

고정밀 위성항법서비스의 무결성 감시 방안 분석

Analysis on the Integrity Monitoring Methods of High Accuracy Service of Global Navigation Satellite Systems

손표웅¹ · 박슬기² · 박상현² · 신유진³ · 송재영⁴ · 김의호^{5*}

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, ²해양PNT연구단, ³홍익대학교 자율주행·지능로봇
⁴홍익대학교 기계공학과, ⁵홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Pyo-Woong Son¹ · Sul Gee Park² · Sang Hyun Park² · Yujin Shin³ · Jaeyoung Song⁴ · Euiho Kim^{5*}

¹Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea; ²Maritime PNT Research Office, Daejeon 34103, Korea; ³Autonomous Vehicle & Intelligent Robotics Program, Hongik University, Seoul 04066, Korea; ⁴Department of Mechanical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea; ⁵Department of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Korea

[요 약]

육상에서 자율주행차량이 본격적으로 개발됨에 따라 해상에서도 자율주행선박에 대한 국제적 논의가 계속되고 있고, 국제해사기구(IMO; International Maritime Organization)에서는 위성항법시스템을 이용해 10 cm 이하의 위치 정확도를 무결성 감시 기능과 함께 보장하도록 권고하고 있다. 10 cm 이하의 위치 정확도 성능을 제공하기 위해서는 위성신호의 반송파를 기반으로 고정밀 보정정보를 사용해야 한다. 또한 이에 대한 무결성을 감시하기 위해서는 각 보정정보 생성 과정에서 발생하는 오차를 overbounding 할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 현재 운용되고 있는 고정밀 위성항법서비스 무결성 감시 방안에 대해 분석한다. 또한 미국에서 운용 중인 위성 기반의 광역보강시스템(WAAS; wide area augmentation system)의 무결성 감시기법을 분석하고, 해양 지역에서의 고정밀 위성항법서비스의 무결성 감시 방안을 도출하였다.

[Abstract]

International Maritime Organization (IMO) recommends maintaining a positioning accuracy of global satellite navigation system (GNSS) within the range of 10 cm and monitoring its integrity. In order to provide the positioning accuracy of 10 cm or better, high-precision correction information must be used based on the carrier phase of the satellite signal. Furthermore, in order to monitor the integrity of this, the errors should be overbounded in the process of generating correction. In this paper, we analyze the GNSS integrity monitoring methods in high-precision position service currently in operation. The integrity monitoring technique of the wide area augmentation system (WAAS) of the U.S. is studied. As a conclusion, we propose the integrity monitoring method of Korean high-precision GNSS service in maritime area.

Key word : Maritime PNT service, GNSS, Augmentation system, Integrity, High accuracy positioning service.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.2.143>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 9 March 2021; Revised 12 April 2021
Accepted (Publication) 28 April 2021 (30 April 2021)

*Corresponding Author : Euiho Kim

Tel : +82-2-320-1636

E-mail: euihokim@hongik.ac.kr

1. 서론

위성항법시스템(GNSS; global navigation satellite system)은 상대적으로 작고 가벼운 장치만을 이용해 사용자에게 PNT(position, navigation, and timing) 정보를 제공함으로써, 많은 분야에서 관련 응용서비스를 발전시켜왔다 [1]. 특히 육상과 항공분야에서는 활발하게 연구되고 있는 자율항법 시스템에 필수적인 위치 및 시각 정보를 제공하는 역할을 하고 있다. 해상분야에서도 자율항법시스템 개발에 관한 논의가 활발하게 이뤄지면서, 국제해사기구(IMO; International Maritime Organization)에서는 자율항법시스템을 위한 위성항법시스템의 요구 성능을 정확도, 가용성, 연속성, 무결성 측면에서 정립하고 권장하고 있다 [2].

현재 우리나라의 해양지역에서는 수 미터 이내의 위치정확도와 무결성 감시기능을 제공하는 DGNSS(differential GNSS) 서비스가 운영되고 있지만, 자율항법시스템을 위해 IMO에서 요구하는 95% 오차범위 내의 10 cm 위치정확도 조건을 만족하기는 어렵다 [3]. DGNSS 정보는 위성항법시스템 신호의 코드 정보를 활용한 위치 결정방법에 사용되는 것으로, 10 cm 수준의 정밀한 위치정확도 확보를 위해서는 신호의 반송파 정보를 활용하여 위치 계산을 해야 한다. 그렇기 때문에 고정밀 위치 계산을 위한 보정정보 또한 반송파 기반으로 생성해야 한다.

