

## 도파관 슬롯 배열을 이용한 비주기 부배열의 최적화 설계

# Design and Validation of Aperiodic Subarrays Using Waveguide Slot Arrays

오 명 준<sup>1</sup> · 최 원 민<sup>2</sup> · 황 금 철<sup>3</sup>

Myeong-Jun Oh<sup>1</sup> · Won-Min Choi<sup>2</sup> · Keum-Cheol Hwang<sup>3</sup>

### 요 약

도파관 슬롯 배열은 낮은 전송 손실과 고출력 운용이 가능하여 대형 배열 안테나 구현에 적합하다. 본 논문에서는 2×2 슬롯 배열 기반의 비주기 부배열을 설계하고 제작·검증을 수행하였다. 슬롯 수에 따라 균일 및 비균일 전력 분배기를 적용하였으며, GLPSO(genetic learning particle swarm optimization)를 활용하여 슬롯 간 위상 균일성을 확보하였다. 측정 결과, 2.8~3.0 GHz 대역에서  $|S_{11}| \leq -10$  dB 특성을 보였고, 이득과 부엽레벨은 시뮬레이션과 잘 일치하였다. 전체 24×24 배열은 중심 주파수에서 35.4 dBi의 최대 이득을 달성하였으며, 0°~10° 빔 조향 범위에서 부엽 억제 효과가 확인되었다. 이를 통해 제안된 부배열 설계의 실용 가능성을 검증하였다.

### Abstract

Waveguide slot arrays provide low transmission losses and high power capabilities, making them suitable for large-scale antenna systems. This paper presents the design and experimental validation of an aperiodic subarray based on a 2×2 slot configuration. Uniform and non-uniform power dividers were applied depending on the slot distribution, and genetic learning particle swarm optimization (GLPSO) was used to ensure phase uniformity. The measured gain and sidelobe levels were consistent with those of the simulations. The complete 24×24 array achieved 35.4 dBi gain at 2.9 GHz and demonstrated sidelobe suppression within a 0~10° beam steering range. These results verified the feasibility of the proposed subarray design for practical waveguide slot array applications.

Key words: Waveguide Slotted Array, Subarray, Aperiodic Array, Optimization, FoV(Field of View)

### I. 서 론

전자주사식 배열(ESA) 안테나는 고이득과 빠른 빔 조향이 가능하여 레이더 및 위성통신에 널리 활용된다<sup>[1]</sup>. 그러나 능동 위상 배열 안테나(APAA)는 각 채널마다 위

상천이기와 송수신 모듈(TRM)이 필요해 대규모 구현 시 비용이 급격히 증가하는 한계가 있다<sup>[2]</sup>. 이를 완화하기 위해 부배열 개념이 적용되지만, 주기적 배열은 작은 빔 조향에서도 그레이팅 로브가 발생한다. 따라서 이를 억제할 수 있는 비주기 부배열 구조 연구가 요구되며, 기존 연

「이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-22-021, 우주공간 신호정보 특화 연구실).」

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

1: 박사과정(<https://orcid.org/0009-0004-9760-4763>), 2: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0009-0005-8316-5189>)

3: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received September 15, 2025 ; Revised October 2, 2025 ; Accepted October 15, 2025. (ID No. 20250915-101)

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

구는 주로 배열 배치 알고리즘에 집중되어 실제 도파관 기반 구현·검증 사례는 부족하다.

본 논문에서는 도파관 슬롯 배열 기반의 비주기 부배열 최적 설계 방법을 제안한다. 균일·비균일 전력 분배기와 GLPSO 최적화를 통해 슬롯 간 위상 균일성을 확보하고, 제작·측정을 통해 설계의 타당성을 검증하였다. 이를 전체 배열에 적용하여 빔 조향 특성을 분석하였으며, 연구 결과는 비주기 부배열의 실용성과 향후 고성능 배열 안테나 설계에의 활용 가능성을 보여준다.

## II. 제안된 부배열 구조

그림 1은 제안된 도파관 슬롯 배열 기반 부배열의 전체 구조를 보여준다. 그림 1(a) 및 그림 1(b)는 참고문헌 [3] 및 참고문헌 [4]에서 제안된 부배열 구조 및 가중치 최적화 알고리즘을 적용하여 도출된 후보 부배열을 나타낸다. 다양한 부배열 형태는 부엽 레벨(SLL)을 낮추는 데 유리하지만, 제작 용이성과 구현 가능성을 고려하여 본 연구에서는 다섯 종류 부배열을 최종적으로 선정하였다. 그림 1(c) 및 그림 1(d)는 그림 1(b)의 1사분면 배열을 기준으로 원점 대칭 배치를 적용하여, 동일한 구조를 2·3·4사분면에 복제함으로써 설계한 24×24 배열의 후면부와 3차원 형상을 각각 나타낸다.

