

# Genetic Swarm Optimization을 활용한 위상배열 안테나의 부배열 가중치 최적화

정 태 용\*, 오 경 현\*, 김 지 형\*,  
우 대 웅\*\*, 황 금 철\*

## Optimization for Subarray Weighting of a Phased Array Antenna Using Genetic Swarm Optimization

Taeyong Jeong\*, Kyunghyun Oh\*,  
Jihyung Kim\*, Dae Woong Woo\*\*,  
Keum Cheol Hwang\*

### 요 약

부배열이 적용된 위상배열안테나의 경우, 각 부배열의 위상중심이 비주기적인 배열 환경이므로 Taylor 가중치를 적용하는 것이 제한된다. 그러므로, 본 논문에서는 Genetic Swarm Optimization (GSO)을 활용하여 부배열이 적용된 위상배열 안테나의 부배열 가중치 최적화 방법을 제안한다. GSO를 활용한 부배열 가중치 최적화 결과, boresight 방향으로 빔이 조향될 때의 최대 부엽준위는 22.3 dB 이다. Azimuth와 elevation 방향으로 각각 5°, 10° 빔 조향을 수행한 경우 부엽준위는 20.4 dB, 20.9 dB 그리고, -13.1 dB, -13.4 dB를 달성 하였다.

**Key Words** : subarray, phased array antenna, weighting optimization, aperiodic array, smart antenna

### ABSTRACT

In the case of a phased array antenna to which subarrays are applied, the application of Taylor weighting is limited because the phase center of each subarray is an aperiodic array environment. Therefore, in this paper, we propose a method for optimizing the weighting of each subarray of phased array antennas using Genetic Swarm Optimization (GSO). As a result of optimization of the weighting of each subarray using GSO, the peak sidelobe level when the beam is steered in the boresight direction is 22.3 dB. When the beams were steered at 5° and 10° in the azimuth and elevation directions, respectively, the sidelobe levels were 20.4 dB, 20.9 dB, and -13.1 dB and -13.4 dB.

### 1. 서 론

최근 레이더에 사용되는 모든 복사소자에 TRM (Transmitter Receiver Module)과 ADC(Analog Digital Converter)가 부착된 완전 디지털 방식의 레이더로 발전되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 좁은 영역을 빔조향하기 위하여 모든 복사소자에 TRM 및 ADC를 부착시킬 경우 요구 성능 대비 제작비가 과도하게 증가하게 된다. 또한 TRM 및 ADC의 줄이기 위해 복사소자 개수를 줄일 경우 이득이 감소한다는 문제가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 복사소자를 grouping하여 부배열을 형성하여 빔 조향 수행하는 부배열 최적화 기법이 적용되어 왔다<sup>2,3)</sup>. 부배열을 위상배열 안테나에 적용 시 각 부배열의 위상중심이 한 파장을 넘게 되면 빔을 조향 할 때 grating lobe가 발생하게 되므로 부배열의 위상중심이 한 파장이 넘지 않도록 부배열 구조에 대한 최적화를 수행하여야 한다<sup>3)</sup>. 그러나, 최적화된 각 부배열의 위상중심들은 서로 비주기적 배열 환경이므로 Taylor 가중치가 적용되지 않아 가중치 최적화를 수행하는데 어려움이 따른다. 논문<sup>4,5)</sup>은 부배열 설계 및 가중치를 최적화 하기 위해 각각

※ 이 논문은 2020년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

• First Author : (ORCID:0000-0002-4779-937X)Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, taeyong@skku.edu, 학생(석·박사통합과정), 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-8074-1137)Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, khwang@skku.edu, 정교수, 정회원

\* Hanwha systems

\*\* Agency for Defense Development

논문번호 : KICS202111-301-A-LU, Received November 5, 2021; Revised December 10, 2021; Accepted January 5, 2022

Genetic Algorithm (GA)와 Particl Swarm Optimization (PSO) 가 활용되었다. 그러나, GA를 활용하여 최적화를 수행할 경우 시간이 오래걸린다는 단점이 있으며, PSO는 local solution에 쉽게 수렴된다는 특징이 있다. Genetic Swarm Optimization (GSO)는 GSO는 GA와 PSO를 결합한 하이브리드 (hybrid) 최적화 기법으로서 PSO의 최적화 속도를 개선하기 위해 고안되었다<sup>6,7)</sup>.

