

재구성 지능형 반사 표면 구현을 위한 편파에 독립적인 특성을 갖는 수동형 단위구조 설계

Biswarup Rana*, 조성실**, 홍익표***

Passive Type Polarization Independent Unit Cells for a Reconfigurable Intelligent Surfaces

Biswarup Rana*, Sung-Sil Cho**, and Ic-Pyo Hong***

이 논문은 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중점연구지원사업 (2019R1A6A1A03032988)과 기초연구사업 (2020R1I1A3057142), 2023년도 과학기술정보통신부의 재원으로 수행된 미래 지하도시 연구사업으로 수행되었습니다

요 약

무선 통신 시스템에 적용이 가능한 재구성 지능형 반사 표면(RIS)은 유망한 무선 통신 시스템 중 하나로, 6G 통신에서 RIS를 사용하여 저비용, 에너지 효율 및 스마트한 무선 환경을 구현할 수 있다. RIS는 수많은 단위구조로 구성된 구조로서 이론적 연구들은 꾸준히 진행되어 왔다. 하지만 실제 사용을 위한 RIS 설계는 매우 제한적이다. 따라서 본 논문에서는 새로운 유형의 수동형 RIS 단위구조를 설계하였다. 6GHz 이하 주파수 대역에서 설계하기 위해 1.58mm의 두께를 가지는 저렴한 FR4 기판을 사용하였으며, 단위구조의 크기는 42mm x 42mm이다. 이는 3.5GHz 주파수 대역에서 동작하도록 설계되었으며, 편파에 독립적인 특성을 가짐으로 이 구조를 사용하여 편파 손실을 극복할 수 있다. 또한 서로 다른 위상을 가지는 RIS 단위구조를 조합한 결과, 특정 방향으로 빔을 조향할 수 있는 것을 방사패턴 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

Abstract

Reconfigurable intelligent surface(RIS) applicable to wireless communication systems is one of the promising wireless communication systems. In 6G communications, RIS can be used to realized a low-cost, energy-efficient, and smart wireless environment. RIS is comprised of a large number of unit cells. There have been lots of papers on the theoretical study of RIS. However, the design of RIS for actual use is very limited. In this paper, we have proposed a new type of unit cells for a passive type of RIS. We have taken a low-cost FR4-substrate with a thickness of 1.58 mm for our design in the sub-6 GHz frequency band. The area of each unit cell was 42mm × 42mm. The RIS is designed to operate at the central frequency of 3.5 GHz frequency band and has polarization-independent structure, so polarization loss can be overcome using the structure. In addition, as a combined result of RIS unit cell having difference phases, it was confirmed through simulated radiation pattern that the combined RIS structure can steer the beam in a specific direction.

Keywords

reconfigurable intelligent surface, RIS, polarization independent, MIMO, unit cell

* 공주대학교 스마트자연공간연구센터 박사후연구원 · Received: Oct. 12, 2022, Revised: Dec. 07, 2022, Accepted: Dec. 10, 2022
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8803-3493> · Corresponding Author: Ic-Pyo Hong
** 공주대학교 정보통신공학과 박사과정 Dept. of Smart Information Technology Eng. Kongju National University,
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0878-077X> Cheonan, Korea
*** 공주대학교 스마트정보기술공학과 교수(교신저자) Tel.: +82-41-521-9199, Email: iphong@kongju.ac.kr
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

1. 서 론

현재 무선통신 관련 기술자들은 5G 통신과 6G 통신이 인간과 사물 모든 것을 하나로 연결할 수 있을 것으로 생각하고 있다[1]. 5G 통신 시스템은 64개 이상의 안테나 소자를 사용하여 원하는 방향으로 안테나 빔을 보내는 MIMO(Massive Multiple-Input Multiple-Output) 기술을 사용하고 있으며 [2]-[5], 이 기술을 통해 시스템의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 하지만 이는 다중 채널에서의 그림자 페이딩을 극복할 수 없다[6].

