

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.4.65>
JIIBC 2023-4-11

Ku-대역 FMCW 레이더용 전자식 빔 조향 배열 안테나 특성 검증

Characteristic Verification of Electronically Scanned Array Antenna for a Ku-band FMCW Radar

정채현*, 이재민*, 김민철*, 이행수*, 류성준**, 장성훈**

Chae-Hyun Jung*, Jaemin Lee*, Minchul Kim*,
Hang-Soo Lee*, Sungjun Yoo**, Sunghoon Jang**

요약 본 논문에서는 포토닉스 기반의 Ku-대역 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더 시스템에 적용할 전자식 빔 조향 배열 안테나 설계, 제작 및 검증 단계에 대해서 기술한다. 본 시스템은 송신부와 수신부가 따로 구성되어 있으며, 송수신부에 동일 안테나를 적용하였다. 설계된 안테나는 2×8 배열 구조를 가지며, Ku-대역에서 동작한다. 16개의 복사 소자 개별로 정재파비 측정 및 배열 복사 소자 간 커플링 영향성을 확인하였다. 또한, 송신 수신 안테나로 넘어가는 전력으로 인한 시스템 영향성을 최소화 하도록 송신 안테나, 수신 안테나 간의 분리도 특성을 최적화 하였으며 측정을 통해 확인하였다. 최종적으로 근접전계 챔버에서 16개 복사 소자 각각 빔 패턴 측정하여 데이터 확보 후 빔 합성을 통하여 2×8 배열 안테나의 빔폭, 부엽준위 및 빔 조향 특성을 확인하였다.

Abstract In this paper, the design, fabrication and verification steps of an electronically scanned array antenna(AESA) for a photonics-based Ku-band FMCW radar system is described. The presented system consists of a transmitter and a receiver respectively, which has a same antenna in the transceiver. The designed antenna has 2×8 array configuration and operates at Ku-band. The VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) of each 16-radiators and the coupling power between radiators is measured. Also, in order to minimize the radar system damage because of handover power from the transmitter antenna to the receiver antenna when the transmitter works, the isolation between the transmitter antenna and the receiver antenna is optimized by test. As a result, beamwidth, side lobe level and beam steering characteristic are obtained by synthesizing each radiator pattern measurement data after each beam pattern of 16-radiators is measured in the near-field chamber.

Key Words : Photonic, FMCW, Antenna, Near-field

*정회원, LIG 넥스원(주)

**정회원, 국방과학연구소

접수일자 2023년 6월 8일, 수정완료 2023년 7월 8일

게재확정일자 2023년 8월 4일

Received: 8 June, 2023 / Revised: 8 July, 2023 /

Accepted: 4 August, 2023

*Corresponding Author: chaehyun.jung@lignex1.com

Dept. of Radar Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

I. 서 론

레이더의 소형 경량화를 위한 레이더 분야의 신기술 중 하나인 광소자 기반의 포토닉스 레이더가 국내외에서 많이 연구되고 있다.^{[1]-[2]} 특히 최근 국내에서는 기존 FMCW 시스템^{[3]-[4]}에 포토닉스 기반의 송수신장치를 적용한 레이더 시스템이 개발되고 있는 추세이다.^{[5]-[7]} 송신부와 수신부가 분리되어 구현되는 FMCW 시스템의 경우 운용 시 송신부가 시간적으로 끊임없이 레이더 송신호를 운용하므로 수신부로 전달되는 전자파 영향성 검토가 필수적이다. 또한, AESA 방식을 위한 배열 안테나 적용 시에는 복사 소자 개별 특성을 확인을 통해 단계적으로 전체 배열 안테나의 특성 확인이 필요하다.^[8]

