

능동 소자 패턴을 고려한 위상배열 안테나의 빔조향 효율 최적화

김창성¹, 박슬기¹, 박영미², 이철수^{2*}
¹한화시스템, ²국방과학연구소

Beam-Steering Efficiency Optimization Considering the Active Element Pattern for Phased Array Antenna

Changseong Kim¹, Seul-Gi Park¹, Young-Mi Park², Cheol-Soo Lee^{2*}
¹Hanwha Systems
²Agency for Defense Development

요약 본 논문에서는 위상배열 안테나의 능동 소자 패턴을 고려하여 빔조향 효율을 최적화하는 방법을 제안한다. 기존의 빔조향 알고리즘에서 지향 각도별 인가 위상은 각 배열 소자의 방사 패턴이 모두 동일하다는 조건에서 계산된다. 하지만 실제 배열 소자의 방사 패턴은 상호 커플링 및 모서리 효과로 인해 상이하고, 이로 인해 빔조향 효율이 감소한다. 그러므로 본 최적화 방법에서는 각 배열 소자의 능동 소자 패턴이 고려된 소자별 위상 가중치와 진폭 가중치를 계산하는 방법을 제시한다. 배열 소자의 능동 소자 패턴은 CST(Computer Simulation Technology) - MWS(MicroWave Studio)로 시뮬레이션 되었다. 최적화된 위상 가중치와 진폭 가중치 적용 전후의 안테나 이득 및 투과 전력을 비교하여 빔조향 효율이 개선됨을 입증하였다. 본 최적화 알고리즘을 적용하면, 수백 개 이상의 소자를 가진 위상배열 안테나의 빔 형성 기술에 있어서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

Abstract This paper proposes a novel method to optimize the beam-steering efficiency considering the active element pattern for phased array antennas. Phase excitations by the steering angle were calculated assuming that the radiation pattern of all elements is the same in a conventional beam-steering algorithm. On the other hand, the radiation pattern of elements was different because of mutual coupling and edge effects, so that the beam-steering efficiency decreases. Therefore, the method to calculate the phase and amplitude weighting considering the active element pattern is suggested. The active element pattern, including coupling and structural features, was simulated using CST-MWS. The improvement of beam-steering efficiency was confirmed by comparing the conventional algorithm with the proposed method. The suggested optimization algorithm is useful for beam-shaping technology in the case of phased array antennas, which have many elements.

Keywords : Active Element Pattern, Amplitude-Phase Weighting, Optimization Method, Phased Array Antenna, Radiation Efficiency

본 논문은 국방과학연구소의 재원을 지원받아 수행됨.

*Corresponding Author : Cheol-Soo Lee(Agency for Defense Development)

email: cslee@add.re.kr

Received July 5, 2022

Revised August 1, 2022

Accepted August 3, 2022

Published August 31, 2022

1. 서론

2010년대 이전의 전자전 시스템 및 전자전 운용기에서는 ALQ-99와 같은 기계식 주사 배열(MSG: Mechanically Scanned Array) 재머가 주로 사용되었다. 기계식 주사 방식은 빔조향 속도가 느리고, 신뢰도가 낮다는 한계점을 가지고 있다. 그러나 능동 전자식 주사 배열(AESA: Active Electronically Scanned Array) 기술은 기계식 조향에 비해 시간이 약 10^7 배 가량 빠르고, 빔조향에 의한 다수의 위협에 동시 대응이 가능하며, 신뢰도가 5배 이상 높아지는 장점이 있다[1,2]. 최근, 질화갈륨(GaN) 기반의 고풍력 증폭기가 포함된 능동위상배열 기술에 대한 수요가 커지고, 이를 적용한 AN/ALQ-249와 같은 재밍포드들이 개발되고 있다[3-5].

기존의 빔조향 알고리즘에서는 모든 소자의 패턴이 같다고 가정하고, 위상배열 안테나의 지향 각도별 인가 위상은 배열 소자의 좌표를 이용하여 계산된다[6]. 하지만 각 소자의 능동 소자 패턴(AEP: Active Element Pattern)은 소자 간 상호 커플링(Mutual coupling), 모서리 효과(Edge effect)로 인해 각각 다르게 나타난다. 그러므로 능동 소자 패턴을 고려하지 않을 경우, 빔조향 효율 및 빔조향 정확도가 감소한다. 참고문헌 [7-10]은 상호 커플링을 보상하는 연구를 수행하였고, 능동 소자 패턴에 적응형 위상을 추가하여 빔을 최적화한 수행되었지만, 1차원 배열구조 및 전자파 해석에 한정되었다 [7-9]. 또한, 기존의 빔조향 알고리즘에 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용한 연구가 수행되었지만, 알고리즘의 정확한 비용 함수(cost function)를 정의하기 어렵고, 연산량이 큰 단점을 가지고 있다[10]. 즉, 2차원 위상배열 안테나에서 소자별 능동 소자 패턴을 고려하여 입력신호의 가중치를 계산하고, 방사 효율을 높인 연구는 미비하다.

