

모노펄스 추적을 이용한 무인기 DoA 추정정밀도 향상 방안에 관한 연구

손으뜸효태* · 윤창배**

A Study on UAV DoA Estimation Accuracy Improvement using Monopulse Tracking

Eutum-Hyotae Son* · Chang-Bae Yoon**

요 약

비행체의 위치정보는 GPS 교란과 같은 위협성에 노출될 수 있기 때문에 위치를 추정하기 위해 관성항법장치와 같은 여러 연구가 수행되고 있다. DoA(Direction of Arrival) 및 RTT(Round Trip Time)을 이용한 위치추정 기법은 레이더시스템에 적용되어 비행체의 위치를 추정하는데 사용되고 있으며 무인기 데이터링크에 적용 가능하다. 무인기 데이터링크는 넓은 대역폭을 사용하기 때문에 다중혼 방식의 합·차패턴 생성 방식을 주로 사용하며 탑재체의 제한된 송신출력으로 낮은 SNR 영역을 포함하여 추적을 수행한다. 일반적으로 낮은 SNR에서 위치 추정오차는 증가하며 높은 SNR에서 부엽을 제한하지 못하면 추정된 DoA의 유효성이 상실된다. 본 논문에서는 부엽을 제한하고 낮은 SNR에서 증가하는 DoA 추정오차를 보정하기 위한 방안을 제시한다.

ABSTRACT

Various studies such as INS(Inertial Navigation System) are conducting to estimate the position of UAV, because the GPS information of UAV is at risk like the GPS jamming. The position estimation using DoA and RTT are used to apply many radar systems, and that process can be applied in datalink of UAV. The general monopulse feed in UAV datalink is Multi-horn, because of the wide BW(Band Width) and frequency range. And it needs wide SNR range of tracking because of the limited transmit power of airborne unit. The estimation error of position increase at low SNR, and the DoA is valid in only 3dB beam width but high SNR causes false of mainlobe detection because of large sidelobe. In this paper, We propose the method to achieve higher accuracy of DoA estimation on low SNR and review some idea that able to detect mainlobe.

키워드

UAV, Data-link, DoA Estimation, Mainlobe Detection, Monopulse Tracking
무인기, 데이터 링크, DoA 추정, 주엽 탐지, 모노펄스 추적

1. 서 론

무인기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)의 복합항법장치는 다양한 센서정보를 종합하고 위치 및 자세

를 측정하여 비행제어 및 임무정보에 활용한다. 무인기 데이터링크 시스템에서 위치정보가 제공할 수 있다면, 관성항법장치(Inertial Navigation System, INS) 오차를 보정하거나 전파기만(spoofing), 항법방해

* 교신저자 : 한화시스템(tai0912.son@hanwha.com)

** 한화시스템(changbae.yoon@hanwha.com)

· 접수일 : 2017. 11. 10

· 수정완료일 : 2017. 11. 27

· 게재확정일 : 2017. 12. 15

· Received : Nov 10, 2017, Revised : Nov 27, 2017, Accepted : Dec 15, 2017

· Corresponding Author : Eutum-Hyotae Son

Hanwha Systems Co., Ltd.

Email : tai0912.son@hanwha.com

(meaconing)와 같은 GPS(: Global Positioning System) 교란을 감지하는데 활용할 수 있다. 복합항법장치는 획득된 데이터의 통계적 특성을 기반으로 위치보정을 위한 확장형 칼만필터 등을 적용하여 정확한 위치를 추정할 수 있게 된다[1-5].

무인기 데이터링크 시스템에서 제공할 수 있는 센서정보는 RTT(: Round Trip Time)과 DoA(: Direction of Arrival) 정보로써 각 정보의 정확도가 GPS와 비교하여 상대적으로 매우 떨어진다. RTT는 송수신단의 클럭오차 및 클럭주파수에 따른 오차가 존재하며 DoA는 SNR에 따른 추적 Distortion, 지상 안테나의 자세오차, 페이딩에 의한 Distortion, 데이터의 시간오차, 각도센서의 양자화오차 등 SEP(: Spherical Error Probability)를 증가시킬 수 있는 요소가 존재하며 0.1°의 오차만으로도 100km에서 175m의 오차를 발생시켜 GPS의 오차를 크게 상회한다.

