

경사 하강 위상 조절 빔확장 기법을 활용한 위상배열레이다의 스캔 타임 최적화 방법

손제경*¹, 홍성원*², 양은정*³

Scan time Optimization in Phased Array Radar using Gradient Descent Phase Only Beam Broadening

Jegyung Son*¹, Sungwon Hong*², and Eunjung Yang*³

This work was supported by the Agency for Defense Development grant funded by the Korean government

요 약

레이다는 넓은 영역의 탐색과 다수 표적의 추적을 위해 시간 자원 최적화를 필요로 한다. 많은 시간 자원이 영역 탐색에 소모되기 때문에 탐색 스캔 타임을 줄임으로써 시간 자원을 절약할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 확장빔 생성을 위한 경사 하강 위상 조절 빔확장 기법과 다중 확장빔 빔그리드 설계를 통한 스캔 타임 최적화 기법을 제안한다. 경사 하강 위상 조절 방법을 통해 다중 확장빔을 생성하고 탐색 영역에 따라 최적 송신빔을 선택하여 방사하면 영역 탐색에 필요한 빔의 개수가 감소하므로 스캔 타임이 최적화된다. 제안하는 방법이 필요한 사례와 구체적인 구현 방안을 제시하였고, 시뮬레이션을 통해 다양한 확장빔이 필요에 따라 적합하게 형성되며 이를 활용해 스캔 타임을 최적화 할 수 있음을 증명하였다.

Abstract

Radar requires optimization of time resources to search wide areas and track multiple targets. Since a significant portion of time is consumed in area search, reducing the search scan time can save resources. To this end, this paper proposes a scan time optimization using a gradient descent phase only beam broadening technique for generating broad-beams and a beam grid design based on multiple broad-beam. Using the gradient descent phase only beam broadening technique, multiple broad-beams are generated. And then, the optimal beam is selected and transmitted according to the search area. This reduces the number of beams required for area search, therefore it optimizes scan time. Cases where the proposed method is needed and a specific implementation of algorithm are presented. Simulations demonstrate that various broad-beams can be appropriately formed as needed and that this can be utilized to optimize scan time.

Keywords

scan time optimization, beam broadening, gradient descent optimization, beamgrid design

* 국방과학연구소 제3기술연구원 4부(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0002-8153-1518>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-9509-0691>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0003-4724-5542>

• Received: Mar. 12, 2026, Revised: Apr. 22, 2026, Accepted: Apr. 25, 2026
• Corresponding Author: Jegyung Son
Agency for Defense Development, Yusong P.O.Box 35, Daejeon, 34186
Korea
Tel: +82-42-821-3308, Email: jgs@add.re.kr

1. 서 론

레이다는 특정 방향으로 전파를 송신하고 경로상에 있는 물체에 의해 반사되는 전파 신호를 수신함으로써 해당 물체의 거리/속도 정보를 추출하는 기술을 지칭한다. 레이더 시스템은 특정 영역 안에 표적 존재 여부를 찾는 ‘탐색’ 기능과 탐색된 표적의 정밀 정보 추출을 위한 ‘추적’ 기능을 갖는다. 레이더 시스템의 성능은 얼마나 넓은 영역(거리, 방위, 고도)을 빠르게 탐색할 수 있는지와 얼마나 많은 표적을 추적할 수 있는지로 표현되는데, 이 성능의 개선을 위해서는 레이더 기능 수행 주기인 프레임타임 최적화 과정이 필요하다. 프레임타임은 임무 영역의 스캔 소요 시간 또는 목표 표적 정보 갱신율에 의해 결정된다. 탐색 기능만을 수행하는 탐색 레이더의 경우 탐색 영역을 모두 스캔하는데 소요되는 시간이 프레임타임이 된다. 탐색과 추적 등 다양한 기능을 수행하는 다기능 레이더의 경우는 탐색 영역을 스캔한 시간과 추적에 소요되는 시간을 더한 시간이 프레임타임이 된다. 만약 탐색에 소요되는 시간을 감소시킨다면 레이더는 더 높은 표적 정보 갱신율을 갖게 되고 많은 표적 추적을 할 수 있게 된다. 결국 레이더 시스템 성능 향상을 위해서는 빠른 빔 스캔을 통한 탐색 시간 최소화가 필요하다.

