

단기선 환경에서 측정 도메인 모니터를 활용하는 CDGNSS 시스템의 보호수준 산출

민동찬, 김민찬, 이지윤^{*}

Protection Level for Short-baseline Carrier-phase Differential GNSS with Range-domain Monitoring

Dongchan Min^{ID}, Noah Minchan Kim^{ID}, Jiyun Lee[†]^{ID}

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

ABSTRACT

Swarm operations for unmanned vehicles are expanding across reconnaissance, logistics, and defense applications. Missions with tight inter-vehicle spacing—such as aerial refueling and close-formation flight—require centimeter-level relative positioning and navigation integrity. This paper presents a protection level (PL) computation method for carrier phase differential GNSS (CDGNSS) that operates with measurement-domain monitors. We derive the biases in the Kalman filter estimates caused by undetected faults with consideration of the recursive nature of the filters. The impacts of these biases on fixed-baseline solutions and ambiguity resolution are separately derived under the worst-case scenario. These impacts are then combined to compute the PL. The performance of the proposed method is assessed through simulations assuming the use of an ephemeris monitor. The computed PLs are compared with PLs computed using a Solution Separation (SS)-based method. The obtained results show that, for short baselines, the proposed method yields smaller PLs and a lower computational burden by avoiding parallel multi-subset filtering. Sensitivity analyses across inter-vehicle separations indicate that the performance degrades with increasing baseline distance, whereas the benefits are strongest at short separations. Given these characteristics the approach is well-suited to tightly spaced multi-vehicle operations.

Keywords: ambiguity resolution, carrier-phase differential GNSS, integrity, protection level, range domain monitor
주요어: 미지 정수 추정, 반송파 기반 GNSS 시스템, 무결성, 보호 수준, 측정치 도메인 모니터

1. 서론

무인이동체의 군집 운용은 정찰·재난 대응·물류·군사 작전 등 다양한 분야에서 활용 범위를 빠르게 넓히고 있다. 특히 공중 급유나 근접 편대 비행처럼 기체 간 거리가 매우 짧은 임무에서는 센티미터(cm)급 상대 위치 정확도가 필수 요건으로 요구된다. 이러한 임무의 안정적 수행을 위해 상대 위치 정확도뿐 아니라 항법 무결성(integrity) 보장이 필수적이다. 항법 무결성은 민간 유인 항공분야에서 수십년간 활용되어온 개념으로, 무결성 보

장을 위해 고장 검출 기능과 보호수준(Protection Level, PL) 산출 기능이 요구된다. 보호수준은 높은 확률(예. 99.99999%)로 실제 위치가 보호수준 내부에 있음을 보장하는 항법 오차에 대한 경계로서 정의된다. 산출된 보호 수준과 운용 어플리케이션에서 정의하는 허용 위치 오차 한계를 비교하여 안전성을 보장한다.

위성항법 시스템을 활용하여 cm급 위치 정확도를 달성하기 위해서는 반송파 측정치를 활용하는 것이 필수적이다. 현재 운용중인 반송파 기반 고정밀/고무결성 보장 항법 시스템으로 Joint Precision Approach And Landing System (JPALS)

Received Aug 10, 2025 Revised Sep 01, 2025 Accepted Sep 26, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: jiyunlee@kaist.ac.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가 있다 (Rife et al. 2008). JPALS는 Carrier-phase Differential GNSS (CDGNSS) 기반 시스템으로, 전투기의 항공 모함 착륙을 위해 개발되었다. JPALS는 고장 검출을 위해 Ground-Based Augmentation System (GBAS)에서 활용하는 고장 모니터를 차용하였다 (Rife et al. 2008). 보호 수준의 경우 고장 모니터에서 검출하지 못한 미검출 고장까지 고려하여 산출되어야 하지만 공개 문헌 기준으로는, JPALS는 정상 상황만을 고려한 보호 수준을 산출한다 (Rife et al. 2008). 이는 군 운용 특성상 다중화 센서, 고가 장비, 그리고 조종사 감시가 전제된 체계이므로, 미검출 고장이 최종 보호수준 값에 주는 영향이 매우 작다고 판단하여 이를 고려하지 않은 것으로 추측된다. 하지만, 군용 시스템인 JPALS와는 달리 민간 무인이동체의 경우에는 고가·다중화 센서 구성이 현실적으로 어렵고, 운용 중 인간 감시가 부재하므로 미검출 고장까지 고려한 보호 수준 산출 체계가 요구된다.

반송파 기반 시스템에서 미검출 고장을 고려하여 보호수준을 산출하는 것은 미지 정수 해결 과정 때문에, 코드 기반 시스템보다 더욱 복잡하다. 이는 미지 정수 해결 과정이 비선형적이고 이산(discrete)적인 특징을 갖기 때문에 미검출 고장이 미지 정수 해결과정에 미치는 영향을 정확히 정량화 하기 어렵기 때문이다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 Khanafseh et al. (2013)과 Khanafseh & Pervan (2011)은 Solution Separation (SS) 기반의 위치 도메인 모니터를 활용하였다. SS 기반 모니터는 기존 코드 기반 시스템을 위해 개발된 방법으로 모든 위성을 사용하여 계산된 항법해와 고장이 의심되는 위성의 측정치를 제외하고 계산한 항법해의 차이를 활용하여 고장을 검출한다 (Blanch et al. 2015). 이러한 방법은 미검출 고장을 위치 도메인에서 정의할 수 있기 때문에, 미검출 고장의 영향을 보호 수준 산출에 용이하게 고려할 수 있다. El-Mowafy & Kubo (2017, 2018)은 이 방법을 CDGNSS 기반 기술 중 하나인 Real Time Kinematic (RTK)과 다양한 센서를 융합하는 시스템에 적용하여 무결성을 보장하였다. 또한, Zhang et al. (2023)과 Zhang & Wang (2023)은 SS 기반 방법을 기준국 네트워크를 활용하는 Precise Point Positioning-RTK 시스템에 적용하였으며, Zhang & Wang (2024)는 미지 정수 해결 과정이 SS 기반 모니터에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 사전 연구들은 반송파 기반 시스템에 SS 모니터를 적용할 때, 기존 코드 기반 시스템에서 활용되는 특징을 수학적 검증 없이 적용하였는데, Min et al. (2025)는 이 특징들이 반송파 기반 시스템에서도 적용 가능함을 수식적으로 검증하였다. 이처럼 반송파 기반 시스템에서 SS 기반 무결성 보장 방법은 활발히 연구되었지만, 다수의 항법필터를 병렬로 구동해야 하는 SS 기법 특성상, 높은 연산 부하가 발생한다.

