

## 3D 인쇄기술을 이용한 X대역 이중 선형 편파 변환기 설계

### Design of Dual-Linear Polarization Converter in X-Band Using 3-D Printing Technique

노영훈 · 이경영\* · 이인곤\*\* · 김종영\*\*\* · 홍익표\*\* · 김지훈\* · 육종관

Yeong-Hoon Noh · Gyeongyeong Lee\* · In-Gon Lee\*\* · Jongyeong Kim\*\*\* ·  
Ic-Pyo Hong\*\* · Jihoon Kim\* · Jong-Gwan Yook

#### 요 약

본 논문에서는 X 대역 이중 선형 편파 변환기를 설계하고 제작하는 방법을 제안한다. 다이폴-via-다이폴의 3층 구조의 편파 변환기 단위 셀에 대한 등가회로 분석을 진행하여 투과 및 반사 성능에 영향을 미치는 파라미터에 대한 분석을 수행하였다. 임의의 via 높이에 대해 편파 변환기를 제작하기 위해 3D 인쇄기술을 활용하였고, 8×8로 배열된 시편을 제작하여 투과 및 편파변환 특성을 측정하였다. 이를 통해 설계 및 제작한 이중 선형 편파 변환기가 X대역 전체에서 높은 투과 및 편파변환 성능을 가지는 것을 검증하였다.

#### Abstract

In this study, a method for designing and fabricating an X-band dual linear polarization converter is proposed. Using the equivalent circuit model, the unit cell design was analyzed for the three-layered polarization converter structure, dipole-via-dipole, and the parameters affecting the transmission and reflection performance were determined. To manufacture the polarization converter with an arbitrary height of the via structure, a 3D printing technique was adopted. An 8×8 array metasurface was fabricated to measure the propagation properties, and it was verified that the polarization converter shows high performance in transmission and polarization conversion in the entire X-band.

Key words: Dual-Linear Polarization Converter, Metasurface, Printed Electronics, 3D Printing Technique, Equivalent Circuit Model

#### I. 서 론

다기능 전파 성능을 구현하기 위해 방위 산업의 레이

다 분야에 편파 변환기의 활용성이 커지면서 선형 편파 변환이 가능한 메타 표면에 대한 설계기법이 활발히 연구되고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

「본 연구는 국방과학연구소 미래도전기술 사업의 한화시스템(주) 시제개발비 지원으로 수행됨.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*공주대학교 신소재공학과(Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University)

\*\*공주대학교 정보통신공학부(Department of Information and Communication Engineering, Kongju National University)

\*\*\*한화시스템 특수레이다팀(Specific Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received October 29, 2021 ; Revised November 18, 2021 ; Accepted December 1, 2021. (ID No. 20211029-100)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

선형 편파 변환기는 입사파의 편파와 수직인 편파의 전파를 방사하는 수동 소자로, 가장 기본적인 형태로는 수평 선형 편파를 수직 선형 편파로 변환해주는 평면형 다이폴 구조가 있다<sup>[3]</sup>. 이 경우, 특정 길이 성분에 대한 공진때문에 협대역 투과특성을 가지므로 넓은 활용도를 위해 대역폭을 향상시킬 필요가 있다.

대역폭을 조절하기 위해 일반적으로 결합 구조<sup>[4]</sup>나 비아(via)홀 구조<sup>[5]</sup>와 같이 높이 성분에 의한 공진 특성 변화를 활용할 수 있고, 복수의 공진 주파수 간의 차이를 조절해 투과 대역의 범위를 조절할 수 있다. 본 논문에서는 비아홀 구조를 이용해 대역폭을 최적화한 X 대역 이중 선형 편파 변환기를 설계하였고, 임의의 비아높이에 대한 제작 자유도가 높은 3D 인쇄기술을 이용했으며, 제작한 이중 선형 편파 변환기의 투과 및 편파변환 성능을 검증하였다.

