

# 초음파센서에 도플러 효과를 적용한 방위각 추정 연구

강경선\*, 이기림, 이상민  
국방기술품질원 지휘정찰센터

## Estimation of Azimuth Angle by Applying Doppler Effect to Ultrasonic Sensor

Gyeongseon Kang\*, Gi-Rim Lee, Sang-min Lee  
C4ISR Center, Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 일반적으로 초음파 센서는 주 로브의 크기가 타 센서에 비해 크다는 특징 때문에 한 빔 내에 여러 물체가 있을 때, 물체를 각각으로 구별하지 못해 단순하게 물체의 유무와 속도 및 거리 등을 측정하는 용도로 사용된다. 그러나 본 논문에서는 초음파 센서에 도플러 효과를 적용하여 각 물체가 가지는 도플러 주파수의 차이를 비교함으로써 한 빔 내에 여러 물체 각각의 방위각을 예측하고 구분하였다. 제안된 기술의 타당성을 검증하기 위해 한 빔 내에 다른 위치에 있는 2~3개의 목표물을 구분하는 실험을 하였고, 실험 결과 허용 오차범위에 해당하는 값을 추정하여 목표물의 위치와 개수를 구분할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 기술은 현재 초음파 센서로 연구되고 있는 국내외 연구 주제를 넘어 자동차 센서 및 차세대 IOT 모션 입력 장치의 상용화 등과 같은 여러 산업에 초기 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** According to a large body of work, ultrasonic sensors are used for simple measurements such as length and velocity measurement and object detection due to their larger main lobe compared to other sensors. However, distinguishing objects within a single beam is challenging. Nevertheless, ultrasonic sensors are more affordable than other sensor options. In this study, the Doppler effect was applied to ultrasonic sensors to predict the azimuth angle by comparing the difference in Doppler frequency of each object. Several experiments were conducted on the validity of the proposed technique. The experimental results indicated that it was possible to estimate the angle value within the desired tolerance. In conclusion, this research shows that an ultrasonic sensor can be used for the basic study of next-generation technologies such as sensor processing for autonomous vehicles and gesture recognition systems.

**Keywords** : Ultrasonic, Ultrasonic Sensor, Doppler Effect, Estimation of Azimuth, Sensor Processing

### 1. 서론

초음파는 음파의 주파수보다 높은 소리이고 음파는 인간의 가청 주파수인 20 ~ 20,000 Hz를 의미한다. 그러므로 초음파 센서는 인간의 가청 주파수인 약 20 kHz 이상의 주파수를 사용하여 소음이 발생하지 않는다는 장점

이 있고 비접촉식 방식으로 물체를 감지하거나, 거리와 속도 측정을 할 수 있어 의료, 자동화 시스템과 같은 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 초음파 센서는 주 로브의 빔 폭이 넓어 각도 분해능이 좋지 못하다는 단점이 있다. 대략 -6 dB를 기준으로 하였을 때, 45° 이상의 빔 패턴을 가지며, 한 빔 내에서 한 개 이상의 물체를 각

\*Corresponding Author : Gyeongseon Kang(C4ISR Center, Defense Agency for Technology and Quality)  
email: seonee0526@naver.com

Received May 31, 2023  
Accepted August 10, 2023

Revised June 26, 2023  
Published August 31, 2023

각의 물체로 구별할 수 없어 물체의 유무와 속도 및 거리 측정과 같이 단순한 목적으로 사용되고 있다.

본 연구를 통해 제안하고자 하는 방식은 레이더 신호 처리에서 주로 사용되는 도플러 효과를 초음파 센서에 적용하여 방위각 해상도를 높이는 것이다. 레이더 신호 처리와 초음파 신호처리는 본질적으로 같은 내용으로 볼 수 있다. 초음파 신호는 일반 음성신호와와는 다르게 Fraunhofer 거리인  $\frac{2D}{\lambda^2}$ 이 수 mm로 값이 매우 작고, 관측자로부터 멀리 떨어져 있으므로 평면파 근사가 가능한 원거리장(far-field) 조건을 만족하기 때문에 감쇄를 제외하면 레이더의 모든 이론을 그대로 적용할 수 있다. 본 논문에서는 제안하는 기술의 타당성을 검증하기 위해 몇 가지 실험을 하였고, 초음파 센서의 활용 분야를 넓힐 수 있는 기초 연구를 진행하였다.

