

삼각 격자구조를 갖는 평면배열 안테나의 부엽 레벨 감소를 위한 최적 평면배열 형상에 관한 연구

배지훈^o, 성낙선, 이태윤, 김종면, 표철식

한국전자통신연구원 무선방송연구소 전파기반연구부

baejh@etri.re.kr^o, nsseong@etri.re.kr, tylee@etri.re.kr, kjmin@etri.re.kr, and cspyo@etri.re.kr

STUDY ON THE OPTIMAL PLANAR ARRAY STRUCTURE WITH TRIANGULAR LATTICE FOR SIDE-LOBE REDUCTION

Ji-Hoon Bae^o, Nak-Seon Seong, Tae-Yune Lee, Joung-Myoung Kim, and Cheol-Sig Pyo

Advanced Radio Technology Department, Radio & Broadcasting Research Laboratory, ETRI

ABSTRACT

In this paper, we design an optimized planar array structure with triangular lattice for side-lobe reduction using a genetic algorithm. A constraint optimization is implemented by optimally removing some outer array elements far from the array center. It is shown that only the proper array shape without optimizing the magnitudes and phases of each array antenna can give low side-lobe level with a slight main beam broadening.

Keywords: Antenna array pattern synthesis, Genetic algorithm, Side-lobe reduction, Optimization

I. 서 론

정지위성 궤도 (geostationary orbit) 및 저위성 궤도 (low earth orbit) 를 갖는 능동 위상배열 안테나 (active phased array antenna)에 대한 많은 연구 및 개발등이 현재까지 10년 이상 진행되어 왔다. 본 논문에서는 능동 위상배열 안테나 시스템 중 배열 안테나 방사패턴의 부엽레벨 (SLL) 감소를 위한 방사 소자의 배치구조에 대한 기본 연구 결과 및 분석등을 다룬다. 부엽 레벨감소를 위하여 기존의 삼각 격자구조 (triangular lattice)를 가지는 평면배열에 최적화 알고리즘을 적용하여 초기 배열모양을 변형하여 수행한다. 이때, 안테나 소자에 가해지는 크기 및 위상은 고정한다. 본 연구에서 이용하는 최적화 알고리즘은 유전 알고리즘 (genetic algorithm)이고, 이를 이용하여 배열 안테나 개구면 전력 효율 (aperture power efficiency)을 최대화하고, 계산 효율을 높이기 위하여 배열 안테나 중심에서 멀리 떨어져 있는 영역에 위치한 소자들을 “on” 하거나 “off” 시켜서

배열 모양을 재구성한다. 안테나 단일 소자의 방사패턴은 원형편파를 갖는 마이크로스트립 사각패치 안테나이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 원형편파의 마이크로스트립 기반 사각패치 안테나에 대한 방사패턴을 기술하고, 3 절에서는 유전 알고리즘을 이용한 배열 안테나 범패턴 합성에 대하여 기술하고, 4 절에서는 이러한 기법을 이용한 시뮬레이션 결과를 보여주고, 마지막 5 절에서 결론을 유도한다.

II. 원형 편파를 갖는 마이크로스트립 사각 단일패치 안테나

본 논문에서 다루고 있는 배열 안테나 방사패턴에서 단일 안테나 방사소자는 그림 1의 마이크로스트립 사각패치 안테나이고, 그림 1(b)와 같이 원형 편파 (circular polarization)를 갖는다. 원형 편파는 두 개의 직교모드가 90°의 시간 위상차이를 가지고 패치 안테나에 여기될 때 발생할 수 있다 [1].

