

Analysis of Jamming Robustness Performance According to RNSS Signal Waveforms

Subin Lee¹, Kahee Han², Jong-Hoon Won^{1†}

¹Autonomous Navigation Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Satellite Navigation Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 34129, Korea

ABSTRACT

As the importance and dependency of the positioning, navigation, and timing (PNT) information provided by the radio navigation satellite service (RNSS) increases, the vulnerability of RNSS to jamming can lead to significant risks. The signal design under the consideration of anti-jamming performance helps to provide service which is robust to jamming environment. Therefore, it is necessary to evaluate the jamming robustness performance during the design of new signals. In this paper, we introduce figures-of-merit (FoMs) that can be used for an anti-jamming performance analysis of designed signals of interest. We then calculate the FoMs, such as the quality factor (Q factor), tolerable jamming-to-signal ratio (tolerable J/S), and range to jammer (d) for legacy RNSS signals and analyze the results. Finally, based on the results of the analysis, we derive waveform design conditions to obtain good anti-jamming performance. As a result, this paper shows that the waveforms with wide bandwidth leading to good spectral efficiency provide strong anti-jamming performance.

Keywords: RNSS, jamming, performance analysis, signal design

1. 서론

위성 기반 항법 시스템이 제공하는 positioning, navigation, and timing (PNT) 정보는 다양한 분야에서 사용됨에 따라 중요도와 의존도가 증가하고 있으며, 국가 인프라의 핵심 요소로서 미래 기술에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 이러한 위성 기반 항법 서비스는 고도 20,000 km 이상의 상공을 선회하는 위성으로부터 수신되는 신호를 이용하기 때문에, 지상에서 수신되는 신호의 전력이 약 -160 dBW 이하로 매우 미약하고, 이에 따라 radio frequency interference (RFI)로 인한 잠재적 위험에 취약하다는 특성을 갖는다 (Pinker & Smith 1999). RFI는 radio navigation satellite service (RNSS) 수신기의 신호 획득 및 추적 과정을 방해하여 PNT 정보를 기반으로 하는 서비스에 영향을 미

치며, 생명 안전 및 금융 등과 관련된 어플리케이션에 위험한 장애를 초래할 수 있다. 따라서 현대화 및 새로운 신호의 설계를 수행할 때 RFI에 대한 견고성 성능을 평가할 필요가 있다.

RFI는 비의도적 또는 의도적 간섭원으로 구분될 수 있다. 여기서, 의도적인 간섭원은 일반적으로 재밍 (jamming)과 스푸핑 (spoofing)의 2가지 유형으로 분류된다. 이 중 재밍은 스푸핑과 달리 간단한 신호 유형을 사용하여 RNSS 수신기를 무력화한다. Personal privacy device (PPD) 장치를 이용한 재밍 발생이 일반적이며, 대부분의 국가에서 PPD의 사용이 금지되어 있으나 쉽게 구할 수 있다는 점에서 RNSS 신호에 대한 주요 위협으로 간주된다 (Intertanko 2019). 실제 2013년 미국의 Newark 공항에서는 공항 내 지상 기반 증강 시스템 (ground-based augmentation system, GBAS)이 마비된 사례가 보고된 적이 있다. 일부 트럭 운전사가 사생활 보호를 위해 불법적으로 PPD를 사용하여 재밍 신호를 방출했기 때문이다 (Pullen & Gao 2012). 이처럼 재밍의 목적이 고의적인 공격이 아닌 개인적인 이유라 하더라도 부수적인 피해가 발생할 수 있다.

RNSS 신호 설계 단계에서 후보 신호에 대한 항재밍 성능을 평가하는 것은 재밍 공격을 방어할 수 있는 방식 중 하나이며, 재밍 저항 품질 인자, 용인 가능한 재밍 신호 전력비 및 유효 재머 범위

Received Jun 26, 2023 Revised Jul 07, 2023 Accepted Jul 10, 2023

†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>

의 성능지표 (figures-of-merit, FoMs)는 RNSS 신호의 항재밍 성능을 해석적으로 평가하는데 널리 사용된다 (Ward et al. 2017). 이와 관련된 초기 연구 (Lee et al. 2022)에서는 L6 대역에서의 새로운 RNSS 신호를 설계하기 위해 다양한 후보 신호를 선정하고, 선정된 후보 신호에 대한 항재밍 성능을 평가하였다. 그러나 초기 연구에서 사용된 재밍 저항 품질 인자는 신호의 대역폭에 대한 영향을 반영하지 못한다는 한계가 있다. Han et al. (2022)에서는 이러한 문제를 인식하고 재밍 저항 품질 인자를 재 정의하였으며 RNSS 시스템의 보안 서비스 신호에 대한 평가를 수행하였다. 단, 재밍 저항 품질 인자만을 통해 항재밍 성능 평가를 수행했다는 한계가 있다.

따라서, 본 논문은 선행 연구 확장을 위해 신호 처리 단계에 따른 재밍 저항 품질 인자, 용인 가능한 재밍 신호 전력비, 유효 재밍 범위의 FoMs를 통해 RNSS 신호의 전송파형에 따른 항재밍 성능 평가를 수행하고 평가 결과를 기반으로 하여 재밍에 견고한 성능을 갖기 위한 전송파형 설계 조건을 도출하는 것을 목적으로 한다. 이와 더불어, 기존의 재밍 저항 품질 인자의 한계에 대해서 숙하기 위해 일부 전송파형에 대한 기존의 재밍 저항 품질인자와 재 정의된 재밍 저항 품질 인자를 통한 평가 결과를 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 평가에서 고려되는 RNSS 신호와 재밍 신호의 전송파형에 대해 정리하고, 3장에서는 항재밍 성능 분석을 위한 FoMs에 대해 소개한다. 4장에서는 2장에서 소개한 RNSS 신호에 대한 항재밍 성능을 평가하고 이에 대해 분석한다. 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. RNSS 및 재밍 신호의 전송파형

