

단원형배열안테나의 합차 모노펄스 주엽 식별

박현규^{*,1)} · 우대웅¹⁾ · 김재식¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 미사일연구실

Main-Lobe Recognition for Sum-Delta Monopulse of Single-Ring Circular Array Antenna

Hyeongyu Park^{*,1)} · Daewoong Woo¹⁾ · Jaesik Kim¹⁾

¹⁾ Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 27 December 2022 / Revised 2 March 2023 / Accepted 6 March 2023)

Abstract

The target must be located within the main-lobe of the antenna in order to measure the direction of the target by using sum-delta monopulse technique. The most common way if the target is located within the main-lobe is to compare the amplitude of the sum channel received signal with the delta channel received signal. However, in the case of the single-ring circular array antenna, it is difficult to apply the conventional method due to its structural limitation where antenna elements do not exist in the center of the array. In this paper, we proposed a novel method to identify whether a target is located within the main-lobe by appropriately adjusting the feeding amplitude of each element constituting the single-ring circular array antenna through the particle swarm optimization method. Simulation results showed that the proposed method can determine whether the target is located within the main-lobe of the single-ring circular array antenna.

Key Words : Single-Ring Circular Array Antenna(단원형배열안테나), Sum-Delta Monopulse(합차 모노펄스), Side-Lobe Recognition(부엽식별), Particle Swarm Optimization(입자군집최적화)

1. 서론

합차 모노펄스 기법은 표적의 방향을 정밀하게 측정하기 위하여 널리 사용되는 기법 중 하나이다. 합차 모노펄스 기법의 적용을 위해서는 표적이 모노펄스

안테나 방사패턴의 주엽(main-lobe)에 위치하는 것이 전제되어야 하므로^[1], 주엽 내 표적의 위치 여부를 식별하는 것은 표적의 방향 측정에 있어 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 이를 식별하는 가장 일반적인 방안은, 모노펄스 안테나의 합/차 채널 수신신호의 크기를 비교하여 합 채널 수신신호가 차 채널 수신신호보다 큰 경우 표적이 주엽에 위치한다고 판단하는 것이다. 하지만, 이 방법의 적용을 위해서는 주엽을 제

* Corresponding author, E-mail: hgpark@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

외한 모든 영역에서 모노펄스 안테나의 합 채널 방사 패턴이 차 채널 방사패턴보다 낮은 준위를 갖도록 안테나 설계 및 제작이 수행되어야 한다.

안테나 소자를 노즈부 외곽이나 비행체의 동체 측면에 배열하여 구성한 단원형배열안테나(single-ring circular array antenna)는 비행체 노즈부를 타 목적으로 활용할 수 있는 장점으로 인하여 최근 이를 이용한 방향탐지기법에 대한 연구가 수행되고 있다^[2,3]. 단원형배열안테나의 경우 배열 중심부에 안테나 소자가 존재하지 않는 구조적인 한계로 인하여, 배열 안테나의 합 채널 방사패턴이 주엽을 제외한 모든 영역에서 차 채널 방사패턴보다 낮은 준위를 갖도록 부엽 저감 설계를 수행하는 것이 매우 어려우며^[4], 이로 인해 상기한 기존의 주엽 식별 방안을 적용하는 것이 불가능하다. 이에 단원형배열안테나로 구성된 방향탐지 시스템에 합차 모노펄스 기법을 적용하여 표적의 방향을 계측하기 위해서는 표적이 배열안테나의 주엽에 위치하는지 식별할 수 있는 새로운 방안이 필요하다.

