

실내 무선 통신 신호 개선을 위한 1-bit 재구성 지능형 표면

문윤석*, 어승환**, 홍익표***

A 1-bit Reconfigurable Intelligent Surface for Improving Indoor Wireless Communication Signals

Yun-Seok Mun*, Seung-Hwan Euh**, and Ic-Pyo Hong***

이 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중점연구소지원사업 (2019R1A6A1A03032988)과 기초연구사업 (2020R111A3057142), 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터(2022R1A6C101A741)의 지원을 받아 수행되었습니다

요약

본 논문에서는 실내 무선 통신 신호의 수신 전력 향상을 위하여 5GHz 주파수 대역에서 동작하는 1-bit 재구성 지능형 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)을 제안하였다. 제안한 단위 구조는 크기가 큰 공진 패치와 크기가 작은 기생 패치가 핀 다이오드를 통해 연결되어 있으며, 핀 다이오드의 상태에 따라 표면 전류 분포를 변화시킴으로 동작 주파수 대역에서 180°의 위상차를 갖도록 설계하였다. 단위 구조 시뮬레이션 결과 5.03GHz~5.67GHz 주파수 대역에서 2.18dB 미만의 반사계수를 지니며, 640MHz의 동작 대역폭에서 180°±20° 내외의 위상차를 가짐을 확인하였다. 1-bit 재구성 지능형 표면의 단위 구조를 16×10 배열로 제작하여 실험실과 복도 두 가지 실내 환경에서 수신 전력 측정 결과 최대 9.7dB의 수신 전력 향상을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a 1-bit Reconfigurable Intelligent Surface(RIS) operating in the 5 GHz frequency band is proposed to enhance the received power of indoor wireless communication signals. The proposed unit structure consists of a large resonant patch and a small parasitic patch connected through a PIN diode, and is designed to have a phase difference of 180° in the operating frequency band by changing the surface current distribution according to the state of the PIN diode. Simulation of the unit structure shows that it has a reflection coefficient of less than 2.18dB in the frequency band from 5.03 GHz to 5.67 GHz, and a phase difference of 180°±20° in the operating bandwidth of 640MHz. The unit structure of the 1-bit Reconfigurable Intelligent Surface was fabricated in a 16×10 array, and received power measurements in two indoor environments, a laboratory and a corridor, showed a received power improvement of up to 9.7 dB.

Keywords

reconfigurable intelligent surface, metasurface, sub-6 GHz, PIN-diode, received power

* 국립공주대학교 정보통신공학과 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3524-2384>
** 국립공주대학교 스마트정보기술공학과 학사
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9517-9972>
*** 국립공주대학교 스마트정보기술공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

· Received: Apr. 13, 2024, Revised: May 29, 2024, Accepted: Jun. 01, 2024
· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong
Dept. of Smart Information Technology Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31080, Korea
Tel.: +82-41-521-9199, Email: iphong@kongju.ac.kr

I. 서 론

오늘날 사물인터넷(IoT, Internet of Things)이나 블루투스(Bluetooth)를 이용한 웨어러블 기기의 통신 방식은 전자기파를 사용하여 무선으로 통신이 이루어지고 있다. 무선 통신에서는 통신 기기의 안정적인 신호 응답특성, 고속의 데이터 전송률 그리고 통신 지연을 줄이기 위한 저지연 통신이 매우 중요하다[1]. 하지만 사용자의 편의 향상을 목적으로 한 대부분의 무선 통신 기기는 주로 비면허 주파수 대역인 ISM 대역을 사용하고 있어 동일 대역을 사용하는 무선 통신 기기 간의 주파수 간섭, 트래픽 저하 그리고 데이터 전송률 지연 등의 문제가 발생하고 있다[2][3]. 이러한 문제는 통신 경로상의 장애물이 존재하는 실내 환경에서 주로 발생하며 특히 신호 직진성이 강한 GHz 이상의 주파수 대역에서 더 크게 발생할 수 있다. 따라서 신호의 수신전력 향상과 통신 범위를 넓히는 방안이 요구되고 있으며, 해당 문제의 해결 방안으로 다중 입력 다중 출력 안테나(MIMO, Multiple Input Multiple Output)[4], 소형 셀 기지국 배치[5], 중계안테나 구축[6] 등이 있다. 하지만 추가적인 안테나 기지국 건설 및 중계안테나를 구축하기에는 막대한 설치비용과 높은 전력 소모가 필요하다는 제한 사항이 존재하므로 이를 해결을 위한 방안으로 재구성 지능형 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)에 관한 연구가 진행되었다[7]-[11].