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 몇 년 동안 재구성 지능형 반사 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)을 사용하여 신호 강도가 낮은 음영 지역의 페이딩 효과를 극복하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[7]-[13]. RIS는 입사하는 신호에 대하여 사용자가 원하는 방향으로 신호를 반사 시킴으로서 기존 통신 시스템의 음영 지역을 해소시킬 수 있는 반사체 중 하나이다. RIS를 구성하는 각각의 단위구조는 반사파의 위상을 조절할 수 있는 기능을 가지고 있어 입사하는 입사파를 원하는 방향으로 반사시켜 기존 통신 신호의 스펙트럼 효율성을 크게 향상시킬 수 있으며, 채널의 보안성도 높일 수 있다[14]. 이러한 기능을 갖는 RIS는 건물의 벽 등에 설치하여 낮은 전력 및 저렴한 가격으로 동일 채널 간섭을 억제할 수 있고, 추가로 안테나를 설치하지 않아도 실내 또는 실외에서의 통신 성능을 개선할 수 있다.

최근에는 5G/6G 통신에서 사용하기 위한 RIS 관련 연구들이 진행되고 있다. 중국의 S. Xu 연구팀에서는 미래 mm-파 대역에 적용을 위하여 2bit의 핀 다이오드를 사용하여 위상과 편파변환이 가능한 높은 이득을 갖는 재구성 RIS를 제안하였다[15]. 또한 중국의 H. Yin 연구팀에서는 5.8Hz에서 동작하는 재구성 RIS를 설계하였고, RIS를 제어하기 위한 효율적인 알고리즘을 제안하였다[6]. 프랑스의 J.-B. Gros 연구팀에서는 이진 위상 조절이 가능한 메타 표면을 기반으로 mm-파 대역에서 동작하는 RIS를 제안하였다[8]. RIS는 편파 관련 손실이 매우 중요한 요소 중 하나이지만, 선행연구 모두 편파 관련 손실에 대해서는 고려하지 않았다. 또한 대부분의

RIS는 PIN 다이오드와 같은 능동소자를 사용하여 빔조향 특성을 구현하지만, 복잡한 바이어스 회로와 제어 시스템을 구현해야 하는 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 복잡한 제어보드 없이 한 개의 설계 파라미터만을 사용하여 위상특성을 변화시킬 수 있으며 편파 변화에 따라 독립적인 특성을 갖는 수동형 RIS의 단위구조를 설계하였으며, 설계한 단위구조의 방사패턴을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

II. 단위구조 설계

제안한 RIS의 단위구조는 42mm×42mm의 크기를 가지며, 3.5GHz에서 동작한다. 이때 사용된 기판은 유전율 4.4, 손실 0.02의 저렴한 FR4 기판을 사용하였다. 그림 1은 제안한 RIS의 기초 단위구조로 FR4 기판 위에 반지름 4mm의 원형 구조와 반지름 10mm의 링 구조가 결합되어 있으며, 완벽한 반사 특성을 구현하기 위해 FR4 기판 아래 7mm 떨어진 위치에 접지면을 위치시켰다. 기존의 RIS 구조들은 주로 좁은 대역폭을 가지고 있으므로, 본 논문에서는 대역폭을 향상시키기 위하여 다중 공진 특성을 갖도록 원형 구조와 링 구조를 결합하여 대역폭을 향상시켰다. 또한 원형 타입의 구조를 선택함에 따라 편파 및 입사각 변화에 따라 안정적인 성능을 구현할 수 있으며[16], 구조가 간단하여 제작이 용이하다는 특징을 갖는다. 그림 2와 3은 제안한 기초 단위구조의 반사계수와 위상을 ANSYS HFSS의 무한주기구조 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과, 동작주파수에서 -1dB의 반사계수를 가지며, -38°의 위상을 가지며, 편파 TE, TM 모드 변화에 따라 안정적인 특성을 가짐을 확인하였다.

