

비선형 최적화 기반 디지털 능동 위상 배열 안테나 부엽 차단 빔 패턴 합성 기법

Nonlinear Optimization Algorithm-Based Digital Active Phased Array Antenna Sidelobe Blanking Beam Pattern Synthesis

이원렬 · 배창식* · 송종화* · 김성태* · 홍순기

Won-Ryeol Lee · Chang-Sik Bae* · Jong-Wha Song* · Sung-Tai Kim* · Sun K. Hong

요 약

최근 안테나 빔 패턴의 부엽으로 들어오는 클러터 및 재밍 신호와 같은 간섭 신호로 인해 레이더의 탐지 성능 저하를 방지하기 위하여 디지털 능동 위상 배열 안테나에서 소수의 소자들을 활용하여 추가적인 안테나 사용 없이 부엽 차단 빔 패턴을 형성하는 연구가 제안되어 왔다. 기존의 원하는 부엽 차단 빔 패턴을 정확히 얻기 위해서는 시뮬레이션을 활용하여 수동적으로 소자의 변수(크기, 위상, 위치 등)들을 변경하며 최적의 해를 도출해야 한다. 본 논문에서는 수동적인 방식 대신 패턴 합성법과 소자 신호 크기 및 위상 가중치, 소자 위치를 변수로 갖는 *nature inspired* 기반의 비선형 최적화 알고리즘(*i.e.* genetic algorithm, particle swarm optimization)들을 활용하여 신뢰성 있는 최적의 부엽 차단 빔 패턴 합성 및 알고리즘별 결과 비교를 진행하였다. 최적화 결과 두 알고리즘 모두 성공적으로 부엽을 덮을 수 있는 패턴을 생성하였으며, 입자 군집 최적화 알고리즘이 높은 적합도에서 수렴하는 것을 확인하였다.

Abstract

Recently, research has been proposed using a few components in digital active phased array antennas to achieve sidelobe blanking beam patterns without the need for additional antennas, aiming to mitigate the degradation of radar detection performance caused by interference signals such as clutter and jamming entering through the sidelobes. To precisely obtain the desired sidelobe blanking beam pattern, simulations are required to manually vary the parameters of the components (such as magnitude, phase, and position) and derive an optimal solution. In this study, instead of a manual approach, a reliable synthesis of optimal sidelobe blanking beam patterns is proposed based on pattern synthesis methods and nature-inspired nonlinear optimization algorithms (that is, genetic algorithm and particle swarm optimization) with the magnitude, phase and position of array elements as variables. A comparison of the algorithmic results for the synthesis of the optimal sidelobe blanking beam patterns was performed. The optimization results showed that both algorithms successfully generated patterns capable of blanking sidelobes, with the particle swarm optimization demonstrating convergence at higher fitness levels.

Key words: Nonlinear Optimization, Digital Active Phased Array Antenna, Pattern Method, Sidelobe Blanking, Pattern Synthesis

「이 연구는 2024년 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

송실대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soongsil University)

*한화시스템(Department of Avionics Radar System, Hanwha Systems)

· Manuscript received April 11, 2024 ; Revised April 23, 2024 ; Accepted May 13, 2024. (ID No. 20240411-037)

· Corresponding Author: Sun K. Hong (e-mail: shong215@ssu.ac.kr)

I. 서 론

최근 무인기 기술의 발전으로 날씨의 영향을 거의 받지 않는 레이더를 활용한 탐지 기술의 중요성이 증가하였다. 그러나 수신 빔 패턴에서 주 빔을 제외한 부엽에서 들어오는 강력한 클러터(clutter) 및 재밍(jamming) 신호는 표적의 위치를 기만하여 정밀한 표적 탐지에 어려움을 야기한다. 이러한 부엽에서 들어오는 강력한 간섭 신호를 효과적으로 차단하기 위해 부엽 차단(SLB: sidelobe blanking) 기술이 제안되었다^[1]. 부엽 차단 기술은 주 안테나의 부엽을 덮을 수 있는 추가적인 부엽 차단용 안테나를 사용하여 그림 1과 같이 주 안테나에 들어온 신호의 크기와 SLB 안테나의 신호 크기를 비교하여 SLB 안테나의 신호 크기의 비가 임계치보다 크게 되면 부엽에서 수신된 간섭 신호로 판단하여 해당 신호를 차단한다. 최근 SLB 기술과 디지털 능동 위상 배열 안테나를 접목하여 추가적인 안테나 사용 없이 주 안테나를 위한 채널에 SLB 안테나를 위한 채널을 사용하여 하나의 배열 안테나에서 두 개의 안테나를 구현하는 기술이 제안되었다^[2]. 디지털 능동 위상 배열 안테나에서의 SLB 안테나 패턴을 구현하는 방식은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫 번째는 소수의 소자들만을 활용하여 수동적인 방식으로 가중치를 대입하는 방법^[2], 두 번째는 다수의 소자들을 최적화 알고리즘을 사용하여 원하는 패턴을 구현하는 방식이 존재한다^[3]. 기존의 SLB 패턴 합성(synthesis) 관련 연구는 code-division multiplexing 방식을 사용하여 주 빔 배열의 소자들과 부엽 차단 소자들을 공유하는 방식을 통해 원하는 SLB 패턴을 합성하였다. 하지만 code-division multiplexing을 사용하는 SLB 기법의 경우, 특정 PRF(pulse repetition frequency)를 가지는 재밍 신호에 취약할 수 있으며, 다수의 소자를 부엽 차단 안테나로 사용함에 따라

