

초소형 위성 SAR 안테나용 광대역 적층형 패치 배열 안테나 설계 및 제작

Design and Fabrication of Broadband Stacked Patch Array Antennas for Small Satellite SAR Applications

조수빈 · 이재민 · 박종민 · 유제우 · 채희덕

SooBean Cho · Jae-Min Lee · Jongmin Park · Je-Woo Yu · Heeduck Chae

요약

본 논문에서는 초소형 위성 SAR 안테나용 광대역 패치 배열 안테나의 설계 및 제작 결과를 제시하였다. 군집 소형 위성 SAR용 안테나에 적용을 고려하여 평판형 타입이며, 경량화, 광대역 및 고지향성 특성의 단일편파 안테나를 설계하였다. 또한 고각 방향으로 전기적 빔조향이 가능하도록 배열 간격을 설계하였으며, 제한된 공간 내에서 방위각 방향으로 배열하기 위해 혼합 급전 방식(hybrid series-parallel feed)으로 최적화 설계하였다. 또한, 광대역 특성을 만족하기 위해 적층형 구조를 적용하였다. 제작된 안테나의 대역폭은 능동반사손실 -10 dB 이하 기준에서, 약 12 %임을 확인하였다. 또한, 근접전계시험을 통하여 안테나의 빔패턴을 확인하였다.

Abstract

This study proposed the design and fabrication of a broadband patch array antenna tailored for small satellite synthetic aperture radar (SAR) applications. Considering its application to clustered small satellite SAR systems, the antenna was designed in a flat-panel configuration with single polarization and optimized for lightweight, broadband, and high-gain characteristics. The element spacing was optimized to enable electronic beam steering toward high elevation angles. A hybrid series-parallel feeding structure was adopted to enable a compact azimuthal array configuration within a limited surface area. In addition, a stacked structure was employed to achieve a broadband performance. The measurement results showed that the antenna achieved an impedance bandwidth of approximately 12 %. The radiation patterns were validated using near-field measurements.

Key words: SAR System, Satellite, Patch Array Antenna

I. 서론

위성 SAR 시스템은 위성에서 지상 또는 해양으로 전자

기파를 방사하여 목표물에 반사된 신호를 수신하여 영상을 획득하는 시스템이다^[1]. 소형 SAR 위성은 궤도 운용비용과 제작 비용은 절감하면서도 기상 조건에 관계없이 고

LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received July 14, 2025 ; Revised July 23, 2025 ; Accepted August 5, 2025. (ID No. 20250714-067)

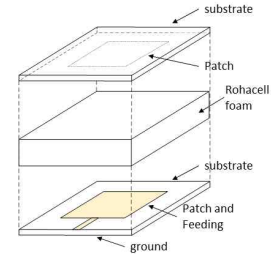
· Corresponding Author: Soobean Cho (e-mail: soobean.cho@lignex1.com)