무결성 보장을 위한 또 다른 접근 방식은 JPALS에서 활용하는 GBAS 지상 모니터와 같은 측정치 도메인 모니터를 활용하는 것이다. 측정치 도메인 모니터는 SS 기반 방법과 비교하여 상대적으로 낮은 연산량이 요구된다. 그러나 SS 기반 모니터와 달리, 이 모니터는 미검출 고장이 측정치 도메인에서 정의되기 때문에 보호 수준 산출에 어려움이 있다. 측정치 도메인 모니터에서 검출되지 못한 미검출 고장의 영향을 보호 수준 산출에 반영하기 위해서는 측정치 도메인의 미검출 고장을 위치 도메인으로 전파하는 과정이 필요하다. 이 과정에서 고장이 전파되는 메커니

즘은 미지 정수 해결 과정으로 인해 이산적(discrete)이고 비선형적인 특성을 포함한다. 이는 측정치 도메인 기반 모니터를 활용하는 CDGNSS 시스템의 보호 수준 산출을 복잡하게 만든다. Khanafseh et al. (2013)는 측정치 도메인에서 발생 가능한 고장의 최대 크기를 사전에 알고 있는 상황에서 CDGNSS 기반 시스템의 보호 수준을 산출하는 방법을 제안하였다. 해당 방법은 고장이 보호 수준 산출에 미치는 영향을 두 개의 요소로 분리하여, 각 요소를 독립적으로 바운드하였다. 하지만 해당 연구에서는 칼만 필터를 사용하였음에도 불구하고, 고장이 칼만 필터의 재귀적 특성에 의해 전파되는 영향을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 측정치 도메인 모니터를 활용하는 CDGNSS에서 보호 수준 산출 방법을 제안한다. 고장으로 인해 측정치에 편향(bias)이 발생할 경우, 1차적으로 항법 필터에 편향이 발생하며, 2차적으로 미지 정수 추정 과정에서 잘못된 추정이 발생하게 된다. 이러한 영향이 모두 통합되어 최종적으로 항법해에 편향이 발생한다. 보호 수준은 이러한 통합적 영향을 반영하여 산출되어야 하며, 미검출 고장 중 가장 큰 항법해 편향을 유발하는 최악의 상황까지 고려되어야 한다. 본 연구에서는 Khanafseh et al. (2013)의 방법처럼 용이한 보호 수준 산출을 위해 각각의 영향을 독립적으로 고려하여 보호 수준을 산출하였다. 항법 필터에 최악의 편향을 발생시키는 상황과 미지 정수 추정 과정에서 최악의 상황을 유발하는 상황을 독립적으로 도출하고, 각 상황을 보수적으로 통합하여 보호 수준을 산출하였다. 이때, 미검출 고장이 칼만 필터에 의해 재귀적으로 전파되는 영향까지 수식적으로 도출하여 함께 반영하였다. 제안하는 방법의 성능 분석을 위해 GBAS의 측정치 도메인 모니터 중 하나인 위성 궤도력 모니터를 사용하는 상황에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 보호 수준을 산출하고 Min et al. (2025)에서 제안한 위치 도메인 모니터 기반 시스템을 활용하는 상황과 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 CDGNSS 시스템의 항법 알고리즘에 대해 기술한다. 3장에서는 보호 수준 산출 방법에 대해 설명하며, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 5절에서는 결론을 도출한다.

2. CDGNSS 시스템 항법 알고리즘

이번 장에서는 CDGNSS 시스템의 항법 알고리즘에 대해 기술한다. 2.1절에서는 본 연구에서 활용하는 CDGNSS 알고리즘에 대해 간략히 정리하였고, 2.2절에서는 고장이 항법 필터에 미치는 영향을 수식적으로 도출하였으며, 2.3절에서는 최종 항법해에 미치는 영향을 도출하였다.

2.1 항법 알고리즘

이번 절은 CDGNSS 항법 시스템에서 활용하는 항법 알고리즘에 대해서 간략히 정리하였다. CDGNSS는 상대 항법 시스템으로 두개의 수신기에서 수신한 GNSS 측정치를 사용하여 두 수신기 간 상대 벡터를 산출한다. 두 수신기간 거리가 매우 짧아 대부분의 대류권/전리권 오차가 제거되는 경우에 대하여, 시간 k 에서

CDGNSS 측정치는 Eq. (1)과 같이 표현된다 (Teunissen 2002).

$$y_k = B_k \cdot b_k + A_k a_k + f_k + \varepsilon_{y_k} \quad (1)$$

여기서 y_k 는 이중차분 코드 및 반송파 측정치를 의미하며, b_k 는 상대 벡터, a_k 는 이중차분 미지 정수 벡터를 나타낸다. f_k 는 고장 벡터를 의미하며, 고장이 발생하지 않은 정상 상황에서는 0 벡터이다. ε_{y_k} 는 y_k 에 대한 잡음으로 평균이 0이고 공분산 행렬 R_k 인 정규 분포 $N(0, R_k)$ 를 따른다고 가정된다. B_k 와 A_k 는 각각 b_k 와 a_k 에 대응되는 측정치 행렬을 나타낸다.

Eq. (1)에서 칼만 필터를 활용하여 상대 벡터와 미지 정수 벡터 추정치를 산출한다. 이때, 미지 정수가 정수라는 성질은 무시하고 각 추정치를 산출하며, 각각은 상대 벡터 실수해 \hat{b}_k 및 미지 정수 실수해 \hat{a}_k 라 명명한다. 이 실수해들은 Eq. (2)와 같이 정규 분포를 따른다.

$$\begin{bmatrix} \hat{b}_k \\ \hat{a}_k \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} b_k + \mu_{b_k} \\ a_k + \mu_{a_k} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} Q_{b_k} & Q_{b_k \hat{a}_k} \\ Q_{\hat{a}_k b_k} & Q_{\hat{a}_k} \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

여기서 Q_{b_k} 와 $Q_{\hat{a}_k}$ 는 각각 \hat{b}_k 와 \hat{a}_k 의 필터 분산 행렬을 의미하며, $Q_{b_k \hat{a}_k}$ 와 $Q_{\hat{a}_k b_k}$ 는 \hat{b}_k 와 \hat{a}_k 의 필터 공분산 행렬을 의미한다. μ_{b_k} 와 μ_{a_k} 는 고장에 의해 b_k 와 a_k 에 발생하는 편향을 나타내며, 정상 상황에서는 0 벡터이다.

다음 과정으로 미지 정수의 정수 성질을 반영하기 위해, 산출된 미지 정수 실수해는 정수로 변환되며, 이때 미지 정수 실수해는 Z-변환을 통한 역상관 과정과 Integer Bootstrapping (IB) 과정을 거친다 (Teunissen 2002). Z-변환은 미지 정수 실수해 간 존재하는 상관관계를 최소화시켜 미지 정수 추정 성공 확률을 향상시키는 역할을 한다 (Teunissen et al. 1997). IB 과정은 조건부 최소자승법과 반올림을 결합한 형태로 실수해를 정수해로 변환시키는 역할을 한다 (Teunissen 2005). 미지 정수 실수해로부터 변환된 정수해는 미지 정수 고정해 \hat{a}_k 라고 명명한다. 미지 정수 고정해가 실제 미지 정수와 동일하게 산출되는 경우를 Correct Fix (CF)라고 하며, 그렇지 않은 경우 Incorrect Fix (IF)라 한다. 고장이 없는 정상 상황에서도 잡음에 의해 IF 상황이 발생할 수 있으며, 반대로 고장이 발생한 상황에서도 고장의 크기와 잡음에 따라 CF 상황이 발생할 수 있다. 산출된 미지 정수 고정해는 정밀한 상대 벡터 추정치, 즉 상대 벡터 고정해 \hat{b}_k 산출을 위해 Eq. (3)과 같이 활용된다 (Teunissen 2002).

$$\hat{b}_k = \hat{b}_k - Q_{\hat{b}_k \hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1} (\hat{a}_k - \hat{a}_k) \quad (3)$$

2.2 고장에 의한 실수해의 영향

이번 절은 고장이 칼만 필터로부터 산출되는 상대 벡터 실수해 및 미지 정수 실수해에 미치는 영향에 대해 기술한다. 고장이 발생하여 측정치에 편향이 발생하는 경우, 칼만 필터에서 산출되는 상대 벡터 및 미지 정수 실수해에는 편향이 발생한다. 이때, 발생한 고장은 현재 시간의 상대 벡터 및 미지 정수뿐만 아니라, 그 이후에 산출되는 모든 추정치에 영향을 미친다.

