

# Direction of Arrival Estimation of GNSS Signal using Dual Antenna

Junho Ong<sup>1,2</sup>, Hyoungmin So<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

<sup>2</sup>Department of Weapon System Engineering, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

## ABSTRACT

This paper deal with estimating the direction of arrival (DOA) of GNSS signal using two antennae for spoofing detection. A technique for estimating the azimuth angle of a received signal by applying the interferometer method to the GPS carrier signal is proposed. The experiment assumes two antennas placed on the earth's surface and estimates the azimuth angle when only GPS signal are received without spoofing signal. The proposed method confirmed the availability through GPS satellite placement simulation and experiments using a dual antenna GPS receiver. In this case of using dual antenna, an azimuth angle ambiguity of the received signal occurs with respect to the baseline between two antennas. For this reason, the accurate azimuth angle estimation is limits, but it can be used for deception by cross-validating the ambiguity.

**Keywords:** GNSS, GPS, DoA, spoofing detection

## 1. INTRODUCTION

Global navigation satellite system (GNSS) 신호를 인위적으로 교란하는 기만 기술은 코드지연, 도플러 주파수, 항법 메시지와 같은 GNSS 위성 신호의 구성요소를 위조하여 방송해 사용자가 잘못된 위치정보를 얻도록 하는 방해기술이다. Global positioning system (GPS) C/A 코드 등 상용 GNSS 시스템은 신호 구조가 공개되어 있어 기만 공격에 취약한 것으로 알려져 있다. 최근 다수의 실험 결과를 통해 무인드론, 선박 등이 기만공격에 의해 실제 경로에서 잘못된 방향으로 유도될 수 있음이 확인되었다 (Kerns et al. 2014, Psiaki & Humphreys 2016, Bhatti & Humphreys 2017). 또한 러시아, 이란 등 기만공격으로 추정되는 다수의 GPS 교란 사례가 확인되고 있어, 위성항법 기만에 대한 위협이 현실화되고 있다 (Israel Defense 2016, NewScientist 2017). 기만공격은 재밍공격과 다르게 공격받는 사용자가 공격을 알아차리지 못한다는 점에서 사용자에게 치명적일 수 있기 때문에 기만 탐지에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

대표적인 기만 탐지 기술로는 P(Y) 코드와 같은 비공개 신호를 이용한 암호화 인증 기법, 배열 안테나를 사용하는 입사각 추정 기법, 관성항법 장치와 같은 GPS 이외의 센서와의 일관성 검증 등의 방식이 있다 (John 2001). 이 외에도 단순한 형태의 기만 탐지 기법으로 급격한 신호 세기의 변화, 항법 위성의 시계 오차 특성 변화, 항법 메시지의 변화 등을 감시하는 기법들이 있다 (Jafarnia-Jahromi et al. 2012). 이들 기만대응 기법들 중에서는 암호화 신호를 이용하여 원천적으로 기만에 대응하는 방식이 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 하지만 현재 가용한 GPS P(Y) 코드를 이용하기 위해서는 별도의 암호 해독 모듈인 Selective availability anti-spoofing module을 탑재해야 하므로 대다수 일반 사용자들은 접근이 불가능하다. 따라서 일반 사용자들이 적용 가능한 효과적인 기만 대응 기법으로 배열 안테나를 이용하는 입사각 추정 기법이 활발히 연구되고 있다.

배열 안테나를 사용해 입사각을 추정하는 기법은 전통적인 2차원 원형 배열안테나를 사용하는 방법이 있다 (Daneshmand et al. 2012). 복소 소자를 이용하는 배열 안테나 기술은 기만 신호의 방위각과 고도각을 추정된 뒤 수신 소자의 이득과 빔 형성을 조정해 기만신호를 제거할 수 있다. 하지만 배열 안테나를 사용할 경우 별도의 신호 처리부가 요구되어 수신기의 복잡도가 증가하고, 다수의 안테나 패치로 인해 수신기의 형상이나 중량이 증가하는 한계를 가진다. 유사한 방식으로 최소한의 안테나를 사용하여 합성개구 기법으로 적응형 빔포밍을 구현한 사례도 있다 (Pany et al. 2013). 그러나 이 방법 또한 안테나를 회전시키기 위

