

24 GHz 대역 레이더의 평면 커버와 레이더 간의 이격 거리의 영향에 관한 연구

(Study on Effects of Separation Distance between Flat
Cover and Radar for 24 GHz Band Radar)

여 준 호¹⁾, 이 종 환²⁾, 류 정 탁^{3)*}
(Junho Yeo, Jonghwan Lee, and Jeong Tak Ryu)

요 약 본 논문에서는 두꺼운 레이더 커버와의 이격 거리가 24 GHz 대역 레이더 성능에 미치는 영향을 실험을 통해 연구하였다. 레이더 앞에 두께 10 mm의 폴리카보네이트 레이더 커버가 놓일 때 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리 변화에 따른 레이더 성능의 변화를 레이더 커버가 없을 때와 비교하였다. 레이더 성능 지표로는 레이더에서 측정된 거리를 사용하였고, 건물 내 복도에서 사람이 일정한 속도로 레이더로부터 멀리 벗어났다가 다시 가까워질 때 거리를 측정하였다. 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리는 2 mm, 5 mm, 20 mm로 정하여 실험하였다. 레이더 커버가 없을 때는 49.64 m까지 거리를 측정할 수 있었고 가장 오차가 적었다. 이격 거리가 2 mm일 때는 레이더 커버의 영향으로 37.61 m부터 거리 측정이 안되는 구간이 나와서 성능이 가장 좋지 않았다. 이격 거리가 5 mm와 20 mm로 증가시켰을 때는 49.56 m까지 거리가 측정되었으나 측정된 거리와 실제 거리와의 오차가 큰 구간이 레이더 커버가 없을 때 보다 많이 발생하였다.

핵심주제어: 레이더, 커버, 폴리카보네이트, 이격 거리, 실내 복도

Abstract In this paper, the effects of separation distance from a thick radar cover on the performance of 24 GHz band radar was studied through experiments. When a polycarbonate radar cover with a thickness of 10 mm was placed in front of the radar, the variations in radar performance according to the change in the separation distance between the radar and the radar cover was compared with the case without the radar cover. As a radar performance indicator, the distance measured from the radar was used, and the distance was measured using the radar when a person moves away from the radar at a constant speed in the hallway of the building and then approaches again. The separation distance between the radar and radar cover was tested at 2 mm, 5 mm, and 20 mm, respectively. When there was no radar cover, the distance could be measured up to 49.64 m and the error was the lowest. When the separation distance was 2 mm, there was a section where distance measurement was not possible starting from 37.61 m, so the performance was the worst. When the separation distance was increased to 5 mm and 20 mm, the distance was measured up to 49.56 m, but the section where the error between the measured distance and the expected distance was large occurred more often than when there was no radar cover.

Keywords: radar, cover, polycarbonate, separation distance, indoor hallway

* Corresponding Author: jryu@daegu.ac.kr
Manuscript received November 08, 2023 / revised December
11, 2023 / accepted January 23, 2024

1) 대구대학교 AI학부, 제1저자
2) 대구대학교 전자공학과, 제2저자
3) 대구대학교 전자공학과, 교신저자

1. 서 론

레이더는 전파이용 탐지 및 거리 측정(RADIo Detection And Ranging)의 줄임말로 특정 주파수 대역의 전자파를 송신한 후 물체에서 되돌아오는 반사파를 이용하여 물체의 거리, 방향, 각도, 속도를 측정하는 시스템이다 (Lin et. al, 2018, Lee et. al, 2023, Song et. al, 2020). 2차 세계대전에서 처음 개발된 이후로 군사 분야에서 감시용 및 무기 제어용의 목적으로 널리 사용되고 있으며 최근에는 비행기, 배, 자동차 등의 주행 제어 및 충돌 감지, 교통 통제, 기상 관측 등의 민간 분야에도 많이 사용되고 있다 (Edde, 1992). 레이돔(radome, 혹은 레이더 커버(cover))은 레이더(RADAR)와 돔(dome)의 합성어로 비, 눈, 바람, 먼지, 온도 등 환경적 영향으로부터 레이더 시스템이나 안테나를 보호하기 위한 덮개 혹은 하우징(housing)이며, 실내나 실외에서 레이더를 사용하기 위해 꼭 필요하다 (Qamar et. al, 2020).

