

시간 지연을 통한 능동위상배열 안테나 빔 조향 기능 검증

Verification of Beam Steering Based on True Time Delay in Active Phased Array Antennas

권시원 · 주정명 · 박세준 · 정영주 · 임재환 · 채희덕 · 진형석 · 박종국

Siwon Kwon · JungMyoung Joo · Sejun Park · YeongJu Jung · JaeHwan Lim ·
Heeduck Chae · Hyung-Suk Jin · Jong-Kuk Park

요약

넓은 영역을 빠르고 정확하게 탐지하기 위해 능동위상배열 안테나 시스템에서 정밀한 빔 조향 기술은 필수적이다. 기존 협대역 레이다 시스템에서는 위상 변위기(phase shifter)를 이용한 위상 변위 기반의 빔 조향 방식이 널리 사용되었다. 그러나 고속 신호 처리와 정밀한 거리 정보 확보가 요구되면서 광대역 레이다 시스템의 사용이 증가하고 있고 이에 따라 실시간 시간 지연(TTD, true time delay) 기반의 빔 조향 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다. 시간 지연 기반의 빔 조향은 각 채널들에 위상차가 아닌 시간차를 인가하여 파면의 기울기를 제어하는 방식이다. 본 논문에서는 위상 변위 방식 및 시간 지연 방식이 모두 적용된 실제 8×8 능동위상배열 안테나 시스템의 송신 근접전계 시험을 수행하였다. 이를 통해 시간 지연 기반의 빔 조향 결과가 위상 변위 방식의 결과와 동일하게 나타나는지를 확인함으로써, 실제 시스템 수준에서의 시간 지연 기반 빔 조향의 구현 가능성을 검증하였다.

Abstract

Precise beam-steering technology is essential in active phased-array antenna systems to rapidly and accurately detect targets over a wide area. Phase-based beam steering using phase shifters has been widely adopted in conventional narrowband radar systems. However, as high-speed signal processing and high-resolution range detection have become increasingly important, the use of broadband radar systems is expanding, and research on real-time true time delay (TTD)-based beam steering is gaining momentum. Unlike phase-based methods, TTD beam steering applies time delays, rather than phase shifts, across channels to control the wavefront slope. In this study, near-field transmission measurements were conducted on an 8×8 active phased-array antenna system implementing both phase-shift and time-delay beam-steering methods. By comparing the results obtained from the two approaches, the time-delay-based beam steering method was verified to produce beam directions consistent with those of the phase-shift method, thereby demonstrating the feasibility of implementing time-delay-based beam steering at the practical system level.

Key words: Active Phased Array, AESA, Beam Steering, Phase Shift, Time Delay, Near-Field

「이 연구는 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 연구되었음(UC210013YD).」
LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received September 12, 2025 ; Revised September 26, 2025 ; Accepted November 6, 2025. (ID No. 20250912-099)
· Corresponding Author: Siwon Kwon (e-mail: siwon.kwon@lignex1.com)

I. 서 론

개별 복사소자의 위상을 조정함으로써 전기적으로 빔 조향이 가능한 능동위상배열 안테나는 넓은 영역을 빠르게 탐지할 수 있어 다양한 응용 분야에서 널리 사용되고 있다^[1]. 이와 같은 능동위상배열 안테나를 포함한 레이더 시스템에서 빔 조향 기술은 목표물의 정밀한 탐지를 위해 매우 중요하다. 일반적으로 사용되는 빔 조향 방식은 위상 변위 방식으로, 각 채널에 위상 변위기(phase shifter)를 적용하여 위상값을 조절함으로써 전파를 원하는 방향으로 방사하도록 한다. 최근에는 광대역 레이더 시스템의 연구가 활발해지면서 시간 지연(TTD, true time delay)을 기반으로 한 빔 조향 방식이 주목받고 있다^{[2],[3]}. 시간 지연 기반 빔 조향은 각 소자에 전달되는 신호의 시간을 조절하여 파면의 기울기를 제어함으로써 빔 조향을 하는 방식이다.