본 논문에서는 레이더시스템에 활용되고 있는 모노펄스 추적기법을 기반으로 다양한 측면의 센서오차를 분석하고, 이를 개선하기 위한 방안을 제시한다. 본론의 1절에서는 RTT 및 DoA 정보를 위치정보로 변환하는 이론적인 개념을 소개하고, 2절에서는 모노펄스를 통한 DoA 추정기법의 제한요소에 대해 설명한다. 3절에서는 낮은 SNR에서 DoA 추정정밀도 향상방안을 설명하고, 4절에서는 각도를 검출할 수 있는 한계 조건인 주엽을 탐지하기 위한 부엽제한 안테나를 가정하고 기준신호가 열잡음에 의해 검출되지 않을 때, 주엽을 탐지할 수 있는 조건에 대해서 분석한다. 5절에서 제안한 방안에 따라 왜곡성분이 제거됨을 실험을 통해 검증하고 향후 무인기 데이터링크의 발전방향을 제안하며 결론을 맺는다.

II. 본 론

2.1 RTT 및 DoA를 이용한 GPS 좌표변환

RTT와 DoA를 이용한 위치 추정은 구형좌표계에서 직교좌표계로 변환하는 것으로 시작한다. 식 (1)은 구형좌표계의 (R, θ, ϕ) 에서 직교좌표계 (X, Y, Z) 로 변환하기 위한 수식이며, R 은 RTT를 통해 변환되는 거리정보로 식 (2)에 대입하여 산출할 수 있다. 이때 처리 시간과 내부 지연요소와 같은 옵셋 정보를 사전에 측

정하거나 비행 중 유효한 GPS를 통한 거리정보와 비교하여 옵셋을 제거함으로써 상대적으로 높은 정확도를 달성할 수 있다[6].

$$X = R \sin \theta \cos \phi, Y = R \sin \theta \sin \phi, Z = R \cos \theta \quad (1)$$

$$R = C / RTT, C = \text{speed of light} \quad (2)$$

θ 는 진북기준의 방위각, ϕ 는 수평면 기준의 고각을 나타낸다. 실제 각도센서를 통해 검출된 각도는 진북과 수평면대비 각도센서가 장착된 자세오차 성분을 포함하고 있으며, 기울기 센서와 Dual-GPS 모듈을 통해 획득된 자세정보(Roll, Pitch, Yaw)를 Rotation Matrix에 대입하여 획득한다. 이렇게 획득된 정보의 정확성은 센서정밀도에 비례하며 추가적으로 비행체가 임무중 수집한 GPS 좌표와의 오차를 비교하여 좀더 정밀한 보정에 이용할 수 있다. GPS 좌표는 Geodetic 좌표계를 사용하며 비행체의 GPS 좌표를 산출하기 위해서 지상의 좌표를 ECEF 좌표계로 변환한 뒤 앞서 구한 벡터를 지상의 위도와 경도기준으로 회전변환하여 더한 뒤 다시 Geodetic 좌표계로 변환한다. Geodetic 좌표계에서 ECEF 좌표계 변환은 식 (3)을 통해 이루어진다[7].

$$X_{ecef} = (R_\theta + h) \cos \phi \cos \theta \quad (3)$$

$$Y_{ecef} = (R_\theta + h) \cos \phi \sin \theta$$

$$Z_{ecef} = ([1 - e^2] R_\theta + h) \sin \phi$$

$$e = \text{Eccentricity of Earth}$$

$$R_\theta = \text{SemiMinor Axis} / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}$$

$$\phi = \text{Latitude}$$

$$\theta = \text{Longitude}$$

$$h = \text{Altitude}$$

지구의 이심률과 단축의 길이는 WGS84(: World Geodetic System)를 참조하고 있으며, 그림 1은 식 (3)에 대한 도식이며 지구 타원체 모델을 설명하고 있다.

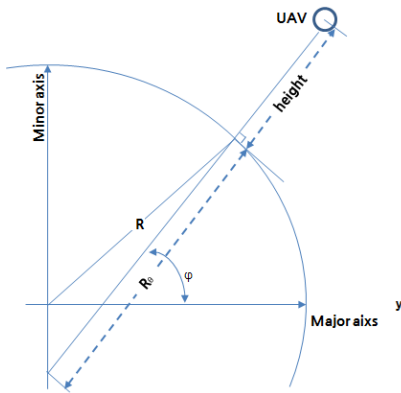


그림 1. Geodetic - ECEF 변환 개념도
Fig. 1 Geodetic - ECEF convert concept

2.2 모노펄스를 통한 DoA 추정기법의 제한요소

DoA를 추정하는 방식 중 가장 높은 정밀도와 처리속도를 가지는 방식은 Phased Array를 이용한 방식이다. 그러나 효율이 동일하다고 가정했을 때 SNR은 신호의 입사면적에 비례하며, DoA 추정오차는 SNR에 비례한다. Phased Array 안테나의 빔포밍 방식은 입사면적이 증가함에 따라 기하급수적으로 비용이 증가하고 구현 난이도 역시 비례하여 증가한다[8].

