

개선된 이진 입자 군집 최적화 알고리즘을 적용한 픽셀 형태 주파수 선택적 표면의 효율적인 설계방안 연구

Effective Design of Pixel-type Frequency Selective Surfaces using an Improved Binary Particle Swarm Optimization Algorithm

양 대 도 · 박 찬 선 · 육 종 관

Dae-Do Yang · Chan-Sun Park · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문은 레이돔과 같은 다층구조의 주파수 선택적 표면(frequency selective surfaces: FSS)을 설계하는데, 편파나 입사각 등 다양한 고려사항에 대한 유연성을 갖는 픽셀 형태의 주파수 선택적 표면을 설계하는 것에 관한 것이다. 픽셀 형태의 FSS를 설계할 때 이산 공간 문제를 해결할 수 있는 다양한 방법 중 이진 입자 군집 최적화(binary particle swarm optimization: BPSO) 알고리즘은 FSS의 주기구조 패턴을 결정하는데 쉽게 적용 가능한 기술 중 하나이며, 따라서 향상된 BPSO 알고리즘을 통해 롤 오프 전파 투과특성을 갖는 FSS를 효율적으로 설계하는 기법을 제안하였다. 원하는 솔루션에 입자를 유도하기 위한 적합성 함수 설계에 대하여 수렴속도 문제를 해결하기 위해, ‘기울기’를 입력 변수로 한 적합성 함수를 적용할 경우 쉽게 원하는 전파특성을 갖는 FSS를 얻을 수 있었다.

Abstract

This study investigates a method of designing pixel-type frequency selective surfaces(FSS) with flexibility while considering factors, such as polarization and incident angle. Among the various methods used to solve the discrete space problem when designing a pixel-type FSS, the binary particle swarm optimization(BPSO) algorithm is one of the most applicable techniques to determine the periodic structure pattern of an FSS. Therefore, a method of efficiently designing FSS with roll-off band pass characteristics using an improved BPSO algorithm is proposed. To solve the convergence problem in the fitness function design to induce particles in the desired solution, FSS with desired roll-off wave characteristics can be easily obtained by applying a fitness function using “slope” as an input parameter.

Key words: Pixel-Type Frequency Selective Surfaces, Binary Particle Swarm Optimization, Fitness Function Modeling

I. 서 론

주파수 선택적 표면(FSS)은 주기구조를 이용해 특정한

주파수를 가진 전자파를 투과하거나 반사하는 표면이다. 이러한 FSS는 통신, 레이더 시스템 등 여러 분야에서 많이 사용되는데^{[1],[2]}, 주기구조의 형상을 갖는 FSS는 입사

「이 논문은 2018년도 연세대학교 ACEM 연구실의 지원으로 연구되었음」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received December 5, 2018 ; Revised February 7, 2019 ; Accepted April 15, 2019. (ID No. 20181205-10S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

하는 전자파에 대해 특정 주파수만을 통과 또는 반사하는 필터 역할을 하며, 이러한 특성으로 인해 레이돔 설계에 주로 사용된다. 일반적인 형태의 FSS는 비교적 단순한 형태의 엘리먼트로 구성^[3]되어 있으며, 이러한 단순구조의 경우 등가회로로 쉽게 모델링하여 표현이 가능하다^[4]. 그러나 레이돔같이 FSS 및 유전체 기관으로 구성된 다층 구조는 복잡한 고차 응답의 주파수 선택 특성을 가지며, 이에 기존의 단순한 형태의 FSS로는 원하는 주파수 선택적 특성에 대한 최적의 제원을 얻는 것이 어렵게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 수치해석 방법^{[5],[6]} 기반의 픽셀 형태의 FSS가 제안되었다. 따라서 FSS를 설계하는 방법은 고정된 패턴의 FSS에 대해 길이나 폭 등의 제원을 결정하는 방법과 픽셀 형태의 FSS와 같이 구조의 패턴을 결정하는 방법의 두 가지 큰 문제로 볼 수 있으며^[7], 이러한 FSS 설계 시 필요한 최적화 기법은 유전 알고리즘(GA)^{[8]~[10]}, 입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘^{[11]~[13]}, 또는 진화 알고리즘^{[14]~[16]} 등과 같은 다양한 진화적 기법이 있다.

