

능동위상배열 안테나의 배열면 고속 정렬에 관한 연구

김인환*¹, 김태형*², 이재용**³, 김동혁*³

A Study on Fast Alignment of Active Electrically Scanned Array(AESA) Antenna

Inhwan Kim*¹, Taehyung Kim*², Jaeyong Lee**³, and Donghyeok Kim*³

이 논문은 2020년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC200027FD)

요 약

레이더의 발전 및 운용 조건을 만족시키기 위해 레이더 안테나는 AESA(Active Electrically Scanned Array)로 구성되고 있으며, AESA 안테나의 성능 보장을 위해 배열면 정렬은 필수적이다. AESA 안테나의 경우 배열 수가 많아 크기가 크기 때문에 근접전계 배열면 정렬을 이용하며, 기존의 근접전계 배열면 정렬 방식은 복사 소자 수만큼 측정을 요구하므로, 정렬 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이 논문에서는 능동위상배열 안테나의 배열면 정렬을 위한 고속 정렬 알고리즘을 설명하고, 이를 적용하여 20x20 AESA 안테나 고속 정렬 시뮬레이션과 실제 측정을 통해 검증하였다. 고속 정렬 알고리즘의 정렬 소요 시간은 기존 P2P 대비 24배 단축되며, 각 소자의 진폭 평균 및 표준편차는 68.4895 dB, 3.7089 dB에서 73.4834 dB, 1.4449 dB로 개선되었고, 위상의 평균 및 표준편차는 -2.207° , 103.1367° 에서 0.0946° , 3.1955° 로 개선되었다.

Abstract

In order to meet the development and operation conditions of the radar, the radar is composed of Active Electrically Scanned Array(AESA), the array plane alignment is essential to ensure the performance of AESA antenna. As the number of radiating elements increases, near-field measurement method is used for alignment, near-field measurement has the disadvantage of taking a long time, because it is required as many as the number of elements. This paper explain a proposed alignment algorithm for AESA antenna and the fast alignment of 20x20 AESA antenna is verified through simulation and measurement using near-field measurement. A alignment time of proposed algorithm is reduced by 24 times compared to P2P. The amplitude and phase average and standard deviation of all elements were improved from -68.4895 dB, 3.7089 dB to 73.4834 dB, 1.4449 dB, and from -2.207° , 103.1367° to 0.0946° , 3.1955° .

Keywords

fast alignment algorithm, calibration, AESA antenna, near-field measurement

* (주)한화시스템 연구원(*³ 교신저자)
- ORCID¹: <http://orcid.org/0009-0004-6258-4045>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0001-7235-3866>
- ORCID³: <http://orcid.org/0009-0007-2525-9595>
** 국방과학연구소 연구원
- ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-9374-0769>

• Received: Nov. 07, 2023, Revised: Dec. 01, 2023, Accepted: Dec. 04, 2023
• Corresponding Author: Donghyeok Kim
Dept. of Hanwha Systems
Tel.: +82-31-8020-7560, Email: kdong9593@hanwha.com

1. 서 론

최신의 레이더는 다양한 다수의 표적을 동시에 탐색 및 추적하는 다기능 레이더로 발전하고 있으며, 이를 위해 레이더의 안테나는 능동위상배열 안테나로 구현되고 있다[1]. 능동위상배열 안테나는 전자적 빔조향, 수신 다중빔, 적응빔 등 디지털 빔형성이 가능하며, 이를 위한 각 복사 소자의 정밀한 제어가 요구된다. 이를 위해 위상배열안테나의 배열면 정렬은 필수적이며[2][3], 크기가 큰 레이더용 안테나는 근접전계 배열면 정렬을 이용한다. 또한 mutual coupling을 이용하여 배열면 정렬을 할 수 있지만[4], 모든 소자의 mutual coupling값을 구해야 한다. 근접전계 배열면 정렬과 mutual coupling을 이용한 배열면 정렬은 안테나의 크기에 의존하지 않는다는 이점이 있지만, 측정 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다[5].