Received May 14, 2020 Revised Jun 04, 2020 Accepted Jun 05, 2020

†Corresponding Author

E-mail: hyoungmin.so@gmail.com

Tel: +82-42-821-4463 Fax: +82-42-823-3400

Junho Ong <https://orcid.org/0000-0003-1338-160X>

Hyoungmin So <https://orcid.org/0000-0001-5279-8833>

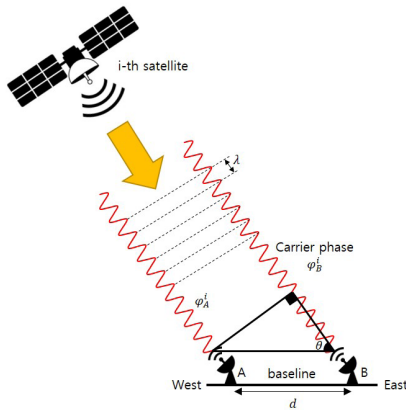


Fig. 1. Antenna and satellite layout conceptual diagram.

한 구동기, 회전판 등의 기구가 요구되어 중량과 형상 제약에 상당한 제약이 발생한다.

이러한 배열안테나 방식의 한계를 극복하기 위해 최소한의 안테나를 이용하는 입사각 추정기법들이 연구되고 있으며, 반송파 측정치를 이용한 간섭계 방식들이 적용되고 있다 (Younger & Reid 2017). 최근 연구에서는 Multiple signal classification algorithm 기법과 간섭계 방식을 비교하여 GPS 위성의 고도각 추정 성능을 확인한 바 있다 (Wang et al. 2018). 이러한 기존의 연구들은 반송파 측정치 기반의 간섭계 기법을 적용하여 자세 추정과 빔포밍을 위한 조향각 추정을 수행한 것으로, 이 방식을 기반 검출에 적용한 사례는 없다.

본 논문은 드론이나 항공기 등에 적용되는 2개 안테나 위성항법 수신환경에서 적용가능한 반송파 측정치 기반 기반검출 기법을 제안한다. 이를 위하여 기존의 간섭계 기법을 적용하고, GNSS 위성의 방위각 검출 성능을 분석하였다. 항법위성의 방위각에 따른 간섭계 방식의 적용 성능을 모의 검증하고, 2개 안테나 사용으로 발생하는 방위각 추정치의 180° 모호성 문제를 고려하는 기반 검출 기법을 제시하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 2차원 환경에서 방위각 추정시 오차 특성에 대해 보인다. 3장에서는 3차원 모의 환경에서의 방위각 추정 기법을 보이고, 모호성에 대한 접근법을 제시한다. 4장에서는 본 논문의 연구 결과로서 이중 안테나를 사용한 방위각 추정 결과를 기술한다.

## 2. INTERFEROMETRIC METHOD OF AZIMUTH ANGLE ESTIMATION

### 2.1 Azimuth Angle Estimation Algorithm

Fig. 1과 같이, GNSS 위성과 두 개의 안테나에서 수신되는 신호와 방위각을 가정한다.  $i$ 번째 위성의 위치를  $\mathbf{X}_i$ , 두 안테나의 위치는  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 이고, 수신기 시계오차를  $B$ 로 가정한다. 반송파 측정치의 잡음 오차 수준은 일반적인 수신기의 PLL 성능을 고려하여 반송파 1 cycle의 1/100인 0.0019 m로  $\epsilon_A, \epsilon_B$ 를 가정했을 때, 반송파 측

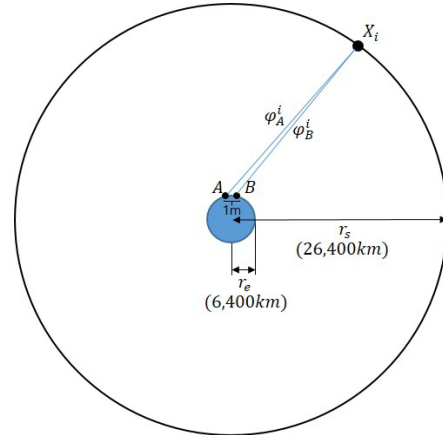


Fig. 2. DOA estimation concept using two antenna.

