

저궤도 항법 시스템의 가용성 및 탄력성 향상을 위한 지상국 PAA 기반 능동적 결함 교정에 관한 개념 연구

김원길[†], 유태호

A Conceptual Study on Active Fault Remediation Based on Ground Phased Array Antennas to Enhance Availability and Resilience of LEO-PNT Systems

Wongil Kim[†] , Taeho Yu 

KPS Ground and User Segment Development Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

Low Earth Orbit Positioning, Navigation, and Timing (LEO-PNT) systems offer higher signal strength and faster convergence time over Medium Earth Orbit (MEO) Global Navigation Satellite System (GNSS). However, uncertainties in orbit determination persist due to orbital perturbations. Conventional Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM)-based Fault Detection and Exclusion (FDE) approaches suffer from a structural limitation where faulty satellite exclusion reduces navigation availability. Furthermore, in severely occluded environments such as urban canyons, fault-induced Geometric Dilution of Precision (GDOP) spikes can effectively suspend navigation services. This makes it difficult to meet the operational requirements of high-reliability applications such as autonomous driving and Urban Air Mobility (UAM). To overcome these limitations, this paper presents a conceptual study on ground station Phased Array Antenna (PAA)-based active fault remediation to enhance the availability and resilience of LEO-PNT systems. The proposed architecture consists of four core functions: spatiotemporal consistency assurance via digital beamforming-based PAA, real-time bias correction and transfer based on the nominal satellite constellation, precise state estimation combining an Extended Kalman Filter (EKF) with an orbital dynamics model and warm start mechanism, and an active feedback loop with correction data uplink within one second. Through a worst-case geometric scenario analysis, the proposed architecture confirms the feasibility of maintaining satellite geometry and enhancing positioning precision through resilient recovery, without excluding faulty satellites, even in critical environments where conventional FDE approaches render the service unavailable. This study proposes a conceptual design for ground station-centric active integrity management, and a quantitative performance validation is planned in subsequent research.

Keywords: LEO-PNT, PAA, active fault remediation, resilience, availability

주요어: 저궤도 항법 시스템, 위상배열안테나, 능동적 결함 교정, 탄력성, 가용성

1. 서론

우주 강국 간의 저궤도(LEO) 군집 위성 경쟁이 가열됨에 따

라, 초정밀 위치·항법·시각(PNT) 정보를 제공하는 저궤도 항법시스템(LEO-PNT) 구축이 국가 우주 전략의 핵심 과제로 부상하고 있다. 저궤도 위성은 중궤도(MEO) Global Navigation

Received Feb 28, 2026 Revised Mar 09, 2026 Accepted Mar 20, 2026

[†]Corresponding Author E-mail: wgkim90@kari.re.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.

Satellite System (GNSS) 대비 높은 신호 강도와 빠른 동역학적 가변성을 지녀 사용자 수신기의 Precise Point Positioning (PPP) 방법시 수렴 시간 단축에 유리하지만, 대기 항력 및 지구 중력 섭동 등 복잡한 외란 하에서 궤도 결정 및 시계 유지의 불확실성이 상존한다 (Won et al. 2024). 또한 위성 가시 시간이 짧고 궤도 평면 변화가 빠르다는 특성으로 인해 항법 서비스의 연속성 확보가 구조적으로 까다롭다.

특히 위성 기하가 빠르게 변화하는 환경에서는 항법 무결성과 가용성 간의 상충 관계가 두드러진다. 항법 무결성이란 시스템 고장으로 사용이 불가하거나 위치 오차에 큰 결함이 예상될 때 사용자에게 적시에 경고를 제공하는 능력을 의미하며, 이는 사용자 안전과 직결되는 임무 필수 요건이다 (Kim et al. 2025). 기존의 수동적 결함 위성 배제 전략인 Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) 기반 Fault Detection and Exclusion (FDE)은 결함 위성을 단순히 제거함으로써 가용 위성 수를 감소시키고, 결과적으로 시스템의 기하학적 가용성(geometric availability)을 저하시키는 한계를 지닌다. 특히 도심 항공모빌리티(UAM)와 같은 미래 고신뢰 항법 수요 환경에서 위성 배제는 서비스 단절(outage) 및 위상 무결성 저하의 직접적인 원인이 된다. 따라서 고가용성이 요구되는 자율주행, 항공 도심 모빌리티 등의 운용 요건을 충족하기 위해서는 이러한 수동적 방식을 넘어서 혁신적인 방식이 필요하다. 2.1절은 무결성과 가용성 간의 상충관계 및 기하학적 취약성과 이에 따른 문제점에 대해 기술하였다.

그리고 기존의 위성 지상국은 항법 서비스의 탄력적 운영에 있어 관측 데이터의 시공간적 비일관성을 가지며, 복구 지연 시간에 의한 탄력성 저하와 같은 한계점을 노출한다. 시스템의 탄력성(resilience)은 ‘결함 발생 후 원래의 서비스 수준으로 복구되는 속도와 능력’으로 정의된다. 기존의 위성은 지상국 ‘1안테나-1 위성’ 구조로 인한 시공간적 비일관성과 위성 결함 탐지 시 위성 관제의 개입이나 안테나 구동, 제어 등에 따른 복구 지연으로 탄력적 항법 서비스 운영에 한계를 가진다. 2.2절은 기존 지상국의 시공간적 비일관성 및 탄력성 한계에 대해 기술하였다.

이러한 기술적 한계점을 극복하기 위해 본 논문은 저궤도 항법 시스템의 가용성 및 탄력성 향상을 위한 지상국 Phased Array Antenna (PAA) 기반의 능동적 결함 교정에 관한 개념연구를 수행하였다. 본 논문에서 결함이란 궤도력 및 시계 결함에 따라 시스템이 성능 요건을 벗어난 상태로 정의하며, ‘능동적 결함 교정(active fault remediation)’이란, 결함 위성을 시스템에서 배제하는 기존의 수동적 무결성 관리 방식과는 달리, 지상국이 독립적인 고정 좌표와 정상 위성군 정밀 위치 정보를 기반으로 결함 위성의 위치를 추정하고, 이를 실시간으로 보정 데이터를 생성하여 위성에게 피드백함으로써 항법 자원으로 계속 활용 가능하도록 지원하는 운용 개념을 의미한다. 즉 능동적 결함 교정은 단순한 결함 탐지 및 배제를 넘어, 결함 발생 이후에도 위성 기하 구조를 유지하면서 항법 서비스의 연속성과 가용성을 보존하는 것을 목표로 하는 지상국 중심의 복원 아키텍처이다. 이는 결함 위성 제거로 인한 기하학적 열화를 최소화하고, 임계 가시 환경에서도 항법 성능 저하를 완화하기 위한 대안적 무결성 관리 프레임워크로 제안된다. Fig. 1은 이 논문에서 제안하는 아키텍처에 따른 운영 개념이다.