해상도 지상 관측이 가능하다는 장점을 가지고 있어 정찰, 재해 모니터링, 환경 감시 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이에 따라 경량화 및 소형화된 안테나 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다. 최근 민간 주도의 활발한 위성 개발에 의해, 소형 SAR 위성의 군집 형성이 가능해졌으며, 단일 중대형 위성으로는 수행하기 어려운 임무를 군집 소형 위성들로 수행이 가능하게 되었다. 이러한 위성 SAR 시스템에 적용되는 안테나는 탑재 공간 적합성, 경량화 요구, 고이득 및 정밀한 빔 제어 능력 등을 동시에 만족해야 한다. 이와 같은 조건을 충족시키기 위해 위성 SAR 시스템용 안테나에 배열 안테나를 적용시키면, 반사판 안테나 대비 가벼우면서 low-profile 특성을 가지고 대량 생산 용이성을 제공하며 전기적으로 빔 조향이 가능하다는 장점을 가지게 되어 우주 임무에 적합한 결과를 얻게 된다^{[2][3]}. 안테나에 단일 편파 방식을 적용하게 되면 복잡한 편파 제어 회로 없이 안정적인 전자기파 전송이 가능하다. PCB 기반 단층 패치 배열 안테나는 제작 공정이 단순하며, 평면에 구성된 다양한 급전방식이 반사손실 및 급전 효율 측면에서 비교적 우수한 특성을 보이고, 탑재체 적응성이 높아 초소형 위성의 기계적, 열적 제약을 효과적으로 대응할 수 있다^[4]. 그러나, 단층 패치 구조는 좁은 대역폭 및 제한적인 이득 특성으로 인해 고해상도 SAR 시스템이 요구하는 성능을 만족하기 어렵다^[5]. 이러한 한계 극복을 위한 방법 중 하나가 적층형 마이크로스트립 패치 안테나 구조이다. 적층 구조는 상하에 서로 다른 크기의 패치 또는 유전체 기판을 배치하여, 공진 주파수들을 중첩시켜 대역폭을 효과적으로 확장할 수 있고, 이득 또한 향상시킬 수 있다^{[6][7]}. PCB 기반 평판형 구조의 배열 안테나는 구조 통합이 용이하여 방사체 수납 효율 면에서도 적합하며, 급전 네트워크 설계를 통해 다양한 빔폭 및 방사패턴을 조절할 수 있어, SAR의 지향성 및 빔조향 요구를 만족할 수 있다. 본 논문에서는 초소형 위성 SAR 시스템에 적용 가능한 단일편파 적층형 패치 능동위상배열 안테나의 설계 및 제작에 관하여 서술하였다.

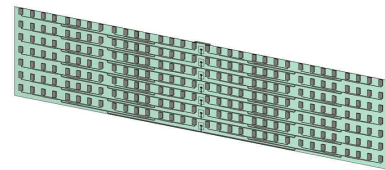
II. 안테나의 설계

초소형 위성 SAR 시스템에 적용 가능한 단일편파 능

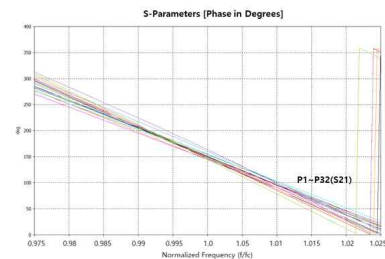
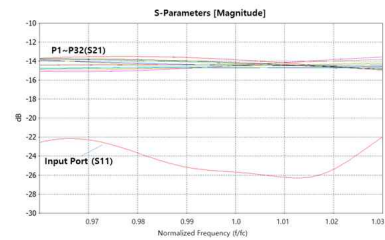
동위상 적층형 패치 배열 안테나는 마이크로스트립 구조의 패치 및 급전 선로로 구성된 층과 Rohacell 층, 기생형 패치 층을 수직 방향으로 적층하여 구성하였으며, 그림 1(a)은 단위 소자의 형상이다. 배열 안테나는 두 개의 방



(a) 단위 복사소자 구성
(a) Structure of the unit radiator



(b) 복사소자 및 급전 구조
(b) Radiating element and feeding structure



(c) 1×32 분배기의 시뮬레이션 결과(크기 및 위상)
(c) Simulation results for 1×32 power divider (magnitude and phase)

그림 1. 복사소자 형상 및 시뮬레이션 결과
Fig. 1. Radiating element design and simulation results.

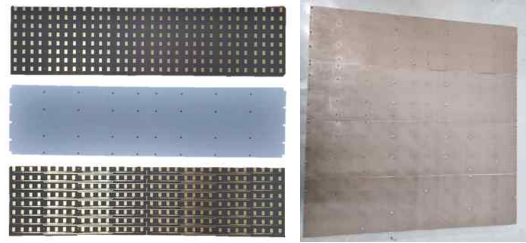
사 패치를 수직 방향으로 적층하여 구성하였으며, 서로 다른 크기로 설계하여 서로 다른 공진 주파수를 가지며, 이를 통해 광대역 특성을 확보하였다.

