

근접전계 측정을 이용한 항공기용 능동위상배열(AESA) 안테나 보정방법

장 동 혁*

The Calibration Method of Airborne Active Electrically Scanned Array(AESA) Antenna using Near-field Measurement

Dong-Hyeok Jang*

요 약

AESA(Active Electrically Scanned Array) 안테나는 공간, 무게, 전원 등 제한이 많은 항공기에서 사용하기 적합하다. AESA 안테나는 제조 공차, 온도 변화, RF소자 특성 등으로 인해 채널마다 크기 및 위상값에 오차가 발생한다. 이러한 오차들은 안테나 성능 열화의 원인이 된다. 따라서, 성능 향상 및 유지를 위해 안테나 각 채널의 크기 및 위상 보정은 필수적이다. 이 논문에서는 4가지 안테나 보정법들을 설명하고 그 중 가장 정확한 근접전계 측정 보정법을 이용한 AESA 안테나 보정과정을 설명한다. 근접전계 측정 보정법을 검증하기 위해 16x16 AESA 안테나의 시뮬레이션과 실제 측정을 통해 안테나 성능 개선을 확인하였다.

Abstract

AESA(Active Electrically Scanned Array) antenna is advantageous in airborne radar, with their tight constraints on space, weight and power. Due to manufacturing tolerance, temperature variation, characteristics of electronic component, and so on, amplitude and phase error of each channel of antenna occur. These errors degrade antenna performance. Therefore, to improve and maintain performance of antenna, calibration is necessary. This paper explain four antenna calibration methods and AESA antenna calibration process using near-field measurement, which is the most accurate. To prove the calibration method using near-field measurement, the performance improvement of 16x16 AESA antenna is verified through simulation and measurement using near-field measurement calibration method.

Keywords

calibration method, airborne, AESA antenna, near-field measurement

* 한화시스템 시스템 부문 선임연구원
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1776-5116>

· Received: Oct. 13, 2023, Revised: Nov. 03, 2023, Accepted: Nov. 06, 2023
· Corresponding Author: Dong-Hyeok Jang
Dept. of Hanwha Systems 491-23, Gyeonggidong-ro, Namsa-cup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
Tel.: +82-31-8020-7169, Email: donghyuk.02@hanwha.com

1. 서 론

AESA(Active Electrically Scanned Array) 안테나는 많은 레이더 시스템에 사용되고 있다. 그 중에서도 장착공간이 제한적이고 무게 및 전원이 제한되는 환경인 항공기에서 AESA 안테나는 쉽게 적용시킬 수 있다는 이점을 가지고 있다[1][2].

AESA 안테나는 배열안테나, 송수신모듈 등으로 구성되어 있다. 그 중 중요한 송수신모듈의 경우 송신출력을 내기 위한 HPA와 수신신호를 저잡음 증폭시키기 위한 LNA로 구성되어 있다. 이렇게 구성된 AESA 안테나는 제조 공차, 온도 변화, RF소자 특성 등으로 인해 각 채널마다 크기 및 위상값에 오차가 발생한다[3]. 각 채널들의 크기 및 위상 오차들은 첨두치의 위치 및 값, 부엽 레벨 같은 안테나 성능 열화의 원인이 된다[4]. 성능 향상 및 유지를 위해 AESA 안테나 각 채널의 크기 및 위상 보정은 필수적이다[5].

크기 및 위상을 보정하기 위한 AESA 안테나 보정방법으로는 그림 1과 같이 근접전계 측정 보정법, 주변 안테나 보정법, 보정선로 보정법, 상호결합 보정법이 있다.

