

GNSS Error Generation Simulator for Signal Quality Monitoring of KASS

Gun-Hoon Ji¹, Jong-Yeoun Choi², Jong-Hoon Won^{1†}

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

²Korea Aerospace and Research Institute, Satellite Based Augmentation System R&D Division, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

In this paper, a GNSS error generation simulator for Signal Quality Monitoring (SQM) is implemented by using Matlab based on mathematical models derived from the effect of GNSS signal and measurement errors. The GNSS signal measurement errors of interest in this paper include three cases such as Evil Wave Form (EWF), Multipath (MP) and Radio Frequency Interference (RFI). In order to verify the validity of the generated measurement errors, a simple form of metrics for detecting and monitoring GNSS errors is included in the simulator. The GNSS errors generated by the simulator are added to the GNSS measurement data from commercial GNSS receiver in real time, and then, the SQM is tested for various scenarios of each case configured by scenario setting of the user.

Keywords: evil-waveform, multipath, radio frequency interference, signal quality monitoring

1. INTRODUCTION

GNSS (Global Navigation Satellite System) 기반 위치 서비스는 지상, 공중, 해상 등 다양한 영역에서 응용시스템이 사용되며, 그 중요도가 계속해서 증가하고 있는 추세다. 위치 정확도 이외에도 측정된 정보에 대한 신뢰성을 검증하고 오류원에 대해 감시하는 것은 위치 기반 서비스를 사용하는데 있어 매우 중요하다. 이와 관련하여, 국제민간항공기구 요구사항에서는 GNSS 서비스를 정확성, 무결성, 연속성, 유효성 총 4가지 항목의 기준을 기반으로 하여 서비스의 품질을 평가한다 (Mitelman 2005). GNSS 신호는 위성에서 송신되어 수신기에 이르는 과정에서 다양한 오차의 영향을 받는다. 이 과정에서 발생하는 오차 신호의 대표적인 유형으로 시스템 내제, 신호 경로, 환경적 특성에 의해 3가지로 구분할 수 있다 (Irsigler 2008). 이 중에서 신호 경로 및 주변환경적 특성에 의한 영향은 기존 GNSS 신호에 추가적으로 생성 또는 더해져서 수신되는 형태이다. 단 수신기 측면에서는 측정되는

신호만을 이용하여 신호 오류를 판별하므로, 신호 품질 모니터링 부에서 검출하는 것으로 본 연구에서는 다음과 같이 정의한다.

첫째로 GNSS 신호를 송신하는 과정에서 탑재체 내부에서 발생하는 하드웨어적 결함으로 인한 대표적인 오류인 Evil Wave Form (EWF)가 존재한다. EWF는 위성 신호의 navigation data unit에 영향을 주고, 이러한 EWF 영향을 correlation function을 통해 사전에 연구가 진행되어왔다 (Phelts 2001). 기존에 발생했던 EWF는 GPS L1 C/A에 해당하는 BPSK 변조기법에 대해서 주로 다루어졌고, 이후에 새로운 다양한 GNSS 신호에 대해서도 연구되고 있다 (Raimondi et al. 2012, Pagot 2016). Phelts (2001)에서는 일반적으로 알려진 International Civil Aviation Organization (ICAO) 기반 형태의 EWF 오류 모니터링 검증 기법을 제시했지만, 최근에는 다른 형태의 다양한 EWF 오류 영향을 검증하기 위한 학습 기반의 Signal Quality Monitoring (SQM)을 제시한 사례가 있다 (Zhuang et al. 2020).

둘째로 GNSS 신호가 송신되면 안테나를 통해 수신 후, 처리하기까지 겪는 오류 중 가장 두드러지는 것은 Multipath (MP)이다. MP의 경우 다중 반사 신호로 인해 무작위성이 강하고, 정확한 모델링을 하는데 어려움이 있다. 독일항공우주센터 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR)에서는 통계적 수치를 이용한 Land Mobile Satellite (LMS) 채널(channel)효과를 적용시켰고 (Krach, Lehner, & Steingass 2005), 단일 반사 모델을 통해 포립션 함수(envelope function)의 영향을 확인하는 연구사례가

Received Sep 10, 2021 Revised Sep 25, 2021 Accepted Sep 30, 2021

[†]Corresponding Author

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

Tel: +82- 32-860-7406

Gun-Hoon Ji <https://orcid.org/0000-0003-4132-4813>

Jong-Yeoun Choi <https://orcid.org/0000-0001-6014-0812>

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

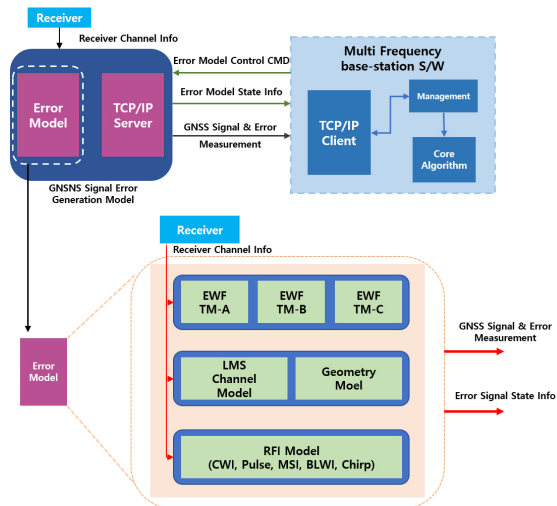


Fig. 1. Overall system block diagram of GNSS error generation simulator block diagram.

있다 (Pirsiavash, Broumandan, & Lachapelle 2017). MP 효과를 모니터링하는 기법은 다양하게 연구되어 왔고 (Irsigler 2008), 대표적으로는 Code minus Carrier (CMC) monitoring 기법이 존재한다.

셋째로 이외에도, 위성 통신 시스템에서는 위성파와 수신기의 거리 차이로 인한 낮은 수신전력으로 의도적인 신호 외에 비의도적인 신호에 의한 RFI(Radio Frequency Interference)에 큰 영향을 받는다 (Dovis 2015). Chen (2014)에서는 GNSS 신호 대역에 미치는 영향을 협대역 및 광대역으로 구분하여 나타냈다. RFI는 일반적으로 신호의 수신 세기에 직접적인 영향을 미치기 때문에 수신 신호 전력 관점에서 모니터링을 제시한 사례가 있고 (Thompson 2010), 이에 대응하기 위한 다양한 방법들이 연구되어왔다 (Gao et al. 2016).

GNSS 오류 신호는 특히 항공 분야에서 주로 이용되는 Satellite Based Augmentation System (SBAS)와 Local Area Augmentation System (LAAS) 시스템에 큰 영향을 준다. 해당 시스템에서는 높은 정확도뿐만 아니라 무결성(Integrity)과 연속성(Continuity)을 통해 안전성을 보장하는 것이 필수적이다 (Enge 1999). 따라서 SBAS 지상국에서는 오류 신호 관련 모니터링 시스템을 구축할 필요가 있다.