레이돔은 외부 환경으로부터 레이더를 보호해야 하는 역할을 수행하지만, 레이더 시스템의 성능에 영향을 미치지 않기 위해 수신 및 송신 전자파에 투명해야 한다. 가장 간단한 레이돔은 균질한 반파장 두께의 유전체 재료를 갖춘 단일층 구조로 만들 수 있으며, 레이돔의 모양은 평면, 구형 또는 육면체이다 (Kumar et. al, 2021). 기상 관측이나 군사용 목적에 레이더는 구형 모양의 레이돔을 많이 사용하지만, 자동차 레이더는 평면 레이돔을 사용하며 최적의 레이돔 설계를 위한 연구가 활발히 되고 있다 (Karthikeya et. al, 2020, Liu et. al, 2019). 일반적으로 사용되는 레이돔 재료는 폴리부틸렌 테레프탈레이트(polybutylene terephthalate; PBT), 플렉시글래스(plexiglass), 폴리카보네이트(polycarbonate; PC), 폴리테트라플루오로에틸렌(polytetrafluoroethylene), 폴리스티렌(polystyrene), 아크릴로니트릴 부타디엔 스티렌(acrylonitrile butadiene styrene; ABS) 등과 같은 저손실 유전체 재료이다.

일반적으로 무한 크기의 평면 레이더 커버에 대해서 안테나에서 전파되는 전자파는 다중으로 반사되는 반사파들의 합과 투과파들의 합으로

표현할 수 있다 (Infineon Technologies AG, 2020; Kumar et. al, 2021). 레이더 커버의 두께가 유전체 내부 유효파장의 1/2의 배수일 때, 반사파의 합이 최소가 되고 투과파의 합은 최대가 되는 특성이 주기적으로 나타난다. 본 연구에서 사용한 폴리카보네이트의 24 GHz 대역의 중심주파수인 24.125 GHz에서 비유전율을 2.9로 가정하며, 반사파가 최소가 되고 투과파가 최대가 되는 최적의 폴리카보네이트 레이더 커버 두께는 아래 공식에 의해 3.651 mm의 정수배이다 (RFbeam Microwave GmbH, 2023).

$$T_m = \frac{n\lambda_m}{2} = \frac{n\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (2)$$

여기서 T_m 은 최적의 레이더 커버 두께, n 은 정수, λ_m 은 레이더 커버 유전체의 유효 파장, λ_0 은 자유공간 파장, ϵ_r 은 레이더 커버 유전체의 비유전율, c 은 자유공간 빛의 속도, f_0 은 레이더의 동작 주파수이다.

안테나와 레이더 커버 사이의 거리는 아래 공식에 의해 자유공간 파장의 1/2의 정수배로 6.218 mm의 정수배이다 (RFbeam Microwave GmbH, 2023).

$$d_m = \frac{n\lambda_0}{2} \quad (3)$$

본 논문에서는 폴리카보네이트로 만든 두께 10 mm의 두꺼운 레이더 커버가 24 GHz 상용 레이더 앞에 놓일 때, 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리(separation distance) 변화에 따른 레이더 성능의 변화를 연구하였다. 일반적으로 레이더 커버의 두께는 식 (1)의 최적 두께로 제작을 하지만 특수한 경우에 기구적인 내구성 과 제작의 편의성을 위해 최적의 두께보다 두껍고 정수배가 아닌 형태로 제작될 수 있다. 본 논문에서 사용한 레이더 커버의 두께 10 mm는 식 (1)의 최적 두께보다 약 2.74배 커서 두꺼운

것으로 볼 수 있다. 이러한 두꺼운 레이더 커버와 레이더 사이의 이격 거리의 변화가 레이더에 미치는 영향을 레이더에서 측정된 거리를 레이더 성능 지표로 사용하여 분석하였다. 건물 내 복도에서 사람이 일정한 속도로 레이더로부터 멀리 벗어났다가 다시 가까워질 때 거리를 측정하였다. 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리는 자유공간 파장의 1/2 보다 매우 작은 2 mm, 자유공간 파장의 1/2 근처인 5 mm, 자유공간 파장의 1/2의 3배보다 조금 큰 20 mm로 정하여 실험하였다.

2. 24 GHz 대역 레이더 시스템 구성

2.1 IMD-2000 레이더

움직이는 사람의 거리를 측정하기 위해 IMD-2000 레이더를 사용하였다. IMD-2000은 독일 이노센트(InnoSenT)사의 신호 처리 기능이 내장된 24 GHz 주파수 대역에서 동작하는 레이더 센서이다 (InnoSenT GmbH, 2023). FSK (frequency shift keying) 변조를 사용하여 물체의 속도, 이동 방향 및 거리를 측정할 수 있다. 0.5m에서 최대 50m 거리의 탐지 범위를 가지며, 0.23km/h ~ 28.43km/h의 속도 측정이 가능하다. 그림 1은 IMD-2000의 치수와 외형 사진이 나타나 있다.

