

능동위상배열안테나 시스템의 초기 빔 형성에 관한 연구

Initial Beam Forming for Active Phased Array Antenna Systems

정진우* · 주태환

Jinwoo Jung* · Taehwan Joo

요약

능동위상배열안테나는 배열되어있는 각 방사소자에 급전되는 신호의 크기와 위상을 제어하여 빔을 조향 및 형성하는 안테나 시스템이다. 이와 같은 안테나 시스템을 이용하여 대국과의 무선 통신을 수행하기 위해서는 대국을 향한 정밀한 초기 빔 형성이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 대국의 위치를 정확하게 확인할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 2차원 광역 빔 형성, 공간 순차 탐색 그리고 휴리스틱 알고리즘을 이용한 정밀 탐색 절차를 기반으로 대국의 위치를 확인하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 20×20개의 방사소자가 배열된 능동위상배열안테나 시스템을 기반으로 모의실험을 통해 검증하였다. 100회의 모의실험을 통해 제안된 초기 빔 형성 기법에 의해 예측된 대국 위치와 실 대국 위치와의 평균 오차는 약 0.295 deg.가 됨을 확인하였다.

Abstract

An active phased array antenna is a system that steers and forms a beam by controlling the amplitude and phase of the excited signal to each radiating element. To perform wireless communication using such an antenna system, precise initial beam forming based on the position of a partner station must be preceded. This paper proposed a method for the position of partner stations based on two-dimensional wide beam formation, spatial sequential search, and precision search using heuristic algorithms. The proposed method was verified by simulation based on an active phased-array antenna system in which 20×20 radiating elements are arranged. One hundred simulations were conducted, which helped verify that the error between the estimated position by the proposed method and the actual partner station position is approximately 0.295°.

Key words: Active Phased Array Antenna, Beam Forming, Direction of Arrival, Heuristic Algorithm

I. 서론

능동위상배열안테나는 배열된 각 방사소자에 급전되는 신호의 크기 및 위상 가중치 제어를 통해 빔을 조향

및 형성할 수 있다^{[1]~[3]}.

능동위상배열안테나 시스템은 다수의 방사소자 배열을 통해 고이득 방사특성을 유도할 수 있다. 그리고 급전 신호 가중치의 전기적 제어를 통해 빠른 빔 조향을 수행

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 ‘통신용 다중빔 형성 및 추적기술연구’과제의 일환으로 연구되었음(UD190008ED).」

*동신대학교 에너지IoT전공(Department of Energy IoT, Dongshin University)

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 31, 2020 ; Revised August 18, 2020 ; Accepted August 24, 2020. (ID No. 20200731-006S)

· Corresponding Author: Jinwoo Jung (e-mail: jungjw@dsu.ac.kr)

할 수 있으며, 특정 각도에 대한 패턴 널링(pattern nulling)을 통해 재밍(jamming) 및 간섭원에 대한 적응형 빔 형성을 수행할 수 있다. 더불어 low-profile 형상으로 구현이 가능해 형상 적응형(conformal) 안테나 시스템 구현 또한 가능하다^{[4],[5]}.

상기와 같은 다양한 장점을 가지고 있는 능동위상배열 안테나 시스템을 활용하여 무선 통신망을 구축함과 동시에 다양한 빔 형성을 통해 통신 품질을 향상시키기 위해서는 대국을 향한 정밀한 빔 형성 절차(초기 빔 형성)가 선행되어야 한다.

일반적으로 무선 통신에 있어, 대국의 정확한 위치는 인지할 수 없다. 이와 같은 상황에서 능동위상배열안테나 시스템을 기반으로 초기 빔을 형성하기 위해서는 대국에서 송출하는 신호의 강도를 기반으로 급전 신호에 가중되는 최적의 크기 및 위상이 탐색되어야 한다.

휴리스틱 알고리즘(heuristic algorithm)은 시스템이 모델링되어 있어 다 변수 입력에 대한 결과를 산출할 수 있을 때, 산출 결과를 비용 평가값으로 두고 최적의 다 변수 입력을 탐색할 때 주로 사용되는 알고리즘이다. 능동위상배열안테나 시스템은 급전신호 가중값과 방사소자의 배열 수 및 위치를 기반으로 방사패턴을 모델링할 수 있고, 방사 패턴을 기반으로 특정각도에 따른 수신강도를 산출할 수 있다. 따라서 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 급전신호의 크기 및 위상을 최적화하는 방법이 많이 연구되어 왔다^{[6]~[8]}.

그러나 휴리스틱 알고리즘은 최적화해야 하는 입력 변수의 수가 많을수록 알고리즘 수행 속도가 느려지는 현상이 나타날 뿐만 아니라, 지역 수렴(local optima) 현상 발생 확률이 증가하게 되는 문제가 발생한다. 능동위상배열 안테나 시스템에 있어 고이득 방사특성이 요구되는 경우, 요구 이득의 증가에 따라 방사 소자 수가 증가되어야 한다. 따라서 초기 빔 형성을 위해 최적화를 수행해야 하는 다변수가 증가하게 되고, 이는 휴리스틱 알고리즘을 이용한 초기 빔 형성 속도가 느려질 뿐만 아니라, 초기 빔 형성 확률이 낮아지게 된다. 따라서 능동위상배열안테나를 이용하여 무선 통신망을 구축하기 위해서는 초기 빔 형성 속도 및 확률관점에서 개선된 방법이 필요하다.

본 논문에서는 상기와 같은 문제를 해결하기 위해, 개

선된 초기 빔 형성 방법에 관하여 연구하였다. 제안된 초기 빔 형성 방법은 광역 빔 형성절차, 공간분할 순차탐색 절차, 그리고 분할 공간 영역 내 위치 기반 휴리스틱 알고리즘을 이용한 정밀 탐색(빔 조향) 절차로 구성된다.

II. 능동위상배열안테나 시스템 구성

본 장에서는 제안된 초기 빔 형성 방법을 분석하기 위한 능동위상배열안테나 시스템의 구성에 관하여 기술하였다.