## II. 이중 선형 편파 변환기 설계 및 제작

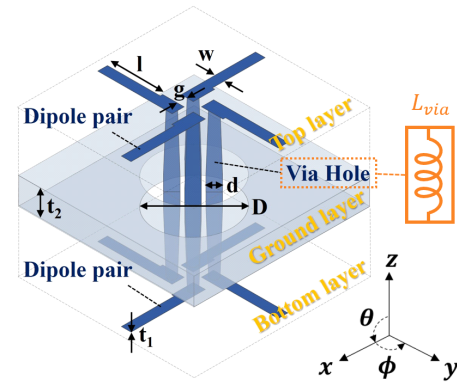
### 2-1 다이폴 안테나를 이용한 단위 셀 설계

그림 1(a)은 본 논문에서 제안하는 선형 편파 변환기의 단위셀 구조를 나타낸 것으로, Top, Ground, Bottom 층의 3층 구조로 이루어져 있다. Top, Bottom 층에는 x축, y축 방향으로 놓인 마이크로스트립 형태의 다이폴 안테나가 있고, 동일한 구조를 서로 수직하게 배치한 구조이므로 x 축, y축 편파에 대해 동일한 특성을 가진다. 하나의 접지 층을 공유하고 있으며, 수직 비아홀을 통해 두 층이 전기적으로 연결된다. 이때 연결되는 두 층의 다이폴 안테나 편파 방향이 서로 교차하여, x축 편파 방향의 입사파를 Top 층에서 수신한 경우, Bottom 층에서는 y축 편파 반향의 송신 전파를 방사하게 된다<sup>[5]</sup>. 주요 파라미터값은 표 1에 나타내었다.

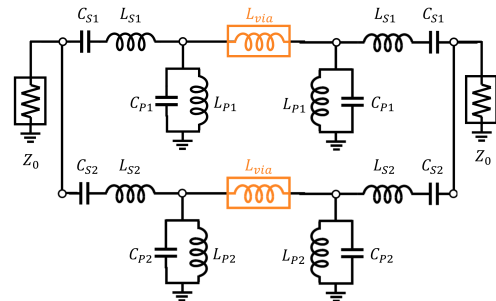
선형 편파 변환기의 투과 대역 성능을 분석하기 위해

표 1. 선형 편파 변환기 단위 셀의 구조적 파라미터  
Table 1. Geometrical parameters (in mm) of the unit cell structure.

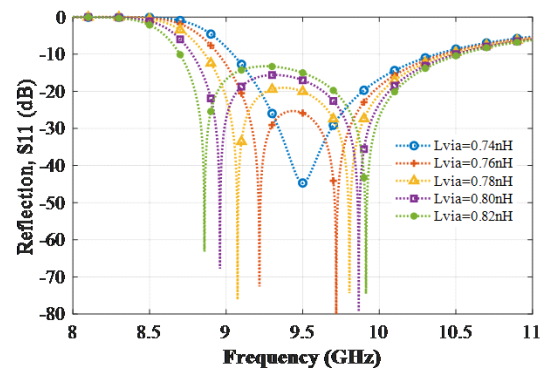
$w$	$l$	$D$	$d$	$g$	$h$	$t_1$	$t^2$
0.6	3	3.8	0.7	0.5	6.4	0.1	0.8



(a) 선형 편파 변환기 단위 셀 구조도  
(a) Schematic of the unit cell structure



(b) 선형 편파 변환기 단위 셀에 대한 등가회로 모델  
(b) Equivalent circuit model of the unit cell structure



(c) 비아구조의 인덕턴스에 따른 공진 특성 변화  
(c) Resonance property in terms of via inductance

그림 1. 등가회로 모델을 이용한 다이폴 단위 셀 설계  
Fig. 1. Unit-cell design with dipole using equivalent circuit.

다이폴 안테나 이론과 등가회로 모델을 활용할 수 있다. 그림 1(b)에 나타나 있듯이, 다이폴 안테나 쌍은 직렬 LC 회로와 병렬 LC 회로를 이용해 등가화할 수 있고, 커패시

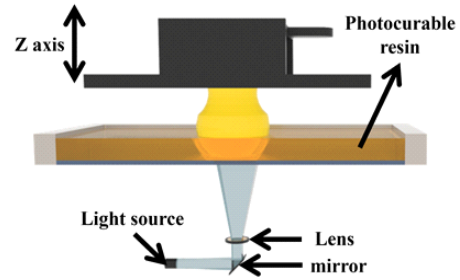


턴스와 인덕턴스 값은 공진 주파수에 맞춰 결정된다. 다이폴 길이 및 폭에 의한 공진 성분은 높은 Q 값을 가지기 때문에 협대역 투과특성을 보인다.

