

# 도파관 측정 기반의 X 대역 PIN 다이오드 등가회로 값 추출 방법

## Extraction Method for X-Band PIN Diode Equivalent Circuit Parameters Based on Waveguide Measurement

정 해 빈 · 이 선 규 · 이 정 해

Hae-Bin Jung · Sun-Gyu Lee · Jeong-Hae Lee

### 요 약

본 논문에서는 도파관 측정 환경에서 X 대역 PIN 다이오드의 등가회로 값 추출 방법을 제안한다. S 파라미터 측정에는 회로망 분석기, 도파관, transition, 동일한 두 개의 어댑터와 PIN 다이오드를 포함한 1×2 단위 셀이 사용되었으며, 측정 결과로부터 PIN 다이오드의 등가회로 값을 추출하였다. 측정 부품에서 생기는 불필요한 오차를 줄이기 위하여 Thru, Reflect, Line(TRL) 보정 방법을 이용하였으며, 최종적으로 어댑터에 의한 영향이 보정된 측정 결과로부터 정확한 PIN 다이오드의 등가회로 값을 결정하였다.

### Abstract

An extraction method is proposed for the equivalent circuit parameters of an X-band PIN diode based on waveguide measurement. For the S-parameter measurement, a network analyzer, a waveguide, a transition, two identical adapters, and a 1×2 unit cell with two PIN diodes were used, and the equivalent circuit parameters of the PIN diode were extracted from the measurement results. The thru, reflect, line calibration method was adopted to reduce undesired errors in the components used for measurement, and the equivalent circuit parameters of the PIN diode were determined from the measurement results, where the effect of adapters was corrected.

Key words: PIN Diode, Unit Cell, Waveguide Measurement, TRL Calibration Method, MetaSurface

### I. 서 론

능동 메타표면 안테나<sup>[1]</sup>는 시스템의 소형화, 경량화가 가능한 구조적 장점을 가지면서 임의 방향으로 고이득 빔 조향이 가능한 안테나이다. 이러한 장점 덕분에 최근 능동 메타표면 안테나는 레이더, 무선전력 전송, 위성 통신과 같은 분야에 유력한 후보로서 주목받고 있다. 능동

메타표면 안테나의 종류로는 반사배열 안테나(reflectarray antenna), 투과배열 안테나(transmitarray antenna)가 있다. 이 중에 반사배열 안테나는 접지면에서 급전된 모든 전파가 반사되고, 한 면의 방사부만을 사용하여 실제 구현에서 시스템 복잡도가 낮기 때문에 투과배열 안테나보다 높은 개구면 효율을 갖는다<sup>[1][2]</sup>.

능동 메타표면 안테나 단위 셀은 위상 제어를 위해

†이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업 (2015R1A6A1A03031833)의 지원을 받아 수행된 연구임.

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

· Manuscript received May 4, 2022 ; Revised June 2, 2022 ; Accepted August 12, 2022.(ID No. 20220504-045)

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

PIN 다이오드, Varactor 다이오드, Liquid crystal, RF MEMS 스위치 등이 포함될 수 있다<sup>[1]</sup>. 이 중에서 PIN 다이오드는 on/off의 1-bit 제어를 사용하여 반사파의 180° 위상차를 이용하므로 단순한 시스템 운용이 가능하고<sup>[3]</sup>, ns의 빠른 스위칭 속도<sup>[4]</sup>로 인한 빠른 빔 조향이 가능하다.

정밀한 빔 조향을 위해서는 정확한 위상 제어가 요구되며, 단위 셀에 사용된 PIN 다이오드의 정확한 등가회로 값 결정이 필수적이다. 기존에 수행된 연구<sup>[5]</sup>에서는 다른 연구 사례<sup>[6]</sup>와 PIN 다이오드 제조사에서 제공한 데이터 시트<sup>[4]</sup>를 참고하여 등가회로 값을 결정하여 사용하였다. 그러나 측정 환경이 본 논문과 다르고 그 값이 부정확하여, 측정된 메타표면 안테나의 이득은 시뮬레이션과 차이가 있어 측정 환경에 맞는 PIN 다이오드의 새로운 등가회로 값 결정이 필요하였다.

