

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2024.24.1.23>
IIBC 2024-1-4

Ka대역 능동위상배열 광대역 안테나 성능 검증

Performance Verification of Active Phased Array Broadband Antenna in Ka-Band

김영완*, 백종균*, 채희덕*, 주지한*

Youngwan Kim*, Jong-Kyun-Back*, Hee-Duck Chae*, Ji-Han Joo*

요약 본 논문에서는 광대역 특성을 가지는 능동위상배열 안테나의 설계, 검증 및 분석에 대하여 기술하였다. 능동위상배열 안테나를 항공기 혹은 미사일에 적용하려면 배열 안테나의 소형화 및 광각 빔조향 특성을 확보하는 것은 피할 수 없는 안테나 설계 고려 사항이 될 수 있다. 특히 전자적으로 광각 빔조향 시 능동반사계수 특성은 시스템의 생존 및 성능 측면에서 최소화되어야 하는 설계 파라미터이다. 광대역 특성 및 광각 빔조향에 적합한 복사 소자로 본 논문에서는 Step Flared Notch(SFN)를 적용한 배열 구조를 설계하고 구좌표계 θ 각도 기준 최대 40° 빔조향에 따른 능동반사계수를 최소화하였다. 복사소자의 대역폭은 Ka대역에서 능동반사 기준으로 3GHz를 확인하였다. 또한 실제 제작된 8by8 배열 안테나는 근접전계 시험을 통해 복사소자의 단일 패턴을 측정하고, 수학적으로 합성하여 탐색기 시스템에 사용하는 송/수신빔을 예측하여 성능을 분석하였다.

Abstract This paper describes the design, verification, and analysis techniques for an advanced phased array antenna. When applying an active phased array antenna to an aircraft or missile, miniaturization of the array antenna and wide-angle beam steering characteristics can be unavoidable antenna design considerations. In particular, the active reflection coefficient characteristics when electronically steering a wide-angle beam is a design parameter that must be minimized in terms of system survival and system performance. As a radiator suitable for broadband characteristics and wide-angle beam steering, this paper designed an array structure using SFN and minimized the active reflection coefficient according to beam steering of up to 40° based on the spherical coordinate system angle. The bandwidth of the radiator was confirmed to be 3GHz based on active reflection in the Ka-band. In addition, the performance of the actually manufactured 8by8 array antenna was analyzed by measuring the single pattern of the radiator through a near-field test, mathematically synthesizing it, and predicting the Tx/TRx beam used in the seeker system.