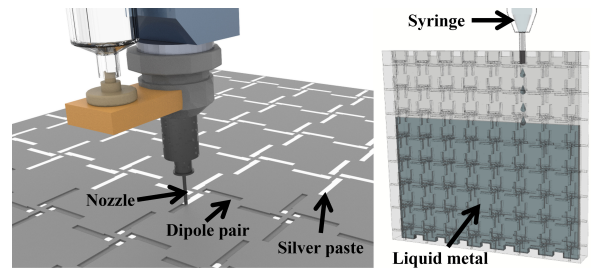
Top 층과 Bottom 층의 다이폴 소자는 서로 같은 구조이므로 동일한 회로로 모델링하여 직렬연결 관계로 표현할 수 있다. 두 편파 방향으로 배치된 다이폴 소자는 위의 등가회로 모델 두 개의 병렬 회로로 나타낼 수 있고, 각 병렬 회로의 커패시턴스 및 인덕턴스 값에 따라 두 개의 공진 모드가 존재한다.  $Z_0$ 가 자유공간의 특성임피던스  $377 \Omega$ 일 때 그림 1(c)는 등가 회로 모델로부터 계산한 선형 편파 변환기 단위 셀의 반사특성을 나타낸 것이다. 다이폴 소자에 의해 두 개의 공진 주파수가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 두 공진점의 위치를 조절하여 투과특성의 대역폭을 변화시킬 수 있다. 이를 위해 그림 1(b)의 등가회로에 Top, Bottom 층을 연결하는 비아홀에 해당하는 인덕턴스 성분  $L_{via}$ 를 추가하면 각 다이폴 병렬 회로의 공진 주파수 간 차이를 조절할 수 있다. 그림 1(c)와 같이  $L_{via}$ 를 0.74 nH부터 0.82 nH까지 증가함에 따라 낮은 공진 주파수는 더 낮아지고, 높은 공진 주파수는 높아져 공진 주파수 간 차이가 벌어짐을 확인할 수 있다. 따라서, 비아홀의 높이를 조절하면 길이 변화에 따라 인덕턴스 값이 변화하게 되고, 최적화된  $L_{via}$ 를 찾는다면 적합한 대역폭의 투과성능을 구현할 수 있다.

## 2.2 3D 프린팅 기술을 이용한 선형 편파 변환기 제작

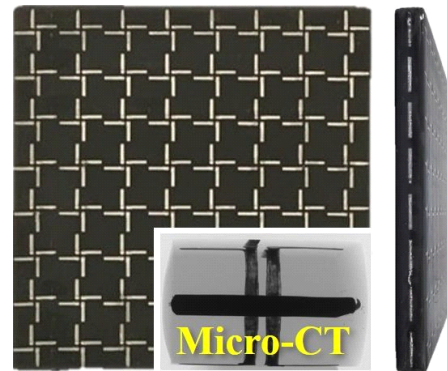
투과 대역폭에 주요한 영향을 미치는 비아홀의 높이 변수에 따라 제작의 자유도를 높이기 위해 기판 3D 프린팅 기술을 이용하였다<sup>[6]~[8]</sup>. 설계한 선형 편파 변환기의 3D CAD 모델을 slicing 소프트웨어(ChiTuBox)를 이용해  $50 \mu\text{m}$  두께의 여러 층으로 나누어준 후, 각 층을 405 nm의 광원을 가진 3D 프린터(Grigo)로 광경화수지(resin)를 경화하여 패턴 부분이 음각화된 기판을 제작한다. 음각 부분에는 노즐 인쇄방식을 이용해 실버 페이스트(silver paste)를 일정한 속도로 방출하여 다이폴 안테나 패턴과 via를 인쇄하였다. 마지막으로 접지층은 액체 금속(갈린스탄, Galinstan)을 주입하는 사출성형 방법을 사용하여 제작하였다. 제작 과정을 그림 2에 나타내었다. 기판의



(a) 이중 선형 편파 변환기의 유전체 기판 3D 인쇄 과정  
(a) 3D printing of a dielectric substrate



(b) 전도성 패턴 인쇄 및 접지층 형성 기술  
(b) Conductive pattern printing and formation of ground layer



(c) 3D 인쇄기술로 제작한 8×8 배열 선형 편파 변환기  
(c) 3D printed 8×8 array for the polarization converter

그림 2. 유전체 기판 3D 인쇄 및 전도성 패턴 형성 과정  
Fig. 2. Illustration of the 3D printed dielectric substrate and the method for forming a conductive pattern.

유전율은  $\epsilon_r=2.73$ ,  $\tan \delta=0.033$ 이다. 기판의 두께, 즉 Top, Bottom 층과 접지층 간의 거리는 일정하게 유지한 채로 액체 금속이 주입되는 기판 접지층의 공간 두께를 조절하여 비아홀 높이를 변경하였다.