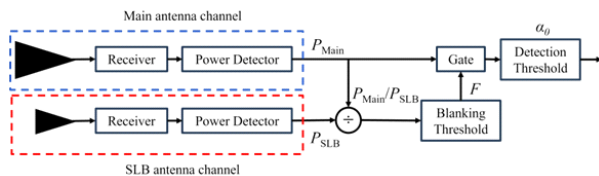


그림 1. 일반적인 부엽 차단 시스템의 구성도
Fig. 1. Configuration diagram for conventional SLB system.

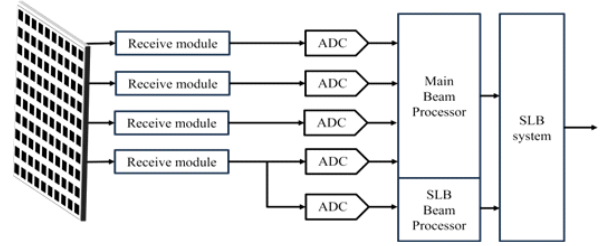


그림 2. 부엽 차단 빔 패턴 합성 적용을 위한 시스템
Fig. 2. Synthesis of sidelobe blocking beam pattern for application in beamforming systems.

하드웨어 구성에 부담이 증가하게 된다. 또한 패턴 합성에 이상적인 방사패턴을 활용하면 실제 배열 안테나와의 정확도가 떨어지는 단점이 존재한다^[4]. 따라서 본 논문은 평면 디지털 능동 위상 배열 안테나에 적용될 수 있는 부엽 차단 빔 패턴 합성의 가능성을 확인하고자 그림 2와 같이 주 빔에 영향을 주지 않으며 채널이 독립되어 있는 디지털 능동 위상 배열 안테나 시스템을 예시로 사용하였다. 이후 배열 안테나의 소자별 패턴을 측정하고, 채널이 독립적으로 분리된 SLB 채널을 통해 nature inspired 알고리즘 기반의 SLB pattern synthesis를 제안하고 알고리즘들간 성능 비교를 진행한다. 본 논문의 Section II에서는 비선형 최적화에 사용된 비용함수 설명에 앞서 SLB 안테나 개요에 대한 설명 이후 비용함수를 설명한다. Section III는 제안된 기법을 검증하기 위해 설계된 평면 배열 안테나 및 패턴 곱셈법을 설명한다. 이후 Section IV에서는 사용된 최적화 기법들에 대한 간략한 설명과 마지막으로 Section V에서는 최적화 파라미터 설명과 결과를 비교 분석한다.

II. Proposed Cost Function

2-1 부엽 차단 안테나 구성

SLB 안테나의 차단 방식은 그림 1에서 보인 것과 같이 주 빔에서 들어온 신호의 전력(P_{Main})을 부엽에서 들어온 신호의 전력(P_{SLB})으로 나누어 차단 임계치와 비교하여 차단 유무를 결정하게 된다. 안테나별 수신 전력은 이득 패턴에 비례하며, 부엽내 동일한 방향에서 주 안테나의 이득과 부엽 차단 안테나 이득 차이가 명확할수록 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)가 낮은 환경에서도

오차단을 방지할 수 있다^{[5],[6]}. 즉, 그림 3에서 보여주듯 주 빔 영역에서는 기울기 $1/F$ 가 증가하여 탐지영역(detection region)이 증가하고, 부엽 영역에서는 기울기 $1/F$ 가 감소하여 차단 영역(blanking region)이 증가하게 된다. 하지만, 그림 4(a)에서 보여주는 이상적인 부엽 안테나 패턴으로 취급되던 등방성 안테나의 경우, 부엽 방향의 이득 b , 부엽 차단 안테나의 이득 a 의 차이인 b/a 는 주 안테나의 최대 이득 d 와 a 의 차이 d/a 와 서로 trade-off 관계를 가지게 된다. 따라서 효과적인 부엽 차단 시스템을 구성하기 위해서는 그림 4(b)와 같이 부엽 차단 안테나 패턴이 주 빔에서 억제, 부엽 영역에서는 ripple이 최대한 적은 평탄한 형태를 가져야 한다.

