JPNT 10(1), 21-28 (2021)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.1.21

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

RF Compatibility Analysis of GNSS and KPS Signals at L6/S-band

Subin Lee, Kahee Han, Jong-Hoon Won†

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

ABSTRACT

In order to develop a Korea Positioning System (KPS) as part of key national infrastructure, independent navigation signal design is essential. The designed signal candidates must coexist with existing or planned GNSS signals within the limited frequency band. This requires a RF compatibility assessment, which can be performed using the Spectral Separation Coefficient (SSC) and Effective Carrier to Noise Density Ratio (Effective C/N_0), for navigation signals. Thus, in this paper, the analysis of RF compatibility between the designed signal candidates and the existing GNSS signals is carried out based on analytical and numerical techniques.

Keywords: GNSS, KPS, spectral separation coefficient (SSC), effective C/N_0

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS)은 정보통신, 위성, 국방, 해양, 항공, 측지측량, 시각동기 등 다양한 분야에서 활용됨으로써 중요성이 높아지고 있다. 세계 여러 나라들은 독자적으로 GNSS 운용 및 현대화를 위해 노력하고 있으며, 미국 Global Positioning System (GPS)를 필두로 하여 유럽연합의 Galileo, 러시아의 GLObal NAvigation Satellite System (GLONASS), 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BDS), 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), 인도의 Navigation with Indian Constellation (NavIC)가 있다. 이러한 동향에 따라 한국도 독자적인 측위 시스템 Korea Positioning System (KPS)을 국가 인프라 구축의 일환으로 개발할 계획이다 (Park & Heo 2019).

이와 같은 위성 항법 시스템의 신호들은 국제전기통신연합 (ITU: International Telecommunication Union)에서 항법시스템 대역으로 할당한 주파수 대역을 통해 송신된다. 대부분의 항법 신호는 L 대역을 사용하고 있으며, 국제전기통신연합에서 S 대역 (2483.5 – 2500 MHz) 및 C 대역 (5000 – 5030 MHz)을 항법시스템 대역에 추가 할당함에 따라 NavIC은 L5 대역과 S 대역을 사용하고 있다. 새롭게 설계될 KPS 역시 국제전기통신연합에서 할당한 항법시스템 대역안에서의 신호 설계가 필수이며 설계된 신호는 제한된 주파수 대역 안에서 기존 GNSS 신호 및 계획된 신호와 공존해야 한다. Avila-Rodriguez et al. (2007)에서는 호환성에 대해 각 개별 서비스 및 신호를 방해하지 않고 Positioning, Navigation, Timing (PNT) 서비스를 별도로 또는 함께 사용할 수 있는 능력이라고 설명하며, 실제 Galileo 설계 시 기존 항법신호와의 공존을 고려하여 주파수 및 신호 계획을 확정하였다고 언급한다. 마찬가지로 다른 기존 항법신호의 경우도 호환성을 충족하기 위한 방향으로 신호 계획을 확정하며 (Avila-Rodriguez 2008, Zhang et al. 2017), KPS 신호 역시 기존 및 계획된 신호와의 호환성을 판단하여 설계되어야 한다.

신호 호환성 평가를 위한 일부 방법론들은 신호성능지수인 Spectral Separation Coefficient (SSC)와 Effective Carrier to Noise Density Ratio (Effective C/N_0)를 사용한다 (Wallner et al. 2005, 2006, Liu et al. 2011, ITU 2015). 새롭게 설계될 KPS 신호와 기존 항법 신호 호환성 평가를 위해서도 위에 언급한 성능지수를 사용하여 분석한 선행 연구들이 있다. Shin et al. (2020b)에서는 L1/L2/L5 대역안에서 기존 항법 신호와 KPS 신호와의 호환성을 평가 하기 위해 KPS 신호와 기존의 위성 항법 신호의 전송 환경을 가정하고 간섭 신호의 전력 밀도를 추정하여 간섭 영향의 증대 수준을 분석하고 있다. 간섭 신호의 전력 밀도는 Effective C/N_0 저하 분석을 하는데 있어 입력 값으로 사용될 수 있다. 이와 비슷하게 Lee et al. (2020)에서는 이론적 수식 바탕의 해석적 시

Received Feb 16, 2021 **Revised** Mar 05, 2021 **Accepted** Mar 08, 2021
†**Corresponding Author**E-mail: jh.won@inha.ac.kr
Tel: +82-32-860-7406 Fax: +82-32-863-5822
Subin Lee https://orcid.org/0000-0001-8807-4327
Kahee Han https://orcid.org/0000-0001-8804-5120
Jong-Hoon Won https://orcid.org/0000-0001-5258-574X

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

뮬레이터를 이용한 SSC, 간섭 신호의 전력 밀도 및 Effective C/N_0 저하 분석을 L6/S 대역안에서 수행하였다.

이상과 같은 연구들은 이상적 랜덤 신호를 가정하여 해석적 기법 기반으로 신호 호환성을 평가한다. 하지만 실제 GNSS 신호는 Pseudo Random Noise (PRN) 코드, 항법 메시지에 의해 이상적이지 않기 때문에 해석적으로 분석한 스펙트럼 및 상관 특성과 차이가 있다 (Shin et al. 2020a). 따라서 본 논문에서는 Lee et al. (2020)을 확장시켜 신호 송수신 체인 전 과정을 수행하여 신호의 성능지수를 분석하는 수치적 시뮬레이터를 이용하여 신호 호환성을 평가하고 이를 해석적 시뮬레이터를 이용하여 출력한 결과값과 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 신호 호환성 평가를 위한 신호성능지수를 설명하고 3장에서는 신호 호환성 평가를 위한 설계 시나리오 정의와 시뮬레이터 소개 및 시뮬레이션 결과를 분석한다. 끝으로 4장에서 결론을 맺는다.

