

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.5.103>
JIIBC 2023-5-16

탐색기용 AESA 안테나 성능 고도화 연구

A Study on AESA Antenna Performance Advancement for Seeker

김영완*, 백종균**, 채희덕***, 주지한****

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

요약 본 논문에서는 미사일의 눈 역할을 하는 탐색기에 적용할 수 있는 AESA 안테나의 성능 고도화 연구를 진행하고 실제 측정을 통해 안테나 성능을 검증하였다. AESA 안테나 설계 시에는 필연적으로 발생하는 복사소자 간의 상호간섭 영향으로 송신 시 능동반사계수의 최적화를 고려해야하며, 탐색기의 공간 제한을 극복할 수 있는 소형/경량화가 적용된 복사소자의 선정이 중요한 설계 고려 사항이다. 이에 탐색기용 AESA 구조에 적용하기 위한 배열안테나 연구를 통해 전기적 성능 및 Low-profile 구조 측면에서 최적화가 필요하다. 본 논문에서 설계하고 측정한 복사소자는 일반적인 비발디 안테나의 성능을 고도화시키면서 Low-profile 구조를 만족할 수 있는 Step Flared Notch(SFN)를 설계하였다. 본 논문을 통해 SFN은 일반적인 비발디 안테나와 동일하게 광대역 특성을 가지며 AESA 안테나에 필요한 특성들이 최적화 된 특성을 보유함을 확인 할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 최적화 된 구조는 실제 프로토타입 안테나 제작을 통해 패턴 특성과 능동반사계수 특성을 확인하였다.

Abstract In this paper, a performance enhancement study of an AESA antenna that can be applied to a seeker that serves as the eye of a missile was conducted, and the performance of the antenna was verified through actual measurement. When designing an AESA antenna, the optimization of the active reflection coefficient must be considered during transmission due to the mutual coupling between radiators that inevitably occurs, and the selection of a radiator that can overcome the space limitation of the seeker with a small size/light weight is an important design consideration. Accordingly, optimization in terms of electrical performance and low-profile structure is required through research on array antennas for application to the AESA structure. The radiator designed and measured in this paper was designed as an SFN that can satisfy the low-profile structure while enhancing the performance of a general vivaldi antenna. Through this paper, it was confirmed that SFN has the same broadband characteristics as general vivaldi antennas and has optimized characteristics required for AESA antennas. The structure optimized through simulation confirmed the pattern characteristics and active reflection coefficient characteristics through the fabrication of actual proto-type antennas.

