

# 포인트 클라우드 이미징을 위한 가상 배열 확장 기반 D-Band FMCW 레이더

## D-Band FMCW Radar with Virtual Array Expansion for Point Cloud Imaging

이시준 · 문관우 · 강석원 · 양동열 · 윤정배 · 최서령 · 서은진 · 김병성\*

Si-jun Lee · Kwan-Woo Moon · Seuk-Won Kang · Dong-Yeol Yang · Jeongbae Yoon ·  
Seo-Rueong Choi · Eun-Jin Seo · Byung-Sung Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 28 nm CMOS 기반 D-band 송수신 칩을 활용하여 FMCW(Frequency Moudlated Continuous Wave) 레이더 시스템을 구현하고, 단일 송신 채널 이동을 통한 가상 배열 기반 ULA를 구성하여 방위각 해상도와 다중 표적 분리 성능을 검증하였다. 거리 측정에서는 표적 거리에 대한 피크 결과를 통해 제안한 시스템의 기본적인 거리 검출 기능을 확인할 수 있었다. 또한 실내 반사체 환경에서 얻은 데이터를 포인트 클라우드로 변환한 결과, 기둥 및 주변 구조물이 분리되어 나타났고, 표적이 배치된 경우에는 코너 리플렉터 신호가 추가되어 배경 산란과 명확히 구분되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 제안한 시스템이 다채널 MIMO 배열을 구현하기 이전 단계에서 고해상도 이미징 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 유효한 방법임을 보여주며, 향후 ADAS, 무인 이동체, 보안/감시 시스템 등 다양한 응용 분야에서 고해상도 이미징 레이더 설계에 활용될 수 있음을 시사한다.

### Abstract

This study proposed an FMCW(Frequency Moudlated Continuous Wave) radar system using a 28-nm CMOS D-band transceiver chip and verified its angular resolution and multi-target separation performance by constructing a virtual ULA through the sequential movement of a single transmit channel. Range measurements confirmed the basic range detection capability of the proposed system through the peak results at the target distances. In addition, the point cloud analysis of the indoor reflective environment data showed that the columns and surrounding structures were separated, and when a target was placed, the corner reflector signal appeared and was distinguished from the background scattering. These results demonstrated that the proposed system provided a method for quantitatively evaluating high-resolution imaging performance prior to multi-channel MIMO implementation and suggested its applicability to high-resolution imaging radar design for ADAS, unmanned vehicles, and security/surveillance systems.

Key words: D-Band, FMCW Radar, ULA, Point Cloud, High-Resolution Imaging

「이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0023704, 2025년 산업혁신인재성장지원사업).」  
「본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 재난안전 임무용 육해공 무인이동체 개발사업을 통해 수행되었음(RS-2025-02908357).」  
성균관대학교 반도체융합공학과(Department of Semiconductor Convergence Engineering, Sungkyunkwan University)

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

· Manuscript received September 15, 2025 ; Revised October 2, 2025 ; Accepted November 14, 2025. (ID No. 20250915-102)

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

## I. 서 론

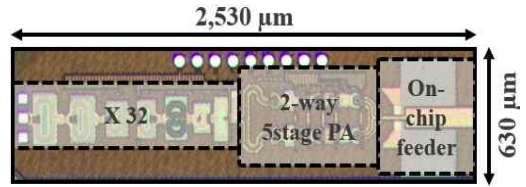
레이다 시스템은 다양한 환경에서 물체의 거리, 속도, 각도 정보를 비접촉 방식으로 획득할 수 있어 차량용 운전자 보조 시스템(ADAS), 무인 이동체, 보안/감시 시스템 등 폭넓은 분야에서 활용되고 있다<sup>[1]</sup>. 최근에는 고해상도 센싱과 이미징 기술에 대한 수요가 증가함에 따라, 레이다의 주파수 대역이 점차 mmWave 및 서브-테라헤르츠(Sub-THz) 영역으로 확장되고 있으며, 특히 D-band(110~170 GHz) 대역은 기존 상용 대역 대비 파장이 짧기 때문에, 동일한 물리적 안테나 크기에서도 유효 개구 확대를 통해 각도 해상도 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 소형/고집적 모듈 구현에 유리하여 다채널 송수신 모듈 및 배열 확장 연구에 적합한 주파수 대역으로 주목받고 있다. 그러나 짧은 파장 특성으로 인한 전송 손실, 대기 흡수, 패키징 기생 효과 등은 시스템 안정성 확보에 한계를 야기한다. 특히 파장이 짧아질수록 칩 간 배열 간격이 좁아져 렌즈 패키징, 안테나-인-패키징(AiP) 등 다양한 기술을 적용하더라도 MIMO(multiple input multiple output) 어레이 구성을 위한 물리적 제약과 성능 한계가 뒤따른다<sup>[2]</sup>. 더불어, 안테나 배열을 통한 각도 해상도 향상은 물리적 크기, 채널 집적도, 전력 소비와 직결되므로 단순히 주파수를 상승시키는 것만으로는 해결하기 어렵다<sup>[3-5]</sup>. 이러한 한계를 고려할 때, 목표로 하는 각도 해상도와 다중 목표물 탐지 성능을 확보하기 위해서는 전체 배열을 구현하기 전 사전 검증이 필요하다.