본 논문에서는 단일 주파수 환경에서 위상 변위 기능 없이 시간 지연만을 통해 빔 조향이 실제로 가능한지 실제 능동위상배열 안테나 시스템 제작 및 근접전계 시험을 통해 직접 검증하고자 한다. II장에서는 위상 변위 및 시간 지연에 따라 적용되는 빔 조향 가중치를 기술하고 MATLAB 기반 수학적 계산을 통해 얻은 빔 패턴 결과를 비교한다. III장에서는 실제 제작된 능동위상배열 안테나 시스템의 송신 근접전계 시험을 통해 위상 변위 및 시간 지연 방식 각각의 빔 패턴 결과를 비교하여 시간 지연 기반 빔 조향 방식을 검증하고 IV장에서는 결론으로 마무리한다.

II. 위상 변위 및 시간 지연을 통한 빔 조향

2-1 위상 변위 및 시간 지연에 따른 빔 조향 방식

간격 d 로 균일하게 배열된 능동위상배열 안테나 시스템에서 θ 방향으로 빔 조향을 하고자 할 때, 그림 1과 같이 각 소자에 위상차 $\Delta\phi$ 를 인가하여 소자 간에 전파 경로 차이를 발생시킨다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} = \frac{2\pi f d \sin\theta}{c} \quad (1)$$

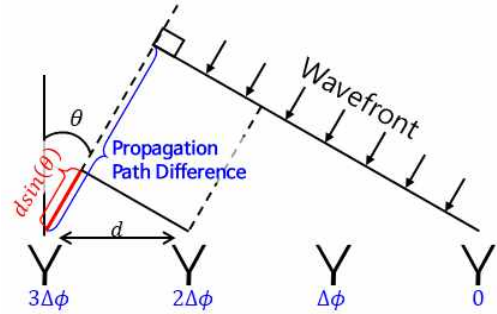


그림 1. d 간격을 가진 1D 배열 안테나 형상
Fig. 1. Configuration of 1D antenna placing of each other.

위상차 $\Delta\phi$ 는 식 (1)과 같이 주파수(f)에 대한 수식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{d \sin\theta}{c} \quad (3)$$

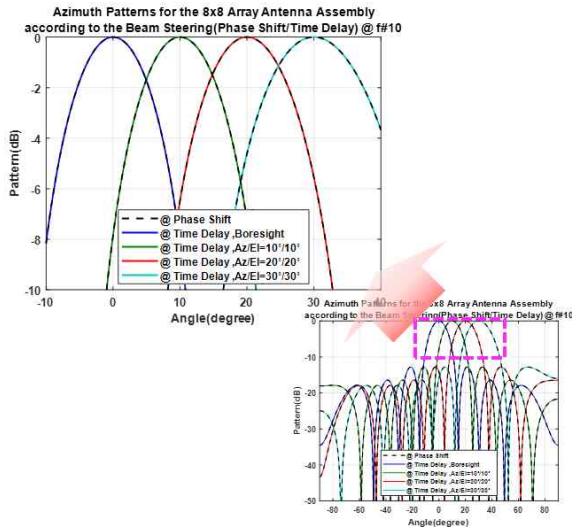
시간과 위상의 관계는 식 (2)와 같고, 따라서 시간차 Δt 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^{[2],[4],[5]}.

시간 지연을 통한 빔 조향 방식에서는 각 소자마다 식 (3)과 같이 시간차 Δt 를 적용하여 신호 도달 시간을 조절함으로써 파면의 기울기를 제어하여 원하는 방향으로 조향할 수 있게끔 한다.

