

원형 편파 스위칭 기능이 있는 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나

Reconfigurable Reflectarray Antenna
with Circular Polarization-Switching Capability

김 진 기 · 이 선 규* · 이 정 해

Jin-Ki Kim · Sun-Gyu Lee* · Jeong-Hae Lee

요 약

본 논문에서는 원형 편파 스위칭 기능이 있는 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나를 제시한다. x 및 y 편파 단위 셀의 기준 위상을 동위상 또는 반대 위상으로 설정하여 RHCP(right-handed circular polarization) 또는 LHCP(left-handed circular polarization)으로 편파를 스위칭하는 방법을 제안한다. 또한, 두 직교 편파의 기준 위상을 이동시킴으로써 축비를 향상하는 최적화 방법을 제안한다. 제안된 안테나의 빔 조향은 시뮬레이션 및 측정에서 RHCP 및 LHCP로 xz 및 yz 평면에서 최대 45° 까지 되는 것으로 검증되었다.

Abstract

This paper presents a reconfigurable reflectarray antenna (RRA) that uses a metasurface to achieve circular polarization-switching capability. A method for switching to right-handed circular polarization (RHCP) or left-handed circular polarization (LHCP) by setting the reference phases of the x - and y -polarized unit cells as in-phase or out-of-phase is proposed. In addition, an optimization method for improving the axial ratio by shifting the reference phases of the two orthogonal polarizations is presented. Simulation and measurements are detailed, verifying the beam steering of the proposed RRA to be as high as 45° in the xz and yz planes.

Key words: Metasurface Antenna, Dual-Circular Polarization, Phase Quantization, Beam Steering, Axial Ratio

I. 서 론

재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나^{[1]~[3]}는 전자적 빔 조향을 위해 고가의 위상천이기 대신 PIN 다이오드와 같은 능동 부품을 사용하므로 시스템의 저비용, 경량화의 장점이 있어서 무선 통신, 위성 통신, 레이더에 응용될 수 있는 차세대 안테나로 주목받고 있다. 일부 응용에서는 편파 불일치로 인한 전송효율 감소를 방지하기 위해 원

형 편파 안테나가 이용되고 있으며, 더 안정적인 통신을 위해 RHCP(right-handed circular polarization)와 LHCP(left-handed circular polarization)를 스위칭하여 사용하기도 한다.

이전 연구에서는 원형 편파 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나^{[3]~[6]}가 보고되었다. 그러나 대부분의 안테나^{[4]~[6]}는 단위 셀에서 x 및 y 편파를 독립적으로 제어할 수 없어서 원형 편파 스위칭이 불가능했다. 한편, 이중 편파 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나^[3]는 단위 셀에

「이 논문은 2023학년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(2015R1A6A1A03031833)의 지원을 받아 수행된 연구임.」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)

· Manuscript received December 5, 2023 ; Revised December 19, 2023 ; Accepted January 17, 2024. (ID No. 20231205-102)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

서 x 및 y 편파를 독립적으로 제어 가능하였고, 두 편파를 같은 방향으로 동시에 빔 조향함으로써 원형 편파로 합성할 수 있었다. 그러나 가상의 원형 편파 급전 안테나를 사용하여 한 가지 원형 편파에 대해 시뮬레이션에서만 제한적으로 검증하였다는 한계가 있었다.

본 논문에서는 이중 편파 메타표면^[3]을 기반으로 원형 편파 스위칭 기능이 있는 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나를 제안한다. 급전 안테나로 LHCP 패치 안테나를 설계하고 메타표면에 결합하여 xz 및 yz 평면에 대해 원형 편파 빔 조향을 측정하였다. 여기서 기존의 이중 편파 메타표면이 x 및 y 편파 단위 셀을 독립적으로 제어할 수 있다는 점을 이용하여, 각 편파의 기준 위상을 동위상이나 반대 위상으로 설정함으로써 RHCP 또는 LHCP로 편파를 스위칭하는 방법을 제안한다. 또한, 두 편파의 기준 위상을 이동시킴으로써 축비를 향상하는 방법을 제안한다.