Key Words : Step Flared Notch, Broadband, Wide-Angle Steering

*정회원, LIG넥스원(주)
접수일자 2023년 10월 7일, 수정완료 2024년 1월 7일
게재확정일자 2024년 2월 9일

Received: 7 October, 2023 / Revised: 7 January, 2024 /

Accepted: 9 February, 2024

*Corresponding Author: youngwan.kim@lignex1.com

Dept. of RF/Microwave R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

I. 서 론

레이더 기술은 종래의 기계식 빔조향 방식에서 전자식 빔조향 방식으로 진화하고 있다. 레이더 뿐만 아니라 이 제는 미사일의 눈 역할을 하는 탐색기에서도 전자식 빔 조향인 AESA(Active Electronically Scanned Array) 방식으로 발전되고 있다. AESA 방식은 분산형 반도체 송수신기를 적용하여 점진적 성능 열화의 특성을 가지고 빠른 빔조향이 가능하여 탐지,추적 등의 다기능을 수행 하기 위한 고성능 레이더 및 탐색기에 필수적인 구조가 되었다.^[1] 국내에서도 AESA 구조를 탐색기에 적용하기 위한 연구가 활발히 시도되고 있다. 항공기에 적용하기 위한 AESA 구조와 달리 밀리미터파에 적용하는 AESA 구조는 전기적인 빔조향 성능과 더불어 소형화 되고 제작성이 보장되는 구조가 적용되어야 실제 미사일에 적용 될 수 있다. 상대적으로 주파수가 낮은 마이크로파 대역 에서 주로 사용되던 다이폴, 비발디 안테나 복사소자는 밀리미터파에서 파장이 짧아 배열 시 복사소자간의 커플 링 및 제작성에서 성능 개선의 필요성이 대두되고 있다. 탐색기의 운용 환경 및 전파 환경을 고려하여 본 논문에 서는 SFN 복사소자를 제안하였다. 마이크로파 대역에서 적용했던 비발디 안테나 구조 방식부 형태를 계단 형태 로 최적화하여 인접 소자와의 커플링 영향을 개선시키고 복사소자의 높이를 줄일 수 있는 구조로 시뮬레이션을 통해 8by8 Array 상태에서 개별 복사소자의 성능을 최 적화하고 배열 상태에서의 빔패턴 및 능동반사계수를 최 적화하였다. 능동반사계수는 8by8 배열 상태에서의 자 기 및 결합 계수를 CST의 MWS 시뮬레이터를 이용하여 추출하고 수학적인 합성을 통해 원통형 좌표계 θ 각도 기준 최대 40° 빔조향에 대한 능동 반사계수를 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 최적화된 배열 안테나는 Compact-Range(CR) 측정을 통해 개별 복사소자의 빔패턴 성능을 측정하였다. 또한 PNA 계측기를 통해 특정 소자의 자기 반사계수 및 상호결합계수를 측정하여 능동반사계수를 계산하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 추가적으로 8by8 배열 상태에서 64개 복사소자의 근접전계 측정을 수행 후 탐색기 운용에 필요한 송/수신빔 성능을 예측하 고 설계 결과와 비교를 통해 제작 및 측정의 유효성을 확 인하였다.

II장에서는 8by8 배열 구조의 이상적인 합성 결과 및 시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 기초 이론에 대해 설 명하고 III장에서는 본 논문에서 제시한 SFN 복사소자의 설계 형상에 대해 소개한다. IV장에서는 최적화 설계된

복사소자의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하여 설 계 및 제작, 측정의 유효성을 검증하고 V장에서 결론으 로 마무리하였다.

II. 8by8 배열 구조 검증

본 논문에서 검증하는 배열 구조는 총 64개의 복사 소 자를 삼각 배열 형태로 그림 1과 같은 형태로 초기 설계 를 시작하였다. 그레이팅 로브를 고려한 배열 구조 설계 시 삼각 구조로 배열 소자를 배치시키면 좀 더 넓은 배열 간격을 유지 시킬 수 있다.^[2]

본 논문에서 검증한 배열 구조는 표 1과 같이 원통좌 표계 θ 각도 기준 최대 40° 빔조향에 대한 성능을 최적 화하기 위해 배열 간격을 설정하였다. 또한 탐색기에 적 용할 수 있는 송/수신 빔을 검증하기 위해 송신과 수신 각각 다른 가중치를 적용하여 성능을 검증하였다.

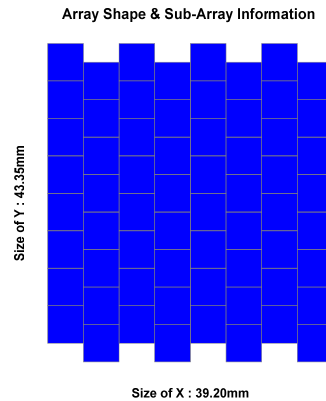


그림 1. 8 by 8 배열 구조 형상
Fig. 1. 8 by 8 array configuration

표 1. 8by8 배열 안테나 구조
Table 1. Configuration of 8 by 8 array antenna

Parameter	Design Objective
Frequency	Ka-Band
Dx/Dy (mm/mm)	4.9 / 5.1
Nx/Ny	8 / 8
Steering Range (구좌표계 θ Angle기준)	$\pm 40^\circ$
송신/수신 가중치	Uniform / Taylor 28dB

그림 2와 3은 설계한 배열 구조에서의 송신과 수신 빔 패턴의 이상적인 합성 결과를 보여준다.