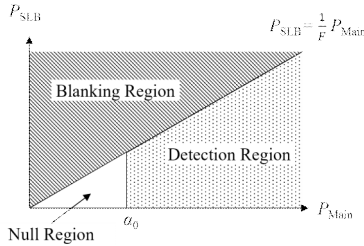


그림 3. 부엽 차단 시스템 논리 평면
Fig. 3. Logic plane of sidelobe system.

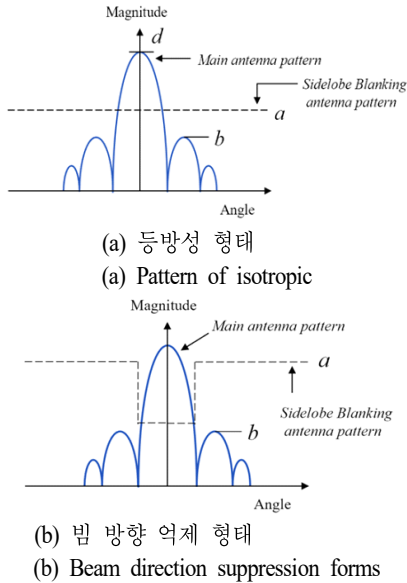


그림 4. 이상적인 부엽 차단 방사패턴
Fig. 4. Ideal sidelobe blanking pattern.

2-2 비용함수

최적화 기반의 부엽 차단 합성을 위해서는 원하는 패턴과 유사성을 수치적으로 표현해줄 수 있는 비용 함수(cost function)를 필요로 하며, 이는 합성 기법 결과에 지대한 영향을 미친다. $N \times M$ 크기의 평면 배열 안테나의 빔 조향이 각도와 위상 0 도 기준의 방사 패턴 수식은 식 (1)과 같다.

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g_{mn} e^{j\xi_{mn}} \quad (1)$$

여기서, g_{mn} 는 소자별 가중치이며, 복소수 형태를 가진다. ξ_{mn} 는 $\beta[x'_{mn}\sin(\theta)\cos(\phi) + y'_{mn}\sin(\theta)\sin(\phi)]$, x'_{mn} , y'_{mn} 는 m 번째 행, n 번째 열에 해당하는 소자의 좌표이다. 이때, 부엽 차단 안테나의 배열 크기를 $N' \times M'$ 으로 가정하면 부엽 차단 안테나 패턴은 $F_{slb}(\theta, \phi)$ 로 표현할 수 있다. 따라서 $F_{slb}(\theta, \phi)$ 기반의 비용함수는 식 (2)~식 (4)와 같다.

$$FOM = \frac{1}{1 + p_1 FOM_{side} + p_2 FOM_{mid}} \quad (2)$$

$$FOM_{side} = \sum_{\phi, \theta \in \phi_{side}, \theta_{side}} (F_{slb}(0, \phi) + F_{slb}(\theta, 0) - \mu_{side}) \quad (3)$$

$$FOM_{mid} = \frac{1}{K} \sum_{\theta, \phi \in \theta_{mid}, \phi_{mid}} (F_{slb}(0, \phi) + F_{slb}(\phi, 0)) \quad (4)$$

여기서, p_1 , p_2 는 패널티 상수이며, $\theta_{side}, \phi_{side} \in (-70, -3) \cup (3, 70)$, μ_{side} 는 부엽 차단의 부엽 영역에서의 $F_{slb}(0, \phi_{side}) + F_{slb}(\theta_{side}, 0)$, 평균값을 의미한다. K 는 θ_{mid}, ϕ_{mid} 의 샘플링 개수이다. 해당 비용함수는 식 (3)에서 보여주듯이 부엽 구간에서 F_{slb} 의 ripple를 줄이면서 평탄한 패턴을 위하여 분산을 작아지는 방향으로 최적화를 진행하며, 식 (4)에서는 빔 방향 구간에서 억제를 진행한다. 또한 본 논문의 패널티 상수 p_1 은 0.5, p_2 는 7로 설정하였다.

III. 평면 배열 구성 및 패턴 결합

본 논문의 부엽 차단 안테나 패턴 합성은 비교적 적은

수의 소자를 사용하여 원하는 차단 패턴을 구현하므로 최적화 알고리즘과 실제 방사 패턴의 높은 신뢰성을 요구하게 된다. 수학적 계산 기반의 프로그램으로는 안테나 소자들간 상호 결합(mutual coupling)과 에지 효과(edge effect) 구현에는 제한사항이 존재한다. 따라서, 본 논문은 맥스웰 방정식 해석 기반의 프로그램인 CST suite studio와 수학적 계산 기반 프로그램인 MATLAB을 활용하여 소자의 패턴을 추출해 array factor와 접목시키는 소자 패턴 곱셈 기법(element pattern multiplication method)을 활용하였다. 또한 효율적인 소자 패턴 곱셈을 위하여 E-plane과 H-plane 방사 패턴이 대칭인 개구면 급전 마이크로스트립 패치 배열 안테나를 활용하였다^[7].

