

A Spoofing Detection Scheme Based on Elevation Masked-Relative Received Power in GPS Receivers using Multi-band Array Antenna

Junwoo Jung^{1†}, Hyunhee Won¹, Sungyeol Park¹, Haengik Kang¹, Seungbok Kwon¹, Byeongjin Yu², Seungwoo Seo³

¹LIG Nex1, Seongnam, Gyeonggi-do 13488, Korea

²Microinfinity Corporation, Daejeon 34012, Korea

³Agency for Defense Development, Daejeon 34602, Korea

ABSTRACT

Many spoofing detection studies have been conducted to cope with the most difficult types of deception among various disturbances of GPS, such as jamming, spoofing, and meaconing. In this paper, we propose a spoofing detection scheme based on elevation masked-relative received power between GPS L1 and L2 signals in a system using a multi-band array antenna. The proposed scheme focuses on enabling spoofing to be normally detected and minimizes the possibility of false detection in an environment where false alarms may occur due to pattern distortion among elements of an array antenna. The pattern distortion weakens the GPS signal strength at low elevation. It becomes confusing to detect a spoofing signal based on the relative power difference between GPS L1 and L2, especially when GPS L2 has weak signal strength. We propose design parameters for the relative power threshold including beamforming gain, the minimum received power difference between L1 and L2, and the patch antenna gain difference between L1 and L2. In addition, in order to eliminate the weak signal strength of GPS L2 in the spoofing detection process, we propose a rotation matrix that sets the elevation mask based on platform coordinates. Array antennas generally do not have high usefulness in commercial areas where receivers are operated alone, but are considered essential in military areas where GPS receivers are used together with signal processing for beamforming in the direction of GPS satellites. Through laboratory and live sky tests using the device under test, the proposed scheme with an elevation mask detects spoofing signals well and reduces the probability of false detection relative to that without the elevation mask.

Keywords: anti-spoofing, spoofing detection, relative power, elevation mask, multi-band array antenna

1. 서론

전세계 항법 시스템 Global Positioning System (GPS) 위성이

Received Mar 06, 2023 Revised Mar 11, 2023 Accepted Mar 31, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: jung.junwoo@lignex1.com, junu.jung@gmail.com
Tel: +82-31-5178-4598 Fax: +82-31-5178-7088

Junwoo Jung <https://orcid.org/0000-0002-0412-2561>

Hyunhee Won <https://orcid.org/0009-0001-2156-2737>

Sungyeol Park <https://orcid.org/0000-0001-9717-2340>

Haengik Kang <https://orcid.org/0000-0001-7001-887X>

Seungbok Kwon <https://orcid.org/0000-0002-5485-8753>

Byeongjin Yu <https://orcid.org/0009-0000-5672-0582>

Seungwoo Seo <https://orcid.org/0000-0002-1923-8364>

보편적으로 사용되면서 GPS L1 C/A (Coarse/Acquisition, 이하 GPS L1) 대역 외에도 GPS L2C (Civil, 이하 GPS L2) 및 L5와 같은 다중대역을 사용하는 위성항법 신호 체계가 개발되어 민간에서도 위성항법이 가능한 다중대역 위성항법 시스템이 개발되었다 (Yun & Lee 2021, Lee et al. 2021). 다중대역 위성항법 신호를 수신하고 다수의 패치안테나를 활용하여 위성항법 신호의 추적 성능을 높이는 빔포밍 기능을 수행할 수 있는 배열안테나 개발도 활발히 연구되고 개발되고 있다 (Kang et al. 2017). 특히 GPS 대역에 수신되는 교란신호인 재밍신호와 기만신호를 효과적으로 완화할 수 있는 배열안테나를 활용한 교란 대응 기법들은 점차 많은 장비 및 연구에서 활용되고 있다 (Jung et al. 2018).

다중대역 위성항법 신호를 수신하기 위해서는 배열안테나가 장착되는 시스템의 크기 제약으로 인해 일반적으로는 적층 기반

의 패치안테나 제작 기법이 사용되며, 적층 형태의 안테나 제작 기법에서는 대역별 수신 왜곡이 심한 결과를 얻게 된다 (Kim et al. 2013). 특히 GPS 기반 배열안테나의 경우, GPS L1 대역이 주항법 대역이기 때문에 GPS L1 대역을 수신하는 안테나를 적층 안테나 중 상부에 위치하게 되며, 이외 대역을 하부 안테나에 위치하도록 설계하는 것이 일반적이다. 이로 인해 입사 방향별 왜곡 현상이 많이 발생하게 되며, 입사 방향별 패턴 왜곡 현상은 배열안테나 설계에 따라 다르게 형성될 수 있다 (Yoo et al. 2017).

배열안테나에서 수신하는 GPS 대역별 수신 위성신호 세기는 GPS interface control document (ICD)에서 정의하고 있는 대역별 위성 종류와 송신 신호 세기, 패치안테나 기준 입사 각도에 따른 수신 안테나 이득에 따라 결정되며, 송신 안테나 이득은 항법 위성 대비 안테나 위치에 따라 매우 결정적이다 (IS-GPS-200 2021). 수신 안테나 이득의 경우 배열안테나 이득 왜곡현상으로 인해 차이가 발생한다. 배열안테나 설계가 동일할 경우, 제작사 미세 조정에 따라 입사각별 상세 이득이 일부 달라질 수는 있지만 전체적인 이득 패턴은 유사하게 측정되며, 배열안테나의 제작 규격 관리를 통해 유사한 이득 패턴을 얻을 수 있도록 통제가 가능하다.

재밍과 기만, 재방송으로 대표되는 GPS 교란신호 중 최근 식별 및 검출이 상대적으로 더 어려운 기만신호에 대응하는 많은 연구들이 진행되고 있으며, 기만신호를 검출하는 주요 기법들을 분류하면 절대 신호세기 검출, 동일 항법 시스템 내 주파수 대역별 비교를 통한 상대 신호세기 비교 검출(이하, 상대세기 검출), 의사거리 비교 검출, 도플러와 의사거리율 비교 검출, 항법데이터 검출 (Wen et al. 2005, Humphreys et al. 2008, Jeong et al. 2012), 상관기 출력 비교 검출 (Jafarnia-Jahromi et al. 2012)로 나눌 수 있다. 이러한 기만대응 기법들은 단독으로 사용되기 보다는 각 기법의 한계를 보완하기 위해 각 기법들을 통합 적용하여 기만대응 시스템을 구축하는 것이 효과적이다.

다양한 기만신호 대응 기법들 중에서 본 논문에서는 다중대역 배열안테나를 사용하는 환경에서 양각 마스크를 적용한 GPS L1과 L2간 상대세기 검출 방식을 제안하며, 제안하는 방식은 왜곡이 발생한 이득 패턴으로 인해 오검출이 발생할 수 있는 환경에서 오검출 확률은 최대한 낮추고 실제 GPS L1과 L2 신호를 수신하는 환경에서 정상적으로 기만 검출이 될 수 있도록 하는데 중점을 주고 있다. 배열안테나로 인한 패턴 왜곡은 배열안테나 기준 낮은 양각의 GPS 위성신호를 더 열악하게 만든다. 또한 GPS L2 대역 위성 항법신호를 더 열화 시키는 적층형 패치 구조로 인해 GPS L1과 L2 신호간 상대세기 비교를 통한 기만검출에 혼란을 야기한다. 본 논문에서는 상대세기 비교 시 배열안테나가 장착된 플랫폼좌표계 기준에서 양각 마스크 이하의 열화 가능성이 높은 GPS L2 위성 항법신호를 상대세기 기만검출에서 제외하고, 빔포밍 이득, GPS L1/L2 간 최소 수신 세기차와 단일 패치 기준의 GPS L1/L2 간 측정 이득차를 파라미터화 하여 기만검출 임계치 설계에 적용하는 방식을 제안한다. 교란신호를 고려하지 않은 상용 수신기는 배열안테나를 사용할 필요가 없지만, 재밍 및 기만의 교란신호를 필수로 고려하는 군용 수신기는 재밍신호를 제거하고 기만신호를 완화하기 위해 다수 위성방향으로의 빔포밍 기능이 탑재된 교란 대응 신호처리와 연동하는 배열안테나의 사용

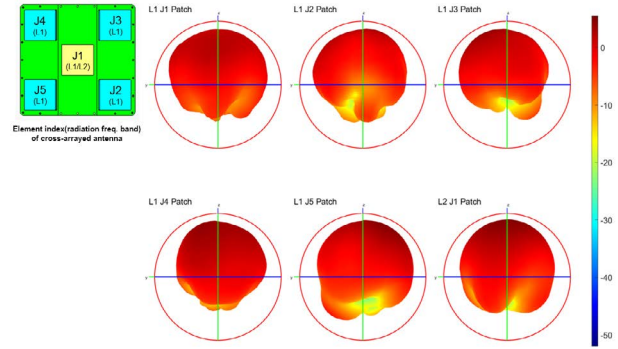


Fig. 1. GPS L1/L2 gain pattern results of a cross-arrayed antenna with 5-element patch antennas.