본 논문에서는 최적화가 완료된 부배열 구조에 대하여 논문<sup>6)</sup>에서 소개된 GSO를 활용하여 부배열 가중치 최적화를 수행 하였으며 최적화가 완료된 가중치를 boresight 및 빔 조향 경우에 각각 적용하여 부엽 준위를 확인한다.

## II. 부배열이 적용된 위상배열 안테나의 array factor

그림 1은 좁은 영역의 빔 조향시 제작비 감축을 위하여 제안된 위상배열 안테나의 구조를 보여준다. 각 부배열 마다 하나의 TRM과 ADC가 적용되어 있어 동일한 부배열에 속한 복사소자의 가중치와 위상 값은 서로 같은 값을 가지게 된다. 그림 1을 수식으로 표현하면 아래와 같다<sup>3)</sup>.

$$AP(\theta, \phi) \approx \left( \sum_{k=1}^K f_k(\theta, \phi) \right) f_s(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$f_k(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^{N_k} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (x_{k,n}u + y_{k,n}v)} \quad (2)$$

$$f_s(\theta, \phi) = \sum_{k=1}^K w_k e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (\rho_{k,x}(u - u_{k,0}) + \rho_{k,y}(v - v_{k,0}))} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u &= \sin(\theta)\cos(\phi) \\ v &= \sin(\theta)\sin(\phi) \\ u_{k,0} &= \sin(\theta_{k,0})\cos(\phi_{k,0}) \\ v_{k,0} &= \sin(\theta_{k,0})\sin(\phi_{k,0}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ) \\ (-90^\circ \leq \theta_{k,0} \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi_{k,0} \leq 360^\circ) \end{aligned}$$

$$\rho_{k,p} = \frac{\sum_{n=1}^{N_k} w_{k,n} p_{k,n}}{\sum_{n=1}^{N_k} w_{k,n}} \quad (p = x \text{ or } y) \quad (5)$$

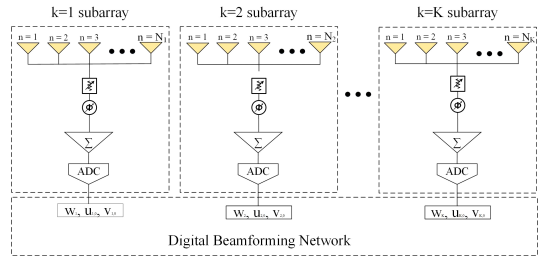


그림 1. 부배열이 적용된 위상배열 안테나  
Fig. 1. Active phased array antenna with subarrays

식 (1)은 부배열이 적용된 위상배열 안테나의 Array Pattern (AP)이며  $f_k$ 와  $f_s$ 으로 결정된다. 식 (2)는 단일 부배열에 대한 array factor이며  $f_k$ 라고 정의하였다. k번째 단일 부배열에 속한 복사소자의 위치  $(x_{k,n}, y_{k,n})$ 에 의하여 결정된다. 식 (3)은 단일 부배열이 K개만큼 배열되었을 때의 array factor 이며  $f_s$ 라고 정의하였다.  $f_s$ 는 k번째의 위상중심  $(\rho_{k,x}, \rho_{k,y})$ 과 가중치  $(w_k)$ , 위상값  $(u_{k,0}, v_{k,0})$ 에 의해 결정된다. 식 (5)는 각 부배열의 위상중심을 의미하며 부배열에 속한 복사소자의 위치와 가중치에 의해 결정된다. 본 논문에서는 참고문헌<sup>8)</sup>의 부배열 구조 최적화 설계 방법을 참고하여 복사소자 간 간격  $0.7\lambda$ , 484개의  $22 \times 22$  배열 안테나에 대하여 64개의 부배열로 구성되도록 부배열 구조 최적화가 수행되었다. 여기서, 부배열 구조 최적화 제약 조건으로는 균일 가중치( $w_k=1$ ) 조건에서 azimuth와 elevation 방향으로  $5^\circ$  조향시 낮은 부엽준위가 달성되도록 부배열 구조 최적화 비용함수에 반영되었다.

