

# FR-4 PCB에 구현한 저가형 24 GHz 레이더 시스템

## Low-Cost 24 GHz Radar Fabricated on FR-4 PCB

이용석 · 신민건 · 김준성 · 박재현 · 정진우 · 김병성

Yong-Seok Lee · Min-Geon Sin · Jun-Seong Kim · Jae-Hyun Park · Jin Woo Jung · Byung-Sung Kim

### 요 약

본 논문은 FR-4 기판에 24 GHz FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더 시스템을 설계해 저가형 레이더의 구현 가능성을 제시하였다. 24 GHz에서 FR-4 기판의 손실을 최소화하기 위해 전송선 손실과 방사 효율을 고려하여 기판의 두께를 정하였다. 아울러, 위상 고정루프 없이 ISM(Industrial Scientific and Medical) 밴드에서 발진기를 작동시키기 위해 DAC의 삼각파 Chirp 신호와 PTAT(Proportional To Absolute Temperature) 전압을 합성해 전압제어발진기의 제어전압으로 사용했다. 동작 주파수 대역은 24.02~24.25 GHz이며, 출력전력 4 dBm, 수신 전압이득은 66 dB, 안테나 이득은 9 dBi이다. RF와 MCU 보드 모두 FR-4 기판에 제작하였으며, 레이더 모듈의 크기는 4 cm×4.5 cm이다.

### Abstract

In this study, a 24-GHz frequency modulated continuous wave(FMCW) radar system was designed on an FR-4 board to demonstrate the feasibility of low-cost radar systems. As the FR-4 substrate has a large substrate loss, its thickness was carefully determined considering line loss and radiation efficiency. Additionally, to operate the radar chip in the industrial scientific and medical(ISM) band without using a phase locked loop(PLL), we superposed and used the triangular wave signal of the DAC and proportional to absolute temperature (PTAT) voltages as a VCO tuning voltage. The designed radar has an operating frequency range of 24.02~24.25 GHz, output power of 4 dBm, a total receiver voltage gain of 66 dB, and an antenna gain of 9 dBi. The RF and MCU boards both use FR-4, and the size of the radar module is 4 cm×4.5 cm.

Key words: FR-4, FMCW, 24 GHz Radar

### I. 서 론

최근 들어 자전거의 후방 추돌 사고를 방지하기 위한 24 GHz 대의 후방 근접 차량 경고용 레이더 수요가 있으나, 대중화하기에는 아직 그 가격이 비싸다<sup>[1][2]</sup>. 24 GHz에서싼 가격으로 FMCW 레이더를 만들기 위해서는 저가의

기판에 PLL 등의 고가 부품을 사용하지 않고 제작해야 한다. 그러나, FR-4 기판은 손실이 크며, PLL이 없는 경우 ISM 밴드 내로 주파수를 제어하기 어려운 문제가 있다. 24 GHz ISM 밴드를 이용한 기존의 FMCW 레이더 연구는 RF와 베이스밴드를 구분해 전자는 저손실 기판에, 후자는 FR-4 기판에 설계하는 방식이며, PLL을 사용하여

「이 연구는 2019학년도 한국산업기술평가위원회의 산업기술혁신사업 지원을 받아 연구되었음(NO.2002712).」

성균관대학교 정보통신대학(College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received September 16, 2019 ; Revised October 1, 2019 ; Accepted October 10, 2019. (ID No. 20190916-085)

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

ISM 밴드 내로 주파수를 제어하는 방식을 주로 사용하고 있다<sup>[3]~[5]</sup>. 본 논문에서는 저가형 24 GHz 레이다를 구현하기 위해 FR-4 기판의 급전 손실과 방사 효율을 최적화하고, 위상 고정 루프 없이 PTAT 전압을 이용한 주파수 제어를 통해 개방 루프 방식으로 ISM 밴드 내에서 동작하는 FMCW 레이다를 설계하였다. 본 논문의 2장에서는 제안한 레이다 시스템 구성도에 대하여 살펴보고, 3장에서 FR-4 기판에 설계한 24 GHz 패치안테나와 전송선 설계, 임피던스 매칭 구조에 대해 설명한다. 4장에서는 전압합성기와 베이스 밴드 필터에 대해서 설명하며, 5장에서 구현된 레이다 모듈에 대한 성능을 평가하고, 6장에서 결론 및 향후 방향을 정리한다.

## II. 레이다 시스템 구성도

그림 1은 제작한 레이다 시스템 구성도이다.

