The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 22, No. 6, pp.43-49, Dec. 31, 2022. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.6.43
JIIBC 2022-6-7

자율주행센서로서 개발한 2-chip 기반의 FMCW MIMO 레이다 설계 및 구현

Design and Implementation of FMCW Radar Based on two-chip for Autonomous Driving Sensor

최준혁*, 박신명, 이창현**, 백승열**, 이미림****

Junhyeok Choi*, Shinmyong Park**, Changhyun Lee**, Seungyeol Baek**, Milim Lee**

요 약 FMCW레이다는 일반 차량의 충돌방지용도 뿐만 아니라 자율주행시스템에서 활발히 센서로서 사용이 되고 있다. 본 논문에서는 자율주행센서로서 개발한 2-chip 기반의 FMCW MIMO(Multi Input Multi Output) 레이다 설계 및 구현에 대해서 설명하였다. 사용 칩을 이용하여 48채널의 가상배열을 이용하여 방위각 해상도가 우수하게 설계하였으며, 특히 Frame 기반과 Chirp 기반의 파형발생 및 신호처리를 혼합하여 최대탐지 가능 속도와 속도 보상에 대해 강점을 보유할 수 있도록 제작하였으며, 구현된 시스템은 실험실 내 시험과 실제 주행시험을 통하여 성능 및 상용화 가능성에 대한 분석을 진행하였다.

Abstract FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) Radar is very useful for vehicle collision warning system and autonomous driving sensor. In this paper, the design and implementation of FMCW radar based on two chip MMIC developed as an autonomous driving sensor was described. Especially, generation of frame-based and chirp-based waveform generation and signal processing are mixed to have the strength of maximum detection speed and compensation of speed. This implemented system was analyzed for performance and commercialization potential through lab. test and driving test in K-city.

Key Words : Autonomous Driving, FMCW Radar, MIMO Radar

Ⅰ. 서 론

FMCW레이다는 과거부터 차량 충돌방지 용도에서부터 현재 운전자 보조시스템(ADAS, Advanced Driver Assistance Systems), 나아가 자율주행자동차의 자율행용 센서로서도 많이 사용되고 있다. 특히 라이다나 카메라 등과 함께 레이다를 이용하여 자율주행을 수행하는 것이 활발히 연구되고 있다[1,2]. 최근에는 직접화된 RFSoC를 이용하여 설계 및 다양한 연구활동이 활발히 진행되고 있으며, 이를 이용할 시 크기 및 가격 측면에서 많은 장점을 가지고 있다[3-8].

현재 차량용 레이다 센서 및 자율주행을 위한 센서에는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 송신 방식으로 대부분 활용되고 있다[5-8]. 일반적인

*정회원, LIG넥스원 레이다연구소(교신저자)
**정회원, LIG넥스원 레이다연구소
접수일자 2022년 9월 16일, 수정완료 2022년 11월 16일
게재확정일자 2022년 12월 9일

Received: 16 September, 2022 / Revised: 16 November, 2022 / Accepted: 9 December, 2022
*Corresponding Author: junchoi510@llignex1.com
Dept. of Radar R&D, LIGNEX1, Korea

FMCW레이다의 특성 상, 변조 대역폭과 주기에 의해 거리와 속도는 측정되지만 방위각 해상도는 안테나 개구면 크기에 반비례한다.

본 논문에서는 레이다의 크기를 소형화하면서 방위각 해상도를 증대시키기 위하여 가상의 배열인 MIMO (Multi-Input Multi-Opuput) 방식의 안테나로 설계를 진행하고 제작하였으며, Two -Chip을 이용한 시스템으로 설계하였다. 특히 상대적으로 작고 가격이 싼 FMCW 레이다를 만들기 위해 75~79GHz에 기반을 둔 직접화 칩을 사용하였다. 본 칩은 TI사의 AWR2243이며, 송신 3채널, 수신 4채널을 가지고 있다. 본 연구에서는 송신 6채널, 수신 8채널을 혼합한 MIMO 안테나 배열을 적용하였다. 본 논문의 구성은 II장에서 FMCW레이다에 대해서 간단히 소개하고, 개발품에 대한 각 구성품별에 대한 설계 및 구현에 대한 내용을 제시하였다. III장에서는 실험실 및 실제 자율주행시험장(K -city)에서 주행시험을 통해 얻은 결과를 논의하였다.