제시된 안테나는 x - y 평면에 x 및 y 축 기준 각각 20개의 방사소자가 등간격으로 배열된 안테나이다. 여기서 각 축 기준 방사소자간 간격은 0.55λ 로 설정하였다. 이는 각 축 기준 배열된 방사소자수와 최대 빔 조향 각도를 기준으로 가시영역(visible region)^[9] 내에 단일 그레이팅 로브(grating lobe) 영역만을 포함시키기 위한 식 (1)의 조건을 적용하여 산출한 결과이다.

$$d \leq \frac{(N-1)\lambda}{N(1+\sin\theta_m)} \tag{1}$$

여기서 N 과 θ_m 은 각 축 기준 방사소자 배열 수와 최대 빔 조향 각도이다. 본 논문에서 제시된 안테나의 경우, θ_m 은 45 deg로 설정하였다. 각 축 기준 방사소자 간 간격에 따른 각 방사소자의 위치는 식 (2)에 의해 산출된다.

$$x_p[n,m] = 0.5(2(n) - (N_x - 1))d_x \tag{2-1}$$

$$y_p[n,m] = 0.5(2(m) - (M_y - 1))d_y \tag{2-2}$$

여기서 x_p 및 y_p 는 각 방사소자의 x 및 y 축 기준 방사소자 좌표, $[n,m]$ 은 각 방사소자의 행 및 열에 관한 인덱스(index), N_x 와 M_y 는 각 축 기준 방사소자 배열 수 그리고 d_x 와 d_y 는 식 (1)에 의해 산출된 각 축 기준 방사소자 간 간격이다.

그림 1은 상기 조건을 기반으로 구성된 능동위상배열 안테나 시스템의 구성도를 보여준다.

그림 2는 제시된 능동위상배열안테나에 있어, 급전 신호에 가중된 크기 및 위상이 균등할 때의 array factor (AF) 기반 방사특성을 보여준다. 그림 2(a)에 있어, 실선은 3 dB 빔폭 경계를 보여준다. x 및 y cut 기준 반치각

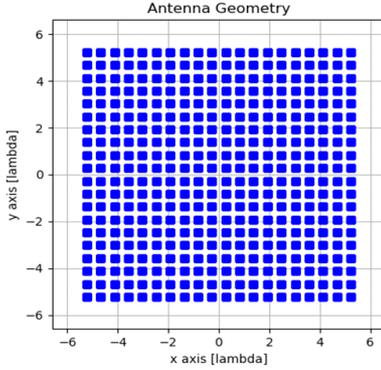


그림 1. 능동위상배열안테나 시스템 구성도
Fig. 1. Geometry of active phased array antenna system.

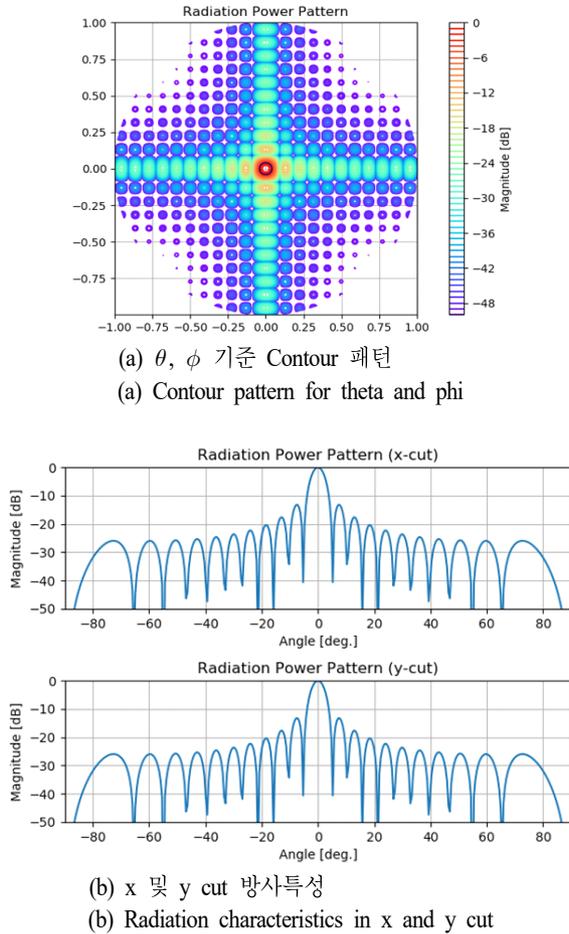


그림 2. 균일 급전된 능동위상배열안테나의 방사특성
Fig. 2. Radiation characteristics for presented antenna system with uniform exciting.

(HPBW: half power beam width)은 각각 약 4.5 deg.이고, 지향특성(directivity)는 약 29 dBi이다.

Ⅲ. 초기 빔 형성 방법

3-1 광역 빔 형성

2장에서 제시된 능동위상배열안테나에 있어, 방사소자를 점전하원으로 대체하여 방사특성을 분석하는 AF는 방사소자 위치 기준 이산 신호로 대체할 수 있다. 이를 이산 푸리에 변환에 기초하여 빔폭 내 이득이 균일한 광역 빔을 형성하기 위한 급전신호의 가중치를 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$w[n,m] = \text{sinc}\left(\Omega_x \frac{2\pi x_p[n,m]}{d_x(N_x-1)}\right) \text{sinc}\left(\Omega_y \frac{2\pi y_p[n,m]}{d_y(M_y-1)}\right) \quad (3)$$

여기서 ω 는 급전 신호의 가중치이고, k 는 전파 상수이다. Ω_x 와 Ω_y 는 이산 푸리에 변환에 기반 주파수 영역에서 사각펄스 형상이 형성되기 위한 주파수 영역 범위에 대응되는 값으로 방사소자의 위치와 요구 빔폭을 기반으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\Omega_x = kd_x[n,m]\sin(0.5(b_x + \pi/90)) \quad (4-1)$$

$$\Omega_y = kd_y[n,m]\sin(0.5(b_y + \pi/90)) \quad (4-2)$$

여기서 b_x 와 b_y 는 x 및 y cut 기준 요구 빔폭이다.

식 (3)을 기반으로 하여, 급전 신호에 가중하기 위한 크기 및 위상은 식 (5)와 같다.

$$w_{Amp} = |\omega/\omega_{max}| \quad (5-1)$$

$$w_{Phase} = \angle \omega \quad (5-2)$$

식 (5-1)에 있어, ω_{max} 는 가중치 값의 최댓값으로 안테나 급전 신호의 크기 가중치를 정규화하기 위한 값이다.