그림 1(b)는 배열 안테나의 급전구조 및 배열 안테나를 보여준다. 그림 1(a)에서 보인 단위 소자를 방위각 방향으로 grating lobe가 생기지 않는 배열 간격으로 배치하였고, 고각 방향으로는 고각방향 빔 조향 범위가 고려된 선 배열 간격 내 제한된 공간 내에서 배치하였다. 방위각 방향으로 1×32 배치를 위해 T-분배기를 적용하여 혼합 급전 방식(hybrid series-parallel feed)으로 최적화 설계를 진행하였다. 최적화를 통해 그림 1(c)와 같이 중심 주파수를 기준으로 1×32의 급전 구조의 시뮬레이션 크기 및 위상 결과이며, 대역폭 내 포트간 오차는 최대 4.4 dB, 위상은 최대 약 47.6°를 확인하였다.

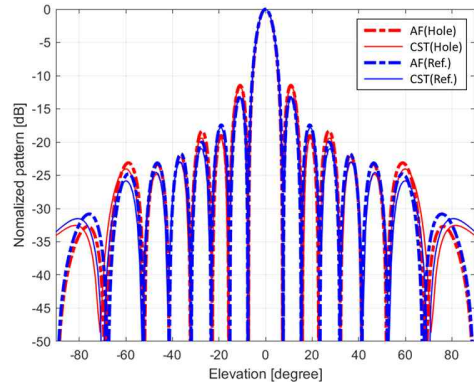
III. 안테나의 제작 및 측정

3-1 안테나 제작

그림 2는 복사소자 제작 형상으로, 안테나의 전체 배열은 32×32이다. 방위각 방향으로는 32개의 소자가 하나의 급전구조를 통해 묶여있으며, 고각 방향으로 32×1 선 배열되어 있다. 제작성 향상을 위해 4개의 부배열로 나누어 제작 및 조립을 수행하였다. 그림 2(a)는 안테나 제작 구성품으로 방사 패턴을 포함한 인쇄회로기판, Rohacell foam, 복사소자 패치와 급전구조 패턴을 포함하는 인쇄회로기판, 커넥터와 하우징으로 구성되어 있다. 또한, 안테나 최종 안테나 제작 형상(32×32)으로 총 4개의 부배열(8×32)로 구성되어 있다. 최종 안테나 형상의 경우, 최상판 기판의 유전체만 외부로 노출되며, Rohacell foam 및 두 기판층을 하우징에 고정하기 위해 나사를 활용한 체결구조를 적용하였다. 실제 제작 형상에서의 체결구조(홀)에 의한 영향성을 분석해야 하나, 시뮬레이션 상의 구현 문제로 체결 구조에 의한 패턴 영향성을 확인하기 위해 10×10배열 시뮬레이션을 진행하였고, 결과 패턴은 그림 2(b)와 같다. 배열계수(array factor)를 기반으로 방사패턴을 구현하였으며, 전자기 시뮬레이션 소프트웨어(CST)를 통해 패턴 결과를 비교하였다. 표 1에서 보인 바와 같



(a) 안테나 제작 구성품(8×32) 및 안테나 제작 형상 (32×32)
(a) Components for antenna fabrication(8×32) and fabricated structure of the antenna (32×32)



(b) 체결구조(홀)의 유무에 의한 시뮬레이션 패턴 결과
(b) Simulation radiation patterns with and without mounting holes

그림 2. 안테나 형상 및 체결구조에 따른 패턴 결과
Fig. 2. Antenna structure and simulation pattern results.

표 1. 체결구조(홀) 유무에 따른 시뮬레이션 결과
Table 1. Simulation results with and without mounting holes.

Simulation model	Simulation tool	Directivity (dBi)	Beamwidth (°)	Sidelobe level (dB)
With mounting holes	CST	28.3	6.5	-11.5
	Array factor	28.31	6.57	-11.18
Without mounting holes	CST	28.5	6.7	-13.1
	Array factor	28.5	6.71	-13.13