본 연구에서는 28 nm CMOS 공정을 이용해 자체 개발한 송수신 칩을 이용한 D-band FMCW 레이다 시스템을 제시한다. 먼저 거리 측정을 수행하여 명확한 피크 검출을 확인함으로써 기본적인 거리 검출 기능을 검증하였다. 이후 단일 송신 채널 이동을 통한 가상 배열 기반 ULA(uniform linear array)를 구성하여 목표로 하는 각도 해상도 및 다중 목표물 탐지 성능을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 마지막으로 포인트 클라우드 기반 다중 목표물 탐지 결과를 제시한다.

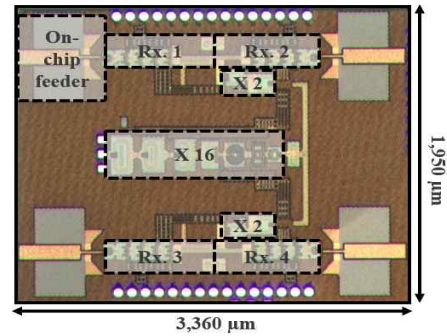
## II. 레이다 송수신 모듈 구성

### 2-1 레이다 송수신칩

그림 1 및 그림 2는 각각 칩과 D-band 송수신칩의 블록

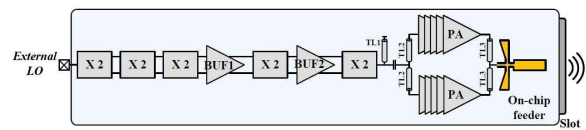


(a) 1 채널 송신칩 사진  
(a) Chip microphotographs of 1Tx

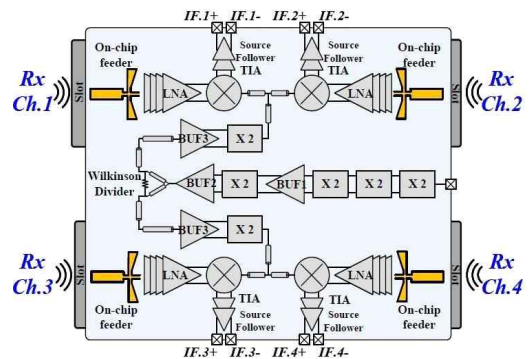


(b) 4 채널 수신칩 사진  
(b) Chip microphotographs of 4Rx

그림 1. 1 채널 송신칩 사진 및 4 채널 수신칩 사진  
Fig. 1. Chip microphotographs of 1Tx and 4Rx.



(a) 1 채널 송신칩 블락도  
(a) Block diagram of 1Tx chipset



(b) 4 채널 송신칩 블락도  
(b) Block diagram of 4Rx chipset

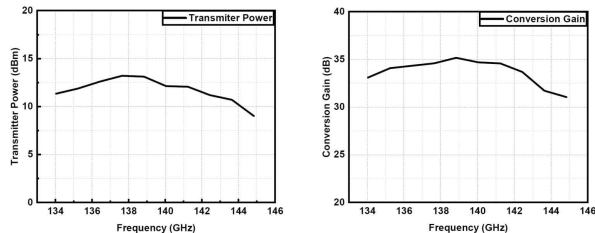
그림 2. 1 채널 송신칩 및 4 채널 수신칩 블락도  
Fig. 2. Block diagram of 1Tx and 4Rx chipset.

