

# PPO 알고리즘을 이용한 능동위상배열안테나 적응형 고속 보정 방법

## Adaptive Fast Calibration Method for Active Phased Array Antennas using PPO Algorithm

이 성 제\*, 변 기 식\*\*, 윤 흥 집\*★

Sungee Lee\*, Kisik Byun\*\*, Hong-Jib, Yoon\*★

### Abstract

In this paper, a high-speed calibration method for phased array antennas in the far-field is presented. A max calibration, which is a simplification of the rotating-element electric-field vector (REV) method that calibrates each antenna element only through received power, and a method of grouping calibrations by sub-array unit rather than each antenna element were proposed. Using the Proximal Policy Optimization (PPO) algorithm, we found a partitioning optimized for the distribution of phased array antennas and calibrated it on a subarray basis. An adaptive max calibration method that allows faster calibration than the conventional method was proposed and verified through simulation. Not only is the gain of the phased array antenna higher while calibration is being made to the target, but the beam pattern is closer to the ideal beam pattern than the conventional method.

### 요 약

본 논문에서는 원전계 환경에서 위상배열안테나를 고속 보정하는 방법이 제안되었다. 원전계에서 수신된 전력만을 통해 각 안테나 요소의 보정하는 기존 rotating-element electric-field vector (REV) 방법을 간소화 한 최대값 보정 방법과, 각 안테나 요소가 아닌 부배열 단위로 묶어서 보정하는 방법이 제안되었다. PPO 알고리즘을 이용하여 위상배열안테나의 분포에 최적화된 파티셔닝을 찾고, 그에 따른 부배열 단위로 보정하여 기존 방법 대비 더 빠른 보정이 가능한 적응형 최대값 보정 방법이 제안 및 시뮬레이션 검증되었다. 보정이 이루어지는 동안 위상배열안테나의 이득이 더 높을 뿐 아니라, 형성되는 빔 패턴이 기존 방법보다 이상적인 빔 패턴에 더 가깝다.

*Key words : Phased Array Antennas, Far-field Calibration, Reinforcement Learning, Radar, Communication*

### 1. 서론

통신/레이다 시스템에 활용되는 위상배열안테나는 고정 오차, 온도 변화, 전기적 환경 변화, 칩과 소자의 노

후화 등 물리적, 전기적 오차에 의해 각 안테나 요소의 크기와 위상이 이상적인 값에서 벗어 나게 된다. 때문에 위상배열안테나의 빔 형성, 부엽 레벨, 이득, 빔 폭 등의 성능을 유지하기 위해서는 작동 전, 경우에 따라 작동 환

\* Hanwha Systems

\*\* Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

★ Corresponding author

E-mail : yoon0711@hanwha.com, TEL : +82-31-8020-7157

Manuscript received Nov. 28, 2023, revised Dec. 15, 2023, accepted Dec. 27, 2023.

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.

경 중 보정이 필요하다. 위상배열안테나를 보정하는 가장 일반적인 방법은 근접전계 (near-field) 측정을 이용한 방법으로[1]-[7], 근접전계 영역에서 프로브 안테나를 활용하여 각 안테나 요소의 크기와 위상에 대한 측정을 통해 정밀한 보정이 가능하다. 그러나 근접전계 보정의 경우 프로브 안테나의 물리적 정렬, 위상을 측정하기 위한 높은 수준의 측정 환경이 필요하므로, 위상배열안테나의 분리가 어렵거나 이미 장착 및 운용되어 챔버 등의 정밀한 측정 환경으로의 이동이 어려운 경우 보정에 제약을 갖게 된다.

위상배열안테나를 보정하는 다른 방식으로는 원전계 (far-field) 보정 방법이 있는데, 위상을 변화시키면서 원전계 영역에서 수신전력을 측정하는 rotating-element electric-field vector(REV) 기반 방법[8]-[11]은 일정 수준의 신호대 잡음비만 확보되면 보정이 가능하다. 수신된 크기 정보만을 가지고 높은 정확도의 보정이 가능하므로 물리적 정렬이나 위상 측정을 위한 높은 수준의 측정 환경이 필요하지 않기 때문에, 제작/장착 후 발생하는 오차를 보정하는 효율적인 방법이 될 수 있다. 위성이거나 레이더시스템에 활용되는 능동위상배열안테나의 경우 일반적으로 안테나 요소 개수가 매우 많기 때문에 각 안테나 요소의 위상을 일일이 변화시키면서 보정하면 많은 시간이 소요된다. 전체 위상배열안테나를 부배열 단위로 파티셔닝하여 묶음으로 진행하면 보정시간을 단축시킬 수 있는데, 부배열 단위로 동일한 위상을 변화시키므로 부배열 내 오차로 인해 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 부배열 단위로 묶으면 측정 횟수가 주는 만큼 필연적으로 정확도가 떨어지므로, 이를 보완하기 위해 여러가지 경우로 부배열을 파티셔닝하여 보정을 진행할 필요가 있다.

