

Interference Analysis of KPS Signals on the L-band GNSS Signals

Jang Hwan Shin¹, Deok-Won Lim², Jung-Min Joo², Sang Jeong Lee³, Hong-Yeop Song⁴, Jong-Hoon Won⁵, Jae Min Ahn^{1†}

¹Department of Radio Science and Information Communication Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

³Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁴School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

⁵Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

ABSTRACT

In order to propose new satellite navigation signals, it is essential to analyze the increased level of interference effect that the existing signals suffer. In this paper, a method for estimating the power density of the interference signals on GPS signals is proposed before and after the additional transmission of the KPS signals in the L1, L2 and L5 bands. For estimation, we assume the number of visible satellites observed over the Korean peninsular and the minimum received power of the satellite navigation signals. The comparison of the estimated values shows that the power density of the interfering signal increases by up to 1.37 dB due to the introduction of KPS, but this leads to an increase in interference plus noise power density below 0.47 dB.

Keywords: satellite navigation signals, interference power density, spectral separation coefficient, minimum received power

1. INTRODUCTION

위성항법시스템을 운용하기 위한 항법위성은 기존의 측위 신호 이외에도 재난 및 전쟁과 같은 비상 상황을 대비한 공공안전서비스(Public Safety Service, PSS) 신호와 위성항법시스템의 측위 정밀도 향상과 미래 활용성 증대 차원에서 부가 서비스 제공을 위한 보정 신호를 전송하고 있다. 그러나 항법위성용 주파수 대역의 자원은 한정되어 있을 뿐만 아니라 전세계 여러 지역에서 Global Positioning System (GPS), Galileo, BeiDou

와 같은 여러 위성항법시스템을 독자적으로 운용하고 있기 때문에 항법위성에서 송출되는 다양한 위성항법 신호들은 동일 주파수 대역에서 동시 전송되어야 한다 (Yao & Lu 2017). 예를 들어 L1 (1575.42 MHz) 대역에서 GPS는 C/A, P(Y), L1C를, Galileo는 E1OS, E1PRS를, BeiDou는 B1C를 동시 전송하고 있다. 이러한 상황에서 동일 대역에서 전송되는 서로 다른 위성항법 신호들 사이에는 간섭이 발생하고 이로 인하여 신호의 획득 및 추적 성능의 열화를 가져올 수 있다.

위성항법 신호들은 동일 대역에서 발생하는 간섭의 영향을 줄이기 위한 목적으로 서비스별 서로 다른 파형 변조 방식을 적용하여 설계된다 (Betz 1999). 위성항법시스템의 개발 초기부터 현재까지 가장 보편적으로 사용되는 파형 변조 방식으로는 전송 비트의 논리값에 따라 반송파의 위상을 180°만큼 편이하는 Binary Phase Shift Keying (BPSK)가 있으며 대표적인 BPSK 기반 위성항법 신호로는 GPS L1 C/A, L2C가 있다. 이와 달리 Binary Offset Carrier (BOC)은 전송 비트에 부 반송파를 곱하여 반송파의 위상을 편이하는 방식이며 신호의 전력을 중심 주파수로부터 멀어지게 하는 특징이 있기 때문에 기존의 BPSK 기반의 위성항법 신호와의 간섭을 줄일 수 있다. 이처럼 동일 대역에서 위성항

Received Nov 04, 2020 Revised Nov 30, 2020 Accepted Dec 01, 2020

†Corresponding Author

E-mail: jmahn@cnu.ac.kr

Tel: +82-42-821-6866 Fax: +82-42-823-5586

Jang Hwan Shin <https://orcid.org/0000-0003-0247-5205>

Deok-Won Lim <https://orcid.org/0000-0002-5154-8063>

Jung-Min Joo <https://orcid.org/0000-0001-6826-1010>

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

Hong-Yeop Song <https://orcid.org/0000-0001-8764-9424>

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

Jae Min Ahn <https://orcid.org/0000-0002-6261-0010>

법 신호들의 동시 전송을 위하여는 간섭 신호와 기존 신호 사이의 Spectral Separation Coefficient (SSC) 성능 분석을 통한 파형 변조 방식의 선택이 수행되고 최종적으로는 동시 전송으로 인한 기존 신호가 겪는 간섭 신호의 전력이 제시되어야 한다 (Wu & He 2011).

한편 한국형위성항법시스템(Korea Positioning System, KPS)의 도입이 가시화됨에 따라 한반도 상공에서도 7개의 정지궤도 위성을 통한 KPS 신호들의 전송이 계획되어 있다. 항법위성용 주파수 대역에서 KPS 신호들의 추가 전송은 기존의 위성항법 신호들이 겪는 간섭 영향의 증대를 가져온다. 따라서 KPS 도입에 앞서 이에 대한 추정값이 제시되어야 한다. 본 논문에서는 가장 널리 사용되고 있는 GPS 신호를 대상으로 KPS 신호의 추가 전송으로 인한 간섭 영향의 증대 수준을 추정하는 방법을 서술하고 간섭 및 잡음 전력 밀도의 증가가 미약함을 보임으로써 KPS 도입의 타당성을 제시한다.

