

Integrity Monitoring for Drone Landing in Urban Area using Single Frequency Based RRAIM

Hojoon Jeong, Bu-Gyeom Kim, Changdon Kee[†]

Department of Aerospace Engineering and the Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

ABSTRACT

In this paper, we developed a single frequency-based RRAIM to monitor integrity of the UAM landing vertically in urban area with only low-cost single-frequency GPS receiver. Conventional dual-frequency RRAIM eliminates ionospheric delay through a combination of frequencies. In this study, ionospheric delay was directly modeled. Drift error of residual ionospheric delay is modeled using the previously studied result on ionospheric rates of change. To verify the performance of the proposed RRAIM algorithm, a simulation of vertical landing UAM in urban area was conducted. It was assumed that the protection level at the initial position was calculated through SBAS correction data. During vertical landing, integrity monitored by receiver alone without external correction data. In the 60 sec simulation, the protection level of the proposed RRAIM compared to the conventional RRAIM was calculated to be 140% due to the accumulated ionospheric delay error. Nevertheless, it was confirmed that the final vertical protection level meeting the requirements of LPV-200, which cannot be achieved with single frequency GPS receiver alone.

Keywords: GPS, RRAIM, integrity monitoring, urban environment

1. INTRODUCTION

도심항공교통 (Urban Air Mobility, UAM)은 하늘을 이동 통로로 활용하는 미래의 도시 교통 체계를 의미한다. 도심지에서 드론 활용 운용 방안으로는 택배 물품 배달부터 사람을 운송하는 이동수단의 역할까지 다양한 방식이 존재하며 이와 관련된 기술들은 전세계적으로 꾸준히 발전하고 있다. 국내에서는 다수의 기업에서 개인용 항공기 (Personal Air Vehicle, PAV) 개발 및 항공 교통 관련 사업을 진행하고 있고 정부에서는 한국형 도심항공교통 (K-UAM) 실증 사업을 통해 인프라를 구축하고 기술개발사업을 진행하여 2025년까지 한국형 UAM 상용화를 목표하고 있다. UAM의 현실화를 위해선 다양한 기술들이 필요하지만 이들 중 가장 중요하다고 볼 수 있는 것이 바로 정밀하고 안전한 항법이

다. 이를 위해 기존에 항공기 사용자를 위해 만들어진 무결성 개념을 사용하는 연구가 활발하게 진행 중이다.

무결성이란 사용자 위치에 대한 신뢰 수준을 의미하는 지표로 항법 시스템에 오류가 발생한 경우 정해진 시간 (Time-to-Alert, TTA) 내에 사용자에게 경고를 줄 수 있는지에 대한 능력을 포함한다. 항법 시스템을 사용하는 항공 사용자의 경우 각 운항단계마다 요구되는 최대 허용 오차 값이 요구조건을 정해져 있으며 이를 경보한계 (alert limit)이라 한다. 무결성은 지정된 항법 요구조건에 대해 자신의 위치를 확률적으로 신뢰할 수 있는 bound를 제공하며 이를 보호수준 (protection level)이라 한다. 기존의 항공 사용자의 무결성 감시를 위한 대표적인 시스템으로 Satellite Based Augmentation System (SBAS)가 존재한다. SBAS는 정지 궤도 위성을 활용하여 Global Navigation Satellite System (GNSS)를 이용하는 사용자에게 GNSS 오차 보정정보를 제공함과 동시에 무결성 정보를 제공한다.

SBAS는 정지궤도 위성신호를 이용하기 때문에 고층 빌딩에 의해 위성의 가시성이 현저히 떨어지는 도심지에서는 활용이 제한될 수 있다. SBAS가 비 가용인 상태에서도 사용자는 독자적으로 자신의 무결성을 감시할 수 있어야 안전한 항행이 가능하다. 이를 위한 기술을 수신기 자체 무결성 감시 기법 (Receiver

Received Nov 15, 2022 Revised Nov 21, 2022 Accepted Nov 26, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: kee@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8052 Fax: +82-02-878-0559

Hojoon Jeong <https://orcid.org/0000-0001-6997-7838>

Bu-Gyeom Kim <https://orcid.org/0000-0001-7769-1493>

Changdon Kee <https://orcid.org/0000-0002-8691-7068>

Autonomous Integrity Monitoring, RAIM)이라 한다 (Zhu et al. 2018). 일반적으로 많이 연구되고 있는 RAIM이나 Advanced RAIM의 경우 의사거리 측정치를 활용하여 무결성을 수행한다. 그러나 의사거리 측정치를 사용할 경우 다중 경로 오차가 극심한 도심지에선 성능이 현저히 저하된다는 단점이 존재한다. GNSS 수신기의 경우 빌딩이나 도로 표지판 같은 다양한 전파 방해 요인이 있는 도심지에선 위성에서 직접 들어오는 신호뿐만 아니라 장애물에 반사된 신호를 동시에 받게 되며 이로 인해 발생하는 오차를 멀티패스 오차라고 한다. 특히 멀티패스 오차는 의사거리에서 크게 발생하는데 최대 150 m 수준까지 발생한다 (Groves 2013). 이에 반해 반송파 위상 측정치의 경우 약 1/4 cycle (5 cm) 수준으로 의사거리에 비해 매우 작게 발생한다 (Hsu et al. 2015). 뿐만 아니라 반송파 위상 측정치는 의사거리 측정치에 비해 잡음 수준이 1/100수준으로 매우 정밀하다. 그러나 반송파 위상 측정치를 항법에 활용하기 위해선 미지정수를 결정해야하는 문제가 존재한다.

