

Performance Analysis for Secured Service Signals of RNSS Systems

Kahee Han¹, Subin Lee¹, Kihoon Lee², Jong-Hoon Won^{1†}

¹Department of Electrical & Computer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Satellite Navigation Team, Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

ABSTRACT

When designing a new RNSS signal, the performance analysis for the legacy signal providing the same service, is required to determine the performance requirements. However, there are few studies on the secured service (SS) signal performance analysis, and the waveform is the only published information on the signal design component of the SS signal. Therefore, in this paper, we introduce several figures-of-merit (FoMs) that can be used for performance analysis in terms of the waveform. And then, we calculate the FoMs, such as autocorrelation main peak to secondary peak ratio (AMSR), spectral efficiency, Gabor bandwidth, multipath error, and jamming resistance quality factor, for the existing SS signals and discuss the analysis results. Finally, we conclude that the superior waveform for each FoM is different, and that the consideration of the trade-off relationship between the FoMs is required for waveform design.

Keywords: RNSS, secured service, waveform, performance analysis, figures-of-merit

1. 서론

현대사회에서 측위, 항법 및 시각 동기 (Positioning, Navigation, and Timing, PNT) 정보가 교통, 통신, 금융 등 국가 주요 인프라 운영의 핵심으로 자리매김함에 따라, 이를 제공하는 무선항행위성업무 (Radio Navigation Satellite Service, RNSS) 시스템의 중요성이 대두되고 있다. RNSS 시스템의 중요성 및 필요성을 빠르게 인식한 미국, 러시아, 유럽, 중국, 일본, 인도 등의 우주기술 강국들은 자국의 독자적인 RNSS 시스템의 구축 및 현대화를 위한 연구를 지속적으로 수행 중에 있으며, 최근 우리나라 또한 독자적인 RNSS 시스템의 필요성을 인지하고 한국형 위성항법 시스템 (Korean Positioning System, KPS)의 개발을 공표하였다 (MSIT 2021).

한편, 기존 RNSS 시스템의 현대화 및 새로운 RNSS 시스템의 개발은 새로운 항법신호 설계를 필수적으로 동반한다. 따라서

RNSS 시스템이 제공하는 각 서비스 특성에 적합한 차세대 RNSS 항법신호 개발을 위한 연구가 요구된다.

대부분의 RNSS 시스템은 공통적으로 공개 서비스 (Open Service, OS) 및 보안 서비스 (Secured Service, SS)를 제공한다. OS는 민간 사용자를 대상으로 PNT 정보를 무상으로 제공한다. 반면, SS는 암호화된 신호를 통해 제공되며, 정부에 의해 허가된 사용자만을 대상으로 PNT 정보를 제공한다.

SS는 미국 Global Positioning System (GPS)에서는 precise positioning service (PPS), 러시아 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS)에서는 secured service, 유럽 Galileo에서는 PRS, 중국 BeiDou Navigation Satellite System (BDS)에서는 authorized service (AS), 인도 Navigation with Indian Constellation (NavIC)에서는 restricted service (RS)로 명명하고 있다. 이하 논문에서는 이러한 유형의 서비스를 SS로 통일하여 지칭한다.

각 RNSS 시스템의 대표적인 SS 신호로는 GPS의 P(Y) 및 M 신호, GLONASS의 L1SF 및 L2SF 신호, Galileo의 E1PRS 및 E6PRS 신호, BDS의 B1Q, B2Q, B3Q, B1A 및 B3A 신호, NavIC의 L5 RS 및 S RS 신호가 있다.

한편, 새로운 RNSS 신호 설계를 위해서는 동일 서비스를 제공하는 기존 신호에 대한 성능 분석이 우선적으로 수행되어야 하며, 분석 결과를 기반으로 설계 신호의 성능 요구조건을 정의할 필요가 있다. 그러나, 민간 공개 신호인 OS 신호와 달리 SS 신

Received Nov 24, 2022 Revised Dec 05, 2022 Accepted Dec 06, 2022

[†]Corresponding Author

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

Tel: +82-32-860-7406 Fax: +82-32-863-5822

Kahee Han <https://orcid.org/0000-0001-8804-5120>

Subin Lee <https://orcid.org/0000-0001-8807-4327>

Kihoon Lee <https://orcid.org/0000-0003-3618-7324>

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

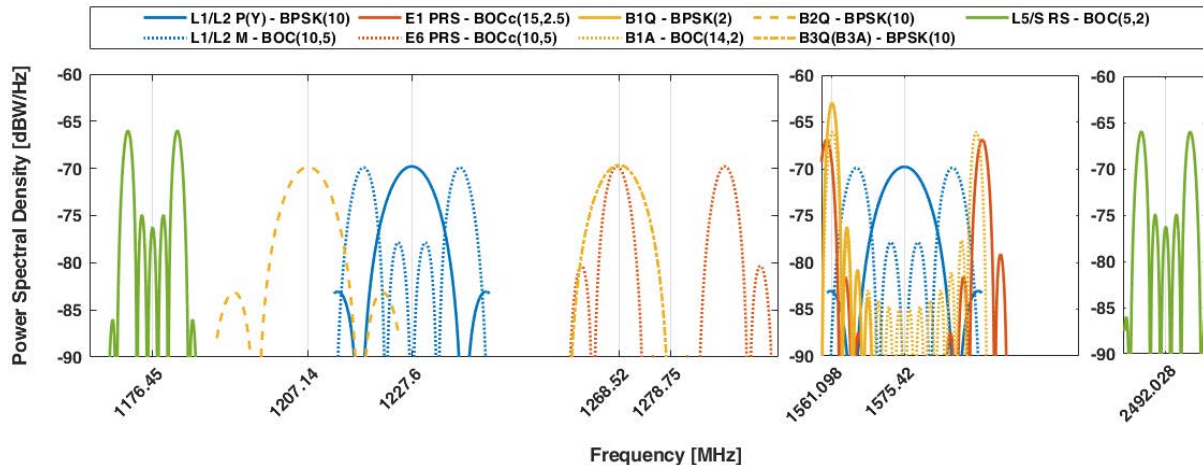


Fig. 1. PSD of the existing SS signals of RNSS systems.