2. FIGURES OF MERIT

2.1 Spectral Separation Coefficient (SSC)

SSC는 상관기 출력에서 간섭에 의해 야기되는 성능 저하를 나타내고, 정량화 하기 위한 신호성능지수이다. 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{ls} = \int_{-\beta_r/2}^{\beta_r/2} G_l(f) G_S(f) df \tag{1}$$

여기서 β_r은 수신기 front-end의 복소 대역폭, $G_l(f)$는 정규화된 총 간섭(aggregate interference)의 Power Spectral Density (PSD), $G_S(f)$는 정규화 된 신호의 PSD이다. SSC는 새로운 신호 설계 시, 기존 신호와의 호환성 판단을 위해 사용될 수 있다. 각각의 신호는 수용 가능한 총 유효 잡음 레벨(aggregate effective noise level)에 대한 제한을 가지며, 이를 충족시키기 위한 기존 신호 및 새로운 신호 간 SSC의 상한값이 정의된다. 즉, 새로운 신호에 의한 추가적인 간섭이 발생하여도 기존 신호의 수용 가능한 총 유효 잡음 레벨이 더 크도록 SSC 상한값을 정의한다. 예를 들어 새로운 GNSS 신호를 간섭으로 간주하는 경우, 기존 C/A code 신호와의 SSC는 $k_{vC} \leq -76.4$ *dBW/Hz*, M code 신호를 간섭 신호로 간주하는 경우 새로운 신호와의 SSC는 $k_{Mv} \leq -82.6$ *dBW/Hz*를 만족해야 한다 (Betz & Goldstein 2002).

2.2 Effective Carrier to Noise Density Ratio (Effective C/N_0)

위성 송신 안테나로부터 송신된 신호는 전송 처리 및 처리 과정에서 다양한 신호 전력 손실을 겪고 이는 수신된 신호의 C/N_0 열화를 야기한다. C/N_0 열화를 야기시키는 다양한 요인들 외에 RF 간섭 또한 C/N_0 열화를 야기한다. 간섭이란, 수신하고자 하지 않는 신호가 수신되는 것을 말하며, 수신기 신호처리 관점에서 간섭은 잡음과 같다. 따라서 수신기에서의 신호 성능을 예측하기 위해 수신기에 도달하는 GNSS 신호 자체뿐 아니라 간섭에 의한 영향까지 고려한 Effective C/N_0를 계산해야 하고 이는 신호 호환성 평가의 성능지수로써 사용될 수 있다. Effective C/N_0는 간섭을 잡음으로 모델링함으로써 계산될 수 있으며 식 (2)와 같다 (Betz 2001). 여기서 C_s는 수신하고자 하는 GNSS 신호의 수신 전력, N_0는 수신기의 열 잡음 전력 밀도, C_l는 간섭의 수신 전력이다. 무한대의 RF front-end 대역폭을 가지는 이상적인 GNSS 수신기가 가지는 C/N_0는 C_s/N_0이다. 즉, 식 (2)는 RF front-end 대역폭 및 간섭에 의해 C/N_0가 어떻게 감쇄되는지 보여준다.

Table 1. Test scenario configurations.

Frequency band	Center frequency [MHz]	Signal/ Scenario name	Modulation	Chip rate [Mcps]	Sub-carrier frequency [MHz]
L6	1278.75	E6 CS (=QZSS L6)	BPSK(5)	5.115	-
		E6PRS	BOCcos(10,5)	5.115	10.23
	1268.52	B3I	BPSK(10)	10.23	-
S	2492.028	SPS-S	BPSK(1)	1.023	-
		RS-S	BOC(5,2)	2.046	5.115
L6	1283.865	S1	BPSK(1)	1.023	-
		S2	BPSK(5)	5.115	-
	1288.980	S3	BOC(5,1)	1.023	5.115
		S4	BOC(5,2.5)	2.5575	5.115
S	2492.028	S5	BPSK(4)	4.092	-
		S6	BPSK(8)	8.184	-
		S7	BOC(3,2)	2.046	3.069
		S8	BOC(3,3)	3.069	3.069

한편, RF 간섭은 수신하고자 하지 않는 GNSS 시스템 신호에 의한 간섭과 GNSS가 아닌 타 시스템에 의한 간섭으로 분류될 수 있다. 따라서 식 (3)과 같이 다시 쓰일 수 있다. 여기서 I_{GNSS}는 GNSS 시스템의 신호에 의한 잡음 밀도 성분이다. 새롭게 설계된 신호에 의한 간섭은 GNSS 시스템 신호에 의한 간섭이므로 I_{GNSS}에 포함되며, 식 (4)와 같이 계산할 수 있다. 식 (4)를 식 (3)에 대입함으로써 SSC에 따른 Effective C/N_0의 열화를 계산할 수 있다.

$$(C/N_0)_{eff} = \frac{C_S \int_{-\beta_r}^{\beta_r} G_S(f) df}{N_0 \int_{-\beta_r}^{\beta_r} G_S(f) df + C_l \int_{-\beta_r}^{\beta_r} G_S(f) G_l(f) df} \tag{2}$$

$$(C/N_0)_{eff} = \frac{C_S \int_{-\beta_r}^{\beta_r} G_S(f) df}{N_0 \int_{-\beta_r}^{\beta_r} G_S(f) df + I_{GNSS} + I_{Non-GNSS}} \tag{3}$$

$$I_{GNSS} = Interf.Rx.Power\ [\text{dBW}] + 10\log\left(\text{간섭위성수}\right) + SSC\ [\text{dB/Hz}] \tag{4}$$

3. RF COMPATIBILITY ASSESSMENT

3.1 Scenario Configuration

KPS 신호 후보군이 아직 설정되지 않은 이유로 GNSS/KPS 신호 호환성 결과를 확인하기 위해 KPS 신호에 대한 임의의 시나리오를 정의한 후 이에 대해 시뮬레이션을 수행한다. 본 논문에서는 신호의 혼잡도가 크지 않은 L6, S 대역을 기준으로 새로운 신

https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.1.21

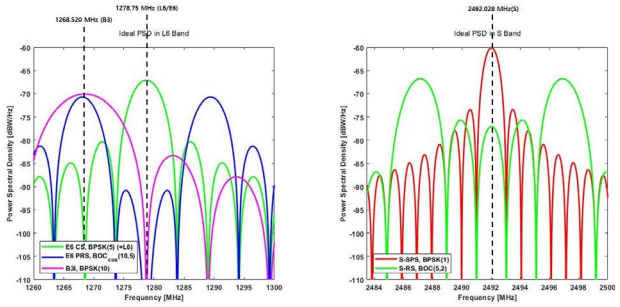


Fig. 1. Legacy signal PSD in L6/S band: L6 band (left), S band (right).

