

Magic-T 회로 구조를 이용한 Ku-Band 파도 탐지 레이더 시스템용 4-Port 위상 조절 안테나 설계

Design of a Four-Port Phase Control Antenna for Ku-Band Wave Detection Radar System Using Magic-T Circuit Structure

이 승 우 · 민 경 식 · 여 유 석

Seung-Woo Yi · Kyeong-Sik Min · You-Seok Yeoh

요 약

본 논문에서는 해안 침식과 이안류 사고 방지를 위한 파도 탐지 레이더 시스템용 4-port 위상 조절 안테나의 설계 방법을 제안한다. 제안된 안테나는 Magic-T 회로 구조를 구현하여 급전 port의 위치에 따라 패치 안테나의 빔 패턴과 위상을 변경하는 새로운 위상 조절 기술이다. Magic-T 회로 구조의 위상 조절과 높은 격리도 특성을 이용하여 4개의 port를 가지는 2×4 패치 배열 안테나로 설계하였다. 제안된 안테나의 반사계수와 각 port 간의 격리도는 각각 -20 dB와 -30 dB 이하의 우수한 설계 결과를 얻었다. Magic-T 회로 구조를 이용한 위상 조절을 기반으로 각 port의 급전에 따라, 빔 패턴이 1개에서 4개까지 방사하는 우수한 특성을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a design method for a four-port phase-controlled antenna for wave detection radar systems for preventing coastal erosion and accidents caused by rip current waves. The proposed antenna is a new phase-control technology that implements the magic-T circuit structure, enabling the adjustment of the beam patterns and phases of the patch antenna based on the position of the feeding ports. Utilizing the phase control and high isolation characteristics of the magic-T circuit structure, we designed 2×4 patch array antennas with four ports. The proposed antenna achieved excellent design results with reflection coefficients and isolation between each port measuring below -20 and -30 dB, respectively. Based on phase control using the magic-T circuit structure, the study confirmed that the antenna exhibited excellent characteristics, radiating beam patterns ranging from one to four beams depending on the excitation to each port.

Key words: Magic-T Circuit Structure, Patch Antenna, Wave Detection Radar, Phase Control, High Isolation

I. 서 론

최근 지구온난화를 넘어선 지구 보일링 현상이 가속화

되고 있다. 이에 따라 이상기후로 인한 자연재해가 다수 발생하고 있으며, 특히 해안가에서의 해안 침식과 이안류로 인한 인명피해와 금전적 손실이 커지고 있다. 이러한

「본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.」

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00253131).」

한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime & Ocean University)

· Manuscript received November 27, 2023 ; Revised December 9, 2023 ; Accepted December 19, 2023. (ID No. 20231127-005S)

· Corresponding Author: Kyeong-Sik Min (e-mail: ksmin@kmou.ac.kr)

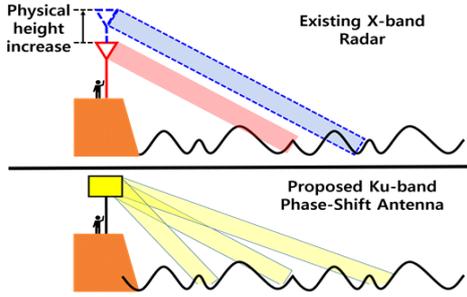


그림 1. 기존 안테나와 제안하는 안테나의 빔 위치 조절 비교
 Fig. 1. Beam position control comparison of existing antenna and proposed antenna.

문제에 대응하기 위해 파도 탐지 레이더를 이용하여 파고, 파향, 파주기의 파도 데이터를 수집하여 취약 지역에 방어 체계를 구축하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1],[2]}. 파도 탐지 레이더로 널리 사용되는 X-band 파도 탐지 레이더는 회절현상과 협대역폭 특성 때문에 실시간으로 파도 정보의 빅데이터 신호처리가 어렵다. 그리고 기존 X-band 레이더 시스템은 그림 1과 같이 안테나를 일정한 높이에 고정하여 파도를 탐지하기 때문에 파도 타겟의 위치가 바뀌면 안테나의 높이를 수동적으로 바꿔줘야 하는 결정적 단점이 있다^[3]. 이러한 단점을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 1과 같이 Ku-band 4-port 위상 조절 안테나 기술을 제안한다. 이 기술은 각 급전 port의 위상 차이를 이용하여 메인 빔의 방향을 제어하여 빔 스티어링 기법으로 타겟 위치를 정하는 기술이다. 따라서 Ku-band의 넓은 대역폭 특성과 4-port 위상 조절 안테나 기술을 접목하여 높은 분해능 특성과 물리적 높이 조절 없이 위상 조절을 통해 다양한 각도에서 타겟 위치에 대한 파도 빅데이터 수집이 가능한 안테나 설계 방법을 제안한다.