자율항법시스템과 같이 사용자의 안전이 매우 중요한 시스템에서는 항법시스템에게 단순히 높은 수준의 위치 정확도만을 요구하는 것은 아니다. 수신기가 계산한 위치 정보를 신뢰할 수 있는지 판단하는 무결성 감시기능이 함께 지원되어야 한다 [4]. 현재 운용 중인 고정밀 위성항법시스템의 무결성 감시 서비스로는 미국의 GPS(global positioning system)에 대한 WAAS(wide area augmentation system)와 유럽의 Galileo에 대한 EGNOS(european geostationary navigation overlay service)가 있다 [5],[6]. 유럽과 미국에서 운용 중인 보강항법시스템은 코드 정보 기반의 서비스이지만, 오랜 시간 다양한 연구를 통해 감시 기법에 대한 검증이 진행되었고, 반송파 기반의 보강서비스에서도 상당부분 응용이 가능할 것으로 기대된다.

해양 PNT 연구단에서는 우리나라 전 해상지역(해안으로부터 100 km 이내)에서 자율항법시스템을 위해 IMO가 요구하는 센티미터급 정밀 PNT 정보를 제공할 수 있도록 연구개발하고 있다. 본 논문에서는 센티미터급 정밀 PNT 서비스의 무결성 감시를 위하여, 기존의 WAAS의 무결성 감시기법에 대해 분석하였다. 또한 두 시스템에 대한 분석을 통해 국내에서 개발하고 있는 센티미터급 정밀 PNT 서비스의 무결성 감시 기능 개발 방안을 도출하였다.

II. GNSS의 무결성 감시 방안

2-1 무결성 위협 요소 정의

GNSS의 무결성을 감시하기 위해서는 항법계 결과에 영향을 미칠 수 있는 정보들을 파악하고 오류를 확인할 수 있어야 한다. 일반적으로 잘 알려져 있는 GNSS의 무결성 위협요소로는 GPS 위성의 시각오차, 궤도오차, 코드-반송파 발산오차, 주파수간 편이, 이온층 보정정보 오차, 대류층 보정정보 오차, 기준국 수신기 시계 오차 등이 있다 [5]. 무결성 보장에 관한 요구조건 만족을 위해 각 요소들의 위협 모델을 확률적으로 도출하는 것이 필요하고, 이를 위해 많은 데이터를 수집하는 것이 필요하다.

2-2 무결성 위협 확률 도출

무결성 위협확률은 시스템에서 고장이 발생하였을 때, 감시자가 이를 발견하지 못한 상태에서 사용자의 위치 오차가 정해진 한계 범위 이상의 값을 가질 확률을 의미한다. 이를 식으로 표현하면 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{LOI} \geq P_{PL} \times P_{MD} \times P_{prior} \quad (1)$$

여기서, P_{LOI} 는 the probability of loss of integrity, P_{PL} 는 the probability of protection level violation, P_{MD} 는 the probability of missed detection, P_{prior} 는 the probability of satellite failure 이다.

IMO에서는 선박을 위한 위성항법시스템의 무결성 위협에 관해 P_{LOI} 가 3시간 동안 10^{-5} 이하의 값을 갖도록 요구하고 있다 [1]. 만약, 위성항법시스템의 고장 확률이 10^{-5} 보다 낮다면, P_{PL} 과 P_{MD} 값과 상관없이 시스템 요구사항을 만족시킬 수 있다. 하지만 P_{prior} 가 10^{-5} 이하라면, P_{LOI} 가 10^{-5} 이하의 값을 갖도록 P_{PL} , P_{MD} 의 값을 제어해야 한다. 일반적으로 시스템 고장확률이 무결성 요구조건보다 크기 때문에 본 논문에서는 P_{prior} 가 10^{-5} 이하인 상황을 가정하였다.