2.1 RNSS 신호의 전송파형

미국의 global positioning system (GPS)를 필두로 하여, 여러 우주 강국들이 전 세계 또는 특정 지역을 범위로 RNSS를 제공하고 있다. 이러한 위성항법시스템의 신호 $x(t)$ 는 반송파, 항법메시지 및 확산 전송파형으로 구성되며, Eq. (1)과 같이 간소화하여 모델링 될 수 있다.

$$x(t) = \sqrt{2Pd(t)}s(t) \cos(2\pi f_{carr}t + \theta_c), \quad (1)$$

여기서 P 는 항법신호의 수신 전력, $d(t)$ 는 항법메시지, $s(t)$ 는 확산 전송파형, f_{carr} 와 θ_c 는 각각 반송파의 주파수와 위상을 의미한다.

이 중, 확산 전송파형은 신호의 power spectral density (PSD)의 형상을 결정하는 주요 신호 설계 요소로써, 코드 칩 속도, 부 반송파 주파수 및 변조 기법에 의해 결정된다. Table 1은 항재밍 성능 계산을 위해 본 논문에서 고려한 전송파형을 시스템 및 신호와 함께 나열하며, Fig. 1은 Table 1에 나열된 전송파형의 PSD를 보여준다. 단, 현재 운용 중이거나 계획된 RNSS 신호들은 대부분 code division multiple access (CDMA) 방식을 사용하고 있으므로, frequency division multiple access (FDMA)를 사용하는 GLONASS의 일부 신호는 본 논문의 평가에서 고려하지 않는다.

Table 1. Waveform of RNSS signals considered in study.

Waveform	System & Signal
BPSK(1)	GPS: L1 C/A, L2C GLONASS: L1OC (data), L2OC (data) QZSS: L1 C/A, L1S, L2C NavIC: L5 SPS, S SPS
BPSK(2)	BDS: B1, B2I
BPSK(5)	Galileo: E6 QZSS: L6
BPSK(10)	GPS: L1 P(Y), L2 P(Y), L5 GLONASS: L3OC, L5OCM Galileo: E5a, E5b BDS: B2Q, B2a, B2b, B3, B3A QZSS: L5, L5S
BOC _s (1,1)	GLONASS: L1OC (pilot), L1OCM, L2OC (pilot) QZSS: L1 C/B
MBOC(6,1,1/11)	GPS: L1C Galileo: E1OS BDS: B1C QZSS: L1C NavIC: L1 SPS
BOC _s (5,2)	NavIC: L5 RS, S RS
BOC _s (5,2,5)	GLONASS: L1SC, L2SC
BOC _s (10,5)	GPS: LIM, L2M
BOC _c (10,5)	Galileo: E6PRS
BOC _s (14,2)	BDS: B1A
BOC _c (15,2,5)	Galileo: E1PRS

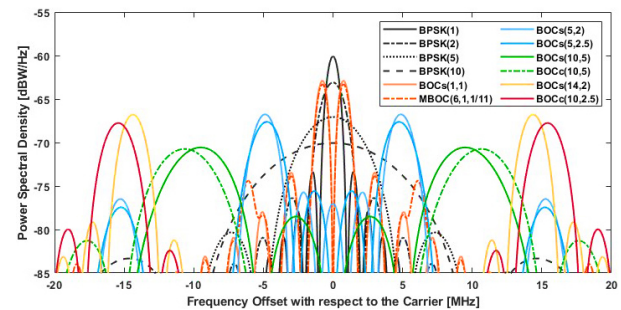


Fig. 1. PSD of the RNSS waveforms considered in study.

2.2 재밍 신호의 전송파형

재밍 신호는 연속 파형 간섭 (continuous wave interference, CWI), 정합 스펙트럼 간섭 (matched spectrum interference, MSI), chirp 간섭 (chirp interference) 및 대역제한 백색잡음 간섭 (band-limited white noise interference, BLWI)의 4가지 유형으로 구분될 수 있다. 각 신호는 주파수 특성 및 수신기에 미치는 영향이 상이하다. Table 2는 대표적인 4가지 유형의 재밍 신호의 모델링 식을 나열하였다.

CWI는 순수 정현파로써 표현될 수 있는 모든 협대역 신호를 포함하며, 의도적인 재밍이나 가까운 대역의 변조되지 않는 송신기 반송파 및 개인 전자 장치로부터 발생할 수 있다 (Ward et al. 2017). 이러한 형태의 간섭은 RNSS 신호에서 pseudo random noise (PRN) 코드로 인해 생기는 spectral line에 더해지면서 RNSS 신호 처리 과정을 교란시키지만 수신기 입력단에서의 필터를 통해 쉽게 대응이 가능하다는 특성을 가진다 (Ye et al. 2017). Fig. 2는 CWI의 정규화된 PSD를 보여주며, 선 스펙트럼의 형태를 띠는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. The model of 4 types of jamming signal.

Type	Equations
Continuous wave interference (CWI)	$J_{CWI}(t) = \sqrt{2P_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$
Matched spectrum interference (MSI)	$J_{MSI}(t) = \sqrt{2P_i} s_i(t) \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$
Chirp interference	$J_{Chirp}(t) = \sqrt{2P_i} \sin\left[2\pi\left(f_0 + \frac{k}{2}t\right)t\right], t = 0 \leq t \leq T_{sw}$
Band-limited white noise interference (BLWI)	$J_{BLWI}(t) = n(t) \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$

where, P_i is power of the interference signal, f_i is interference frequency, θ_i is the phase, $s_i(t)$ is the MSI spreading code, f_0 is the starting frequency, k is the chip rate, T_{sw} is the sweep time, $n(t)$ is the Gaussian white noise with mean value zero and variance σ^2 .