본 논문에서는 실제 한국항공우주연구원에서 제공예정인 Korea Augmentation Satellite System (KASS) 서비스 성능 검증을 위한 오류 생성 시스템을 개발하고 이에 대한 기술을 서술한다. 시스템은 Fig. 1과 같이 구성되어 GNSS 위성신호 오류에 대해 시나리오를 크게 EWF, MP, RFI로 구분한 후, 각각의 오류 신호에 의한 영향을 수신기 측정치 파라미터인 Auto-correlation, C/N_0 , pseudo-range의 3가지 측면에서 고려하여 모델링한다. 한국항공우주연구원의 KASS 기준국에서는 측정치 측면에서 GNSS 오류 신호를 모니터링하기 위한 검증 알고리즘을 수행하기 때문에, 본 연구에서는 신호영역이 아닌 측정치영역에서 간접적으로 오류를 생성하는 방식을 채용한다. 오류 측정치 종류에 따른 모니터링 기법은 Correlator values test, CMC monitoring, $\Delta C/N_0$

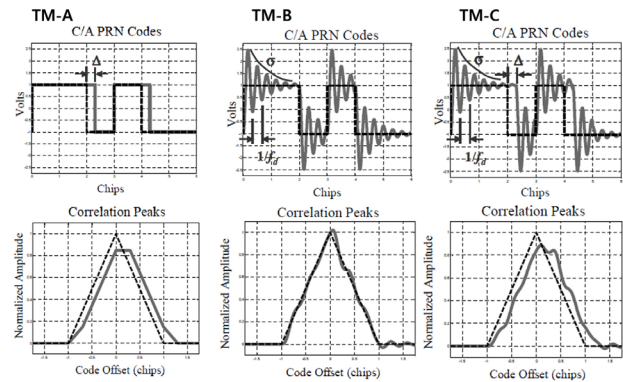


Fig. 2. EWF 2OS threat model.

monitoring으로 나누어 각각의 오류를 검증한다. 최종적으로 저장된 실제 GNSS 정보를 이용하여, 사용자가 선택한 설정 및 시나리오에 따른 오류 측정치 생성과 검증의 과정을 일련의 시뮬레이션을 통해 구현하고 결과를 분석하여 개발한 오류 생성 시스템의 타당성을 검증한다.

2. GNSS SIGNAL ERROR MODELING

2.1 EvilWave Form

EWF는 위성 탑재체의 결함으로 인한 비 이상적인 신호 현상을 일컫는다. 이러한 현상은 1993년에 유일하게 최초로 발견되었고, 50 cm 이하의 정확도를 갖는 코드 의사거리 측정치 기반 DGPS 위치 정확도에 대해 2~8 m 정도의 오차를 유발했다 (Edgar et al. 1999). EWF 발생 이후 ‘Simpler Threat Models’, ‘Most EvilWave Form (MEWF)’ 등의 다양한 모델이 제안되었지만, 본 연구에서는 2nd Order Step (2OS) 위협 모델을 기반으로 EWF 영향을 생성한다. 해당 모델은 3가지 파라미터를 사용하여 비교적 간단하게 EWF 현상을 구현할 수 있으면서 EWF에 의한 deadzones, distortions, false peaks을 나타낼 수 있다.

EWF에 의한 신호의 상관함수 왜곡현상은 PRN code에 아날로그, 디지털, 아날로그/디지털 결합의 3가지 현상으로 구분하여 Fig. 2와 같이 각각 Threat Model A, B, C (TM-A, TM-B, TM-C)로 나타낸다 (Phelts 2001). TM-A는 선형 혹은 지연에 의한 Navigation Data Unit의 결함 요소를 유발하고, TM-B 모델은 입력 신호에 대해 2차 시스템의 amplitude modulation 또는 ringing 영향을 주어 오차를 생성한다. TM-C은 TM-A와 TM-B가 결합된 형태로 2가지 특성이 결합된 상관함수의 왜곡을 유발한다. EWF에 의한 상관함수의 영향을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{EWF}(\tau) = \langle x_{EWF}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle \quad (1)$$

여기서 $R_{EWF}(\tau)$ 은 EWF의 영향을 받은 상관함수를 의미하고 괄호 $\langle, \rangle$ 과 같이 표현한다. $x_{EWF}(t)$, $x_{nom}(t - \tau)$ 은 각각 상관함수 계산을 위한 EWF 신호, 그리고 시간지연이 발생한 일반적인 신호를 의미한다. $x_{EWF}(t)$ 에 각각의 오류신호를 적용하면 식 (2), (3)과 같다.

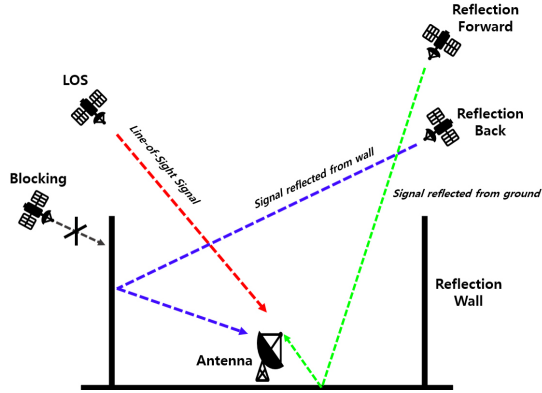


Fig. 3. Geometry-based multipath environment.

TM-A

$$R_{TM-A}(\tau, \Delta) = \begin{cases} R_{lag}(\tau) & \Delta \geq 0 \\ R_{lead}(\tau) & \Delta \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_{lag}(\tau) &= \langle x_{lag}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle \\ &= \langle x_{lag}(t) - x_{nom}(t) + x_{nom}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle \\ &= \langle x_{lag}(t) - x_{nom}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle + \langle x_{nom}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle \\ &= \langle x_{lag}(t) - x_{nom}(t), x_{nom}(t - \tau) \rangle + R_{nom}(\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $R_{lag}(\tau)$, $R_{lead}(\tau)$ 은 각각 지연과 선행 현상의 EWF에 의한 상관함수의 오류를 나타낸다.

TM-B

$$R_{TM-B}(\tau, \sigma, f_d) = h_{2nd}(\tau, \sigma, f_d) * R_{nom}(\tau) = E|_0^{\tau+T_c} - 2E|_0^{\tau} + E|_0^{\tau-T_c} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E(t) &= \int_0^t e(\alpha) d\alpha \\ &= \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t - \frac{2\sigma}{\sigma^2 + \omega_d^2} + \frac{\exp(-\sigma t)}{\sigma^2 + \omega_d^2} \left[2\sigma \cos \omega_d t + \left(\frac{\sigma^2}{\omega_d} - \omega_d \right) \sin \omega_d t \right] & t \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 σ 은 damping factor, f_d 은 damping frequency, h_{2nd} 은 2차 TM-B 시스템, 그리고 e 은 2차 TM-B 시스템의 unit step response을 의미한다.

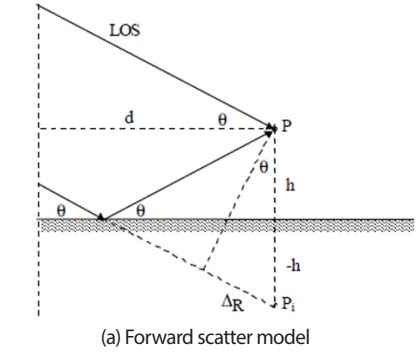
TM-C

$$R_{TM-C}(\tau, \sigma, f_d, \Delta) = h_{2nd}(\tau, \sigma, f_d) * R_{TM-A}(\tau) \quad (6)$$

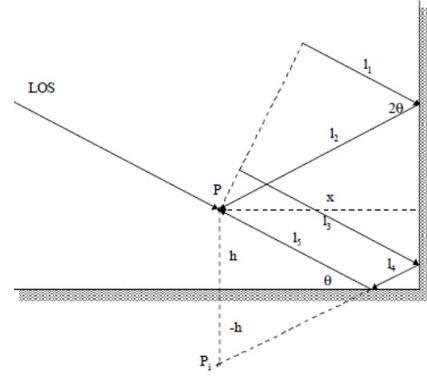
TM-C 시스템은 2차 TM-B 시스템의 입력으로 TM-A에 의한 상관함수의 결과를 사용하여 2종류의 EWF 오류원이 결합되는 형태로 생성된다.

2.2 Multipath

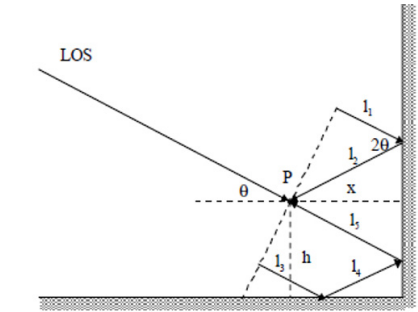
MP는 직진 신호의 반사 및 회절 된 신호의 수신으로 발생하는 오차로, 직진 신호에 해당하는 Line-of-Sight (LOS) 성분 이외의 한 개 또는 그 이상의 MP 신호들이 합쳐져 복합적인 신호의 형태로 수신된다. 본 연구에서는 MP 영향 중 수신기를 기준으로 인공



(a) Forward scatter model



(b) Backscatter model-1



(c) Backscatter model-2

Fig. 4. Geometry-based multipath model (Forward & back scatter model).