본 논문에서는 능동위상배열안테나를 적응형으로 파티셔닝하여 완벽한 보정에 걸리는 시간의 37.5%의 시간을 소모했을 때 기존 방법보다 더 높은 정확도로 위상배열안테나를 보정하는 방법을 제시한다. 많은 파티셔닝 조합 중에 보정에 사용될 가장 효율적인 파티셔닝 조합을 찾기 위해 강화학습 모델 중 하나인 Proximal Policy Optimization(PPO) 알고리즘이 [12] 활용되었다. 또한 원전계 보정 방법으로 REV 대비 계산 복잡도가 낮은 Max Calibration(최대값 보정) 방법을 제시하고, 강화학습으로 찾은 최적의 파티셔닝들을 이용하여 부배열 단위로 최대값 보정을 시뮬레이션하여 기존 방법과의 비교 분석될 것이다.

## II. 원전계 보정

### 2.1. 원전계 보정의 활용

원전계 조건에서 위상을 측정하지 않고 보정하는 원전계 보정 방법은 원거리에서 수신된 전력 변화만으로 보정이 가능하다는 장점이 있다. 그림 1은 수신 전력만을 사용하여 원전계 보정을 하는 개념도로, N개의 안테나 요소로 이루어진 위상배열안테나의 각 안테나 요소의 위상  $\phi_1 \sim \phi_N$ 을 바꾸면 전체 수신 전력이 사인파의 형태를 띠게 된다. 이 사인파의 정보를 이용하여 배열안테나의 보정이 가능하다. 안테나 요소수가 매우 많은 대형위상배열안테나의 경우 원전계 조건을 만족하는 거리가 커지므로 보정에 필요한 최소 거리도 늘어나게 된다는 점이 있다. 이로 인해 위상배열안테나의 크기 대비 지면으로부터의 거리가 가까운 경우 다중경로 성분이 커지게 되어 보정 정확도가 떨어지게 됨에 유의해야 한다.

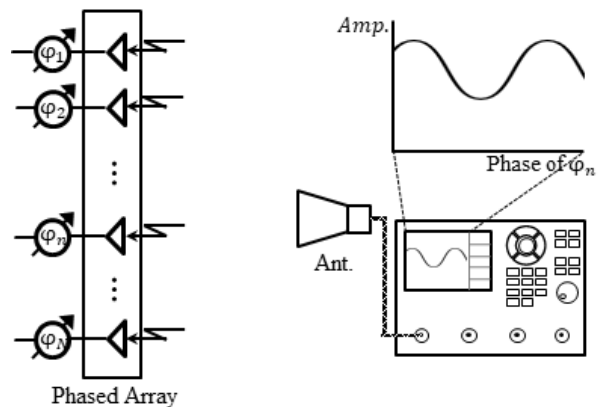


Fig. 1. Schematic measurement configuration for far-field calibration using only received power.

그림 1. 수신 전력만을 이용한 원전계 측정 개념도

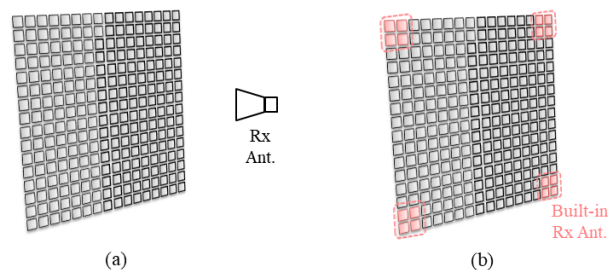


Fig. 2. Configuration of phased array antenna calibration using only received power (a) under far-field condition, and (b) using built-in calibration.

그림 2. 수신 전력만을 이용한 위상배열안테나 보정 개념도 (a) 원전계 조건, (b) built-in 보정

그림 2는 수신 전력만을 이용한 보정 개념도로, 그림 2 (a)와 같이 원전계 조건하에서는 각 안테나 요소의 위상을 바꿔가며 수신전력을 측정하면 된다. 충분한 원전계 조건을 갖추기 어렵거나 추가적인 수신 안테나 없이 항상 보정이 필요한 경우 그림 2 (b)와 같이 배열안테나의 일부 소자들만을 수신 소자로 활용하는 구조를 갖춰서 built-in 안테나를 이용해 수신 전력에 대한 변화를 측정할 수 있다[13]. 이 경우 원전계 조건이 아니므로, 위상배열안테나의 구조에 따른 보정 계산식이 필요하다.

2.2. REV Calibration

REV 보정 방법은 위상배열안테나의 각 요소에서 방사되는 전기장 벡터의 진폭과 위상을 결정하는 보정 방법으로, 그림 3과 같은 구성도로 나타낼 수 있다. REV 보정의 핵심은 모든 안테나 요소의 위상을 초창기 벡터합 방향으로 정렬시키는 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 모든 안테나 요소의 벡터를 전체 벡터합 벡터  $A_0$ 로 바꾸기 위해 위상을 바꾸고 있는 안테나 요소와 벡터  $A_0$ 의 사이각  $X$ 와 벡터  $A_0$  대비 해당 안테나 요소 벡터의 크기  $K$ 를 구한다. 보정값  $X$ 와  $K$  구하는 식은 식(1)과 같으며, 전체 벡터합이 최대가 되는 위상 변환값  $\Delta_0$ 와 수신 전력의 최대값과 최소값을 각각  $E_{max}$ ,  $E_{min}$ 이라고 정의할 때  $(E_{max} + E_{min}) / (E_{max} - E_{min})$ 의 값을 갖는  $\Gamma$ 를 구하여 계산된다. 그림 3에서  $Y * A_0$ 는 벡터 시작점부터 원의 중심까지의 벡터를 의미하며, 위상이 바뀌는 안테나 요소를 제외한 나머지 벡터들의 벡터합 크기  $Y * A_0$ 보다 위상을 변화하고 있는 안테나 요소의 크기가 더 큰 경우, 벡터의 시작점이 원 안에 들어오게 되며 식 (2)를 사용한다.  $\Gamma$ 값은 식(1)의 경우  $Y/K$ , 식 (2)의 경우  $K/Y$ 가 된다[8].