본 논문에서는 반사 배열 메타표면 안테나에서 단위 셀의 도파관 측정을 기반으로 하여 X 대역(8~12 GHz)에서 PIN 다이오드의 등가회로 값을 결정하였다. 여기서 측정 부품에서 생기는 오차를 최소화하기 위해 TRL 보정 방법<sup>[7]</sup>이 적용되었다. 정확한 PIN 다이오드 등가회로 값을 결정하기 위해, 링 패치의 크기에 따라 등가회로 값을 추출하고 그 평균값을 사용하였다.

## II. 측정 방법 및 이론

그림 1은 연구에서 제안된 TRL 방법을 검증하기 위한 예시 구조로써, 사용된 PIN 다이오드의 등가회로와 소형화된 링 패치 단위 셀 구조<sup>[5]</sup>를 나타낸다. 사용된 단위 셀은 2층의 Taconic TLY-5 기판( $\epsilon_r=2.2$ ,  $\tan \delta=0.0009$ )으로 구성되어 있으며, 기존의 단위 셀<sup>[2],[3]</sup>과 유사한 설계 구조를 갖는다. 여기에는 상부층에는 PIN 다이오드를 포함한 방사 구조, 중간층에는 접지면 구조, 그리고 하부층에는 DC 바이어스를 위한 회로가 포함된다. 단위 셀에 포함된 PIN 다이오드는 MACOM 사의 MA4GP907 모델이 사용되었다.

단위 셀에서 링 패치는 PIN 다이오드와 단락 비아 홀을 통해 접지면과 연결된다. 여기서 이상적인 PIN 다이오드를 가정하면, 다이오드의 on/off 상태에 따라 한쪽 방사 슬롯이 단락/개방되어 두 가지 모드를 얻을 수 있다<sup>[3]</sup>. 링

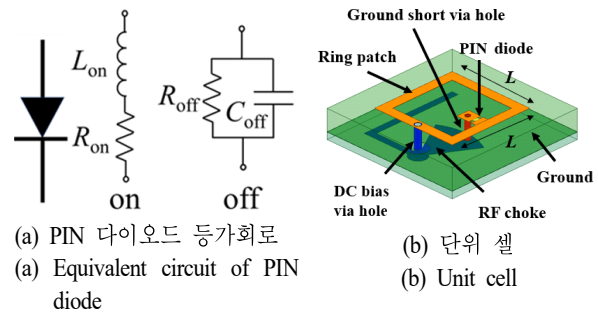


그림 1. PIN 다이오드 및 단위 셀 구조

Fig. 1. PIN diode and unit cell structure.

패치의 한 변의 길이  $L$ 을 가변하여 두 모드의 위상차가 180°가 되는 주파수를 선택할 수 있다.

그러나 실제 PIN 다이오드의 경우에는 그림 1 (a)와 같이 다이오드 내부 기생 소자 성분이 존재한다. PIN 다이오드에 순방향 전압을 인가하면 다이오드가 도통되어 전류가 흐르는 on 상태가 되어, 내부 저항( $R_{on}$ )과 인덕턴스( $L_{on}$ )의 직렬형태의 등가회로로 표현된다. 반면에, PIN 다이오드에 역방향 전압을 인가하면 다이오드가 단락되어 공핍층에 의해 전류가 흐르지 않는 off 상태가 되며, 큰 저항( $R_{off}$ )과 커패시턴스( $C_{off}$ )의 병렬 형태의 등가회로로 표현된다.