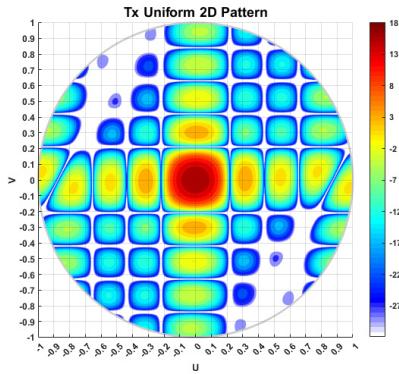


그림 2. 송신 2D 패턴
 Fig. 2. Tx 2D Pattern

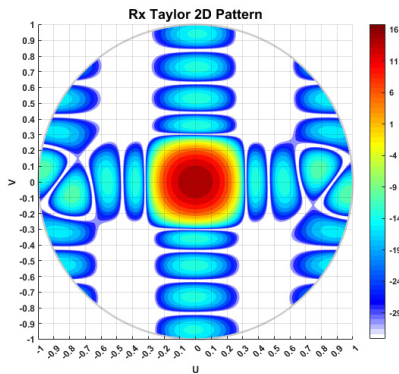


그림 3. 수신 2D 패턴
 Fig. 3. Rx 2D Pattern

송신 시에는 64개 배열소자의 크기가 동일한 Uniform 분포를 적용하여 이득이 가장 크지만 상대적으로 부엽 수준이 높은 빔을 적용하였다. 수신빔은 표적 오탐 확률을 낮추고 전자전 재밍 신호에 적합한 빔을 구현하기 위해 Taylor 가중치를 적용하여 부엽 수준을 낮춘 빔을 적용하였다. 그림 5는 송수신 빔의 방위각 빔 패턴을 비교한 그림이다.

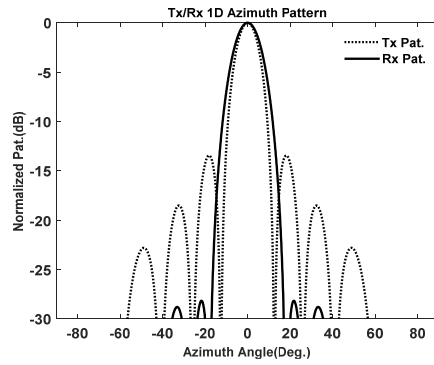


그림 4. 송수신 1D 패턴
 Fig. 4. Tx/Rx 1D Pattern

빔조향에 따른 그레이팅 로브를 고려한 배열 형상이 정해지고 송수신 빔 가중치에 대한 패턴 형상이 결정되면 다음으로는 능동반사계수에 대한 설계를 진행한다. 능동 반사 계수는 능동 위상 배열안테나의 송신 시 발생하는 배열 소자간 상호 결합 영향을 고려한 수치로 능동 위상배열 안테나의 성능을 가늠하는 척도가 된다. 능동 위상배열 안테나는 주로 배열 소자의 위상을 조절하여 빔을 컨트롤하기 때문에 능동반사계수는 배열 소자의 위상 분포에 따라 바뀌게 된다.^{[2][3][4]} 레이더 및 탐색기에 적용되는 능동 위상 배열 안테나는 주파수, 빔 조향각, 운용 모드 등에 따라 배열 소자의 위상 상태가 변하기 때문에 능동 반사 계수는 설계 및 시험 평가 단계에서 중요하게 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.^[5]

일반적인 능동 위상 배열안테나의 능동 반사 계수 정의는 다음과 같다. 그림 5에서 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.

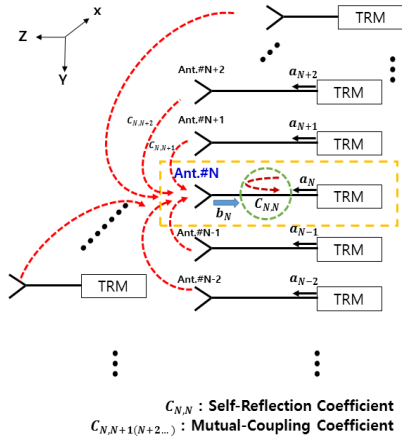


그림 5. 능동 반사 계수 개념도
Fig. 5. Conceptual diagram of active reflection coefficient

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

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.