본 연구에서는 시간 차분 된 반송파 위상 측정치를 활용하여 도심지에서 무결성 감시 방안을 제안한다. 미지정수는 한번 결정된 경우 시간에 대해 일정한 값을 갖는다. 반송파 위상 측정치를 시간 차분할 경우 미지정수를 결정하지 않고도 측정치를 활용 가능하다. 반송파 위상 측정치의 사이클 슬립 같은 경우 단일주파수 기반의 수신기에서도 관성 센서와 결합 시 검출 가능하다는 기존 연구를 토대로 고려사항에서 제외하였다 (Kim et al. 2020). 반송파 위상 측정치는 멀티패스에 강인한 특성을 가지고 있기 때문에 도심지에서 무결성 감시에 이점이 존재한다. 시간 차분된 반송파 위상을 측정치로 활용하는 무결성 감시 알고리즘으로 Relative RAIM (RRAIM)이 존재한다 (Lee 2011). 기존의 RRAIM은 이중주파수 측정치를 기반으로 설계된 알고리즘으로 주파수 조합을 통해 전리층이 모두 제거된다고 가정한다. 그렇기 때문에 단일주파수 측정치만 제공 가능한 저가의 수신기에서는 알고리즘을 활용할 수 없다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 전리층 잔여 오차에 대한 모델링을 추가로 고려함으로써 저가의 단일주파수 기반 수신기에서도 무결성 감시에 활용 가능한 단일주파수 기반 RRAIM 알고리즘을 제안한다. 도심지에 착륙하는 드론에 대한 모의 실험을 진행하였으며 초기 위치는 개활지에서 SBAS 신호를 통해 획득하여 무결성이 보장된다고 가정하였다. 이후 도심지에 착륙하는 동안 SBAS 신호가 고층 빌딩에 의해 차단된 SBAS outage 상황을 정하였다. SBAS가 불용상태에서 RAIM과 RRAIM과 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM을 통해 무결성을 감시하고 성능을 비교하였다.

2. POSITIONING

2.1 Initial Position

초기 위치는 SBAS 보정정보를 이용하여 획득한다. SBAS는 의사거리 기반 보정 방법이다. j 번째 위성에서 측정되는 의사거리 ρ 는 식 (1)과 같이 정의된다 (Kaplan & Hegarty 2006).

$$\rho^j = d^j + B - b^j + t^j + i^j + M^j + \varepsilon_\rho^j \quad (1)$$

여기서 d 는 사용자와 GPS 위성까지 거리, B 는 사용자 수신기 시계 오차, b 는 위성 시계 오차, t 는 대류층 지연 오차, i 는 전리층 지연 오차, M 은 다중 경로 오차, ε_ρ 는 의사거리 잡음을 나타낸다. 이때 식 (2)는 의사거리 측정치를 위성 위치 $\vec{R}^j$, 사용자 위치 $\vec{R}_u$ 그리고 시선벡터 (Line of sight) $\vec{e}^j$ 를 이용해 나타낸 것이다.

$$\rho^j = (\vec{R}^j - \vec{R}_u) \cdot \vec{e}^j + B - b^j + t^j + i^j + M^j + \varepsilon_\rho^j \quad (2)$$

이때 위성 위치, 위성 시계 오차, 대류층 오차, 전리층 오차와 같이 추정 가능한 오차를 보정한 의사거리 측정치 식을 좌변에 나타내게 되면 식 (3)과 같이 사용자의 위치와 사용자 수신기 오차 행렬을 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \rho^1 - (\hat{R}^1 \cdot \hat{e}^1 - \hat{b}^1 + \hat{t}^1 + \hat{i}^1) \\ \rho^2 - (\hat{R}^2 \cdot \hat{e}^2 - \hat{b}^2 + \hat{t}^2 + \hat{i}^2) \\ \vdots \\ \rho^m - (\hat{R}^m \cdot \hat{e}^m - \hat{b}^m + \hat{t}^m + \hat{i}^m) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{e}^1 & -1 \\ \hat{e}^2 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{e}^m & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{R}_u \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\rho^1 \\ v_\rho^2 \\ \vdots \\ v_\rho^m \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 v 는 SBAS 보정 정보와 모델을 통해 오차 요소를 추정하고 제거했을 때 잔여오차를 의미한다. 이를 벡터 식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\vec{z}_{\rho,i} = -H_i \vec{x}_i + \vec{v}_i \quad (4)$$

여기서 $\vec{z}$ 벡터는 측정치 식, H 는 시선벡터로 이루어진 관측행렬, $\vec{x}$ 는 추정하고자 하는 사용자 위치와 사용자 수신기 오차로 이루어진 벡터를 의미한다. 측정치의 공분산은 식 (5)와 같다.

$$R_\rho \equiv \text{cov}[\vec{z}_\rho] \quad (5)$$

여기서 R_ρ 는 SBAS를 통해 획득한 측정치 오차 공분산을 의미한다.

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,fit}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,air}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 \quad (6)$$

식 (6)은 R_ρ 의 대각 행렬을 의미한다. 이때 $\sigma_{i,fit}^2$, $\sigma_{i,UIRE}^2$, $\sigma_{i,air}^2$, $\sigma_{i,tropo}^2$ 는 각각 위성 시계-궤도 오차, 전리층 오차, 수신기 잡음 및 다중경로 오차, 그리고 대류층 오차를 의미한다. 위성-시계 궤도 오차와 전리층 오차의 공분산은 SBAS 신호를 통해 제공받을 수 있다. 수신기 잡음 및 다중경로 오차와 대류층 오차는 DO-229D 문서를 참조하여 미국의 SBAS인 Wide Area Augmentation System (WAAS)의 공분산 모델을 이용하였다 (RTCA 2006). 측정치 오차 공분산을 이용할 경우 식 (7)과 같이 가중 최소 자승법 (weighted least square method)을 이용할 수 있다.

$$S_i \equiv - \left(H_i^T R_\rho^{-1} H_i \right)^{-1} H_i^T R_\rho^{-1} \hat{x} = S_i \vec{z}_\rho \quad (7)$$

2.2 Relative Position

상대 위치는 시간 차분 된 반송파 위상 측정치를 활용한다. j 번

째 위성의 반송파 위상 측정치 ϕ 는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\phi^j = d^j + B - b^j + t^j - i^j + m^j + N^j \lambda + \varepsilon_\phi^j \quad (8)$$

여기서 각 성분은 의사거리 식에서 정의된 항과 동일하며 새로 정의된 $m, N, \lambda, \varepsilon_\phi$ 는 각각 반송파 위상 측정치의 다중경로오차, 미지정수, 반송파 파장 길이, 반송파 잡음을 의미한다.

