

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.5.87>  
JIIBC 2022-5-13

## AESA 레이더 광각 빔조향 특성을 고려한 복사소자 설계 기법

### Radiator Design Method considering Wide-Angle Beam Steering Characteristics of AESA Radar

김영완\*, 채희덕\*, 안세환\*, 주지한\*

Young-Wan Kim\*, Hee-Duck Chae\*, Se-Hwan An\*, Ji-Han Joo\*

**요약** 본 논문에서는 탐색기용 AESA 레이더에 적용할 수 있는 배열소자 설계에 관한 연구를 수행하였다. AESA 레이더에 적용하기 위한 안테나는 전자 빔조향 특성을 확보하기 위해 배열 안테나에 적용할 최적의 복사소자를 선정하고, 설계 시 빔조향 특성을 고려하여야 한다. 특히 광각 빔조향 특성을 충족하기 위해 광각 임피던스 매칭(WAIM: Wide Angle Impedance Matching) 기법을 활용하여 광각 조향 시 발생할 수 있는 음영 지역(Scan Blindness region)을 최소화하여야 한다. 이처럼 시스템 운용의 안정성 확보가 AESA 레이더의 중요한 설계 고려 사항이 되고 있다. 본 논문에서는 AESA 레이더 안테나 장치에 적용되는 복사소자 특성을 개선하기 위해 복사소자 끝단에 WAIM을 적용하고, 시스템의 안정적 운용 척도인 능동 반사 계수 성능 변화를 검토하였다. 최종 성능 결과는 시뮬레이션 데이터를 수학적으로 합성하여 제시한 방안의 유효성을 검증하였다.

**Abstract** In this paper, a study was conducted on the design of an array element that can be applied to the AESA radar for seeker. An antenna for application to AESA radar should choose an optimal radiation element to be applied to an array antenna in order to secure electrical beam steering characteristics, and consider beam steering characteristics when designing. In particular, in order to satisfy the wide-angle beam steering characteristics, the wide-angle impedance matching technique should be used to minimize the scan blindness region that may occur during wide-angle steering. As such, securing the stability of system operation is becoming an important design consideration for AESA radar. In this paper, WAIM is applied to the end of the radiation element to improve the characteristics of the radiation element applied to the AESA radar antenna device, and the change in the performance of the active reflection coefficient, which is a stable operation index of the system, is reviewed. The final performance result verified the validity of the proposed method by mathematically synthesizing the simulation data.

**Key Words** : Active reflection coefficient, AESA, WAIM

\*정회원, LIG넥스원  
접수일자 2022년 8월 11일, 수정완료 2022년 9월 11일  
게재확정일자 2022년 10월 7일

Received: 11 August, 2022 / Revised: 11 September, 2022 /  
Accepted: 7 October, 2022

\*Corresponding Author: youngwan.kim@lignex1.com  
Dept. of RF/Microwave R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

## I. 서 론

전자기파를 표적에 발사시켜 그 표적으로부터 반사되는 전자기파를 수신하여 표적과의 거리, 방위각, 고각 정보를 획득하는 장치인 레이더 (RADAR : Radio Detection and Ranging)는 제 1차 세계 대전을 거쳐 위상 배열인 AESA (Active Electronically Scanned Array)방식으로 발전되고 있다.<sup>[1]</sup> 레이더에 적용되는 안테나는 배열안테나 형태로 고이득에 좁은 빔폭을 가지는 빔 형태를 유지하여야 한다. 이러한 위상배열 구조에서 안테나는 주파수에 따른 파장 길이에 따라 배열 구조 및 개수가 정해지게 된다. 최근에는 레이더 뿐만 아니라 탐색기에 적용되는 안테나 장치도 기존의 김발 구도에 의한 기계적인 빔조향이 아닌 AESA 방식을 이용한 전자 빔 조향 방식을 적용하고 있는 추세이다. AESA 방식을 사용할 경우 배열구조의 모든 채널에 고가의 TRM이 장착되기 때문에 경제적인 이유로 배열소자의 개수를 최소화하기 위해 배열 간격을 최대한 넓게 설계한다. 하지만, 배열 간격을 넓히면, 배열구조의 주기성에 의해 가시영역(Visible Range)내에 주빔과 동일한 크기의 부엽이 발생하여 AESA 구조의 빔조향 범위가 제한되는 등 시스템 운용에 제한이 발생한다. 이러한 그레이팅 로브를 피하기 위해 배열 간격은 주파수에 따라 정해지며, 이렇게 밀집된 배열 구조의 모든 채널에서 신호를 발생시킬 경우 채널간의 상호 결합량이 증가하게 되어 채널별로 반사되는 신호의 크기가 커지며, TRM 수신 가능 레벨 이상의 신호가 채널로 반사되면 채널이 오동작하게 되어 시스템 운용이 불가능해진다.<sup>[2][3]</sup>