호에 대한 성능 분석 연구는 미미한 실정이다. 또한 SS 신호는 그 특성 상 자세한 신호 설계 사양이 공개되어 있지 않으며, 타 RNSS 시스템과의 간섭 영향 분석을 위한 지상에서의 최소 수신 전력 및 전송파형에 관한 정보 만이 공개되어 있다 (ITU 2022).

따라서 본 논문에서는 새로운 RNSS 시스템의 SS 신호 설계를 위한 참고 연구자료로서의 역할을 기대하며, 기존 SS 신호의 전송파형에 따른 성능 분석을 수행한다. 단, 대부분의 RNSS 신호는 code division multiple access (CDMA) 방식을 사용하므로, frequency division multiple access (FDMA) 방식인 GLONASS의 SS 신호는 분석에서 제외한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 RNSS 신호 및 전송파형에 대해 설명하고, 3장에서는 전송파형 성능 분석을 위해 사용 가능한 성능지표 (Figures-of-Merit, FoM)에 대해 소개한다. 4장에서는 기존 SS 신호에 대해 3장에서 소개한 FoMs를 계산하고, 이에 대해 고찰한다. 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. RNSS 신호 및 전송파형

RNSS시스템은 협대역 데이터 신호에 높은 코드칩속도를 가지는 확산 전송파형을 곱하여 광대역 신호로 변조한 후 전송하는 직접 시퀀스 대역 확산 (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS) 방식을 이용한다 (Kaplan et al. 2017). RNSS 신호 $x(t)$ 는 반송파, 항법메시지 및 확산 전송파형으로 구성되며, Eq. (1)과 같이 간소하게 모델링 할 수 있다.

$$x(t) = \sqrt{2P}d(t)s(t)\cos(2\pi f_{carr}t), \quad (1)$$

여기서 P 는 항법신호의 송신 전력, $d(t)$ 는 항법메시지, $s(t)$ 는 확산 전송파형, f_{carr} 는 반송파 주파수이다.

확산 전송파형 $s(t)$ 는 RNSS 신호의 주파수 영역에서의 전력 분포, 즉 power spectral density (PSD)의 형상을 결정하는 주요 신호 설계 요소이다. 확산 전송파형은 확산 코드와 칩 전송파형에 의해 결정되며, Eq. (2)와 같이 정의할 수 있다 (Ma et al. 2020, Yao & Lu 2021).

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n p(t - nT_c), \quad (2)$$

여기서 c_n 은 $\{+1, -1\}$ 로 구성된 확산 코드, $p(t)$ 는 칩 전송파형, T_c 는 코드칩 지속시간 (duration) 이다.

한편, RNSS 신호 설계에서 확산 코드의 설계 목적은 ranging 정확도와 같은 항법성능 향상보다는 주로 확산 코드 간 높은 직교성을 갖도록 하는 것이다 (Yao & Lu 2021). 따라서 본 논문에서는 칩 전송파형만을 고려하여 전송파형의 성능 분석을 수행하며, 이하 칩 전송파형을 전송파형으로 칭한다.

전송파형을 결정하는 신호 설계 파라미터로는 코드칩속도, 부반송파 주파수, 변조 기법 및 펄스 성형 기법이 있다. 단, 모든 RNSS 신호가 구형 펄스를 기반으로 하므로, 본 논문에서도 구형 펄스만을 고려한다.

Fig. 1은 이 논문에서 다루는 SS 신호들의 전송파형에 따른 PSD를 보여준다. L1 대역의 경우, GPS의 P(Y) 및 M 신호는 스펙트럼이 적절히 분리되도록 설계되었으며, 이후에 설계된 Galileo의 E1PRS 및 BDS의 B1Q와 B1A 신호는 모두 먼저 설계된 P(Y) 및 M 신호와 높은 스펙트럼 분리도를 가지도록 설계된 것을 볼 수 있다. L2 및 L6 대역에서는 각 시스템이 서로 다른 반송파 주파수를 통해 SS 신호를 송출하므로, 각 SS 신호가 모두 5.115 MHz 이상의 높은 코드칩속도를 가지는 전송파형을 사용한다. 단, L1 및 L6 대역에서 Galileo와 BDS의 SS 신호 간 스펙트럼이 매우 중첩된다는 이슈가 존재한다. L5 및 S 대역에서는 NavIC만이 SS 신호를 송출하고 있다.

3. 전송파형 성능 분석을 위한 FIGURES OF MERIT

3.1 구현 복잡도 및 Ranging 성능 관련 FoMs

본 논문에서는 자기상관 함수 (Auto-Correlation Function, ACF)의 main peak와 secondary peak 값 간의 비 (Auto-

Table 1. Implementation complexity and ranging performance related FoMs.

FoMs	Equations	References
Autocorrelation main peak to secondary peak ratio (AMSR [unitless])	$AMSR = \frac{\max\{R^2(\tau)\}}{R^2(0)}$ (3)	Han et al. (2022)
Spectral efficiency (η_p, η_r [unitless])	$\eta_t = \int_{-\frac{B_t}{2}}^{\frac{B_t}{2}} S_s(f) df$ (4)	Avila-Rodriguez (2008)
	$\eta_r = \int_{-\frac{B_r}{2}}^{\frac{B_r}{2}} G_s(f) df$ (5)	
	$G_s(f) = \begin{cases} \frac{S_s(f)}{\int_{-\frac{B_t}{2}}^{\frac{B_t}{2}} S_s(\gamma) d\gamma}, & f \leq \frac{B_t}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	
Gabor bandwidth (B_{Gabor} [Hz])	$B_{Gabor} = \sqrt{\int_{-B_r/2}^{B_r/2} f^2 G_s(f) df}$ (6)	Xue et al. (2015)
Multipath error for CELP disc. (ϵ_{MP} [m])	$\epsilon_{MP} = find \left(\delta\tau \left \begin{matrix} I_E(\delta\tau; \tau_M) - I_L(\delta\tau; \tau_M) \\ I_E(\delta\tau; \tau_M) + I_L(\delta\tau; \tau_M) \end{matrix} \right = 0 \right) * c/f_c$ (7)	Irsigler (2008), Han et al. (2022)
	with	
	$I_E = R \left(\delta\tau - \frac{d}{2} \right) + \alpha R \left(\delta\tau - \tau_M - \frac{d}{2} \right) \cos(\delta\psi)$ $I_L = R \left(\delta\tau + \frac{d}{2} \right) + \alpha R \left(\delta\tau - \tau_M + \frac{d}{2} \right) \cos(\delta\psi)$	