항공기 AESA 안테나의 경우 배열의 수가 많아

크기가 크고 사용 주파수 대역이 높기 때문에 원전계 측정이 어려워 근접전계 측정을 이용하여 안테나 성능을 측정한다[6]. 안테나 성능 측정 전에 안테나 보정을 수행해야 하기 때문에 본 논문에서는 초기 보정에 유리하고 정확한 측정이 가능한 근접전계 챔버를 이용한 근접전계 측정 보정법을 사용하였다. 근접전계 측정 보정법의 효과를 입증하기 위해 시뮬레이션과 AESA 안테나 측정을 통해 보정 전/후의 빔 조향 값, 빔폭, 부엽 레벨의 성능을 비교하였다.

시뮬레이션 및 측정에 사용한 16x16 AESA 안테나는 그레이팅 로브를 피하기 위해 삼각배열로 구성되어 있다. 송수신모듈의 경우 각 채널의 감쇄 적용과 보정을 위해 6-bit 감쇄기와 위상변이기를 사용한다고 가정하였다. 6-bit 감쇄기의 감쇄 스텝은 0.5 dB, 6-bit 위상변이기의 위상변이 스텝은 5.625°이다. 목표 부엽레벨을 -18 dB 이하로 16x16 배열에 Taylor 가중치를 적용했다.

본 논문 II장에서는 4가지의 AESA 보정법들에 대해 설명하고 근접전계 측정 보정법의 과정과 근접전계 측정 보정법 시뮬레이션 방법 및 결과에 대해서 III장에서 설명한다. IV장에서는 실제 근접전계 측정 보정법을 적용하여 보정 전/후에 측정된 안테나 성능 변화를 확인한다.

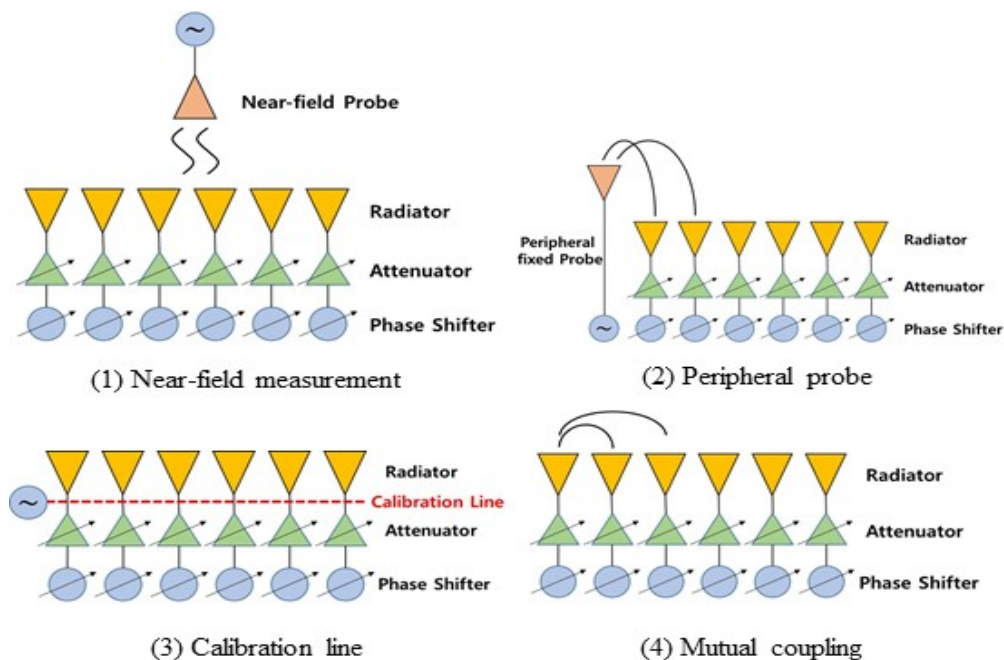


그림 1. AESA 안테나 보정법들
 Fig. 1. Calibration methods of AESA antenna

II. AESA 안테나 보정법들

그림 1에서 4가지 AESA 안테나 보정법들의 보정 원리에 대해 표현하였다. 근접전계 측정 보정법은 근접전계 챔버내의 측정 프로브를 이용해 각 채널의 크기, 위상값을 측정하여 보정하는 방법이다. 챔버내에서 각 채널의 크기 및 위상값을 직접 측정하기 때문에 정확도가 높고 근접전계 패턴 시험 이전에 초기보정이 가능하다는 장점이 있다.