그림 2에 나타난 것처럼 도파관 기반 단위 셀 환경<sup>[6]</sup>에서 측정된 반사 계수를 통해 단위 셀의 동작을 실험적으로 확인할 수 있다. 단위 셀은 transition, WR-90 도파관, coaxial to WR-90 어댑터를 통해 벡터 회로망 분석기

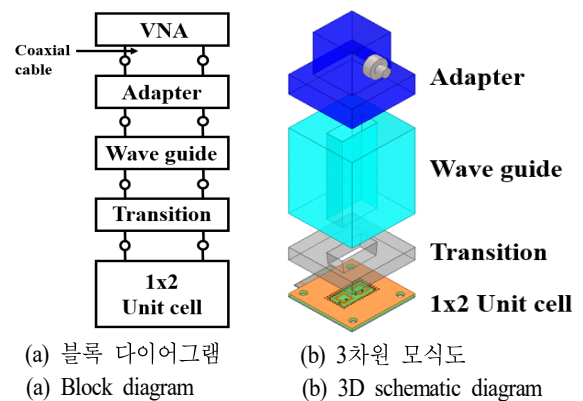


그림 2. 측정 환경

Fig. 2. Environment of measurement.

(vector network analyzer)로 연결되며, 단위 셀의 반사 계수는 벡터 회로망 분석기에서 측정된  $S_{11}$ 을 통해 확인할 수 있다. 여기서 단위 셀(10.5 mm×10.5 mm)과 WR-90 도파관(22.86 mm×10.16 mm)의 개구면 불일치를 해결하기 위해 단위 셀 2개가 한 묶음인 1×2 단위 셀(21 mm×10.5 mm)을 이용하였고, 22.86 mm×10.16 mm에서 21 mm×10.5 mm로 개구면이 변하는 transition으로 완벽히 결합하였다.

PIN 다이오드 등가회로 값은 다양한 링 패치의 길이  $L$ 에 대해 측정된 반사 계수와 시뮬레이션을 일치시키도록 데이터 피팅(data fitting)을 통해 추출하였다. 여기서  $L_{on}$ 과  $C_{off}$ 에 의한 주파수 천이는 반사 계수의 위상이 0도가 되는 공진 주파수를 기준으로 결정하였고,  $R_{on}$ 과  $R_{off}$ 에 의한 삽입 손실은 X 대역에서 반사 계수의 크기를 기준으로 결정하였다.

이러한 방법으로 추출된 PIN 다이오드 등가회로 값에는 측정 부품에서 발생하는 오차, 측정 기기에 의한 오차 등이 포함될 수 있다. 따라서 등가회로 값을 정확하게 결정하기 위해서는 측정 부품에서 발생하는 불필요한 오차를 제거해야 한다. 그림 2에서 1×2 단위 셀 부분을 구리판으로 대체하여 접속시키고 측정 부품들을 하나씩 순차적으로 제거하면서  $S_{11}$ 의 크기를 확인하였고, 어댑터에서 가장 큰 오차가 발생하는 것을 확인했다.

그림 3은 TRL 보정 방법<sup>[7]</sup>을 나타낸다. 2 포트를 갖는 측정 대상 기기(device under test)의 특성을 확인하고자 하는 기준 평면에서의 파라미터 값은 측정기기의 오차로 인해 실제 측정이 이루어지는 측정 평면의 파라미터 값과 다를 수 있다. 여기서 발생할 수 있는 오차를 그림 3 (a)처럼 오차 상자(error box)로 표현할 수 있고, 그림 3 (b)의 Thru, Reflect, Line(TRL) 측정을 이용해 오차 상자의 S 파라미터를 확보하면 이것을 ABCD 파라미터로 변환한다. 그 후 행렬의 계산을 통해 그림 3 (a)와 같이 2 포트 측정 대상 기기에 직렬로 연결된 오차 상자의 영향을 보정한다. 본 논문에서는 그림 3 (c)와 같이 어댑터를 오차 상자로 설정하여 어댑터의 영향을 제거하고자 한다. 그러나 1×2 단위 셀은 1 포트 구조이기 때문에 2 포트 측정과 달리 앞서 언급한 행렬 계산이 필요 없다. TRL 보정에서는 다음 식 (1)~식 (5)와 같이  $e^{\gamma l}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{11}$ ,  $\Gamma_L$ 의 미

