

강화학습 기반 비등간격 2차원 안테나 최적화

강세영, 고준성, 김경민*, 나선필*, 박철순* 정원주

고려대학교, *국방과학연구소

{sykang0229, wchung}@korea.ac.kr

Optimization for Non-Uniformly Spaced 2-D Antennas based on Reinforcement Learning

Kang Se Young, Ko Jun Sung, Kim Gyung Min*, Nah Sun Phil*, Park Cheol Sun*, Chung Won Zoo

Korea University, *Agency for Defence Development

요약

본 논문은 강화학습을 사용한 비등간격 2차원 안테나 최적화 연구이다. 원하는 beam width와 side-lobe level을 만족하는 3차원 빔을 만들기 위해서 새로운 3차원 빔형성 비용 함수를 제안하고 비용 함수를 최소로 만드는 안테나 위치와 각 안테나의 가중치를 찾기 위해서 강화학습 알고리즘을 사용하였다. 본 논문에서는 격자 구조와 non-linear 구조를 갖는 비등간격 2차원 안테나를 설계하고 등간격 2차원 안테나와 성능을 비교하여 비등간격 2차원 안테나가 등간격 2차원 안테나보다 뛰어난 빔형성 성능을 가짐을 보였다. 또한, 두 가지의 비등간격 2차원 안테나의 빔형성 성능 비교를 통하여 새로운 2차원 배열의 가능성을 확인하였다.

I. 서론

안테나 배열 최적화는 효율적인 신호 송수신을 가능하게 하여 최신 무선 통신 시스템에서 중요한 역할을 하고 있다.[1] 2차원 안테나 배열에는 등간격 배열 구조와 비등간격 배열 구조가 있다. 등간격 배열 구조는 동작 주파수에 의해 안테나의 위치가 정해져 한정된 빔형성 성능을 갖는다. 하지만, 비등간격 배열 구조는 동작 주파수와 독립적인 최적의 안테나 배열 구조를 사용할 수 있어 등간격 구조보다 좋은 빔형성 성능을 갖는다.

비등간격 안테나 구조를 최적화하기 위해서는 수많은 local optimum을 가지는 비선형 문제를 풀어야 한다. 이러한 비선형 문제는 closed-form solution을 갖지 않아 다양한 휴리스틱 알고리즘이 사용되었다.[2] 하지만, 휴리스틱 알고리즘은 global optimum을 찾기 위해 많은 시간이 걸리거나 local optimum에 빠지는 문제가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강화학습을 적용하는 연구가 이루어졌다.[2,3]

본 논문에서는 원하는 모양의 3차원 빔을 만들기 위해 beam width(BW)와 side-lobe level(SLL)에 제약 조건을 주는 비용 함수를 제안하였다. Modified reinforcement learning(MORELA)[4]를 사용하여 비등간격 2차원 안테나의 안테나 위치와 가중치를 찾고, 시뮬레이션을 통하여 등간격 2차원 안테나와 비등간격 2차원 안테나의 빔형성 성능을 비교하였다.

II. 비등간격 2차원 안테나 모델과 비용 함수

그림 1은 N 개의 isotropic 안테나로 이루어진 비등간격 2차원 안테나의 구조를 보여준다. 이러한 2차원 안테나 배열의 array factor(AF)는 다음과 같이 정의된다.[1]

$$AF(w_i, x_i, y_i; \theta, \phi) = \sum_{i=1}^N w_i \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} x_i (u - u_0) + y_i (v - v_0)\right) \quad (1)$$

여기서

$$u = \sin(\theta) \cos(\phi), \quad u_0 = \sin(\theta_0) \cos(\phi_0) \quad (2)$$

$$v = \sin(\theta) \sin(\phi), \quad v_0 = \sin(\theta_0) \sin(\phi_0) \quad (3)$$

w_i 는 i 번째 안테나의 가중치, x_i 와 y_i 는 각각 i 번째 안테나의 x축 좌표와 y축 좌표, θ 는 polar angle, ϕ 는 azimuth angle, θ_0 와 ϕ_0 는 각각 polar angle과 azimuth angle에 대한 스캔 각도이다.

