THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2022 November.; 33(11), 886～892.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2022.33.11.886
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

94 GHz 수신 4채널, 송신 1채널 FMCW 레이다 시스템

94 GHz 4 Rx, 1 Tx FMCW Radar System

김은빈 · 김승연 · 박재현 · 유태우* · 남상욱* · 김병성

Eun-Bin Kim · Seung-Yeon Kim · Jae-Hyun Park · Taewoo Yu* · Sangwook Nam* · Byung-Sung Kim

요 약

본 논문에서는 무인이동체의 자율주행시스템을 위한 94 GHz FMCW 레이다 시스템을 제안한다. 시스템 제작에 사용한 94 GHz 송수신칩은 65 nm CMOS 공정을 통해 제작되었으며, 측정한 송신전력은 9.77 dBm, 수신칩의 변환이득은 26 dB, 잡음 지수는 시뮬레이션 결과 8 dB로 추정된다. 수신칩은 4채널을 내장하고 있으며, 시스템은 2×2 배열로 2채널은 방위각, 3채널은 앙각 측정에 사용하였다. 송수신 안테나는 마이크로스트립 패치 안테나로 제작하였고, 안테나 이득은 각각 시뮬레이션상 약 11 dBi이다. 처프 시간은 50 μs이며, 데이터 수집 보드에서 기저대역 신호에 26 dB의 이득을 주면서 필터링한 후 14 bit ADC로 50 MSPS 속도로 샘플링하였다. ADC의 출력은 FPGA를 통해 데이터를 수집하여 FFT 기반의 알고리즘으로 물체의 거리와 각도 정보를 획득하였다. 실험을 통해 본 시스템의 하드웨어와 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

Abstract

This paper describes a 94 GHz FMCW radar system for unmanned vehicles using 94 GHz 1 Tx and 4 RX chips designed in a 65-nm CMOS process. The measured output power of the transmitter and the conversion gain of the receiver were 9.77 dBm and 26 dB, respectively. The simulated noise figure of the receiver chip was 8 dB. The Tx and Rx antennas were microstrip patch antennas with a gain of 11 dBi on a Duroid substrate. The chirp period of the sawtooth FMCW waveform was 50 μs. The baseband signal was bandpass-filtered with a passband gain of 26 dB and sampled at a rate of 50 MSPS with a 14-bit ADC. The output of the ADC was acquired using an FPGA. The distance and angle information of the target were calculated using the FFT-based algorithm. The processed results closely matched the calculated results based on the specifications of TRx chips and processing gain, which confirmed the validity of the developed radar system.

Key words: FMCW Radar, 94 GHz, DoA Algorithm

Ⅰ. 서 론

최근 무인 이동체를 자율주행화하는 기술이 개발되고

「본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동체원천기술개발사업을 통해 수행되었음(2020M3C1C1A01084573).」

「이 연구는 삼성전자(Samsung Electronics Co., Ltd)의 지원으로 수행한 연구 결과입니다.」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*서울대학교 전기정보공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University)

· Manuscript received September 19, 2022 ; Revised September 28, 2022 ; Accepted October 6, 2022. (ID No. 20220929-075)

· Corresponding Author: Byung Sung Kim (e-mail: bskimice@skku.edu)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 자율주행시스템에 주로 사용되는 센서에는 카메라, 레이다, 라이다 센서가 있다. 카메라와 라이다는 고해상도를 제공하지만 악천후에 취약하다. 레이다는 앞서 설명한 두 가지 센서에 비해 해상도는 낮지만 악천후에서도 안정적으로 동작하기 때문에, 카메라와 상호 보완적으로 사용되고 있다[1],[2].

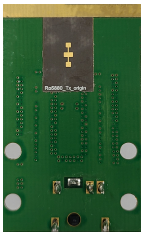
본 논문에서는 본 연구진이 CMOS 공정으로 개발한 레이다 트랜시버 IC를 사용하여 제작한 송수신 모듈과 기저대역 신호를 처리하는 데이터 수집 보드를 결합한 FMCW 레이다 시스템을 제안한다. 아울러, 다채널 수신기를 이용하여 물체의 거리 및 각도 정보를 획득한 결과를 제시한다.