현대의 AESA(Active Electronical Scanned Array) 레이더는 전자식 빔조향을 통해 과거 기계식 레이더 대비 비약적인 스캔 속도 향상을 가지게 됐다. 하지만 현대 다기능 레이더는 기능의 다양화와 높은 성능 요구로 인해 추가적인 프레임타임 최적화가 필요하고 이를 위해 많은 연구가 수행되었다. 가장 직관적인 접근 방법으로 빔 스케줄링을 최적화하는 방안이 [1][2]와 같은 논문에서 연구되었다. 좀더 구조적 변화를 가져가는 방법으로 [3]에서는 개구면 분할 빔 조향을 통한 탐색 시간 감소 방안을 제안했는데 이는 구현 관점에서 하드웨어적 제약 사항이 있으며 유연성이 부족하다는 한계점이 있다. [4]에서는 빔 확장을 통한 탐색 성능 개선 방안을 제안한다. 이 방법은 디지털 다중빔 형성 기능이 필요하기에 하드웨어적 제약이 있지만, 기법 자체는 소프트웨어적으로 구현 가능하여 시스템 적용이 용

이하고 유연하게 활용할 수 있다. 다만, [4]에서는 개념적 설명에 국한되어 시스템 구현 관점에서 자세한 활용 방안이 부족하고 [5]-[7]에서는 빔확장 기법에 대한 연구는 제안되었으나 그 활용과 구현에 대한 설명이 부족한 실정이다.

우리는 프레임타임 최적화 문제를 해결하기 위해 위상 조절 빔 확장 기반 탐색 성능 개선 방안을 확장하여 제안하고 나아가 실제 구현을 위한 세부 방법들을 제시한다. 2장에서는 탐색 성능 개선을 위한 빔 운용 방안을 설명하고 3장에서는 위상 조절 빔 확장 기법을 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 요약하고 마지막 5장 결론으로 논문을 끝맺는다.

II. 다중 확장빔 기반 빔그리드 설계

레이더는 정면(Boresight) 조향시 목표 최대탐지거리를 만족할 수 있도록 에너지 버짓을 설계하고 측면 조향시 발생하는 스캔 손실은 추가적인 펄스 누적을 통해 보상한다. 그런데 레이더의 관심 대상이 탐색 영역을 매우 빠른 속도로 지나가는 표적이라면 짧은 스캔 시간이 요구되기 때문에 펄스 누적이 불가능하다. 이를 보상하기 위해 안테나 출력과 크기(이득)를 키울 수밖에 없는데, 안테나 크기를 키우면 식 (1)[8]과 같이 3dB 빔폭이 좁아진다. 이때 θ_{3dB} 는 3dB 빔폭을, λ 는 파장을, 그리고 D 는 안테나 크기를 의미한다.

$$\theta_{3dB} \approx 0.886 \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

빔폭이 좁아지면 같은 영역을 탐색할 때 스캔 수가 그림 1과 같이 증가하므로 에너지에 비례하여 스캔 시간을 줄일 수 없다. 그림 1에서 주황색 원과 회색 원은 각각 좁은빔과 넓은빔을 나타낸다.

우리는 위와 같은 사례의 문제 해결을 위해 다중 송신 확장빔을 적용한 빔그리드 설계를 제안한다. 안테나 크기를 키운 레이더는 출력과 송신 및 수신 이득이 모두 증가하여 과한 에너지 버짓을 갖게 된다. 예를 들어 안테나 크기를 두 배 키웠다면 출력 3dB, 송신이득 3dB, 그리고 수신이득 3dB 총 9dB를 추가적으로 얻게된다. 좁아진 송신빔 대신에 넓은

3dB 빔폭을 합성하여 사용할 수 있다면 송신 이득은 일부 잃지만, 스캔 시간을 효과적으로 단축할 수 있고 원하는 프레임타임을 만족할 수 있게 된다. 다중 송신 확장빔은 여러 개의 확장빔을 생성해서 상황에 맞는 빔을 선택하는 것을 의미한다. 레이더는 빔 조향을 할수록 스캔 손실이 발생하고 조향각이 클수록 빔이 넓어지기 때문에 각도 정확도 또한 저하된다.

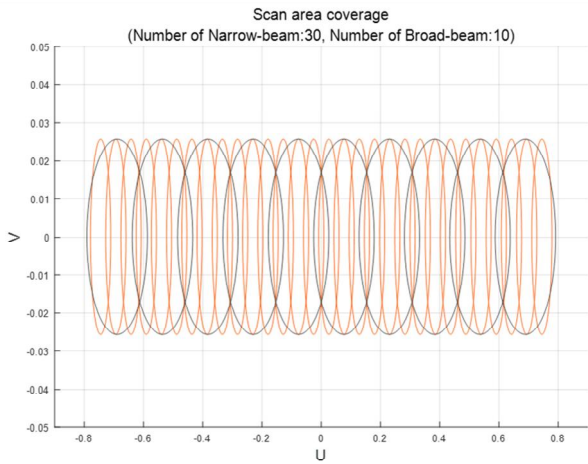


그림 1. 빔폭에 따른 탐색영역 빔그리드 차이
Fig. 1. Search Beamgrid difference according to beamwidth

식 (2)와 같이 표현되는 스캔 손실을 계산해서 에너지가 충분한 구간에서는 넓은 빔을, 크게 감소되는 구간에서는 보다 좁은 빔을 사용하면 탐색 영역에서 최적화된 빔이 선택되어 사용된다. 식 (2)는 Linear scale의 Two-way 스캔 손실이며 u, v 는 각각 안테나 조향각을 ψ 는 off-boresight 각을 의미한다[8].