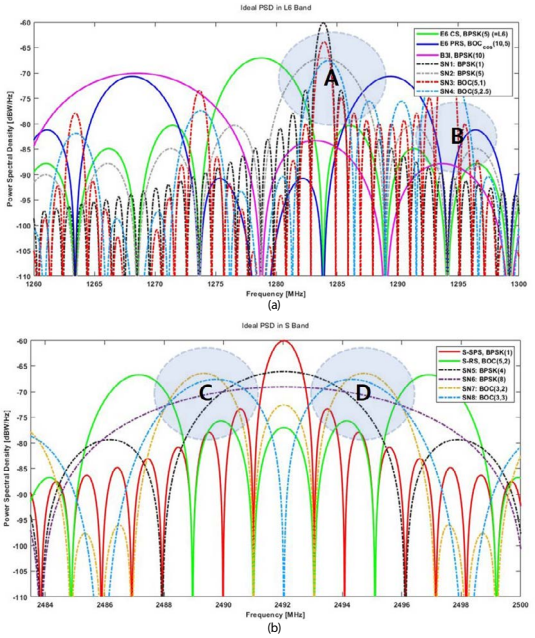


Fig. 2. Legacy signal PSD and scenario signal PSD: (a) L6 band, (b) S band.

호를 설계하였으며 시나리오로써 기존 항법 신호도 함께 고려한다. 각 신호들의 특성은 Table 1에 정의하였다.

Fig. 1은 L6 및 S 대역에 존재하는 기존 위성 항법 신호들의 이상적 PSD이다. L6 대역에는 Galileo의 E6 CS(= QZSS LEX), E6 PRS, BeiDou의 B3I 신호가 존재하며 L1 대역에 비해 사용 신호의 수가 현저히 적지만 모든 신호가 넓은 메인 로브 폭을 가지고 있고 B3I 신호의 경우 L6 대역의 중심 주파수로부터 왼쪽으로 약 10 MHz 떨어져 있다는 특징이 있다. S 대역에는 NavIC의 SPS-S, RS-S 신호가 존재하며, NavIC만이 유일하게 항법신호를 송출하고 있다는 특징이 있다.

본 논문에서 새롭게 정의한 시나리오의 이상적 PSD는 Fig. 2에 기존 항법 신호의의 이상적 PSD와 함께 도시하였다. 시나리오 중심 주파수 선정을 위해 각 주파수대역에 존재하는 기존 위성 항법 신호의 PSD를 확인하고 비교적 신호 전력이 비어 있는 곳을 파란색 원 A, B, C, D로 표시하였다. 파란색 원을 기준으로, 설계한 신호 전력이 집중되고 1.023 MHz 또는 10.23 MHz의 배수가 될 수 있도록 중심 주파수를 선정한 후 중심 주파수에 따라 BPSK 또는 BOC 변조 기법을 선택하여 기존 위성 항법 신호와의 호환성을 확인하였다. S1 ~ S4는 L6 대역에 대한 시나리오이며, S5 ~ S8는 S 대역에 대한 시나리오이다. L6 대역에 설계된 S1과 S2 시나리오는 파란색 원의 A지역에 전력이 집중될 수 있도록 설계한 시나리오이며, S3과 S4는 정의한 중심 주파수를 기준으로 파란색 원의 A와 B 지역에 전력이 집중될 수 있도록 BOC 변조 기법을 사용하여 설계한 시나리오이다. S 대역에 설계된 시나리오의 경우 S 대역에 할당된 대역폭이 16.5 MHz로 다른 GNSS 신호 대역보다 좁다는 특성을 가져 현재 S 대역의 NavIC 신호들과 동일한 중심 주파수를 가지도록 설계하였다. S5와 S6은 BPSK, S7과 S8은 BOC 변조기법을 사용하여 파란색 원의 C와 D 지역에 전력이 집중될 수 있도록 하였다.

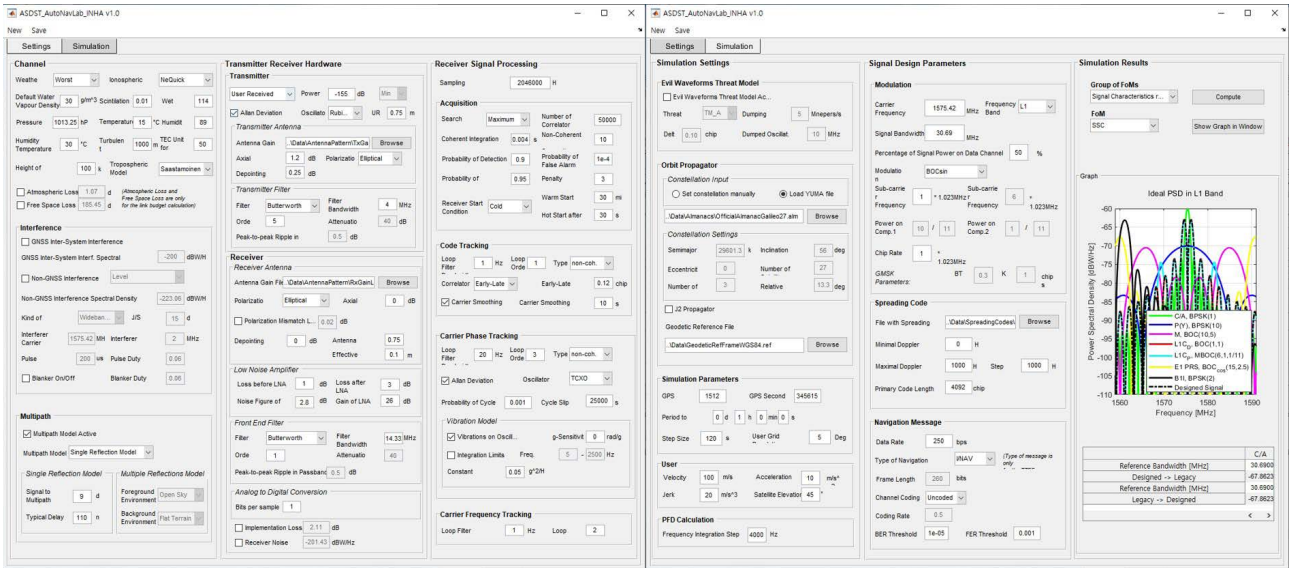


Fig. 3. Analytical simulator GUI.