RF 보드와 MCU 보드를 각각 제작했으며, 잡음 방지를 위해 LDO(Low Drop Out) 2개를 사용해 RF와 디지털에 공급전원을 분리했다. 레이더 모듈에 사용한 칩은 Infineon 사 BGT24LTR11, MCU는 ST사 STM32F303RE, 전압 합성기는 TI사 OPA2357을 사용했다. IF신호는 MCU에 내장된 OP AMP를 사용해 증폭했다. PLL을 사용하지 않고 ISM 밴드 내로 동작주파수를 유지하기 위해 레이더 칩에서 제공하는 PTAT 전압과 DAC Chirp 신호를 사용하여 전압

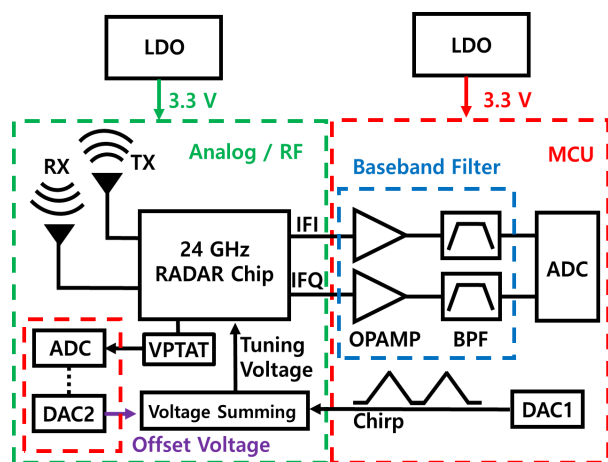


그림 1. 24 GHz FMCW 레이다 구성도  
Fig. 1. 24 GHz FMCW radar diagram.

제어 발진기를 제어하였다.

### III. 24 GHz RF 전단 설계

### 3-1 패치 안테나 및 전송선 설계

고주파 손실이 큰 FR-4 기판에 24 GHz 레이다 모듈을 설계하기 위해 ANSYS사 HFSS EM 시뮬레이션을 통해 표 1과 같이 기판 두께가 증가할수록 전송선의 급전 손실은 커지는 반면, 안테나 효율은 증가하는 반대되는 상관관계를 확인하였다. 단일패치 안테나의 급전선 길이 5 mm를 고려해서 안테나 이득과 전송선 손실을 더하면 기판 두께가 0.6, 0.8, 1.0 mm일 경우 각각 5.58 dB, 6.06 dB, 6.49 dB로 1.0 mm 기판 두께에서 가장 좋은 값을 보이지만, 중앙 급전방식의 1×6 배열 안테나를 시뮬레이션하면 그림 2에서 확인할 수 있듯이 각각 10.5 dBi, 10.9 dBi, 9.4 dBi로 나타나, 1.0 mm 기판에서 오히려 이득이 감소하고, 부엽의 크기가 증가한다. 이는 기판이 두꺼워짐에 따라 안테나 배열에서 급전 선로의 방사량이 증가하고, 180도 위상 차이가 선로도 선풍이 증가하여 불연속 효과가 크게 나타나 안테나 방사특성에 영향을 주기 때문으로 생각된다. 따라서 본 논문에서는 실현 이득과 부엽특성을 고려해 안테나를 구현하는 FR-4 기판의 두께를 0.8 mm로 선정했다.

안테나의 직렬 급전 길이가 길어질수록 손실이 증가하고, 이득 증가는 미미해지기 때문에 본 연구에서는 그림 3과 같이 중앙 급전 방식을 사용하였다. 중앙 급전 방식은 좌우를 동상으로 급전하면 이득 증가대신 안테나 범

표 1. 전송선 손실, 단일 패치안테나 효율 시뮬레이션 결과  
Table 1. Simulation results of transmission line loss and single patch antenna efficiency.

| Microstrip line loss (5 mm) |                | Single patch antenna |            |
|-----------------------------|----------------|----------------------|------------|
| Thickness                   | Insertion loss | Gain                 | Efficiency |
| 0.2 mm                      | -0.36 dB       | 3 dBi                | 37 %       |
| 0.4 mm                      | -0.4 dB        | 5 dBi                | 57 %       |
| 0.6 mm                      | -0.42 dB       | 6 dBi                | 68 %       |
| 0.8 mm                      | -0.44 dB       | 6.5 dBi              | 76 %       |
| 1.0 mm                      | -0.51 dB       | 7 dBi                | 88 %       |
| 1.2 mm                      | -0.58 dB       | 6.8 dBi              | 89 %       |