본 논문의 2장에서는 간섭 영향의 증대 수준을 분석하기 위한 한반도 상공에서의 KPS 신호와 기존의 위성항법 신호의 전송 환경을 가정하고 GPS L1 C/A, L1C, L2C, L5가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도의 추정 방법에 대하여 서술한다. 3장에서는 2장에서 서술한 방법을 바탕으로 추정된 간섭 영향의 증대 수준 결과를 분석하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. METHODOLOGY TO ANALYZE THE LEVEL OF INTERFERENCE POWER ON GPS SIGNALS

2.1 Signal Transmission Environment over Korean Peninsular

위성항법시스템은 서비스 영역에 따라 전역위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)과 지역위성항법시스템(Regional Navigation Satellite System, RNSS)으로 나눌 수 있다. 대표적인 GNSS로는 미국의 GPS가 있으며 '20년부터 서비스 예정인 유럽의 Galileo와 중국의 BeiDou가 있다. RNSS로는 2023년 구축 완료 예정인 일본의 Quazi-Zenith Satellite System (QZSS)가 있으며 우리나라의 KPS 또한 RNSS로의 구축이 계획되고 있다 (Joo & Heo 2020). GPS는 총 31개의 위성을 운용 중이며 최소 24개의 중궤도 위성을 통하여 작동하도록 되어있다. Galileo는 2020년까지 30개의 위성을 발사할 예정이며, BeiDou는 2000년부터 3개의 위성으로 중국과 주변 지역을 포함하는 제한된 범위를 대상으로 운용되었으나 2020년까지 35개의 위성으로 GNSS를 구축할 예정이다. QZSS는 2023년까지 7개의 정지궤도 및 경사타원궤도 위성으로 구축될 예정이며 우리나라의 KPS 또한 QZSS와 동일한 개수의 위성으로 구축될 것으로 보인다. 다만 본 논문에서는 L1, L2, L5 대역에서 KPS 신호의 추가 전송으로 인한 GPS L1 C/A, L1C, L2C, L5 신호에 더해지는 간섭 신호 전력의 증대 수준을 분석하기 위하여 한반도 상공에서 관측되는 가시위성의 개수를 Table 1로 가정한다. GPS, Galileo, BeiDou는 GNSS로서 전지구를 범위로 분포하고 있는 궤도 위성 중 한반도

Table 1. Number of visible satellites over Korean peninsular.

System	Number of satellites
GPS	12
Galileo	15
BeiDou	18
QZSS	7
SBAS	4
KPS	7

Table 2. Minimum received power and waveform modulation method for signals in the L1 band.

System	Signal	Minimum received power (dBW)	Waveform
GPS	C/A	-158.5	BPSK(1)
GPS	P(Y)	-161.5	BPSK(10)
GPS	L1C	-157.0	MBOC
Galileo	E1OS	-157.0	MBOC
BeiDou	B1C	-159.0	MBOC
QZSS	C/A	-158.5	BPSK(1)
QZSS	L1C	-157.0	MBOC
QZSS	SAIF	-161.0	BPSK(1)
SBAS	C/A	-161.0	BPSK(1)
KPS	L1C	-157.0	MBOC
KPS	MLS	-157.0	MBOC

지표면 기준으로 반구 상공에 위치한 항법위성에서 송출하는 전파만이 한반도에 위치한 지상 수신국에 도달하는 것으로 간주하였기 때문에 가시위성의 개수를 전체 궤도 위성 개수의 절반으로 가정하였다. QZSS와 KPS는 RNSS로서 정지 궤도와 경사 궤도 위성의 개수를 가시위성의 개수로 가정하였으며 위성기반보정시스템(Satellite Based Augmentation System, SBAS)의 경우는 일본의 Multi-functional Satellite Augmentation System (MSAS), 중국의 Satellite Navigation Augmentation System (SNAS) 그리고 구축 예정인 한국형 위성항법보정시스템(Korea Augmentation Satellite System, KASS)의 정지 궤도 위성의 개수로 가정하였다.