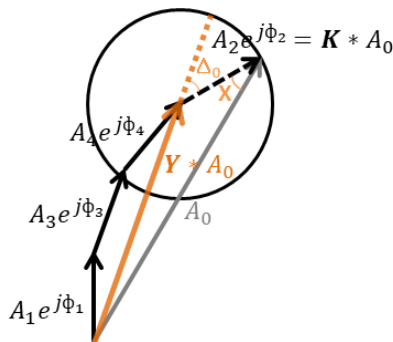


Fig. 3. REV method concept diagram showing each antenna element as a vector in the far-field. 그림 3. 원전계에서 각 안테나 요소를 벡터로 나타낸 REV 방법 개념도

$$K = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}}$$

$$X = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + \Gamma} \right) \tag{1}$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}}$$

$$X = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + \frac{1}{\Gamma}} \right) \tag{2}$$

2.3. Max Calibration

REV 방법은 효율적인 원전계 보정 방법이지만, 안테나의 요소수가 많아질수록 초창기 상태의 전체 벡터  $A_0$ 의 크기와, 특정 안테나 요소의 위상을 바꿔 전체 벡터합을 최대로 만든 벡터합의 크기  $E_{max}$ 가 거의 동일하게 된다. 때문에 각 안테나 요소의 위상을 수신되는 전력이 최대가 되도록 바꾸면 전체 안테나의 위상이 거의 동일하게 된다. 이는 모든 벡터의 위상을 정렬시키는 기준 벡터  $A_0$ 가 일정하다는 REV 방법의 이점은 사라지지만,  $E_{max}$ 의 방향이 거의 변하지 않는 대형배열안테나의 경우에 더 간단하고 빠른 보정이 가능하게 된다. 그림 4는 원전계에서의 최대값 보정 방법 개념도로, 그림 4 (a)는 초기 상태, (b)는 첫 번째 안테나 요소의 위상을 전체 벡터합의 크기, 즉 수신된 전력값의 크기가 최대가 되도록 한 상태이다. 첫 번째 안테나 요소의 벡터가 바뀌고나면, 해당 상태에서 두 번째 안테나 요소의 벡터를 전체 벡터합이 최대가 되도록 위상을 변경한다. n개의 안테나 요소로 이루어진 위상배열안테나의 처음 벡터합의 상태인 초기 벡터를  $V_1$ , 그 벡터합에 속한 각 안테나 요소의 벡터를  $V_{11} \sim V_{1n}$ 으로 표기하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.  $V_{11}$ 의 위상을 바꾼 전체 벡터합의 상태를  $V_2$ 라 한다면 위상이 바뀐 벡터  $V_{21}$ 는 식 (4)와 같다. 각 안테나 요소의 벡터를 바꾸며 i번 반복해서 업데이트 하면 식 (5)와 같이 나타내진다.

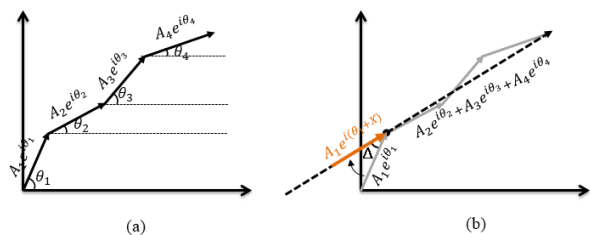


Fig. 4. Conceptual diagram of the max calibration method in the far field (a) is the initial state, (b) is the direction of the first element is varied.

그림 4. 원전계에서 최대값 보정 방법 개념도 (a) 초기 상태 (b) 첫번째 요소의 방향이 바뀐 상태

$$V_1 = (V_{11} + V_{12} \dots + V_{1n}) \in C^n$$

$$V_{11} = A_1 e^{i\theta_1}, V_{12} = A_2 e^{i\theta_2}, \dots, V_{1n} = A_n e^{i\theta_n} \tag{3}$$

$$V_2 = (V_{21} + V_{22} \dots + V_{2n})$$

$$V_{21} = (V_{12} + \dots + V_{1n}) / |V_{12} + \dots + V_{1n}| \tag{4}$$

$$V_{i+1} = (V_{i,1} + \dots + V_{i+1,n})$$

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} \text{ (if } j \neq i)$$

$$V_{i+1,j} = (V_{i,1} + \dots + V_{1,n} - V_{i,i}) / |V_{i,1} + \dots + V_{1,n} - V_{i,i}| \text{ (if } j = i)$$

$$\tag{5}$$

이 때, 그림 4 (a)의 벡터 4개를 안테나 요소가 아닌 4개의 부배열로 볼 수 있으며, 최대값 보정을 묶음 단위로 할 수 있다. 묶음 개수  $l$ 개로 최대값 보정하는 초기 벡터를  $V_0$ 로 표기하면, 식 (6)과 같이 표기되며, 최종 최대값 보정 결과는 식 (7)과 같다.