where, $R(\tau)$ is the normalized ACF, τ is the code offset between the received signal and the local replica, $S_s(f)$ is the PSD normalized to unit area over infinite bandwidth, B_t is the two-sided transmitted bandwidth, $G_s(f)$ is the PSD normalized to unit area over, B_r, B is the two-sided received bandwidth, B_{DLL} is the DLL bandwidth, I_E and I_L are the early and late correlator output, respectively, d is the correlator spacing, $\delta\tau$ is the code tracking error, τ_M is the delay of the multipath signal, $\delta\psi$ is the phase offset between the direct and the multipath signal, α is the amplitude ratio between the direct and the multipath signal, c is the speed of light, and f_c is the chip rate.

correlation Main peak-to-Secondary peak Ratio, AMSR) 및 스펙트럼 효율을 FoM으로 하여 전송파형에 따른 구현 복잡도를 분석한다. AMSR은 ACF의 main peak와 side peaks 중 가장 큰 값을 가지는 secondary peak 간의 제곱 비로 정의된다 (Han et al. 2022). 스펙트럼 효율은 특정 대역폭 내에 위치하는 신호 전력 비율을 의미하며, 송신기 및 수신기 관점에서 정의할 수 있다 (Avila-Rodriguez 2008).

전송파형에 따른 Ranging 성능은 Gabor 대역폭 및 다중경로 오차를 이용하여 분석할 수 있다. Gabor 대역폭은 수신 환경에 의한 영향을 최대한 배제하고 전송파형 고유의 특성에 의존하는 코드 추적 성능을 분석하기 위해 사용되며, delay-locked-loop (DLL) 열 잡음 지터로부터 유도된다 (Xue et al. 2015). 다중경로 오차는 다중경로 신호에 의해 왜곡된 ACF에 의한 코드 추적 과정에서 발생하는 의사거리 오차를 의미한다 (Irsigler 2008, Han et al. 2022).

구현 복잡도 및 ranging 성능 관련 FoMs에 대한 표현식 및 이에 대해 자세히 설명된 참고문헌은 Table 1에 나열하였다.

3.2 항 재밍 성능 관련 FoM

재밍(전파 교란)은 매우 높은 전력을 가지는 간섭 신호로써, RNSS 수신기의 정상 동작을 불가능하게 하는 것을 목적으로 한

다. 재밍 신호에 의한 간섭 영향은 RNSS 신호 간 간섭 분석과 마찬가지로 spectral separation coefficient (SSC) k_s 를 이용하여 분석할 수 있다 (Novella et al. 2021). 그러나, SSC는 일반적으로 RNSS 신호 간의 간섭 영향을 나타내는 데에 사용된다. 따라서, 비 RNSS 신호인 재밍 신호에 의한 간섭 영향은 재밍 저항 품질 인자 $Q factor$ 를 이용하여 나타낼 수 있다. $Q factor$ 는 RNSS 신호의 해당 간섭 신호에 대한 저항 성능을 의미하며, Eq. (8)과 같이 SSC의 역수에 비례하도록 정의한다.

$$Q factor = \frac{\eta_r}{k_{ts}}, \quad (8)$$

한편, Ward et al. (2017)과 같이 $Q factor$ 의 분모를 $f_c k_s$ 로 정의하는 경우가 있으나, 이 경우 f_c 에 따른 항 재밍 성능 차이를 반영하지 못하므로, 본 논문에서는 $Q factor$ 를 Eq. (8)과 같이 정의한다.