상기 가중치가 반영된 그림 1의 능동위상배열안테나 시스템의 AF는 식 (6)과 같다.

$$AF = \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{M_y} w_{Amp}[n,m] \exp(\psi_x + \psi_y + \alpha) \quad (6)$$

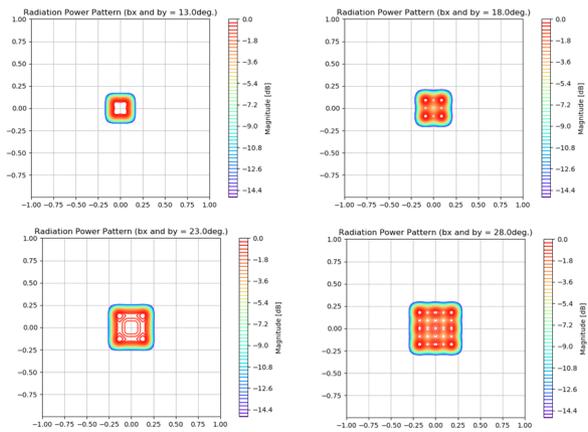
$$\Psi_x = jkd_x[n,m]\sin\theta\cos\phi \quad (6-1)$$

$$\Psi_y = jkd_y[n,m]\sin\theta\sin\phi \quad (6-2)$$

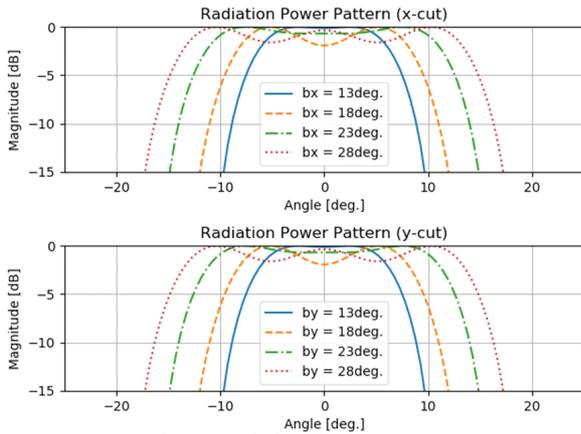
$$\alpha = jw_{Phase}[n,m] \quad (6-3)$$

그림 3은 2장에서 제시된 능동위상배열안테나를 기반으로 식 (4)의 b_x 와 b_y 가 13, 18, 23, 그리고 28 deg.인 경우에 대하여 식 (6)에 의해 산출된 방사특성을 보여준다.

분석 결과, 각 요구 빔폭(b_x, b_y)에 대한 x 및 y cut 기준 반치각은 각각 13.5, 17.5, 23.6, 그리고 27.6 deg.이다.



(a) θ, ϕ 기준 Contour 패턴
(a) Contour pattern for theta and phi



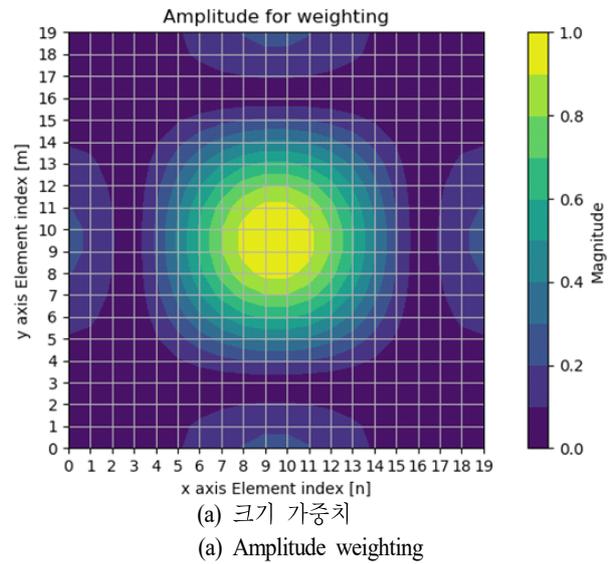
(b) x 및 y cut 방사특성
(b) Radiation characteristics in x and y cut

그림 3. 요구 빔폭에 따른 방사특성
Fig. 3. Radiation characteristics according to desired beam width.

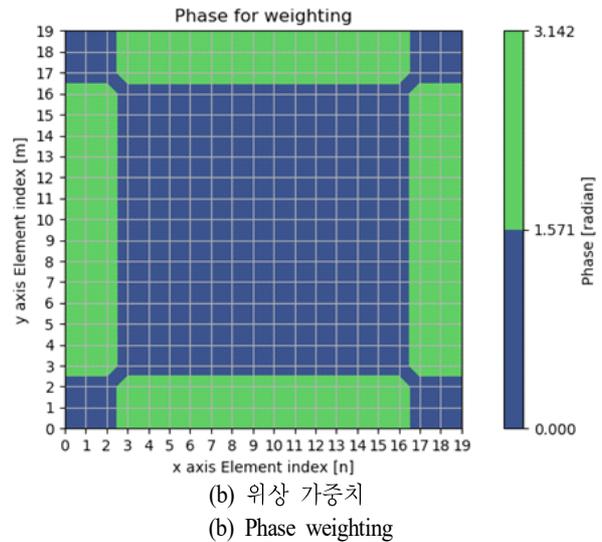
상기 결과를 요구 빔폭과 비교하면 약 0.5 deg.의 차이가 발생한다. 이는 푸리에 변환 관점에서 한정된 방사소자수에 따라 고조파 성분이 합성되지 않았기 때문이다. 더불어 본 논문에서 제시된 식 (3) 및 (4)와 능동위상배열안테나 구조에 맞게 유도되었기 때문이다.

그림 4은 식 (4)의 b_x 와 b_y 가 13 deg.인 경우의 ω_{Amp} 과 ω_{Phase} 의 분포를 보여준다.