$$\tilde{z}_\phi = -H\tilde{x} + \tilde{N}\lambda + \tilde{v}_\phi \quad (9)$$

의사거리와 동일한 방식으로 측정치를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (10)은 시간 차분 된 반송파 위상 측정치를 나타낸다. 이때 아래 첨자 i 는 초기 시점 (initial), c 는 현재 시점 (current)을 의미한다.

$$\begin{aligned} \Delta_i z_\phi &\equiv z_{\phi,c} - z_{\phi,i} \\ &= -H_c \tilde{x}_c + H_i \tilde{x}_i + \Delta_i \tilde{v}_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

시간 차분 된 반송파 측정치 식을 상대 위치 $\Delta \tilde{x}$ 에 대해 나타내면 식 (11)과 같다. 상대 위치를 제외한 나머지 항을 오차로 간주된다.

$$\begin{aligned} \Delta_i z_\phi &= -H_c \tilde{x}_c + H_c \tilde{x}_i - H_c \tilde{x}_i + H_i \tilde{x}_i + \Delta_i \tilde{v}_\phi \\ &= -H_c \Delta_i \tilde{x} - \Delta_i H \tilde{x}_i + \Delta_i \tilde{v}_\phi \end{aligned} \quad (11)$$

초기 위치에 관한 성분은 SBAS를 통해 계산한 초기 위치를 통해 보상할 수 있다. 최종적으로 RRAIM에 사용된 측정치는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta_i r &= \Delta_i z_\phi + \Delta_i H \tilde{x}_i \\ &= -H_c \Delta_i \tilde{x} + \Delta_i H \tilde{x}_i + \Delta_i \tilde{v}_\phi \end{aligned} \quad (12)$$

RRAIM 측정치는 상대 위치에 관한 식으로 정리되는 것을 알 수 있다. 측정치 오차 성분에는 초기 위치 오차의 영향과 시간 차분 된 오차 성분이 존재한다. 초기 위치 오차와 시간 차분 된 오차 성분은 독립적이기 때문에 측정치 오차 공분산은 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} R_\Delta &\equiv \text{cov}[\Delta_i r] \\ &= \text{cov}[\Delta_i H \tilde{x}_i] + \text{cov}[\Delta_i \tilde{v}_\phi] \\ &= \Delta_i H P_i \Delta_i H^T + R_{\text{coast}} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 R_Δ 는 RRAIM 측정치 오차 공분산을 의미한다.

$$\sigma_{\Delta,i}^2 = \sigma_{i,\Delta nmp}^2 + \sigma_{i,\Delta tropo}^2 + \sigma_{i,\Delta clk}^2 \quad (14)$$

식 (14)는 RRAIM 측정치 오차 공분산의 대각 행렬을 의미한다. 이때 $\sigma_{i,\Delta nmp}^2, \sigma_{i,\Delta tropo}^2, \sigma_{i,\Delta clk}^2$ 는 각각 잡음과 멀티패스, 대류층 drift, 위성 시계 drift를 의미한다 (Walter et al. 2008). 기존의 RRAIM은 이중 주파수 기반의 알고리즘으로 iono free 조합을 통해 전리층을 제거한다. 그러나 본 연구에서는 단일 주파수 기반 RRAIM을 설계하기 위하여 전리층의 drift가 고려된 공분산 식을 새로 정의하였다.

$$\sigma_{\Delta,i}^2 = \sigma_{i,\Delta nmp}^2 + \sigma_{i,\Delta tropo}^2 + \sigma_{i,\Delta clk}^2 + \sigma_{i,\Delta iono}^2 \quad (15)$$

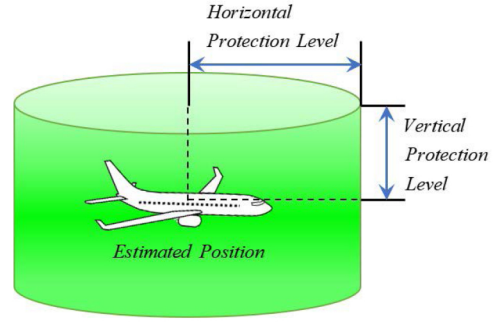


Fig. 1. Concept of user protection level.

식 (15)는 본 논문에서 제안하는 단일 주파수 기반 RRAIM 알고리즘에서 전리층 drift가 고려된 측정치의 오차 공분산을 의미한다. 전리층 drift에 대해 연구한 선행연구에 따르면 전리층 폭풍이 발생한 날 적도 지방의 데이터를 분석하였을 때 시간에 따라 변화하는 전리층을 바운드하기 위한 시그마로 23 mm/s를 산출하였다 (Walter et al. 2018). 선행 연구에서는 최종적으로 얻어진 결과를 worst case로 판단하여 일반적인 날의 전리층 drift와 비교했을 때 5σ에 해당하는 값이라 판단하였다. 본 논문에서는 선행연구의 결과를 활용하여 시간 차분 된 수직 전리층 지연의 drift를 4.6 mm/s로 두고 각 위성의 경사 전리층을 보상하기 위한 obliquity factor를 곱하여 $\sigma_{\Delta iono}$ 를 모델링하였다.

초기 위치와 마찬가지로 측정치 오차 공분산을 이용하여 가장 최소 자승법으로 상대 위치를 계산할 수 있다. 식 (16)은 초기 위치 대비 사용자의 상대 위치를 의미한다.

$$\begin{aligned} S_\Delta &\equiv -\left(H_c^T R_\Delta^{-1} H_c\right)^{-1} H_c^T R_\Delta^{-1} \\ \Delta_i \hat{x} &= S_\Delta \Delta_i r \end{aligned} \quad (16)$$

3. PROTECTION LEVEL

항법 시스템을 사용하는 항공 사용자의 경우 각 운항단계마다 요구되는 최대 오차 허용 값이 요구조건으로 정해져 있으며 (ICAO 2006), 이를 경보한계 (alert limit)라 한다. 예를 들어 WAAS의 경우 LPV-200 요구조건을 만족하도록 설계된 시스템이며 이때 수직 경보한계는 35 m로 명시되어 있다. 그러나 사용자는 실제 자신의 위치를 알 수 없으므로 실제 위치 오차를 알 수 없다. 따라서 자신의 오차 수준을 확률적으로 내포할 수 있는 경계가 필요하며 이를 보호수준 (protection level)이라 한다. 보호수준은 Fig. 1과 같이 추정된 위치를 기준으로 계산되며 실제 위치가 보호수준 이내에 있을 확률이 무결성 요구조건으로 정해진 확률을 만족하도록 설정해야 한다. 표준 분포표상에서 무결성 요구조건에 해당하는 상수 값과 위치 추정 시 획득한 위치 오차의 표준편차를 이용하여 요구조건에 만족하는 보호수준을 계산한다. 일반적으로 수직 보호수준이 수평 보호수준보다 크게 계산되기 때문에 수직 보호수준이 요구조건을 만족하는 경우 전체적으로 무결성이 만족된다고 판단한다. 본 연구에서도 수직 보호수준에 대해서만 분석을 진행하였다.