근접전계 배열면 정렬은 근접전계 챔버 내에서 측정 프로브를 이용하여 각 복사 소자의 진폭 및 위상 값을 측정하여 정렬하는 방법으로, 일반적으로 많이 이용하는 정렬 방법은 그림 1과 같이 Back projection과 P2P(Point to Point)가 있다.

Back projection은 안테나보다 큰 면적을 프로브로 측정한 후 각 소자의 진폭 및 위상을 구하는 방식이며, 안테나 배열면의 4~5배 면적에 대하여 전계값을 측정해야 한다. 또한, Mutual coupling으로 인해 계산된 각 소자의 진폭 및 위상이 오차를 가질 수

있다는 단점이 있다. 그리고, P2P 방식은 근접전계 측정 영역에서 복사 소자별 중심 위치의 전계값을 측정하는 방법으로, Back projection에 비해 진폭 및 위상 오차는 적지만, 복사 소자 수만큼 측정을 요구하므로 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

본 논문에서는 다기능 레이더에서 사용하는 능동 위상배열 안테나의 고속 정렬법에 대해서 기술하고자 한다. 제안한 알고리즘의 효과를 입증하기 위해 P2P 방법을 이용한 배열면 정렬 결과와 제안한 알고리즘을 이용한 배열면 정렬 결과를 비교하였다.

시험 조건은 20x20 배열 안테나를 이용하였으며, 능동위상배열 안테나의 성능 중 HPBW(Half Power Beam Width)와 PSL(Peak Side Lobe Level)을 확인하였다. 제안한 고속 배열면 정렬 알고리즘을 적용하여 능동위상배열 안테나 배열면 고속 정렬이 가능함을 확인하였다.

II. 근접전계 배열면 고속 정렬

근접전계 배열면 정렬은 능동위상배열 안테나 배열면의 각 소자에서 크기 및 위상이 동일한 값을 갖도록 보정하는 정렬 절차이다[6]. 본 논문에서 제안한 고속 정렬 알고리즘은 복사 소자의 중앙에서 측정 프로브를 이용하여 한번 전계를 방사하고 모든 소자에서 수신하여 배열면을 정렬하는 방법이다. 능동위상배열 안테나 배열면 고속 정렬 알고리즘의 흐름도를 그림 2에 나타내었다.

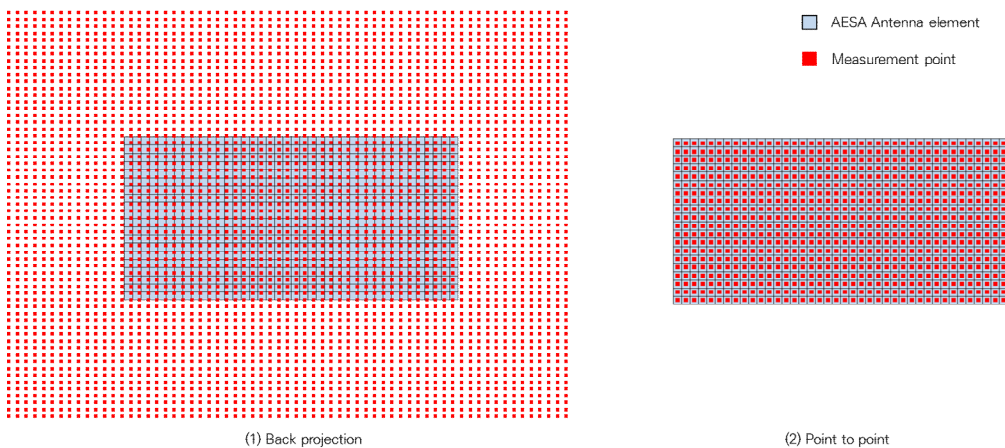


그림 1. 능동위상배열 안테나의 근접전계 배열면 정렬 방법
Fig. 1. Near-Field Alignment methods of AESA antenna