$$L_{scan} = \cos^2 \psi \quad (2)$$

$$\psi = \cos^{-1}(\sqrt{1 - u^2 - v^2})$$

다중 송신 확장빔 적용 빔그리드 설계 효과는 그림 2와 3의 비교에서 나타난다. 그림 2는 좁은 빔 하나만 활용하여 영역 탐색을 하고 그림 3은 3종류의 확장빔을 활용하여 영역 탐색을 수행하는 예시이다. 좁은 빔만을 사용할 경우 총 136개의 빔을 사용하는데 반해, 다중 확장빔을 사용하면 총 50개의 빔을 사용한다. 이는 탐색 시간이 절반 이하로 감소함을 의미한다. 그림 3에서 손실이 적은 $\pm 40^\circ$ 영역

에서 가장 넓은 빔을 사용하여 탐색 빔 개수를 많이 감소시킨 것이 확인된다. 또한 손실이 큰 $\pm 60^\circ$ 영역에는 좁은 빔을 사용하여 에너지와 각도 정확도를 확보하였다.

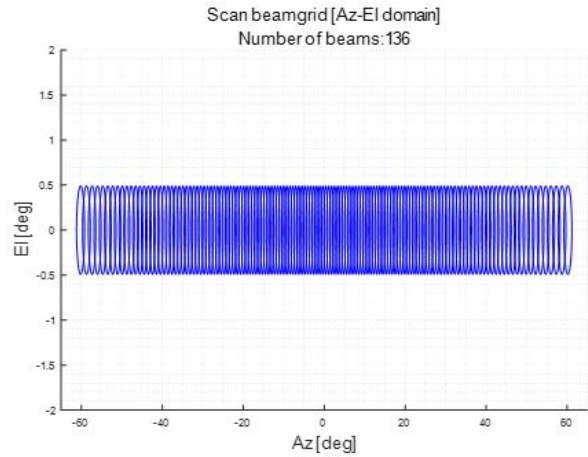


그림 2. 좁은빔 빔그리드 설계 예시
Fig. 2. Example of beamgrid design using narrow beam

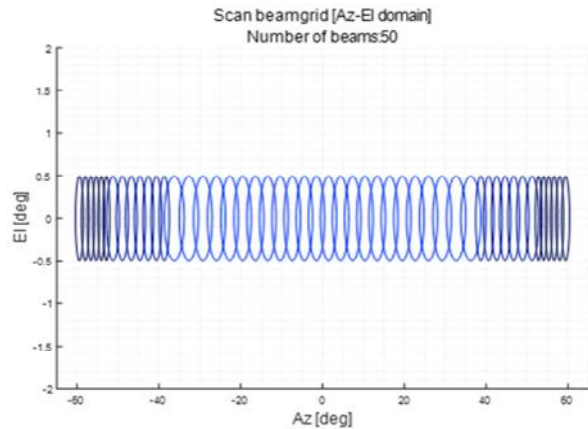


그림 3. 다중 확장빔 빔그리드 설계 예시
Fig. 3. Example of beamgrid design using multiple broaden-beams

송신 확장빔 종류가 변하는 구간에서는 두 종류의 빔 각각의 중첩률이 달라지는 문제가 발생한다. 식 (3)과 같이 넓은 빔을 기준으로 중첩률을 유지하면서 빔그리드 좌표를 설계하면 의도치 않은 에너지 손실을 방지한다. $u_n, \theta_{u_n}, r_{ovl}$ 은 각각 n번째 u 중심점, n번째 빔의 u도메인 3dB 빔폭, 그리고 중첩률을 나타낸다.

$$u_n = u_{n-1} + \frac{\theta_{u_{n-1}}(2r_{ovl} - 1) + \theta_{u_n}}{2} \quad (3)$$

다중 송신 확장빔 활용에는 제약이 있다. 넓어진 송신빔 영역을 커버할 수 있는 넓은 수신빔이 필요하거나 또는 추가 에너지 손실 없는 수신을 위해 그림 4와 같은 다중 수신빔 운용이[4] 필요하다. 그림에서 파란색 원과 검은색 원은 각각 송신빔과 수신빔을 나타낸다. 또한, 원하는 확장빔 합성을 위한 설계가 추가적으로 필요하다. 확장빔 합성은 안테나 소자에 가중치를 곱함으로써 얻을 수 있는데, 가중치는 크기와 위상 모두를 조절할 수 있지만 출력의 저하를 막기 위해 위상 조절만을 이용한 빔합성이 요구된다. 제안하는 확장빔 합성 방법을 다음 절에서 설명한다.