주변 안테나 보정법은 AESA 안테나에서 배열안테나 외의 존재하는 독립적인 안테나를 이용하여 각 채널의 크기, 위상값을 측정하여 보정하는 보정법이다. 안테나에 존재하는 독립적인 안테나를 사용하기 때문에 추가적인 측정 시스템이 필요하지 않고 야전에서도 보정이 가능하다는 장점이 있다.

보정선로 보정법은 안테나 내부에 보정선로를 설계하고 그 선로를 이용하여 각 채널의 크기, 위상값을 측정하고 보정하는 방식이다. 안테나 내부에 설계된 보정선로를 사용하기 때문에 야전에서 보정이 가능하고 주기적으로 보정선로를 통해서 보정을 할 수 있다는 장점이 있다[7].

상호결합 보정법은 소자의 상호결합 값을 측정 후 계산하여 각 채널의 크기, 위상값을 보정한다.

표 1. 보정법들의 장단점
Table 1. Strength and weakness of calibration methods

Method	Strength	Weakness
Near-field measurement	1. Precisely calibration 2. Directly calibration	1. Long measure time 2. Complex setup
Peripheral probe	1. Calibration is possible in the field 2. No Measurement system required	1. Large antenna size 2. Wide dynamic range
Calibration line	1. Calibration is possible in the field 2. Periodic calibration	1. Additional hardware 2. Reference value measurement required
Mutual coupling	1. Periodic calibration 2. Ease of dynamic range design	1. Each channel power on/off required 2. Calibration algorithm required

각 소자의 주변소자를 사용하기 때문에 동적영역 설계가 쉽고 야전에서 주기적으로 보정이 가능하다는 장점이 있다. 각 보정법의 장단점을 표 1에 설명하였다[8].

III. 근접전계 측정 보정 과정 및 시뮬레이션

AESA 안테나 보정을 위한 근접전계 측정 보정법의 흐름도는 그림 2와 같고 보정과정은 아래 설명과 같다. AESA 안테나 보정을 위해 AESA 안테나를 근접전계 챔버에 위치시키고 가장 먼저 안테나 면 정렬을 통해 기계적 오차를 최소화시켜 준다. 두 번째로는 보정을 위해 안테나의 각 채널들의 크기 및 위상을 측정한다. 측정된 크기 값을 확인하여 채널의 정상/비정상 여부를 판단하여 비정상일 때는 안테나 정비 후 다시 시험을 진행해야 한다. 모든 채널이 정상일 때, 측정된 크기 및 위상값을 이용하여 보정값을 계산하고 적용해준다. 보정값 적용 후 다시 모든 채널의 크기 및 위상값을 측정하여 보정이 잘 되었는지 확인한다. 크기 및 위상값이 원하는 기준만큼 보정이 되지 않았다면 다시 처음부터 보정과정을 진행한다.

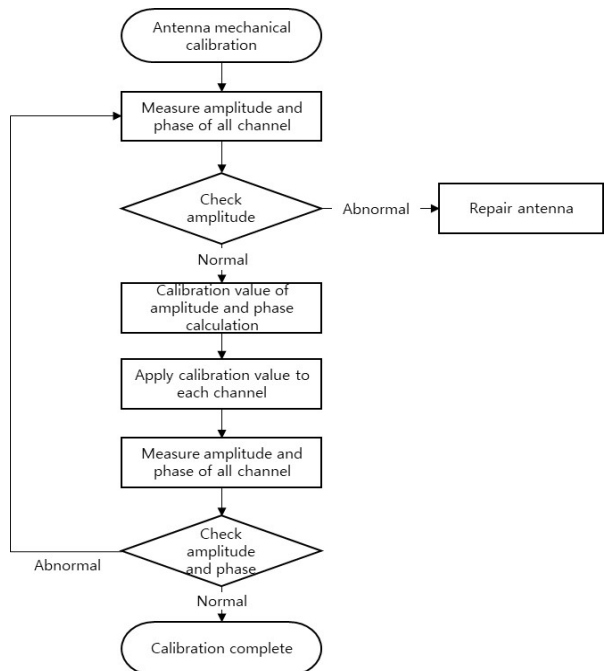


그림 2. 근접전계 측정 보정법 흐름도
Fig. 2. Flow chart of calibration method using near-field measurement