정치  $\phi_A^i, \phi_B^i$ 에 대한 단순화된 모델을 식 (1~2)와 같이 정의하였다.

$$\phi_A^i = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{A}\| + B + \epsilon_A (\epsilon_A = \sim N(0, \sigma^2)), \sigma = 0.0019 \quad (1)$$

$$\phi_B^i = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{B}\| + B + \epsilon_B (\epsilon_B = \sim N(0, \sigma^2)), \sigma = 0.0019 \quad (2)$$

모의된 반송파 측정치와 안테나간의 거리  $d$ 를 이용하여 간섭계 방식으로 방위각을 추정하는 방법은 식 (3)과 같다 (Younger & Reid 2017).

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\phi_A^i - \phi_B^i}{d} \right) \quad (3)$$

GNSS 위성의 고도는 약 20,000 km 수준으로, 지상에 위치한 두 안테나 간의 거리에 비하면 매우 먼 거리이다. 따라서 두 안테나에서 수신하는 측정치의 방향 벡터는 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서, Fig. 1에서 정의된 수신 신호의 방위각  $\theta$ 는 식 (3)을 이용하여 추정할 수 있다.

### 2.2 Azimuth Angle Estimation Simulation

모의 환경을 구성하여, 식 (1~3)의 방위각 추정기법의 성능을 확인할 수 있다. Fig. 2와 같이 단일 항법위성과 지표면에 놓은 2개의 안테나를 모의하고, 안테나 간의 거리는 1 m로 설정한 후 위성을 360° 회전시키며 방위각을 추정하였다.

방위각 추정 모의 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 x축은 수신기를 중심으로 한 실제 방위각, y축은 2개 안테나를 이용하여 추정된 방위각이다. 실제 방위각이 360°까지 회전하는데 비해 추정된 방위각은 180°까지 추정된 후 반전해 추정하는 성능을 보인다. 이것은 두 개 안테나를 이용할 때, 안테나 간의 기저선을 기준으로 양쪽으로 수신되는 신호의 방위각을 구분하지 못하는 모호성이 발생한 것이다. 따라서 두 개 안테나를 이용하는 제안된 방식은 180° 이내 범위에서만 방위각 추정이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 한계를 갖는 제안된 방식을 기반 검출 용도로 활용하기 위한 교차 검증 기법을 제안하였다. 이에 대해서는 3장에서 설명한다.

방위각 추정 성능 확인을 위해 모호성이 발생하지 않는 0~180°

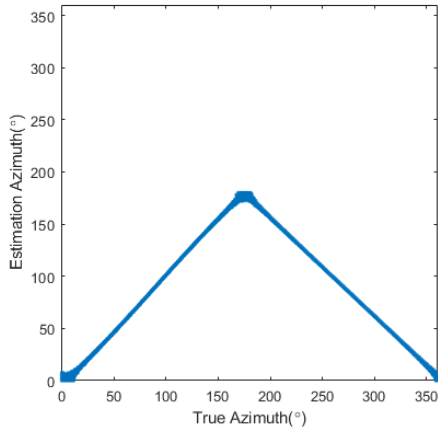


Fig. 3. Result of DOA estimation.

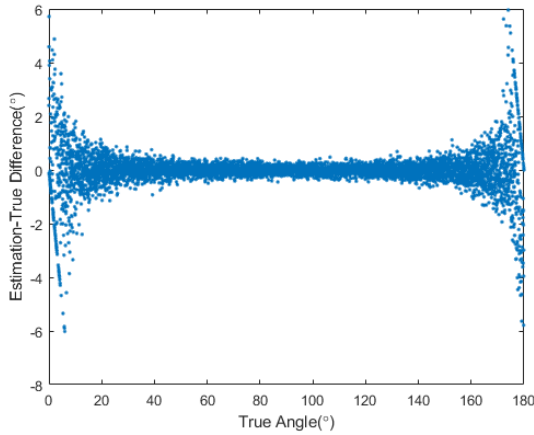


Fig. 4. DOA estimation error.

영역에 대한 추정 오차를 Fig. 4에 도시하였다. 모의 결과 5° 이내의 오차 수준을 확인할 수 있으며, 위성이 0°와 180°에 가까이 위치해 있을 때 오차가 커지는 특성이 있다. 이 특성은 방위각을 추정할 때, 식 (3)과 같이 역코사인으로 추정하여 생기는 한계이다. 단일 송신기에서 다수의 위성항법 신호를 모의하여 방송하는 일반적인 기만 공격을 가정할 때, 기만 신호는 특정 방향에서 다수의 위성신호가 입사되는 형태인 반면 항법 위성은 궤도의 특성상 다수의 방향에 분포하게 된다. 따라서 공간상에 널리 분포하는 정상 위성 신호와 특정 방향에서 다수의 신호가 수신되는 기만 신호를 구분하는데 있어 5° 수준의 방위각 추정 성능은 기만 검출 용도로 활용할 수 있다고 판단한다.