다이어그램의 사진이다. 해당 칩의 경우 28 nm CMOS 공정으로 자체 개발하였다. 단일 채널 송신칩은 32-채배기, 전력증폭기, 칩상 급전기로 구성되고, 4 채널 수신칩은 32-채배기, 저잡음 증폭기, 하향 변환기, 트랜스 임피던스 증폭기로 구성된다. 송신칩과 수신칩의 크기는 각각  $2,530 \times 630 \mu\text{m}$  와  $3,360 \times 1,950 \mu\text{m}$ 이다. 송신칩과 수신칩의 경우 32-채배기를 2-채배기에 먹수배하는 방식으로 체배를 달성한다. 초기 16-채배의 경우 상보적 2-채배기를 먹수배하며, 마지막 2-채배기의 경우 푸쉬-푸쉬 2-채배기를 사용한다. 수신칩의 경우 16-채배기를 4개 채널이 공통으로 사용하며, 마지막 2-채배기를 2개 채널이 공통으로 사용한다. 송신칩의 전력 증폭기는 5단 증폭기를 2-way로 결합하여 높은 출력 전력을 확보한다. 5단 증폭기의 경우 4단 차동 공통-소스 증폭기와 마지막 단으로 차동 캐스코드 증폭기로 구성된다. 수신칩의 저전력 증폭기는 4단 공통-소스 증폭기로 구성된다.

측정된 송신칩의 출력은 139 GHz에서 13.1 dBm이며 소모 전력은 414.4 mW이다. 수신칩은 139 GHz에서 34.7 dB의 변환 이득을, 3 MHz에서 10.1 dB의 잡음 지수를 갖는다. 그림 3은 송신칩과 수신칩의 측정 결과를 보여준다. 송신칩과 수신칩 모두 over-the-air로 측정하였다.

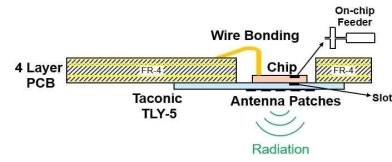
### 2-2 송수신 안테나 및 패키징

그림 4는 송수신칩과 패치 안테나를 통합한 구조를 나타낸다. 안테나 하부 슬롯을 통한 직접 급전 방식을 적용하여 기생 방사 손실을 최소화하였으며, 접지 스텔브와 칩 박막화를 통해 전송 손실을 추가로 억제하였다. 이러

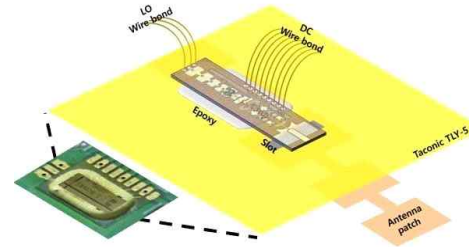


(a) 송신칩 측정 결과 (b) 수신칩 측정 결과  
 (a) Measurement results of 1Tx (b) Measurement results of 4Rx

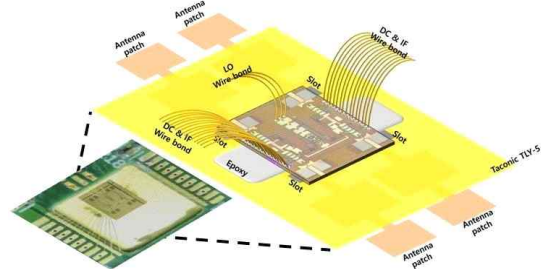
그림 3. 송수신칩 측정 결과  
 Fig. 3. Measurement results of Tx chip and Rx chip.



(a) 통합 패키징 구조  
 (a) Integrated packaging structure



(b) 송신칩셋 및 안테나 패키징 구조  
 (b) Packaging structure of Tx chipset and antenna



(c) 수신칩셋 및 안테나 패키징 구조  
 (c) Packaging structure of Rx chipset and antenna

그림 4. 송수신칩셋 및 안테나 패키징 구조  
 Fig. 4. Packaging structure of TRx chipset and antenna.

한 구조는 PCB 캐비티와 비전도성 에폭시 접합만으로 구현 가능해 패키징 공정을 단순화하고 모듈 집적 효율을 높일 수 있다<sup>[6],[7]</sup>. 플립칩 방식은 칩 하부가 기판에 부착되는 구조로 MIMO 구성 시 전력 밀도가 높아지면서 발열이 심화되는데, 제안하는 구조는 칩 후면이 안테나 그라운드 기판과 직접 접촉되어 MIMO 어레이 구현 시 열 방출 측면에서 유리하다.