의 벽을 가상으로 생성하여 발생하는 반사파의 입력을 모델링하여 적용한다.

본 연구에서는 인공의 벽을 생성할 경우 발생할 수 있는 MP의 종류를 구분하여 Fig. 3와 같이 모델링했다. 임의의 수신기를 기준으로 인공의 벽을 가정하고 수신기를 기준으로 위성 고도각에 따른 위성 가시성을 파악한다. 그 후, 위성과 수신기의 상대적인 위치에 따라 LOS, Reflection을 결정하고 전방 산란과 후방 산란의 2가지 경우의 반사신호로 구분한다.

MP에 의한 오류 신호를 생성하기 위해 Fig. 4과 Table 1에 나와 있는 것과 같이 전방 산란과 후방 산란에 대해 구분하여 각각의 경로 지연을 같이 수학적으로 모델링한다 (Hannah 2001). Fig. 4b은 후방 산란 중 2번 반사되는 경우 벽면에서 지면으로 반사가 진행된다, Fig. 4c은 지면에서 벽면으로 반사가 진행된다. P 와 P_i 는 각각 수신기의 위치와 바닥면으로부터 반대위치의 수신기를 나타낸다. Fig. 4a의 d 는 임의의 지점에서 수신기까지의 수평거리를

Table 1. Geometry-based multipath.

Scattering types	Multipath model	
Forward Scattering	$dR_F = 2h \cdot \sin(\theta)$	(7)
Back Scattering - A	$dR_{BA} = \frac{z \cdot \cos(2\theta)}{\cos(\theta)} + \frac{z}{\cos(\theta)}$	(8)
Back Scattering - B	$dR_{BB} = \begin{cases} 2h \cdot \sin(\theta) + \frac{x \cdot \cos(2\theta)}{\cos(\theta)} + \frac{x}{\sin(\theta)} - \frac{h}{\sin(\theta)} + \frac{h}{\sin(\theta)}, \text{zone} - 1 \\ 2x \cdot \cos(\theta) - \frac{h \cdot \cos(2\theta)}{\sin(\theta)} + \frac{h}{\sin(\theta)} - \frac{x}{\cos(\theta)} + \frac{x}{\cos(\theta)}, \text{zone} - 2 \end{cases}$	(9)

나타내고, l_i 은 Fig. 4의 backscatter 모델에서 벽면의 반사에 따른 신호의 경로를 나타낸다. Table 1의 수식에서 공통적으로 θ 은 LOS 신호와 수신기간의 고도각, h 는 벽면과 수신기 사이의 수직 거리, x 는 벽면과 수신기간의 수평거리를 나타낸다. 또한, MP로 인한 신호의 수신전력은 Fresnel reflection coefficients을 고려하여 계산한다.

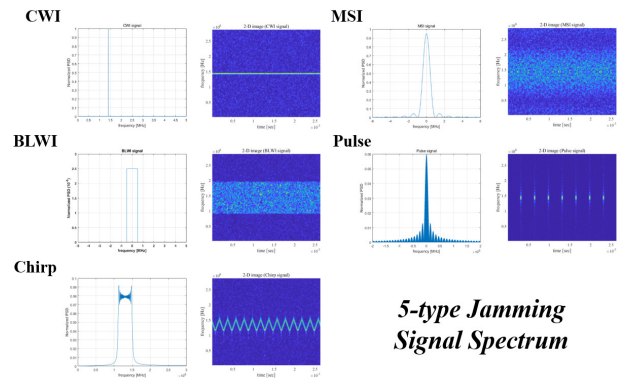
2.3 Radio Frequency Interference

일반적으로 GNSS 분야에서 언급되는 RFI 신호는 GNSS 수신기의 성능을 저하시키는 무선 통신 시스템의 신호를 의미한다. GNSS에 영향을 미치는 신호 대역폭에 따라 광대역/협대역 간섭 신호로 분류하여 Continuous Wave Interference (CWI), Pulse, Matched Spectrum Interference (MSI), Band Limited White Interference (BLWI), Chirp의 총 5가지로 기술적 측면에서 구분한다 (Kim et al. 2020). 각각의 주파수 영역 특성을 나타내는 power spectrum density와 time-frequency 2-D 영역에 대한 spectrum은 Fig. 5와 같다. 이러한 특성을 나타내는 RFI jamming 신호는 시간영역에 대해 Table 2와 같이 수학적으로 모델링 할 수 있다. 여기서, 공통적으로 P_i 은 interference power, f_i 은 interference frequency, θ_i 은 initial phase을 의미한다. BLWI에서 $n(t)$ 은 gaussian white noise, Pulse에서 $rectpuls(t, d, r)$ 은 pulse width d 와 pulse rate r 을 입력으로 사각 펄스파를 생성하는 함수다. 마지막으로 chirp에서 k 은 chirp rate을 나타낸다. 생성된 RFI 신호의 영향을 측정치에 해당하는 range와 C/N_0 로 표현하기 위해서는 jamming 신호와 기존의 GNSS 신호의 스펙트럼 영향을 분석해야 한다 (Kaplan & Hegarty 2006).

2.4 GNSS Signal and Measurement Error Generation

본 논문에서는 오류 시나리오에 따라 신호 품질을 모니터링하기 위해 correlation function, pseudo-range, C/N_0 와 같이 3가지 측면에서 오류 측정치를 생성한다. 각각의 오류 시나리오는 3가지 파라미터에 대해 오류 측정치 생성여부가 다르다. 또한, MP와 RFI의 경우 2종류 이상의 오류 측정치를 생성하지만 신호 품질을 평가하기 위해 사용되는 파라미터는 서로 다른 1개의 파라미터를 사용한다. 이에 대해서 Table 3에 본 논문에서 시뮬레이션을 통해 오류 시나리오에 따라 생성되는 오류 측정치를 정리했다.

EWf은 앞서 설명한 상관함수 형태의 왜곡을 나타내는 수식을 기반으로 상관함수에서 발생하는 오차 측정치를 곧바로 생성

**Fig. 5.** 5-type RFI spectrum and spectrogram.**Table 2.** 5-Type RFI.

Interference types	Interference model	
CWI	$J_{CWI}(t) = \sqrt{2P_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$	(10)
MSI	$J_{MSI}(t) = \sqrt{2P_i} C(t) \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$	(11)
BLWI	$J_{BLWI}(t) = n(t) \cos(2\pi f_i t + \varphi)$	(12)
Pulse	$J_{Pulse}(t) = \sqrt{2P_i} \cdot rectpuls(t, d, r) \cdot \cos(2\pi f_i t + \theta_i)$	(13)
Chirp	$J_{Chirp}(t) = \sqrt{2P_i} \sin(2\pi(f_0 + \frac{k}{2}t)t)$	(14)

Table 3. Error measurement classify about generation and monitoring.

Error - type	SQM-metric	Correlation function	Pseudo-range [m]	C/N_0 [dB-Hz]
EWf	⊗	×	×	×
MP	×	⊗	⊗	⊗
RFI	×	×	⊗	⊗

*×: No Generation, ⊗: Generation measurement, ⊗: Generation and monitoring measurement

한다.

MP의 경우 모델링을 통해 반사되는 오차 신호의 경로 지연과 수신 신호 전력이 생성되기 때문에 이를 기반으로 수신기 처리를 통한 pseudo-range의 오차를 계산해야 한다. 본 연구에서는 GPS의 BPSK 신호의 단일 반사에 대해서만 고려하고, 이 때 수신기 추적 파라미터와 오차 신호의 경로 지연 및 수신 신호 전력 성분을 통해 multipath envelope을 생성하여 range의 오차 성분을 생성한다 (Enge 1999).