본 논문에서는 배열 전방 3차원 공간에 대한 부엽 저감이 어려운 단원형배열안테나의 특성을 고려하여, 배열 전방의 여러 2차원 평면에 대한 부엽 저감 결과를 종합적으로 이용함으로써 주엽 식별을 수행하는 방안을 제안하였다. 본 논문의 2장에서는, 배열 전방에 다수의 2차원 평면을 설정하고 각 평면에 대하여 입자군집최적화(PSO, Particle Swarm Optimization) 기법^[5]을 적용하여 부엽 저감을 위한 안테나 소자의 이득 가중치를 결정하는 방법을 기술한다. 또한 이를 바탕으로 각각의 가중치 조합을 적용하여 기존의 주엽 식별 방안을 수행한 결과를 종합함으로써 배열 전방 3차원 공간에서의 주엽을 식별하는 방법에 대하여 기술한다. 이어서 3장에서는 제안한 주엽 식별 시뮬레이션을 수행한 결과에 대하여 기술한다.

2. 기존 단원형배열안테나 주엽 식별 기법의 한계

단원형배열안테나는 Fig. 1과 같이 안테나 소자를 한 줄의 원형으로 배열하여 구성한 원형배열안테나를 말한다. 단원형배열안테나의 모든 안테나 소자가 동일한 이득과 위상을 갖는 경우, 배열안테나 주엽의 방향은 배열에 수직인 방향(Fig. 1의 z-축)과 같다. 단원형배열안테나는 배열 중심부에 안테나 소자가 존재하지 않는 원형배열의 구조적인 한계로 인하여, 배열 전

방의 3차원 공간에서 기존 주엽 식별 기법 적용에 충분한 만큼의 부엽 저감을 수행하는 것이 불가능하다.

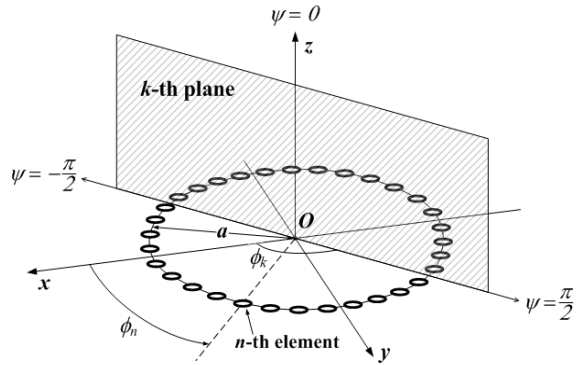


Fig. 1. Single-ring circular array antenna

기존의 주엽 식별 기법을 그대로 적용하는 것이 불가능함을 설명하기 위하여 단원형배열안테나를 구성하는 모든 안테나 소자들이 동일한 이득과 위상을 갖는 경우의 안테나 합 채널 방사패턴과, 이득은 동일하나 안테나 소자의 위치가 $x > 0$ 일 때와 $x < 0$ 일 때의 위상이 반대인 경우의 차 채널 방사패턴을 Fig. 2에 나타내었다. 이 때, 합 채널 방사패턴과 차 채널 방사패턴을 비교하여 배열 전방 3차원 공간 전체에서 주엽 식별을 수행한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 흰 부분은 합 채널 방사패턴 준위가 차 채널에 비하여 높아 기존의 기법을 적용했을 때 주엽으로 식별되는 부분이며, 검은 부분은 합 채널 방사패턴 준위가 차 채널에 비하여 낮은 부분이다. Fig. 3의 결과로부터, 실제의 주엽($\theta = 0$ 주위 영역) 외에도 많은 영역이 주엽으로 식별되는 오류가 발생함을 확인할 수 있다.

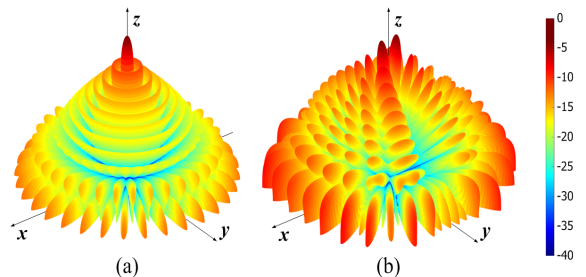


Fig. 2. Antenna radiation pattern of the single-ring circular array antenna with uniform amplitude. (a) Sum channel, (b) Delta channel

