 공유하는 채널 및 모드는 79X (1166 MHz) ~ 100X (1187 MHz) 이다.

2.2 DME/TACAN 신호 구조

GNSS에 비 의도적인 재밍을 일으킬 수 있는 DME/TACAN의 응답 신호를 식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다 (Gao et al. 2013).

$$s_{DME}(t) = \left\{ e^{-\frac{\alpha}{2}\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)^2} + e^{-\frac{\alpha}{2}\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)^2} \right\} \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

with, $\alpha = 4.5 \times 10^{11} s^{-2}$

여기서 Δt 는 간격, f_c 는 채널의 중심 주파수이다. 신호는 3 μs의 폭, 12 μs의 간격을 갖는 가우시안 펄스 쌍이며, 기저 대역에서의 신호를 시각화 하면 Fig. 2a와 같다. GPS L5/Galileo E5a 수신기는, DME/TACAN의 각 채널과 중심 주파수가 다르므로, 수집되는 DME/TACAN 신호의 형태는 Fig. 2b와 같이 변화한다.

2.3 한국지역 내 DME 비콘 분포

한반도 내륙의 공항 및 항로 인근에 배치된 DME 비콘의 위치

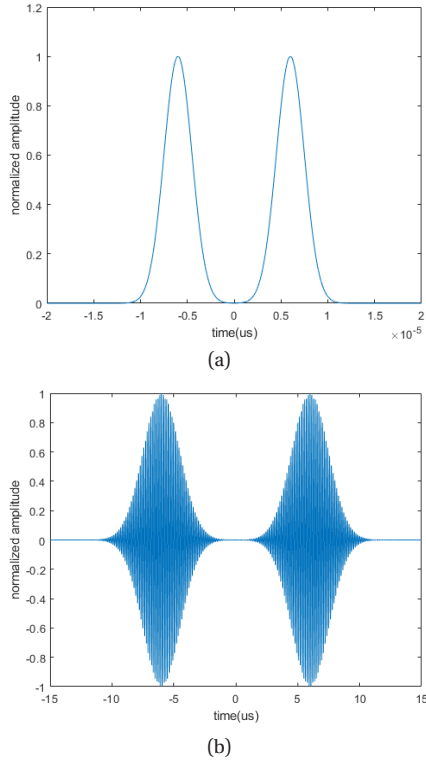


Fig. 2. A DME/TACAN pulse. (a) envelope (b) modulated

Table 1. DME channel allocation in GNSS L5 band and its position in Korea.

DME channel number	Frequency (MHz)	Position
83X	1170	Gimpo
85X	1172	Gimhae
85X	1172	Incheon
87X	1174	Busan
91X	1178	Gwangju
94X	1181	Osan
95X	1182	Yecheon
96X	1183	Yangju,
98X	1185	Anyang
98X	1185	Sacheon

와 DME의 할당 채널은 국토교통부에서 운영하는 항공정보서비스 (AIS: Aeronautical Information Service) 페이지에서 제공하는 Area chart에서 확인할 수 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2021). 본 논문에서는 GPS L5/Galileo E5a 신호의 mainlobe 주파수 내에 신호를 송신하는 비콘에 대해서만 확인했다. 해당 비콘의 채널 번호, 위치, 송출 신호의 주파수를 Table 1에 정리했고, 비콘의 위치를 Fig. 3에 나타냈다.

2.4. 신호 샘플 수집

지상에서 L5 대역의 GNSS 재밍 환경을 확인하기 위해 임의의 세 장소에서 스펙트럼 분석기로 신호 수집 환경을 확인한 뒤, 신호 샘플을 수집했다. 장소는 인하대학교 하이테크센터 옥상, 김포공항의 DME 비콘 주변, 양주 무선항공 표지소 입구 앞 총 세 곳이다. 인하대학교는 김포공항의 DME 비콘으로부터 약 16 km,



Fig. 3. Position of DME/TACAN beacon in Korea.

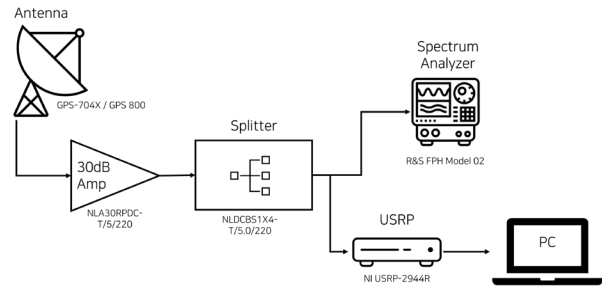


Fig. 4. Equipment configuration diagram.