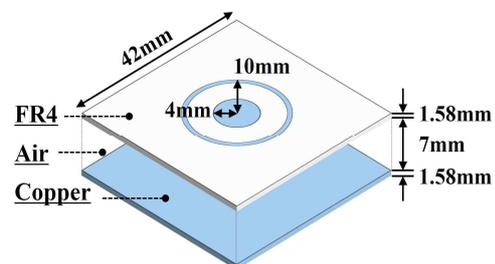


그림 1. RIS의 기초 단위구조
Fig. 1. Basic unit cell of RIS

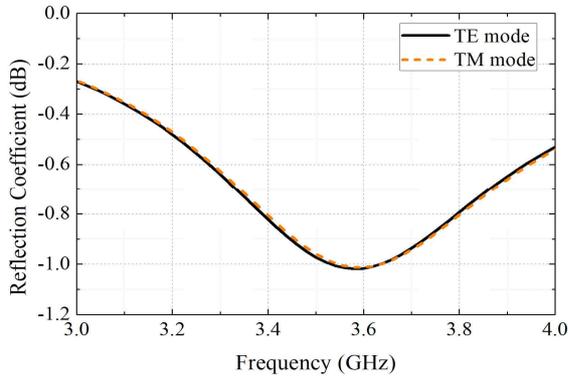


그림 2. 기초 단위구조의 반사계수
Fig. 2. Reflection coefficient of the basic unit cell

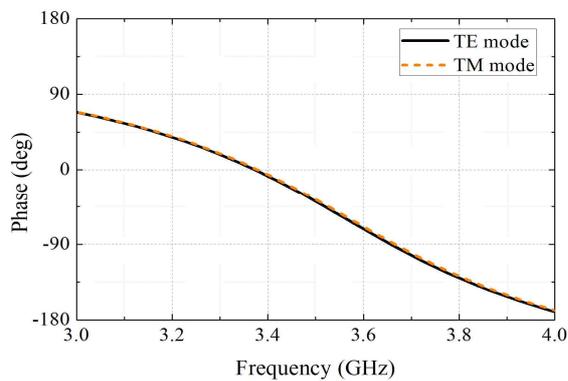


그림 3. 기초 단위구조의 위상
Fig. 3. Phase of the basic unit cell

본 논문의 최종 목표는 수동형 RIS를 설계하는 것으로, 빔 조향 특성을 구현하기 위해서는 각 단위 구조의 위상차가 180° 를 가져야 한다. 따라서 그림 4와 같이 기초 단위구조에 링 구조를 추가하여 링 구조의 반지름이 변화함에 따라 위상을 변화시킬 수 있는 RIS 단위구조를 설계하였다. 그림 5와 그림 6은 링 구조의 반지름 R이 5mm~8.5mm로 변화할 때의 반사계수와 위상을 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션 결과, 반지름이 증가할수록 위상이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

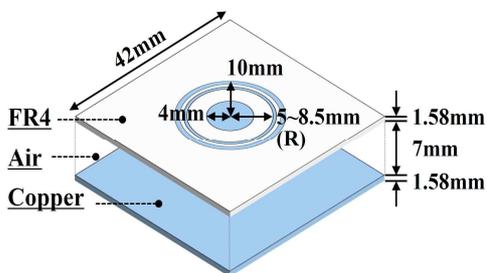


그림 4. 제안된 RIS 단위구조
Fig. 4. Proposed RIS unit cell

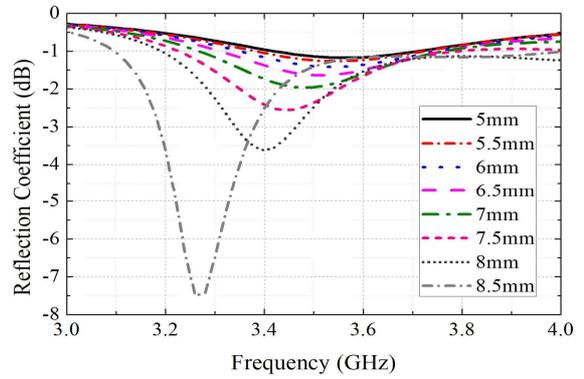


그림 5. 제안된 RIS 단위구조의 반사계수
Fig. 5. Reflection coefficient with proposed RIS unit cell