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

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

$$\Gamma_N^{active, steering} = W_{uniform} \sum_{n=1}^M C_{N,M} \cdot e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}_n} \cdot e^{-j\vec{k} \cdot \Delta\Psi_{steer}} \quad (5)$$

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

능동 반사 계수는 AESA 시스템 운용 중에 계속적으로 변하게 된다. 시뮬레이션 및 측정 결과의 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.^{[6][7][8]}

III. SFN 복사소자 설계

본 논문에서는 그림 6과 같이 SFN 복사소자를 적용한 배열 구조의 성능 검증을 수행하였다. 일반적인 비발디 안테나의 방사부 형상과 달리 exponential 구조가 아닌 계단 형태의 구조로 공간상으로 전계를 방사하는 구조로 비발디 구조 대비 복사소자의 높이를 최소화 할 수 있어 Low-profile 형태를 구현할 수 있다.

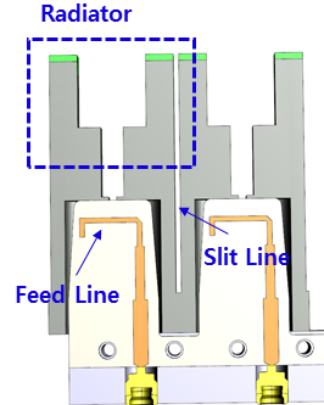


그림 6. SFN 형상
Fig. 6. SFN configuration

또한 방사부가 직각의 계단 형태이기 때문에 인접 소자의 전계 방향의 대각방향 전계 성분이 일반적인 비발디 구조에 비해 상대적으로 작아 인접 소자와의 상호간섭 영향을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

능동반사계수 관점의 최적화를 수행하기 위해 인접 소자와의 위상을 조절할 수 있는 설계 파라미터를 설계해야 하고 SFN 구조에서는 그림 6의 슬릿 구조를 이용해야 한다.^[8] 주파수 및 빔조향 범위가 정해지면 배열 간격이 정해지게 되고 인접 소자의 상호결합 크기는 고정되어 조절하기 힘들지만, 식 (2)를 통해 알 수 있듯이 가장 큰 결합계수가 상쇄될 수 있도록 슬릿의 폭과 길이를 최적화하여 복사소자간의 상대 위상을 180° 가깝게 유지시켰다.^[9]

IV. 시뮬레이션/측정 결과

밀리미터파 대역에서 동작하는 복사소자의 제작은 상대적으로 작은 크기로 인해 정밀 가공을 통해 제작 공차를 최소화 하여야 한다. 특히 그림 6에서 보는 것처럼 방사부에 급전 신호를 인가하는 급전부는 수 mm 이내의 제작이 필요해 레이저 커팅 공법을 적용하여 정밀 가공을 통해 제작을 수행했다. 또한 급전 구조의 손실을 최소화하기 위해 기판이 아닌 공기층으로, 즉 선로 위 아래가 공기로 구성될 수 있는 Air 스트립 구조를 적용하였다. 실제 공기층은 유전율이 1에 가까운 로하셀 폼을 이용하여 모사할 수 있었다. 제작된 형상은 그림 7과 같이 8by1 모듈을 제작하고 총 8개의 모듈을 조립하여 총 8by8 배열 구조를 형성하였다.

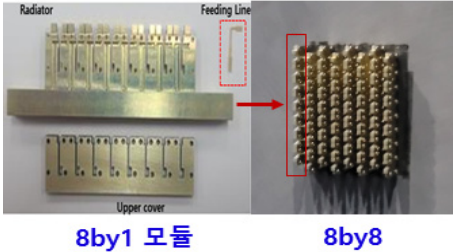


그림 7. 8by8 배열 형상
 Fig. 7. 8by8 array configuration

8by8 배열은 먼저 64배열소자의 개별 복사소자 패턴 및 반사계수 측정을 수행하였다. 측정은 근거리에서 원전계 패턴 측정을 수행할 수 있는 콤팩트레인지(Compact Range(CR)) 측정을 수행하였다.