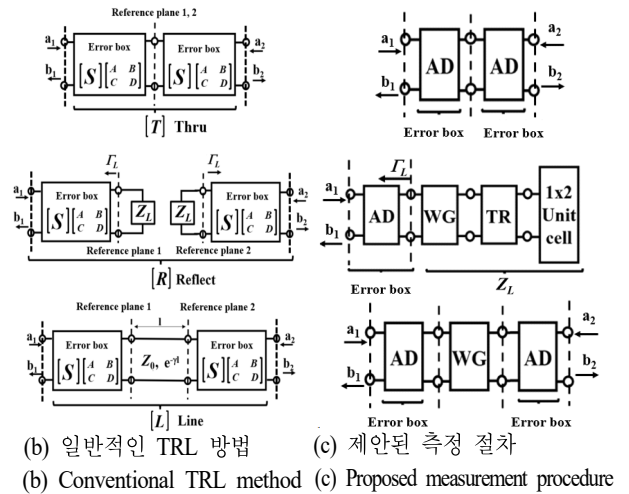
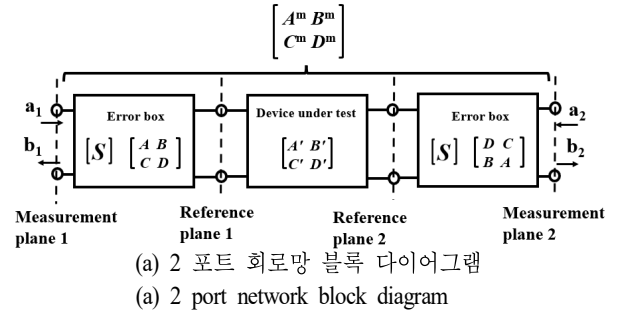


그림 3. TRL 보정 방법

Fig. 3. TRL calibration method.

지수 5개를 구하기 위해서  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $R_{11}$ 의 측정값 5개만이 필요하다.

$$e^{\gamma l} = \frac{L_{12}^2 + T_{12}^2 - (T_{11} - L_{11})^2 \pm \sqrt{(L_{12}^2 + T_{12}^2 - (T_{11} - L_{11})^2)^2 - 4L_{12}^2 T_{12}^2}}{2L_{12} T_{12}} \quad (1)$$

$$S_{22} = (T_{11} - L_{11}) / (T_{12} - L_{12} e^{-\gamma l}) \quad (2)$$

$$S_{11} = T_{11} - S_{22} T_{12} \quad (3)$$

$$S_{12}^2 = T_{12} (1 - S_{22}^2)^2 \quad (4)$$

$$\Gamma_L = \frac{R_{11} - S_{11}}{S_{12}^2 + S_{22} (R_{11} - S_{11})} \quad (5)$$

식 (1)~식 (5)에서 알 수 있듯이  $\Gamma_L$ 은 Reflect 측정에서  $Z_L$ 에 어떤 값을 사용하여도 계산 가능하다. 따라서 어댑터의 영향을 제거한 1×2 단위 셀의 반사 계수는 도파관과 트랜지션, 1×2 단위 셀의 결합을  $Z_L$ 로 사용했을 때  $\Gamma_L$

을 계산하여 획득할 수 있다. 이 때,  $T_{11}$ 과  $T_{12}$ 는 Thru에서,  $L_{11}$ 과  $L_{12}$ 는 Line에서,  $R_{11}$ 은 Reflect에서 측정된 값이다.  $e^{j\ell}$ 은 Line 측정에서 추가된 선로에 의한 감쇠 및 위상 지연을 의미한다.

따라서 본 논문과 같이 측정 대상 기기가 1 포트인 측정 환경에서는 제안된 측정 절차를 사용하면 오차 상자의  $S$  파라미터를 직접 계산하지 않고도 오차 상자의 영향이 보정된 결과인  $\Gamma_L$ 을 곧바로 계산할 수 있다.