II. 안테나 구조

반사형 능동 메타표면 안테나는 그림 1(a)와 같이 급전 안테나와 능동 메타표면^[3]으로 구성되어 있다. 여기서 설계된 LHCP 패치 급전 안테나의 구조는 그림 1(b)와 같으며, 9.9 GHz에서 반사 계수는 -14 dB, 최대 이득은 6.66 dBi, 축비는 0.86 dB로 측정되었다. 급전 안테나의 위치는 스피로버(spillover) 효율이 69 %, 테이퍼(taper) 효율이 78 %로, 둘의 곱이 최대가 되는 지점으로 선택하였고, 이때 $F/D=0.32$ 이다. 여기서 F 는 급전 안테나와 개구면 사이의 거리로 40 mm, D 는 개구면 한 변의 길이로 126 mm이다.

능동 메타표면은 그림 1(c)와 같이 x 및 y 편파에 대해 각각 82개의 단위 셀이 교차로 배열되어 있는 구조이다. 여기서 x 또는 y 편파를 선택하고 grating lobe를 방지하기 위해 소형화된 직사각형 링 패치 모양의 단위 셀이 채택되었다. 각 단위 셀^[3]은 PIN 다이오드를 on/off함에 따라 링 패치의 전기적 길이가 달라져 반사 계수의 위상을 180° 로 가변 할 수 있도록 설계되었다. 단위 셀의 치수는 $P=9$ mm, $L_x=3.6$ mm, $L_y=7.9$ mm, 그리고 $W=0.75$ mm이다. 또한, 원하지 않는 직교 편파의 영향을 상쇄하기 위해 대칭적으로 회전된 부배열 구조가 채택되었다.

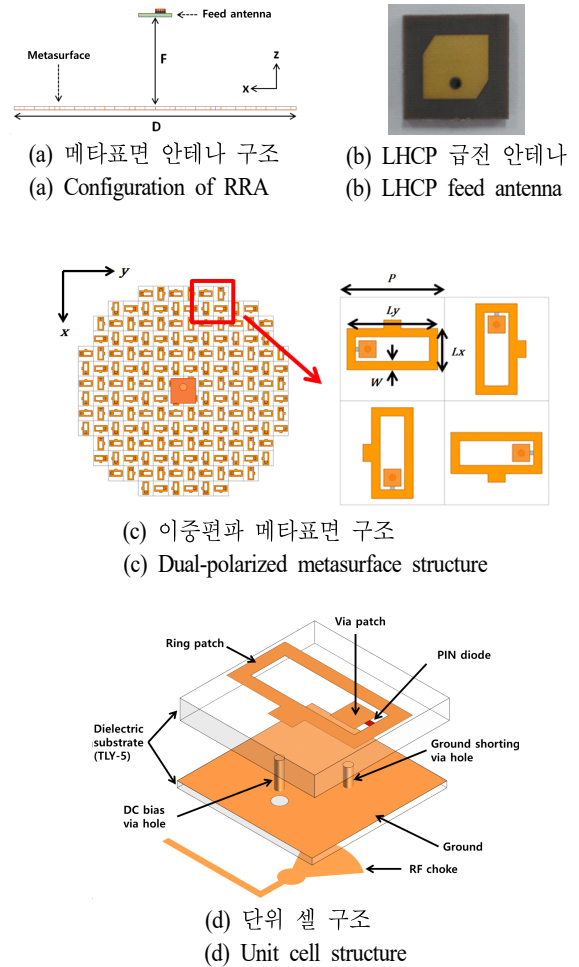


그림 1. 제안된 안테나 구조
Fig. 1. Structure of proposed RRA.