$$V_i = (V_{i1} + V_{i2} \dots + V_{il}) \text{ where } V_{ij} = V_{(i-1)j} \text{ if } j \neq i$$

$$V_{ii} = \sum_{j \neq i} V_{i-1,j} * \frac{|V_{ii}|}{|\sum_{j \neq i} V_{i-1,j}|} \tag{6}$$

$$V_{l+1} = (V_{(l+1)1} + V_{(l+1)2} + \dots + V_{(l+1)l}) = \sum_j V_{l+1,j} \tag{7}$$

### III. 파티셔닝

#### 3.1. 파티셔닝과 유사도

최대값 보정은 모든 안테나 요소의 위상을 전체 벡터 합의 크기가 최대가 되는  $E_{max}$  방향으로 바꾼다. 수신 전력이 최대가 되도록 위상을 바꾸는 간단한 방법이지만, 배열안테나의 요소수가 많으면 보정에 오랜 시간이 걸리게 된다. 때문에 식 (6), (7)과 같이 안테나 요소를 임의의 묶음, 부배열 단위로 최대값 보정을 하면 보정 시간을 단축시킬 수 있다. 부배열이 포함하는 평균 안테나 요소의 개수를  $k$ 라고 하면,  $k$ 배 빠른 속도로 보정이 가능해진다. 하지만 부배열에 속한 안테나 요소들은 항상 같은 위상값만 변하므로 해당 요소들간 위상 오차는 보정이 되지 않는다. 때문에 부배열로 단위로 최대값 보정을 하고 난 뒤, 다른 파티셔닝으로 부배열을 구성하여 최대값 보정을 하면 이전 파티셔닝에서 같은 부배열에 속하여 서로 위상정렬이 되지 않았던 안테나 요소들의 위상정렬이 이루어져 보정 정확도 향상을 꾀할 수 있다. 가령, 그림 5와 같이  $16 \times 16$  위상배열안테나를 세로 단위로 16개 씩 부배열을 구성하여 총 16개의 부배열로 파티셔닝 하는 경우, 16개의 안테나 소자 묶음을 하나의 부배열 단위 벡터로 최대값 보정을 하므로 부배열의 개수인 16번 만큼의 최대값 보정이 필요하다. 두번째 파티셔닝에서 가로 단위로 부배열을 구성하면 역시 16번의

최대값 보정이 필요하다. 이때 만약 파티셔닝1을 이용하여 최대값 보정을 반복하면, 같은 벡터 계산을 반복하므로 아무런 의미가 없게 된다. 이와 같은 논리로 파티셔닝 간 유사도가 높을수록 효율이 떨어지게 된다. 가로 단위와 세로 단위는 직교성을 가지므로 직관적으로 쉽게 유추할 수 있지만, 그 이후의 파티셔닝은 무수히 많은 조합 중 선택되어야 한다.

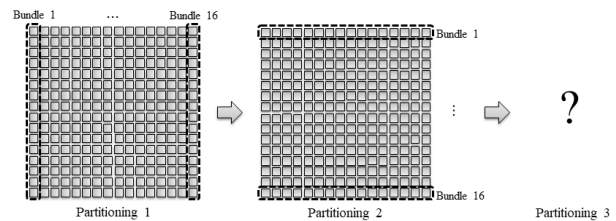


Fig. 5. Conceptual illustration of partitioning array antennas into horizontal and vertical bundles.

그림 5. 배열 안테나를 수평, 수직으로 분할하는 개념도

#### 3.2. 파티셔닝 방법

$16 \times 16$  위상배열안테나를 최대값 보정을 할 때, 각 안테나 소자 단위로 보정을 하면 256번의 최대값 보정이 필요하다. 만약 이 횟수를 96회로 한정하고, 96회 동안 최적의 보정을 해야 한다면 어떤 파티셔닝을 어떤 순서로 배치하는지에 대한 경우의 수는 매우 크다. 부배열 수를 항상 16개로 한정한다 하더라도, 파티셔닝 배치순서 6!을 포함하여  $({}_{256}C_{16} * {}_{240}C_{16} * \dots * {}_{32}C_{16} * {}_{16}C_{16})^{6*6!}$ 의 매우 큰 경우의 수가 있으며, 파티셔닝마다 부배열 숫자의 자유도까지 고려하면 계산 영역 밖의 숫자가 된다. 또한 시뮬레이션 시 위상배열안테나가 가지는 초기 오차는 랜덤하므로, 난수로 생성된 여러 위상배열안테나의 크기와 위상의 샘플에 대해 최대값 보정을 계산하고 비교하는 연산은 일반적인 방법으로 불가능하다. 이를 해결하는 방법중 하나는, 여러개의 부배열 단위에 대해 각각 유사도가 낮은 파티셔닝 후보들을 수십개씩 만들고, 조합과 순서를 효율적으로 결정하는 것이다. 생성된 파티셔닝 중 어떠한 파티셔닝들이 어떤 순서로 선택되는지에 따라 최대값 보정의 결과는 달라지게 된다. 이는 유사도가 너무 높은 파티셔닝을 사용하면 최대값 보정의 효율이 떨어진다는 추론을 바탕으로 한다. 부배열을 이루는 안테나 요소 수의 단위는 4개, 16개, 32개, 64개 등으로 한정하여 수백개의 파티셔닝에서의 조합으로 계산량을 줄일 수 있다.