P_{PL} 은 사용자의 실제 위치 오차가 사용자가 계산한 보호수준을 초과하는 확률을 의미하는데, 보호수준을 과하게 보수적으로 설정하면 보호수준이 사용자 경보 한계수준을 초과하는 경우가 빈번해지고, 항법시스템의 가용성이 떨어지게 된다. 하지만 보호수준을 충분히 보수적으로 설정하지 않는다면 P_{PL} 이 높아지고, 결과적으로 P_{LOI} 가 높아지게 된다. 그렇기 때문에 적절한 보호수준을 설정하는 것이 중요하다.

P_{MD} 을 무결성 요구조건에 맞게 제어하기 위해서는 시스템 고장 유무를 판단하는 기준을 정해야 한다. 시스템 고장 유무를 판별하는 경우는 자체적인 고장 검출 알고리즘을 이용해 고장 유무를 판별하거나, 시스템에서 검출할 수 있는 최소 검출 고장(MDE; minimum detection error) 이하의 고장이 발생한 경우에는 사용자의 위치 오차를 검정통계량으로 하여 임계값 이상의 값을 갖는 경우 이를 고장으로 판별한다.

임계값을 높이면, MDE 이하의 오차를 발견하지 못할 확률(P_{MD})이 높아지게 되고 결과적으로 P_{LOI} 가 커질 위험이

높아지게 된다. 하지만 반대로 임계값을 낮추게 된다면, P_{MD} 는 낮아지지만, 사용자가 시스템을 사용할 수 없는 경고상태가 빈번해지기 때문에 가용성이 낮아지는 단점이 있다.

2-3 보호수준 생성을 위한 overbounding 기법

무결성 요구조건에 맞게 P_{PL} 을 제어하기 위해서는 적절한 보호수준 생성이 필수적이다. 각 오차정보의 보호수준을 생성하기 위해서는 충분히 많은 데이터 확보를 통해 오차 분포를 모델링하고 이를 overbounding 하는 것이 중요하다 [7].

Overbounding 기법 중 가장 먼저 시도된 PDF (probability density function) overbounding 기법은 실제 오차 분포의 양 끝단을 overbounding하는 방법이다. 하지만 range domain에서의 PDF를 이용해 overbounding 할 경우, position domain에서 매우 보수적인 overbounding의 결과로 이어진다는 연구가 있었다 [8]. 이러한 단점을 보완하기 위해 CDF (cumulative distribution function) bounding 기법이 개발되었다. Declen은 그의 논문에서 위성항법 신호의 오차가 가우시안 분포를 따를 때, CDF 기반의 overbounding 기법이 PDF 기반의 기법보다 더 작은 표준편차를 갖는 유연한 overbounding을 수행하면서도 실제 위치 오차를 모두 overbounding 할 수 있음을 증명하였다 [9].

III. 주요 무결성 감시 기법 분석

3-1 측정치 품질 검사

GNSS의 무결성을 감시하는 기준국에서 수신된 신호는 가장 먼저 측정치의 품질 검사 (MQM; measurement quality monitoring)를 거치게 된다. MQM 과정에서는 식 (2)와 같이 반송파 측정치와 의사거리 측정치를 평활화하고, 현재 epoch에서의 측정치와 비교하여 cycle-slip을 검출한다.

$$PR_{smoothed}(k) = \frac{1}{N_s}PR(k) + \frac{N_s - 1}{N_s}PR_{proj}(k) \quad (2)$$

$$= \frac{1}{N_s}PR(k) + \frac{N_s - 1}{N_s}\{PR_{smoothed}(k-1) + \phi(k) - \phi(k-1)\}$$

여기서, $PR(k)$ 와 $\phi(k)$ 는 k번째 epoch의 의사거리 측정치와 반송파 위상 측정치, $PR_{proj}(k)$ 는 이전 epoch에서의 평활화 된 의사거리 측정치와 반송파 위상 측정치를 이용하여 구한 예측치를 의미한다. N_s 는 MQM 과정에 사용되는 최근 측정치 샘플의 개수로 WAAS의 경우 100 초간의 샘플 수를 기준으로 사용하고 있다.