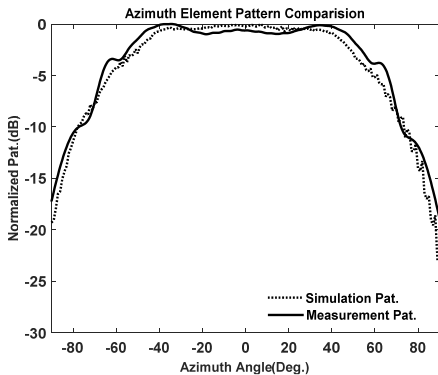


그림 8. 단일 방위각 능동 패턴
 Fig. 8. Single Azimuth Active Pattern

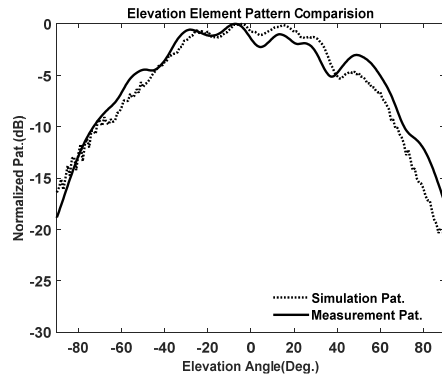


그림 9. 단일 고각 능동 패턴
 Fig. 9. Single Elevation Active Pattern

8by8 배열 상태에서 32번 포트 기준으로 측정된 방위각/고각 단일 능동 패턴은 그림 8,9와 같다. 시뮬레이션과 거의 유사한 측정 결과를 확인할 수 있었다.

단일 복사소자의 빔패턴 성능이 검증되면, 실제 8by8 배열 상태에서의 빔패턴 및 능동반사계수 성능을 검증한다. Network Analyzer를 이용해 64개 복사소자 중 32번 복사소자의 능동반사계수를 예측하기 위해 32번 포트를 기준으로 총 63포트의 상호간섭 계수(S21)와 32번 포트의 자기 반사계수(S11)를 측정하였다. 측정된 S-파라미터값을 기반으로 식 (5)를 이용해 주파수별, 빔조향각별 능동반사계수를 구할 수 있다. 그림 10은 빔 조향에 따른 대역내 최대/평균 능동 반사계수를 보여준다. 평균 반사계수는 조향각내 모든 조향각의 평균값을 보여주며, 본 논문에서 목표로 했던 40° 조향각까지 최대값은 -15dB 이하 평균값은 -23dB 이하 결과를 확인할 수 있었다.

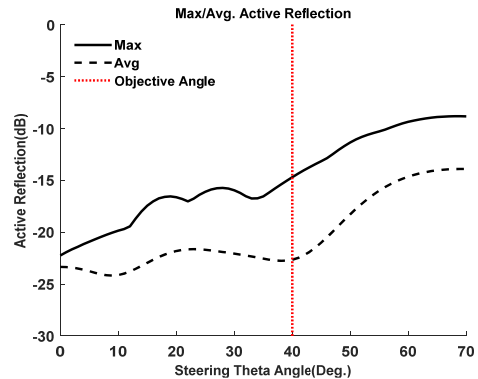


그림 10. 최대/평균 능동반사계수 측정 결과
 Fig. 10. Measurement result of max/avg. active reflection coefficient

이 결과를 주파수에 따른 능동반사계수 결과로 전환하면 그림 11과 같으며 거의 3GHz의 대역폭 내에서 -10dB 이하의 광대역 성능을 보임을 확인 할 수 있었다. 마이크로파 대역에서 동작하는 다이폴에 비해 더 넓은 대역폭을 확인 할 수 있었다.