재구성 지능형 표면은 일반적으로 유전 기판 위에 수백 개의 마이크로스트립 패치 형태의 단위 구조와 RF 접지면으로 구성되어 있다[12]. 단위 구조는 핀 다이오드, 바랙터 다이오드, MEMS와 같은 RF 소자가 포함되어 있으며, RF 소자는 인가되는 전압에 따라 단위 구조의 표면 전류 분포를 재구성하여 주파수 응답 특성을 변화시킬 수 있다[13][14]. 따라서 변경된 단위 구조 간의 위상차를 이용하여 표면에 입사된 신호를 원하는 특정 방향을 반사할 수 있다. 또한 사용되는 RF 소자의 수를 증가시킬수록 다양한 표면 전류 분포 제공이 가능하여 다양한 주파수 응답 특성을 구현할 수 있으나, 제어회로 시스템이 복잡해지며 제작 비용이 증가하는 문제가

있다. 따라서 N-bit 재구성 지능형 표면보다 1-bit 재구성 지능형 표면이 제어회로 시스템의 간소화와 제작 비용을 낮출 수 있다[15]. 하지만 낮은 방사 효율을 지니므로 더 많은 단위 구조 수의 배열로 구성할 필요가 있다[16].

본 논문에서는 실내 무선 통신 신호 개선을 목적으로 5GHz 주파수 대역에서 동작하는 1-bit 재구성 지능형 표면을 설계하였다. 재구성 지능형 표면의 제어회로는 저전력으로 구동될 수 있는 라즈베리 파이 3B+와 시프트 레지스터를 활용하여 보다 적은 입출력 포트를 사용하여 각각의 단위 구조에 포함된 핀 다이오드를 제어할 수 있도록 설계하였다. 제작한 구조의 성능 검증을 위하여 실내 무선 통신 환경에서 시나리오별 수신전력을 측정하였다.

II. 제안한 구조의 설계 및 측정

재구성 지능형 표면은 금속재질의 반사판과 달리 $M \times N$ 개의 마이크로스트립 패치 형태의 단위구조가 배열된 형태를 지닌다. 이때 배열된 단위구조는 RF 소자가 포함되어 있어 DC 전압을 인가하여 구조를 재구성할 수 있다. 재구성된 1-bit 시스템의 단위구조는 ON/OFF 상태에 따라 2개의 위상값을 지니므로 재구성 지능형 표면은 단위구조 간 위상차를 이용하여 표면에 입사된 신호를 특정 방향으로 반사할 수 있다. 재구성 지능형 표면에서 방사되는 반사 신호의 세기는 안테나의 배열 원리로 설명할 수 있으며 방사되는 총 전계의 값은 단위구조와 배열인자의 곱으로 표현된다[17]. 배열인자 내 (m, n) 번째 단위구조의 위상은 신호의 입사각 위상에서 원하는 반사각의 위상을 빼 값으로 나타낼 수 있으며[15], 단위구조의 ON/OFF 상태에 따른 위상차를 구현하여 배열인자 값 조절을 통해 표면에 입사하는 신호를 원하는 방향으로 조향하여 반사할 수 있다.

본 논문에서 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면은 제어회로의 간소화 및 제작 비용을 보다 줄이기 위하여 2개 이상의 유전기판을 사용하는 선행 연구 구조와 다르게 1개의 유전기판을 사용하여 재구성 지능형 표면을 설계하였다. 제안한 재구성 지능형 표면의 단위구조는 그림 1(a)과 같이 상부층에는 유

전율 $\epsilon_r=4.4$, 손실탄젠트 $\tan\delta=0.02$, 높이=1.6mm를 가지는 FR-4 유전 기판 위에 5GHz 대역의 신호를 반사하기 위한 2개의 사각 패치 구조와 편 다이오드가 위치하고 있다. 중간층에는 편 다이오드에 DC 전압을 인가하기 위한 바이어스 회로, 하부층에는 3mm의 공기층과 RF 접지면으로 구성되었다. 주파수 재구성 특성을 구현하기 위하여 그림 1(b)과 같이 단위 구조를 5GHz 대역에서 반사 특성을 갖는 메인 공진 패치 구조와 기생 패치 구조 사이에 편 다이오드가 위치하도록 설계하였으며, 편 다이오드의 ON/OFF 상태에 따라 2개의 패치구조 사이의 전기적 길이를 변화시켜 위상차를 구현하였다.