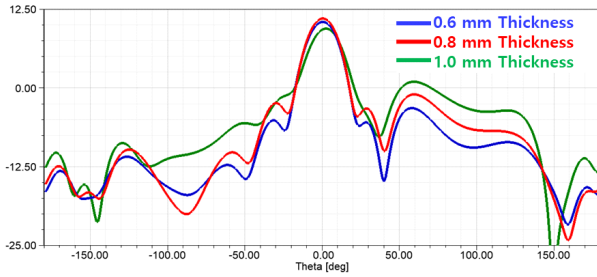


그림 2. 두께별 1×6 중앙 급전 방식 패치안테나 방사패턴  
Fig. 2. 1×6 center feeding patch antenna radiation pattern by thickness.

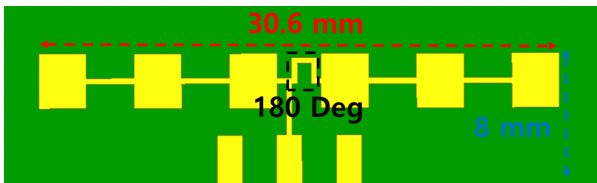


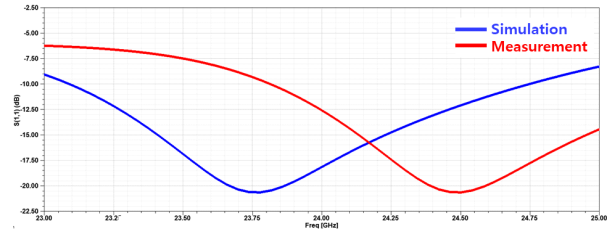
그림 3. 설계한 1×6 중앙 급전 방식 패치안테나  
Fig. 3. Designed 1×6 center feeding patch antenna.

이 분리되므로 그림 3과 같이 전송선을 통해 180° 위상 천이를 구현했다<sup>[6]</sup>.

패치 안테나 크기는 30.6 mm×8 mm이고, 안테나 단독 측정을 위해 SMA 커넥터를 추가했다. 패치 안테나는 그림 7과 같이 RF보드에 배치되며, 동일한 송·수신 안테나를 사용한다. 그림 4와 같이 반사계수상으로 시뮬레이션보다 공진 주파수가 약 0.7 GHz 올라갔으나, ISM 밴드 내에서 반사손실이 10 dB 이하였기 때문에 수정 없이 사용하였으며, 이득은 시뮬레이션보다 1.9 dB 감소한 9 dBi이다. 측정결과, 시뮬레이션보다 부엽과 후엽레벨이 낮은 결과를 보였으며, 고각 빔 폭은 약 18°이다.

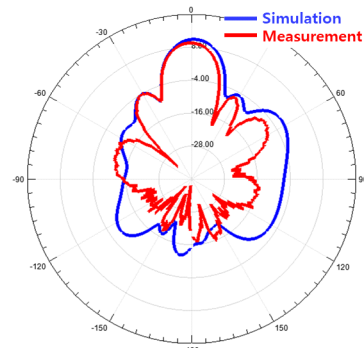
### 3-2 임피던스 매칭

본 논문에서 사용한 레이더 칩은 Infineon사에서 유전율 3.6, 두께 0.252 mm인 Ro4350B 듀로이드 기판에서 RF 입출력의 정합용 천이구조를 제공한다<sup>[7]</sup>. 하지만 본 연구에서는 유전율 4.4, 두께 0.8 mm인 FR-4 기판을 사용하기 때문에 독립적인 임피던스 정합구조를 개발해야 했으며, 그림 5(a), 5(b)는 단계별 시뮬레이션과 측정결과를 나타



(a) 반사 손실

(a) Return loss



(b) 안테나 이득

(b) Antenna gain

그림 4. 송·수신 6×1 패치 배열 안테나 파라미터

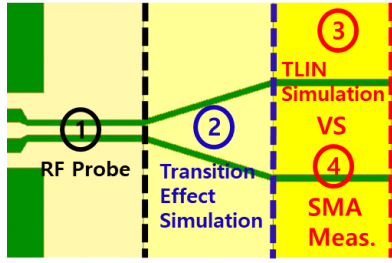
Fig. 4. Parameter of 6×1 patch array antenna in transceiver.

