

위상 조절 넓은 빔 패턴을 이용한 조향별 이득 및 빔폭 유지 방법

Maintaining Scan-Invariant Gain and Beamwidth Using Phase-Only Wide Beam Patterns

김 태 완¹ · 한 일 탁² · 최 준 호³

TaeWan Kim¹ · IITak Han² · JunHo Choi³

요 약

본 논문에서는 위상 조절을 통한 넓은 빔을 이용하여 조향별 이득 및 빔폭 유지 방법을 제안한다. 제안된 구조에서 조향별 손실 값을 보상하는 안테나 테이퍼링 값을 수식화하여 결과를 예측하고 증명하였다. 제안된 수식을 통해 선형뿐만 아니라 면형 배열에서 역위상을 갖는 소자값을 조절함으로써 일정한 이득 및 빔폭을 유지하는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper proposed a method for maintaining scan-angle-dependent gain and beamwidth using a binary phase taper. In the proposed structure, the antenna tapering values required to compensate for scan-dependent losses are analytically formulated, and the resulting performance is both predicted and verified. Using the derived expressions, it is confirmed that constant gain and beamwidth can be maintained not only for linear arrays but also for planar arrays by appropriately adjusting the excitation coefficients of elements.

Key words: Scan-Invariant Gain, Phase-Only Excitation, Phase Tapering, Active Array Radar

I. 서 론

레이다가 일정한 성능을 확보하기 위해서는 빔조향에 대한 일정한 이득 및 빔폭이 요구된다. 배열안테나에서 빔을 조향할 경우, 조향각이 증가함에 따라 유효 개구가 감소하여 빔폭이 확장되고 이득이 저하되는 현상이 근본적으로 발생한다. 이러한 조향 손실은 SNR이 감소하며 결과적으로 탐지 거리 및 추적 성능이 조향각에 따라 불

균일하게 변화하는 문제를 초래한다. 특히 넓은 스캔 각을 요구하는 능동 위상 배열 레이더 시스템에서는 이러한 각도 의존적 성능 열화가 전체 탐색 및 추적 성능을 제한하는 주요 요인으로 작용한다. 이것을 극복하기 위해 원통형 어레이 또는 다중표면 어레이가 제안되었다^{[1],[2]}. 이러한 접근은 높은 복잡도 및 높은 비용 등이 동반되게 된다. 단일 안테나 면에서 조향별 일정한 빔폭과 이득을 유지하기 위해 개구면적을 조절하는 방법에 대해서 참고

「이 연구는 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 수행된 연구개발사업(No.924017301).」

국방과학연구소(Agency for Defence Development)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0004-7111-5769>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0009-0006-9471-7011>), 3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9244-6637>)

· Manuscript received December 22, 2025 ; Revised January 27, 2026 ; Accepted March 12, 2026. (ID No. 20251222-005S)

· Corresponding Author: TaeWan Kim (e-mail: gold427@add.re.kr)

문헌 [3]에 소개되었다. 하지만 개구면 조절의 경우 EIRP 나 G/T 같은 주요 에너지 손실이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 조향각에 따라 위상 조절 테이퍼링을 조절함으로써 빔폭과 이득을 일정하게 유지하는 기법을 제안한다. 전 스캔 영역에서 일정한 이득과 빔폭을 유지할 경우, 조향별 일정한 EIRP를 갖기 때문에 탐지 성능의 각도 의존성이 제거되어 균일한 탐지 확률과 안정적인 추적 성능을 확보할 수 있다. 본 논문에서는 이전 연구[4]로 정의된 이진 위상 테이퍼링 기반 넓은 빔 형성 기법을 기반으로 조향별 이득 및 빔폭 유지 기법에 대해 수식적으로 정의하였고 선형배열만 아니라 면형 배열에 대해서 조향별 이득 및 빔폭 유지 기법을 증명하였다. 최대 이득 및 빔폭 오차는 1.5% 및 8% 이내의 결과를 얻을 수 있었다.

II. 선형 배열에서 조향별 이득 및 빔폭 유지를 위한 수식 및 분석

조향별 이득 및 빔폭을 일정하게 조절하기 위해서는 위상 조절 테이퍼링이 적용된 안테나의 패턴을 수식적으로 정확하게 정의가 되어야 한다. 그림 1은 소자 간격이 d 인 N 개의 선형 배열 구조에서 양끝 M 개의 소자 위상이 ϕ_{diff} 도 나머지($N-2M$)는 0도의 위상을 갖는 배열 형상이다. 이와같이 이진위상분포를 가진 전체 배열소자의 배열 인자(AF, array factor)를 AF_{binary} 로 정의하며 수식화함으로써 배열안테나의 이득, 빔폭 및 패턴 등을 계산하여 성능을 분석할 수 있다[4].