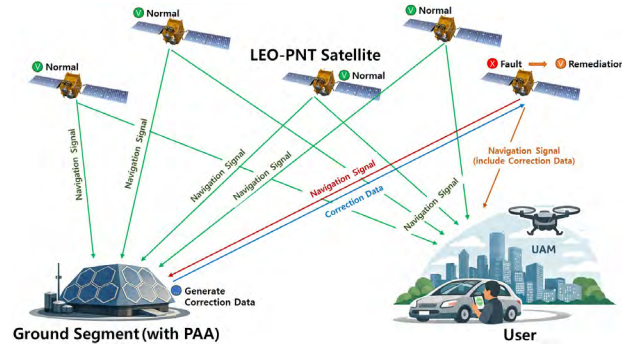


Fig. 1. Concept of operations for the proposed architecture.

본 논문은 검증된 실제 구현보다는 개념적인 아키텍처를 제안하는 데 중점을 두고 있다. 정량적인 성능 한계 산출 및 실현 가능성 분석은 본 연구의 범위를 벗어나며 이는 향후 후속 연구를 진행할 예정이다.

2. 항법 서비스를 위한 지상 아키텍처의 기술적 현안 및 한계

2.1 FDE의 무결성-가용성 상충 관계 및 기하학적 취약성

저궤도 항법 시스템은 중궤도 GNSS 대비 높은 신호 강도를 제공할 수 있으나, 위성 가시 시간이 짧고 궤도 평면 변화가 빠르다는 특성으로 인해 항법 서비스의 연속성 확보가 구조적으로 까다롭다. 특히 위성 기하가 빠르게 변화하는 환경에서는 항법 무결성과 가용성 간의 상충 관계가 더욱 두드러지게 나타난다.

현재 널리 적용되는 RAIM 기반 FDE 방식은 가시 위성의 기하학적 중복성에 의존하여 결함을 탐지하고 배제하는 구조를 갖는다. 일반적인 3차원 위치 추정 및 수신기 시계 바이어스를 포함하는 항법 문제에서, 단일 위성 결함을 식별, 배제하기 위해서는 통상적으로 최소 6기 이상의 가시 위성이 요구된다. 그러나 도심 협곡과 같은 지형적 차폐 환경에서는 가시 위성 수가 일시적으로 4~5기에 제한되는 구간이 빈번하게 발생할 수 있다 (Kim 2009). 이러한 상황에서 결함이 탐지될 경우 무결성 보호 수준을 유지하기 위해 항법 해의 제공이 제한되거나 중단될 가능성이 높아지며, 이는 무결성 기반 서비스의 연속성을 저해하는 요인으로 작용한다 (Blanch et al. 2015). 이러한 서비스 불연속성은 고가용성, 고신뢰성이 요구되는 자율주행 차량이나 도심 항공모빌리티와 같은 차세대 이동체 응용의 운용 요건을 충족하는 데 제약으로 작용할 수 있다 (Zhu et al. 2018).

한편, 결함 위성을 배제하는 과정에서 남은 위성군이 형성하는 기하 구조의 품질이 급격히 저하되는 기하학적 취약성 또한 문제로 지적된다. 특히 기하적으로 중요한 위치, 예를 들어 사용자 상공 방향에 가까운 위성이 배제될 경우, 잔여 위성들로 구성된 기하 구조의 체적이 크게 감소하면서 Geometric Dilution of Precision (GDOP)가 급격히 증가할 수 있다 (Kim et al. 2020). 이

경우, 결함 위성을 제거함으로써 무결성 요구 조건은 충족되더라도 정상 동작 중인 위성들만으로는 항법 해의 정밀도를 충분히 보장하기 어려워지는 상황이 발생할 수 있다. 이는 무결성 확보를 위한 배제 전략이 결과적으로 항법 성능 저하로 이어질 수 있음을 시사하며, 기존 무결성 관리 프레임워크의 구조적 한계를 드러낸다.

2.2 기존 지상국의 시공간적 비밀관성 및 탄력성 한계

시스템의 탄력성은 '결함 발생 후 원래의 서비스 수준으로 복구되는 속도와 능력'으로 정의된다. 그러나 기존의 지상 세그먼트 아키텍처는 항법 서비스의 탄력적 운영에 있어 관측 데이터의 시공간적 비밀관성, 복구 지연 시간에 의한 탄력성 저하와 같은 한계점을 노출한다.

기존의 기계식 구동 안테나는 '1안테나-1위성' 추적 원칙에 고착되어 있다. 또한 저궤도 위성은 초속 약 7.5 km로 고속 이동하므로, 다수의 위성을 개별 안테나로 관측할 경우 각 위성 측정치 사이에 미세한 시간 지터(time jitter)와 공간적 위상 오차가 발생한다 (Kaplan & Hegarty 2017). 이러한 데이터의 비밀관성은 결함 위성의 실제 위치를 역추산하기 위해 필요한 '위성-지상 동시 스냅샷' 확보를 방해하며, 결과적으로 결함 교정의 정밀도와 신뢰성을 저하시킨다.

탄력적 항법 시스템은 위성 결함 탐지 즉시 보정 정보를 생성하여 사용자에게 전달해야 한다. 그러나 기존 지상국은 위성 결함 탐지 후 관제 센터의 개입이나 안테나 지향 변경 등에 물리적 시간이 소요되는 비실시간 또는 비연속적 시스템 체계이다. 이러한 지연 시간이 저궤도 환경에서 수십 킬로미터 이상의 궤도력 공백을 야기하며, 시스템이 스스로 결함을 보수하고 서비스를 유지하는 능력을 근본적으로 제약한다 (Chen et al. 2024).