III. 원형 편파 스위칭 및 축비 보정 원리

능동 메타표면 안테나의 빔 조향 원리^[7]는 배열 안테나의 어레이 팩터(array factor) 이론을 기반으로 메타표면 반사파의 파면을 조작함으로써 빔의 방향을 제어할 수 있다. 빔 조향을 위한 반사파의 위상은 급전 안테나로부터 메타표면에 구면파 형태로 도달한 입사파의 위상과 단위 셀의 반사 계수의 위상에 의해 다음 식과 같이 계산될 수 있다^{[3],[7]}.

$$\phi_{x \text{ or } y}^{\text{out.}} = \phi_{x \text{ or } y}^{\text{in.}} + \phi_{x \text{ or } y}^{\text{req.}} + \phi_{x \text{ or } y}^{\text{ref.}}, \quad (1)$$

여기서 $\phi_{x \text{ or } y}^{\text{out.}}$, $\phi_{x \text{ or } y}^{\text{in.}}$, $\phi_{x \text{ or } y}^{\text{req.}}$, $\phi_{x \text{ or } y}^{\text{ref.}}$ 는 각각 메타표면 내 x

또는 y 편파 단위 셀에서 출력, 입력, 요구, 기준 위상^{[3],[7]}을 나타낸다. 출력 위상은 원하는 방향으로 빔 조향을 하기 위해 필요한 위상으로 어레이 팩터를 통해 구할 수 있고 연속적인 위상 변화를 갖는다. 입력 위상은 급전 안테나로부터 메타표면의 각 단위 셀에 도달한 전파의 위상 지연이며 요구 위상은 단위 셀의 반사 위상으로 출력 위상과 입력 위상으로부터 계산되고, 마찬가지로 연속적인 위상 변화를 갖는다. 하지만 PIN 다이오드를 on/off하여 빔조향을 수행하는 1비트 메타표면의 경우 요구 위상을 0° 또는 180° 로 양자화하는 과정을 겪으며, 연속적인 위상 분포에 비해 필연적으로 양자화 효율의 열화가 발생한다. 이때 양자화 효율을 최대를 하기 위해 메타표면 전체 단위 셀에 동일한 기준 위상을 더해주는 기법이 적용될 수 있다^{[3],[7]}. 여기서 180° 위상차로 양자화하였으므로 양자화 효율이 최대가 되는 기준 위상은 180° 마다 반복된다. 따라서 x 및 y 편파에 대해 양자화 효율이 최대가 되는 기준 위상은 동위상 또는 반대 위상(180°)의 경우가 있다.

한편, 이상적인 RHCP 및 LHCP 빔을 생성하기 위해 능동 메타표면의 출력파의 크기는 동일하고, 위상은 식 (2) 및 식 (3)과 같이 설정되어야 한다.

$$\phi_x^{\text{out.}} = \phi_y^{\text{out.}} + 90^\circ \quad (2)$$

$$\phi_x^{\text{out.}} = \phi_y^{\text{out.}} - 90^\circ \quad (3)$$

여기서 식 (2) 및 식 (3)은 각각 RHCP 및 LHCP 빔 조향을 위한 직교 편파의 위상 조건에 해당한다. 이 조건은 식 (1)로부터 x 및 y 편파의 기준 위상을 동위상 또는 반대 위상으로 설정함으로써 설정할 수 있다. LHCP 급전 안테나를 가정하였으므로, x 및 y 편파의 기준 위상을 같게 한 동위상 반사의 경우, 입사파의 방향과 메타표면의 반사파 진행 방향이 반대가 되므로 식 (2)와 같은 조건이 되어 RHCP 빔이 생성된다. 반대로 기준 위상에 180° 차이를 준 반대 위상(180°)의 경우, 식 (3)과 같은 조건이 되어 LHCP 빔이 생성된다.

이러한 원리를 적용한 예제로 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ)$ 방향으로 RHCP와 LHCP 빔 조향 시 메타표면의 PIN 다이오드 on/off 제어 상태를 그림 2에 나타내었다. x 및 y 편파의 양자화 효율이 최대가 되는 기준 위상이 같도록 설정된

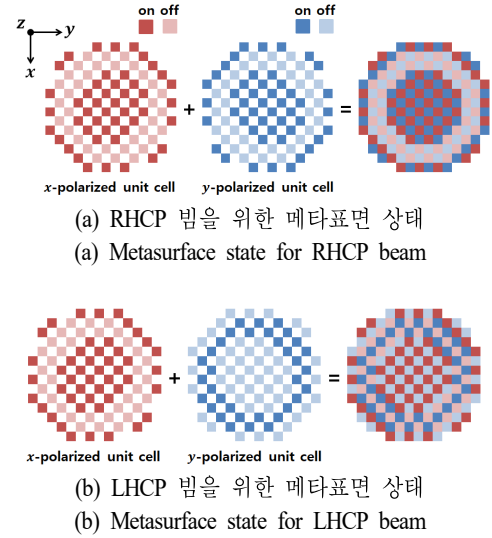


그림 2. 전면 방향에서 RHCP/LHCP 빔의 예시

Fig. 2. Examples for RHCP/LHCP beam at boresight direction.

