위성항법시스템용 위성 궤적 지도 정보 기반 다중 기만기 탐지 기법

오민규, 정방철
아주대학교
mkoh@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Satellite Trajectory Map-Based Multi-Spoofer Detection Technique for GNSS

Minkyu Oh, Bang Chul Jung
Ajou University

요 약

본 논문에서는 다수의 기만기(spoofer)가 존재하는 환경에서, 글로벌 위성항법시스템(global navigation satellite system, GNSS) 수신기가 저장하고 있는 위성의 궤적 지도(ephemeris map)를 활용하여 신뢰도 있게 기만 공격을 검출하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 균일 평면 배열 안테나(uniform planar array, UPA)를 탑재한 GNSS 수신기가, 위성 궤적 지도에서 추출한 도래각 정보를 기반으로 각 위성의 예상 도래각(방위각, 고도각)을 계산하고, 방향 탐지 기법을 이용하여 획득한 도래각 추정 결과와 비교함으로써 기만 공격 여부를 판별한다. 시뮬레이션을 통해 다수의 기만기가 협업하여 각기 다른 위성의 PRN 신호를 모사하는 고도화된 기만 공격 환경에서도 제안 기법이 실제 신호와 기만 신호를 효과적으로 구분할 수 있음을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

차세대 통신 시스템에서는 무인 항공 정찰, 자율주행, ISAC(integrated sensing and communication) 등 다양한 응용 분야의 요구에 따라, 정밀한 위치 추정 성능의 중요성이 점차 부각되고 있다 [1]. 그러나 GNSS 신호 구조의 공개로 인해 기만(spoofing) 공격이 심각한 보안 위협으로 대두되고 있다. 이와 관련하여 [2]에서는 도래각(direction of arrival, DOA) 검출 일관성을 이용한 기만 탐지 기법이 제안되었으나, 단일 기만기 환경에서만 유효하며, [3]에서 제안한 잔차 제곱합 최소화 기반 알고리즘은 조합 탐색에 따른 높은 연산 복잡도로 인해 실시간 탐지에는 부적합하고, [4]에서 제안한 DOA 기반 기만 탐지 기법은 위성 신호가 존재하지 않는 환경에서만 성능이 검증되었다. 본 논문에서는 위성 궤적 지도 정보에 기반한 GNSS 기만 탐지 기법이, 다수의 기만기가 협업하는 고도화 기만 공격 시나리오에서도 우수한 탐지 성능을 제공함을 모의실험을 통해 확인하였다

Ⅱ. 위성 궤도 지도 정보를 이용한 다중 전파 간섭 공격 탐지 기법

본 논문에서는 M개의 안테나로 구성된 균일 평면 배열안테나(uniform planar array antenna, UPA)를 장착한 고정형 GNSS 수신기가 K개의 PRN 위성 신호를 수신하는 환경을 고려한다. 또한, 각 기만기는 자체 GNSS 수신기와 단일 안테나를 이용해 $L(\leq K)$개의 PRN 위성 신호를 정교하게 모사하여 서로 다른 PRN 신호를 송출하는 고도화된 기만 공격을 가정하며, 각 기만기는 임의의 위치에서 GNSS 수신기로 송신한다. 일반성을 잃지 않고, 기만기가 특정 PRN 위성 신호를 모사하는 경우 t시간에서 GNSS 수신기에 도달하는 수신 신호$\mathbf{y}(t)\left(\in\mathbb{C}^M\right)$는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{a}^A(\gamma,t)x^A(t)+\mathbf{a}^S(\gamma,t)x^S(t)+\mathbf{n}(t),$$

여기서 상단 첨자 A와 S는 각각 위성 신호와 기만 신호를 의미하고, $\mathbf{a}(t)\left(\in\mathbb{C}^M\right)$와 $x(t)$는 각각 t시간의 조향 벡터와 데이터 신호를 의미 한다.