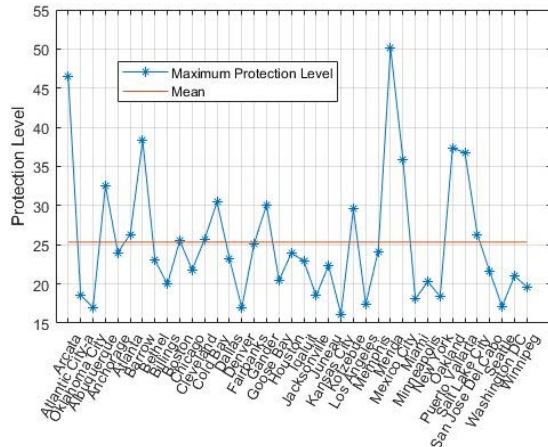


Fig. 2. WAAS protection level at maximum position error.

3.1 SBAS

SBAS는 지상의 기준국에서 위성의 고장을 감시한다. 위성의 고장을 감지할 경우 사용자에게 정해진 시간 (TTA) 이내에 전달 해주는 시스템이다. 따라서 보호수준 계산 시 fault free 조건만을 가정한다. 식 (16)으로부터 계산된 초기 오차 공분산은 식 (17)과 같다.

$$P_i = (H_i^T R_i^{-1} H_i)^{-1} \quad (17)$$

초기 위치 오차의 표준 편차에 상수배를 함으로써 식 (18)과 같이 fault free 상황의 보호 수준을 계산할 수 있다.

$$\sigma_{SBAS,V} = \sqrt{P_i(3,3)} \\ VPL_{SBAS} = k_V \times \sigma_{SBAS,V} \quad (18)$$

여기서 k_V 는 표준분포표상에서 SBAS의 무결성 요구조건인 10^{-7} 에 해당하는 상수 값이고 σ_V 는 위치 오차의 수직 표준편차를 의미한다. 본 논문에서는 잔여오차 모델로 미국의 WAAS를 가정하였다. 미국 연방 교통 안전 위원회에서는 WAAS에 대한 평가 분석표를 제공한다. 평가 분석표에는 WAAS 네트워크와 Federal Aviation Administration (FAA)의 National Satellite Test Bed (NSTB) 네트워크에서 획득한 WAAS 데이터를 제공한다 (NSTB/WAAS T&E Team 2019). Fig. 2는 WAAS 평가분석에 사용한 기준국에서 최대 위치오차가 관측된 날의 보호 수준을 나타낸 그래프이다. 본 연구에서는 해당 결과들의 평균인 25 m를 3σ 에 해당하는 값으로 판단하고 1~2 σ 에 해당하는 크기로 초기 수직 보호수준으로 설정하였다.

3.2 RAIM

RAIM은 사용자 단독으로 무결성을 감시한다. 따라서 수신기가 독자적으로 고장을 감시해야 한다. 보호수준계산 시 fault free 상황과 고장 발생 상황을 동시에 가정한다. Fault free 상황은 위치 계산에 사용된 측정치에 고장이 없음을 의미한다. 따라서 SBAS 보호수준 계산과 동일한 방식으로 위치 오차 공분산에 상

수배를 취하여 fault free 보호 수준을 계산한다.

$$VPL_{fault-free} = k_{FF} \times \sigma_V \quad (19)$$

여기서 K_{FF} 는 fault free 상황일때 표준분포표상에서 무결성 요구조건인 10^{-7} 에 해당하는 상수이고 σ_V 는 계산된 위치의 수직 위치 오차 공분산을 의미한다. 수신기 내부에서 판단변수 (test statistics)가 임계 값 (T , threshold)을 넘길 경우 측정치에 고장이 발생했다고 판단한다. 이때 고장이 발생했는지라도 판단변수가 정해진 임계 값을 넘지 않는 경우에는 고장이 검출되지 않는다. 이 경우 수신기는 해당 측정치를 정상 측정치로 판단하고 항법에 사용한다. 이때 고장이 발생했지만 검출되지 않을 최대 크기는 임계 값에 해당한다. 고장 발생을 가정하고 보호수준 계산할 때에는 검출 불가능한 고장을 고려하기 위하여 식 (20)과 같이 발생 가능한 고장의 최대값인 임계 값을 더해서 계산한다.

$$VPL_{fault,i} = k_{md} \times \sigma_V + T_i \quad (20)$$

여기서 K_{md} 는 표준 분포표상에서 고장 발생 상황 시 무결성 요구조건인 10^{-3} 에 해당하는 상수를 의미한다. 임계 값이 작을 경우 고장이 발생하지 않았는데 고장으로 인지하는 false alarm 확률이 높아지게 된다. 반대로 임계 값이 크게 설정할 고장이 발생해도 검출하지 못하는 missed detection이 발생할 확률이 높아진다. Missed detection이 발생할 경우 시스템에 큰 위험을 초래할 수 있기 때문에 엄격하게 고려해야 한다 그에 반해 false alarm은 발생 시 시스템의 연속성을 해치기는 하지만 missed detection에 비해 위험 수준은 낮다. 그러므로 임계 값 계산 시 시스템의 연속성을 해치지 않는 수준에서 최대한 missed detection이 발생하지 않도록 설정해야 한다. 따라서 최소한의 연속성 요구조건을 만족하는 임계 값을 설정함으로써 되도록 missed detection 확률을 피할 수 있도록 해야 한다. 연속성에 대한 요구조건은 무결성과 마찬가지로 항법 요구조건으로 주어진다. 본 논문에는 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM과 residual based RAIM의 비교를 통해 도심지에서 제안하는 알고리즘의 성능을 하였다.