그림 2는 모노펄스 빔 방식을 고려한 원점대칭 형태의 최적화된 부배열 구조이며, 색깔을 달리 하여 부배열의 경계를 표현하였다. 다음 장에서는 최적화된 부배열 구조의 가중치 최적화 방법에 대해 소개한다.

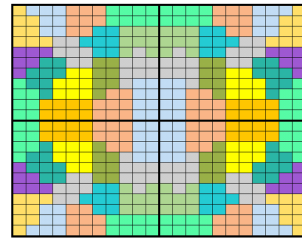


그림 2. 최적화된 부배열 구조  
Fig. 2. Optimized subarrays structure

### III. 최적화된 부배열 형상의 가중치 최적화 및 빔 특성 분석

그림 3은 최적화된 부배열 구조에 대한 부배열 가중치 최적화 알고리즘 흐름도이다. 그림 2의 최적화된 부배열 구조에  $-30$  dB Taylor 가중치를 적용을 시킬 경우 동일한 부배열에 속한 복사소자일지라도 서로 다른 가중치를 가지게 된다. 따라서, 각 부배열마다 평균 가중치를 계산한다. 각 부배열마다 계산된 평균 가중치의  $\pm 20\%$  만큼의 부배열 가중치 최적화 범위를 설정한다. 임의의 가중치를 각 부배열에 할당하고 식 (1)을 활용하여 boreishgt의 경우, azimuth elevation  $5^\circ$  조향시 부엽준위를 도출 하고 부엽준위 크기중 가장 큰 값을 cost function (CF)으로 식 (6)과 같이 선언 한다. CF가 최솟값에 수렴하지 못하면 iteration에서 일부의 개체를 랜덤으로 선택하여 GA로 진화 시키고 나머지 변수는 PSO를 속도 및 위치를 갱신한다. 두 변수를 결합하여 update된 부배열 가중치를 활용하여 부엽준위를 다시 계산 하고 CF의 충족 여부를 따진다.

$$CF = \text{Max}(SLL_{\text{boresight}}, SLL_{\text{Azimuth scans}}, SLL_{\text{elevation scan}}) \quad (6)$$

그림 4는 최적화가 완료된 원점 대칭적 형상의 부배열 가중치 분포도를 보여준다. 도출된 최적화 가중치는 boreishgt 및 빔 조향의 경우 동일하게 적용되는데 이는 메모리 증가에 의한 제작 비용 문제를 해결하기 위함이다. 최적화된 가중치가 적용된 배열안테나의 boresight 방향으로 빔 조향시 개구 효율은 0.68 으로 일반적인 개구 안테나의 개구효율이 0.3에서 0.7 사이 값을 가진다는 것을 고려하면 다소 높은 효율이 확보되었다.

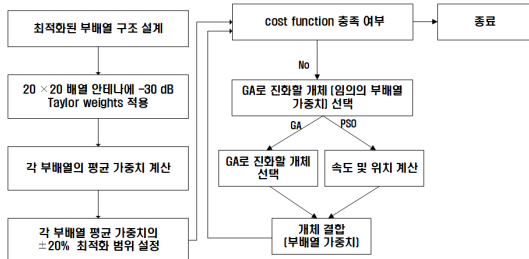


그림 3. 부배열 가중치 최적화 흐름도  
Fig. 3. Flow chart for weighting optimization of subarrays

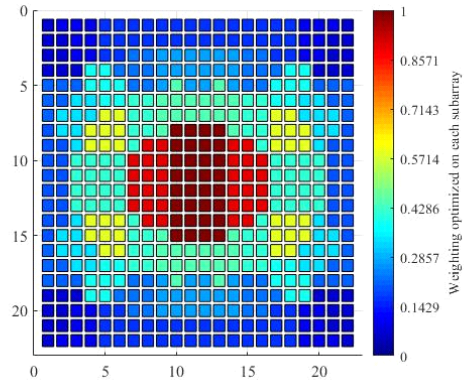


그림 4. 각 부배열에 할당된 최적화 가중치 분포도  
Fig. 4. Distribution of optimized weighting assigned to each subarray