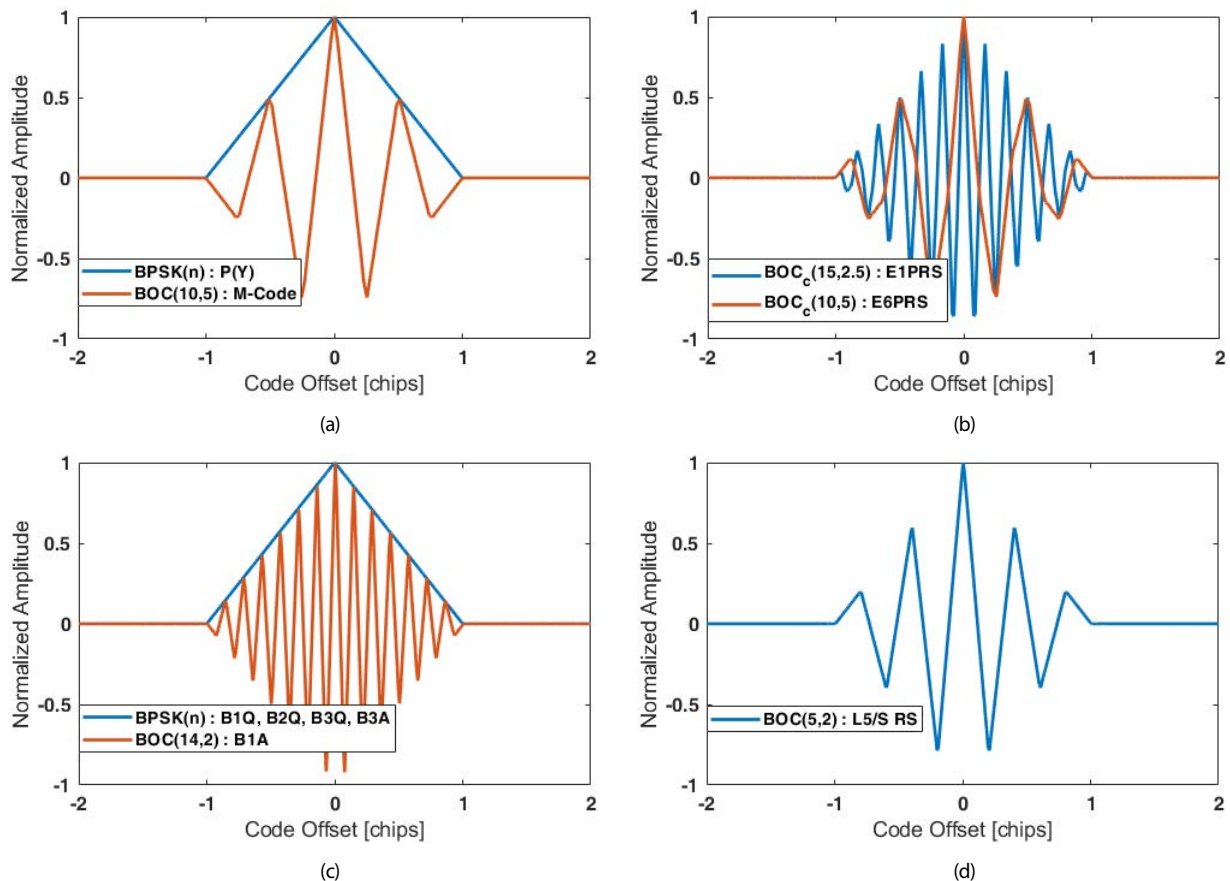
4. 기존 SS 신호 전송파형의 성능 분석

앞서 설명한 FoMs는 공통적으로 송수신 대역폭에 의존한다. Table 2는 FoMs 계산을 위해 본 논문에서 가정하는 각 SS 신호별 송수신 대역폭을 나열한다.

송수신 필터는 모두 통과 이득이 1인 이상적인 boxcar 필터로 가정하며, B_{tr} 및 B_{rl} 은 필터링에 의한 왜곡이 거의 존재하지 않는

Table 2. Transmission and receiver front-end bandwidth of each SS signal.

System	GPS		Galileo		BDS				NavIC
Signal	P(Y)	M	E1PRS	E6PRS	B1Q	B2Q	B3A(B3Q)	B1A	RS
Waveform	BPSK(10)	BOC _{sin} (10,5)	BOC _{cos} (15,2.5)	BOC _{cos} (10,5)	BPSK(2)	BPSK(10)	BPSK(10)	BOC _{sin} (14,2)	BOC _{sin} (5,2)
B_{t1} [MHz]	250	250	250	250	250	250	250	250	250
B_{t2} [MHz]	30.69	30.69	32.84	37.5	16	36	20.46	32.736	24/16.5
B_{r1} [MHz]	250	250	250	250	250	250	250	250	250
B_{r2} [MHz]	20.46	30.69	32.84	30.69	4.092	20.46	20.46	32.736	14.322

**Fig. 2.** ACF of the existing SS signals with the transmission bandwidth and the receiver front-end bandwidth are B_{t1} and B_{r1} : (a) GPS, (b) Galileo, (c) BDS, (d) NavIC.

경우의 FoMs 분석을 위해 신호 대역폭 대비 매우 큰 250 MHz로 설정하였다. B_{t2} 은 각 신호의 interface control document (ICD)를 참고하여 설정하였으며, 관련 ICD가 공개되지 않은 경우에는 반송파 주파수와 송출 대역의 가용 주파수 범위를 고려하여 가능한 최대 대역폭으로 설정하였다. NavIC의 경우, L5 및 S 대역을 통해 동일한 전송파형을 가지는 RS 신호를 송출하지만, 각 주파수 대역의 할당 대역폭이 다르므로, B_{t2} 또한 각각 24 MHz 및 16.5 MHz로 다르게 설정된 것을 볼 수 있다. B_{t2} 은 해당 신호의 신호 대역폭과 동일하게 설정하였다. 여기서 신호 대역폭은 각 신호 PSD의 main lobe의 null-to-null 대역폭을 의미하며, BOC 신호의 경우에는 두 main lobes를 모두 포함하는 최소 대역폭으로 정의한다. 이 때 신호 대역폭이 B_{t2} 보다 크다면, B_{t2} 은 B_{t2} 와 동일하도록 설정하였다.

4.1 자기상관 함수의 Main Peak와 Secondary Peak 값 간의 비 분석 결과

AMSR 값이 클수록 main peak와 secondary peak 간의 구분이 어려워므로, 이 값이 높을수록 해당 신호를 처리하기 위한 수신기 구현 복잡도가 증가하는 것을 의미한다. Fig. 2는 송수신 대역폭을 각각 B_{t1} 및 B_{r1} 로 가정하였을 때의 각 시스템 별 SS 신호의 ACF를 보여준다.

한편, 실제 위성 및 수신기는 대역 제한 필터를 가지며, 고주파 영역이 제한됨에 따라 ACF가 왜곡되어 rounded peak를 가지게 된다. ACF는 송수신 필터의 대역 제한에 의해 손실되는 전력이 클수록 크게 왜곡되며, 따라서 AMSR 또한 송수신 필터 대역폭에 따라 다르게 분석된다. Fig. 3은 송수신 대역폭에 따른 각 SS 신호

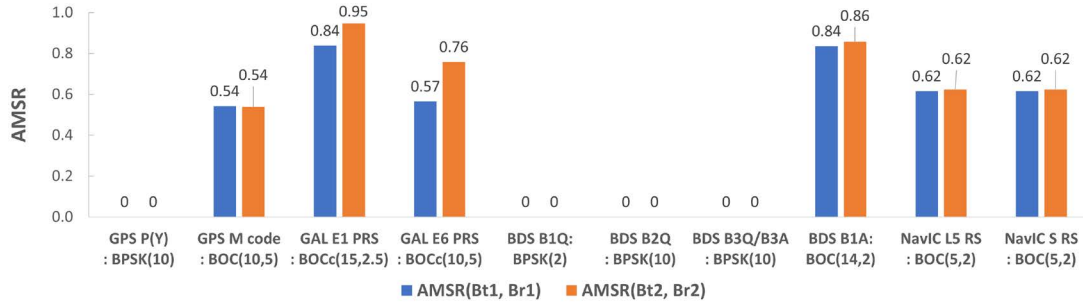


Fig. 3. AMSR of each SS signal with respect to the transmission bandwidth and the receiver front-end bandwidth.

