

# 모듈형 레이다 능동위상배열 안테나를 위한 주변 안테나 보정기법

김영환\*<sup>1</sup>, 김건우\*<sup>2</sup>, 이호주\*<sup>3</sup>

## Peripheral Probe Calibration Method for Modular Radar Active Electronically Scanned Array Antenna

Young-Hwan Kim\*<sup>1</sup>, Kun-Woo Kim\*<sup>2</sup>, and Ho-Joo Lee\*<sup>3</sup>

### 요약

모듈형 능동위상배열 레이다에서 모듈 교체 시 발생하는 위상 편차는 필수적으로 보정되어야 하나, 기존 근전계 기반 보정 방식은 과도한 시간과 비용을 요구하여 실용성이 낮다. 본 연구에서는 별도의 근전계 시설 없이 배열 주변에 배치된 안테나를 활용하여 위상 오차를 보정하는 기법을 제안한다. 제안된 방식은 동일 조건에서 반복적인 측정에도 RF 특성이 유지됨을 바탕으로 교체 모듈의 대표 채널만을 측정함으로써 전체 소자의 위상 오차를 효과적으로 보정할 수 있다. 정상 상태 패턴 대비 모듈 교체하고 보정 전/후 패턴을 상관계수, RMS 위상 오차, SLL 변화를 통해 정량적으로 비교한 결과, 제안 기법으로 복원된 패턴이 초기 보정 상태와 거의 동일한 수준임을 확인하였다. 이를 통해 제안된 방식이 외부 환경에서도 신속하고 비용 효율적인 모듈 교체 보정을 가능하게 함을 실험적으로 입증하였다.

### Abstract

When modules are replaced in Active Electronically Scanned Array (AESA) antenna of modular radars, It is necessary to calibrate the phase. However, conventional near-field-based methods are impractical due to excessive time and cost. This study presents a calibration method using peripheral antennas to correct phase errors without near-field measurement facilities. By exploiting the inherent repeatability and stability of RF characteristics, the proposed method enables phase correction through measurement of only a representative channel of the replaced module. Quantitative comparisons—based on correlation coefficient, RMS phase error, and SLL variation—between pre-/post-replacement patterns demonstrate that the restored pattern closely matches the initial pattern. These results experimentally verify that the proposed approach enables rapid and cost-efficient calibration even in external environments.

### Keywords

modular radar, AESA, calibration, peripheral probe, antenna

\* 한화시스템 연구원(\*<sup>1</sup> 교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0007-8742-2597>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-4585-4080>  
- ORCID<sup>3</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-8479-5530>

• Received: Dec. 02, 2025, Revised: Dec. 18, 2025, Accepted: Dec. 21, 2025  
• Corresponding Author: Young-Hwan Kim  
Dept. of 491-23, Gyeonggidong-Ro, Chang-Li, Namsa-Eup, Cheoin-Gu  
Tel.: +82-31-8020-7526, Email: [kyh730@hanwha.com](mailto:kyh730@hanwha.com)

## I. 서 론

능동위상배열 안테나는 다기능 레이더를 구성하는 핵심 구성품으로, 능동위상배열 안테나를 구성하는 각 송수신모듈(TRM, Transmitter Receiver Module)은 HPA(High Power Amplifier), LNA(Low Noise Amplifier)를 포함하고 있고 제작 공차, 온/습도, RF 소자 특성이 서로 상이하여 진폭 및 위상 보정을 필수적으로 수행해야 한다[1].