이 필수로 설계되고 있다. 따라서 교란 대응 신호처리를 거쳐 수신되는 위성신호의 경우 배열안테나의 왜곡된 다중대역 이득 패턴과 빔포밍 신호처리를 통한 이득이 포함되어 위성신호 수신세기가 결정되는 환경에서 본 논문에서 제안한 기만대응 방식은 실효성이 높다고 할 수 있다.

본 논문의 나머지 구성은 다음과 같다. 2장에서는 다중대역 배열안테나의 빔형성 패턴 및 배열안테나를 활용한 수신기의 야외 수신신호 세기를 분석한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 기법의 임계치 설정 및 수행 절차를 설명한다. 4장에서는 랩 시험을 통해 제안하는 기법의 정상동작 여부를 검증하고, 제안하는 기법의 적용 여부에 따른 수신기의 기만대응 성능 분석을 수행한다. 또한 야외 운용 환경에서의 양각 마스크 적용 유무에 따른 기만 오검출 성능을 분석한다. 5장에서는 본 논문에서 제안하는 기법의 의미와 보다 정밀한 기만검출 성능을 얻을 수 있는 방향을 제시하고 마무리한다.

2. ANALYSIS BASED ON MULTI-BAND ARRAY ANTENNA

2.1 다중대역 배열안테나 빔형성 패턴 분석

GPS L1과 L2 모두 수신 가능한 다중대역 배열안테나를 설계하기 위해서는 주요 민간 위성항법 수신대역인 GPS L1 신호를 우선적으로 수신해야 한다. 점차 소형화되는 시스템에 장착을 위한 설계로 배열안테나의 소형화를 위해서 다중대역 배열안테나는 GPS L1과 L2 대역을 적층형 패치 구조로 제작하였으며, L1 수신 패치를 상부에, L2 수신 패치를 하부에 수신하도록 제작하였다. 배열안테나를 구성하기 위해 각 적층형 패치 안테나는 5소자 안테나로 구성하였으며, 5개의 패치안테나를 배열로 구성하게 되면 배치에 따른 타 패치에 의한 이득 패턴 왜곡 현상이 필연적으로 발생하게 된다 (Kim 2013). GPS L2 대역의 경우 적층형 패치 안테나의 하부에 위치하게 됨에 따라 왜곡이 가중되어 발생하게 되며, 실제 측정된 배열안테나의 이득 패턴은 Fig. 1과 같이 GPS L1 대역과 L2 대역의 측정 결과를 통해 확인이 가능하다. Fig. 1의 패턴을 측정한 배열안테나는 1번 패치를 중앙에 둔 열십자 형태의 배열로 구성되어 있고, GPS L1 및 L2의 모든 대역은 중

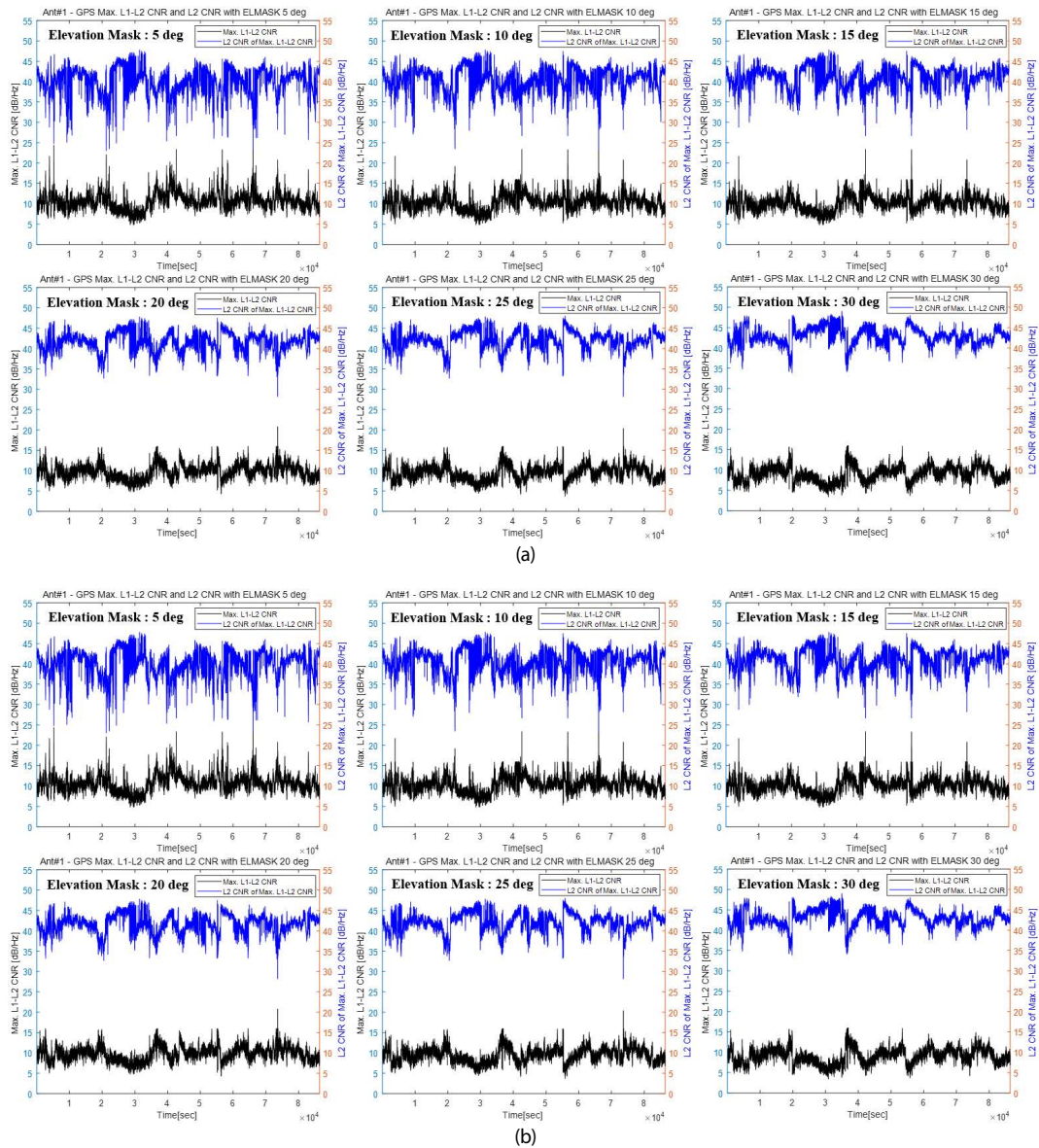


Fig. 2. GPS L1/L2 differential power comparison result of GPS L1 beam-formed array antenna in live sky test. (a) array antenna number 1, (b) array antenna number 2.

안에 위치한 1번 패치를 통해서만 수신하고 나머지 4개의 주위 패치 안테나들은 GPS L1 대역만 수신하는 형태의 패치 안테나로 제작하였다. Fig. 1의 패턴 측정 결과와 같이 GPS L1 대역 1번 패치 (L1 J1)보다 GPS L2 대역 1번 패치(L2 J1)의 양각 낮은 쪽 이득이 낮고 감쇄가 넓게 형성됨을 확인할 수 있었다.