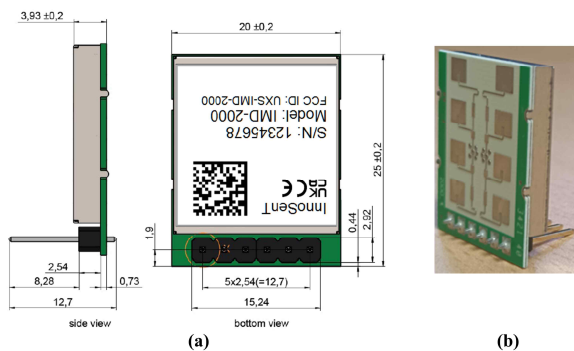


Fig. 1 IMD-2000: (a) mechanical drawings (InnoSenT GmbH, 2023) and (b) picture

레이더의 길이는 25 mm이고, 폭은 20 mm이

며, 두께는 3.93 mm이다. 외부 연결 핀의 길이를 고려하면 두께는 12.7 mm이다.

레이더 커버는 비유전율 2.9인 폴리카보네이트(polycarbonate)로 제작되었고, 길이 53.6 mm, 폭 45.6 mm, 두께 5.5 mm인 전면부와 길이 44.6 mm, 폭 25.6 mm, 두께 4.5 mm인 후면부가 결합된 곡률이 0인 평면 구조이고 전체 두께는 10 mm이다. 레이더 커버의 전면부와 후면부의 모서리는 둥글게 라운딩되어 있다. 그림 2에 레이더 커버의 치수와 외형 사진이 나타나 있다.

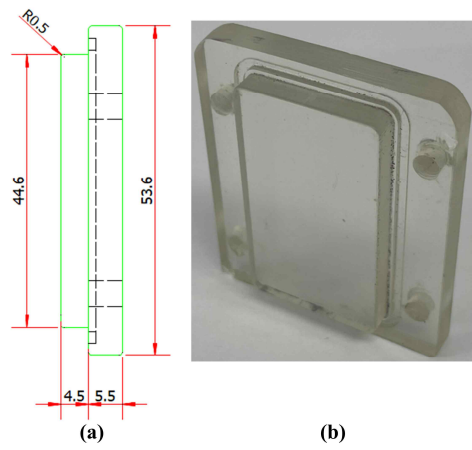


Fig. 2 Polycarbonate radar cover: (a) mechanical drawings and (b) picture

2.2 아두이노 메가 보드를 이용한 레이더 측정 거리 수집

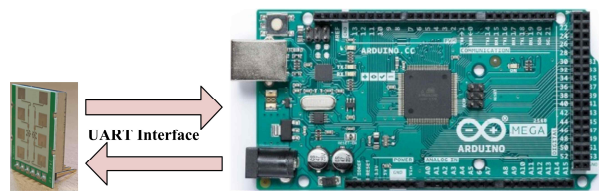


Fig. 3 UART interface between IMD-2000 radar and arduino Mega board

IMD-2000 레이더에서 측정된 거리 정보를 수집하기 위해 그림 3과 같이 아두이노 메가 보드와 UART(universal asynchronous receiver/transmitter; 범용 비동기 송수신기) 인터페이스를 이용하여 연결하였다.

그림 4에 나타난 측정 데이터 수집을 위한 구성도와 같이 IMD-2000 레이더를 통해 측정된 거리 정보를 300 msec 간격으로 UART 인터페이스를 통해 아두이노 메가 보드로 전송하고, 날짜, 시간, 카운트 회수, 거리 등의 전송 정보를 엑셀 파일로 노트북에 저장한다.

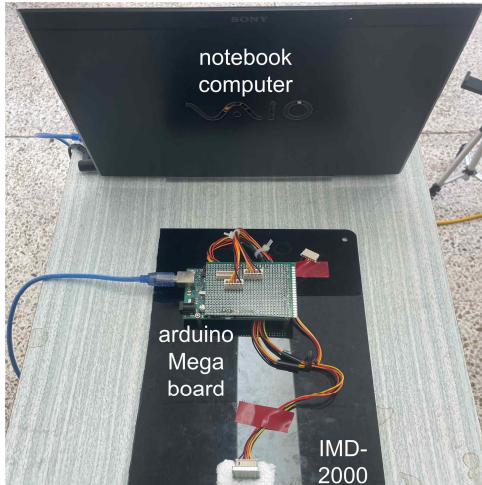


Fig. 4 Measured data acquisition system using IMD-2000 radar, arduino Mega board, and notebook computer

3. 실험결과

3.1 실험 환경

실험 환경은 그림 5와 같이 건물 내 복도에서 사람이 일정한 속도로 IMD-2000 레이더로부터 50 m 이상 멀리 벗어났다가 다시 가까워질 때 거리를 측정하였다.