능동위상배열 안테나는 일정 수량의 TRM을 통합한 모듈화된 조립체 형태로 제작하여 여러 조립체가 통합된 형태로 구성될 수 있는데, 송수신조립체(TRA, Transmitter Receiver Assembly) 단위의 보정은 원전계 방식을 이용하여 최소한의 측정 환경과 측정시간으로 보정이 가능하다[2]. 이때, TRA를 확장하여 능동위상배열 안테나를 구성할 경우 각 TRA 내에서는 TRM 간 보정이 되어 있지만 TRA 간의 특성 차이로 인해 진폭 및 위상의 편차가 발생하게 된다. 근접 전계 성능시험 시 전체 능동위상배열 안테나 보정을 수행하여 특성 차이를 보정할 수 있지만, 모듈형 레이더의 일부 모듈 고장으로 인해 모듈의 정비 및 교체가 이루어질 경우 새로 장착된 조립체를 위해 보정을 재수행 할 수밖에 없다. 보정을 위해 기존 보정 방식을 수행할 경우 레이더 전체를 이동하고 안테나를 분리하는 등 심각한 정비 소요가 발생하고, 별도의 근접 전계 시설까지 보유하여야 한다.

본 논문에서는 능동위상배열 안테나 보정법 중 반복 측정 시 RF 특성이 일관되게 나오는 점을 활용할 수 있는 주변 안테나를 통해 모듈화된 TRA의 대표 채널 위상을 측정하여 별도의 근접 전계 시설뿐만 아니라 사전에 식별된 표적 없이 전체 채널의 위상을 보정할 수 있는 방법을 선정하여 모듈화된 TRA 교체 시에도 빠르고, 간편하게 보정하여 정비 소요를 최소화할 수 있는 보정법을 제시하고, 실제 레이더에서 제시한 보정법을 수행하여 안테나의 성능을 확인하여 효용성을 입증하였다.

## II. 능동위상배열 안테나 보정법

능동위상배열 안테나 보정법에는 대표적으로 근접

전계 보정법, 보정라인 보정법, 상호 결합 보정법, 주변 안테나 보정법, 외부 표적 보정법이 있다[3].

첫 번째로, 근접 전계 보정법은 무반사 환경에서 비교적 정확한 보정이 가능하지만, 시간이 많이 소요되고 모듈화된 TRA를 교체하는 대형 능동위상배열 안테나는 재측정을 위해 이동 및 재설치하는데 정비 소요가 과하게 필요하다는 단점이 있다.

두 번째로, 보정라인 보정법은 필드에서 보정이 가능하지만, 보정을 위한 추가 장치를 안테나가 포함해야 하고 배열 소자 수가 많아질수록 수신 동적영역을 확보하기 어렵다.

세 번째로, 상호 결합 보정법 역시 필드에서 보정이 가능하지만, 배열 소자 수가 많아지면 보정 알고리즘의 복잡도가 높아진다[4].

네 번째로, 외부 표적 보정법은 운용 중 보정이 가능하다는 장점이 있지만, 원전계 공간이 필요하거나 운용 중 사용하는 방식이므로 대형 레이더는 공간 확보 문제와 측정하고 데이터를 처리하여 보정 계수를 실시간으로 처리하기 위해 신호처리능력이 높아져야 한다[5]-[7].

마지막으로, 주변 안테나 보정법은 필드에서 보정이 가능하고, 공통된 송수신 경로와 가역성을 이용하기 때문에 복잡도 역시 낮아 본 논문에서 보정법으로 채택하였다. 외부에 별도의 안테나를 장착해야 한다는 문제가 있지만, 본 논문의 방식은 장/탈착식으로 제작하여 평상시 안테나를 장착하지 않도록 하여 정비가 필요할 경우에만 활용할 수 있고, 측정 시마다 동일한 위치에 장착하여 안테나의 위상 특성이 변하지 않는다면 동일한 측정 결과가 나오는 점을 활용하였다. 제안된 방법은 정상 상태의 안테나의 위상 특성을 주변 안테나로 측정하여 참조 데이터로 활용하고, 이후 위상 보정이 필요한 상태의 위상 특성을 측정하여 참조 데이터와 위상차를 보정하도록 하였다.

## III. 보정 과정 및 시뮬레이션

### 3.1 주변 안테나 보정장치 구성

주변 안테나 보정을 위해서 특정 위치에서 전체 배열 면에 RF 신호를 송신하고 수신할 수 있는 안

테나, 파형 송수신과 데이터 저장 및 장입을 위한 보정장치가 필요하며 그림 1의 측정 사진과 같이 주변 안테나를 고정시켜 측정 대상 안테나의 소자별 특성을 측정할 수 있게 하였고, 주변 안테나를 통해 측정된 데이터가 보정장치로 저장되는 경로를 그림 2로 간략하게 표현하였다.