II. 레이다 설계

1. FMCW레이다 개요

FMCW레이다는 시간에 따라 선형적으로 Sweep하는 chirp 신호를 송신하고 목표물로부터 반사된 수신신호를 수신하게 된다. 송신 신호와 수신신호 사이에는 거리에 따른 주파수 차이가 발생하게 된다. 차주파수는 목표물로부터 반사된 수신신호와 송신신호를 곱(Mixing)하는 방식을 사용하여 추출하게 된다. Mixing된 신호는 저대역주파수통과필터를 통과하여 합주파수 성분은 제거되고 차주파수 성분만 남게되는데 이를 비트주파수(beat Frequency)라고 한다. 비트 주파수는 식(1)과 같다.

$$f_{Beat} = \frac{2BR}{TC} - \frac{2}{\lambda} v_r = f_r + f_d \qquad (1)$$

여기서 R은 목표물까지의 거리 V_r은 시선 속도(Radial Velocity), B는 주파수 대역폭, C는 광속, T는 FMCW 변조주기, λ는 파장을 나타낸다.

2. 마이크로 스트립 패치 MIMO 배열 안테나

안테나는 레이다 MMIC 칩과의 인터페이스를 구성하고 있다. 송신 안테나부는 MMIC인(TI, AWR2243P)에서 송신하는 신호를 방사하는 역할을 수행하고, 수신 안테나는 방사된 송신신호가 목표물로부터 산란하여 발생한 신호를 수신하여 MMIC로 전달하는 역할을 한다.

표 1. 안테나 개발 규격
Table 1. Specification of antenna

항목		개발규격
주파수		76 ~77 GHz
정재파비		2.5:1 이상
안테나 채널 수	송신채널	6 channel
	수신채널	8 channel
빔폭	방위각(합성빔폭)	100 degree(2.01 degree)
	고각	14 degree
안테나 이득		12 dBi 이상
부엽준위		-14 dB 이하

그림 1은 방위각 동작 범위에서 grating lobe가 발생하지 않는 안테나 간격을 고려하여 선택된 안테나 배열 형상을 보여준다. 수신 안테나는 2.15mm(d) 간격으로 방위각 방향으로 4개가 배열된 형상이 51.6mm(24*d) 간격으로 2개가 배치되어 있으며, 송신 안테나는 8.6mm(4*d) 간격으로 6개가 배열되어 등간격으로 배열된 48개의 가상배열 안테나를 형성한다.

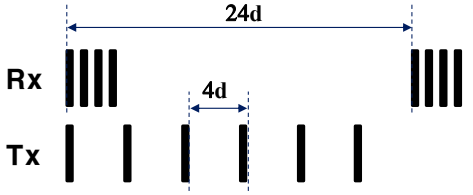


그림 1. 시제의 안테나 배열 형상
Fig. 1. Concept of antenna array

시제의 안테나 패턴은 단독 측정이 불가능하기에 코너 리플렉터를 기준방향(Boresight)에 배치하고 레이다를 Rotator 위에 배치하여 레이다를 회전시키며 MIMO 레이다의 수신신호를 획득하고, 이를 수신 빔형성 신호처리하여 각도별 수신 신호의 크기를 확인하였다. 그림 2는 안테나 패턴 측정을 위한 챔버 내 측정하는 상황을 나타낸 사진이다.