멀리 벗어날 때와 가까워질 때의 평균 속도는 1 m/sec 내외이며, 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리가 2 mm, 5 mm, 20 mm일 때 측정된 거리 정보를 레이더 커버가 없을 때와 비교하였다. 그림 6은 4가지 경우에 대한 사진이 나타나 있다. 레이더와 커버 고정을 위해 전자파 전파에 영향이 적은 스티로폼(styrofoam, expanded polystyrene)에 홈을 파서 고정하였다. IMD-2000 레이더는 복도 바닥에서 높이 1 m 위의 책상에 놓고 거리를 측정하였다.



Fig. 5 Hallway experiment setup in building

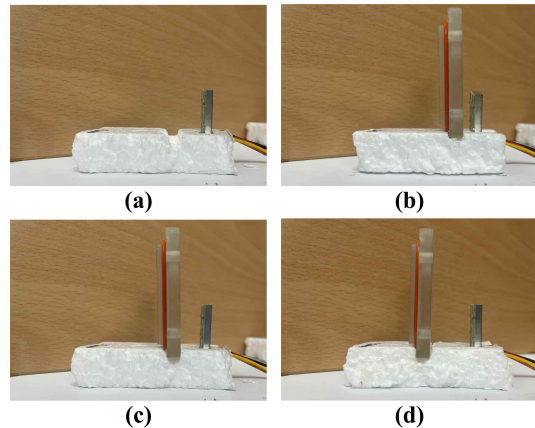


Fig. 6 Separation distance between radar and radar cover: (a) without radar cover, (b) 2 mm, (c) 5 mm, and (d) 20 mm

3.2 결과분석

4가지의 경우에 대해서 각각 5회 실험하여 사람이 레이더로부터 멀어질 때와 다시 가까이 올 때 실제 거리와 측정 거리 사이의 오차의 절대값의 합을 각각 계산하여 평균값을 오차율과 함께 표 1에 비교하였다.

$$\text{오차합} = \sum |\text{실제거리} - \text{측정거리}| \quad (4)$$

$$\text{오차율} = \sum \frac{|\text{실제거리} - \text{측정거리}|}{\text{실제거리}} \times 100(\%) \quad (5)$$

실험 결과, 레이더 커버가 없을 때는 49.64 m 까지 거리를 측정할 수 있었고, 실제 거리와 측정 거리의 오차가 가장 적었다. 실제 거리는 평균 속도를 이용하여 계산하였다. 이격 거리가 2 mm일 때는 레이더 커버의 영향으로 안테나 이득이 줄어들어 37.61 m부터 거리 측정이 안되는 구간이 나왔다. 이격 거리가 5 mm와 20 mm로 증가시켰을 때는 49.56 m까지 거리가 측정되었으나 실제 거리와 측정 거리의 오차가 레이더 커버가 없을 때 보다 더 크고 이격 거리가 5 mm일 때가 20 mm일 때 보다 오차가 더 적게 나타났다. 이것은 자유공간 파장의 1/2 근처인 5 mm일 때가 레이더 성능에 영향을 가장 덜 미치기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1 Experiment results(1)

separation distance (mm)	error sum when far away	error sum when approaching	maximum measured distance (m)
without cover	148 (7.5%)	158 (9.2%)	49.64
2	479 (19.9%)	280.5 (12.8%)	37.61
5	155.5 (8.2%)	190.5 (10.5%)	49.56
20	207 (14.2%)	185.5 (10.3%)	49.56

표 2는 실제 거리와 측정거리의 오차가 3 m 이상인 경우의 횟수와 거리 측정이 안되는 경우의 횟수도 5회 실험 평균값을 비교하였다. 멀어질 때와 가까워질 때 3 m 이상 오차 횟수와 측정이 안되는 횟수를 더하면 레이더 커버가 없을 때 횟수가 가장 적고 그 다음으로 이격 거리 5 mm, 20 mm, 2 mm 순으로 적게 나타났다. 이격 거리가 2 mm일 때는 커버와 레이더와의 거리가 너무 가까워서 반사파가 커지고 레이더 안테나 성능에 영향을 많이 미치는 것으로 판단된다. 이격 거리가 자유공간 파장의 1/2 근처인 5 mm일 때와 자유공간 파장의 1/2의 3배보다 조금 큰 20 mm일 때는 이격 거리 2 mm일 때 보다 성능이 좋게 나타났다. 그리고 이격 거리가 5 mm일 때가 20 mm일 때 보다 조금 더 성능이 좋게 나타나 이격거리가 자유공간의 1/2 파

장 근처일 때가 성능이 가장 좋은 것으로 판단된다.