식 (3)과 같이 $PR(k) - PR_{proj}(k)$ 를 검정통계량으로 하여 이 값이 클수록 의사거리에 급격한 변화가 발생했다고 판단하게

된다. 이상 여부를 판단하기 위한 검정통계량의 임계값은 위성의 고도각에 따라 결정되는데 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다 [10].

$$Threshold_{elev} = 6.82 \times (0.1 + 2e^{-3\alpha(k)}) \quad (3)$$

여기서 $\alpha(k)$ 는 k번째 epoch에서 위성의 고도각이다.

3-2 주파수간 편이오차 검사

위성항법시스템에서 가장 큰 오차 요인 중에 하나인 전리층에 의한 신호 지연 오차를 추정하기 위해서는 GNSS의 L1 주파수 신호와 L2 주파수 신호를 활용한다. 이 과정에서, 신호를 송신하는 위성과 신호를 수신하는 수신기 모두에서 서로 다른 주파수 신호를 송신하고 수신하는데 고유의 편이오차가 발생한다. 위성에서 발생하는 오차는 tau group delay (τ_{gd})라고 하며, 수신기에서 발생하는 오차는 주파수간 편이오차 (IFB; inter frequency bias)라고 한다.

전리층에서의 신호지연 오차를 추정하기 위한 관측값에는 식 (4), (5)에서 볼 수 있듯이 τ_{gd} 와 IFB가 함께 포함되어 있는데, 이를 정확하게 추정할 수 있어야 전리층 신호지연 오차를 정밀하게 제거할 수 있다.

$$PR_{L1}^j = \rho + I_{L1} + \tau_{gd}^j + M_{L1} + \varepsilon_{L1} \quad (4)$$

$$PR_{L2}^j = \rho + I_{L2} + \gamma \cdot \tau_{gd}^j + IFB + M_{L2} + \varepsilon_{L2}$$

$$\frac{PR_{L2}^j - PR_{L1}^j}{\gamma - 1} \quad (5)$$

$$= \tilde{I}_{L1} = I_{L1} + \tau_{gd}^j + \frac{IFB}{\gamma - 1} + \frac{M_{L2} - M_{L1}}{\gamma - 1} + \frac{\varepsilon_{L2} - \varepsilon_{L1}}{\gamma - 1}$$

여기서, PR_{L1}^j, PR_{L2}^j 은 j번째 위성의 L1, L2 주파수 신호로부터 추정된 의사거리, ρ 는 위성과 수신기 사이의 거리, I_{L1}, I_{L2} 는 각 주파수 신호의 전리층에 의한 신호 지연 크기, γ 는 I_{L1} 과 I_{L2} 의 비율, M_{L1}, M_{L2} 는 기지국 위치에서의 다중경로 오차, $\varepsilon_{L1}, \varepsilon_{L2}$ 는 잡음을 나타낸다. 또한 IFB는 L2 주파수 식에서만 나타나게 되는데 이는 수신기 시계가 L1 C/A 코드를 기준으로 이뤄지기 때문이다.

τ_{gd} 와 IFB를 정밀하게 추정하려면, 기지국이 넓은 범위에 고루 분포하고 있다면 전리층의 thin shell model과 kalman filter를 이용하는 방법이 효과적이며 [11], 기지국 네트워크가 좁은 범위에 한정되어 있다면 반송파를 이용하여 아래 식 (6)을 이용하는 방법이 있을 수 있다.

$$\tilde{I}_{L1,\phi} = \frac{\phi_{L1}^j - \phi_{L2}^j}{\gamma - 1} \quad (6)$$

$$= I_{L1} - \tau_{gd}^j - \frac{IFB}{\gamma - 1} + \frac{N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2}{\gamma - 1} + v_\phi$$

여기서, $\tilde{I}_{L1,\phi}$ 는 반송파의 전리층 지연오차 측정값, v_ϕ 는 반송파의 다중경로 오차 및 잡음이다. τ_{gd} , IFB, 반송파 미지정수 (N_1, N_2)가 일정하다고 가정하면, $\tilde{I}_{L1,\phi}$ 의 평균값을 측정하여 I_{L1} 를 예측할 수 있고, 이를 식 (5)의 \tilde{I}_{L1} 에 대입하여 τ_{gd} 와 IFB의 값을 추정할 수 있다.