그림 5는 송수신안테나 빔 패턴의 시뮬레이션 결과이다. 송신 안테나의 빔 조향각은 수평 66.87°, 수직 25.1°를 만족하고, 안테나 이득은 139 GHz에서 11.02 dBi이며, 대

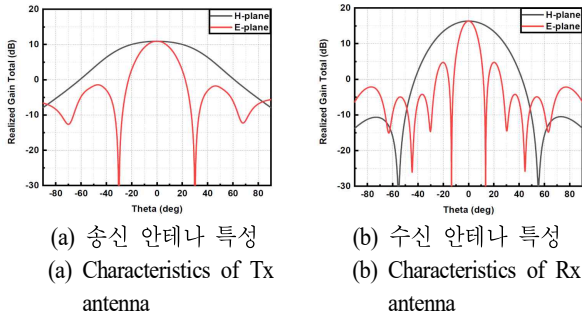


그림 5. 송수신 안테나 특성 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Characteristics of Tx and Rx antenna.

역폭은 5.69 GHz이다. 수신 안테나의 빔 조향각은 수평 73.43°, 수직 23.46°를 만족하고, 안테나 이득은 139 GHz에서 10.3 dBi이며, 대역폭은 5.24 GHz이다.

### 2-3 송수신 모듈 하드웨어 구성

그림 6은 구현한 1 채널 송신 모듈과 4 채널 수신 모듈의 사진이다.

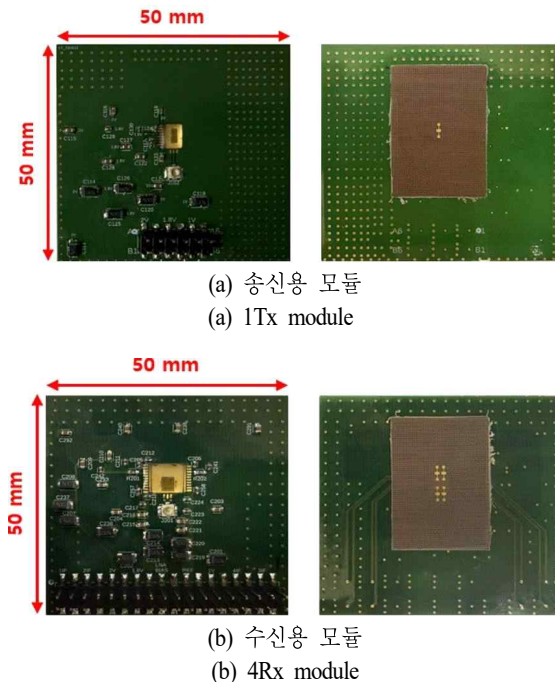


그림 6. 140 GHz 송수신용 모듈  
Fig. 6. 140 GHz TRx module.

### Ⅲ. 가상 배열 기반 방위각 분해능 시뮬레이션

레이다 시스템에서 각도 해상도를 높이기 위해서 일반적으로 다수의 안테나 배열이 요구되지만, 물리적 제약으로 배열 크기를 무한정 확장하기는 어렵다. 이를 보완하기 위해 가상 배열이 제안되며, 이는 실제 안테나 수를 줄이면서도 유효 개구를 확대할 수 있다. 본 연구에서는 송신 EIRP 특성과 수신 이득이 최대가 되는 주파수 지점인 139.2 GHz를 중심주파수로 설정하였다. 수신칩의 방위각 방향 안테나 간격은 1.332 mm로 설계되었으며, 이는 139.2 GHz에서 약 0.618 λ에 해당한다. 이를 기준으로 송신 채널을 확장하면, 수신칩 간격과 결합하여 가상 ULA(uniform linear array)가 형성된다. 유효 개구 길이는 식 (1)로 표현되며<sup>[8]</sup>, 배열 개수가 증가할수록 유효 개구가 선형적으로 확장된다.

$$D_{eff} = (N_{Tx} \times N_{Rx})d \quad (1)$$

또한, ULA 배열 안테나의 3 dB 빔폭은 식 (2)로 근사된다<sup>[8]</sup>. 따라서 송신 채널 수 확장은 곧 빔폭 축소와 해상도 개선으로 이어진다.

$$\theta_{3dB} \approx \frac{0.886\lambda}{D_{eff}} \quad (2)$$

그림 7의 시뮬레이션 결과에 따르면, 송신 채널 수 확장에 따라 3 dB 빔폭이 표 1과 같이 감소하였다.

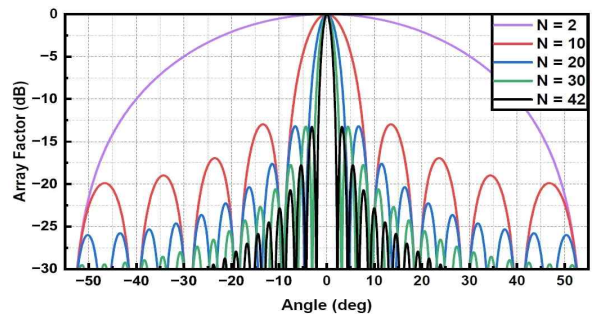


그림 7. 가상 배열 확장에 따른 방사 패턴 및 빔폭 변화  
Fig. 7. Radiation pattern and beamwidth variation with virtual array expansion.