높은 주파수 대역에서 가장 효율적으로 유효입사면적을 증가시키는 방안은 반사판안테나의 형태이며 반사판안테나가 DoA를 추정할 때 필연적으로 발생하는 구동지연, 각도센서 양자화 오차 등은 합·차신호의 비율을 오차각도로 환산하는 모노펄스 방식을 통해 예측가능하다.

모노펄스 방식의 기본원리는 입사되는 신호의 합·차패턴을 생성하여 그 크기를 비교하는 원리이다. 합·차신호의 비율은 3dB 빔폭 내에서 비교적 선형적으로 증가하며 FNBW(: First Null Beam Width)에 도달하기까지 부호를 유지한다. 따라서 추적가능영역은 FNBW 범위로 합·차신호의 비율이 입사각 오차에 따라 증가하는 비율의 선형성이 깨지더라도 추적은 가능하며 산출오차각의 정밀도가 유지되는 구간은 3dB 빔폭 범위로 제한할 수 있다[9].

합·차패턴을 생성하기 위한 방식으로 다중모드 방식과 다중혼 방식을 사용할 수 있으며 다중모드 방식은 대역폭에 한계를 가지며 반사판 직경에 비해 이득의 손실이 있다. 더 넓은 범위에서 추적이 가능하고

부엽의 크기가 현저히 줄어드는 장점이 있으며 크기가 상대적으로 작기 때문에 소형화가 요구되는 시스템 또는 부엽의 크기가 민감하게 제한되어야 하는 시스템에서는 다중모드 방식을 사용한다. 다중혼 방식은 다중모드에 비해 더 넓은 대역폭과 상대적으로 높은 이득을 가지게 되므로 상대적으로 페데스탈의 규모가 큰 무인기 데이터링크에서는 다중혼 방식이 합리적인 선택이다[10].

다중혼 방식은 그림 2와 같이 각 급전혼의 안테나 이득패턴이 반사판 중심을 기준으로 교차된 형태로 표현한다. 어긋난 각 빔의 중심 간격이 커질수록 각각의 이득이 감소하고 교차지점에서의 이득패턴 기울기가 증가하므로 전체 이득이 떨어지며 차패턴이 증가하여 추적을 위해 요구되는 SNR이 작아진다. 또한 부엽의 크기가 이득이 감소하는 정도보다 빠르게 작아지므로 시스템을 설계할 때 반사판 및 급전혼의 설계가 사실상 위치추정 정밀도를 결정할 수 있다.

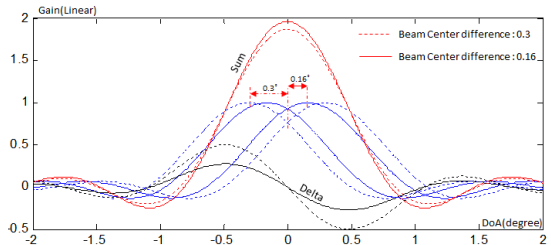


그림 2. 다중혼 방식 합·차패턴 개념도
Fig. 2 Multi-Horn method Sum/Delta concept

2.3 낮은 SNR에서의 DoA 추정정밀도 향상방안

모노펄스 추적은 즉각적으로 오차를 검출하고 처리지연이 작기 때문에 뛰어난 정밀도를 예상할 수 있다. 그러나 SNR이 감소함에 따라 가우시안 분포로 분산이 증가하는 Phased Array 방식에 비해 모노펄스 방식은 위상이 식별될 수 있는 범위 안에서만 측정된 오차각이 유효하므로 평균의 옅셋이 발생하는 형태로 오차가 증가한다. 예상되는 정밀도 안에서 평균을 취한다면 분산은 감소시킬 수 있지만 Bias는 감소하지 않는다. 이러한 경우에 위상의 검출이 확정적인 시점을 기준으로 고의오차를 발생시켜 추적하는 방식을 제안한다.