3-3 위성시계 및 궤도 추정오차 검사

모든 기준국에서 수집되는 정보들은 공통의 시각정보를 기반으로 생성되어야 한다. 그렇기 때문에 기준국의 시계 중 하나를 주시계로 설정하고, 이에 대한 시계 오차를 칼만필터를 통해 구한다. 그런 후에 CVTT (common view time transfer) 방식으로 각 기준국 수신기의 시각오차를 제거한다. 수신기 시각오차가 제거되고 나면, 모든 기준국의 의사거리 잔차가 같은 시각에 동기화 된다.

m 번째 기준국에서 관측된 k 번째 위성의 시각 동기화 된 의사거리 잔차 측정치는 아래 식 (7)과 같다.

$$\vec{\Delta\rho}_m^k = \mathbf{1}_m^k \cdot \Delta R^k - \Delta B^k + v_m^k \quad (7)$$

ΔR^k 는 궤도오차 벡터, $\mathbf{1}_m^k$ 는 m 번째 기준국에서 k 번째 위성까지의 가시선, ΔB^k 는 주시계 오차의 잔차를 포함하는 위성시계 오차, v_m^k 는 다중경로오차 및 잡음을 포함한다.

식 (7)에서 위성 시계 오차를 제거하기 위해 측정치 잡음이 가장 작은 기준국(p)의 의사거리 잔차를 아래 식 (8)처럼 제거할 수 있다.

$$\Delta\tilde{\rho}_m^k - \Delta\tilde{\rho}_p^k = (\mathbf{1}_m^k - \mathbf{1}_p^k) \cdot \Delta R^k + (v_m^k - v_p^k) \quad (8)$$

식 (8)을 모든 기준국에서의 의사거리 잔차에 대해 행렬형태로 정리하면 아래 식 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\tilde{\rho}_1^k - \Delta\tilde{\rho}_p^k \\ \vdots \\ \Delta\tilde{\rho}_M^k - \Delta\tilde{\rho}_p^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{1}_1^k - \mathbf{1}_p^k) \\ \vdots \\ (\mathbf{1}_M^k - \mathbf{1}_p^k) \end{bmatrix} \cdot \Delta R^k + \begin{bmatrix} v_1^k - v_p^k \\ \vdots \\ v_M^k - v_p^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 M 은 시각동기화 된 의사거리 잔차 측정치의 개수이며, 측정값의 잡음 편차는 평균이 0인 분포를 갖는다. 식 (9)에서 ΔR^k 를 minimum-variance estimator를 이용해 최종적으로 추정할 수 있다.

3-4 CNMP 감시

CNMP (code noise and multipath monitor)는 전리층 오차를 보정한 반송파 기반의 평활화 과정을 거쳐 다중경로오차를 검

출한다. 가장 먼저 측정치에 cycle slip이 발생했는지 검사한 후, 이중 주파수 신호의 차분을 통해 전리층 오차가 보정된 반송파 값을 획득한다. Mean filter를 통해 의사거리와 반송파의 조합을 이용하여 다중경로오차를 추정하고, mean error function을 통해 최종적인 다중경로오차의 표준편차인 σ_{mp} 를 계산한다.

3-5 UDRE 감시

GPS 위성은 항법메시지를 통해 사용자에게 URA (user range accuracy) 정보를 송신함으로써, 위치 정확도를 예상할 수 있도록 한다. 마찬가지로 GPS 신호의 보정정보와 무결성 정보를 제공하는 WAAS에서는, 보정정보를 이용하는 사용자들이 예상할 수 있는 정확도를 UDRE (user differential range error)를 통해 제공하고 있다.

UDRE는 위성의 궤도, 시계 오차와 대류층, CNMP, IFB에 관한 보정정보를 적용하고, 수신기 시계오차까지 보상에 계산한다. 이렇게 계산된 UDRE를 지속적으로 감시하고, 잔차가 사용자 요구조건 만족을 위한 일정 수준 이상을 초과하는 경우, 사용자에게 해당 위성에 대해 경고를 제공할 수 있다.

3-6 GIVE 감시

GIVE (grid ionospheric vertical error)는 격자형태로 제공되는 전리층 보정정보에 대한 오차를 의미하며, 이 보정정보를 적용한 사용자의 잔여 위치 오차에 대한 감시를 수행한다. CNMP 감시 과정에서 측정된 측정치를 기반으로 전리층 지연 오차의 참값을 구할 수 있고, 전리층 보정정보 수신값과의 차이를 분석하여 잔차 및 무결성 정보를 산출하게 된다.