표 1. 송신 채널 수에 따른 3 dB 빔폭  
Table 1. 3 dB beamwidth according Tx channels.

Number of Tx	3 dB beamwidth
$N_{Tx}=1$ (2 elements)	$\theta_{3dB} \approx 47.7^\circ$
$N_{Tx}=5$ (10 elements)	$\theta_{3dB} \approx 8.3^\circ$
$N_{Tx}=10$ (20 elements)	$\theta_{3dB} \approx 4.1^\circ$
$N_{Tx}=15$ (30 elements)	$\theta_{3dB} \approx 2.7^\circ$
$N_{Tx}=21$ (42 elements)	$\theta_{3dB} \approx 1.95^\circ$

#### IV. 기저대역 모듈 구성 및 신호처리

그림 8은 기저대역 모듈 하드웨어 구성을 나타낸다. 기저대역 모듈은 기준신호 공급 보드, 데이터 수집 보드로 구성된다. 기준신호 공급 보드는 송수신 칩 구동용 400  $\mu$ s 처프 신호를 PLL과 VCO로 생성하며, 2.167~2.183 GHz 대역의 신호를 송수신칩에서 믹서를 통해 138.7~139.7 GHz의 D-band 신호로 변환한다. 송수신칩은 이보다 넓은 대역을 지원하지만, 실제 대역폭 설정 시에는 거리 해상도( $\Delta R$ )와 최대 측정 거리( $R_{max}$ ) 간의 관계, ADC 샘플링 주파수( $f_s$ ) 제약을 함께 고려하였다. 거리 해상도는 식 (3)으로 표현되며, 여기서  $c$ 는 광속,  $B$ 는 FMCW 처프 신호의 대역폭이다.  $B=1$  GHz 기준 15 cm로 계산된다. 최대 측정 거리는 IF 대역폭과 ADC 샘플링 주파수에 의해 결정되며, 식 (4)로 표현된다. 여기서  $S$ 는 처프 신호의 기울기이다. 식 (4)를 이용해 최대 측정 거리를 계산하면  $B=1$  GHz 기준 150 m에

해당한다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \tag{3}$$

$$R_{max} = \frac{f_s}{2} \frac{c}{2S} \tag{4}$$

본 시스템에서는 150 m까지의 측정을 고려하여 1 GHz 대역폭을 사용하였다. 데이터 수집 보드는 수신칩에서 하향 변환된 IF 4채널 신호를 12 bit, 5 MS/s ADC로 디지털화하며, 내장 저역통과필터(LPF)와 가변이득증폭기(VGA)를 통해 신호 레벨 증폭 및 불필요한 고주파 성분을 제거한다. 디지털 신호는 FPGA로 전달되어 실시간 저장 및 전송되며, 이후 PC와 연결되어 후처리와 알고리즘 검증이 수행된다. 기저대역 보드는 이와 같은 구성을 통해 RF 보드와 상위 제어 시스템 간 인터페이스 역할을 담당한다.

표적의 거리 및 방위각 추정은 FFT(fast fourier transform) 기반으로 수행된다. FPGA에서 수신한 IF 신호를 1D-FFT하여 주파수 도메인에서 신호 크기 및 위상 정보를 얻고, 표적 거리 인덱스를 탐지한다. 표적 거리 인덱스의 위상 정보를 가상 배열 각 요소에서 추출하여 FFT를 수행하면 표적의 도래각을 계산할 수 있다. 이를 통해 거리-각도 좌표상에서 표적을 추정하고, 거리-각도 맵을 극좌표계 ( $r, \theta$ )에서 직교 좌표계 ( $x, y$ )로 변환하여 2D 포인트 클라우드로 시각화한다.