특정 채널의 자기 반사계수에 타 채널간의 상호결합량이 더해진 능동 반사 계수는 실제 송신 시 주파수 및 빔 조향에 따라 변하는 계수로서 배열안테나 복사소자 설계 시 고려되어야 하는 중요한 파라미터이다.

본 논문에서는 Ka 대역에서 동작하는 AESA 배열소자 설계 시 능동 반사 계수를 최소화 할 수 있는 구조에 대해 검토하였다. 빔조향 범위  $\pm 40^\circ$ 내에서 능동 반사 계수를 계산하였고, 능동 반사 계수를 최소화하기 위한 구조 적용 여부에 따른 능동 반사 계수 개선량을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션은 CST사의 MWS를 이용하여 부배열 구조의 S-파라미터를 추출하여 수학적 으로 합성하여 주파수, 빔조향각에 따른 능동 반사 계수를 비교하였다.

II장에서 능동 반사계수에 대한 개념 및 시뮬레이션을 통한 검증 방법에 대해 간략히 설명하고, III장에서는 실

제 적용 된 구조를 소개하고, V장에서 시뮬레이션 결과를 통해 유효성을 검증하였다.

## II. 능동 반사 계수 개념 및 검증방안

능동 반사 계수는 능동 위상 배열안테나의 송신 시 발생하는 배열 소자간 상호 결합 영향을 고려한 수치로 능동 위상 배열 안테나의 성능을 가늠하는 척도가 된다. 능동 위상 배열 안테나는 주로 배열 소자의 위상을 조절하여 빔을 컨트롤하기 때문에 능동 반사 계수는 배열 소자의 위상 분포에 따라 바뀌게 된다.<sup>[4][5][6]</sup> 레이더 및 탐색기에 적용되는 능동 위상 배열안테나는 주파수, 빔 조향각, 운용 모드 등에 따라 배열 소자의 위상 상태가 바뀌므로 능동 반사 계수는 설계 및 시험 평가 단계에서 세심하게 고려되어야 하는 요소이다. 운용 주파수별 전 채널의 평균 능동 반사 계수 증가는 운용 빔의 이득에 손실을 초래하며, 주파수별 최대 능동 반사 계수의 증가는 TRM을 손상시켜 MTBF(Mean Time Between Failure)를 감소시킨다. 일반적인 능동 위상 배열안테나의 능동 반사 계수 정의는 다음과 같다. 그림 1에서 보는 것처럼 N번째 TRM의 출력  $a_N$ 이 N번째 안테나를 통해 자기반사되는 성분을  $S_{N,N}$ 이라고 하고, 임의의 M번째 안테나로부터 상호 결합되는 성분을  $S_{N,M}$ 이라고 한다면 N번째 포트에 넘어오는 총 반사 성분  $b_N$ 은 다음과 같이 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$b_N = \dots + S_{N,N-1}a_{N-1} + S_{N,N}a_N \quad (1)$$

$$+ S_{N,N+1}a_{N+1} + \dots$$

최종적으로 N번째 포트에서의 능동 반사 계수는 다음의 식으로 정의될 수 있다.

$$\Gamma_N^{active} = \frac{b_N}{a_N} = \sum_M C_{N,M} \quad (2)$$

$$C_{N,M} = S_{N,M} \cdot \frac{a_M}{a_N} \quad (3)$$

동일한 TRM의 출력을 가정하면 능동 반사 계수는 식 (4)와 같이 주파수의 함수가 되며, 빔 조향각을 고려한 식은 (5)와 같이 표현될 수 있다.