### 3.3. 적응형 파티셔닝 방법

가장 효율적인 파티셔닝 조합을 찾는 행위는 스무고개에 비유할 수 있다. 파티셔닝을 스무고개의 질문, 위상배열안테나의 배열 초기값, 오차 분포 혹은 보정값을 스무고개의 정답으로 비유한다면 가장 효율적인 파티셔닝 순서를 찾는다는 것은 가장 효율적인 스무고개 질문을 찾는 행위와 같다. 모든 오차 분포에 대해 효율적인 파티셔닝은, 모든 정답에 대해 효율적인 스무고개 질문과 같으므로 일반적으로 유리한 질문, 가령 '생물인지 무생물인지', '움직이는지 멈춰있는지'와 같은 질문이 된다. 마찬가지로 모든 오차 분포에 대해 좋은 파티셔닝은 생물과 무생물처럼 서로 상반되는, 직교성을 갖는 가로 묶음과 세로 묶음 등이 될 수 있다. 때문에 위상배열안테나의 오차 분포를 알 수 있다면 더 좋은 파티셔닝을 찾을 수 있게 된다. 예를 들어, 배열안테나의 위상 분포가 (0°, 360°) 구간에서 균일한 분포를 가지고, 크기가 평균 1 표준편차 0.1을 가진다면 스무고개에서 정답의 범위가 동물원에 있는 동물, 산업 혁명 이후의 발명품 등으로 좁혀지게 된다. 때문에 정답의 범위에 맞는 효율적인 질문들이 존재하며, 같은 논리로 오차 분포에 따라 적응형으로 파티셔닝을 나누는 것이 더 효율적인 방법이 된다. 스무고개 정답을 잘 맞추기 위한 질문들과 질문의 순서는 일반화하여 정의하기 매우 어렵지만 정답이 반드시 존재하며, 정답이 존재하지만 경우의 수가 많거나 찾기가 어려운 환경에서 강화학습을 이용하여 해결할 수 있다.

### 3.4. PPO 알고리즘

위상배열안테나의 특정 오차 분포가 주어졌을 때, 효율적인 파티셔닝과 순서를 찾는 알고리즘으로 강화학습 방법중 하나인 PPO 알고리즘을 사용할 수 있다. PPO 알고리즘은 Trust Region Policy Optimization(TRPO) 알고리즘을 발전시킨 방법으로 정책 업데이트를 제한하는 클리핑 함수를 사용하여 새 정책이 이전 정책에서 너무 멀리 벗어나지 않도록 한다[12]. 때문에 무수히 많은 수의 스무고개 정답이 아닌, 비교적 적은 수의 표본으로 학습하기 용이하다. 본 연구에서는 강화학습의 action으로 파티셔닝의 변화, reward로 위상배열안테나의 최종 이득, state로 파티셔닝 조합/순서를 사용하였다. 파티셔닝의 조합의 변화에 따라 배열안테나의 최종 이득이 변하면서 이득이 가장 높아지는, 즉 보정이 가장 잘 되는 방향으로 학습된다. 배열안테나의 최종 이득은 파티셔닝에 따라 부배열 단위 최대값 보정을 진행한 최종 배열의 벡터합의 크기이다. 이 알고리즘의 의사코드와 변수는

표 1과 같다. 의사코드는 파티셔닝 설정을 불러오고, PPO 정책  $\pi\theta$ 를 초기화하는 과정, 에포크마다 환경을 리셋하고 각 타임스텝에 대해 정책  $\pi\theta$ 를 사용하여 어떠한 파티셔닝을 취할지 선택하는 과정, 그리고 보상과 새로운 상태를 관찰하여 정책을 업데이트 하는 과정으로 나눌 수 있다. PPO 클리핑 매개변수  $\epsilon$ 은, 학습률을 의미하며 정책의 변화를 제한한다.  $r(\theta)$ 는 새 정책과 이전 정책의 비율로 새 정책에서 특정 행동을 할 확률을 이전 정책에서 했을 확률로 나눈 값이다. clip 함수는  $r(\theta)A_t$ 을  $1-\epsilon$ 과  $1+\epsilon$  사이로 제한하여, 정책의 급변을 방지하고 학습 안정도를 높인다.  $r_t$ 는 시간에 따라 에이전트가 받은 보상을,  $s_t$ 는 시간에 따른 환경 상태를,  $a_t$ 는 시간에 따라 에이전트가 취한 행동을 나타낸다.  $A_t$ 는 시간에 따른 이득을 나타낸다. 결론적으로  $A_t$ 가 가장 높은 값을 갖도록  $s_t$ 의 변화에 대한  $a_t$ 가 효율적이 되도록 학습된다.

Table 1. The pseudocode of adaptive Max calibration method using PPO algorithm.

