

레이다 빔조향 특성 측정 장치 개발 및 보어 사이트 에러 측정

Development of Radar Beam Steering Measurement System and measurement Boresight Error

곽 용 길

국방과학연구소

Yong-kil Kwak

Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

[요 약]

본 연구에서는 AESA 레이더의 근전계에서 송신/수신 모드에 대한 원전계 빔조향, 근전계 빔집속 등의 기능을 수행하기 위한 빔조향 특성 측정 장치를 개발하였다. 빔조향 특성 측정장치는 구면형 근접전계 스캐너, 안테나 포지셔너, 근접전계 제어기, 네트워크 측정기, 레이더 제어시스템, 검증용 레이더 및 모의레이돔, AESA 레이더 등으로 구성된다. 개발한 시스템을 이용하여 AESA 레이더에 대한 레이돔 장착 전/후의 송/수신 패턴 특성을 측정하였고, 근접전계 측정 후 원전계로의 변환을 통해 빔패턴을 분석하였다. 그리고 레이더 안테나 장치의 보어 사이트 에러를 측정하였고, 모의 레이돔 장착 전후 메인 로브가 동일하게 형성됨을 확인할 수 있었다.

[Abstract]

In this study, a beam steering measurement system was developed to perform functions such as far-field beam steering and near-field beam focusing for TX/RX modes in the near file of the AESA radar. The beam steering measurement system consists of a spherical near-field scanner, an antenna positioner, a near-field controller, a network analyzer, a radar control system, a verification radar, a simulated radio, and an AESA radar. Using the developed system, the characteristics of TX/RX patterns before and after installation of radome to AESA radar were measured, and the beam pattern was analyzed through conversion to far field-after near-field measurement. The boresight error of the radar antenna device was measured, and it was confirmed that the main lobes were formed the same before and after the simulated radar dome was mounted.

Key word : AESA radar, Beam steering, Boresight error, Mock-up Radome, Near field.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.546>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 August 2023; **Revised** 12 October 2023
Accepted (Publication) 26 October 2023 (30 October 2023)

***Corresponding Author : Yong-kil Kwak**

Tel: +82-42-821-3136

E-mail: ykkwak7@gmail.com

1. 서론

현대의 항공기용 레이더는 반도체 송수신 모듈을 기반으로 하는 능동위상배열 안테나 구조로 발전하는 추세이다. 능동위상 배열 안테나는 빔 스캔을 전자식으로 조향하며, 상대적으로 빠른 시간에 조향 범위 내 조향이 가능하다[1]. 이러한 레이더의 다양한 기능과 성능을 확인하기 위해서는 원전계 거리를 만족하는 수백 미터 이상의 시험장이 필요하다 [2],[3]. 본 연구에서는 이러한 제한을 해결하기 위해 레이더 빔조향 특성에 대한 측정 기능을 구현하기 위한 측정시스템을 개발하였다. 이에 필요한 구면형 근접전계 스캐너, AUT(antenna under test) 포지셔너, 근접전계 제어기, RF 펄스 네트워크 측정기를 연동하여 AESA(active electronically scanned array) 레이더를 측정할 수 있는 시스템을 구축하며, 검증용 레이더 및 모의레이돔을 이용하여 측정시스템에 대한 검증까지 수행하였다. 개발한 장치의 시험은 크게 구동 및 기능 시험, 레이저 트래커 연동 시험, 측정 기능/성능 시험으로 구분된다. 이러한 시험을 통해 빔조향 특성 측정 장치를 개발하였고, 개발된 장치의 구면형 근접전계 스캐너를 활용하여 전투기 모의 레이돔 장착 전/후의 송수신 패턴 특성을 측정하였다.

II. 시스템 설계

빔조향 특성 측정장치는 AZ(azimuth) 축, Theta 축, Phi 축, Y2 축 등으로 구성된 구면형 근접전계 스캐너, AUT 포지셔너, 근접전계 제어기, RF 펄스 네트워크 측정기, AC/DC 전원공급기로 구성된다. 빔조향 특성 측정장치의 전반적인 구성품 제어 및 상태정보 확인, 측정 시나리오 생성 및 구현, 결과확인을 위한 검증용 레이더/AESA 레이더는 제어컴퓨터와 검증용 레이더(원전계 평면배열안테나, 근전계 평면배열안테나, 빔집속 선형배열안테나, 송수신기, 신호처리기) 및 모의레이돔과 통합모의제어기 그리고 AESA 레이더를 포함하여 구성된다.