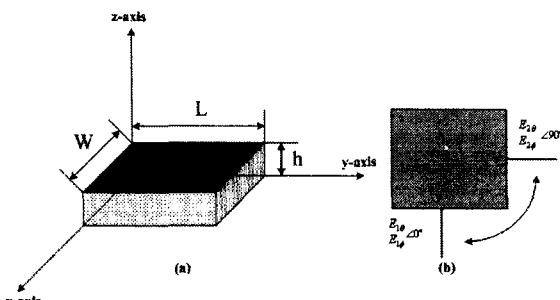


그림 1 원형편파를 갖는 사각패치 안테나 구조

따라서, 그림 1(b)와 같이 두개의 직교 모드, TM_{100}^z 와 TM_{010}^z 에 대한 방사패턴은 다음과 같이 계산할 수 있다 [1].

$$\begin{aligned} E_1(\theta, \phi) &= E_{1\theta}(\theta, \phi)\hat{\theta} + E_{1\phi}(\theta, \phi)\hat{\phi} \\ E_2(\theta, \phi) &= E_{2\theta}(\theta, \phi)\hat{\theta} + E_{2\phi}(\theta, \phi)\hat{\phi} \end{aligned}$$

(1)

여기서,

$$\begin{aligned} E_{1\theta}(\theta, \phi) &= -jCLh \cos\phi \left(\frac{\sin Y}{Y} \right) \left(\frac{\sin Z}{Z} \right) \cos\left(\frac{\kappa W}{2} \sin\theta \cos\phi\right) \\ E_{1\phi}(\theta, \phi) &= jCLh \cos\theta \sin\phi \left(\frac{\sin Y}{Y} \right) \left(\frac{\sin Z}{Z} \right) \cos\left(\frac{\kappa W}{2} \sin\theta \cos\phi\right) \\ E_{2\theta}(\theta, \phi) &= -jCWh \sin\phi \left(\frac{\sin X}{X} \right) \left(\frac{\sin Z}{Z} \right) \cos\left(\frac{\kappa L}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \\ E_{2\phi}(\theta, \phi) &= -jCWh \cos\theta \cos\phi \left(\frac{\sin X}{X} \right) \left(\frac{\sin Z}{Z} \right) \cos\left(\frac{\kappa L}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \end{aligned}$$

$$C = \frac{\kappa E_0 \exp(-j\kappa r)}{\pi r}, X = \frac{\kappa W}{2} \sin\theta \cos\phi, Y = \frac{\kappa L}{2} \sin\theta \sin\phi$$

$$Z = \frac{\kappa h}{2} \cos\theta \text{이다.}$$

원형편파를 가지는 패치안테나의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$E = \sqrt{[E_1(\theta, \phi) + jE_2(\theta, \phi)] \cdot [E_1^*(\theta, \phi) - jE_2^*(\theta, \phi)]} \quad (2)$$

III. 최적 평면 배열 구조 형성을 위한 범퍼턴 합성

본 절에서는 유전 알고리즘을 이용하여 배열 안테나 방사패턴의 부엽레벨을 감소하는 최적 평면배열 구조를 얻기 위한 방법을 기술한다.

1. 삼각 격자구조를 갖는 2차원 평면 배열

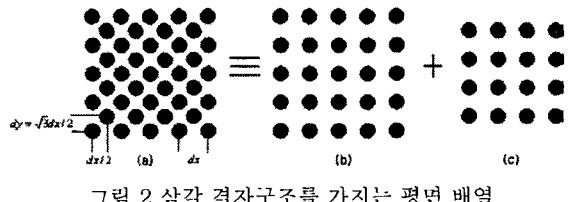


그림 2 삼각 격자구조를 가지는 평면 배열

삼각 격자구조를 가지는 평면배열은 위 그림 2와 같이 그림 2(b)와 그림 2(c)의 두 사각배열 (rectangular array)의 합으로 주어진다. 따라서, 삼각 격자구조의 평면배열의 방사패턴 p_{tri}^{2D} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_{tri}^{2D}(u, v) = p_{rec_1}^{2D}(u, v) + p_{rec_2}^{2D} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} p_{rec_1}^{2D}(u, v) &= \frac{1}{M_1 N_1} \sum_{n=0}^{N_1-1} \sum_{m=0}^{M_1-1} \exp[j(\kappa n dx \cdot u + km \sqrt{3} dx \cdot v)] \\ p_{rec_2}^{2D}(u, v) &= \frac{1}{M_2 N_2} \sum_{n=0}^{N_2-1} \sum_{m=1}^{M_2} \exp[j(\kappa(n dx + dx/2) \cdot u + km \sqrt{3} dx \cdot v)] \end{aligned}$$

M_1 과 N_1 는 그림 2(b)의 사각배열에서 세로방향 및 가로방향에 위치하는 전체 소자개수를, M_2 과 N_2 는 그림 2(c)의 사각배열에서 세로방향 및 가로방향에 위치하는 전체 소자개수를 각각 나타낸다.