경우, 그림 2(a)와 같이 두 편파는 유사한 on/off 분포를 갖게 되어 RHCP 빔이 생성된다. 반대로 x 및 y 편파의 양자화 효율이 최대가 되는 기준 위상에 180° 차이를 설정하면, 그림 2(b)와 같이 두 편파가 반전된 on/off 분포를 갖게 되고 LHCP 빔이 생성된다.

그러나 실제 메타표면 안테나는 급전 안테나 구조, 메타표면의 모서리 회절, 측정에 사용된 지그에 의한 산란 효과에 의해 이상적인 원형 편파 조건을 벗어나게 되어 축비 성능이 열화될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 축비 최적화 방법은 직교 편파의 기준 위상을 양자화 효율이 최대가 되는 조건인 식 (2) 또는 식 (3)에서 약간 이동시킴으로써 양자화 효율, 출력 위상을 변화시킬 수 있으며, 이를 통해 이상적인 원형 편파 조건에 가깝게 최적화할 수 있다. 그 방법은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\phi_x^{\text{out.com.}} = \phi_x^{\text{req.}} + \phi_x^{\text{in.}} + \phi_x^{\text{ref.com.}} \quad (4)$$

$$\phi_y^{\text{out.com.}} = \phi_y^{\text{req.}} + \phi_y^{\text{in.}} + \phi_y^{\text{ref.com.}}, \quad (5)$$

여기서 $\phi_x^{\text{out.com.}}$, $\phi_y^{\text{out.com.}}$ 는 각각 x 또는 y 편파의 보정된 출력 위상으로 기준 위상 $\phi_x^{\text{ref.com.}}$, $\phi_y^{\text{ref.com.}}$ 을 임의로 설정하여 보정할 수 있다. 이러한 방법을 사용하면 표 1에 나타난 것과 같이 보정 전후에서 이득은 유지되면서

표 1. xz 평면의 $\theta=45^\circ$ 에서 RHCP 빔에 대한 축비 최적화의 예시

 Table 1. Example of axial ratio optimization for RHCP beam at $\theta=45^\circ$ in xz plane.

	Before compensation	After compensation
Gain sim. [dBic]	13.69	13.57
Gain mea [dBic]	11.44	11.14
Axial ratio sim. [dB]	1.11	0.72
Axial ratio mea. [dB]	3.89	1.67

축비는 시뮬레이션에서 0.39 dB, 측정에서 2.22 dB 더 낮게 최적화되었다.

IV. 측정 및 시뮬레이션 결과

그림 3은 제작된 안테나의 실물 사진이다. 설계된 능동 메타표면 안테나는 제어부, 급전 안테나를 지그에 결합한 구조로 제작되었으며 pc 프로그램과 제어회로를 통해 메타표면의 각 다이오드에 전력을 공급함으로써 빔 조향이 가능하다. 해당 안테나는 측정거리 7 m의 무반사실에서 측정되었다^[3]. 그림 4 및 그림 5는 각각 RHCP와 LHCP의 빔 조향 결과를 나타낸다. 두 원형 편파 모두 xz 및 yz 평면에서 최대 45° 까지 빔 조향 되는 것을 확인했다. 여기서 메타표면은 대칭 구조이므로 한쪽 방향에 대해서만 측정하였다. RHCP 빔의 최대 이득은 13.89 dBic, 개구면 효율은 15.52 %로 측정되었으며, LHCP 빔의 최대 이득은 14.12 dBic, 개구면 효율은 14.19 %로 측정되었다. 축비는 LHCP & yz 평면의 $\theta=45^\circ$ 를 제외하고 모든 조향각에서