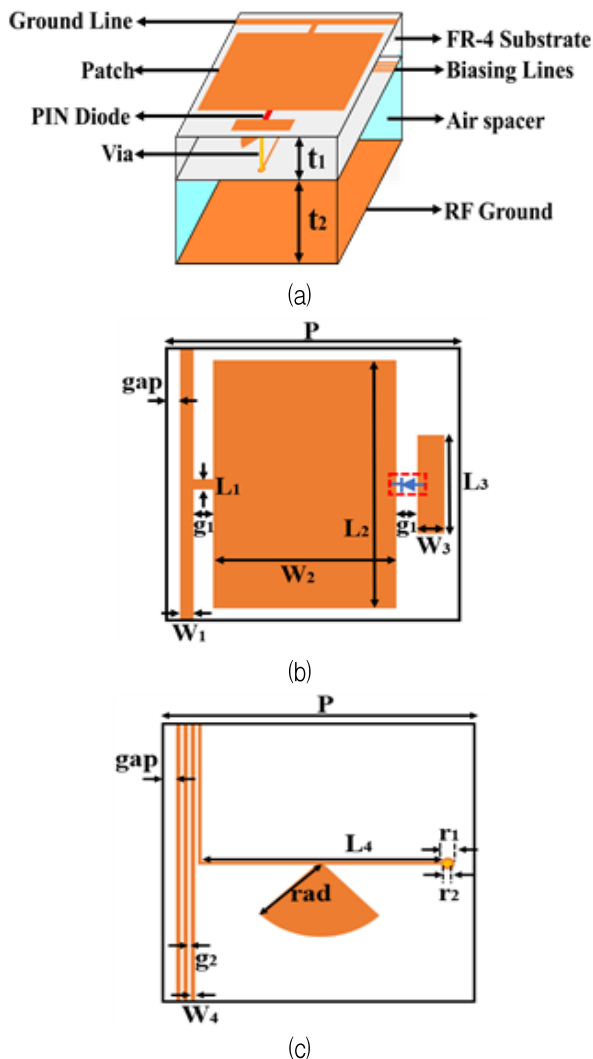


그림 1. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면
 (a) 3D 뷰 (b) 상단 뷰 (c) 바이어스 회로
 Fig. 1. Proposed 1-bit RIS
 (a) 3D view (b) Top view (c) Bias circuit

PIN 다이오드의 ON/OFF 상태에 따른 단위구조의 위상차는 표면에 입사하는 신호원이 정현파 신호로 $[0, 2\pi]$ 주기의 위상값을 가지므로, N-bit 시스템에서 단위구조 간 위상차는 N-bit 단위의 이산적인 양자화를 진행하기 때문에 $\frac{2\pi}{2^n}$ 을 만족해야 한다. 따라서 1-bit 재구성 지능형 표면 단위구조의 ON/OFF 상태에 따른 위상차를 $180^\circ \pm 20^\circ$ 의 값을 가지도록 설계하였다. 이때 사용한 편 다이오드는 Skyworks의 SMP1340-079LF ($L=0.7nH$, $C=0.21pF$, $R=0.85\Omega$, $R_p=10k\Omega$)을 사용하였다. 그림 1(c)는 바이어스 회로를 나타낸 것으로 바이어스 라인에 RF 신호가 유입됨을 방지하기 위한 방사형 스텐트를 설계하였다.