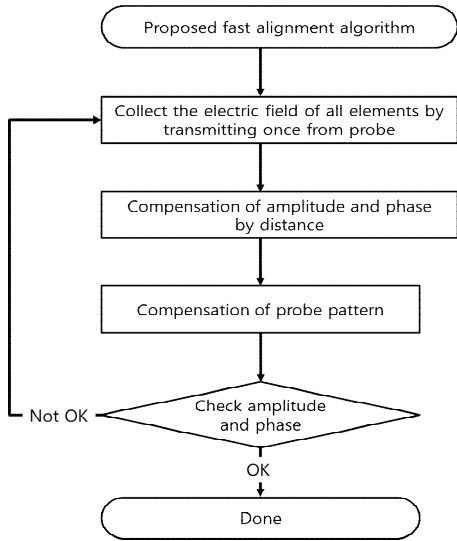


그림 2. 능동위상배열 안테나 배열면 고속 정렬 알고리즘 흐름도

Fig. 2. Proposed fast alignment algorithm process of AESA antenna

고속 정렬 알고리즘은 근접전계 프로브를 이용하여 배열면 중심으로 송신하고, 모든 소자에서 수신한 전계값을 각 소자와 프로브 사이의 거리에 따른 보상, 프로브 패턴 보상을 수행하며, 보상된 진폭 및 위상값을 기준 오차값과 비교하여 정상/비정상 여부를 판단한다. 정상/비정상 기준 오차보다 적으면 정상으로 판단하여 알고리즘이 완료되고, 비정상으로 판단 시 처음부터 알고리즘을 다시 수행한다.

알고리즘 시뮬레이션 조건은 20x20 위상배열안테나를 구성하여 Taylor 가중치를 적용하였으며, Grating lobe를 고려하여 능동위상배열 안테나를 삼각 배열하였다.

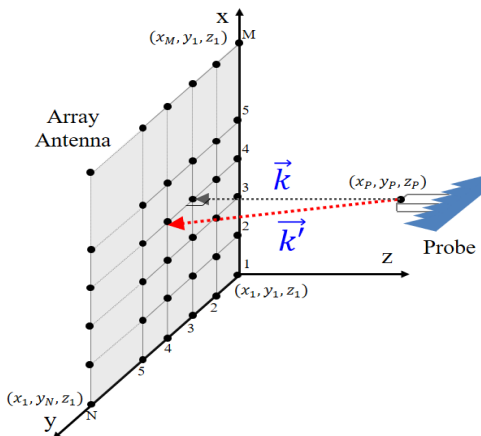


그림 3. 근접전계 측정 환경

Fig. 3. Near-Field Measurement configuration of AESA antenna

고속 정렬 알고리즘 수행을 위한 근접전계 측정 환경은 그림 3과 같이, 배열면에 수직 방향으로 측정 프로브가 위치한다.

위 그림에서 x-y평면에 능동위상배열 안테나가 위치해있고, 근접전계 프로브의 위치 좌표는 (x_p, y_p, z_p) 이다. 근접전계 프로브로부터 법선 방향으로 능동위상배열 안테나 배열면으로의 벡터가 \vec{k} 이고, 근접전계 프로브로부터 임의의 복사 소자의 벡터가 \vec{k}' 이다. 위상배열 안테나와 근접전계 프로브는 500 mm 떨어져 있다. 측정 거리에 따라서 진폭 및 위상 차이가 발생하므로 이를 보상하여야 하며, 측정 거리에 따른 진폭 및 위상값은 식 (1)과 같다.

$$E_R = E_{normal} \frac{1}{|\vec{k}'|^2} e^{(j\frac{2\pi}{\lambda}|\vec{k}'|)} \quad (1)$$

여기서, E_{normal} 은 근접전계 프로브 출력 전계 값, λ 는 파장이다. 근접전계 프로브에서 한번 방사하여 배열안테나가 수신한 전계값 E_{RXi} , ($i = 1, 2, \dots, 400$) 행렬을 E_{RX} 로 정의하고, 배열안테나와 근접전계 프로브 사이의 거리에 따른 진폭 및 위상값 E_{Mj} ($j = 1, 2, \dots, 400$)의 행렬을 E_M 으로 정의하면 측정 거리에 따른 보상 수식은 식 (2)와 같다.

$$E_{RC} = E_{RX} \times E_M^* \quad (2)$$

여기서, 행렬 E_{RC} 모든 소자에서 수신한 전계 값 행렬 E_{RX} 에 거리에 따른 진폭 및 위상을 보상한 행렬, E_M^* 은 E_M 의 공액 행렬(Conjugate matrix)이며, 행렬곱이 아닌 행렬의 요소끼리 곱하는 요소곱을 이용해서 E_{RC} 를 구할 수 있다.