#### V. 전체 레이더 시스템 구성 및 측정 셋업

아두이노 보드로 제어 가능한 리니어 액츄에이터 위에 송신 모듈을 장착하여 방위각 방향으로 2 dx 간격마다 이동시키며 원하는 위치에서 신호를 방사할 수 있도록 구현하였다. 사용한 리니어 액츄에이터는 100  $\mu$ m 수준의 위치 제어 정밀도를 갖추고 있어, 송신 모듈 이동 간격의 오차를 최소화하며 반복적인 위치 이동이 가능하다. 이를 통해 실제 다중 송신 안테나 배열을 사용하지 않고도 송신 위치를 순차적으로 변화시켜 동일한 효과의 가상 ULA를 형성하였다. 이 방식은 제한된 하드웨어로도 다중 안테나 배열을 구현한 것과 동일한 개구 확장을 가능하게 하며, 결과적으로 유효 개구를 증가시켜 각도 해상도를 향상시킬 수 있다. 레이더 시스템의 파라미터들은 표 2, 측정 셋업은 그림 9와 같다.

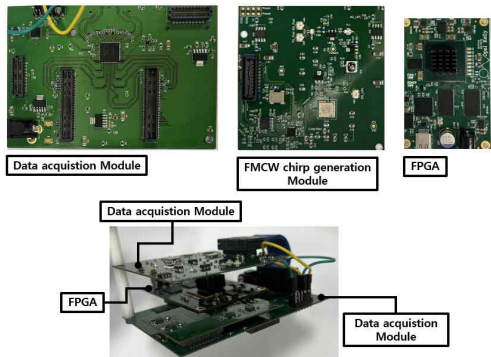


그림 8. 기저대역 보드 하드웨어 구성  
Fig. 8. Baseband board hardware configuration.

표 2. 레이더 시스템 파라미터  
Table 2. Radar system parameter.

Parameter	Value
$P_t$	13.1 dBm
$G_t$	11.02 dBi
$G_r$	10.3 dBi
Rx conversion gain	34.7 dB
VGA gain	20 dB
ADC sampling rate	5 MHz
Sampling point	2,000
Chirp bandwidth	1 GHz (138.7~139.7 GHz)
Chirp time	400 us
IF bandwidth	2.5 MHz

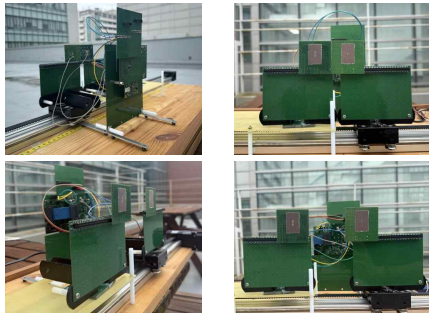


그림 9. 레이더 시스템 하드웨어 및 측정 셋업  
Fig. 9. Radar system hardware configuration and measurement setup.

VI. 측정 결과

거리 측정은 단일 코너 리플렉터(RCS:  $15 m^2$ )를 표적으로 사용하였다. 그림 10에 보인 바와 같이 리플렉터는 삼각대를 이용해 설치하였으며, 동일한 방위각 측상에서 각각 6.1 m와 8.4 m 지점에 위치시켜 측정을 진행하였다.

그림 11의 결과에서 두 거리 지점 모두에서 명확한 피크가 관찰되었으며, 레이더 방정식에 따른 이상적인 감쇠 곡선과 측정 데이터가 일치함을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안한 레이더 시스템이 안정적으로 거리 검출을 수행할 수 있음을 검증하였다. 기본적인 거리 검출 성능을 확인한 이후, 방위각 해상도 및 다중 표적 분리 성능을 검



그림 10. 표적 거리 탐지 측정 환경  
Fig. 10. Target range detection measurement environment.

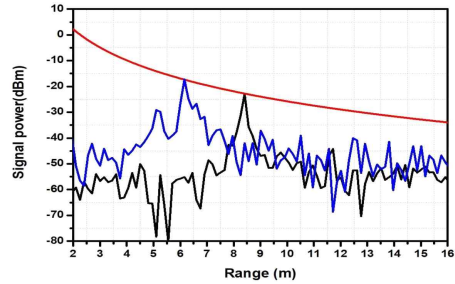


그림 11. 표적 거리 탐지 결과  
Fig. 11. Results of target range detection.

증하기 위한 실험을 추가적으로 진행하였다. 리니어 액츄에이터를 통해 송신 모듈을 이동시키면서 가상 배열의 크기를 단계적으로 확장하였고, 송신 모듈의 위치에 따른 수신 데이터 써밍을 진행하면서 방위각 해상도의 변화를 측정하였다. 표적은 동일한 거리 측상에 두 개의 단일 코너 리플렉터(RCS:  $15 m^2$ )를 배치하였다.