Table 2 Experiment results(2)

separation distance (mm)	number of errors over 3m when far away	number of errors over 3m when approaching	not measurable	total
without cover	12	14	6	32
2	13	17	62	92
5	16.5	18.5	14	49
20	23	28.5	6.5	58

그림 7에서 그림 10까지는 4가지 경우에 대해서 레이더로 측정된 거리를 실제 거리와 비교한 그래프를 나타내고 있다. 그림에서 점선은 실제 거리이고 실선은 레이더로 측정된 거리이다.

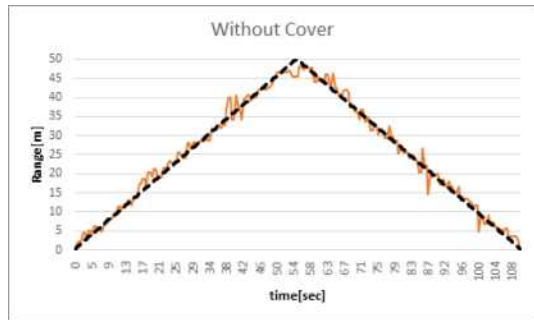


Fig. 7 Measured distance example without cover

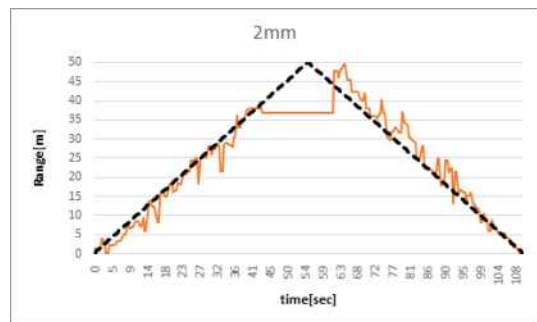


Fig. 8 Measured distance example for separation distance = 2 mm

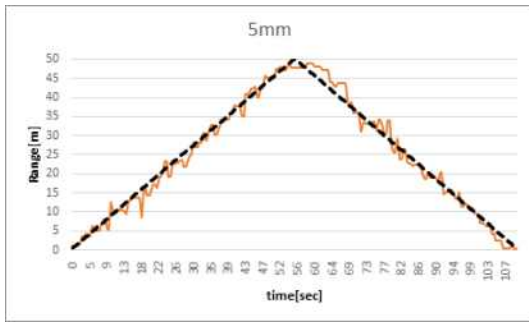


Fig. 9 Measured distance example for separation distance = 5 mm

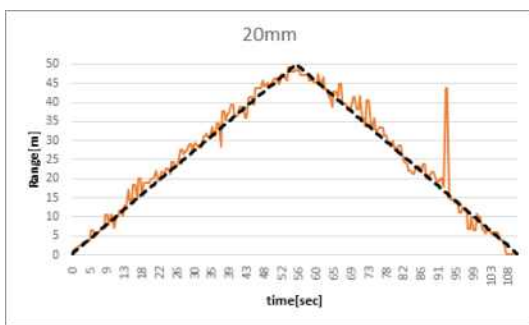


Fig. 10 Measured distance example for separation distance = 20 mm

레이더 커버가 없을 때 오차가 가장 적으며, 그 다음으로 이격 거리 5 mm일 때가 오차가 적은 것을 알 수 있다. 이격거리 20 mm일 때는 5 mm일 때 보다 멀어질 때 오차가 더 크고 가까워질 때 오차는 비슷한 것으로 나타났다. 이격 거리가 2 mm일 때는 최대 측정거리가 줄어들고 오차가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 레이더 커버가 레이더 성능에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하였다. 24 GHz 레이더 앞에 두께 10 mm의 폴리카보네이트 재질의 레이더 커버가 놓일 때 레이더와 레이더 커버 사이의 이격 거리 변화에 따른 레이더 성능의 변화를 레이더 커버가 없을 때와 비교하였다. 레이더에서 측정된 거리를 레이더 성능 지표로 사용하여 건물 내 복도에서 사람이

일정한 속도로 레이더로부터 멀리 벗어났다가 다시 가까워질 때 레이더 커버가 없을 때, 레이더 커버가 있을 때 이격 거리가 2 mm, 5 mm, 20 mm일 때 4가지 경우에 대해 측정된 거리를 통해 실제 거리와 비교하였다.