Key Words : Step Flared Notch, Active reflection coefficient, AESA, Low-profile

*정회원, LIG넥스원(주)
접수일자 2023년 7월 28일, 수정완료 2023년 9월 5일
게재확정일자 2023년 10월 6일

Received: 28 July, 2023 / Revised: 5 September, 2023 /
Accepted: 6 October, 2023

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

I. 서 론

최근 레이더 기술은 전자식 빔조향 방식을 사용하는 AESA(Active Electronically Scanned Array)방식으로 발전되고 있다. 기본적으로 AESA 방식은 분산형 반도체 송수신기를 적용하여 점진적 성능 열화의 특성을 가지고 빠른 빔조향이 가능하여 탐지,추적 등의 다기능을 수행하기 위한 고성능 레이더에 필수적인 구조가 되고 있다. 해외에서는 이미 미사일에서 눈 역할을 하는 탐색기에도 AESA 구조를 적용하여 전기적인 빔조향을 구현하는 연구가 활발히 진행되어 왔으며^[1] 국내에서도 AESA 구조에 대한 연구가 활발히 시도되고 있다. 항공기에 적용하기 위한 AESA 구조와 달리 밀리미터파에 적용하는 AESA 구조는 전기적인 빔조향 성능과 더불어 소형화되고 제작성이 보장되는 구조가 적용되어야 실제 미사일에 적용될 수 있다. 마이크로파 대역에서 주로 사용되던 다이폴, 비발디 안테나 복사소자는 밀리미터파에서 상대적으로 근접되는 복사소자간의 커플링 및 제작성에서 성능 개선의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 밀리미터파에서의 전기적인 빔 조향 성능 및 Low-profile 구조를 만족하며 제작성을 확보할 수 있는 구조로 본 논문에서는 SFN 복사소자를 제안하였다. 일반적인 비발디 안테나 구조의 exponential하게 퍼지는 복사소자부를 계단형태로 최적화하여 인접 소자와의 커플링 영향을 개선시키고 복사소자의 높이를 줄일 수 있는 구조로 시뮬레이션을 통해 8by8 Array 상태에서 성능을 최적화하였다. 시뮬레이션을 통해 최종 설계된 안테나는 실제 일부 구조를 제작하여 빔패턴 및 커플링 성능의 유효성을 확인하였다. 본 논문에서는 CST의 MWS 시뮬레이터를 이용하여 실제 구조를 최적화하였고, Compact-Range(CR) 측정을 통해 복사소자의 빔패턴 성능을 측정하였다. PNA 계측기를 통해 특정 소자의 자기반사계수 및 상호결합계수를 측정하여 능동반사계수를 계산하여 성능 검증을 수행하였다.

II장에서는 AESA 안테나의 빔조향 특성을 검증하기 위해 능동반사계수의 개념 및 검증방안에 대해 설명하고 III장에서는 실제 시뮬레이션을 통해 설계한 SFN 배열 구조에 대해 설명하고, IV장에서 측정 결과를 소개하였다.

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.^{[2][3][4]} 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 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.

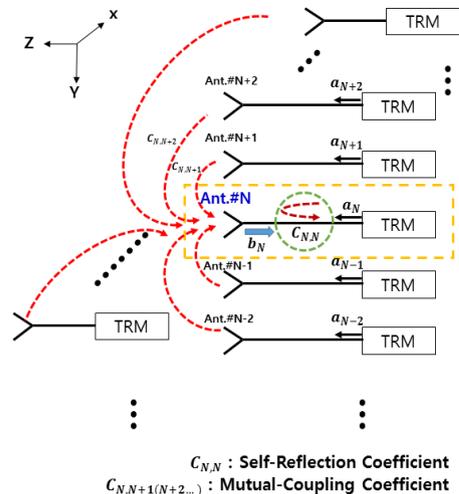


그림 1. 능동 반사 계수 개념도
Fig. 1. Conceptual diagram of active reflection coefficient

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

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

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.

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

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

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

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

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

능동 반사 계수는 AESA 시스템 운용 중에 계속적으로 변화하게 된다. 시뮬레이션 및 측정 결과의 검증은 MWS를 통해 모든 출력 포트에서 $S_{N,M}$ 값을 추출하여 식(5) 기반의 수학적인 계산을 통해 주파수, 빔 조향각에 따른 능동 반사 계수의 최대, 평균값을 예측할 수 있다^{[5][6][7]}.

III. SFN 8 by 8 구조 설계

본 논문에서는 그림 3과 같이 SFN 8by8 구조를 기본으로 시뮬레이션을 수행하였다. MWS 시뮬레이터를 통해 Ka 대역에서 빔 조향각 45°(구좌표계 Theta Ang.) 기준으로 Grating-Lobe(GL) 특성을 고려한 배열 간격을 적용하였다. 설계된 8by8 배열구조는 표 1을 통해 확인할 수 있다.

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 Theta Angle기준) | ±45° |

그림 2는 실제 최종 설계된 SFN 복사소자의 형상을 보여준다. 실제 빔이 방사되는 방사부가 일반적인 비발디 안테나의 exponentail 구조가 아닌 계단 형태의 구조로 공간상으로 전계를 방사하는 구조로 비발디 구조 대비 복사소자의 높이를 최소화 할 수 있어 Low-profile 형태를 구현할 수 있다.