최종적으로 그림 2(c)와 같이 전체 크기가  $76 \times 76 \text{ mm}^2$

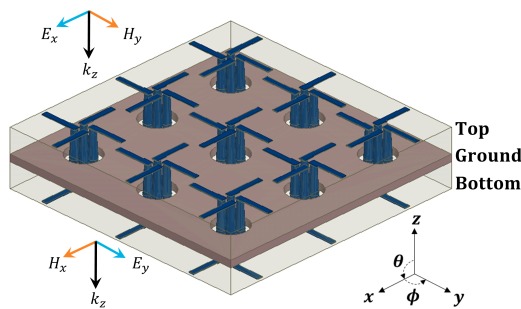
이고 전체 두께가 6.4 mm인 8×8 배열의 선형 편파 변환기를 제작하였다. 시편의 내부 구조를 볼 수 있는 Micro-CT 분석을 통해 각 단위 셀에 대해 전극, 비아홀, 접지층 등의 제작 완성도를 확인하였다.

### III. 이중 선형 편파 변환기의 투과성능

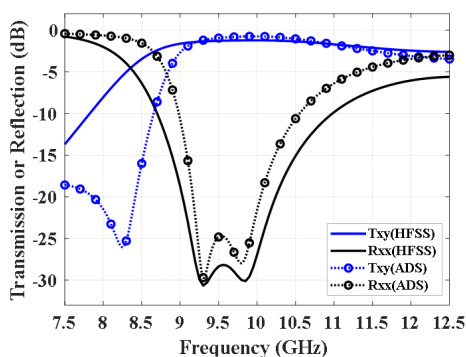
회로 해석 시뮬레이터(ADS)를 이용해 등가회로 모델의  $L_{via}$ 에 따른 경향성을 분석하고 회로 파라미터를 최적화하였으며, 이로부터 전파시뮬레이터(HFSS)를 이용해 이중 선형 편파 변환기의 구조적 파라미터를 최적화하였다. 그림 3(a)는 각 층의 패턴 형태와 편파 변환기의 배열 구조를 나타낸 것이다. Top 층으로 -z방향의 입사파가 급전되고, Bottom 층을 통해 -z방향으로 편파 변환된 전

파가 방사된다. 선형 편파 변환기의 다이폴 패턴이 x, y축 방향 각각에 대해 동일하므로, x축 방향 편파인 평면파가 입사한 경우에 대해서만 시뮬레이션 및 측정을 진행하였다. 이중 선형 편파 변환기 단위 셀의 최종 투과 및 반사 성능 시뮬레이션 결과는 그림 3(b)에 나타내었다. 반사 특성(Rxx)은 9.3, 9.8 GHz에서 공진점을 보이고, 변환된 편파의 투과 특성(Txy)은 9.95 GHz에서 -1.2 dB로 최댓값을 가진다. 또한, 등가회로를 이용한 해석 결과와 유사한 투과 및 반사특성을 나타내므로 최적화된 구조적 파라미터를 도출했음을 알 수 있다.

그림 4(a)는 선형 편파 변환기의 편파변환 및 투과성능을 측정하기 위한 자유공간 측정장치이다. 송신 및 수신 프로브 안테나를 Network Analyzer에 연결하고, 송수신 안테나 개구면 사이 중앙에 8×8 배열 선형 편파 변환기를

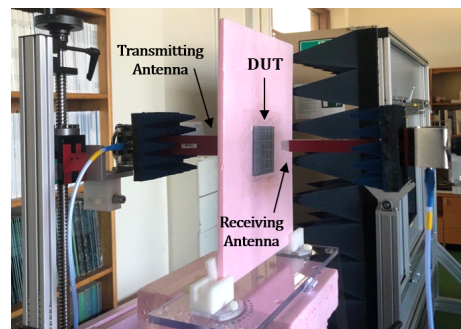


(a) 이중 선형 편파 변환기의 구조도  
(a) Conceptual diagram of the polarization converter

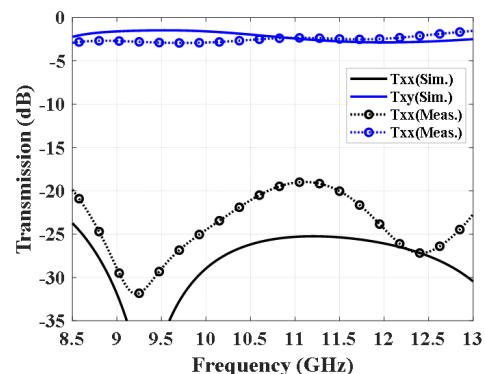


(b) 단위 셀 구조의 투과 및 반사특성  
(b) Transmission and reflection characteristic for the unit-cell

그림 3. 이중 선형 편파 변환기의 구조 및 특성  
Fig. 3. Structure and characteristics of dual-linear polarization converter.



(a) 투과성능에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과 비교  
(a) Comparison of the measured and simulated results



(b) 투과성능 측정 및 시뮬레이션 결과 비교  
(b) Comparison of the measured and simulated results

그림 4. 동일 편파 및 교차 편파에 대한 투과성능  
Fig. 4. The results of the co-, cross-polarized transmission.