### 3. AZIMUTH ANGLE ESTIMATION SIMULATION USING GNSS SIGNAL

#### 3.1 Azimuth Angle Estimation using Carrier Phase

제안된 기법을 실제와 유사한 3차원 환경에서 모의하고 성능을 확인하였다. 본 논문에서는 방위각 추정 방식을 기만검출에 사용하고자 하므로, 관측된 측정치를 이용하여 수신되는 GNSS

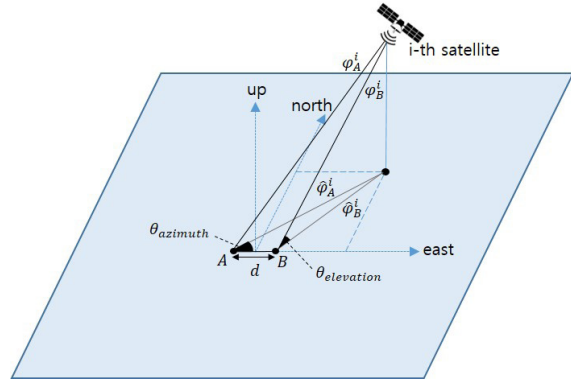


Fig. 5. Azimuth estimation conceptual diagram.

신호의 방위각을 추정하였다. 일반적인 기만공격이 단일 송신기에서 다수의 위성신호를 송출하는 특성을 갖기 때문에, 방위각을 검증하여 실제위성과 기만위성 신호를 구분할 수 있다. 3차원 모의 환경을 Fig. 5에 도시하였다.

반송파 측정치에 대한 단순화 모델  $\varphi_A^i, \varphi_B^i$ 는 식 (1~2)와 같고, 방위각 추정을 위해 지역평면으로 사영된 측정치  $\hat{\varphi}_A^i, \hat{\varphi}_B^i$ 는 항법메시지를 통해 계산한 위성의 고도각  $\theta_{elevation}$ 을 이용하여 식 (4~5)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\varphi}_A^i = \varphi_A^i \times \cos(\theta_{elevation}) \tag{4}$$

$$\hat{\varphi}_B^i = \varphi_B^i \times \cos(\theta_{elevation}) \tag{5}$$

이와 같이 평면상에 사영된 측정치와 안테나간의 이격거리 d를 이용하면, 식 (3)과 유사한 간섭계 방식의 방위각 추정이 가능하다 (Younger & Reid 2017). 최종적으로 Fig. 5의 환경에서 방위각 추정은 식 (6)과 같다.

$$\theta_{azimuth} = \cos^{-1}\left(\frac{\varphi_A^i - \varphi_B^i}{d}\right) \tag{6}$$

#### 3.2 Result of Simulation

위성 환경 모의를 위해 국토지리정보원에서 제공하는 2017년 6월 5일 세종 관측소(SEJN)의 RINEX 데이터를 사용하였으며, 기준국 기준의 위성 배치는 Fig. 6과 같다. Fig. 5의 모의환경 구성을 위해 두 개의 안테나를 가정하였으며, 각 안테나는 세종 관측소를 중심으로 동쪽으로 0.5 m, 서쪽으로 0.5 m 위치시켜 안테나의 기저선은 1 m가 되도록 했다. 항법메시지에서 제공하는 위성의 위치와 가정된 두 개 안테나의 위치를 기반으로 가상의 측정치를 모의하고, 식 (4~6)을 이용한 방위각 추정결과를 Fig. 7에 도시하였다. x축은 위성의 PRN이고, y축은 방위각이다. 이 때, 각 위성의 실제 방위각(○)과 식 (8)에서 추정된 방위각(\*), 추정된 방위각을 안테나간의 기저선에 반전시켜 결과값(+) 3가지 결과를 하나의 그래프에 표시하였다.