3-1 평면 배열 안테나

중심 주파수 10 GHz를 가지며 E-, H-plane 방사 패턴이 대칭인 개구면 급전 마이크로스트립 패치의 안테나를 그림 5에서 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과로 소자 안테나의 대역은 9.48~10.48 GHz 이며, 최대 7.04 dBi의 이득을 가

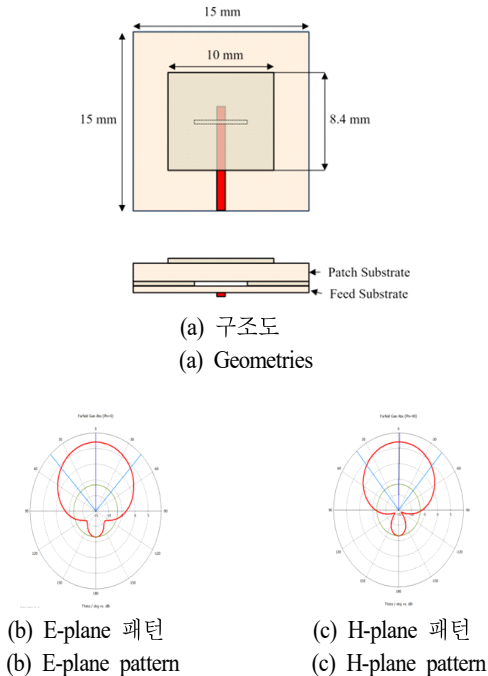


그림 5. 개구면 급전 마이크로스트립 안테나
Fig. 5. Aperture coupled microstrip patch antenna.

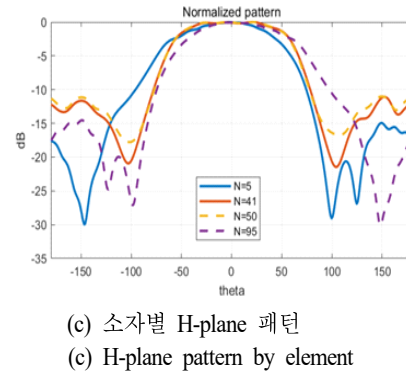
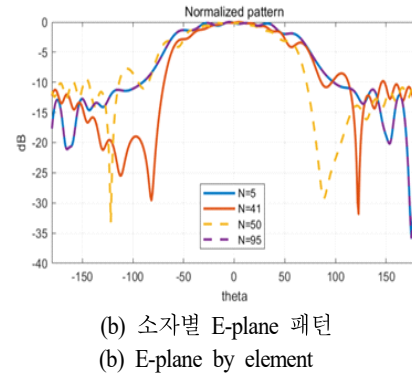
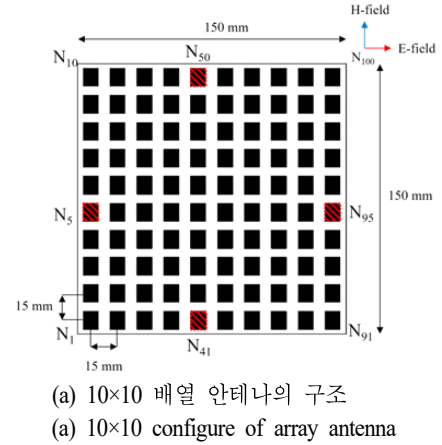


그림 6. 대칭성 방사패턴을 가지는 10×10 배열 안테나
Fig. 6. 10×10 array antenna with a symmetric pattern.

진다. 그림 6 (a)는 10×10 크기의 평면 배열 안테나이며, 소자간 간격은 $\lambda_0/2$ 로 설정하였다. 여기서 λ_0 는 자유공간에서 배열 안테나 중심 주파수의 파장이다. 또한 그림 6(b) 및 그림 6(c)에서 보여주듯이 각 외각에 존재하는 소자의 패턴은 대칭성을 가지고 있다.

3-2 부배열 기반 소자 패턴 곱셈 기법

신뢰성 있는 배열 패턴을 효율적으로 구현하기 위하여 그림 7과 같이 에지 및 상호결합 영향을 가장 많이 받는 영역과 상호결합의 영향을 받는 영역을 3가지로 구분하였다. 여기서 함수 f_E, f_H 는 각각 E-, H-plane을 반전시키는 함수이다. 이를 식 (1)과 결합하면 식 (5)와 같이 표현이 가능하다.

$$F(\theta, \phi) = A_{mn}(\theta, \phi) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g_{mn} e^{j\mathbf{r}_{mn}} \quad (5)$$

여기서 A_{mn} 은 소자의 위치에 따라 반전함수가 적용된 방사 패턴이다.