본 논문의 Ⅱ장에서는 레이다 송수신 모듈, Ⅲ장에서는 기저대역 데이터 수집 보드의 구조에 대해 설명하고 Ⅳ장에서는 안테나 배열 및 신호처리 알고리즘에 대해 서술한다. Ⅴ장에서는 측정 결과를, 마지막으로 Ⅵ장에서는 결론을 제시한다.

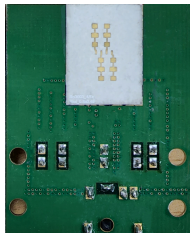
Ⅱ. 레이다 송수신 모듈

그림 1은 1채널 송신 모듈과 4채널 수신 모듈의 사진이다. 설계한 칩의 단일 채널 수신기 및 송신기 구조는 기발표한 77 GHz 레이다 송수신 칩과 유사하다[3]. 송수신 모듈 내부에 패키징된 칩은 그림 2와 같다. 개발한 송수신칩은 칩상 안테나 급전기를 내장하여 복잡한 mm파 패키징 작업 없이 간단하게 94 GHz 송수신 모듈 제작이 가능하다.

그림 2는 송신칩 및 수신칩 사진이다. 송신기는 주파수 63 체배기 및 전력 증폭기로 구성되며, 수신기는 주파수

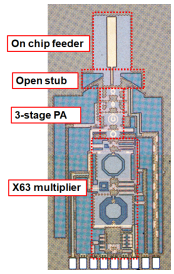


(a) 94 GHz 송신모듈
(a) 94 GHz transmitter board

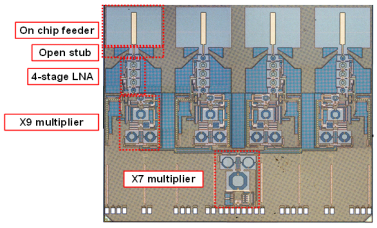


(b) 94 GHz 수신모듈
(b) 94 GHz receiver board

그림 1. 94 GHz 송수신 모듈
Fig. 1. 94 GHz TRX module.



(a) 94 GHz 송신칩
(a) 94 GHz TX chip



(b) 94 GHz 수신칩
(b) 94 GHz RX chip

그림 2. 94 GHz 송수신칩
Fig. 2. 94 GHz TRX chip.

63 체배기, 저잡음 증폭기, 혼합기, 트랜스임피던스 증폭기로 구성된다. 주파수 63 체배기는 7 체배기 한 단과 3 체배기 두 단으로 구성된다. 7단 주입-잠금형 링 발진기에서 7개의 동일한 위상 차이를 가지는 신호를 만들고, 7-푸쉬 가산기를 통해 7차 고조파 성분을 얻는다. 3 체배기는 서브 하모닉 믹서를 기반으로 한다. 주파수 2 체배단을 분리하여 추가적인 위상차이를 만들어 내는 방식을 이용해 직교 신호 생성단이 요구되는 기존의 서브 하모닉 믹서 기반 주파수 3 체배기의 단점을 보완하였다. 전력 증폭기와 저잡음 증폭기는 차동 공통 소스 구조를 사용하였으며, 혼합기는 선형성과 노이즈, 전력소모에 강점이 있는 수동 구조를 사용하였다. 측정된 송신기의 출력 전력은 94.5 GHz에서 9.77 dBm이며, 소모 전력은 177.6 mW이다. 수신기의 변환 이득은 94.5 GHz에서 26 dB이다. 수신기의 전체 잡음 지수는 시뮬레이션 결과 1 MHz IF 주파수에서 8 dB이며, 4 채널 수신기의 전체 소모 전력은 480 mW이다.

본 논문의 시스템에서는 DDS에서 만들어진 기준 신호 1.5 GHz~1.525 GHz의 톱니파가 칩 내부의 63 체배기를

거쳐 94.5 GHz ~96.075 GHz가 되어, 칩상 안테나 급전기와 안테나의 슬롯 도파관을 통해 안테나로 급전되어 방사한다. 송신 모듈은 가로 27 mm, 세로 42 mm이고, 수신 모듈은 가로 36 mm, 세로 46 mm이며, 무게는 각각 8 g과 11 g이다.