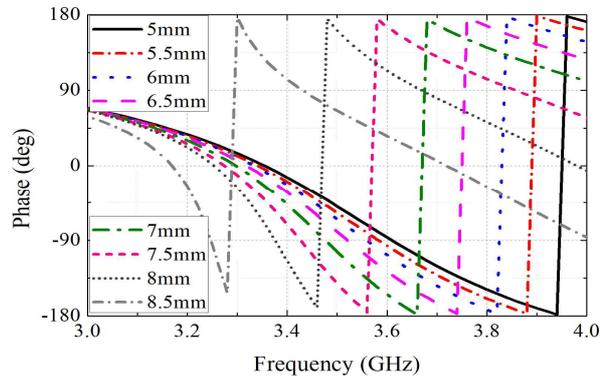


그림 6. 제안된 RIS 단위구조의 위상
Fig. 6. Phase with proposed RIS unit cell

III. 설계한 단위구조의 방사패턴

설계한 단위구조가 안테나의 입사파를 잘 반사시키는지 확인하기 위하여 3.5GHz에서 동작하는 표준 혼 안테나를 사용하여 반사된 안테나의 방사패턴을 시뮬레이션 하였다. 먼저 RIS 기초 단위구조의 성능을 확인하기 위하여 그림 7과 같이 기초 단위구조를 9x9 배열하였다.

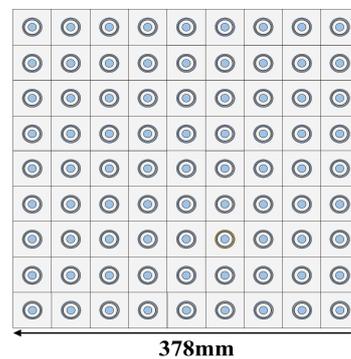


그림 7. 방사패턴을 확인하기 위한 9x9 단위구조
Fig. 7. 9x9 unit cells to verify the radiation patterns

그림 8(a)는 3.5GHz에서 동작하는 표준 혼 안테나의 방사패턴을 나타낸 것으로 입사 패턴의 이득은 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 평면 모두에서 13.2dBi이다. 그림 8(b)는 기초 단위구조일 때의 방사패턴을 나타낸 것으로, 동작주파수 3.5GHz에서 $\theta=-180^\circ$ 방향으로 14.4dBi의 이득을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 제안된 RIS 단위구조를 9x9 배열 했을 때, 링 구조의 반지름이 변화에 따른 반사된 방사 패턴을 나타낸 것이다. 링 구조의 반지름이 8.5mm

일 경우에는 $\theta=-180^\circ$ 방향으로 10.9dBi의 이득을 가지며, 8mm일 경우에는 9.4dBi의 이득을 가진다. 또한 반지름이 7mm일 경우에는 $\theta=-180^\circ$ 방향으로 12dBi의 이득을 가지며, 6.5mm일 경우에는 $\phi=0^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$ 평면 모두에서 13.8dBi의 이득을 가짐을 확인할 수 있다. 링 구조의 반지름이 증가할수록 반사계수가 커짐에 따라 안테나의 이득이 약간 감소하는 특징을 가지지만, 비교적 반사가 잘 되고 있음을 확인할 수 있다.