낸 것이다. 우선적으로 레이더 칩의 입, 출력에서 그림 5(a) ① 부분의 CPW 구조로 신호를 전송한 후 종단에서 250  $\mu$ m 피치의 프로브로 반사계수를 측정하였다. 이렇게 측정한 임피던스를 기준으로 ②, ③번 영역의 50  $\Omega$  천이 구조를 설계하였다. 측정은 Anritsu사의 MS4647A 벡터 네트워크 분석기를 이용했다. 마지막으로 제작한 보드에 SMA 커넥터를 연결한 측정결과와 그림 5(b) ④번에 나타내었다.

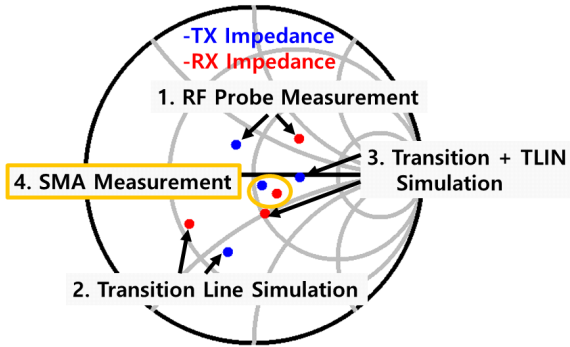
## IV. 전압합성기 및 베이스 밴드 필터

### 4-1 전압 합성기

서론에서 설명한 바와 같이 위상 고정 루프없이 BGT24LTR11 레이더 칩을 사용할 경우, 가장 문제가 되는 것은 발진주파수가 24 GHz 대에 허용된 ISM 주파수 내로 주파수를 제어하는 것이다. Infineon사의 BGT24LTR11 칩은 온도



(a) 임피던스 시뮬레이션 및 측정 순서  
(a) Impedance simulation and measurement sequence

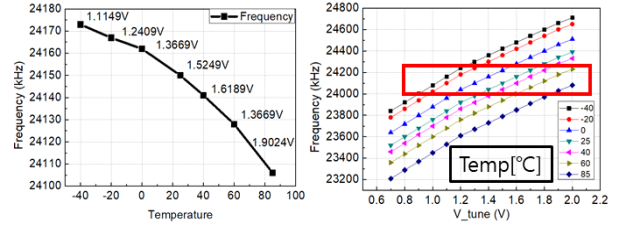


(b) RF 송·수신 단 임피던스 측정결과  
(b) RF input/output impedance measurement result

그림 5. 임피던스 매칭 과정 및 결과

Fig. 5. Impedance matching process and results.

에 비례하는 PTAT 전압 출력을 제공하는데 이 전압을 칩의 발진기 제어 전압으로 인가하는 경우에는 그림 6(a)와 같이 온도별로 약 24.08~24.17 GHz에서 발진주파수가 형성되어 ISM 밴드 내로 전압을 유지할 수 있다<sup>[7]</sup>. 그러나, 이 동작 조건은 단일 주파수로 동작하는 이동체 탐지용 도플러 레이더에만 사용이 가능하며, 광대역 주파수 스위치가 필요한 FMCW에는 사용이 불가능하다. 온도와 제어전압에 따른 BGT24LTR11 칩의 발진주파수는 그림 6(b)와 같으며, 그림에서 붉은 상자 안에서만 ISM 주파수 내로 동작함을 알 수 있다. 따라서, FMCW 주파수를 ISM 밴드 내로 제어하기 위해서는 발진기의 램프 전압을 합성할 때 온도별로 초기값을 달리하여 설정해야 한다. 본 연구에서는 PTAT 전압을 ADC로 읽은 후 PTAT 전압에서 약 200 mV 오프셋 하강된 전압 값을 초기값으로 삼각파 전압을 합성하는 방법으로 주파수를 제어하였다. 오프셋 전압과 삼각파전압을 두 개의 DAC를 사용하여 발생시키고 TI



(a) PTAT 전압 연결시 발진 주파수  
(b) 온도 및 제어 전압에 따른 발진 주파수 특성  
(a) Oscillation frequency with PTAT voltage  
(b) Oscillation frequency characteristics versus temperature and control voltage

그림 6. BGT24LTR11 발진기의 특성

Fig. 6. Characteristics of BGT24LTR11 oscillator.

사의 OPA2357를 이용하여 24.02~24.25 GHz 사이에 동작하는 제어신호를 구현하였다. 그러나, 60°C를 초과하는 온도에서는 상기의 대역폭을 확보하기 어려운 단점이 있다. 상기 방법은 하나의 DAC으로도 구현 가능하나, 개발상의 편의를 위해 현 단계에서는 2개의 DAC으로 구현하였다.