2-1 시스템 구성

빔조향 특성 측정장치의 각 구성품별 연동 구성도는 그림 1과 같다. 빔조향 특성 측정장치의 연동 구성도는 검증용 레이더를 이용한 연동 구성과 AESA 레이더를 이용한 연동 구성으로 구분된다. 빔조향 특성 측정장치를 통한 검증용레이더 측정은 근전계에서 송신/수신 모드에 대한 원전계 빔조향, 근전계 빔집속 등 특성을 측정하기 위함이며, AESA 레이더 측정은 빔조향 특성 측정장치의 구면형 근접전계스캐너를 활용하여 AAU의 송신/수신 채널에 대한 원전계 빔조향 특성, 근전계 빔집속 특성 등을 측정한다. 구면형 근접전계 스캐너는 총 3개의 회전축(AZ, Theta, Phi)과 1개의 직선 구동축(Y2)으로 구성된다.

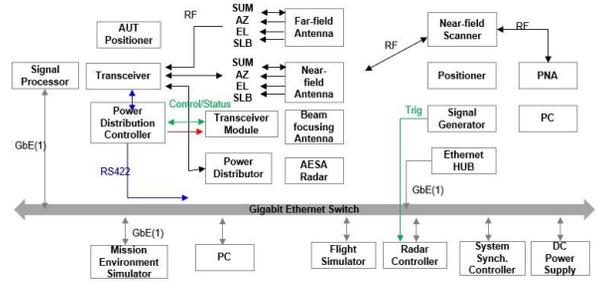


그림 1. 빔조향 특성 측정 장치 구성도
Fig. 1. Configuration of beam steering measurement

근접전계 스캐너는 근접전계 제어기와 연동되어 수신된 위치 정도에 대하여 구동하며, 설정된 주파수 및 빔 조향 각도에 대하여 빔패턴 측정을 수행한다. AUT 포지셔너는 총 1개의 직선 구동축(Y1)으로 구성되며, 근접전계 제어기와 연동되어 수신된 위치 정보 및 구동 정보에 대하여 모션 구동을 한다. 근접전계 제어기는 빔조향 특성 측정 장치의 전체 구동을 제어하며 UMAC(universal machine and automation controller), AC 서보 모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 레이더 제어 시스템은 근접전계 제어기 및 통합제어분석전시기와 연동되어 검증용 레이더 등의 측정대상의 주파수, 빔조향 등 제어 연동하는 장치이다. 검증용 레이더는 검증용 안테나 3종(원전계, 근전계, 빔집속 안테나)과 송수신기, 신호처리기, 짐벌로 구성되어 있다. 모의레이돔은 레이더의 안테나 덮개로서, 검증용 레이더를 덮기 위한 대칭형 모의레이돔과 AESA 레이더 안테나를 보호하기 위한 전투기용 비대칭 형상의 모의 레이돔으로 구성된다. 통합모의제어기는 레이더제어시스템과 연동하여 검증용 레이더의 송수신기 및 빔집속 안테나의 위상/이득을 제어하고, 레이더 임무환경모의기는 신호처리기와 이더넷으로 연동하여 저장된 I/Q 데이터 로딩 및 분석하는 기능을 수행한다.

2-2 구면형 근접전계 스캐너

구면형 근접전계 스캐너는 총 3개의 회전축과 1개의 직선 구동축으로 구성되어 있으며, 각 축별 설계값은 표1과 같고, 형상은 그림 2와 같다.

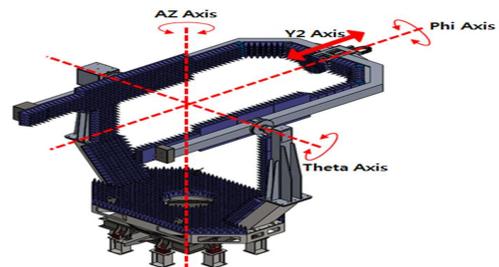


그림 2. 구면형 근접전계 스캐너 각 축별 형상
Fig. 2. Configuration of spherical near field scanner

표 1. 구면형 스캐너 설계 사양

Table 1. Design parameters of Spherical near field scanner

Axis	Parameters	Performance
AZ	Angular velocity	5 °/s
	Resolution	0.1 °
	Accuracy	± 0.1 °
	Range	360 °
Theta	Angular velocity	10 °/s
	Resolution	0.1 °
	Accuracy	± 0.1 °
	Range	±150 °
Phi	Angular velocity	15 °/s
	Resolution	0.1 °
	Accuracy	± 0.1 °
	Range	360 °
Y2	Angular velocity	10 mm/s
	Resolution	± 0.1 mm
	Accuracy	0.1 mm
	Range	±150 mm