입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘^[7]은 주어진 공간을 탐색하기 위해 입자 무리의 움직임 및 지능을 사용하는 반복적인 최적화 기법으로, 이진 탐색공간에서의 최적화 문제를 해결하기 위해 이진 입자 군집 최적화(BPSO) 알고리즘^[18]이 고안되었다. 제시된 BPSO의 전달 함수는 시그모이드 함수(S자 형태의 전달 함수)였으나, 기존 PSO와 다른 논리로 인한 수렴속도의 한계가 나타났으며, 이를 개선하기 위한 다양한 연구가 진행되었다^{[19]~[23]}. 그중 최근에 제안된^[24] V자 형태의 전달 함수의 적용은 기존의 S자 형태의 전달 함수보다 개념 및 수렴성능 면에서 더 나은 이점을 가짐을 증명하였으며, 본 연구는 V자 형태의 전달 함수를 적용하여 나온 수렴성능을 얻을 수 있도록 하였다.

각 입자가 N차원 공간을 탐색하여 최고의 해를 찾는데 사용되는 적합성 함수를 설정하는 것은 원하는 성능을 갖는 FSS를 설계하는데 매우 중요하다. 따라서 반복마다 낮은 적합성 값을 갖는 입자를 갱신하여 지역 최솟값이 아닌 전역 최솟값에 입자를 유도하기 위한 적합성 함수가 설계되었다^{[25],[26]}.

이에 본 연구에서는 특정 주파수에서 협대역 특성을 갖는 FSS를 설계하는데 이전에 사용된 적합성 함수의 한

계점을 살펴보고, 이를 개선한 기울기 기반의 적합성 함수를 소개하여 상대적으로 적은 반복횟수로도 빠르게 원하는 주파수 특성을 갖는 FSS를 설계할 수 있음을 시뮬레이션 결과 및 분석을 통해 증명한다.

II. 알고리즘 및 적합성 함수 모델링

2-1 이진 입자 군집 최적화 알고리즘

PSO는 James Kennedy, Russell C. Eberhart에 의해 개발되었으며 새의 무리와 곤충 떼의 사회적 행동과 같이 주어진 공간을 탐색하기 위한 병렬 진화 연산 기법이다. 입자들의 무리는 탐색공간 전체에 확률적으로 분포하며, 각 입자는 자체로 임의의 속도와 방향을 갖는다. 이렇게 초기 임의의 입자들을 생성한 이후 이들이 갖는 특성이 목적에 근접한 특성값을 갖도록 유도하는데 반복마다 **particle best** 및 **global best**를 평가하고, 정해진 반복횟수가 끝날 때까지 입자들을 목표로 하는 값으로 유도하기 위해 속도와 위치를 갱신한다. 그림 1의 흐름도는 이러한 PSO 알고리즘의 절차를 보여준다.

이러한 PSO 알고리즘을 기반으로 하여 제안된 이진 입자 군집 최적화(BPSO) 알고리즘은 이산 공간에서 최적해를 찾는 진화적 알고리즘이다. 이산 이진 공간에서 위치 갱신은 기본적으로 "0"과 "1"값 사이를 변환하는 것

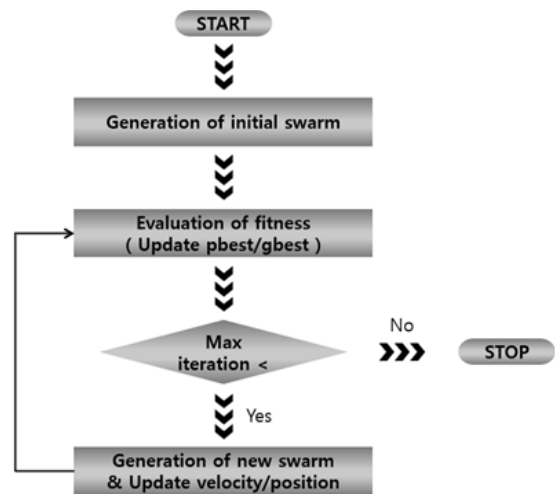


그림 1. PSO 알고리즘 흐름도
Fig. 1. The flowchart for PSO algorithm.

을 의미한다. 이 변환은 입자의 속도에 따라 수행되어야 하지만, 문제는 실제 공간에서의 속도 개념이 이진 공간에서 위치를 업데이트하기 위해 어떻게 사용되어야 하는지에 관한 것이다. 결과적으로 이러한 문제는 속도의 확률로 입자의 위치 정보를 변경함으로써 해결할 수 있으며^{[27],[28]}, 이를 위해 새롭게 도입되는 전달 함수는 속도 값의 위치를 갱신하기 위해 확률값으로 매핑하는 역할을 한다.