항법위성용 주파수 동일 대역에서 기존 신호에 더해지는 간섭 신호의 전력은 간섭 신호를 전송하는 항법위성으로부터 송출된 전파가 지표면으로 도달할 당시의 입사각의 크기와 관련된다. 가령 송출된 전파가 지상 수신국이 설치된 지표면과 수직 방향으로 도달할 경우의 간섭 신호의 수신 전력은 수평 방향으로 도달할 경우보다 큰 값을 가지며 이로 인하여 간섭의 영향도 크게 나타난다. 또한 항법위성은 중심이 지구의 중심과 일치하는 궤도면을 따라 항행하며 전파를 송출하기 때문에 수신국은 간섭 신호를 수신할 때마다 다른 입사각을 가지는 전파를 수신하며 이에 따라 간섭 신호의 수신 전력은 매 순간 다른 값을 가진다. 하지만 본 논문에서는 KPS 신호의 추가 전송으로 인한 GPS 기준 신호에 더해지는 간섭 신호의 전력 밀도를 계산하여 기준값으로 제시하고 열잡음 전력 밀도보다 낮게 나타남을 보이기 위하여 지상 수신국으로 도달하는 간섭 신호의 수신 전력은 항법위성의 고도와는 관계없이 항상 일정한 세기를 갖는 것으로 간주한다. 이를 위하여 수신 신호의 세기를 각각의 위성항법시스템에 해당하는 인터페이스통제문서(Interface Control Document, ICD)에서 정의한 L1, L2, L5 대역에서 전송되는 위성항법 신호에 대한 최소 수신 전력으로 가정하고 이를 각각의 위성항법 신호에 적용된 파형 변조 방식과 함께 정리하여 Tables 2-4에 제시하였다 (Galileo

Table 3. Minimum received power and waveform modulation method for signals in the L2 band.

System	Signal	Minimum received power (dBW)	Waveform
GPS	L2C	-158.5	BPSK(1)
GPS	P(Y)	-161.5	BPSK(10)
QZSS	L2C	-158.5	BPSK(1)
KPS	L2C	-158.5	BPSK(1)

Table 4. Minimum received power and waveform modulation method for signals in the L5 band.

System	Signal	Minimum received Power (dBW)	Waveform
GPS	L5	-154.0	QPSK(10)
Galileo	E5a	-155.0	QPSK(10)
BeiDou	B2a	-155.5	QPSK(10)
QZSS	L5	-154.0	QPSK(10)
SBAS	L5	-157.0	BPSK(10)
KPS	L5	-154.0	QPSK(10)

ICD 2010, Galileo ICD 2014, IS-QZSS 2018). Tables 2–4에서 제시된 최소 수신 전력은 항법위성이 5°의 상승 고도각을 가질 때 0 dBi의 전력 이득을 갖는 우측원형편파(Right Hand Circular Polarization, RHCP) 수신 안테나로 측정된 결과이다 (BeiDou ICD-BIC 2017, BeiDou ICD-B2a 2017). GPS L1C는 BOCsin(1,1) 변조가 적용된 데이터 성분(L1CD)과 BOCsin(1,1) 변조 코드와 BOCsin(6,1) 변조 코드를 통한 Time Multiplexed BOC (TMBOC) 변조가 적용된 파일럿 성분(L1CP)로 구성된다 (IS-GPS-800E 2018). L2C는 0.5115 Mcps의 칩 율을 갖는 L2 Civil Moderate (L2CM)와 L2 Civil Long (L2CL) 코드가 시분할 방식으로 구성되며 두 코드를 합친 L2C는 1.023 Mcps의 칩 율을 가지며 BPSK(1) 변조가 적용되어 L2 반송파에 실려 전송된다 (IS-GPS-200L 2020). L5는 10.23 Mcps의 칩 율을 갖는 데이터 성분(L5I)과 파일럿 성분(L5Q)이 BPSK(10) 변조 방식으로 L5 반송파에 실려 전송된다 (IS-GPS-705G 2020). QZSS L1C, L2C, L5는 GPS의 L1C, L2C, L5의 특성 및 구조가 일치하도록 설계하고 운용한다 (Sakai et al. 2008). Tables 2–4에서 제시한 우리나라의 KPS 신호 역시 QZSS와 유사한 방식으로 설계되어 구축될 예정이기 때문에 GPS 신호의 특징 및 구조를 따르는 것으로 가정한다.

2.2 Spectral Separation Coefficient Between the Signals

GPS기준 신호에 더해지는 간섭 신호의 전력은 동일 대역에서 전송되는 GPS 기준 신호와 간섭 신호에 적용된 파형 변조 방식의 조합에 따라 다르게 계산된다. SSC는 동일 대역을 공유하는 간섭 신호에 의해 기준 신호가 겪는 간섭 신호 전력을 계산하기 위한 유용한 척도이며 Eq. (1)과 같다 (Betz & Titus 2004).