Ⅲ. 기저대역 데이터 수집 보드

기저대역 데이터 수집 보드는 LO 신호공급부와 데이터수집부로 나뉜다. LO 신호공급부는 처프 신호를 생성하는 AD9915 DDS로 구성되어 있으며, DDS는 1.5 GHz에서 1.525 GHz까지 총 25 MHz를 50 μs 주기로 변조한다. DDS의 최대 출력 주파수는 위의 주파수를 출력할 수 없기 때문에 DDS 출력 파형의 2차 고조파 성분을 이용해 원하는 주파수 파형을 생성하였다. 수신칩에서 하향 변환된 표적 신호는 연산 증폭기로 구성된 증폭기 및 필터를 통해 26 dB의 추가 이득을 갖고 ADC3442 14 bit ADC 로 입력되며, 50 MSPS로 샘플링되어 Ultra96 FPGA에 수집된다[4]. 그림 3은 송수신 모듈과 기저대역 데이터 수집 보드를 결합한 전체 구조도를 나타낸다.

Ⅳ. 안테나 배열 및 신호처리 알고리즘

4-1 송신 안테나

그림 4는 송신안테나 빔 패턴의 시뮬레이션 결과이다. 송신 안테나는 Rogers 5880 5 mil 기판에 제작되었고, 송신칩의 급전기에서 안테나의 중앙으로 급전하는 방식으로 설계되었다. 안테나의 빔 조향각은 수평 60°, 수직 30°를 만족하고 안테나 이득은 시뮬레이션상으로 11.54 dBi이며, 안테나의 대역폭은 약 3.3 GHz이다.

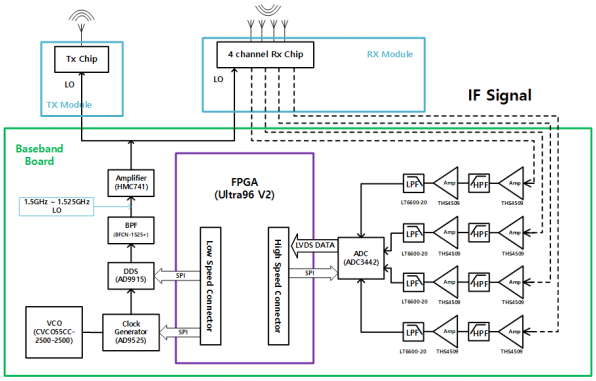
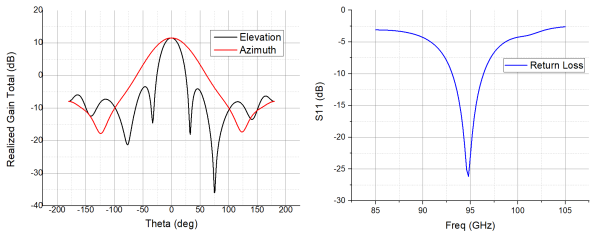


그림 3. 94 GHz 레이다 시스템 구조도
Fig. 3. 94 GHz radar system diagram.



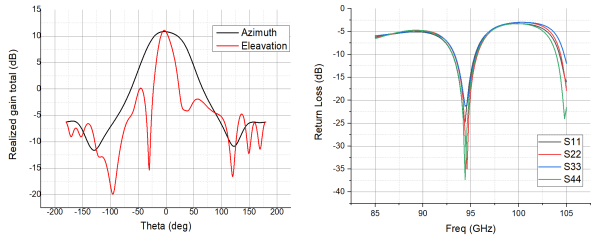
(a) 송신 안테나 방사패턴 (b) 송신 안테나 반사손실
(a) TX antenna radiation pattern (b) TX antenna return loss

그림 4. 송신 안테나 특성
Fig. 4. Characteristics of TX antenna.

4-2 수신 안테나

그림 5는 수신안테나 빔 패턴의 시뮬레이션 결과이다. 수신 안테나는 Rogers 3003 5 mil 기판에 제작되었고, 4채널 수신칩의 칩상 급전기에서 안테나 끝으로 급전하는 방식으로 설계되었다. 수신 안테나의 빔 조향각은 수평 66°, 수직 22°를 만족하고, 안테나 이득은 시뮬레이션상으로 11.24 dBi이며, 대역폭은 약 2.6 GHz이다.

그림 6(a)는 수신부 4채널의 안테나 배열을 도식화한 것이다. 수신 안테나는 좌우상하 2×2 배열로 되어 있어 방위각 방향과 앙각 방향 모두 도래각 추정을 할 수 있다. ①번과 ③번 채널, ②번과 ④번 채널은 좌우 방향으로 각각 0.75 λ 간격으로 배치되어 있다. 또한 ①번 채널과 ②번 채널, ③번과 ④번 채널은 phase center 기준 1.5 λ 간



(a) 수신 안테나 방사패턴 (b) 수신 안테나 반사손실
(a) RX antenna radiation pattern (b) RX antenna return loss

그림 5. 수신 안테나 특성
Fig. 5. Characteristics of RX antenna.