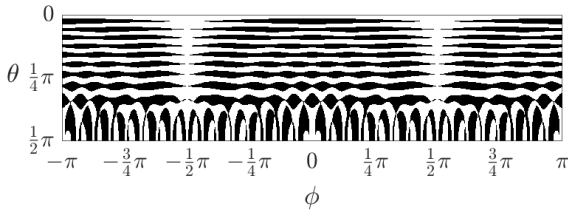


Fig. 3. Main-lobe recognition result based on the antenna radiation pattern in figure 2

3. 단원형배열안테나의 주엽 식별 기법

이에 본 장에서는 배열 전방의 z-축을 포함하는 2차원 평면에 대하여 부엽 저감을 수행하고, 이로부터 도출된 안테나 소자의 이득 가중치 조합을 활용함으로써 배열 전방 3차원 공간에서 표적이 배열안테나의 주엽에 위치하는지 식별하는 기법에 대하여 상세히 기술한다. 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 일정한 간격의 32개 등방성(isotropic) 안테나 소자로 구성된 단원형배열안테나를 가정하였으며, 각 안테나 소자의 위치는 아래의 식과 같다.

$$(x, y, z) = (a \cos \phi_n, a \sin \phi_n, 0) \quad (1)$$

$$\text{where } a = 5\lambda, \phi_n = \frac{(2n-1)\pi}{32}, (n = 1, \dots, 32)$$

3.1 배열 전방 2차원 평면에 대한 부엽 저감

본 절에서는 배열 전방에 배열에 수직인 방향벡터 (Fig. 1의 z-축)와 배열의 중심(Fig. 1의 점 O)을 포함하는 2차원 평면(Fig. 1 참조) 상에서 배열안테나의 합 채널 방사패턴에 대한 부엽을 저감하는 방법에 대하여 기술한다.

본 연구에서는 식 (2)와 같이 ϕ_k 값을 달리한 K개의 2차원 평면을 설정하고, 각 평면에 대하여 부엽 준위 저감을 위한 안테나 배열 소자 이득 가중치 조합을 입자군집최적화 기법을 이용하여 도출한다.

$$\phi_k = \frac{(k-1)\pi}{K}, (k = 1, \dots, K) \quad (2)$$

입자군집최적화는 개체의 군집이론에 기반하여 최적화 문제를 해결하는 기법으로서, 이 기법에서는 각 입자가 자신의 현재 위치와 속도뿐만 아니라 자신과

군집의 이력을 이용하여 자신의 다음 위치 및 속도를 계산하며, 이를 수식으로 나타내면 아래와 같다⁶⁾.

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + r_1c_1[p_i(t) - x_i(t)] + r_2c_2[g(t) - x_i(t)] \quad (3)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4)$$

위 식에서, $x_i(t)$, $x_i(t+1)$ 는 i번째 입자의 현재 위치 및 다음 위치를 의미하고, $v_i(t)$, $v_i(t+1)$ 는 i번째 입자의 현재 속도와 다음 속도를 의미한다. $p_i(t)$ 는 i번째 입자의 이력 중 최적의 값(가장 작은 cost)을 가질 때의 입자 위치이며, $g(t)$ 는 군집의 이력 중 최적의 값을 갖는 입자의 위치이다. w 는 개별 입자의 관성 가중치이며, r_1 , r_2 는 각각 개별 입자의 이력과 군집의 이력이 갖는 중요도를 나타내며, 0에서 1사이의 값을 랜덤하게 갖는다. c_1 , c_2 는 각각 r_1 , r_2 의 가중치를 의미한다.