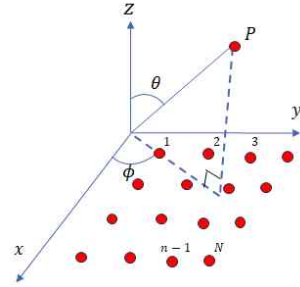


그림 1. N 개의 안테나로 이루어진 비등간격 2차원 안테나
비등간격 2차원 안테나의 빔 패턴은 아래와 같이 normalized AF로 나타낼 수 있다.

$$BP(\theta, \phi) = 20 \log_{10} \left(\frac{|AF(w_i, x_i, y_i; \theta, \phi)|}{\max(|AF(w_i, x_i, y_i; \theta, \phi)|)} \right) \quad (4)$$

Desired 빔 패턴을 만들기 위해서 BW와 SLL에 제약 조건을 주는 3차원 빔형성을 위한 새로운 비용 함수를 다음과 같이 제안한다.

$$f = \int_0^\pi \int_\theta \int_\phi \left| BP(\theta, \phi)^{(\alpha^{deg})} - BP_{des}(\theta, \phi) \right|^2 d\theta d\phi d\alpha \quad (5)$$

여기서 α^{deg} 는 3차원 빔의 단면적에 대한 각도 파라미터, $BP(\theta, \phi)^{(\alpha^{deg})}$ 는 각도 α^{deg} 에 대한 2차원 빔 패턴, $BP_{des}(\theta, \phi)$ 는 원하는 BW와 SLL을 가지는 빔 패턴이다. 비용 함수는 그림 2와 같이 3차원 빔으로부터 얻은 α^{deg} 에서의 빔 패턴과 desired beam pattern 사이의 차이를 계산한다. 본 논문에서는 MORELA를 사용하여 비용 함수 식 (5)를 최소화하는 안

테나의 위치와 가중치를 찾아 비등간격 2차원 안테나를 설계하였다.

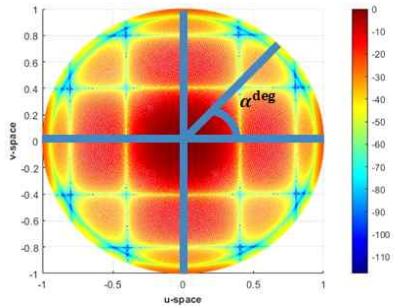


그림 2. 3차원 빔의 2차원 빔 패턴 추출 개요도

III. 시뮬레이션 결과

MORELA를 사용하여 식 (5)를 최소로 만드는 비등간격 2차원 안테나 배열과 각 안테나의 가중치를 찾을 수 있다. 본 논문에서는 격자 구조와 non-linear 구조를 가지는 두 가지 종류의 비등간격 2차원 안테나를 최적화하였다. 안테나 배열 최적화를 위해 사용한 MORELA는 다음과 같은 최적화 과정을 갖는다.[4]

1. 초기 solution vector 생성
2. 비용함수 계산 및 최적 안테나 배열 및 가중치 선택
3. 최적 안테나 배열 및 가중치 기반의 sub-solution vector 생성
4. 비용함수 계산 및 비최적 안테나 배열 및 가중치 제거
5. 보상(Reward) 계산 및 solution vector 업데이트
6. Step 2로 이동 및 stopping criteria 만족 시 종료

본 논문에서 사용한 MORELA 파라미터는 learning rate(α)는 0.8, search space parameter(β)는 10, discounting factor(γ)는 0.2, solution vector의 개수(m)은 10, 최대 반복 횟수(T)는 1,000으로 설정하였다. 비등간격 2차원 안테나의 위치와 가중치에 대한 초기 solution vector는 각각 최소 간격(d_{min})은 0.1λ , 최대 간격(d_{max})은 λ , 각 안테나의 최소 가중치(w_{min})는 0.1, 최대 가중치(w_{max})는 1로 설정하였다. 본 논문에서는 MORELA를 사용하여 16개의 안테나로 이루어진 격자 구조와 non-linear 구조를 가지는 비등간격 2차원 안테나를 설계하였다. 여기서 BW와 SLL은 각각 40deg 와 -15dB 로 설정하였고, α^{deg} 의 간격을 30도로 설정하였다.