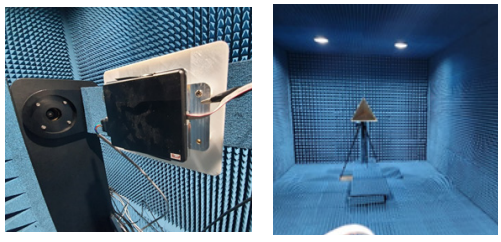
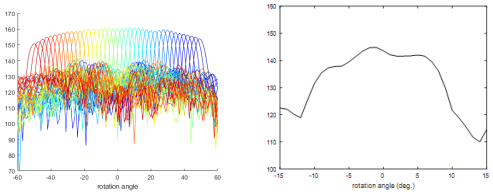


그림 2. 안테나 패턴 측정 구성도
Fig. 2. Configuration of antenna pattern measurement

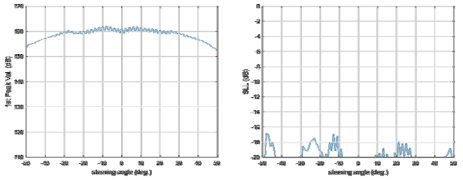
그림 3은 제작된 시제의 패턴 측정 결과로서 레이다를 1 ° 씩 방위각 방향으로 회전하여 얻은 수신 패턴이다. X축은 회전 각도를 의미하며, Y축은 그 때의 신호크기를 나타낸다. 합성 빔의 빔폭은 0 ° 기준에서 2.01 ° 이다.



(a) (b)

그림 3. 수신 패턴 (a) 방위각 합성 패턴, (b) 고각 합성 패턴
Fig. 3. Receiving pattern of (a) azimuth, and (b) elevation Synthesis

그림 4는 챔버 내에서 획득한 수신 패턴의 각 최대값(peak value) 연결을 통해 추정한 2-way의 단일패턴과 부엽수준을 보여준다.



(a) (b)

그림 4. 수신 패턴 특성 (a) 수신패턴 Peak로 추정한 2-way 단일 패턴, (b) 부엽 수준
Fig. 4. Receiving pattern Characteristic, (a) 2-way peak pattern, (b) sidelobe level

2. RF 보드 및 디지털 보드 설계

레이다 보드는 크게 RF 칩, MCU, 전원부분 그리고 인터페이스부로 구성되어 있다. 그림 5는 레이더 보드 구성에 대한 블록다이어그램을 나타낸다. 제작된 보드는 76~77GHz 주파수 대역을 사용하도록 설계하였으며, 2개의 RF칩(TI, AWR2243) 및 1개의 MCU(Infineon, TC397)로 구성하였다. 입력전원은 차량에서 사용하는 12V를 사용하며, 인쇄회로기판은 성능과 함께 경제적인 측면을 고려하여 TLY-5A 재질을 사용하였다. 2개의 칩으로 구성된 RF회로에서, 1개의 칩은 Master 나머지 칩은 Slave로 동작한다. Master칩은 40MHz의 기준 클럭 신호를 사용하며, Slave 칩과 동기화하는데 20GHz를 사용하게 된다. MCU는 RF칩으로부터 LVDS(Low Voltage Differential Signal)를 통해 디지털 수신신호를 입력받는다. 이 전달된 데이터는 MCU 내부에서 신호처리를 수행하며, 최종 신호처리 결과는 차량용 이더넷을 통해 컴퓨터로 전달되게 된다. MCU는 PMIC를 제어하며, I2C를 통해 제어하게 된다.