다음의 2 장에서는 삼각 격자구조를 가지는 식 (3)의 기본 평면배열로부터 부엽레벨 감소를 위한 최적 평면배열을 산출하기 위한 방법을 설명한다.

2. 유전 알고리즘을 이용한 범퍼턴 합성

본 장에서는 낮은 부엽 레벨을 얻기 위하여, 식 (3)의 초기 평면배열에 유전 알고리즘을 적용하여 초기평면배열을 최적화한다. 여기서, 유전 알고리즘의 탐색 범위를 평면배열의 바깥 영역에 위치하는 소자들로 국한하여 각 소자들이 유전 알고리즘에 의하여 “on” 혹은 “off” 상태를 이용하여 최대 부엽 레벨을 감소하도록 한다.

유전 알고리즘은 자연선택 (natural selection)과 진화 (evolution)의 개념을 모델링한 확률 탐색 (stochastic search) 방법이다 [3]. 유전 알고리즘의 기본 절차는 다음과 같이 주어진다.

단계 1 : 개체를 구성하여 초기 집단 (population)을 형성한다.

단계 2 : 적합함수 (fitness function)를 이용하여 집단을 구성하는 각 개체의 적합도를 평가한다.

단계 3 : 평가된 적합도 값에 따라 개체를 선택한다. (selection)

단계 4 : 교배 (mating)를 통하여 자손 (offspring)을 생성한다.

단계 5 : 새로 생성된 집단에 대하여 돌연변이를 발생시키고, 적합도를 재평가한다.

단계 6 : 원하는 해를 얻을 때까지 단계 2에서 단계 5를 반복 수행한다.

유전 알고리즘의 일반적인 개념과 용어 설명, 그리고 EM (electromagnetics) 문제에 대한 응용 사례들은 [3] - [5]에 자세히 설명되어 있다.

본 연구에서 유전 알고리즘을 이용한 빔페인 합성을 수행하기 위하여 다음의 그림 3에서부터 시작한다. III 절의 1 장에서 살펴본 것과 같이 삼각 격자 구조의 평면 배열은 두 개의 사각 배열로 나눌 수 있다. 따라서, 본 장에서는 하나의 사각 배열에 대한 빔페인 합성에 대하여 기술한다. 삼각 격자 구조의 평면 배열에 대한 빔페인 합성 시에는 그림 2(a)와 그림 2(b)의 사각 배열에 2 장에서 소개하는 방법을 각각 적용하고 합성하여 구한다.

그림 3과 같이 각각의 소자들은 x 축과 y 축에 대하여 사각 격자의 일정한 간격으로 대칭적으로 위치하고 있다. 따라서, 최적의 평면 배열을 형상화하기 위하여 영역 I에 존재하는 영역 (A)과 영역 (B)에 놓여진 소자들만 고려한다. 그러면, 유전 알고리즘을 적용하기 위한 사각 평면 배열은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} p^{2D} = & \frac{1}{N^2} \left[2 \sum_{n=1}^R \cos(kndx \cdot (u - u_0)) + 1 \right] \cdot \left[2 \sum_{m=1}^Q \cos(kmdy \cdot (v - v_0)) + 1 \right] \\ & + \frac{A_{mn}}{N^2} \left[2 \sum_{n=1}^M \cos(kndx \cdot (u - u_0)) + 1 \right] \cdot \left[2 \sum_{m=Q+1}^M \cos(kmdy \cdot (v - v_0)) + 1 \right] \\ & + \frac{A_{mn}}{N^2} \left[2 \sum_{n=R+1}^M \cos(kndx \cdot (u - u_0)) + 1 \right] \cdot \\ & \left[2 \sum_{m=1}^Q \cos(kmdy \cdot (v - v_0)) + 1 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, A_{mn} 은 소자에 가해지는 가중치로서, 1 혹은 0의 값을 가진다. 그리고, $u_0 = \sin \theta_0 \cos \phi_0$, $v_0 = \sin \theta_0 \sin \phi_0$ 이고, M, Q, R은 각각 그림 3과 같이 주어진다. $A_{mn} = 1$ 은 소자 상태가 "on" 인 것을, 반면에 $A_{mn} = 0$ 은 소자 상태가 "off" 인 것을 각각 나타낸다. 주어진 개체에 대한 적합도를 평가하기 위한 적합함수는 다음과 같이 정의된다.