IV. 최적화

위상 배열 안테나에 방사 패턴에 영향을 미치는 요소는 소자들의 진폭 크기, 위상 천이, 위치, 개수로 설정할 수 있다. 본 연구에서는 사용되는 변수들은 진폭 크기, 위상 천이, 위치이며 부엽 차단 배열 안테나의 소자 개수는 최적화 계산 부담을 줄이기 위해 전체 배열 안테나의 소자 개수의 약 10 %로 설정하였다. 이때 소자들의 위치는 10×10 배열에서 결정되는 것이 아닌 반드시 첫 번째 소자를 포함하면서 사각형 형태를 가지는 조합에 한하여 최적의 위치를 찾아간다. 이는 그림 2에서의 하드웨어 구성

$f_H(S_1)$	$f_H(S_3)$	$f_{EH}(S_1)$
S_2	S_4	$f_E(S_2)$
S_1	S_3	$f_E(S_1)$

그림 7. 부배열 대칭기반 패턴 곱셈 기법

Fig. 7. Subarray symmetry-based pattern multiplication method.

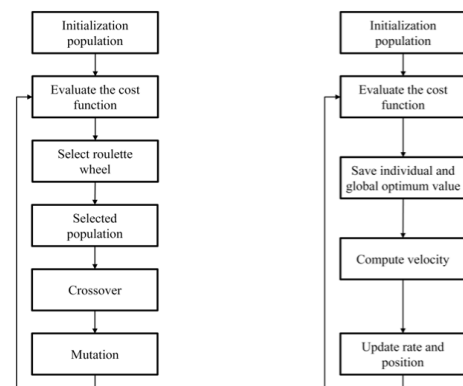
을 용이하게 할 수 있는 제한 조건이며, 최대한 많은 사각형 조합을 유도하기 위해 최종적으로 최적화에 사용된 소자의 개수는 12개로 설정하였다. Nature inspired algorithm은 복잡한 비선형 문제에 관하여 효과적인 결과를 도출할 수 있어, 패턴 합성에서 많이 적용되어 오고 있으며, 대표적으로 유전적 알고리즘과 입자 군집 최적화 알고리즘이 있다^{[8]~[10]}.

4-1 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm)

유전적 알고리즘은 생물학적 진화 원리를 모방하여 최적화 문제를 해결하는 기법이며, 유전자의 유전적 연산 및 자연 선택 과정을 흉내내어 문제 공간을 탐색하고 최적해를 발견한다. 그림 8(a)에서 보여주듯이 생성된 초기 해집단을 제안된 비용함수를 통해 평가 후, 평가 점수를 기준으로 룰렛 휠 방식의 자연 선택, 교차, 돌연변이를 반복한다^[11]. 본 연구에서 해집단의 크기는 50으로 설정하였으며 돌연변이 확률과 교차확률은 파라미터 튜닝을 통해 1 %, 80 %로 유전적 알고리즘의 하이퍼파라미터들을 설정하였다.

4-2 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization)

입자 군집 최적화는 자연의 집단 행동을 모방하여 해집단들의 정보를 공유하여 문제 공간을 탐색하며 최적해



(a) 유전적 알고리즘

(b) 입자 군집 최적화

(a) Genetic algorithms

(b) Particle swarm optimization

그림 8. 비선형 최적화 알고리즘

Fig. 8. Nonlinear optimization algorithms.

를 찾아가는 기법이다. 그림 8(b)에서 보여주듯이 다양한 위치에 존재하는 해집단을 제안된 비용함수로 평가 이후 개별 최적해와 글로벌 최적해를 기반으로 속도를 계산하고 위치를 재설정하는 과정을 반복한다^[12]. 본 연구에서는 유전적 알고리즘과의 비교를 위하여 동일한 해집단 크기 50을 가지며, 관성 가중치(inertia weight)는 1, 관성 가중치 감쇠비(inertia weight damping ratio)는 0.99, $c1$ (cognitive parameter)은 1.5, $c2$ (social parameter)는 1.6으로 설정하였다.