고장에 의한 추정치의 편향은 칼만 필터 업데이트 식으로부터 유도될 수 있다. 임의의 시간 k^{th} 에서 칼만 필터의 시스템 업데이트와 측정치 업데이트는 Eq. (4)와 (5)를 통해 이루어진다 (Simon 2006).

$$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1}^+ \quad (4)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (5)$$

여기서 $x_k = [b_k^T a_k^T]^T$ 는 칼만 필터의 상태변수(State)를 나타낸다. \hat{x}_k^- 와 \hat{x}_k^+ 는 각각 x_k 에 대한 사전(a priori) 및 사후(a posteriori) 추정치를 나타낸다. F_k 는 시스템 업데이트 행렬을 나타내며, $H_k = [B_k A_k]$ 는 측정치 업데이트 행렬을 나타낸다. 본 연구에서는 시스템 업데이트 행렬 F_k 를 단위행렬 I 로 가정하였다. 다만, 상대 벡터와 미지 정수 벡터의 다이내믹을 반영하기 위해 시스템 업데이트 공분산 행렬 W_k 을 Eq. (6)과 같이 정의하였다.

$$W_k = \text{diag}(\infty \ \infty \ \infty \ 0 \ \dots \ 0) \quad (6)$$

여기서, $\text{diag}(v)$ 는 벡터 v 의 원소를 대각 성분으로 갖는 대각 행렬을 의미한다. Eq. (6)에서 ∞ 는 상대 벡터에 해당하는 공분산 값으로, 단위 행렬로 정의된 F_k 가 실제 상대 벡터의 다이내믹을 반영하지 못하는 점을 보완하기 위해 설정하였다. 시뮬레이션 상에서는 ∞ 를 표현하기 위해 임의의 큰 수 10^6 을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서는 필터 단순화를 위해 상대 벡터 다이내믹 행렬을 단위 행렬로 가정하였으나, 보다 정교한 모델링을 위해서는 관성 센서를 활용하거나 Constant Velocity 모델을 적용하여 상대 벡터 다이내믹을 표현할 수 있다. 이러한 확장된 모델을 적용할 경우, 속도 벡터를 필터에서 함께 추정해야 한다. 특히 Constant Velocity 모델을 적용하는 경우에는 속도 추정을 위해 Eq. (1)의 측정치 벡터에 도플러 측정치가 포함되어야 한다. 이후 유도 과정에 대해서는 필터 추정 변수에 속도 변수가 추가되는 점과 상대 벡터 다이내믹 행렬이 반영되는 점을 고려하여 본 논문과 동일한 방법론으로 유도할 수 있다. Eq. (6)에서 나머지 0에 해당하는 원소는 미지 정수 벡터의 공분산 값으로, 사이클 슬립이 발생하지 않는 한 변하지 않는 특성을 고려하여 0으로 설정하였다. Eq. (5)를 Eq. (4)에 대입하고, F_k 에 단위 행렬을 대입하여 정리하면 Eq. (7)와 같이 정리할 수 있다.

$$\hat{x}_k^+ = (I - K_k H_k) \hat{x}_{k-1}^+ + K_k y_k \quad (7)$$

만약, 고장이 발생하여 칼만 필터 추정치에 계속하여 누적되고 있는 상황이라면, 고장에 의해 사후 추정치 \hat{x}_k^+ 에 발생하는 편향 μ_{x_k} 은 Eq. (7)로부터 Eq. (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu_{\hat{x}_k} = (I - K_k H_k) \mu_{\hat{x}_{k-1}} + K_k f_k \quad (8)$$

즉, 우변의 첫 번째 항은 $k-1^{\text{th}}$ 시간까지 누적된 고장의 영향이 현재 추정치에 전파되는 크기를 나타내며, 두 번째 항은 k^{th} 에 발생한 고장이 현재의 추정치에 투영되는 크기를 나타낸다. Eq. (8)을 f_1, \dots, f_k 의 합으로 나타내면 Eq. (9)와 같이 표현 가능하다.

$$\mu_{\hat{x}_k} = \begin{bmatrix} \mu_{b_k} \\ \mu_{a_k} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^k S(k, j) \cdot f_j \quad (9)$$

여기서, $S(k, j)$ 는 시간 j^{th} 에서 발생한 고장 f_j 의 영향을 시간 k^{th} 로 전파해주는 행렬로써 Eq. (10)과 같이 정의된다.

$$S(k, j) = (I - K_k H_k) \dots (I - K_{j+1} H_{j+1}) K_j \quad (10)$$

즉, 칼만 필터에서 계산되는 상대 벡터 실수해와 미지 정수 실수해의 편향은 Eq. (9)를 통해 계산된다.

2.3 고장에 의한 상대 벡터 고정해의 영향

이번 절에서는 고장에 의해 발생한 상대 벡터 실수해 및 미지 정수 실수해의 편향이 최종적으로 상대 벡터 고정해에 미치는 영향에 대해 기술한다. Teunissen (2002)는 상대 벡터 고정해와 상대 벡터 실수해의 조건부 확률 밀도 함수가 Eq. (11)과 같은 관계를 가짐을 증명하였다.

$$f_{\hat{b}_k|\hat{a}_k}(u|w) = f_{\hat{b}_k|\hat{a}_k}(u|w) \quad (11)$$

여기서 $f_{\hat{b}_k|\hat{a}_k}(u|w)$ 는 상대 벡터 고정해의 조건부 확률 밀도 함수로, $\hat{a}_k=w$ 인 상황에서 $\hat{b}_k=u$ 인 확률 밀도를 의미한다. $f_{\hat{b}_k|\hat{a}_k}(u|w)$ 는 상대 벡터 실수해의 조건부 확률 밀도 함수로, $\hat{a}_k=w$ 인 상황에서 $\hat{b}_k=u$ 인 확률 밀도를 의미한다. u 는 임의의 실수이며, w 는 임의의 정수이다.