2.2 다중대역 배열안테나를 활용한 수신기의 야외 수신신호 세기 분석

실제 제작한 GPS L1/L2 다중대역 배열안테나를 사용하여 야외 신호 수신 조건에서 GPS L1 대비 L2 상대신호 세기를 측정하기 위해 동일 규격으로 제작한 배열안테나 2개를 활용하여 야외 시험을 수행하였다. 야외 시험 조건은 GPS L1/L2 대역을 수신할

수 있는 위성항법 수신기에 GPS L1 대역은 위성별 빔포밍 신호처리를 수행한 GPS L1 신호를 수신기에 전달하고 GPS L2신호는 빔포밍 신호처리 없이 수신기에 전달하였다. 다중대역 배열안테나를 사용하는 환경에서 디지털 빔포밍을 대역별로 독립적으로 수행하는 것이 일반적이며, 2022년 9월 기준 GPS L2C 송출가능 위성이 24개로 GPS L1 보다 적으며, 그 중에서도 미사용 위성이 존재하기 때문에 (NAVCEN 2022) full operational capability (FOC)를 수행하기에는 부족하여 두 대역 모두 빔포밍을 수행하는 것보다 GPS L1 대역만을 빔포밍 하는 것이 효율적이다. GPS L1 대역 빔포밍을 수행한 배열안테나를 이용한 위성항법 수신기의 GPS L1 대비 L2 상대신호 세기의 24시간 시험결과는 Fig. 2와 같다. 배열안테나의 제작에 따른 차이 여부도 분석하기 위해 동일한 크기와 배치, 형상으로 제작하고 동일 이득 및 축비 규격을 적용한 두

Table 1. Maximum differential power of two GPS L1/L2 array antennas made by the same specification in various elevation mask conditions.

Elevation mask (deg)		5	10	15	20	25	30
Max. Diff. Power	Array Ant. No. 1	24.4	23.4	23.4	20.8	20.4	16.0
L1-L2 (dB)	Array Ant. No. 2	25.8	25.8	25.8	22.5	22.5	15.9

개의 배열안테나를 같은 시간에 로깅하여 분석한 결과를 Fig. 2에 정리하였다. GPS 위성이 동일한 위치로 돌아오기까지 걸리는 시간인 23시간 56분 이상의 시험환경에서 상용 수신기에서 사용하는 기본 양각 마스크인 5도부터 5도 단위로 최대 30도까지 양각 마스크를 적용한 결과를 Fig. 2에서 확인할 수 있다. Fig. 2에서 검정색 그래프는 L1 위성 신호세기에서 L2 위성 신호세기를 차분한 위성별 상대세기 값들 중 최대값을 표현하고, 파란색 그래프는 상대세기 값이 최대일 때의 L2 위성 신호세기를 표현하였다. Fig. 2를 통해 기만신호 오검출이 발생할 수 있는 편차가 큰 L1/L2간 상대세기 차이 발생확률이 배열안테나 기준 양각 마스크 값이 커짐에 따라 발생 빈도가 점차 줄어들고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 상대세기 차가 큰 결과 값은 앞서 언급한 다중대역 배열안테나 제작 시 발생하는 이득 왜곡 현상으로 인해 L2 신호의 수신 신호세기가 더욱 열화되기 때문임을 Fig. 2의 시험결과로 확인할 수 있었다.

3. PROPOSED SCHEME

3.1 양각 마스크를 고려한 상대세기 기만검출 임계치 설정

상대세기 기만검출 기법의 임계치 설정을 위해 Fig. 2의 양각 마스크에 따른 시험결과를 실제 GPS L1과 L2 간 상대세기 설계 차이와 비교 분석한 결과를 Table 1에 표현하였다. Table 1의 결과에서 확인할 수 있듯이 간헐적으로 발생하는 GPS L1 대비 L2의 수신신호 세기의 차이로 인해, 5소자 빔포밍 이득 6.9 dB, GPS L1과 L2의 최소 수신세기 차 6.0 dB (IS-GPS-200 2021), L1 - L2 간 단일 패치 기준 안테나 최대 이득차 3.1 dB 각각을 상대세기 임계치의 한 파라미터로 하여 각 파라미터를 모두 더했을 때 값인 임계치 16.0 dB의 설계 값은 실제 배열안테나 양각 마스크 30도 이상에서의 측정 결과에서 유사하게 얻을 수 있음을 확인하였다. 설계한 임계치 값에서 실제 운용에 필요한 임계치 마진 값은 시스템의 동적 운용 환경, 탑재 장비의 분석 로직 업데이트 주기, 배열안테나의 균일한 제작 능력에 따라 달라질 수 있으며, 본 논문에서는 수신 신호세기의 2배인 3.0 dB를 임계치 마진 값으로 설정하였다. 따라서 기만신호가 19.0 dB 높게 인가되면 상대세기로 인한 기만신호로 검출하여 항법해 연산에서 배제하는 방식으로 기만대응을 수행하게 된다. 기만신호 발생기가 동적으로 이동하는 목표물을 기만하기 위해서는 송/수신 안테나 이득뿐만 아니라 목표물 이동시간과 궤적 분석을 통해 송신신호 세기를 고려한 경로손실도 감안하여야 하기 때문에 기만을 성공시키기 위해서는 GPS L1 대역에 위성 수신신호 세기 보다 매우 높은 신호세기로 인가하여 기만신호를 발생시켜야 하며, 이로 인해 본 논문에서 설정한 상대세기 기만검출 임계치를 통해 충분히 검출이 가능하다.

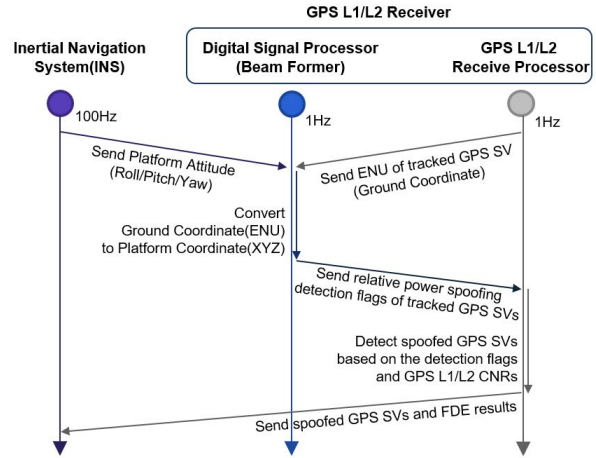


Fig. 3. Spoofing detection processing flow based on elevation masked relative received power in GPS L1/L2 receiver.

3.2 양각 마스크 적용을 위한 상대세기 기만검출 수행 절차

지금까지 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 기법의 임계치 설정에 대해서는 분석하였으나, 배열안테나 기준의 양각 마스크를 적용하기 위해서는 추가적인 절차가 더 필요하다. 일반적인 위성항법 수신기의 양각 마스크는 안테나가 천정방향을 향하고 있는 지표좌표계 기준의 양각 마스크이며 배열안테나가 장착된 플랫폼 자세에 따라 수신되는 위성신호의 입사각이 달라지고 그에 따라 수신되는 신호세기가 달라지기 때문에 각 항법 위성의 양각을 플랫폼좌표계 기준으로 연산할 수 있는 좌표계 변환 프로세스가 필요하다. 이와 같은 좌표계 변환 프로세스를 포함하여 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출을 위해서 플랫폼의 자세정보, 수신기 기준의 항법 위성 위치정보, 측정된 GPS L1/L2 위성 신호세기인 carrier-to-noise ratio (CNR) 입력 정보가 필요하다. 본 논문에서 고려하고 있는 플랫폼의 자세정보는 GPS L1/L2 수신기의 외부에 있는 관성항법장치로부터 수신할 수 있으며, 수신기 기준의 항법 위성의 위치정보는 수신기 내 GPS L1/L2 수신 처리부로부터 획득이 가능하다. GPS L1/L2 수신기는 GPS L1/L2 수신 처리부와 빔포밍을 위한 디지털 신호 처리부로 구성되어 있으며, 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 알고리즘 구동을 위한 GPS L1/L2 수신기 동작 흐름도는 Fig. 3에 표현하였다. 제안하는 기만검출 알고리즘은 매 epoch 마다 수행하게 되며, 관성항법장치로부터 수신하는 자세정보는 100 Hz 속도로 수신하며, 지표좌표계를 사용하는 위성의 위치정보는 GPS L1/L2 수신 처리부에서 1 Hz 속도로 수신한다. 모아진 정보를 통해 디지털 신호 처리부는 수신기의 지표좌표계에서 배열안테나가 장착된 플랫폼의 플랫폼좌표계로 변환하여 배열안테나 위치 대비 항법 위성의 방위각과 양각을 얻을 수 있다. 이를 통해 위성마다의 양각을 확인하여 상대세기 기만검출을 수행할 지에 대한 플래그를 GPS L1/L2 수신 처리부에 전달하고, 이 플래그를 통해 GPS L1/L2 수신 처리부에서는 상대세기 기만검출 플래그에 체크된 위성의 신호 세기가 임계치를 넘게되면 항법해 연산을 위한 측정치에서 배제하는 기만 검출 후 제거 (fault detection and elimination, FDE)를

수행하게 된다. 이를 통해 검출된 위성정보와 기만신호로 추정되는 위성을 배제한 항법해 결과인 시간, 위치, 속도 정보를 출력하게 된다.