본 논문에서와 같이 32개의 안테나 소자로 구성된 단원형배열안테나의 부엽 저감 문제 해결을 위하여 입자군집최적화 기법을 적용하는 경우, 식 (3), (4)의 x_i , v_i , p_i , g 는 32x1 벡터가 된다. 벡터 \vec{x}_i , \vec{p}_i , \vec{g} 를 구성하는 32개의 요소는 각각 안테나 소자의 이득 가중치를 의미하며, 0에서 1사이의 값을 갖도록 설정한다. 배열을 구성하는 32개 안테나 소자의 이득 가중치가 $\vec{x}_{i,k} = [x_{i,k,1}, x_{i,k,2}, \dots, x_{i,k,32}]$ 일 때, k번째 2차원 평면상의 배열안테나 합 채널 방사패턴과 차 채널 방사패턴을 구하는 식은 각각 아래의 식 (5), (6)과 같다⁶⁾. 식 (5), (6)에서의 ψ 를 설정하는 기준은 Fig. 1에 나타내었다.

$$F_k^{\Sigma}(\psi) = \sum_{n=1}^{32} x_{i,k,n} e^{jk a \sin \psi \cos(\phi_k - \phi_n)} \quad (5)$$

$$F_k^{\Delta}(\psi) = \sum_{n=1}^{32} x_{i,k,n} \text{sgn}\{\cos(\phi_k - \phi_n)\} e^{jk a \sin \psi \cos(\phi_k - \phi_n)} \quad (6)$$

입자군집최적화 기법에서의 cost는 주어진 ψ 의 범위 내에서 식 (5)로 계산한 합 채널 방사패턴의 부엽 준위와 방사패턴 상의 변곡점에서의 준위를 비교하여 큰 값으로 설정한다. 본 논문에서는 부엽 저감의 효과를 확보하기 위하여 ψ 의 범위를 $\pm \frac{3}{8}\pi$ 이내로 제한

하였다. 이 때, dB 단위의 안테나 패턴을 ψ 의 함수 $f_k(\psi)$ 로 두었을 때($f_k(\psi) = 10 \log_{10} F_k^Z(\psi)$), 그 도함수 $f_k'(\psi)$ 와 이계도함수 $f_k''(\psi)$ 에 대하여, $f_k''(\psi_0) = 0$ 일 때 $|f_k'(\psi_0)| \leq 1.0$ 을 만족하는 $F_k^Z(\psi_0)$ 값을 변곡점에서의 준위로 계산한다^[7]. 본 논문에서는 입자 수 1,000, 반복 횟수 1,000, w 의 초기값을 1.0, w 의 damping ratio를 0.999, $c_1 = 2.0$, $c_2 = 2.5$ 로 설정하였다.

상기한 입자군집최적화 기법의 결과로 도출되는 $\vec{g}_k = [g_{k,1}, g_{k,2}, \dots, g_{k,32}]$ 는 k 번째 2차원 평면에서 배열 안테나 합 채널 방사패턴의 부엽을 저감하기 위한 배열 소자의 이득 가중치를 의미한다.

3.2 배열 전방 3차원 공간에 대한 주엽 식별

상기한 \vec{g}_k 의 이득 가중치를 갖는 단원형배열안테나는 k 번째 2차원 평면상에서 합 채널 방사패턴의 부엽을 저감시킬 수 있다. 이에 해당 k 번째 2차원 평면에서는 합/차 채널 방사패턴 준위를 비교하는 기존의 주엽 식별 기법을 적용하여 표적의 주엽 내 위치 여부를 판단할 수 있다. 이와 같이 식별 가능한 주엽 영역은 k 번째 2차원 평면상에서만 정의되나, 공간상에서 안테나 방사패턴의 연속적인(continuous) 특성을 고려할 때 Fig. 4와 같이 해당 평면 주위에서도 유효할 것으로 예상할 수 있다.