4.3 최적화 결과

유전적 알고리즘과 입자 군집 최적화를 1,000번의 반복수 진행하였으며, 랜덤 초기화에 대한 5번의 시도에 대한 평균 비용함수 결과는 그림 9와 같다. 알고리즘별 최적해 결과는 표 1 및 표 2에서 보여주고 있으며, elements number는 부엽 차단 배열 소자의 인덱스, g_{mn} 은 소자의 최적해 complex 가중치, position index(N_i)는 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 전체 배열 내에서 소자의 위치를 의미한다. 입자 군집과 유전적 알고리즘의 수렴 속도는 비슷한 결과를 보이고 있지만 입자 군집 알고리즘이 유전적 알고리즘보다 0.03 높은 적합도 수치에서 수렴이 되고 있었다. 그림 10 및 그림 11은 표준화된 주 빔 방사 패턴과 SLB

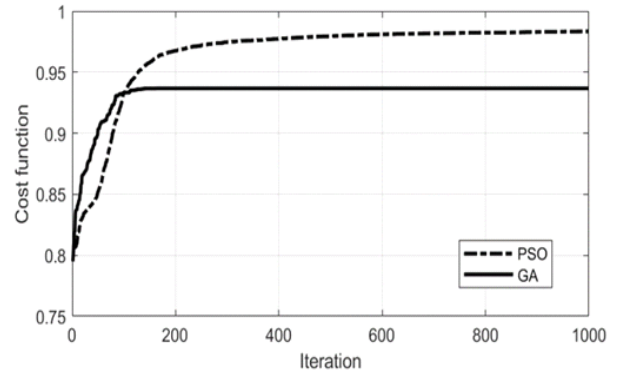


그림 9. 유전적 알고리즘과 입자 군집 최적화 간의 평균 성능 비교

Fig. 9. Performance comparison between genetic algorithm and particle swarm optimization, five trials each.

패턴에 대하여 각각 최대 F 가 적용되었을 때의 결과를 보여주며, 그림 12는 소자들의 최적화 위치를 시각적으로 보여준다. 두 가지 기법에서 최적화의 결과는 주 빔 방향에서 억제와 부엽 영역을 덮을 수 있는 패턴이 생성되었지만 유전적 알고리즘의 H-plane 결과에서 부엽 영역에 ripple이 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 부배열 기반의 굵셈 기법으로 CST와 MATLAB의 패턴이 높은 유사성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 빔 조향 상황에서도 부

표 1. 유전적 알고리즘 기반의 부엽 차단 합성의 정규화된 가중치

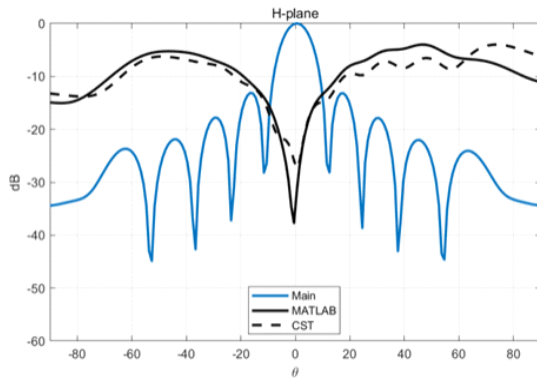
Table 1. Normalized weight of sidelobe synthesis based genetic algorithm.

Elements number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
g_{mn}	$0.77 \angle 112.5^\circ$	$0.14 \angle 157.5^\circ$	$0.77 \angle 303.8^\circ$	$0.06 \angle 180^\circ$	$0.06 \angle 281.3^\circ$	$0.48 \angle 157^\circ$	$0.83 \angle 292.5^\circ$	$0.59 \angle 45^\circ$	$1 \angle 168.8^\circ$	$0.11 \angle 180^\circ$	$0.08 \angle 315^\circ$	$0.8 \angle 0^\circ$
Position index (N_i)	1	2	3	4	5	6	11	12	13	14	15	16

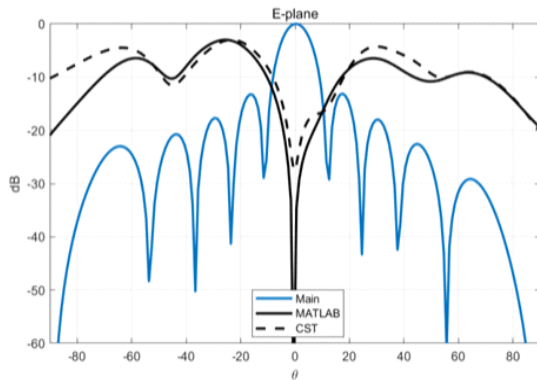
표 2. 입자 군집 최적화 기반의 부엽 차단 합성의 정규화된 가중치

Table 2. Normalized weight of sidelobe synthesis based particle swarm optimization.