2-3 검증용 레이더

검증용 레이더는 3종의 검증용 안테나(원전계, 근전계, 빔 집속)와 안테나를 통해 RF 신호를 송수신 하는 송수신기, 송수신기로부터 생성된 IQ 데이터를 광저장하는 장치인 신호처리기, 안테나의 빔조향 각도를 기계적으로 제어하는 짐벌로 설계하였다. 검증용 안테나는 AESA 레이더의 안테나 크기 및 이득을 고려하여 설계하며, 송수신기는 검증용 안테나를 통해, RF 신호를 송/수신 하기 위한 소스를 제공하는 장치이며, 레이더 송신파형 발생과 다채널 신호수신 기능을 보유한다. 신호처리기는 송수신기에서 수신된 IQ 데이터를 광저장하는 역할을 수행하며 레이더 임무환경모의기와 이더넷으로 연동한다. 그리고 짐벌은 원전계 안테나와 근전계 안테나의 빔조향 각도를 기계식으로 제어하는 역할을 함, 빔 조향 범위는 ±60°의 범위를 제어할 수 있도록 구성하였다. 검증용 안테나와 송수신기의 설계 사양은 각각 표2와 같다.

표 2. 검증용 안테나, 송수신기 설계 사양

Table 2. Design parameters of verification antenna

Components	Performance
Far field antenna	-Gain: above 30 dBi -Channel : Sum, Az/EI, Difference, SLB
Near field antenna	-Gain: above 30 dBi -Frequency band : X band
Transceiver	-Generate radar waveform -Output power: 10 dBm ±2 dB typ. -Instantaneous bandwidth: 5 MHz ±5% -Flatness : less than ±2 dB

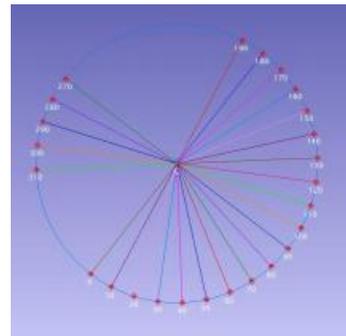
2-4 모의 레이더

빔조향특성 측정장치에 사용되는 전투기용 모의 레이더는 적층가공(AM : Additive Manufacturing)을 이용하여 제작하였으며, 비대칭 형상으로 제작성을 고려하여 ABS(Acrylonitrile, Butadiene, Styrene) 재질로 설계하였으며, 안테나 정면을 기준으로 총 4단계로 거리별 두께를 가지는 스택 형상으로 설계하였다.

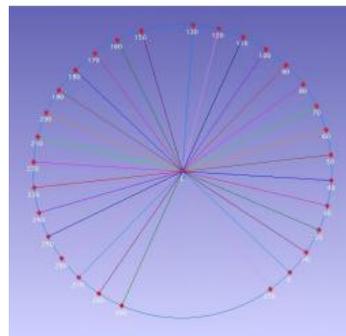
III. 시스템 성능 시험

3-1 구면형 근접전계 스캐너

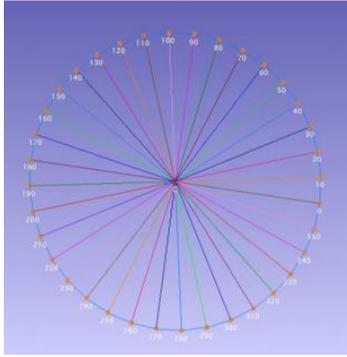
구면형 근접전계 스캐너의 구동축(AZ, Theta, Phi, Y2)이 근접전계제어기와 연동되어 정상적으로 구동하는지를 확인하고, 구동에 대한 정확도는 레이저 트랙커를 통해 계측 후 확인하였다. 그림 3은 각 축별 10° 단위로 제어하였을 때, 각 지령값에 대한 구동축 이동 변위를 레이저 트랙커로 측정된 결과이며, 표3은 측정된 값을 정리한 결과이다. 구조상 계측이 불가능한 일부 각도에서는 측정값을 제외하였다. 각 축 별 구동부를 10° 단위로 제어했을 때, AZ 축의 최대 오차는 0.017°(평균 0.004°), Theta 축의 최대 오차는 0.042°(평균 0.026°)이다. 그리고, Phi축의 최대 오차는 최대 오차는 0.037°(평균 0.01°)로, 3축 모두 설계 목표값에 만족함을 알 수 있다.