BPSO 알고리즘에서 속도를 갱신하는 입자 군집 속도 갱신 공식은 기존 PSO 알고리즘과 같이 각 입자가 갖는 관성 항과 particle best로 유도하기 위한 인지 항, global best로 유도하기 위한 군집 항의 세 항의 합으로 이루어진다.

$$v_p^{i+1} = wv_p^i + c_1r(pb_{est_p} - x_p^i) + c_2r(gbest - x_p^i) \quad (1)$$

여기서 i 는 각 반복횟수이며, p 는 입자 번호이다. Inertia term(wv_p^i)은 입자의 방향을 얼마나 빠르게 변경하는가를 제어하는 부분으로 v_p^i 는 i 번째 반복횟수에서 p 번째의 입자 속도이다. w 는 입자가 문제 해결공간을 더 많이 탐색하도록 조절하는 역할을 한다. Cognitive term($c_1r(pb_{est_p} - x_p^i)$)은 입자가 particle best로 움직이는 방법을 제어하거나 직접 발견한 best solution으로 돌아가는 것을 제어하며, Social term($c_2r(gbest - x_p^i)$)은 입자가 global best로 향하는 경향성을 제어한다. pb_{est_p} 는 p 번째 particle에 의해 나타나는 best solution의 위치를 나타내며, $gbest$ 는 global best solution의 위치를 나타낸다. c_1 과 c_2 는 각각 particle best와 global best의 상대적인 영향력 크기를 결정하는 가속 상수이며, 임의 계수(r)는 입자를 각각 particle 및 global best로 사행하는 정도를 control한다.

James Kennedy, Russell C. Eberhart에 의해 제안된 BPSO 알고리즘의 입자변경 위치 규칙과 전달함수는 다음과 같다. 식 (3)의 전달함수(시그모이드 함수)는 x_p^i 가 반복 중에 "0" 또는 "1"일 가능성을 결정하기 위해 추가된다.

$$x_p^{i+1} = \begin{cases} 1 & \text{if } r < T(v_p^{i+1}) \\ 0 & \text{if } r \geq T(v_p^{i+1}) \end{cases} \quad (2)$$

$$T(v_p^{i+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_p^{i+1}}} \quad (3)$$

그러나 식 (2)와 식 (3)의 경우, 연속적인 문제를 이산화된 공간으로 옮기는 과정에서 기존의 PSO와 다소 다른 개념으로 인해 수렴의 한계를 보인다. 따라서 기존의 BPSO 알고리즘을 토대로 전달 함수를 수정하려는 노력이 있었으며^{[19]~[23]}, Seyedali Mirjalili, Andrew Lewis는 기존 S자 형태의 전달 함수(시그모이드 함수)를 V자 형태의 전달 함수로 변경하여 더 나은 수렴결과를 보임을 제시하였다^[24]. 본 연구에 적용한 새롭게 제시된 입자변경 위치 규칙 및 V자 형태의 전달 함수는 다음과 같다.

$$x_p^{i+1} = \begin{cases} (x_p^i)^{-1} & \text{if } r < T(v_p^{i+1}) \\ x_p^i & \text{if } r \geq T(v_p^{i+1}) \end{cases} \quad (4)$$

$$T(v_p^{i+1}) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2} v_p^{i+1}\right) \right| \quad (5)$$

2.2 적합성 함수 모델링

BPSO 알고리즘은 적합성 함수의 최솟값을 갖는 입자를 global best로 선정하여 다음 반복에 해당 입자를 반영하므로 FSS 성능에 맞도록 각 입자의 적합성 값을 갱신시켜주는 적합성 함수의 설정이 중요하다.

Gutiérrez^[25]와 Liu^[26]는 해당 입자가 갖는 FSS 특성을 나타내는 계수 값을 CG-FFT 또는 FEM 방식의 수치해석 기반의 구조해석을 통해 얻은 뒤, 요구되는 계수 값을 갖는 마스크(mask)를 설정한 후 이들의 차이 값을 통해 적합성 값을 구하였다. 이렇게 계수 값을 기반으로 설계된 적합성 함수는 식 (6)과 같다.

$$F = \frac{1}{N_\theta} \sum_{k=1}^{N_\theta} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_k(Mask - C_{TE}^2(f_i, \theta_k)))^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_k(Mask - C_{TM}^2(f_i, \theta_k)))^2 \right) \quad (6)$$

여기서 N , N_θ 은 주파수 및 입사각 개수이며, w_k 는 해당하는 입사각별 가중치를, C 는 해당 주파수 및 입사각에서의 전송계수를 나타낸다. 이를 기반으로 하여 계수의 '값'을 기준으로 설정한 마스크는 그림 2와 같다($a = 0.63$, $b = 1.37$). Upper mask와 Lower mask를 설계함으로써 두 마스크 사이로 전송계수를 유도하도록 설정하였다.