Elements number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
g_{mn}	$0.09 \angle 145.4^\circ$	$0.79 \angle 0^\circ$	$0.71 \angle 181^\circ$	$0.67 \angle 321.4^\circ$	$0.7 \angle 125.1^\circ$	$0.6 \angle 105.8^\circ$	$0.63 \angle 185.5^\circ$	$0.58 \angle 151^\circ$	$1 \angle 87.4^\circ$	$0.37 \angle 65.4^\circ$	$0.63 \angle 140.1^\circ$	$0.62 \angle 295^\circ$
Position index (N_i)	1	2	3	11	12	13	21	22	23	31	32	33

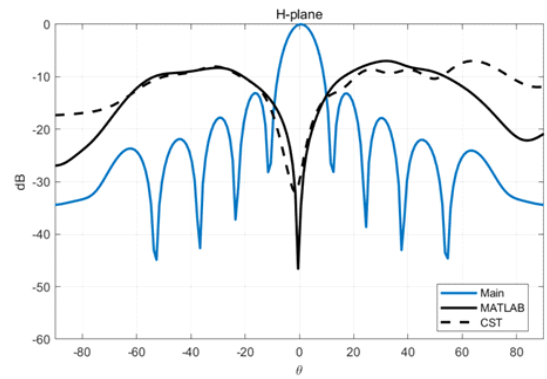


(a) E-plane 패턴
(a) E-plane pattern

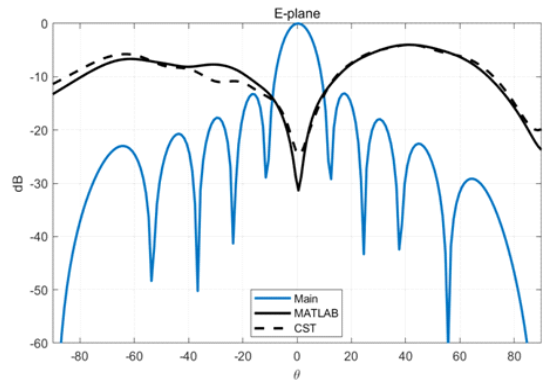


(b) H-plane 패턴
(b) H-plane pattern

그림 10. 유전적 알고리즘의 최적화 결과
Fig. 10. Genetic algorithm optimization result.



(a) E-plane 패턴
(a) E-plane pattern



(b) H-plane 패턴
(b) H-plane pattern

그림 11. 입자 군집 알고리즘의 최적화 결과
Fig. 11. Particle swarm algorithm optimization result.

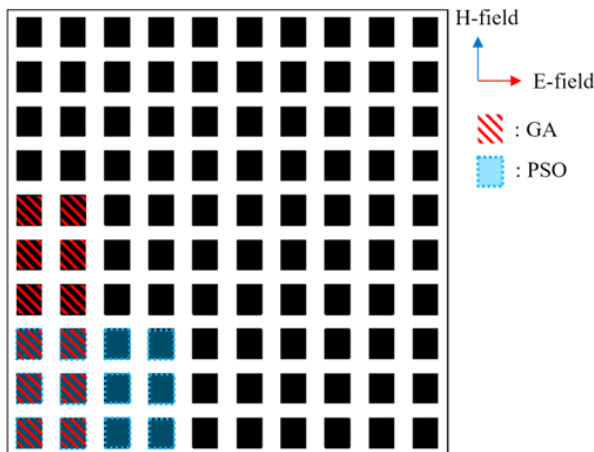


그림 12. 비선형 최적화 SLB 소자 위치 결과
Fig. 12. Nonlinear optimization result of SLB position.

엽 차단을 확인하기 위해 $\theta=0^\circ$ 에서 도출된 PSO 최적해에 빔 조향에 따른 array factor를 적용하였을 때의 결과를 그림 13과 같이 확인 하였다. $\theta=15^\circ, 30^\circ$ 빔 조향 상황에서 결과를 확인하였으며, 조향 상황에서도 부엽 차단 패턴이 유지가 가능하다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 부엽 차단 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 nature inspired algorithm 기반 SLB 합성 기법을 제안하였다. 제안된 비용 함수는 주 빔 방향에서는 억제, 부엽 영역에서는 평탄한 패턴을 가질 수 있도록 설계되었으며, 최적해의 신뢰성을 위하여 전자기파 해석 시뮬레