Eq. (2)와 같이 상대 벡터 실수해와 미지 정수 실수해는 정규 분포를 따르기 때문에, 상대 벡터 실수해의 조건부 확률 밀도 함수 또한 정규 분포 밀도 함수로 정의 된다. 즉, 미지 정수 고정해가 w 인 경우, 상대 벡터 고정해의 평균은 Eq. (12)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} E(\hat{b}_k) &= b_k + \mu_{\hat{b}_k} \\ &= E(\hat{b}_k) + Q_{\hat{b}_k\hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1} (w - E(\hat{a}_k)) \\ &= (b_k + \mu_{\hat{b}_k}) + Q_{\hat{b}_k\hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1} (w - (a_k + \mu_{\hat{a}_k})) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $E(\bullet)$ 는 평균 연산자(expectation operator)이다. 첫 번째 등호는 상대 벡터 고정해에 대한 정의이며, 두 번째 등호는 널리 알려진 정규 분포 조건부 확률 분포 식에 의해 성립한다. 세 번째 등호는 Eq. (2)로부터 성립한다. 따라서, 상대 벡터 고정해의 편향 $\mu_{\hat{b}_k}$ 는 Eq. (12)로부터 Eq. (13)과 같이 정리될 수 있다.

$$\mu_{\hat{b}_k} = \mu_{\hat{b}_k} - Q_{\hat{b}_k\hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1} (\mu_{\hat{a}_k} - (w - a_k)) \quad (13)$$

3. 보호 수준 산출 방법

본 장에서는 보호 수준 산출 방법에 대해 기술한다. 3.1절에서는 무결성 위협 확률로부터 보호 수준 식을 도출하고, 3.2절과 3.3절에서는 도출된 보호 수준 식을 실질적으로 계산하기 위한 방법을 기술한다.

3.1 무결성 위협 확률과 보호 수준

무결성 위협 확률(Probability of Hazardous Misleading Information, $P(HMI)$)이란 모니터에 의한 경보 없이 추정된 항법 해의 오차가 기준이 되는 한계를 넘는 확률을 의미한다 (Joerger et al. 2014). 보호 수준(protection level)은 시스템의 무결성 요구 조건을 만족하도록 설정된 기준 한계로서, 무결성 위협 확률이 요구되는 무결성 요구조건과 동일하게 되도록 하는 값으로 계산된다. 보호 수준 산출 시에는 고장 발생 상황에서 모니터링 시스

템이 검출하지 못한 미검출 고장의 영향까지 모두 고려해야 한다. 그러나 실제 운용 환경에서는 현재 고장의 발생 여부를 확정적으로 알 수 없으므로, Eq. (14)와 같이 확률론적 접근법을 통해 서만 이를 고려할 수 있다 (Joerger et al. 2014).

$$P(HMI) = \sum_{i=0}^h P(HMI|H_i)P_{H_i} \quad (14)$$

여기서 H_i 는 i^{th} 위성에 고장이 발생한 가상 상황을 나타내며, H_0 는 고장이 발생하지 않은 정상 상황을 나타낸다. P_{H_i} 는 고장 가설 H_i 가 발생했을 확률을 나타낸다.

고장 가설 H_i 하에서 무결성 위협 확률과 보호 수준의 관계는 HMI 정의 (Joerger et al. 2014)로부터 Eq. (15)와 같이 표현 가능하다. Eq. (15)에서 상대 벡터 고정해 \hat{b}_k 는 벡터이지만, 이하의 전개에서는 편의상 \hat{b}_k 를 상대 벡터 고정해의 원소 중 수직 성분만을 나타낸다고 한다. 다른 성분들에 대해서는 수직 성분과 동일하게 적용 가능하다.

$$P(|\hat{b}_k - b_k| > PL_i|H_i) \cdot P_{MD} \cdot P_{H_i} = I_{req,i}^* \quad (15)$$

여기서 항법 필터와 모니터는 서로 독립이라고 가정되었으며, P_{MD} 는 모니터에서 고장을 검출하지 못할 확률을 의미한다. $I_{req,i}^*$ 는 고장 가설 H_i 에 할당된 수직 성분 무결성 요구조건을 의미하며, PL_i 는 고장 가설 H_i 에 대한 보호 수준을 의미한다. Eq. (15)로부터 산출되는 보호 수준은 H_i 상황에서 실제 위치가 보호 수준 내부에 존재함을 $1 - I_{req,i}^*$ 의 확률로 보장한다.

Eq. (15)로부터 PL_i 를 계산하기 위해 상대 벡터 고정해의 확률 밀도 함수가 요구된다. 상대 벡터 고정해의 확률밀도 함수는 미지 정수 고정해의 CF와 IF 여부에 따라 평균값이 달라지며, 이는 Eq. (13)에서 확인 가능하다. Eq. (15)에 전체 확률의 법칙을 적용하면 Eq. (16)과 같이 CF와 IF 경우를 확률적으로 분리하여 나타낼 수 있다.

$$P(|\hat{b}_k - b_k| > PL_i|CF, H_i) \cdot P(CF|H_i) + P(|\hat{b}_k - b_k| > PL_i|IF, H_i) \cdot P(IF|H_i) = I_{req,i} \quad (16)$$

여기서, $I_{req,i}$ 는 $I_{req,i}^*/P_{MD}/P_{H_i}$ 를 나타내며, $P(CF|H_i)$ 와 $P(IF|H_i)$ 는 각각 H_i 상황에서 CF와 IF일 확률을 나타낸다. 고장 가설 H_i 상황에서 CF 또는 IF 상황은 고장에 의한 미지 정수 실수해 편향의 크기와 잡음에 의해 결정된다. 즉, H_i 상황이라든가 편향의 크기가 작은 경우 CF일 수 있으며, 편향의 크기가 크더라도 잡음이 고장을 상쇄시켜 CF가 낮은 확률로 발생할 수 있다. 고장 가설 H_i 상황에서의 CF 및 IF 확률에 대한 보다 자세한 내용은 3.3절에 기술하였다.

Khanafseh et al. (2013)와 같이 IF 상황일 경우 상대 벡터 고정해의 오차가 항상 보호 수준을 넘는다고 가정하면, Eq. (16)은 Eq. (17)과 같이 정리된다.

$$P(|\hat{b}_k - b_k| > PL_i|CF, H_i) \cdot P(CF|H_i) + P(IF|H_i) = I_{req,i} \quad (17)$$

여기서, $I_{req,i}$ 는 $I_{req,i}^*/P_{MD}/P_{H_i}$ 를 나타낸다. $P(CF|H_i)$ 와 $P(IF|H_i)$ 의 합은 항상 1이기 때문에, Eq. (17)은 Eq. (18)과 같이 정리될 수 있다.

$$P(|\hat{b}_k - b_k| > PL_i|CF, H_i) = \frac{I_{req,i} - P(IF|H_i)}{1 - P(IF|H_i)} \quad (18)$$

CF 상황에서 상대 벡터 고정해는 정규 분포를 따르기 때문에,

Eq. (18)에서 보호 수준은 Eq. (19)와 같이 표현될 수 있다.

$$PL_i = \mu_{b_k|CF} + \Psi^{-1} \left(\frac{I_{req,i} - P(IF|H_i)}{1 - P(IF|H_i)} \right) \cdot \sigma_{b_k|CF} \quad (19)$$

여기서 $\mu_{b_k|CF}$ 는 CF 상황에서 상대 벡터 고정해에 발생한 편향을 의미하며, Eq. (13)에서 $w=a_k$ 인 상황이다. $\sigma_{b_k|CF}$ 는 상대 벡터 고정해의 표준편차를 의미한다. Ψ^{-1} 는 표준 정규분포의 Complementary Cumulative Distribution Function의 역함수를 의미한다.