3. 제안하는 PAA 기반 능동적 결함 교정 아키텍처

본 논문에서의 능동적 결함 교정은 결함 위성의 신호를 배제하여 무결성을 확보하는 접근이 아니라, 결함 위성의 상태를 지상국 고정 좌표 및 정상 위성군을 활용하여 재추정하고, 보정 벡터를 생성하여 항법 해 계산에 재통합하는 접근으로 정의된다. 이 개념은 결함 위성을 제거함으로써 기하학적 자유도를 감소시키는 기존 FDE 구조와 대비되며, 복원 중심의 운용 패러다임으로 전환하는 것을 특징으로 한다. 제안하는 아키텍처는 Fig. 2와 같으며 (1) 디지털 빔포밍(digital beamforming) 기반 PAA, (2) 정상 위성군 기반 실시간 바이어스 교정 및 전이, (3) Extended Kalman Filter (EKF) 기반 상시 모니터링 및 정밀 위치 추정, (4) 실시간 보정 데이터 생성 및 능동적 피드백으로 구성된다.

- (1) 디지털 빔포밍 기반 PAA: 단일 개구면에서 다중 빔을 형성하여 군집위성을 동시에 추적 및 송수신하며 시공간적 일관성을 확보한다.
- (2) 정상 위성군 기반 실시간 바이어스 교정 및 전이: 정상 위성군의 기하학적 참값을 기준으로 지상국-위성 시계 오차 및 안테나 위상 중심 오차를 실시간 식별하고, 이를

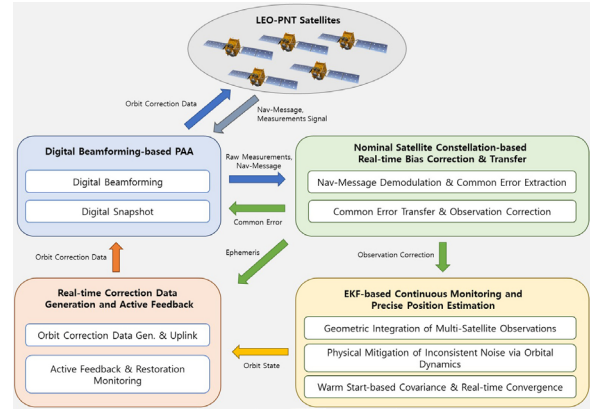


Fig. 2. Ground station PAA-based active fault remediation architecture.

결함 위성에 전이하여 시스템 내부 바이어스를 일괄 상쇄한다.

- (3) EKF 기반 상시 모니터링 및 정밀 위치 추정: 저궤도 위성 동역학 모델과 워밍 스타트(warm start) 메커니즘을 결합하여 각도 측정 잡음을 완화하고, 결함 탐지 시 지연 없이 위성 위치를 추정한다.
- (4) 실시간 보정 데이터 생성 및 능동적 피드백: 결함 위성의 궤도 및 시계 보정치, 궤도변화율, 시계변화율로 보정 데이터를 구성하여 1초 이내에 업링크하고, 항법신호를 수신하여 최종 품질을 보증하는 능동적 루프 및 상태 관리를 수행한다.

3.1 지상국 PAA

PAA는 다수의 안테나 소자를 배열하고, 각 소자에 입력되는 신호의 위상을 개별적으로 제어하여 전파의 지향성을 전자적으로 조절하는 안테나 시스템이다 (He et al. 2021). 특히 본 연구에서는 디지털 빔포밍 기반 PAA는 수신된 아날로그 신호를 소자 레벨에서 즉시 디지털화하여 연산함으로써, 물리적 구동 없이 소프트웨어만으로 수십 개의 독립적인 수신 및 송신 빔을 동시에 형성한다. 이는 저궤도 항법시스템에서 요구되는 고정밀 관측과 실시간 피드백을 단일 하드웨어 개구면 내에서 통합 처리할 수 있게 한다.

3.1.1 PAA 주요 장점

디지털 빔포밍 기반의 PAA의 첫 번째 주요 장점은 다중빔 생성을 통한 다중 위성 동시 송수신 및 추적이다. 단일 개구면에서 여러 개의 독립적인 빔을 생성하여 빔 커버리지 내 모든 저궤도 위성의 항법 신호를 수신하는 동시에 결함 위성을 대상으로 한 보정 메시지 송신 빔을 개별적으로 할당할 수 있다. 이는 고속 이동하는 저궤도 군집 위성의 핸드오버를 끊임없이 처리할 뿐만 아니라, 모니터링과 결함복원이 실시간으로 교차하는 능동적 결함 교정에 효율적이다. 또한, 빔포밍 기반으로 한 외부 간섭신호 제거, 빔폭 조정 등 다양한 상황에서 유연한 대처가 가능하다. 두 번째로는 초고속 지향성 스위칭 및 민첩한 대응이다. 기계적 동작

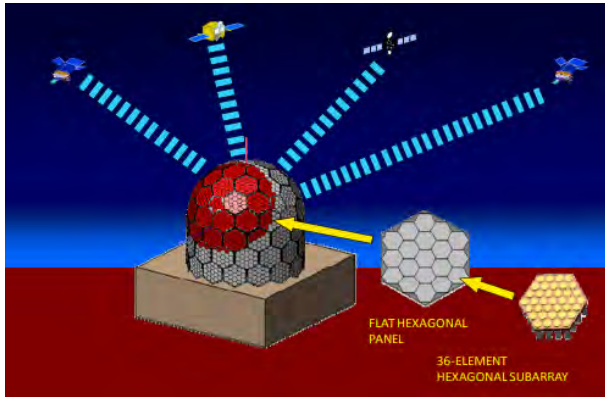


Fig. 3. Geodesic dome phased array antenna (Ahn et al. 2010).

이 아닌 전자적 스캔을 통해 마이크로초 단위로 빔 방향을 전환할 수 있어, 위성 궤도 변화에 대한 대응력을 극대화할 수 있다. 마지막으로 높은 시스템 신뢰성이다. 구동부가 없어 평균 고장 간격(MTBF)가 매우 길며, 일부 소자가 고장나더라도 전체적인 송수신 이득이 급격히 저하되지는 않는 특성을 가진다 (Dolph Microwave 2025).