최대 측정 거리, 실제 거리와 측정 거리의 오차, 3 m 이상 오차 횟수, 측정불가 회수 등을 비교한 결과, 레이더 커버가 없을 때가 가장 성능이 좋고 그 다음으로 이격 거리 5 mm, 20 mm, 2 mm 순으로 성능이 좋은 것으로 나타났다. 따라서 폴리카보네이트로 만든 두께 10 mm의 두꺼운 레이더 커버와 레이더 사이의 이격 거리는 자유공간 파장의 1/2 근처인 5 mm로 사용하는 것이 레이더 커버를 사용하지 않았을 때와 비교할 때 성능이 가장 적게 저하된 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

References

- Edde, B. (1992). *Radar: Principles, Technology, Applications*, New Jersey, Prentice Hall, 1992.
- Infineon Technologies AG (2020). *Radar Wave Propagation through Materials: Walls and Radomes*, <https://www.infineon.com/cms/en/product/gated-document/whitepaper-radar-wave-propagation-through-materials-5546d462766cbe8601768a120c6d36cf/> (Accessed on Nov. 2nd, 2023)
- InnoSenT GmbH (2023). *IMD-2000 - RADAR SENSOR*, <https://www.innosent.de/en/sensors/imd-2000-radarsensor/> (Accessed on Nov. 2nd, 2023)
- Karthikeya, G. S., Koul, K. S., Poddar, A. K. and Rohde, U. (2020). Path Loss Compensated Millimeter Wave Antenna Module Integrated with 3D-printed Radome, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30. e22347.
- Kumar, C., Mohammed, H. U. R. and Peake, G. (2021). Mmwave Radar Radome Design

Guide, Application Report, *Texas Instruments*, Aug. 2021

Lee, J., Jin, Y., Song, S. and Ko, S. (2023). Experimental Test and Performance Evaluation of Mid-Range Automotive Radar Systems Using 2D FFT ROI, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 28(1), 1-8

Lin, J., Li, C., Chang, C. C., Tsai, T., Zito, D. and Chang, S. F. (2018). Review – Semiconductor Integrated Radar for Sensing Applications, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 7(7), 3126 - 3142.

Liu, J., Li, L., Zuo, Y., Chen, H. and Ni, S. (2019). Analysis of Performance Degradation Introduced by Radome for High-precision GNSS Antenna, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019, 1529656.

Qamar, Z., Salazar-Cerreno, J. L. and Aboserwal, N. (2020). An Ultra-wide Band Radome for High-performance and Dual-polarized Radar and Communication Systems, *IEEE Access*, 8, 199369-199381.

RFbeam Microwave GmbH (2023). RADOME (Radar Enclosure), https://rfbeam.ch/wp-content/uploads/dlm_uploads/2023/05/AN-03-Radome.pdf (Accessed on Nov. 2nd, 2023)

Song, S., Kim, S., Jin, Y. S. and Lee, J. (2020). Enhancement Techniques of Color Segmentation for Detecting Missing Persons in Smart Lighting System Using Radar and Camera Sensors, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 25(3), 53-59



여 준 호 (Junho Yeo)

- 종신회원
- 경북대학교 전자공학과 공학사
- 경북대학교 전자공학과 공학 석사
- 미국 Pennsylvania State University 전기공학과 공학박사
- 국방과학연구소 연구원
- 미국 Pennsylvania State University 박사후 과정
- 한국전자통신연구원 RFID 시스템연구팀 선임 연구원
- (현재) 대구대학교 AI학부 교수
- 관심분야: RFID 및 광대역 안테나, 고감도 마이크로파 센서, Chipless RFID, 레이더 센서



이 종 환 (Jonghwan Lee)

- 학생회원
- (현재) 대구대학교 정보통신대학 전자공학과 학생
- 관심분야: 반도체 소자, 나노 기술



류 정 탁 (Jeong Tak Ryu)

- 종신회원
- 1999년 : 오사카대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년 3월~현재: 대구대학교 전자전기공학부 교수
- 관심분야 : 나노기술 및 센서 시스템