근접전계 프로브로 송신하여 위상배열 안테나로 수신한 데이터는 프로브 패턴 영향을 받는다[7][8]. 이를 보상하기 위해 모든 복사 소자 위치에서의 프로브 패턴 전계 값을 구해야 하며, 근접전계 측정 프로브 WR284의 구조는 그림 4와 같다.

그림에서 WR284 프로브의 길이가 a 이고, 높이가 b 이며, 프로브 개구면 중심에서 임의의 방향으로의 벡터가 \vec{r} 이다. x축에서 벡터 \vec{r} 의 x-y 평면 정사영으로의 각도가 ϕ 이며, z축에서 벡터 \vec{r} 로의 각도가 θ 이다.

프로브 패턴 보상을 위해 모든 소자 위치에서 프로브 패턴의 전계 값을 구해야 하며, 프로브 패턴은 도파관(프로브)의 E-plane 값과 H-plane의 값을 이용하여 구할 수 있다[9]. 프로브 패턴의 전계 값을 구하는 수식은 식 (3)과 같다.

$$E(r, \theta, \phi) = \frac{e^{jkr}}{kr} [E_E(\theta) \sin\phi \hat{e}_\theta + E_H(\theta) \cos\phi \hat{e}_\phi] \quad (3)$$

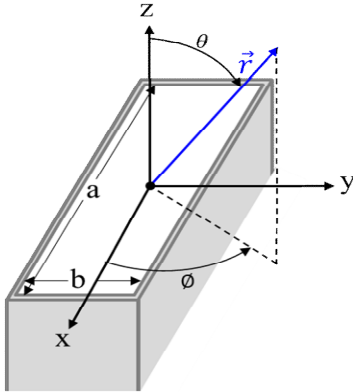


그림 4. 근접전계 측정프로브(WR284) 구조
Fig. 4. Structure of Near-Field measurement probe

여기서, r 은 프로브로부터 떨어진 거리, k 는 $2\pi/\lambda$, \hat{e}_θ 는 θ 방향의 단위 벡터, \hat{e}_ϕ 는 ϕ 방향의 단위 벡터이다. $E_E(\theta)$ 는 θ 각도에서의 프로브의 E-plane 패턴 값, $E_H(\theta)$ 는 θ 각도에서의 프로브의 H-plane 패턴 값이다. 모든 소자 위치에서의 프로브 복소 전계 값 E_{Pi} ($i = 1, 2, \dots, 400$) 행렬을 E_P 로 정의하면, 프로브 패턴에 의한 영향 보상 수식은 식 (4)와 같다.

$$E_{PC} = E_{RC} \times E_P^* \quad (4)$$

위의 식에서, 행렬 E_{PC} 는 E_{RC} 행렬에 근접전계 프로브의 패턴을 보정한 행렬이다. 식 (2)에서와 동일하게, E_P^* 는 E_P 의 공액 행렬이며, 행렬곱이 아닌 요소곱을 이용해서 행렬 E_{PC} 를 구할 수 있다.

III. AESA 안테나 측정결과

P2P를 이용한 S-대역 20x20 위상배열 안테나 진폭 및 위상값의 정렬 전/후 결과를 그림 5에 나타내었으며, Taylor 가중치를 적용하기 전의 결과이다.