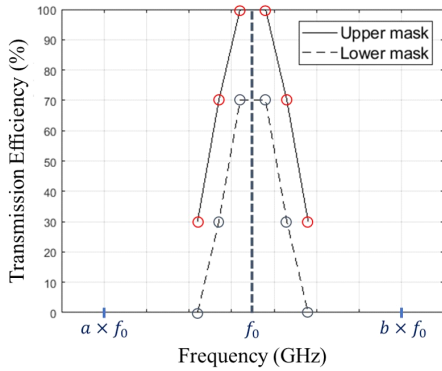


그림 2. 기존의 적합성 함수
Fig. 2. Conventional fitness function.

위 기존의 적합성 함수의 단점을 보완하여 새롭게 제안하는 적합성 함수는 식 (7), 그림 3과 같다. $Mslp$ 는 두 인근 해석된 주파수의 마스크 기울기를, $Cslp$ 는 계수의 기울기이다. 식 (6)은 해당 주파수의 마스크와 계수의 차이를 계산하는 반면, 식 (7)은 두 인근 주파수의 마스크와 계수의 기울기 차이로 계산을 하여, 특정 주파수 근처 대역에서 협대역 주파수 특성을 가진 입자를 갱신하도록 유도한다.

$F =$

$$\frac{1}{N_\theta} \sum_{k=1}^{N_\theta} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_k (Mslp - C_{TE}^2 slp(f_i, \theta_k)))^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (w_k (Mslp - C_{TM}^2 slp(f_i, \theta_k)))^2 \right) \quad (7)$$

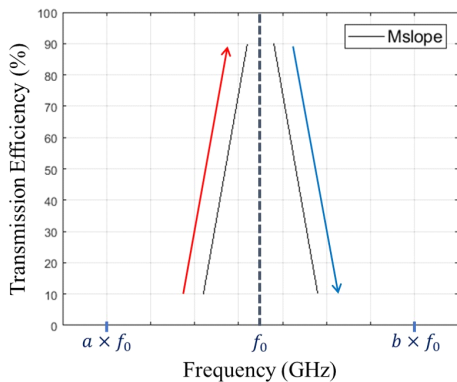


그림 3. 제안하는 기울기 기반의 적합성 함수
Fig. 3. Proposed fitness function.

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

3-1 FSS 설계 및 시뮬레이션 설정

본 논문에서 다루는 FSS의 목표성능은 X 밴드의 특정 주파수에서 협대역 전파투과 특성을 갖는 FSS를 설계하는 것이다. 제작상의 이점과 레이더의 경량화를 위해 단층 FSS를 고려하였으며, 이전 장에서 제시한 두 개의 적합성 함수에 대한 차이를 비교하는 것에 초점을 두었으므로 연산의 효율성을 위해 FSS에 추가적인 유전체 적용을 고려하지 않았다.

따라서 위 기준에 고려한 FSS 설계재원은 그림 4와 같다.

2장에서 새롭게 제안된 적합성 함수(식 6, 그림 3)의 BPSO 알고리즘 효율성을 증명하기 위해 이진문제 해결로 제작되는 FSS를 설계하였다. 2차원의 PEC 표면에 0 또는 1의 조합으로 이루어진 총 324개의 cell(18×18)로 구성하였으며, 입사 방향에 대한 안정성을 보장하기 위해 대칭 구조로 제작하는 것을 고려하여 45개의 셀로 FSS 패턴을 설계하였다. 한 입자가 갖는 FSS 크기는 X 밴드 대역의 공진 전파특성을 얻기 위한 적절한 크기인 1 cm×1 cm이며^[3], FSS를 구성하는 cell size는 0.5 mm×0.5 mm이다. 각 셀의 경계를 명확하게 구분하고, 전파투과특

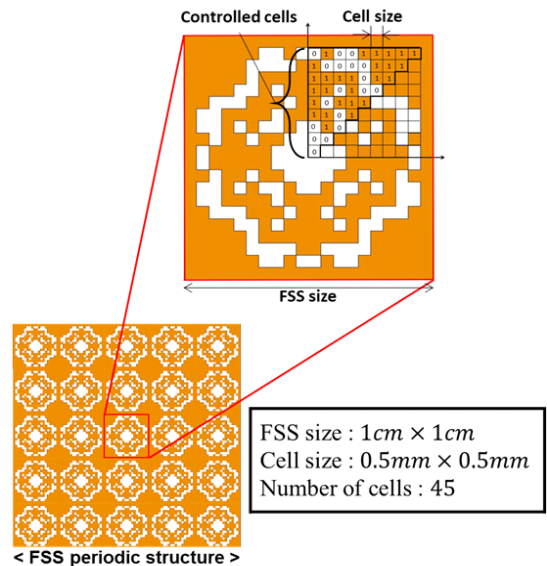


그림 4. 설계한 FSS 형상 및 재원
Fig. 4. The shape of FSS and parameter.