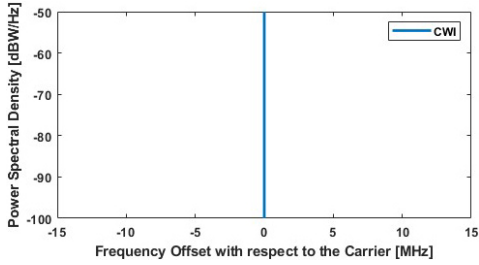


Fig. 2. PSD of the CWI signal.

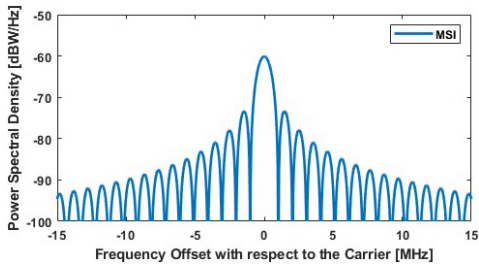


Fig. 3. PSD of the MSI signal (BPSK(1)).

MSI는 수신기 작동 방해에 위해 RNSS 신호와 동일한 반송파 및 동일한 확산 전송파형을 갖는 신호를 말한다 (Ward et al. 2017). 이러한 형태의 간섭은 RNSS 신호와 동일한 확산 코드를 사용하기 때문에 수신기의 상관기 효율을 떨어뜨려 신호 처리 과정을 교란시키며, 효율적인 항재밍 수신기 시스템 구현이 어렵다는 특성을 가진다 (Chen 2014). Fig. 3은 RNSS 신호의 전송파형이 binary phase shift keying (BPSK)(1)일 때, MSI의 정규화된 PSD를 보여준다.

Chirp 신호는 시변 주파수 변조를 동반한 연속 파형 신호로서 기술적으로 구현이 쉽고 재밍 특성이 좋기 때문에 차량 내 재머와 같은 저가 전파교란장치에 주로 이용된다. Fig. 4는 chirp 신호의 k 가 50 MHz/ms, T_{sw} 가 0.1 ms일 때, 시간-주파수 특성과 정규화된 PSD를 보여준다. Fig. 4a는 2주기의 T_{sw} 동안 변화하는 주파수를 보여주며, Fig. 4b는 1주기의 T_{sw} 동안 chirp 간섭의 정규화된 PSD를 보여준다.

BLWI는 RNSS 신호 대역 내에서 일정한 전력 분포를 갖는 간섭을 의미한다. 주로 전자 통신 시스템으로부터 생성되는 서비스 신호에 의해 유발된다. BLWI는 잡음 신호가 특정 반송파 대역에 변조된 형태로 모델링 될 수 있으며, 대역이 제한된 일정 스펙트럼을 갖는 가우시안 잡음과 같다. Fig. 5는 대역폭이 10.23 MHz일

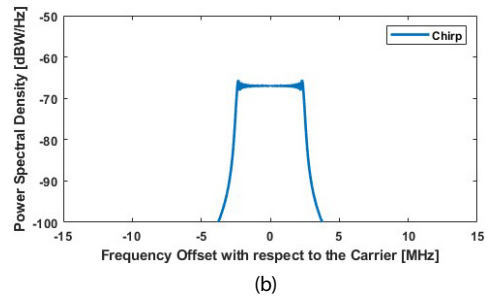
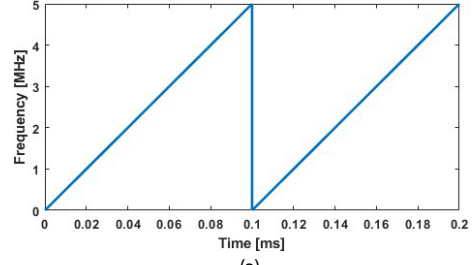


Fig. 4. Chirp signal characteristics ($k = 50$ MHz/ms, $T_{sw} = 0.1$ ms): (a) time-frequency, (b) PSD.

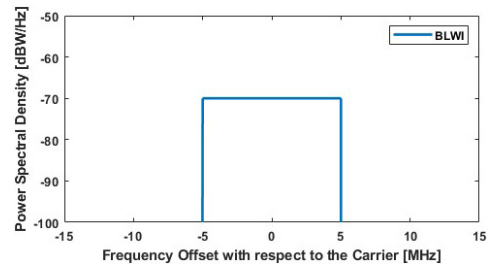


Fig. 5. PSD of the BLWI signal (bandwidth = 10.23 MHz).

때의 정규화된 BLWI의 PSD를 보여준다.

3. 항재밍 성능 평가를 위한 성능지표

3.1 재밍 저항 품질 인자

재밍 저항 품질 인자 (Q factor)는 항법신호의 재밍에 대한 저항 성능을 의미하며, 항법신호와 재밍신호의 주파수 특성을 이용

하여 계산되는 항재밍 성능지수이다. 코드 및 반송파 추적 성능 관점에서 다르게 분석될 수 있으며, 각 관점에서의 유효 반송파 대 잡음 비, $C/N_{0,eff}$ 는 Eqs. (2)와 (3) 같다 (Han 2023).

$$(C/N_{0,eff})_{CarrTrk} = \frac{C_s}{N_0 + \frac{C_l \kappa_{ls}}{\eta}}, \tag{2}$$

with

$$\kappa_{ls} = \int_{-B_r/2}^{B_r/2} G_i(f)G_s(f)df$$

$$\eta = \int_{-B_r/2}^{B_r/2} G_s(f)df$$

$$(C/N_{0,eff})_{CodeTrk} = \frac{C_s}{N_0 + C_l \chi_{ls}}, \tag{3}$$

with

$$\chi_{ls} = \frac{\int_{-B_r/2}^{B_r/2} G_s(f)G_l(f)f^2df}{\int_{-B_r/2}^{B_r/2} G_s(f)f^2df}$$