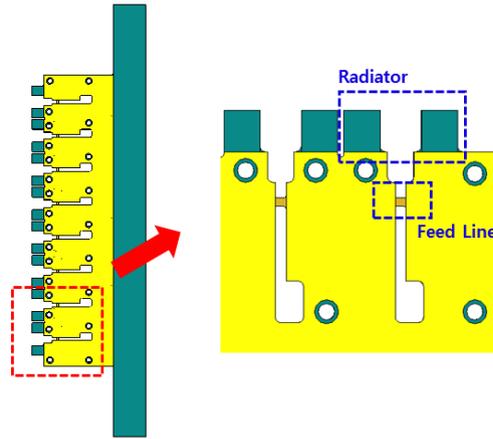


그림 2. SFN 복사소자
 Fig. 2. SFN radiator

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.

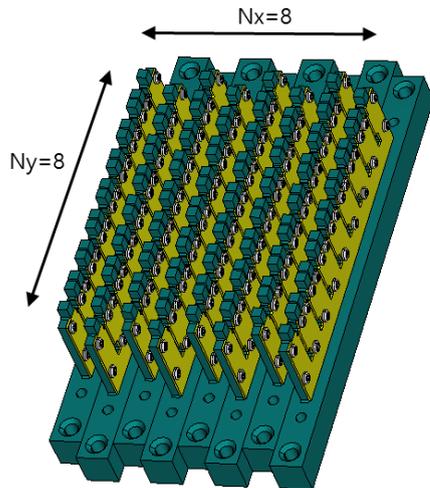


그림 3. 8 by 8 안테나조립체
 Fig. 3. 8 by 8 radiators

본 논문에서는 Ka 대역의 소형화된 복사소자의 제작성을 고려하여 그림 3과 같이 8 by 8 구조로 안테나조립체를 설계하고 최적화하였다.

능동반사계수 관점의 최적화를 수행하기 위해 인접 소자와의 위상을 조절할 수 있는 설계 파라미터를 설계해야하고 SFN 구조에서는 슬릿 구조를 이용해 이를 구현하였다.[7]

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 위상을 180° 가깝게 유지시켰다.

IV. 시뮬레이션/측정 결과

본 논문에서는 그림 3과 같이 8 by 8 시제를 구성하기 전에 그림 4와 같이 8 by 1의 프로토타입 8개 복사소자를 제작하여 성능 검증을 수행하였다. 향후에는 프로토타입 시제 8개를 조립하여 8 by 8 시제를 구성할 수 있게 모듈화된 8개 소자를 구성하여 성능을 검증하였다.

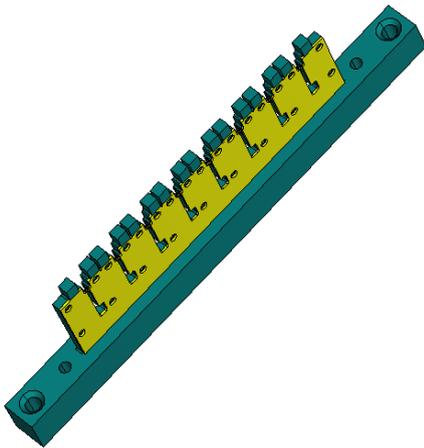


그림 4. 8 by 1 프로토타입 설계 형상
Fig. 4. 8 by 1 proto-type design configuration

실제 제작된 프로토타입은 그림 5와 같은 형태로 제작하였다. 방사 손실을 최소화하고 제작성을 높이기 위해 방사체는 금속으로 제작하였고 급전 라인은 레이저 커팅을 이용한 정밀 가공 방식으로 제작 후 최종 방사체와 조립하는 형태로 제작하였다. 또한 급전 구조의 손실을 최소화하기 위해 기판이 아닌 Ai-Strip, 즉 선로 위 아래가

공기로 구성될 수 있는 스트립 구조를 적용하였다. 실제 공기층은 유전율이 1에 가까운 로하셀 폼을 이용하여 모사할 수 있었다.