본 논문에서는 AESA 방식 포토닉스 기반 FMCW 레이더 시스템에 적용 위한 Ku-대역의 2×8 배열 안테나를 설계 및 필요 검증 단계에 대해서 기술하였다. 상용 전자파 해석 도구를 이용하여 단일 복사 특성 확인 및 전체 배열 안테나 특성을 확인하였다. 설계 후 제작된 배열 안테나는 개별 복사 소자의 자체 반사손실 및 복사 소자 간의 능동반사계수 특성을 확인 하였으며, 송신부와 수신부 안테나 간의 분리도 특성을 최적화하여 수신단에 영향을 최소화 하도록 하였다. 또한, 근접전계 챔버에서 개별 복사 소자 근접전계 시험 결과를 합성하여 전체 배열 안테나의 빔폭, 부엽준위 및 빔 조향 특성을 확인하였다. 본 시험 검증을 통해 AESA 방식 포토닉스 기반 FMCW 레이더 시스템에 적용 가능한 배열 안테나를 제시하였다.

II. 본 론

1. 복사 소자 설계

단일 복사 소자는 그림 1 과 같이 신호 인가 위한 feeder, 인가된 신호를 방사하는 dipole, E-Plane/H-Plane 방향의 상호 결합 영향 최소화 위한 구조물 Director로 구성되어 있다. 단일 복사 소자의 설계 방향은 자기 반사계수를 최소화하기 위한 via-hole 적용 및 배열 시 발생할 수 있는 상호 결합 영향성을 최소화 하기 위해 형상 치수를 최적화하였다.

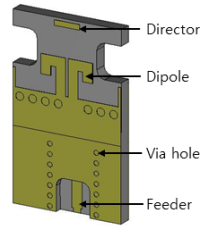


그림 1. 단일 복사 소자
Fig. 1. Single radiator element

2×8 전체 배열 형상은 그림 2와 같으며, 방위각 간격은 $0.675 \lambda_0$ 고각 간격은 $0.7 \lambda_0$ 로 설계 하였다.^[9]

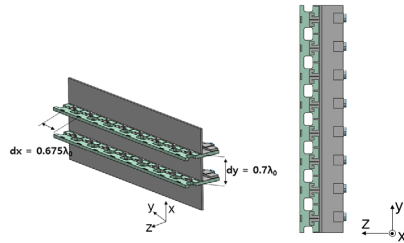


그림 2. 2×8 배열 안테나 3D 모델
Fig. 2. 2×8 Array antenna 3D Model

2. 배열안테나 제작 형상 및 능동반사계수 시험

설계된 안테나는 Taconic사의 RF-35 기판을 적용하여 제작하였다. 1×8 배열 안테나를 4조 제작하여, 2조는 송신부용 나머지 2조는 수신부용을 할당하였다. 그림 3에 1×8 배열 안테나의 앞면과 뒷면의 형상을 보여준다. 각 복사 소자의 능동 반사계수 특성을 확인하기 위하여 급전부에 SMP 커넥터를 연결하여 시험을 진행하였다.

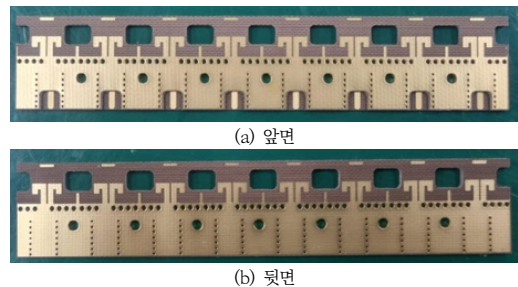


그림 3. 2×8 배열 안테나 제작 형상
Fig. 3. 2×8 fabricated array antenna

능동반사계수는 개별 복사 소자가 인접 복사 소자에 의해 상호 결합특성을 고려한 결과를 보여준다. 그림 4와 같이 배열안테나의 포트 번호를 할당하여, 네트워크 분석기를 활용하여 포트 1에 안테나 1번 포트를 연결하며, 네트워크 분석기 포트 2에 순차적으로 안테나 2~16번 포트에 연결하여 S-parameter를 획득한다. 안테나 2번 포트에도 네트워크 분석기 포트 1을 연결하고, 나머지 안테나 포트에 순차적으로 네트워크 분석기 포트 2를 연결하여 S-parameter를 측정하며, 나머지 안테나 포트 3~16에 대해서도 동일 한 절차를 적용하여 데이터를 획득한다.