논문에서는 위상배열 안테나의 능동 소자 패턴을 고려하여 빔조향 효율을 최적화하는 방법을 제안하였다. 2장 본문의 1, 2절에서는 기존의 빔조향 알고리즘과 실제 배열 소자 간 상호 커플링과 모서리 효과의 영향을 기술하였으며, 3절에서는 단일편파, 이중편파에 따른 위상 가중치, 진폭 가중치 적용방법을 제시하였다. 3장 시뮬레이션 결과에서는 최적화된 위상 가중치와 진폭 가중치를 적용하여 안테나의 U-V 패턴을 비교하였으며 안테나의 빔조향 효율이 개선됨을 확인하였다. 4장에 결론을 기술하였다.

2. 본론

2.1 위상배열 안테나 조향 알고리즘

$M \times N$ 개의 소자를 가진 평면 직각 배열 안테나의 구조는 Fig. 1과 같다. Eq. (1)에서 배열 계수(Array Factor)는 x축 배열 요소(S_{xm})와 y축 배열 요소(S_{ym})의 곱으로 정의된다.

$$AF = S_{xm} S_{ym} \quad (1)$$

Where, S_{xm} denotes array factor of x-direction, S_{ym} denotes array factor of y-direction

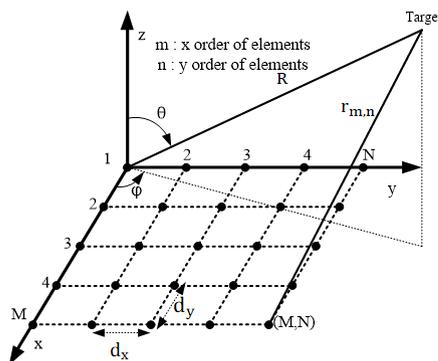


Fig. 1. The structure of planar M by N array antenna

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \quad (2)$$

$$S_{ym} = \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \sin\phi + \beta_y)} \quad (3)$$

Where, I_{m1} , I_{n1} denotes excitation coefficient, d_x , d_y denotes spacing between the elements along the x-axis and y-axis, respectively, β_x , β_y denotes progressive phase shift along the x-axis, y-axis, respectively.

$$\beta_x = -kd_x \cos\theta_0 \cos\phi_0 \quad (4)$$

$$\beta_y = -kd_y \cos\theta_0 \sin\phi_0 \quad (5)$$

Eq. (1)-(5)을 통해 지향각도(θ_0 , ϕ_0)에서 최대의 배열 계수를 갖고 있으며, 이 때 소자별 인가 위상은 Eq. (6)과 같다.

$$\psi_{m,n} = \beta_x(m-1) + \beta_y(n-1) \quad (6)$$

Where, $\psi_{m,n}$ denotes phase excitation.

2.2 배열 안테나의 상호 커플링

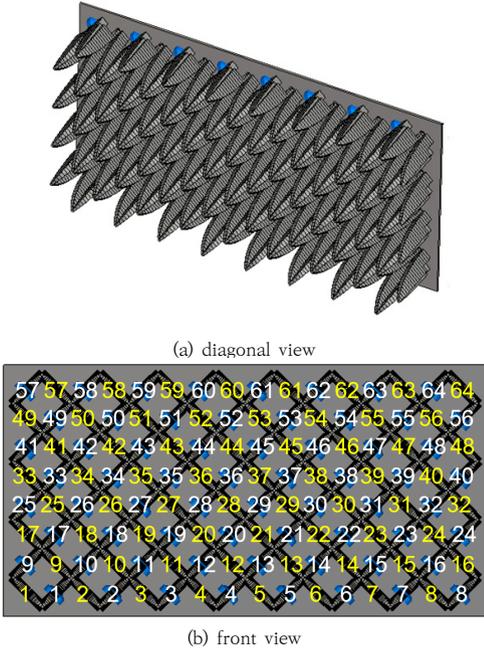


Fig. 2. The structure of array antenna used for simulation

Fig. 2에서는 128개의 방사 소자를 가진 이중편파 배열 안테나를 도시한다. 안테나는 각각 -45° , $+45^\circ$ 로 기울어진 비발디(Vivaldi) 소자 64개의 배열로 구성되어 있다. Fig. 2(b)에서는 정면에서 -45° 로 기울어진 소자 64개가 노란색으로, $+45^\circ$ 로 기울어진 소자 64개는 하얀색으로 소자 번호를 표시하였다.