GPS L1/L2 수신기의 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 동작을 위해 항법 위성의 플랫폼좌표는 GPS L1/L2 수신 처리부에서 추적한 위성의 지표좌표를 전달받아 디지털 신호 처리부에서 회전행렬을 적용하여 변환한다. 본 논문에서는 구하고자 하는 플랫폼좌표계에서의 n 번째 위성의 위치를 X_n, Y_n, Z_n 으로 정의한다. 플랫폼좌표계의 X_n, Y_n, Z_n 값은 회전행렬 R 과 지표좌표계 기준 n 번째 위성의 북쪽, 동쪽, 상향 방향 위치인 N_n, E_n, U_n 값과의 곱으로 계산하며 식 (1)과 같이 정의한다.

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} N_n \\ E_n \\ U_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 n 번째 위성의 N_n, E_n, U_n 값은 GPS L1/L2 수신 처리부에서 항법위성에서 수신한 궤도력 데이터와 항법해를 풀어내 획득한 시각과 현재 위치 정보를 이용하여 지표좌표계 기준으로 변환하여 디지털 신호 처리부로 전달한다. 또한 회전행렬 R 은 롤(roll), 요(yaw), 피치(pitch) 변환 순서에 따라 변환되어 식 (2)와 같이 획득할 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\beta) \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 α, β, γ 는 관성항법장치로부터 획득한 롤, 피치, 요 값의 라디안 단위 값이며, γ 는 요 회전방향과 반대방향으로 정의되어 입력된 자세정보에서 -1을 곱한 값으로 변환하여 입력한다. 상기 지표좌표계 기준 N_n, E_n, U_n 값과 회전행렬을 통해 구한 X_n, Y_n, Z_n 값을 통해 n 번째 위성의 플랫폼좌표계 기준 방위각 θ_n 과 양각 ϕ_n 은 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_n = \text{atan} \left(\frac{\sqrt{X_n^2 + Y_n^2}}{Z_n} \right), \quad \phi_n = \text{atan} \left(\frac{Y_n}{X_n} \right) \quad (3)$$

여기서 $\text{atan}()$ 는 아크탄젠트 함수를 의미한다. 상기 식에서 구한 양각의 수식을 통해 GPS L1/L2 수신기에서 항법에 사용하는 모든 위성의 양각을 분석하여 양각 마스크 적용을 결정한 후 상대세기 기만대응 기법을 수행하게 된다.

4. TEST RESULTS

본 논문에서 제안하는 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만신호 검출을 위한 알고리즘 기능이 정상 동작하는지 확인하기 위해 단일 GPS 시뮬레이터를 이용한 랩 시험을 통해 기능 검증 시험을 수행하였다. 또한 실제 GPS 신호를 수신하는 GPS L1/L2 수신기에 상대세기 기만검출을 적용하였을 시 기만대응 성능을 측정하기 위해 두 대의 GPS 시뮬레이터를 활용한 기만대응 성능 분

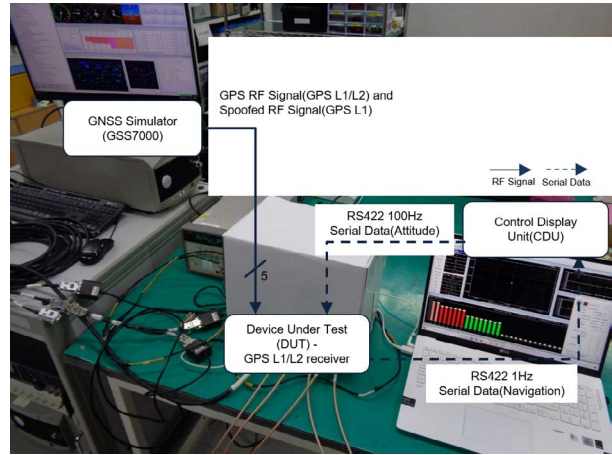


Fig. 4. Laboratory test structure for spoofing detection function verification of proposed scheme.

석 시험을 수행하였다. 기만신호를 야외에서 방송하는 것은 제한되어 있기 때문에 실제 야외의 GPS 신호에 동기된 기만신호를 인가하는 시험 절차와 동일한 조건을 모의하기 위해 하나의 GPS 시뮬레이터는 야외 GPS L1/L2 신호를, 다른 GPS 시뮬레이터는 GPS L1의 기만신호를 인가하는 용도로 사용하였다. 또한 야외 GPS 신호 수신 조건에서 동일한 상대세기 기만검출 임계치를 적용하여 GPS 수신기를 운용하였을 때 양각 마스크의 유무에 따라 기만신호 오검출 성능을 분석하는 시험을 수행하였다.

4.1 기능 검증

양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 알고리즘의 정상 동작 확인을 위한 랩 시험 조건에 기능 검증 시험 구성도는 Fig. 4와 같다. 상대세기 기만검출 알고리즘이 탑재된 GPS L1/L2 수신기에 GPS 위성신호와 기만신호를 모의한 신호 인가를 위해 SPIRENT사의 SimGen SW가 탑재된 GSS7000 시뮬레이터를 사용하였다. GPS L1/L2 수신기에 관성항법장치의 모의된 롤/피치/요 자세정보를 주입하여 주기 위해 제어표시기 (control display unit, CDU)에 관성항법모의 SW를 탑재하여 100 Hz의 RS422 시리얼 데이터를 통해 주입하여 주었다. 또한 GPS L1/L2 수신기의 기만검출 및 위성항법 정보를 출력하기 위해 제어표시기에 위성항법표시 SW를 탑재하여 1 Hz의 RS422 시리얼 데이터를 통해 출력하여 주었다. GPS L1/L2 수신기에 구현된 상대세기 기만검출 알고리즘을 검증하기 위해 GPS 시뮬레이터에서 양각 5도에서 30도 사이에 위치한 기만 GPS 위성 1개와 양각 30도 이상에 위치한 기만 GPS 위성 1개의 GPS L1과 L2 간 상대세기를 임계치 이상으로 설정하고 다른 GPS L1/L2 위성은 임계치 이내의 상대세기를 가지도록 하여 동시에 인가하였다. 플랫폼좌표계와 지표좌표계의 양각이 동일하도록 관성항법모의 SW의 롤/피치/요는 모두 0도로 설정하여 주입하였다. 시험 시작 시점에서 양각 5도에서 30도 사이에 위치한 기만 GPS 위성의 경우 양각 마스크로 인해 기만신호로 검출되지 않고, 대조군으로 설정한 양각 30도 이상에 위치한 기만 GPS의 경우에는 양각 마스크 이상이기 때문에 기만신호로 검출되어 항법에 사용하지 않는 조건을 초기 시작 조건으

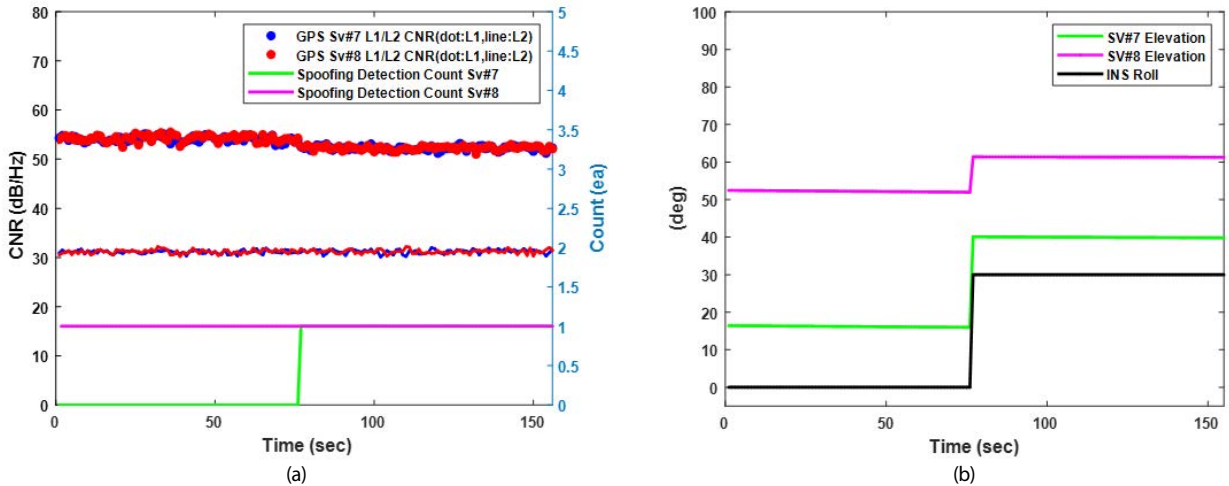


Fig. 5. Laboratory test result of spoofing detection function verification with proposed scheme. (a) GPS L1/L2 CNRs and spoofing detection count of satellite vehicles 7 and 8, (b) platform coordinate elevations of satellite vehicles 7 and 8 with INS roll.