아울러, 참고문헌 [7]의 그림 8에서 PTAT 사용시 동작 주파수 선형성을 나타내는 지표를 이용해 식 (1)로 주파수 변조 선형도를 계산했다<sup>[8]</sup>.

$$L = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}} \quad (1)$$

$L$ 은 주파수 변조 선형도를 나타내며,  $S_{\max}$ 와  $S_{\min}$ 은 튜닝감도의 최대값과 최소값을 각각 나타낸다. 식 (1)로 계산했을 시 거리 30 m에서 5.4 m의 오차가 나타난다. 자전거 후방감지 레이더는 장거리에서 정교한 거리 정확도를 요구하지 않으며, 직접적인 위협이 되는 3.5 m 거리에서는 0.65 m의 거리 오차로 줄어들기 때문에 별도의 선형화 알고리즘을 적용하지 않았다.

#### 4-2 베이스밴드 필터 설계

레이더 칩의 출력을 분석한 결과, 입출력간의 격리도 문제와 자유 발진하는 VCO의 특성으로 인해 IF 출력에서 DC 근방의 저주파 노이즈가 크게 나타나는 문제가 확인되었다<sup>[9]</sup>. 이 문제를 해결하기 위해 5~316 kHz가 되도록 필터를 구성하였으며, 통과 대역에서 최대 이득은 44

dB이다. 최종 출력은 I/Q 신호를 모두 사용하여 복소 FFT를 수행함으로써 이미지 밴드 잡음을 억제하는 기법을 사용하였다<sup>[10]</sup>.

## V. 레이더 모듈 설계 및 필드 테스트

그림 7은 24 GHz FMCW 레이더 모듈로 크기는 4.5 cm×4 cm이다. 1차 제작은 RF와 MCU 부분을 분리하여 제작하였으며, FR-4 기판에 제작하였기 때문에 다층기판을 사용하면 손쉽게 일체화할 수 있다.

그림 8은 24 GHz FMCW 레이더 모듈을 이용한 실내 측정 환경이다. 표적으로 반지름 18 cm이고, RCS(Radar Cross Section)이 0.1 m<sup>2</sup>인 구를 사용하였다. 신호 스위프 시간은 2.2 msec, 대역폭 230 MHz로 설정하고, FFT 신호를 이용하여 표적과의 거리를 계산하였다.

실내 클러터 레벨을 측정하기 위해 표적이 없는 상태와 12 m 거리 표적이 있는 경우의 수신 전력을 비교하였다. 그림 9는 측정결과를 나타내며, 이론적 수신 전력은

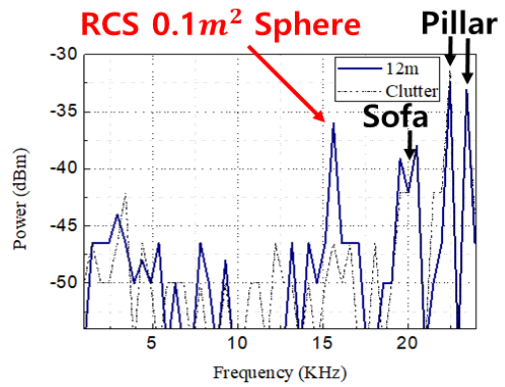


그림 9. 측정결과

Fig. 9. Measurement result.

식 (2)로 계산된다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2)$$

위 식에서  $P_r$ 은 수신전력,  $P_t$ 은 송신전력,  $\lambda$ 는 파장,  $G_t$ ,  $G_r$ 는 송·수신 안테나 이득,  $\sigma$ 는 타겟의 RCS,  $R$ 은 거리이다. 수신전압이득은 66 dB이고, FFT 결과 -36 dBm이 측정되어 계산값과 측정값이 유사함을 확인했다.