IV. 정밀 PNT 시스템의 무결성 감시 기법 제안

4-1 정밀 PNT 정보 제공을 위한 PPP-RTK 기법 개요

PPP-RTK (precise point positioning - real time kinematic)는 기존의 PPP (precise point positioning)과 달리, 전리층 및 대류층 지연오차, 위성 및 기지국의 hardware bias의 측정값 등의 보정정보를 추가적으로 제공하여 단일 수신기가 반송파 기반으로 정밀한 위치를 계산할 수 있는 방법이다.

PPP-RTK에 사용되는 보정정보는 일반적인 network RTK 시스템과 같이 지상에 위치한 기준국들의 네트워크에서 측정값 모델을 구성하여 제공한다. 다중 주파수 신호($j=1, \dots, f$)에 대해 코드와 반송파 측정값을 선형화하면 아래 수식 (10), (11), (12)와 같다.

$$E\{\Delta\phi_{r,j}^s(i)\} = g_r^s(i)^T \Delta x_r(i) + dt_r(i) + \lambda_j \delta_{r,j}(i) - dt^s(i) - \lambda_j \delta_j^s(i) - \mu_{j,r}^s(i) + \lambda_{j,r}^s(i) \quad (10)$$

$$E\{\Delta p_{r,j}^s(i)\} = g_r^s(i)^T \Delta x_r(i) + dt_r(i) + d_{r,j}^s(i) - dt^s(i) - d_j^s(i) + \mu_j^s(i) \quad (11)$$

$$\Delta x_r(i) = \begin{bmatrix} \Delta b_r(i) \\ \tau_r(i) \end{bmatrix}; g_r^s(i) = \begin{bmatrix} -u_r^s(i) \\ m_r^s(i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $\Delta b_r(i)$ 는 3차원의 수신기 위치 벡터, $\tau_r(i)$ 는 ZTD (zenith tropospheric delay)를 나타낸다. 이들은 수신기-위성 간 가시선 단위 벡터인 $u_r^s(i)$ 와 대류층 맵핑 함수 계수인 $m_r^s(i)$ 를 곱해 사용한다. 수신기와 위성의 시계 오차는 각각 $dt_r(i)$, $dt^s(i)$ 로 나타내며, $\delta_{r,j}^s(i)$ 와 $\delta_j^s(i)$ 는 각각 수신기와 위성의 hardware phase bias, $dt_r(i)$, $dt^s(i)$ 는 각각 수신기와 위성의 code bias를 의미한다. 전리층 지연 오차는 L1 주파수(λ_1)에 대해 $l_r^s(i)$ 로 표현되며, 다른 주파수의 경우 주파수 상수 $\mu_j = \frac{\lambda_1^2}{\lambda_j^2}$ 를 곱하여 사용해 준다. 최종적으로 $z_{r,j}^s$ 는 반송파의 미지정수를 나타내고 정수의 성질을 갖는다.

위 식을 PPP-RTK 네트워크에 적용하면, rank가 부족한 design matrix가 생성되는데, 일반적으로 미지 상태 변수에 대한 해를 구할 수 없다. 네트워크 내의 미지 상태 변수를 구하기 위해 design matrix를 full rank로 바꿔 줄 수 있는 작업을 해야 하고, S-transformation 기법을 사용해 공통 수신기 또는 공통 위성의 시각 오차를 제한 조건으로 활용하는 방법이 제안된 바 있다 [12]. 이렇게 S-transformed states에 대한 측정값을 기준국 네트워크에서 측정하고, 사용자에게 보정정보로 제공하면 사용자는 RTK와 같이 센티미터급의 정밀한 위치정보를 획득할 수 있다.

4-2 CLAS에서 제공하는 무결성 정보 분석

앞서 설명한 PPP-RTK 기법을 이용한 고정밀 위치정보를 제공하는 일본의 CLAS 서비스는 위성 궤도 및 시각 오차, 전리층 및 대류층 지연 오차 등에 대한 보정정보를 SSR (state space representation) 방식으로 사용자에게 전달한다 [13]. 보정정보가 갱신되는 주기는 필요에 따라 5-30초 간격으로 달라지며, 제공된 보정정보를 바탕으로 사용자는 다음 식 (13)과 같이 보호수준 계산에 필요한 i 번째 위성에 대한 신호의 분산을 구할 수 있다.