Table 2. Specification of antennas.

	GPS 800	GPS 704-X
3 dB pass band	1.15 GHz ~ 1.65 GHz	
Gain at zenith for L5/E5a band	5.5 dBic (maximum)	2 dBic (minimum)
Gain roll-off (from zenith to horizon)	11 dB	
Characteristic impedance	50	
VSWR	2.0	

Table 3. Specification of amplifier (NLA30RPDC-T/5/220) & splitter (NLDCBS1X4-T/5.0/220).

	Amplifier (NLA30RPDC-T/5/220)	Splitter (NLDCBS1X4-T/5.0/220)
Frequency range	1.1 GHz ~ 1.7 GHz	
Characteristic impedance	50	
Operating voltage range	3.3 V ~ 15 V	
Typical current consumption	36 mA ~ 40 mA	17 mA (maximum)
Gain	29 dB ~ 31 dB	17 dB ~ 20 dB

양주 비콘으로부터 약 44 km 떨어진 곳에 위치해 있다.

신호 샘플 저장에 사용한 장비 구성은 Fig. 4와 같으며, 각 장비의 사양은 세부 사양은 Tables 2 ~ 4와 같다 (Harxon 2021, Novatel 2021, GPS Networking 2021a, 2021b, National Instruments 2017). 하이테크센터 옥상에서는 Harxon 사의 GPS 800 안테나를, 나머지 경우에는 Novatel 사의 GPS 704-X 안테나를 사용했다. GPS 800 안테나의 경우 GPS 704-X 안테나 보다 이득이 3 dB 정도 높다. 안테나로부터 수신된 신호가 증폭기에서 30 dB 증폭되

Table 4. Specification of NI-USRP 2944R.

Specification	Value
Number of channels	2
Frequency range	10 MHz ~ 6 GHz
Frequency step	< 1 kHz
Gain range	0 dB ~ 37.5 dB
Gain step	0.5 dB
Maximum input power	-15 dBm
Noise figure	5 dB ~ 7 dB
Frequency accuracy	2.5 ppm
Maximum instantaneous real-time bandwidth	160 MHz
Maximum I/Q sample rate	200 MS/s
Analog-to-digital converter (ADC)	14 bit

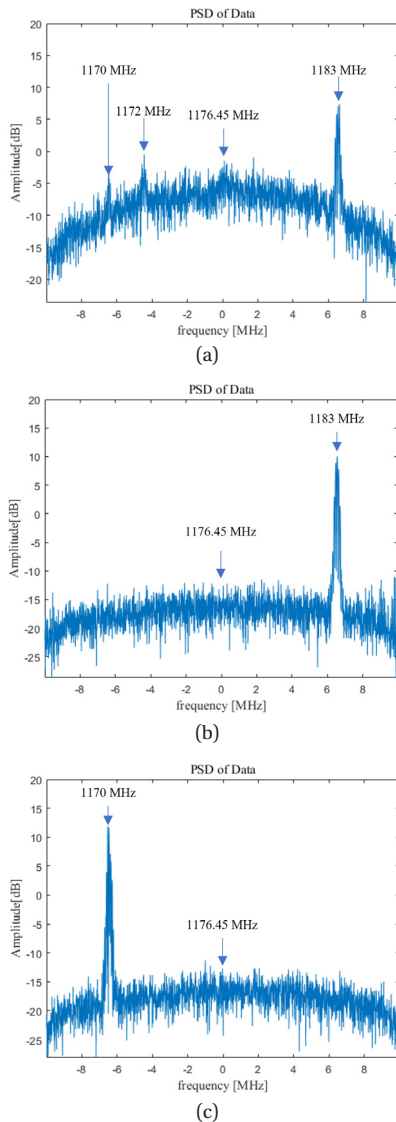


Fig. 5. Power spectral density of signal samples. (a) Inha university (b) Yangju (c) Gimpo.