II. 제안된 안테나의 빔 형성 방법

2-1 다중 급전을 통한 빔 패턴 조절

본 논문에서 제안된 안테나의 빔 형성 방법은 각 급전 port에 Magic-T 회로 구조를 이용하여 어레이된 패치 안테나의 위상을 조절함으로써 다양한 빔 패턴을 형성하는

것이다. 예를 들면, 그림 2에서처럼 4개의 패치 안테나 소자에 급전할 때, port 1 급전의 경우 4개의 안테나 소자가 동위상이 되어 하나의 주 빔이 형성된다. port 2에서 급전을 할 때는 2개의 패치 안테나 소자 그룹이 수평 방향으로 동위상이 되어 두 개의 수직 방향 빔이 형성된다. 또 port 3에 급전하게 되면 두 개의 패치 안테나 소자 그룹이 수직 방향으로 동위상을 가지며 2개의 수평 방향 빔이 형성된다. 마지막으로 port 4에서 급전하게 되면 수직과 수평 방향으로 서로 다른 위상을 가지므로 4개의 빔이 분산되어 방사된다. 이러한 이론을 이용하여 안테나의 소자를 동시에 사용하면서 각 급전 port에 따라 위상을 조절할 수 있다^[4]. 다중 급전을 통해 빔 패턴을 조절하게 되면 빔 조향을 집중시키거나 분산시킬 수 있다. 그림 3(a)와 같이 빔을 집중시켜 고이득, 고분해능을 가진 파도 데이터를 얻을 수도 있고 그림 3(b)와 같이 빔을 분산시켜 넓은 영역에서도 많은 데이터를 획득함으로써 타겟 지역에서의 파도 변화를 분석하는 것이 가능하다. 본 연구는 이러한 원리를 이용하여 4-port 위상 조절 안테나를 설계하였다.

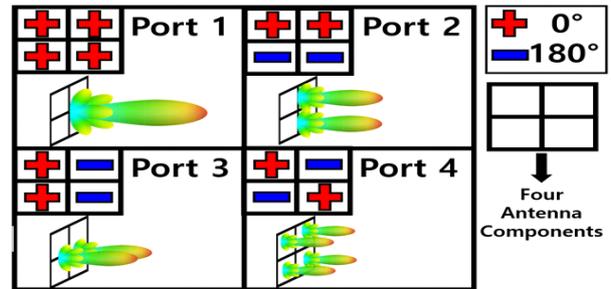


그림 2. 급전 port에 따른 방사 패턴 조절
 Fig. 2. Radiation pattern control according to feeding port.

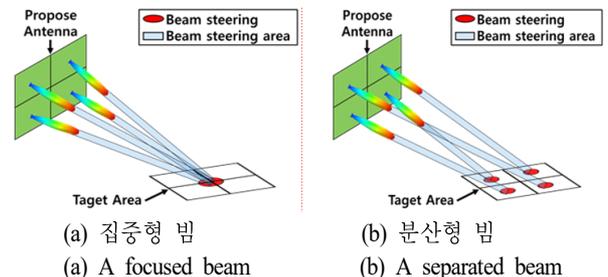


그림 3. 제안된 안테나의 빔 패턴 조절 원리
 Fig. 3. Beam pattern control principle of the proposed antenna.