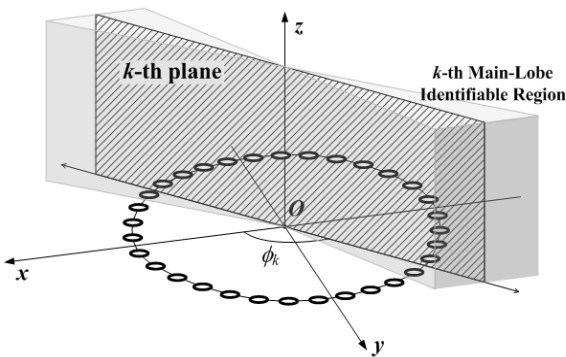


Fig. 4. Main-lobe identifiable region

실제로, 본 연구에서 제안한 방법을 통해 첫 번째 ($k = 1$) 2차원 평면($\phi_1 = 0$)에 대하여 합 채널 방사패턴의 부엽을 저감시키기 위한 배열 소자의 가중치를 도출한 후, 이를 적용한 경우의 합/차 채널 방사패턴은 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 결과에서, 입자군집최적화

기법의 cost는 $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$ 범위에서 정의하였다.

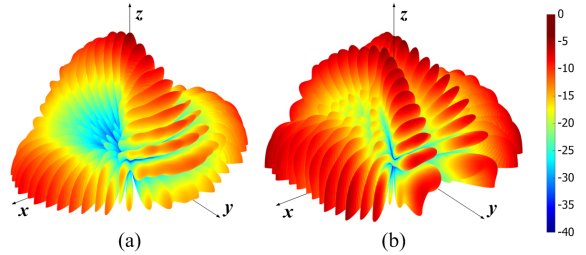


Fig. 5. Antenna radiation pattern of the single-ring circular array antenna with optimized amplitude. (a) Sum channel, (b) Delta channel

부엽 저감 효과를 보다 명확히 표현하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 5의 합/차 채널 방사패턴을 첫 번째 2차원 평면상에서 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 해당 평면상에서의 부엽 저감 결과(Fig. 6(b) 참조) 주엽 영역과 $|\psi| \geq \frac{3}{8}\pi$ 인 영역을 제외한 모든 각도 범위에서 합 채널 방사패턴이 차 채널 방사패턴에 비하여 높은 준위를 갖는 것을 확인할 수 있다.

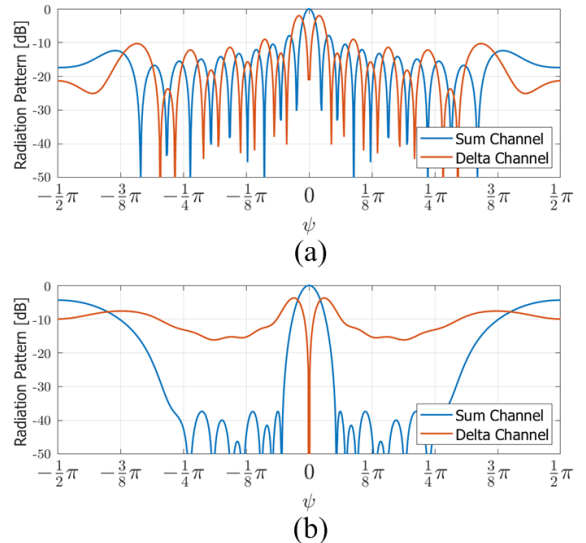


Fig. 6. Antenna radiation pattern of the single-ring circular array antenna on the first plane; (a) with uniform amplitude, (b) with optimized amplitude

Fig. 5에 나타난 합/차 채널 방사패턴의 준위를 비교하여 배열 전방 3차원 공간 전체에서 주엽 식별을 수행한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 3의 결과와 비교해 볼 때, 합 채널 방사패턴에 대한 부엽 저감을 수행한 $\phi = 0, \pm\pi$ 주위 영역에서 주엽 식별 성능이 상대적으로 우수한 반면, $\phi = \pm\frac{\pi}{2}$ 주위에서는 열화되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 그래프를 x 축 방향으로 $\pm\frac{\pi}{2}$ 만큼 평행이동 시킬 경우 주엽 식별 특성이 상호 보완되어 향상될 것임을 예상할 수 있다.

따라서 두 개 이상의 2차원 평면에 대하여 상기 과정을 수행한 후 모든 결과에서 공통적으로 주엽 영역으로 식별된 영역을 도출함으로써 최종적인 배열 전방 3차원 공간상에서의 주엽 식별 성능을 향상시킬 수 있다.