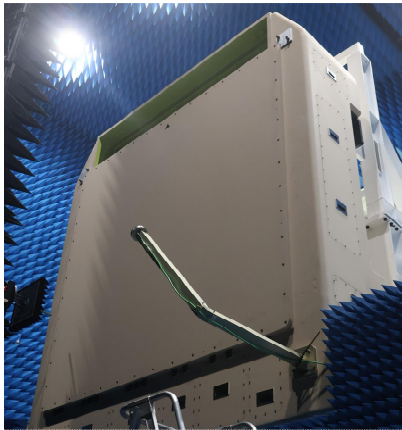


그림 1. 주변 안테나 보정 사진  
Fig. 1. Picture of peripheral probe calibration

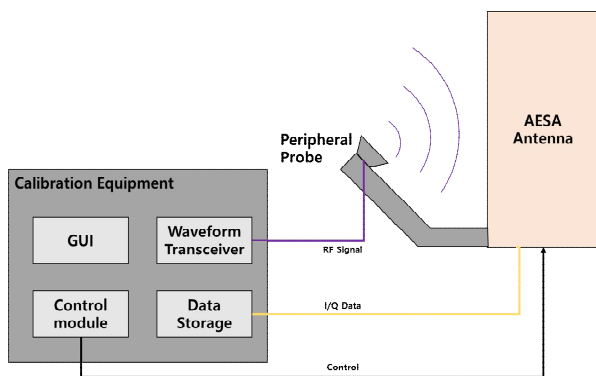


그림 2 주변 안테나 보정법 구성도  
Fig. 2. Peripheral probe calibration method layout diagram

주변 안테나의 경우 장착 위치에 따른 편파 불일치에 의해 수신 동적 영역을 불만족하는 위치가 없도록 원형 편파 특성과 넓은 빔폭을 가지는 안테나를 사용하였다.

### 3.2 보정장치 동작 원리

보정장치는 대상이 되는 능동위상배열 안테나로부터 국부, 기준, 동기 신호를 수신하여 동기가 맞춰진 신호를 생성할 수 있도록 설계하였다. 능동위

상배열 안테나의 송신 특성은 보정장치에서 수신한 X-대역 신호를 국부 신호 및 중간주파수를 이용해 기저대역으로 내린 후 I/Q 데이터로 변환하여 신호 저장기에 저장된다. 반대로, 능동위상배열 안테나의 수신 특성은 보정장치에서 송신한 X-대역 신호를 수신하여 송수신조립체에서 보정장치와 유사한 과정을 거쳐 수신된 I/Q 데이터를 보정장치로 전달하여 저장한다. I/Q 데이터량은 측정 주파수 샘플 수와 채널 수(TRA 또는 TRM)에 의해 결정된다.

보정장치는 초기에 배열 면 정렬이 정상인 상태에서 측정을 수행하여 저장을 하고, 배열 면 정렬이 틀어지는 상황이 발생하면 해당 상태를 측정하여 정상 상태와 차이를 이용해 보정을 수행한다. 그림 3은 주변 안테나 보정 절차에 대한 이해를 돕기 위한 흐름도이다.