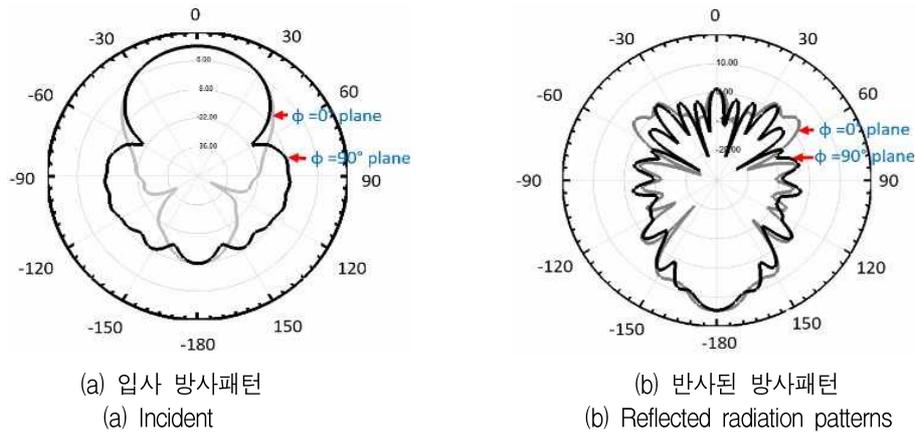


그림 8. 9x9 배열한 기초 단위구조
Fig. 8. Basic unit cell in 9x9 array

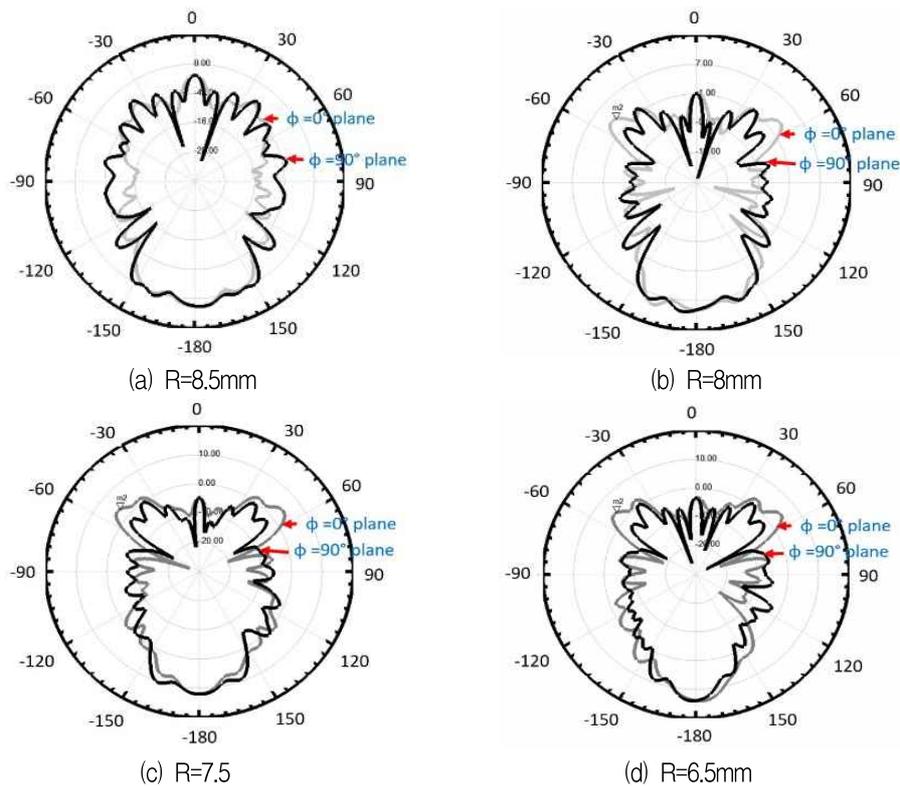
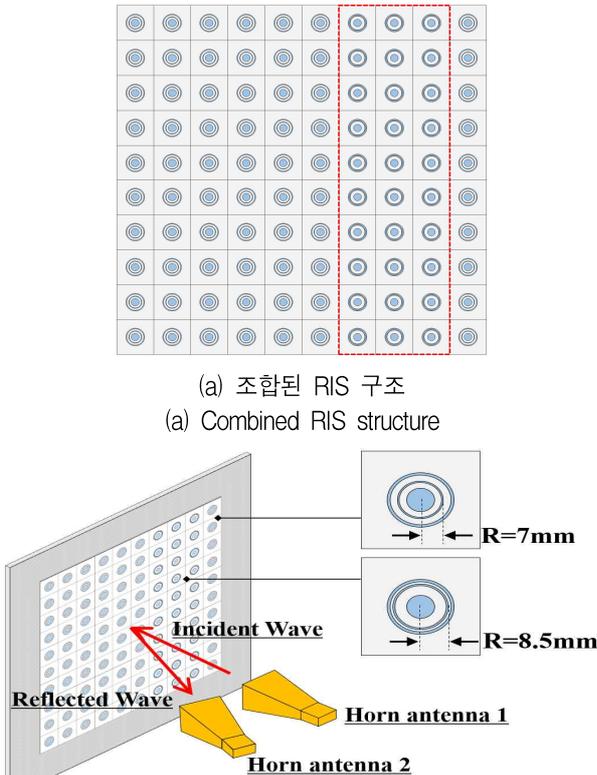


그림 9. 9x9 배열한 제안된 RIS 단위구조의 반사된 방사 패턴
Fig. 9. Reflected radiation pattern of proposed RIS unit cell in a 9x9 array

앞에서 언급한 바와 같이 제안된 RIS 단위구조는 180도 위상차를 갖는 2개의 단위구조를 서로 조합하면 반사파의 각도를 조절할 수 있다.