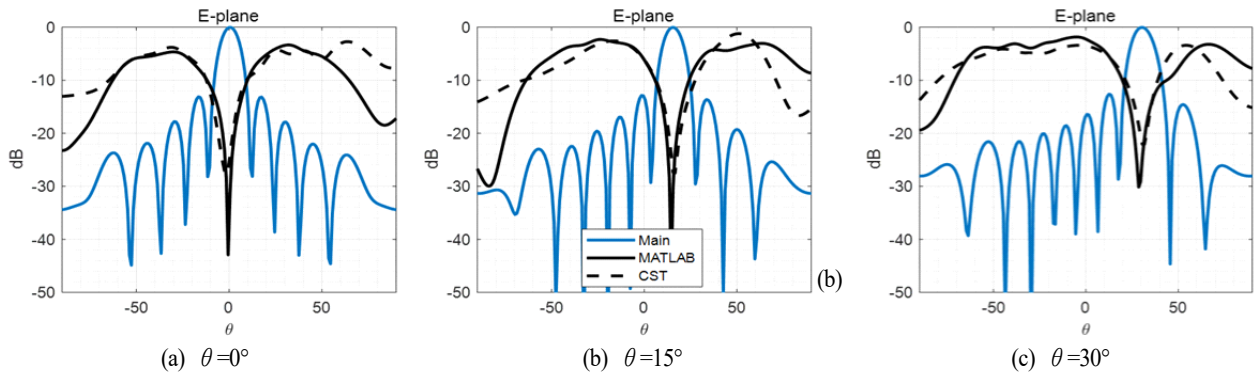


그림 13. 빔 조향 상황에서의 부엽 차단 방사패턴

Fig. 13. Sidelobe blocking patterns in beam steering scenarios.

이선을 접목하여 부배열 기반 패턴 곱셈 기법을 사용하였다. 최적화 결과, 유전적 알고리즘 입자 군집 알고리즘 모두 준수한 결과를 보였으나, 입자 군집 알고리즘이 더 높은 적합도를 가지는 것을 확인하였으며, 최적해 결과를 전지가파 해석 시뮬레이션에 적용하였을 때의 결과도 부엽 차단이 가능함을 확인하여 결과의 신뢰성을 높였다. 또한 최적해의 array factor를 대입하여 빔 조향 상황에서도 적용 가능하다는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 부엽 차단 빔 패턴을 비선형 최적화 알고리즘과 패턴 곱셈법을 통해 효과적으로 합성 가능성을 제시한다.

References

- [1] G. Cui, A. De Maio, M. Piezzo, and A. Farina, "Sidelobe blanking with generalized Swerling-Chi fluctuation models," *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 2, pp. 982-1005, Apr. 2013.
- [2] J. M. Joo, J. M. Lee, J. Park, H. S. Jin, Y. D. Kang, and I. T. Han, et al., "A study of dual channel side-lobe blanking beam pattern formation optimized for digital active phased array antennas of multi-function radar systems," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 1, pp. 62-71, Jan. 2020.
- [3] W. C. Barott, B. Himed, "Time-modulated array pattern for sidelobe blanking in spectrometry and radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1015-1018, May 2014.
- [4] S. Zhang, S. Gong, Q. Gong, Y. Guan, and B. Lu, "Application of the active element pattern method for calculation of the scattering pattern of large finite arrays," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 83-86, Feb. 2011.
- [5] D. A. Shnidman, S. S. Toumodge, "Sidelobe blanking with integration and target fluctuation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 3, pp. 1023-1037, Jul. 2002.
- [6] C. D. Richmond, "Performance of a class of adaptive detection algorithms in nonhomogeneous environments," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, no. 5, pp. 1248-1262, May 2000.
- [7] J. H. Kim, Y. M. Yoon, and B. G. Kim, "The mirror active element pattern method for the radiation pattern computation of linear array antennas," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 50, no. 8, pp. 94-102, Aug. 2013.
- [8] N. Ghattas, A. M. Ghuniem, A. A. Abdelsalam, and A. Magdy, "Planar antenna arrays beamforming using various optimization algorithms," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 68486-68500, Jul. 2023.
- [9] D. W. Boeringer, D. H. Werner, "Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array

synthesis," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 3, pp. 771-779, Mar. 2004.

- [10] D. Marciano, F. Duran, "Synthesis of antenna arrays using genetic algorithms," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 42, no. 3, pp. 12-20, Jun. 2000.

- [11] J. H. Holland, "Genetic algorithms," *Scientific American Magazine*, vol. 267, no. 1, pp. 66-73, Jul. 1992.

- [12] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, Perth, Nov.-Dec. 1995, pp. 1942-1948.

이 원 렬 [송실대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5855-9136>



2023년 8월: 송실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2023년 8월~현재: 송실대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 기계학습 기반 신호처리, 안테나

김 성 태 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9354-1807>



1996년 2월: 송실대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 송실대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이더 연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템

배 창 식 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3201-3848>



2015년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2017년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2017년 7월~현재: 한화시스템(주) 레이더 연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템

홍 순 기 [송실대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3794-3171>



2005년 5월: 미국 University of Maryland, ECE (공학사)
2008년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학석사)
2012년 12월: 미국 Virginia Tech, ECE (공학박사)
2008년 5월~2015년 10월: 미국 해군연구소 (NRL) 연구원

2015년 11월~2017년 2월: 미국 Rose-Hulman 공대 ECE 조교수
2017년 3월~현재: 송실대학교 전자정보공학부 부교수
[주 관심분야] 레이더 및 센서, 마이크로파/밀리미터파 시스템, 무선전력전송, 고출력 전자기파

송 중 화 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9774-4043>



2005년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학박사)
2016년 8월~현재: 한화시스템(주) 레이더 연구소 연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템