초음파 센서에 도플러 효과를 적용한 대다수의 국내외 연구 주제는 의료분야에서 신체의 이상 증후를 판별하는 연구[1-4], 특정한 물체의 속력을 관측하여 상태를 판별하는 연구[5-10]이며 그 외에 음성 신호처리[11-13], 사물인터넷 기기 제어[14] 등과 같은 연구도 진행되고 있지만, 방위각 분해능을 높인 연구는 진행되고 있지 않고 있다.

## 2. 본론

### 2.1 도플러 효과를 적용한 초음파 센서의 각도 분해능 향상 원리

도플러 효과(doppler shift)는 빛을 방출하는 물체가 관측자를 기준으로 가까워지거나 멀어질 때, 실제 파장과 달라져 보이는 현상이다. 도플러 효과는 관측하고자 하는 대상의 움직임의 방향에 따라 주파수 편이가 양수 또는 음수로 정해진다.

수식을 정의하는 과정은 다음과 같다. 표적까지의 거리가  $R$ 이고, 송신파의 파장이  $\lambda$ 일 때, 송수신 양방향 전파 경로에서 전체 위상 변화는 Eq. (1)과 같다.

$$\phi = 2\pi \times \frac{2R}{\lambda} = 4\pi R/\lambda \quad (1)$$

관측자에 대해 표적이 상대적인 운동을 할 경우, 관측자와 표적 사이의 거리  $R$ 이 변하므로 Eq. (1)에서 보는 바와 같이 위상이 변하게 된다. Eq. (1)을 시간에 대해 미분하면 시간에 대한 위상 변화율, 즉 각주파수

(angular frequency)를 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다. Eq. (2)에서  $v_r$ 은 시선속도(radial velocity)이다.

$$w_d = \frac{d\phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} = \frac{4\pi v_r}{\lambda} = 2\pi f_d \quad (2)$$

도플러 주파수 편이  $f_d$ 는 Eq. (2)의 각주파수  $w_d$ 로부터 Eq. (3)이 된다.

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2f_0 v_r}{c} \quad (3)$$

본 논문에서는 관측자인 초음파센서가 고정되어 있고, 관측하고자 하는 물체만 움직이며, 2차원 공간에서 나타낼 수 있으므로 최종 사용되는 공식은 Eq. (4)와 같다.

$$f_d = 2f_0 v_r \cos(\theta)/c \quad (4)$$

Eq. (4)를 통해, 각도에 대한 도플러 주파수가 우함수 모양을 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 1은 목표물의 방위각에 따른 도플러 주파수의 변화를 나타내며 물체의 속력은 1 m/s이라고 가정하였다.

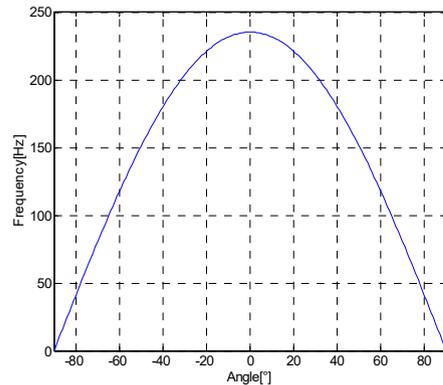


Fig. 1. Doppler frequency according to the azimuth of the target

또한, Eq. (4)에 의해 센서에서 보내는 전파의 속도, 주파수, 물체의 속력, 측정된 도플러 주파수로 방위각을 얻을 수 있다는 것을 Eq. (5)로 확인할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{f_d v_t}{2f_0 v_r} \right) \quad (5)$$

또한, 초음파의 속도는 주변 온도의 영향을 받으므로 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t = 331.5 + 0.6T \quad (T : \text{온도}(\text{°C})) \quad (6)$$

Fig. 2는 하나의 빔 내에서 도플러 주파수의 차이를 비교하여 목표물을 분해하는 원리를 도식화한 것이다.