3.2.1 Residual based RAIM

Residual Based RAIM은 의사거리 측정치의 잔차를 이용하여 수신기 단독으로 무결성을 감시한다 (Walter & Enge 1995). Residual Based RAIM의 경우 측정치들의 제곱 합 (Weighted sum of squared error)을 이용하여 임계 값과 판단변수를 계산한다. 이때 각 측정치 별로 다른 임계 값을 갖기 때문에 worst case를 반영할 수 있도록 식 (21)과 같이 max 값으로 고장 발생 상황의 보호수준을 결정한다.

$$VPL_{fault} = \max_i (VPL_{fault,i}) \quad (21)$$

최종적으로 식 (22)와 같이 fault free 상황과 고장 발생 상황 중 worst case를 보호수준으로 선정한다.

$$VPL = \max(VPL_{fault-free}, VPL_{fault}) \quad (22)$$

3.2.2 RRAIM

RRAIM은 전체적인 개념은 RAIM과 동일하지만 positioning 방식이 조금 다르다. RRAIM의 위치 해는 식 (23)과 같이 초기위치와 상대위치의 합으로 계산된다. 초기 위치에 해당하는 $\hat{x}_i$ 는 SBAS를 통해 획득하는 것을 가정했기 때문에 무결성이 보장된다. 따라서 RRAIM의 무결성 감시 대상은 상대위치에 해당하는 Δ_i 로 좁혀지게 된다.

$$\hat{x}_e = \hat{x}_i + \Delta_i \hat{x} \quad (23)$$

RRAIM은 solution separation 기법을 활용하여 고장을 감시한다. Solution separation 기법에서는 full-set solution과 subset solution의 차이 값을 판단 변수로 정의한다. 이때 full set solution은 모든 측정치를 사용하여 획득한 위치를 의미하고 subset solution은 하나의 측정치를 제외하고 획득한 위치를 의미한다. Fault free 상황에선 full-set solution과 subset solution의 차이가 크지 않지만 만약 고장 발생 상황에서는 차이가 크게 발생할 수 있음을 예상할 수 있다. 만약 고장 위성을 제거하고 subset을 구성할 경우 이때의 subset solution은 정상 측정치만을 이용하게 된다. 반대로 full-set solution에는 고장 위성의 측정치가 포함되어 있기 때문에 둘 사이에 차이가 발생하여 고장을 검출하게 된다. 실제로 어떤 위성에 고장이 발생했는지 미리 알 수 없기 때문에 구성 가능한 모든 subset 조합에 대해 고장 감시를 진행해야 한다. RRAIM은 상대 위치에 대해서만 무결성을 감시하기 때문에 solution separation 기법은 상대 위치에만 적용된다. 이때 고장 감시는 상대위치에 대해서만 이루어지지만 최종적인 보호수준은 초기 위치와 상대 위치의 합으로 이루어진 절대 위치에 대해서 계산해야 한다.

$$P_R = \text{cov}[\hat{x}_i + \Delta_i \hat{x}] \\ = E[\hat{x}_i \hat{x}_i^T] + E[\Delta_i \hat{x} \Delta_i \hat{x}^T] + E[\Delta_i \hat{x} \hat{x}_i^T] + E[\hat{x}_i \Delta_i \hat{x}^T] \quad (24)$$

여기서 P_R 은 RRAIM 알고리즘으로 계산된 절대 위치 오차 공분산을 의미한다. 이때 첫번째 항과 두번째 항은 각각 초기 위치 오차 공분산과 상대 위치 오차 공분산을 의미한다. 초기 위치 오차 공분산은 식 (17)를 통해 계산할 수 있으며, 상대 위치 오차 공분산은 식 (16)으로부터 계산할 수 있다. 이는 식 (25)와 같다.

$$E[\Delta_i \hat{x} \Delta_i \hat{x}^T] = (H_c^T R_\Delta^{-1} H_c)^{-1} \quad (25)$$

식 (24)에서 세번째 항과 네번째 항은 초기 위치 오차 공분산과 상대 위치 오차 공분산의 상관관계를 나타낸 값이다. 이때 식 (12)와 (16)으로부터 상대 위치에는 초기 위치 오차의 성분이 포함 되어있는 것을 알 수 있다. 따라서 RRAIM 위치 오차 공분산 계산 시 초기 위치 오차와 상대 위치 오차 사이 상관관계가 존재하며 이는 식 (26)과 같다.

$$E[\Delta_i \hat{x} \hat{x}_i^T] = S_\Delta \Delta_i H E[\hat{x}_i \hat{x}_i^T] \quad (26)$$

고장 발생 상황에서 보호 수준을 계산하기 위해선 subset

Table 1. Measurement simulation model.

	Model	Assumption
GPS	Orbit	BRDC
	Ionospheric delay	IONEX data
	Tropospheric delay	Saastamoinen model
	Receiver noise	1st order Markov process
	Multipath	1st order Markov process
SBAS	Residual orbit error	WAAS performance analysis report
	Residual ionospheric delay	

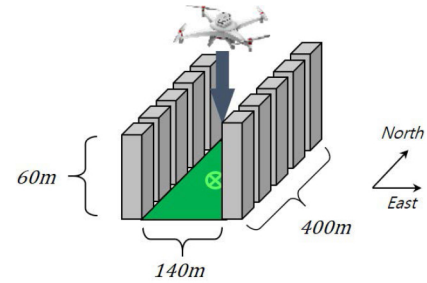


Fig. 3. Urban environment modeling.

solution에 대한 위치 오차 공분산을 계산해야 한다.

$$P_{R,sub} = \text{cov}[\hat{x}_i + \Delta_i \hat{x}_{sub}] \quad (27)$$

여기서 $\Delta_i \hat{x}_{sub}$ 는 subset solution으로 계산한 RRAIM 상대 위치를 의미하며 $P_{R,sub}$ 는 subset solution으로 계산한 RRAIM 절대 위치 오차 공분산을 의미한다. RRAIM의 보호 수준은 RAIM과 같은 방식으로 계산된다.