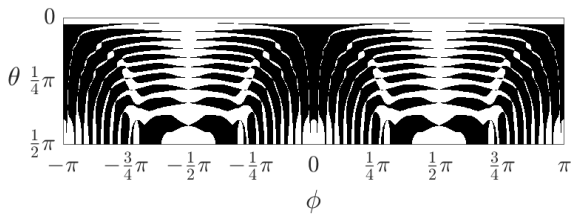


Fig. 7. Main-lobe recognition result based on the antenna radiation pattern in figure 5

4. 주엽 식별 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안한 방법을 적용하여 주엽 식별을 수행한 결과를 기술한다. 본 연구에서는 2차원 평면의 수 K 및 입자군집최적화 기법의 cost에 따라 변화하는 주엽 식별 성능 비교를 위하여 식 (2)의 K 를 2, 4, 8로 두었을 때, 입자군집최적화 기법의 cost를 $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$ 범위에서 정의한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

아래의 Fig. 8은 입자군집최적화 기법의 cost를 $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$ 범위에서 적용한 경우 2차원 평면에서의 합/차 채널 방사패턴을 나타낸다. K 가 2, 4, 8일 때, 입자군집최적화 기법 cost 정의 영역에 따른 주엽 식별 결과는 각각 Fig. 9, 10, 11과 같다.

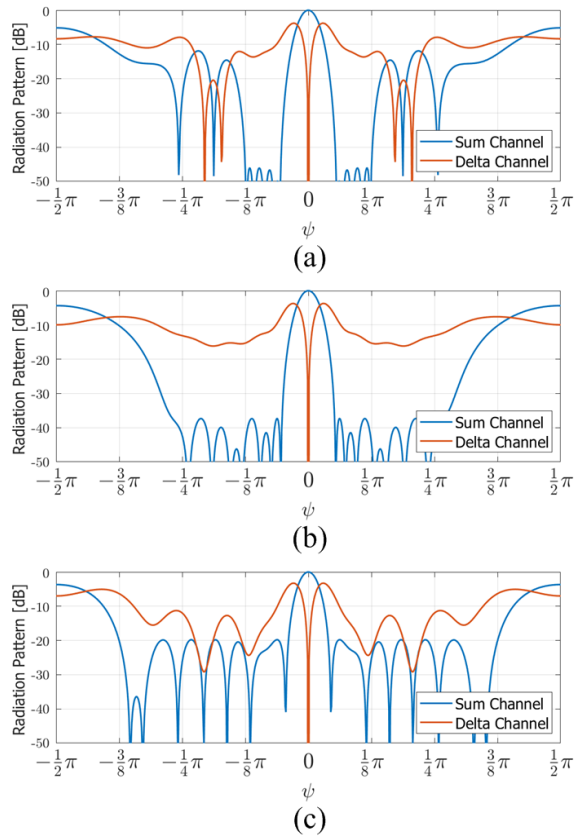


Fig. 8. Antenna radiation pattern of the single-ring circular array antenna with optimized amplitude on the 2-D plane. (a) $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, (b) $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, (c) $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$

Fig. 8의 결과는 cost 정의 영역의 폭과 정의 영역 내의 부엽 준위 저감폭 사이에는 상충관계(trade-off)가 존재하므로, 입자군집최적화 기법의 cost 정의 영역을 적절히 설정하는 것이 중요함을 나타낸다. 또한 Fig. 9 ~ 11의 결과로부터 cost 정의 영역에 따라 주엽 식별 성능에 차이가 있음을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 주엽 식별 성능을 정량적으로 비교하기 위하여 배열에 수직인 방향을 기준으로 $\pm\frac{3}{8}\pi$ 영역(주엽 식별 결과 그래프에서 $\theta \leq \frac{3}{8}\pi$ 인 영역)에서 주엽이 아닌 부분을 주엽으로 식별하는 비율(오인 비율)을 계산하여 Table 1에 정리하였다.