Eq. (19)로부터 상대 벡터 고정해의 보호 수준을 산출하기 위해서 $P(IF|H_i)$ 가 $I_{req,i}$ 보다 작아야 함을 확인할 수 있다. $P(IF|H_i)$ 는 미지 정수 실수해의 편향의 크기가 커질수록 커지며, 미지 정수 실수해의 편향의 크기는 고장의 크기가 클수록 커진다. 따라서, 미검출 고장의 크기가 충분히 작지 않은 경우 $P(IF|H_i)$ 가 $I_{req,i}$ 보다 크기 때문에 상대 벡터 고정해의 보호 수준을 산출할 수 없으며, 무결성을 보장할 수 없다. 이러한 경우 상대 벡터 실수해와 그에 해당하는 보호 수준을 활용하여 무결성을 보장한다.

Eq. (19)로부터 산출된 보호 수준은 H_i 가설 상황에 대응되는 보호 수준이다. 모든 고장 가설 H_1, \dots, H_n 에 대응되는 각각의 보호 수준을 산출하고, 그 중 최댓값을 항법 시스템의 최종 보호 수준으로 활용함으로써 무결성을 보장한다.

Eq. (19)로부터 보호 수준을 계산하기 위해 3.2절과 3.3절에서는 각각 $\mu_{b_k|CF}$ 와 $P(IF|H_i)$ 를 계산하는 방법을 기술한다. 이때, 최악의 미검출 고장 상황에서도 보호 수준이 위치 오차를 바운드할 수 있도록 보장하기 위해, 바운딩 기법이 적용되어 산출된다.

3.2 CF 상황 하에서의 상대 벡터 고정해 편향

상대 벡터 고정해 편향 $\mu_{b_k|CF}$ 는 Eq. (13)에서 $w=a_k$ 를 대입함으로써 계산된다.

$$\mu_{b_k|CF} = \mu_{b_k} - Q_{b_k \hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1} \mu_{\hat{a}_k} \quad (20)$$

Eq. (9)를 Eq. (20)에 대입하면 상대 벡터 고정해 편향은 Eq. (21)과 같이 표현된다.

$$\mu_{b_k|CF} = \sum_{j=1}^k s_b(k, j) \cdot f_{j,i} \quad (21)$$

여기서, $s_b(k, j)$ 는 $[I - Q_{b_k \hat{a}_k} Q_{\hat{a}_k}^{-1}] \cdot S(k, j)$ 로 정의된다. $f_{j,i}$ 는 H_i 상황에서 j^{th} 시간에 발생한 미검출 고장을 의미한다. 미검출 고장 벡터는 어느 위성에 고장이 발생했는지 나타내는 표시자 벡터 $v_{j,i}$ 와 미검출 고장의 크기 $m_{j,i}$ 의 곱으로 표현될 수 있다. 표시자 벡터는 고장이 발생한 위성의 측정치에 해당하는 원소는 1이고, 그 외의 원소는 0이다. 즉, j^{th} 위성이 고장난 상황을 의미하는 H_i 고장 가설 상황 하에서, 표시자 벡터 $v_{j,i}$ 는 하나로 특정된다. 반면, 미검출 고장 크기 $m_{j,i}$ 의 경우 그 값을 특정할 수 없다. 하지만, 측정치 도메인 모니터를 통해 미검출 고장이 가질 수 있는 크기의 최댓값 $M_{j,i}$ 를 특정할 수 있다. 이 최댓값을 활용하여 상대 벡터 고정해 편향이 가질 수 있는 최댓값을 Eq. (22)와 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{b_k|CF} < \sum_{j=1}^k |s_b(k, j) \cdot v_{j,i}| M_{j,i} \quad (22)$$

여기서, 절댓값이 적용된 이유는 미검출 고장의 랜덤한 방향까지 모두 고려한 최댓값을 도출하기 위함이다. 따라서, Eq. (22)에서 산출되는 상대 벡터 고정해 편향은, 미검출 고장에 의해 발생할 수 있는 모든 상황 중 최악 조건에서의 편향 크기를 보수적으로 바운드한다.

칼만 필터에서 과거에 발생한 고장이 현재 추정치에 미치는 영향은 시간이 지남에 따라 점진적으로 감소한다. 즉, Eq. (22)에서 현재 시점 k 을 기준으로 더 오래전에 발생한 고장일수록 추정치 편향에 미치는 영향이 작아진다. 이러한 특성을 고려하여, 본 연구에서는 계산량을 위해 필터 시작 시점부터가 아닌, 현재 시점으로부터 100초 이전까지 발생한 고장의 영향만을 고려하였다.

3.3 미지 정수 고정해 IF 확률

미지 정수 고정해가 IF일 확률 $P(IF|H_i)$ 는 미지 정수 실수해의 공분산 행렬 $Q_{\hat{a}_k}$ 과 편향 $\mu_{\hat{a}_k}$ 으로부터 Eq. (23)을 통해 계산된다 (Teunissen et al. 2000).

$$P(IF|H_i) = 1 - \prod_{j=1}^n \left[\Phi \left(\frac{1 - 2c_j L_k^{-1} Z_k^T \mu_{\hat{a}_k}}{2\sigma_{z_{j|j}}} \right) + \Phi \left(\frac{1 + 2L_k^{-1} Z_k^T \mu_{\hat{a}_k}}{2\sigma_{z_{j|j}}} \right) - 1 \right] \quad (23)$$

여기서, Z_k^T 는 Teunissen et al. (1997)에서 제안한 Z-변환 행렬을 의미한다. Z-변환 후의 미지 정수 실수해 공분산 행렬 $Q_{\hat{a}_k}$ 은 $Z_k^T Q_{\hat{a}_k} Z_k$ 로 계산된다. L_k 은 $Q_{\hat{a}_k}$ 을 LDL 분해했을 때 산출되는 단위 하삼각행렬을 의미한다. $\sigma_{z_{j|j}}$ 는 대각행렬 D_k 의 j^{th} 원소를 나타내며, D_k 는 $Q_{\hat{a}_k}$ 을 LDL 분해했을 때 산출되는 대각행렬을 의미한다. c_j 는 j^{th} 원소는 1이고, 나머지 원소는 0의 값을 갖는 벡터를 의미한다. Φ 는 표준 정규 분포의 Cumulative Density Function을 나타낸다. Eq. (23)을 통해 계산되는 IF 확률은 미지 정수 실수해의 편향의 크기와 방향에 영향을 받는다. 특히, 편향의 크기가 0일 때, 최솟값을 가진다. Eq. (23)으로부터 미검출 고장에 의해 발생할 수 있는 최악의 IF 확률을 산출하기 위해 Eq. (24)의 변수 μ_{ξ_k} 를 정의하였다.

$$\mu_{\xi_k} = D_k^{-1} L_k^{-1} Z_k^T \mu_{\hat{a}_k} \quad (24)$$

변수 μ_{ξ_k} 의 i^{th} 원소는 Eq. (23)의 $c_j L_k^{-1} Z_k^T \mu_{\hat{a}_k} / \sigma_{z_{j|j}}$ 와 동일하다. Eq. (9)를 Eq. (24)에 대입하여 정리하면 Eq. (25)와 같이 μ_{ξ_k} 를 미검출 고장 f_j 에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\mu_{\xi_k} = \sum_{j=1}^k s_a(k, j) \cdot f_{j,i} \quad (25)$$