### III. 측정 결과 및 분석

일반적으로 PIN 다이오드의 등가회로 값은 다이오드가 적용된 구조에 상관없이 일정한 값을 가져야 한다. 이러한 부분을 확인하기 위해 표 1과 같이 링 패치의 길이  $L$ 을 6.0~6.9 mm로 변화시켜가며, PIN 다이오드의 등가회로 값을 추출하고 정리하였다. TRL 적용 유무에 따라서 추출된 값들의 분산은 각각  $R_{on}$ 은 23.7 %,  $L_{on}$ 은 67.4 %,  $R_{off}$ 는 55.8 %,  $C_{off}$ 는 경우 47.4 %만큼 감소하였다. 이것은 오차가 가장 많이 발생하는 부품인 어댑터의 영향

표 1. PIN 다이오드 등가회로 값의 측정 결과

Table 1. Measured results of PIN diode equivalent circuit parameters.

Ring patch length $L$ [mm]	w/o TRL				w/ TRL			
	$R_{on}$ [ $\Omega$ ]	$L_{on}$ [nH]	$R_{off}$ [k $\Omega$ ]	$C_{off}$ [fF]	$R_{on}$ [ $\Omega$ ]	$L_{on}$ [nH]	$R_{off}$ [k $\Omega$ ]	$C_{off}$ [fF]
6.0	45	0.05	4	50	25	0.05	7	45
6.1	30	0.05	4	48	15	0.05	7	45
6.2	30	0.2	6.5	52	15	0.14	7	47
6.3	25	0.15	10	42	15	0.14	11	39
6.4	20	0.15	10	52	15	0.15	11	38
6.5	20	0.13	9	43.5	10	0.14	10	42
6.6	15	0.11	8	45	10	0.13	10	44
6.7	20	0.06	4	35	15	0.05	7	36
6.8	15	0.05	7	43	10	0.08	10	40
6.9	11	0.05	7	43	8	0.05	10	39
Average	23.1	0.1	6.95	45.35	13.8	0.098	9	41.5
Dispersion	88.49	0.0028	5.02	25.00	20.9	0.0019	2.80	11.85

을 제거하였기 때문으로 분석된다. TRL 보정을 하였음에도 링 패치의 크기에 따라 추출된 등가회로 값들에 약간의 차이가 있는 이유는 1) 측정 장비 내/외부에서 발생하는 잡음, 2) 사용된 측정 부품들의 완전한 대칭성 미확보인 것으로 사료된다.

PIN 다이오드 파라미터 값은 TRL 보정을 적용하여 추출된 파라미터 값의 평균은  $R_{on}=13.8 \Omega$ ,  $L_{on}=0.098 \text{ nH}$ ,  $R_{off}=9 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{off}=41.5 \text{ fF}$ 로 결정되었다. 기존 다이오드 파라미터<sup>[4],[6]</sup>인  $R_{on}=4.2 \Omega$ ,  $L_{on}=0.05 \text{ nH}$ ,  $R_{off}=300 \text{ k}\Omega$ ,  $C_{off}=42 \text{ fF}$ 과 비교하면,  $C_{off}$ 는 거의 변하지 않은 반면,  $L_{on}$ 은 on 상태의 공진 주파수가 감소하여 약 2배 크기를 가지게 결정되었다. 또한,  $R_{on}$ 는 증가하고  $R_{off}$ 는 감소하여 단위 셀의 삽입 손실이 증가하는 방향으로 변화하였다.

TRL 보정에 의한 등가회로 값의 정확도를 확인하기 위해, 그림 4와 같이 측정된 메타표면의 방사 패턴<sup>[5]</sup>을 기존의 PIN 다이오드 등가회로 값, TRL 보정에 의해 결정된 PIN 다이오드의 등가회로 값을 이용한 메타표면의 시뮬레이션 방사 패턴 결과와 비교하여 나타내었다. 측정된 방사 패턴 이득 최대값을 기준으로, 시뮬레이션에 기존 등가회로 값을 적용한 경우와의 차이는  $(\theta, \phi)=(0^\circ, 0^\circ)$  조향에서 1.07 dB,  $(\theta, \phi)=(30^\circ, 0^\circ)$  조향에서 0.62 dB였다.