(a) Azimuth Axis



(b) Theta Axis



(c) Phi Axis

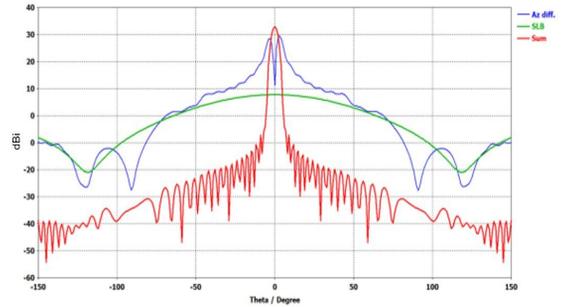
그림 3. 구면형 근접전계 스캐너 각 축별 위치 정밀도 측정
Fig. 3. Measurement positioning accuracy of spherical near field scanner

표 3. 구면형 근접전계 스캐너 각 축별 위치 오차
Table 3. Positioning error of spherical near field scanner

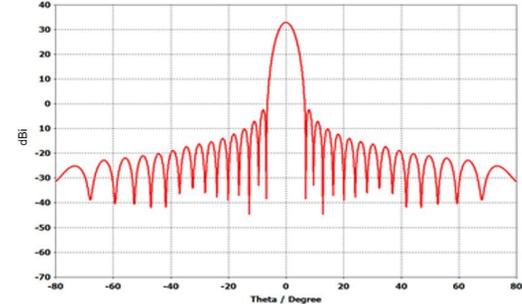
Command (°)	Positioning error (°)		
	AZ	Theta	Phi
0	0.000	0.000	0.000
10	0.001	0.009	0.014
20	0.001	0.005	0.023
30	0.000	0.014	0.008
40	-0.003	0.010	0.015
50	-0.002	0.021	0.002
60	-0.003	0.016	0.002
70	-0.005	0.026	0.009
80	-0.004	0.023	0.004
90	-0.005	0.027	0.010
100	-0.005	0.020	-0.004
110	-0.001	0.025	0.004
120	-0.003	0.014	0.017
130	-0.005	0.013	-0.002
140	-0.002	-	0.014
150	0.000	-0.023	0.018
160	0.002	-0.030	0.010
170	-0.004	-0.036	0.006
180	-0.011	-0.042	-0.020
190	0.017	0.041	-0.011
200	-	0.046	-0.008
210	-	0.044	0.003
220	-	0.044	-0.016
230	-	0.041	-0.007
240	-	0.043	0.000
250	-	0.039	-0.020
260	-	0.038	0.002
270	0.008	0.029	-0.003
280	0.006	-	0.000
290	0.007	-	0.006
300	0.004	-	0.007
310	0.004	-	0.000
320	-	-	0.007
330	-	-	0.030
340	-	-	-0.037
350	-	-0.007	-0.012
Max	0.017	0.046	0.037

3-2 검증용 레이더

원전계, 근전계 안테나의 이득을 측정하고, 송수신의 출력 신호를 확인하여 개발된 구성품의 성능을 검증하였다. 그림 4(a)는 원전계 평면배열 안테나의 이득을 측정한 결과이다. 중심 주파수 f_c GHz에서 각각 Sum, difference, SLB 채널의 이득을 나타낸다. 그림4(b)는 근전계 안테나의 복사 패턴이며 설계 사양인 30 dBi 이상을 만족함을 알 수가 있다.