1-bit 재구성 지능형 표면 단위 구조의 주파수 응답 특성을 알아보기 위해 Ansys사의 상용시뮬레이터 HFSS의 무한주기구조 해석 방식을 사용하였으며, 자세한 시뮬레이션 조건은 표 1에 나타내었다. 또한 표 2에 1-bit 재구성 지능형 표면의 최적화된 단위 구조 설계 파라미터값을 나타내었으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 설정 조건

Table 1. Simulation setup conditions

Setup conditions	Settings
Port	Floquet port
Boundary	Master & slave
Incident angle	Normal incident
Frequency range	4GHz~7GHz

표 2. 단위구조 설계 변수

Table 2. Unit-cell design parameter

Parameters	Value (mm)	Parameters	Value (mm)
P	22	r1	1
W1	1	r2	0.6
W2	13.8	rad	6
W3	2	g1	1.6
W4	0.3	g2	0.2
L1	0.8	gap	1
L2	20	t1	1.6
L3	8	t2	3
L4	17.2		

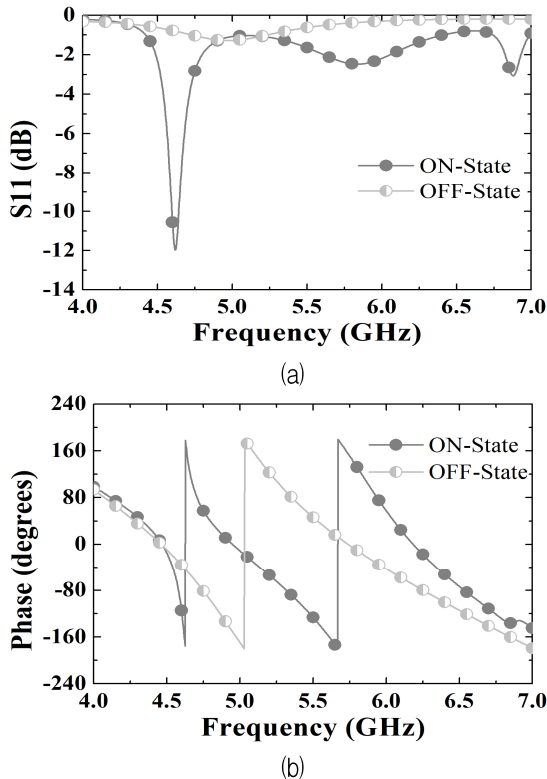


그림 2. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면 단위구조의 주파수 응답 특성 (a) 반사계수 (b) 위상
 Fig. 2. Frequency response characteristics of the proposed 1-bit RIS unit structure (a) Reflection coefficient (b) Phase

설계한 단위구조는 5.03GHz~5.67GHz 대역에서 2.18dB 미만의 반사계수와 640MHz의 동작 대역폭에서 $180^{\circ} \pm 20^{\circ}$ 의 위상차를 확인하였다. 또한 입사파의 입사각도 변화에 따른 주파수 응답 특성을 확인한 결과, 그림 3에 나타난 바와 같이 동작주파수인 5GHz와 5.5GHz에서 입사각 15°와 30°까지는 수직 입사파 기준으로 10% 이내의 오차를 가지며, ON/OFF 상태에 따라 위상차가 비교적 180°의 위상차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

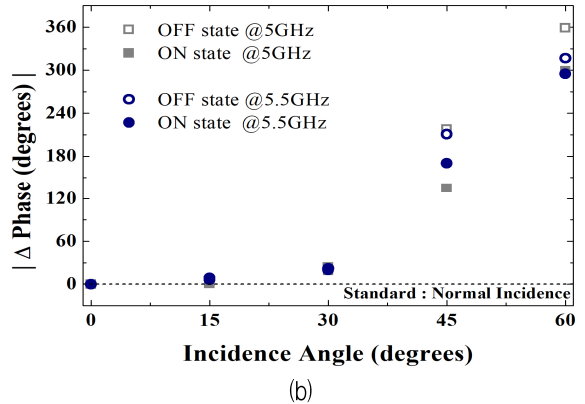
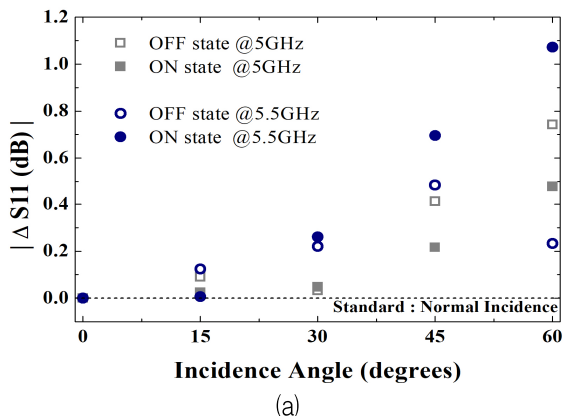