그림 2는 본 연구에서 최종적으로 채택한 다섯 가지 부

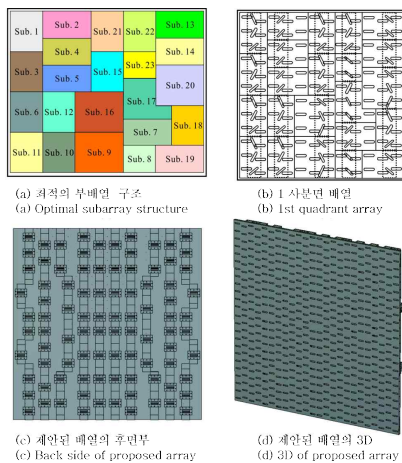


그림 1. 제안된 도파관 슬롯 배열의 구조  
Fig. 1. Structure of proposed waveguide slot array.

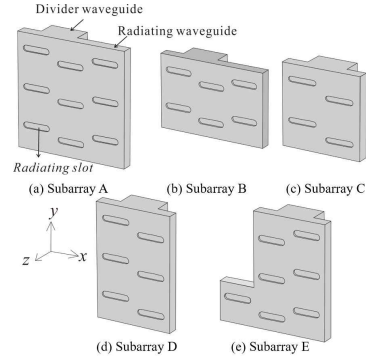


그림 2. 제안된 부배열의 구조  
Fig. 2. Structure of proposed subarray.

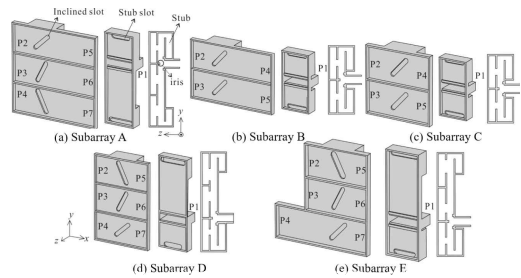


그림 3. 전력 분배 도파관의 구조  
Fig. 3. Structure of divider waveguide.

배열(A~E)의 형상을 보여준다. 각 부배열은 방사 슬롯 개수와 분배 도파관 구성이 달라 서로 다른 전력 분배 특성과 방사 특성을 갖는다.

그림 3은 그림 2에서 제시한 다섯 가지 부배열의 전력 분배 도파관 구조를 나타낸다. 부배열 B와 C에는 대칭형 1×2 분배기를 적용하였으며, A와 D에는 1×3 균일 분배기를 사용하였다. 반면 부배열 E는 슬롯 수가 달라 비균일 1×3 분배기를 설계하여 슬롯 수가 많은 도파관에 더 많은 전력이 공급되도록 하였다. 시뮬레이션 결과, 분배기의 출력 전력은 이론값과 잘 일치하였고, 출력 포트 간 위상 차도 2° 이내로 유지되어 급전 단계의 위상 불균형이 최소화됨을 확인하였다.

## III. 최적화 알고리즘 및 결과

실제 방사 도파관 내부 슬롯에서의 전계 위상은 분배기 출력 위상에 더해 전파 경로와 구조적 불연속의 영향

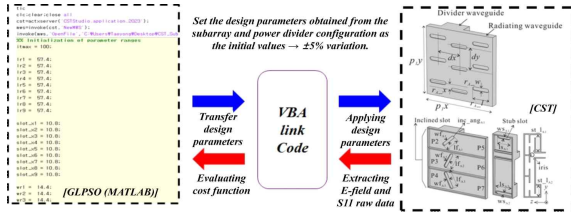


그림 4. 제안된 비주기 부배열을 위한 최적 설계 알고리즘  
Fig. 4. Optimal design algorithm for proposed aperiodic subarray.

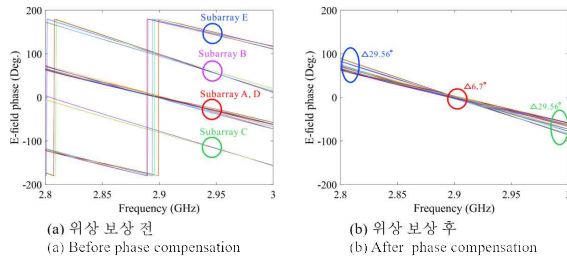


그림 5. 제안된 부배열 종방향 슬롯의 여기된 전기장 위상  
Fig. 5. Excited E-field phase of proposed subarray at longitudinal slot.