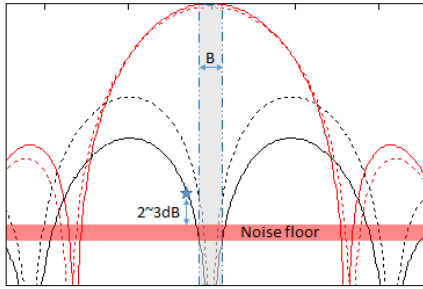


그림 3. 낮은 SNR의 DoA 추정 성능열화
Fig. 3 DoA estimation performance degradation of low SNR

그림 3에서와 같이 SNR이 작을 때 B영역에서는 추적오차를 검출할 수 없다. 위상이 검출되는 시점인 B영역의 임계점에서 추정된 오차각은 열잡음에 의해 왜곡되어 있으며 추적상태에서는 검출된 오차에 따라 즉각적으로 추적이 수행되어 추적오차 및 DoA추정 결과의 정확도를 저하시킨다. 추적 중 차신호의 크기가 열잡음 임계치에 도달했을 때 차신호가 열잡음보다 2~3dB 높은 지점을 추적하며 고의로 발생시킨 오차만큼을 제거하여 비행체 위치를 추정할 수 있다. SNR이 낮은 시점은 일반적으로 낮은 고각을 가지며 낮은 고각일수록 페이딩에 의해 SNR에 손해를 가져올 수 있기 때문에 발생시키는 고의오차는 고각방향으로 증가하도록 하는 것이 바람직하다.

2.4 부엽제한 안테나를 통한 주엽판단 기법

모노펄스 추적을 통한 위치추정기법은 어디까지나 3dB 빔폭 내에서 가능하다. 하지만 부엽에서의 합·차 패턴은 주엽의 패턴과 매우 유사한 형태를 가지고 있어 모노펄스 추적기에서 획득한 오차각의 유효성을 판단하기 어렵다. 이때 넓은 빔폭을 가지는 안테나(부엽제한 안테나)를 통해 주엽의 크기를 예측하는 방식을 사용할 수 있다.

넓은 빔폭의 안테나는 근거리 GPS추적에 활용할 수 있는 측면이 있지만 본 절에서는 부엽제한을 위한 안테나로써만 서술한다. 부엽제한 안테나의 수신신호 감도가 열잡음을 초과하여 수신된다면 우리는 안테나 이득차이를 알고 있으므로 손쉽게 주엽을 판단할 수 있다. 만일 부엽제한 안테나에서 수신된 신호에서 열잡음만이 감지된다면 주엽을 판단할 수 없다. 이득을

높이기 위해서 부엽제한 안테나의 빔폭을 줄인다면 부피가 크게 증가한다. 따라서 데이터링크 시스템의 규격을 충족하고, 운용성을 고려한 부엽제한 안테나의 이득 및 빔폭 규격을 선정하여 설계하여야 한다.

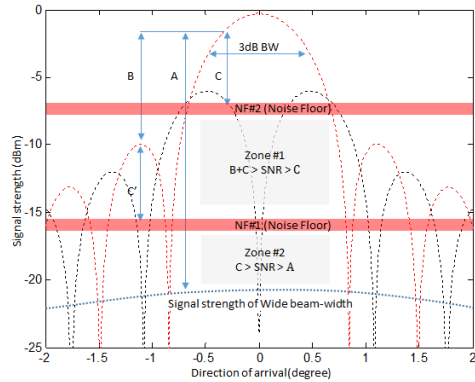


그림 4. 안테나 이득패턴 파라미터
Fig. 4 Antenna gain pattern parameter

그림 4의 A는 부엽제한 안테나와 주엽의 이득차이이고 B는 주엽과 부엽의 이득차이며, A와 B는 페이딩이나 탐색시간을 고려하여 적절한 마진을 설정해야 한다. C는 최소수신레벨에서의 SNR이며, 최소수신레벨에서의 합·차 신호비와 동일하다.