그림 5는 그림 4의 가중치가 반영된 경우에 대하여 식

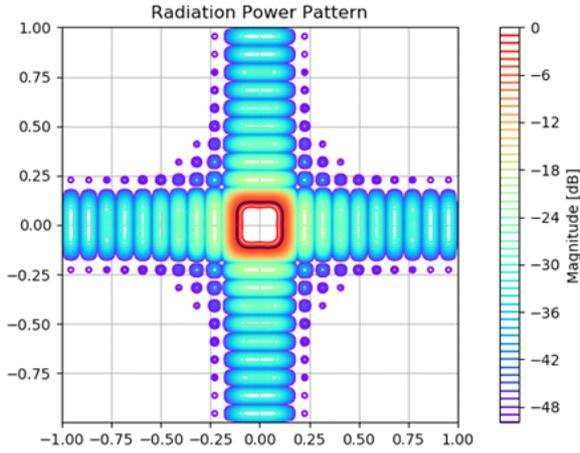


(a) 크기 가중치
(a) Amplitude weighting

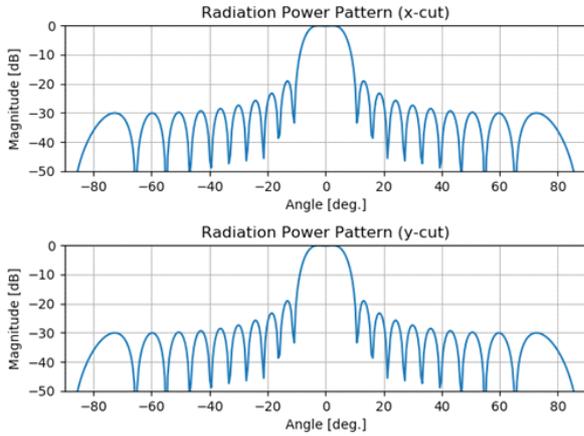


(b) 위상 가중치
(b) Phase weighting

그림 4. 광역 빔 형성을 위한 가중치 분포
Fig. 4. Weighting distribution for wide beam forming.



(a) θ, ϕ 기준 Contour 패턴
(a) Contour pattern for theta and phi



(b) x 및 y cut 방사특성
(b) Radiation characteristics in x and y cut

그림 5. 광역 빔 형성에 따른 안테나 시스템 방사특성
Fig. 5. Radiation characteristics of antenna system for wide beam forming.

(6)에 따른 방사특성 결과를 보여준다.

광역 빔 형성에 따른 지향특성은 균일 급전된 동일 구조의 능동위상배열안테나 대비 약 18 dBi가 감소한다. 따라서 지향특성은 약 10 dBi가 된다. 빔폭의 증가 대비 이득 감소가 상대적으로 크게 산출되는 이유는 광역 빔 형성을 위한 가중 신호의 크기가 다수의 방사소자에 대하여 감소하였기 때문이다.

이와 같은 결과에 의해 광역 빔의 경우 대국의 신호를 감지할 수 없는 경우가 발생할 수 있다고 생각할 수 있다.

그러나 일반적으로 초기 빔 형성과정에서는 대국에서 비콘(Beacon) 신호를 송출하기 때문에 정상적인 통신 신호 대비 SNR(signal to noise)이 확보되어 낮은 지향특성에 대해서도 대국의 신호를 감지할 수 있기 때문이다.

3-2 공간분할 순차탐색

능동위상배열안테나 시스템에 대한 대국의 위치는 방위각 기준 $\pm 45 \text{ deg.}$, 앙각 기준 $\pm 25 \text{ deg.}$ 범위 이내에 존재한다고 가정하였다(위성국을 제외하면 일반적으로 앙각 탐색 범위는 제한적이다).

순차 탐색을 위한 광역 빔은 그림 3의 분석 결과 중, b_x 와 b_y 가 13 deg.인 경우로 선정하였다. 이는 광역 빔 형성에 따른 안테나의 지향특성이 20 dBi 이상 감소될 경우, 비콘 신호의 수신도 어려울 수 있다는 현실을 반영한 결과이다.

광역 빔이 x 및 y cut 기준 반치각이 13 deg.인 점을 고려하여 상기 탐색 영역을 x 및 y 축 기준으로 11.25 deg. 단위로 공간 분할하면, x 축 기준으로는 8개의 공간이 분할되고, y 축 기준으로는 4개의 공간이 분할된다. 이에 따라 광역 빔을 이용한 순차 탐색 영역은 총 32개의 공간으로 분할된다.

능동위상배열안테나 시스템을 이용하여 공간분할 순차탐색을 수행하기 위해서는 광역 빔을 형성하는 가중치와 함께 빔 조향이 수행되어야 한다. 이를 반영한 능동위상배열안테나의 AF는 식 (7)과 같다.

$$AF = \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{M_y} w_{Amp}[n,m] \exp(\Psi_x + \Psi_y + \alpha + \beta) \quad (7)$$

여기서 Ψ_x, Ψ_y 그리고 α 는 식 (6)과 같다. β 는 빔 조향을 위한 위상천이 가중치로 식 (8)과 같다.

$$\beta = -jk \sin \Theta_d (x_p[n,m] \cos \Phi_d + y_p[n,m] \sin \Phi_d) \quad (8)$$

$$\Phi_d = \arctan(\sin \theta_x / \sin \theta_y) \quad (8-1)$$

$$\Theta_d = \arcsin(\sin \theta_x / \cos \Phi_d) \quad (8-2)$$

여기서 θ_x 와 θ_y 는 구좌표계 기준 θ 가 아닌 x 및 y 축 기준 빔 조향 각도이다. Θ_d 와 Φ_d 는 θ_x 와 θ_y 에 따른 구 좌표

표 1. 순차 탐색 중심 각도

Table 1. Center angle for spatial sequential search.

(unit: degree)

Index	1	2	3	4	5	6	7	8
θ_x	-39.375	-28.125	-16.875	-5.625	5.625	16.875	28.125	39.375
θ_y	16.875							
Θ_d	-44.239	-33.615	-24.238	-17.842	17.842	24.238	33.615	44.239
Φ_d	-24.588	-31.625	-45	-71.342	71.342	45	31.625	24.588
Index	9	10	11	12	13	14	15	16
θ_x	39.375	28.125	16.875	5.625	-5.625	-16.875	-28.125	-39.375
θ_y	5.625							
Θ_d	39.935	28.782	17.842	7.968	-7.968	-17.842	-28.782	-39.935
Φ_d	8.783	11.746	18.658	45	-45	-18.658	-11.746	-8.783
Index	17	18	19	20	21	22	23	24
θ_x	-39.375	-28.125	-16.875	-5.625	5.625	16.875	28.125	39.375
θ_y	-5.625							
Θ_d	-39.935	-28.782	-17.842	-7.968	7.968	17.842	28.782	39.935
Φ_d	8.783	11.746	18.658	45	-45	-18.658	-11.746	-8.783
Index	25	26	27	28	29	30	31	32
θ_x	39.375	28.125	16.875	5.625	-5.625	-16.875	-28.125	-39.375
θ_y	-16.875							
Θ_d	44.239	33.615	24.238	17.842	-17.842	-24.238	-33.615	-44.239
Φ_d	-24.588	-31.625	-45	-71.342	71.342	45	31.625	24.588

계 기준 각도(θ, ϕ)이다. 이는 일반적으로 방사특성은 구좌표계 기준으로 도시되기 때문이다.