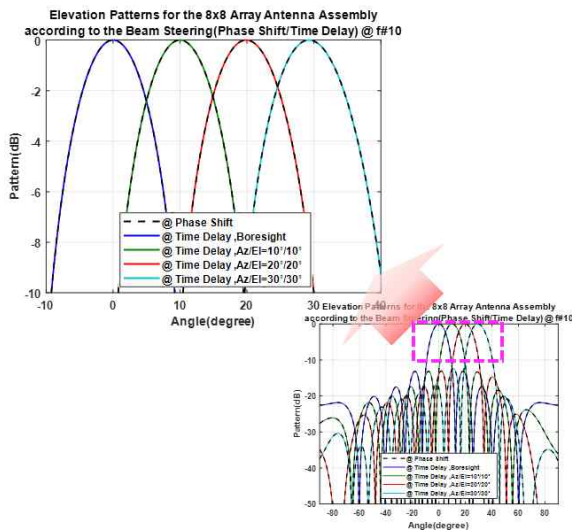
2-2 MATLAB 시뮬레이션 결과

앞서 제시한 수식을 기반으로 MATLAB을 활용하여 위상 변위 및 시간 지연에 따른 안테나 빔 패턴을 각각 계산하였다. 방위각 및 고각 방향으로 0° 부터 30° 까지 10° 간격으로 조향하기 위한 위상 변위값과 시간 지연값을 계산한 후, 각 소자에 적용하여 중심 주파수에서의 빔 패턴을 도출하였다. 그림 2는 위상 변위값을 적용하여 계산한 빔 패턴과 시간 지연값을 적용한 방위각/고각 빔 패턴 결과를 비교한 그래프이다.

MATLAB 기반 시뮬레이션 결과, 시간 지연 방식의 빔 패턴이 위상 변위 방식의 빔 패턴과 동일한 방향으로 조향이 되었으며, 원하는 방향으로 빔 조향이 잘 되었음을 확인할 수 있다.



(a) 방위각 방향 빔 패턴
(a) Azimuth beam patterns



(b) 고각 방향 빔 패턴
(b) Elevation beam patterns

그림 2. 위상 변위/시간 지연을 통한 빔 조향 방위각/고각 패턴 비교
Fig. 2. Simulation antenna azimuth beam pattern of 8x8 array antenna using phase shifting.

III. 능동위상배열 안테나 송신 근접전계 시험 측정 결과

본 논문에서 사용된 8x8 능동위상배열 안테나는 표 1에 제시된 주파수 대역 및 배열 구조를 기반으로 설계 및

표 1. 8x8 능동위상배열 안테나 구조

Table 1. Configuration of 8x8 active phased array antenna.

Parameter	Value
Frequency	L-band
Nx/Ny	8/8
Dx/Dy (λ_0)	0.49/0.58
Steer angle	Off-axis $\pm 45^\circ$
Tx weight	Uniform

제작되었다. 빔 조향 범위는 off-axis 기준 $\pm 45^\circ$ 이며, 송신 시에는 모든 채널에 동일한 세기의 신호가 인가되도록 uniform 가중치를 적용하였다. 안테나는 그림 3과 같이 삼각 배열 구조를 적용하여 빔 조향 범위를 넓히고 조향 범위 내 그레이팅 로브의 발생을 방지하도록 설계되었다⁶⁾.

제작된 능동위상배열 안테나는 송수신 모듈과 통합한 후 무반향 챔버 내에 설치하여 송신 근접전계 시험을 수행하였다. 시험 시에는 그림 4와 같이 안테나조립체 하우징과 근접전계 시험치구에 의한 전파 반사나 산란으로 인한 측정 정확도 저하를 방지하고자 흡수체를 부착하였다.

제작된 송수신 모듈은 위상 변위와 시간 지연 방식 모두에 기반한 빔 조향이 가능하도록 구현되었으며, 선택된 방식에 따라 각 채널들의 위상값을 제어한다. 본 시험에서는 중심 주파수 기준의 위상 변위값 및 시간 지연값을

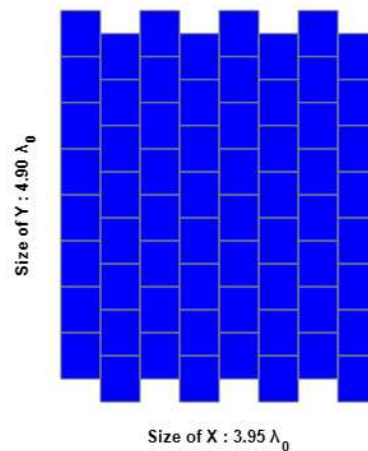


그림 3. 설계/제작된 8x8 능동위상배열 안테나 배열 구조
Fig. 3. Array configuration of the 8x8 active phased array antenna.



그림 4. 안테나부 근접전계 시험 구성
Fig. 4. Set-up configuration of near-field test.