여기서 $s_a(k, j)$ 는 $D_k^{-1} L_k^{-1} Z_k^T E S(k, j)$ 로 정의되며, E 는 $[\mu_{b_k}^T \mu_{\hat{a}_k}^T]^T$ 로부터 $\mu_{\hat{a}_k}$ 을 분리해내는 행렬이다. 3.1절과 유사한 방식으로, 표시자 벡터 $v_{j,i}$ 와 미검출 고장의 최대 크기 $M_{j,i}$ 를 활용하여 최악의 μ_{ξ_k} 를 Eq. (26)과 같이 계산할 수 있다.

$$\mu_{\xi_k} < \sum_{j=1}^k |s_a(k, j) \cdot v_{j,i}| M_{j,i} \quad (26)$$

Eq. (26)으로부터 계산된 μ_{ξ_k} 의 각 원소를 Eq. (23)에 대입하여 산출된 IF 확률은, 미검출 고장에 의해 발생할 수 있는 모든 IF 시나리오 중 최악 조건에서의 IF 확률을 보수적으로 바운드하는 값

Table 1. Simulation parameters.

Parameters		Values
Navigation requirements	Integrity risk in vertical direction ($I_{req,v}$)	10^{-7}
	Continuity risk under fault-free ($C_{req,0,v}$)	10^{-5}
Faults	A priori probability of a satellite measurement fault ($P_{H_{f=0}}$)	10^{-5}
	The number of maximum simultaneous faults	Single
Environments	Location	Daejeon, South Korea
	Constellation	GPS 24 / Galileo 27
	Frequency	L1/L5 for GPS, E1/E5a for Galileo
Measurement error models	Code multipath error	$\sigma: 1+3.09\cdot\exp(-\frac{x}{9.12})$ m, $\tau: 30$ s
	Carrier multipath error	$\sigma: 2+6.18\cdot\exp(-\frac{x}{9.12})$ cm, $\tau: 30$ s
	Ionospheric decorrelation error	4 mm/km

으로 사용될 수 있다. 또한, 계산량을 고려하여 Eq. (22)에서와 마찬가지로 현재 시점으로부터 100초 이전까지 발생한 고장의 영향만을 고려하였다.

4. 시뮬레이션 기반 성능 분석

4.1 시뮬레이션 파라미터

본 연구에서 제안하는 보호 수준의 성능 평가를 위해 시뮬레이션 기반 성능 분석을 수행한다. 대전 지역에서 이중 주파수/이중 위성군 측정치를 사용하는 두 대의 무인 이동체를 가정하였다. 코드 측정치 다중경로 오차는 1차 가우스 마코프 모델로 모델링되었으며, 시간 상수는 30초로 설정하였다. 표준 편차의 경우 고도각 90° 에서 수신되는 신호에 대하여 1m로 가정하였으며, 고도각에 따른 값은 Table 1의 식을 따른다. 반송파 측정치 또한 1차 가우스 마코프 모델로 모델링되었으며, 시간 상수는 30초, 고도각 90° 에 대하여 2 cm의 표준 편차를 적용하였다. 코드와 반송파 측정치의 다중경로 오차는 Khanafseh et al. (2018)의 분석 결과를 참고하여 결정하였다. 전리층 잔류 오차는 4 mm/km (Lee et al. 2007)로 가정하였다.

성능 분석은 위성 궤도력 고장 상황을 고려하여 수행되었다. 위성 궤도력 고장은 위성에서 방송하는 항법 메시지에 오류가 발생하여 항법 메시지로부터 산출된 위성 위치와 실제 위성 위치 간에 큰 차이가 발생하는 상황을 의미한다. 이때 위성 위치 오차로 인한 GNSS 측정치 편향의 크기는 위성 위치 차이를 두 무인이동체 간 상대 벡터에 투영한 값으로 결정된다. 본 연구에서는 무인이동체가 위성 궤도력 고장 검출을 위해 Orbit-fit 모니터 (Lee et al. 2006)를 탑재하고 있다고 가정하였으며, 미검출 고장의 크기는 Lee et al. (2006)의 분석 결과를 활용하였다. 수직 방향 무결성 위협 확률 요구조건은 10^{-7} , 모니터의 연속성 위협 확률 요구조건은 10^{-5} 로 가정하였다. 무결성 위협 확률 요구조건은 모든 위성에 동일하게 분배되었다. 위성 궤도력 고장이 발생할 확률은 10^{-5} 로 가정하였다.

4.2 보호 수준 산출 결과

Fig. 1은 두 무인이동체 간 거리가 10 m인 상황에서 보호 수준을 산출한 결과이다. 검은색 실선은 Orbit-fit 모니터를 사용하

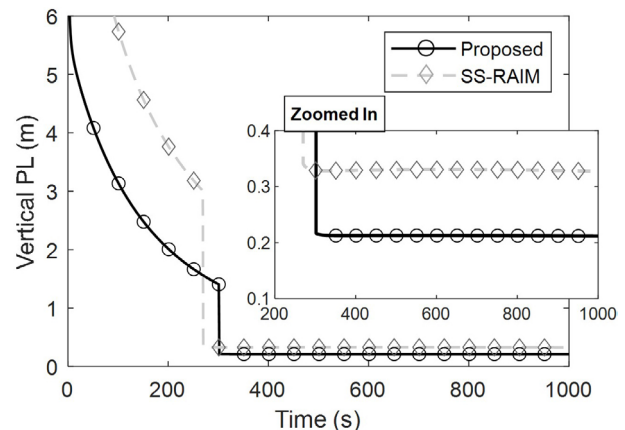


Fig. 1. Vertical Protection Level (PL) comparison between the proposed method (black solid line with circle markers) and the SS-RAIM method (gray dashed line with diamond markers) for a baseline distance of 10 m.

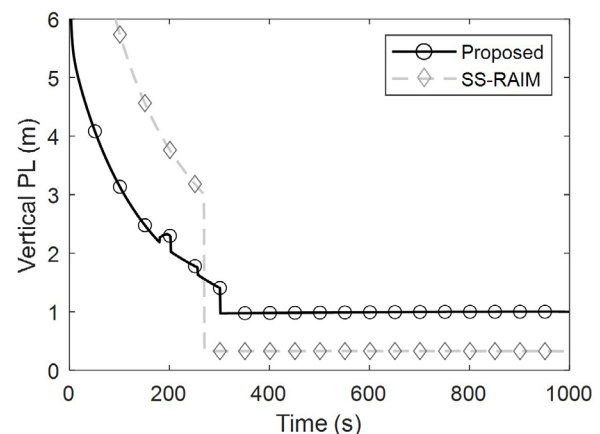


Fig. 2. Vertical Protection Level (PL) comparison between the proposed method (black solid line with circle markers) and the SS-RAIM method (gray dashed line with diamond markers) for a baseline distance of 200 m.