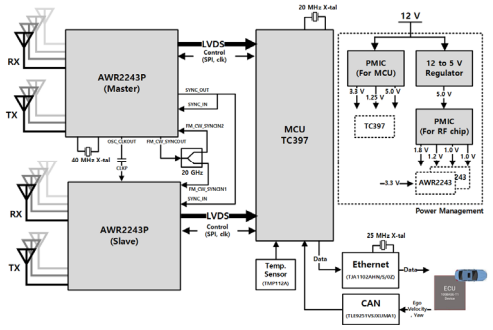
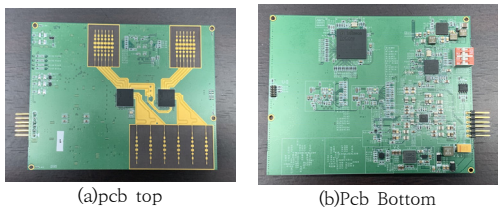


그림 5. 레이다 보드 구성도
Fig. 5. Configuration of radar board

그림 6은 최종 제작된 시제의 PBA(Printed Circuit Board Assembly)를 나타내었다. 크기 및 기타 제원은 표 2에 나타내었다.



(a)pcb top (b)Pcb Bottom

그림 6. 레이다 보드 사진
Fig. 6. Picture of radar board top & bottom

표 2. 레이다 보드 제원
Table 2. Specification of radar board

항목		개발규격
안테나 채널 수	송신채널	6 channel
	수신채널	8 channel
입력전원		12 VDC
데이터 인터페이스		Automotive Ethernet
전원소모량		3 Watt 이하
동작온도		-40℃ ~ +85℃
크기	Bare(WxH)	120.0mm X 90mm
	기구 포함(WxHxD)	140.0mm X 110mm x 50mm
무게		385 gram

3. 신호처리 설계

본 논문에서 수행하는 신호처리는 상대적으로 가까운 거리에 있으며 넓은 시야각을 가지는 near mode에 대

해서 설명한다. 일반적인 차량용 ADAS의 목적과는 달리, 자율주행을 위해서는 레이더 HIT 데이터를 추출하여 자율주행 컴퓨터로 전송해 주어야 하므로 신호처리에서는 HIT 추출과정을 설명한다. 본 제품에서 사용된 near mode는 그림 7에서와 같이 frame MIMO 방식과 chirp MIMO 방식을 혼합하여 사용하였다. Frame MIMO 방식은 최대 속도 탐지 측면에서 우수하고 chirp MIMO 방식은 속도 보상(Velocity Compensation)에 유리하여 방위각 정확도 측면에서 유리하다. 따라서 각 방식의 장점을 극대화하기 위해 두 가지 방식의 MIMO를 조합하여 최종 신호처리를 수행하였다. 두가지 방식을 혼합하여 방사하고 신호처리 함으로써 최종 데이터를 추출하는 갱신주기가 짧아지는 것(50msec 이하)도 장점 중의 하나이다.

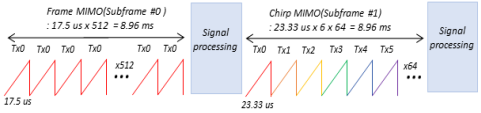


그림 7. Near Mode 구조도
Fig. 7. Structure of near mode

그림 8은 frame MIMO 방식에서의 신호처리 flow chart이다. 거리처리 후 속도 처리, 그리고 탐지, 그후 방위각 추출 순으로 진행하였다.