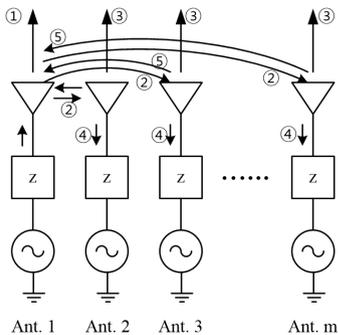
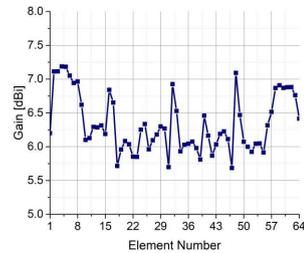
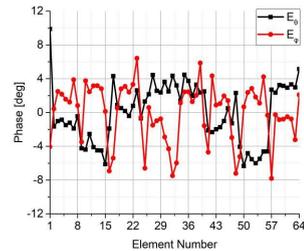


Fig. 3. Transmitting mode coupling paths between antennas 1 and m.

기존의 빔 조향 알고리즘에서 각 소자는 같은 방사 패턴을 갖는 것으로 간주하지만, 실제 배열 안테나에서는 각 소자의 위치에 따라 방사 패턴이 다르게 나타난다. 각 소자의 방사 패턴이 다르게 나타나는 것에는 외곽소자의 모서리 효과(Edge effect)와 소자 간 상호 커플링이 기인한다. Fig. 3에서는 다수의 소자 배열된 위상배열 안테나에서 급전된 신호에 의한 상호 커플링에 의한 영향을 나타내었다. Ant. 1에서 방사된 안테나 신호는 ①의 경로로 대기 중에 방사되고, ②의 경로로 이웃한 m번째 소자에 도달한다. 각 소자에서 도달된 신호는 ③의 경로로 대기 중에 방사되거나, ④의 경로로 각 소자의 급전부에 도달한다. 대기 중에 방사될 때 다시 1번 소자로 되돌아가는 신호는 ⑤의 경로로 전달된다. 이러한 상호 커플링의 효과는 소자의 형상, 소자의 위치, 급전 형태, 스캔 볼륨에 따라 달라지고, 소자 간 방사 전자기장을 상이하게 만든다. 또한, 외곽소자의 경우 모서리 효과가 크기 때문에 소자의 방사 전자기장을 단순 수식으로 예측하기 어렵다. 그러므로 각 AEP는 전파 해석 소프트웨어 CST-MWS로 시뮬레이션 되었다.



(a) Gain of array element 1~64 (-45° slant)



(b) Phase of array element 1~64 (-45° slant)

Fig. 4. Active element characteristic at 6 GHz in direction of boresight($Az/EI = 0^\circ/0^\circ$).

Fig. 2에 도시된 배열 안테나의 -45° 로 기울어진 소자별 6 GHz에서의 보어사이트 방향에서 방사 특성을 Fig. 4에 나타내었으며, Fig. 4 (a)에서는 모서리 효과로 인해 외곽에 위치한 소자들의 이득이 더 높은 것을 확인할 수

있다. Fig. 4 (b)에 보어사이트 방향에서의 각 소자의 방사 위상으로 소자의 방사 위상은 전체 방사 위상의 평균치로 정규화되었다. 보어사이트 방향으로 조향할 때에 소자 간 원거리장 위상차가 ± 10 도 이내에 분포하고 있다.

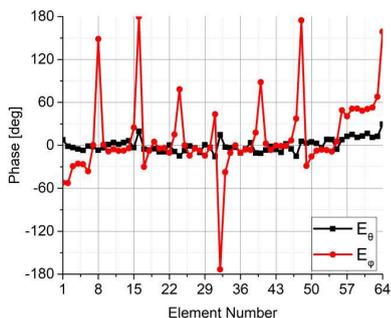


Fig. 5. Phase of array element (Az/EI = 45°/0°).