을 받으므로, 슬롯 간 위상 편차는 더 크게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 이러한 슬롯 간 위상 불균일을 보정하기 위하여 GLPSO(genetic learning particle swarm optimization) 기반 알고리즘을 적용하였다<sup>5)</sup>.

그림 4는 MATLAB과 CST를 연동하여 구현한 최적화 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 최적화 과정에서 고려된 비용 함수는 슬롯 간 전계 위상 균일성을 최우선 목표로 하고, 반사 손실과 전력 분배 오차를 제약 조건으로 함께 반영하였다.

본 연구에서는 단순 PSO가 국소 최적해(local optimum)에 빠질 수 있다는 한계를 보완하기 위해, 유전 알고리즘(GA)의 학습 기능을 결합한 GLPSO를 적용하였다. 그 결과 초기 세대에서 슬롯 간 위상 편차가 약 11.9°였으나, 세대가 진행될수록 점진적으로 개선되어 최종적으로 6.7° 이내로 수렴하였다.

그림 5는 위상 보상 전·후의 전계 위상 분포를 비교한 결과로, 최적화 후 모든 부배열에서 슬롯 위상 균일성이 향상되어 전체 배열의 빔 특성이 개선됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 제작 및 검증

그림 6은 제작된 비주기 도파관 슬롯 부배열의 시제품을 보여준다. 방사 도파관과 전력 분배 도파관은 WR284 half-height 규격을 기반으로 알루미늄 소재를 가공하여 제작하였다. 제작된 시제품의 특성은 웨이브가이드용 TRL 캘리브레이션을 수행한 네트워크 분석기를 통해 측정되었으며, 측정 시 전이 어댑터를 포함한 기준면을 설정하여 불연속에 따른 영향을 최소화하였다. 해당 전이 어댑터는 중심 주파수 2.9 GHz에서 약 0.0006 dB의 낮은 전환 손실을 보여 측정의 정확성을 확보하였다.

그림 7은 그림 6에서 제작된 부배열의 active S-parameter를 나타낸다. 2.8~3.0 GHz 대역에서 -10 dB 이하의 반사 특성이 측정되었으며, 시뮬레이션과 결과가 잘 일치하였다. 이를 통해 제안된 부배열의 임피던스 정합이 확인되었다.

그림 8은 azimuth 방향 조향 결과로, 중심 주파수(2.9 GHz)에서 최대 이득이 35.4 dBi로 확인되었으며, 주엽은 원하는 방향으로 정확히 형성되었다. 특히 azimuth 4° 방향에서 최대 6.2 dB의 부엽 억제 효과가 나타나, 비주기

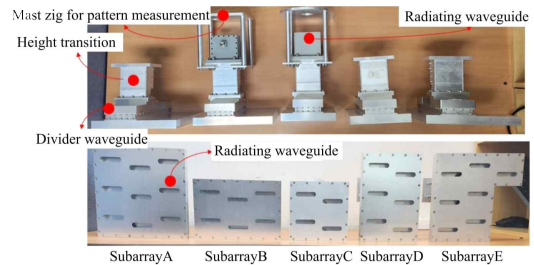


그림 6. 제작된 부배열 시제품 사진  
Fig. 6. Fabricated subarray shape.

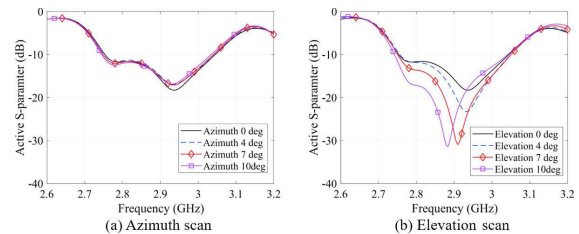


그림 7. 능동 S-파라미터  
Fig. 7. Active S-parameter.