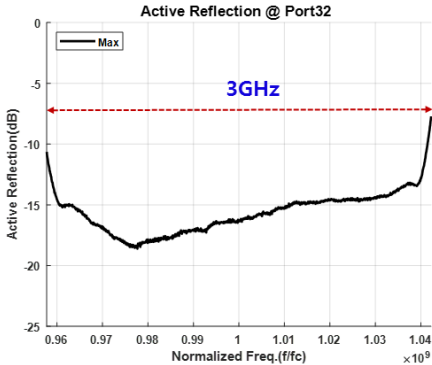


그림 11. 최대 능동반사계수 측정 결과
Fig. 11. Measurement result of max active reflection coefficient

조향각별 능동반사계수는 그림 12을 통해 확인할 수 있다. 그림은 원통좌표계기준 θ 각도 기준 최대 40°까지의 평면상의 능동반사계수를 보여준다. 배열안테나 중앙부 Boresight 기준으로 조향각이 커지면서 능동반사계수가 점진적으로 커짐을 확인 할 수 있지만, 목표했던 조향각 내에서 -15dB 이하의 우수한 성능을 확인 할 수 있었다.

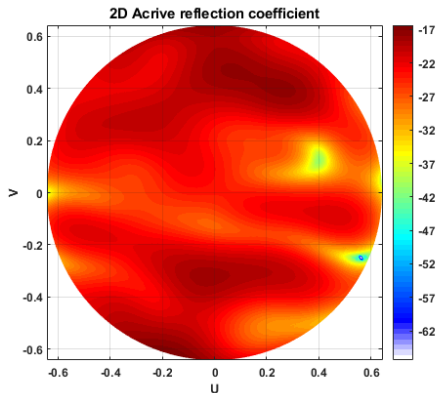


그림 12. 최대 2D 능동반사계수 측정 결과
Fig. 12. Measurement result of max 2D active reflection coefficient

능동반사계수의 성능은 배열 소자의 상하 좌우 대칭성을 고려해 일부 포트의 검증을 통해 전체 배열소자의 성능을 검증 할 수 있다.

능동반사계수 성능을 확인한 후에는 배열상태에서 64개 복사소자의 개별 빔패턴을 측정하고, 수학적 빔 합성을 통해 예측하고자 하는 송수신 빔의 성능을 예측할 수 있다.

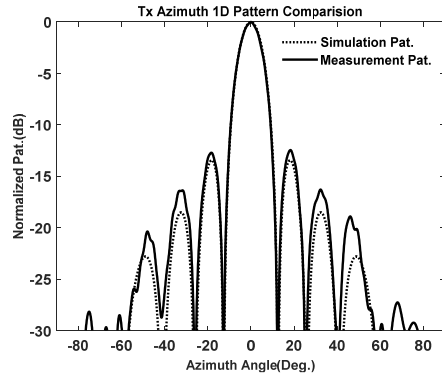


그림 13. 송신 방위각 빔패턴
Fig. 13. Tx Azimuth Beam Pattern

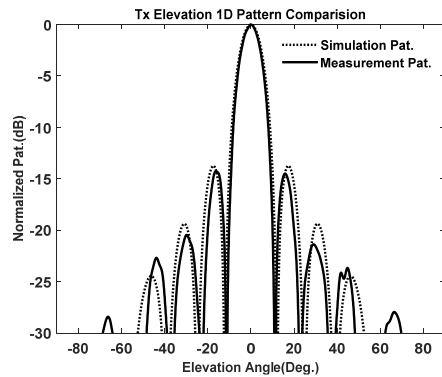


그림 14. 송신 고각 빔패턴
Fig. 14. Tx Elevation Beam Pattern

그림 13~16은 실제 64개 포트의 개별 근접전계 시험을 통해 얻은 패턴을 송신 Uniform, 수신 Taylor 가중치로 합성한 결과를 보여준다. 그림 13,14는 송신빔의 방위각/고각 패턴 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 그림으로 예측값과 거의 유사한 측정 결과를 확인 할 수 있다.

마찬가지로 그림 15,16은 수신빔의 방위각/고각 패턴 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 그림으로 예측값과 거의 유사한 측정 결과를 확인 할 수 있다.