Fig. 5는 빔 조향각으로 방위각/고도각이 45도/0도 일 때 소자의 방사 위상 특성으로 Fig. 4(b)의 보어사이트 방향의 방사 위상에 비하여 큰 값으로 이는 빔 조향각 도에서 안테나의 빔조향 효율을 악화시킬 수 있다.

2.3 능동소자패턴 가중치 계산 알고리즘

2.3.1 단일 편파 수신기 환경

위상배열 안테나에서 방사되는 총 전기장은 능동소자 패턴을 이용하여 Eq. (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$E_s(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N w_n \psi_n(\theta, \phi) E_n(\theta, \phi) \quad (7)$$

Where, w_n denotes the weighting factor, E_s denotes the electric field of array antenna.

이때의 전기장은 배열 안테나의 소자가 순서대로 급전될 때, 다른 소자들이 모두 중단되었을 경우의 수치이다. 배열 안테나의 합성 전기장은 각 능동 소자 패턴에 중첩의 원리(Superposition)를 적용하여 계산된다.

Fig. 6에서는 빔조향 효율을 최적화하기 위해서 소자별 가중치를 보정하는 절차를 도시한다. 빔조향 각도가 결정되면, 소자별 인가 위상은 소자 위치에 따라서 Eq. (6)에 따라 계산된다. 소자별 위상 가중치($w_{p,n}$)는 Eq. (8)을 이용하여 얻어진다.

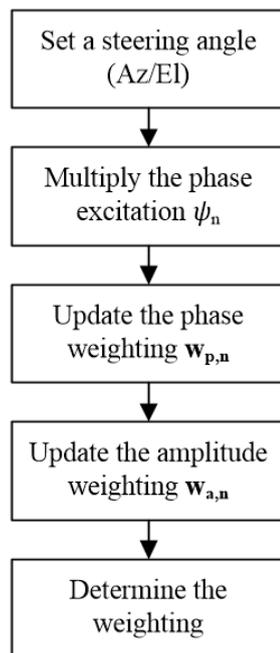


Fig. 6. The procedure of the weighting optimization (single polarization).

$$w_{p,n} = e^{-j \tan^{-1} \left(\frac{\text{imag}(E_n)}{\text{real}(E_n)} \right)} \quad (8)$$

Eq. (9)의 코시슈바르츠 부등식을 이용하여 이득 최대 값을 구하고 각 소자별 진폭 가중치($w_{a,n}$)는 Eq. (10)의 진폭 가중치는 라그랑주 승수법을 이용하여 얻어진다.

$$G = \frac{\left(\sum_{n=1}^N w_{a,n} E_n \right)^2}{\sum_{n=1}^N w_{a,n}^2} \leq \left(\sum_{n=1}^N E_n^2 \right) \quad (9)$$

$$w_{a,n} = \frac{E_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^N E_n^2}} \quad (10)$$

각 소자별 최종 가중치는 진폭 가중치와 위상 가중치의 곱으로 가중치 적용에 따른 안테나 이득은 Eq. (11)로 유도된다.

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} = \frac{4\pi}{2\eta} \frac{\left| \sum_{n=1}^N \psi_n w_n E_n \right|^2}{\sum_{n=1}^N |w_{a,n}|^2} \quad (11)$$

2.3.2 이중 편파 수신기 환경

이중 편파의 경우에는 E_θ , E_ϕ 성분이 모두 고려되어야 한다. Eq. (12)에서는 이중 편파 성분이 모두 존재할 때 위상배열 안테나의 이득을 나타낸다.

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} = \frac{4\pi}{2\eta} \frac{\left| \sum_{n=1}^N \psi_n w_n E_{\theta,n} \right|^2 + \left| \sum_{n=1}^N \psi_n w_n E_{\phi,n} \right|^2}{\sum_{n=1}^N |w_{a,n}|^2} \quad (12)$$

Where, w_n denotes weighting, G denotes the gain of antenna, U denotes the radiation intensity, Pin denotes the input power.

$$\max(E_s^2) = \max\left(\left(\sum_{n=1}^N \psi_n w_n E_{\theta,n}\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N \psi_n w_n E_{\phi,n}\right)^2\right) \quad (13)$$

Where $E_{\theta,n}$, $E_{\phi,n}$, denotes the far-zone electric field components of nth order element. w_n denotes the weighting, $w_{p,n}$ $w_{a,n}$.