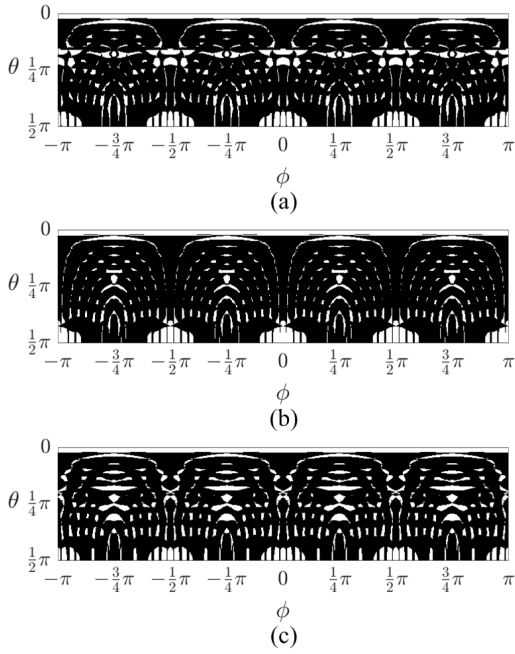


Fig. 9. Main-lobe recognition results($K = 2$).

(a) $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, (b) $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, (c) $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$

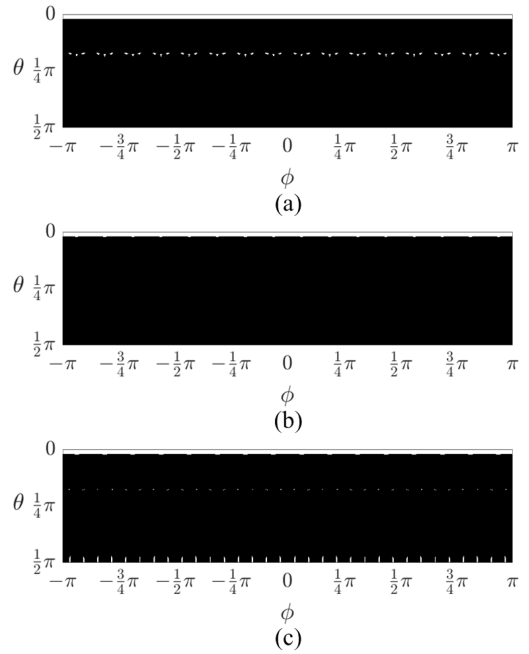


Fig. 11. Main-lobe recognition results($K = 8$).

(a) $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, (b) $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, (c) $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$

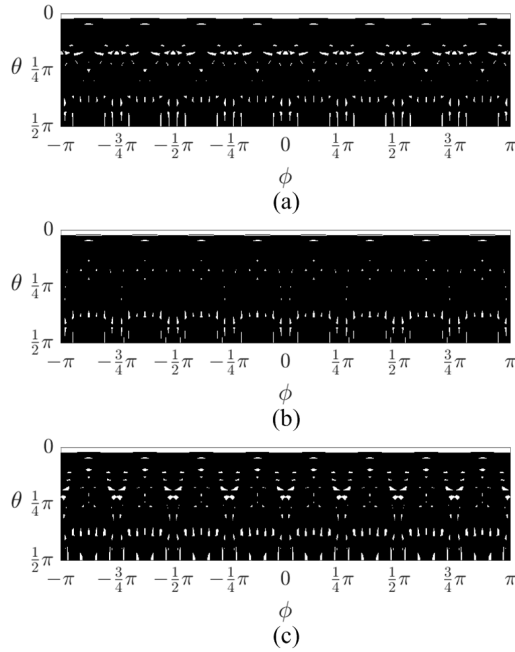


Fig. 10. Main-lobe recognition results($K = 4$).