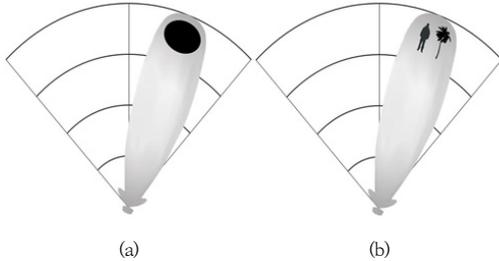


Fig. 2. Principle of target decomposition within single beam  
(a) The target is cannot be decomposed  
(b) The target is decomposed using the Doppler effect

Fig. 3은 자동차에 초음파 센서를 부착하여 목표물이 위치한 방향으로 움직이고, 두 개의 목표물이 초음파 센서의 빔 내에 도달하였을 때 도플러 주파수의 차이를 구별하는 원리를 나타내는 그림이다.

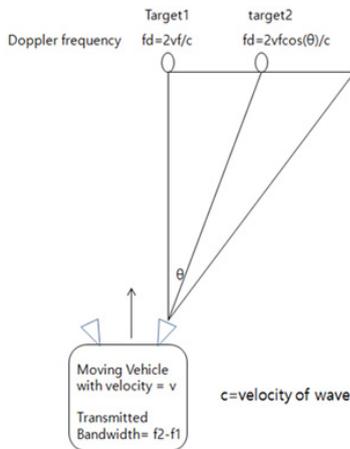


Fig. 3. Ultrasonic sensor with Doppler effect on a car

두 물체는 모두 정지한 상태이고 자동차가  $v$ 의 속력으로 일정하게 움직인다고 가정하였을 때, target 1의 도플러 주파수는  $2vf/v_r$  만큼의 편이가 생기므로 target 1과 target 2를 구별할 수 있다.

### 3. 검증

#### 3.1 실험

##### 3.1.1 실험 환경

실험에 사용된 초음파 센서는 송신부와 수신부가 함께 있고 구동 주파수는 40 kHz이다. 한 빔의 크기는  $-6dB$  기준으로  $100^\circ$ 의 크기를 가지며 각도의 범위는  $-50^\circ \sim 50^\circ$ 이다. 각도에 따른 도플러 주파수는 우함수 형태를 가지므로  $0^\circ \sim 50^\circ$  사이의 물체의 각도를 추정하였다.

물체 다가올 때, 센서로 신호를 받기 유리하기 때문에 본 실험에서는 물체가 센서의 방향으로 움직이는 상황의 신호를 받는 실험을 하였다. 물체가 2개일 때는 센서와 물체 사이에 이루는 각도가 [ $0^\circ$   $30^\circ$ ], [ $0^\circ$   $40^\circ$ ]에서 센서의 방향으로 5 cm 움직일 때 결과를 취득했고, 물체가 3개일 때는 [ $0^\circ$   $26^\circ$   $40^\circ$ ]의 각도에서 센서의 방향으로 7 cm 움직일 때 실험 결과를 취득하여 분석하였다.

초음파 센서와  $0^\circ$ 를 이루는 물체를 기준으로  $30^\circ$ 일 때는 23.2 cm 위치이고  $40^\circ$ 는 33.8 cm이다. 물체가 3개일 때는 19.5 cm, 33.8 cm이다.