$$VPL_{RAIM, fault-free} = k_{FF} \sqrt{P_R(3,3)} + Bias_{nom} \\ VPL_{RAIM, fault,sub} = k_{md} \sqrt{P_{R,sub}(3,3)} + T_{RAIM,sub} + Bias_{max} \quad (28)$$

여기서 $T_{RAIM,sub}$ 는 subset solution에 대한 임계 값을 의미한다. $Bias_{nom}$ 과 $Bias_{max}$ 는 각 위성의 Integrity Support Message (ISM)로부터 제공받은 range bias로 계산한 위치 오차 바이어스를 의미한다. Range bias는 GPS 안테나 바이어스와 신호 deformation에 의해 발생하며 nominal 상황과 maximum 상황에 대해 각각 0.1 m, 1.125 m로 설정하였다 (Walter et al. 2008). 최종적인 RRAIM 보호수준은 식 (29)와 같다.

$$VPL_{RAIM} = \max(VPL_{RAIM, fault-free}, \max_{sub}(VPL_{RAIM, fault,sub})) \quad (29)$$

4. SIMULATION

도시환경에서 제안된 단일주파수기반 RRAIM의 무결성 감시 성능을 확인하기 위해 모의 실험을 진행한다. 모의실험에 사용된 측정치 생성 조건은 Table 1에 정리하였다. 이때 고층 빌딩에 의한 신호 차단 상황을 모델링하기 위해 도시 환경을 모델링 하였다. 사용자는 착륙지점까지 수직 하강하는 드론을 가정하였다. 착륙 지점에서 가시 위성이 5개 이상 보이도록 건물들 Fig. 3과 같

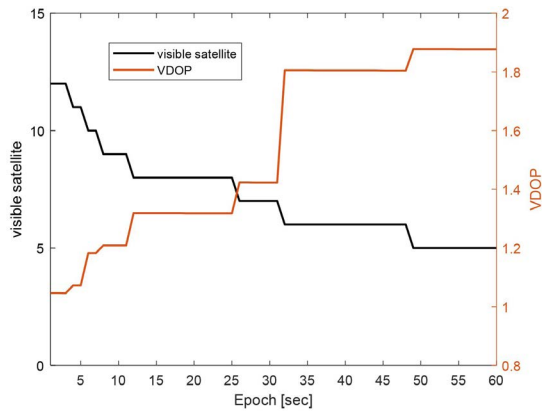


Fig. 4. Visible satellite and VDOP in time domain.

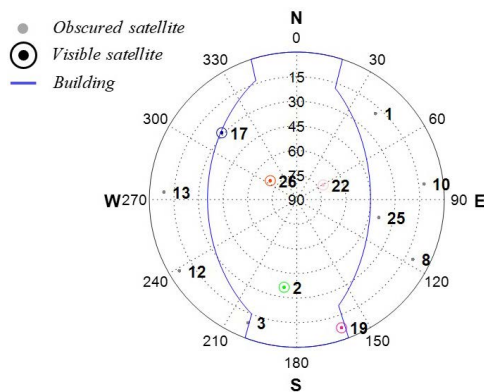


Fig. 5. Skyplot at the landing site.

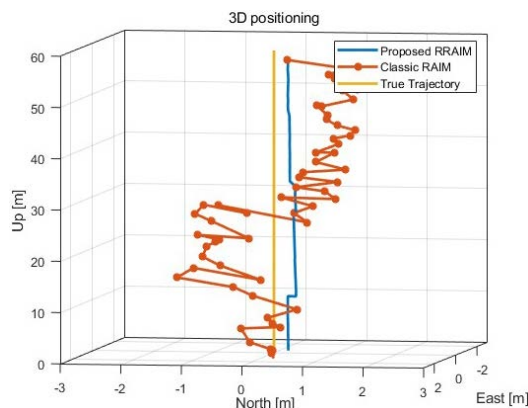


Fig. 6. 3D positioning result of residual based RAIM and proposed RRAIM.

이 설정하였다. Fig. 4는 드론이 하강하는 동안 감소한 가시위성 수와 이로 인한 Vertical Dilution of Precision (VDOP) 증가를 의미한다. Fig. 5는 착륙지점에서 빌딩으로 인해 가려진 GPS 위성을 나타낸 skyplot이다. 이때 상용 드론의 최대 하강속도가 3 m/s로 제한된 것에 착안하여 모의 실험하는 드론의 하강속도를 1 m/s로 설정하였다. 드론의 궤적은 착륙지점으로부터 60 m 떨어진 상공에서 1분간 등속으로 하강하는 상황을 가정하였다.

초기 시점에선 SBAS 보정신호를 받아 무결성이 보장된 위치

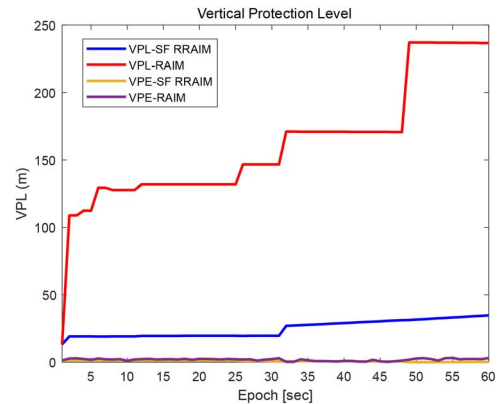


Fig. 7. Vertical protection level of residual based RAIM and proposed RRAIM.

Table 2. Vertical protection of RAIM and proposed RRAIM.

VPL	RAIM	Proposed RRAIM
Initial epoch	13.0 m	13.0 m
Final epoch	236.8 m	34.4 m

를 획득한다고 가정하고 나머지 시점에선 SBAS가 신호가 빌딩에 의해 차단된 SBAS outage 상황을 가정한다. SBAS outage 상황에서 수신기가 독자적으로 무결성을 감시할 수 있는 방안으로 일반 의사거리 기반 RAIM, 이중주파수 RRAIM 그리고 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM을 비교하였다. 각 알고리즘을 독립적으로 수행하고 결과를 비교함으로써 도심지에서 RRAIM 적용시 성능 향상을 확인하였다. RAIM의 측정치 오차 공분산 계산 시 대류층은 UNB3 모델, 전리층은 Klobuchar 모델 (Klobuchar 1987), 잡음과 다중 경로 오차는 양각에 따른 모델을 이용하였다 (Park 2008). RRAIM 측정치 오차 공분산은 기존의 RRAIM 논문을 이용하였으며 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM의 경우 본 논문에서 제안하는 전리층 drift 모델을 추가 고려하였다.