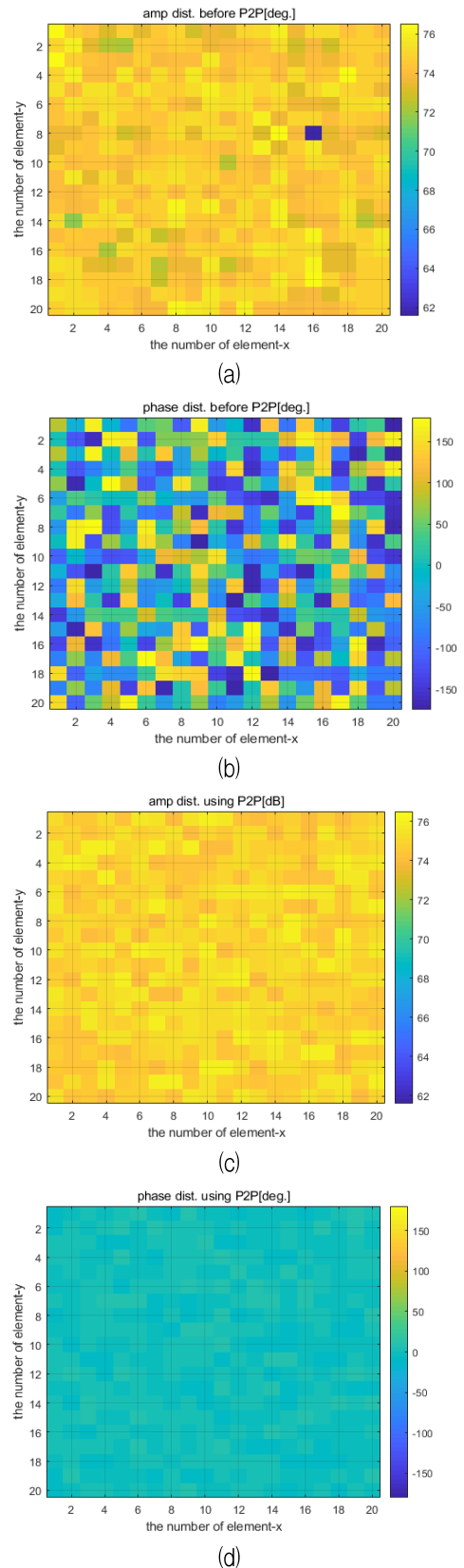


그림 5. P2P 정렬 전 진폭(a) 및 위상값(b) 정렬 후 진폭(c) 및 위상값(d) 결과
Fig. 5. Results of before/after AESA antenna alignment using P2P

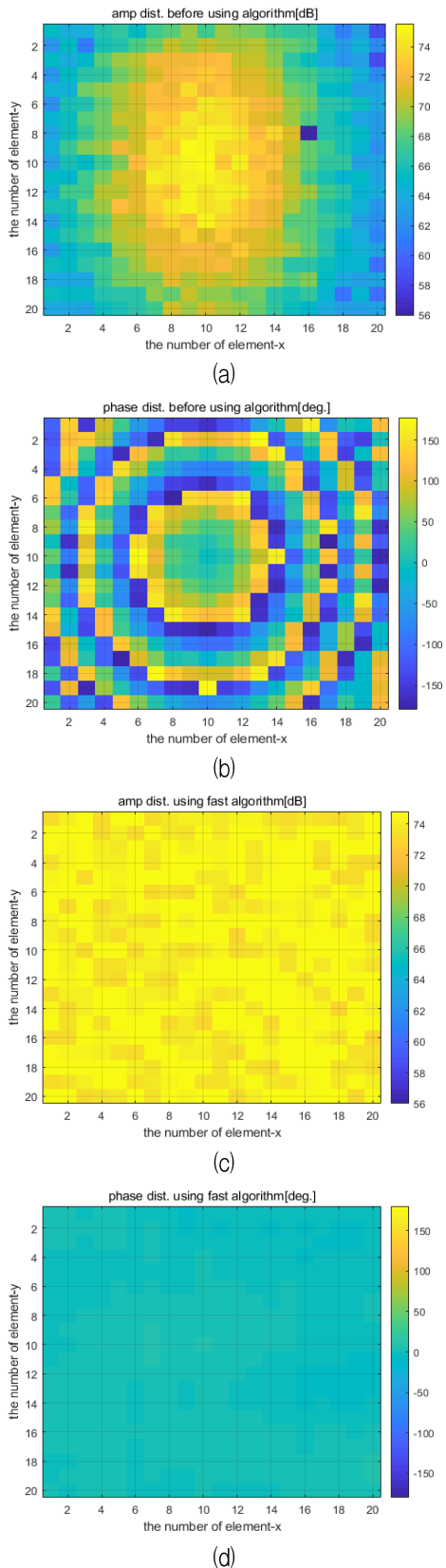


그림 6. 배열면 고속 정렬 알고리즘을 적용 전 진폭(a) 및 위상값(b), 적용 후 진폭(c) 및 위상값(d) 결과
 Fig. 6. Results of before/after AESA antenna alignment using proposed algorithm