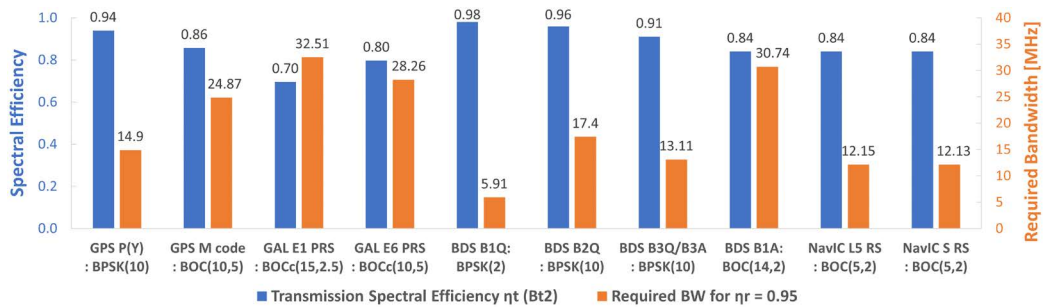


Fig. 4. Transmission spectral efficiency and required receiver front-end bandwidth for $\eta_r=0.95$ of each SS signal.

의 AMSR 계산 결과를 보여준다.

AMSR은 변조 차수 ($2f_c/f_m$, 여기서 f_c 는 부반송파 주파수)가 높을수록, cosine-BOC 전송파형을 사용할수록 큰 값을 가졌다. 한편, 송수신 대역폭을 제한하는 경우, cosine-BOC 신호의 AMSR 값이 상대적으로 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 cosine-BOC 신호의 PSD는 sine-BOC 신호와 반대로 PSD의 main lobes 바깥쪽으로 큰 sidelobes가 위치하는 특성에 기인한다. 즉, cosine-BOC 신호는 동일한 코드칩속도 및 부반송파 주파수를 가지는 sine-BOC 신호보다 대역 제한에 의해 더 심한 ACF 왜곡을 겪게 된다.

송수신 대역폭을 각각 B_{12} 및 B_{r2} 로 정의하였을 때, cosine-BOC 전송파형이 적용되고 변조 차수가 높은 E1PRS 신호가 0.95로 가장 높은 AMSR 값을 가졌다. 기존 SS 신호의 AMSR 분석 결과를 통해 ACF의 형상에 의한 수신기 구현 복잡도는 SS 신호 설계 관점에서 중요한 고려사항이 아님을 예상할 수 있다.

4.2 스펙트럼 효율 분석 결과

스펙트럼 효율 값이 클수록 필터링에 의한 신호 왜곡이 적으며, 신호 전력을 효율적으로 사용할 수 있는 것을 의미한다. Fig. 4는 송신 대역폭이 B_{12} 일 때의 송신 스펙트럼 효율과 0.95 이상의 η_r 를 얻기 위해 요구되는 최소 수신 대역폭을 보여준다.

송신 측면에서의 스펙트럼 효율 η_t 은 신호 대역폭이 좁을수록 우수한 경향을 보였으며, 본 논문에서 E1PRS 신호가 0.7로 가장 낮은 값을 가졌다. 한편, 신호 대역폭이 동일한 M 및 E6PRS 신호의 비교를 통해 동일한 신호 대역폭을 가지는 경우, sine-BOC 신호가 cosine-BOC 신호보다 더 우수한 스펙트럼 효율을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 AMSR 분석 결과와 마찬가지로 cosine-

BOC 전송파형의 PSD 특성에 기인한다.

한편, η_r 이 0.95가 되도록 하기 위해 요구되는 수신 대역폭은 신호 대역폭에 비례하며, 전송파형이 동일한 경우에는 송신 대역폭이 좁을수록 더 작은 값을 가졌다. 한편, E6PRS 신호의 경우, cosine-BOC 전송파형의 PSD 특성에 의해 동일한 신호 대역폭을 가지는 M 신호보다 약 3.39 MHz 넓은 수신 대역폭이 요구되며, 두 신호의 송신 대역폭을 동일하게 30.69 MHz로 가정하더라도 약 1.71 MHz 더 넓은 수신 대역폭을 요구하였다.

스펙트럼 효율 분석 결과를 통해, 새로운 SS 신호의 전송파형 설계 시에 약 0.7의 송신 스펙트럼 효율을 가지는 전송파형 또한 충분히 고려할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 Gabor 대역폭 분석 결과

Gabor 대역폭은 그 값이 클수록 전송파형 고유의 특성에 기인한 코드 추적 오차가 적음을 의미한다. Fig. 5는 모든 SS 신호의 송신 대역폭을 B_{12} 로 가정하였을 때, 수신 대역폭에 따른 각 신호의 Gabor 대역폭을 보여준다.