고, 분배기를 통해 스펙트럼 분석기와 USRP로 이동한다. 증폭기는 GPS Networking 사의 NLA30RPDC-T/5/220 모델을 사용하여 30 dB 이득을 취했고, 분배기는 GPS Networking 사의

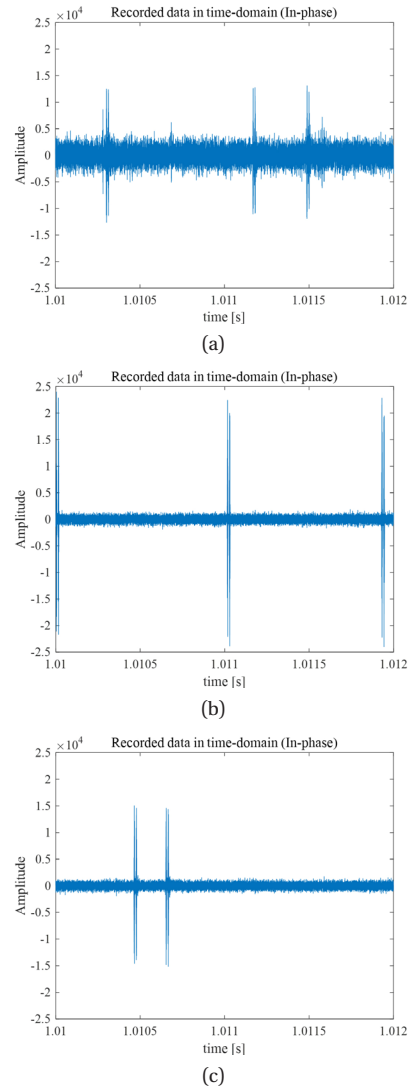


Fig. 6. Recorded signal samples in time domain. (a) Inha university (b) Yangju (c) Gimpo.

NLDCBSIX4-T/5.0/220 모델을 사용하여 스펙트럼 분석기와 USRP 라인으로 분리하였다. 스펙트럼 분석기는 현장에서 신호 샘플 수집 이전에 재밍 신호 유무 판단 및 성공적인 신호 수신 여부를 확인하기 위해 사용되었다. 신호 샘플을 저장하여 분석하기 위해 RF-front end로 PC와 NI USRP-2944R 모델을 사용했다. USRP-2944R은 14 bit의 높은 분해능을 갖는 ADC가 내장되어 있다.

수집한 신호 샘플은 GPS L5, QZSS L5, Galileo E5, BDS B2a의 mainlobe를 모두 담을 수 있도록 중심 주파수 1176.45 MHz, 20 MHz의 대역폭, 20 MHz의 샘플 주파수를 갖도록 하향 변환했다. Fig. 5는 세 지역에서 수집한 신호 샘플의 전력 스펙트럼 밀도 (Power Spectral Density; PSD)이다. 인하대학교에서 수집한 신호 세기가 양주와 김포에서 수집한 것 보다 높는데, 이는 인하대에서 사용한 안테나의 이득이 3 dB 더 높기 때문이다. 김포 신호 샘플은 1170 MHz 부근에서 신호 전력이 강하고, 양주 신호 샘플은 1183 MHz 부근에서 신호 전력이 강한 것을 확인할 수 있다.

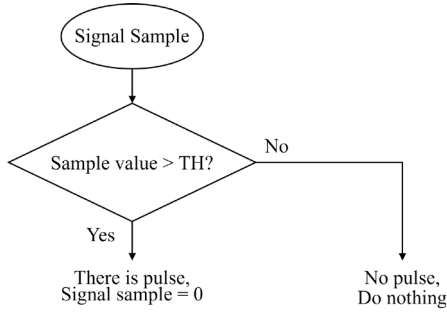


Fig. 7. Flow chart of pulse blanking.

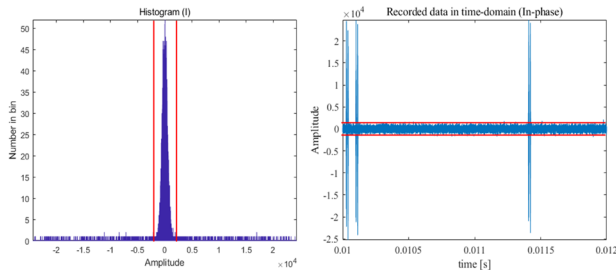


Fig. 8. Pulse blanking threshold selection.

Table 1과 비교하면, 각 지역의 비콘에 할당된 채널의 중심 주파수와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 인하대에서는 양주 비콘에 할당된 채널에 펄스가 관측되지만, 김포에서는 관측되지 않는다. 이는 DME/TACAN 송신기와 측정 장소 사이의 거리 및 방향성의 영향으로 예측된다. Fig. 6은 신호 샘플을 시간 영역에서 나타낸 것이다. 시간 영역에서 강력한 펄스 신호가 관측될 때 마다, 비콘에 할당된 채널의 주파수에서 강력한 펄스가 관측됨을 확인할 수 있다.