$$AF_{binary} = \sum_{n=1}^{N-2M} \exp(K(n - (N-2M+1)/2)) + e^{j\phi_{diff}} \sum_{n=1}^M \exp(K(n - (M+1)/2))2\cos(K(N-M)) \quad (1)$$

이때, K 는 $j2\pi \frac{d}{\lambda}(\sin\theta - \sin\theta_0)$ 이고 d 는 소자 간 거리, λ

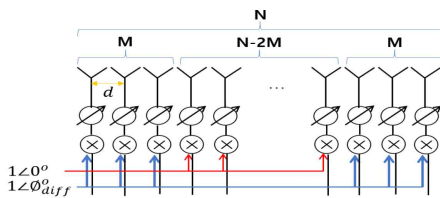


그림 1. 제안된 능동배열레이다 구조
Fig. 1. Proposed active phased array radar structure.

는 파장이다. 즉 ϕ_{diff} 가 고정되어 있다면 ϕ_{diff} 위상을 갖는 소자의 수 M 을 통해 넓은 빔을 갖는 위상 테이퍼링 값을 조절할 수 있다. 만약 이진 위상 테이퍼링을 통한 넓은 빔을 정면 조향에 대해서 확보를 했다면, 조향에 따라 테이퍼링 값을 조금씩 줄이면서 조향 손실을 보상에 준다면 모든 조향각에 따라 정면 조향과 동일한 이득과 빔폭을 확보할 수 있다. 다른 최적화 기법을 통한 위상 테이퍼링 기법은 특정 빔폭에 대해서 어떠한 규칙 없이 최적화가 되기 때문에 조향에 따라 동일한 유효 개구면적을 확보하기 위해서는 각 조향별로 각각 최적화를 수행해 그에 맞는 위상분포를 확보해야 하지만, 본 이진위상기법은 단순히 M 값을 줄임으로서 수식으로 일정한 유효 개구면적을 확보할 수 있다. 유효 개구면의 식 (2)은 아래와 같다.

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{array} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \eta_M D$$

이때, $\eta_M = \frac{(N-2M-2Me^{j\phi_{diff}})^2}{N^2}$, $0 \leq \eta_M \leq 1$

$$D = NG_e \cos^{1.2}\theta_{scan} \quad (2)$$

이때 η_M 은 M 의 이진위상 테이퍼링에 의한 안테나 효율이다. 이진위상구조는 식 (2)와 같이 η_M 를 정확하게 정의할 수 있기 때문에 조향별 개구효율 또는 이득을 정의할 수 있다. D 은 배열안테나의 지향성이다. 이때, G_e 는 단일 안테나 정면 방향의 이득이며 $\cos^{1.2}\theta_{scan}$ 은 단일안테나의 최대 파워로 정규화 한 이론적 패턴 분포이다. 일반적으로 코사인 지수는 단일 소자 패턴의 각도별 손실 값에 따라 다르게 근사화 가능하며, 실제 단일 안테나의 각도별 실측 값을 사용해도 무방하다. 본 논문에서는 단일 소자 패턴을 1.2승으로 근사화하였다. 식 (2)를 통해 정의된 안테나 효율에 따라서 배열안테나의 이득 및 개구효율이 바뀌는 것을 알 수 있다. 이진 위상 테이퍼링의 경우 M 값이 커질수록 낮은 안테나 효율로 인해 이득이 줄어들고 M 값이 줄어들수록 안테나 효율이 증가해 $M=0$ 이 되면(테이퍼링이 없으면) 안테나 효율이 1이 되어 손실이 발생하지 않는다. 그럼 정면조향에서의 이득(G_0)과 빔조향에서의 이득($G_{\theta_{scan}}$)이 동일하기 위해서는 각 조향각에 대해서 안테나 이득을 식 (3) 및 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$G_0 = G_e N(N-2M_0 - 2M_0 e^{j\phi_{diff}})^2 / N^2 \quad (3)$$

$$G_{\theta_{scan}} = G_e N(N - 2M_{scan} - 2M_{scan} e^{j\phi_{diff}})^2 \cos^{1.2} \theta_{scan} / N^2 \quad (4)$$

정면 조향 이득과 빔조향 이득을 동일하게 하기 위한 조향 시의 M_{scan} 값을 찾기 위해 식 (5) 및 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$G_0 = G_{\theta_{scan}} \quad (5)$$

$$\frac{(N - 2M_0 - 2M_0 e^{j\phi_{diff}})^2}{(N - 2M_{scan} - 2M_{scan} e^{j\phi_{diff}})^2} = \cos^{1.2} \theta_{scan} \quad (6)$$