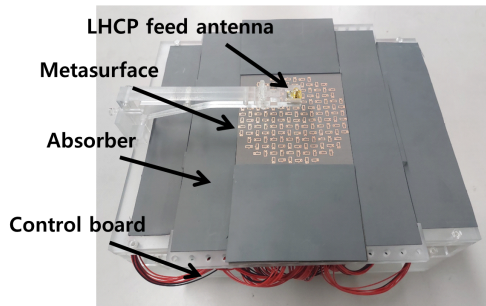
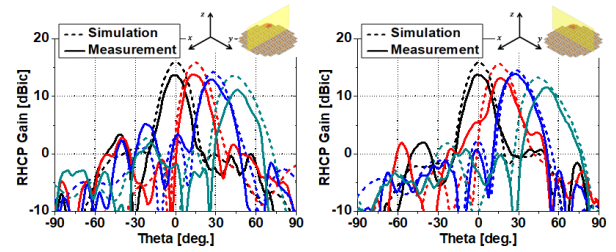
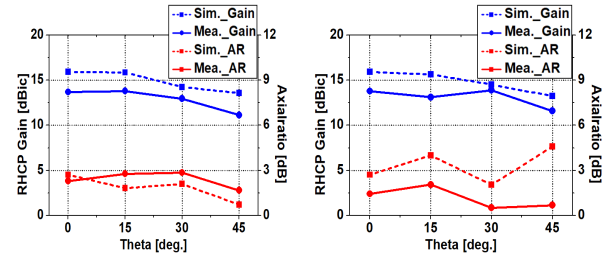

 그림 3. 제작된 안테나
Fig. 3. Fabricated antenna.

 (a) xz 평면에서 빔 조향
(a) Beam steering in xz plane
(b) yz 평면에서 빔 조향
(b) Beam steering in yz plane

 (c) xz 평면에서 축비
(c) Axial ratio in xz plane
(d) yz 평면에서 축비
(d) Axial ratio in yz plane

그림 4. RHCP 빔 조향 결과

Fig. 4. RHCP beam steering results.

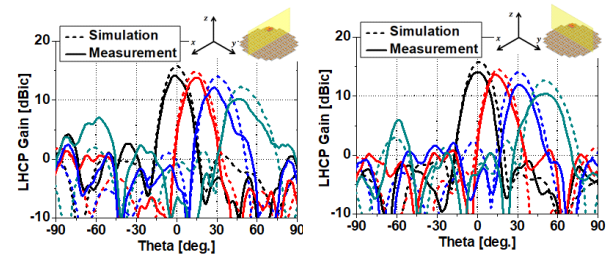
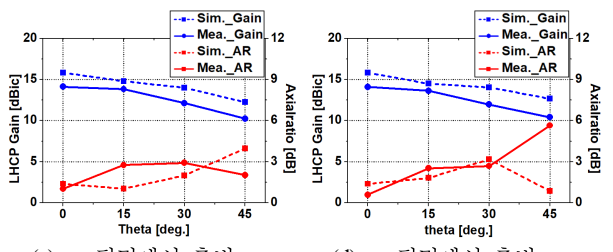

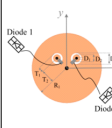
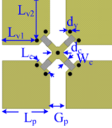
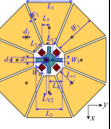

 (a) xz 평면에서 빔 조향
(a) Beam steering in xz plane
(b) yz 평면에서 빔 조향
(b) Beam steering in yz plane

 (c) xz 평면에서 축비
(c) Axial ratio in xz plane
(d) yz 평면에서 축비
(d) Axial ratio in yz plane

그림 5. LHCP 빔 조향 결과

Fig. 5. LHCP beam steering results.

표 2. 원형 편파 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나의 비교

Table 2. Comparison of CP RRAs.

	This work	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]
CP switching	O	X	X	X
Unit cell design				
Frequency	9.9 GHz	9.5 GHz	10.25 GHz	9.5 GHz
Peak gain [dBic]	13.89(RHCP) / 14.12(LHCP)	21.8	20.4	24.5
F/D	0.32	0.99	1.05	1.02

3 dB 이하로 유지되었다. 측정 결과의 오차는 제작된 급전 안테나의 성능 오차, 제작 공차, 조립 오차, 지그의 영향 등에 의한 것으로 사료된다.