3. 펄스 재밍 극복 방법과 SDR에서의 적용

3.1 Pulse Blanking

PB는 펄스 재밍에 대응할 수 있는 수신기 측 신호처리 기법으로, 그 flowchart는 Fig. 7과 같다. 수신기의 신호처리 단계 이전에 신호 샘플의 값이 사전에 지정된 문턱 값을 초과하면, 그 샘플의 값을 0으로 대체하는 기법이다 (Hegarty et al, 2000). 본 논문에서는 실험의 간소화를 위하여 PB의 문턱 값 (Threshold)은 Fig. 8과 같이 히스토그램을 통해 99%의 값이 분포해 있는 값으로 지정한다.

Figs. 9와 10은 양주에서 수집한 샘플에 PB기법을 적용하기 전/후의 신호 샘플과 PSD이다. PB 적용 이전에는 강한 펄스 신호가 관측됐지만, 적용 후에는 펄스가 사라짐을 확인할 수 있다.

3.2 SDR에서의 Pulse Blanking 적용

Fully Reconfigurable Multi-constellation & Multi Frequency SDR (Song et al, 2021)은 높은 reconfigurability를 목표로 개발

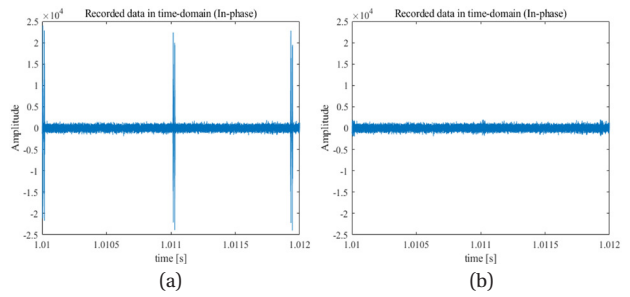


Fig. 9. Signal sample in time domain. (a)Before pulse blanking (b)After pulse blanking.

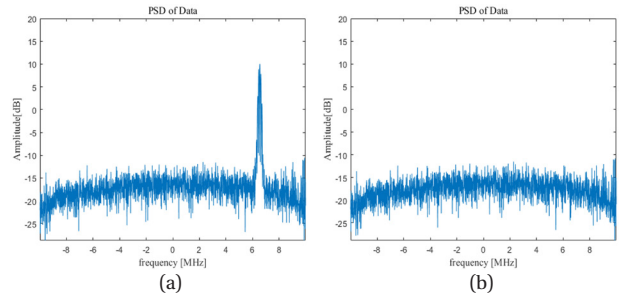


Fig. 10. PSD of signal (a) Before pulse blanking (b) After pulse blanking.

Table 5. Secondary code length and acquisition parameters of signals in GNSS L5 band.

Signal	Secondary code length	Coherent integration time [ms]	Acquisition Threshold
GPS L5I / QZSS L5I	10	10	5
Galileo E5a-I	20	20	5
BDS B2a-D	5	5	2.5

하여 source code의 재사용율을 높이고, configuration file의 변경만으로 신호 처리에 사용되는 파라미터를 변경할 수 있는 높은 변동성을 가지며, Application Programming Interface (API) Reconfigurable 기능을 지원하는 SDR이다. 사용자는 SDR의 신호처리과정에서 내장된 함수와 API함수중에서 선택하여 사용할 수 있다. API함수를 선택하면 사용자가 기존에 정의된 입력과 출력의 형태를 유지한 채로 신호처리 과정을 사용자의 목적에 따라 변경하여 사용할 수 있다.

SDR의 API 기능을 활용하여 신호 획득과 추적 함수에 PB 기능을 추가하여 적용 전 후의 L5 대역에 송출되고 있는 4가지 시스템의 신호 처리결과를 확인한다. 신호 획득에서 code replica를 생성할 때 secondary code를 곱하여 신호의 secondary code의 길이만큼 coherent integration time을 늘리는 방법을 사용했다. Table 5는 각 시스템 별 secondary code 길이와 이에 따른 coherent integration time 및 신호 획득 문턱 값이다. 시스템 마다 secondary code의 길이가 다르므로, 신호 획득에 사용된 coherent integration time이 다르며, 신호 획득에 필요한 acquisition metric의 문턱 값도 달라진다. acquisition metric은 replica와 received signal의 상호 상관 결과의 최대 피크 값과 두 번째 피크 값의 비율로, 샘플에 GNSS 신호 이외의 성분이 많을수록 이 값이 작아지며, 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

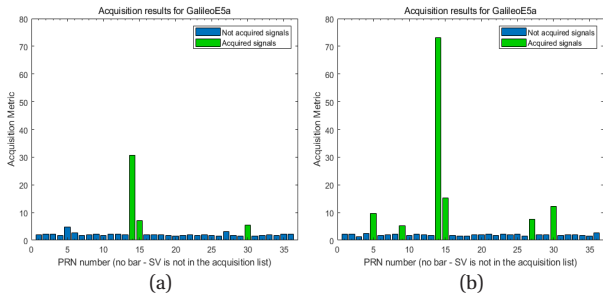


Fig. 11. Acquisition results of Galileo E5a in Gimpo scenario. (a) Before pulse blanking (b) After pulse blanking.