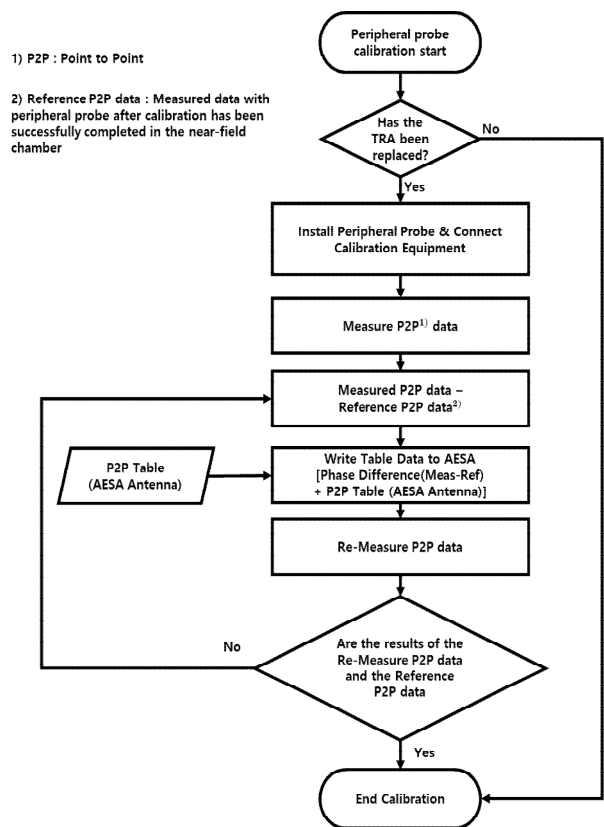


그림 3. 주변 안테나 보정 흐름도  
Fig. 3. Flowchart of peripheral probe calibration

### 3.3 주변 안테나 측정 위상 시뮬레이션

주변 안테나가 설치되는 위치를 고려하여 전파가 능동위상배열 안테나의 각 소자로 이동하는 경로의

거리를 이용해 측정될 위상을 예상할 수 있으며, 송수신기 위상 특성 차이 보정을 목적으로 하지만, 이 특성이 동일하다고 가정하여 무시하면 정상 상태의 수신된 신호의 위상[8]은 식 (1)과 같다.

$$\phi_n = k\sqrt{(x_0 - x_n)^2 + (y_0 - y_n)^2 + (z_0 - z_n)^2} \quad (1)$$

위 식에서  $\phi_n$ 은 주변 안테나로 측정된 n번째 소자의 위상값이고,  $k$ 는 위상 정수[rad/m],  $x_0$ 는 주변 안테나의 x좌표[m],  $y_0$ 는 주변 안테나의 y좌표[m],  $z_0$ 는 주변 안테나의 z좌표[m],  $x_n$ 은 측정 소자의 x좌표[m],  $y_n$ 은 측정 소자의 y좌표[m],  $z_n$ 은 측정 소자의 z좌표[m] 이다.

위 수식에서 위상값만을 이용하여 전체 배열 면의 위상 시뮬레이션한 결과는 그림 4과 같다.

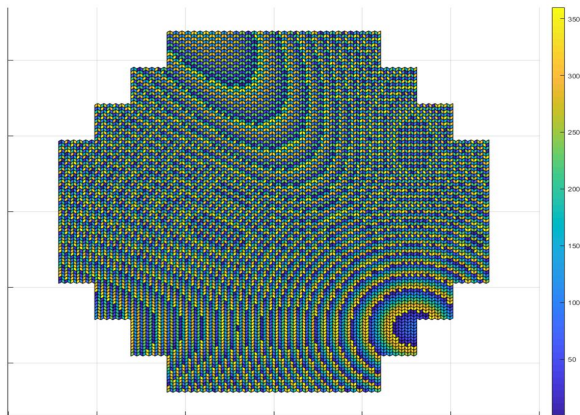


그림 4. 주변 안테나에 의한 이상적인 송수신모듈 위상분포  
Fig. 4. Ideal TRM phase distribution by peripheral probe

위상은 주변 안테나의 위치를 기준으로 퍼져나가는 형태의 분포를 보인다.

#### IV. 측정 및 분석 결과

주변 안테나를 AESA 안테나에 장착하여 전체 소자에 대한 위상을 측정하고, 추후 TRA 교체 시 위상 비교 및 보정을 위해 TRA의 대표 채널 위상을 측정하였다. 전체 소자의 위상 측정 결과는 그림 5와 같다.