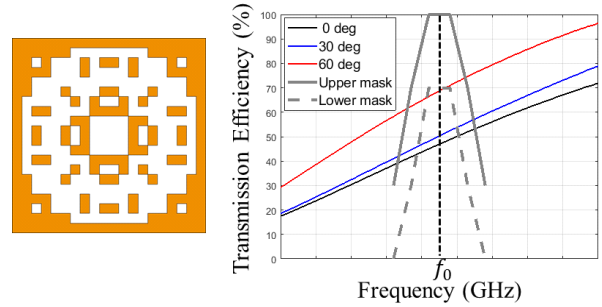
성을 보다 쉽게 얻기 위해 셀 각각의 테두리는 PEC로 고정하였다. 한편으로 입사각에 관한 FSS 특성을 최적화하기 위해 0°, 30°, 60°에 대한 전송계수를 적합성 함수에 대입하였다.

PSO 알고리즘의 입력재원은 다음과 같다. 최대 반복횟수는 100회 기준이며, c_1 과 c_2 는 모두 2.0이다. 가중치 w 는 0.9에서 0.4로, 최대 반복횟수인 100회에 나누어 선형적으로 감소한다. 또한, 기존 적합성 함수와의 정확한 비교를 위해 각 입사각에 대한 가중치는 모두 1로 설정하였다.

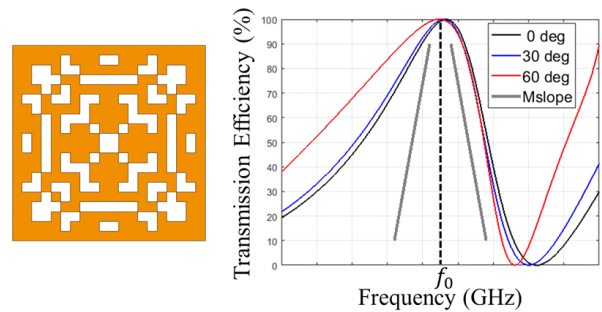
FSS 설계절차는 그림 5의 흐름도와 같으며, BPSO 알고리즘과 FSS 전파특성 해석을 동시에 수행하기 위해 두 개의 시뮬레이션 도구를 연동하여 진행하였다^[29].

3-2 시뮬레이션 결과 및 분석

식 (6)과 식 (7)을 적용한 결과, FSS 형상 및 주파수 특성은 그림 6과 같다. 식 (6)의 적합성 함수를 적용한 FSS의 주파수 특성보다 식 (7)의 제안된 기울기 기반의 적합성 함수를 적용한 FSS의 주파수 특성이 목표로 하는 FSS 설계에 더 잘 맞음을 확인할 수 있다. 기존의 적합성 함수를 적용한 결과가 새롭게 제안한 적합성 함수를 적용한 결과에 비해 목표하는 전파성능이 충족되지 않은 이유는 크게 2가지로 유추해 볼 수 있다. 첫째, 요구되는 FSS 전파특성을 얻는데 반복횟수가 불충분하여 원하는 전파성



(a) 기존의 적합성 함수 적용한 결과
(a) Result of using conventional fitness function



(b) 기울기 기반 적합성 함수 적용한 결과
(b) Result of using slope-based fitness function

그림 6. FSS 구조 및 전파특성 비교

Fig. 6. Comparison of FSS structures and wave characteristics.

능을 가진 FSS 형태를 얻을 만큼의 충분한 수렴이 이루어지지 않았다는 이유를 들 수 있으며, 둘째로, 기존의 적합성 함수를 적용 시 원하는 전파특성을 갖는 FSS의 입사각 최소의 적합성 값을 얻지 못하고 오히려 원하지 않는 전파성능을 가진 FSS가 최소 적합성 값을 획득하여 global best 또는 particle best로 다음 반복에 갱신되기 때문이다.