표 1은 상기 공간 분할에 따른 빔 조향 중심 좌표를 $\theta_x, \theta_y, \Theta_d$ 그리고 Φ_d 를 기준으로 정리한 결과이다. 그림 6은 광역 빔이 형성된 상태에서 상기 설정에 따른 각 공간 분할 영역의 중심을 기준으로 빔 조향되었을 때, 3 dB 빔폭 경계를 보여준다. 경계 안의 숫자는 표 1의 인덱스이다. 그림 6에 있어 빔 조향 각도가 클수록 3 dB 경계가 넓어지는데, 이는 빔 조향 시 나타나는 일반적인 현상이다.

그림 7은 공간 분할 영역에 있어 순차 탐색 인덱스 기준 1, 9, 14, 21, 26에 대한 방사특성을 보여준다.

공간분할 순차탐색은 각 공간분할 영역의 중심 각도에 광역 빔을 조향하면서 수신 신호 강도가 최대인 지점을 탐색하는 절차이다.

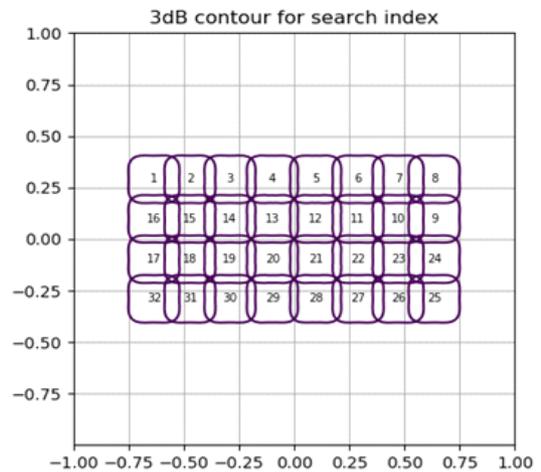
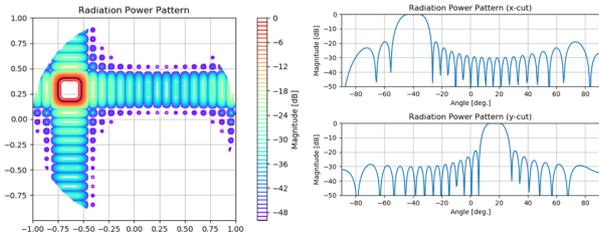
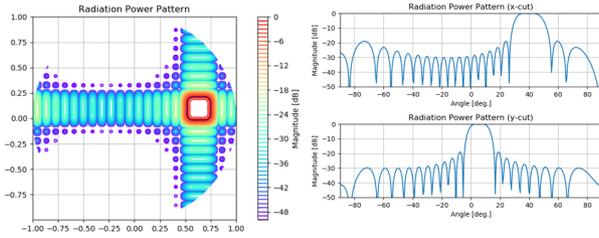


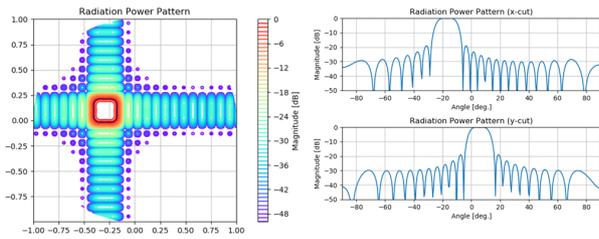
그림 6. 공간 분할 순차 탐색 영역 및 인덱스
Fig. 6. Spatial sequential search area and index.



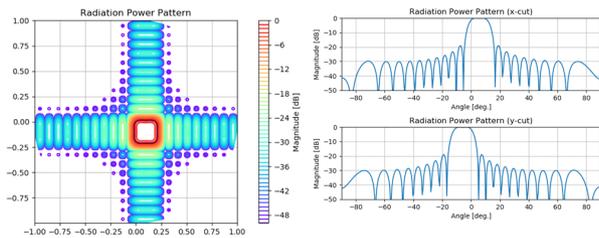
(a) Index: 1



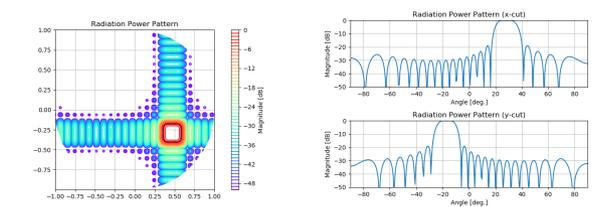
(b) Index: 9



(c) Index: 14



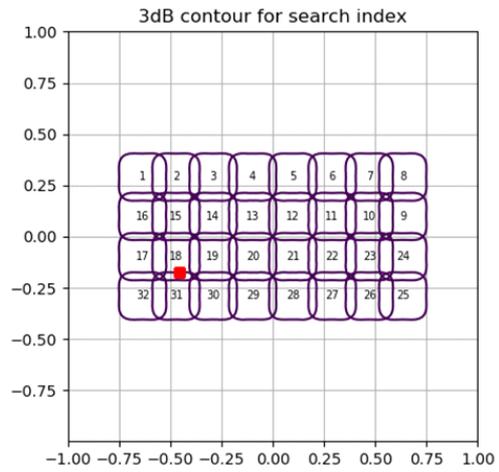
(d) Index: 21



(e) Index: 26

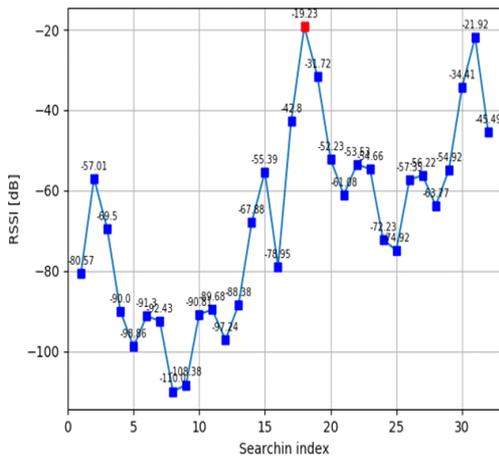
그림 7. 순차 탐색에 따른 방사특성

Fig. 7. Radiation characteristics according to sequential search.