Table 6. Acquisition metric of each sample.

Gimpo			Yangju			Inha		
GNSS: PRN	PB on	PB off	GNSS: PRN	PB on	PB off	GNSS: PRN	PB on	PB off
GPS 3	9.38	-	GPS 6	23.61	6.43	GPS 4	12.97	13.80
GPS 6	5.66	-	GPS 9	8.18	-	GPS 6	22.35	21.21
GPS 14	13.26	8.33				GPS 9	38.51	37.07
						GPS 25	22.29	21.07
GAL 5	8.85	-	GAL 3	10.82	-	GAL 2	10.97	9.76
GAL 9	5.99	-	GAL 8	10.68	-	GAL 3	13.35	10.66
GAL 14	60.97	35.33	GAL 14	11.39	-	GAL 5	163.19	144.78
GAL 15	13.56	7.19	GAL 15	9.10	-	GAL 9	117.30	116.71
GAL 27	6.95	-	GAL 27	5.09	-	GAL 11	6.30	6.38
GAL 30	12.31	5.37				GAL 14	93.49	105.07
						GAL 15	15.07	15.01
						GAL 27	5.75	6.10
						GAL 30	15.48	17.09
						GAL 36	109.20	110.24
BDS 28	2.78	-	BDS 28	3.18	-	BDS 27	11.50	11.59
BDS 33	3.63	-	BDS 33	4.11	-	BDS 28	24.54	21.76
BDS 38	3.42	-	BDS 38	4.70	-	BDS 30	3.40	3.30
BDS 40	3.71	2.85				BDS 32	5.04	5.58
BDS 42	3.27	-				BDS 33	21.50	20.87
						BDS 38	15.28	16.42
						BDS 39	3.05	2.67
						BDS 40	9.24	8.01
						BDS 41	20.56	16.60
						BDS 43	5.28	5.59
QZS 3	11.77	-	QZS 1	6.70	-	QZS 1	58.30	57.70
QZS 7	6.01	-	QZS 3	5.81	-	QZS 3	79.39	75.98
			QZS 7	14.42	-	QZS 7	70.05	56.45

$$\text{acquisition metric} = \frac{1^{\text{st}} \text{ correlation peak}}{2^{\text{nd}} \text{ correlation peak}} \quad (2)$$

신호 추적의 경우 모두 1ms의 coherent integration time을 가지며, 추적 함수의 경우 일반적인 binary phase shift keying 신호의 추적 알고리즘을 사용했다.

3.3 신호 획득 함수 적용 결과

Fig. 11은 신호 샘플 중 김포에서 수집한 Galileo E5a 신호 획득결과이다. x축은 위성의 PRN 번호를, y축은 acquisition metric을 나타내며, PB 적용 이후 획득된 신호 개수가 늘어났고, acquisition metric도 현저히 증가한 것을 볼 수 있다. PB 적

Table 7. Estimated Carrier to Noise ratio (C/N_0) of each sample.