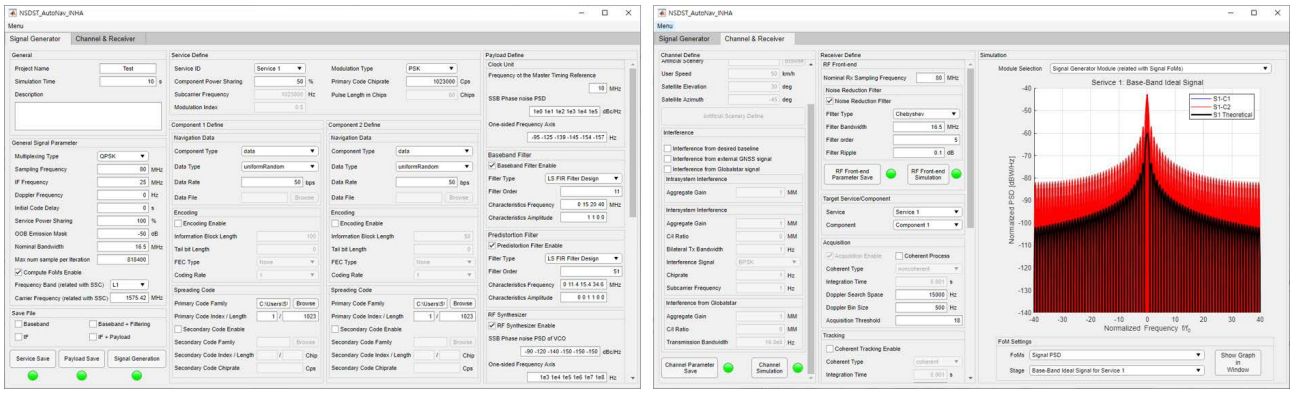


Fig. 4. Numerical simulator GUI.

Table 2. Spectral separation coefficients in L6 band [dB/Hz]: analytical (numerical).

Rx \ Tx	Galileo		BDS	Scenarios			
	E6 CS BPSK(5)	E6PRS $BOC_{cos}(10,5)$	B3I BPSK(10)	S1 BPSK(1)	S2 BPSK(5)	S3 BOC(5,1)	S4 BOC(5,2.5)
E6 CS =QZSS L6	-68.8046 (-64.2985/-68.4776)	-86.7943 (-86.4276)	-83.6743 (-82.8845)	-83.9954 (-83.9871)	-76.9883 (-76.9240)	-89.9543 (-89.8908)	-85.9816 (-85.8304)
E6PRS	-86.7943 (-86.5091/-86.5763)	-73.1731 (-70.5324)	-74.5647 (-74.5854)	-88.8969 (-88.8599)	-81.8951 (-79.1081)	-85.4320 (-85.4362)	-81.4592 (-81.3935)
B3I	-82.9988 (-83.4698/-83.6545)	-74.5365 (-74.5989)	-78.7834 (-68.2783)	-96.2059 (-95.7046)	-89.1867 (-88.7910)	-86.2425 (-85.4522)	-86.6029 (-85.8189)

Table 3. Spectral separation coefficients in S band [dB/Hz]: analytical (numerical).

Rx \ Tx	NavIC		Scenarios			
	SPS-S BPSK(1)	RS-S BOC(5,2)	S5 BPSK(4)	S6 BPSK(8)	S7 BOC(3,2)	S8 BOC(3,3)
SPS-S	-61.8507	-77.8018	-66.4749	-69.2742	-73.3979	-77.3873
RS-S	(-48.3018)	(-78.3400)	(-66.3173)	(-69.0046)	(-72.5902)	(-76.8170)
	-77.8018	-69.2041	-78.2676	-74.8646	-77.3304	-76.8271
	(-75.0970)	(-67.0148)	(-78.0997)	(-74.8343)	(-73.9381)	(-76.7107)

3.2 Analytical Simulator

해석적 시뮬레이터는 신호설계 파라미터와 성능지수 간의 관계식을 기반으로 구현되었으며, MATLAB 기반 시뮬레이션 툴이다 (Han & Won 2019). 항법 신호뿐만 아니라 위성 탑재체, 채널, 수신기 및 시뮬레이션 환경을 파라미터 화하여 설계된 GNSS 신호의 성능지수를 계산한다. Fig. 3은 해석적 시뮬레이터의 GUI이다. 중심적으로 사용한 패널은 중심 주파수, 주파수 대역 설정, 기준 신호 대역폭, 변조 기법, 코드 칩 속도 등과 같이 주파수 특성 관련 입력 파라미터를 가지는 Signal Design Parameters 패널과 2.2에서 언급한 I_{GNSS} 및 $I_{Non\text{-}GNSS}$ 관련 입력 파라미터를 가지는 Interference 패널이다. 시뮬레이터는 Signal Design Parameters 패널에 입력된 파라미터를 기반으로 이론적 PSD를 그리고 이를 이용하여 계산된 SSC와 SSC에 따라 계산될 수 있는 I_{GNSS}을 Interference 패널에 입력함으로써 SSC에 따른 Effective C/N_0열화의 영향을 출력할 수 있다. 출력된 SSC를 통해 설계 신호와 기존 신호와의 간섭 정도를 알 수 있고, Effective C/N_0을 통해 가시 위성 수와 SSC를 고려한 총 간섭이 실제 C/N_0 열화와 어떤 영향이 있는지 확인함으로써 신호 호환성을 평가할 수 있다. 시뮬레이터를 통해 획득한 SSC 및 Effective C/N_0에 대한 검증은 기존에 알려진 변조방식을 적용하여 획득한 결과와 선행연구 (Betz & Goldstein 2002, Betz 2001)에서 제시되는 결과를 비교하여 수행하였다.