그림 4. 2x8 배열 안테나 포트 번호
 Fig. 4. 2x8 array antenna port number

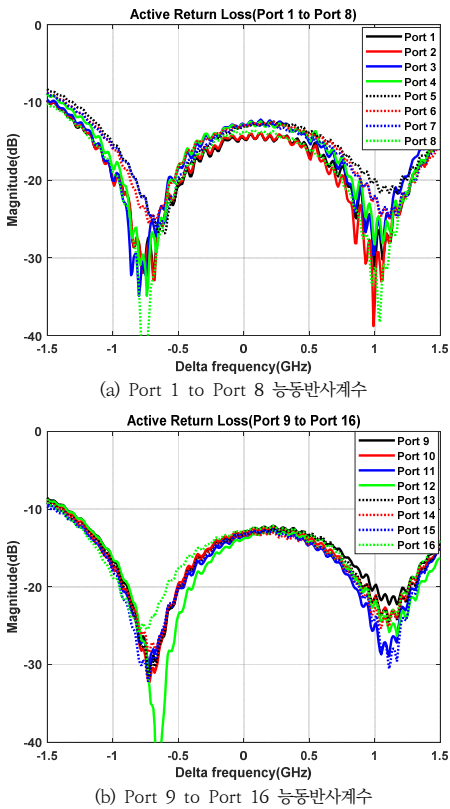


그림 5. 포트별 능동반사계수 결과
 Fig. 5. Results of active return loss at each port

획득된 데이터를 활용하여 안테나 각 포트별 능동반사계수를 그림 5와 같이 확인하였다. 각 포트별 능동반사계수는 -10 dB 이하 기준 관심대역폭(± 1 GHz 이상)을 만족하는 것을 확인 할 수 있다.^[9]

3. 송수신부 간 분리도 시험 결과

송신 안테나와 수신 안테나를 분리하여 사용하는 FMCW의 레이더의 경우 송신 시 수신단으로 넘어오는 파워 레벨이 수신 경로에 영향이 없는지 검토하여야 한다. 설계된 배열 안테나가 적용될 수신 시스템의 구성도는 그림 6과 같다.

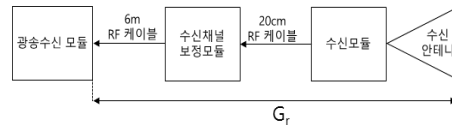


그림 6. 수신 시스템 구성도
 Fig. 6. Block diagram of a receiver system

송신부로부터 출력된 파워(P_{Tx})가 수신부로 입력되면, 그림 6의 수신 안테나부터 RF 케이블까지(G_r , 수신 이득) 거쳐 광송수신모듈에 입력 되게 된다. 이때 입력되는 파워는 광송수신모듈 입력 $P_{1dB}(OTM_{P1dB})$ 보다 작아야 한다. 본 조건을 만족시키기 위해 송신부와 수신부 간의 분리도 값(Isolation)은 다음 조건을 만족시켜야 한다.

$$Isolation > P_{Tx} + G_r - OTM_{P1dB} \quad (1)$$

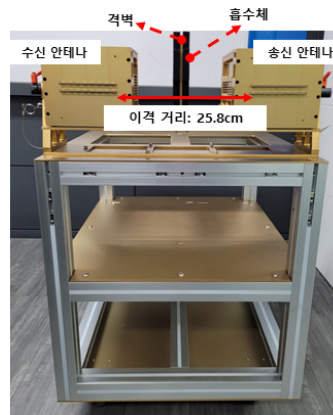


그림 7. 송신 수신 안테나 제작 형상
 Fig. 7. Fabricated Tx. & Rx. antenna

관계식에 의해 도출된 분리도 값은 60 dB 이며, 해당 수치를 만족시키기 위해 그림 7 과 같이 송신 안테나와 수신 안테나 사이를 25.8 cm 이격을 두었으며, 중간에 흡수체 격벽도 적용하였다.