Gimpo			Yangju			Inha		
GNSS: PRN	PB on	PB off	GNSS: PRN	PB on	PB off	GNSS: PRN	PB on	PB off
GPS 3	35.90	-	GPS 6	36.56	22.19	GPS 4	35.38	34.52
GPS 6	31.66	-	GPS 9	33.13	-	GPS 6	42.12	41.62
GPS 14	35.10	7.70				GPS 9	39.95	39.37
						GPS 25	36.81	36.11
GAL 5	32.81	-	GAL 3	33.89	-	GAL 2	34.07	33.08
GAL 9	27.38	-	GAL 8	8.03	-	GAL 3	8.07	8.03
GAL 14	38.30	36.12	GAL 14	8.09	-	GAL 5	40.58	40.03
GAL 15	32.64	26.79	GAL 15	35.41	-	GAL 9	40.17	39.63
GAL 27	30.13	-	GAL 27	32.25	-	GAL 11	29.90	28.50
GAL 30	33.64	28.54				GAL 14	8.03	8.06
						GAL 15	34.61	33.68
						GAL 27	33.94	32.94
						GAL 30	34.70	33.82
						GAL 36	40.64	40.07
BDS 28	29.80	-	BDS 28	33.58	-	BDS 27	35.85	35.91
BDS 33	7.98	-	BDS 33	34.49	-	BDS 28	39.54	38.97
BDS 38	31.01	-	BDS 38	27.03	-	BDS 30	8.03	8.51
BDS 40	34.35	29.59				BDS 32	8.03	7.98
BDS 42	33.16	-				BDS 33	39.99	39.43
						BDS 38	39.84	39.30
						BDS 39	31.91	30.73
						BDS 40	36.01	35.26
						BDS 41	40.65	40.11
						BDS 43	8.25	8.07
QZS 3	36.61	-	QZS 1	34.70	-	QZS 1	40.71	40.16
QZS 7	34.57	-	QZS 3	33.06	-	QZS 3	41.57	41.05
			QZS 7	36.02	-	QZS 7	40.62	40.04

용 이전과 이후 각각의 경우 획득한 위성 PRN 번호와 acquisition metric을 Table 6에 정리했다. 펄스파가 매우 강력하게 수신되는 환경인 김포와 양주의 경우, PB를 적용하기 이전에는 획득되는 신호 개수가 굉장히 적으며, acquisition metric 또한 매우 낮았으며, PB로 펄스 재밍 영향을 감소시켰을 때, 획득 신호 개수 및 acquisition metric이 향상됨을 확인했다. 인하대의 경우 적용 이전과 이후에 획득 신호 개수 차이는 나지 않았으나, acquisition metric이 약간 향상되었다. 이는 인하대의 위치가 김포와 양주 대비 DME 비콘과의 거리가 멀기 때문에, 펄스 신호의 세기가 미약해져 DME 비콘에 의한 펄스 재밍 강도 또한 낮아졌을 것으로 예상된다.

3.4 신호 추적 함수 적용 결과

신호 추적 과정에서 추정된 C/N_0 평균값을 Table 7에 정리했다. Fig. 12는 그 중 Galileo에 대한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. x축은 위성의 PRN 번호, y축은 평균 C/N_0 , 붉은 막대는 PB 적용 전, 푸른 막대는 PB 적용 이후의 평균 C/N_0 를 나타낸다. 강력한 펄스가 송출되고 있는 비콘 주변인 김포와 양주의 경우 PB 기법을 사용하기 전과 후의 C/N_0 평균값이 수 dB-Hz 이상 높아지는 것을 확인할 수 있으며, 비콘에서 상대적으로 떨어진 위치인 인하대는 상대적으로 작은 크기의 펄스가 수신되고 있고, C/N_0 변동이 비교적 작은 1 dB-Hz 이하로 나타났다.

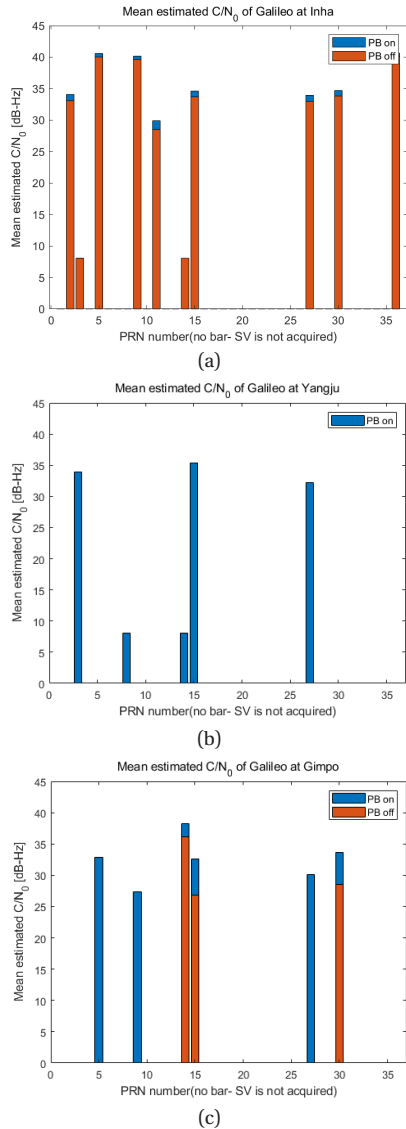


Fig. 12. Estimated C/N₀ of Galileo E5a in Gimpo scenario. Before pulse blanking(red), after pulse blanking(blue), (a) Inha University (b) Yangju (c) Gimpo.