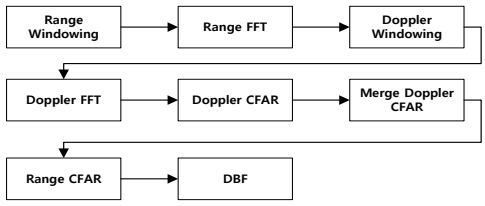


그림 8. Frame 기반 MIMO 방식의 신호처리 흐름도
Fig. 8. Signal flow-chart of frame-based MIMO

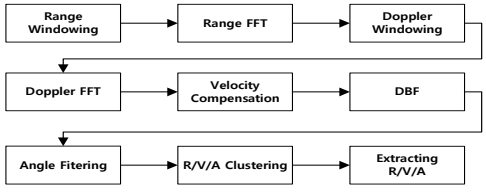


그림 9. Chirp 기반 MIMO 방식의 신호처리 흐름도
Fig. 9. Signal flow-chart of chirp-based MIMO

그림 9는 chirp 기반 MIMO 방식에서의 신호처리 flow chart이다. Frame 기반과 마찬가지로 속도 처리까지는 동일하게 진행되지만, 속도 추출 후 속도에 대한 보상을 수행하고 방위각을 추출하고 최종 추출된 데이터의 거리/속도/방위각을 이용하여 클러스터링을 진행하였다. Range FFT와 Doppler FFT에서 사용된 window는 Hanning window를 사용하였고, 방위각 정보 추출 성능 향상을 위해, frame MIMO 및 chirp MIMO 모두 DBF(digital beam-forming)를 수행하여 두 결과의 일치 여부를 확인하고 최종 방위각을 추출하여 거리, 속도, 방위각을 추출하였다. 그림 10은 frame MIMO 신호처리 결과와 chirp MIMO 신호처리 결과를 이용하여 표적정보(거리/속도/각도/power)를 추출하는 과정을 상세히 보여준다.

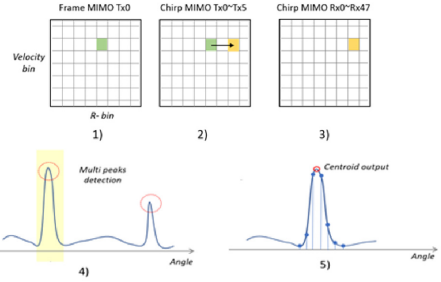


그림 10. 표적정보 추출 방법
Fig. 10. Extraction method of target information

1) Frame 기반 data에서 거리-속도 peaks를 추출한다.
2) Chirp 기반에서 속도에 의해 변화된 거리를 계산하여 속도에 의한 위상 변화를 보상한다.
3) Chirp 기반의 MIMO의 데이터를 이용, complex FFT 결과를 사용하여 48채널 가상배열에 대해서 디지털 빔포밍(digital beam-forming)을 수행한다.
4) 다중 표적에 대한 각도 탐지 알고리즘을 적용한다.
5) 각도 측면에 centroiding 기법을 수행하여 전력값(power value)을 추출한다.

Ⅲ. 실험실 및 도로주행 시험 결과

실험실 내에서 레이다의 단품의 성능을 검증하기 위하여 상용 시험장비를 이용하여 시험을 수행하였다.

그림 11의 (a)는 로데슈바르츠의 AREG800A 상용 시험장비이다. 이 시험장비는 레이더 신호를 수신하여 시험환경에 셋팅한 거리, 속도를 모의해서 다시 레이더로 송신해주는 역할을 수행한다.

(a) (b)

그림 11. 실험실 시험 환경 (a) 상용 시험장비(AREG800A), (b) 제작된 레이다
Fig. 11. Set-up of laboratory test, (a) AREG800A, (b) Proposed Radar

최대탐지거리와 최대탐지속도에 대한 시험결과를 자체 제작한 GUI를 이용하여 분석, 검증하였다. 그림 12의 (a)는 탐지 당시의 GUI에서의 캡쳐 화면이며, (b)는 약 10초의 누적데이터의 분포값과 평균값을 나타낸 것이다.

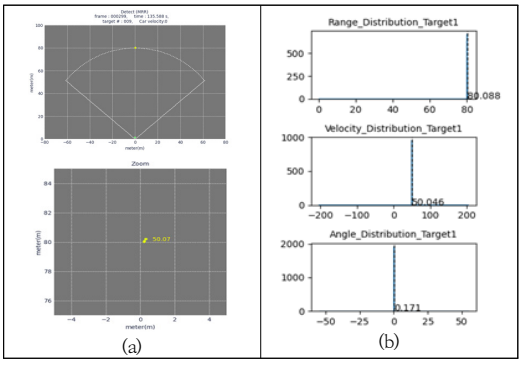


그림 12. 최대탐지거리 시험 결과 분석 (a) 최대 탐지거리 결과 GUI, (b) 누적 데이터 분석결과
Fig. 12. Result of max. detection Range, (a)GUI, analysis of cumulative data