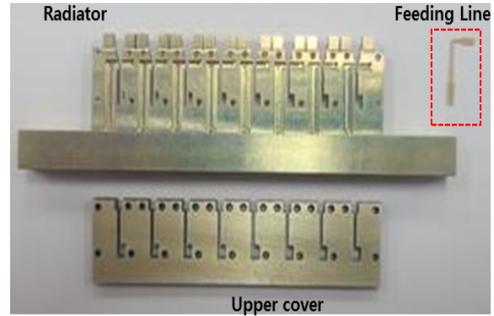


그림 5. 8 by 1 프로토타입 제작 형상
Fig. 5. 8 by 1 proto-type fabrication configuration

실제 제작된 프로토타입 안테나는 S-Parameter 측정 및 빔패턴 측정을 수행하였다. Network Analyzer를 이용해 64개 복사소자 중 28번 복사소자의 능동반사계수를 예측하기 위해 28번 포트를 기준으로 총 7포트의 상호간섭 계수(S21)와 28번 포트의 자기 반사계수(S11)를 측정하였다. 측정된 자기반사 및 상호간섭 계수는 그림 6과 같으며 포트간의 거리에 비례하게 대칭적으로 크기가 증가함을 알 수 있다.

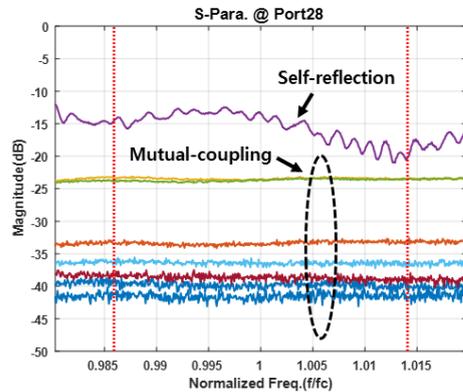


그림 6. S파라미터 측정 결과
Fig. 6. S-parameter measurement result

그림 6의 측정 결과로부터 식 (5)를 이용해 주파수별, 빔조향각별 능동반사계수를 구할 수 있다. 목표로 했던 Ka 주파수 범위내 목표 빔조향 범위인 45° 이내 능동반사계수 결과는 그림 7과 같다. 목표 대역 내의 전체 조향각 범위에서 -10dB 이하의 최대값을 보였다.

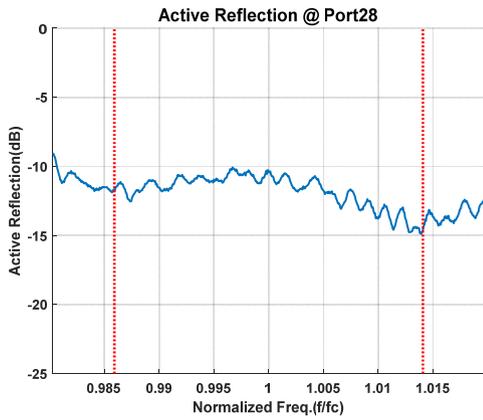


그림 7. 능동반사계수 합성 결과
 Fig. 7. Active-reflection synthesized result

다음으로는 밀리미터파 대역의 복사소자 정밀 제작을 검증하기 하고 빔 조향 성능을 예측하기 위해 프로토타입 복사소자의 방사패턴을 측정하였다. 단일 복사소자의 빔패턴은 빔폭이 상대적으로 넓기 때문에 원전계 측정을 수행하여 정확하게 패턴을 예측할 수 있으며, 본 논문에서는 CR(Compact-Range)측정을 통해 방사 성능을 검증하였다.