3.1.2 PAA 주요 단점

PAA의 주요 단점으로는 각도 측정 잡음을 가지는 것이다. 안테나의 물리적 크기와 빔 폭의 한계로 인해 원거리 위성 관측 시 거리 측정 대비 상대적으로 큰 각도 오차가 발생한다. 하지만 본 논문에서는 PAA 각도 측정 잡음을 제거하는 방법이 아닌, 서로 다른 방향에서 형성되는 기하 제약을 통해 상태 추정 오차 공분산을 축소하는 메커니즘을 제안하여 PAA 각도 측정 잡음 자체를 감소시키는 것이 아닌 상태 추정 단계에서의 오차를 완화하는 방향을 가진다. 3.3절에서 이를 설명하고 있다. 그리고 PAA의 경우 수천 개의 소자와 고성능 디지털 처리가 요구되어 초기 구축 비용이 기계식 안테나 대비 높다. 하지만 다중 위성 동시 처리 능력에 따른 운영 효율성, 부지 활용 자산, 유지보수 비용, 시스템 확장성 등을 고려할 때, 총 수명 주기 관점에서는 기계식 안테나 대비 우월한 경제성을 가진다 (He et al. 2021). 또한, 평면형 배열 안테나의 경우, 기계식 조향 안테나와 비교하여, 조향각이 클수록 빔폭 증가, 빔오차 증가 및 편파 특성 왜곡 등이 발생한다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 표면적응형 배열 형상 혹은 Fig. 3과 같이, 다면체를 구형대로 구성하는 지오데식 돔(geodesic dome) 구조의 배열 형상을 활용함으로써, 조향각이 커질 경우 발생하기는 성능 열화를 극복할 수 있다 (Ahn et al. 2010).

3.1.3 디지털 빔포밍 기반 시공간 일관성 확보 및 디지털 스냅샷 기능

2.2절에서 언급되었던 기계식 안테나의 시공간적 비일관성 문제를 해결하기 위해, 이 아키텍처는 지상국 PAA의 디지털 빔포밍 기능을 활용한다.

PAA는 단일 개구면에서 가시권 내의 모든 위성에 대해 독립

적인 수신 빔을 형성하여 나노초단위로 동기화된 위성의 의사거리 및 도달각(AoA)을 획득한다. 이는 초속 7.5 km로 이동하는 저궤도 위성 관측 시 발생하는 안테나 간 시간 지터를 근본적으로 차단하고 위성-지상 간의 동시공간 스냅샷을 형성한다. 특히 이렇게 확보된 수신 데이터의 정밀한 타임스탬프는 결합위성으로 송신될 보정 신호의 생성 시점과 동기화되어, 공간적 위상 오차 문제를 해결하고 결합 위성의 실제 위치 역추산을 위한 관측치의 정밀도를 극대화한다.

3.2 정상 위성군 기반 실시간 바이어스 교정 및 전이 기능

이번 절에서는 지상국 PAA 시스템 자체에서 발생하는 하드웨어적 오차를 정상 위성군 기반으로 실시간 바이어스 교정 및 전이하는 메커니즘을 기술한다. 이는 결합 위성의 실제 오차만을 추출하여 2.1절에서 언급한 무결성-가용성 상충관계를 극복하기 위한 조건을 만든다.

3.2.1 항법 메시지 복조 및 오차 추출

지상국 PAA는 정상 위성군의 항법 신호를 수신하여 두 가지 데이터를 동시에 획득한다. 첫번째는 신호 추적 루프를 통해 오차가 포함된 원시 관측치(raw measurements)이며, 특정 시각에 대한 의사거리와 도달각 벡터로 구성된다. 두번째는 항법 신호를 복조하여 추출한 방송 궤도력이다. 방송 궤도력을 바탕으로 정상 위성의 정확한 3차원 위치를 산출하고, 이를 지상국 위치와 연립하여 이론적 기하 참값을 계산한다. 이후 이론 값과 실제 원시 관측치를 비교하여 모든 정상 위성에서 발생하는 오차를 도출한다. 오차에는 PAA 수신 시계 바이어스, PAA 시스템의 안테나 각도 바이어스가 포함된다.

3.2.2 오차 실시간 전이 및 관측치 보정

정상 위성군으로부터 도출된 오차는 결합 위성을 실시간으로 수신 중인 해당 빔 프로세싱 유닛으로 즉각 전이한다. 결합 위성의 원시 관측 데이터가 생성되는 시점에 맞춰, 앞서 산출된 오차를 선제적으로 보상함으로써 PAA 시스템의 안테나 각도 바이어스, PAA 수신 시계 바이어스를 일괄 상쇄한다. 이 과정을 통해 확보되는 보정된 관측치는 항법신호 자체가 아닌, 수신된 전파를 기저대역에서 디지털 처리하여 얻은 수치 데이터, 즉 시스템에서 기이한 오차가 제거된 기하학적 의사거리 및 도달각 벡터를 의미한다. 이 보정된 관측치는 이어지는 3.3절의 입력으로 사용된다.

3.3 EKF 기반 상시 모니터링 및 정밀 위치 추정 기능

이번 절에서는 3.2절에서 획득한 보정된 관측치를 확장 칼만 필터의 입력원으로 활용하여, 결합 위성의 3차원 상태 벡터(x)를 정밀도 향상을 위해 능동적 상태 수렴 메커니즘을 기술한다. 3차원 상태 벡터 x는 Eq. (1)과 같다.

$$x = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \delta t, \delta \dot{t}]^T \quad (1)$$

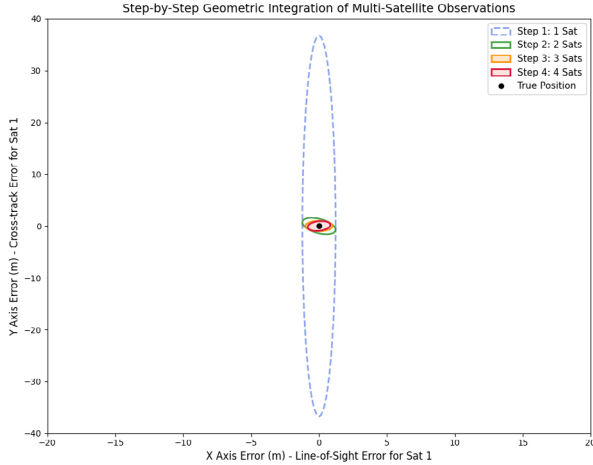


Fig. 4. Geometric integration of multi-satellite observations.