(a) 목표 각도 ($\theta_x = -27^\circ, \theta_y = -10^\circ$)

(a) Target angle ($\theta_x = -27^\circ, \theta_y = -10^\circ$)



(b) 순차 탐색에 의한 수신강도

(b) RSSI for sequential search

그림 8. 공간분할 순차탐색 결과

Fig. 8. Spatial sequential search results.

그림 8은 무작위 난수 발생 함수에 의해 생성된 임의의 대국 위치에 따른 순차 탐색 결과를 보여준다. 그림 8(a)의 사각형 표시는 대국의 위치로 θ_x 는 -27 deg 이고, θ_y 는 -10 deg 이다. 그림 8(b)는 순차탐색에 따라 수신된 신호 강도를 도시한다.

그림 8의 결과에 있어, 수신신호 강도는 균등 급전된 안테나의 지향특성을 기준으로 광역 빔 형성과 빔 조향에 따라 발생하는 지향특성 감소가 반영된 수치이다. 최

대 수신 신호 강도는 8번 영역에서 발생하였으며, 이때 수신 레벨은 -19.23 dB이다.

3-3 정밀 탐색

공간분할 순차탐색이 종료되어 대국의 대략적인 위치를 확인한 후에는 정밀한 빔 형성이 수행되어야 한다. 본 논문에서는 대국에서 송출하는 신호에 대한 수신 강도를 비용 평가값으로 한 휴리스틱 알고리즘을 사용하였다.

일반적으로 대국의 위치를 인지하지 못한 상태에서 수신 신호 강도를 기반으로 휴리스틱 알고리즘에 의한 초기 빔 형성 방법에 있어, 최적화 요소는 각 방사소자에 급전되는 신호의 위상 천이 값으로 설정되어 왔다^{[6],[7]}.

상기와 같은 방법을 기반으로 본 논문에서 제시된 능동위상배열안테나의 정밀 빔 형성을 위해서는 200개의 위상천이 값에 대한 휴리스틱 알고리즘을 수행해야 한다. 일반적으로 휴리스틱 알고리즘은 최적화해야 할 대상(변수)의 수가 많을수록 성능이 저하된다.

본 논문에서는 상기와 같은 문제를 해소하기 위해, 수신 신호 강도가 최대가 되는 θ_x 와 θ_y 를 탐지하는 것으로 변경하였다. 이와 같이 최적화해야 할 변수가 변경 가능한 이유는 제시된 능동위상배열안테나가 등간격 배열로 설정되어 있어, 요구 빔 조향 각도에 따른 각 방사소자의 위상천이 가중값이 식 (8)과 같이 쉽게 산출되기 때문이다. 더불어, 휴리스틱 알고리즘에 의해 최적화해야 하는 변수의 변화 범위는 식 (9)와 같이 설정하였다.

$$\theta_x^S - 7.5^\circ \leq \theta_x \leq \theta_x^S + 7.5^\circ \quad (9-1)$$

$$\theta_y^S - 7.5^\circ \leq \theta_y \leq \theta_y^S + 7.5^\circ \quad (9-2)$$

여기서 θ_x^S 와 θ_y^S 는 공간분할 순차탐색에 의해 탐색된 영역의 중심 각도이다. 식 (9)의 탐색 범위는 공간분할 순차탐색에 사용되는 광역 빔의 반치각이 약 13 deg.인 점을 반영하여, 조금 더 넓은 영역을 탐색하기 위해 15 deg.로 설정하였다.

다변수 최적화를 위한 대표적인 휴리스틱 알고리즘으로 유전 알고리즘(GA: genetic algorithm), 입자 군집 최적화(PSO: particle swarm optimization) 알고리즘 그리고 포복경 영양 번식(VPR: vegetative propagation by runner) 알

고리즘 등이 있다^{[10]-[12]}. 이중 VPR 알고리즘은 영양 기관에 의해 번식하는 식물 생태를 모방한 알고리즘으로, 식물의 노화 현상과 포복경에 의한 지속적인 주변탐색 절차가 포함되어, 타 휴리스틱 알고리즘과 비교하여 지역 수렴현상이 개선된 알고리즘이다. 따라서 본 논문에서는 대국의 정밀탐색을 위해 VPR 알고리즘을 사용하였다.

VPR 알고리즘은 식 (10)과 같이 각 식물에 의해 형성되는 주근 및 부근을 통해 획득한 토양 양질 평가값(P_b , S_b)를 기반으로 식물이 번식해 나가면서 최고 토양 위치를 탐색한다.

$$Run^i = c_r r (S_b^i - X^i) + c_p r (P_b - X^i) \quad (10)$$

여기서 i 는 i 번째 식물, Run 은 포복경 위치, c_p 와 c_r 는 주근 및 부근에 의한 포복경 생성 계수, r 은 난수 발생함수 그리고 X^i 는 i 번째 식물의 현재 위치이다.

주근은 식물의 위치(X)에 형성되며, 부근은 주근 인근에 형성된다. 따라서 부근의 위치는 정규 분포 난수 발생함수(r_n)를 사용하여 식 (11)과 같이 표현된다.

$$R^i(m) = X^i + c_s r_n \quad (11)$$

여기서 $R^i(m)$ 은 i 번째 식물의 m 번째 부근을 뜻하고, c_s 는 부근 위치 발생 계수이다.

식 (10)을 기반으로 생성된 포복경에 의한 다음 세대 식물의 위치는 식 (12)와 같이 산출된다.

$$X^i[t+1] = X^i + Run^i \quad (12)$$

여기서 t 는 세대(알고리즘 수행 횟수)를 뜻한다.