128개 방사 소자의 전기장은 E_θ , E_ϕ 성분으로 나누어져 중첩된다. 위상배열 안테나의 총 방사 전기장이 최대가 되기 위한 조건은 Eq. (13)과 같다. 가중치는 진폭 가중치, 위상 가중치로 나누어서 계산된다.

Fig. 7은 이중 편파 위상배열 안테나에 대한 입력신호 가중치를 산출하는 절차이다. 단일 편파 위상배열 안테나와 다르게 이중 편파 위상배열 안테나의 최대 이득이 각 편파 성분의 절대값 제곱의 합에 비례하기 때문에, 위상 가중치와 진폭 가중치를 계산할 때 입력되는 전기장이 종속적이기 때문에 가중치는 반복 알고리즘을 통해 계산된다.

$$w_{p,n} = e^{j\theta_{P,n}} \quad (14)$$

$$\theta_{P,n} = \arctan\left(\frac{a_\theta d_\theta + a_\phi d_\phi - b_\theta c_\theta - b_\phi c_\phi}{a_\theta c_\theta + a_\phi c_\phi + b_\theta d_\theta + b_\phi d_\phi}\right) \quad (15)$$

$$a_\theta = \text{real}(w_{a,n} \psi_n E_{\theta,n}) \quad (16)$$

$$a_\phi = \text{real}(w_{a,n} \psi_n E_{\phi,n}) \quad (17)$$

$$b_\theta = \text{imag}(w_{a,n} \psi_n E_{\theta,n}) \quad (18)$$

$$b_\phi = \text{imag}(w_{a,n} \psi_n E_{\phi,n}) \quad (19)$$

$$c_\theta = \text{real}\left(\sum_{n=1}^N w_{a,n} \psi_n E_{\theta,n}\right) - a_\theta \quad (20)$$

$$c_\phi = \text{real}\left(\sum_{n=1}^N w_{a,n} \psi_n E_{\phi,n}\right) - a_\phi \quad (21)$$

$$d_\theta = \text{imag}\left(\sum_{n=1}^N w_{a,n} \psi_n E_{\theta,n}\right) - b_\theta \quad (22)$$

$$d_\phi = \text{imag}\left(\sum_{n=1}^N w_{a,n} \psi_n E_{\phi,n}\right) - b_\phi \quad (23)$$

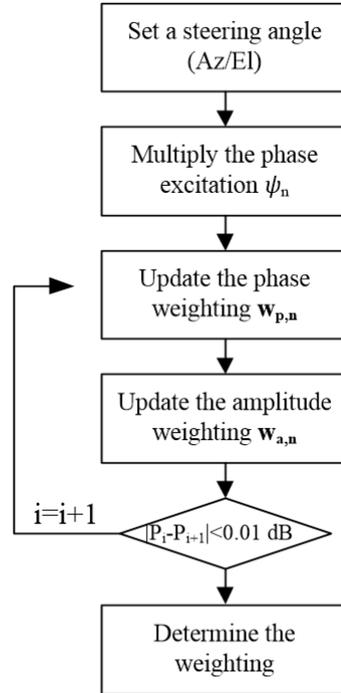


Fig. 7. The procedure of the weighting optimization (dual polarization).

이중편파 위상배열 안테나의 빔조향 효율을 개선하기 위하여 제안된 알고리즘에서 Eq. (16)-(23)는 재귀 성분이기 때문에 반복을 통해 이득 수렴되는지 확인해야 한다. Table 1은 반복 횟수에 따른 안테나 이득의 변화를 시뮬레이션한 것으로 4회 이상부터 이득이 수렴함을 확인할 수 있다.

진폭 가중치도 위상 가중치와 같이 Eq. (13)을 미분하여 계산할 수 있다. 진폭 가중치와 위상 가중치는 서로 종속적이므로, 반복 수행을 통해 이득을 수렴시킬 수 있다.

Table 1. The change in gain by number of repetitions (Az/El = 45°/0°).