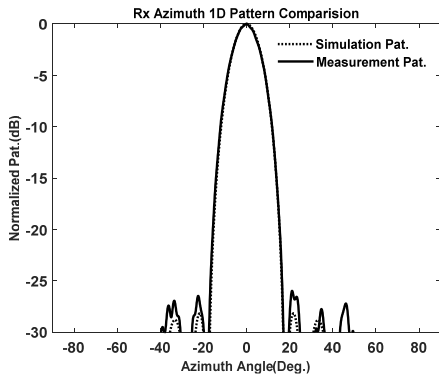


그림 15. 수신 방위각 빔패턴
 Fig. 15. Rx Azimuth Beam Pattern

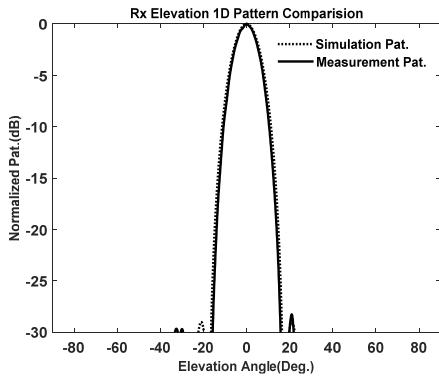


그림 16. 수신 고각 빔패턴
 Fig. 16. Rx Elevation Beam Pattern

제작된 8by8 배열 안테나 측정 결과를 기반으로 합성한 송수신 빔 모두 기대했던 부엽수준 및 빔폭을 만족함을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기에 적용할 수 있는 AESA 안테나 구조를 설계하고 실제 8by8 단위 복사소자를 제작하여 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교 검증하였다. 마이크로파 대역에서 주로 사용하는 다이폴, 일반적인 비발디 안테나에 비해 본 논문에서 제안한 SFN 안테나는 상대적으로 소형화를 구현하면서 광대역 특성 및 광각 빔조향에 최적화된 형태로 설계되었다.

밀리미터파 안테나 제작의 정밀성을 확보하기 위해 레이저 커팅 공법을 적용해 제작한 안테나는 CR측정, 근접

전계 시험을 통해 개별 및 배열단위 빔패턴 성능을 검증 완료하였고, 8by8 배열 기준 능동반사계수를 계산하고 목표했던 조향각 내에서 -15dB이하의 최대 능동반사계수 성능을 확보함을 검증하였다.

본 논문에서 제안한 복사소자는 향후 밀리미터파 대역에서 운용 될 탐색기에 적용할 수 있는 능동위상배열에 매우 적합한 복사소자로 사용될 수 있음을 본 논문 측정 결과를 통해 확인 할 수 있다.

References

- [1] M. Jyothi, E. Srinivas, Yogesh Kumar Verma, "Concept of Electronically Scanned Array(AESA) Seeker Beam Control and Stabilization", 2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation, Dec. 2018. DOI: [10.1109/INCAP.2018.8770892](https://doi.org/10.1109/INCAP.2018.8770892)
- [2] Constantine A. Balanis, Modern Antenna Handbook, John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [3] Hubregt J. Sisser. Array and Phased Array Antenna Basics, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [4] 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.
- [5] Youngwan Kim, Hee-Duck Chae, Dong-Kuk Lee, Myung-Deuk Jung, Jong-Kuk Park, "A Study of the Stabilized System Operation Considering the Reflection Characteristics of an Active-Phased Array Antenna", The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 23권 1호, pp. 29-37, 01. 2012. DOI:<https://dx.doi.org/10.5515/KJIEES.2012.23.1.029>
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Youngwan Kim, Hee-Duck Chae, Se-Hwan An, Ji-Han Joo, "Radiator Design Method considering Wide-Angle Beam Steering Characteristics of AESA Radar", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 22, No. 5, pp. 87-92, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2022.22.5.87>
- [9] Trevor Bird, Mutual Coupling Between Antennas, John Wiley & Sons Inc., Pages : 325-356, Jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119565048>

저 자 소 개

김 영 완(정회원)



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

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

백 종 균(정회원)



- 2011년 2월 : 동국대학교 전자공학과(공학사)
- 2013년 8월 : 동국대학교 전자전기공학과(공학석사)
- 2013년 4월 ~ 현재 : (주)LIG넥스원 선임연구원
- 주 관심분야 : 안테나 설계 및 수치 해석

채 희 덕(정회원)



- 1999년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

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

주 지 한(정회원)



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

• 주 관심분야 : 마이크로웨이브 탐색기, 초고주파 회로 및 시스템