그림 12는 측정 환경, 그림 13은 실제 측정 데이터를 이용해 도출한 빔 패턴 결과로, 가상 배열 크기에 따른 방위각 해상도 변화를 나타낸다. 배열이 확장됨에 따라 메인 로브의 빔 폭이 점차 감소하고,  $3.8^\circ$  간격으로 배치된



그림 12. 표적 탐지 측정 환경  
Fig. 12. Target detection measurement environment.

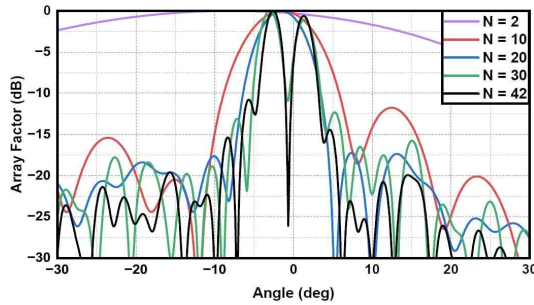


그림 13. 가상 배열의 크기에 따른 방위각 해상도 변화  
Fig. 13. Azimuth resolution variation with virtual array expansion.

두 표적의 분리도가 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다. 특히 가상 엘리먼트 30개 구성으로 null  $-10$  dB 수준의 분리 성능을 확보할 수 있었으며, 42개까지 확장했을 때 null  $-25$  dB 수준에 도달하여 더욱 방위각 각도 해상도가 향상됨을 확인할 수 있다.

이러한 빔 패턴 기반 분석 결과는 포인트 클라우드 변환을 통해서도 확인할 수 있으며, 동일한 측정 환경에서 획득한 데이터를 변환하여 표적 배치 전후의 공간적 분포를 비교하였다. 이는 특정 거리 인덱스에만 국한하지 않고 모든 거리 셀에 대한 변환을 수행하여 얻어진 결과이다. 그림 14는 표적 배치 전, 그림 15는 표적 배치 후의 포인트 클라우드 데이터를 각각 제시한다.

표적을 배치하지 않은 경우, 측정 환경에 존재하는 기둥 구조물의 분포가 포인트 클라우드에서도 일정한 패턴으로 나타났다. 근거리에서는 지면 반사에 따른 클러스터가, 원거리에서는 표적이 없음에도 일부 산란점이 지속적으로 관찰되었으며, 이는 다중 반사 등에 의해 발생한 고스트 표적일 가능성이 있다. 고스트 표적은 물체 간 다중 반사 등으로 인해 지속적으로 나타날 수 있어, 정밀한 검출과 분류를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

표적을 배치한 경우에는 기존의 기둥 구조물 및 지면 반사에 따른 산란에 더해, 코너 리플렉터 위치에서 강한 산란이 추가로 나타났다. 이를 통해 실제 표적이 존재할 때 포인트 클라우드상에서 주변 환경에 의한 산란과는 다른 형태로 분포가 형성되는 양상을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서는 이러한 측정 환경에서의 산란 특성을 바탕으로, D-band 고해상도 배열 안테나를 실제 구현했을

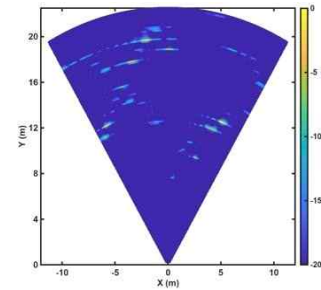


그림 14. 표적 배치 전의 포인트 클라우드 데이터  
Fig. 14. Point cloud data before target placement.

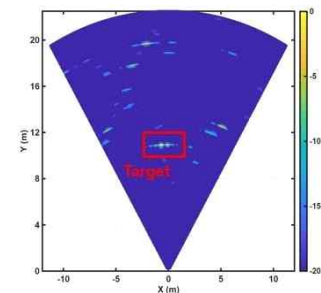


그림 15. 표적 배치 후의 포인트 클라우드 데이터  
Fig. 15. Point cloud data after target placement.

때 안테나 패턴, 지면 반사, 고스트 등이 포인트 클라우드 결과에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 검토하였다. 이를 통해 배열 및 안테나 구조 설계 시 고려해야 할 요소를 구체적으로 파악하고, 향후 시스템 최적화에 활용할 수 있는 기초 데이터를 마련하였다.