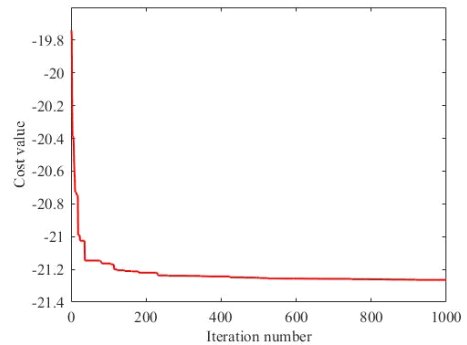


그림 5. 최적화 iteration 변화  
Fig. 5. Change of optimization iteration

그림 5는 iteration에 따른 최적화 결과에 대한 수렴도를 보여주고 있다. x축은 최적화 수행시 설정된 iteration이며, y축은 식(6)에 대한 결과를 보여주고 있다. 본 논문에서는 GSO 알고리즘의 iteration을 1000번 수행 하였으며, 최적화 시간은 89시간이 소요 되었다.

그림 6-9은 그림 4의 최적화된 부배열 가중치가 그림 2의 최적화된 부배열 구조에 적용되었을 때 빔 특성을 보여주는 방사패턴 이다. 여기서, element pattern은  $\cos^{1.5}\theta$ 을 사용하였다. 그림 4는 azimuth 평면의 빔 조향시 boresight, azimuth  $1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 에 대한 빔 특성을 제시하고 있으며, 그림 5는 boresight, elevation  $1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 에 대한 빔 특성을 제시하고 있다. 그림 6과 7을 diagonal 평면의 중  $\phi=45^\circ$  경우와  $\phi=135^\circ$  인 경우에 대한 빔 특성을 제시하고 있으며 부배열 구조 및 가중치 분포가 원점대칭 형태이므로 대각 방향에서의 빔이 대칭적으로 형성됨을 확인 할 수 있다. 또한, 빔 조향시 조향 각도가 증가함에 따라 부엽준위가 증가하는 것을 확인 할 수 있는데

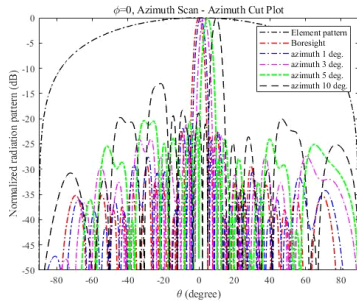


그림 6. Azimuth 평면의 방사 패턴  
Fig. 6. Radiation pattern at azimuth cut

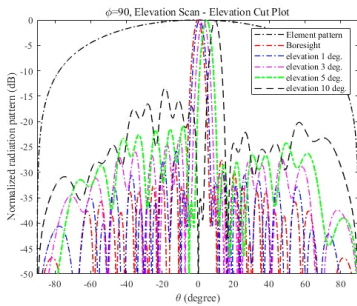


그림 7. Elevation 평면의 방사 패턴  
Fig. 7. Radiation pattern at elevation cut

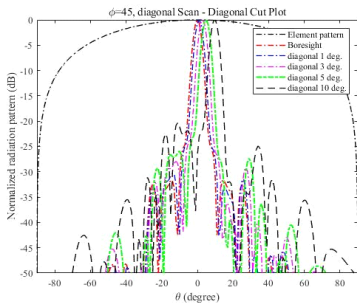


그림 8. Diagonal 평면의 방사 패턴 ( $\phi=45^\circ$  cut)  
Fig. 8. Radiation pattern at diagonal cut ( $\phi=45^\circ$  cut)

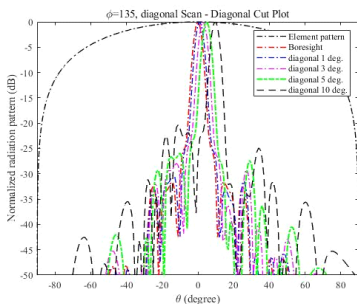


그림 9. Diagonal 평면의 방사 패턴 ( $\phi=135^\circ$  cut)  
Fig. 9. Radiation pattern at diagonal cut ( $\phi=135^\circ$  cut)

boresight 방향의 경우 grating lobe가 단일 부배열의 평균 방사패턴의 null에 위치하게 된다. 그러나, 빔 조향시, grating lobe가 null 밖으로 이동하게 되면서 부엽준위가 증가하게 된다<sup>[6]</sup>. 빔 성능에 대한 정략적 특성을 Table 1과 2에 제시한다. 성능 확인 결과  $5^\circ$  이내 빔 조향 범위에서  $-20$  dB 이하의 부엽준위가 확보 되었으며  $10^\circ$  이내 빔 조향 범위에서  $-13$  dB 이내의 부엽준위가 확보 되었다.