격으로 배치되어 있다.

이 구조에 따라 ①번 채널을 기준으로 ①번과 ③번 채널 정보로 방위각을 추정하였다. 앙각을 추정하려면 ①번과 ②번 채널 정보를 사용해야 하는데, 이 두 채널 사이에 방위각과 앙각에 따른 위상 변화가 동시에 발생한다. 앙각 정보만 얻기 위해 그림 6(b)와 같이 ①번과 ③번 채널 중앙에 위치하면서 ②번 채널과 방위각 방향으로는 동상이 되는 가상 배열을 만들었다.

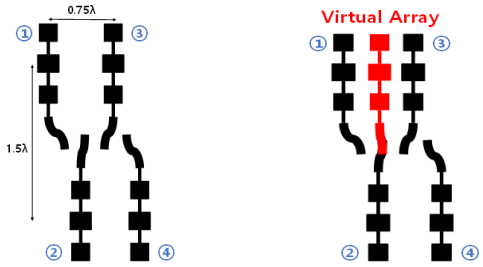
$$s_1 = A_1 e^{j\omega_1},\ s_2 = A_2 e^{j\omega_2},\ s_3 = A_3 e^{j\omega_3},\ s_4 = A_4 e^{j\omega_4} \quad (1)$$

$$s_{13} = A_{13} e^{j\omega_{13}} = \left(\frac{A_1 + A_3}{2}\right) e^{j\left(\frac{\omega_1+\omega_3}{2}\right)} \quad (2)$$

각 채널 신호의 크기와 위상은 식 (1)처럼 표현될 수 있다. A_1, A_2, A_3, A_4는 각 신호의 크기를, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$는 위상을 나타낸다. 가상 안테나 신호를 s_{13}이라고 하면 이 신호의 크기와 위상은 ①번과 ③번 채널 신호의 중간값이라고 가정할 수 있다. 따라서 s_{13}은 식 (2)로 나타난다.

4-3 신호처리 알고리즘

도래각 추정 알고리즘은 FFT를 기반으로 구현했다. 먼저 FPGA를 통해 수집한 ADC 출력 데이터를 1D FFT하여 신호의 크기 및 위상을 구한 후 하드웨어 설계상 생기는 위상 차이를 보완해준다. 다음으로 CFAR 알고리즘으로 표적에 해당하는 인덱스를 구한 뒤 식 (2)로 가상 안테나 배열 신호 s_{13}을 만들어 도래각 추정을 위해 FFT를 한 번 더 수행한다.



(a) 94 GHz 수신 안테나 구조도
(a) 94 GHz RX antenna array

(b) 94 GHz 가상 안테나 배열이 생성된 수신 안테나 구조도
(b) 94 GHz RX antenna array with virtual array

그림 6. 94 GHz 수신 안테나 배열
Fig. 6. 94 GHz RX antenna array.

Ⅴ. 측정 결과

완성된 송수신모듈과 데이터 수집 보드를 이용해 실제 목표물을 두고 측정을 진행하였다. 목표물은 15 m^2(11.7 dBsm)의 RCS를 갖는 코너 리플렉터로 선정하였고 레이다 시스템으로부터 약 4.6 m 떨어진 지점에 위치시켰다. 그림 7은 측정 환경을 나타낸다.

레이다 시스템의 변수들은 표 1과 같다. ADC 샘플링 포인트는 한 처프당 2,500개이며, 이 중 452개 포인트를

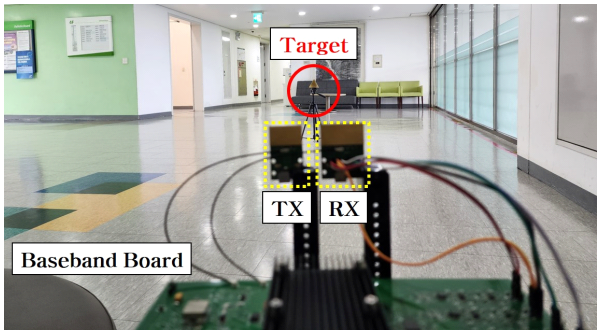


그림 7. 측정 환경
Fig. 7. Measurement environment.