Gain [dBi]	Frequency [GHz]				
	2	3	4	5	6
number of repetitions					
0	13.5118	17.1393	19.0157	21.1580	21.9038
1	15.4749	19.7699	21.8421	23.4293	24.5629
2	15.8161	19.8380	21.8506	23.4386	24.5636
3	15.8546	19.8394	21.8507	23.4387	24.5636
4	15.8587	19.8394	21.8507	23.4387	24.5636

3. 시뮬레이션 결과

제안된 방법을 이용하여 위상 가중치, 진폭 가중치를 적용하였을 때의 빔조향 효율 비교하였다. 시뮬레이션에 이용된 배열 소자는 각각 +45도, 45도로 기울어진 소자 64개가 적용되었다. Table 2에서는 단일 편파, 6 GHz 조건에서 지향각도 및 가중치에 따른 안테나 이득을 나타낸다.

Table 2. The gain of phased array antenna by weighting factor (single polarization).

Gain of phased array antenna at 6 GHz (G_θ) [dBi]				
Steering angle	$[w] = 1$	apply $w_{A,n}$	apply $w_{P,n}$	apply $w_{A,n}w_{P,n}$
AZ/EL = 0°/0°	18.9669	19.0542	24.1604	24.2251
AZ/EL = 45°/0°	19.1923	19.3016	21.9608	22.0696
Az/EL =45°/25°	14.1858	16.4513	19.7623	20.2477

가중치를 적용하지 않는 경우에 비하여 진폭 가중치, 위상 가중치, 진폭 및 위상 가중치가 적용되는 순서로 안테나 이득이 증가하였다.

안테나로 입사된 신호는 자유공간으로 신호를 방사하므로 방사전력은 안테나의 이득과 투과전력의 합이며, 금속재질의 안테나의 경우 안테나 자체손실은 무시할 수 있다. 투과전력은 능동반사계수로부터 얻을 수 있으며 $1 - |I_a|^2$ 으로 능동반사계수(I_a)는 Eq. (24)로 유도된다.

$$I_a^t = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_t} |b_n|^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_t} |a_n|^2}} \quad (24)$$

Where $[b] = [S][a]$, S denotes the antenna's scattering matrix, I_a^t denotes the total active reflection coefficient, a denotes the excitation vector, and b denotes the scattered vector.

여기에서 $[b] = [S][a]$ 으로 S 로는 안테나의 산란계수, a는 입사신호 특성을 의미한다.

표3에 단일편파에 대한 지향각 및 적용 가중치에 따른 정규화된 투과전력으로 진폭 및 위상 가중치를 모두 적용하였을 때 빔조향 각도에 따라 개선됨을 확인하였다.

Table 3. The normalized total accepted power at 6 GHz (single polarization).

The normalized total accepted power($1 - I_a^t ^2$) -45° slant (dB)				
Steering angle	$[w] = 1$	apply $w_{A,n}$	apply $w_{P,n}$	apply $w_{A,n}w_{P,n}$
AZ/EL = 0°/0°	0.9756 (-0.107)	0.9748 (-0.111)	0.9754 (-0.108)	0.9745 (-0.112)
AZ/EL = 45°/0°	0.9554 (-0.198)	0.9569 (-0.191)	0.9581 (-0.186)	0.9585 (-0.184)
Az/EL =45°/25°	0.8750 (-0.580)	0.8775 (-0.568)	0.8909 (-0.502)	0.8918 (-0.497)

Table 3에서는 수신기가 단일 편파일 때, 지향각도 및 적용 가중치에 따른 정규화된 투과전력을 나타낸다. 투과전력은 Eq. (24)로 계산된 합성 능동 반사 계수로 계산된다. 배열 안테나 이득과 투과전력의 합이 안테나 자체 손실을 제외한 방사 전력이 된다. 즉 가중치를 모두 적용했을 때 지향 각도에서의 방사 전력이 가장 크다.

Table 4. The gain of phased array antenna by weighting factor (dual polarization).

Gain of phased array antenna at 6 GHz [dBi]					
Steering angle	$[w] = 1$	apply $w_{A,n}$	apply $w_{P,n}$	apply $w_{A,n}w_{P,n}$	
AZ/EL = 0°/0°	G_{total}	24.4845	24.5225	24.6003	24.6362
	G_θ	18.9669	19.0742	21.8584	21.8866
	G_ϕ	23.0536	23.0643	21.3038	21.3487
AZ/EL = 45°/0°	G_{total}	21.9038	22.1350	24.5635	24.7820
	G_θ	19.1923	19.1289	21.6193	21.7962
	G_ϕ	18.5726	19.1205	21.4861	21.7470
Az/EL =45°/25°	G_{total}	16.6308	16.9301	22.1608	22.3586
	G_θ	14.1858	14.1211	19.6523	19.6720
	G_ϕ	12.9705	13.7086	18.5831	18.9986