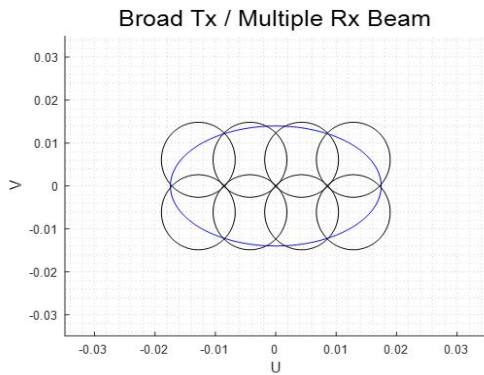


그림 4. 다중 수신빔 예시
Fig. 4. Example of multiple receive beam

III. 경사 하강 위상 조절 빔확장

확장빔 합성을 위해 경사 하강(Gradient descent) 기반 위상 가중치 조절 기법을 적용한다. 경사 하강 기법은 함수의 값을 최소화하기 위해 기울기 (Gradient) 방향을 따라 반복적으로 해를 찾아가는 최적화 방법이다. 반복적 해를 찾는 과정이기에 연산량이 많고 Local minimum에 빠지기 쉽지만, 적절한 목표 함수를 선정해주면 가장 최적의 해를 찾을 수 있는 방법이다.

논문에서 최소화하고자 하는 함수 즉, Cost function은 목표 확장빔 패턴과 현재 가중치로 생성할 수 있는(합성할 수 있는) 패턴의 차이이며 식 (4)와 같이 표현된다. 이때 P_s 는 합성 패턴, \bar{P}_s 는 합성 패턴의 켤레 값, 그리고 P_g 는 목표 함수를 나타낸다.

$$C = \sum_u (P_s \bar{P}_s - P_g^2)^2 \tag{4}$$

합성 패턴 P_s 는 식 (5)와 같다[8]. N, w_n, K, x_n, u 는 각각 안테나 소자 개수, n번째 소자 가중치, wave number, n번째 소자 위치, u 도메인 벡터(-1~1)를 의미한다.

$$P_s = \sum_{n=1}^N w_n \cdot e^{jKx_n u} \tag{5}$$

최적화 과정에서 중요한 점은 확장빔 합성을 위해 가중치 w 를 최적화 하는게 아닌 가중치의 위상만을 최적화하는 것이다. 가중치 자체를 최적화하면 가중치의 크기 값도 바뀌게 되고 이는 최적화의 자유도는 비약적으로 상승시켜 주지만 안테나의 출력을 감소시킨다(증가시키건 물리적으로 불가하다). 이를 위해 우리는 가중치 위상 ϕ 의 최적화를 목표로 한다. 가중치와 위상의 관계식은 식 (6)에서 나타낸다.

$$w = e^{j\phi} \tag{6}$$

결국 가중치 형성을 위한 위상 ϕ 의 최적화를 수행해야 하므로 Cost function 대비 위상의 변화량을 계산해야 한다. 이러한 과정에는 켈레함수가 포함된 복소수 미분을 위해 Wirtinger 미분을 사용한다[9]. Wirtinger 미분과 위상의 변화량 추적을 위해 Chain rule을 활용하면 Cost function 대비 위상의 변화량은 식 (7)과 같이 유도된다.

$$\frac{dC}{d\phi} = \frac{dC}{dP_s} \frac{dP_s}{dw} \frac{dw}{d\phi} + \frac{dC}{d\bar{P}_s} \frac{d\bar{P}_s}{d\bar{w}} \frac{d\bar{w}}{d\phi} + \frac{dC}{dP_s} \frac{dP_s}{d\bar{w}} \frac{d\bar{w}}{d\phi} + \frac{dC}{d\bar{P}_s} \frac{d\bar{P}_s}{dw} \frac{dw}{d\phi} \tag{7}$$

위 수식에 $L = \sum_u (P_s \bar{P}_s - P_g^2)$, $\frac{dC}{dP_s} = 2 \cdot L \cdot \bar{P}_s$, $\frac{dP_s}{dw} = e^{jKx_n u}$, $\frac{dw}{d\phi} = jw$ 를 반영하면 식 (8)과 같이 정리된다.

$$\frac{dC}{d\phi} = (2 \cdot L \cdot \bar{P} \cdot e^{jKxu} \cdot jw) + (2 \cdot L \cdot P \cdot e^{jKxu} \cdot j\bar{w}) \quad (8)$$

변화량을 위상 ϕ 에 반영하고 가중치 w 로 변화해서 패턴을 형성하면 변화량 반영 전보다 목표 확장빔 패턴에 유사해진다. 이러한 연산 과정을 변화량이 수렴할때까지 반복하면 목표 확장빔에 유사한 패턴을 형성한다. 변화량을 위상에 반영하는 방법은 식 (9)에 나타난다. lr은 learning rate로 변화량이 반영되는 비율을 조정하는 파라미터이다. 매 iteration마다 lr비율을 감소시킴으로써(Decay) 수렴 특성을 안정화한다.

$$\phi = \phi - lr \cdot \frac{dC}{d\phi} \quad (9)$$

경사 하강 기반 최적화 방법에서 local minimum에 빠지는 확률을 낮추기 위해 Cost function을 효율적이고 다양하게 조합하는 것이 중요하다. 그림 5에 확장빔 형성을 위한 빔패턴과 마스크 패턴을 표현하였다. 회색, 파란색, 주황색 선이 각각 유니폼빔, 확장빔, 마스크 패턴을 나타낸다. 만약 파란색 그래프가 목표 확장빔 패턴일 때 Cost function을 $(P_s \bar{P}_s - P_g)^2$ 으로 정의하면 매우 복잡한 최적화 문제가 된다.