표 1. PPO 알고리즘을 이용한 적응형 최대값 보정 방법 의사코드

Pseudo code	<p>PPO_AdaptiveMaxCalibration Algorithm</p> <p>Initialize:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Load partitions from PARTITION_PATH</li> <li>- Define AdaptiveMaxCalibration environment with ARRAY_SIZE and NUM_PARTITIONS</li> <li>- Initialize policy <math>\pi\theta</math> for PPO</li> </ul> <p>For each epoch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reset environment and retrieve initial state</li> <li>- For each timestep:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Select action based on current policy <math>\pi\theta</math></li> <li>Apply action, observe reward and next state</li> <li>Store transition (state, action, reward, next state)</li> </ul> </li> <li>- Update policy <math>\pi\theta</math> using PPO:                             <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\theta_{new} = \operatorname{argmax}_{\theta} E[\min(r(\theta)A_t, \operatorname{clip}(r(\theta), 1-\epsilon, 1+\epsilon)A_t)]</math></li> <li>where <math>r(\theta) = \pi\theta(a_t s_t) / \pi\theta_{old}(a_t s_t)</math></li> </ul> </li> </ul> <p>Repeat for specified number of epochs</p> <p>Plot and analyze training performance metrics</p>
Variable	<p><math>\epsilon</math> (epsilon): PPO clipping parameter (learning rate)</p> <p>clip(): Clipping function in PPO, <math>r(\theta)A_t</math> is limited to between <math>1-\epsilon</math> and <math>1+\epsilon</math>.</p> <p><math>\theta_{new}, \theta_{old}</math>: Indicate the parameters of the updated and old policies, respectively.</p> <p><math>\pi\theta</math>: Represents the agent's current policy.</p> <p><math>r(\theta)</math>: Represents the ratio of the new policy to the old policy.</p> <p><math>r_t</math>: Represents the reward received by the agent at time t.</p> <p><math>s_t</math>: Represents the state of the environment at time t.</p> <p><math>a_t</math>: Represents the action taken by the agent at time t.</p> <p><math>A_t</math>: Represents the advantage at time t.</p>

### IV. 시뮬레이션 결과

PPO 알고리즘을 이용하여 위상 분포가 (0°, 360°)에서 균일하고, 크기 평균 1, 표준편차 0.1을 가진 16×16 위상배열안테나에 대해 최대값 보정횟수를 96회로 제한하였다. 파티셔닝은 부배열 개수를 4, 8, 16, 32, 64로 나누는 파티셔닝을 각각 20개, 18개, 16개, 14개, 12개 만든 후 아무런 제약을 두지 않고 임의의 순서로 골라 횟수를 96회 이하로 만족하도록 하였다. 예를 들어 부배열 개수가 4인 파티셔닝을 고르면 횟수 4를 소모, 부배열 개수가 16인 파티셔닝을 고르면 횟수 16회가 소모된다. PPO 알고리즘이 찾은 가장 효율적인 파티셔닝은 그림 6과 같으며, 같은 부배열에 속한 안테나 요소는 같은 색을 갖는다. 예를들어 3번째 파티셔닝의 경우 4×4 구조로 같은 색을 지닌 부배열이 존재한다. 부배열 숫자는 순서대로 8, 8, 16, 16, 16, 32이 사용되어 해당 부배열에 따라 순서대로 총 96회의 최대값 보정이 진행되었다. 그림 6의 파티셔닝 순서는 비유적으로 스무고개에서 가장 효율적인 질문의 순서를 의미한다. 그림 7은 시행횟수에 따른 위상배열안테나의 벡터 크기를 나타낸 값이다. 256개의 안테나 요소로 이루어진 각 안테나 요소가 상대적인 크기값으로 1의 크기를 가졌다고 했을 때, 모든 배열안테나 요소의 벡터합 크기가 256이 완벽한 보정이 되었다고 볼 수 있다. 그림 7의 x축은 256개의 안테나 요소를 1개씩 최대값 보정방법으로 보정할 경우 걸리는 단위 시간을 나타낸 것으로 256개의 안테나 요소를 보정하는데는 256의 단위 시간이 소모된다. 96회의 최대값 보정 후 96의 크기를 가지며, PPO 알고리즘을 이용하여 찾은 6개의 파티셔닝을 이용한 적응형 최대값 보정을 하면 96회의 최대값 보정 후 114의 크기를 갖는다. 보정을 하는 동안의 크기가 항상 더 크므로 도중에 과정

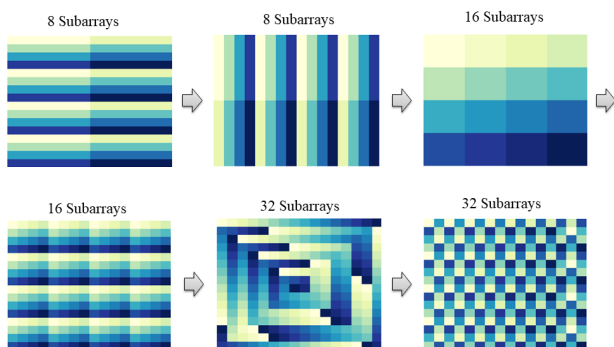


Fig. 6. Optimized partitioning and order found with PPO algorithm.

