

LCMV를 활용한 Thinned 능동위상배열안테나의 Null 방사 패턴 구현

Implementation of Null Radiation Pattern of Thinned Active-Phased Array Antenna Using LCMV

정 태 용¹ · 황 금 철²Taeyong Jeong¹ · Keum Cheol Hwang²

요 약

본 논문에서는 thinned 능동위상배열안테나의 널(null) 방사 패턴 구현을 위해 LCMV(linear constraint minimum variance)를 활용하는 것을 제안한다. Thinning factor를 60 % 미만으로 설계하기 위하여 Binary-GLPSO(genetic learning particle swarm optimization)가 활용되어 array configuration 최적화가 수행되었다. 정면 방향, 방위각/고각 45° 조향 시 LCMV를 활용하여 도출된 가중치를 thinned 배열에 적용하여, 적용 전/후 널 패턴 생성 여부, 주엽 틸트 및 크기 변동 여부에 대해 비교하였다. 제시된 지점에서 -150 dB 수준의 널이 형성된 것이 확인되었으나 널 개수가 증가하거나 주엽에 인접한 부엽에 대하여 널을 형성시킬 경우 주엽의 방향이 최대 0.3° 틸트된 것이 확인되었다.

Abstract

In this paper, we propose using linear constraint minimum variance (LCMV) to implement a null radiation pattern for a thinned active-phased array antenna. To implement a thinning factor of less than 60 %, binary-genetic learning particle swarm optimization (GLPSO) was used to optimize the array configuration. When steering in the boresight and at 45° azimuth/elevation angles, the weights derived using the LCMV were applied to the thinned array and compared for the null pattern, main lobe tilt, and level changes before and after the application. The results confirmed a null level of -150 dB formed at the presented point; however, when the number of nulls increased or a null was formed for a side lobe adjacent to the main lobe, the direction of the main lobe tilted by up to 0.3°.

Key words: Thinned Array, Null Pattern, LCMV, GLPSO, Jammer

I. 서 론

재밍은 특정 방향에서 강력한 전자기파를 방사시킴으로써 레이더의 식별 능력을 교란하기 위한 전자전 방식이다. 재밍으로부터 표적 식별 능력을 보존하기 위한 대표적인 방법은 방사 패턴에 널(null)을 형성하는 것이다. 대표적으로 LCMV(linear constraint minimum variance)를

활용하여 널 패턴 구현을 위한 가중치가 유도되나, 대부분의 연구결과와 주기적으로 배열된 평면 및 선형 배열 안테나를 대상으로 한 널 패턴 연구이다^{[1]~[3]}.

레이더의 성능은 가격과 비례하여 증가하며, 이는 장비를 구성하고 있는 TRM(transmitter receiver module)과 ADC(analog to digital Converter)가 지배적인 역할을 하고 있다. 이러한 이유로, 레이더의 성능을 보존시키면서

「이 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 미래도전국방기술 연구개발사업(No.912902601).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

1: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-4779-937X>), 2: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received January 9, 2024 ; Revised February 5, 2024 ; Accepted May 9, 2024. (ID No. 20240109-003)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: khwang@skku.edu)

TRM 및 ADC를 줄이기 위한 연구가 진행되고 있으며 대표적으로 배열안테나의 채널 중 일부를 임의로 제거한 형태의 **thinned** 배열 안테나를 한 예로 들 수 있다^[4]. Thinned 배열안테나 설계를 위한 **array configuration** 및 낮은 부엽준위 달성을 위한 가중치 등 다양한 연구가 활발히 진행되고 있으나 널 가중치 적용 시 방사 패턴 분석에 관한 연구는 부족한 상황이다^{[4][5]}. 본 논문에서는 문헌^[5]을 참고하여 Binary-GLPSO(gentic learning particle swarm optimization) 기반 **thinned** 배열안테나를 설계하였다. 여기서, GLPSO는 GA(genetic algorithm)와 PSO(particle swarm optimization)가 결합한 방식으로 multimodal 문제에 대하여 우수한 수렴성을 가지고 있다^[6]. 이후, **thinned** 구조에 LCMV로 도출된 널 가중치를 적용하여 널 형성 및 주엽의 틸트 여부를 확인하였다.