BPSK 신호는 수신기 대역폭이 증가함에 따라 Gabor 대역폭이 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 반면에 BOC 신호는 반송파 주파수에서 부반송파 주파수만큼 떨어진 주파수에 신호 전력이 밀집되어 있으므로, 수신기 대역폭이 좁을 때는 매우 낮은 Gabor 대역폭을 가지다가 수신기 대역폭이 PSD의 두 main lobes를 포함하기 시작하는 지점에서부터 가파르게 증가한다. 즉, BOC 변조 적용을 통한 코드 추적 성능 향상은 수신기 대역폭이 신호 대역폭 대비 충분히 넓은 경우에만 기대할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 송신 대역폭이 B_{12} 일 때, 수신 대역폭이 송신 대역폭

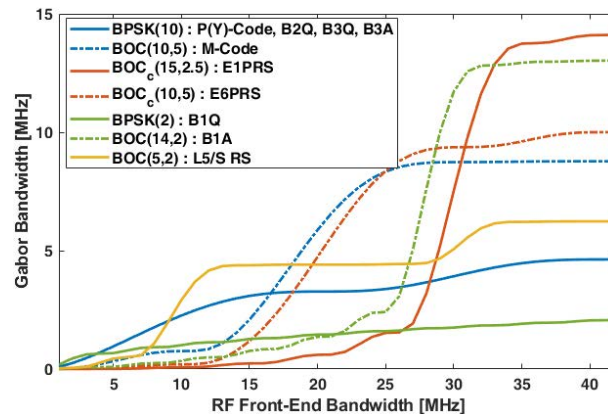


Fig. 5. Gabor bandwidth of the existing SS signals when the transmission bandwidth is B_T .

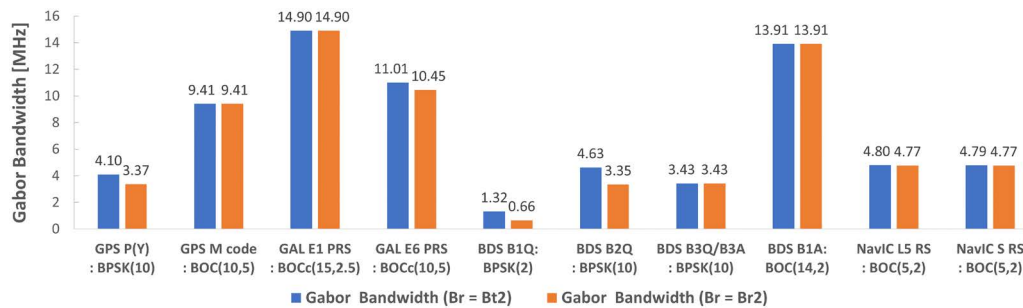


Fig. 6. Gabor bandwidth of each SS signal with respect to the receiver front-end bandwidth.

과 동일하거나 B_{t2} 인 경우의 Gabor 대역폭을 보여준다. Gabor 대역폭 분석 결과, 고주파 영역에 신호 전력이 집중된 신호일 수록 더 큰 Gabor 대역폭을 가지며, E1PRS 신호가 14.9 MHz로 가장 큰 Gabor 대역폭을 가졌다. 동일한 코드칩속도와 부반송파 주파수를 가지는 M 신호와 E6PRS 신호의 Gabor 대역폭을 비교해보면, cosine-BOC 변조가 sine-BOC 변조보다 더 우수한 코드 추적 성능을 보였다.

가장 작은 Gabor 대역폭을 가지는 BDS B1Q 신호는 수신기 대역폭에 따라 각각 1.32 MHz 및 0.66 MHz의 값을 가졌다. 그러나, 동일 대역에 현대화 SS 신호인 B1A 신호가 설계된 것을 고려할 때, BPSK(10) 수준 이상의 Gabor 대역폭을 가지는 전송파형이 SS 신호용으로 적합한 것을 유추할 수 있다.

4.4 다중경로 오차 분석 결과

다중경로 신호에 의한 의사거리 오차는 다중경로 오차 포락선 (Multipath Error Envelope, MPEE)을 이용하여 분석할 수 있다 (Irsigler 2008). MPEE는 다중경로 지연 시간에 따른 direct 신호의 의사거리 오차를 의미하며, MPEE가 작을수록 다중경로 환경에 더 강건한 것을 의미한다. Fig. 7은 송수신 대역폭이 B_{t2} 및 B_{r2} , 판별기 유형은 CELP, d 는 0.1칩, α 는 -6 dB라고 가정하였을 때, 각 SS 신호의 MPEE를 보여준다.

코드칩속도가 높을수록 최대 다중경로 오차가 작으며, 오차를 야기하는 다중경로 지연 시간의 범위 또한 좁은 것을 볼 수 있다.

한편, BOC 신호의 경우, ACF가 다수의 peaks를 가지므로 다수의 zero-crossing을 포함하는 MPEE를 가지며, 변조 차수가 높을 수록 많은 수의 zero-crossing이 나타났다.

한편, 부반송파 주파수가 다중경로 오차에 미치는 영향은 RS 신호와 B1A 신호의 비교를 통해 확인할 수 있다. 변조 차수가 높을수록 ACF의 peaks가 더 첨예해지므로, 동일한 상관기 간격 하에서는 코드칩속도가 동일하더라도 부반송파 주파수가 높을수록 최대 다중경로 오차가 작은 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 가정한 다중경로 환경에서 송수신 대역폭에 따른 각 SS 신호의 최대 MPEE 값을 보여준다. 제한된 송수신 대역폭으로 인한 ACF의 왜곡은 결과적으로 MPEE를 왜곡한다 (Han et al. 2022). 대부분의 SS 신호에 대해 왜곡된 MPEE의 최대 값은 증가하였으며, 증가량은 송신 대역폭 대비 수신 대역폭의 비가 작을 수록 크게 나타났다. 송수신 대역폭의 비가 가장 작은 B1Q 신호는 송수신 대역폭이 각각 B_{t2} 및 B_{r2} 인 경우와 비교하여 최대 다중경로 오차가 약 20 m 증가하면서 가장 큰 증가를 보였다.

Gabor 대역폭 분석과 동일한 이유로 B1Q 신호를 제외하면, 가정한 다중경로 오차 성능 분석 환경 하에서 기존 SS 신호는 대역 제한에 의한 왜곡이 발생하는 경우에도 5 m 이내의 다중경로 오차 성능을 가지는 것으로 분석되었다.