$$K_{ls} = \int_{-\beta_y/2}^{\beta_y/2} G_l(f)G_s(f) df \quad (1)$$

여기서 K_{ls} 는 기준 신호와 간섭 신호 사이의 평균 SSC이며 정규화된 간섭 신호 전력 스펙트럼 밀도 $G_l(f)$ 와 기준 신호 전력 스펙트럼 밀도 $G_s(f)$ 의 상관연산으로 계산된다. 여기서 β_y 는 수신기 정합필터의 대역제한 주파수를 의미한다. Eq. (1)에서 제시한 SSC는 주어진 β_y 에 대해 기준 신호와 간섭 신호에 적용된 파형 변조 방식의 조합에 따라 상이한 값을 갖는다. Tables 2–4에서 정리된 결과로부터 L1, L2, L5 대역에서 전송되는 위성항법 신호들의 파형 변조 방식은 BPSK(1), BPSK(10), Multiplexed BOC (MBOC)이 있으며 Eq. (1)을 통하여 계산된 이들 사이의 SSC를 Table 5에서 정리해서 보이고 있다 (Sekar, Sengupta, & Bandyopadhyay 2012). Table 5에 정리된 결과로부터 BPSK(1)을 기준으로 BPSK(1), BPSK(10), MBOC 사이의 SSC는 각각 -61.86 dB-Hz, -70.25 dB-Hz, -68.28 dB-Hz로서 SSC는 동일한 파형 변조 방식 사이인 경우에 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 L1 대역에서 위성항법 신호를 전송하는 항법위성의 개수와 위성항법 신호에 요구되는 최소 수신 전력이 동일한 환경에서는 GPS C/A에 더해지는 간섭의 영향은 GPS C/A와 동일한 파형 변조 방식인 BPSK(1)이 적용된 QZSS C/A인 경우에 가장 크게 나타남을 의미한다.

Table 5. Spectral separation coefficient between the waveform modulation method.

Waveform	SSC (dB-Hz)		
	BPSK(1)	BPSK(10)	MBOC
BPSK(1)	-61.86	-70.25	-68.28
BPSK(10)	-70.25	-71.87	-70.86
MBOC	-68.28	-70.86	-65.66

이와 같은 과정을 적용하여 L1 대역의 GPS C/A에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도를 계산한다. 이상에서 서술한 과정을 적용하여 L1 대역의 GPS C/A에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도의 계산 과정을 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

2.3 Estimation of the Interference Power Density on GPS Signals

항법위성에서 전송되는 신호는 상호상관 전력이 최소화된 서로 다른 의사잡음코드가 대역확산코드로 할당되기 때문에 신호가 수신되는 모든 시간 구간에서 평균이 0이고 서로 간의 독립성을 가지는 랜덤 변수로 간주할 수 있다. 서로 간의 독립성을 가지는 랜덤 변수들의 총 분산은 각각의 랜덤 변수가 가지는 분산의 합이며 평균이 0인 랜덤 변수의 분산은 신호의 전력을 의미한다 (Miller & Childers 2004). 따라서 동일 대역에서 동일한 파형 변조 방식이 적용된 간섭 신호의 수신 전력은 개별 간섭 신호들의 수신 전력의 합으로 계산할 수 있다.

항법위성용 주파수 대역에서 기준 신호에 더해지는 간섭 신호의 전력 밀도의 추정 과정은 다음과 같다. 개별 간섭 신호에 요구되는 최소 수신 전력을 해당 간섭 신호를 전송하고 있는 항법위성의 개수만큼 더하여 수신 전력을 계산하고 계산된 수신 전력과 기준 신호와 간섭 신호에 적용된 파형 변조 방식 사이의 SSC를 곱하여 개별 간섭 신호의 전력 밀도를 계산한다. 이와 같은 과정을 동일 대역에서 전송되는 모든 간섭 신호에 대하여 수행하고 모든 개별 간섭 신호의 전력 밀도를 합산하여 기준 신호에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도를 계산한다. 이상에서 서술한 과정을 적용하여 L1 대역의 GPS C/A에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도의 계산 과정을 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{CA} = 10\log_{10}(P_{B1CA}) \cdot SSC_{B1B1} + 10\log_{10}(P_{B10CA}) \cdot SSC_{B10B1} + 10\log_{10}(P_{MCA}) \cdot SSC_{MB1} \quad (2)$$