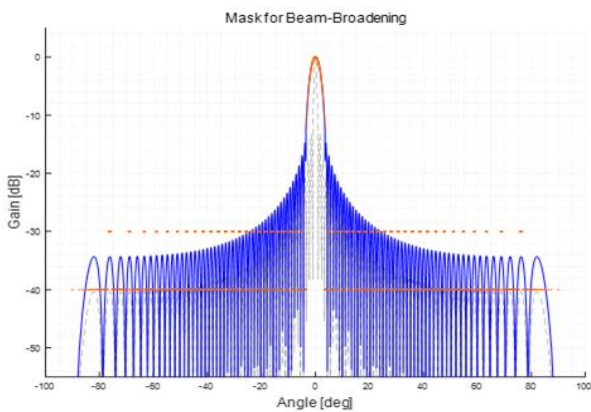


그림 5. 확장빔 합성을 위한 마스크 예시
Fig. 5. Example for broaden-beam synthesis

대신, 주황색으로 표시된 Mask 패턴을 활용해서 Cost function을 $(P_s \bar{P}_s - Mask \cdot P_g)^2$ 으로 정의하면 상

대적으로 최적화 자유도가 올라가고 원하는 패턴을 추출하기 용이해진다. 나아가 Cost function의 변화량 계산은 선형 시스템처럼 동작하기 때문에 원하는 Cost function을 추가하는 방식으로 개선 가능하다. 즉, 주엽 영역 Cost function과 부엽 영역 Cost function을 정의해서 더하면 최적화 과정은 두 Cost function을 최소화하는 방향으로 진행된다.

IV. 시뮬레이션 결과

경사 하강 기반 위상 조절을 이용한 빔합성(4배, 6배, 8배 확장) 결과를 그림 6-8에 각각 제시하였다. 그림의 결과에서 주엽 빔폭이 자연스럽게 확장된 것과 부엽 영역이 과도하게 튀지 않고 억제된 것을 확인할 수 있다. 이는 최적화 기법이 마스크 제약 조건을 따라 효과적으로 수행되었음을 보여준다. 주엽 영역만을 확대하여 비교한 결과를 그림 9에 도시하였다. 회색, 주황색, 노란색, 보라색 선은 각각 1배, 4배, 6배, 8배 확장빔을 나타낸다. 다른 확장빔과 달리 6배 확장빔은 크지 않지만 리플이 발생하고 -9dB 영역에 local peak가 생성된 것이 확인된다. 그림 7의 패턴을 참조하면 부엽 영역의 최적화에 편향되어 부엽 영역의 최적화가 부족했던 것으로 판단되며, 이러한 결과는 마스크와 최적화 함수의 개선 여지가 있음을 시사한다. 2배 확장빔은 [6]에서 분석한 것과 마찬가지로 최적화 자유도 저하로 인해 합성 이득이 저하됨을 확인하였다.