3.3 Numerical Simulator

수치적 시뮬레이터는 실제 위성 탑재체의 신호 생성부터 지상 수신기의 신호처리까지의 신호 송수신 체인 전 과정을 수행하는 수치적 end-to-end 시뮬레이터이며, Matlab 기반 시뮬레이션 툴이다 (Shin et al. 2019). 따라서 해석적 시뮬레이터와 동일하게 항법 신호뿐 아니라 위성 탑재체, 채널, 수신기 및 시뮬레이션 각 단계에 대해서 성능지수를 계산한다. 획득한 성능지수들에 대한 검증은 해석적 시뮬레이터의 값과 비교함으로써 수행될 수 있다. Fig. 4는 수치적 시뮬레이터의 GUI이다. 수치적 시뮬레이터를 이용한 신호 호환성 평가를 위해 L6 및 S 대역의 기존 항법신호와 3.1에서 정의한 임의의 신호를 생성하고 신호 처리하여 SSC와 SSC에 따른 Effective C/N_0 열화를 분석한다.

수치적 시뮬레이터에서도 해석적 시뮬레이터와 마찬가지로 GUI에 입력한 파라미터에 맞게 신호를 생성한다. 단, 수치적 시뮬레이터는 실제와 유사한 신호를 직접 생성하여 SSC를 계산하는 이유로 Table 1에서 정의한 파라미터뿐 아니라 시뮬레이션 시간, PRN 코드 및 코드 길이, 데이터 속도 등의 파라미터로 인해 PSD를 다르게 그리고 이는 이론적 PSD를 통해 계산한 SSC와 수치적 PSD를 통해 계산한 SSC와의 값차이를 야기시키므로 추가로 언급한 파라미터를 고려하여 시뮬레이션을 수행해야한다. 예를 들어 일반적으로 SSC는 연속적인 PSD를 가정하고 계산되나,

Table 4. Equivalent noise density in L6 band [dBW/Hz]: analytical.

Rx \ Tx	Galileo		BDS	Scenarios			
	E6 CS BPSK(5)	E6PRS *BOCcos(10,5)*	B3I BPSK(10)	S1 BPSK(1)	S2 BPSK(5)	S3 BOC(5,1)	S4 BOC(5,2.5)
E6 CS (=QZSS L6)	-213.8046	-231.7943	-228.6743	-232.9748	-225.9677	-238.9337	-234.9610
E6PRS	-231.7943	-218.1731	-219.5647	-237.8763	-230.8745	-234.4114	-230.4386
B3I	-227.9988	-219.5365	-223.7834	-245.1853	-238.1661	-235.2219	-235.5823

Table 5. Equivalent noise density in S band [dBW/Hz]: analytical.

Rx \ Tx	NavIC		Scenarios			
	SPS-S BPSK(1)	RS-S BOC(5,2)	S5 BPSK(4)	S6 BPSK(8)	S7 BOC(3,2)	S8 BOC(3,3)
SPS-S	-208.3779	-224.3508	-215.4543	-218.2536	-222.3773	-226.3667
RS-S	-224.3508	-215.7531	-227.2470	-223.8440	-226.3098	-225.8065

데이터 속도가 칩 속도 및 코드 길이와 관련된 조건을 만족하지 않으면 PSD는 주기적인 spectral lines를 보이게 되고 이러한 경우 이론적 SSC값과 다른 값을 가질 수 있다 (Liu et al. 2010). 또한, ITU 2015에 따르면 1023 chip의 짧은 코드 길이를 가지는 L1 C/A 경우 integration time이 1 ms를 넘을 경우 식 (1)을 따르지 않을 수 있다고 설명하고 있으며, 본 논문에서는 고려하지 않지만 신호 간 Doppler Offset 값에 따라 영향을 크게 받을 수 있다고 설명하고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 항법 신호에 대해서 Open Service (OS) 신호가 아닌 이유로 공개된 정보가 적어 실제 PRN 코드를 입력할 수 없는 경우와 본 논문에서 정의한 시나리오에 대해 임의의 10230 chip PRN 코드를 입력 파라미터로 설정하였으며, 설정한 PRN 길이와 칩 속도의 관계를 고려하여 데이터 속도 값을 설정하였다. 시뮬레이션 시간은 각 신호의 주기가 충분히 반복될 수 있고 신호 처리가 가능할 수 있도록 10초 동안 수행하였다. 이때, E6 CS 신호의 경우 Data와 Pilot의 두 성분으로 신호가 구성되어 있는 이유로 각 성분에 대하여 SSC가 계산된다. RS-S 신호의 경우는 E6 CS 신호와 마찬가지로 Data와 Pilot의 두 성분으로 구성돼 있지만 입력 파라미터와 관련된 정보가 적은 이유로 Data 성분만을 고려하여 SSC를 계산한다. 신호 생성이 완료되면 신호 처리 전 실제 신호 송신 과정에서 겪는 채널의 영향을 신호에 입히게 된다. 본 논문에서는 간섭 신호에 대한 Effective C/N_0 열화 분석을 위해 Additive White Gaussian Noise (AWGN)와 간섭 신호를 함께 더해준 신호를 처리하여 추정한 C/N_0 와 AWGN 채널의 영향만 입힌 신호를 처리하여 추정한 C/N_0 를 비교함으로써 C/N_0 열화 정도를 판단하여 신호 호환성을 분석한다.