로 설정하였다. 시험 75초 이후 관성항법모의 SW의 자세를 변화시켜 양각 5도에서 30도 사이에 위치한 기만 GPS 위성도 플랫폼 좌표계 기준 양각 30도 이상이 조건이 달성되면 기만검출이 수행되는지 확인하는 절차로 기능 검증시험을 수행하였다.

Fig. 5는 검증 시험을 수행한 결과를 도시하고 있다. GPS 시뮬레이터 지표표준 기준 양각 16.2도에 위치한 GPS 7번 위성과 양각 52.1도에 위치한 GPS 8번 위성을 기만 GPS 위성으로 설정하여 시험을 수행하였다. Fig. 5a에서 GPS 7번과 8번 위성의 GPS L1과 L2간 상대세기 차는 임계치인 19.0 dB가 넘도록 설정되어 있음을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 5b의 시험 시작 구간에서 GPS 7번 위성의 경우 양각 30도 이하에 위치하기 때문에 기만위성으로 검출하지 않고 양각 30도 이상에 위치한 GPS 8번의 위성만 기만위성으로 검출하였음을 Fig. 5a에서 확인할 수 있다. Fig. 5b에서 확인할 수 있듯이, 시험 77초 시점에 관성항법모의 SW를 통해 롤을 30도 변화시킴으로 GPS 7번 위성도 플랫폼좌표계 기준 양각 40.0도로 변경되면서 양각 마스크인 30도가 넘어감으로 인해 기만위성으로 검출됨을 확인하는 결과를 통해 GPS L1/L2 수신기에 탑재한 양각 마스크를 적용한 기만검출 알고리즘의 기능이 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

4.2 기만대응 성능 분석

GPS L1/L2 수신기에 상대세기 기만검출 알고리즘을 적용하였을 때의 기만대응 성능 분석을 위한 야외 환경을 모의한 시험 구성도는 Fig. 6과 같다. 야외 환경에서 GPS L1 신호 빔포밍을 모의하기 위해 5채널 분배기를 통해 GPS L1/L2 수신기에 Fig. 6의 상단에 위치한 GPS 시뮬레이터 신호를 입력한다. Fig. 6의 하단에 위치한 GPS 시뮬레이터를 통해 GPS L1 기만신호를 5채널 분배기를 통해 GPS L1/L2 수신기에 입력한다. 2개의 5채널 분배기의 출력은 2채널 합성기를 통해 상대세기 기만검출 알고리즘이 적용된 GPS L1/L2 수신기에 입력된다. 2개의 시뮬레이터의 위성항법 신호의 궤도력 정보를 맞춰주기 위해 SEPTENTRIO 사의 GPS 수신기를 활용하여 야외 환경의 GPS L1/L2 신호를 모의한 GPS

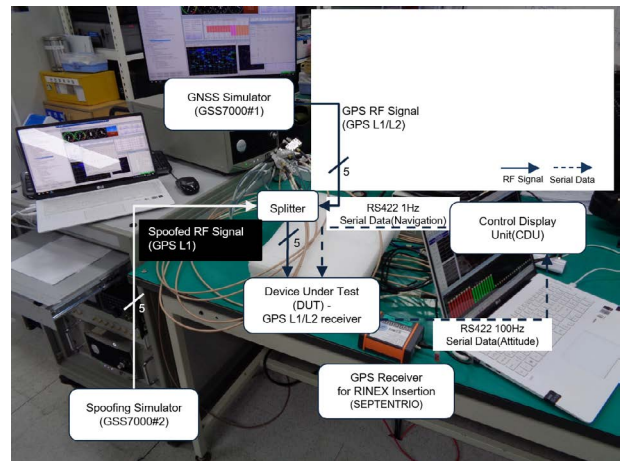


Fig. 6. Laboratory test structure for spoofing detection and elimination with and without proposed scheme.

시뮬레이터의 RF 신호를 받아 파일로 출력한 RINEX 데이터를 기만신호를 인가하는 GPS 시뮬레이터에 장입하여 주었다. 또한 GPS L1/L2 신호를 모의한 GPS 시뮬레이터의 시각동기를 기만신호 인가 GPS 시뮬레이터에 맞춰 주도록 하드웨어 간 설정하였다. 야외 환경의 GPS L1 신호 빔포밍을 수행을 위해 Fig. 4와 같이 제어표시기 내 탑재한 관성항법모의 SW를 통해 GPS L1/L2 수신기에 입력하여 주고, 기만검출 및 위성항법 정보 출력을 위해 Fig. 4와 같이 제어표시기 내 탑재한 위성항법표시 SW를 사용하였다. GPS L1/L2 수신기의 기만대응 성능 분석을 위해 야외 환경을 모의한 GPS 시뮬레이터 구동 및 GPS L1/L2 수신기 3D 항법 및 빔포밍 수행 이후, 60초와 120초 시점에 양각 30도 이상의 GPS L1 기만신호 각 1개씩을 GPS 시뮬레이터에서 상대세기 임계치 이상으로 주입한다. 임계치 이상 세기의 기만신호 인가 시에 5 m/sec 의사거리 오차 변화를 지속적으로 주도록 하였다. 기만대응 성능 분석 비교를 위해 GPS L1/L2 수신기에 상대세기 기만검출 알고리즘이 동작하지 않을 때와 동작할 때의 위성항법 성능을 비교 분석하였다.