## Ⅶ. 결 론

본 연구에서는 28 nm CMOS 기반 D-band 송수신칩을 활용하여 FMCW 레이더 시스템을 구현하고, 단일 송신 채널을 리니어 액추에이터로 수동 이동시켜 가상 배열을 구성하는 방식으로 실험을 수행하였다. D-band의 짧은 파장은 안테나 물리적 크기 대비 유효 개구를 확대하여 높은 공간 해상도를 제공하지만, 다채널 MIMO 배열을 무한정 확장하기에는 회로 집적도, 전력 소비, 패키징 손실 등 기술적 제약으로 어려움이 있다. 이에 따라 송수신칩 하나만을 사용하여 MIMO의 가상 배열 효과를 재현함으로써, 하드웨어 자원을 최소화하면서 배열 확장에 따른

방위각 해상도와 포인트 클라우드 기반 이미징 성능을 실험적으로 확인하였다. 측정 결과, 배열이 확장됨에 따라 방위각 해상도가 개선되었으며, 포인트 클라우드 분석을 통해 배경 산란과 실제 표적을 구분할 수 있음을 확인하였다. 제안된 접근법은 단일 칩 기반의 가상 배열 구성을 통해 D-band 레이더의 해상도 특성을 정량적으로 검증할 수 있음을 보였다. 이를 통해 다채널 MIMO 시스템 설계에 필요한 배열 크기와 성능 수준을 사전에 평가할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있다. 나아가, 실제 시스템 운용 시 발생할 수 있는 안테나 패턴에 따른 특성 변화, 지상 클러터, 다중 반사에 따른 고스트 표적 등 다양한 부가 효과를 사전에 확인하고 이를 배열 구조와 시스템 파라미터 최적화에 반영함으로써, 다배열 모듈 제작 이전에 성능 한계를 체계적으로 검증할 수 있는 기반을 마련하였다.

### 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] J. Yoo, D. Kim, W. Keum, H. Son, J. Kim, and I. M. Lee, et al., "A 140-GHz FMCW radar transceiver with dual-lens packaging for improved beam alignment in 65-nm CMOS technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, no. 11, pp. 6426-6442, Nov. 2024.

[3] A. Visweswaran, K. Vaesen, M. Glassee, A. Kankuppe, S. Sinha, and C. Desset, et al., "A 28-nm-CMOS based 145-GHz FMCW radar: System, circuits, and characterization," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 56, no. 7, pp. 1975-1993, Jul. 2021.

[4] A. Ahmed, L. Li, M. Jung, S. Li, D. Baltimas, and G. M. Rebeiz, "140-GHz 2-D scalable on-grid 8×8-element transmit-receive phased arrays with up/down converters demonstrating a 5.2-m link at 16 Gbps," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 72, no. 5, pp. 2852-2868, May 2024.

[5] S. W. Kang, D. Y. Yang, J. B. Yoon, J. H. Park, Y. J. Han, and S. Kim, et al., "A D-band 1Tx 4Rx mid-range automotive CMOS FMCW radar," in *2025 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2025*, San Francisco, CA, Jun. 2025, pp. 1-4.

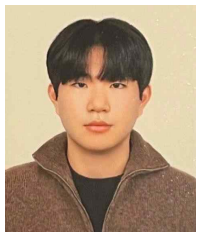
[6] O. Y. Kwon, C. Cui, J. S. Kim, J. H. Park, R. Song, and B. S. Kim, "A compact integration of a 77 GHz FMCW radar system using CMOS transmitter and receiver adopting on-chip monopole feeder," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 6746-6757, Jan. 2019.

[7] J. S. Kim, H. J. Kim, M. Shin, J. H. Park, O. Y. Kwon, and R. Song, et al., "79 GHz active array FMCW radar system on low-cost FR-4 substrates," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 213854-213865, Nov. 2020.

[8] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016.

이 시 준 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-9038-9365>



2024년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)  
 2024년 3월~현재: 성균관대학교 반도체 융합공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF 시스템 HW 설계 및 신호처리

문 관 우 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-7182-1653>



2024년 2월: 숭실대학교 전기공학부 (공학사)  
 2024년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기 컴퓨터공학과 석사과정  
 [주 관심분야] RF 시스템 HW 설계 및 신호처리

강 석 원 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4658-3008>



2021년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)  
2021년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정  
[주 관심분야] RFIC 설계

최 서 령 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-3487-2440>



2025년 2월: 성균관대학교 전자전기공학과 (공학사)  
2025년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF 시스템 추정 알고리즘 설계 및 신호처리

양 동 열 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7403-8464>



2020년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)  
2020년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정  
[주 관심분야] RFIC 설계

서 은 진 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-4200-8281>



2025년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)  
2025년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF 시스템 HW 설계 및 신호처리

윤 정 배 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6213-7569>



2021년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)  
2021년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정  
[주 관심분야] 밀리미터파 안테나 설계 및 패키징, 시스템 설계

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, RF소자 모델링