제작 후 요구 분리도를 만족하는지 확인하기 위하여 무반향 챔버에 제작품을 그림 8과 같이 설치하였다.



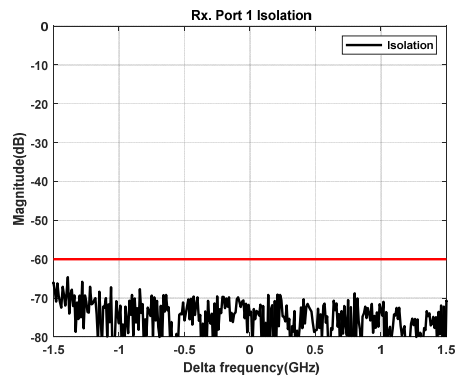
그림 8. 분리도 시험 셋업
Fig. 8. Test setup for isolation

네트워크 분석기 1번 포트를 수신 안테나 1번 포트에 연결하고, 분석기 2번 포트에 송신 안테나 1~16 포트를 각각 연결하여 S-parameter를 전수 측정하여 수신 안테나 1번 포트에 대한 분리도 데이터를 획득하였다. 동일한 절차로 수신 안테나 포트 4번, 8번에 대해서도 분리도를 측정하였다. 송신 안테나와 수신 안테나의 포트 위치는 그림 9와 같다.

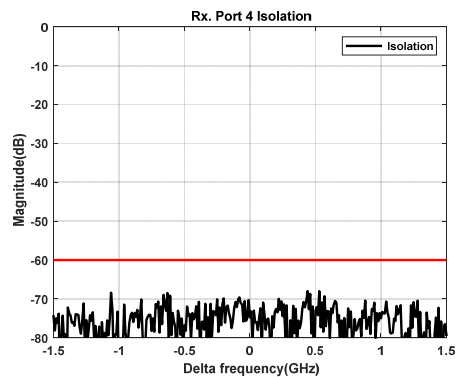


그림 9. 송신 수신 안테나 포트 번호
Fig. 9. Tx. & Rx. antenna port number

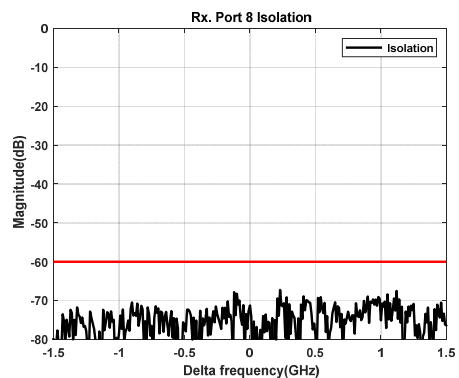
측정된 분리도 결과는 그림 9와 같으며, 요구 규격 - 60 dB 이하를 잘 만족하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) 수신안테나 Port 1 분리도 시험 결과



(b) 수신안테나 Port 4 분리도 시험 결과



(c) 수신안테나 Port 8 분리도 시험 결과

그림 10. 분리도 시험 결과
Fig. 10. Results of the isolation

4. 근접전계 시험 결과

분리도를 만족시키는 송신 수신 안테나 형상 및 배치 조건이 확정된 상황에서 안테나 패턴이 잘 합성되는지 그림 11과 같이 근접전계 시험셋업을 구성하여 확인하였다.