(a) $|\psi| \leq \frac{\pi}{8}$, (b) $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$, (c) $|\psi| \leq \frac{3}{8}\pi$

Table 1. 오인 비율 [%]

Cost 정의 영역	K		
	2	4	8
$ \psi \leq \frac{\pi}{8}$	13.53	2.59	0.48
$ \psi \leq \frac{\pi}{4}$	8.34	0.97	0.00
$ \psi \leq \frac{3}{8}\pi$	16.05	3.61	0.10

Table 1의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 방법이 단원형배열안테나 전방 공간에 대한 주엽 식별에 유효함을 확인하였다. 배열 소자의 이득 가중치를 결정하기 위한 입자군집최적화 기법의 cost 정의 영역에 따라 편차는 존재하나, 부엽 식별 결과를 종합하는 2차원 평면의 수 K 가 4 이상일 경우 대부분의 영역에서 주엽 식별이 성공적으로 수행되었다. 특히, cost 정의 영역을 $|\psi| \leq \frac{\pi}{4}$ 로 설정하고 여덟 개 2차원 평면의 주엽 식별 결과를 종합하는 경우에는 주엽 식별에 오인이 발생하지 않았다.

또한 2차원 평면에서의 합 채널 방사패턴 부엽 저감 시, 단원형배열안테나의 구조적 한계로 인하여 far side-lobe 영역($|\psi| \geq \frac{3}{8}\pi$ 인 영역)에서는 부엽 저감이 이루어지지 못하였음에도 불구하고, 여러 2차원 평면에서의 주엽 식별 결과를 종합하는 과정에서 해당 영역에 대한 주엽 식별도 성공적으로 이루어질 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 구조적 한계로 인하여 배열 전방 3차원 공간에 대한 모노펄스 합 채널 방사패턴의 부엽 저감이 어려워 기존의 주엽 식별 방법을 적용할 수 없었던 단원형배열안테나에 대하여, 배열 전방의 2차원 평면에 대한 부엽 저감 및 이를 이용한 주엽 식별 결과를 종합함으로써 배열 전방 3차원 공간에 대한 주엽 식별을 수행하는 방안을 제안하였다. 본 논문에서는 배열 전방의 2차원 평면에 대한 부엽 저감을 위하여 입자군집최적화 기법을 이용한 배열 소자 이득 가중치 도출 방안 및 도출된 가중치를 적용하여 수행한 주엽 식별 결과를 종합함으로써 최종적으로 배열 전방 3차원 공간에 대한 주엽 식별을 수행하는 방안을 상세히 기술하였다. 상기 방안과 관련된 변수들을 달리한 시뮬레이션 결과들을 통해, cost 정의 영역을 적절히 선택하는 것이 오인 비율 감소에 큰 영향을 미치는 것과 부엽 식별 결과를 종합하는 2차원 평면의 수가 많을수록 오인 비율이 감소하는 것을 확인하였다. 또한 시뮬레이션 결과로부터 본 연구에서 제안한 방법을 활용하여 성공적으로 합/차 모노펄스 주엽 식별을 수행할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2015-2018년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.

References

- [1] S. M. Sherman and D. K. Barton, "Monopulse Principles and Techniques, 2nd ed.," Artech House, 1984.
- [2] H. Park, J. Park, and D. Woo, "Efficient Direction Finding Method Using Space Division Table," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 193-194, 2017.
- [3] H. Park, D. Woo, J. Kim, and J. Park, "Direction Finding and Tracking Using Single-Ring Circular Array Antenna and Space Division Table," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 117-124, 2022.
- [4] H. Park, J. Park, and D. Woo, "Sidelobe Reduction for the Circular Array Antenna Using PSO," KIMST Fall Conference Proceedings, pp. 537-538, 2017.
- [5] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942-1948, 1995.
- [6] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed.," Wiley, 2016.
- [7] H. Park, J. Park, D. Woo, and J. Kim, "PSO Cost Function Modification for Side-Lobe Reduction of Single-Ring Circular Array Antenna," KIMST Fall Conference Proceedings, pp. 1203-1204, 2018.