여기서 SSC_{B1B1} , SSC_{B10B1} , SSC_{MB1} 는 각각 Table 5에 정리된 BPSK(1), BPSK(10), MBOC과 BPSK(1) 사이의 SSC이며 dB-Hz의 단위를 갖는다. P_{B1CA} , P_{B10CA} , P_{MCA} 는 각각 L1 대역에서 BPSK(1), BPSK(10), MBOC이 적용된 간섭 신호의 수신 전력으로서 W 단위를 가진다. D_{CA} 는 간섭 신호와 기준 신호에 적용된 파형 변조 방식에 해당하는 SSC를 P_{B1CA} , P_{B10CA} , P_{MCA} 에 각각 곱하여 계산된 간섭 신호의 전력 밀도를 모두 더한 결과로서 L1 대역의 GPS C/A에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도이며 dB-Hz 단위를 갖는다. P_{B1CA} , P_{B10CA} , P_{MCA} 는 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_{B1CA} &= N_{GPS,CA}P_{GPS,CA} + N_{QZSS,CA}P_{QZSS,CA} + N_{QZSS,SAIF}P_{QZSS,SAIF} + N_{SBAS,CA}P_{SBAS,CA} \\ P_{B10CA} &= N_{GPS,PY}P_{GPS,PY} \\ P_{MCA} &= N_{GPS,L1C}P_{GPS,L1C} + N_{Galileo,E10S}P_{Galileo,E10S} + N_{Beidou,B1C}P_{Beidou,B1C} \\ &\quad + N_{QZSS,L1C}P_{QZSS,L1C} + N_{KPS,L1C}P_{KPS,L1C} + N_{KPS,MLS}P_{KPS,MLS} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $N_{x,y}$ 는 L1 대역에서 GPS C/A에 더해지는 간섭 신호 y를 전송하는 위성항법시스템 x의 항법위성 중 한반도 상공에서 관측되는 가시위성의 개수이다. $P_{x,y}$ 는 Table 2에서 제시된 위성항법시스템 x에서 전송하는 간섭 신호 y에 요구되는 최소 수신 전력을 W 단위로 환산한 값이다. 다만 Eq. (3)의 P_{MCA} 는 L1 대역에서 KPS LIC, MLS가 추가 전송되는 경우에 대해서 계산된 간섭 신호의 수신 전력이며 KPS 도입 이전의 기존 MBOC이 적용된 간섭 신호만의 수신 전력을 계산하기 위하여는 $N_{KPS,L1C}$, $N_{KPS,MLS}$, $P_{KPS,L1C}$, $P_{KPS,MLS}$ 의 영향은 무시되어야 한다.

GPS LIC인 경우 간섭 신호의 총 전력 밀도는 Eq. (4)으로, L1 대역에서 동일한 파형 변조 방식이 적용된 간섭 신호들의 수신 전력은 GPS C/A인 경우와 마찬가지로 Eq. (5)과 같이 계산된다.

$$D_{L1C} = 10\log_{10}(P_{B1L1C}) \cdot SSC_{B1M} + 10\log_{10}(P_{B10L1C}) \cdot SSC_{B10M} + 10\log_{10}(P_{ML1C}) \cdot SSC_{MM} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{B1L1C} &= P_{B1CA} \\ P_{B10L1C} &= P_{B10CA} \\ P_{ML1C} &= P_{MCA} \end{aligned} \quad (5)$$

Eq. (4)의 SSC_{B1M} , SSC_{B10M} , SSC_{MM} 은 각각 Table 5에서 정리된 BPSK(1), BPSK(10), MBOC과 MBOC 사이의 SSC이다. Eq. (5)의 P_{B1L1C} , P_{B10L1C} , P_{ML1C} 는 각각 L1 대역에서 BPSK(1), BPSK(10), MBOC이 적용된 간섭 신호의 수신 전력이며 LIC가 C/A와 동일한 대역에서 전송되기 때문에 같은 계산과정을 따른다. LIC도 C/A인 경우와 마찬가지로 KPS 도입 이전의 기존 MBOC이 적용된 간섭 신호만의 수신 전력을 계산하기 위하여는 $N_{KPS,L1C}$, $N_{KPS,MLS}$, $P_{KPS,L1C}$, $P_{KPS,MLS}$ 의 영향은 무시되어야 한다.

L2 대역의 GPS L2C에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도의 계산 과정은 Eq. (6)으로, 동일한 파형 변조 방식이 적용된 간섭 신호들의 수신 전력은 Eq. (7)과 같다.

$$D_{L2C} = 10\log_{10}(P_{B1L2C}) \cdot SSC_{B1B1} + 10\log_{10}(P_{B10L2C}) \cdot SSC_{B10B1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{B1L2C} &= N_{GPS,L2C}P_{GPS,L2C} + N_{QZSS,L2C}P_{QZSS,L2C} + N_{KPS,L2C}P_{KPS,L2C} \\ P_{B10L2C} &= N_{GPS,PY}P_{GPS,PY} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 P_{B1L2C} , P_{B10L2C} 는 각각 L2 대역에서 BPSK(1), BPSK(10)이 적용된 간섭 신호의 수신 전력이다. 여기서 P_{B1L2C} 는 KPS L2C의 수신 전력에 의한 영향이 포함되어 있기 때문에 KPS 도입 이전의 기존 BPSK(1)이 적용된 간섭 신호만의 수신 전력을 계산하기 위하여는 $N_{KPS,L2C}$, $P_{KPS,L2C}$ 의 영향은 무시되어야 한다.