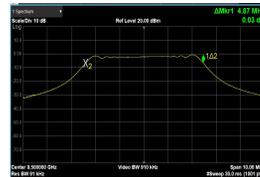
(a) 원전계 안테나 이득



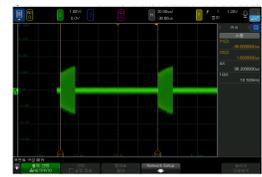
(b) 근전계 안테나 이득

그림 4. 원전계, 근전계 안테나 이득
Fig. 4. Gain of near field and far field antenna

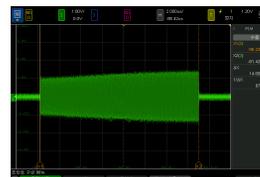
개발한 송수신기가 운용 모드 별 생성하는 파형을 측정하고 결과 레이더 파형을 발생할 수 있는지 측정하였고, 그 결과를 그림 5에 나타내었으며, 측정 결과 설계 목표치를 만족함을 알 수가 있다.



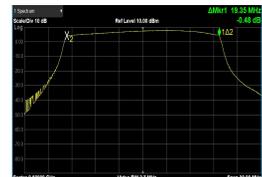
(a) A mode (BW :0.00 MHz)



(b) A mode (PRI : 00.0 us)



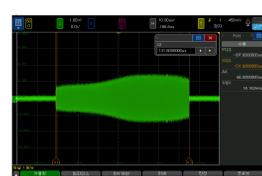
(c) A mode (PW : 00.0 us)



(d) B mode (BW : 0.00 MHz)



(e) B mode (PRI : 000 us)



(f) B mode (PW : 00 us)

그림 5. 송수신기 레이더 파형
Fig. 5. Radar waveform of transceiver

3-3 모의 레이돔

레이다 운용 편파가 수직편파일 경우 RF 신호원이 모의 레이돔 정면을 기준으로 0°에서 30°까지 수직 방향으로 변화하며 입사되는 경우와, 레이다 운용편파가 0°에서 30°까지 수평 방향으로 변화하며 입사되는 경우를 가정하여 전송 손실을 분석하였고, 그 결과를 표4에 나타내었다.

표 4. 모의 레이돔 전송 손실

Table 4. Transmission loss of mock up radome

RF angle (°)	Transmission loss	
	Vertical pol. (Min./Max.m dB)	Horizontal pol. (Min./Max.m dB)
0	-0.75 / -0.80	-0.77 / -0.82
5	-0.75 / -0.80	-0.77 / -0.82
10	-0.77 / -0.81	-0.75 / -0.80
15	-0.80 / -0.85	-0.75 / -0.80
20	-0.82 / -0.90	-0.77 / -0.82
25	-0.85 / -1.00	-0.77 / -0.82
30	-0.90 / -1.10	-0.80 / -0.85

IV. 레이다 안테나 보어사이트 에러 확인

본 절에서는 개발된 빔조향 특성 측정 장치를 활용하여, 레이다 안테나의 전투기 모의레이돔 장착 전/후에 따른 송신/수신 패턴 측정을 통하여 BSE(Bore-Sight Error)를 확인하였다. AESA 레이다 안테나의 근접전계 측정은 3개 주파수의 수평, 수직 편파, 측정 범위는 AZ 0°~360°, Roll 0°~90°에 대해 측정하였고, 근접전계 측정 결과를 레이돔 유무에 따라 근접전계 측정 후 원전계로의 데이터 변환을 위해 1° 단위로 FFT하여 분석하여 측정을 확인하였다.

그림 6은 모의 레이돔 장착 전후 중심주파수에서의 송신 패턴을 측정된 결과이다. 모의 레이돔 장착 전/후 안테나 장치의 메인 로브는 -15°에서 동일하게 형성되며, 메인 로브의 최대 송신레벨은 장착 전/후 -0.989 dB/-0.426dB로 0.56dB 변화됨을 알 수 있다. 메인 로브의 송신빔폭은 0.233° 변화되고, 송신이득은 -1.399dB 차이 있음을 알 수가 있다. 그림 7은 모의레이돔 장착 전/후 중심주파수에서 안테나 장치의 수신 패턴을 측정된 결과이다. 모의레이돔 장착 전/후 메인 로브는 -15°에서 동일하게 형성되며, 최대 수신레벨, 수신빔폭, 수신이득은 각각 0.006dB, 0.143°, -0.382dB 로 변화되었다.