표 1. 빔조향 각도에 따른 부엽준위 변화 (단위: dB)  
Table 1. Change of sidelobe level according to steering angle (unit: dB)

	boresi- ght	$1^\circ$	$3^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$
Azimuth cut	-22.3	-21.9	-21.1	-20.4	-13.1
Elevation cut	-27.6	-25.1	-23.1	-20.9	-13.4
$\phi=45^\circ$ cut	-31.7	-30.3	-27.9	-25.9	-20.3
$\phi=135^\circ$ cut	-31.7	-30.3	-27.9	-25.9	-20.3

표 2. 빔조향 각도에 따른 빔폭 변화  
Table 2. Change of beamwidth according to steering angle

	boresi- ght	$1^\circ$	$3^\circ$	$5^\circ$	$10^\circ$
Azimuth cut	$4.1^\circ$	$4.1^\circ$	$4.1^\circ$	$4.0^\circ$	$3.8^\circ$
Elevation cut	$4.4^\circ$	$4.3^\circ$	$4.3^\circ$	$4.3^\circ$	$3.9^\circ$
$\phi=45^\circ$ cut	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$
$\phi=135^\circ$ cut	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$	$4.2^\circ$

#### IV. 결 론

본 논문에서는 GSO를 활용하여 최적화된 부배열 구조에 대하여 부배열 가중치 최적화를 수행하였다. Bore-sight, azimuth, elevation 그리고 diagonal  $1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $5^\circ$  조향시 모두  $-20$  dB 이하,  $10^\circ$  조향시  $-13$  dB 이하의 부엽준위가 달성 되었으며 모든 복사소자에 TRM과 ADC가 각각 장착된 능동위상배열 안테나 보다 TRM 및 ADC를 86.8% 감소 가능할 것으로 고려 된다. 제안된 부배열 가중치 최적화 방법은 최적화가

완료된 부배열 구조에 대해 적용함으로써 좁은 영역에 대한 빔 조향 application에 활용될 것으로 기대 된다.

### Reference

- [1] H. Kim, H. K. Kim, and H. K. Na, “능동 위상 배열 레이더의 개발 동향,” *The Proc. Korea Electromagnetic Eng. Soc.*, vol. 25, no. 2, pp. 39-49, Mar. 2014.
- [2] R. L. Haupt, *Antenna arrays: a computational approach*, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] U. R. Nickel, “Properties of digital beamforming with subarrays,” *2006 CIE Int. Conf. Radar*, pp. 1-5, Oct. 2006.
- [4] K. Yang, Y. Wang, and H. Tang, “A subarray design method for low sidelobe levels,” *Electromagnetics*, vol. 89, no. 4, pp. 45-51, Jan. 2020.
- [5] R. L. Haupt, “Optimized weighting of uniform subarrays of unequal sizes,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 4, pp. 1207-1210, Apr. 2007.
- [6] A. Gandelli, F. Grimaccia, M. Mussetta, P. Pirinoli, and R. E. Zich, “Genetical swarm optimization: An evolutionary algorithm for antenna design,” *Automatika*, vol. 47, no. 3, pp. 105-112, Dec. 2006.
- [7] K. C. Hwang, “Design of x-band broadband twist reflector using hybrid particle swarm optimization,” *J. KIEES*, vol. 20, no. 4, pp. 390-395, Apr. 2009.
- [8] G. Kwon, J. Y. Park, and K. C. Hwang, “Design of a subarray configuration for multifunction radars using a nested optimization scheme,” *Electromagnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 276-285, May 2016.
- [7] A. D. Brown, *Electronically scanned arrays MATLAB® Modeling and simulation*, CRC Press, 2017.