II. Thinned 능동위상배열안테나 설계 및 LCMV를 활용한 널 가중치 도출

그림 1은 소자 간격이 0.55λ 인 24×24 주기 배열에서 일부 소자를 제거하여 설계된 **thinned** 배열 형상이다. Thinned 배열 안테나는 부엽준위 -25 dB 수준을 달성하기 위해 Taylor tapering 25 dB가 적용된 주기 배열의 최대 부엽준위와 동일하도록 최적화되었다^[7]. 설계된 **thinned** 배열은 340개의 복사소자가 활용되었고 원점 대칭 형태이며 **thinning factor**는 약 59 %($340/576$)이다.

그림 2 및 그림 3은 그림 1에 대한 정면 방향, 방위각/고각 45° 조향 방향에 대한 방사 패턴이다. 여기서 단일 방사 패턴은 $\cos^{1.5}\theta$ 이다. 주기 배열과 **thinned** 배열은 정면 방향에서 최대 부엽준위가 -25 dB, -23 dB이며

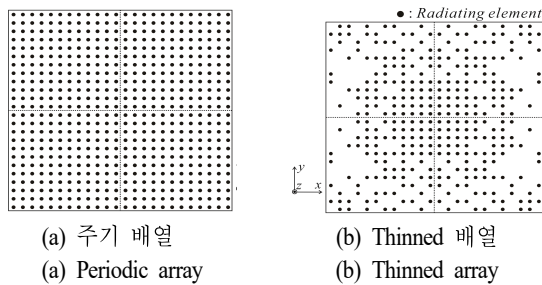


그림 1. 최적화된 thinned array configuration
Fig. 1. Optimized thinned array configuration.

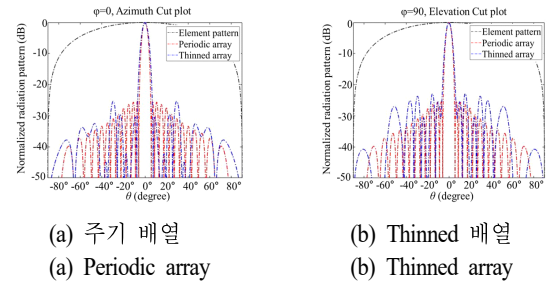


그림 2. 정면 방향 방사 패턴
Fig. 2. Radiation pattern at direction of boresight.

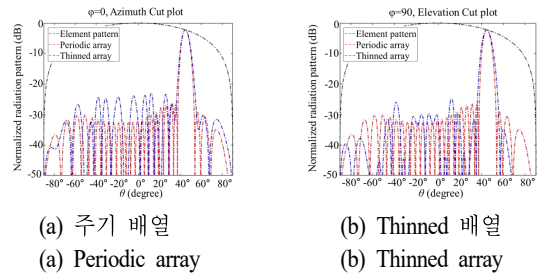


그림 3. 방위각/고각 45° 조향 방향에 대한 방사 패턴
Fig. 3. Radiation pattern at direction of 45° azimuth/elevation.

HPBW(half power beamwidth)는 모두 3.5° 이다. 방위각 45° 조향시 주기 배열의 최대 부엽준위와 HPBW는 -24.22 dB, 6.5° 이며 **thinned** 배열은 -22.4 dB, 7° 이다. 고각 45° 조향시 주기 배열의 최대 부엽준위와 HPBW는 -24.22 dB, 6.4° 이며 **thinned** 배열은 -21.1 dB, 6.4° 이다.

그림 4는 널 알고리즘 구현을 위한 신호 모델이다. N 은 주기 배열 기준 전체 채널의 개수를 의미하며 θ_0 는 수신 신호 또는 표적 신호의 방향을, θ_k 는 간섭 신호의 방향을 의미한다. Y_N 는 채널별로 수신되는 간섭 신호를 의미하며 w_N 는 채널별 인가되는 가중치이다. 식 (1)은 SINR

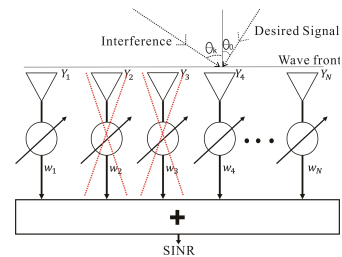


그림 4. Thinned 배열 안테나 개념도
Fig. 4. Conceptual structure of thinned array antenna.