PAA의 하드웨어적 한계로 인한 각도 측정 잡음은 단일 관측 시점에서 제거하기 어려우나, 이 아키텍처는 이를 개별 데이터의 정밀도 향상이 아닌 상태 추정 단계에서의 오차 공분산(P) 축소를 통해 해결한다. 가시권 내 모든 위성을 대상으로 하는 상시 모니터링은 사전에 정보 행렬(I)을 충분히 확장하여 최소화된 오차 공분산을 유지하며, 결합 탐지 시 공간적 기하 제약과 저궤도 위성의 동역학 모델을 결합함으로써 결합 위성의 정밀한 상태 벡터를 추정한다.

3.3.1 다중 위성 관측치의 기하학적 통합

지상국 PAA는 가시권 내 위성들에 대해 보정된 의사거리와 도달각 데이터를 수 밀리초 단위로 끊임없이 획득하고 이를 공간 상에서 유기적으로 통합하여 정보 행렬(I)을 구성한다. 관측 업데이트 단계에서 정보 행렬은 Eq. (2)와 같이 재귀적으로 확장된다 (Morales et al. 2019).

$$I_k = I_k^- + \sum_{i=1}^N H_{i,k}^T R_{i,k}^{-1} H_{i,k} \quad (2)$$

여기서 I_k^- 는 예측된 사전 정보 행렬, $H_{i,k}$ 는 i 번째 위성에 대한 관측 Jacobian 행렬, $R_{i,k}^{-1}$ 는 관측 잡음 공분산 행렬의 역수로서 센서 정보의 가중치를 의미한다. PAA의 거리 관측치는 정밀도가 높아 관측 잡음의 가중치가 매우 크게 작용하며, 시선 방향의 오차 분산을 강력하게 제약한다. 반면 도달각은 각도 측정 잡음이 커서 관측 잡음의 가중치가 작으므로 단일 관측 시 횡방향 정보량 확장은 제한적이다. 단일 관측의 횡방향 취약성은 서로 다른 공간적 방향($H_{i,k}$)에서 유입되는 다중 위성 관측 정보의 합산을 통해 상쇄한다 (Chen et al. 2013). 특정 위성의 횡방향 축이 다른 위성에게는 시선 방향 축으로 작용하여 막대한 거리 가중치를 보강한다. 결과적으로 전체 오차 공분산 크기를 3차원 전 방향에서 특정 정밀도로 최소화한다. Fig. 4는 이러한 다중 위성 관측 정보 기하학적 통합의 원리를 직관적으로 설명하기 위해 2차원 평면으로 투영한 오차 공분산의 단면을 나타낸다. 첫 번째 위성의 시선 방향을 X축으로 정렬하였을 때, X축 방향은 PAA의 고정밀 거리 관측

치에 의해 강하게 제약되는 반면, Y축 방향은 각도 측정 잡음에 의해 크게 확장된다. 그러나 다수의 위성 관측치가 단계적으로 합산됨에 따라, 서로 다른 공간적 방향의 거리 가중치가 다른 위성의 횡방향 취약성을 상호 보완한다. 실제 시스템에서는 다수의 위성 고도각과 방위각을 달리하며 배치되므로, 이와 동일한 기하학적 상쇄 원리가 3차원 공간 전체에 적용되어 최종 상태 추정 오차 공분산이 원형에 가깝게 최소화됨을 알 수 있다.

3.3.2 궤도 동역학 기반을 통한 비일관적 잡음의 물리적 완화

PAA 하드웨어 기인 각도 측정 잡음은 저궤도 위성의 궤도 동역학 모델이 가진 제약 조건과 결합되어 간접적으로 완화된다. 상태 추정간의 시간 업데이트 과정은 궤도 상태 전이 행렬(Φ)과 시스템 프로세스 잡음 공분산(Q)을 통해 예측되며, 사전 오차 공분산(P_k^-)과 사전 정보 행렬(I_k^-)은 Eqs. (3, 4)와 같이 도출된다.

$$P_k^- = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (3)$$

$$I_k^- = (P_k^-)^{-1} \quad (4)$$

위성의 실제 운동은 뉴턴 역학 및 섭동력 모델에 기반한 Φ_{k-1} 행렬에 의해 연속적이고 제한된 궤적을 그린다 (Morales et al. 2019). 반면, 수신 과정의 미세한 PAA 각도 측정 잡음은 이 모델과 일관되지 않은 무작위 잡음의 특성을 보인다. EKF는 관측 업데이트 과정에서 예측된 상태량과 실제 관측치 간의 잔차를 평가하며, 이를 상태 추정치에 반영하는 비율은 Eq. (5)와 같은 칼만 이득(K_k)을 통해 결정된다 (Brown & Hwang 1997).

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

단일 관측치에 포함된 급격한 횡방향 각도 변동은 Φ_{k-1} 가 제시하는 궤도 동역학적 허용 범위를 벗어나므로, 물리적으로 불가능한 궤도 이탈로 간주되어 상태 추정치 반영 비율이 억제된다. 또한 시스템 프로세스 잡음(Q_{k-1})을 적절하게 통제함으로써, 결합 발생 전후로 위성의 상태 벡터는 동역학적으로 타당한 범위 내에서 안정적으로 유지되며, 비일관적인 각도 측정 잡음이 최종 해에 미치는 영향력을 최소화한다.

Fig. 5는 시간 경과에 따른 Radial, Along-track, Cross-track에 대한 위치 추정 오차 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 지상국 PAA의 각도 측정 잡음은 3차원 전 축에 걸쳐 복합적으로 영향을 미친다. 특히, PAA의 고정밀 거리 관측치에 의해 오차 분산이 강하게 억제되는 Radial 방향과 달리 Cross-track은 위성까지의 거리에 비례하여 도달각 잡음에 가장 직접적으로 원시 관측치의 기하학적 오차가 가장 크게 나타난다. 하지만 시뮬레이션 결과 Cross-track 축의 큰 비일관적 잡음을 궤도 동역학적 제약을 통해 완화하여 위성 상태 벡터가 실제 궤도에 가깝게 안정적으로 유지됨을 볼 수 있다.