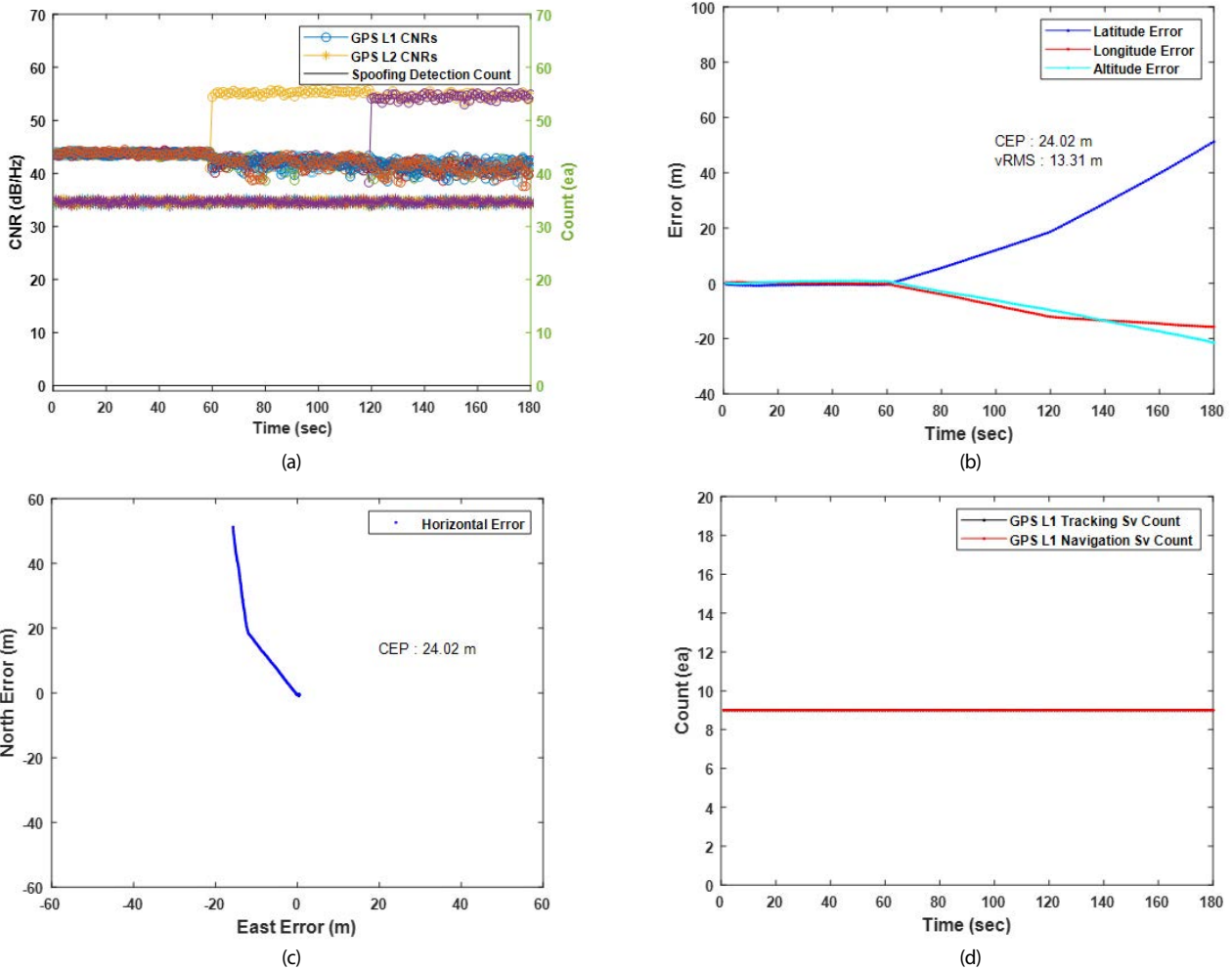


Fig. 7. Laboratory test result of spoofing detection and elimination without proposed scheme. (a) GPS L1/L2 CNRs and spoofing detection count, (b) position error including CEP and vertical RMS, (c) horizontal error including CEP, (d) GPS L1 tracking and navigation satellite vehicle count

Fig. 7은 GPS L1/L2 수신기에 상대세기 기반검출 알고리즘이 동작하지 않았을 때의 결과를 출력하였다. Fig. 7a에서는 수신기에서 수신한 모든 GPS L1/L2 위성의 CNR과 기반검출 개수를 출력하였다. Fig. 7a에서 확인할 수 있듯이 로깅 시작 60초와 120초에 GPS L1 대역 기만신호 인가를 위한 GPS 시뮬레이터를 통해 상대세기 임계치 이상의 기만신호가 인가된 것을 확인할 수 있으며, 궤도력과 시각 동기가 정확히 맞아 인가와 동시에 기만신호를 추적함을 확인할 수 있었다. 하지만 기반검출 알고리즘을 강제로 동작하지 않도록 설정한 상태이기 때문에 기반검출 개수를 0으로 출력하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 기만신호 내 포함된 의사거리 오차 변화로 인해 Figs. 7b,c를 통해 위도, 경도, 고도 축 위치오차와 수평 위치오차가 기만신호 인가 이후 증가함을 확인할 수 있었고, 기만신호로 인해 수평, 수직 위치오차를 표현한 circular error probability (CEP)와 vertical root mean square (vRMS) 값이 24.02 m와 13.31 m로 증가하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 7d에서는 GPS L1/L2 수신기에 기반검출 알고리즘이 동작하지 않는 조건에서 궤도력과 시각 동기를 맞춘 기만신호가 인가됨에 따라 추적 위성 수와 항법 위성 수가 변하지 않고 유지됨

을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 GPS L1/L2 수신기에 양각 마스크를 적용한 상대세기 기반검출 알고리즘을 동작 시켰을 때 결과를 출력하였다. Fig. 8a에서도 수신기에서 수신한 모든 GPS L1/L2 위성의 CNR과 기반검출 개수를 출력하였으며, Fig. 7a와 동일하게 로깅 시작 60초와 120초에 GPS L1 대역 기만신호가 인가됨을 확인할 수 있었다. Fig. 8a를 통해 기반검출 개수가 기만신호 인가와 동시에 증가하여 60초에 1개, 120초에 2개의 기만신호가 검출됨을 확인할 수 있었다. 120초 이후 2개의 상대세기가 센 기만신호가 인가됨에 따라 GPS L1 CNR 변화폭이 커 순간적으로 기반검출을 놓치는 현상이 발생하였으나, 이는 GPS L1/L2 수신기에 설계되어 있는 자동이득제어(auto gain control, AGC)가 동작하여 생긴 현상이며 기반검출을 놓친 바로 다음 epoch에서 재검출함을 확인할 수 있었다. Figs. 8b,c에서 위도, 경도, 고도 축 위치오차와 수평 위치오차가 기만신호가 인가되더라도 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었으며, 이는 Figs. 7b,c와는 다르게 제한한 기반검출 알고리즘이 정상적으로 수행되면 기만신호가 인가되더라도 위치오차에 문제가 없음을 Figs. 8b,c에서의 CEP와 vRMS 값인 1.39 m와 0.29 m를 통

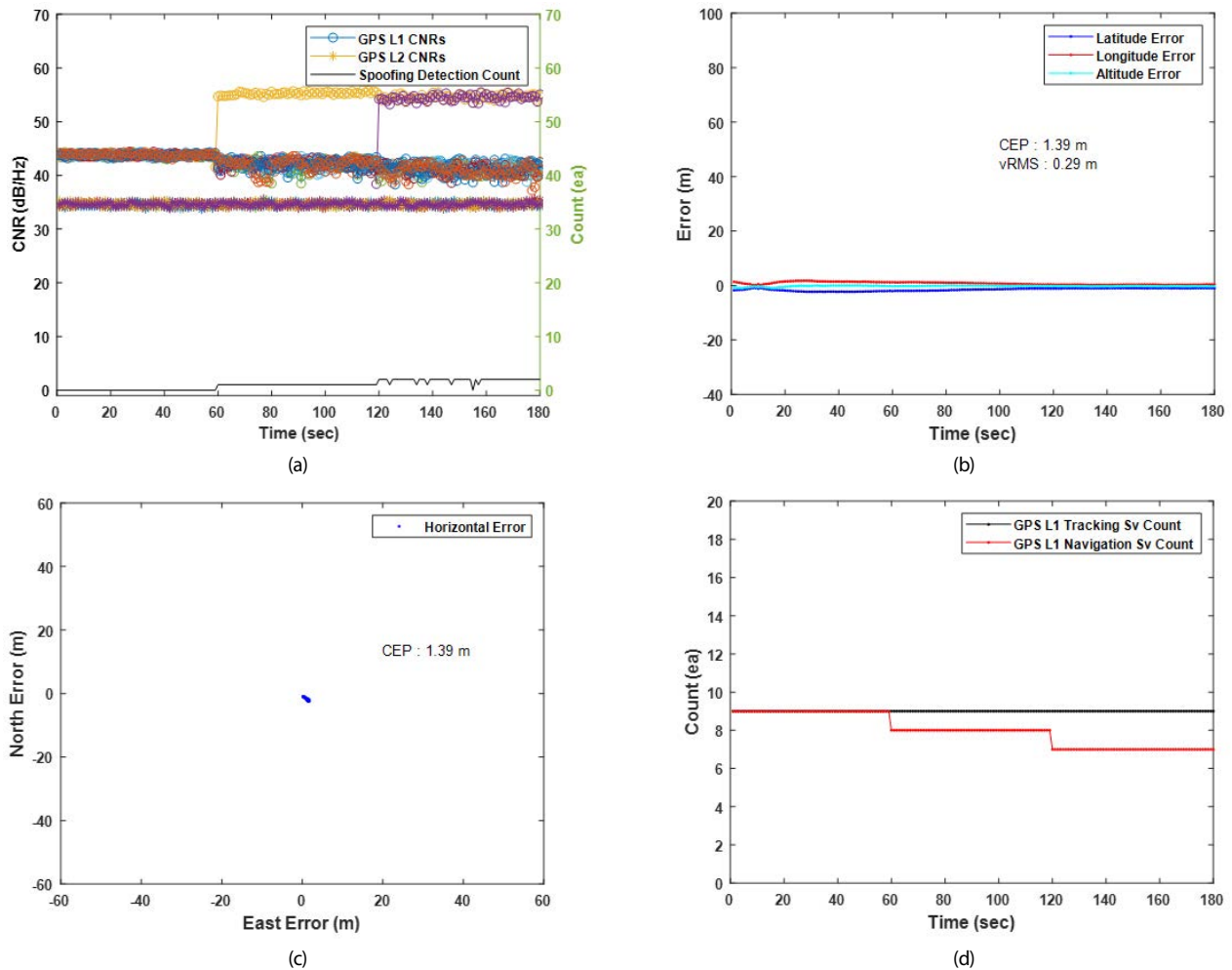


Fig. 8. Laboratory test result of spoofing detection and elimination with proposed scheme. (a) GPS L1/L2 CNRs and spoofing detection count, (b) position error including CEP and vertical RMS, (c) horizontal error including CEP, (d) GPS L1 tracking and navigation satellite vehicle count.