(signal interference noise ratio)의 정의로 수신된 잡음 및 간섭(P_{out}) 대비 수신된 신호(S_{out})의 비로써 정의된다. 식 (2)는 수신된 간섭 신호의 계산 식이다. 각 채널 간 간섭 신호는 복소 행렬 형태의 Y 에 대한 공분산 행렬과 가중치 행렬 w 의 곱으로 구현된다. 여기서 Y^H 는 행렬 Y 에 대한 켤레 전지 행렬(conjugate transpose matrix)을 의미한다. 식 (3)은 LCMV의 목적함수이며 간섭 신호를 최소화하기 위한 최적의 가중치가 도출되도록 정의된 것을 확인할 수 있다. 식 (4)는 LCMV의 제약 조건으로 원하는 방향(θ_0)에서 최대값 1을 유지하고 간섭 방향(θ_k)에서 최소값 0을 유지한다. 조향 벡터 $v(\theta)$ 는 θ 방향으로 빔 조향하기 위한 배열 안테나의 채널 간 가중치 값을 행렬 형태로 나타낸 것이다^{[1],[3]}. 여기서 주기 배열과 thinned 배열은 배열 구성이 다르므로 해당 AF(array factor)도 서로 다르게 구현된다. 따라서 thinned 배열에서 $v(\theta)$ 를 정의할 때 thinned AF에서 도출된 빔 조향을 위한 위상 지연 값으로 정의해야 한다.

$$SINR = \frac{S_{out}}{P_{out}} \quad (1)$$

$$P_{out} = w^H R w \quad (R = E\{Y Y^H\}) \quad (2)$$

$$w_0 = \min_w w^H R w \quad (3)$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & w^H v(\theta_0) = 1 \\ & w^H v(\theta_k) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

III. LCMV를 통해 도출된 널 가중치 적용 여/부에 대한 Thinned 배열의 방사 패턴 비교

그림 5~그림 7은 LCMV를 활용하여 도출된 널 가중치 적용 여/부에 대한 thinned 배열의 정면 방향 방사 패턴 비교를 보여주고 있다. 원하는 지점에 널이 형성된 것을 확인할 수 있으나, 널의 개수가 증가하거나 주엽 주변의 위치에 널을 형성할 경우 주엽의 방향이 틸트 되는 경향을 확인하였다. 표 1을 통해 정량적으로 제시한다.

그림 8 및 그림 9는 방위각/고각 방향으로 각각 45° 빔 조향 시 2개 및 3개의 지점에 널 가중치를 적용한 방사 패턴을 보여주고 있다. 3개의 널이 형성된 경우, 빔이 틸트 된 것이 확인되었으며 정량적 결과는 표 2를 통해 제시된다.

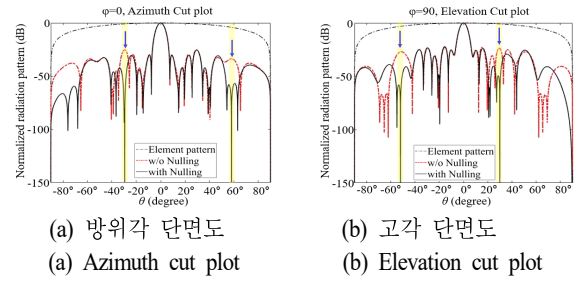


그림 5. Thinned 배열의 2 points 널 적용에 따른 방사 패턴(정면 방향, Case 1)

Fig. 5. Radiation pattern with 2 points nulls of thinned array (boresight, Case 1).

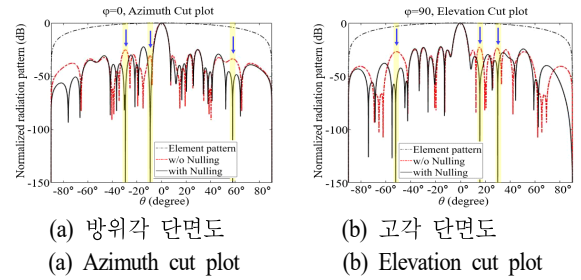


그림 6. Thinned 배열의 3 points 널 적용에 따른 방사 패턴(정면 방향, Case 2)

Fig. 6. Radiation pattern with 3 points nulls of thinned array (boresight, Case 2).

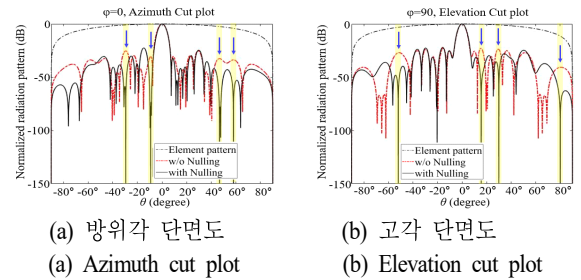


그림 7. Thinned 배열의 4 points 널 적용에 따른 방사 패턴(정면 방향, Case 3)

Fig. 7. Radiation pattern with 4 points nulls of thinned array (Boresight, Case 3).