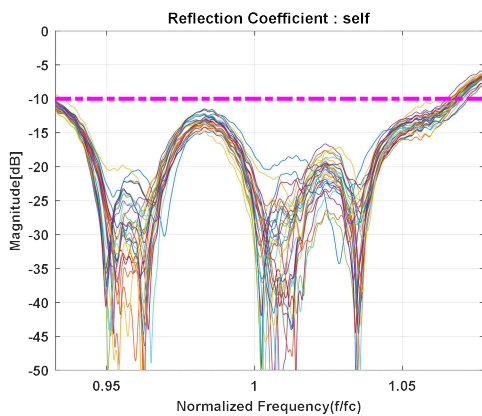
이 체결구조를 위한 홀의 유무에 따라 빔 폭이 약 0.2° 줄었고, 지향성은 약 0.1 dB 줄어들었으며, 부엽레벨 또한 약 2 dB 열화되었음을 확인하였다. 체결을 위한 홀에 의한 성능 저감을 확인하여 체결 위치를 최소화 및 최적화

를 진행하였다.

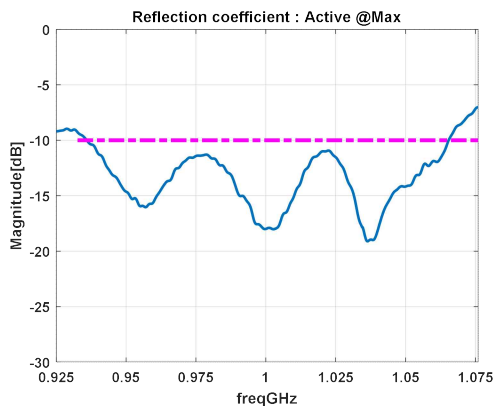
3-2 안테나 측정

위성 SAR용 안테나이므로 클린룸 내 무반향 챔버에서 능동반사계수 측정 및 근접전계 시험을 진행하였다.

그림 3(a)는 제작된 32배열 안테나의 반사손실(self return loss)이며, 그림 3(b)는 빔 조향 범위 내 최대 능동반사손실(max active return loss within beam steering range)



(a) 반사손실 측정 결과
(a) Reflection coefficient measurement results



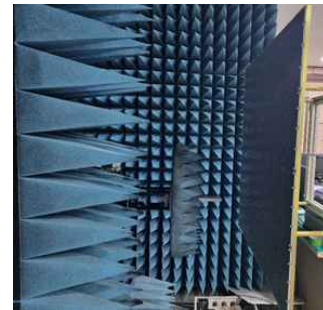
(b) 최대 빔 조향각 내 능동반사손실 측정 결과
(b) Active reflection coefficient measurement results at max beamsteering

그림 3. 반사손실 및 능동반사손실 측정 결과
Fig. 3. Reflection coefficient and active reflection coefficient measurement results.

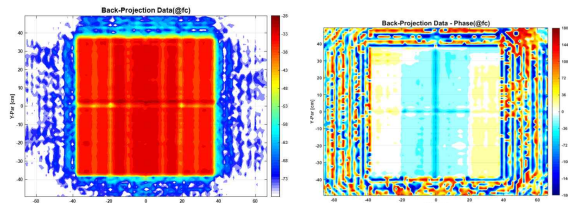
측정 결과이다. 반사손실 대역폭은 -10 dB이하 기준으로 위성 SAR 시스템에서 요구된 대역폭은 약 7 %지만, 제작된 32배열 안테나의 반사 손실 대역폭은 약 12 % 이상임을 확인하였다. 빔조향 범위 내 최대 능동반사손실 (Active return loss @ max)의 대역폭은 약 11 % 이상으로 요구 대역폭 결과를 초과하여 만족함을 확인하였다.

안테나의 빔패턴 성능을 검증하기 위해 근접전계 시험을 수행하였으며, 시험 셋업 및 측정 환경은 그림4(a)와 같다. 그림 4(b)는 근접전계 시험 결과로, 중심주파수에서 측정된 결과를 백프로젝션 기법을 통해 계산된 크기 및 위상 분포이며, 균일하게 분포됨을 확인하였다.