PRN 3번 위성의 경우 실제 방위각(○)은 150°로 180° 이내에 있으므로, 추정 방위각(\*) 150°로 추정이 가능하다. 반면 PRN 14번 위성의 경우 실제 방위각(○)이 -70°이고, 식 (6)을 통한 추정결과

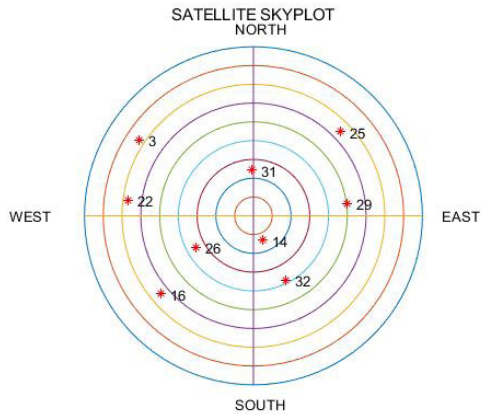


Fig. 6. Azimuth estimation simulation skyplot.

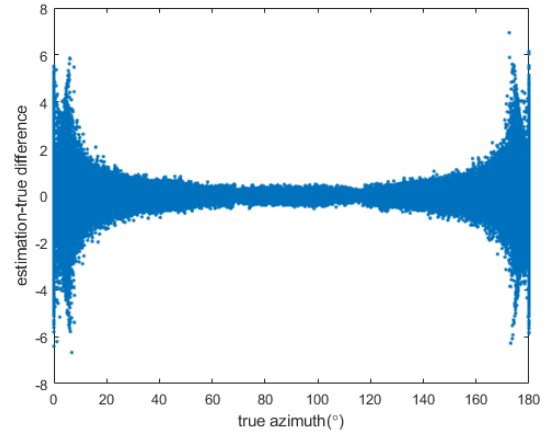


Fig. 8. Azimuth estimation simulation error.

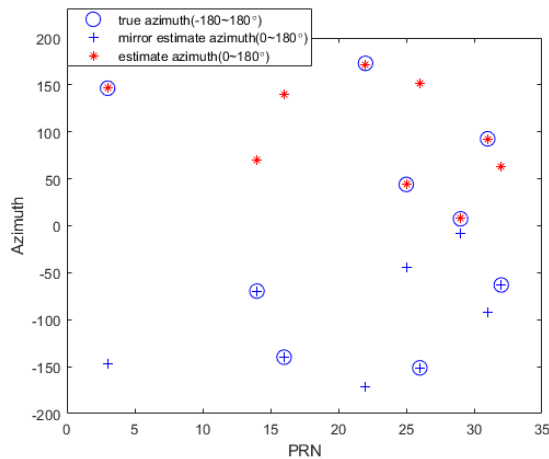


Fig. 7. Result of DOA estimation simulation.

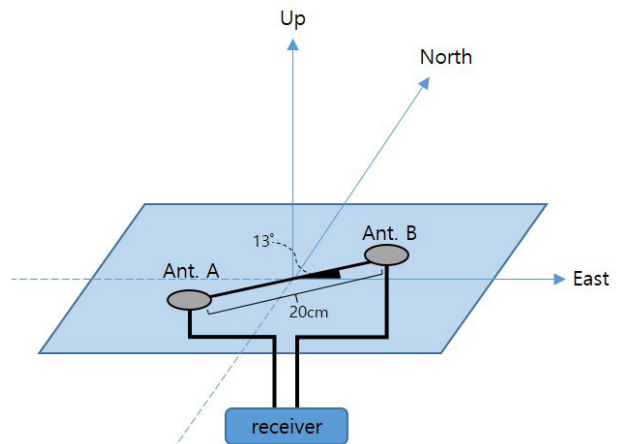


Fig. 9. Antenna placement.

(\*)는 70°이다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 두 개 안테나 사용 시 안테나 기저선을 기준으로 양쪽 방향에 대한 구분이 불가능한 한계이다. 이를 보완하기 위해 추정 방위각을 안테나 기저선에 대해 반전시킨 결과(+)를 이용하면 0-180° 범위 외에 대한 방위각도 검증이 가능하다.

이상의 모의 환경에 대한 방위각 추정 성능을 위해 12시간 동안 모의된 방위각 추정 오차를 Fig. 8에 도시하였다. 그 결과, Fig. 4의 모의 결과와 같이 0°와 180° 방위각을 갖는 위성에 대해 오차가 큰 특성을 보인다. 이 때의 최대 오차는 6° 정도 수준으로 특정 방향에서 다수의 신호가 수신되는 기만 신호와 공간상에 널리 분포하는 정상 신호를 구분하여 기만 검출 용도로 활용이 가능하다고 판단한다.