## VI. 결 론

본 논문은 FR-4 기판에서 24 GHz FMCW 레이더 시스템을 제작하고 측정하였다. FR-4 전송선 손실 시뮬레이션 결과, 10 mm 급전 길이에서 0.9 dB의 손실이 발생할 것으로 예상했지만, 실제 제작한 모듈의 출력전력 측정 시 2 dB의 손실이 발생되어 FR-4 손실에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

현재 차량뿐 아니라, 생활감시 레이더에 대한 연구가 활발하다<sup>[11],[12]</sup>. FR-4 기판을 이용한 24 GHz 레이더를 제작한 본 연구를 통해 고손실 기판에 밀리미터파 시스템 실현 가능성을 보여 더욱 저렴한 가격의 레이더가 보급될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] GARMIN, "Varia™ RTL510". Available: <https://www.garmin.com>

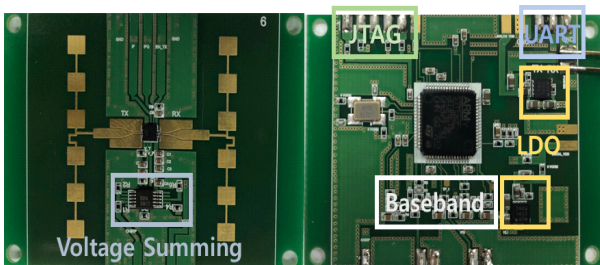


그림 7. 24 GHz FMCW 레이더 모듈  
Fig. 7. 24 GHz FMCW radar module.



그림 8. 측정환경  
Fig. 8. Measurement environment.

- min.kr/products/intosports/varia-rtl-510
- [2] C. Degen, C. Domnik, A. Kurten, M. Meuleners, M. Notz, and R. Pohle-Frohlich, et al., "Driver assistance system for pedelecs," in *2019 20th International Radar Symposium(IRS)*, Ulm, Germany, 2019, pp. 1-8.
- [3] T. Hsu, C. Tseng, "Compact 24-GHz Doppler radar module for non-contact human vital-sign detection," in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Okinawa, 2016, pp. 994-995.
- [4] H. Lee, E. Lee, J. Kim, H. Ko, and C. Kim, "24 GHz Doppler radar sensor for robotic applications," in *2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2013)*, Gwangju, 2013, pp. 1277-1279.
- [5] E. Hyun, Y. Jin, and J. Lee, "Development of 24 GHz FMCW level measurement radar system," in *2014 IEEE Radar Conference*, Cincinnati, OH, 2014, pp. 796-799.
- [6] K. Wincza, S. Gruszczynski, and J. Borgosz, "Microstrip antenna array with series-fed 'through-element' coupled patches," *Electronics Letters*, vol. 43, no. 9, pp. 487-489, Apr. 2007.
- [7] Infineon Technologies AG. "Infineon Technologies AG BGT24LTR11 application note6," 2017. Available: [https://static6.arrow.com/aropdfconversion/b090137d1dba2b01972fc0f61721ccc6ff228f46/infineon-an472\\_bgt24ltr11n16-an-v01\\_01-en.pdf](https://static6.arrow.com/aropdfconversion/b090137d1dba2b01972fc0f61721ccc6ff228f46/infineon-an472_bgt24ltr11n16-an-v01_01-en.pdf)
- [8] E. L. Holzman, R. S. Robertson, *Solid-State Microwave Power Oscillator Design*, Boston, MA, Artech House, pp. 352-353, 1992.
- [9] S. Turso, T. Bertuch, "Zero-IF radar signal processing," in *2015 European Radar Conference(EuRAD)*, Paris, 2015, pp. 513-516.
- [10] K. Ramasubramanian, "Using a complex-baseband architecture in FMCW radar systems," Texas Instruments, Dallas, TX, 2017.
- [11] H. Krishnaswamy, H. Hashemi, "A 4-channel 4-beam 24-to-26 GHz spatio-temporal RAKE radar transceiver in 90 nm CMOS for vehicular radar applications," in *2010 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, San Francisco, CA, 2010, pp. 214-215.
- [12] R. Ebelt, A. Hamidian, D. Shmakov, T. Zhang, V. Subramanian, and G. Boeck, et al., "Cooperative indoor localization using 24-GHz CMOS radar transceivers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 2193-2203, Sep. 2014.

이 용 석 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6977-7964>



2017년 2월: 호서대학교 전기공학과 (공학사)  
2017년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

신 민 건 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6715-5416>



2015년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)  
2019년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 신호처리

김 준 성 [성균관대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0036-4034>



2014년 2월: 광운대학교 전자재료공학과 (공학사)

2014년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

정 진 우 [케이디테크/대표]

<https://orcid.org/0000-0002-9089-3468>



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 8: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

1999~2003년: (주)삼성전자 무선사업부 선임연구원

현재: 케이디테크 대표

[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

박 재 현 [성균관대학교/박사과정]

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



2016년 2월: 성균관대학교 반도체시스템공학과 (공학사)

2016년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] RFIC 레이더 시스템

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 소자모델