Fig. 6은 제안하는 RRAIM과 일반 의사거리 RAIM의 위치 결과를 비교한 것이다. 초기에는 두 알고리즘 모두 SBAS를 이용하여 계산된 위치에서 출발한다. 이후 제안하는 RRAIM은 시간 차분 반송파 위상 측정치를 이용하여 상대 위치를 계산하고 초기 위치로부터 현재 위치를 계산하고 의사거리 기반 RAIM은 의사거리를 이용한 최소 자승법 위치 해를 계산한다. 그 결과 잡음 수준이 작고 다중 경로 오차에 강인한 반송파 위상을 측정치로 사용하는 RRAIM의 위치 오차가 의사거리 기반 RAIM의 위치 오차보다 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 모의실험에서는 다중경로 오차를 1차 마르코프 프로세스로 모델링하였기 때문에 실제 도심지의 다중경로 오차 영향이 충분히 반영 못하였을 수 있고 실제 도심지에서는 더 큰 성능 차이가 발생할 것으로 보여 진다. RRAIM 위치 오차에 발생한 불연속 지점은 가시 위성이 감소할 때 관측행렬의 변화로 인해 발생한 것이다. Fig. 7은 의사거리 기반 RAIM과 제안하는 RRAIM의 보호수준 결과를 나타낸 것이다. 초기 보호수준은 모두 SBAS 보정 정보를 사용하여 획득한 보호수준으로부터 시작한다. 이후 2번째 epoch부터 SBAS 신호가 차단되는 상황이 발생됨에 따라 의사거리 기반 RAIM의 경우 100 m 이상으로 보호수준이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 제안하는 단일 주파수

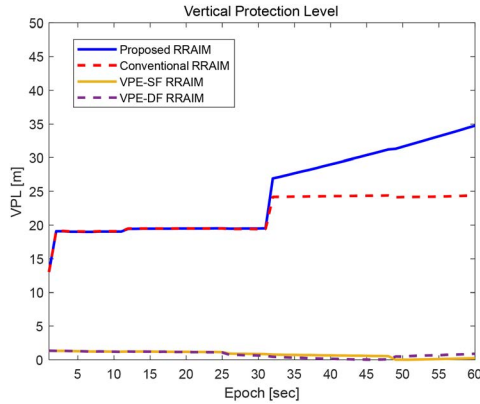


Fig. 8. Vertical protection level of dual frequency based RRAIM and proposed RRAIM.

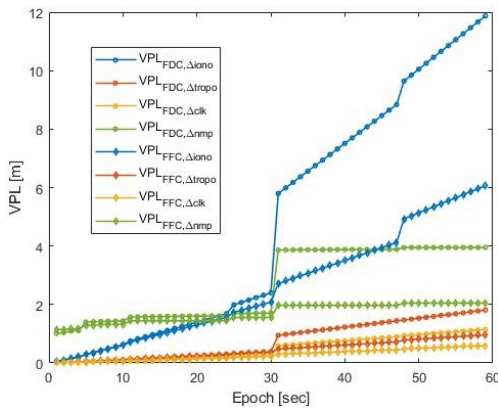


Fig. 9. Vertical protection level corresponding to the measurement components of the proposed RRAIM.

RRAIM은 초기에 SBAS에서 얻어진 보호수준을 착륙 시점까지 유지하는 것을 확인하였다. Table 2는 초기 시점과 마지막 착륙 시점에서 두 알고리즘의 수직 보호수준 결과를 나타낸 것이다.

이후 제안된 단일주파수 기반 RRAIM과 기존 이중주파수 기반 RRAIM을 비교함으로써 단일 주파수 기반 알고리즘의 성능을 확인하였다. Fig. 8은 이중주파수 기반 RRAIM과 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM의 보호수준을 비교한 결과이다. 이중 주파수의 조합으로 전리층 지연을 제거하는 기존 RRAIM과 달리 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM은 전리층 지연 오차의 drift를 직접 고려하게 된다. 따라서 시간이 길어질수록 전리층 오차가 누적된다. 따라서 모의 실험시간이 늘어날수록 기존 RRAIM과의 보호수준 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 31 epoch 시점에서 가시 위성 감소로 인해 VDOP가 크게 증가한 순간 이후부터 기존 알고리즘과의 보호수준 차이가 벌어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 말한 전리층 오차의 누적으로 인한 영향으로 나타난 결과이다. Fig. 9는 제안하는 단일주파수 기반 RRAIM의 측정치 오차 공분산 모델링에 사용된 각 오차 요소들이 VPL에 미친 영향을 나타낸다. 고장 발생 상황 (Fault during coasting)의 결과가 Fault free 상황 (Fault free coasting)보다 VPL이 크게 계산되는 것을 확인할 수 있으며 시간에 대해 모델링 된 다른 오차성분과 달리 잡음

Table 3. Vertical protection of dual frequency based RRAIM and proposed RRAIM.

VPL	Conventional RRAIM	Proposed RRAIM
Initial epoch	13.0 m	13.0 m
Final epoch	24.4 m	34.4 m