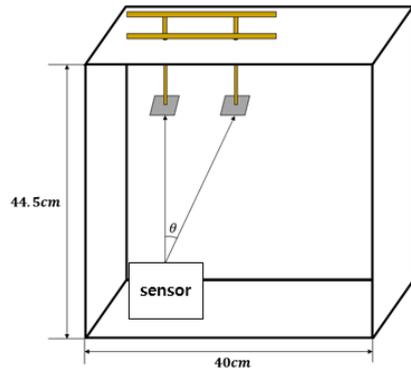


Fig. 4. Experiment environment

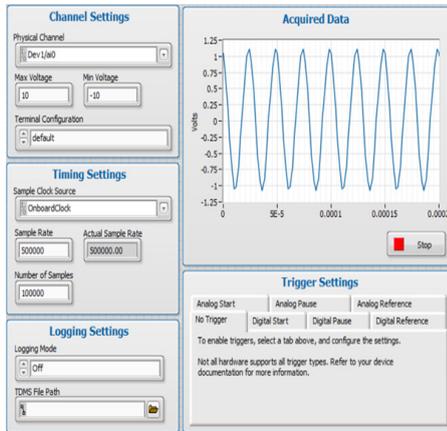
물체의 위치의 정확도를 위하여 Fig. 4와 같이 크기가  $40 \times 30 \times 44.5$  (cm)인 실험 상자를 만들어 실험하였다. 윗면에 각도를 고려하여 구멍을 뚫어 막대가 지나갈 수 있게 하였고, 막대 밑에  $2 \times 2$  (cm)크기의 사격형 목표물을 부착하여 측정하였다.

##### 3.1.2 도플러 주파수 분석

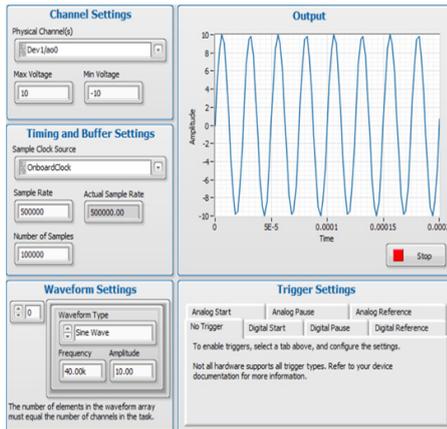
데이터 수집보드(data acquisition)를 이용하여 초음파센서의 구동 주파수인 40kHz의 사인파를 보내고 목표

물에 반사된 신호를 수집하여 실시간으로 데이터를 분석하였다.

Fig. 5는 실시간으로 초음파 센서에 인가하는 신호와 물체를 맞고 돌아오는 수신 신호를 나타낸 것이다. 보내는 신호와 받는 신호 모두 Sample Rate의 값이 500 kHz이고 데이터의 개수는 100,000개로 설정하여 5 Hz의 주파수 해상도 값으로 데이터를 취득하였다. 보내는 신호는 초음파 센서의 구동 주파수인 40 kHz의 10 V 신호를 생성하였다.



(a)



(b)

Fig. 5. Acquired signal using Data Acquisition  
(a) Received signal  
(b) Transmitted signal

그림 6은 센서로부터 받은 신호에 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 적용하여 도플러 주파수를 실시간으로 취득한 것이다. FFT를 적용한 결과 구동 주파수가 받는 신호에 비해 큰 값으로 취득되기 때문에 실제 물

체에서 측정되는 도플러 주파수 값과 혼동을 일으킬 수 있다. 그러므로 구동 주파수 부분의 값을 버터 워스 필터(butterworth filter) 설계를 통해 제거해주었다.

### 3.2 실험 결과

취득한 데이터의 피크(peak)의 개수가 물체의 개수에 따라 비례한다는 것을 확인하였다. 모든 물체는 같은 속력과 같은 방향으로 움직이므로 센서와의 각도가 0°인 물체의 도플러 주파수를 이용하여 물체의 속력을 구하였다. 실험 횟수는 한 방위각에 대한 실험 당 10 회이다.

물체와 센서의 거리가 가장 멀 때를 기준으로 물체가 2개 일 때 [0° 30°], [0° 40°]의 위치에 있는 물체의 도플러 주파수를 취득하였고, 물체가 3개일 때 [0° 26° 40°] 위치의 물체의 도플러 주파수를 취득하여 분석하였다. 물체와 센서의 거리가 가장 멀리 있을 때부터 가까이 있을 때까지 가지는 각도를 오차 범위로 설정하였다.

Fig. 6, 7, 8은 각 물체의 도플러 주파수를 나타내는 예시이고, Table 1, 2, 3은 실험 결과를 정리한 것이다.