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{i,user})^2 + \left(\frac{\sigma_{i,sis}}{10}\right)^2 + \left(\frac{40.3 \times 10^{16}}{f^2} \sigma_{i,iono} \times 100\right) + \left(\frac{\sigma_{i,trop}}{10 \sin E_i}\right)^2} \quad (13)$$

여기서, $\sigma_{i,user}$ 는 다중경로오차이며 사용자가 직접 계산해야 하는 값이다. SIS (signal in space) 오차인 $\sigma_{i,sis}$ 는 Compact SSR GNSS URA 메시지에 의해 제공되며, 전리층 지연 오차인

$\sigma_{i,iono}$ 는 Compact SSR STEC Correction 메시지에 의해 제공되고, 대류층 지연 오차인 $\sigma_{i,trop}$ 는 Compact SSR Gridded Correction 메시지에 의해 제공된다. E_i 는 i 번째 위성의 양각이다. 만약 사용자가 스스로 계산한 σ_i 가 무결성 요구조건 만족을 위한 임계값을 초과할 경우, 해당 위성 신호의 정보에 대한 가중치를 낮추거나 사용하지 않을 수 있다.

4-3 정밀 PNT 정보의 무결성 감시 방안 도출

앞선 내용을 종합적으로 분석해 보면, PPP-RTK를 사용하는 정밀 PNT 서비스의 무결성 감시 기능을 제공하기 위해서는 앞서 언급한 기존 보강서비스의 감시방법을 적용해야하고, 추가적으로 다음과 같이 3가지 측면에서 고려되어야 한다.

첫째, 위성신호 고장 위험에 대해 적절히 대응할 수 있어야 한다. PPP-RTK 보정정보 생성을 위한 칼만 필터에서 산출되는 공분산 행렬과 innovation은 위성 신호의 고장을 검출할 수 있지만, snapshot 방식과 달리 고장 검출에 시간이 필요하다. 따라서 다양한 고장환경에서 정해진 시간 (time-to-alert) 내에 충분히 높은 확률로 고장 검출이 가능하도록 해야 한다.

둘째, 보정정보의 품질에 대한 보장이 가능해야 한다. PPP-RTK에서 제공하는 보정정보를 충분히 overbounding하여 사용자가 제공받은 보정정보를 사용할지에 대해 판단할 수 있게 해야 한다. 동시에, 이런 보정정보의 overbounding 결과가 과하게 보수적으로 산정되어 보호수준이 너무 크게 계산되지는 않는지 고민해야 한다.

셋째, 사용자 영역에서 반송파의 미지정수해의 무결성에 관한 감시가 이루어져야 한다. PPP-RTK 기법에서 SSR 방식의 보정정보를 수신하면 기존의 PPP 방식보다 빠른 시간 내에 미지정수의 해를 도출할 수 있지만, 정확한 미지정수해 도출에 대한 무결성을 감시할 수 있어야 전체 위치 정보에 대한 무결성도 보장할 수 있다.

V. 결 론

자율주행기술이 발전하고 이에 대한 수요가 높아짐에 따라 해양에서도 자율운항선박에 대한 연구와 개발이 가속화 되고 있고, 이에 따라 고정밀 위치 정보와 이에 대한 무결성 감시 방안이 요구되고 있다. PPP-RTK 방식은 기존의 RTK 방식보다 광범위한 영역의 다수 사용자에게 고정밀 위치정보를 획득할 수 있도록 보정정보를 전달할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 위성항법시스템의 무결성 감시 기능을 수행하는 WAAS 시스템의 주요 기법에 대해 분석하고, PPP-RTK 기법으로 획득하는 위치정보에 대한 무결성 감시 방안에 대해 도출 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 도출 방안에 따라 추후 PPP-RTK 서비스의 무결성 감시기법을 구체화하고 실제 서비스에 적용할 수 있을 것을 기대한다.