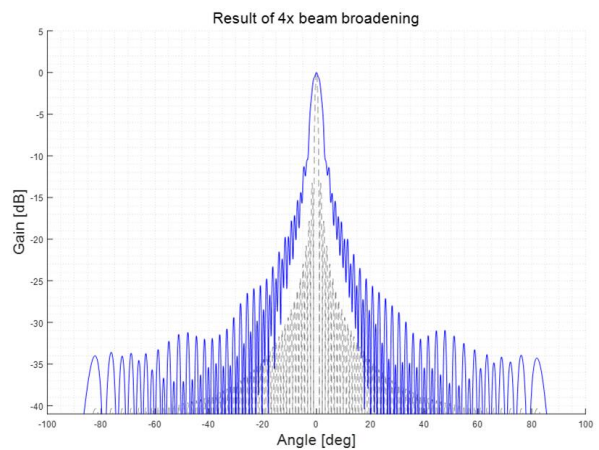


그림 6. 확장빔 합성 결과 4배
Fig. 6. Result of 4x beam broadening

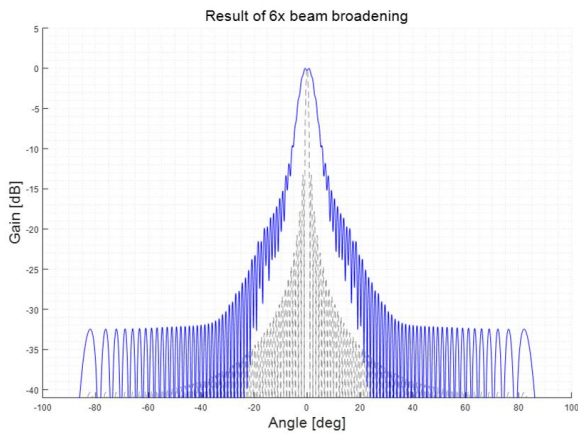


그림 7. 확장빔 합성 결과 6배
Fig. 7. Result of 6x beam broadening

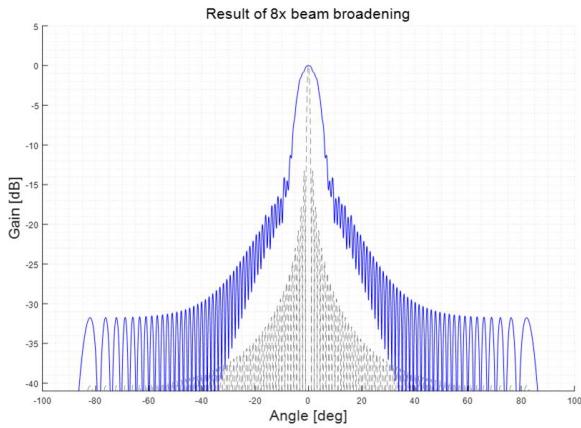


그림 8. 확장빔 합성 결과 8배
Fig. 8. Result of 8x beam broadening

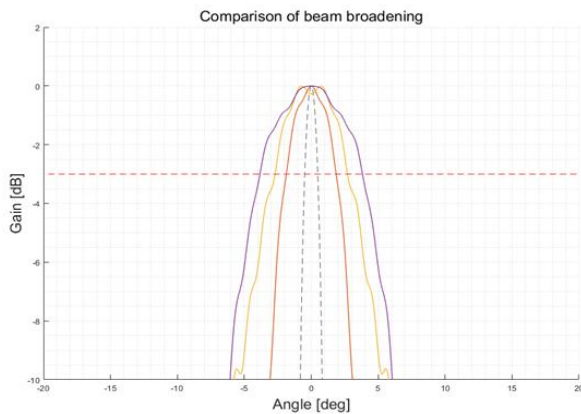


그림 9. 확장빔 주엽 영역 비교
Fig. 9. Comparison of broad-beam mainlobe

2배 빔은 그래프의 식별률이 떨어져서 별도로 제시하진 않았지만, 이득과 빔폭은 표 1과 표 2에 각각 제시하였다. 2배 확장빔의 경우는 마스크와 최적

화 방법 개선을 통한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 1의 이득(Directivity) 수치는 확장빔의 이득이 이론상 얻을 수 있는 값과 비슷하거나 오히려 개선되어서 매우 효과적으로 빔이 합성됐음을 입증한다.

표 1. 확장빔 이득 비교

Table 1. Comparison of broaden-beam directivity

Beam types	Ideal directivity [dB]	broaden-beam directivity [dB]	Difference [dB]
Uniform beam	44.13	-	-
2x beam broadening	41.13	40.45	-0.67
4x beam broadening	38.13	38.21	+0.08
6x beam broadening	36.35	36.34	-0.01
8x beam broadening	35.13	35.46	+0.33

표 2의 3dB 빔폭 측정 결과에서는 확장빔이 의도한 확장 비율과 유사하게 빔폭이 확장되었음을 보여준다. 다만, 6배 확장빔의 경우는 주엽 영역 특성이 좋진 않았던 것과 마찬가지로 확장 비율도 불충분하게 형성되었다.

표 2. 빔별 3dB 빔폭 측정치

Table 2. Measurements of 3dB beamwidth per beam

Beam types	3dB Beamwidth [deg]	Ratio
Uniform beam	0.97	-
2x beam broadening	1.79	1.85
4x beam broadening	3.72	3.84
6x beam broadening	5.41	5.58
8x beam broadening	7.66	7.90

그림 10과 그림 11은 Uniform 빔과 8배 확장 빔의 UV 영역에서의 패턴 비교를 위해 도시하였다. V방향의 빔폭은 유지된채 U방향으로 확장되어 빔폭이 넓어졌다. 패턴의 최대값이 1이 되도록 정규화되어서 Uniform빔과 확장빔의 dB 스케일(컬러맵)은 동일한 범위에서 형성된다. 다만 확장빔은 부엽의

레벨이 넓게 형성되어 이득 자체는 확장 비율에 따라 감소하였다.

$$Scan\ time = N_p \times PRI \times N_{BG} \quad (10)$$

표 3에서는 계산의 간략화를 위해 $N_p = 1$, $PRI = 1ms$ 로 가정한다.