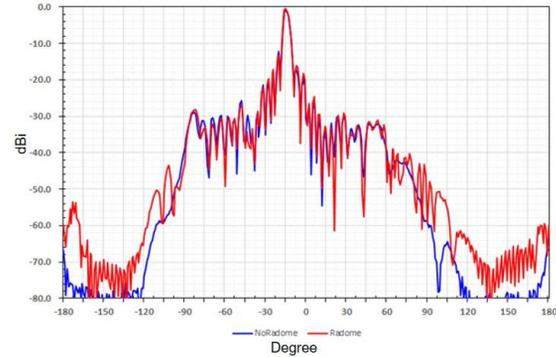


그림 6. 송신 패턴 측정 결과(모의레이돔 장착 전/후)
 Fig. 6. TX result(with radome/without radome)

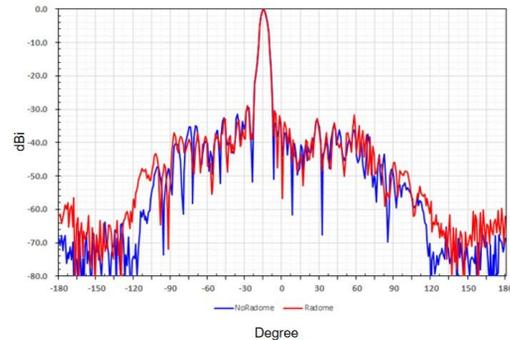


그림 7. 수신 패턴 측정 결과(모의레이돔 장착 전/후)
 Fig. 7. RX result(with radome/without radome)

안테나 장치의 빔 송신/수신 정면 빔인 -15°에서 안테나 장치의 main beam peak가 동일하게 형성되어 모의 레이돔에 의한 보어 사이트 에러는 발생하지 않았다. 다만, 송신/수신 패턴에 있어서 전력 레벨 값만 차이가 발생하였다. 이러한 전력 레벨 차이는 측정 후 데이터 분석 간 데이터 정규화(Normalization)하는 과정에서 발생한 Offset으로 판단된다. 모의레이돔 장착 전/후에 대한 빔폭의 변화는 송신패턴일 경우 최대 0.424°, 수신패턴의 경우 최대 0.149°의 변화가 발생한다. 모의레이돔 장착 전/후 이득의 변화는 송신 패턴일 경우 최대 -1.399dB, 수신패턴의 경우 최고주파수에서 최대 -0.471dB의 모의레이돔에 의한 전송손실 결과가 발생함을 알 수가 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 AESA 레이다 빔조향 특성에 대한 측정을 하기 위한 시스템을 개발하였다. 개발한 시스템은 구면형 근접전계 스캐너, 근접전계제어기, RF필드 네트워크 측정기를 연동하여 AESA 레이다를 측정할 수 있다. 측정은 구면형 근접전계 측정 방식을 이용하며, 검증용 레이다 및 모의레이돔을 이용하여 측정시스템에 대한 검증을 수행하였다. 구면형 스캐너의 AZ, Theta, Phi, Y축 방향의 위치 정밀도를 레이저 트랙

커를 활용하여 측정하였고, 설계 요구도를 만족하였다. 그리고 검증용 레이더의 주파수 범위, 레이더 파형을 확인하였고, 근전계, 원전계 안테나의 복사 패턴을 분석하였다. 이를 통해 빔조향 특성 측정 장치가 설계 요구 사양을 만족함을 알 수 있었다. 개발된 장치를 활용하여 레이더 안테나 장치의 보어 사이트 에러를 측정하였고, 모의 레이더 장착 전후 메인 로브가 동일하게 형성됨을 확인할 수 있었다. 다음 단계로 실제 전투기 장착 레이더에 대해서 동일한 시험을 통해 안테나 장치의 보어 사이트 에러를 확인하고 보정할 수 있을 것이라 예상된다.

Acknowledgments

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연

구소의 지원을 받아 수행된 연구임(274190001)

References

- [1] Salvador H., "Benefits of Digital Phased Array Radars," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 104, Issue 3, Mar. 2016
- [2] C. S. Kim, S. G. Park, Y. M. Park, C. S. Lee, "Beam-Steering Efficiency Optimization Considering the Active Element Pattern for Phased Array Antenna," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 23, No. 8, pp. 22-30, 2022.
- [3] G. C. Park, "Near field beam focusing of AESA radar," *Conference of KIMST*, pp. 171-172, Jun. 2019.



곽 용 길 (Yong-Kil Kwak)

1997.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학사)
 1999.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학석사)
 2005.2월 : 부산대학교 기계공학부(공학박사)
 2011.10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
 ※관심분야 : 제어/계측, 레이더/전자전 시스템