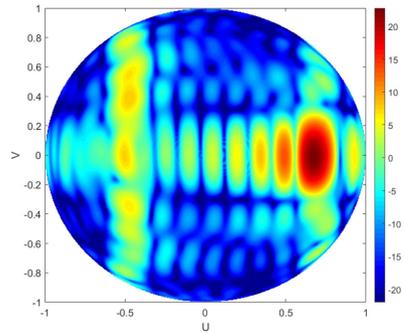
Table 4는 이중편파 위상배열 안테나에서 6 GHz 조건에서 지향각도 및 적용 가중치에 따른 편파별 이득, 총 이득 특성을 나타내었다. 보어사이트(AZ/EL=0도/0도)로 지향할 때보다 외곽으로 지향할수록 가중치에 따른 안테나 이득이 증가됨을 확인할 수 있다.

Table 5. The normalized total accepted power at 6 GHz (dual polarization).

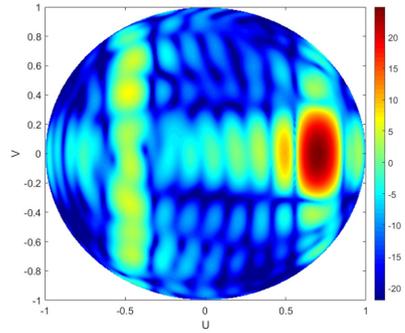
The normalized total accepted power(1- I _a ^t ²) +45° slant (dB)				
Steering angle	[w] = 1	apply w _{A,n}	apply w _{P,n}	apply w _{A,n} w _{P,n}
AZ/EL = 0°/0°	0.9756 (-0.107)	0.9755 (-0.108)	0.9754 (-0.108)	0.9753 (-0.109)
AZ/EL = 45°/0°	0.9552 (-0.199)	0.9559 (-0.196)	0.9450 (-0.246)	0.9503 (-0.221)
Az/EL =45°/25°	0.9301 (-0.315)	0.9279 (-0.325)	0.9303 (-0.314)	0.9275 (-0.327)
The normalized total accepted power(1- I _a ^t ²) -45° slant (dB)				
Steering angle	[w] = 1	apply w _{A,n}	apply w _{P,n}	apply w _{A,n} w _{P,n}
AZ/EL = 0°/0°	0.9756 (-0.107)	0.9753 (-0.109)	0.9754 (-0.108)	0.9752 (-0.109)
AZ/EL = 45°/0°	0.9554 (-0.198)	0.9564 (-0.194)	0.9506 (-0.22)	0.9500 (-0.195)
Az/EL =45°/25°	0.8750 (-0.580)	0.8766 (-0.572)	0.8734 (-0.588)	0.8846 (-0.5324)

Table 5에서는 수신기가 이중 편파일 때 지향각도 및 적용 가중치에 따른 정규화된 투과전력을 나타낸다. 단일 편파와 마찬가지로 가중치를 모두 적용했을 때 빔조향 각도에 따라 투과전력이 상승함을 확인하였다.

Fig. 8, 9에 이중편파 위상배열 안테나에서 제안된 빔조향 효율을 개선하기 위한 진폭 및 위상 가중치를 적용 여부에 따른 U-V 방사 패턴을 나타내었다. 본 논문에서 제안한 가중치 알고리즘을 적용한 경우 방위각/고각의 지향 각도가 45°/0°일 때 안테나 이득은 2.88 dB가 증가하였으며, 최대 이득이 지향하는 빔조향 각도도 42.07°/-0.77°에서 44.03°/0° 개선되었다. 또한, 45°/25°의 빔조향 각도를 갖는 경우 안테나 이득은 5.73 dB 향상되었고, 최대 이득을 갖는 각도는 제안된 최적화 알고리즘을 적용에 따라 41.3°/22.38°에서 44.83°/22.38°로 정확한 빔조향 특성을 얻었으며, 안테나 이득 증가 및 빔조향 정확도는 제안된 알고리즘으로 개선할 수 있다.