계산하여 이를 모든 채널에 적용한 뒤 방사시킨다. 이후 동일한 중심 주파수 기준으로 신호를 수신하고 근접전계 데이터를 획득한 뒤, 푸리에 변환식을 통해 원전계 패턴으로 변환하여 빔 지향 정확도를 확인하였다^[7]. 조향 범위 내 $\theta/\phi=45^\circ/0^\circ$, $\theta/\phi=20^\circ/45^\circ$, $\theta/\phi=45^\circ/45^\circ$, $\theta/\phi=45^\circ/90^\circ$ 총 4개의 방향에 대한 빔 조향을 수행하였다.

그림 5는 보어사이트에서의 근접전계 결과이고, 그림 6은

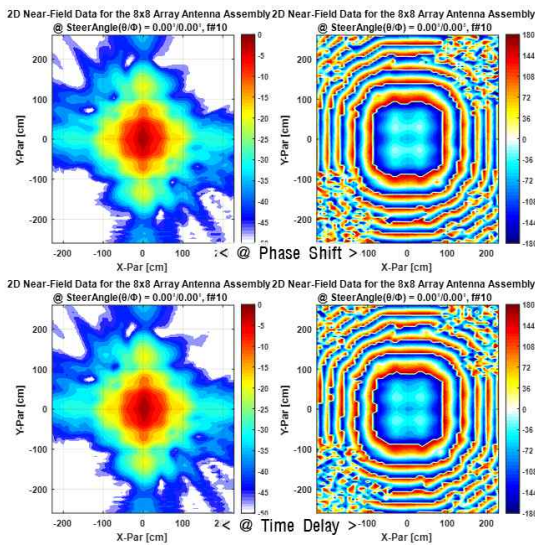


그림 5. 근접전계 측정 결과(크기/위상) (@ 보어사이트)
Fig. 5. Near-field measurement results (@ Boresight).

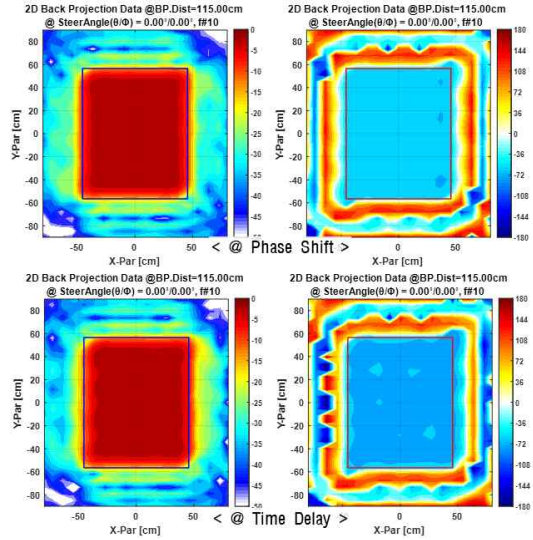


그림 6. 백프로젝션을 통한 안테나 개구면에서의 크기/위상 분포 (@ 보어사이트)

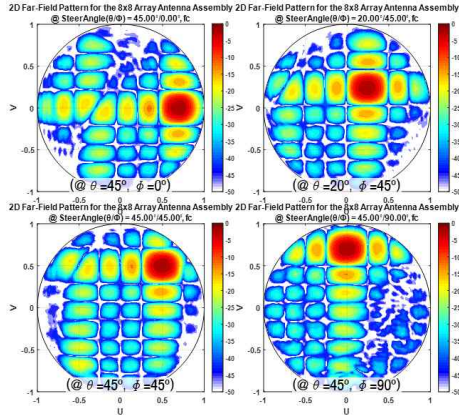
Fig. 6. Magnitude/Phase distribution on the antenna aperture by back-projection (@ Boresight).

보어사이트의 근접전계 데이터를 백프로젝션 기법을 적용하여 계산된 안테나 개구면에서의 크기/위상 분포를 플랏한 그림이다^{[8],[9]}. 해당 그림을 통해 안테나 개구면에서의 크기/위상 정렬 상태가 모두 양호함을 확인할 수 있다.