이러한 보정 과정을 거치는 근접전계 측정 보정법의 성능을 증명하기 위해 배열 안테나 패턴 수식을 이용하여 시뮬레이션을 수행했다. 등방성 복사소자로 이루어진 각 채널의 크기 값 a_n , 위상 값 p_n 인 N개의 수로 이루어진 배열 안테나의 패턴 수식은 아래 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 f(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N f_n(\theta, \phi) \quad (1) \\
 &= \sum_{n=1}^N a_n \exp \left[j(2\pi/\lambda \vec{k}(\theta, \phi) \cdot \vec{r}_n + p_n) \right] \\
 &= \sum_{n=1}^N a_n \exp(jb_n)
 \end{aligned}$$

위 식에서 λ 가 파장일 때, $\vec{k}(\theta, \phi)$ 는 조향 방향 (θ, ϕ) 의 단위벡터, \vec{r}_n 은 n번째 채널의 위치, $f_n(\theta, \phi)$ 는 n번째 소자의 배열 계수이고 b_n 은 n번째 소자의 위상값이다. 각 채널의 위치 오차가 없다고 가정하면 $\vec{k}(\theta, \phi) \cdot \vec{r}_n$ 은 조향 방향이 주어졌을 때 상수이고 b_n 과 p_n 은 위상을 표현한 같은 변수로 사용할 수 있다.

위치 오차가 없다고 가정할 때, 실제 오차가 적용된 채널의 크기 및 위상 값은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 a_n^{real} &= a_n(1 + \gamma_n) \quad (2) \\
 b_n^{real} &= b_n + \delta_n
 \end{aligned}$$

a_n^{real} 과 b_n^{real} 은 n번째 채널의 실제 크기 및 위상 값이고 확률변수 γ_n 과 δ_n 은 각각 상대적인 크기 및 위상의 오차이다. 중심극한정리에 따라 평균값 0인 가우시안 분포를 가지는 두 개의 크기, 위상의 확률 변수는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \gamma_n &\approx N(0, \sigma_a^2) \quad (3) \\
 \delta_n &\approx N(0, \sigma_p^2)
 \end{aligned}$$

위 식에서 σ_a 는 크기 오차의 표준편차, σ_p 는 위상 오차의 표준편차이다.

크기 및 위상 오차를 배열 안테나 패턴 식 (1)에 반영한 실제 안테나 패턴 식은 아래 식 (4)와 같다[9].

$$f^{real}(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n(1 + \gamma_n) \exp[j(b_n + \delta_n)] \quad (4)$$

식 (2)를 이용해 계산된 AESA 안테나 각 채널의 크기 오차의 평균, 표준편차, 최대값은 표 2와 같다. 식 (4)에 각 채널의 오차값들을 적용하여 보정 전 안테나 패턴을 계산했다.

표 2. 보정 시뮬레이션 전 크기 및 위상 오차 통계분석
Table 2. Amplitude and phase error statistical analysis before calibration simulation

Item	Amplitude error	Phase error
Average	0.09 dB	0.14°
Standard deviation	1.5 dB	15°
Maximum	4.54 dB	45.35°

각 채널에 크기 및 위상값에 보정값을 적용하여 안테나 패턴을 구하는 수식은 식 (5)와 같다. A_n 은 크기 오차 보정값, P_n 은 위상 오차 보정값이다.

$$\begin{aligned}
 f^{mod}(\theta, \phi) &= \sum_{n=1}^N a_n(1 + \gamma_n + A_n) \exp[j(b_n + \delta_n + P_n)] \quad (5)
 \end{aligned}$$

6-bit 감쇄기와 위상변이기의 스텝 값들을 이용하여 보정값을 계산 후 식 (5)에 대입하여 보정 후 안테나 패턴을 계산했다.