## 4. FIELD EXPERIMENT USING REAL GNSS SIGNAL

### 4.1 Setup

이중안테나 GPS 수신기를 이용하여 실제 GPS 신호를 수신하

고, 후처리 방식으로 제안된 기법의 성능을 확인하였다. 본 실험에서는 IFEN사의 SX-3 이중안테나 소프트웨어 수신기를 이용하여 실제 GPS 신호를 수신하였다 (IFEN GmbH 2019). 실험은 2019년 10월 10일, 대전에서 수행되었으며 10분 동안의 측정치를 이용하여 후처리 검증하였다. 실험에서의 안테나 배치는 Fig. 9와 같이 동쪽 방향에 대해 약 13° 경사를 갖고 있으며, 기저선 거리는 20 cm이다. Fig. 10은 실험 당시의 위성 배치를 skyplot으로 나타내었다.

### 4.2 Result

식 (4-6)의 기법을 실제 GPS 수신 신호에 적용한 결과를 Fig. 11에 도시하고, Table 1에 10분간 수신된 3600개의 샘플에 대한 추정 오차 통계를 제시하였다. 실험결과 6기의 가시 위성에 대하여, 5기에 대해서는 모의결과 수준의 추정 성능을 확인할 수 있었고, PRN 20, 32번은 7-8° 수준이다. 14번 위성의 경우, 추정 오차가 22°로 상당히 크게 확인되었는데, 이것은 수신 환경에 따른 다중경로 오차 등이 측정치에 반영된 것으로 추정된다. 다중경로 등 측정치 오차에 따른 성능 열화에 대해서는 추후 연구를 진행할 예정이다.

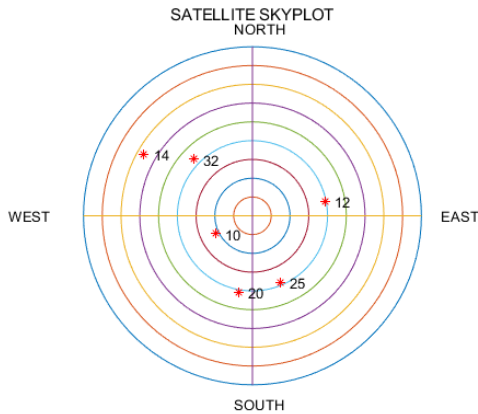


Fig. 10. 10 October 2019 19:00 satellite skyplot.

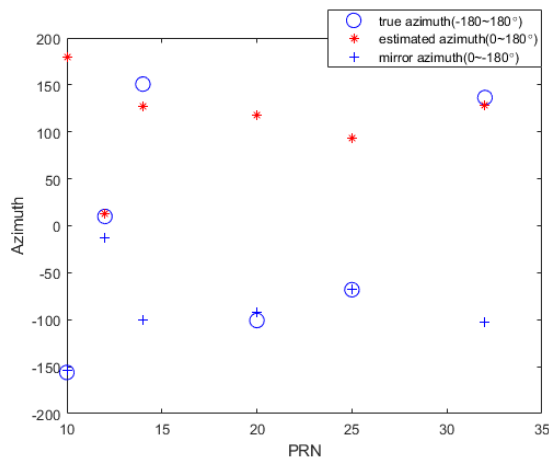


Fig. 11. Result of azimuth angle using dual-antenna receiver.

## 5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 2개의 안테나를 이용하는 수신기에서 GNSS 위성 신호의 방위각을 추정하는 기법을 제안하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 성능을 확인하였다. 해당 기법은 위성항법 기만 검출을 목적으로 제안된 것으로, 특정 방향에서 다수의 위성항법 기만신호를 방송하는 기만기와 다수의 방향에서 송출되는 위성신호를 구분하는데 사용할 수 있다. 2개의 안테나 이용 시에는 안테나 간 기저선을 기준으로 양쪽 방향에 대한 구분이 불가능한 한계가 있으나, 기만 검출의 용도로서는 추정 방위각을 기저선 기준으로 반전시켜 확인하는 교차 검증 방식으로 활용할 수 있음을 보였다. 제안된 기법은 항공기와 같이 복수의 안테나를 장착한 경우 그대로 사용될 수 있다.