VPR 알고리즘은 식물의 노화를 모사하여 지역 수렴 현상을 개선하였다. 식물의 노화는 식 (13)과 같이 세대(t)에 비례하여 증가하는 a_g 변수를 이용하여 모사된다.

$$P_b^{cost} = P_b^{max} \exp(-c_t a_g) \quad (13)$$

여기서 c_t 는 식물 노화 계수, P_b^{max} 는 식물군에 의해 탐지된 최고 비용 평가 값이다. a_g 는 식물 번식에 의해 탐지된 최고 비용 평가 값(P_b)이 갱신되면 '0'으로 초기화 된다.

각 식물의 위치(X)는 본 논문에서 탐지하고자 하는 θ_x 과 θ_y 로 정의된다. P_b 와 S_b 는 비용 평가에 의한 결과 값이다. 본 논문에서는 식물 위치의 번식 이동에 따른 주어진

θ_x 와 θ_y 에 따른 안테나의 $AF(\theta_x, \theta_y)$ 로 산출하였으며 식 (8)을 이용하였다. 알고리즘의 종료 조건은 AF 의 linear scale 값이 0.97 이상인 경우로 설정하였다.

본 논문의 정밀 탐색을 위한 VPR 알고리즘의 설정 값은 표 2와 같다.

그림 9는 그림 8의 결과에 의해 탐색된 영역 내에서 VPR 알고리즘을 통해 정밀 탐색한 결과를 보여준다. 그림 9(a)는 5개의 식물들이 탐색 영역 내에서 알고리즘 수행 횟수에 따라 이동 번식함에 따라 탐색된 최고 비용 평가 위치(P_b)를 보여준다. 각 식물은 서로 다른 마커(marker)로 구분되어 있다. 알고리즘 종료 조건은 13차 세대에서 만족하였다. 그림 9(b)와 그림 9(c)는 알고리즘 종료에 따라 탐색된 대국 위치를 기준으로 빔이 형성되었을 때의 결과를 보여준다. 알고리즘 종료에 따른 최종 탐색 위치로 θ_x 는 -26.67 deg.이고, θ_y 는 -9.73 deg.이다. 이에 따라 실제 대국 위치와의 오차는 약 0.42 deg.이다.

분석 결과를 기반으로 위상 천이 값이 아닌 각도를 기반으로한 VPR 알고리즘을 이용하여 원활한 정밀 탐색이 가능함을 확인할 수 있다.

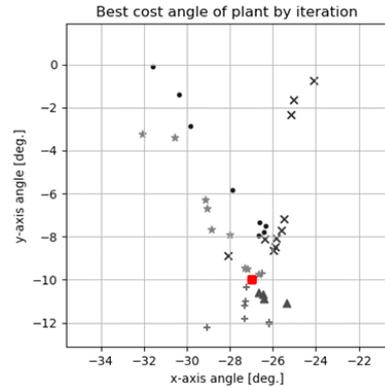
IV. 모의실험

본 장에서는 본 논문에서 제안한 초기 빔 형성 방법을 검증하기 위해, 3-2절에서 설정된 대국의 위치 경계 영역 내에 난수 발생 함수를 기반으로 100개의 대국 위치를 선정하고, 광역 빔 기반 공간분할 순차탐색 절차와 휴리스틱 알고리즘에 의한 정밀 탐색 절차를 기반으로 초기 빔 형성에 관한 모의실험을 수행한 결과에 대하여 기술하였다.

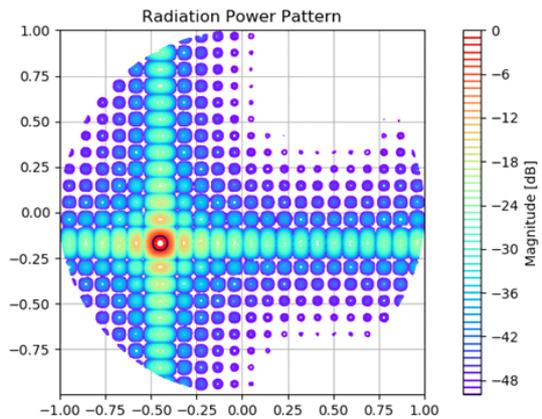
표 2. VPR 알고리즘 설정 값

Table 2. Parameters for VPR algorithm.

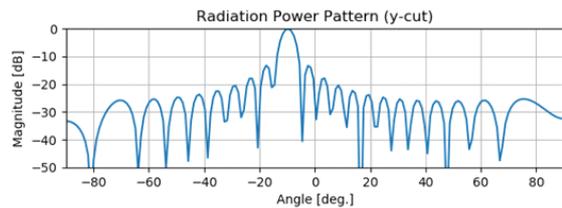
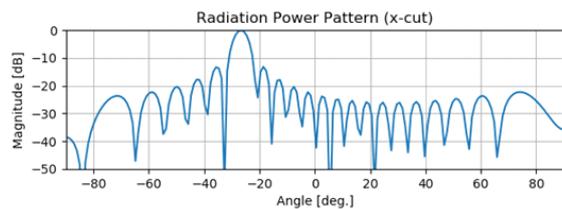
Plant number	5
Rhizome number	4
c_p	0.15
c_r	0.3
c_s	5
c_t	0.0001
Stop criterion	0.99