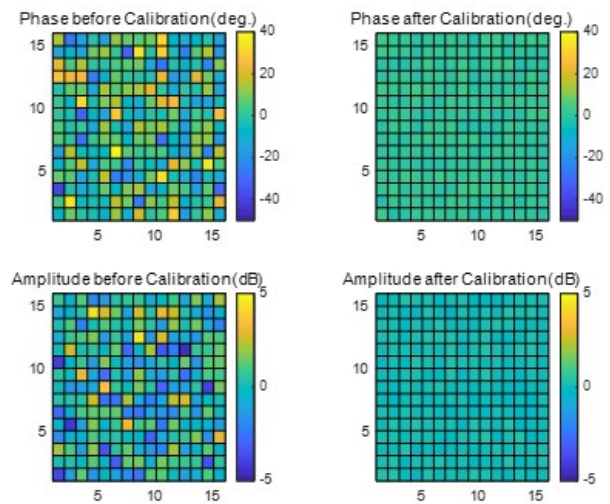


그림 3. 크기 및 위상 오차 보정 전/후 시뮬레이션
Fig. 3. Simulation result before and after calibration of amplitude and phase error

식 (3)을 통해 계산된 보정 전 크기 및 위상값과 식 (5)를 통해 보정된 크기 및 위상값은 그림 3과 같다.

보정 후 계산된 크기 및 위상 오차의 평균, 표준편차, 최대값은 표 3과 같다.

표 3. 보정 시뮬레이션 후 크기 및 위상 오차 통계분석
Table 3. Amplitude and phase error statistical analysis after calibration simulation

Item	Amplitude error	Phase error
Average	0.01 dB	0.06°
Standard deviation	0.14 dB	1.64°
Maximum	0.25 dB	2.63°

그림 4는 식 (4)와 식 (5)를 이용해 계산된 보정 전/후 안테나 패턴이다. 보정 전의 안테나 패턴은 대칭적이지 않은 반면 보정 후의 안테나 패턴은 대칭적인 모습을 나타낸다.

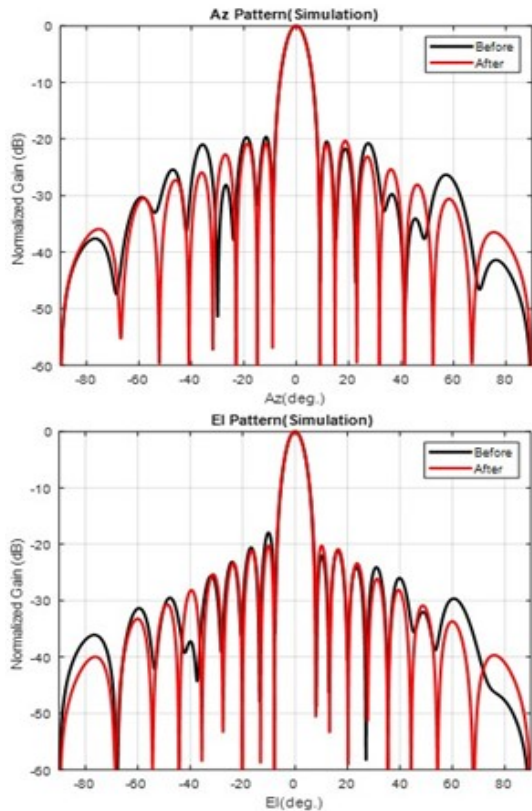


그림 4. 보정 시뮬레이션 전/후 안테나 Az, El 패턴
Fig. 4. Antenna Az, El pattern before and after calibration simulation

16x16 안테나의 이상적인 패턴과 보정 시뮬레이션 전/후의 크기 및 위상 값으로 계산된 안테나 패턴의 성능은 표 4와 같다.