4.5 재밍 저항 품질 인자 분석 결과

재밍 저항 품질 인자 Q factor는 클수록 항 재밍 성능이 우수한

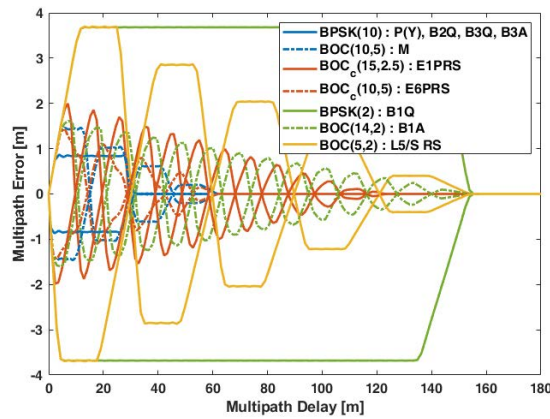


Fig. 7. MPEE of the existing SS signals when the transmission bandwidth and the receiver front-end bandwidth are B_{tl} .

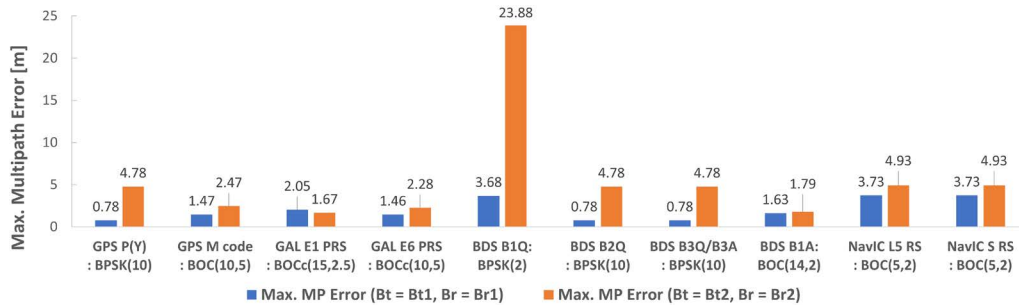


Fig. 8. The maximum value of MPEE of each SS signal with respect to the transmission bandwidth and the receiver front-end bandwidth.

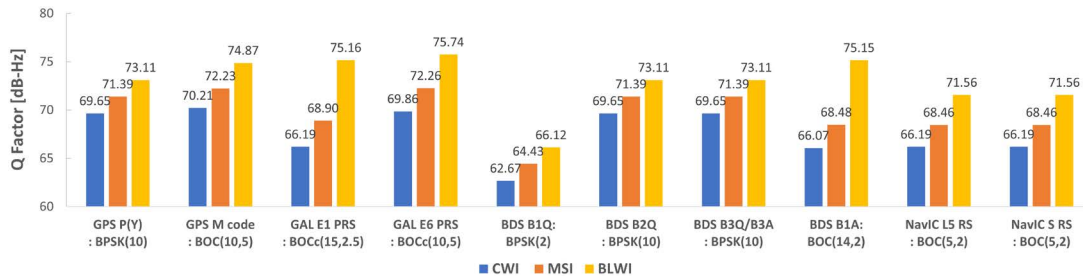


Fig. 9. Q factor of each SS signal with respect to jamming signal type.

것을 의미하며, 재밍 신호 유형에 따라 다른 값을 가진다. 본 논문에서는 대표적인 재밍 유형인 continuous wave interference (CWI), matched spectrum interference (MSI), bandlimited white-noise interference (BLWI)를 고려한다 (Ward et al. 2017). CWI는 피 간섭 신호의 PSD의 mainlobe의 중심에 위치하며, BOC 신호의 경우 두 main lobes 중 하나의 mainlobe의 중심에 위치한다고 가정한다. MSI는 B_{tl} , BLWI는 B_{r2} 와 동일한 송신 대역폭을 가지며, 피 간섭 신호의 반송파 주파수를 그 중심으로 하도록 정의한다.

Fig. 9는 송수신 대역폭이 B_{tl} 및 B_{r2} 일 때, 각 재밍 유형에 대한 SS 신호의 Q factor 계산 결과를 보여준다. 모든 SS 신호는 각 재밍 유형에 대해 BLWI, MSI, CWI 순으로 높은 Q factor를 가지며, 이를 통해 공통적으로 협 대역 간섭보다 광대역 간섭에 강인한

것을 알 수 있다. BLWI에 대한 항 재밍 성능은 신호 대역폭이 넓을수록 우수하였다. 단, 가장 넓은 신호 대역폭을 가지는 E1PRS 신호의 경우, 본 논문에서 가정한 송신 대역폭이 신호 대역폭보다 좁음으로 인해 예상보다 낮은 성능을 보였다. MSI에 대한 항 재밍 성능은 자기 자신과의 SSC에 반 비례한다. CWI에 대한 항 재밍 성능은 PSD의 최대값이 작을수록, 즉 신호 전력이 넓게 퍼진 형태를 가지는 신호가 더 우수하였다.

Gabor 대역폭 분석과 마찬가지로 B1Q 신호를 제외하면, 가장 한 항 재밍 성능 분석 환경 하에서 기존 SS 신호는 CWI, MSI 및 BLWI 유형에 대해서 각각 66.07 dB-Hz, 68.46 dB-Hz, 71.46 dB-Hz 이상의 Q factor를 가진다. 특히, M 신호 및 E6PRS 신호가 모든 재밍 유형에 대해 우수한 항 재밍 성능을 보였다.

4.6 고찰

SS 신호는 암호화된 신호를 이용하여 정부에 의해 허가된 사용자를 대상으로 재밍 신호가 존재하는 환경 하에서도 우수한 ranging 성능을 제공하는 것을 주 목표로 한다. 정의된 서비스의 목적 및 대상을 고려하면, SS 신호용 수신기는 고성능인 경우가 일반적이다. 따라서 전송파형에 따른 구현 복잡도는 SS 신호 설계 시 주요 고려사항이 아님을 예상할 수 있으며, 이는 AMSR 및 스펙트럼 효율 분석 결과를 통해 다시 확인할 수 있다. 즉, SS 신호는 우수한 ranging 성능과 항 재밍 성능을 위해 주어진 주파수 대역폭을 충분히 점유하여 높은 코드칩속도 또는 높은 부반송파 주파수를 가지도록 설계된다.