RFI의 경우 C/N_0 의 오차 성분을 생성하기 위해 수신기 추적 성능을 고려해야 하지만, 기본적으로 GNSS 신호의 C/N_0 은 white noise을 가정하고 있기 때문에, nonwhite interference에 해당하는 RFI에 대한 다른 접근방법이 필요하다. 이에 대해 가상의 white noise density을 생성하여 공식화한 effective C/N_0 을 정의하여 이를 통해 오차 측정치를 계산한다. RFI에 의한 간섭 신호의 영향은 Kaplan & Hegarty (2006)을 참고하여 GNSS 수신기 측정치에 식 (15)와 같이 적용한다.

$$(C/N_0)_{eff} = (C/N_0) \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_R(f)|^2 S_S(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_R(f)|^2 S_S(f) df + C_i/N_0 \int_{-\infty}^{\infty} |H_R(f)|^2 S_I(f) S_S(f) df}$$

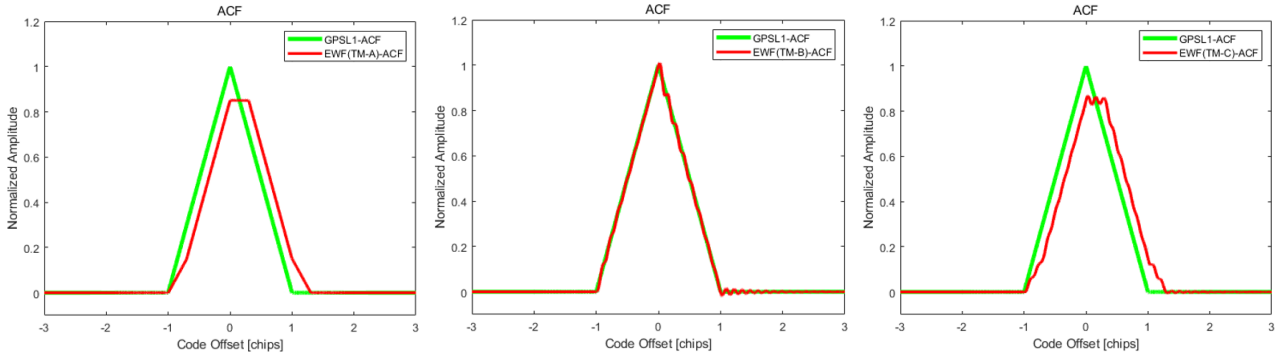


Fig. 6. EWF generation result.

$$= \frac{1}{\frac{1}{(C_s/N_0)} + \frac{C_l/C_s}{QR_c}} \quad (15)$$

여기서, C/N_0 은 RFI의 영향이 없는 반송파 대 잡음비를 나타내고, C_l 은 수신된 간섭 신호의 세기, C_s 은 수신된 신호의 세기, S_s 와 S_l 은 각각 수신된 신호와 간섭 신호의 power spectral density를 나타낸다. H_R 은 수신기 필터의 전달 함수를 의미하고, R_c 은 확산코드의 code rate를 의미한다.

수신기 처리 과정 중 code tracking의 영향은 early-late correlator의 차이를 통해 coherent integration 과정에서 발생하는 오류를 식 (16)과 같이 표현한다.

$$\sigma_{CELP} \cong \frac{\sqrt{B_n}}{2\pi \int_{-\beta_{r/2}}^{\beta_{r/2}} f S_S(f) \sin(\pi f D T_c) df} \sqrt{\int_{-\beta_{r/2}}^{\beta_{r/2}} \left[\frac{C_s^{-1}}{N_0} + \frac{C_l}{C_s} S_l(f) \right] S_S(f) \sin^2(\pi f D T_c) df} \quad (16)$$

여기서, B_n 은 code tracking loop의 bandwidth을, β_r 은 precorrelation filter bandwidth을 의미한다.

3. SIMULATION AND RESULTS

3.1 Simulation Configuration

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 GNSS 신호의 오류 측정치를 EWF, MP, RFI의 관점에서 모델링하여 생성한 후, 비교 및 분석한다. 시뮬레이션은 다중 채널을 지원하는 다중 주파수 상용 수신기 Novatel ProPak6를 통해 실시간으로 입력되는 측정치를 자체 제작한 Matlab 기반 GNSS 신호 오류 생성 시뮬레이터에 전달하여 오류의 영향이 첨가된 측정치를 생성한다. 오류 시나리오는 중첩되어 적용되지 않고 각각에 대해 선택적으로 설정 가능하다. 시뮬레이션 환경 설정에 관한 자세한 사항은 Table 4에 나타내었다.

시뮬레이션은 크게 2 종류로 나누어 수행한다. 먼저 GUI를 통해 사용자가 설정한 값에 따라 생성된 오류의 결과를 나타내고 확인하여 오류가 올바르게 적용된 것을 확인한다. 그 후, 오류 파

Table 4. Simulation configuration.

Simulation setting	Parameter
GNSS type / signal type	GPS / L1 C/A
Simulation time	900 seconds (15 minutes)
Measurement experiment	Rooftop Opensky
Receiver	Novatel ProPak6
Error measurement	Auto-correlation function, C/N_0 , pseudo-range
Error scenario	EWF, multipath, RFI

라미터를 변경해가며, 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 파라미터 변화에 따른 오류 측정치의 경향을 본 연구 진행 중 간단한 모니터링 목적으로 제작한 신호 오류 모니터링 소프트웨어를 이용하여 살펴보도록 한다.

3.2 Error Generation Result

시뮬레이션을 통해 각각의 EWF 오류를 생성한 결과는 Fig. 6와 같다. 시뮬레이션에 사용되는 GNSS 수신기는 correlation function에 관련된 값을 출력하지 않기 때문에, 본 연구에서는 시뮬레이터를 통해 하드웨어 수신기 성능에 맞는 이상적인 Auto-correlation function 값을 생성하여 임의의 noise를 추가해 correlation function의 측정치를 생성한 후, 식 (1-6)에 따라 EWF 오류를 생성한다. Fig. 6a의 TM-A은 0.3 delta chips 만큼의 오류를 생성했고, Fig. 6b의 TM-B은 2 Mnepers/s damping factor, 8 MHz damping frequency 영향을 주어 오류를 생성한 결과다. Fig. 6c는 Figs. 6a와 6b의 영향을 결합하여 생성한 EWF의 correlation function 결과를 나타낸다.

결과를 살펴보면, TM-A의 경우 2OS-model에 따른 deadzones이 상관함수의 정점부근에서 나타나고, 이와 함께 상관함수의 정점이 이동된 것을 확인할 수 있다. Delta chips의 값이 커질수록, 이상적인 ACF 대비 정점값과 code offset 변화량이 증가한다. TM-B은 2차의 아날로그 오류가 첨가되어, 상관함수에서 진동효과가 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 진동의 크기와 진동의 주파수 조절을 통해 왜곡된 형태를 조정할 수 있다. Damping factor은 오류 진동의 감쇠율을 나타내기 때문에 값이 작을수록 ACF 오류를 크게 야기하지만, damping frequency의 경우 단순히 수치의 크기에 따라 ACF 오류 정도를 일반화할 수 없다. TM-C은 TM-A와 TM-B의 결과가 결합되어 deadzones과 distortions, 그리고 false peak등 모든 현상이 확인되는 것을 알

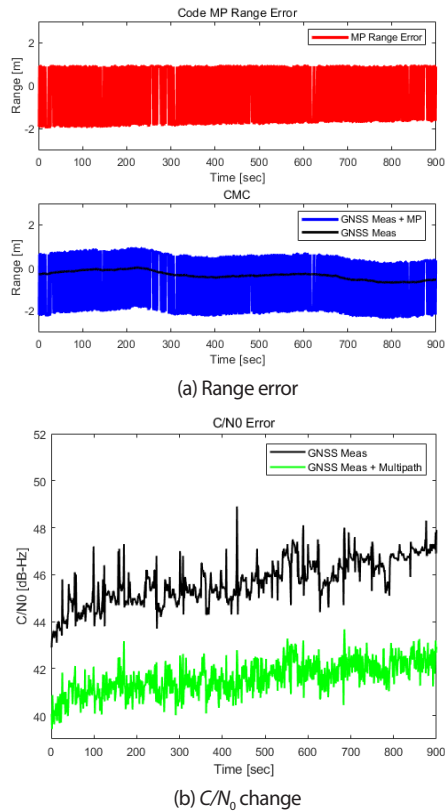


Fig. 7. MP generation results.