IV. 결 론

본 논문에서는 thinned 능동위상배열안테나 설계를 위한 array configuration 최적화를 수행하였으며 설계된 thinned 배열에 LCMV를 통해 도출된 널 가중치를 적용하

표 1. 정면 방향에 대한 널 방사 패턴 분석

Table 1. Null radiation pattern analysis at boresight direction.

	Position of main lobe [°]		Null position [°]	
	Azimuth cut	Elevation cut	Azimuth cut	Elevation cut
Case 1	0	0	-29.4, 58	-52, 30
Case 2	0.2	0	-29.4, -9.2, 58	-52, 15.6, 30
Case 3	0.3	-0.1	-29.4, -9.2, 46.7, 58	-52, 15.6, 30, 80

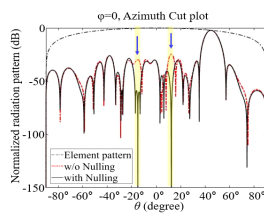
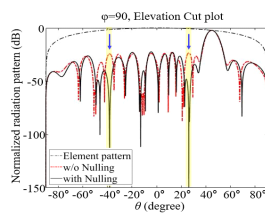
(a) 방위각 단면도
(a) Azimuth cut plot(b) 고각 단면도
(b) Elevation cut plot

그림 8. Thinned 배열의 2 points 널 적용에 따른 방사 패턴(방위각/고각 45° 조향, Case 4)

Fig. 8. Radiation pattern with 2 points nulls of thinned array (azimuth/elevation 45°, Case 4).

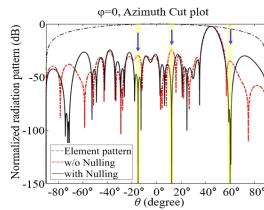
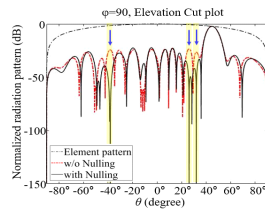
(a) 방위각 단면도
(a) Azimuth cut plot(b) 고각 단면도
(b) Elevation cut plot

그림 9. Thinned 배열의 3 points 널 적용에 따른 방사 패턴(방위각/고각 45° 조향, Case 5)

Fig. 9. Radiation pattern with 3 points nulls of thinned array (azimuth/elevation 45° scan, Case 5).

여 방사 패턴을 분석하였다. 3개의 null을 구한 경우와 4개의 null을 구현하는데 가중치 도출 시간 차이는 0.1초 수준으로 동일하며, 원하는 구간에 널이 형성되는 것이 확인되었다. 그러나, 주엽에 인접한 위치에 널을 형성하거나 널의 개수가 증가할 경우, 주엽의 방향이 최대 0.3° 틸트 되는 것이 확인되었다. 따라서, LCMV를 활용하여

표 2. 45° 방위각/고각 45° 빔 조향에 대한 널 방사 패턴 분석

Table 2. Null radiation pattern analysis at azimuth/elevation 45°.

	Position of main lobe [°]		Null position [°]	
	Azimuth cut	Elevation cut	Azimuth cut	Elevation cut
Case 4	45	45	-15, 12.4	-38.1, 26.1°
Case 5	45.3	45	-15, 12.4, 60	-38.1, 26.1, 32

thinned 배열안테나의 널 패턴 알고리즘 구현이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] E. Yang, Y. H. Jang, W. Kim, and D. Yeom, "Beam domain localized adaptive beamforming for fully digital active array radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 5, pp. 494-504, May 2021.
- [2] A. Fenn, *Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications*, Norwood, MA, Artech House, 2007.
- [3] T. W. Jeffrey, *Phased-array radar design: Application of radar fundamentals*, Stevenage, IET Digital Library, 2009.
- [4] R. L. Haupt, "Thinned arrays using genetic algorithms," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 7, pp. 993-999, Jul. 1994.
- [5] T. Jeong, K. Oh, J. Y. Jung, and K. C. Hwang, "Design of thinned phased array antenna with subarrays," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 4, pp. 284-292, Apr. 2022.
- [6] Y. J. Gong, J. J. Li, Y. Zhou, Y. Li, H. S. H. Chung, and Y. H. Shi, et al., "Genetic learning particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 10, pp. 2277-2290, Oct. 2016.
- [7] A. D. Brown, *Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation*, Boca Raton, FL, CRC Press, 2017.