한편, SS 신호들은 상호 간 충분한 스펙트럼 분리도를 가져야 한다. Fig. 1에서 L1 대역을 보면, 후발주자인 Galileo의 E1PRS 및 BDS의 B1A 신호는 모두 먼저 설계된 GPS의 P(Y) 및 M 신호와 높은 스펙트럼 분리도를 가지도록 상대적으로 낮은 코드칩속도와 높은 부반송파 주파수를 가지도록 설계된 것을 알 수 있다. BDS-2의 SS 신호인 B1Q는 낮은 코드칩속도와 L1 대역 타 SS 신호와 다른 반송파 주파수를 가진다.

기존 SS 신호의 ranging 및 항 재밍 성능 관련 FoMs 계산 결과를 종합적으로 분석해 보면, 전송파형으로 BPSK(10)을 가지는 P(Y), B2Q 및 B3Q/A 신호는 송수신 대역이 충분히 넓을 때, 가장 우수한 다중경로 오차 성능을 가졌다. 또한 항 재밍 성능 측면에서도 모든 재밍 유형에 대해 양호한 성능을 보였다. M, E1PRS, E6PRS, B1A 및 RS와 같이 높은 부반송파 주파수를 가지는 BOC 계열의 SS 신호는 코드 추적 오차 성능 및 BLWI에 대한 항 재밍 성능 관점에서 이점을 가진다. 그러나, 낮은 코드칩속도로 인해 CWI 및 MSI에 대해 다소 낮은 항 재밍 성능을 가지며, 대역 제한에 의한 성능 저하가 크게 나타났다.

한편, OS 신호의 대표적인 전송파형인 BPSK(1) 및 BOC(1,1)은 B1Q의 BPSK(2)와 유사하거나 열화된 ranging 및 항 재밍 성능을 가진다. 단, BPSK(1)의 경우 구현 복잡도 측면에서 모든 SS 신호보다 이점을 가진다.

5. 결론

본 논문에서는 RNSS 신호 전송파형의 성능 분석을 위해 사용 가능한 FoMs를 소개하고, 이를 이용하여 기존 SS 신호에 적용된 전송파형에 대한 성능 분석을 수행하였다. FoM마다 우수한 전송파형이 다르게 나타났으며, 이를 통해 신호 성능 간의 trade-off 관계가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 trade-off 관계는 새로운 SS 신호의 전송파형 설계 시에 고려될 수 있다. 예를 들어, 우수한 코드 추적 성능을 최우선 요구사항으로 가질 때, 높은 수신기 구현 복잡도 및 낮은 스펙트럼 효율을 감수하고 높은 부반송파 주파수를 가지는 cosine-BOC 전송파형의 사용을 고려할 수 있다.

본 논문에서 조사한 전송파형 성능 분석을 위한 FoMs 및 제시한 기존 SS 신호 전송파형의 성능 분석 결과는 향후 새로운 RNSS 시스템의 SS 신호의 전송파형 설계 시에 유용한 참고자료

로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (UD210005SD).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Han, K., Lee, S., Lee, K., 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, Han, K. and Won, J.-H.; methodology, Han, K.; software, Han, K.; validation, Han, K., Lee, S., and Won, J.-H.; formal analysis, Han, K.; investigation, Han, K.; resources, Han, K. and Won, J.-H.; data curation, Han, K.; writing—original draft preparation, Han, K.; writing—review and editing, Han, K., Lee, S., and Won, J.-H.; visualization, Han, K.; supervision, Won, J.-H.; project administration, Lee, K. and Won, J.-H.; funding acquisition, Lee, K. and 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, Ph.D. Dissertation, University FAF Munich.
- Han, K., Lee, S., You, M., & Won, J.-H. 2022, A Comprehensive Evaluation of Possible RNSS Signals in the S-Band for the KPS, Sensors, 22, 2180. <https://doi.org/10.3390/s22062180>
- Irsigler, M. 2008, On Generalized Signal Waveforms for Satellite Navigation, Ph.D. Dissertation, University FAF Munich.
- ITU 2022, Recommendation ITU-R M.1787-4, Description of systems and networks in the radionavigation-satellite service (space-to-Earth and space-to-space) and technical characteristics of transmitting space stations operating in the bands 1164-1215 MHz, 1215-1300 MHz and 1559-1610 MHz, International Telecommunication Union.
- Kaplan, E. D., Betz, J. W., Hegarty, C. J., Parisi S. J., Milbert, D., et al. 2017, Fundamentals of Satellite Navigation, Chapter 2 in Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. (eds.), Understanding GPS: Principles and Applications, 3rd

ed. (Boston: Artech House Inc.)

- Ma, J. Yang, Y., Li, H., & Li, J. 2020, FH-BOC: generalized low-ambiguity anti-interference spread spectrum modulation based on frequency-hopping binary offset carrier, *GPS Solution*, 24, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00982-3>
- MSIT 2021, Launch to become the world's seventh 'Space Powerhouse'! [Internet], cited 2022 Nov. 23, available from: <https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=568>
- Novella, G., Macabiau, C., Garcia-Pena, A., Martineau, A., Ladoux, P., et al. 2021, From ICAO GNSS Interference Mask to Jamming Protection Area for Safe Civil Aviation Operation, *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)*, St. Louis, MO, 20-24 Sep 2021, pp.834-854. <https://doi.org/10.33012/2021.17936>
- 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>
- Yao, Z. & Lu, M. 2021, Next-Generation GNSS Signal Design, vol.6, *Navigation: Science and Technology*, ed. M. Huang (Singapore: Springer)



Kahee Han is a Ph.D. candidate 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.



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.



Kihoon Lee is a principal researcher at Agency for Defense Development. He received his B.S. from the Mechanical Engineering Department of POSTECH in 1999. He received his M.S. from the Mechanical Engineering Department of KAIST in 2001. He received his Ph.D. from the Aerospace Engineering Department of KAIST in 2018. He has served as a researcher at Agency for Defense Development since 2001. His research focuses on the development of GNSS system, Anti-Jamming and Anti-Spoofing technologies.



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.