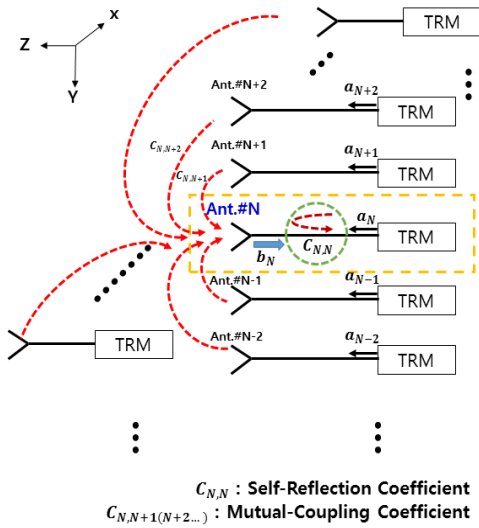


그림 1. 능동 반사 계수 개념도  
Fig. 1. Conceptual diagram of active reflection coefficient

$$I_N^{active} = W_{uniform} \sum_{n=1}^M C_{N,M} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_n} \quad (4)$$

$W_{uniform}$  : uniform weight of elements  
 $\vec{k}$  : vector wave number  
 $\vec{r}_n$  : position vector

$$I_N^{active,steering} \quad (5)$$

$$= W_{uniform} \sum_{n=1}^M C_{N,M} e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_n} \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \Delta\Psi_{steer}}$$

$\Delta\Psi_{steer}$  : Phase Variation due to the beam steering

능동 반사 계수는 AESA 시스템 운용 중에 계속적으로 변하게 된다. 시뮬레이션 검증은 MWS를 통해 모든 출력 포트에서  $S_{N,M}$  값을 추출하여 식(5) 기반의 수학적 계산을 통해 주파수, 빔 조향각에 따른 능동 반사 계수의 최대, 평균값을 예측할 수 있다.<sup>[7][8]</sup>

### III. 능동 반사 계수 개선 구조

본 논문에서 능동 반사 계수 성능을 검증하기 위해 적용한 X-대역 배열 구조는 주파수에 따른 파장 길이를 고려하여 표 1과 같이 배열 간격을 결정하였다.

표 1. 위상배열안테나 구조

Table 1. Configuration of phase array antenna

| Parameter      | Design Objective |
|----------------|------------------|
| Frequency      | X-Band           |
| Dx/Dy (mm/mm)  | 15 / 15.3        |
| Nx/Ny          | 13 / 13          |
| Weight         | Uniform          |
| Steering Range | $\pm 45^\circ$   |

배열소자는 일반적인 exponential 형상의 Norch 안테나를 변형하여 상호 결합 및 소형화 설계가 가능한 형태인 Step Flare Notch(SFN) 구조를 제안하였다. SFN의 형상은 그림 2와 같이 복사부가 계단 형태로 배열 시 인접 소자와의 결합량을 최소화하며 전체 방사소자의 길이를 최소화할 수 있는 구조이다.

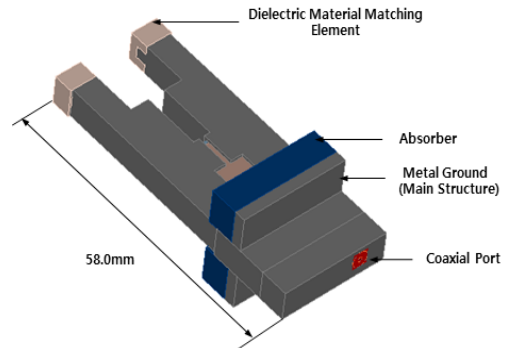


그림 2. SFN 형상

Fig. 2. SFN configuration

SFN은 광대역 복사소자로 발룬 구조를 통해 급전되는 안테나이다. 계단 형태로 인해 상호 결합 및 소형화 효과를 가진 SFN의 능동 반사 계수 최적화를 위해 그림 3처럼 복사소자 끝단에 유전체 캡을 적용하고 배열 소자 사이에 Isolated Slot을 적용하였다.

그림 3처럼 배열소자 사이에 Isolated Slot을 적용하여 전체 배열소자 송수신 간의 결합량을 조절할 수 있다. Slot의 길이를 최적화하면 채널 기준 자기반사계수 및 상호 결합 계수의 위상을 조절할 수 있어, 능동 반사 계수 최적화를 수행할 수 있다. 상호 결합 계수의 위상을 조절하여 자기반사계수와 180도 위상차를 유지시켜 능동 반사 계수를 최소화 할 수 있었다.