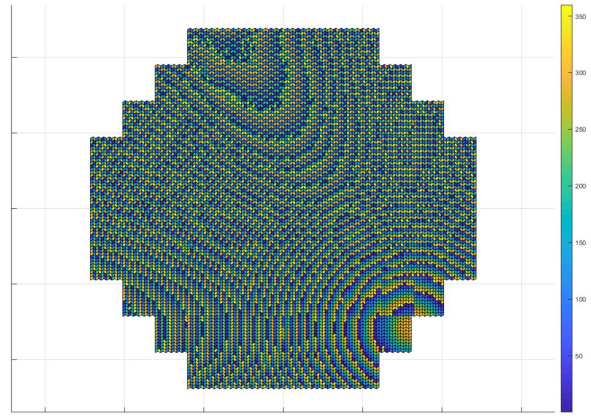


그림 5. 주변 안테나로 측정된 송수신모듈 위상분포  
Fig. 5 TRM phase distribution measured by peripheral probe

측정 대상인 AESA 안테나를 근접 전계 시설을 이용해 초기 보정 상태의 안테나 패턴을 측정하였다. 그림 6은 u( $\theta$ -cut,  $\phi=0$ ), v( $\theta$ -cut,  $\phi=90$ ) 안테나 패턴이며, 그림에 표시된 목표 부엽수준(SLL, Side Lobe Level) 대비 약 1.46dB 이상을 만족함을 확인하였다.

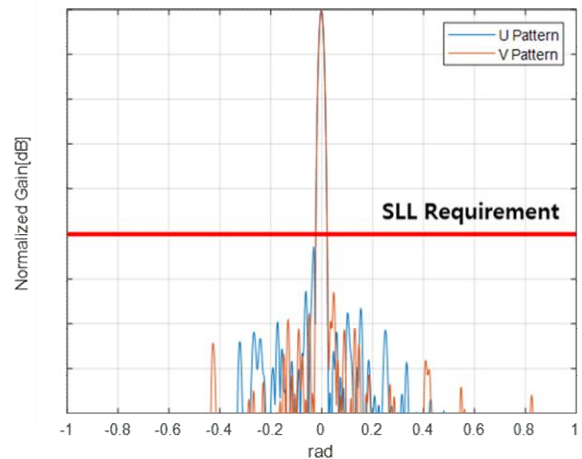


그림 6. 초기보정상태 u, v 안테나 패턴  
Fig. 6. u, v antenna pattern in initial calibration status

임의의 TRA 교체를 수행한 후 TRA의 대표 채널 위상을 측정하여 초기 보정 상태의 대표 채널 위상과 차이를 비교하여 교체한 위치의 위상이 다른 위치와 차이가 있음을 확인하였고 그 결과는 그림 7과 같다.

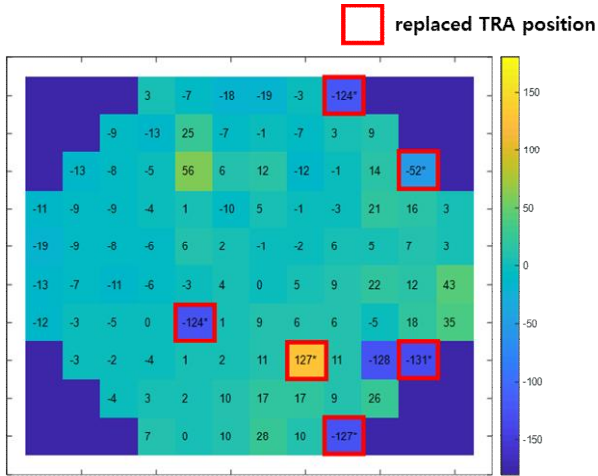


그림 7. TRA 교체 전/후 위상차  
Fig. 7. Phase difference before/after TRA replacement

TRA 교체 수량이 많지 않은 경우 위상 보정을 수행하지 않으면 빔 폭, 이득과 같은 성능에는 크게 영향을 주지 않지만, 부엽과 같이 위상에 크게 영향을 받는 요소는 목표값을 벗어날 가능성이 있다. 교체된 TRA의 수가 많아질수록 영향은 더욱 커질 것이며 심각할 경우 주빔의 형상 및 이득까지 영향을 줄 수 있다. 교체 전/후의 RMS 위상 오차는 식 (2)를 통해 분석하였으며

$$S_{\text{phase error}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (2)$$

위 식에서  $S_{\text{phase error}}$ 는 대표 채널 위상차의 RMS 위상 오차이며,  $N$ 은 측정 소자 수,  $X_i$ 는  $i$ 번째 소자의 측정 위상값이다.