표 4를 통해 보정전 EI 패턴의 빔 조향값이 0.04° 이 보정 후에 0°로 개선되었고 Az, EI 부엽 레벨 각각 -20 dB 이하로 개선된 것을 확인 하였다.

각 소자의 크기 및 위상값을 오차의 표준편차를 이용하여 생성하고 소자에 적용하였다. 적용된 소자의 크기 및 위상값으로 계산된 안테나 패턴으로 안테나 성능을 확인하였다. 또한, 크기 및 위상 값에 보정값을 적용하여 각 소자를 보정하고 안테나 패턴을 계산하여 보정 시뮬레이션 전/후의 안테나 성능을 비교하였고 성능이 개선되는 것을 확인하였다.

표 4. 보정 시뮬레이션 전/후 안테나 성능
Table 4. Antenna performance before and after calibration simulation

Antenna performance		Ideal	Before calibration	After calibration
Beam point	Az	0°	0.02°	0.02°
	EI	0°	0.04°	0°
Beam width	Az	7.56°	7.57°	7.57°
	EI	6.62°	6.61°	6.61°
Sidelobe level	Az	-20.55 dB	-19.65 dB	-20.34 dB
	EI	-20.34 dB	-17.96 dB	-20.27 dB

IV. 16x16 AESA 안테나 측정결과

평면형 근접전계 측정법이 적용된 근접전계 챔버에서 16x16 항공기용 AESA 안테나 측정을 진행하였다. 측정 프로브와 안테나 사이의 거리는 근접전계 조건이 만족하도록 설정하였다. 안테나 외곽의 포인트들을 이용하여 안테나 면 정렬 수행하여 기계적 오차를 최소화하였다. 소자들의 크기 및 위상값을 네트워크 분석기의 S21 값을 이용하여 측정하였다.

측정된 보정 전/후 소자들의 크기 및 위상 오차의 평균, 표준편차, 최대값은 표 5와 같다. 크기의 오차 표준편차가 1.58 dB에서 보정 후 0.31 dB로 1.27 dB 개선되었다. 또한, 위상 오차값의 표준편차가 15.94°에서 보정 후 2.39°로 13.55° 개선되었다.

표 5. 보정 전/후 크기 및 위상 오차 통계분석

Table 5. Amplitude and phase error statistical analysis after calibration simulation

Item	Before calibration		After calibration	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
Average	2.88 dB	-68.34°	0.55 dB	0.67°
Standard deviation	1.58 dB	15.94°	0.31 dB	2.39°
Maximum	7.52 dB	161.95°	1.78 dB	5.88°

보정 전의 크기 및 위상 오차 값들이 보정 후에 차이가 줄어든 것을 그림 5을 통해서 확인할 수 있다.

근접전계 측정 보정법에 의한 안테나 성능 변화를 확인하기 위해 측정된 보정 전/후의 크기 및 위상 값을 이용하여 안테나 패턴을 계산하고 성능을 비교하였다.

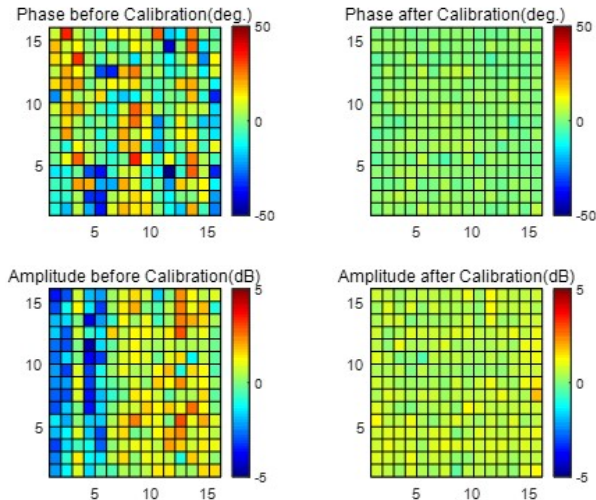


그림 5. 크기 및 위상 오차 보정 전/후 측정값
Fig. 5. Measurement before and after calibration of amplitude and phase error

보정 전 Az패턴에서 부엽레벨이 -16.27 dB로 크게 증가하고 비대칭적인 모습이 보정을 통해 부엽레벨이 낮아지는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다.