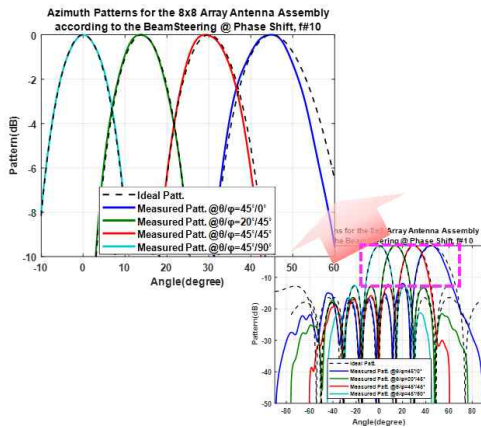
그림 7은 위상 변위를 적용한 2D/방위각/고각 안테나 빔 조향 패턴, 그림 8은 시간 지연값을 적용한 방위각/고각 안테나 빔 조향 패턴 결과를 나타낸다. 표 2는 각 조향 방향에서의 빔 지향 각도 값을 나타내었으며, 모든 경우에 1° 미만의 오차 범위 내에서 빔이 정확하게 조향되었음을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 제작된 8×8 능동위상배열 안테나 시스템의 송신 근접전계 측정을 통해 시간 지연 기반의 빔 조향 방식을 검증하였다. MATLAB을 통해 중심 주파수에서 각 채널에 적용할 시간 지연값을 계산하고 이를 적용한 결과, 빔이 목표 방향으로 정확히 조향됨을 확인하였다. 또한, 위상 변위 및 시간 지연 방식 모두 적용 가능한 8×8 능동위상배열 안테나 시스템을 제작하여 각각의 방식에 대해 송신 근접전계 시험을 수행한 결과, 두 방식 모

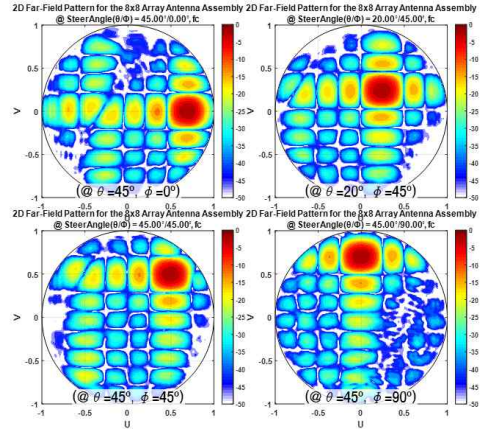


(a) 2D 빔 패턴
(a) 2D beam pattern

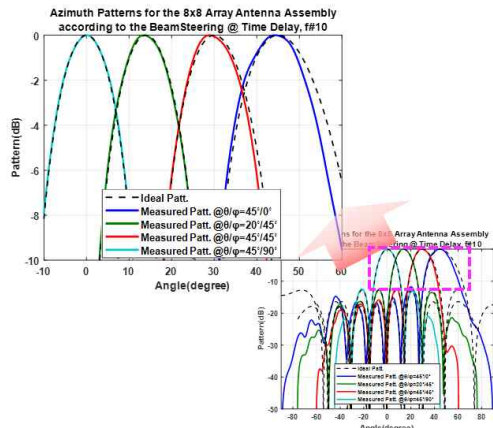


(b) 방위각/고각 방향 1D 빔 패턴
(b) Azimuth/Elevation 1D beam pattern

그림 7. 위상 변위를 통해 조향한 안테나 빔 패턴
Fig. 7. Measured antenna beam pattern of array antenna by phase shifting.



(a) 2D 빔 패턴
(a) 2D beam pattern



(b) 방위각/고각 방향 1D 빔 패턴
(b) Azimuth/Elevation 1D beam pattern

그림 8. 시간 지연을 통해 조향한 안테나 빔 패턴
Fig. 8. Measured antenna beam pattern of array antenna by time delay.

표 2. 빔 지향 각(명령값과 측정값)
Table 2. Beam pointing angle (commanded vs measured).

Commanded Beam steering angle (θ/ϕ) (°)	Measured	
	Phase shift (°)	Time delay (°)
45/0	44.90/0.01	44.25/-0.01
20/45	19.60/45.34	19.49/45.72
45/45	44.00/45.29	43.82/45.54
45/90	45.15/89.94	45.26/89.89

두에서 정확한 빔 조향이 이루어졌음을 확인하였다. 이를 통해 시간 지연 기반 빔 조향 방식이 빔 조향 수단으로서 충분히 작동할 수 있음을 실제 시스템 수준에서 검증할 수 있었다.