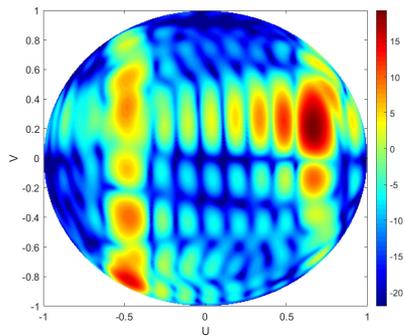


(a) before applying the weighting factor

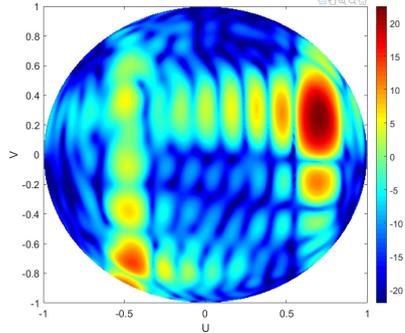


(b) after applying the weighting factor

Fig. 8. U-V pattern of array antenna gain (Az/El = 45°/0°).



(a) before applying the weighting factor



(b) after applying the weighting factor

Fig. 9. U-V pattern of array antenna gain (Az/El = 45°/25°).

4. 결론

본 논문에서는 위상배열 안테나의 능동 소자 패턴을 고려하여 빔조향 효율을 최적화하는 방법을 제안했다. 기존의 빔조향 알고리즘 적용 시 배열 소자 간 상호 커플링과 모서리 효과로 인해 빔조향 효율이 낮아지는 현상을 개선하기 위해서, 각 소자별 능동 소자 패턴을 고려한 위상, 진폭 가중치를 적용했다. 배열 소자에 최적화된 위상, 진폭 가중치 적용 후의 안테나 이득 및 투과전력을 비교하였고, 빔조향 효율이 개선됨을 확인하였다. 본 방법에서 고려되는 소자별 능동 소자 패턴은 소자가 늘어날수록 추출 시간이 늘어나는 단점이 있지만, 차후 컴퓨팅 파워(Computing power)가 증가하고, 패턴 측정 방법이 적용된다면, 수백개 이상의 배열 소자를 가진 배열 안테나에 적용이 가능하다. 본 방법을 적용하면 위상배열 안테나의 빔조향 효율 및 빔 정확도를 향상하는 데 있어서 활용도가 높을 것으로 예상된다.

References

- [1] J. W. Kim, "Radar development direction and development trend", *Defense and Technology*, 421, pp.77-93.
- [2] W. Gruener, J. P. Toernig, P. J. Fielding, "Active-electronically-scanned-array based radar system features", pp.339-343, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1049/cp:19971691>
- [3] C. Bolkcom, "Navy F/A-18E/F Super Hornet and EA-18G Growler Aircraft: Background and Issues for Congress", LIBRARY OF DC CONGRESSIONAL WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE, 2008.
- [4] M. T. Davis, D. Barno, N. Bensahel, *The enduring need for electronic attack in air operations*, Center for a New American Security, 2014.
- [5] J. Sim, B.-H. Park, "A Study on the Analysis of R&D Trends and the Development Plan of Electronic Attack System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* Vol. 22, No. 6, pp.469-476, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.6.469>
- [6] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, John Wiley & sons, 2015.
- [7] D. F. Kelley, W. L. Stutzman, "Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects", *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 41 no. 12, pp.1625-1632, 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1109/8.273305>

- [8] H. Steyskal, J. S. Herd, "Mutual coupling compensation in small array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38 no. 12, pp.1971-1975, 1990.
DOI: <http://doi.org/10.1109/8.60990>
- [9] H. M. Aumann, A. J. Fenn, F. G. Willwerth, "Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37 no. 7, pp.844-850, 1989.
DOI: <https://doi.org/10.1109/8.29378>
- [10] S. Caorsi, A. Lommi, A. Massa, M. Pastorino, "Peak sidelobe level reduction with a hybrid approach based on GAs and difference", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 4, pp.1116-1121
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.825689>

김 창 성(Changseong Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
- 2021년 8월 : 아주대학교 AI융합 네트워크학과 (공학박사)
- 2021년 9월 ~ 현재 : 한화시스템 전문연구원

<관심분야>

전자전, 전자파 산란, 안테나

박 슬 기(Seul-Gi Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2008년 2월 : 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : 한화시스템 전문연구원

<관심분야>

전자전, 안테나, 레이더

박 영 미(Young-Mi Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 충남대학교 전자계산학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 컴퓨터과학과 (공학석사)
- 1991년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야>

전자전, 방향탐지

이 철 수(Cheol-Soo Lee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

<관심분야>

전자전, RF 소자 및 안테나, 전자파 산란