제안하는 기법은 각 PRN 위성의 2차원 DOA를 추정하고, 위성 궤적 지도에서 추출하여 계산된 DOA 값과 서로 비교함으로써 전파 간섭 공격 여부를 탐지한다. 구체적으로, GNSS 수신기는 위성 궤적 정보를 사전에 알고 있다고 가정하여, 궤적 정보를 통해 PRN 위성의 예상 DOA $\bar{\gamma}\left(=\left\{\bar{\phi},\bar{\theta}\right\}\right)$을 계산할 수 있다. 여기서 $\phi(\in[0,2\pi))$와 $\theta(\in[0,\pi/2])$는 각각 방위각(azimuth angle)과 고도각(elevation angle)을 의미한다. 이후, GNSS 수신기는 각 PRN 위성에 대해 수신 신호 샘플을 수집하고 단일 신호원에 대한 DOA 추정을 수행한다. 그러면, k째 PRN 위성에 대한 추정 DOA와 예상 DOA 간의 차이를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta\phi_m=\mathrm{mod}\left(\left|\bar{\phi}_m-\hat{\phi}_m\right|,2\pi\right),\ \Delta\theta_m=\left|\bar{\theta}_m-\hat{\theta}_m\right|,$$

만약 $\Delta\phi_m$과 $\Delta\theta_m$의 값이 사전에 설정한 임계값 이상인 경우, 해당 PRN 신호에는 전파 간섭이 존재하여 DOA 추정 정확도가 저하된 것으로 판단할 수 있다. GNSS 수신기는 이러한 오차가 임계값을 초과하는 PRN에 대해 예비 알람을 발생시키며, DOA 추정 과정에서의 오차로 인한 오경보 가능성을 고려하여, 전체 PRN 중 임계빈도 $\zeta(\leq K)$ 이상의 PRN에서 예비 알람이 관찰되는 경우 GNSS 간섭 공격이 발생했다고 결정한다.

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

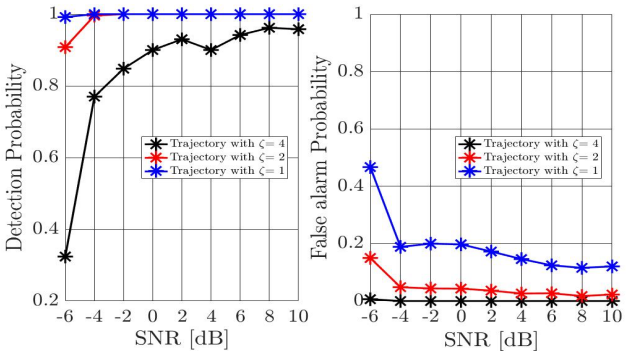

그림 1. 다수 기만기가 존재하는 환경에서 제안 기법의 검출 및 오경보 확률.

그림 1은 GNSS 수신기가 8개의 PRN 위성 신호를 수신하는 상황에서, 각각 4개의 PRN을 모사하는 다수의 기만기가 존재할 때, 추정된 DOA 정보를 활용한 기만 탐지 기법의 검출 확률과 오경보 확률의 성능을 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 따라 도시한 결과다. 본 모의실험에서는 16소자 UPA를 갖춘 GNSS 수신기를 가정하였으며, 기만 공격 여부를 결정하는 PRN 위성 개수 임계빈도를 변화시키면서 탐지 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 다양한 조건에서 본 기법이 DOA 추정기법이 작동하는 환경에서 높은 검출 확률과 낮은 오경보 확률을 동시에 달성함을 확인하였으며, 이는 다수의 기만기가 동시에 여러 PRN을 공격하는 실제적 환경에서도 신뢰성 높은 GNSS 기만 탐지가 가능함을 의미한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 지원(IITP-2025-RS-2024-00436406)과 저궤도 위성통신 핵심기술 기반 큐브위성 개발 과제의 지원(RS-2024-00396992)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] Q. Luo, Y. Cao, J. Liu, and A. Benslimane, “Localization and navigation in autonomous driving: Threats and countermeasures,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 4, pp. 38-45, Aug. 2019.

[2] Young-Seok Lee, Jeong Seon Yeom, and Bang Chul Jung, “A novel antenna-based GNSS spoofing detection and mitigation technique,” in *Proc. 2023 IEEE 20th Consum. Commun. Netw. Conf.*, pp. 489-492, Jan. 2023.

[3] M. Meurer, A. Konovaltsev, M. Cuntz, and C. Hättich, ”Robust Joint Multi-Antenna Spoofing Detection and Attitude Estimation using Direction Assisted Multiple Hypotheses RAIM,” *in Proc. ION GNSS 2012*, Nashville, TN, USA, Sept. 2012, pp. 241-254.

[4] H. Tan, N. Xie, L. Huang, and H. Li, “Enhancing GNSS Signal Authentication Through Multi-Antenna Systems,”*IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 4361-4374, May 2025.