$$F = \max_{SLL} \{ 20 \log(p_{mn}^{2D}) \}, \quad \theta = \text{부엽 영역}, \phi = 0^\circ \sim 180^\circ \quad (5)$$

유전 알고리즘을 이용하여 부엽 레벨 감소를 위한 빔페인 합성 절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

단계 1 : 이진 스트링 (binary string)의 염색체 (chromosome)인 A_{mn} 에 대한 초기 집단을 형성한다.

단계 2 : 식 (5)를 이용하여 최대 SLL을 계산한다.

단계 3 : 단계 2에서 얻은 적합도에 따라 개체를 높은 순으로 나열하여 최저 50%를 버린다

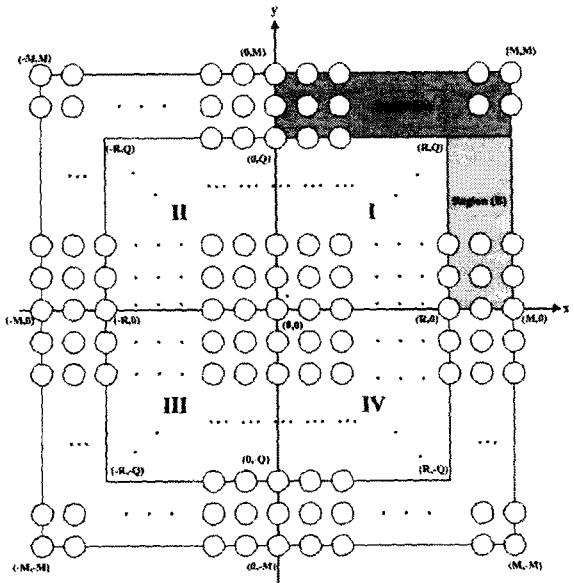


그림 3 빔페인 합성을 위한 평면 배열 구조

단계 4 : 선택된 50%에서 교배 연산자를 이용하여 새로운 자손들을 생성한다.

단계 5 : 돌연변이 확률에 의거하여 새로 생성된 집단에 돌연변이를 생성한다.

단계 6 : 최대 부엽 레벨의 감소가 만족될 때까지 단계 2부터 단계 5까지 반복 수행한다.

IV. 시뮬레이션 결과

삼각 격자 구조를 가지는 초기 평면 배열은 그림 4와 같이 주어진다.

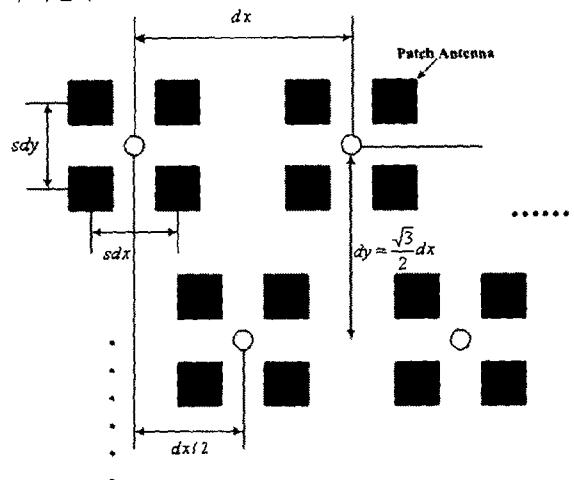


그림 4 부 배열 구조를 갖는 삼각 격자 구조의 평면 배열

그림 4의 부배열 (sub-array)로 이루어진 평면배열은 12 X 23 의 사각평면배열과 11 X 22의 사각평면배열로 나누어진다. 각 부배열은 2 X 2 마이크로스트립 사각패치 안테나로 구성된다. 이때, $dx=2.2\lambda$ 이고 $sdx=sdy=1\lambda$ 이다. 원형편파를 갖는 사각패치 안테나에 대한 여러가지 변수들은 다음의 표 I 과 같이 주어진다.