여기서 $(C/N_{0,eff})_{CarrTrk}$ 와 $(C/N_{0,eff})_{CodeTrk}$ 는 각각 반송파 및 코드 추적 관점에서의 $C/N_{0,eff}$, C_s 는 항법신호의 수신 전력, C_l 는 간섭신호의 수신 전력, N_0 는 잡음 전력 밀도, B_r 는 수신기 대역폭, η 는 스펙트럼 효율, κ_{ls} 는 spectral separation coefficient (SSC), χ_{ls} 는 early-late 상관기 간격이 매우 작다고 가정하였을 때의 코드 추적 SSC (code tracking SSC, CTSSC), $G_i(f)$ 와 $G_s(f)$ 는 각각 Eq. (4)와 같이 송신 대역폭에 의해 정규화된 RNSS 및 간섭 신호의 PSD이다.

$$G(f) = \begin{cases} \int_{-B_t/2}^{B_t/2} S(f)df, & |f| \leq B_t/2 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \tag{4}$$

여기서 B_t 는 신호의 송신 대역폭, $S(f)$ 는 무한대의 대역폭에 의해 정규화된 신호의 PSD이다.

Q factor는 Eqs. (2)와 (3)으로부터 유도될 수 있으며, 반송파 위상 및 코드 추적 관점에서의 Q factor, $Q'_{CarrTrk}$ 와 $Q_{CodeTrk}$ 는 각각 Eqs. (5)와 (6) 같이 정의된다 (Xue et al. 2015, Han 2023).

$$Q'_{CarrTrk} = \frac{\eta}{\kappa_{ls}} \tag{5}$$

$$Q_{CodeTrk} = \frac{1}{\chi_{ls}} \tag{6}$$

두 지수의 역수는 각 신호 처리 단계 관점에서의 $C/N_{0,eff}$ 식의 분모에 작용되는 것을 알 수 있다. 따라서, 각 지수가 클수록 $C/N_{0,eff}$ 의 분자항이 커져 $C/N_{0,eff}$ 값이 커지므로 항재밍 성능이 우수함을 의미한다.

한편, $Q'_{CarrTrk}$ 는 일반적으로 Eq. (7)과 같이 분모를 코드 칩 속도 f_{code} 와 SSC의 곱으로도 정의해 왔으며 (De Bakker 2007, Baek et al. 2012, Ward et al. 2017, van der Merwe et al. 2018), 본 논문에서는 이를 $Q_{CarrTrk}$ 로 표기한다. 하지만, 이를 통한 RNSS 신호의 항재밍 성능 측정은 전송파형의 성능 우위 확인이 어렵다는 한계가 존재한다.

$$Q_{CarrTrk} = \frac{\eta}{f_{code} \kappa_{ls}} \tag{7}$$

예를 들어 Fig. 6은 RNSS 신호의 송수신 대역폭이 충분히 넓다고 가정하였을 때 몇 가지 전송파형의 CWI, MSI, chirp 간섭 및 BLWI 신호에 대한 $Q'_{CarrTrk}$ 와 $Q_{CarrTrk}$ 의 결과를 보여준다. CWI는 RNSS 신호 PSD의 최댓값 지점에 위치, MSI의 대역폭은 RNSS 신호와 동일하다고 가정하였다. Chirp 신호는 RNSS 신호의 PSD의 주엽 내 간섭이 존재한다고 가정하였다. RNSS 신호의 부 반송파 주파수 ($f_{subcarr}$) 및 f_{code} 를 이용하여 표현하면, BPSK 신호의 경우 $2 \times f_{code}$ 의 대역폭 내에서 간섭이 존재하며, binary offset carrier (BOC) 신호의 경우 $f_{subcarr} \pm f_{code}$ 의 대역폭 안에서 간섭이 존재한다. BLWI의 대역폭은 RNSS 신호의 주엽을 포함하는 최소 대역폭으로 설정하였다.

Fig. 6a는 $Q'_{CarrTrk}$ 의 결과를 보여주며, Fig. 6b는 $Q_{CarrTrk}$ 의 결과를 보여준다. 먼저, 항법신호가 BPSK 변조일 때를 살펴보면 Fig. 6a는 전송 파형에 따른 우위를 판단할 수 있지만, Fig. 6b는 CWI, MSI, chirp 간섭 및 BLWI 신호에 대해 각 1, 1.5, 2.2, 2.2의 동일한 결과를 도출하여 성능 우위 판단이 불가능함을 확인할 수 있다. 이와 비슷하게 항법신호가 BOC 변조일 때도 Fig. 6a의 경우 항법신호의 전체적인 대역폭에 의존하여 성능 우위가 결정됨을 확인할 수 있지만, Fig. 6b는 BOC(1,1)과 BOC(2,2)와 같이 대역폭이 다르더라도, 변조의 차수($=2 \times (f_{subcarr}/f_{code})$)가 동일하면 거의 동일한 결과를 도출하여 우위 판단에 어려움이 존재함을 알 수 있다. 이에 따라, 본 논문은 반송파 추적 성능 측면에서의 Q factor 계산 시 Eq. (5)를 통해 RNSS 신호의 항재밍 성능 판단을 수행한다.