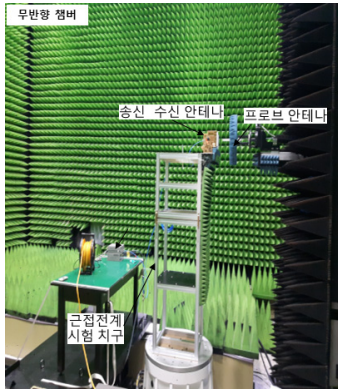
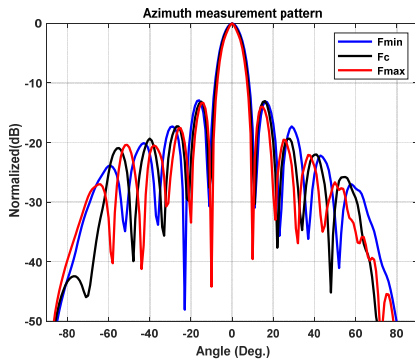
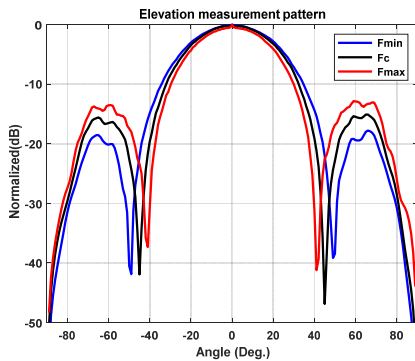


그림 11. 근접전계 시험 셋업
 Fig. 11. Test setup for near-field measurement

송신 안테나에 대해 1~16번 복사 소자를 각각 측정하고 합성기법을 활용하여 그림 12와 같이 방위각 및 고각 패턴을 확인하였다. 복사 패턴의 결과는 표 1에 정리하였다.



(a) 송신 안테나 방위각 복사 패턴



(b) 송신 안테나 고각 복사 패턴

그림 12. 송신 안테나 복사 패턴
 Fig. 12. Radiation pattern of Tx. antenna

표 1. 송신 안테나 복사 패턴 결과

Table 1. Results of Tx. antenna radiation pattern

	방위각			고각		
	F _{min}	F _c	F _{max}	F _{min}	F _c	F _{max}
3dB 빔폭(°)	10.1	9.4	8.7	41.5	37.1	36.5
부엽준위 (dB)	-13.0	-12.9	-12.7	-18.4	-15.3	-12.1

전자적 빔 조향 시 빔 특성을 확인하기 위해 시스템에서 요구하는 조향 범위 $\pm 20^\circ$ 내에서 빔 특성도 합성기법을 통하여 확인하였으며, 그림 13과 같이 양호한 패턴 결과를 얻었다.

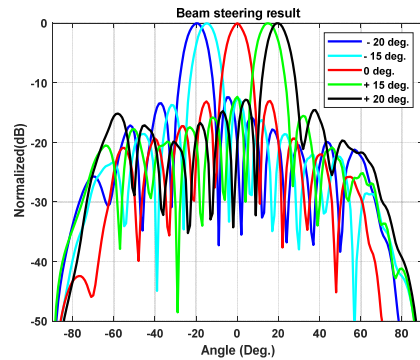


그림 13. 송신 안테나 빔 조향 시 복사 패턴
 (-20, -15, 0, +15, +20)

Fig. 13. Beamsteering radiation pattern of Tx. antenna
 (-20, -15, 0, +15, +20)

III. 결론

본 논문에서는 전자식 빔 조향이 가능하며 송신 및 수신 안테나 분리된 FMCW 레이더 시스템에 적용할 2×8 배열 안테나 설계, 제작 및 필요 검증 단계에 대해서 기술하였다. 제작 후 각 개별소자의 능동반사계수 특성을 측정하였으며, 결과가 -10 dB 이하로 양호한 결과가 나옴을 확인하였다. 그리고 송신 수신 안테나 간의 요구 분리도 값을 시스템 버짓 분석을 통하여 획득하였으며, 최적화 형상 설계 적용 및 시험을 통해 요구 분리도를 만족하는 결과를 얻었다. 최종적으로 근접전계 시험을 통해 안테나 성능을 검증하였으며, FMCW 레이더 시스템에 적용 가능함을 확인하였다.