수 있다. ACF의 형태는 왜곡이 가장 심한 모습을 보이지만, 실제로 SQM을 수행할 때는 모든 ACF function 값에 대해 비교를 수행할 수 없기 때문에 검증 결과는 실제 ACF 오류 영향과 완전히 일치하지는 않는다.

MP의 경우 인공의 벽을 생성하여 반사 및 회절 신호의 영향을 분석하는 Geometry model을 이용하여 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. Fig. 7a는 BPSK modulation에서 path delay에 따른 code phase error를 보여준다. 해당 결과는 correlator spacing 1의 값을 갖는 BPSK MP envelope을 통해 range error를 생성한다. Fig. 7a 위의 빨간색으로 나타낸 결과는 시뮬레이션을 통해 생성된 range error이다. Fig. 7a 아래의 파란색은 code phase와 carrier phase의 차이를 나타내는 CMC의 envelope function을 수신기로부터 측정된 값과 MP 오류가 추가된 결과를 비교하여 나타낸 그래프다. GNSS 수신기 측정치 기반의 CMC는 큰 변화량 없이 0 근방의 일정수준 range error를 보여주지만, 시뮬레이션을 통해 생성된 MP의 영향은 2.5 m 크기의 envelope 형태 변화량을 보여준다. Fig. 7b는 반사파의 Fresnel reflection coefficients를 고려하여 MP 신호의 영향을 원본 C/N_0 값에 추가한 결과를 나타냈다. MP에 의한 C/N_0 의 변화량은 기존의 측정치에서 약 3 dB-Hz 정도의 일정 수준 bias와 함께 variance 영향이 추가된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 RFI에 해당하는 CWI, Pulse, BLWI, Chirp에 의해 생성된 오류 측정치를 나타낸다. 중간주파수를 0.4 MHz로 설정하여 기존의 GNSS 신호와 간섭신호 간의 스펙트럼이 겹쳐 영향이 상당히 강하게 나타난다. 각각의 오류에 대한 파라미터 설정값

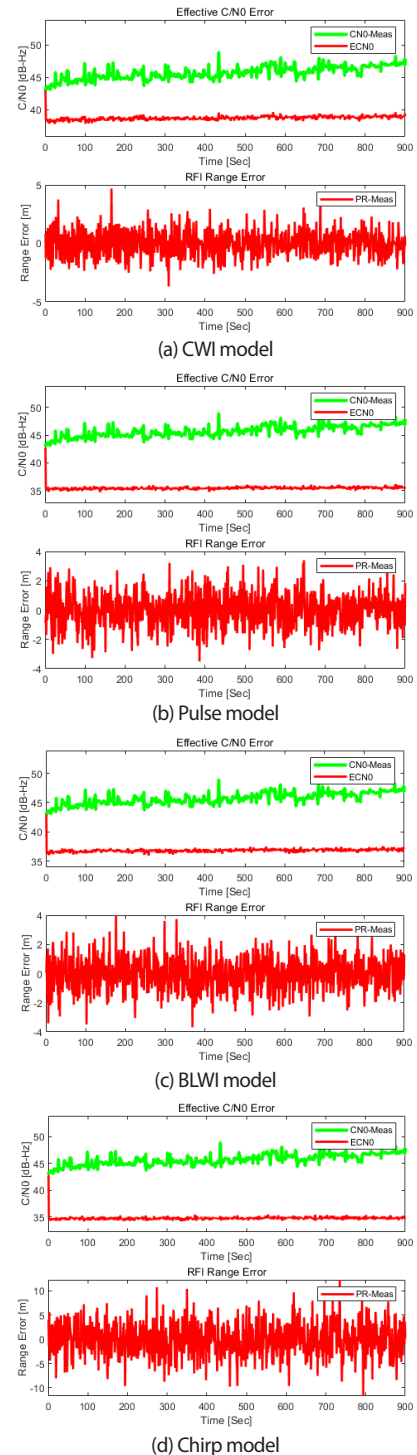


Fig. 8. 5-type RFI generation results.

은 공통적으로 I/S 을 40으로 하였다. 또한, 중간주파수를 GNSS와 동일하게 설정했다. 개별적으로 각 RFI에 대한 설정은 Chen (2014)을 참고하여 다음과 같이 설정했다. CWI는 0.6 MHz offset frequency를 갖고, Pulse는 3000 pulse per second와 100 MHz을 주기로 설정하였다. BLWI는 2 MHz 만큼의 대역폭을 설정했고, Chirp은 1000 MHz의 주기와 0.01 second만큼의 sweep time으로

Table 5. TM-B delta metric with damping frequency.

EWF model	Parameter	Value					
TM-A	DeltaChips	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	Delta	0.0323	8.1123	18.0155	19.0310	20.2410	21.5947
	DeltaChips	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	Ratio	0.0287	5.5785	10.6189	9.8052	8.9632	7.9475
TM-B	Damp factor [Mnepers/s]	0	1	2	3	4	5
	Delta [unitless]	0.0323	4.3241	4.8679	5.3890	5.5930	5.7444
	Damp factor [Mnepers/s]	0	1	2	3	4	5
	Ratio [unitless]	0.0287	5.0938	4.4246	4.6986	4.8034	4.8997
	Damping freq [MHz]	0	4	6	8	10	12
	Delta [unitless]	0.0323	4.8635	4.3266	4.0073	3.7345	3.5334
	Damping freq [MHz]	0	4	6	8	10	12
	Ratio [unitless]	0.0287	4.4360	2.7814	2.3582	2.0086	1.7684

변조된다. 간섭신호에 영향 정도를 나타내는 수치로 Q-factor을 정의하여 사용할 수 있다 (Kaplan & Hegarty 2006). Q-factor의 크기는 작을수록 간섭 신호의 스펙트럼 영향력이 크고 그 결과 생성되는 C/N_0 오류로 인한 Effective C/N_0 값의 변화량이 커진다. 각각의 Q-factor은 CWI은 3.6398, BLWI은 2.1554, Pulse은 1.4950, Chirp은 1.2730 값을 갖는다.