3.2 용인 가능한 재밍 신호 전력비

용인 가능한 재밍 신호 전력비, *Tolerable J/S*는 수신기가 정상 동작을 하는 데에 용인 가능한 재밍 신호의 수신 전력과 항법 신호의 수신 전력 간의 비를 의미하며, Eq. (8)과 같이 정의된다 (Ward et al. 2017).

$$Tolerable J/S = G_{SV} - G_J + 10 \log_{10} \left[Q_x \left(10^{-\frac{(C/N_{0,eff})_{minReq}}{10}} - 10^{-\frac{C/N_{0,eff}}{10}} \right) \right], \tag{8}$$

여기서 G_{SV} 는 항법신호를 송출하고 있는 위성을 향한 수신기 안테나 이득, G_J 는 재머를 향한 수신기 안테나 이득, Q_x 는 $Q'_{CarrTrk}$ 또는 $Q_{CodeTrk}$, $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 는 수신기의 안정적인 동작을 위해 요구되는 최소 $C/N_{0,eff}$, $C/N_{0,eff}$ 는 재밍이 존재하지 않을 때의 유효 C/N_0 이다.

*Tolerable J/S*는 Eq. (8)을 통해 알 수 있듯이 Q_x 가 커질수록, $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 와 $C/N_{0,eff}$ 간 차이가 커질수록 그 값이 커지게 된다. 즉, SSC와 CTSSC의 성능이 우수할수록, 수신기가 좋지 않은 수신 환경에서 안정적으로 작동할수록, 수신 환경이 좋을수록 *Tolerable J/S* 값이 커지게 된다. *Tolerable J/S* 값이 크다는 것은 보다 큰 재밍 전력을 용인할 수 있음을 의미하므로 항재밍 성능이 우수함을 의미한다.

한편, 수신기 신호 처리 단계에서 반송파 위상 추적은 간섭에 가장 취약하다. 따라서, Eq. (8)에서 $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 는 일반적으로 안정적인 반송파 추적을 위한 최소 요구 $C/N_{0,eff}$, Q_x 는 $Q'_{CarrTrk}$ 로 설정된다.

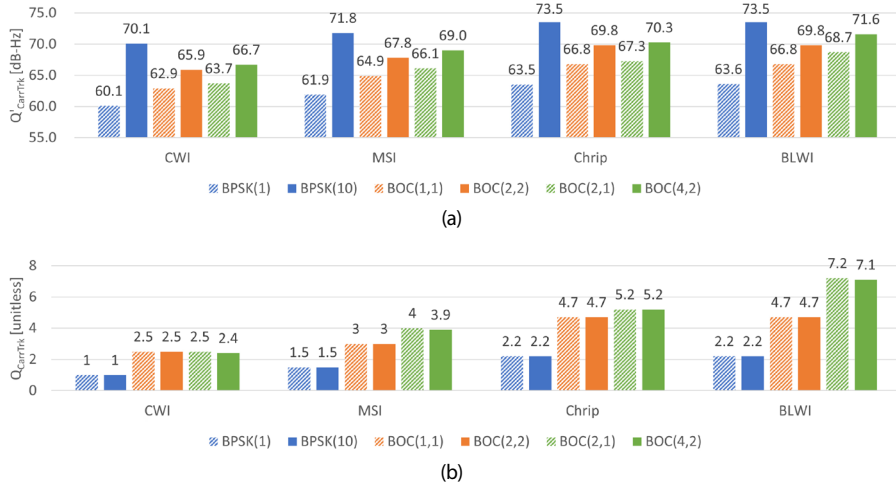


Fig. 6. Performance results according to Q factor definition with respect to carrier tracking: (a) $Q'_{CarrTrk}$, (b) $Q_{CarrTrk}$.

3.3 유효 재머 범위

유효 재머 범위 (range to jammer, d)는 재머가 RNSS 수신기에 간섭의 영향을 미칠 수 있는 범위를 의미하며, Eq. (9)와 같이 정의된다.

$$d = \lambda_i / 4\pi \times 10^{[EIRP - (Tolerable J/S + C_R)]/20}, \quad (9)$$

여기서 λ_i 는 간섭 신호의 파장, $EIRP$ 는 등방성 안테나를 고려한 재머의 송신 출력, C_R 은 항법 신호의 최소 수신 전력을 의미한다. d 의 값이 작을수록 유효 재머 거리가 짧은 것으로 RNSS 수신기를 방해하기 위한 더 많은 재머 전력이 필요함을 의미하며, RNSS 신호 측면에서는 신호의 항재밍 성능이 우수함을 의미한다.

한편, d 는 타 항재밍 성능지수와 다르게 간섭 신호의 반송파 주파수에 의존하여 결과가 계산된다. 따라서, RNSS 신호 설계 대역에 따라 항재밍 성능 측면이 달라짐을 알 수 있다.

4. RNSS 신호의 항재밍 성능 분석

RNSS 신호의 전송파형에 따른 항재밍 성능 분석은, 2장에서 언급된 RNSS 신호 및 재밍 유형을 고려하여 수행된다. 신호 유형 외에도 항재밍 성능 분석을 위해 필요한 파라미터 값 설정은 다음과 같이 가정한다.

먼저, RNSS 신호의 송수신 대역폭은 고려되는 모든 전송파형의 주엽을 포함할 수 있도록 하는 40 MHz로 설정하였다. CWI의 반송파 주파수와 MSI, BLWI 및 chirp 신호의 대역폭 특성은 Fig. 6의 결과 도출을 위해 설정한 가정을 동일하게 사용한다.

$Tolerable J/S$ 계산을 위해 필요한 파라미터는 RNSS 신호의 전송파형 설계 파라미터에 의한 영향을 지배적으로 확인하기 위해 모든 평가 시나리오에 대해 공통의 값을 가정한다.