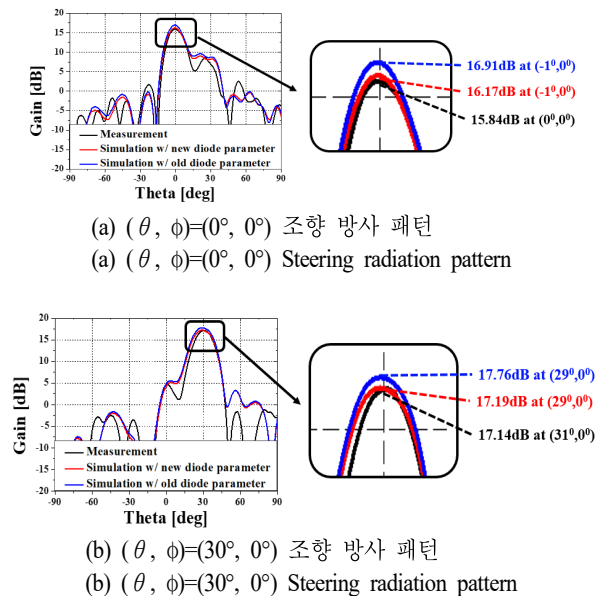


그림 4. 메타표면 방사 패턴 비교

Fig. 4. Comparison of metasurface radiation pattern.

반면에, 본 논문에서 결정된 등가회로 값을 시뮬레이션에 적용한 경우에는 그 차이가  $(\theta, \phi)=(0^\circ, 0^\circ)$  조향에서 0.33 dB( $\theta, \phi)=(30^\circ, 0^\circ)$  조향에서 0.05 dB로 감소하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 TRL 보정을 적용하여 결정된 등가회로 값을 적용하여 시뮬레이션할 경우, 기존 값을 사용하는 것보다 측정 결과와 더욱 일치하여 정확도가 높아짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 도파관 기반 단위 셀 측정을 통하여 정확한 등가회로 값을 결정하는 방법을 제시하였다. 반사 배열 메타표면 안테나의 단위 셀에 적용할 수 있는 TRL 방법을 제안하여 오차가 가장 많이 발생하는 측정 부품인 어댑터의 영향을 감소시켰다. TRL 적용 이후에 다양한 크기의 단위 셀 측정에서 등가회로 값의 분산이 감소함을 보였다. 측정된 방사패턴을 본 논문에서 결정된 등가회로 값 기반의 시뮬레이션과 비교하였고, 기존에 사용된 등가회로 값을 사용한 시뮬레이션과 비교하여 오차가 감소한 것을 확인하였다.

#### References

[1] S. V. Hum, J. P. Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and arrays 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. Zhang, X. Chen, Z. Wang, Y. Ge, and J. Pu, "A 1-bit electronically reconfigurable reflectarray antenna in X band," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 66567-66575, May 2019.  
 [3] 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.  
 [4] MACOM, "MA4GP907 GaAs flip chip PIN diodes." Available: <https://www.macom.com/products/product-detail/MA4GP907>  
 [5] S. G. Lee, Y. H. Nam, Y. J. Kim, J. Y. Kim, and J. H. Lee, "1-Bit reconfigurable reflectarray antenna based on small ring patch," in *2022 International Symposium on Advanced Electromagnetic Engineering and Science (ISAEESSE)*, Pyeongchang, Feb. 2022.  
 [6] A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier, and P. Pouliquen, "1-Bit reconfigurable unit cell based on PIN diodes for transmit-array applications in X - band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 5, pp. 2260-2269, May 2012.  
 [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 2260-2269, 2011.

정 해 빈 [홍익대학교/석사과정]

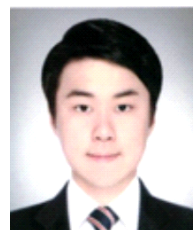
<https://orcid.org/0000-0002-3254-231X>



2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2021년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타물질 및 메타표면 안테나

이 선 규 [홍익대학교/박사과정]

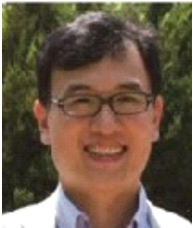
<https://orcid.org/0000-0001-6383-7287>



2016년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
 2018년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 2018년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정  
 [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, Meta-material RF소자, 무선전력전송