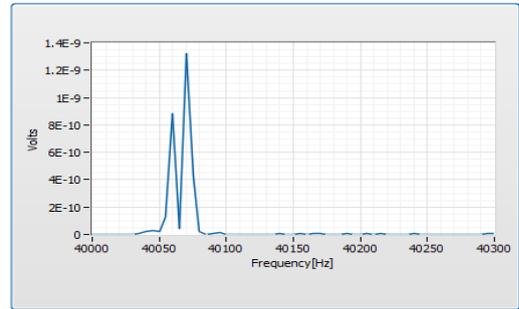


Fig. 6. Doppler frequency when object position [“0°” “30°”]

Table 1. Experiment result when the position of objects [“0°” “30°”]

Min	Max	1	2	3
30°	33.5°	31°	32.2°	31°
		4	5	6
		32.2°	32.2°	31°
		7	8	9
		31°	32.2°	31°
		10		
		31°		
Mean(Angle)		31.28°		
Mean(Velocity)		0.29m/s		

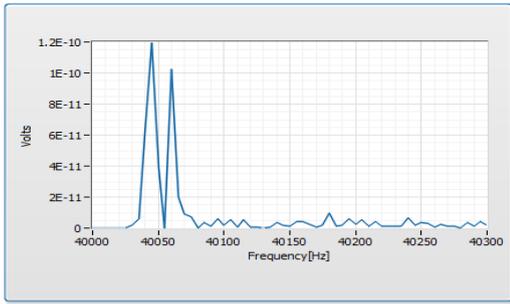


Fig. 7. Doppler frequency when object position ["0°" "40°"]

Table 2. Experiment result when the position of objects ["0°" "40°"]

Min	Max	1	2	3
40°	43.8°	41.4°	42.8°	41.4°
		4	5	6
		41.4°	41.4°	43.3°
		7	8	9
		41.4°	41.4°	41.4°
		10		
Mean(Angle)		41.73°		
Mean(Velocity)		0.26m/s		

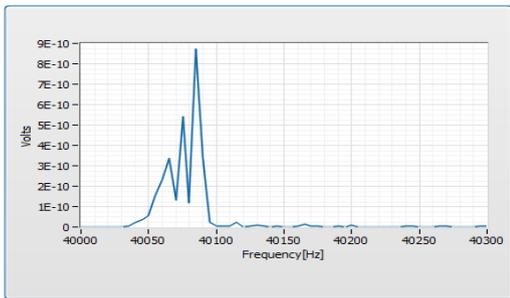


Fig. 8. Doppler frequency when object position ["0°" "26°" "40°"]

Table 3. Experiment result when the position of objects ["0°" "26°" "40°"]

Min	Max	1	2	3
26° 40°	30.4° 45.5°	28.9°	29.9°	28°
		41.4°	42.8°	45°
		4	5	6
		28°	28°	29.9°
		45°	45°	42.8°
		7	8	9
		28.9°	28°	29.9°
		41.4°	45°	42.8°
		10		
		28° 40°		
Mean(Angle)		28.75° 43.12°		
Mean(Velocity)		0.35m/s		

취득한 데이터를 분석한 결과, 오차 범위 안의 값이 취득되었고 물체의 개수와 피크 값의 개수가 비례함을 확인하였다. 실험 결과를 통해 초음파의 한 빔 내에 여러 물체가 있을 때 도플러 편이 현상을 이용하여 물체를 구분하고 방위각을 추정하는 것이 가능하다는 것을 검증하였다.