표 2는 본 논문의 연구결과를 원형 편파 급전 안테나를 사용한 기존 반사형 능동 메타표면 안테나 사례^{[4]~[6]}와 비교한 것이다. 기존 안테나들은 x 및 y 편파를 제어하기 위한 PIN 다이오드가 하나의 바이어스 선로에 연결되어 있기 때문에 다이오드의 상태가 종속적으로 제어되어 한 가지 원형 편파로만 빔 조향이 가능한 한계가 있다. 반면에 제안된 안테나는 x 및 y 편파 단위 셀을 각각 설계함으로써 독립적으로 제어되어 편파 스위칭 빔 조향이 가능하다. 본 논문의 안테나는 기존 논문의 안테나에 비해 이득이 작은 급전 안테나를 사용하기 때문에 작은 값의 F/D를 갖는다^[8].

V. 결 론

본 논문에서는 설계된 LHCP 패치 급전 안테나를 이용하여 원형 편파 스위칭 기능이 있는 재구성 가능한 반사형 메타표면 안테나를 설계하였다. x 및 y 편파의 기준 위상을 동위상 또는 반대 위상으로 설정함으로써 RHCP 또는 LHCP로 편파 스위칭하는 방법을 제안하였고, 축비를 개선하기 위해 기준 위상을 이동시키는 최적화 방법을 제안하였다. 제안된 안테나의 원형 편파 스위칭 빔 조향

은 측정을 통해 xz 평면과 yz 평면에서 낮은 축비로 최대 45°까지 가능한 것을 확인하였다.

References

- [1] S. V. Hum, J. P. Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 1, pp. 183-198, Jan. 2014.
- [2] H. Yang, F. Yang, X. Cao, S. Xu, J. Gao, and X. Chen, et al., "A 1600-element dual-frequency electronically reconfigurable reflectarray at X/Ku-band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 6, pp. 3024-3032, Jun. 2017.
- [3] S. G. Lee, J. H. Lee, "A dual-polarized reconfigurable reflectarray antenna based on a symmetrically rotated sub-array," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 55657-55663, Jun. 2023.
- [4] F. Wu, R. Lu, J. Wang, Z. H. Jiang, W. Hong, and K. M. Luk, "A circularly polarized 1 bit electronically reconfigurable reflectarray based on electromagnetic element rotation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 9, pp. 5585-5595, Sep. 2021.
- [5] F. Wu, R. Lu, J. Wang, Z. H. Jiang, W. Hong, and K. M. Luk, "Circularly polarized one-bit reconfigurable ME-dipole reflectarray at X-band," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 496-500, Mar. 2022.
- [6] F. Wu, W. G. Zhao, X. Xia, J. Wang, Z. H. Jiang, and R. Sauleau, et al., "A 2 bit circularly polarized reconfigurable reflectarray using p-i-n-diode-tuned crossed-bowtie patch elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 9, pp. 7299-7309, Sep. 2023.
- [7] S. G. Lee, Y. H. Nam, Y. Kim, J. Kim, and J. H. Lee, "A wide-angle and high-efficiency reconfigurable reflectarray antenna based on a miniaturized radiating element," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 103223-103229, Sep. 2022.

- [8] C. H. Lee, T. V. Hoang, S. W. Chi, S. G. Lee, and J. H. Lee, "Low profile quad-beam circularly polarized antenna using transmissive metasurface," *IET Microwaves*,

Antennas & Propagation, vol. 13, no. 10, pp. 1690-1698, Aug. 2019.

김 진 기 [LIG Nex1/연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-6820-5315>



2022년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2024년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2024년 1월~현재: LIG Nex1 연구원
[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타물질 및 메타표면 안테나

이 선 규 [한국전자통신연구원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6383-7287>



2016년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2018년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2023년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2024년 1월~현재: 한국전자통신연구원

입체통신연구소 연구원
[주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타물질 및 메타표면 안테나

이 정 해 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5135-6360>



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

2019년 1월~2019년 12월: 한국전자과학회 회장

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF소자, 무선전력전송