2-2 Magic-T 회로 구조의 동작 원리

제안된 4-port 위상 조절 안테나는 microstrip line에서 Magic-T 회로의 동작 원리를 이용하여 위상을 조절하였다. 그림 4는 Magic-T 회로의 형상을 보여준다. port 1에서 급전하였을 때는 microstrip line을 따라 접지와 수직 방향의 전계가 전파되고 동위상으로 port 3과 port 4에 급전된다. 반대로, port 2에 급전하였을 때는 Slot line으로 접지와 수평 방향으로 전계가 진행하며, microstrip line과 만나는 지점에서 전계 방향이 회전하게 된다. 이에 따라 port 3에는 위로 향하는 동위상의 전계 방향이 발생하고 port 4에는 아래로 내려가는 역위상의 전계 방향이 발생하게 된다. 따라서 port 3과 port 4에는 역위상의 전계가 방사된다. 또한, port 1과 port 2는 전계 방향이 서로 직교이므로 우수한 격리 특성을 보여준다^{[5]~[8]}.

Ansys 社의 HFSS tool을 사용하여 모의실험 된 Magic-T 회로 구조의 위상 결과를 그림 5에 나타내었다. 중심 주파수 17.5 GHz에서 port 1에 급전하였을 때의 위상 결과는 S_{31} 과 S_{41} 이 동위상으로 동작하는 것을 알 수 있다.

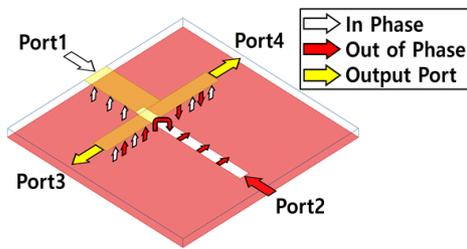


그림 4. Magic-T 회로 구조
Fig. 4. Circuit structure of Magic-T.

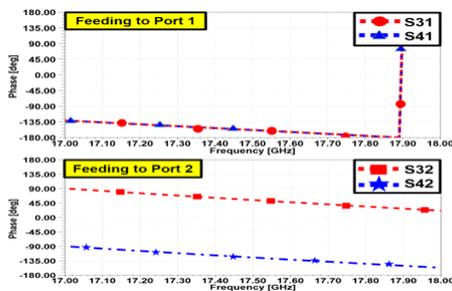


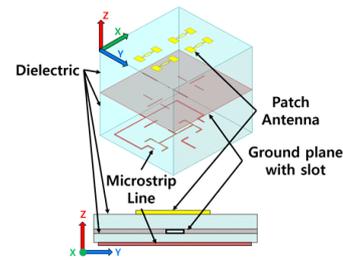
그림 5. Magic-T 회로 구조의 모의실험 된 위상 결과
Fig. 5. Simulated phase results of Magic-T circuit structures.

그리고 port 2에 급전하였을 때의 위상 결과는 S_{32} 와 S_{42} 가 서로 역위상으로 동작하는 것을 알 수 있다.

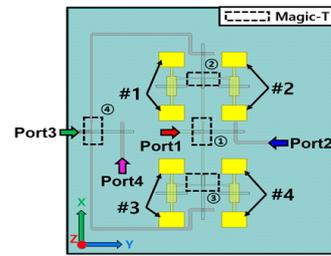
Ⅲ. 안테나의 구조 및 모의실험 결과

3-1 안테나의 구조

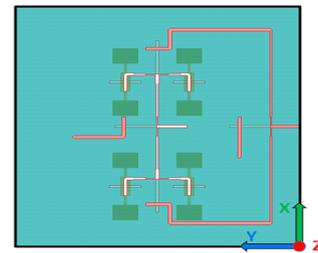
그림 6은 4-port 위상 조절 안테나의 구조이다. 모의실험에 사용된 기판은 FR-4이며 유전율은 4.4, 손실 탄젠트는 0.02를 적용하여 설계하였다. 2-Layer 구조로써 각각의 유전체 기판의 높이는 아래층은 0.4 T와 윗층은 0.8 T를



(a) 투시도
(a) Perspective view



(b) 상면도
(b) Top view



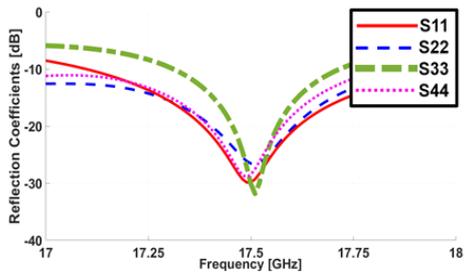
(c) 하면도
(c) Bottom view

그림 6. 제안된 안테나의 구조
Fig. 6. Structure of the proposed antenna.