3.3.3 웹 스타트 기반의 공분산 수렴 및 실시간 수렴

이 아키텍처가 제안하는 실시간 복원 성능은 결합 탐지 시점(K)에 처음부터 궤도를 추정하는 것이 아니라, 상시 모니터링을

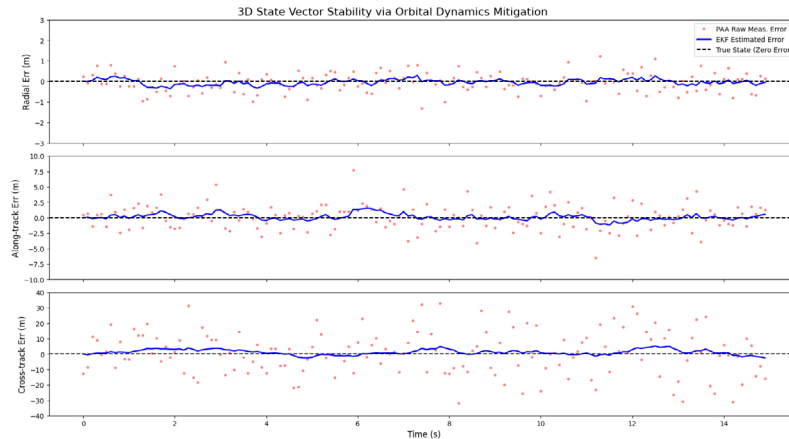


Fig. 5. Geometric integration of multi-satellite observations.

통해 결함 발생 이전부터 정보 밀도가 극대화된 사전 정보 행렬 (I_k)을 지속적으로 보존하는 워 스타트 메커니즘에 기인한다. 저 궤도 환경에서 관측 데이터의 불연속성은 실시간 궤도 예측 정확도와 무결성에 영향을 미쳐 연속적인 데이터 모니터링이 중요하다 (Chen et al. 2024). 정상 운용 시 PPA는 가시 위성을 지속적으로 추적하여 오차 공분산을 최소화해 준다. 결함 신호가 탐지되는 즉시, 이미 수렴된 고신뢰도의 I_k 를 바탕으로 PAA 관측치만을 활용한 능동적 고속 업데이트를 수행하여 결함 위성의 궤도를 실제 궤도에 가깝게 추정한다. 보정 데이터 생성을 위한 1초의 짧은 업링크 제약 시간내에서도 다수(M 번)의 관측 데이터를 재귀적으로 처리한다. 이 구간 동안 누적되는 사후 정보 행렬(I_{k+M})은 Eq. (6)과 같이 근사되며, 최종 오차 공분산(P_{k+M})은 Eq. (7)과 같다. 또한 결함 위성의 최종 상태 벡터 추정치($\hat{x}_{k+M}$)은 비선형 관측 모델 ($h(x)$)과 칼만 이득(K)을 활용하여 Eq. (8)과 같이 재귀적으로 갱신된다 (Brown & Hwang 1997).

$$I_{k+M} \approx I_k + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N H_{i,k+j}^T R_{i,k+j}^{-1} H_{i,k+j} \quad (6)$$

$$P_{k+M} = I_{k+M}^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_{k+j} = \hat{x}_{k+j}^- + K_{k+j} [z_{k+j} - h(\hat{x}_{k+j}^-)] \quad (j = 1, \dots, M) \quad (8)$$

초기 정보 행렬(I_k)이 워 스타트로 인해 이미 충분히 큰 상태에서 단시간 내에 다량의 기하학적 제약 정보가 합산된다. 따라서, 결함 위성을 배제하지 않고도 일시적인 PAA 각도 관측 잡음을 상쇄하며, 최종 오차 공분산(P_{k+M})을 높은 정밀도 수준으로 최소화하여 특정 정밀도 수준의 오차 범위 내로 결함 위성에 대한 상태 벡터 추정 값($\hat{x}_{k+M}$)이 도출된다.

Fig. 6은 결함 탐지 시점 전후의 상태 벡터 추정 오차를 시물레이션 하였다. 이 시물레이션은 고도 500 km의 저궤도 환경과 PAA 각도 오차 0.05도를 반영하였다. 콜드 스타트의 경우 사전 정보가 없어 급격한 위치 오차 확산을 가지며, 속도 오차의 경우 1 초라는 제약 시간내에 목표하는 정밀도에 수렴하지 못한다. 반면 워 스타트는 기 확보된 사전 정보 행렬(I_k)을 통해 불연속 없는 안

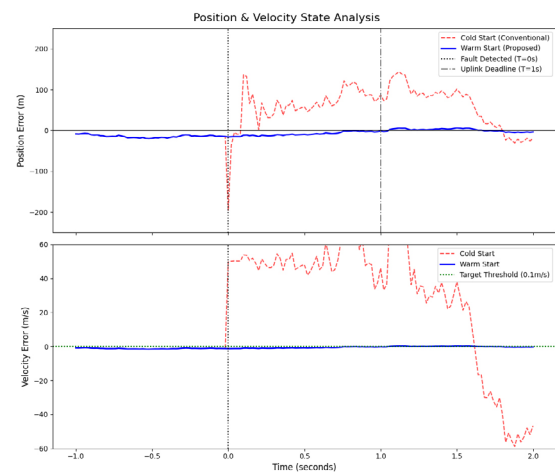


Fig. 6. Position and velocity state analysis.

정적인 위치 상태를 유지하며, 3.3.2절에서의 동역학 제약에 의해 잡음에 대해 상쇄되어 안정적인 속도상태를 유지한다. 워 스타트 메커니즘은 결함 탐지 즉시 정밀한 상태벡터를 도출함으로써, 1 초 이내에 실시간 업링크를 가능하게 하는 시스템 탄력성을 가질 수 있다.

3.4 실시간 보정 데이터 생성 및 능동적 피드백 기능

이번 절에서는 3.3절의 정밀 위치 추정을 통해 산출된 결함 위성 위치 정보를 실제 항법 서비스 복원을 위한 보정 데이터로 변환하고, 이를 사용자에게 송출 및 모니터링하는 최종 프로세스를 기술한다.

3.4.1 궤도 보정 벡터 산출 및 보정 데이터 업링크

정밀 위치 추정을 통해 산출된 결함 위성의 4차원 상태벡터(위치 및 시간)와 현재 방송중인 궤도력 정보를 실시간 비교하여 능동적으로 보정 벡터를 생성한다. 이때 보정 벡터는 위성의 3차

Table 1. Qualitative comparison of fault mitigation strategy in LEO-PNT system.