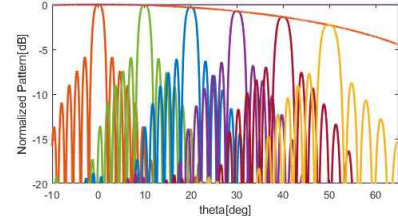
식 (3) 및 식 (4)를 이용하여 최종적으로 수식 (6)과 같이 고정된 N , M_0 , ϕ_{diff} , 및 θ_{scan} 에 의해서 조향에 따른 M_{scan} 을 확정할 수 있다. 본 수식을 풀기 전 특정 최대 θ_{scan} 까지의 M_{scan} 값을 구할 수 있는 조건은 식 (7)과 같다. 이는 빔조향 손실보다 정면 조향 시 발생하는 테이퍼링 손실이 더 커야만 한다는 것을 알 수 있다. 원하는 최대 빔조향까지 테이퍼링 손실을 줄이면서 원하는 동일 이득을 확보할 수 있다.

$$20 \log_{10} \left((N - 2M_0 - 2M_0 e^{j\phi_{diff}})^2 / N^2 \right) \geq 20 \log_{10} (\cos^{1.2} \theta_{scan}) \quad (7)$$

조향에 따른 동일한 이득을 확보한다면 식 (8)에 따라 동일한 빔폭(Ω_{3dB})을 확보할 수 있다.

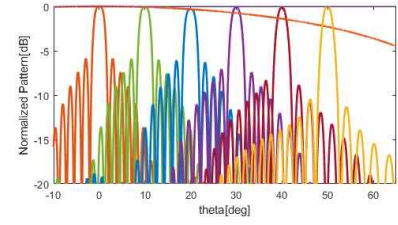
$$G(0) \Omega_{3dB}(0) = G(\theta_{scan}) \Omega_{3dB}(\theta_{scan}) = constant \quad (8)$$

최종적으로 그림 2(a)는 동일한 M 값 즉 동일한 안테나 효율을 적용한 결과이며, 그림 2(b)는 식 (6)을 통해 빔조향에 따른 적절한 M_{scan} 값을 적용한 결과이다. 이때 N은 200개, 정면조향에 대해 M_0 는 20개, ϕ_{diff} 는 180도, $d/\lambda = 0.5$ 그리고 단일안테나 이득(G_e)은 5 dBi를 적용하였다. 결과를 통해 볼 수 있듯이, 동일 M을 사용하면 단일안테나의 손실분($\cos^{1.2} \theta_{scan}$)만큼 조향에 따라 이득이 떨어지는 것을 볼 수 있지만, 적절한 M_{scan} 을 적용한 결과를 보면, 빔 조향에 따라서도 이득이 감소하지 않고, 정면 조향과 유사한 이득을 유지하는 것을 알 수 있다. 표 1은 위의 그림을 정리한 표이다. 수식 (7)에서 알 수 있듯이, 50도까지의 최대 빔조향 손실은 -2.3 dB이고 정면방향의 테이퍼링 손실이 -4.43 dB이기 때문에, 50도까지 모든 조향각에 대해서 동일한 이득을 확보할 수 있다. 그리고 표 1



(a) 고정 테이퍼링 적용

(a) Fixed tapering



(b) 적응형 테이퍼링 적용

(b) Adaptive tapering

그림 2. 선형 배열의 빔조향 패턴

Fig. 2. Radiation pattern of linear arrays.

에서 알 수 있듯이, 식 (8)에서 정의한 결과와 같이, 같은 이득을 갖는다면 조향에 따라서 일정한 빔폭값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 일부 이득과 빔폭이 차이가 나는 것은 M_{scan} 은 정수 값을 가져야 하기 때문에 양자화 에러가 발생한 것이다. 실제 충분한 N을 통한 M_{scan} 을 정의한다면 빔조향에 따라 완벽히 일치하는 이득과 빔폭값을 확보할 수 있다. 또한 소자별 출력파워가 10 W라 가정하면 모든소자가 전력을 일정하게 방사하기 때문에 EIRP 또한 일정하게 유지되는 것을 표 1을 통해 확인할 수 있다.

III. 2차원 조향별 이득 및 빔폭 유지 설계 및 결과

1D에 적용된 AF를 2D로 확장한 결과를 확인하기 위해 본 논문에서는 총 5,034개의 소자를 사용하며 좁은빔 대비 약 2배의 빔폭을 갖는 넓은 빔을 타겟으로 위상을 설계하였다. $d/\lambda=0.5$ 로 정의하였고 주파수는 3 GHz에서 분석하였다. 그림 3과 같이 이진 위상을 적용하였으며 ϕ_{diff} 는 180도를 적용하였고 $2M/N$ 의 비율은 12.5 %를 초기 정면 조향값으로 적용하였다. 제안하는 구조를 통해 조향을 통한 동일 이득 및 빔폭 확보를 계산하였다. 단일안테나

표 1. 조향각에 따른 빔폭 및 이득

Table 1. Beamwidth and gain depending scan angle.