그림 6. PPO 알고리즘으로 찾은 최적화된 파티셔닝 및 순서

을 중단하더라도 더 많은 보정이 된다는 장점이 있다. 그림 8 (a)는 오차가 없는 이상적인 상태, (c)~(d)는 PPO 알고리즘 학습에 사용되지 않은 100개의 16×16 위상배열안테나 테스트 샘플에 대하여, 오차가 있으며 보정을 하지 않은 경우, 96회 적응형 최대값 보정, 96회 최대값 보정을 이용해 보정한 결과로 이득 뿐 아니라 빔형태도 적응형 최대값 보정이 이상적인 빔 패턴과 더 가까운 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 8의 결과를 3D 빔 패턴으로 나타낸 것으로, (a)와 (b)는 각각 적응형 최대값 보정 및 최대값 보정 후의 빔 패턴을 나타낸다. 표 2

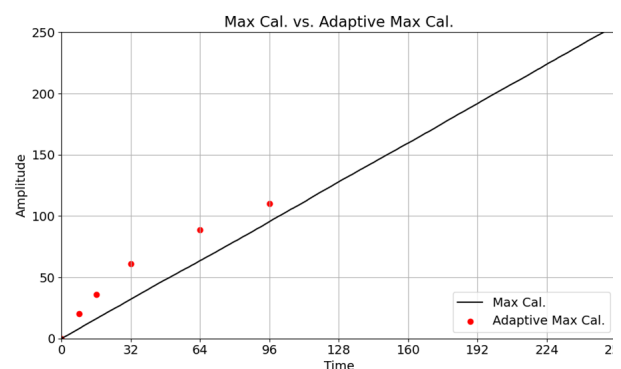


Fig. 7. Amplitude of phased array antennas for number of trials; adaptive max calibration (red dot), and max calibration (black).

그림 7. 시행횟수에 따른 위상배열안테나의 크기; 적응형 최대값 보정 방법(빨강), 최대값 보정 방법(검정)

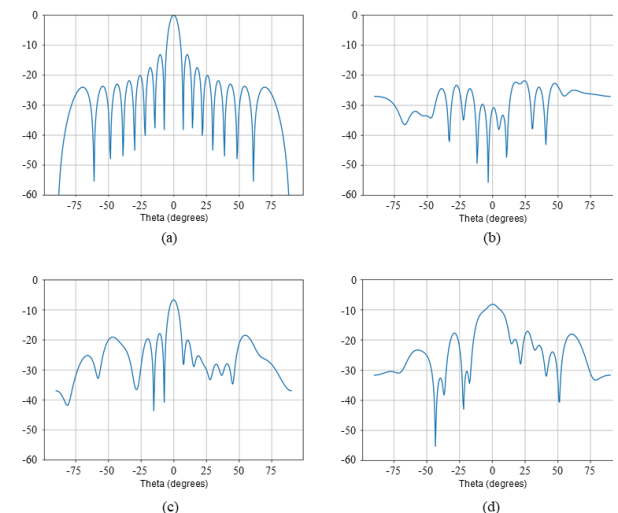


Fig. 8. Simulation results of azimuth beam pattern for 16x16 phased array antennas: (a) ideal, (b) before calibration, (c) after adaptive max calibration, and (d) after max calibration.

그림 8. 16x16 위상배열안테나의 방위각 빔 패턴 시뮬레이션 결과; (a) 오차가 없는 경우, (b) 보정 전, (c) 적응형 최대값 보정, (d) 최대값 보정 후

는 모든  $\phi$ 에 대한 수신이득, 평균부엽레벨 및 평균 빔 폭을 나타낸다. 오차가 없는 경우를 기준으로 정규화하였을 때 배열안테나 이득은 각각 -6.6 dB, -8.1 dB로 적응형 최대값 보정의 결과가 1.5 dB 더 높은 이득을 가진다. 또한 모든  $\phi$ 에 대한 평균 부엽레벨은 각각 12.4 dB, 12.1 dB로 적응형 최대값 보정이 0.3 dB 더 낮은 부엽을 갖는다. 평균 빔폭은 각각 6.0°, 10.9°로 적응형 최대값 보정이 평균적으로 이상적인 빔 패턴의 빔폭 5.5°에 더 가깝다.

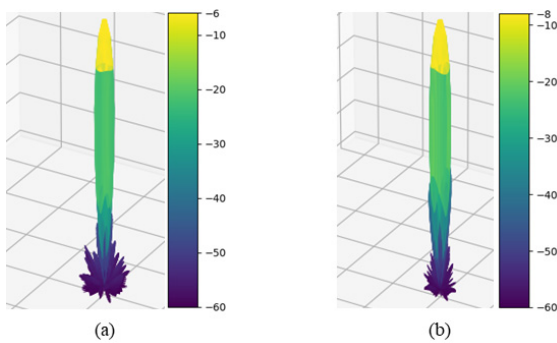


Fig. 9. Simulation results of 3D beam pattern for 16×16 phased array antennas; (a) after adaptive max calibration, and (b) after max calibration..

그림 9. 16×16 위상배열안테나의 3D 빔 패턴 시뮬레이션 결과; (a) 적응형 최대값 보정, (b) 최대값 보정 후

Table 2. Comparison of gain, side-lobe level, and beamwidth with adaptive max calibration and max calibration.