이런 결과가 나타난 이유를 비교하여 분석하기 위해, 기울기 기반의 적합성 함수를 적용한 결과로 나타난, 원하는 전파성능을 갖는 FSS(그림 6(b))의 전송계수를 다시 기존의 적합성 함수(식 6)에 대입하여 원하지 않는 전파성능을 갖는 FSS(그림 6(a))의 적합성 값과 비교해 보면 표 1과 같은 결과를 확인할 수 있다. 표 1에 의하면, 식 (6)을 적용하여 나온 FSS에 대한 적합성 값의 최종수치는 0.2484로, 이는 기울기 기반 적합성 함수의 변환된 적합성 값이 0.3198인 것에 비해 확실히 작은 값을 갖는다. 적합

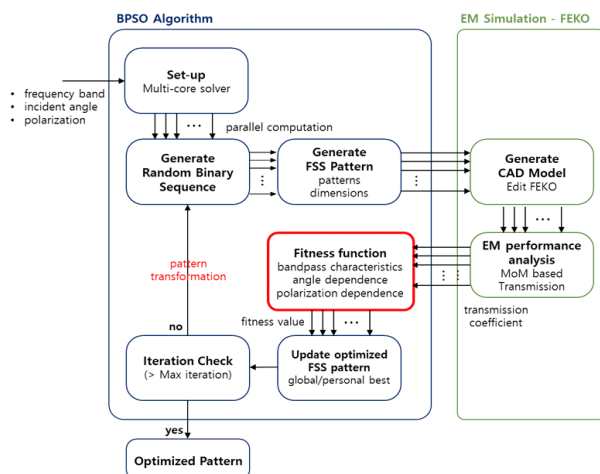


그림 5. FSS 설계절차 흐름도

Fig. 5. The flowchart of the design FSS process.

성 값이 작다는 것은 원하는 성능으로의 최적화가 더 잘 이루어졌다는 것을 의미하며, 낮은 값을 갖는 FSS 형상이 particle best 및 global best로 선정되어 다음 반복 시 입자 정보 갱신에 영향을 미친다는 것을 뜻한다. 그러나 표 1에서 값 기반의 적합성 함수인 식 (6)을 적용한 결과값이 식 (7)을 적용하였을 때 얻은 결과값보다 상대적으로 적은 값임에도 불구하고 그림 5(a)과 같이 원하는 전파특성의 FSS 형태가 나타나지 않는다. 따라서 식 (6)을 적용하였을 경우 목표로 하는 FSS의 재원을 갖는 입자를 다음 반복에 갱신하지 않을 가능성이 있다는 것을 의미하며, 결과적으로 기존의 적합성 함수는 물 오프 전파특성을 갖는 FSS를 찾는데 좋은 적합성 함수가 아님을 보여준다.

물론, 식 (6)을 적용한 결과가 모두 위 그래프처럼 나타나진 않는다. 45개의 이진 셀이 사용되는 FSS 형상은 2^{45} 개의 무수한 경우의 수가 있을 것이며, 이 중 많은 극솟값이 존재하고 있음을 추측해 볼 수 있다. 위의 시뮬레이션 결과는 많은 실험 중 극솟값에 수렴된 하나의 결과일 뿐이며, 실제 기존의 적합성 함수를 사용하여 결과를 얻은 사례가 있으므로 기존의 적합성 함수의 적용이 아주 불가능하다고는 볼 수 없다. 실제로 그림 7의 FSS의 경우

표 1. 최소 적합성 값 비교
Table 1. Minimum fitness values comparison.

FSS design iteration number	FSS fitness value applied to conventional fitness function	FSS fitness value applied to slope-based fitness function	
		Fitness value	Fitness value transformed to conventional fitness function
1	0.2656	0.4983	0.3897
2	0.2641	0.4899	0.5674
3	0.2516	0.4799	0.3839
4	0.2516	0.4024	0.3869
7	0.2516	0.2856	0.3552
14	0.2514	0.2856	0.3552
17	0.2495	0.2856	0.3552
18	0.2495	0.2465	0.3233
26	0.2495	0.2461	0.3198
46	0.2484	0.2461	0.3198
100	0.2484	0.2461	0.3198

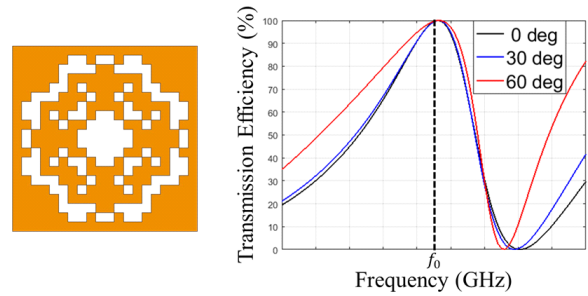


그림 7. 기울기 기반 적합성 함수 적용한 결과 FSS의 구조 및 전파특성
Fig. 7. The transmission efficiency of FSS using slope-based fitness function.