표 3. 스캔 타임 비교
Table 3. Comparison of scan time

	Beamgrid using narrow beam	Beamgrid using multiple Broaden-beams
Scan time	0.479 s	0.165 s

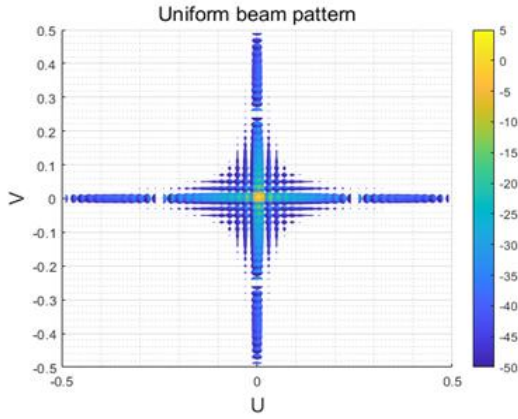


그림 10. 유니폼빔 패턴
Fig. 10. Pattern of niform beam

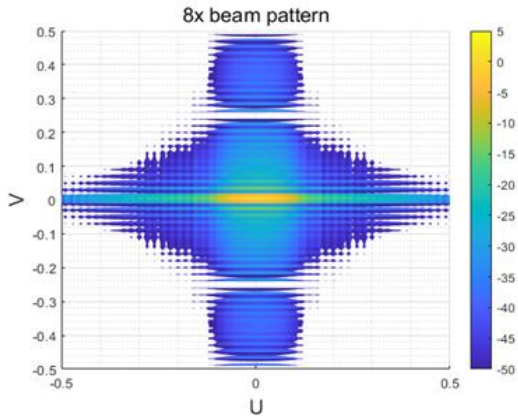


그림 11. 8배 확장빔 패턴
Fig. 11. Pattern of 8x broadening beam

일반적인 빔그리드 설계와 생성된 확장빔 기반 빔그리드 설계를 수행하면 각각 그림 12, 13과 같은 결과가 도출된다. 확장빔 기반 빔그리드 설계시 스캔에 필요한 빔개수가 약 1/3로 감소하였다. 이때 빔폭이 변하는 구간은 식 (2)와 같이 배열 레이다의 스캔 손실 증가 비율에 맞춰 설정하였고 식 (3)에 따라 중첩률을 적용하였다. 표 3에서는 좁은빔을 사용할 때와 다중 확장빔을 사용할 때의 스캔 시간을 비교하였다. 스캔 시간은 영역을 탐색하는데 소요되는 시간이다. 레이다가 한 방향을 탐색할 때 사용하는 펄스의 간격이 PRI(Pulse Repetition Interval), 펄스의 개수가 N_p 그리고 빔그리드 개수가 N_{BG} 이면 스캔 시간은 식 (10)과 같이 계산된다.

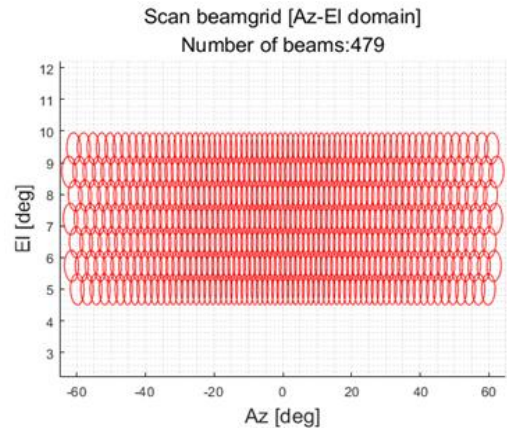


그림 12. 좁은빔 빔그리드 설계 결과
Fig. 12. Result of beamgrid design using narrow beam

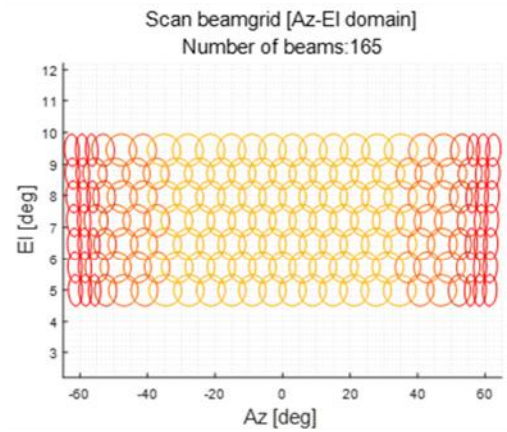


그림 13. 다중 확장빔 빔그리드 설계 결과
Fig. 13. Result of beamgrid design using multiple broaden-beams

제안하는 방법의 전체 흐름도를 그림 13에 나타낸다. 파란색으로 표현된 블록이 각각 경사 하강 위상 조절 빔확장과 다중 확장빔 기반 빔그리드 설계

이다. 레이다의 제원과 에너지 버짓을 고려하여 다양한 확장빔을 생성하고, 생성된 확장빔을 기반으로 빔그리드를 설계한다. 확장빔과 에너지 버짓을 기반으로 파형을 설계하면 레이다 스캔 시간이 계산된다. 스캔 시간을 더 조절해야하면 확장빔 생성 단계부터 과정을 반복하며 최적화를 수행한다.