Ward et al. (2017)에서 설정된 파라미터를 참고하여 Q_s 를 $Q'_{CarrTrk} (C/N_{0,eff})_{minReq}$ 는 수신기의 반송파 추적 루프가 Costas라고 가정하여 27 dB-Hz, $C/N_{0,eff}$ 는 45 dB-Hz, G_{SV} 와 G_r 는 각각 1.5 dBi와 -3 dBi로 가정하여 분석한다. 추가로, d 계산을 위해 사용되

는 C_R 역시 고정된 값을 사용하여 계산되며 대표적인 민간 신호 L1 C/A의 최소 수신 전력 값인 -158.5 dBW를 가정하여 분석한다 (GPS ICD 2022).

4.1 재밍 저항 품질 인자 분석

Fig. 7은 각 재밍 유형에 대한 전송파형의 $Q'_{CarrTrk}$ 결과를 보여 준다. 모든 전송파형은 CWI, MSI, chirp 간섭 및 BLWI 순으로 높은 값을 가지며, 이를 통해 항법신호가 협대역 간섭 신호보다 광대역 간섭 신호에 강인함을 알 수 있다.

전송파형 측면에서는 전송파형이 넓은 대역폭을 가질수록 항재밍 성능이 좋아짐을 확인할 수 있다. BPSK(1) 또는 BOCs(1,1)과 같이 일반적으로 좁은 대역폭을 가지도록 설계된 민간용 신호들은 BPSK(10) 또는 BOCs(10,5)와 같이 넓은 대역폭을 가지도록 설계된 군용 신호 대비 항재밍 성능이 좋지 않다. 단, BOCs(14,2) 또는 BOCc(15,2.5)와 같이 수신 대역폭 대비 전송파형 대역폭이 넓은 경우 대역 제한으로 인한 전력 손실로 인해 예상되는 성능 대비 좋지 않은 결과를 도출하는 경우도 존재함을 알 수 있다.

예를 들어 간섭 신호가 MSI인 경우 BOCs(14,2)의 두 주엽을 포함하는 최소 대역폭이 BOCs(5,2) 대비 약 18 MHz 넓은 대역폭을 가지지만 설정된 40 MHz의 송수신 대역폭에 의해 상대적으로 낮은 스펙트럼 효율을 갖기 때문에 결과적으로 BOCs(5,2)보다 낮은 결과를 도출하고 있다. 즉, 좋은 항재밍 성능을 갖도록 전송파형을 설계하기 위해서는 스펙트럼 효율을 고려하면서 설계 대역폭 내 PSD가 넓게 분포해 있어야 함을 의미한다.

추가로, chirp 신호와 BLWI 신호는 BPSK이거나 BOC의 변조 차수가 2일 때는 거의 동일한 결과를 갖지만 BOC의 변조 차수가 3 이상인 경우에는 chirp 간섭이 RNSS에 더 큰 간섭의 영향을 미침을 알 수 있다. 이는 chirp 간섭의 전력이 BLWI 대비 상대적으로 RNSS 신호 PSD의 주엽에 집중되어 있기 때문이다.

Fig. 8은 각 재밍 유형에 대한 전송파형의 $Q_{CodeTrk}$ 결과를 보여주며, $Q'_{CarrTrk}$ 결과와 약간 다른 경향을 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 7에서는 변조 기법과 관계없이 전송파형의 PSD가 넓은 대역폭을 가질 때 좋은 항재밍 성능을 보였지만, Fig. 8은 전송파형

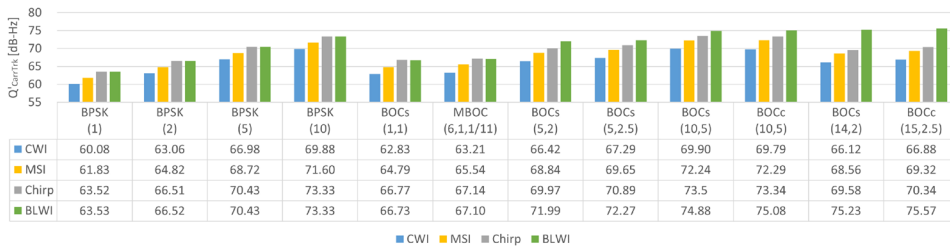


Fig. 7. $Q'_{CarrTrk}$ of each waveform with respect to jamming signal type.

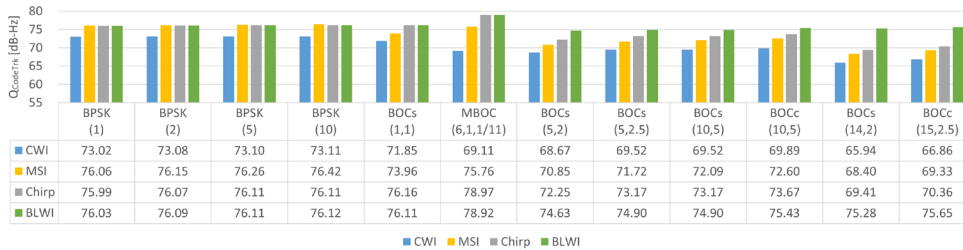


Fig. 8. $Q_{CodeTrk}$ of each waveform with respect to jamming signal type.

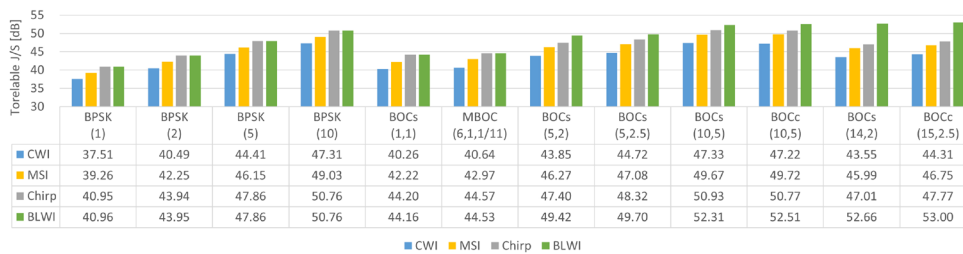


Fig. 9. Tolerable J/S of each waveform with respect to jamming signal type.