위치시켰다. x축 편파 방향으로 급전 신호를 입사하여 x축( $T_{xx}$ ), y축( $T_{xy}$ ) 편파 방향에 대해 송신 파워 대비 수신 파워 비( $S_{21}$ )를 측정된 후, 시편이 없는 경우의 측정 결과와의 차이를 구해 투과 성능(transmission)을 도출하였다. 그림 4(b)와 같이 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사하며, y축 편파는 8.55~12.5 GHz 범위(약 4 GHz 대역폭)에서 -3 dB 이상의 투과성능을 보이는 반면, x축 편파는 약 -20 dB 이하의 투과성능을 가져 선형 편파 변환기가 잘 구현되었음을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 이중 선형 편파 변환기의 via 구조의 높이 성분이 투과성능의 대역폭에 미치는 영향을 분석하였고, 임의의 금속 패턴 및 기관의 두께를 구현할 수 있는 3D 인쇄기술을 이용하여 제작한 후 성능 검증을 수행하였다. 이를 통해 선형 편파 변환기의 두 공진 주파수를 조절해 광대역 투과특성을 도출할 수 있고, 임의의 성능을 가지는 메타 표면 구조에 대한 설계 및 제작 자유도를 향상할 수 있다.

#### References

[1] K. C. Hwang, "Design of X-band broadband twist reflector using hybrid particle swarm optimization," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 4, pp. 390-395, Apr. 2009.

[2] E. Lim, S. Pyo, "Orthogonally-polarized dual-band switchable microstrip antenna using PIN-diode loaded H-shape slot," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 2, pp. 156-162, Feb. 2016.

[3] M. A. Joyal, J. J. Laurin, "A cascaded circular-polarization-selective surface at K band," in *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, Spokane, WA, Jul. 2011, pp. 2657-2660.

[4] B. Lin, J. Wu, X. Da, W. Li, and J. Ma, "A linear-to-circular polarization converter based on a second-order band-pass frequency selective surface," *Applied Physics A*, vol. 123, no. 1, pp. 1-5, Dec. 2017.

[5] S. Y. Wang, W. Liu, and W. Geyi, "Dual-band transmission polarization converter based on planar-dipole pair frequency selective surface," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 3791, Fed. 2018.

[6] L. Y. Zhou, J. Fu, and Y. He, "A review of 3D printing technologies for soft polymer materials," *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 28, Apr. 2020.

[7] A. Ambrosi, M. Pumera, "3D-printing technologies for electrochemical applications," *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 10, pp. 2740-2755, Apr. 2016.

[8] Y. T. Kim, K. Castro, N. Bhattacharjee, and A. Floch, "Digital manufacturing of selective porous barriers in microchannels using multi-material stereolithography," *Micromachines*, vol. 9, no. 3, p. 125, Mar. 2018.

노 영 훈 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3479-2838>



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 전자기 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, HEMP

이 경 영 [공주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0330-3328>



2020년 2월: 공주대학교 신소재공학부 (공학사)

2020년 3월~현재: 공주대학교 신소재공학과 석사과정

[주 관심분야] 2.5D/3D 프린팅과 관련된 다양한 기능성 소재, 인쇄전자

이 인 곤 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3974-4766>



2013년 2월: 공주대학교 전자공학과 (공학사)  
2015년 8월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
2020년 2월: 공주대학교 정보통신공학과 (공학박사)  
2021년 10월: 공주대학교 스마트자연공간

연구센터 박사후연구원

2021년 11월~현재: 한화시스템 전문연구원

[주 관심분야] 투과배열 안테나, 메타표면구조

김 지 훈 [국립공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1477-1423>



2005년 5월~2009년 1월: 미국 INTEL Corporation 수석 엔지니어  
2009년 9월~2012년 2월: Korea Institute of Ceramic Eng.& Tech. 선임연구원  
2012년 3월~현재: 공주대학교 신소재공학부 교수

[주 관심분야] 2.5D/3D 프린팅과 관련된

다양한 기능성 소재, 무선전력전송, 저항성 랜덤 액세스 메모리, 인쇄전자의 Electromigration

김 종 영 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3621-6802>



2018년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)  
2020년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)  
2020년 11월~현재: 한화시스템 연구원  
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 안테나, 전자파 흡수체, 메타표면구조

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 수치해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공정 구조, EMI/EMC, HEMP, 플라즈마 해석

홍 익 표 [국립공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)  
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보

통신총괄 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar

2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar

2003년 3월~현재: 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수

[주 관심분야] 전자기 수치해석, 안테나, 메타표면구조