그림 5(a)는 방위각 방향 원전계 패턴 결과로 중심주파수에서의 시뮬레이션 패턴 결과와 측정 결과로 유사함을 확인하였다. 그림 5(b)는 고각 방향 원전계 패턴 결과로 중심주파수에서의 시뮬레이션 패턴 결과와 측정 결과로

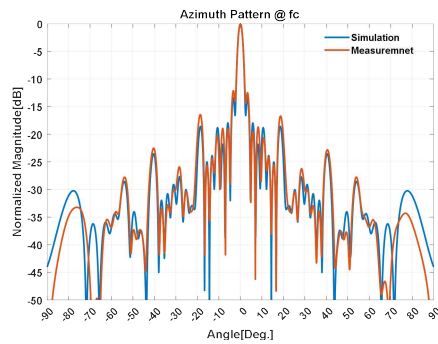


(a) 근접전계 측정 환경
(a) Near-field measurement environment

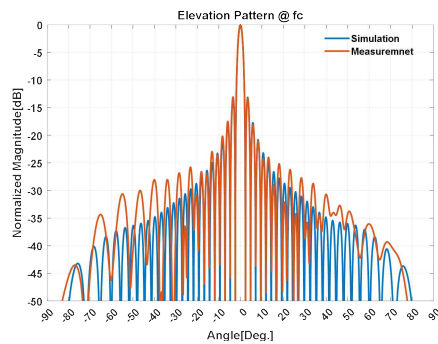


(b) 백프로젝션 기법을 통해 계산된 안테나 개구면에서의 크기 및 위상 분포
(b) Calculated magnitude and phase distribution on antenna aperture by back-projection technique

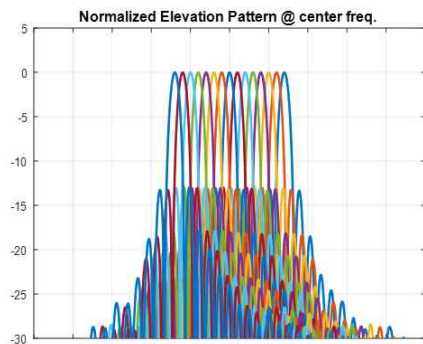
그림 4. 근접전계 시험 셋업 및 측정 환경
Fig. 4. Near-field test set-up and environment.



(a) 방위각 방향 시뮬레이션 및 측정 패턴
(a) Azimuth pattern and azimuth simulation pattern



(b) 고각 방향 시뮬레이션 및 측정 패턴
(b) Elevation pattern and elevation simulation pattern

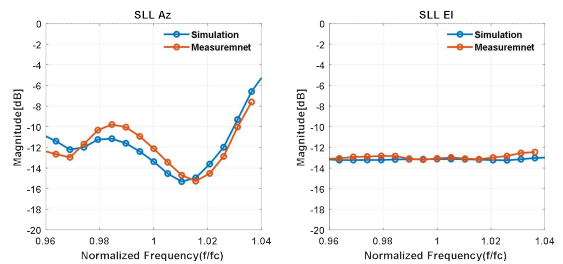


(c) 고각 방향 빔조향 패턴
(c) Elevation beamsteering pattern

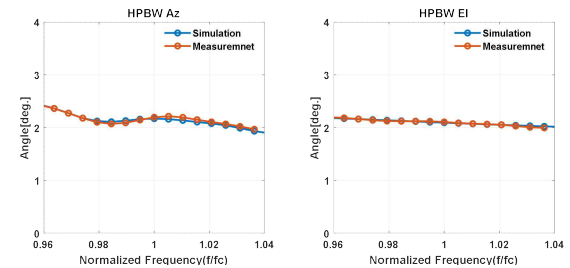
그림 5. 시뮬레이션 결과 및 빔 패턴 측정 결과
Fig. 5. Results of beam pattern measurements and simulation.