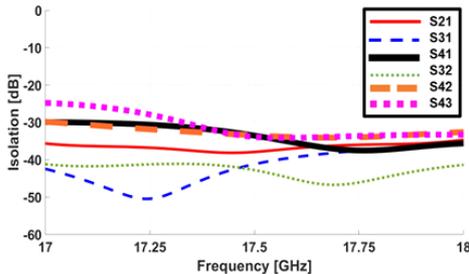
사용하였다. 맨 위층에는 패치 안테나 소자가 있으며 안테나 사이의 거리는 slot line의 공간을 확보하기 위해 0.76λ 의 길이로 설계하였다. 중간층에는 slot line과 ground가 있고 가장 아래층에는 microstrip line의 4개의 급전 port가 있으며 중간층의 slot으로 급전되는 구조이다. 그림 6(b)의 ①, ②, ③ 그리고 ④는 각각 4개의 Magic-T 위치를 나타낸다. 그리고 각각의 안테나 그룹은 2개의 패치 소자를 한 그룹으로 하여 #1, #2, #3 그리고 #4의 그룹으로 이루어져 있다. 각 급전 port의 위치는 가장 아래층에 있으며, 4종류의 빔 패턴을 형성하기 위해 4개의 port를 사용하였다.

3-2 안테나의 모의실험 결과

그림 7(a)는 제안된 안테나의 반사계수 모의실험 결과이다. 중심 주파수 17.5 GHz에서 S_{11} 은 -29.84 dB, S_{22} 는 -26.54 dB, S_{33} 은 -30.13 dB 그리고 S_{44} 는 -29.84 dB로 4개의 급전 port 모두 -20 dB보다 적은 매우 우수한 특성을 얻었다.



(a) 반사계수
(a) Reflection coefficients

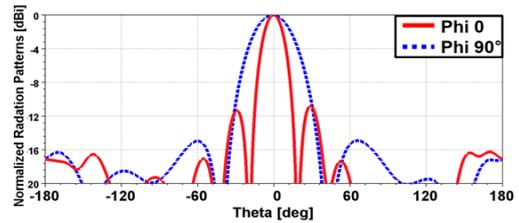


(b) 각 port간의 격리도
(b) Isolation between each port

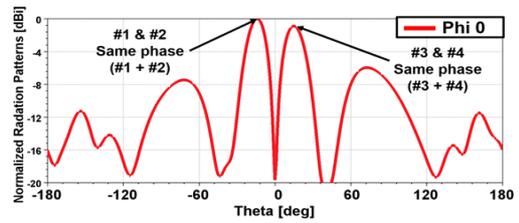
그림 7. 제안된 안테나의 S-parameter 모의실험 결과
Fig. 7. S-parameter simulation results of the proposed antenna.

을 얻었다. 또한 -10 dB를 기준으로 400 MHz의 대역폭을 얻었다. 그림 7(b)는 각 port 간의 격리도 특성 결과이다. Magic-T 회로 구조의 높은 격리도를 가지는 동작 특성으로 인해 격리도 또한 -30 dB 이하의 우수한 결과를 얻었다.

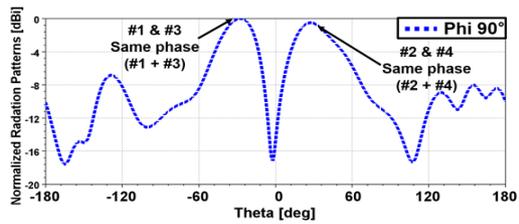
그림 8은 제안된 안테나의 각 port 별 정규화된 방사 패턴을 나타내었다. 그림 8(a)는 port 1에서 급전하였을 때 방사 패턴을 나타내었다. 안테나 소자 그룹 #1, #2, #3 그



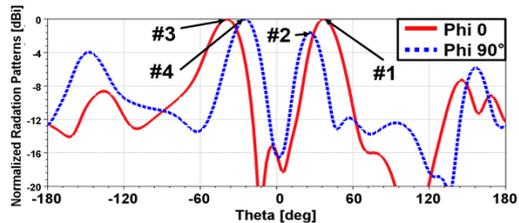
(a) Port 1



(b) Part 2



(c) Port 3



(d) Port 4

그림 8. 각 port의 급전에 의한 E_θ 방사 패턴
Fig. 8. E_θ radiation pattern due to the feed at each port.