		Scan angle (θ_{scan}) (degree)					
		0	10	20	30	40	50
Fig. 2(a)	M_{scan}	8	8	8	8	8	8
	Ω_{3dB} (°)	2.63	2.67	2.8	3.03	3.43	4.08
	G (dBi)	14.5	14.5	14.2	13.8	13.2	12.2
	EIRP (dBi)	74.5	74.5	74.2	73.8	73.2	72.2
Fig. 2(b)	M_{scan}	8	8	8	7	6	4
	Ω_{3dB} (°)	2.63	2.67	2.8	2.66	2.65	2.56
	G (dBi)	14.5	14.5	14.2	14.5	14.5	14.7
	EIRP (dBm)	74.5	74.5	74.2	74.5	74.5	74.7

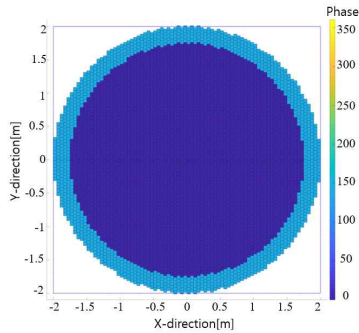


그림 3. 개구면에서의 위상 분포

Fig. 3. Phase distribution of antenna aperture.

이득이 모든 θ 방향에 대해 1차원 배열과 동일한 $\cos^{1.2}\theta$ 의 패턴을 갖는다고 가정하였다. 식 (7)를 통해 X축 및 Y축으로 최대 50도까지 동일 빔이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 식 (6)을 X축과 Y축 방향 각각으로 설정하여 k_x , k_y 축에서 동일한 이득 및 빔폭을 갖도록 계산하였다. 최종적으로 그림 4를 통해 k_x , k_y 축에 최대 50도까지의 빔 조향에 대해 정면조향과 유사한 이득을 얻을 수 있었다. 정면 조향에 대한 이득 및 빔폭은 각각 36.61 dBi 및 2.32도이며 조향 시 이득 및 빔폭의 최대 오차는 각각 1.5% 및 8% 이내의 오차 값을 확인하였다. 빔유지를 하지 않았을 때는 최대 2.1 dB의 빔조향손실이 발생하지만, 이진 위상의 테이퍼링 조절을 통해 정면조향 대비 손실이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 1차원뿐만 아니라 실제 2차원 배열 면에서도 동일하게 모든 조향각에 대해서 일정한 이득 및 빔폭을 갖는 것을 확인할 수 있다.

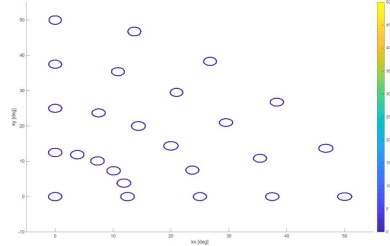


그림 4. 적응형 테이퍼링 적용 조향별 3 dB 빔폭
Fig. 4. 3 dB beamwidth depending on scan angle.

IV. 결 론

본 논문에서는 능동배열레이다의 위상 조절 송신 넓은 빔을 이용하여 조향별 이득 및 빔폭을 유지하는 방법에 대해서 정의하였다. 조향별 조향손실에 상응하는 만큼 안테나 효율을 보상에 주는 방식으로 수식을 정의하였다. 이러한 수식을 통해 선형 또는 면형 배열에서 0도에서 50도까지의 조향에 대해 일정한 이득 및 빔폭을 유지함을 확인하였다. 또한, 이진위상조절을 통해 적용하였기 때문에 모든 조향각에 대해서 일정한 이득뿐만 아니라 일정한 EIRP를 얻을 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] R. L. Haupt, *Antenna Arrays: A Computational Approach*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2010.
- [2] S. Ogurtsov, Z. Song, and D. Caratelli, "Scan-loss compensation for full-azimuth multi-facet phased array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 1, pp. 411-421, Jan. 2023.
- [3] R. L. Haupt, P. Moosbrugger, "Maintaining a constant beamwidth when scanning a phased array," in *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems(ICWITS)*, Maui, HI, Jul.-Aug. 2012, pp. 1-4.
- [4] T. W. Kim, I. T. Han, D. S. Kim, J. H. Choi, M. S. Kwon, and J. M. Yang, et al., "Transmit-beam broadening method of active array radar using binary phase tapering," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 9, pp. 729-732, Sep. 2024.