해 확인할 수 있었다. Fig. 8d에서는 GPS L1/L2 수신기에 기만검출 알고리즘이 정상적으로 수행되면 기만신호를 지속 추적 및 검출하여 항법에 사용하지 않기 때문에 추적 위성개수는 동일하게 유지되지만 항법 위성개수는 60초, 120초에 각각 1개씩 검출한 위성을 항법에서 정상 배제하였음을 확인할 수 있었다.

4.3 야외 오검출 성능 분석

제안하는 상대세기 기만검출 알고리즘을 GPS L1/L2 수신기에 적용하였을 때, 야외 실 GPS L1/L2 수신 환경에서 양각 마스크 유무에 따른 오검출 성능을 분석하였다. 기만신호를 인가하지 않은 야외 환경에서 GPS 위성이 동일한 위치로 돌아오는 데까지 걸리는 시간인 23시간 56분 이상 로깅을 수행하여 오검출 확률을 분석하였다. 야외 오검출 성능 분석을 위한 시험 구성도는 Fig. 9와 같으며, 배열안테나와 GPS L1/L2 수신기를 야외 환경에 장착하고 연장 케이블을 이용하여 셀터 내 설치된 제어표시기와 연동하였다. GPS L1 신호 빔포밍 수행을 위해 제어표시기 내 탑재한 관성항법모의 SW를 통해 GPS L1/L2 수신기에 자세정보를 입력하

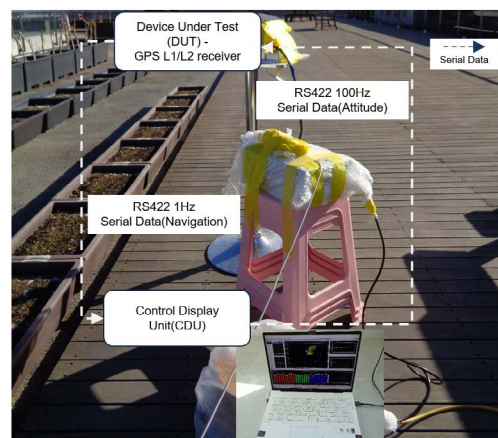


Fig. 6. Live sky test structure for false detection with and without proposed scheme.

여 주고, 기만검출 및 위성항법 정보 수신을 위해 제어표시기 내 탑재한 위성항법표시 SW에서 수신하였다.

Fig. 10에서는 양각 마스크를 적용한 조건과 적용하지 않는 조

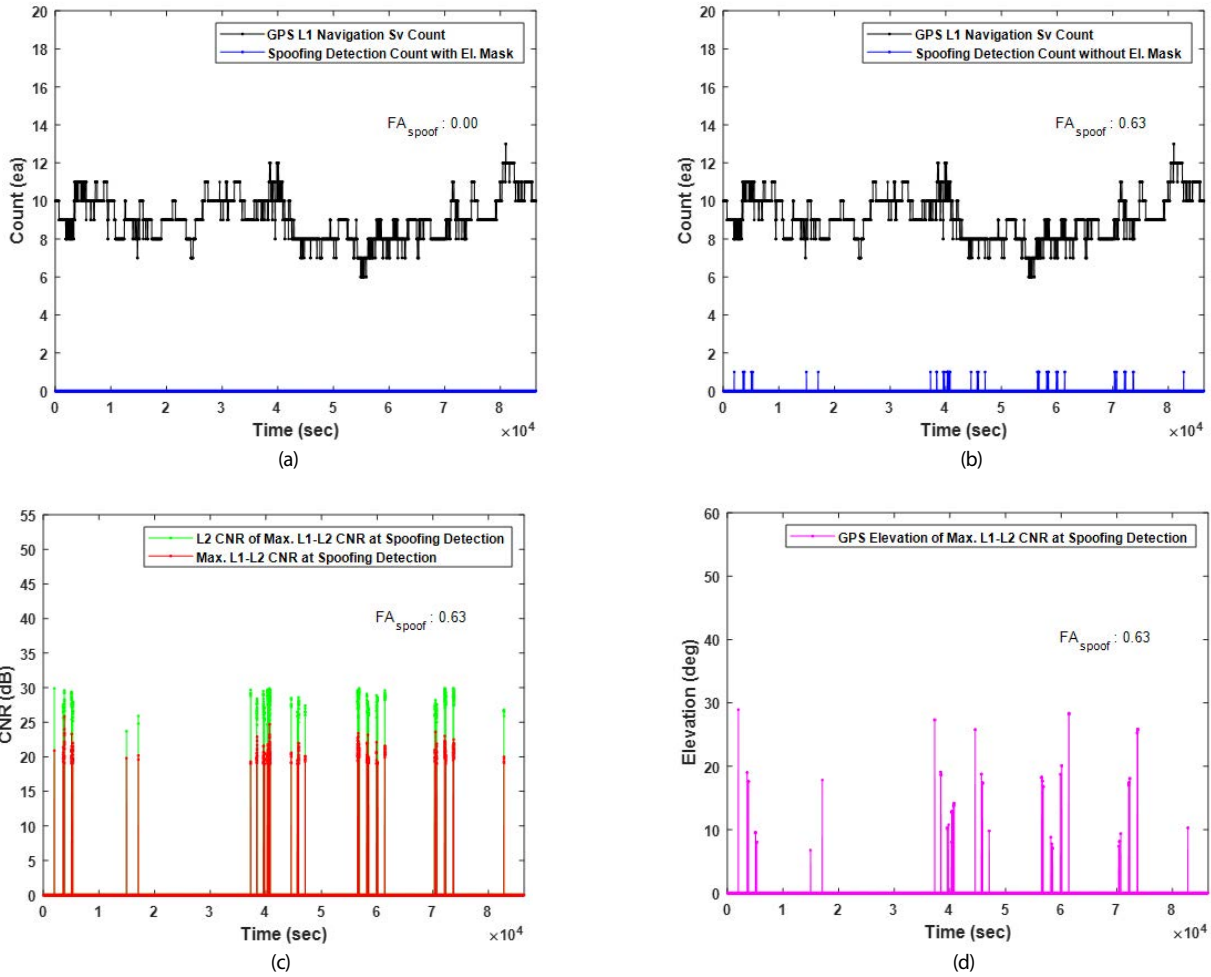


Fig. 10. Live sky test result of false detection probability with and without proposed scheme. (a) spoofing detection count and false detection probability with elevation mask, (b) spoofing detection count and false detection probability without elevation mask, (c) maximum L1-L2 CNR and L2 CNR at spoofing detection without elevation mask, (d) GPS elevation of maximum L1-L2 CNR at spoofing detection without elevation mask.

건에서의 상대세기 기만검출 개수와 항법 위성개수를 시간축으로 출력하였고 오검출 확률은 Fig. 10에 텍스트로 표기하였다. 본문에서 사용한 오검출 확률, FA_{spoof} 는 식 (4)와 같다.

$$FA_{spoof} = \frac{Epoch_{FalseDetected}}{Epoch_{Total}} \times 100 \quad (4)$$

여기서 $Epoch_{FalseDetected}$ 와 $Epoch_{Total}$ 은 기만 오검출 epoch 개수와 전체 로깅한 epoch 개수를 각각 의미한다. 실제 야외 조건에서 로깅을 수행한 동일 날짜 레퍼런스 수신기에서 기만 검출이 발생하지 않았으므로 GPS L1/L2 수신기의 기만검출 개수는 모두 기만 오검출 epoch 개수로 판단하였다. Fig. 10a의 조건인 양각 마스크 적용 조건에서의 오검출 확률은 0.00% 인 반면, Fig. 10b의 양각 마스크를 적용하지 않은 조건의 상대세기 기만검출 알고리즘은 0.63%의 오검출 확률이 발생함을 확인하였다. Fig. 10b의 양각 마스크를 적용하지 않은 조건에서 상대세기 기만검출로 검출된 위성의 CNR 차이와 해당 위성의 양각을 분석하기 위해 Figs. 10c,d 에선 상대세기 기만검출 시점에서의 최대 L1-L2 CNR 및 해당 L2 CNR 값과 최대 L1-L2 CNR 차를 가진 오검출된 위성의 양각