## V. 결 론

본 논문에서는 도파관 슬롯 배열 기반의 비주기 부배열 최적 설계 방법을 제안하였다. 기존 연구 [3], [4]가 알고리즘적 최적화 수준에 머문 것과 달리, 본 연구에서는 도파관 슬롯 배열 기반으로 실제 제작 및 검증을 수행하여 비주기 부배열 설계의 실용성을 입증하였다. 제안된 구조는 균일 및 비균일 전력 분배기와 GLPSO 기반 최적화를 통해 위상 균일성을 확보하였으며, 2.8~3.0 GHz 대역에서 -10 dB 이하의 반사 특성을 보였다. 전체 24×24 배열은 중심 주파수에서 35.4 dBi의 최대 이득을 달성하고, 10° 이내 빔 조향에서 부엽 억제 효과가 확인되어 실용적 적용 가능성을 검증하였다. 특히 uniform feeding 대비 non-uniform feeding 구조는 azimuth 4° 조향에서 약 6 dB 이상의 부엽 억제를 달성하여 성능 향상 효과를 입증하였다. 추후 광대역 확장 및 대형 배열 적용 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] J. Yun, D. Park, D. Jang, and K. C. Hwang, "Design of an active beam-steering array with a perforated wide-angle impedance matching layer," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 9, pp. 6028-6033, Sep. 2021.
- [2] T. K. Sarkar, R. J. Mailloux, A. A. Oliner, M. Salazar-Palma, and D. L. Sengupta, *History of Wireless*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006.
- [3] T. Jeong, K. Oh, J. Y. Jung, and K. C. Hwang, "Field of view analysis of active phased array antenna with subarray TRM," *The Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 3, pp. 190-205, Mar. 2022.
- [4] T. Jeong, J. Yun, K. Oh, J. Kim, D. W. Woo, and K. C. Hwang, "Shape and weighting optimization of a subarray for an mm-Wave phased array antenna," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 6803, Jul. 2021.
- [5] Y. J. Gong, J. J. Li, Y. Zhou, Y. Li, H. S. H. Chung, and Y. H. Shiet al., "Genetic learning particle swarm optimization," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 46, no. 10, pp. 2277-2290, Oct. 2016.

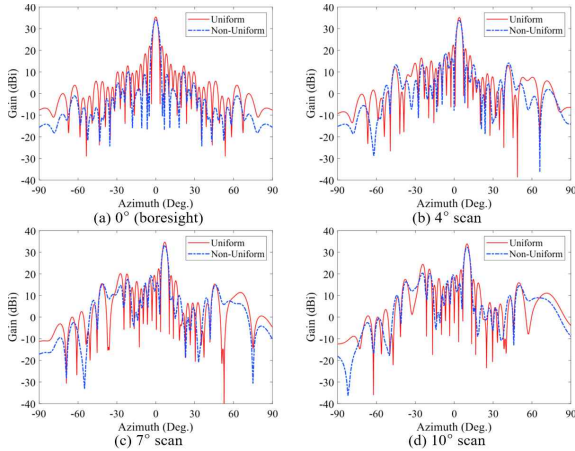


그림 8. Azimuth 방향 빔 조향 시 방사 패턴( $f_c=2.9$  GHz)  
Fig. 8. Radiation pattern when scanning direction of azimuth ( $f_c=2.9$  GHz)

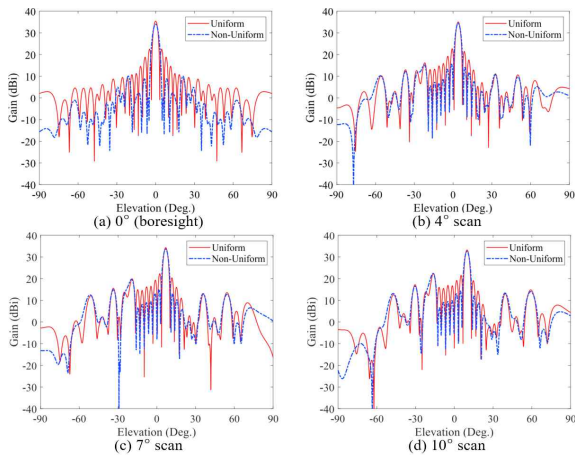


그림 9. Elevation 방향 빔 조향 시 방사 패턴( $f_c=2.9$  GHz)  
Fig. 9. Radiation pattern when scanning direction of elevation ( $f_c=2.9$  GHz).

부배열 설계의 의도가 전체 배열에서도 성공적으로 구현되었음을 보여준다. 동일 조건에서 uniform feeding 구조는 부엽 억제 효과가 제한적이었으나, non-uniform feeding 구조에서는 뚜렷한 개선 효과가 확인되었다.

그림 9는 elevation 방향 조향 결과로, 0°~10° 범위에서 주엽이 안정적으로 형성되었으나 고각이 증가할수록 일부 부엽이 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 배열의 테이퍼링 효과와 그레이팅 로브 발생에 기인하는 것으로 판단된다.