Operational characteristics	Conventional architecture	Proposed architecture	Remark
Fault identification capability	Required 6 satellites	Less dependent	Leveraging precise ground coordinate
Availability	Effectively unavailable	Effectively available	Maximizing system availability
Recovery latency	Non-real-time (minutes or more)	1 second (target value)	Ensuring system resilience
Geometric stability	Substantial degradation of GDOP	Maintaining stable nominal geometry	Continuity of navigation precision
Final positioning error	Service unavailable	Service available	-

원 궤도보정치 및 시계 보정치뿐만 아니라, 저궤도 위성의 고속 동역학 특성과 메시지 전달 지연을 보상하기 위해 State Space Representation 기반의 궤도변화율 및 시계변화율 성분을 포함하여 구성한다. 생성된 보정 데이터는 지상국 PAA를 통해 1초 이내에 업링크되며, 위성은 이를 별도의 연산 없이 항법 데이터 프레임 내 특정 필드에 실시간으로 다중화(multiplexing)하여 방송한다. 이를 통해 사용자 단말은 별도의 통신 채널 없이 항법 신호 수신만으로도 보정치를 추출할 수 있으며, 수신 시점의 시각에 맞춰 보정치를 실시간 외삽(extrapolation)함으로써 결함 위성을 배제하지 않고도 고정밀 항법 해를 유지할 수 있다.

3.4.2 능동적 피드백 및 복원 품질 모니터링

보정 데이터 송출 이후 지상국 PAA는 결함 위성에 대한 추적을 멈추지 않고 능동적 피드백 루프를 수행한다. 송출한 보정 데이터가 반영된 항법신호를 다시 수신하여 가시성 위성 수를 최소화하여 보정된 신호를 통해 계산된 지상국의 위치 해와 실제 지상국 좌표를 비교하여 보정 품질을 모니터링한다. 이를 통해 사용자 단말에 도달하기 전, 최종 위치 오차 범위내에 도달했음을 지상국 수준에서 우선적으로 보증한다.

3.4.3 상태 전이 관리

지상국은 결함 위성의 상태를 상시 모니터링하며, 위성 자체의 결함이 해소되거나, 항법 메시지가 정상화되는 시점을 정밀하게 감지한다. 만약, 항법 메시지 정상화가 될 경우 지상국의 보정 모드를 단계적으로 해제하고 정상 서비스 모드로의 안전한 전환을 수행한다. 이러한 PAA 기반의 능동적 피드백은 저궤도 항법 시스템의 탄력성과 가용성을 극대화한다.

4. 시나리오 기반 가용성 및 탄력성 분석

이번 장에서는 저궤도 항법 시스템 운용 중 발생할 수 있는 최악의 기하학적 조건을 가정하여, 제안된 아키텍처의 가용성과 탄력성 개선 효과를 분석한다.

Worst-case 시나리오는 RAIM 기반 FDE 기법이 무력화되는 ‘임계 가시성 결함’ 상황으로 설정한다.

- 1) 운용환경: 고층 빌딩에 의한 차폐가 심한 도심 협곡
- 2) 가시 위성 수: 항법 해 산출에 필요한 최소 수량인 5기
- 3) 결함 양상: GDOP 결정에 핵심적인 역할을 수행하는 천정 부근 위성 1기에 궤도력의 점진적 드리프트 발생
- 4) 시스템 제약: 결함 위성을 배제할 경우 남은 위성이 4기

가 되어 배치 부적합으로 인해 GDOP이 10 이상으로 급증하여 실질적 항법 정밀도를 상실하는 상황

4.1 기존 FDE 방식의 한계 분석

저궤도 군집 위성을 활용하더라도 도심 협곡과 같은 차폐 환경에서는 유효 가시 위성 수가 빈번하게 6기 미만으로 감소할 수 있다. 일반적인 RAIM 기반 FDE 구조에서는 단일 위성 결함을 식별하기 위해 기하학적 중복성이 확보된 최소 6기 이상의 가시 위성이 요구되는 것으로 알려져 있다 (Wang & Ober 2009). 이러한 조건이 충족되지 않는 5기 가시 환경에서는 결함 발생 시 위성 식별 능력이 제한되며, 무결성 요구 수준을 만족하는 항법 해의 제공이 어려워질 가능성이 높다. 그 결과, 사용자 단말은 일시적으로 항법 해 제공이 제한되는 운용 영역에 진입할 수 있으며, 이는 무결성 기반 서비스의 가용성 저하로 이어질 수 있다 (Wang & Ober 2009).

또한 결함 위성을 배제하는 과정에서 남은 위성군이 형성하는 기하 구조의 품질 저하는 더욱 심화될 수 있다. 특히 사용자 상공 방향 등 기하학적으로 중요한 위치에 존재하던 위성이 제외될 경우, 잔여 위성 배치의 기하학적 체적이 급격히 감소하면서 GDOP가 크게 증가할 수 있다. 이러한 기하학적 열화는 측위 오차 증폭으로 직결되며, 일부 불리한 기하 조건에서는 위치 오차가 수십에서 수백 미터 수준까지 확대될 수 있음이 보고된 바 있다 (Kim et al. 2020). 이는 결함 위성 배제를 통해 무결성 조건을 만족하더라도, 결과적으로 실질적인 항법 성능이 크게 저하될 수 있음을 시사한다.

4.2 제안하는 아키텍처의 능동적 결함 교정에 따른 시나리오 대응 개념

제안된 PAA 기반 아키텍처는 지상국의 정밀 고정 좌표를 기준으로 한 능동적 감시 개념에 기반하여, 결함 위성에 대한 실시간 보정 데이터를 생성한다. 사용자 단말과 달리 지상국 PAA는 자신의 절대 좌표를 기준으로 활용할 수 있으며, 이를 통해 독립적인 다중 빔으로 수신된 각 위성의 관측치를 동역학 모델 및 기준 좌표와 비교함으로써 결함 징후를 식별할 수 있는 추가적인 정보를 확보한다. 이러한 접근 방식은 가시 위성 수가 제한된 환경에서도 결함 위성의 오차 성분을 독립적으로 분리하고 식별 가능성을 향상시킬 수 있다.

이 시나리오에서는 해당 위성이 결함 발생 이전부터 연속적으로 모니터링되고 있다는 가정을 바탕으로, 결함 탐지 이후 1초 이내에 고신뢰도의 보정 데이터를 생성하여 업링크할 수 있는 구조이다. 이를 통해 사용자 단말은 결함 위성을 즉각적으로 배제하

는 대신, 지상국이 제공한 보정 데이터를 적용하여 항법 해 계산에 활용할 수 있는 가능성을 갖게 된다. 이러한 운용 개념은 결합 위성 배제 시 발생할 수 있는 위성 기하 구조의 급격한 열화를 완화하고, 가시 위성 수가 제한된 임계 환경에서도 항법 서비스의 가용성을 유지할 수 있는 탄력적 복원(resilient recovery) 아키텍처의 가능성을 제시한다.