3.3 Verification

3.3.1 EWF verification

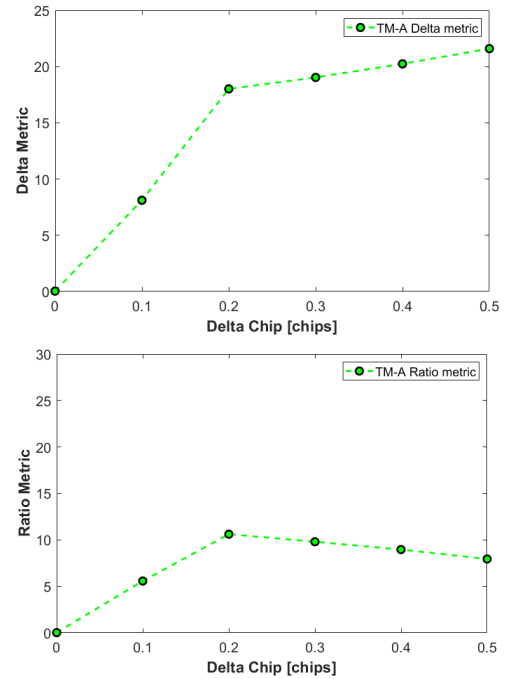
본 논문에서는 EWF 오류 검증을 위한 metric으로 대칭성 검사를 위해 correlator 값의 차이를 이용하는 ‘delta test’와 correlator 값의 비율을 이용하는 ‘ratio test’를 이용한다. ‘ratio test’와 ‘delta test’를 이용하면 왜곡된 상관함수를 통해 오류 신호의 존재를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 correlation function의 peak을 7 tracking pair와 0을 기준으로 0.05, 0.075, 0.1 chip correlator spacing을 선정하여 해당 점에서 대칭성 검사를 통해 오류 존재를 확인한다. EWF 상관함수의 비대칭성 이상을 감지하기 위해 이용한 metric은 식 (17), (18)과 같다.

$$R_{avg,P} = \frac{I_{early} + I_{late}}{2 \cdot I_{Prompt}} \quad (17)$$

$$\Delta_m = \frac{I_{early} - I_{late}}{2 \cdot I_{Prompt}} \quad (18)$$

여기서, $R_{avg,P}$ 은 ratio metric, Δ_m 은 delta metric을 나타내고, I 는 상관함수의 correlation measurement 값을 prompt을 기준으로 correlator spacing 만큼 움직인 값을 의미한다.

식 (17), (18)의 결과에서 ‘ratio test’와 ‘delta test’를 위해 계산한 correlator spacing point에 따른 ratio와 delta 값 계산식을 나타낸다. Fig. 9은 EWF 중 TM-A의 파라미터 delta chip을 변경해가며 metric을 적용한 결과를 나타낸다. 주어진 결과를 통해 EWF TM-A에 의한 오류 영향이 수치적으로 확연히 드러나는 것을 알 수 있다. Table 5에 주어진 결과를 살펴보면, TM-A에 대해 검출 기준을 1 근방으로 설정할 경우 오류가 생성되지 않는 경우와 시뮬레이션을 통해 오류를 생성했을 때 충분히 검출 가능한 수치가 확인된다. TM-A은 delta chip의 증가에 따라 peak 값의 크기

**Fig. 9.** TM-A Delta & ratio metric.

가 작아지고, 정점이 평평한 deadzone 영역이 넓어진다. 이러한 영향에 따라 20개의 correlator spacing pair의 값을 식 (17), (18)에 따라 계산한 후, Phelts (2001)을 참고하여 검출 기준으로 정규화 하면 Fig. 9와 같은 경향을 보인다. TM-A의 delta test는 최소 8.1123에서 최대 21.5947로 delta chip의 변화에 따라 계속해서 증가하는 경향을 보인다. Ratio test의 경우 증가 후 감소하는 경향을 보이지만 최소 5.5785의 값을 갖기 때문에 충분한 threshold을 통해 EWF 검출이 가능하다. Ratio metric의 경우 early/late correlator spacing point의 합으로 계산이 되는데, delta chip의 값이 0.2 근방에서는 검증을 위한 correlator spacing 범위안에서 평형구간을 유지하기 때문에 0.1에 비해 검출 metric 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 0.3 delta chip 이상 구간에서는 우측으로 이동한 상관 함수의 평형구간안에서 대칭성 검사가 이루어지는데 식 (17)에서 알 수 있듯이 상관함수의 I_{Prompt} 값으로 나누어지기 때문에, delta chip이 증가할수록 TM-A의 정점이 감소하는 특성에 의해 metric 값이 조금씩 감소한다.

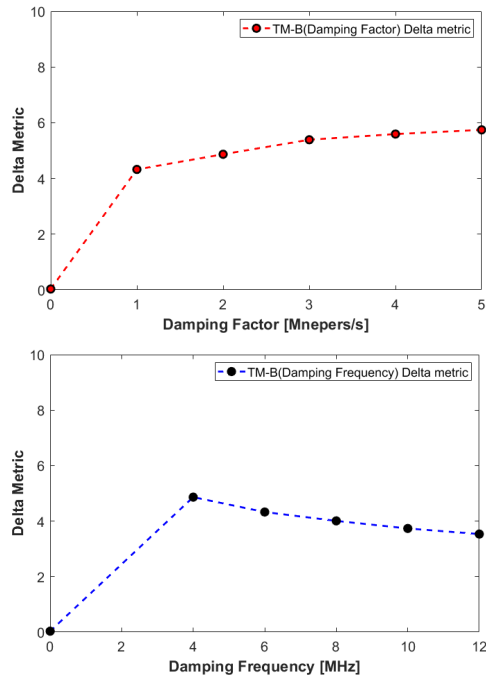


Fig. 10. TM-B Delta metric.

Figs. 10과 11은 TM-B에서 각각 delta metric과 ratio metric을 적용한 결과를 그래프로 나타낸다. Table 5에서는 TM-B의 파라미터에 해당하는 damping factor와 damping frequency에 변화에 따른 시뮬레이션 수치적 결과를 나타낸다. damping factor와 damping frequency는 각각의 시뮬레이션에 따라 1와 6 MHz로 고정시켜 진행했다. TM-B은 두 파라미터의 관계에 따라 correlation function에서 발생하는 진동의 형태가 미세하게 달라지기 때문에 metric 경향을 확정적으로 결정짓기 어렵다. Damping frequency의 변화에 따른 delta test와 ratio test결과 모두 증가 후 감소하는 경향을 보이지만, 이는 시뮬레이션의 시작지점이 4 MHz이기 때문에 사실상 시뮬레이션 구간동안 지속적으로 감소한 형태다. TM-B의 경우 상관 함수의 우측이 좌측에 비해 상대적으로 왜곡이 심한 특성을 보인다. 이 때, damping frequency가 증가할수록 우측의 왜곡이 상대적으로 작은 범위에서 빠르게 움직이기 때문에 delta & ratio metric 모두 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 때 ratio test의 경우 최소 1.7684를 갖기 때문에 최소값보다 큰 threshold 설정이 필요하다. Damping factor의 변화에 따른 metric의 특정 경향은 없지만 최소값이 4.4246이기 때문에 EWF 검출이 충분히 가능하다. 해당 검출 metric은 correlator spacing pair 개수의 제한이 있기 때문에, EWF 오류의 경향을 완벽히 설명할 수 없지만 EWF 영향이 없는 수신기 측정치의 ratio test와 delta test 값이 각각 0.0549, 0.0285이기 때문에 오류 모니터링이 가능하다.

3.3.2 MP verification

본 연구에서 사용하는 MP의 수학적 모델링에서는 Table 1의

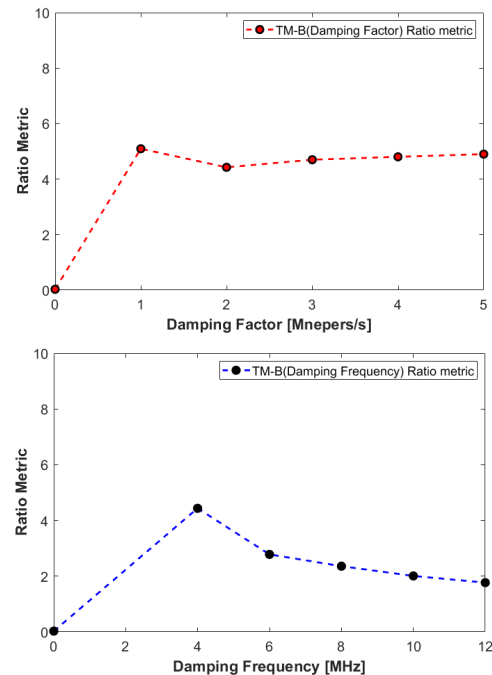


Fig. 11. TM-B ratio metric.