(a) 식물별 최대 비용 평가 위치
(a) Best cost angle according to plant

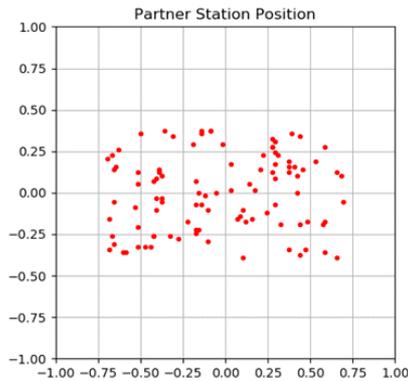


(b) 최종 θ, ϕ 기준 Contour 패턴
(b) Final Contour pattern for theta and phi

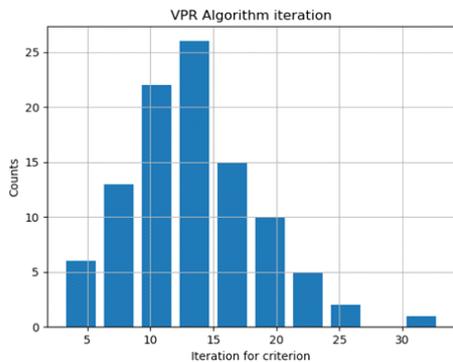


(c) 최종 x 및 y cut 방사특성
(c) Final radiation characteristics in x and y cut

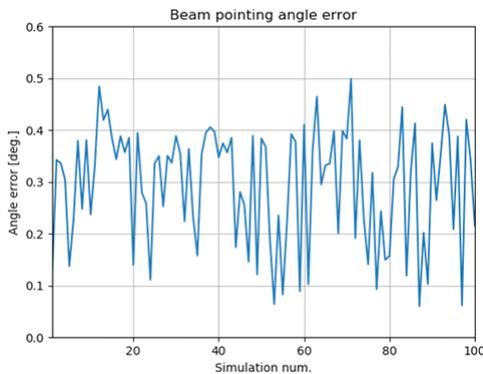
그림 9. VPR 알고리즘에 의한 최종 빔 형성 결과
Fig. 9. Final beam forming results by VPR algorithm.



(a) 대국 위치
(a) Partner station position



(b) VPR 알고리즘 종료 histogram
(b) Histogram for criterion of VPR algorithm



(c) 빔 조향 오차
(c) Final beam pointing angle error

그림 10. 초기 빔 형성 모의실험 결과
Fig. 10. Simulation results for initial beam forming.

그림 10(a)는 모의 실험에 사용된 100개의 대국 위치를 보여준다. 광역 빔을 이용한 공간분할 순차탐색 모의실험

결과, 100 % 확률로 대국의 대략적인 위치를 확인하였음을 확인하였다. 여기서 광역 빔의 반치각은 13 deg.로 설정되었다. 공간분할 순차탐색 이후, VPR 알고리즘을 이용한 정밀 탐색 또한 100 % 확률로 탐색되었음을 확인하였다.

그림 10(b)는 표 2에 기술된 것과 같은 VPR 알고리즘 종료 기준을 만족하는 알고리즘 수행 횟수의 histogram을 보여준다. 평균 12.97회에서 종료됨을 알 수 있다.

그림 10(c)는 본 논문에서 제안된 초기 빔 형성 방법을 기반으로 빔이 형성되었을 때, 대국의 실제 위치와 본 논문에서 제안된 방법에 의해 예측된 대국의 위치와의 오차를 보여준다. 평균 0.295 deg.의 오차가 발생하였음을 알 수 있다.

100회의 모의 실험 결과, 본 논문에서 제안한 초기 빔 형성 방법에 의해 원활한 초기 빔이 형성될 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

능동위상배열안테나 시스템을 이용한 무선 통신망에 있어, 대국과의 원활한 통신망 구축을 위해서는 대국을 정밀 지향하는 초기 빔 형성 절차가 선행되어야 한다. 본 논문에서 이와 같은 초기 빔 형성 방법에 관하여 연구하였다. 제안된 방법은 광역 빔 형성 절차, 공간분할 순차탐색 절차, 그리고 정밀 탐색 절차로 구성된다. 광역 빔 형성은 특정 빔 폭 내 이득이 균일하고, 낮은 부엽 레벨을 갖도록 유도하여 대국의 대략적인 위치 탐지에 용이하도록 하였다. 공간 분할 순차 탐은 탐색 영역을 광역 빔에 맞게 공간 분할하여 순차적인 빔 조향에 의해 대국의 대략적인 위치를 쉽고 빠르게 탐지하는 방법이다. 정밀 탐색은 탐색된 분할 공간 영역 내에서 각도를 기반으로 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 탐색하는 방법으로 VPR 알고리즘을 적용하여 지역 수렴 현상 없이 원활한 정밀 빔 조향이 가능하도록 하였다. 제안된 방법은 무작위로 선정된 100개의 대국위치에 대한 모의실험을 통해 검증되었으며, 100번의 모의실험 결과, 100 % 확률로 대국 위치에 대한 초기 빔이 형성됨을 확인하였다. 분석 결과, 평균 빔 조향 오차는 약 0.295 deg.임을 확인하였다.

References

[1] R. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Boston, MA, Artech House, 1994.

[2] T. Joo, K. Kim, and J. Seo, "Design of tile-type Rx phased array antenna for Ku-band satellite communications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 9, pp. 702-711, Sep. 2019.

[3] J. Joo, J. Lee, J. M. 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.

[4] J. W. Jung, S. K. Lee, "A study on pattern nulling for phased array antenna system," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 67-75, Jan. 2020.

[5] J. S. Park, I. Kim, H. Kim, S. R. Lee, Y. S. Eo, and J. G. Kim, "Wideband microstrip conformal patch array antenna with tilted beam," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 5, pp. 416-423, May 2016.

[6] J. W. Jung, "Improved genetic algorithm for pattern synthesis of phased array antenna," *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 2, pp. 299-304, Apr. 2018.

[7] J. W. Jung, "Improved particle swarm optimization algorithm for adaptive beam forming system," *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 587-592, Jun. 2018.

[8] J. Seo, D. Park, "Adaptive nulling algorithm to reduce the main-beam distortion in single-port phased array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 9, pp. 808-816, Sep. 2016.

[9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1998.

[10] D. S. Weile, E. Michielssen, "The control of adaptive antenna arrays with genetic algorithms using dominance and diploidy," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 10, pp. 1424-1433, Oct. 2001.

[11] S. K. Goudos, V. Moysiadou, T. Samaras, K. Siakavara, and J. N. Sahalos, "Application of a comprehensive learning particle swarm optimizer to unequally spaced linear array synthesis with sidelobe level suppression and null control," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 125-129, Mar. 2010.

[12] J. Jung, "Vegetative propagation by runners optimization algorithm," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 55, no. 9, pp. 25-31, Sep. 2018.

정진우 [동신대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6926-8476>



2005년: 전남대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2007년: 전남대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
 2011년: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 (공학박사)
 2012년~2017년: 국방과학연구소 선임연구원

구원

2018년~현재: 동신대학교 에너지IoT전공 교수

[주 관심분야] 안테나, 능동위상배열안테나

주태환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8750-9779>



2008년: 부산대학교 전기 및 전자공학부 (공학사)
 2010년: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 2014년: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
 2016년~현재: 국방과학연구소 선임연구원

원

[주 관심분야] RF Transceiver, 데이터링크 시스템