본 논문에서는 실험 시 기만 신호를 송출하는데 한계가 있기 때문에 기만 공격 상황을 고려하지 않고, 정상상황에서 GPS위성의 방위각을 정상적으로 추정할 수 있는지를 1차적으로 확인하였다. 추후 연구로는 한반도에서 관측되는 GPS 위성들간의 최소 이격거리 및 이에 따른 고도각과 방위각 수준을 분석하여 입사각

Table 1. Error of azimuth angle using dual-antenna receiver.

PRN	Error mean	Error STD
10	-1.01	1.319
12	-2.395	0.382
14	22.687	0.918
20	-8.311	0.373
25	-0.786	0.36
32	7.454	0.348

추정 정확도를 해석하고, 기만 상황에서의 기만여부 판단을 고려한 연구를 진행할 계획이다. 또한 단일 안테나를 장착한 사용자를 고려하여 합성 안테나 방식의 기법으로 확장하고자 한다.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H. So and J. Ong; Algorithm simulation and performance analysis, J. Ong; writing and editing J. Ong.

## CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

## REFERENCES

- Bhatti, J. & Humphreys, T. E. 2017, Hostile control of ships via false GPS signals: demonstration and detection, *Navigation*, 64, 51-66
- Daneshmand, S., Jafarnia-Jahromi, A., Broumandon, A., & Lachapelle, G. 2012, A low-complexity GPS anti-spoofing method using a multi-antenna array, *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, 1233-1243 Sep 2012
- IFEN GmbH, SX3-The GNSS R&D SW receiver with API [Internet], cited 2019, available from: [http://www.ifen.com/fileadmin/documents/pdf/SX3/SX3\\_Mar2019.pdf](http://www.ifen.com/fileadmin/documents/pdf/SX3/SX3_Mar2019.pdf).
- Israel Defense, Iran develops two new UAV type from captured RQ-170 sentinel [Internet], cited 2016 Oct 5, available from: <https://www.israeldefense.co.il/en/content/iran-develops-two-new-uav-types-captured-rq-170-sentinel>.
- Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., Nielsen J., & Lachapelle, G. 2012, GPS vulnerability to spoofing threats and a review of antispoofing techniques, *International Journal of Navigation and Observation*, 2012, 1-16



- John, A. 2001, Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the global positioning system, Volpe National Transportation System Center
- Kerns, A. J., Shepard, D. P., Bhatti, J., & Humphreys, T. E. 2014, Unmanned aircraft capture and control via GPS spoofing, *Journal of Field Robotics*, 31, 617-636
- NewScientist, Ships fooled in GPS spoofing attack suggest russian cyberweapon [Internet], cited 2017 Aug 10, available from: <https://www.newscientist.com/article/2143499-ships-fooled-in-gps-spoofing-attack-suggest-russian-cyberweapon/>
- Pany, T., Falk, N., Riedl, B., Stöber, C., Winkel, J., et al. 2013, GNSS synthetic aperture processing with artificial antenna motion, *Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2013)*, Nashville, TN, Sep 16-20, 2013, pp. 3163-3171
- Psiaki, M. L. & Humphreys, T. E. 2016, GNSS spoofing and detection, *Proceedings of the IEEE*, 104, 1258-1270
- Wang, B., Li, Y., Shivaramaiah, N. C., & Akos, D. M. 2018, A low complexity GNSS array signal of arrival (AOA) estimation algorithm and validation, *ACES Journal*, 33, 1164-1170
- Younger, J. P. & Reid, I. M. 2017, Interferometer angle-of-arrival determination using precalculated phases, *Radio Science*, 52, 1058-1066



**Junho Ong** is M.S student in the Department of Weapon System Engineering at University of Science and Technology (UST) in Korea. He received B.S. degree from Hannam university in 2019. His research interests are GNSS receiver and anti-spoofing algorithm.



**Hyoungmin So** is senior researcher of Agency for Defense Development (ADD) in Korea, Republic of. He received the B.S. degree in mechanical engineering at Korea University. He received the M.S. and Ph.D. degree in aerospace engineering at Seoul National University (SNU). He worked in the field of GNSS and pseudolite receiver development including SDR and vector tracking loop algorithm in SNU GNSS laboratory. Since 2011, he's been working for ADD. His research interests are GNSS receiver, anti-jamming/spoofing algorithm, and WADGPS technologies.