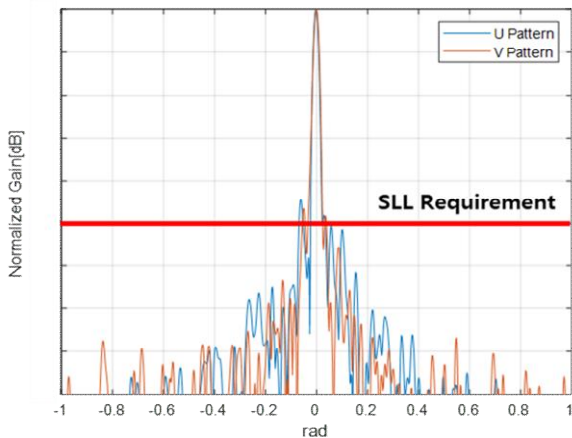


그림 8. TRA 교체 후 u, v 안테나 패턴  
Fig. 8. u, v antenna pattern after TRA replacement

보정 전 RMS 위상 오차는 약  $34.54^\circ$ 임을 확인하였다. 위에서 볼 수 있듯이 96개 중 6개 정도를 교체하였을 때 u, v 안테나 패턴은 그림 8과 같으며 빔 폭 등 주빔의 형상에는 크게 영향은 없지만 교체 위치의 위상이 틀어짐으로 인해 목표 SLL 대비 약  $-2.83\text{dB}$  만족하지 못함을 확인하였다.

안테나 패턴의 유사성을 정량적으로 분석하기 위해 식 (3) 안테나 패턴 상관계수[9]를 통해 분석하였으며

$$\rho_e = \frac{\left| \iint [F_1(\theta, \phi) \cdot F_2^*(\theta, \phi)] d\Omega \right|^2}{\iint |F_1(\theta, \phi)|^2 d\Omega \cdot \iint |F_2(\theta, \phi)|^2 d\Omega} \quad (3)$$

위 식에서  $\rho_e$ 는 두 패턴의 상관계수이며,  $F_1(\theta, \phi)$ 는 기준 안테나의 패턴,  $F_2(\theta, \phi)$ 는 비교할 안테나의 패턴이다.

위 식으로 보정 전 안테나 패턴의 상관관계를 계산하면 약 0.831로 확인되었다. 앞에서 측정된 결과를 이용해 보정장치는 각 TRA에 장입할 보정 테이블을 생성하고, 각 TRA에 보정값을 장입하면 TRA 내 메모리에 보정값이 저장된다. TRA의 위상 보정이 완료된 후 다시 주변 안테나를 이용하여 TRA 대표 채널 위상을 측정하여 초기 보정 상태 위상과 비교한 결과 그림 9과 같이 교체한 위치도 위상이 맞춰진 모습을 확인할 수 있었고 이때 RMS 위상 오차는 약  $5.95^\circ$ 임을 확인하였다.