식 (7-9)에서 알 수 있듯이, 수신기와 위성 간의 고도각이 경로 오차에 주된 영향을 미친다. 수신기를 기준으로 생성한 임의의 벽을 통해 위성의 고도각을 통해 먼저 가시성을 판별한 후, 산란 효과를 적용시키기 때문에, 일정 수준 이상의 고도각에서 신호가 수신될 수 있고, 또한 일반적으로 알려진 고도각이 클수록 MP의 영향이 작아지는 현상이 적용되어야 한다. 따라서, 동일한 조건에서 고도각을 변화시켜가며 MP의 range error 및 C/N_0 error에 대한 모니터링에 대해 Fig. 12, Table 6과 같은 결과를 얻었다. 해당 결과는 앞선 Fig. 7과 같은 결과에서 기존의 GNSS 수신기를 통한 측정값에 대해 특정 고도각에서 일정시간 동안 평균적으로 발생한 envelope의 크기를 통해 range error와, bias 값을 통해 C/N_0 error를 계산했다.

주어진 결과를 살펴보면, 수신기와 장애물, 그리고 위성의 기하학적 배치를 고려했을 때, 고도각 45° 미만에서는 위성이 차단되어 관측되지 않기 때문에 이 때 path delay에 의한 range error는 전혀 발생하지 않고, C/N_0 error 또한 수신되는 신호가 없도록 결과를 생성한다. 그 후에 나타나는 경향은 일반적인 GNSS 신호 특성과 같이 고도각이 높을수록 MP에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. C/N_0 error의 경우 수신되는 고도각 중 가장 낮은값인 45° 에서 3.7187 dB-Hz의 오차가 발생했고, 최대 70° 에서 1.0996 dB-Hz의 오차가 발생했다. 평균적으로 5° 가량의 고도각 변화에 따라 0.436 dB-Hz 만큼의 변화량을 보여준다. range error의 경우 유사하게 최대 0.5639 m, 최소 0.0932 m의 오차와 평균적으로 고도각 변화에 따라 0.078 m 정도의 오차 변화량을 갖는다. 주어진 결과를 통해 고도각에 따른 MP의 영향이 올바르게 적용되는 것을 확인할 수 있고, 실제 MP 모니터링은 Irsigler (2008)을 참고하여 CMC 분석을 수행하면 검출이 가능하다.

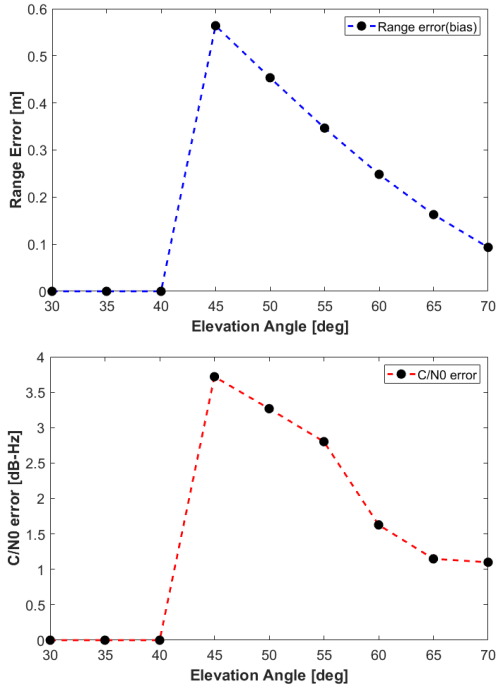


Fig. 12. Multipath metric about elevation angle.

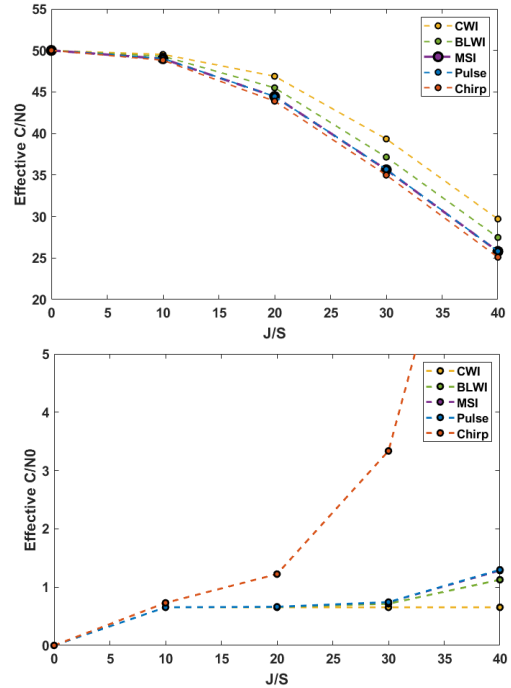


Fig. 13. RFI metric about J/S.

Table 6. MP range error & C/N_0 changes with elevation angle.

Elevation [deg]	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°
Error value									
C/N_0 change [dB-Hz]	block	block	block	3.7187	3.2677	2.8018	4.6273	1.1480	1.0996
MP range error [m]	block	block	block	0.5639	0.4534	0.3465	0.2483	0.1628	0.0932

Table 7. Effective C/N_0 with different J/S of RFI.

J/S	10	20	30	40
Type				
CWI	49.5204	46.8915	39.3392	29.7005
BLWI	49.2983	45.4991	37.1543	27.4769
MSI	48.9959	44.4533	35.6322	25.7987
Pulse	49.0272	44.4540	35.6782	25.8170
Chirp	48.8211	43.8883	34.9850	25.0997

Table 8. Range sigma error with different J/S of RFI.

J/S	10	20	30	40
Type				
CWI	0.6533	0.6533	0.6535	0.6558
BLWI	0.6539	0.6597	0.7148	1.1265
MSI	0.3542	0.6626	0.7409	1.2837
Pulse	0.6541	0.6628	0.7432	1.2971
Chirp	0.7306	1.2234	3.3356	10.3645

3.3.3 RFI verification

본 논문에서는 RFI를 5가지 모델로 나누었고, 각각은 대역특성에 따라 GNSS 신호에 주는 영향에 차이가 발생한다. 앞선 3.2 절의 결과를 통해 GNSS 신호와 RFI간의 스펙트럼 간섭 정도에 따라 jamming의 영향력을 나타내지만, 생성 파라미터의 변화에

따라 이러한 영향력은 다소 달라질 수 있다. 주어진 Tables 7과 8, 그리고 Fig. 13은 전체 RFI 신호에서 재밍 신호의 세기를 나타내는 J/S 의 변화에 따른 의사거리 및 수신전력에 측정치에 대한 영향을 나타낸다. 각각의 재밍 설정 파라미터는 3.2절의 시뮬레이션과 동일하다. C/N_0 의 값을 50 dB-Hz로 동일하게 설정한 후, 식 (15)와 (16)을 바탕으로 J/S 의 값을 10 dB ~ 40 dB까지 변화에 따른 *effective* C/N_0 와 range error bias를 계산했다. J/S 가 증가함에 따라 RFI 스펙트럼의 영향이 커져 오류 측정치의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. J/S 는 10 dB ~ 20 dB에서는 그 영향이 크게 뚜렷하지는 않지만, 30 dB 이상에서는 영향이 뚜렷하게 나타난다. 또한, 앞선 스펙트럼의 영향을 고려한 Q-factor의 크기에 비례하여 재밍 영향도가 나타나는 것을 주어진 결과를 통해 확인할 수 있다. 영향력이 가장 큰 chirp의 경우 *effective* C/N_0 경향을 살펴보면 10 dB에서 20 dB로 증가할 때는 C/N_0 의 감소량이 4.9328 dB-Hz에 불과하지만 20 dB에서 30 dB, 그리고 30 dB에서 40 dB로 J/S 가 증가할 경우 각각 8.9 dB-Hz, 9.8853 dB-Hz로 변화량이 계속 증가하는 것을 알 수 있다. RFI에서는 모니터링 기법으로 스펙트럼을 활용한 방법뿐만 아니라 C/N_0 의 크기에 따라 오류 영향 검증이 가능하다 (Thompson 2010). range error sigma에 대한 결과의 경우 chirp 오류에 대해 상당히 큰 영향이 두드러진다. 다른 오류들의 경우 40 dB-Hz에서 0.5 ~ 1 m 수준의 오류 영향이 보이는 반면 chirp의 경우 10 m에 달하는 오류 결과를 나타낸다.