4. 결론

본 논문에서는 한국 내륙 지역에서의 GNSS L5 대역 재밍 환경을 조사했다. GNSS 이외에 사용되는 대표적인 시스템으로는 DME/TACAN으로 대표되는 항공무선항행 서비스가 있으며, 이는 강력한 펄스파의 송수신으로 항공기의 위치를 추정하는 시스템이다. DME/TACAN은 다양한 주파수를 갖는 채널에 신호를 송출하고 있으며, 그 중 일부 채널은 GPS L5, QZSS L5, Galileo E5, BDS B2a의 mainlobe 인 1166.22 MHz ~ 1186.68 MHz에 포함되는 주파수에 펄스신호를 송출하고 있다. 해당 대역에 포함되는 채널이 할당된 비콘의 위치를 AIS에서 제공하는 차트를 통해 확인했다. GNSS L5/E5a 대역의 mainlobe에 포함되는 주파수에 신호를 송출하는 비콘의 주변과 비콘에서 어느정도 거리가 떨어진 일반적인 환경에서 신호 샘플을 수집하여 펄스 신호의 존재를 확인하

고, 아무 조치를 취하지 않은 경우와 PB를 적용한 경우의 GNSS 시스템 별 신호 획득 및 추적 성능에 대해 분석했다. L5 대역에 송출되고 있는 DME의 펄스 신호가 조사한 채널에서 관측되었으며, 간단한 수신기 신호처리 기법인 PB만을 적용하여도 신호 획득 및 추적 성능이 향상됨을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구 논문은 한국전자통신연구원 연구운영비지원사업(연결의 한계를 극복하는 초연결 입체통신 기술 연구 (21ZH1100) 학술용역 (위탁연구과제)의 연구결과입니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Lee, H. and Won, J. -H. contributed to the design and implementation of the research, to the analysis of the results and to the writing of the manuscript. Conceptualization, Lee, H. and Won, J. -H.; methodology, Lee, H. and Won, J. -H.; software, Lee, H. and Song, Y.-J.; validation, Lee, H. and Won, J. -H.; formal analysis, Lee, H.; investigation Lee, H.; resources, J. -H.; data curation, Lee, H.; writing—original draft preparation, Lee, H.; writing—review and editing, Lee, H. and Won, J. -H.; visualization, Lee, 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

Bastide, F., Chatre, E., Macabiau, C., & Roturier, B. 2004, GPS L5 and Galileo E5a/E5b signal to noise density ratio degradation due to DME/TACAN signals: Simulations and theoretical derivation, in Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 26-28 Jan 2004, pp.1049-1062.

BDS ICD 2017, BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B2a (Version 1.0), China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608518432765621.pdf>

Borio, D. & Cano, E. 2013, Optimal GNSS pulse blanking in the presence of signal quantization, IET Signal