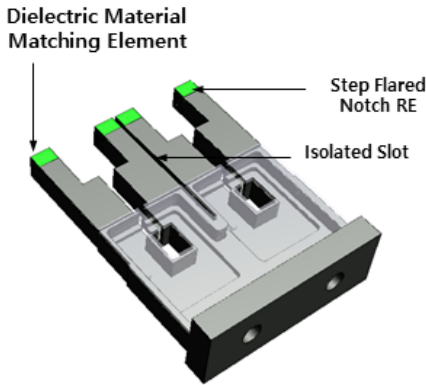


그림 3. SFN 배열 간 슬롯 구조  
Fig. 3. Slot structure of SFN array

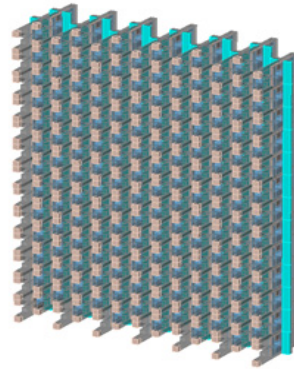


그림 5. 13by13 시뮬레이션 형상  
Fig. 5. 13by13 simulation configuration

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 추가적으로 능동 반사 계수의 성능 개선을 검토하기 위해 그림 4와 같이 Wide-Angle Impedance Matching(WAIM) 구조를 적용하였다. 그림 4와 같이 기본적으로 능동 반사 계수가 최적화된 SFN 구조 전면에 WAIM을 적용하였다.

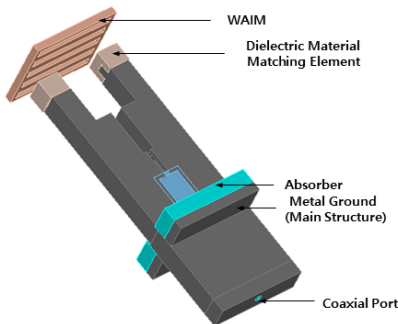


그림 4. WAIM 형상  
Fig. 4. WAIM configuration

WAIM 구조의 유효성을 검증하기 위해 13by13 구조로 확장한 배열 구조의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 형상은 그림 5와 같으며, 13by13 구조의 중심 소자를 기준으로 시뮬레이션을 수행하여, 중심 소자 기준 모든 소자의 S-파라미터 값을 추출하였다.

중심 복사소자 기준 자기 반사계수 및 상호결합 계수는 앞서 정의된 식 (4),(5)를 통해 능동 반사 계수를 계산할 수 있다. 주파수 및 빔 조향각에 따른 능동 반사계수는 그림 6과 같았다. 그림 6은 계산된 빔조향 45° 범위내의 모든 빔 조향각에서의 최대값을 설계 주파수 대역내에서 계산한 결과이다.

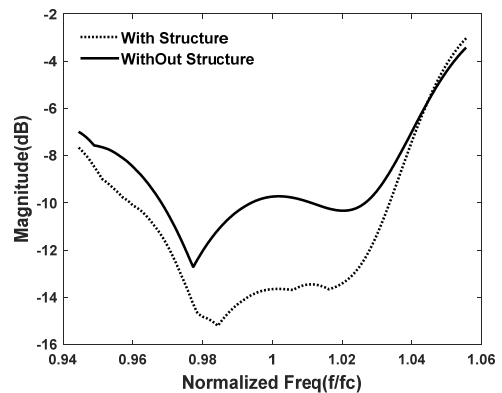
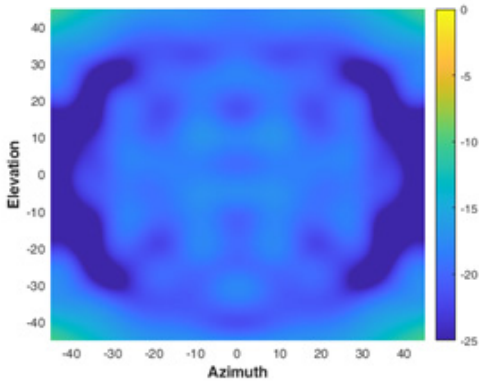
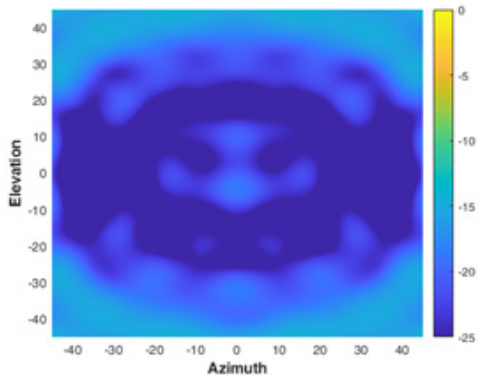