그림 3. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면 단위구조의 입사각 주파수 응답 특성
 (a) 반사계수 변화량 (b) 위상 변화량
 Fig. 3. Incidence angle frequency response characteristics of the proposed 1-bit RIS unit structure
 (a) Reflection coefficient change (b) Phase change

그림 4는 제안한 단위구조를 각각 제어하기 위하여 설계한 제어 보드를 나타낸 것이다. 단위 구조를 제어하기 위해 사용한 Raspberry Pi 3B+의 경우, 입·출력 핀이 40개로 제한되기 때문에 16×10 배열된 재구성 지능형 표면의 단위 구조를 각각 제어하기에는 불가능하다. 따라서 8-bit 신호의 입·출력이 가능한 8-bit 시프트 레지스터를 사용하여 Raspberry Pi 3B+의 제한된 입·출력 핀을 가지고 16×10 배열의 구조를 제어하도록 설계하였다.

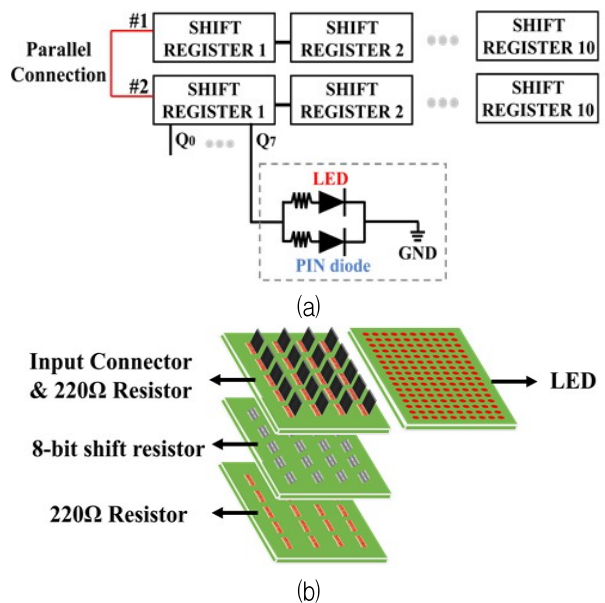
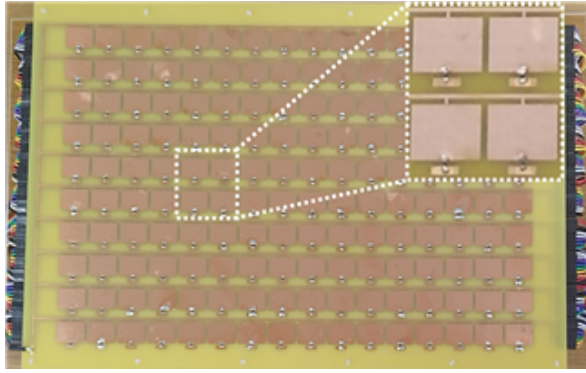
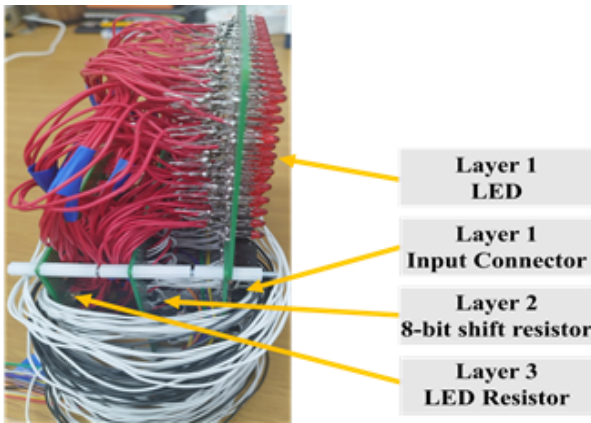


그림 4. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면 제어 보드
 (a) 2x10 직·병렬 8-bit 시프트 레지스터 (b) 제어 보드
 Fig. 4. Schematic of the proposed 1-bit RIS control board
 (a) 2 x 10 series¶llel 8-bit shift resistor (b) Control board



(a)



(b)