리고 #4 모두 동위상으로 동작하여 E_θ 를 $\text{Phi}=0^\circ$ 와 90° 방향에서 보았을 때 하나의 주빔이 형성되는 결과를 얻었다. 그림 8(b)는 port 2에서 급전하였을 때의 방사 패턴을 나타내었다. 안테나 소자 그룹 #1과 #2, 그룹 #3과 #4가 Magic-T 회로 구조로 인해 서로 역위상 특성을 가지기 때문에 빔 패턴 형상이 잘 보이는 방향인 E_θ 를 $\text{Phi}=0^\circ$ 에서 보았을 때 2개의 빔이 방사되는 것을 알 수 있고 두 빔 패턴의 위상 차이는 29.0° 로 계산되었다. 그림 8(c)는 port 3에 급전하였을 때의 방사 패턴을 나타내었다. 안테나 소자 그룹 #1과 #3, 그룹 #2와 #4가 port 2에서의 급전과 같은 원리로 서로 역위상 특성을 가진다. 따라서 빔 패턴 형상이 잘 보이는 방향인 E_θ 를 $\text{Phi}=90^\circ$ 방향에서 보았을 때 두 개의 빔이 방사되는 것을 알 수 있고 두 빔 패턴의 위상 차이는 크로스 빔으로의 패턴이 되어 port 2 급전에 비해 약 2배인 55.5° 로 나타났다. 마지막으로 port 4에서 급전하였을 때의 방사 패턴은 그림 8(d)에 나타내었다. 4개의 패치 소자 그룹이 모두 역위상을 가지므로 E_θ 를 $\text{Phi}=0^\circ$ 와 90° 방향에서 보았을 때 4개의 빔이 방사되는 것을 알 수 있다. 그리고 각 급전 port에서 관측된 이득 값 차이와 위상 차이가 발생하는 원인은 Magic-T 회로 구조 구현을 위해 설계한 급전부가 비대칭 구조로 설계되었기 때문이다. 그러므로 이득 증가를 고려한 Magic-T 회로 다중 급전 방식을 사용하기 위해서는 각 port 간의 급전 구조를 대칭적으로 설계할 필요가 있다고 사료된다. 여기서는 우선, Magic-T 회로 구조의 동작 원리를 이용하여 위상 조절을 통한 빔 패턴 조향 제어가 가능한 안테나 설계를 이론적으로 입증하였다.

그림 9는 제안된 안테나의 각 port 급전에 의한 피크 이득 결과를 나타낸다. 중심 주파수 17.5 GHz에서 급전 port 1, port 2, port 3 그리고 port 4의 경우 각각 13.13 dBi, 8.20 dBi, 3.84 dBi 그리고 3.33 dBi의 결과를 얻었다. 각 port 별 이득이 차이가 나는 이유는 그림 8에서도 설명한 것처럼, port 1에서 급전하였을 때 패치 안테나 소자 그룹 #1, #2, #3, 그리고 #4의 8개 패치 안테나 소자가 동위상으로 동작하기 때문에 13.13 dBi의 높은 이득 결과를 얻은 반면, port 2에서 급전하였을 때의 패치 안테나 소자 그룹 #1과 #2, 그룹 #3과 #4가 Magic-T의 역위상 특성으로 인하여 각각 빔 패턴 하나 당 4개의 패치 안테나 소자가 동

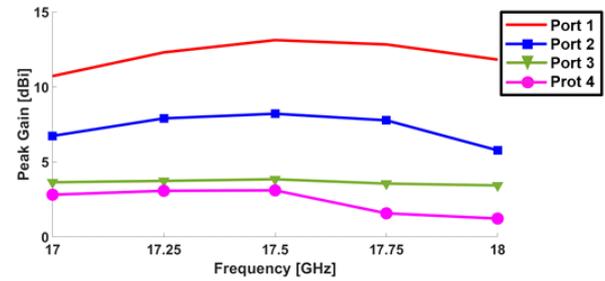


그림 9. 제안된 안테나의 각 port의 급전에 의한 피크 이득
Fig. 9. Peak gain due to feeding of each port of the proposed antenna.