기존 협대역 레이더 시스템에서 널리 사용되던 위상 변위 기반의 빔 조향 방식은 광대역 환경에서 빔 지향 오차가 발생하는 한계를 지닌다. 반면 시간 지연 기반의 빔 조향 방식은 주파수에 의존적이지 않기 때문에, 광대역 환경에서도 빔 지향 오차 발생을 방지할 수 있다는 장점을 가진다. 최근 고속 신호 처리 및 거리 해상도 향상을 위한 광대역 레이더 시스템의 개발이 활발히 진행되면서 주파수 독립적인 빔 조향 기술의 필요성이 증가하고 있다. 따라서 시간 지연 기반 빔 조향 기술은 주파수 관계없이 정밀한 위상 제어가 가능하다는 점에서 추가 연구를 통해 광대역 환경에서의 빔 조향 성능도 검증할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 더 정밀하고 신뢰도 높은 목표 탐지를 위한 핵심 기술로 자리 잡을 것으로 기대된다.

References

[1] H. Kim, H. K. Na, and M. H. Jeon, "Development trend of active phased array radar," *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 2, pp. 39-49, Mar. 2014.
[2] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband

beam steering phased array antenna," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, Mar. 2017.
[3] Y. Jeong, Y. Noh, M. Kim, S. Park, J. Choi, and J. Han, et al., "Design and fabrication of wideband high power transmission board using true time delay," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 10, pp. 802-809, Oct. 2024.
[4] K. H. Lee, "A study on phase bearing error using phase delay of relative phase difference," *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 13, no. 2, pp. 76-81, Feb. 2021.
[5] J. Cha, Y. Park, "A study of 0.5-bit resolution for true-time delay of phased-array antenna system," *International Journal of Advanced Smart Convergence*, vol. 11, no. 4, pp. 96-103, Dec. 2022.
[6] Y. Kim, J. Kwon, Y. Kang, and J. Park, "Array configuration analysis of Ka-band phase array antenna," *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 19, no. 3, pp. 141-147, Jun. 2019.
[7] A. G. Repjar, A. C. Newell, and M. H. Francis, "Accurate determination of planar near-field correction parameters for linearly polarized probes," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 855-868, Jun. 1988.
[8] H. Chae, J. M. Lee, Y. W. Kim, H. S. Kim, H. S. Jin, and J. Park, "Near-field receiving measurement of active phased array antenna for full digital radar application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 7, pp. 625-634, Oct. 2016.
[9] D. Garneski, "A new implementation of the planar near-field back projection technique for phased array testing and aperture imaging," in *The 1990 Symposium Digest of the Antenna Measurement Techniques Association*, Philadelphia, PA, Oct. 1990.

권 시 원 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4926-3452>



2022년 2월: 한양대학교 ERICA 전자공학부 (공학사)
2022년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

정 영 주 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-0148-0100>



2022년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학과 (공학사)
2022년 10월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, RF 송수신모듈시스템

주 정 명 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2013년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 디지털 레이더 시스템, 다기능 레

이다 시스템

임 재 환 [LIG넥스원/기술위원]

<https://orcid.org/0000-0001-5338-3285>

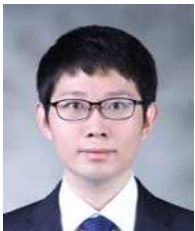


2004년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 2월~2008년 1월: 삼성전자 무선사업부

2008년 2월~현재: LIG넥스원 기술위원 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계, 반도체 송수신모듈, 디지털 레이더 시스템

박 세 준 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2767-5572>



2013년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
2013년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] RF Power Amplifier, 송수신 모듈 회로설계, 디지털 레이더 시스템

채 희 덕 [LIG넥스원/팀장]

<https://orcid.org/0000-0003-4609-1764>



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

2007년 3월~현재: LIG넥스원 초고주파기술연구소 팀장 [주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 안테나 구조 및 빔 패턴 최적화, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자파 수치 해석

진 형 석 [LIG넥스원/팀장]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



2000년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학 석사)

2000년 8월~현재: LIG넥스원 레이더연구소 팀장

[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 능동 위상 배열 레이더, 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계

박 중 국 [LIG넥스원/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학 석사)

2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

2001년 11월~현재: LIG넥스원 초고주파

기술연구소 소장

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