그림 5. 수신 전력 측정을 위해 제작한 1-bit 재구성 지능형 표면 (a) 16x10 배열의 1-bit 재구성 지능형 표면 (b) 1-bit 재구성 지능형 표면용 제어 보드

Fig. 5. 1-bit RIS system fabricated for measuring received power (a) 16x10 array 1-bit RIS (b) Control board for 1-bit RIS

제어 보드는 총 3개의 층으로 구성되어 있으며, 첫 번째 층에는 재구성 지능형 표면 내 핀 다이오드의 현재 상태를 확인하기 위한 LED가 있으며, 두 번째 층은 160개의 단위구조를 제어하기 위한 20개의 8-bit 시프트 레지스터, 마지막 세 번째 층은 LED의 과전류를 보호하기 위한 220Ω 저항이 있다. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같이 단위구조를 16×10 배열하여 제작하였다. 제작한 구조의 성능을 검증하기 위하여 자유공간측정법을 사용하여 동작주파수 대역인 4.9~5.6GHz 대역에서의 반사계수와 위상을 측정하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 입사파가 수직으로 입사할 경우 반사계수와 위상이 비교적 시뮬레이션 결과와 유사하며, ON/OFF 상태에

따라 위상차가 180°의 위상차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

또한 제안한 구조가 실제 실내 환경에 적용했을 경우, 재구성 지능형 표면이 적용하지 않은 일반 환경과 비교하여 수신전력 세기에 영향을 미치는지 확인하기 위하여 수신전력 측정을 하였다. 수신전력 측정시스템은 송신안테나로 5GHz 대역 무선공유기를 사용하였으며, 수신안테나로 5.2GHz 대역 마이크로스트립 패치 안테나를 사용하였다. 수신전력을 측정하기 위해 수신안테나를 노트북에 연결한 뒤 애플리케이션 InSSIDerHome을 통해 측정된 수신전력을 확인하였다.

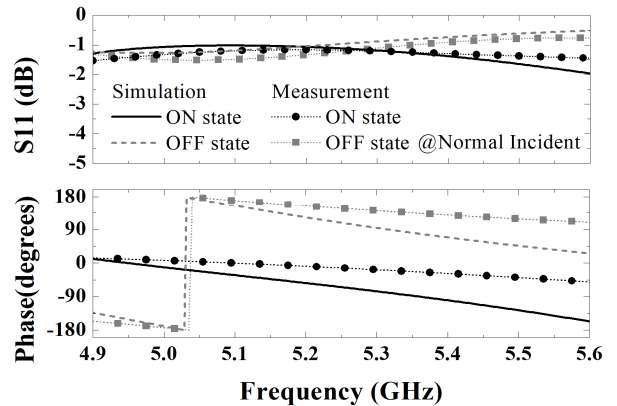
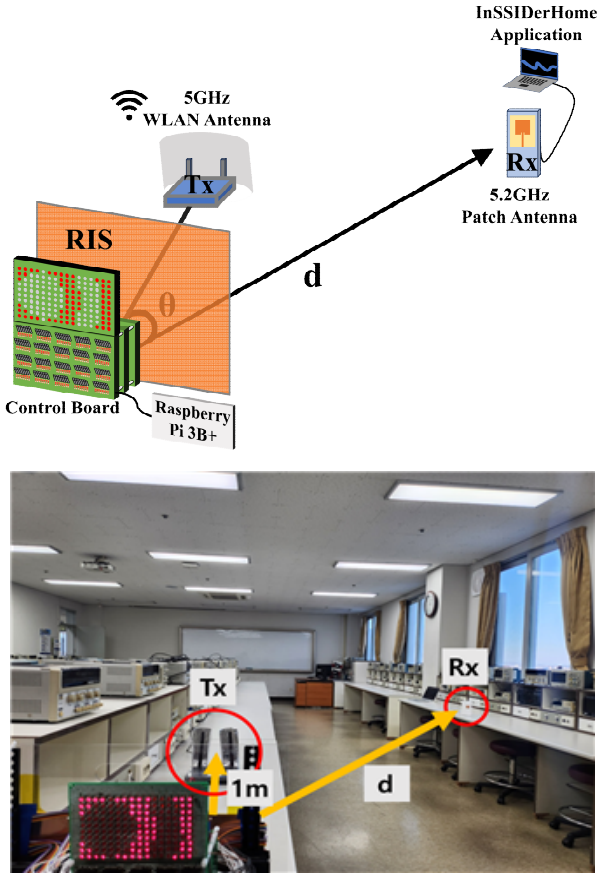