작하기 때문에 port 1에서 급전하였을 때보다 이득이 8.20 dBi로 차이 나는 것을 알 수 있다. port 3에서 급전하였을 때는 패치 안테나 소자 그룹 #1과 #3, 그룹 #2와 #4가 서로 역위상 특성을 가지기 때문에 port 2에서의 급전과 같은 원리로 각각 빔 패턴 하나 당 4개의 패치 안테나 소자가 동작된다. 다만, 급전 회로의 비대칭적 구조로 인해 port 2와 이득이 3.84 dBi로 차이가 발생하였다. port 4에서 급전하였을 때는 패치 안테나 소자 그룹 #1, #2, #3 그리고 #4가 각각 빔 패턴 하나 당 2개의 패치 안테나 소자가 동작하기 때문에 각 그룹당 3.33 dBi를 보이며, 4개의 그룹 이득을 합치면 약 13.22 dBi를 보이므로 정상적인 이득이 얻어지고 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 Magic-T 회로 구조의 높은 격리도 특성과 위상 조절 동작 원리를 이용하여 급전 port에 따른 안테나 소자의 빔 패턴을 조절하고 위상을 변화시키는 새로운 위상 조절 기술을 제안하였다. 제안된 안테나는 Magic-T 회로 구조를 이용한 위상 조절로 각 port의 급전에 따라, 빔 패턴을 1개에서 4개까지 방사하는 우수한 특성을 확인하였다. 제안된 안테나의 반사계수와 각 port간의 격리도는 각각 -20 dB와 -30 dB 이하의 우수한 결과를 얻었으며 집중형 빔 모드와 분산형 빔 모드 조절이 가능한 안테나의 설계 가능성을 입증하였다. 향후 대칭 급전 구조의 설계를 통해 빔 패턴의 제어와 고이득 값을 얻은 후, 안테나를 제작하여 그 특성을 검증할 예정이다.

References

[1] Y. S. Yeoh, K. S. Min, "Design of high-gain slotted array waveguide antenna of radar systems to prevent maritime accidents," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 12, pp. 995-1003, Dec. 2020.

[2] K. Do, J. Kim, "A study on the predictability of eastern winter storm waves using operational wind forecasts of KMA," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, vol. 30, no. 5, pp. 223-233, Oct. 2018.

[3] R. Carrasco, J. Horstmann, and J. Seemann, "Significant wave height measured by Coherent X-band radar," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 9, pp. 5355-5365, Sep. 2017.

[4] T. Tomura, J. Hirokawa, M. Ali, and G. Carpintero, "Millimeter-wave multiplexed wideband wireless link using rectangular-coordinate orthogonal multiplexing (ROM) antennasm," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 24, pp. 7821-7830, Dec. 2021.

[5] M. Aikawa, H. Oga wa, "Double-sided MIC's and their applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 37, no. 2, pp. 406-413, Feb. 1989.

[6] E. A. Mariani, C. P. Heinzman, J. P. Agrios, and S. B. Cohn, "Slot line characteristics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 12, pp. 1091-1096, Dec. 1969.

[7] R. Rashid, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "Prototype evaluation of a beam tracking antenna using magic-T," in *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, Nov. 2015, pp. 1-4.

[8] H. Yin, 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.

이 승 우 [한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5621-9376>



2020년 2월: 경운대학교 항공정보통신공학과 (공학사)
 2022년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계

민 경 식 [한국해양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-9827-0169>



1989년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1991년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1996년 2월: 일본 동경공업대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2001년 2월~2002년 1월: 일본 요코하마

국립대학교 방문교수
 2017년 1월~2018년 1월: 미국 캘리포니아 주립대학교 (프레즈노) 방문교수
 2020년 1월~2020년 12월: 한국전자과학회 학회장
 2021년 1월~현재: 한국전자과학회 명예회장
 1997년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 슬롯 배열 도파관 안테나 설계 및 측정, FDTD 해석법 및 프로그램 개발, 광대역 MDM(Magneto-Dielectric Material) 안테나, 고이득 레이다 안테나, MIMO 안테나 설계 등

여 유 석 [한국해양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6913-968X>



2020년 2월: 경운대학교 항공정보통신공학과 (공학사)
 2020년 3월~2022년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
 2022년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 슬롯 배열 도파관 안테나

설계