식 (4)와 식 (5)를 이용하여 계산된 보정 전/후의 3D 패턴은 그림 7, 8과 같다. 그림 7의 대칭적이지 않고 에너지가 분산된 3D 패턴이 보정 후 대칭적이고 에너지가 집중된 3D 패턴으로 개선된 것을 그림 8에서 확인하였다.

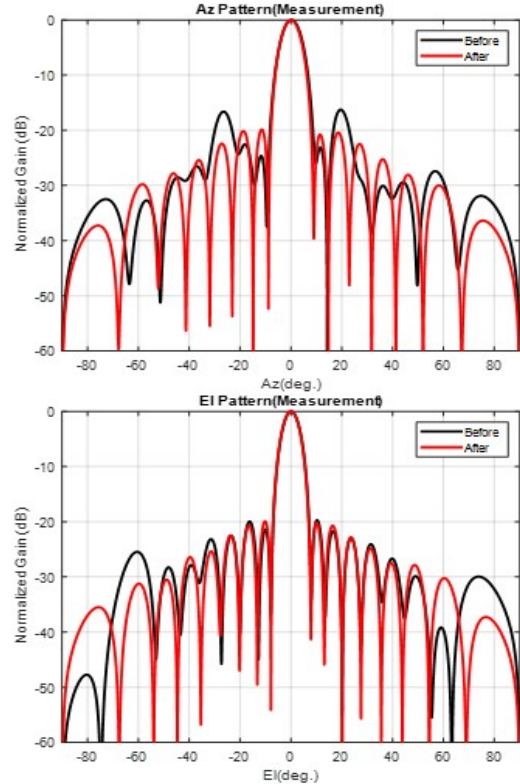


그림 6. 보정 전/후 안테나 Az, Ei 패턴
Fig. 6. Antenna Az, Ei pattern before and after calibration

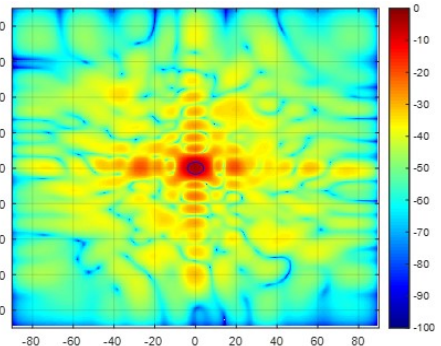


그림 7. 보정 전 3D 패턴
Fig. 7. 3D pattern before calibration

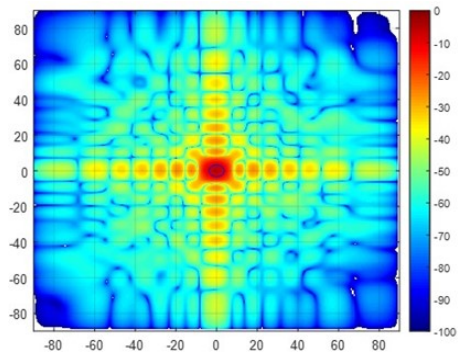


그림 8. 보정 후 3D 패턴
Fig. 8. 3D pattern after calibration

16x16 안테나의 이상적인 패턴과 보정 전/후의 측정된 크기 및 위상 값으로 계산된 안테나 패턴의 성능은 표 6과 같다. 표 6을 통해 보정전 Az, El 패턴의 빔 조향값이 0.22°, 0.12°에서 보정 후에 0.02°, 0°로 개선되었고 Az 빔폭이 7.77°에서 7.52°로 0.25°나 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한, Az, El 부엽 레벨 각각 -19 dB 이하로 개선된 것을 확인할 수 있다.