는 상황에서 본 논문에서 제안한 방법을 활용하여 산출한 보호 수준이며, 회색 점선은 Min et al. (2025)에서 제안한 위치 도메인 모니터를 활용하는 SS 기반 Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) 기법을 적용한 결과이다. 그래프 내부의 작은 그래프는 200 ~ 1000초 구간을 확대한 것이다. 시뮬레이션 결과에서 두 방법 모두 약 300초 부근에서 보호 수준이 급격히 감소

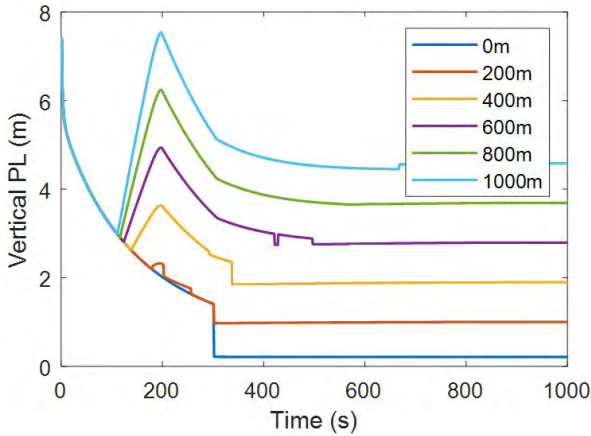


Fig. 3. Vertical Protection Level (PL) comparison with respect to baseline distances.

하는 것을 확인할 수 있다. 이는 300초 이전까지는 상대 벡터 실수해가 활용되다가, 300초 이후부터 상대 벡터 고정해가 사용되기 때문이다. 제안하는 방법에서는 3.3절에서 기술한 바와 같이, 미지 정수 고정해 IF 확률이 무결성 위협 확률 요구조건보다 작은 경우에 고정해를 사용하였다. 필터가 수렴함에 따라 미지 정수 실수해의 추정 정확도가 향상되어 $P(IF|H_i)$ 가 점차 작아지며, 300초 이후, 즉 I_{req} 보다 작아지는 시점부터 상대 벡터 고정해 사용이 가능해졌다. SS-RAIM 기반 방법 또한 필터 수렴에 따라 상대 벡터 고정해 사용이 가능해졌다. 보호 수준 크기를 비교해 보면, 상대 벡터 실수해가 사용되는 구간에서는 SS-RAIM 기반 방법 대비 제안하는 방법이 평균 36% 감소하였으며, 고정해가 사용되는 구간에서는 46% 감소하였다. 계산량 측면에서도 SS-RAIM 기법은 병렬 필터를 구동해야 하기 때문에, 본 연구에서 제안하는 방법 대비 평균 5배 이상의 연산량이 소요되었다.

Fig. 2는 두 무인이동체 간 거리가 200 m인 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 결과에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 제안한 방법을 사용한 경우 상대 벡터 고정해 보호 수준이 크게 증가한 반면, SS-RAIM 기법의 경우 보호 수준에 큰 변화가 없었다. 이러한 차이는 두 모니터링 기법의 근본적인 동작 원리 차이에서 기인한다. Orbit-fit 모니터는 검정 통계량을 위성 위치 도메인에서 정의하고 모니터 임계값과 비교하여 고장을 검출한다. 따라서 미검출 고장의 크기는 위성 위치 도메인에서 정의되며, 이를 측정치 도메인으로 변환하여 보호 수준을 산출한다. 변환 과정에서 동일한 위성 위치 도메인 미검출 고장이더라도 두 무인이동체 간 거리가 증가함에 따라 측정치 도메인에서의 미검출 고장 크기가 비례적으로 증가한다. 반면, SS-RAIM은 측정치로부터 계산된 사용자 위치를 활용하여 고장을 검출한다. 즉, 위치 도메인에 발생하는 고장에 의한 편향을 직접 모니터링하기 때문에 두 무인이동체 간 거리에 의한 영향이 이미 모니터에 반영되어 있어, 거리가 증가하더라도 미검출 고장의 크기는 변화하지 않는다. 이러한 특성 차이로 인해 제안하는 방법의 경우 고정해 보호 수준이 약 4.6 배 가량 증가하였지만 SS-RAIM 기반 기법은 거의 변하지 않았다. 상대 벡터 실수해 보호 수준의 경우 큰 변화를 보이지 않았는데, 이는 미검출 고장 크기 증가로 인한 상대 벡터 실수해 편향 증

가분보다 잡음에 의한 보호 수준의 영향이 더 크기 때문이다. 따라서 고정해의 경우 제안한 기법의 보호 수준이 SS-RAIM 기법보다 더 크게 산출되었지만, 실수해의 경우 제안하는 방법의 보호 수준이 더 작게 나타났다. 계산량 측면에서는 제안한 방법이 SS-RAIM 기법에 비해 더 적은 연산 자원을 요구한다.

Fig. 3은 제안하는 방법을 적용하였을 때 두 무인이동체 간 거리 변화에 따른 보호 수준의 변화를 보여준다. 두 무인이동체 간 거리가 증가함에 따라 미검출 고장의 크기가 점진적으로 증가하며, 이에 따라 보호 수준의 크기도 점진적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 두 무인이동체 간 거리가 400 m 이상인 경우, 약 110초 부근에서 보호 수준이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 누적되는 미검출 고장에 의한 위치 오차를 바운드하기 위함이다. 두 무인이동체 간 거리가 600 m 이하인 경우, Figs. 1과 2의 결과와 같이 보호 수준이 계단식으로 감소하는 구간을 확인할 수 있다. 이는 실수해가 사용되다가 고정해가 사용되었기 때문이다. 다만, 두 무인이동체 간 거리가 증가함에 따라 고정해가 사용되는 시점이 다소 늦어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 미검출 고장에 의한 미지 정수 실수해 편향의 크기가 증가하여 $P(IF|H_i)$ 가 I_{req} 보다 작아지기까지 더 긴 필터링 시간이 요구되었기 때문이다. 두 무인이동체 간 거리가 600 m를 넘어서는 시점부터는 보호 수준이 계단식으로 급감하는 시점을 찾을 수 없다. 이는 미지 정수 실수해 편향의 크기가 너무 커져서 충분한 필터링 시간을 가져도 I_{req} 보다 작은 $P(IF|H_i)$ 를 달성할 수 없어 상대 벡터 고정해를 사용할 수 없었기 때문이다. 본 연구에서 도출된 상대 벡터 고정해 사용 불가능 시점인 600 m는 해당 시뮬레이션 환경에서 국한된 결과이다. 즉, Orbit-fit 위성 궤도력 모니터를 사용하며 Table 1에 정의된 상황에서 도출된 결과로, 다른 고장 모니터를 활용하거나 다른 성능의 수신기를 사용하는 경우에는 상대 벡터 고정해 사용 불가능 시점이 달라질 수 있다.