유사함을 확인하였다. 측정 결과를 통해 패턴이 정상적으로 형성된 것을 통해 설계와 제작이 유효함을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 고각 방향의 전기적 빔조향 패턴 측정

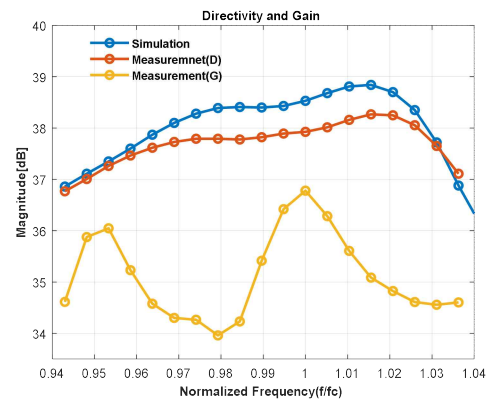
결과로 목표한 빔조향 범위까지 정상적으로 빔이 조향되는 것을 확인하였다. 그림 6은 주파수에 따른 빔패턴 성능을 보여준다. 그림 6(a)는 주파수 대역 내 부엽레벨 시뮬레이션 및 측정 결과로, 방위각 방향 부엽 레벨의 경우,



(a) 주파수에 따른 부엽레벨 측정 결과
(a) Side-lobe level measured results according to frequency



(b) 주파수에 따른 빔폭 측정 결과
(b) HPBW measured results according to frequency



(c) 주파수에 따른 이득 및 지향도 측정 결과
(c) Gain and directivity measured results according to frequency

그림 6. 주파수에 따른 패턴 성능 측정 결과
Fig. 6. Pattern performance measured results according to frequency.

측정 결과가 시뮬레이션 결과 대비 일부 주파수에서 약 1.2 dB 열화되었다. 그림 6(b)는 주파수 대역 내 빙폭의 시뮬레이션 및 측정 결과이며, 빙폭은 시뮬레이션과 측정 결과가 유사함을 확인할 수 있다. 그림 6(c)는 주파수에 따른 이득 및 지향도 시뮬레이션 결과 및 측정 결과로, 측정된 패턴의 지향성과 이득의 차를 통해 획득한 손실은 주파수 대역 내에서 평균 약 2.98 dB임을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위성 SAR용 광대역 패치 배열 안테나를 설계하고 검증하였다. 제안한 안테나는 단일편파 패치 배열 안테나로 광대역 설계를 위해 Rohacell foam을 활용한 적층형 구조를 적용하였으며, 능동위상배열 안테나로 빙조향 범위에서의 능동반사손실을 최소화하여 설계하고 제작 및 측정을 통해 검증하였다. 또한 근접전계 시험을 통하여 제작된 복사소자의 빙패턴 성능을 검증하였다. 본 논문을 통해 얻어진 설계 방법은 초소형 SAR 위성용 안테나의 군집 형성에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] J. Park, D. Kim, W. Kim, and J. Kim, "Operation mode

design and performance analysis for small satellite SAR payload," *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC)*, vol. 19, no. 5, pp. 169-173, Sep. 2019.

[2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016.

[3] J. M. Lee, J. W. Yu, H. Chae, J. K. Park, J. H. Young, and J. D. Lee, et al., "Design and manufacturing of a phased array feeder to verify dual reflectors for satellite synthetic aperture radar applications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 10, pp. 784-789, Oct. 2022.

[4] R. Garg, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Norwood, MA, Artech House, 2001.

[5] D. M. Pozar, "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no.1, pp.79-91, Jan. 1992.

[6] K. L. Wong, *Compact and Broadband Microstrip Antennas*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2002.

[7] H. Youn, Y. W. Kim, Y. H. Han, J. Y. Park, and B. Lee, "Design of wideband high-isolation dual-polarized aperture coupled microstrip patch antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 414-420, May 2020.

조 수 빈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1675-8065>



2016년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학사)

2019년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학석사)

2022년 10월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 반사배열안테나, 능동 위상 배열 안테나, 레이더 및 영상레이더 초고주파 시스템 등

이 재 민 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2293-0976>



2011년 2월: 경기대학교 전자공학부 (공학사)

2013년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)

2013년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 및 영상 레이더 초

고주파 시스템 등

박 중 민 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-1961-8340>



2006년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)

2014년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

2014년 9월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 영상레이다 및 초고주파시스템 등

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 팀장

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

유 제 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1204-074X>



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)

2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2008년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 및 영상레이더 초고주파 시스템 등