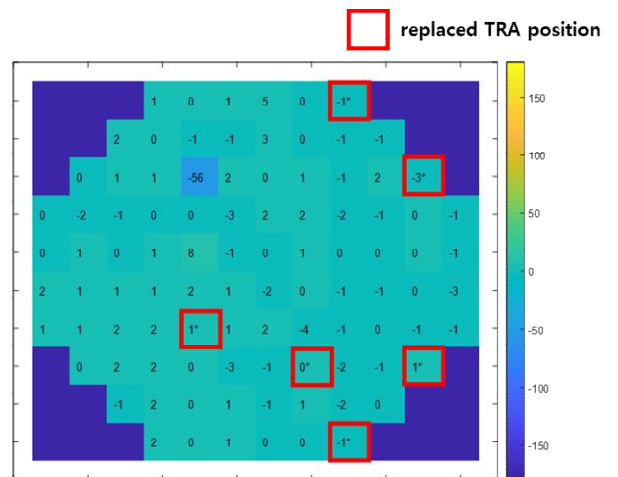


그림 9. 초기 위상과 위상 보정 후 위상차  
Fig. 9. Difference between initial and after calibration phases

위상 후보정을 수행한 후 측정된 u, v 안테나 패턴은 그림 10과 같으며 위상 보정을 통해 목표 SLL 대비 2.54dB 이상 만족하게 됨을 확인하였고, 보정 후 안테나 패턴의 상관관계는 약 0.986로 확인되었다.

본 논문의 주제와는 별개로 그림 9에서 보이는 바와 같이 TRA 보정 후에도 -56° 처럼 위상이 튀는 증상이 발생할 수 있는데 이런 문제가 발생하지 않는다면 더 높은 상관계수와 RMS 위상 오차를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

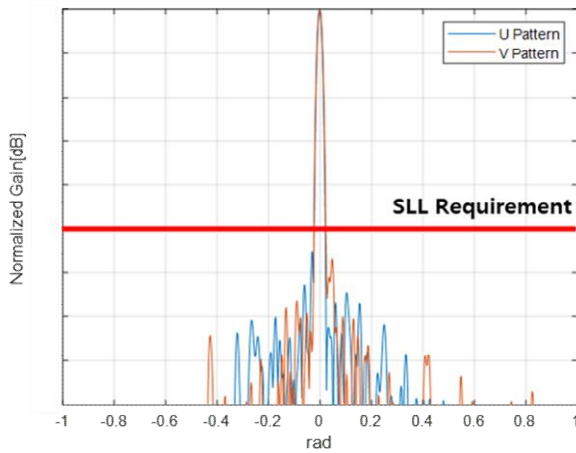


그림 10. 위상 보정 후 u, v 안테나 패턴  
Fig. 10. U, V antenna pattern after calibration

TRA 교체 후 보정 전/후 결과를 표로 정리하면 표 1과 같으며, 안테나 패턴의 상관계수는 보정 후 약 0.986으로 회복되어 초기 보정 상태와 거의 동일한 수준의 패턴이 복원되었음을 확인하였고, 보정 전 RMS 위상 오차 대비 약 80% 이상 개선되었으며, SLL 역시 보정 전에는 목표 SLL를 불만족하였지만 보정 후에는 다시 목표 SLL를 만족하는 결과를 확인할 수 있었다.

표 1. 보정 전/후 결과 데이터  
Table 1. Calibration before/after result data

Parameters Data	Correlation coefficient	RMS phase error [deg]	Relative value to target SLL [dB]
Reference data	1	0	1.46
Before calibration	0.831	34.54	-2.83
After calibration	0.986	5.95	2.54

본 논문에서는 외부에 장착하는 주변 안테나를 이용해 모듈형 레이더의 위상 보정을 수행하고 보정 전/후의 결과를 상관계수, RMS 위상 오차, 목표 SLL 대비 수치를 비교하여 보정 후 안테나 패턴이 정상 상태의 안테나 패턴과 거의 동일한 수준으로 복원되었음을 확인하였다. 결과적으로 대형 안테나의 보정을 별도의 시설을 사용하지 않아 시간을 크게 절약할 수 있고, 추후 모듈을 교체하는 경우에도 레이더 운용 지역에서 신속한 보정으로 안테나 성능을 확보하여 조속히 레이더를 운용할 수 있음을 확인하였다.