3.4 Simulation Result

Tables 2와 3에서는 L6 및 S 대역에 대하여 시나리오와 기존 위성 항법 신호 간의 이론적, 수치적 SSC 계산 결과를 보여준다. SSC 계산에 사용된 front-end의 복소 대역폭은 Galileo, BDS, NavIC 신호에 대해 각각 기준 대역폭인 40.92 MHz, 20.46 MHz, 16.5 MHz로 정의하였다 (Galileo ICD 2016, IRNSS ICD 2017, BeiDou ICD 2018).

이론적 및 수치적 SSC 결과는 설계 신호와 간섭신호 사이의 메인 로브가 최대한 겹치지 않으면서 PSD의 유사도가 떨어지는 경우 SSC 값이 작은 값을 가졌다. 이러한 이유로 L6의 B3I 신호가 같은 대역의 E6 CS, E6 PRS 신호와 비교하여 중심 주파수가 상대적으로 멀어 비교적 낮은 SSC 값을 가짐을 확인할 수 있다. E6 CS 신호의 경우 다른 신호에 비해 self-SSC가 높고, L6 대역 안에서 가장 높은 SSC 값을 가진다. 시나리오와 기존 항법신호 간 SSC 값을 비교하였을 때는 1288.980 MHz의 중심 주파수 값을 가지는 S3 및 S4 시나리오가 모든 기존 항법신호에 대해 전반적으로 낮은 SSC 값을 가짐을 확인하였다. 또한, 시나리오에 의한 SSC 값보다 기존 항법신호들 사이의 SSC 값이 더 높음을 확인할 수 있다. S 대역의 SPS-S의 경우 E6 CS 신호와 동일하게 상대적으로 높은 self-SSC를 가지며, S 대역 내에서 가장 높은 SSC 값을 가진다. S 대역에서 시나리오 신호와 기존 항법신호 간 SSC 값을 비교하였을 때는 BOC 변조기법을 사용하여 비교적 PSD가 기존 항법신호와 겹치지 않는 S7 및 S8 시나리오가 모든 기존 항법신호에 대해 전반적으로 낮은 SSC 값을 가짐을 확인하였다. 이론적 SSC 값과 수치적 SSC 값을 비교하였을 때는 수치적 SSC가 이론적 SSC보다 대체적으로 높았으며, 값의 차이는 있지만 SSC 값이 동일한 양상을 띄우는 것을 알 수 있다. 이때, SPS-S의 경우 다른 기존 항법신호나 시나리오 신호에 비해 이론적 SSC와 수치적 SSC 값의 차이가 약 13 dB/Hz로 값의 차이가 큰데 이는 다른 신호들에 비해 SPS-S의 코드 길이가 1023 chip으로 짧은 코드 길이를 갖고 데이터 속도가 25 bps로 매우 낮기 때문이다.

계산된 SSC 값에 따른 이론적 Effective C/N_0 저하를 확인하기 위해 식 (3)를 이용하여 각 GNSS 시스템에 대한 총 간섭을 구하였다. 총 간섭을 구하기 위해 설정한 Interference Rx. Power는 -155 dBW이며 각 시스템이 동일한 전력으로 신호를 송신하다고 가정하였다. 각 GNSS 시스템에 대한 가시위성수는 Galileo, BDS, NavIC, 및 시나리오 위성에 대해 각각 10기, 10기, 7기, 4기로 정의하였다. 계산한 총 간섭은 Tables 4와 5에 정리하였으며, 각 Table에서 기존 GNSS 시스템 간 가지는 이론적 총 간섭의 최대값과 기존 GNSS 시스템과 시나리오 신호 간 가지는 이론 적 총 간섭의 최대값에 따른 Effective C/N_0 저하는 Fig. 5에 도시하였다. L6 대역에서는 E6 CS와 E6 CS 신호 사이에서의 총간섭이 기존 GNSS 신호 간 총 간섭 중 가장 컸으며, E6 CS와 S2 사이의 총간섭이 기존 GNSS 신호와 시나리오 신호간 총 간섭 중 가장 컸다. S 대역에서는 SPS-S와 SPS-S 신호 사이에서의 총간섭이 기존 GNSS 신호 간 총 간섭 중 가장 컸으며, SPS-S와 S5 사이의 총 간섭이 기존 GNSS 신호와 시나리오 신호간 총 간섭 중 가장 컸다. L6와 S 대역 모두 이론적 총 간섭의 최대값은 기존 GNSS 시스템 간 값이었으며 기존 GNSS 시스템과 시나리오 간 값은 최대값 보다 더 작음을 알 수 있다. 고려된 시나리오 가시 위성 수가 다른 기존 항법 시스템에 대해 6기가 적긴 하지만 이는 10기를 고려했을 때에 비해 4 dBW/Hz 차이로 이를 고려한다 하더라도 시

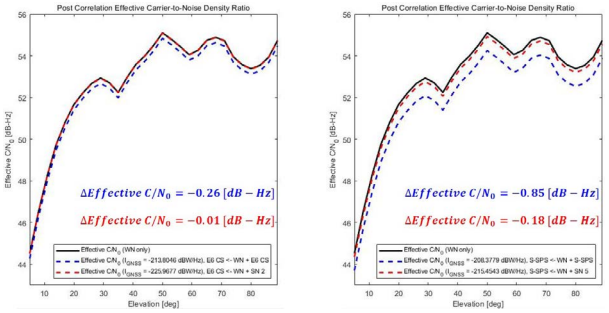


Fig. 5. Effective C/N_0 degradation in L6/S band: L6 band (left), S band (right).