L5 대역의 GPS L5에 더해지는 간섭 신호의 총 전력 밀도의 계산 과정은 Eq. (8)으로, 동일한 파형 변조 방식이 적용된 간섭 신호들의 수신 전력을 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{L5} = 10\log_{10}(P_{B10L5}) \cdot SSC_{B10B10} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_{B10L5} &= N_{GPS,L5}P_{GPS,L5} + N_{Galileo,E5a}P_{Galileo,E5a} + N_{Beidou,B2a}P_{Beidou,B2a} \\ &\quad + N_{QZSS,L5}P_{QZSS,L5} + N_{SBAS,L5}P_{SBAS,L5} + N_{KPS,L5}P_{KPS,L5} \end{aligned} \quad (9)$$

Eq. (8)의 SSC_{B10B10} 는 Table 5에서 정리된 BPSK(10)과 BPSK(10) 사이의 SSC이며 P_{B10L5} 는 L5 대역에서 BPSK(10)이 적용된 간섭 신호의 수신 전력이다. Table 4에서 정리한 결과에 따르면 SBAS L5를 제외한 신호들은 데이터 성분과 파일럿 성분이 QPSK(10) 방식으로 L5 반송파에 실려 전송되지만 단일 성분 기준으로는 BPSK(10) 방식이 적용된 것으로 간주할 수 있다. Eq. (9)의 P_{B10L5} 는 KPS L5의 수신 전력에 의한 영향이 포함되어 있기 때문에 KPS 도입 이전의 기존 BPSK(10)이 적용된 간섭 신호만의 수신 전력을 계산하기 위하여는 $N_{KPS,L5}$, $P_{KPS,L5}$ 의 영향은 무시되어야 한다.

3. ESTIMATION RESULTS OF INTERFERENCE POWER DENSITY

항법위성용 주파수 동일 대역에서 KPS 신호의 추가 전송으로 인한 GPS 신호가 겪는 간섭 영향의 증대 수준을 분석하기 위하여 KPS 도입 전후의 GPS 신호가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도를 추정하고 비교하였다. 간섭 신호의 전력 밀도의 추정은 GPS C/A, LIC, L2C, L5를 대상으로 수행하였으며 KPS 도입으로 인한 추가 전송 신호는 KPS LIC, MLS, L2C, L5으로 가정하였다. 증대 수준의 분석은 Eqs. (2,4,6,8)에서 제시한 D_{CA} , D_{LIC} , D_{L2C} , D_{L5} 를 KPS 신호의 추가 전송 전후에 대하여 각각 계산하고 이를 기반으로 도출된 간섭 및 잡음 전력 밀도를 비교하는 것으로 수행하였다. 간섭 및 잡음 전력 밀도는 Eq. (10)으로 도출하였다.

$$D_{I+N} = 10\log_{10}(P_I + P_N) \quad (10)$$

여기서 P_I 은 D_{CA} , D_{LIC} , D_{L2C} , D_{L5} 를 W-Hz 단위로 환산한 단위 주파수당 간섭 신호의 전력이며 P_N 은 수신기 입력단에서의 열잡음 전력 밀도를 -204 dBW-Hz로 가정하였을 때 얻어지는 단위 주파수당 잡음 전력으로서 P_I 와 마찬가지로 W-Hz 단위를 가진다. 간섭 신호의 전력 밀도의 추정을 수행하기 위한 파라미터로서 Eqs. (2,4,6,8)의 SSC를 Table 6과 같이 설정하였으며 Eqs. (3,5,7,9)의

Table 6. Parameter for Estimation.

Parameter	SSC (dB-Hz)
SSC_{B1B1}	-61.86
SSC_{B10B1}	-70.25
SSC_{MB1}	-68.28
SSC_{B1M}	-68.28
SSC_{B10M}	-70.86
SSC_{MM}	-65.66
SSC_{B10B10}	-71.87

Table 7. Signal transmission environment over Korean peninsular causing interference with C/A and L1C.

System (x)	Signal (y)	C/A		L1C	
		N_{xy}	$P_{xy}(aW)$	N_{xy}	$P_{xy}(aW)$
GPS	C/A	11	141.25	12	141.25
QZSS	C/A	7	141.25	7	141.25
QZSS	SAIF	7	79.43	7	79.43
SBAS	C/A	4	79.43	4	79.43
GPS	P(Y)	12	70.79	12	70.79
GPS	L1C	12	199.53	11	199.53
Galileo	E1OS	15	199.53	15	199.53
BeiDou	B1C	18	125.89	18	125.89
QZSS	L1C	7	199.53	7	199.53
KPS	L1C	7	199.53	7	199.53
KPS	MLS	7	199.53	7	199.53

Table 8. Signal transmission environment over Korean peninsular causing interference with L2C.

System (x)	Signal (y)	L2C	
		N_{xy}	$P_{xy}(aW)$
GPS	L2C	11	141.25
QZSS	L2C	7	141.25
KPS	L2C	7	141.25
GPS	P(Y)	12	70.79

Table 9. Signal transmission environment over Korean peninsular causing interference with L5.