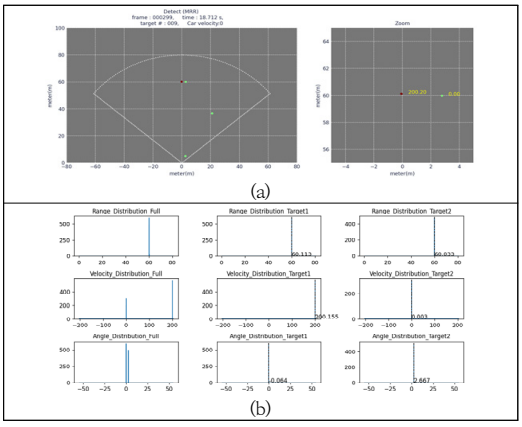


그림 13. 최저/최대 탐지 속도 시험 결과 (a) 최대/최저 탐지 속도 결과 GUI, (b) 누적 데이터 분석결과
Fig. 13. Test result of (a) max/min detection velocity and (b) analysis of cumulative data

표3에서와 같이 최대탐지거리 80.088m와 최대 200.155km/h의 속도를 탐지하였으며, 개발 규격을 충족하였음을 알 수 있다.

표 3. 시험항목별 규격 및 결과
Table 3. Laboratory test item & result

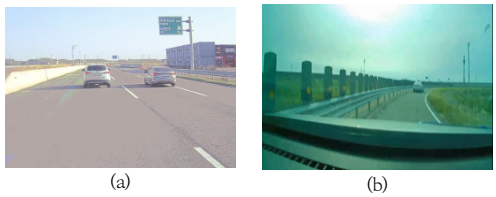
항목	개발규격	시험결과
최대탐지거리	80 m	80.088 m
최저/최대탐지속도	0~200 Km/h	0.003 ~ 200.155 km/h

주행 시험은 레이더를 실제 차량 정면에 장착하여 자율주행시험장(K-city, 경기도 화성)에서 다음과 같은 시험 시나리오로 실시하였다.

Case 1: 레이다를 장착한 차량이 이동하고 표적은 정지(표적은 2개의 자동차), 2개의 차량이 구분 가능한 지점을 판단하기 위한 시험

Case 2: 레이다를 장착한 차량이 이동, 가드레일이 있는 곡선길 운행, 곡선길의 가드레일과 차 구분 가능 여부 판단하기 위한 시험

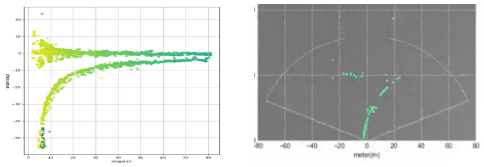
그림 14에서는 2가지 Case에 해당하는 실제 시험환경에 대한 촬영 사진이다. 최종 신호처리 데이터는 차량용 이더넷을 일반 PC의 이더넷으로 변환하는 변환기를 사용하여 수신하였으며, 자체 제작한 GUI를 이용하여 데이터를 분석하였다.



(a) (b)

그림 14. 시험 시나리오별 환경 (a) Case1 시나리오, (b) Case 2 시나리오
Fig. 14. Set-up environment of (a) scenario 1, and (b) scenario 2

그림 15의 (a)는 case 1에서 누적된 데이터를 도시한 결과이며, 측정된 데이터를 누적하여 도시하였다. 최대 탐지거리인 80m부터 지속적으로 2개의 차량이 분해되어 나타남을 알 수 있으며, 2개의 차량을 충분히 구별할 수 있음을 볼 수 있다. (b)는 case 2에서 곡선 차선에서 가드레일과 차량이 구분되어서 도시되는 GUI를 나타내었다. 곡선의 가드레일 모양이 도시되고 있으며, 거리/방위각 방향으로 군집되어 있는 것이 차량데이터로 판단할 수 있다.