References

- [1] F. Zhang, Q. Guo, and S. Pan, "Photonics-based real-time ultra-high-range-resolution radar with broadband signal generation and processing," *Scientific Reports*, Vol. 7 No. 1, pp. 13848, 2017.
DOI:<http://doi.org/10.1038/s41598-017-14306-y>
- [2] P. Ghelfi, et al., "Photonics in radar systems: RF integration for state-of-the-art functionality," *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 16, No. 8, pp. 74-83, 2015.
- [3] Jeong-Yeon Kim, Kil-To Chong, Tae-Yeong Kim, "X-band FMCW RADAR Signal Processing for small ship," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS)*, Vol. 10, No. 11, pp. 3121-3129, 2009.
DOI:<https://doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3121>
- [4] Young-Doo Choi, "Improvement Method of Radar Maximum Detection Range using Wavelet Transform for FMCW Radar," *The Journal of KIIT*, Vol. 20, No. 11, pp. 147-153, 2022.
DOI:<https://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.11.147>
- [5] Y. Bae, M. Yi, J. Shin, and S. Lee, "X-band Photonic-Based Pulsed Radar Architecture with a High Range Resolution," *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 18, pp. 6558, 2020.
DOI:<https://doi.org/10.3390/app10186558>
- [6] S. Yoo, M. Kim, S. Park, M. Kyung, S. Jang and J. Shin, "Design of Photonics-Based FMCW Radar Transceiver System," *the Journal of KIEES*, Vol. 32, No. 10, pp. 933-941, 2021.
DOI:<http://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.10.933>
- [7] Sungjun Yoo, Minchul Kim, Chaehyun Jung, Jaewook Park, Jaemin Lee, Sunghoon Jang, "Development for Wide-Band Active Array System with Photonics-Based Optical Transceiver" *the Journal of KIEES*, Vol. 34, No. 2 pp. 145-154, 2023.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.2.145>
- [8] Young-Wan Kim, Hee-Duck Chae, Se-Hwan An, Ji-Han Joo, "Radiator Design Method considering Wide-Angle Beam Steering Characteristics of AESA Radar," *the Journal of IIBC*, Vol. 22, No. 5, pp. 87-92, 2022.
DOI:<https://doi.org/10.7236/IIBC.2022.22.5.87>
- [9] 정재현, 강맹창, 김민철, 이행수, 류성준, 장성훈, "Ku-band 광대역 배열안테나 설계" *한국전자파학회 하계종합학술대회*, Vol.10, No. 1, 2022.

저 자 소 개

정 재 현(정회원)



- 2008년 2월 : 충남대학교 전기정보통신공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 한국과학기술원 전자전기공학과 (공학석사)
- 2010년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, 광자레이더, 마이크로파탐색기

이 재 민(정회원)



- 2011년 2월 : 경기대학교 전자공학부 (공학사)
- 2013년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

- 주 관심분야 : 위상 배열 안테나 설계, 레이더 시스템, 초고주파 수동회로 설계

김 민 철(정회원)



- 2005년 2월 : 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, 광자레이더, 능동위상배열 송수신기

이 행 수(정회원)



- 2004년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, RF 시스템 설계 등

류 성 준(정회원)



- 2014년 2월 : 홍익대학교 전자전기 공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 홍익대학교 전자정보 통신공학과 (공학석사)
- 2019년 8월 : 홍익대학교 전자정보 통신공학과 (공학박사)
- 2019년 9월 ~ 11월 : 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : GPS 배열안테나, 안테나 설계 및 위치 최적화, 광자 레이더

장 성 훈(정회원)



- 1996년 2월 : 서울시립대학교 전자 공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 서울시립대학교 전자 공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 서울시립대학교 전자 공학과 (공학박사)
- 1998년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
- 주 관심분야 : 레이더 시스템, RF photonics, 디지털 레이더 등

※ 본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.