P2P 정렬 전 진폭(a) 및 위상값(b)은 제조 공차, 온도 변화, RF 소자 특성 등으로 인해 오차를 가지고 있다. 배열면 정렬 전 진폭 및 위상값은 오차로 인해 균일 분포하지 않지만, 배열면 정렬 후 진폭 및 위상값은 균일한 모습을 나타낸다. P2P 정렬 전 각 소자의 진폭 평균 및 표준편차는 74.5030 dB, 1.0338 dB이고 정렬 후 평균 및 표준편차는 74.5107 dB, 0.8897 dB이었다. 또한, 위상의 보정 전 평균 및 표준편차는 -2.4183° , 103.695° 이고 보정 후 평균 및 표준편차는 -0.0045° , 4.4309° 이었다.

배열면 고속 정렬 알고리즘을 적용한 위상 배열 안테나의 진폭 및 위상 정렬 전/후 결과를 그림 6에 나타내었으며, 그림 5와 동일하게 Taylor 가중치를 적용하기 전의 결과이다.

고속 알고리즘 적용 전 진폭(a) 및 위상값(b)은 안테나 배열면을 중심으로 대칭적인 모습이다. 그림 3과 같이 배열면 중심에서 수신하였으므로 배열면 중심의 거리가 가장 짧고, 배열면 중심을 기준으로 대칭적인 모습이다. 고속 정렬 알고리즘을 적용한 배열면 정렬 전 측정된 각 소자의 진폭 평균 및 표준편차는 68.4895 dB, 3.7089 dB이고 보정 후 평균 및 표준편차는 73.4834 dB, 1.4449 dB이었다. 또한, 위상의 보정 전 평균 및 표준편차는 -2.207° , 103.1367° 이고 보정 후 평균 및 표준편차는 0.0946° , 3.1955° 이었다.

P2P를 이용할 경우, 진폭 오차 값의 평균은 0.6754 dB에서 0.4938 dB로, 표준편차는 1.0338 dB에서 0.8897 dB로 개선되었으며, 위상 오차 값의 평균은 89.7236° 에서 3.839° 로 표준편차는 103.695° 에서 4.4309° 로 개선되었다. 고속 정렬 알고리즘을 적용 시 진폭 오차 값의 평균은 3.1408 dB에서 1.248 dB로, 표준편차는 3.7089 dB에서 1.4449 dB로 개선되었으며, 위상 오차값의 평균은 76.7101° 에서 4.248° 로 표준편차는 103.1367° 에서 3.1955° 로 개선되었다.

Taylor 35dB 가중치를 적용한 20x20 위상배열 안테나의 이상적인 2D 안테나 패턴과, P2P를 적용하여 진폭과 위상을 정렬한 경우, 그리고 제안한 알고리즘을 적용하여 진폭 위상을 정렬한 2D 안테나 패턴은 그림 7과 같다.