그림 6. 능동 반사 계수 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulation result of active reflection coefficient

기본적으로 최적화된 SFN의 능동 반사 계수는 WAIM의 유무에 따라 시뮬레이션 주파수 대역내에서 최대값 기준 최대 3.6dB의 성능 개선을 확인할 수 있었다. 좀 더 가시적으로 빔 조향에 따른 능동 반사 계수 성능을 검토하기 위해 그림 7과 같이 모든 빔조향에 따른 결과를 확인하였다.



(a) WAIM 구조 미적용



(b) WAIM 구조 적용

그림 7. 빔조향각별 능동 반사 계수 결과  
 Fig. 7. Active reflection coefficient for beam steering angle

그림 7 (a),(b)는 WAIM의 유무에 따른 빔 조향각별 능동 반사 계수 시뮬레이션 결과를 보여준다. Azimuth, Elevation 45° 빔조향 각도별 능동 반사 계수를 확인 할 수 있다. 전체적으로 능동 반사 계수 성능 개선을 확인할 수 있으며, 특히 Boresight에서 능동 반사 계수 성능 개선이 두드러졌다. 능동 반사 계수의 성능 개선은 배열안테나가 적용되는 시스템의 안정적인 운용을 위해 필수적인 성능 개선 사항이 될 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 탐색기용 AESA에 적용할 수 있는 최적화 구조인 SFN 복사소자의 능동 반사 계수 성능을 개선시키기 위한 구조물에 대한 영향성을 시뮬레이션을 통해

검증을 수행하였다.

X-대역 SFN 구조에 유전체 캡 및 Slot을 적용하여 성능 개선을 수행하였으며, 추가적으로 WAIM을 적용하여 능동 반사 계수 성능 개선을 확인 할 수 있었다. 원하는 빔조향 범위 내에서 최대 3.6dB의 능동 반사 계수 성능 개선을 확인하였으며, 이러한 개선 구조를 시스템에 적용하면 AESA 송신빔 운용 시 발생할 수 있는 음영 영역을 최소화하고 안정적으로 시스템을 운용할 수 있을 것으로 판단한다.

## References

- [1] Skolnik, M. I., Introduction to Radar System, McGraw-Hill, NY,USA., 2001
- [2] Balanis, C. A., Antenna Theory : Analysis and Design, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, 2005.
- [3] Hyung-Gi Lee, Yong-Uk Park, Hak-Keun Choi, "Design of X-Band Phased Array Antenna Systems for Satellite Communication", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 5, No. 1, pp. 53-61, May 2005.
- [4] Constantine A. Balanis, Modern Antenna Handbook, John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [5] Hubregt J. Sisser. Array and Phased Array Antenna Basics, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [6] H. J. Orchard, R. S. Elliott, and G. J. Stern, "Optimization the synthesis of shaped beam antenna patterns", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP 23, no. 1, pp. 100-107, Jan. 1975. DOI: [10.1049/ip-h-2.1985.0013](https://doi.org/10.1049/ip-h-2.1985.0013), PrintISSN 0950-107X, Online ISSN 2053-907X
- [7] Kwan-hyeong Lee, "A Study on the Performance CDMA System Using Adaptive Array Antenna Beamforming Technique", The Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology, Volume: 5, No 2, Pages : 68-73, June 2012. DOI: <http://doi.org/10.17661/jkiieect.2012.5.2.068>
- [8] Seung-gag Lim, Daesu Kang, "Performance analysis of DoA estimation algorithm using a circular array antenna", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.9, no 2, Pages : 395-400, 9. 2008. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2008.9.2.395>

## 저 자 소 개

### 김 영 완(정회원)



- 2005년 2월 : 광운대학교 전자공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

• 주 관심분야 : 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

### 채 희 덕(정회원)



- 1999년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원 수임 연구원

• 주 관심분야 : 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

### 안 세 환(정회원)



- 2004년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

• 주 관심분야 : 초고주파 회로 설계, 마이크로파 송수신기, 마이크로파 탐색기

### 주 지 한(정회원)



- 2002년 8월 : 충북대학교 전파공학과 (공학사)
- 2004년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석 연구원

• 주 관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템