표 1. 레이다 시스템 파라미터
Table 1. Radar system parameter.

P_t	9 dBm
G_t	10 dBi
G_r	10 dBi
Target RCS	15 m^2
Rx conversion gain	26 dB
Baseband amp gain	24 dB
Chirp bandwidth	1.575 GHz
Chirp period time	50 μs
ADC sampling rate	50 MHz
IF bandwidth	25 MHz
Sampling point	2,500
Range resolution	10 cm

잘라내고, 2,048개로 알고리즘을 수행한다. 한 프레임당 12개의 처프를 수집했고, 그림 8은 채널별로 12개 처프를 1D FFT한 뒤 4채널 결과를 평균을 취하여 나타낸 것이다. 레이다 시스템 검증을 위해 정지 표적을 측정하였기 때문에 표적 신호 외에도 벽 등 다수의 클러터 신호가 존재한다. 여러 신호 중 표적 위치에 해당하는 4.6 m에 해당하는 주파수 성분이 나타나는 것을 확인했다.

CFAR 알고리즘을 통해 선정된 인덱스에 도래각 추정 알고리즘을 적용한 결과는 그림 9와 같다. 표적 외에도 다수의 표적이 인식되었으나, 이러한 정지 표적은 향후 Doppler 프로세싱을 통해 제거 가능하므로, DoA 알고리즘의 검증을 위해 표적만 이동해 가며 DoA값을 추정하였다. 그림 9(a)는 방위각, 그림 9(b)는 앙각 그래프이며, 4.6 m에 위치한 표적 각도 정보를 확인할 수 있다. 이 상황을

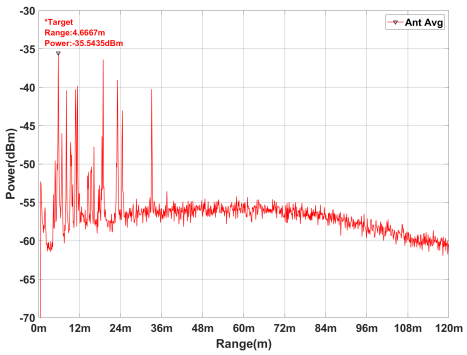
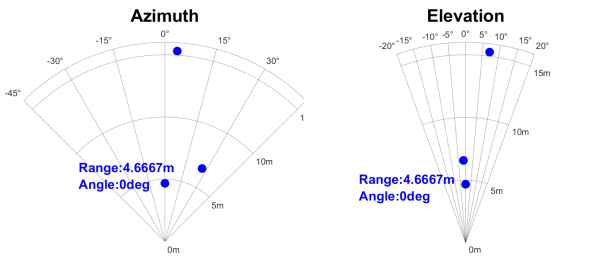


그림 8. 1D FFT 결과
Fig. 8. 1D FFT result.



(a) 중앙에 위치한 표적 방위각 탐지 결과 (b) 중앙에 위치한 표적 앙각 탐지 결과
(a) Azimuth DoA result of the target located at the center (b) Elevation DoA result of the target located at the center

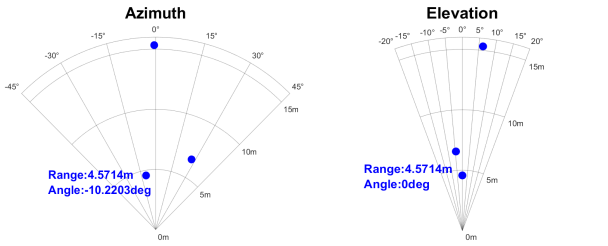
그림 9. 중앙에 위치한 타겟의 도래각 추정 결과
Fig. 9. DoA Result of the target located at the center.

표적이 방위각 방향으로 0°, 앙각 방향으로 0°에 위치해 있다고 보고 위상 보상을 진행하였다.