표 2. 적응형 최대값 보정 및 최대값 보정에 의한 이득, 부엽 레벨, 빔폭 비교

	Adaptive MaxCal.	MaxCal.
Normalized Gain(dB)	-6.6	-8.1
Mean of SLL(dB)	12.4	12.1
Mean of BeamWidth(°)	6.0	10.9

## V. 결론

본 연구에서는 위상배열안테나의 원전계 보정 방법인 최대값 보정 방법과 부배열 단위의 묶음 최대값 보정 방법이 제안되었다. 부배열 단위 최대값 보정 방법을 기반으로 PPO 알고리즘을 활용하여 주어진 위상배열안테나의 오차 분포에 대한 최적의 파티셔닝 방법으로 부배열을 나누어 보정하는 적응형 최대값 보정 방법이 제안 및 시뮬레이션 검증 되었다. 제안된 방법은 낮은 수준의 측정 환경에서 빠르고 효율적인 보정이 가능하며, 37.5%

의 보정 시간을 기준으로 기존 방법보다 배열안테나 이득이 1.5 dB 더 높다. 또한 동일한 시간 자원 소모시 빔 패턴이 기존 방법 대비 이상적인 빔 패턴에 더 가까워 고속 보정에 적합하다.

## References

- [1] W.-S. Yoo, S.-G. Kim, Y.-W. Kwon, G.-Y. Jung, and H.-S. Jang, "Design and Performance Verification of Active Phased Array Antenna Near-Field Scanner with Mobility," *j.inst.Korean.electr. electron.eng.*, Vol.21, no.1, pp.30-38, 2017. DOI: 10.7471/ikeee.2017.21.1.30
- [2] J.-I. Moon, "Quiet Zone Implementation for VHF Antenna Measurement in Semi-Anechoic Chamber," *j.inst.Korean.electr.electron.eng.*, Vol. 16, no.4, pp.290-296, 2012. DOI: 10.7471/ikeee.2012.16.4.290
- [3] D. W. Boeringer and D. H. Werner, "Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.52, no.3, pp.771-779, 2004. DOI: 10.1109/TAP.2004.825102
- [4] T. Laitinen, S. Pivnenko, J. M. Nielsen, and O. Breinbjerg, "Theory and practice of the FFT/matrix inversion technique for probe-corrected spherical near-field antenna measurements with high-order probes," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.58, no.8, pp.2623-2631, 2010. DOI: 10.1109/TAP.2010.2050437
- [5] H. M. Aumann, A. J. Fenn, and F. G. Willwerth, "Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.37, no.7, pp. 844-850, 1989. DOI: 10.1109/8.29378
- [6] W. P. M. N. Keizer, "Fast and accurate array calibration using a synthetic array approach," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.59, no.11, pp. 4115-4122, 2011. DOI: 10.1109/TAP.2011.2164171
- [7] I. Seker, "Calibration methods for phased array radars," *Proc. SPIE*, vol.8714, May 2013, Art. no.87140W. DOI:10.1117/12.2015694
- [8] S. Mano and T. Katagi, "A method for measur-

ing amplitude and phase of each radiating element of a phased array antenna," *Trans. IECE Jpn.*, vol.5, pp.555-560, 1982.

DOI: 10.1002/ECJA.4410650508

[9] M. Liu and Z. Feng, "Combined rotating-element electric-field vector (CREV) method for nearfield calibration of phased array antenna," in *Proc. Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol.*, vol.5, pp.1-4, 2007. DOI: 10.1109/ICMMT.2007.381281

[10] T. Takahashi, Y. Konishi, S. Makino, H. Ohmine, and H. Nakaguro, "Fast measurement technique for phased array calibration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.56, no.7, pp.1888-1899, 2008. DOI: 10.1109/TAP.2008.924682

[11] H.-J. Yoon and B.-W. Min, "Improved Rotating-Element Electric-Field Vector Method for Fast Far-Field Phased Array Calibration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.69, no.11, pp.8021-8026, 2021. DOI: 10.1109/TAP.2021.3083796

[12] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov., "Proximal policy optimization algorithms." *arXiv preprint arXiv:1707.06347*, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1707.06347

[13] K.-M. Lee, R.-S. Chu, and S.-C. Liu, "A built-in performance monitoring/ fault isolation and correction (PM/FIC) system for active phased-array antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.41, no.11, pp.1530-1540, 1993.

DOI: 10.1109/8.267353

#### Kisik Byun (Member)



2013 : B.S. degree in Electronics and Computer Engineering, Hanyang University

2015 : M.S. degree in Electric and Electrical Engineering, Yonsei University

2015~2020 : Research Engineer, Defence Agency for Technology and Quality

2021~ : Research Engineer, Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

#### Hong-Jib, Yoon (Member)



2013 : B.S. degree in Electric and Electrical Engineering, Yonsei University.

2021 : Ph.D. degree in Electric and Electrical Engineering, Yonsei University.

2021~ : Research Engineer, Hanwha Systems

## BIOGRAPHY

#### Sunge Lee (Member)



2012 : B.S degree in Electronics, Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University

2014 : M.S degree in Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University

2014~ : System Engineer, Hanwha System