Table 1은 기존 FDE 방식과 제안 아키텍처간 정성적 비교 분석 내용을 요약한 내용이다.

5. 결론

본 연구에서는 차세대 저궤도 항법시스템의 가용성과 탄력성을 구조적으로 향상시키기 위한 방안으로, PAA를 활용한 능동적 결합 교정 아키텍처를 제안하고 그 개념적 타당성을 검토하였다.

기존 RAIM 기반 FDE 방식은 결합 위성을 단순히 배제함으로써 가용 위성 수를 감소시키고 기하학적 배치 품질을 저하시키는 구조적 한계를 내포한다. 특히 도심 협곡 환경에서 가시 위성이 5기 이하로 제한되는 상황에서 결합이 발생할 경우, 결합 위성 배제로 인한 GDOP의 급증은 항법 서비스의 실질적 중단으로 이어질 수 있다. 이러한 무결성-가용성 상충 관계는 자율주행 및 도심 항공모빌리티와 같은 고신뢰 응용 환경에서 치명적인 제약으로 작용한다.

이를 극복하기 위해 제안된 아키텍처는 네 가지 핵심 기능으로 구성된다. 디지털 빔포밍 기반 PAA의 동기화된 디지털 스냅샷으로 시공간적 비일관성을 해소하고, 정상 위성군 기반 실시간 바이어스 교정으로 시스템 내부 오차를 일괄 상쇄한다. 또한 EKF와 궤도 동역학 모델 및 웹 스타트 메커니즘을 결합하여 결합 탐지 즉시 높은 정밀도의 상태 벡터를 추정하고, 보정 데이터를 1초 이내에 업링크하여 능동적 피드백 루프로 보정 품질을 검증한다.

4장에서 최악의 기하학적 조건(5기 가시, 천정 부근 위성 결합) 시나리오 분석을 통해, 기존 FDE 방식이 사실상 서비스 불능 상태에 이르는 임계 환경에서도 제안된 아키텍처는 안정적인 위성 기하 구조를 유지하며 향상된 항법 정밀도를 제공할 수 있는 가능성을 확인하였다.

다만 본 연구는 개념적 아키텍처 제안에 초점을 두고 있으며, 정량적 성능 한계 산출 및 실현 가능성 분석은 후속 연구 과제로 남겨두었다. 향후 연구에서는 실제 저궤도 군집 위성 환경을 모사한 테스트베드 기반 시뮬레이션을 통해 EKF 수렴 특성, PAA 각도 측정 잡음 민감도, 업링크 지연 조건 등 핵심 설계 파라미터에 대한 정량적 검증을 수행하고, 다중 결합 위성 발생 시나리오 및 다양한 군집 구성에서의 적용 가능성을 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: RS-2022-00165807).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, W.Kim; methodology, W.Kim; formal analysis, W.Kim and T.Yu; investigation, W.Kim and T.Yu; writing—original draft preparation, W.Kim; writing—review and editing, T.Yu.; visualization, W.Kim; supervision, W.Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Ahn, H., Tomasic, B., & Liu, S. 2010, Digital Beamforming in a large conformal Phased Array Antenna for satellite operations support — Architecture, design, and development, 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 12-15 October 2010, 423-431. <https://doi.org/10.1109/ARRAY.2010.5613334>
- 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>
- Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. 1997, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, 3rd ed. (New York: Wiley)
- Chen, B., Wang, K., El-Mowafy, A., & Yang, X. 2024, The Effect of Observation Discontinuities on LEO Real-Time Orbital Prediction Accuracy and Integrity, NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 72, navi.708. <https://doi.org/10.33012/navi.708>
- Chen, C.-S., Chiu, Y.-J., Lee, C.-T., & Lin, J.-M. 2013, Calculation of Weighted Geometric Dilution of Precision, Journal of Applied Mathematics, 2013, 953048. <https://doi.org/10.1155/2013/953048>
- Dolph Microwave 2025, Why Use Array Antennas for Satellites, Feb 2025, available from: <https://www.dolphmicrowave.com/default/why-use-array-antennas-for-satellites/>
- He, G., Gao, X., Sun, L., & Zhang, R. 2021, A Review of Multibeam Phased Array Antennas as LEO Satellite Constellation Ground Station, IEEE Access, 9, 147142-147154. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124318>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2017, Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, 3rd ed. (Boston: Artech House)
- Kim, H.-I. 2009, Development of Integrated Global

Navigation Satellite System Simulator for Evaluation of Positioning Availability and Accuracy Improvement, Master Dissertation, Inha University.

- Kim, Y., Kim, I. J., & Kim, D. 2025, Study on the WAD-RNSS Integrity Alert Concept, JPNT, 14, 47-52. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2025.14.1.47>
- Kim, Y.-G., Park, K.-D., Kim, M.-S., Yoo, C. S., Bae, J. S., & Kim, J. O. 2020, Analysis on GPS PDOP Peaks in Signal-Blockage Simulations, JPNT, 9, 79-88. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.2.79>
- Morales, J. J., Khalife, J., Santa Cruz, U., & Kassas, Z. M. 2019, Orbit Modeling for Simultaneous Tracking and Navigation Using LEO Satellite Signals, Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, USA, 16-20 September 2019, 2090-2099. <https://doi.org/10.33012/2019.17029>
- Wang, J. & Ober, P. B. 2009, On the Availability of Fault Detection and Exclusion in GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring, The Journal of Navigation, 62, 251-261. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005158>
- Won, D., Lee, E., & Cho, C. 2024, Study on Multi-layer PNT through LEO PNT for Enhancing Korean Satellite Navigation, JPNT, 13, 365-378. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.4.365>
- 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. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2766768>



Wongil Kim received the M.S. degrees in the Aerospace system engineering from University of Science and Technology (UST), Daejeon, South Korea, in 2018. Since 2022, he has been with Korea Aerospace Research Institute. His research interests include satellite operation control systems, system engineering, and navigation system design.



Taeho Yu received the Ph.D. degrees in the Electrical engineering from Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, South Korea, in 2026. Since 2026, he has been with Korea Aerospace Research Institute. His research interests include phased array antennas, antennas for ground stations, and satellite navigation applications.