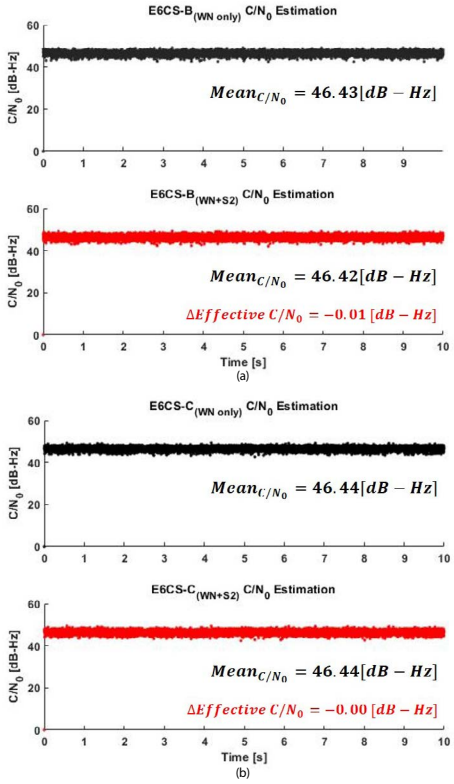


Fig. 6. E6 CS effective C/N_0 degradation: E6 CS-B (a), E6 CS-C (b).

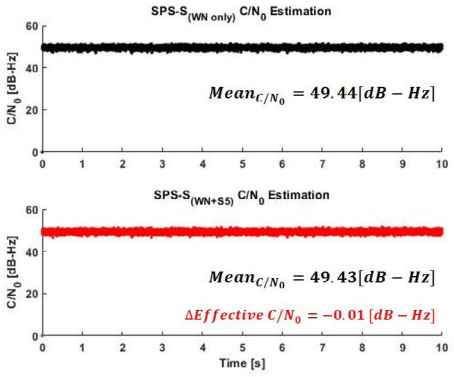


Fig. 7. SPS-S effective C/N_0 degradation.

나리오의 SSC 값이 기존 항법신호에 비해 매우 낮음으로 가시위성 수 및 총 간섭 값의 변화로 인한 Effective C/N_0 변화가 크지 않다. L6/S 대역 모두 기존 GNSS 신호와 시나리오 간 총 간섭에 따른 Effective C/N_0 는 GNSS 신호 간 총 간섭의 최대값에 따른 Effective C/N_0 결과에 비해 C/N_0 감소 정도가 수치적으로 작았고, L6 대역은 −0.01 dB/Hz, S 대역은 −0.18 dB/Hz의 값을 가졌다. GNSS 신호 간 총 간섭의 최대값에 따른 경우는 앞선 결과에 비해 조금 더 큰 저하를 보였지만 L6 대역은 −0.26 dB/Hz, S 대역은 −0.85 dB/Hz로 저하의 정도가 작음을 알 수 있다.

SSC에 따른 Effective C/N_0 열화 정도를 수치적으로도 확인하기 위해 수치적 시뮬레이션을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 해석적 분석과 비교하기 위해 기존 신호와 시나리오 신호간 SSC 값 중 가장 컸던 경우인 E6 CS ← S2, SPS-S ← S5의 Effective C/N_0 열화를 수치적 시뮬레이터를 사용하여 결과를 출력하였다. Fig. 6은 E6 CS 신호 처리 결과이고, Fig. 7은 SPS-S 신호 처리 결과이다. 이론적 결과와 마찬가지로 약간의 저하를 보였지만 이론적 수치보다 훨씬 더 작은 저하를 갖음을 알 수 있다. 이는 실제 생성된 신호에 채널의 영향을 더할 때 다른 항법 신호로부터 오는 신호의 세기보다 White Noise의 세기가 훨씬 커서 항법 신호의 영향으로 인한 Effective C/N_0 열화가 잘 보이지 않기 때문이다. 이러한 이유로 모든 시뮬레이션에서의 저하는 약 −0.01 dB/Hz로 시나리오 신호를 추가함에 따라 기존 항법 신호의 신호 획득 및 추적의 성능 열화는 거의 없을 것으로 예상된다. 마찬가지로 동일 대역의 다른 항법 신호의 간섭들이 많이 생겨도 이로 인한 Effective C/N_0 열화는 크지 않다. 이때, PRN 마다의 간섭 정도가 다르기 때문에 기준 PRN이 바뀌게 되거나 간섭 PRN이 바뀌게 되면 추정 C/N_0와 저하 정도가 달라지게 된다. 하지만 C/N_0 추정 값과 저하 정도가 달라질 뿐이지 간섭의 영향이 있을 때 추정 C/N_0의 저하 양상은 동일함을 확인하였다.

한편, 결과에서 알 수 있듯이 SPS-S 신호의 추정 C/N_0가 E6 CS 신호의 추정 C/N_0보다 약 3 dB 높은데 이는 E6 CS 시뮬레이션에 사용된 수치적 시뮬레이터가 신호의 구성 성분 별로 신호 처리하기 때문이다. 즉, E6 CS 신호의 경우 생성할 때 Data (E6 CS-B)와 Pilot (E6 CS-C)성분을 50%의 비율로 전력을 나누어 신호 생성했기 때문에 E6 CS 신호의 한 구성 성분만 신호 처리할 경우 100% 전력을 가지는 SPS-S 신호보다 약 3 dB 정도 낮게 나오게 되는 것이다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 신호설계 파라미터와 성능지수 간의 관계식을 기반으로 개발된 해석적 시뮬레이터와 신호 송수신 체인 전 과정을 수행하는 수치적 시뮬레이터를 이용하여 설계 시나리오와 기존 GNSS 신호와의 호환성을 평가하였다. SSC 및 Effective C/N_0를 이용하여 설계한 신호가 기존 GNSS 신호에 어느정도 간섭의 영향을 미칠지에 대한 대략적인 영향을 평가하였다.

SSC의 경우 설계 신호와 간섭신호 사이의 메인 로브가 최대한 겹치지 않으면서 PSD의 유사도가 떨어지는 경우 SSC 값이 작은 값을 가졌다. L6 대역에서는 E6 CS와 E6 CS 사이의 SSC가

가장 컸으며, B3I와 S1 사이의 SSC가 가장 작았다. S 대역에서는 SPS-S와 SPS-S 사이의 SSC가 가장 컸으며, RS-S와 S5 사이의 SSC가 가장 작았다. 해석적 SSC와 수치적 SSC 사이의 값 차이는 있었으나 두 시뮬레이션에서 나온 값의 경향이 동일했다. 단, PRN 길이가 짧거나 데이터 속도가 너무 낮은 경우는 수치적으로 계산한 값과 해석적으로 계산한 값의 차이가 컸다.