부엽제한 안테나에 수신되는 신호감도가 열잡음 (Noise Floor, NF)에 도달하기 전까지는 주엽은 $NF+A-B$ 보다 크다. 그러나 신호감도가 NF이하로 감소하게 되면 주엽은 $NF+C$ 보다는 크고 합·차 신호비가 C보다 크다는 조건만 성립하며, 그림 4의 Zone#2에서는 부엽에서도 주엽의 판단조건을 만족하게 된다. 따라서 부엽제한 안테나의 이득은 Zone#2가 존재하지 않도록 설계되어야 한다. 다만 주엽에서 추적중인 상태라면 일시적으로 주엽조건을 불만족 하더라도 실제로는 3dB 빔폭내에 존재할 것이다. 따라서 추적가능여부에 대해서는 히스테리시스 특성을 반영하여 추적 불가에서 가능으로 전환하기 위해서만 분석된 조건을 적용하고, 추적가능에서 불가로 전환시에는 3dB 빔폭 조건을 적용하여 임계점에서의 페이딩에 대비한다.

위 조건에 따라, 40dBi 안테나의 부엽이 26dBi이면서 최소수신레벨이 -83dBm , 열잡음이 -93dBm 일 경우 $B=14\text{dB}$, $C=10\text{dB}$ 이므로 A는 24dB 이하를 만족해야 한다. 추가적으로 부엽제한 안테나의 유효범위

는 열잡음에 따라 제약이 생기므로 NF를 낮추는 방식으로 부엽제한 안테나의 유효범위를 확장시킬 수 있으며, 감소한 열잡음만큼 부엽제한 안테나의 크기를 감소시킬 수 있다.

2.5 제안된 방안에 대한 결과분석

앞서 우리는 주엽탐지를 통해 유효성을 확보하고 넓은 수신신호 범위에서 정확한 DoA를 추정할 수 있는 방식을 제안하였다. 이를 검증하기 위해 기존 모노펄스 시스템에 혼안테나를 이용한 주엽탐지와 고의오차를 발생시킬 수 있도록 적용한 뒤 고의오차 적용 전·후의 결과를 비교하였다.

그림 5와 같이 주엽탐지 성능을 확인하기 위해 방위각은 10도, 고각은 2.5도 범위의 박스스캔 방식을 사용하고, 박스스캔 중 주엽을 탐지하게 되면 추적으로 전환되는 알고리즘을 적용하였다.

그림 6은 그림 5와 같은 시험을 각 SNR에서 20회씩 수행하여 SNR에 따른 주엽탐지 확률을 확인하였으며, SNR이 10dB에 도달할 때 까지 100% 확률로 주엽을 탐지함을 확인하였다.

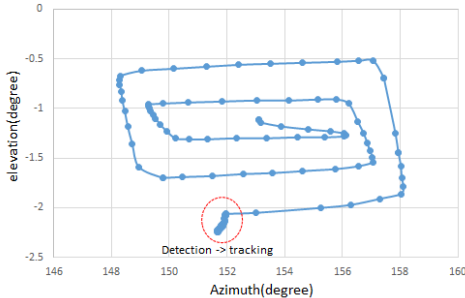


그림 5. 박스 스캔 방식의 주엽탐색 성능
Fig. 5 Mainlobe detection performance of box scan method

고의오차에 따른 DoA 추정 정밀도를 확인하기 위해 모션 시뮬레이터 위에서 신호원의 송신출력 세기를 조정하며 낮은 SNR에서 오차가 증가할 때 고의오차를 발생시켜 그 결과를 확인하였다. 고의오차 미적용 상태에서 열잡음에 의해 분산과 오차평균이 증가함을 그림 7에서 확인할 수 있으며, 고의오차 적용 시 분산이 줄어들고 평균이 0에 수렴함을 확인할 수 있다. 해당 결과는 함·차 신호비에 대한 오차각 비율

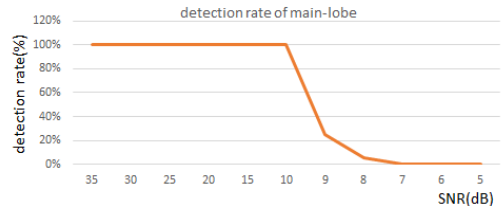


그림 6. SNR별 주엽탐색 확률
Fig. 6 SNR mainlobe detection probability

을 보정하여 정밀도를 높였으며 실제 사용 환경에서는 오차각 비율에 대한 보정오차가 포함될 수 있다.