System (x)	Signal (y)	L5	
		N_{xy}	$P_{xy}(aW)$
GPS	L5	11	141.25
Galileo	E5a	15	316.23
BeiDou	B2a	18	281.84
QZSS	L5	7	398.11
SBAS	L5	4	199.53
KPS	L5	7	398.11

한반도 상공에서 관측되는 가시위성의 개수와 간섭 신호에 요구되는 최소 수신 전력을 Tables 7-9으로 설정하였다. Table 1에서 정의한 한반도 상공에서의 GPS 가시위성 12기 중 가시위성 한 기는 GPS C/A, L1C, L2C, L5를 기준 신호로 전송하고 있기 때문에 Tables 7-9의 GPS 가시위성의 개수를 11으로 설정하였으며 P_{xy} 는 Table 2에서 제시한 dBW 단위의 최소 수신 전력을 $aW(10^{-18}W)$ 단위로 환산하였다.

Table 10은 위에서 설정한 파라미터를 적용하여 KPS 도입 전후의 GPS 신호가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도를 추정된 결과이다. KPS 도입 이후 GPS C/A, L1C, L2C, L5가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도가 KPS 도입 이전과 비교하여 각각 0.47, 0.97, 1.37, 0.63 dB 만큼 증가하였다. L1 대역에서 추가 전송되는 KPS L1C와

Table 10. Estimated results of interference power density on GPS signals.

Condition	Interference power density (dBW-Hz)			
	C/A	L1C	L2C	L5
Before KPS	-204.38	-205.15	-207.60	-209.37
After KPS	-203.91	-204.18	-206.23	-208.74

Table 11. Estimated results of interference plus noise power density on GPS signals.

Condition	Interference plus noise power density (dBW-Hz)			
	C/A	L1C	L2C	L5
Before KPS	-201.18	-201.53	-202.43	-202.89
After KPS	-200.94	-201.08	-201.96	-202.74

MLS에 적용된 파형 변조 방식은 MBOC으로서 GPS L1C와 동일하기 때문에 GPS L1C가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도 증대 수준이 GPS C/A인 경우보다 크게 나타남을 확인할 수 있다. L2 대역에서 추가 전송되는 KPS 신호의 개수는 L1 대역인 경우보다 적음에도 불구하고 GPS L2C가 겪는 간섭 신호의 전력 밀도 증대 수준이 가장 크게 나타나는 이유는 KPS L2C와 GPS L2C에 적용된 파형 변조 방식 사이의 SSC가 Table 6에서 정리한 것과 같이 -61.86 dB-Hz로서 가장 큰 값을 갖기 때문으로 해석할 수 있다. Table 11은 Eq. (10)으로 도출된 KPS 도입 전후 GPS 신호를 수신할 때 측정되는 간섭 및 잡음 전력 밀도를 정리해서 보이고 있다. Table 11에서 정리된 결과로부터 간섭 및 잡음 전력 밀도의 추정값과 열잡음 전력 밀도의 차이가 KPS 도입 전후에 대하여 모두 L1 C/A의 경우에 최대로 나타나며 각각 2.82 dB, 3.06 dB임을 확인하였다. 이는 0.24 dB의 차이로서 미약한 수준임을 알 수 있다 (Inside GNSS 2012).

4. CONCLUSIONS

항법위성용 주파수 대역에서 KPS 신호의 추가 전송으로 인한 GPS 신호가 겪는 간섭 영향의 증대 수준을 분석하기 위하여 한반도 상공에서의 위성항법 신호의 수신 환경을 가정하고 간섭 신호의 전력 밀도 추정 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법을 적용하여 KPS 도입 전후의 간섭 신호의 전력 밀도 추정값을 비교하였다.

간섭 신호의 전력 밀도 추정값 비교를 통해 KPS 도입 이후 GPS 신호가 겪는 간섭 및 잡음 전력 밀도 추정값의 증대 수준이 L1 C/A의 경우 0.24 dB 차이를 보임을 확인하였다. 분석 결과로 볼 때 항법위성용 주파수 동일 대역에서 KPS 신호를 추가 전송한다 하더라도 기존 GPS 신호가 겪는 간섭 영향의 증대 수준이 미약하기 때문에 신호의 획득 및 추적 성능의 열화를 발생시키지 않을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from “Fundamental Research for Korea Satellite Navigation System and Future