변환된 적합성 값은 0.2099인데, 이는 표 1에 제시된 기존의 적합성 함수를 적용한 결과로 얻은 FSS의 적합성 값인 0.2484보다 더 낮은 값을 가지므로, 결과적으로 기존의 적합성 함수를 적용하는 것으로도 원하는 전파특성을 갖는 FSS를 설계할 수 있음을 뜻한다. 그러나 식 (7)을 적용한 결과, 식 (6)을 적용한 결과처럼 원치 않는 주파수 특성을 갖는 입자를 갱신할 가능성이 없으며, 따라서 식 (6)을 적용한 결과보다 적은 반복횟수 내 빠른 효율로 원하는 주파수 특성에 수렴함을 확인할 수 있다.

개선된 적합성 함수의 경우 중심주파수(f_0) 값을 고려하지 않고 근처 주파수 대역 계수의 기울기에 대한 값을 평가하므로 초기 반복횟수에서 중심주파수가 조금씩 천이 되는 경향성을 보인다. 그림 8의 변환된 적합성 값이

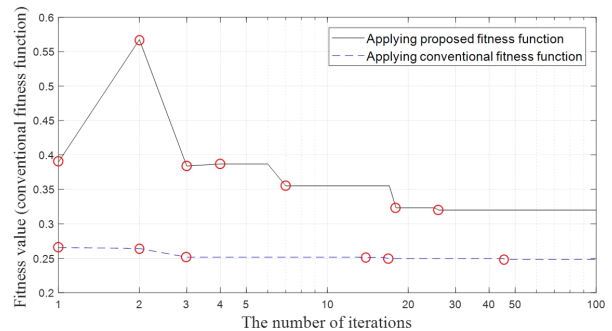


그림 8. 기존의 적합성 함수를 사용한 두 FSS의 최소 적합성 값 비교 곡선
Fig. 8. Curve of minimum fitness values comparison using conventional fitness function.

1~4번 반복횟수 동안 불규칙성을 보이는 것은 이 때문이다. 그러나 반복을 지속하면서 점차 중심주파수로 수렴하는 특성을 보이며, 최종적으로 적합성 값이 낮아지는 특성을 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 레이돔과 같은 다층구조의 FSS를 설계하는데, 편파나 입사각 등 다양한 고려사항에 대한 유연성을 갖는 픽셀 형태의 주파수 선택적 표면을 설계하는 방법에 관한 것이다. 이 FSS를 설계할 때 향상된 BPSO 알고리즘을 통해 롤 오프 전파 투과특성을 갖는 픽셀 형태의 FSS를 효율적으로 설계하는 기법을 제안하였다. 45개의 조절 가능한 이진 셀을 구성하고 있는 2차원의 PEC 표면인 FSS를 기준으로 설계하였으며, 입사각에 대한 안정성을 보장하기 위하여 대칭 구조로 설계하였다. 또한, 목표 주파수 대역인 X-밴드 대역의 파장에 적합한 FSS 크기를 결정하였다. 이진 군집 최적화 알고리즘에서 원하는 솔루션에 입자를 유도하기 위한 적합성 함수 설계에 대하여, 수렴속도 문제를 해결하기 위해 ‘기울기’를 입력 변수로 한 적합성 함수를 적용한 결과, 기존의 ‘값’을 입력 변수로 한 적합성 함수적용에 비해 빠른 효율로 원하는 롤 오프 전파 투과특성을 갖는 FSS를 얻을 수 있었다.

References

[1] T. K. Wu, *Frequency Selective Surface and Grid Array*, New York, NY, Wiley-Interscience, 1995.
 [2] J. C. Vardaxoglou, *Frequency Selective Surfaces: Analysis and Design*, Taunton, Research Studies Press, 1997.
 [3] B. A. Munk, *Frequency Selective Surface: Theory and Design*, Hoboken, John Wiley & Sons, 2005.
 [4] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Stevenage, IET, 1951.
 [5] C. C. Chen, "Transmission through a conducting screen perforated periodically with apertures," *IEEE Transaction, Microwave Theory and Techniques*, vol. 18, no. 9, pp. 627-632, Sep. 1970.
 [6] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Technique for