(a) (b)

그림 15. 시험 분석 결과 (a) Case 1의 분석 결과, (b) Case 2의 분석 결과

Fig. 15. Analysis results of (a) scenario 1, and (b) scenario 2

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 MIMO 배열 안테나를 보유한 자율주행용 FMCW 레이다를 설계 및 구현하였다. 그리고 frame 기반과 chirp 기반의 파형 생성 및 신호처리 방식을 혼합하여 성능을 극대화하였다. 실험실 내에서 기본적인 동작 검증을 수행하였고, 최대 탐지거리와 속도에 대해서 개발 규격 대비 성능이 정상적임을 확인하였다. 게다가 자율주행시험장에서의 주행시험을 통해 분해능 성능이 우수함을 입증하였으며, 자율주행을 위한 데이터로 활용 가능함을 보였다.

References

[1] Jae Hoon Hyun, "The Strategy of GM for the Development of Autonomous Driving Technology and Related Policies", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 21, No. 3 pp. 51-56, 2020.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.51

[2] R. Feger, C. Wagner, S. Schuster, S. Scheiblhofer, H. Jäger, and A.Stelzer, "A 77-GHz FMCW MIMO radar based on an SiGe single-chiptransceiver," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 57, no. 5, pp. 1020-1035, May 2009.

[3] Eun-Jin Jang, Jung-Ihl Kim, "Proposal of New Information Processing Model for Implementation of Autonomous Mobile System", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 19, No. 2, pp. 237-242, Apr 2019
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.2.237

[4] Jri Lee, Yi-An Li, Meng-Hsiung, "A fully integrated 77GHz FMCW radar system in 65nm CMOS technology", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 216-217, Feb. 2010.

[5] Rui Zhou, Haoyi Dong, Debin Hou, Jixin Chen, "Design and Implementation of a Compact 77-GHz FMCW Radar Based on Single-Chip Transceiver with Comb-Line Antenna", 2020 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), pp. 1-3, Sept 2020.

[6] G. Reina, D. Johnson and J. Underwood, "Radar Sensing for Intelligent Vehicles in Urban Environments," MDPI Sensors, Vol.15, pp. 14661-14678, 2015.

[7] S. H. Jeong, J. E. Lee, S. U. Choi , J. N. Oh and K. H. Lee, "Technology Analysis and Low-cost Design of Automotive Radar for Adaptive Cruise Control System," Int. J. Automotive Technology, Vol.13, No.7, pp. 1133-1140, 2012.

[8] J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel, T. Zwick, R. Weigel, and C. Waldschmidt, "Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 ghz frequency band," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 60, no.3, pp. 845-860, Mar 2012.

저 자 소 개

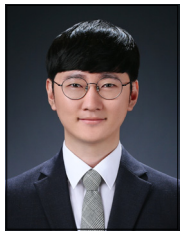
최 준 혁(정회원)

- 2007년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
- 2009년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학석사)
- 현재 : LIG넥스원 수석연구원

박 신 명(정회원)

- 2011년 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2013년 : 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
- 2018년 : 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
- 현재 : LIG넥스원 선임연구원

이 창 현(정회원)



- 2013년 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2015년 : 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 2020년 : 홍익대학교 전자전기공학과 (공학박사)
- 현재 : LIG 넥스원 선임연구원

백 승 열(정회원)

- 2007년 : 한양대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2013년 : LIG넥스원 레이다연구소
- 2017년 : 현대모비스 전장팀
- 2021년 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

이 미 림(정회원)

- 2013년 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사).
- 2015년 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2019년 : 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)
- 현재 : LIG넥스원 선임연구원