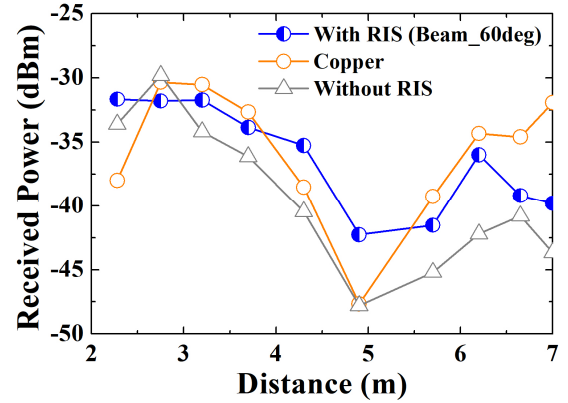
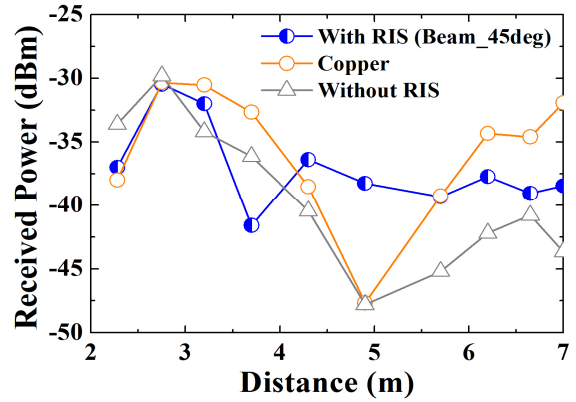
그림 6. 제작한 1-bit 재구성 지능형 표면 단위구조의 주파수 응답특성 측정결과

Fig. 6. Frequency response characteristics of the fabricated 1-bit RIS unit structure

그림 7(a)는 수신전력 측정을 위해 구성한 측정 시스템을 나타낸 것으로, 1-bit 재구성 지능형 표면과 송신안테나와의 거리를 1m로 고정한 뒤 수신안테나와의 거리 d에 따른 수신전력을 측정하는 결과를 그림 7(b)에 나타내었으며 측정된 결과를 정리하여 표 3에 나타내었다. 재구성 지능형 표면에 수직으로 송신신호가 입사할 경우, 각도 $\theta=15^\circ$ 일 때 거리 $d=6.65m$ 에서 수신전력이 $-31dBm$ 으로 반사판을 적용하여 측정된 수신전력 $-34.6dBm$ 대비 $+3.6dB$ 로 약 2.29배의 성능 향상이 이루어졌음을 확인하였다. 또한 재구성 지능형 표면을 적용하지 않은 일반 실험 환경에서의 수신전력 $-40.8dBm$ 과 비교한 결과 $+9.7dB$ 로 약 9.33배의 큰 수신전력 향상을 확인할 수 있다.

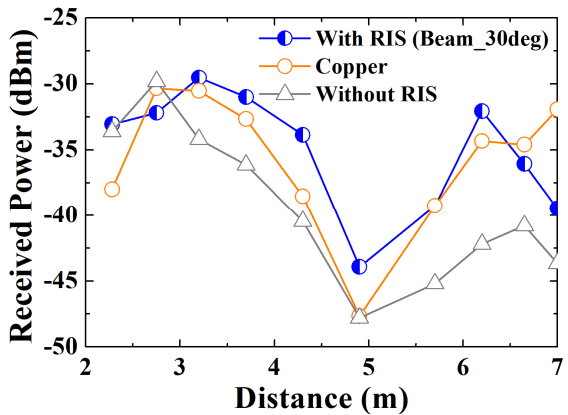
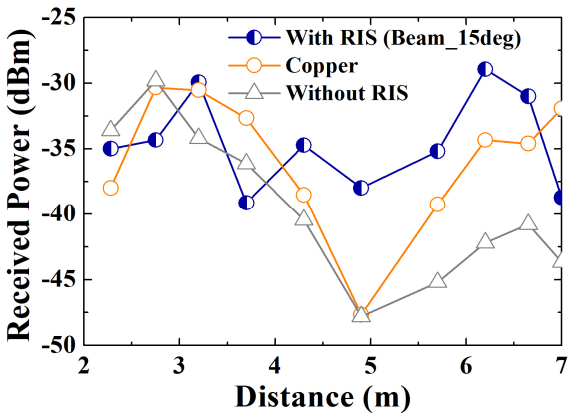