따라서 반지름 7mm일 때와 반지름 8.5mm일 때의 단위구조가 중심주파수 3.5GHz에서 약 180°의 위상 차이를 갖기 때문에 이 2개의 단위구조를 그림 10(a)와 같이 조합하였다. 또한 조합된 구조의 반사된 방사패턴을 시뮬레이션하기 위하여 그림 10(b)와 같이 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 시뮬레이션 결과, 그림 11과 같이 3.5GHz 주파수에서 특정 방향으로 빔을 조향할 수 있었으며, 이때 최대 이득은 11.9dBi이다.

표 1은 본 논문에서 제안한 RIS 구조와 선행 연구들과 비교한 결과를 나타낸 것이다. 제안된 구조는 선행 연구들과 달리 단위구조가 간단하여 제작이 용이하며, 수동형 RIS 구조임으로 복잡한 제어 보드 없이 빔 조향 특성을 구현할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 조합된 RIS 구조
(a) Combined RIS structure

(b) 조합된 RIS 구조의 시뮬레이션 환경
(b) Simulation environment for the combined RIS structure

그림 10. 조합된 RIS 구조와 시뮬레이션 환경
Fig. 10. Combined RIS structure and simulation environment

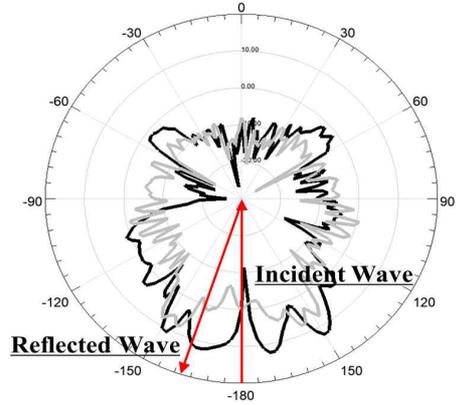


그림 11. 조합된 구조의 반사된 방사패턴
Fig. 11. Reflected radiation patterns of combined structure

표 1. 기존 RIS 구조와 제안된 RIS 구조 비교
Table 1. Comparison of the previous RIS structure and the proposed RIS structure

Ref	Unit cell	Tuning method	Freq.	Comments
[1]	D-type patch	Varactor diode	3.5 GHz	- Fabrication cost ↑ - Need a external controller
[6]	Square loop patch	Varactor diode	5.8 GHz	- Fabrication cost ↑ - Need a external controller
[15]	Jerusalem based patch	PIN diode	2.3 / 28.5 GHz	- Complex unit cell - Need a external controller
[17]	Joined E-shaped	PIN diode	5.4 GHz	- Fabrication cost ↑ - Need a external controller
[18]	Vanadium dioxide-based	Vanadium dioxide	5 / 32 GHz	- Multilayer unit cell - Need a external controller
Proposed	Circular patch with a ring	Mechanical	3.5 GHz	- Simple unit cell - Fabrication cost ↓ - Not need a external controller

IV. 결론

본 논문에서는 3.5GHz에서 동작하는 수동형 RIS의 기초 단위구조를 설계하였고, 시뮬레이션을 통해 RIS의 방사패턴을 확인하였다. 제안한 단위구조는 간단한 원형 구조와 링 구조로 구성된 단순한 패턴을 가지며, 내부 링 구조의 반지름 변화에 따라 서로 다른 위상 특성을 가짐으로 동작 주파수 대역에

서 위상을 쉽게 변화시킬 수 있다. 이러한 단위구조를 조합한 후 시뮬레이션을 통해 혼 안테나의 방사 패턴을 확인한 결과, 빔 조향 특성을 구현할 수 있음을 확인하였으며 이때 최대 이득은 11.9dBi 이다.