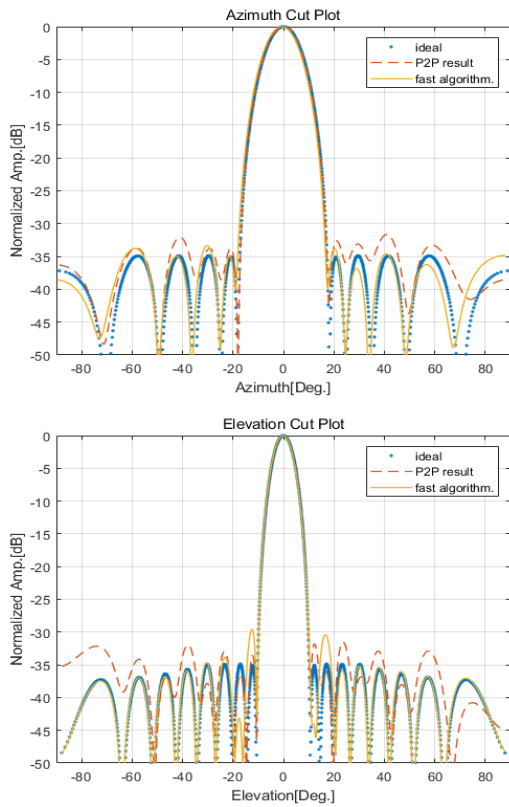


그림 7. 이상값, P2P, 제안한 알고리즘을 이용한 2D 안테나 패턴 방위각(위), 고각(아래)
 Fig. 7. 2D antenna pattern of ideal, by applying P2P, and proposed algorithm

위 그림에서, 모든 복사 소자의 진폭 및 위상이 동일한 데이터의 2D 안테나 패턴 결과(ideal)와 P2P를 적용한 진폭 및 위상, 고속 알고리즘을 이용한 2D 안테나 패턴 결과를 비교하였다. Taylor 35dB 가중치를 적용하였으며, 안테나 2D 패턴의 성능은 표 1과 같다.

표 1. 이상값, P2P, 제안한 알고리즘을 적용한 안테나 성능
 Table. 1. Antenna performances of ideal, P2P, proposed algorithm

Performances of antenna		ideal	P2P	proposed algorithm
HPBW	Az	12.756°	12.846°	12.855°
	EI	7.588°	7.524°	7.587°
PSLL	Az	-35.06 dB	-32.43 dB	-33.74 dB
	EI	-35.06 dB	-32.17 dB	-29.57 dB

표 1를 통해 안테나 성능의 이상 값은 빔폭 방위각 12.756°, 고각 7.588°이며, 부엽레벨 방위각 35.06dB, 고각 35.06 dB이다. P2P의 경우 안테나 성능 이상 값과 빔폭 오차 0.1도 이하, 부엽레벨 3dB 이하로 확인하였으며, 고속 알고리즘 적용 시 빔폭 0.1도 이하, 부엽레벨 6dB 이하로 확인하였다. P2P를 적용한 결과와 제안한 고속 알고리즘을 적용한 결과가 유사함을 검증하였으며, 배열면 고속 알고리즘의 결과 중 부엽레벨은 P2P 적용 결과에 비해 오차가 증가하지만, mutual coupling에 의한 것이다.

근접전계 배열면 정렬에 소요되는 시간은 표 2와 같다.

표 2. 근접전계 배열면 정렬 소요 시간
 Table. 2. Alignment time of P2P, proposed fast algorithm

Alignment method	P2P	Proposed algorithm
Duration of time	120 minutes	5 minutes

P2P 배열면 정렬의 소요 시간은 MTG사의 근접전계 시스템을 적용하여 산출하였으며, P2P 수행 시 측정 그리드는 그림 8과 같다.