#### 4. 결론

초음파 센서는 타 센서에 비해 가격이 저렴하고, 빛의 영향을 받지 않는다는 장점이 있지만, 각도 분해능이 좋지 못해 물체의 유무와 속도 및 길이 측정과 같은 단순한 목적으로 사용되고 있다. 본 연구는 초음파 센서에 도플러 효과를 적용하여 하나의 빔 안에서 각도 분해능을 높였다. 검증과정을 통해 본 연구의 타당성을 입증하였고, 검증 결과에 따라 물체의 개수와 각도를 추정하는 것이 가능하다는 것을 보여준다. 본 연구를 통해 자동차 센서 및 차세대 IOT 모션 입력 장치의 상용화의 초기 연구로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] M. Nakamura, T. Ishikawa, S. Kobashi, K. Kuramoto and Y. Hata, "Blood flow detection under skull by Doppler effect," 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Anchorage, AK, USA, 2011, pp. 758-763.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083743>
- [2] HS Kim, KS Kim, TY Kim, JS Cho, YW Park, CH Song. 1997, "Clinical Efficacy of Doppler Ultrasound for Low Dose Aspirin Therapy in High Risk Pregnancy" Obstetrics & Gynecology Science VOL.40 NO.1 :71-77.
- [3] BJ Kwon, JH Kwon, WJ Kim. 2015, "Usefulness of Transcranial Doppler Sonography for Determining Brain Death" J Korean Neurol Assoc VOL.33 NO.2 :119-121.  
DOI: <https://doi.org/10.17340/jkna.2015.2.11>
- [4] S. Ricci, D. Vilkomerson, R. Matera and P. Tortoli, "Accurate blood peak velocity estimation using spectral models and vector doppler," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 62, no. 4, pp. 686-696, April 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2015.006982>
- [5] CJ Lee, DG Kim, JH Lee, W Kim. 2011, "Development of an Acoustic Velocity Profiler by Using Pulse Repetition Frequency Technique" Journal of Korea Water Resources Association VOL.44 NO.9 :731-740.

DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.9.731>

- [6] HJ You, DS Kim. 2017, "Development of an anisotropic spatial interpolation method for velocity in meandering river channel" Journal of Korea Water Resources Association VOL.50 NO.7 :455-465.  
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2017.50.7.455>
- [7] S. Sudtana, K. Prompak, S. Suphramit, N. Sisuk, S. Boonjun and P. Wardkein, "Velocity Detection by Ultrasonic Doppler based on Multi-Time Technique Analysis," 2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Pattaya, Thailand, 2019, pp. 207-210.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON47248.2019.8955362>
- [8] M. Lobur and Y. Darnobyt, "Car speed measurement based on ultrasonic Doppler's ground speed sensors," 2011 11th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Polyana, Ukraine, 2011, pp. 392-393.
- [9] S. Shin and S. B. Choi, "Target Speed Sensing Technique using Dilation Correlation of Ultrasonic Signal for Vehicle," 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Sophia Antipolis, France, 2019, pp. 1-5.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706036>
- [10] D. Vilkomerson, S. Ricci and P. Tortoli, "Finding the peak velocity in a flow from its doppler spectrum," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 60, no. 10, pp. 2079-2088, Oct. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2013.2798>
- [11] V. Kumar et al., "Unambiguous Identification and Visualization of an Acoustically Active Catheter by Ultrasound Imaging in Real Time: Theory, Algorithm, and Phantom Experiments," in IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 65, no. 7, pp. 1468-1475, July 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TBME.2017.2749245>
- [12] KS Lee, 2016, "Speech synthesis using acoustic Doppler signal" The Journal of the Acoustical Society of Korea VOL.35 NO.2 :134-142.  
DOI: <https://doi.org/10.7776/ASK.2016.35.2.134>
- [13] KS Lee, 2016, "Automatic speech recognition using acoustic doppler signal" The Journal of the Acoustical Society of Korea VOL.35 NO.1 :74-82.  
DOI: <https://doi.org/10.7776/ASK.2016.35.1.074>
- [14] SM Yang, WJ Song, IS Choi, SJ Yoo.(2017). Implementation of Deep Learning-Based Motion Classification System for IoT Device Control in Ultrasonic Sound Environments.The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences,42(9),1796-1805.  
DOI: <https://doi.org/10.7840/kics.2017.42.9.1796>

---

강 경 선(Gyeongseon Kang)

[정회원]



- 2020년 8월 : 경상대학교 전자공학 (전자공학석사)
- 2022년 1월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

레이더 신호처리, 레이더 장비

---

이 기 림(Gi-Rim Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 경상대학교 반도체공학 (반도체공학학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 경북대학교 산업대학원 산업공학 (정보통신공학석사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원

<관심분야>

레이더 장비, 신뢰성

---

이 상 민(Sang-min Lee)

[정회원]



- 2013년 2월 : 포항공과대학교 기계공학 (기계공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

레이더 장비, 신뢰성