Air Traffic Management” of the Korea Aerospace Research Institute funded by the Korea government(MSIT).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Shin, J.H. and Ahn, J.M.; methodology, Shin, J.H. and Ahn, J.M.; software, Shin, J.H.; validation, Lim, D.W. and Joo, J.M.; formal analysis, Lim, D.W. and Joo, J.M.; investigation, Shin, J.H., Lim, D.W. and Joo, J.M.; resources, Lee, S.J., Song, H.Y. and Won, J.H.; data curation, Lee, S.J., Song, H.Y. and Won, J.H.; writing—original draft preparation, Shin, J.H.; writing—review and editing, Ahn, J.M.; visualization, Shin, J.H., Lim, D.W. and Joo, J.M.; supervision, Ahn, J.M.; project administration, Ahn, J.M.; funding acquisition, Ahn, J.M.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Betz, J. W. 1999, The offset carrier modulation for GPS modernization, Proceedings of the 1999 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, Jan 1999, pp.639-648.
- Betz, J. W. & Titus, B. M. 2004, Intersystem and intrasystem interference with signal imperfections, in 2004 Position Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, 26-29 April 2004
- BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document, Open service signal B1C, China Satellite Navigation Office, BDS-SIS-ICD-B1C-1.0, Dec 2017
- BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document, Open service signal B2a, China Satellite Navigation Office, BDS-SIS-ICD-B2a-1.0, Dec 2017
- Inside GNSS, Multiple GNSS: compatibility and interoperability [Internet], cited 2012 Apr 3, available from: <https://insidegnss.com/multiple-gnss-compatibility-interoperability>
- Interface specification document, Navstar GPS space segment/user segment interface, IS-GPS-200L, May 2020
- Interface specification document, Navstar GPS space segment/user segment L1C interface, IS-GPS-800E, Apr

- 2018
- Interface specification document, Navstar GPS space segment/user segment L5 interface, IS-GPS-705G, May 2020
- Joo, J. M. & Heo, M. B. 2020, Feasibility study on Korea Positioning System, Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, Yong Pyong, Korea, 5-7 Feb 2020
- Miller, S. L. & Childers, D. G. 2004, Probability and Random Processes (Burlington: Elsevier Academic Press)
- Sakai, T., Fukushima, S., Takeichi, N., & Ito, K. 2008, Implementation of the QZSS L1-SAIF message generator, Electronic Navigation Research Institute, Japan, Jan 2008
- Sekar, S. B., Sengupta, S., & Bandyopadhyay, K. 2012, Spectral compatibility of BOC(5,2) modulation with existing GNSS signals, Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium, Myrtle Beach, SC, 23-26 April 2012. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236831>
- Signal in space interface control document, European GNSS(Galileo) open service, OS SIS ICD issue 1.1, Sep 2010
- Signal in space interface control document, European GNSS(Galileo) open service, OS SIS ICD issue 1.2, Sep 2014
- Quasi-Zenith Satellite System interface specification, Satellite positioning navigation and timing service, Cabinet Office, IS-QZSS-PNT-003, Nov 2018
- Wu, C. & He, C. 2011, Interference Analysis among Modernized GNSS, in 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), 21-23 Oct 2011, pp.669-673. <https://doi.org/10.1109/ICCP.2011.6089765>
- Yao, Z. & Lu, M. 2017, Signal multiplexing techniques for GNSS: The principle, progress, and challenges with a uniform framework, IEEE Signal Processing Magazine, 34, 16-26. <https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2713882>



Jang Hwan Shin received the Bachelor’s degree in Radio Science and Information Communication Engineering from Chungnam National University in 2019. His research interests include satellite navigation and GNSS signal processing



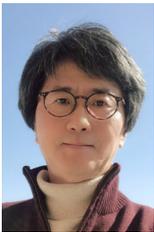
Deok-Won Lim received the Doctor's degree in Electronics Engineering from Chungnam National University in 2011. He is now working in Korea Aerospace Research Institute. His research interests include GNSS receiver design and anti-jamming technologies.

Generation mobile communication and Radio Resource management.



Jung-Min Joo received the Doctor's degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 2015. He has been working at the Korea Aerospace Research Institute since 2004. His research interests include GNSS, SBAS, GBAS, and Ionosphere

monitoring.



Sang Jeong Lee received the Doctor's degree in Control and Measurement from Seoul National University in 1987. He is currently a Professor in the Department of Electronics Engineering at Chungnam National University, Daejeon, Korea. His research interests include GNSS and Robust Control.



Hong-Yeop Song received the Doctor's degree in EE. System from University of Southern California in 1991. He is currently a Professor in the Department of Electrical and Electronic Engineering at Yonsei University, Seoul, Korea. His research interests include Communication Engineering and Informa-

tion Theory.



Jong-Hoon Won received the Doctor's degree in Control Engineering from Ajou University in 2005. He is currently a Professor in the Department of Electrical Engineering at Inha University, Incheon, Korea. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target

tracking systems and self-driving cars.



Jae Min Ahn received the Doctor's degree in Electrical and Electronic from KAIST in 1994. He is currently a Professor in the Department of Radio Science and Information Communication Engineering at Chungnam National University, Daejeon, Korea. His research interests include Physical session of Next-