과 멀티패스는 무작위 상수 (random constant)로 모델링 되어 초기에 가장 큰 영향을 끼친다. 이후 모의 실험 시간이 늘어남에 따라 다른 오차 요소들의 시그마가 증가하면서 결과적으로 전리층에 의한 영향이 가장 커지는 것을 확인할 수 있다. 최종 수직 보호수준을 비교한 결과는 Table 3과 같다. 제안하는 알고리즘의 보호수준이 기존 결과보다 40% 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고 제안하는 알고리즘을 사용하였을 때 단일주파수 기반 GPS 수신기만으로 제한된 시간동안 SBAS 성능을 유지하여 LPV-200 요구조건에 해당하는 수직 보호수준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 도심지에 착륙하는 드론의 무결성을 감시하기 위한 단일주파수 기반 RRAIM 알고리즘을 제안하였다. 제안된 단일주파수 기반 RRAIM 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 도심지에 착륙하는 드론에 대한 모의실험을 수행하였다. 개발자를 이동하는 드론은 SBAS 신호 수신을 통해 무결성이 확보된 위치를 획득할 수 있다. 그러나 도심지로 진입하는 순간 고층 빌딩에 의해 정지궤도 위성의 신호가 차단될 경우 수신기가 독자적으로 무결성을 감시해야 한다. 수신기 단독 무결성 감시 기법으로는 의사거리 기반 RAIM과 이중주파수 기반의 RRAIM이 존재한다. 가시 위성의 변화가 심하고 다중 경로 오차가 극심한 도심지에서는 의사거리 기반의 RAIM은 성능 저하로 인하여 활용이 불가능하다. 또한 기존의 RRAIM의 경우 이중주파수 기반으로 설계된 알고리즘이기 때문에 단일주파수 수신기에는 적용이 불가능하다는 한계점이 존재한다. 그러나 제안된 방법은 전리층을 직접 고려해줌으로써 단일 주파수 기반의 수신기만으로 착륙 기간동안 초기의 SBAS 보호 수준 성능을 유지하는 것이 가능하다. 모의 실험을 통해, 제안하는 알고리즘이 일반 의사거리 기반 RAIM에 비해 멀티패스 오차가 극심하고 가시위성 감소가 빈번한 도심 환경 상황에서 우수한 보호 수준을 제고하는 것을 확인하였다. 또한 전리층 오차에 대한 추가적인 고려로 인하여 기존의 이중주파수 RRAIM 대비 보호수준이 더 크게 계산되지만 제안된 방법을 이용할 경우 저가의 단일주파수 수신기만으로 SBAS 불용 상황에서 제한된 시간동안 SBAS 요구조건인 LPV-200의 수직 경보한계 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 서울대학교 정밀기체설계공동연구소를 통해 계약된 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 21CTAP-C164137-01). 그리고 서울대학교 항공우주신

기술연구소의 지원과 서울대학교 공학연구원의 시설지원에도 감사사를 드립니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.J.; methodology, H.J. and B.K., software, H.J. and B.K.; validation, H.J. and C.K.; formal analysis, H.J. and B.K.; investigation, H.J.; and B.K., resources, H.J., and B.K., data curation, B.K., and H.J., writing—original draft preparation, H.S., and C.K., writing—review and editing, H.J.; visualization, H.J., supervision, C.K.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Groves, P. D. 2013, Multipath vs. NLOS signals, Inside GNSS, 2750, 1-12, [Internet], available from: <https://insidegnss.com/multipath-vs-nlos-signals/>
- Hsu, L.-T., Jan, S.-S., Groves, P. D., & Kubo, N. 2015, Multipath Mitigation and NLOS Detection Using Vector Tracking in Urban Environments, GPS Solutions, 19, 249-262. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0384-6>
- International Civil Aviation Organization, 2006, Annex 10 Aeronautical Telecommunications – Volume 1 Radio Navigation Aids, 6th ed. available from: <https://www.icao.int>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Kim, J., Park, M., Bae, Y., Kim, O.-J., Kim, D., et al. 2020, A Low-Cost, High-Precision Vehicle Navigation System for Deep Urban Multipath Environment Using TDCP Measurements, Sensors, 20, 3254. <https://doi.org/10.3390/s20113254>
- Klobuchar, J. A. 1987, Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23, 325-331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>
- Lee, Y. C. 2011, A Position Domain Relative RAIM Method, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 47, 85-97. <https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5705661>
- NSTB/WAAS T&E Team 2019, Wide Area Augmentation System Performance Analysis Report #70, [Internet], cited 2019 October, available from: <https://www.nstb.tc.faa.gov/reports/waaspan70.pdf>
- Park, B. 2008, A Study on Reducing Temporal and Spatial Decorrelation Effect in GNSS Augmentation System: Consideration of the Correction Message Standardization, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea
- RTCA, Inc. 2006, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229D
- Walter, T., Blanch, J., de Groot, L., Norman, L., & Joerger, M. 2018, Ionospheric rates of change, Proceedings of the ION GNSS+2018, Miami, Florida, September 24-28 2018, pp.4158-4170. <https://doi.org/10.33012/2018.16112>
- Walter, T. & Enge, P. 1995, Weighted RAIM for precision approach, Proceedings of the ION GPS 1995, Palm Springs, CA, September 12-15 1995, pp.1995-2004
- Walter, T., Enge, P., Blanch, J., & Pervan, B. 2008, Worldwide Vertical Guidance of Aircraft Based on Modernized GPS and New Integrity Augmentations, Proceedings of the IEEE, 96, 1918-1935. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006099>
- Zhu, N., Marais, J., Betaille, D., & Berbineau, M. 2018, GNSS Position Integrity in Urban Environments: A Review of Literature, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 19, 2762-2778. <http://doi.org/10.1109/TITS.2017.2766768>



Hojoon Jeong is Ph.D. student of GNSS Laboratory in the Department of Aerospace Engineering at Seoul National University. He received B.S. degree in Aerospace Engineering at Inha University, and M.S. degree in Aerospace Engineering at Seoul National University. His research interests include integrity monitoring and integrated navigation system.



Bu-Gyeom Kim is a Ph.D. candidate of the GNSS Laboratory in the Department of Aerospace Engineering at Seoul National University. He received B.S degree in aerospace engineering from the same university. His main research interest is Satellite Based Augmented System (SBAS) and ionospheric disturbances by earthquakes.



Changdon Kee is a Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering at Seoul National University (SNU), South Korea and supervises SNU GNSS Lab (SNUGL, <http://gnss.snu.ac.kr>). He received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University and a Ph.D. degree

from Stanford University. He served as a Technical Advisor to the Federal Aviation Administration (FAA) on the Wide Area Augmentation System (WAAS) in 1994. Prof. Kee currently serves as a Technical Advisor for Korea Civil Aviation Safety Authority (KCASA) and Ministry of Public Administration and Security (MOPAS). He also served as a President of Korean Institute of Navigation. He has more than 20 years of GNSS and flight control research experiences.