Acknowledgement

본 논문은 해양수산부 국가연구개발과정 “지상기반 센티미터급 정밀 PNT 기술개발”으로 수행된 연구결과입니다 (PMS4650).

References

- [1] M. Son, E. Son, E. Lee, M.-B. Heo, and G.-W. Nam, “Configuration of network based GNSS correction system for land transportation navigation,” *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 21, No. 4, pp. 17–26, Dec. 2013.
- [2] IMO, Revised maritime policy and requirements for a future global navigation satellite system resolution A.915(22), 2001.
- [3] C. S. Lim and B. W. Park, “Comparative analysis of performance for DGPS and SBAS in Korea region,” *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 279-286, 2017.
- [4] H. Yun, A study on GNSS user integrity monitoring algorithm for simultaneous multiple satellite failures, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 2013.
- [5] T. Walter, K. Shallberg, E. Altshuler, W. Wanner, C. Harris, and R. Stimmler, “WAAS at 15,” *Navigation*, Vol. 65, No. 4, pp. 581-600, 2018.
- [6] F. Bauer, G. Greze, F. Haddad, A. Tourtier, B. Rols, and K. Urbanska, “A study on a new EGNOS V2 release with enhanced system performances,” in *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)*, Miami: FL, pp. 902-919, 2019.
- [7] J. Lee and J. Lee, “Correlation between ionospheric spatial decorrelation and space weather intensity for safety-critical differential GNSS systems,” *Sensors*, Vol. 19 No. 9, 2127, 2019.
- [8] T. Walter, and J. Blanch, “Improved user position monitor for WAAS,” *Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 64, No. 1, pp. 165–175, 2017.
- [9] B. DeCleene, “Defining pseudorange integrity – overbounding,” in *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City: UT, pp. 1916-1924, 2000.
- [10] G. Xie, S. Pullen, M. Luo, P. Normark, D. Akos, J. Lee, P. Enge, and B. Pervan, “Integrity design and updated test results for the stanford LAAS integrity monitor testbed,” in *Proceedings of the 57th Annual Meeting/CITF 20th Biennial Guidance Test Symposium*, AlbuquerqueL: NM, pp. 681-693, 2001.
- [11] D. Holaschutz, R. Bishop, R. Harris, and B. Tolman, “Inter-frequency bias estimation for the GPS monitor station network,” in *Proceedings of the 21th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, Savannah: GA, pp. 2405-2415, 2008.
- [12] P. J. G. Teunissen and A. Khodabandeh, “Review and principles of PPP-RTK methods,” *Journal of Geodesy*, Vol. 89, No. 3, pp. 217–240, 2014.
- [13] Cabinet Office: Quasi-zenith satellite system interface specification centimeter level augmentation service, IS-QZSS-L6-001, 2018.



손 표 웅 (Pyo-Woong Son)

2019년 2월 : 연세대학교 대학원 글로벌융합공학 (공학박사)
2019년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원
※관심분야 : 지상파항법시스템, 위성항법시스템, 전파 기만



박 슬 기 (Sul Gee Park)

2010년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2010년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임기술원
2020년 4월 ~ 현재 : 해양 PNT 연구단 총괄체계관리 팀장
※관심분야 : 위성기반 정밀측위, 관성항법, 통합항법, 지상파항법



박 상 현 (Sang Hyun PARK)

2002년 8월: 충남대학교 대학원 전자공학 (공학박사)

2005년 12월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원

2020년 4월 ~ 현재: 해양PNT연구단 단장

※관심분야: 전파항법시스템, 위성항법 보강시스템



신 유 진 (Yujin Shin)

2019년 2월: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 (공학사)

2019년 3월 ~ 현재: 홍익대학교 자율주행·지능로봇 전공 석사과정

※관심분야: 위성항법시스템



송 재 영 (Jaeyoung Song)

2020년 2월: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 (공학사)

2020년 3월 ~ 현재: 홍익대학교 기계공학과 전공 석사과정

※관심분야: 위성항법시스템



김 의 호 (Euiho Kim)

2008년 1월: Stanford University 항공우주공학과 (공학박사)

2015년 9월: 청주대학교 항공기계공학과 조교수

2017년 3월: 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 조교수

※관심분야: 위성항법, 자동제어, 로봇공학