을 각각 출력하였다. Figs. 10c,d의 결과를 통해 양각 마스크 이하 조건에서 GPS L2의 이득 패턴 왜곡으로 인한 L2 CNR 열화로 인해 상대세기 기만검출 임계치가 넘어가는 위성이 발생하여 오검출 되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 10의 결과 비교를 통해 본문에서 제안하는 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 알고리즘을 적용하면 야외 운용 조건에서 GPS L1/L2 수신기에서 기만신호 오검출 확률을 낮추며 정상적으로 기만검출을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 다중대역 배열안테나를 이용한 GPS L1/L2 수신기 환경에서 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 알고리즘을 제안하고, 그 효과에 대해 분석하였다. 배열안테나를 사용하는 환경에서는 빔포밍 신호처리를 통해 위성항법 신호의 이득 및 추적 성능을 높이는 것이 많이 연구되어 활용하는 기술이며 본 논문에서는 빔포밍 신호처리로 인한 이득을 포함한 상대세기

기만검출 임계치를 설정하는 방법을 제안하였다. 빔포밍 신호처리리를 하지 않고 악의적인 재밍 신호에 대한 Null-steering 신호처리리를 위한 용도로 배열안테나를 활용하는 GPS 수신기의 경우에는, 본 논문의 상대세기 임계치 설정 파라미터 중 빔포밍 이득 파라미터만 제외하여 설정한다면 본 논문에서 제안하는 양각 마스크를 적용한 상대세기 기만검출 알고리즘을 동일하게 적용하여 배열안테나로 인한 빔형성 왜곡 현상으로 완화하는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 앞서 언급한 기만검출 연구들 중에서 제안한 한 개 또는 두 개의 기만신호를 잘 검출할 수 있는 패리티 벡터 검사 및 의사거리 잔여오차 검사 등의 기술과, 동시에 많은 수의 기만신호가 인가되더라도 임계치가 넘는 신호는 모두 검출할 수 있다는 장점이 있다. 앞서 언급하였듯이 기만검출 및 대응 기법들은 단독으로 사용되기 보다는 각 기법들의 한계를 서로 보완하기 위해 각 기법들을 순차 병합하여 적용하였을 때 악의적인 기만 공격을 보다 효과적으로 대응할 수 있다.

물론, 양각 마스크를 적용하지 않고 배열안테나의 각 패치안테나 별 전방위 측정 패턴을 플랫폼좌표계 기준의 방위각, 양각의 2차원으로 양자화(quantization)하여 입사되는 GPS 신호의 방위각, 양각에 따라 상대세기 임계치를 설정하여 기만검출을 수행하게 된다면 모든 양각을 지원하는 상대세기 기만검출을 수행할 수 있을 것으로 판단한다. 하지만, 이는 모든 제작되는 배열안테나에 대해 전방위 패턴을 측정해야 하고 그 측정치를 플랫폼좌표계 기준 방위각, 양각으로 양자화하여 GPS 수신기에 입력하는 절차 및 시간이 투입되어야 하기 때문에 현실적으로 기만검출 알고리즘이 탑재되는 배열안테나 기반 GPS 수신기를 개발 및 제작하는 산업계 환경에는 경제적으로 고려할 점이 많다고 판단한다. 하지만, 향후 연구를 통해 실측 배열안테나 전방위 측정 패턴을 활용한 보다 정밀한 상대세기 기만검출 알고리즘을 수행한 시험 결과는 많은 추후 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J. Jung and S. Seo; methodology, J. Jung and S. Seo; software, J. Jung, H. Won, S. Park, and B. Yu; validation, J. Jung, H. Won, S. Park, and B. Yu; formal analysis, J. Jung, H. Won, S. Park, and B. Yu; investigation, J. Jung, H. Kang, and S. Kwon; resources, J. Jung, H. Won, and S. Park; data curation, J. Jung, H. Won, and S. Park; writing—original draft preparation, J. Jung, H. Won, and S. Park; writing—review and editing, J. Jung, H. Won, S. Park, H. Kang, and S. Kwon; visualization, J. Jung, H. Won, and S. Park; supervision, S. Seo; project administration, S. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Humphreys, T. E., Ledvina, B. M., Psiaki, M. L., O'Hanlon, B. W., & Kintner, Jr., P. M., 2008, Assessing the spoofing threat: Development of a portable GPS civilian spoofer, in Proc. ION GNSS 2008, Sep. 16-19, 2008, Savannah, GA, pp.2314-2325. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8132>
- IS-GPS-200 Revision M, Navstar Global Positioning System "Interface Specification: GPS Space Segment/Navigation User Interface", Navstar GPS Joint Program Office, May 2021. <https://www.gps.gov/technical/icwg>
- Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., Nielsen, J., & Lachapelle, G. 2012, GPS vulnerability to spoofing threats and a review of antispoofing techniques, Intl. Journal of Navigation and Observation, 2021, Article ID127072, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2012/127072>
- Jeong, S.-K., Kim, T.-H., Sin, C.-S., & Lee, S.-U. 2012, Technical trends of smart jamming for GPS signal, Electronics and Telecommunications Trends, 27, 75-82. <https://doi.org/10.22648/ETRI.2012.J.270609>
- Jung, J., Park, S.-Y., Hyun, J., Kang, H., Song, K., et al. 2018, Development of Anti-Spoofing Equipment Architecture and Performance Evaluation Test System, JPNT, 7, 127-138. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.3.127>
- Kang, S.-S., Seo, S.-M., Byun, G., & Choo, H. 2017, Design of Dual-Band GPS Array Antenna Using In-Direct Feeding Pad, KJKIEES, 28, 355-365, <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.5.355>
- Kim, H., Byun, G., Son, S.-B., & Choo, H. 2013, Design of a Dual-Band GPS Array Antenna, KJKIEES, 24, 678-685. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2013.24.7.678>
- Lee, H.-B., Song, Y.-J., Park, D.-H., Lee, S., & Won, J.-H. 2021, Monitoring of the Jamming Environment in the GNSS L5 Band in Korea Region, JPNT, 10, 353-361. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.4.353>
- U.S. Coast Guard Navigation Center (NAVCEN), GPS constellation [Internet], cited 2022 Sep 01, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>
- Wen, H., Huang, P. Y., Dyer, J., Archinal, A., & Fagan, J. 2005, Countermeasures for GPS signal spoofing, in Proc. ION GNSS 2005, Sep. 13-16, 2005, Long Beach, CA, pp.1285-1290. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6325>
- Yoo, S., Byun, G., Lee, J.-Y., & Choo, H. 2017, Design of Three-elements CRPA Arrays Using Improved Low-elevation Gain, Journal of Satellite, information and Communications, 12, 83-88. <https://koreascience.kr/article/JAKO201761242144610.page>
- Yun, S. & Lee, H. 2021, Quality Assessment of GPS L2C

Signals and Measurements, JPNT, 10, 13-20. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.1.13>



Junwoo Jung received the Ph.D. degree in information and communication engineering from Ajou University, Korea in 2012. Since January 2012, he has been employed in the LIG NEX1 and engaged in the development of anti-jamming GNSS systems and tactical communications. He received a President award of NIPA from ITRC Forum 2012 and a Research Dev. Government Grant from a Director of DAPA in 2018. He currently works on anti-spoofing/anti-jamming GNSS systems and military SBAS systems.



Hyunhee Won received B.S. degree from in computer science and electrical engineering from Handong Global University, Pohang, Korea. He is currently a research engineer in PGM Core Tech R&D (NAV/GNSS Anti-Jamming R&D) laboratory, LIG NEX1. His research interests are in the area of array signal processing and adaptive processing.



Sungyeol Park received the B.S. degree in electrical engineering from Hanyang University, Korea, in 2012. Since 2012, he has employed in the R&D Lab of the LIG NEX1 and engaged in research and development of anti-jamming GNSS systems.



Haengik Kang received the B.S. degree in electrical engineering from Yonsei University, Korea, in 1996. he received the M.S. degrees in electrical engineering from Yonsei University, Korea, in 1998. He has been working for LIG Nex1 and engaged in the development of GNSS systems.



Seungbok Kwon received the B.S. degree in Control and Measurement from Myongji University, South Korea, in 1997 and the M.S. and Ph.D. degree in the IT convergence and system engineering from Ajou University, South Korea, in 2014 and 2020, respectively. He is currently working for LIG Nex1 Inc., Seongnam, South Korea, as a Chief Research Engineer. His research interests include inertial navigation, and GNSS/INS

integration system.



Byeongjin Yu received the M.S. degree in Control and Instrumentation Engineering from Chungbuk National University in 2007, he joined Navicom Co., Ltd. in 2007 and has 15 years of experience in navigation. He works as a Senior Research Engineer for Microinfinity Co., Ltd from 2021.



Seungwoo Seo is a senior researcher of Agency for Defense Development in Korea, Republic of. He received B.S. and M.S. degree in electrical engineering at Korea University. His research interests include time synchronization system and array signal processing.