- Processing, 7, 400-410
- Chatre, E. 2021, Galileo Status Update, in 2021 ION GNSS+, St. Louis, Missouri, 20-24 Sep 2021.
- Dunn, M. 2021, GPS Enterprise Modernization Briefing, in 2021 ION GNSS+, St. Louis, Missouri, 20-24 Sep 2021.
- Erlandson, R. J., Kim, T., Hegarty, C., & van Dierendonck, A. J. 2004, Pulsed RFI effects on aviation operations using GPS L5, in Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, 26-28 Jan 2004, pp.1063-1076.
- Galileo ICD 2021, European GNSS(Galileo) open service signal-in-space interface control document (OS-SIS-ICD), issue 2.0, European Union. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf
- Gao, G. X., Heng, L., Hornbostel, A., Denks, H., Meurer, M., et al. 2013, DME/TACAN interference mitigation for GNSS: algorithms and flight test results, GPS solutions, 17, 561-573. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0301-9>
- GPS ICD 2021, Global Positioning System interface control documents, IS-GPS-705H, Navstar GPS space segment/User segment L5 Interfaces. USA: Navstar GPS Joint Program Office. <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-705H.pdf>
- GPS Networking 2021a, GPS amplified 1X4 splitter technical product data [Internet], cited 2021 Oct 14, available from: <https://www.gpsnetworking.com/system/datasheets/46/original/DS-ALDCBS1X4.pdf?1631560437>
- GPS Networking 2021b, GPS 30 dB Line Amplifier technical product data [Internet], cited 2021 Oct 14, available from: <https://www.gpsnetworking.com/system/datasheets/36/original/DS-LA30RPDC.pdf?1631821355>
- Grabowski, J. & Hegarty, C. 2002, Characterization of L5 receiver performance using digital pulse blanking, in Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, 24-27 Sep 2002
- Garcia-Pena, A., Julien, O., Gakne, P. V., Macabiau, C., Mabilieu, M., et al. 2019, Efficient DME/TACAN Blanking method for GNSS based navigation in civil aviation, in Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, 16-20 Sep 2019, pp.1438-1452. <https://doi.org/10.33012/2019.16993>
- Garcia-Pena, A., Macabiau, C., Julien, O., Mabilieu, M., & Durel, P. 2020, Impact of DME/TACAN on GNSS L5/E5a receiver, in Proceedings of the 2020 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, California, 21-24 Jan 2020, pp.207-221. <https://doi.org/10.33012/2020.17207>
- Harxon 2021, Survey GNSS antenna GPS800 [Internet], cited 2021 Oct 14, https://en.harxon.com/u_file/product/21_07_19/Harxon%20GPS800%20Brochure.pdf
- Hegarty, C., Kim, T., Ericson, S., Reddan, P., Morrissey, T., et al. 1999, Methodology for determining compatibility of GPS L5 with existing systems and preliminary results, in Proceedings of the 55th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Cambridge, MA, 27-30 Jun 1999, pp.635-644.
- Hegarty, C., van Dierendonck, A. J., Bobyn, D., Tran, M., & Grabowski, J. 2000, Suppression of pulsed interference through blanking, San Diego, CA, 26-28 Jun 2000, pp.399-408.
- ICAO 2018, International Standards and Recommended Practices Annex 10, Aeronautical telecommunications, Volume I: radio navigation aids, 7th edition, International Civil Aviation Organization
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2017, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, 3rd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Karutin, S. 2021, The Status of GLONASS System, in 2021 ION GNSS+, St. Louis, Missouri, 20-24 Sep 2021
- Kim, T. 2021, Status of the Korean Positioning System (KPS), 61st Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee, St. Louis, Missouri, 20-21 Sep 2021.
- Kim, T. & Grabowski, J. 2003, Validation of GPS L5 coexistence with DME/TACAN and link-16 systems, in ION GPS/GNSS 2003, Portland, OR, 9-12 Sep 2003, pp.1455-1469.
- Kogure, S. 2021, Update of QZSS, in 2021 ION GNSS+, St. Louis, Missouri, 20-24 Sep 2021
- Lu, X. 2021, BDS: Navigation Satellite System Development, in 2021 ION GNSS+, Missouri, 20-24 Sep 2021
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2021, Aeronautical Information Services, AD chart [Internet], cited 2021 Apr 12, available from: <http://ais.casa.go.kr/>
- MSIT 2021, Regulations for Radio Frequency Allocation, Ministry of Science and ICT (MSIT), MSIT Notification 2020-111
- Musumeci, L., Samson, J., & Dovis, F. 2014, Performance assessment of pulse blanking mitigation in presence of multiple Distance Measuring Equipment/Tactical Air Navigation interference on Global Navigation Satellite Systems signals, IET Radar, Sonar & Navigation, 8, 647-657. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0198>
- National Instruments 2017, USRP-2944 Specifications - USRP Software Defined Radio Reconfigurable Device

Manual [Internet], cited May 21, available from: <https://www.ni.com/documentation/en/usb-software-defined-radio-reconfigurable-device/latest/specs-usrp-2944/specs>

Novatel 2021, GPS-704-X multi frequency antenna delivers excellent performance, multipath rejection and L-band functionality [Internet], cited 2021 Oct 14. <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Papers/GPS704X/GPS704X.pdf>

Song, Y. J., Lee, H., & 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>



Hak-beom Lee is a M.S. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received B.S. degree from the same university in 2021. His research interests are software receiver, jamming, signal processing, GNSS Space service volume.



time processing.

Young-Jin Song is a M.S. degree student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received a B.S. degree in the Department of Electronic Engineering from the same university in 2020. His research interests include GNSS software receiver, signal processing, real-



Dong-Hyuk Park is a M.S. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received B.S. degree from the same university in 2021. His research interests are autonomous driving, vehicle dynamics, GNSS/IMU integration.



Sanguk Lee received his Ph.D. degree in Aerospace Department from Auburn Univ., USA, 1994. He has been worked for Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) from 1993. He involved in developing satellite ground control system and GNSS infrastructure and IDM systems. Currently, he is leader of KPS satellite navigation research center, ETRI. His research interests are GNSS space and ground segment, satellite control, and small constellation satellite system.



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.