균일 평면 배열안테나를 활용한 위성 궤적 정보 기반 GNSS 기만 공격 탐지 기법

오민규, 이영석, 정방철
충남대학교
minkyuoh@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

GNSS Spoofing Attack Detection Technique Based on Prior Information of Satellite Trajectories Using Uniform Planar Array Antenna

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 위성항법시스템(global navigation satellite system: GNSS)용 배열안테나 수신기가 정지궤도 위성의 궤적 정보를 이용하여 의도적 전파 간섭 공격인 기만 공격을 탐지할 수 있는 GNSS 기만 탐지 기법을 제안한다. 구체적으로, 제안하는 기법은 균일 평면 배열안테나(uniform planar array antenna: UPA)를 구비한 GNSS 수신기가 위성 궤적 정보와 2차원 도래각 추정 결과를 비교함으로써 GNSS 기만 공격의 특징을 추출하고 전파 간섭 공격 여부를 확인한다. 모의실험을 통해 기존 기법 대비 제안하는 기술의 GNSS 기만 탐지 성능을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

무인 항공 정찰, 자율주행 및 통합 센싱 및 통신(integrated sensing and communication: ISAC) 시스템 등 차세대 통신 시스템에서 활용될 것으로 주목받는 다양한 응용은 효과적인 서비스 지원을 위해 통신 성능뿐만 아니라 위치 추정 성능이 필요할 수 있다 [1]. 이에 따라 위성항법시스템(global navigation satellite system: GNSS)을 활용한 무선 측위 연구가 활발히 수행되고 있으나, 알려져 있는 GNSS 신호 구조 및 프로토콜로 인해 의도적으로 GNSS 신호를 모사하여 임의의 GNSS 수신기의 추적 루프를 탈취 및 제어하는 GNSS 기만(spoofing) 공격 위협이 큰 문제로 대두되고 있다. 이와 관련하여 [2]에서는 정교한 GNSS 기만 공격 환경에서 PRN(pseudo random noise) 위성별 도래각(direction of arrival: DoA) 추정 결과의 통계적 특성을 활용한 다중 PRN 다이버시티 기반 GNSS 기만 탐지 기법이 제안되었으나 실제 PRN 위성 궤적을 고려하지 않고 PRN 위성이 충분히 멀리 떨어져 있는 이상적인 GNSS 수신 환경을 가정하였다. 따라서, 본 논문에서는 GNSS 기만 탐지 확률뿐만 아니라 거짓 경보 확률도 고려하여, 실제 PRN 위성 궤적 정보를 이용한 배열안테나 기반 GNSS 기만 탐지 기술을 제안한다. 모의실험을 통해, 단일 GNSS 기만기가 다수의 PRN 위성을 모사하는 시나리오에서 종래의 기법보다 견고한 GNSS 기만 공격 탐지 성능을 보이는 것을 검증한다.

Ⅱ. UPA를 활용한 위성 궤적 정보 기반 GNSS 기만 탐지 기법

본 논문에서는 N개 안테나로 구성된 균일 평면 배열안테나(uniform planar array antenna: UPA)를 갖는 고정된 GNSS 수신기가 M개의 PRN 위성 신호를 수신하고, 자체 GNSS 수신기와 단일 안테나를 갖는 단일 고정형 기만기가 $L(\leq M)$개의 PRN 신호를 정교히 모사하는 통신 환경을 고려한다 [2]. 일반성을 잃지 않고, 기만기가 모사하고 있는 특정 PRN 위성에 대해 GNSS 수신기로 도달하는 t째 시간 수신 신호 $\mathbf{y}(t)(\in\mathbb{C}^N)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 상단 첨자 A와 S는 각각 위성 신호와 기만 신호를 의미하고, $\mathbf{a}(t)(\in\mathbb{C}^N)$와 $x(t)$는 각각 t째 시간에 대한 조향 벡터와 데이터 신호를 나타낸다.

제안하는 기법은 UPA를 활용하여 각 PRN 위성에 대한 수신 신호에서 2차원 DoA를 추정하고, 해당 추정치와 위성 궤적 정보를 이용한 DoA 값과 서로 비교함으로써 GNSS 기만 공격을 탐지한다. 구체적으로, GNSS 수신기는 위성 궤적 정보를 사전에 알고 있다고 가정하여, 궤적 정보를 통해 PRN 위성의 기준 DoA $\bar{\gamma}(=\{\bar{\phi},\bar{\theta}\})$을 계산할 수 있다. 여기서 $\phi(\in[0,2\pi))$와 $\theta(\in[0,\pi/2])$는 각각 방위각(azimuth angle)과 앙각(elevation angle)을 의미한다. 이후, GNSS 수신기는 각 PRN 위성에 대해 수신 신호 샘플을 수집하고 단일 신호원에 대한 DoA 추정을 각 PRN별로 수행한다. 그러면, m째 PRN 위성에 대한 추정 DoA와 기준 DoA 간의 차이를 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

여기서 $\Delta\phi_m$과 $\Delta\theta_m$의 값이 특정 임계 이상 차이가 나는 경우 기만 신호가 DoA 추정에 영향을 미치고 있다고 판단할 수 있다. 따라서, GNSS 수신기는 해당 PRN에서 예비 알람을 경보하고 오경보를 고려해 특정 임계빈도 $\zeta(\leq M)$를 설정하여 ζ 이상의 PRN에서 예비 알람이 확인되면 최종적으로 현재 GNSS 기만 공격을 받고 있는 것으로 결정한다.

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

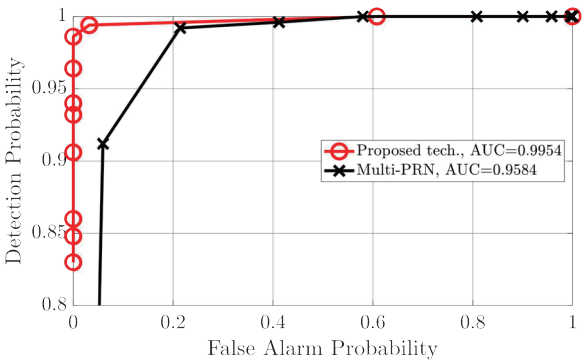

그림 1. 위성 궤적 정보 기반 GNSS 기만 공격 탐지 기법의 ROC 곡선.

그림 1은 GNSS 수신기가 8개의 PRN 위성 신호를 수신할 때 단일 기만기가 4개의 PRN을 모사하는 GNSS 기만 공격 시나리오에서 제안하는 기법의 수신기 동작 특성(receiver operating characteristic: ROC) 곡선을 나타낸다. 본 모의실험에서 GNSS 수신기는 16개의 소자를 갖는 UPA를 구비하고 있고, 최종 기만 공격을 결정하는 PRN 위성 개수 임계 ζ는 4로 설정하여 추정 DoA와 기준 DoA 간 차이를 결정하는 방위각과 앙각의 차이 임계치를 증가시키며 ROC 곡선을 계산하였다. ROC 곡선의 하단 영역의 넓이를 나타내는 AUC(area under the curve)는 0에서 1의 값을 가지며 1에 가까울수록 견고한 탐지 성능을 나타냄을 의미한다. 제안하는 기법은 위성 궤적에 대한 사전 정보를 이용하기 때문에 종래의 통계적 특성을 활용한 기만 탐지 기법보다 효율적으로 GNSS 기만 공격을 탐지할 수 있어 기존 기법 대비 높은 AUC 성능을 달성할 수 있음을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(RS-2024-00396992, 저궤도 위성통신 핵심 기술 기반 큐브 위성 개발) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R1I1A3073740)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.