표 1 마이크로스트립 사각패치 안테나의 변수

변수	W	0.3904 cm
	L	0.3904 cm
	h	0.1588 cm
	유전율 ϵ_r	2.2
	중심 주파수	20 GHz

낮은 부엽레벨을 가지도록 초기 삼각격자구조의 평면배열을 최적화하기 위하여, 12 X 23 의 사각평면배열에서는 $R=7$, $Q=4$, 그리고, 11 X 22 의 사각평면배열에서는 $R=7$, $Q=3$ 으로 설정한다. 다음의 그림 5는 최적화 된 평면배열 구조를 보여준다. 이때, 최대 부엽레벨은 -22.68 dB 이다.

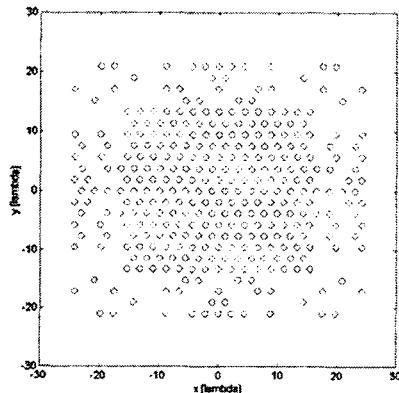


그림 5 최적화된 삼각격자 구조의 평면배열

그림 5의 결과로부터 평면배열의 모양을 최대로 유지하면서 최적의 평면배열 모양을 산출하면 다음 그림 6과 같이 얻을 수 있다. 그림 6의 결과를 살펴보면, 평면배열 형상이 기대한 원형 배열의 형상과는 많이 다른 것을 관찰할 수 있다. 다음의 그림 7은 $u = \sin \theta \cos \phi$, $v = \sin \theta \sin \phi$ 에 대한 그림 6의 2-D 평면배열 패턴의 측면도를 보여준다. 그림 8은 $\phi = 0^\circ$ 평면에서 주빔의 각도 (θ_0, ϕ_0)가 각각 $(-5^\circ, 0^\circ)$, $(0^\circ, 0^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$ 일 때의 전체 배열안테나 방사패턴을 보여준다. 또한, 그림 9는 $\phi = 90^\circ$ 평면에서 주빔 각도가 각각 $(-5^\circ, 90^\circ)$, $(0^\circ, 90^\circ)$, $(5^\circ, 90^\circ)$ 일 때의 전체 배열 방사패턴의 결과를 보여준다.