위와 같은 상황에서 표적을 왼쪽으로 약 10°, 오른쪽으로 약 8°씩 차례로 움직여 도래각 추정 알고리즘을 적용시켜 보았고 도출된 각도는 실제 위치와 유사하며, 결과값을 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

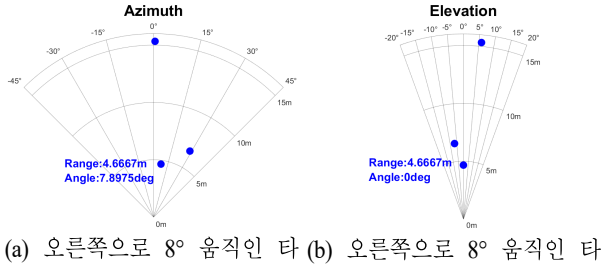
Ⅵ. 결 론

본 논문은 65 nm CMOS 공정을 통해 제작된 트랜시버 칩을 사용하여 물체의 거리와 각도 정보를 알아내는 레이다 시스템을 제안하였다. 레이다의 수신부 안테나를 선형 배열이 아닌 2×2 배열을 사용하여 방위각과 앙각 정보



(a) 왼쪽으로 10° 움직인 표적 방위각 측정 결과 (b) 왼쪽으로 10° 움직인 표적 앙각 측정 결과
(a) Target measurement results of azimuth angle with 10° movement to the left (b) Target measurement results of elevation angle with 10° movement to the left

그림 10. 왼쪽에 위치한 타겟의 도래각 추정 결과
Fig. 10. DoA result of the target located at the left side.



(a) 오른쪽으로 8° 움직인 타겟 방위각 측정 결과 (b) 오른쪽으로 8° 움직인 타겟 앙각 측정 결과
(a) Target measurement results of azimuth angle with 8° movement to the left (b) Target measurement results of elevation angle with 8° movement to the left

그림 11. 오른쪽에 위치한 타겟의 도래각 추정 결과
Fig. 11. DoA result of the target located at the right side.

를 알아낼 수 있도록 설계하였다. FFT 기반의 도래각 추정 알고리즘 결과값은 실제 타겟의 위치 정보와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 움직이는 다중 타겟을 탐지하기 위해 레이다의 각도 해상도를 개선시키는 추가 연구가 필요하다.

References

[1] C. Waldschmidt, J. Hasch, and W. Menzel, "Automotive radar-from first efforts to future systems," *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, no. 1, pp. 135-148, Jan. 2021.

[2] P. Hügler, F. Roos, M. Schartel, M. Geiger, and C. Waldschmidt, "Radar taking off: New capabilities for UAVs," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 19, no. 7, pp. 43-53, Nov.-Dec. 2018.

[3] O. Y. Kwon, C. Cui, J. S. Kim, J. H. Park, R. Song, and B. S. Kim, "A compact integration of a 77 GHz FMCW radar system using CMOS transmitter and receiver adopting on-chip monopole feeder," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 6746-6757, Jan. 2019.

[4] S. Wagner, W. Johannes, "Target detection using autoencoders in a radar surveillance system," in *2019 International Radar Conference(RADAR)*, Toulon, Sep. 2019, pp. 1-5.

김 은 빈 [성균관대학교/석사과정]

https://orcid.org/0000-0002-5420-1233

2021년 2월: 평택대학교 스마트자동차학과 (공학사)

2021년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

[주 관심분야] RF, 레이다 시스템

박 재 현 [성균관대학교/석·박사통합과정]

https://orcid.org/0000-0002-8303-6273

2016년 2월: 성균관대학교 반도체시스템공학과 (공학사)

2016년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] RF, RFIC

김 승 연 [성균관대학교/석·박사통합과정]

https://orcid.org/0000-0002-4807-9294

2017년 8월: 원광대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] RF, 안테나, RF 패키징

유 태 우 [서울대학교/석·박사통합과정]

https://orcid.org/0000-0002-6796-8505

2017년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2017년 3월~현재: 서울대학교 전기정보공학부 석·박사통합과정

[주 관심분야] 레이다 시스템 및 신호처리

남 상 욱 [서울대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0003-3598-1497

1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1983년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)

1989년: Electrical Engineering at the University of Texas at Austin (공학박사)

1990년 3월～현재: 서울대학교 전기공학부 교수

[주 관심분야] Antenna and Wave Propagation, EM Field Numerical Analysis, Microwave & Milimeter-Wave Active/Passive Circuit Design 등

김 병 성 [성균관대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0003-3084-6499

1989년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1997년 3월～현재: 성균관대학교 정보통신대학 교수

[주 관심분야] RFIC 설계, RF 소자모델링