측정된 보정 전/후의 크기 및 위상값으로 식 (4)를 이용하여 계산된 안테나 패턴의 빔 조향 값, 빔폭, 부엽레벨을 통해 안테나 성능이 개선됨을 확인하였다.

표 6. 보정 전/후 안테나 성능

Table 6. Antenna performance before and after calibration

Antenna performance		Ideal	Before calibration	After calibration
Beam point	Az	0°	0.22°	0.02°
	El	0°	0.12°	0°
Beam width	Az	7.56°	7.77°	7.52°
	El	6.62°	6.63°	6.61°
Sidelobe level	Az	-20.55 dB	-16.27 dB	-19.87 dB
	El	-20.34 dB	-19.60 dB	-20.02 dB

V. 결 론

본 논문에서는 다양한 안테나장치 보정방법들 중 가장 정확한 근접전계 측정 보정법을 사용하여 16x16 AESA 안테나의 각 소자들의 크기/위상 값을 보정하여 안테나의 성능 변화를 확인하였다. 우선, 근접전계 측정 보정법을 검증하기 위해 크기/위상 오차 값을 확률변수를 이용하여 생성하고 각 소자의 크기/위상 값으로 안테나 패턴을 시뮬레이션하였고 성능 개선을 확인하였다. 또한, 실제 16x16 항공기용 AESA 안테나를 이용하여 보정 전/후의 각 소자 크기/위상값을 측정하여 안테나 패턴으로 계산해보고 근접전계 측정 보정법에 의한 안테나 성능 개선을 확인하였다.

References

[1] W. Gruener, J. P. Toernig, and P. J. Fielding, "Active-electronically-scanned-array based radar system features", Radar 97, No. 449, pp. 393-343,

- Oct. 1997. <https://doi.org/10.1049/cp:19971691>.
- [2] A. M. Kinghorn, "Where Next For Airborne AESA Technology?", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 24, No. 11, pp. 16-21, Nov. 2009. <https://doi.org/10.1109/MAES.2009.5344177>.
- [3] G. He, X. Gao, and H. Zhou, "Fast Phased Array Calibration by power-only Measurements Twice for Each Antenna Element", International Journal of Antenna and Propagation, Vol. 2019, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6432149>.
- [4] 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>.
- [5] K. Hassett, "Phased Array Antenna Calibration Measurement Techniques and Methods", European Conference Antennas Propagation (EuCAP), Apr. 2016.
- [6] C. A. Balanis, "Modern Antenna Handbook", John Wiley & Sons, Inc., pp. 929, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470294154>.
- [7] B. L. Cho, J. S. Lee, S. G. Sun, J. M. Lee, E. H. Lee, and S. K. Lee, "A Study on Calibration of Transmitter and Receiver Channels Using Coupling Lines in an Active Phased Array Radar System", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 10, pp. 43-49, Oct. 2016. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.10.43>.
- [8] I. Seker, "Calibration methods for phased array radars", Radar Sensor Technology XVII, Vol. 8714, pp. 294-308, May 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2015694>.
- [9] G. He, X. Gao, and R. Zhang, "Impact Analysis and Calibration Methods of Excitation Errors for Phased Array Antennas", IEEE Access, Vol. 9, pp. 59010-59026, Apr. 2021. <https://doi.org/110.1109/ACCESS.2021.3073222>.

저자소개

장 동 혁 (Dong-Hyeok Jang)



2014년 2월 : 중앙대학교

전자전기공학부과 (공학사)

2016년 2월 : 중앙대학교

전자전기공학과 전과 및 광과

(공학석사)

2016년 7월 ~ 현재 : (주)한화시스템

선임 연구원

관심분야 : 능동위상배열 안테나, 레이더 시스템