5. 결론

CDGNSS 시스템은 반송파 측정치를 활용하는 정밀 상대항법 기술로, 공중 급유와 같이 근거리 군집 임무를 수행하는 응용 분야에 적합하다. 이러한 군집 임무의 안전한 수행을 위해서는 항법 시스템의 무결성 보장이 필수적이다. 본 연구에서는 측정치 도메인 모니터를 활용하는 무결성 보장 CDGNSS 시스템에서의 보호수준 산출 방법을 제안하였다. 무결성 위협 확률의 정의로부터 상대 벡터 고정해에 대한 보호 수준 산출식을 유도하였으며, 이는 미검출 고장으로 인한 고정해의 편향과 미지 정수의 IF 확률에 의해 결정된다. 이를 위해 미검출 고장이 칼만 필터의 재귀 과정을 통해 상대 벡터 실수해와 미지 정수 실수해에 누적되는 영향을 정량화하고, 해당 영향을 기반으로 고정해 편향과 IF 확률을 산출하였다. 제안된 PL은 최악의 고장 시나리오에서도 실제 오차를 보수적으로 바운드하도록 설계되었다. Orbit-fit 기반 위성 궤도력 고장 모니터를 가정한 시뮬레이션을 수행하였고, 두 무인이동체 간 거리가 수십 미터 이내인 경우 제안 기법이 SS-RAIM 기반 방법보다 더 작은 보호 수준을 제공하며 더 낮은 연산량을 요구하는 것을 확인하였다. 반면, 두 무인이동체 간 거리 증가에 따

라 미검출 고장 크기가 커지고, 보호 수준이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 제안된 기법이 근거리 군집 운용 환경에서 특히 적합함을 시사한다. 향후 연구에서는 3대 이상의 무인이동체가 구성하는 상대 항법 네트워크를 활용하여, 기하학적 이점을 통해 장거리 기준선에서도 향상된 보호수준 성능을 확보하는 기법을 개발하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체 미래선도 핵심기술 개발사업단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2020M3C1C1A01086407).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D. Min; Methodology, D. Min; Software, D. Min; Validation: D. Min and N. M. Kim; Formal analysis: D. Min, and N. M. Kim; Investigation, D. Min, N. M. Kim, and J. Lee; Resources: D. Min, N. M. Kim, and J. Lee; Data curation: D. Min; Writing—original draft preparation, D. Min; Writing—review and editing, N. M. Kim, and J. Lee; Visualization, D. Min; Supervision, J. Lee; Project administration, J. Lee; Funding acquisition, J. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Blanch, J., Walter, T., Enge, P., Lee, Y., Pervan, B., et al. 2015, Baseline advanced RAIM user algorithm and possible improvements, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 51, 713–732. <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130739>
- El-Mowafy, A. & Kubo, N. 2017, Integrity monitoring of vehicle positioning in urban environment using RTK GNSS, IMU and speedometer, *Measurement Science and Technology*, 28, 055102. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa5c66>
- El-Mowafy, A. & Kubo, N. 2018, Integrity monitoring for positioning of intelligent transport systems using integrated RTK GNSS, IMU and vehicle odometer, *IET Intelligent Transport Systems*, 12, 901–908. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.0106>
- Joerger, M., Chan, F. C., & Pervan, B. 2014, Solution separation versus residual based RAIM, *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 61, 273–291. <https://doi.org/10.1002/navi.71>
- Khanafseh, S., Kujur, B., Joerger, M., Walter, T., Pullen, S., et al. 2018, GNSS multipath error modeling for automotive applications, In *Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)*, Miami, Florida, 24–28 September 2018, pp.1573–1589. <https://doi.org/10.33012/2018.16107>
- Khanafseh, S., Langel, S., Joerger, M., & Pervan, B. 2013, Evaluating integrity and continuity risks of cycle resolution in the presence of receiver faults, In *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, Tennessee, 16–20 September 2013, pp.2583–2591.
- Khanafseh, S. & Pervan, B. 2011, Detection and mitigation of reference receiver faults in differential carrier phase navigation systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 47, 2391–2404. <https://doi.org/10.1109/TAES.2011.6034640>
- Lee, J., Pullen, S., Datta Barua, S., & Enge, P. 2007, Assessment of ionosphere spatial decorrelation for Global Positioning System based aircraft landing systems, *Journal of Aircraft*, 44, 1662–1669. <https://doi.org/10.2514/1.28199>
- Lee, J., Pullen, S., Enge, P., Pervan, B., & Gratton, L. 2006, Monitoring Global Positioning System satellite orbit errors for aircraft landing systems, *Journal of Aircraft*, 43, 799–808. <https://doi.org/10.2514/1.17339>
- Min, D., Kim, N. M., Nam, G., Lee, J., & Pullen, S. 2025, SS RAIM based integrity architecture for CDGNSS systems against satellite measurement faults, *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, in press.
- Rife, J., Khanafseh, S., Pullen, S., De Lorenzo, D., Kim, U. S., et al. 2008, Navigation, interference suppression, and fault monitoring in the sea based Joint Precision Approach and Landing System, *Proceedings of the IEEE*, 96, 1958–1975. <https://doi.org/10.1109/PROC.2008.2006107>
- Simon, D. J. 2006, *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞, and Nonlinear Approaches* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons)
- Teunissen, P. J. G. 2002, The parameter distributions of the integer GPS model, *Journal of Geodesy*, 76, 41–48. <https://doi.org/10.1007/s001900100223>
- Teunissen, P. J. G. 2005, Integer aperture bootstrapping: A new GNSS ambiguity estimator with controllable fail rate, *Journal of Geodesy*, 79, 389–397. <https://doi.org/10.1007/s00190-005-0481-y>
- Teunissen, P. J. G., de Jonge, P. J., & Tiberius, C. C. J. M. 1997, The least squares ambiguity decorrelation adjustment: Its performance on short GPS baselines and short

observation spans, *Journal of Geodesy*, 71, 589-602.
<https://doi.org/10.1007/s001900050127>

- Teunissen, P. J. G., Joosten, P., & Tiberius, C. C. J. M. 2000, Bias robustness of GPS ambiguity resolution, In *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION GPS 2000)*, Salt Lake City, Utah, 19-22 September 2000, pp.104-112.
- Zhang, W. & Wang, J. 2023, Integrity monitoring scheme for single-epoch GNSS PPP-RTK positioning, *Satellite Navigation*, 4, 10. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00099-1>
- Zhang, W. & Wang, J. 2024, GNSS PPP-RTK: integrity monitoring method considering wrong ambiguity fixing, *GPS Solutions*, 28, 30. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01572-9>
- Zhang, W., Wang, J., El-Mowafy, A., & Rizos, C. 2023, Integrity monitoring scheme for undifferenced and uncombined multi-frequency multi-constellation PPP-RTK, *GPS Solutions*, 27, 68. <https://doi.org/10.1007/s10291-022-01391-4>

She has authored over 100 research papers in the field of GNSS applications and safety critical systems.



Dongchan Min is a postdoctoral researcher in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea. He received the B.S. degree in mechanical engineering from Sungkyunkwan University, Republic of Korea, and the M.S. and Ph.D. degrees in Aerospace Engineering from KAIST, Republic of Korea. His research interests include the integrity architecture for carrier-based GNSS systems, and advanced receiver autonomous integrity monitoring.



Noah Minchan Kim received his B.S. degree in Aerospace Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in Daejeon, Republic of Korea, in 2019. He is currently a combined M.S./ Ph.D. student in the Department of Aerospace Engineering at KAIST. His research interests include carrier phase differential global navigation satellite systems, multisensor integration, and navigation integrity.



Jiyun Lee received the Ph.D. degree in Aeronautics and Astronautics from Stanford University, Stanford, CA, USA, in 2005. She is a full professor with the Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST).