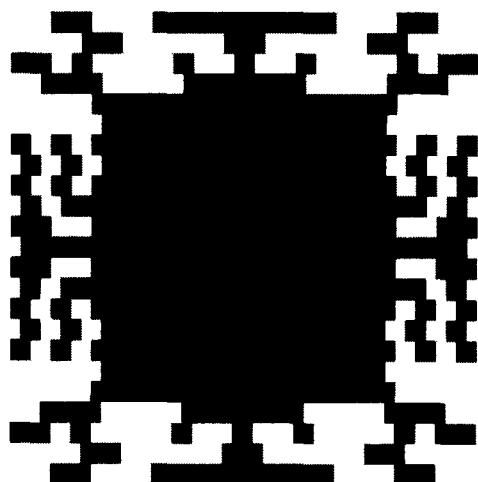


그림 6 삼각격자 구조를 갖는 최적의 평면배열 형상

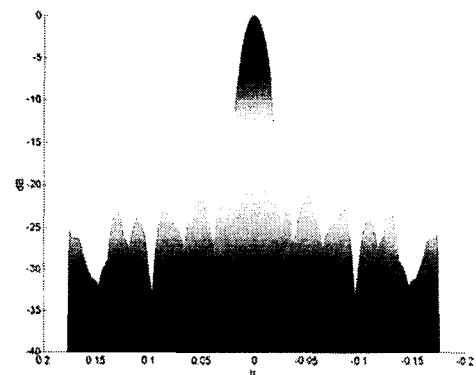
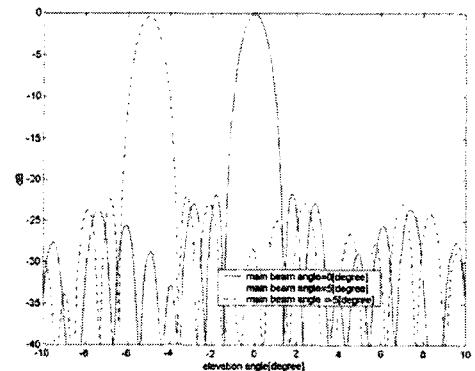
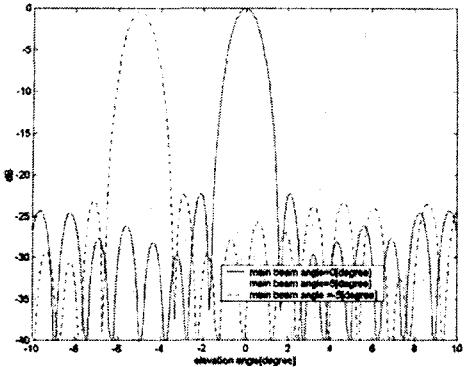


그림 7 최적화된 2-D 평면배열 패턴의 측면도

그림 8 전체 방사패턴 ($\phi = 0^\circ$)

그림 9 전체 방사패턴 ($\phi = 90^\circ$)

마지막으로, 표 II에서는 초기 삼각격자의 평면배열과 최적화된 평면배열 형상에 대한 최대 부엽레벨, 3dB 범폭, 주빔레벨들의 비교 결과들을 나타내었다. 표 II의 결과와 같이 최적화 된 평면배열은 초기 평면배열보다 낮은 부엽레벨을 가지면서, 범폭의 증가도 매우 작다는 것을 관찰할 수 있다.

표 II 두 평면배열에 대한 비교 결과

종류	항목	주빔 각도 ($\phi_0 = 0^\circ$)		
		$\theta_0 = -5^\circ$	$\theta_0 = 0^\circ$	$\theta_0 = 5^\circ$
초기 삼각격자 평면배열 구조	최대 SLL [dB]	-13.38	-13.25	-13.38
	주빔 레벨 [dB]	-0.37	0	-0.37
	3dB 범폭 [°]	0.96	1.0	0.96
최적화된 삼각격자 평면배열 구조	최대 SLL [dB]	-21.78	-21.68	-21.68
	주빔 레벨 [dB]	-0.37	0	-0.37
	3dB 범폭 [°]	1.08	1.14	1.08

V. 결 론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 삼각격자를 갖는 평면배열 구조를 최적화하였다. 배열 안테나 개구면 전력 효율과 계산 효율성을 고려하여 유전 알고리즘의 해공간 영역을 평면배열의 외곽에 위치한 배열소자들로 국한하여 수행하였다. 배열 안테나 개별 소자에 가해지는 크기 및 위상을 조절하지 않고서도, 단지 배열 평면의 모양만으로 충분히 낮은 부엽레벨을 달성할 수 있고, 또한 최적화된 모양은 기대한 원형 모양과는 많이 상이한 것을 관찰할 수 있었다.

참고문헌

- [1] C.A.Balanis, "Antenna theory analysis and design", John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [2] F.Hodjat, and S.A.Hovanessian, "Nonuniformly spaced linear and planar array antennas for sidelobe reduction", *IEEE Antennas and Propa.*, Vol.AP-26, no.2, pp.198-204, March 1978.
- [3] J.M.Johnson, and Yahya R.-S., "Genetic algorithms in engineering electromagnetics", *IEEE Antennas and Propa. Magazine*, vol.39, no.4, pp.7-21, August 1997.
- [4] R.L.Haupt, "Thinned arrays using genetic algorithms", *IEEE Antennas and Propa.*, vol.42, no.7, pp.993-999, July 1994.
- [5] D.F.Li, and Z.L.Gong, "Design of hexagonal planar arrays using genetic algorithms for performance improvement", *ICMMWT*, pp.455-460, 2000