식 (16)을 확인해보면, range error에 해당하는 결과는 주파수 영역에서 GNSS와 RFI 신호 스펙트럼의 영향을 계산한다. 해당 결과는 본 연구에서 사용한 5가지 종류의 jamming 신호 각각을 특징짓는 파라미터의 변화에 따라 주파수 영역 스펙트럼의 오류 영향이 달라지기 때문에 이에 대한 분석이 필요하지만, 이는 추후 연구에서 다루도록 한다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 GNSS 항법신호 오류 모델링 및 생성 소프트웨어 개발을 위해 오류원에 대한 이론적 모델링을 수행하고, MATLAB 시뮬레이터를 통해 생성된 결과를 분석하여 타당성을 검증했다. 오류 시나리오는 EWF, MP, RFI으로 EWF는 2OS model을 적용하여 TM-A, TM-B, TM-C의 3가지 종류로 구분하고 이에 따른 상관함수 형태의 왜곡을 생성했다. MP의 경우 수신기 기준으로 인공의 벽을 생성하여 수신기와 위성 간의 고도각에 따라 발생하는 산란효과를 적용하여 반사파를 생성 후 이에 따른 단일 반사 MP 현상을 구성했다. 오류 측정치는 MP에 의한 path delay를 correlator spacing에 따라 code & carrier phase error 형태로 생성하고, 그에 따른 반사계수를 고려하여 수신 신호 전력 변화량을 계산했다. RFI은 주파수 대역에 따라 GNSS 신호에 영향을 미치는 대표적인 5가지 종류를 모델링 한 후, 각각의 영향을 스펙트럼 관점에서 분석하여 적용했다. 시뮬레이션을 통한 오류 측정치는 실제 GNSS 측정치 중 모니터링에 주요 사용되는 correlation function, pseudo-range, SNR (C/N_0)의 관점에서 변화를 유발하여 생성했다. 또한, 생성된 오류 측정치의 타당성을 살펴보기 위해 오류 생성에 사용되는 파라미터에 변화를 주면서 오류 측정치 결과를 분석했다. 상용 수신기를 통해 실시간으로 기록된 GNSS 데이터를 이용한 시뮬레이션 결과, 오류 신호 존재 유/무에 따른 신호 측정치의 변화를 확인했다. 각각의 오류 시나리오는 파라미터 변화에 따른 오류 측정치를 수치적 검증을 통해 실제 해당 시뮬레이터의 유효성을 확인했다. 본 논문의 결과물은 SBAS 기준국 수신기에 신호 오류를 인가하여 실험함으로써 실제 오류 신호 발생 환경을 구성하고, KASS 기준국의 GNSS 신호 오류 모니터링을 위한 알고리즘 검증 및 대응 수단으로 활용할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 해양수산부 해양안전 및 해양교통기반시설 기술개발사업의 연구비지원 (20150486)에 의해 수행되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, G.-H.J., J.-Y.C. and J.-H.W.; methodology, G.-H.J., J.-Y.C. and J.-H.W.; software, G.-H.J.; validation, G.-H.J. and J.-H.W.; formal analysis, G.-H.J.;

investigation, G.-H.J.; writing—original draft preparation, G.-H.J.; writing—review and editing, J.-H.W.; visualization, G.-H.J.; supervision, J.-H.W.; project administration, J.-H.W.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest

REFERENCES

- Chen, X. 2014, Modelling of GNSS Challenged Environment in Semi-Analytical Simulator, Master's Thesis, Institute of Space Technology and Space Applications, University of Federal Armed Forces Munich
- Dovis, F. 2015, GNSS Interference Threats and Countermeasures (Norwood, MA: Artech House)
- Edgar, C., Czopek, F., & Barker, B. 1999, A Co-operative Anomaly Resolution on PRN-19, In: Proceedings of the ION GPS 1999, Institute of Navigation, Nashville, TN, 14-17 Sep 1999, pp.2269-2271.
- Enge, P. 1999, Local area augmentation of GPS for the precision approach of aircraft, in Proceedings of the IEEE, 87, 111-132. <https://doi.org/10.1109/5.736345>
- Gao, G. X., Sgammini, M., Lu, M., & Kubo, N. 2016, Protecting GNSS Receivers from Jamming and Interference, in Proceedings of the IEEE, 104, 1327-1338. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2525938>
- Hannah, B. M. 2001, Modelling and simulation of GPS multipath propagation, PhD Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane
- Irsigler, M. 2008, Multipath Propagation, Mitigation and Monitoring in the Light of Galileo and the Modernized GPS, PhD Thesis, University FAF Munich, Neubiberg, Germany
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc)
- Kim, H-P. & Jin, G-G. & Won, J-H. 2020, GNSS cloud-data processing technique for jamming detection identification and localisation, IET Radar Sonar Navigation, 14, 1143-1149. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0518>
- Krach, B., Lehner, A., & Steingass, A. 2007, Technical Note on the Implementation of the Land Mobile Satellite Channel Model - Software Usage, German Aerospace Center DLR DLR-KN-FS-02-07 2 DLR
- Mitelman, A. -M. 2005, Signal Quality Monitoring For GPS Augmentation Systems, Ph.D Thesis, Stanford

University

- Pagot, J. -B. 2016, Modeling and monitoring of new GNSS Signal distortions in the context of civil aviation, Ph.D dissertation, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)
- Phelts, R. E. 2001, Multicorrelator Techniques for Robust Mitigation of Threats to GPS Signal Quality, Department of Mechanical Engineering, Ph.D Thesis, Stanford University
- Pirsiavash, A., Broumandan, A., & Lachapelle, G. 2017, Characterization of Signal Quality Monitoring Techniques for Multipath Detection in GNSS Applications, *Sensors*, 17, 1579. <https://doi.org/10.3390/s17071579>
- Raimondi, M., Sénant, E., Fernet, C., Pons R., & AlBitar, H. 2012, Generating Evil WaveForms on Galileo signals using NAVYS, 2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Noordwijk, Netherlands, 5-7 Dec. 2012, pp.1-8, <https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2012.6423071>
- Thompson, R. J. R., Wu, J. H., Balaei, A. T., & Dempster, A. G. 2010, Detection of RF interference to GPS using day-to-day C/No differences, In *Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS*, Taipei, Taiwan, 26-28 October 2010.
- Zhuang, C., Zhao, H., Sun., C & Feng, W. 2020, Detection and Classification of GNSS Signal Distortions Based on Quadratic Discriminant Analysis, in *IEEE Access*, 8, 25221-25236. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965617>



Gun-Hoon Ji received an MSc. Degree in the Department of Electrical and Computer Engineering from Inha University, Korea, in 2021. He is currently working with Samsung Electronics. His research interests include GNSS receiver signal processing, navigation, and SSV.



Jong-Yeoun Choi is the principal researcher at Korea Aerospace Research Institute, Korea. He received his B.S. and M.S. degrees in the Department of Electronics Engineering from Kyungpook National University, Korea, in 1992 and 1995. Also, he received the Ph.D. degree from Chungnam National University, Korea, in 2011. His research interests include satellite system development and satellite navigation

including GNSS, SBAS.



Jong-Hoon Won received a Ph.D. degree from the Department of Control Engineering at Ajou University, Korea, in 2005. He then worked with the Institute of Space Technology and Space Applications at the University Federal Armed Forces (UFAF), Munich, Germany. He was nominated as Head of the GNSS Laboratory in 2011 at the same institute, and he has been involved in lectures on advanced receiver technology at the Technical University of Munich (TUM) since 2009. He is currently an assistant professor in the Department of Electrical Engineering at Inha University. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target tracking systems, and self-driving cars.