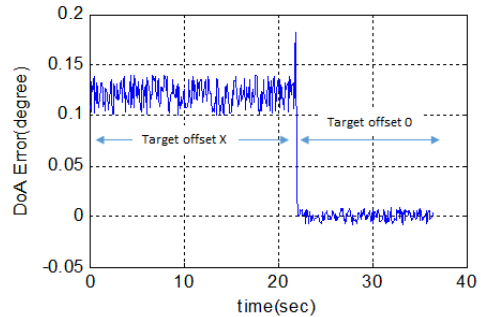


그림 7. 고의오차 적용에 따른 DoA 추정오차
Fig. 7 DoA estimation error according to intentional error application

III. 결론

전자전의 양상이 복잡해지고 비행체의 임무가 고도화되면서 무인기의 생존성에 대한 요구는 더욱 증대되고 있다. 무엇보다 무인기 생존성과 직결되며 이미 수차례 발생한 GPS 교란은 계속해서 다양한 방식으로 진화하고 있다. 그 근본적인 이유는 비행체에 장착된 GPS 수신기를 이용한다는 한계점을 가지기 때문이다. 지상데이터링크 장비를 이용한 위치추정 기법은 다수의 노드를 사용하지 않으며 안전이 보장된 위치에서 무인기의 위치를 추정하기 때문에 다소 떨어지는 정확도에도 불구하고 큰 활용성을 가진다. 우리는 무인기 데이터링크 시스템에 적용되는 모노펄스 추적 시스템에서 발생하는 한계점인 낮은 SNR과 높은 부엽문제를 해결하기 위한 방안들을 제안하였고, 실험을 통해 제안한 방안들이 주엽을 탐지하고 낮은 SNR에서 옯셋이 제거됨을 확인하였다. 이러한 방식은 소형

무인기시스템에서 탑재되는 안테나 및 신호증폭기의 규격이 충분하지 못하더라도 위치 추정오차를 일정범위 안에서 보장할 수 있게 해준다는 점에서 의미가 있다. 향후에는 안테나의 추적시스템이 앞서 이야기한 특성들을 기반으로 인공지능 알고리즘 적용을 통한 지능화 연구가 필요하며, 이를 통해 사용자의 개입을 최소화 하고 임무에 집중할 수 있는 시스템 연구를 목표로 한다.

References

- [1] M. S. Grewal, L. R. Weill, and A. P. Andrews, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, 2nd Ed.* Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [2] J. Kim and J. Lyou "Research on the Method of a Composite Navigation Algorithm Using Aircraft Recorder Data," *Int. J. of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 36, no. 5, 2008, pp. 462-471.
- [3] H. Yu, C. Kim, K. Yoo, Y. Lee, and H. Park, "An Attitude Error Estimation Performance Comparison of Tightly Coupled INS/GPS Navigation System using Different Measurements," *J. of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 14, no. 1, 2011, pp. 49-54.
- [4] S. Kumar and M. Suganthi, "Design of Accurate Navigation System by Integrating INS and GPS using Extended Kalman Filter," *Int. J. of Engineering Research & Technology*, vol. 4, issue 05, 2015, pp. 803-808.
- [5] K. Kim, "Analysis of Anti-Jamming Techniques for Satellite Navigation Systems," *Int. J. of Engineering Research & Technology*, vol. 38C, no. 12, 2013, pp. 1216-1227.
- [6] Y. Song and Y. Shin, "A Study on relative distance estimation for asynchronous FDD using Two-way ToA," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 12, 2016, pp. 1175-1186.
- [7] J. Park and G. Choi, "Overview of sensor fusion techniques for vehicle positioning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 2, 2016, pp. 139-144.
- [8] H. Kwon, Y. Lee, and J. Jung "A Study on 1-Channel Monopulse Receiver," *J. of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 51, no. 1, 2014, pp. 71-76.
- [9] J. Mun and S. Hwang, "Adaptive Beamforming System Architecture Based on AOA Estimator," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 5, no. 12, 2017, pp. 777-782.
- [10] B. M. Chotaliya, and S. Polara "The Comparison of Two Monopulse Tracking Systems: Four - Horn and Multimode," *Int. J. of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, no. 6, 2013, pp. 4059-4063.

저자 소개

손으뜸호태(Eutum-Hyotae Son)



2009년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)
2011년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사)

2011년 ~현재 한화시스템 선임연구원
※ 관심분야 : 데이터링크 시스템, 무선통신

윤창배(Chang-Bae Yoon)



1997년 한국해양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사)
2002년 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학석사)

2008년 ~현재 한화시스템 수석연구원
※ 관심분야 : 데이터링크 시스템