References

- [1] A. Araghi, M. Khalily, M. Safaei, A. Bagheri, V. Sing, F. Wang, and R. Tafazolli, "Reconfigurable intelligent surface(RIS) in the sub-6 GHz band: Design, implementation, and real-world demonstration", *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 2646-2655, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140278>.
- [2] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 9, No. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010. <https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092>.
- [3] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: Benefits and Challenges", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 8, No. 5, pp. 742-758, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2317671>.
- [4] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, No. 2, pp. 186-195, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761>.
- [5] B. W. Seo, "Widely linear hybrid receiver for MIMO interference channel", *Journal of KIIT*, Vol. 17, No. 11, pp. 51-58, Nov. 2019. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2019.17.11.51>.
- [6] X. Pei, H. Yin, L. Tan, L. Cao, Z. Li, K. Wang, K. Zhang, and E. Bjornson, "RIS-aided wireless communications: Prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 69, No. 12, pp. 8627-8640, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3116151>.
- [7] E. Basar, M. D. Renzo, J. D. Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 116753-116773, Aug. 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192>.
- [8] J. B. Gros, V. Popov, M. A. Odit, V. Lenets, and G. Lerosey, "A reconfigurable intelligent surface at mmWave based on a binary phase tunable metasurface", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 2, pp. 1055-1064, May 2021. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3076271>.
- [9] W. Tang, M. Z. Chen, X. Chen, J. Y. Dai, Y. Han, M. D. Renzo, Y. Zheng, S. hin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 20, No. 1, pp. 421-439, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3024887>.
- [10] M. H. Khoshafa, T. M. N. Ngatched, M. H. Ahmed, and A. R. Ndjiongue, "Active reconfigurable intelligent surfaces-aided wireless communication system", *IEEE Communications Letters*, Vol. 25, No. 11, pp. 3699-3703, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3110714>.
- [11] S. Gong, X. Ju, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y. C. Liang, "Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, No. 4, pp. 2283-2314, Jun. 2020. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3004197>.
- [12] S. Sugiura, Y. Kawai, T. Matsui, T. Lee, and H. Iizuka, "Joint beam and polarization forming of intelligent reflecting surfaces for wireless communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 70, No. 2, pp. 1648-1657, Feb.

2021. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3055237>.
- [13] O. Yurduseven, S. D. Assimonis, and M. Matthaiou, "Intelligent reflecting surfaces with spatial modulation: An electromagnetic perspective", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 1, pp. 1256-1266, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3017237>.
- [14] B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, Z. Han, and H. V. Poor, "Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: Achievable rates with limited discrete phase shifts", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 38, No. 8, pp. 1809-1822, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000813>.
- [15] L. Dai, B. Wang, M. Wang, X. Yang, J. Tan, S. Bi, S. Xu, F. Yang, Z. Chen, M. D. Renzo, C. B. Chae, and L. Hanzo, "Reconfigurable intelligent surface-based wireless communication: Antenna design, prototyping and experimental results", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 45913-45923, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977772>.
- [16] T. K. Wu, "Frequency selective surface and grid array", Wiley, pp. 4-5, Jul. 1995.
- [17] M. Ouyang, Y. Wang, F. Gao, S. Zhang, P. Li, and J. Ren, "Computer vision-aided reconfigurable intelligent surface-based beam tracking: prototyping and experimental results", *arXiv preprint arXiv*, Jul. 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05032>.
- [18] R. Matos and N. Pala, "VO2-based ultra-reconfigurable intelligent reflective surface for 5G applications", *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-9, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08458-9>.

저자소개

Biswarup Rana



2007년 : Vidyasagar University, India(공학사)

2009년 : Vidyasagar University, India(공학석사)

2012년 : WestBengal University of Technology, India(기술석사)

2017년 : Indian Institute of Engineering Science and Technology, India(공학박사)

2017년 8월 ~ 2018년 12월 : 서울과학기술대학교

전기전자공학과 박사후연구원

2020년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 스마트자연공간연구센터 박사후연구원

관심분야 : 안테나, 지능형 반사 표면

조 성 실 (Sung-Sil Cho)



2016년 2월 : 공주대학교 정보통신공학부(공학사)

2018년 2월 : 공주대학교 정보통신공학과(공학석사)

2018년 3월 ~ 2022년 2월 : 공주대학교 스마트자연공간연구센터 연구원

2022년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 정보통신공학과 박사과정

관심분야 : 안테나, 주파수 선택구조 설계 및 응용

홍 익 표 (Ic-Pyo Hong)



1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 연세대학교 전자공학과(공학석사)

2000년 2월 : 연세대학교 전기컴퓨터공학과(공학박사)

2000년 3월 ~ 2003년 2월 :

삼성전자 무선사업부 책임연구원

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

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

2003년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 스마트정보기술공학과 교수

관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조