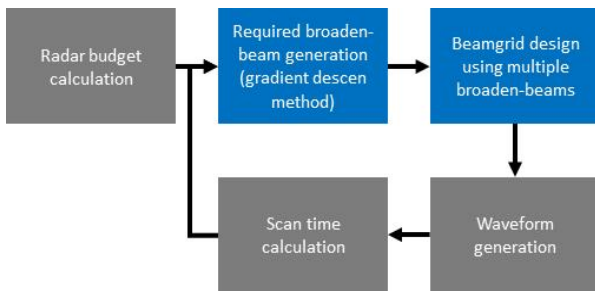


그림 13. 제안 방법의 흐름도
Fig. 13. Flow chart of proposed method

이렇듯 시뮬레이션 결과는 제안 방법으로 확장빔의 자유로운 생성이 가능하고 레이다 스캔 시간을 획기적으로 감소시킴으로써 레이다 시간 자원을 최적화할 수 있음을 증명한다. 모델링 및 시뮬레이션을 위해 사용한 파라미터는 표 4에 나열한다.

표 4. 시뮬레이션 파라미터
Table 4. Simulation parameter

Parameter	Value	Parameter	Value
Frequency	S-band	u, v interval	0.001
Number of Elements (linear array)	104	Elements interval	0.0484 m
Number of Iteration	200	learning rate	0.03
learning rate decay	0.98	Pulse repetition Interval	1 ms

V. 결 론

본 논문에서는 레이다 스캔 타임 최적화를 위한 확장빔 운용 방안과 확장빔 생성을 위한 경사 하강 위상 조절 기법을 제안했다. 다양한 빔폭의 확장빔을 보유하면, 빔조향시 에너지 버짓에 따라 적합한 송신빔을 선택하여 탐색 영역 스캔에 필요한 빔의 개수를 감소시킴으로써 탐색 시간을 최적화 할 수

있다. 이를 위해 최적 송신빔을 선택하여 빔그리드를 설계하는 방법과 원하는 빔폭의 빔패턴을 합성할 수 있는 경사 하강 기반 위상 조절 기법을 구체적으로 제시하였고, 시뮬레이션 결과를 통해 다양한 확장빔이 적합하게 형성됨을 증명하였다.

제안 방법은 새로운 개념의 연구 주제는 아니지만, 독립적으로 연구되던 내용을 통합하여 현실적인 활용 방안과 구체적인 구현 방법을 제시한 것에 의의가 있다.

향후 확장빔 생성시 유효한 초기치를 설정하여 최적화를 개선하는 방법과 최적화에 소요되는 시간 단축 방법에 관한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 이러한 점이 개선되면 제안 방법이 레이다 체계 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. J. Orman, C. N. Potts, K. A. Shahani, and A. R. Moore, "Scheduling for a multifunction phased array radar system", *European Journal of operational research*, Vol. 90, No. 1, pp. 13-25, Apr. 1996. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00307-x](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00307-x).
- [2] B. Li, L. Tian, D. Chen, and Y. Han, "A task scheduling algorithm for phased-array radar based on dynamic three-way decision", *Sensors*, Vol. 20, No. 1, Art. no. 153, Dec. 2019. <https://doi.org/10.3390/s20010153>.
- [3] P. B. Cox and W. L. van Rossum, "Split-aperture phased array radar resource management for tracking tasks", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 61, No. 3, pp. 6476-6486, Jun. 2025. <https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3531843>.
- [4] J. C. Kerce, G. C. Brown, and M. A. Mitchell, "Phase-only transmit beam broadening for improved radar search performance", *IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, USA, pp. 451-456, Apr. 2007. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2007.374259>.
- [5] H. Lebret and S. Boyd, "Antenna array pattern synthesis via convex optimization", *IEEE*

transactions on signal processing, Vol. 45, No. 3, pp. 526-532, Mar. 1997. <https://doi.org/10.1109/78.558465>.

- [6] G. C. Brown, J. C. Kerce, and M. A. Mitchell, "Extreme beam broadening using phase only pattern synthesis", IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, pp. 36-39, Jul. 2006. <https://doi.org/10.1109/SAM.2006.1706079>.
- [7] L. Maman, S. Zach, and A. Boag, "Beam Shaping by Phase-Only Waveform Encoding for Transmitting Array Antennas in Radar Applications", IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, Vol. 6, No. 2, pp. 478-486, Apr. 2025. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2025.3529505>.
- [8] D. K. Barton, "Radar system analysis and modeling", Artech House, 2004.
- [9] P. J. Schreier and L. L. Scharf, "Statistical Signal Processing of Complex-Valued Data", Cambridge University Press, 2010.

양 은 정 (Eunjung Yang)



2004년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과 (공학사)
2006년 8월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과 (공학석사)
2011년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학과 (공학박사)
2011년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리

저자소개

손 제 경 (Jegyung Son)



2015년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학사)
2018년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학석사)
2018년 6월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리,

레이더 성능분석

홍 성 원 (Sungwon Hong)



2010년 2월 : 경북대학교
전자전기컴퓨터학부 (공학사)
2012년 2월 : 경북대학교
모바일통신공학과 (공학석사)
2017년 2월 : 경북대학교
전자공학부 (공학박사)
2017년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템, 레이더 신호/데이터 처리