이 넓은 대역폭을 가질지라도 고주파 영역에 신호 전력이 집중되어 있을 경우 좋지 않은 항재밍 성능을 보였다. 이는 Eq. (3)의 CTSSC 식에서 적분 내 주파수 제곱 성분이 중심 주파수에서 벗어난 간섭 전력이 가중치로 적용되면서 훨씬 큰 영향을 미치기 때문이다. 이러한 경향은 간섭 전력이 RNSS 신호 PSD의 주엽에 집중될수록 가중치의 영향이 크게 적용되므로 CWI와 같이 간섭 신호의 대역폭이 좁을수록 분명해지며, BLWI와 같이 넓을수록 모호해진다.

4.2 용인 가능한 재밍 신호 전력비 분석

Fig. 9는 Tolerable J/S의 결과를 보여준다. 본 논문에서 보여주는 Tolerable J/S는 전송파형과 재밍 유형에 따른 $Q'_{CarrTrk}$ 를 제외한 모든 변수에 대해 동일한 값을 적용하였으므로, 결과의 경향이 $Q'_{CarrTrk}$ 의 경향과 동일하다. 따라서, CWI, MSI, chirp 간섭 및 BLWI 순으로 높은 Tolerable J/S 값을 가지며, 설계 대역폭 내에서 좋은 스펙트럼 효율을 가지면서 PSD가 넓게 분포할수록 더 좋은 성능을 갖는다. CWI에 대한 결과를 기준으로 민간 신호의 경우 대부분 약 40 dB 이하의 Tolerable J/S 값을 도출하였고, 군용 신호의 경우 대부분 40 dB가 넘는 Tolerable J/S 값을 도출함을 확인할 수 있다.

한편, 분석을 위해 고정된 값으로 설정한 $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 및

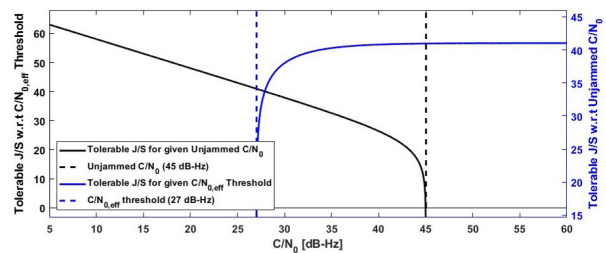


Fig. 10. Tolerable J/S with respect to $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ and $C/N_{0,eff}$.

$C/N_{0,eff}$ 는 신호 처리 및 수신 환경에 의존하며, 변화되는 값에 따라 Tolerable J/S 결과의 범위가 달라진다. Fig. 10은 $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 와 $C/N_{0,eff}$ 의 값에 따른 Tolerable J/S 결과를 보여준다. 이 때, Q_c 는 전송파형이 BPSK(1)이고 간섭이 BLWI일 때의 $Q'_{CarrTrk}$ 의 결과를 사용하였으며, 안테나 이득 관련 파라미터는 앞서 정의한 가정과 동일하게 설정하였다.

Fig. 10의 검정선은 $C/N_{0,eff}$ 가 45 dB-Hz로 고정되었을 때, $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 의 변화에 따른 Tolerable J/S 결과를 나타내며 수신기가 안정적으로 반송파 추적을 수행할수록 우수한 성능을 가졌다. 파란선은 $(C/N_{0,eff})_{minReq}$ 가 27 dB-Hz로 고정되었을 때, $C/N_{0,eff}$ 의 변화에 따른 Tolerable J/S 결과를 나타내며 수신 환경이 좋을수록 우수한 성능을 가졌다.

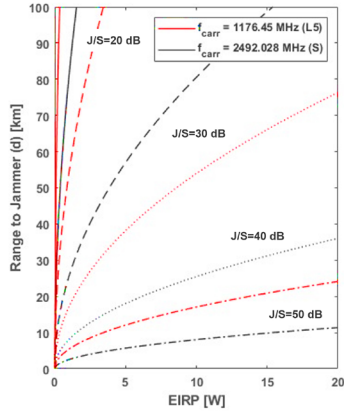


Fig. 11. Result of range to jammer. solid line: 20 dB, dashed line: 30 dB, dotted line: 40 dB, dash-single dotted line: 50 dB.

4.3 유효 재머 범위 분석

Fig. 11은 간섭 신호의 파장 λ , 재머의 송출 전력 $EIRP$ 및 $Tolerable J/S$ 에 따른 유효 재머 범위 d 의 결과를 보여준다. 간섭 신호의 파장은 현재 RNSS 신호가 사용하고 있는 대역 중 대역 간 거리가 가장 먼 L5 및 S 대역에서 일반적으로 사용되는 중심 주파수를 기반으로 설정하였다.

모든 경우에 대해 간섭 신호의 파장이 짧을수록 더 우수한 성능을 가지며, 재머의 $EIRP$ 는 작을수록, RNSS 신호의 $Tolerable J/S$ 는 클수록 우수한 결과를 도출하였다. 신호의 파장은 고주파일수록 파장의 길이가 짧아지므로 $EIRP$ 및 $Tolerable J/S$ 가 동일하게 설정된 경우 S 대역이 L5 대역 대비 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있다. $EIRP$ 의 경우 그 값이 작아질수록 재머의 전력이 약해 RNSS에 미칠 수 있는 범위가 짧아져 우수한 성능을 도출하였으며, $Tolerable J/S$ 는 그 값이 커질수록 RNSS 수신기가 용인할 수 있는 재머의 전력이 커져 우수한 성능을 도출하였다.