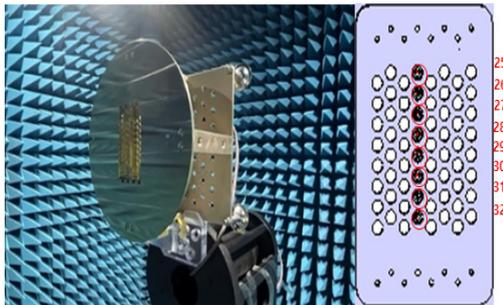
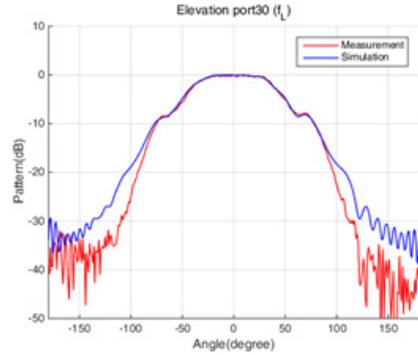


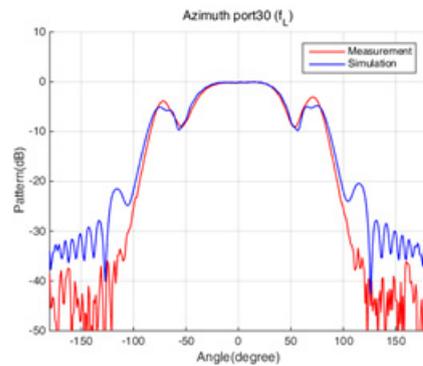
그림 8. 빔패턴 측정 형상
 Fig. 8. Beam pattern measurement configuration

그림 8과 같이 원형 그라운드 판 위에 8 by 1 프로토타입 모듈을 중앙에 장착하고 CR 측정을 통해 빔패턴의 방위각/고각 빔패턴을 측정하였다. 배열 개수가 늘어나 반사판 위에 대부분 복사소자가 배치 되었을때와 다르게 배열 개수가 한정된 상태에서의 복사소자 빔패턴은 반사판의 영향으로 패턴상에 리플이 생길 것으로 예측되며 실제 시뮬레이션 결과와 측정결과는 그림 9와 같이 유사한 경향을 보였다. 그림 9.(b) 고각 패턴 대비 그림 9.(a) 방위각 빔패턴의 리플이 더 큰 것은 방위각 방향으로는 단일 복사소자 상태이고 이로 인해 반사판에 의한 반사

영향으로 패턴상이 왜곡 정도가 큰 것으로 판단된다. 이는 실제 배열 개수가 늘어나면 리플 영향성은 줄어들 것으로 판단된다.



(a) 방위각 빔패턴



(b) 고각 빔패턴

그림 9. 단일 복사소자 빔패턴
 Fig. 9. Radiator Beam-Pattern

V. 결론

본 논문에서는 탐색기용 AESA에 적용할 수 있는 최적 구조인 SFN 배열안테나의 시뮬레이션 및 측정결과를 바탕으로 성능 검증을 수행하였다.

밀리미터파 대역의 복사소자는 짧은 파장으로 초소형의 배열안테나를 구성하게 되고 실제 시뮬레이션 대비 제작 및 조립 오차에 의한 측정 결과에서 열화가 발생할 수 있다. 이러한 제작 및 조립에 의한 안테나 성능을 검증하기 위해 일부 복사소자를 구현한 프로토타입 제작을 통해 성능 검증을 수행하였다. 복사소자로는 제작 측면에서도 상대적으로 용이하며 광대역 특성을 가지고, 상호 결합 영향성이 우수한 SFN 복사소자를 선정하여 설

계하고 제작하여 성능을 검증하였다. 총 8개 복사소자로 구성된 8 by 1 프로토타입의 성능을 검증하였고, 원형좌표계 θ 각도 기준으로 $\pm 45^\circ$ 범위 내에서 원하는 대역에서 최대 -10dB 이하의 능동반사계수 성능을 확인하였다. 추가로 CR 측정을 통해 축소형 프로토타입 복사소자의 빔패턴 성능을 확인할 수 있었다. 본 시제를 성능 검증을 통해 향후 8 by 8 이상의 배열소자조립체로의 확장성을 확인할 수 있었다.

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: <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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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>

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 전기컴퓨터 공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 (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