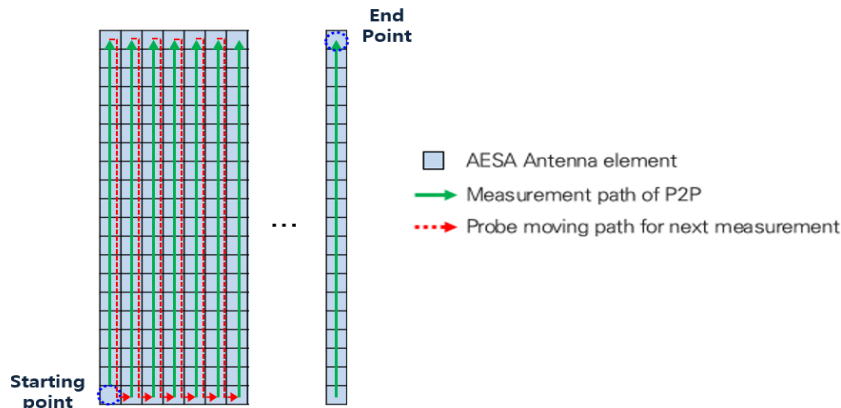


그림 8. P2P 측정 그리드
 Fig. 8. Measurement grid of P2P

좌측 하부에서부터 우측 상부로 모든 복사소자를 순차적으로 측정하며, 열단위로 측정한다. 복사 소자와 소자 사이 이동시간은 약 18초이며, 이는 정확한 측정을 위해 근접전계 프로브는 복사 소자 중심 위치에서 멈춰서 송신하며, 주파수와 빔조향을 포함한 200개의 시나리오 측정 조건이다. 열단위 측정 종료 후 다음 열로 이동하는 시간은 약 10초이며, 데이터 처리시간을 포함하여 약 120분 소요된다. 제안한 알고리즘은 배열면 중심으로 이동시간과 데이터처리까지 약 5분 소요된다. 제안한 고속 알고리즘 적용하여 모든 복사 소자의 진폭과 위상을 동시에 정렬 가능함을 확인하였으며, 복사 소자 수가 증가할수록 더 효과적인 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 레이더용 능동위상배열 안테나의 배열면 정렬 방법 중 P2P와 고속 알고리즘을 적용하여 안테나 주요 성능을 확인하였다. 이를 위해 20x20 배열 안테나를 P2P 측정하여 배열면을 정렬하였고, 배열면 중심으로 한번 측정 후 알고리즘을 적용하여 배열면 정렬한 결과를 비교하였다. 안테나의 패턴 성능을 비교하여 P2P 결과와 유사함을 확인하였으며, 기존 P2P 대비 제안한 알고리즘의 정렬 소요 시간은 24배 단축되며, 고속 정렬 가능함을 검증하였다.

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] H. Guolong, 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>.

[3] G. Babur, G. O. Manokhin, E. A. Monastyrnev, 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. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM16101203>.

[4] J. H. Yun, D. S. Park, Y. K. Jung, D. H. Jang, and K. C. Hwang, "Active Phased Array Antenna Calibration Using Mutual coupling", *The Journal of Korean Institute of Communication Sciences*, Vol. 44, No. 9, pp. 1678-1681, Jul. 2019.

[5] C. A. Balanis, "Modern Antenna Handbook", John Wiley & Sons, Inc., pp. 929, 2007.

[6] K. Hassett, "Phased Array Antenna Calibration Measurement Techniques and Methods", *European Conference Antennas Propagation (EuCAP)*, Apr. 2016.

[7] D. Paris, W. Leach, and E. Joy, "Basic Theory of Probe-Compensated Near-Field Measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 26, No. 3, pp. 373-379, May 1978. <https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141855>.

[8] E. Joy, W. Leach, and G. Rodrigue, "Applications of Probe-Compensated Near-Field Measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 26, No. 3, pp. 379-389, May 1978. <https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141856>.

[9] A. Yaghjian, "Approximate formulas for the far field and gain of open-ended rectangular waveguide", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 32, No. 4, pp. 378-384, Apr. 1984. <https://doi.org/10.1109/TAP.1984.1143332>.

저자소개

김인환 (Inhwan Kim)



2014년 2월 : 한국해양대학교
전파공학과(공학석사)
2016년 7월 ~ 현재 : 한화시스템
선임연구원
관심분야 : AESA 안테나, 레이다
시스템, 안테나시스템

김 태 형 (Taehyung Kim)



2020년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학박사)
2020년 4월 ~ 현재 : 한화시스템
전문연구원
관심분야 : 배열안테나, 레이더
시스템, 무선전력전송

이 재 용 (Jaeyong Lee)



2018년 2월 : 광주과학기술원
기전공학부(공학석사)
2021년 12월 ~ 현재 :
국방과학연구소 연구원
관심분야 : AESA 안테나

김 동 혁 (Donghyeok Kim)



2019년 2월 : 연세대학교
전기전자공학과(공학사)
2021년 4월 ~ 현재 : 한화시스템
연구원
관심분야 : 안테나시스템, 레이더
시스템