Effective C/N_0의 경우 앞서 계산한 SSC와 가시 위성 수를 고려한 총 간섭이 입력 파라미터로 들어가기 때문에 SSC가 클수록 C/N_0 열화 커지는데, 해석적 시뮬레이터를 이용하여 출력한 결과 열화의 정도가 모든 시나리오에 대해 최대 1 dB가 넘지 않는 수준으로 매우 작음을 확인하였다. 수치적 시뮬레이터 결과도 마찬가지로 −0.01 dB 정도의 매우 작은 열화를 가짐을 확인하였고, 이는 해석적 시뮬레이터를 이용하여 출력한 결과보다 훨씬 작은 값이다. 따라서 L6/S 대역에 새로운 신호가 설계되어도 기존 신호의 획득 및 추적 성능의 열화가 매우 작을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 정보(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1A2C2013091).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Lee, S. 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, S. and Won, J. -H.; methodology, Lee, S. and Won, J. -H.; software, Lee, S.; validation, Lee, S. and Won, J. -H.; formal analysis, Lee, S.; investigation, Lee, S.; resources, Lee, S. and Won, J. -H.; data curation, Lee, S.; writing—original draft preparation, Lee, S.; writing—review and editing, Lee, S. and Won, J. -H.; visualization, Lee, S.; 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

Avila-Rodriguez, J. A. 2008, On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation, PhD Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich.

Avila-Rodriguez, J. A., Hein, G. W., Wallner, S., Issler, J. L., Ries, L., et al. 2007, The MBOC modulation: the final touch to the Galileo frequency and signal plan, in the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2007), Fort Worth, Tx, 25-28 Sep 2007, pp.1515-1529.

BeiDou ICD 2018, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document, Open Service Signal B3I (Version 1.0), China Satellite Navigation Office. http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608516798097666.pdf

Betz, J. W. 2001, Effect of partial-band interference on receiver estimation of C/N0: Theory, Proceedings of ION NTM 2001, Jan. 22-24, 2001, Long Beach, Ca, pp.817-828

Betz, J. W. & Goldstein, D. B. 2002, Candidate Designs for an Additional Civil Signal in GPS Spectral Bands, Proceeding of The Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA, 28-30 Jan 2002, pp.622-631

Galileo ICD 2016, European GNSS (GALILEO) Open Service Signal-in-Space INTERFACE Control Document, OS SIS ICD (Issue 1.3), European Union. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf

Han, K. & Won, J. -H. 2019, Development of Matlab-based Signal Performance Analysis Software for New RNSS Signal Design, JPNT, 8, 139-152. https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.139

IRNSS ICD 2017, IRNSS SIS ICD for Standard Positioning Service (version 1.1), Indian Space Research Organization

ITU 2015, Recommendation ITU-R M.1831-1, A coordination methodology for radionavigation-satellite service inter-system interference estimation, International Telecommunication Union.

Lee, S. B., Han, K., & Won, J. H. 2020, Assessment of GNSS/KPS RF Compatibility for KPS Signal Design, Proceeding of IPNT 2020, Nov 11-13 2020, Yeosu, Korea, pp.107-110. http://ipnt.or.kr/2020proc/6

Liu, W., Li, S., Liu, L., Niu, M., & Zhan, X. 2010, A comprehensive methodology for assessing radio frequency compatibility for GPS, Galileo and Compass, Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010), Portland, OR, September 21-24 2010, pp.943-954

Liu, W., Zhai, C. R., Zhan, X. Q., & Zhang, Y. H. 2011, Assessment and analysis of radio frequency compatibility among several global navigation satellite systems, IET Radar, Sonar & Navigation, 5, 128-136. https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2009.0241

Park, J. U. & Heo, M. B. 2019, Korea PNT Update, 59th Meeting of the Civil GPS Service Interface Committee, Miami, Florida, 16-17 Sep 2019.

Shin, H., Han, K., Joo, J. M., & Won, J. H. 2020a, Signal Modulation Techniques and Performance Analysis

for KPS Signal Design, JPNT, 9, 293-304. https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.293

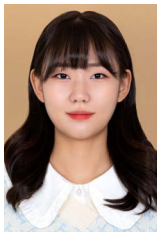
Shin, H., Han, K., & Won, J. H. 2019, Development of End-to-end Numerical Simulator for Next Generation GNSS Signal Design, JPNT, 8, 153-164. https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.4.153

Shin, J. H., Lim, D. W., Joo, J. M., Lee, S. J., Song, H. Y., et al. 2020b, Interference Analysis of KPS Signals on the L-band GNSS Signals, JPNT, 9, 319-325. https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.319

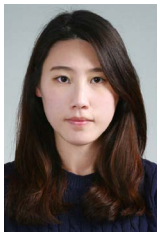
Wallner, S., Hein, G. W., & Avila-Rodriguez, J. A. 2006, Interference computations between several GNSS systems, ESA Navitec, 11-13

Wallner, S., Hein, G. W., Pany, T., Avila-Rodriguez, J. A., & Posfay, A. 2005, Interference computations between GPS and Galileo, Proceedings of the 18th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005), Long Beach, CA, Sep 13-16 2005, pp.861-876

Zhang, X., Wu, M., Liu, W., Li, X., Yu, S., et al. 2017, Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-generation navigation signals, Journal of Geodesy, 91, 1225-1240. https://doi.org/10.1007/s00190-017-1020-3



Subin Lee is a M.S. student of the Autonomous Navigation System Laboratory at Inha University, Korea. She received B.S. degree from Inha University in 2020. Her research interests are GNSS signal design and software receiver.



Kahee Han is a Ph. D. student of the Autonomous Navigation System Laboratory at Inha University, South Korea. She received B.S. and M.S. degrees from the same university in 2017 and 2019. Her research interests are GNSS signal design and software receiver.

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.