analyzing frequency selective surfaces-a review," in *Proceedings of the IEEE*, Dec. 1988, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615.
 [7] A. E. Yilmaz, M. Kuzuoglu, "Design of the square loop frequency selective surfaces with particle swarm optimization via the equivalent circuit model," *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, pp. 95-102, Jun. 2009.
 [8] G. Manara, A. Monorchio, and R. Mittra, "Frequency selective surface design based on genetic algorithm," *Electronics Letters*, vol. 35, no. 17, pp. 1400-1401, Aug. 1999.
 [9] E. A. Parker, A. D. Chuprin, J. C. Batchelor, and S. B. Savia, "Ga optimization of crossed dipole FSS array geometry," *Electronics Letters*, vol. 37, no. 16, pp. 996-997, Aug. 2001.
 [10] J. A. Bossard, D. H. Werner, T. S. Mayer, and R. P. Drupp, "A novel design methodology for reconfigurable frequency selective surfaces using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 4, pp. 1390-1400, Apr. 2005.
 [11] S. Genovesi, R. Mittra, A. Monorchio, and G. Manara, "Particle swarm optimization for the design of frequency selective surfaces," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 277-279, 2006.
 [12] P. H. da F. Silva, R. M. S. Cruz, and A. G. d'Assuncao, "Blending PSO and ANN for optimal design of FSS filters with Koch island patch elements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 8, pp. 3010-3013, Aug. 2010.
 [13] B. Zhang, Z. H. Xue, W. M. Li, W. Ren, and X. Q. Sheng, "Particle swarm optimization of frequency selective surface," in *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, New Taipei City, 2012, pp. 195-198.
 [14] L. H. Manh, M. Mussetta, and R. E. Zich, "Evolutionary algorithm for bandstop frequency selective surface," in *2014 IEEE 5th International Conference on Communications and Electronics(ICCE)*, Danang, 2014, pp. 404-406.

- [15] M. R. da Silva, C. de Lucena Nobrega, P. H. D. F. Silva, and A. G. d'Assuncao, "Optimal design of frequency selective surfaces with fractal motifs," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 8, no. 9, pp. 627-631, Jun. 2014.
- [16] Z. Bayraktar, J. A. Bossard, X. Wang, and D. H. Werner, "A real-valued parallel clonal selection algorithm and its application to the design optimization of multi-layered frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 4, pp. 1831-1843, Apr. 2012.
- [17] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, no. 2, pp. 1942-1948.
- [18] J. Kennedy, R. C. Eberhart, "A discrete binary version of the particle swarm algorithm," in *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, Orlando, FL, 1997, vol. 5, pp. 4104-4108.
- [19] G. C. Luh, C. Y. Lin, and Y. S. Lin, "A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 2833-2844, Mar. 2011.
- [20] P. Y. Yin, "A discrete particle swarm algorithm for optimal polygonal approximation of digital curves," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 15, no. 2, pp. 241-260, Jun. 2004.
- [21] Q. Shen, J. H. Jiang, C. X. Jiao, G. L. Shen, and R. Q. Yu, "Modified particle swarm optimization algorithm for variable selection in MLR and PLS modeling: QSAR studies of antagonism of angiotensin II antagonists," *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 22, no. 2-3, pp. 145-152, Jun. 2004.
- [22] L. Wang, X. Wang, J. Fu, and L. Zhen, "A novel probability binary particle swarm optimization algorithm and its application," *Journal of Software*, vol. 3, no. 9, pp. 28-35, Dec. 2008.
- [23] S. Lee, S. Soak, S. Oh, W. Pedrycz, and M. Jeon, "Modified binary particle swarm optimization," *Progress in Natural Science*, vol. 18, no. 9, pp. 1161-1166, Sep. 2008.
- [24] S. Mirjalili, A. Lewis, "S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary particle swarm optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 9, pp. 1-14, Apr. 2013.
- [25] A. L. Gutierrez, J. R. Perez, and J. Basterrechea, "Binary particle swarm optimization of FSS using a CG-FFT modelling," in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, 2009, pp. 45-49.
- [26] N. Liu, X. Sheng, C. Zhang, J. Fan, and D. Guo, "Design of FSS radome using binary particle swarm algorithm combined with pixel-overlap technique," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 522-531, Mar. 2017.
- [27] S. Mirjalili, S. Z. M. Hashim, "BMOA: Binary magnetic optimization algorithm," *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 204-208, Jun. 2012.
- [28] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour, and S. Saryazdi, "BGSA: binary gravitational search algorithm," *Natural Computing*, vol. 9, no. 3, pp. 727-745, Sep. 2010.
- [29] R. L. Haupt, "Interfacing FEKO and MATLAB for microstrip antenna design," in *23rd Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics*, Verona, pp. 332-335, Mar. 2007.

양 대 도 [연세대학교/공학석사]

<https://orcid.org/0000-0001-8762-3419>



2007년 3월: 공군사관학교 무기기초학과 (이학사)
2019년 3월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
[주 관심분야] 항공기 스텔스 기술, 전자전 시스템, 전파환경 분석

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
[주 관심분야] 수치해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공정 구조, EMI/EMC, HEMP, 플라즈마 해석

박 찬 선 [연세대학교/공학박사]

<https://orcid.org/0000-0001-8877-3291>



2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2019년 3월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
[주 관심분야] 전자기 수치해석