### V. 결 론

본 연구에서는 모듈 교체 시 발생하는 위상 편차를 별도의 근전계 시설 없이 보정하기 위한 주변 안테나 기법을 제안하였다. 제안된 방식은 반복 측정 시에도 RF 특성이 균일함을 활용하여 교체 모듈의 대표 채널만 측정하여 전체 소자의 위상 오차를 효과적으로 보정할 수 있음을 확인하였다. 상관계수, RMS 위상 오차, SLL 변화를 이용한 정량적 검증결과, 보정된 패턴은 초기 보정 상태와 유사한 수준으로 복원되어 기존 근전계 방식 대비 우수한 시간·비용 효율성을 보였다. 본 연구는 모듈형 레이더의 유지·정비 과정에서 현장 기반의 신속한 보정을 가능하게 함으로써 시스템의 운용 가용성을 향상하는데 기여할 것으로 기대된다.

### References

[1] D. H. Jang, "The Calibration Method of Airborne Active Electrically Scanned Array(AESA) Antenna using Near-field Measurement", Journal of KIIT, Vol. 21, No. 12, pp. 121-128, Dec. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.12.121>.

[2] S. H. Park and K. W. Kim, "Automatic Calibration Method of Active Phased Array Antenna using Far-field Measurement in Near-field Chamber", Journal of KIIT, Vol. 22, No. 12, pp. 111-118, Dec. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.12.111>.

- [3] I. Seker, "Calibration Method for Phased Array Radars", Radar Sensor Technology XVII, Vol. 8714, pp. 294-308, May 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2015694>.
- [4] A. Agrawal and A. Jablon, "A Calibration Technique for Active Phased Array Antennas", IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp. 223-228, Jan. 2003. <https://doi.org/10.1109/PAST.2003.1256985>.
- [5] G. Babur, G. O. Manokhin, E. A. Monastyr, A. A. Geltser, and A. A. Shibelgut, "Simple Calibration Technique for Phased Array Radar Systems", Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 55, pp. 109-119, Mar. 2017. <https://doi.org/10.2528/PIERM16101203>.
- [6] R. X. F. Bude, K. A. P. van Hastenberg, U. Johannsen, and A. B. Smolders, "Near-field Calibration Methods for Integrated Analog Beamforming Arrays and Focal Plane Array Feeds", IEEE Open Journal of Antenna and Propagation, Vol. 4, pp. 860-870, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2023.3304371>.
- [7] T. Takahashi, Y. Konishi, S. Makino, H. Ohmine, and H. Nanaguro, "Fast Measurement Technique for Phased Array Calibration", IEEE Transactions on Antenna and Propagation, Vol. 56, No. 7, pp. 1888-1899, Jul. 2008. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.924682>.
- [8] P. Z. Peebles, "Radar Principles", John Wiley & Sons, Inc, pp. 78, 1998.
- [9] S. Blanch, J. Romeu, and I. Corbella, "Exact Representation of antenna system diversity performance from input parameter description", Electronics Letters, Vol. 39, No. 9, pp. 705-707, May 2023. <https://doi.org/10.1049/el:20030495>.

## 저자소개

김 영 환 (Young-Hwan Kim)



2014년 2월 : 중앙대학교  
전자전기공학부(공학사)  
2016년 2월 : 중앙대학교  
전자전기공학부(공학석사)  
2020년 4월 ~ 현재 : 한화시스템  
지상레이다체계2팀 선임 연구원  
관심분야 : 위상배열안테나, 레이더

시스템

김 건 우 (Kun-Woo Kim)



2000년 2월 : 금오공과대학교  
전자통신공학과(공학사)  
2002년 2월 : 금오공과대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
2009년 2월 : 경북대학교  
전자공학과(공학박사)  
2007년 1월 ~ 현재 : 한화시스템

지상레이다체계2팀 수석 연구원

관심분야 : 안테나, 레이더 시스템

이 호 주 (Ho-Joo Lee)



2010년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과(공학사)  
2015년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과(공학석사)  
2020년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과(공학박사)  
2020년 3월 ~ 현재 : 한화시스템

지상레이다체계2팀 전문 연구원

관심분야 : 안테나, RF 시스템, 레이더 시스템