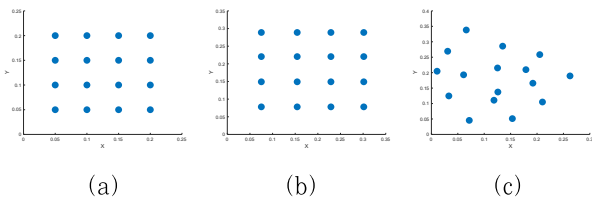


그림 3. 2차원 안테나 배치도

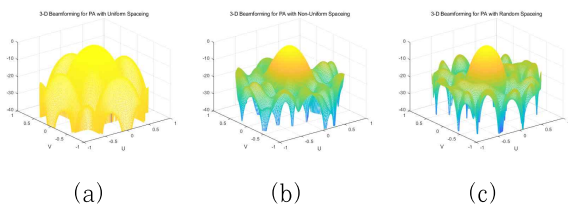


그림 4. 2차원 안테나의 3차원 빔 패턴

그림 3은 안테나 위치의 배치를 보여주는 그림으로 각각 등간격 2차원 안테나(그림 3. (a)), 격자 구조를 갖는 비등간격 2차원 안테나(그림 3.

(b)), non-linear 구조를 갖는 비등간격 2차원 안테나(그림 3. (c))의 배치를 보여준다. 그림 4는 그림 3 배치에 따른 3차원 빔 패턴을 보여주고, 비등간격 2차원 안테나가 등간격 2차원 안테나보다 좋은 빔형성 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 5는 각각 ϕ 가 0도인 축(u-space)과 90도인 축(v-space)에서의 2차원 빔 패턴을 보여준다. ϕ 가 0도인 축에서는 비등간격 2차원 안테나가 모두 BW와 SLL를 만족하지만, ϕ 가 90도인 축에서는 격자 구조를 갖는 비등간격 2차원 안테나의 BW가 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과로부터 non-linear 구조를 가지는 비등간격 2차원 안테나가 더 높은 자유도를 가져 더 뛰어난 빔형성 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

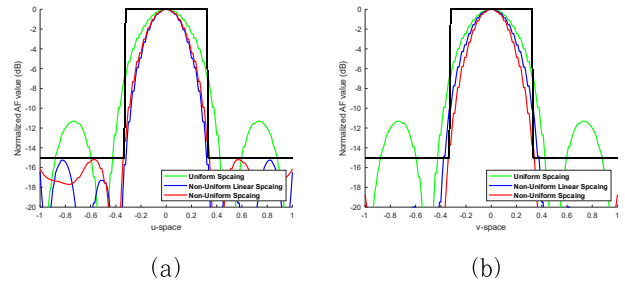


그림 5. 2차원 안테나의 2차원 빔 패턴

IV. 결론

본 논문에서는 강화학습을 기반으로 비등간격 2차원 안테나를 최적화하는 연구를 진행하였다. 3차원 빔형성을 위한 새로운 비용 함수를 제시하고, MORELA를 사용하여 비용 함수를 최소화하는 2차원 안테나의 위치와 가중치를 찾았다. 시뮬레이션을 통하여 등간격 2차원 안테나보다 비등간격 2차원 안테나의 성능이 뛰어난 것을 보이고, 격자 구조의 비등간격 2차원 안테나보다 non-linear 구조의 형태를 가지는 비등간격 2차원 안테나가 더 뛰어난 빔형성 성능을 가짐을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참고 문헌

- [1] Kumar, B. P., and Branner, G. R., "Generalized Analytical Technique for the Synthesis of Unequally Spaced Arrays With Linear, Planar, Cylindrical or Spherical Geometry," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 2, pp. 621-634, Feb. 2005.
- [2] Kang, S. Y., et. al., "Design Method for a Wideband Non-Uniformly Spaced Linear Array Using the Modified Reinforcement Learning Algorithm," Sensors, vol. 22, no. 14, 5456, 2022.
- [3] Kang, S. Y., et. al., "Design Approach of a Wideband Non-Uniformly Spaced Linear Array based on Reinforcement Learning to Suppress Multiple Interference Signals," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 33, no. 10, pp. 811-823, 2022.
- [4] Ozan, C., Baskan, O., and Haldenbilen, S., "A Novel Approach Based on Reinforcement Learning for Finding Global Optimum," Open Journal of Optimization, vol. 6, no. 2, pp. 65-84, June 2017.