5. 결론

본 논문에서는 좋은 항재밍 성능을 갖는 전송파형 설계 조건을 도출하기 위해 사용가능한 FoMs를 소개하고 이를 이용하여 기존 RNSS 신호의 항재밍 성능 분석을 수행하였다.

신호 처리 단계에 따른 Q factor, $Tolerable J/S$ 및 d 를 통하여 평가를 수행하였으며, 그 결과 스펙트럼 효율을 고려하면서 설계 대역폭 내 PSD가 넓게 분포할수록 좋은 항재밍 성능을 가짐을 확인하였다. 단, $Q_{CodeTrk}$ 의 경우 전송파형이 넓은 대역폭을 가질지라도 BPSK 신호 대비 BOC 신호가 낮은 $Q_{CodeTrk}$ 을 갖는 경우도 존재하였다. 하지만 BOC 신호는 BPSK 대비 우수한 측위 성능을 가지기 때문에 전송파형 설계 시 trade-off 관계를 고려할 필요가 있다. $Tolerable J/S$ 와 d 의 경우 본 논문에서 가정된 파라미터 설정에 따라 $Q'_{CarrTrk}$ 에 의존하는 결과를 도출하였으나, $Q'_{CarrTrk}$ 와 같이 수치만을 통해 간섭의 영향 정도를 직관적으로 해석하기 어려운 부분을 보완할 수 있다는 이점을 가진다. 또한, d 의 경우 대역 선정에 따른 항재밍 성능을 제공하며, 평가 결과 고주파 영역에 RNSS

신호를 설계할수록 항재밍 성능 측면에서 우수함을 확인하였다.

본 논문은 항재밍 측면에서의 전송파형 설계 조건을 도출하였으나 추후 실제 신호를 설계할 때는 항재밍 뿐 아니라 다양한 측면에서의 성능 평가가 필요하며, 서비스 목적에 따른 최우선 요구사항을 고려하여 전송파형 설계 도출이 필요하므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

본 논문에서 조사한 항재밍 FoMs 및 도출된 결과는 향후 새로운 RNSS 신호를 설계할 시 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2023년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020RIA2C2013091).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Lee, S., Han, K., and Won, J.-H.; validation, Lee, S., Han, K., and Won, J.-H.; investigation, Lee, S. and Han, K.; resources, Won, J.-H.; data curation, Lee, S.; writing—original draft preparation, Lee, S.; writing—review and editing, 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

Baek, J., Yoo, S., & Kim, S. Y. 2012, Jamming Effect Analysis of Two Chinese GNSS Beidou-II Civil Signals, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2, 840-845.

Chen, X. 2014, Modeling of GNSS Challenged Environment in Semi-Analytical Simulator, Master Thesis, Universität der Bundeswehr München.

De Bakker, P. F. 2007, Effects of Radio Frequency Interference on GNSS Receiver Output, Master Thesis, Delf University of Technology.

GPS ICD 2022, NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces, GPS.GOV, <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200N.pdf>

Han, K. 2023, Exploration of Optimized Waveforms for New

RNSS Signals in L6 and S Bands, PhD Dissertation, Inha University.

- Han, K., Lee, S., Lee, K., & Won, J.-H. 2022, Performance Analysis for Secured Service Signals of RNSS Systems, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 11, 341-349. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.4.341>
- Intertanko 2019. Jamming and Spoofing of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) [Internet], cited 10 Jun. 2023, available from: <https://www.maritimeglobalsecurity.org/media/1043/2019-jamming-spoofing-of-gnss.pdf>
- Lee, S., Han, K., Kraus, T., Pany, T., & Won, J.-H. 2022, Assessment of RFI Robustness Performance for New RNSS Signal Design, in proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022), Denver, Colorado, 19-23 Sep. 2022, pp.852-858. <https://doi.org/10.33012/2022.18463>
- Pinker, A. & Smith, C. 1999, Vulnerability of the GPS Signal to Jamming, *GPS Solutions*, 3, 19-27. <https://doi.org/10.1007/PL00012788>
- Pullen, S. & Gao, G. X. 2012, GNSS jamming in the name of privacy: Potential threat to GPS aviation, *Inside GNSS*, pp.34-43. <https://insidegnss.com/wp-content/uploads/2018/01/marapr12-Pullen.pdf>
- van der Merwe, J. R., Rügamer, A., Garzia, F., Felber, W., & Wendel, J. 2018, Evaluation of Mitigation Methods Against COTS PPDs, 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, 23-26 Apr. 2018, pp.920-930. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373470>
- Ward, P. W., Betz, J. W., & Hegarty, C. J. 2017, GNSS Disruptions, Chapter 9 in Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. (eds.), *Understanding GPS: Principles and Applications*, 3rd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Xue, R., Sun, Y., & Zhao, D. 2015, CPM Signals for Satellite Navigation in the S and C Bands, *Sensors*, 15, 13184-13200. <https://doi.org/10.3390/s150613184>
- Ye, F., Tian, H., & Che, F. 2017, CW Interference Effects on the Performance of GPS Receivers, 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL), Singapore, 19-22 Nov. 2017, pp.66-72. <https://doi.org/10.1109/PIERS-FALL.2017.8293112>



Subin Lee is a Ph.D. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, South Korea. She received B.S. and M.S. degrees from the same university in 2020 and 2022. Her research interest is GNSS signal design.



Kahee Han is a researcher at Electronics and Telecommunications Research Institute. She received Ph.D. Degree in the Department of Electrical and Computer Engineering from Inha University, South Korea, in 2023. Recently, she is involved in Korean Positioning System (KPS) Development Project.



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.