(a)



(b)

그림 7. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면의 측정환경 (a) 측정시스템 (b) 반사판과 비교한 수신전력 결과
Fig. 7. Proposed 1-bit RIS measurement environment (a) Measurement system (b) Received power measurement results compared to copper plate

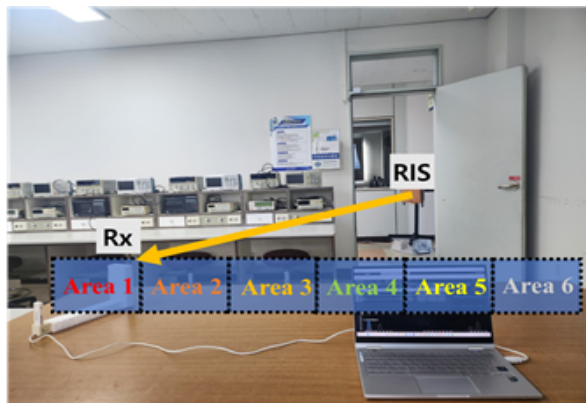
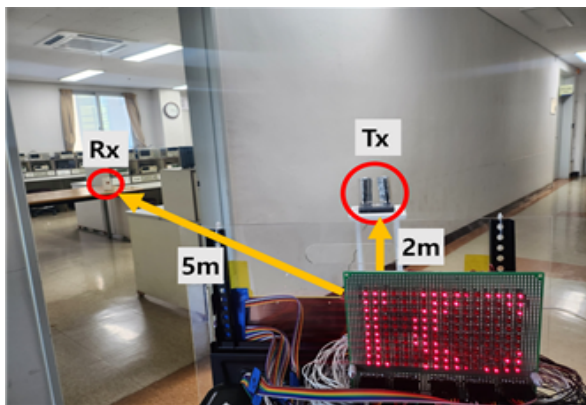


각도 $\theta=30^\circ$ 일 때 거리 $d=3.7\text{m}$ 에서 측정된 수신 전력은 -31dBm 으로 반사판을 적용하여 측정된 수신 전력 -32.67dBm 대비 $+1.67\text{dB}$ 로 약 1.47배의 성능 향상을 보였으며, 아무것도 적용하지 않은 일반 실험 환경에서의 수신 전력 -36.13dBm 대비 $+5.13\text{dB}$ 로 약 3.26배에 해당하는 수신 전력 향상을 확인하였다. 각도 $\theta=45^\circ$ 와 $\theta=60^\circ$ 에서는 1-bit 재구성 지능형 표면이 적용된 환경이 아무것도 적용하지 않은 일반 시험환경에서보다 낮은 수신 전력을 보이며 각각 -2.4dB , -1.4dB 로 기존 신호 세기 대비 0.58배와 0.72배의 수신 전력 변화를 확인하였으며 반사판을 적용하였을 때의 결과 또한 유사한 결과를 보였다. 해당 결과는 송신용 무지향성 무선랜 안테나 후방에 알루미늄 포일을 두어 지향성을 구현하였지만, 송신안테나와 수신안테나의 거리가 가까워 이에 대한 효과가 미비하여 생긴 결과이다.

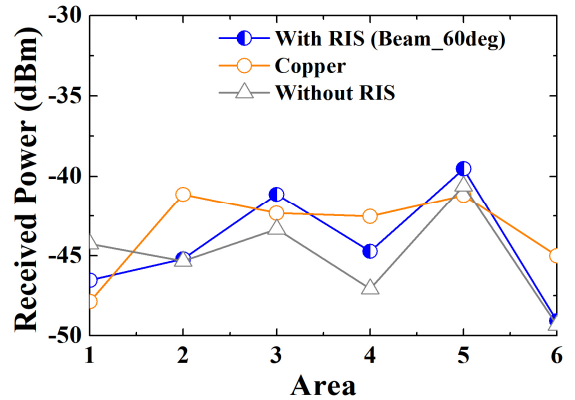
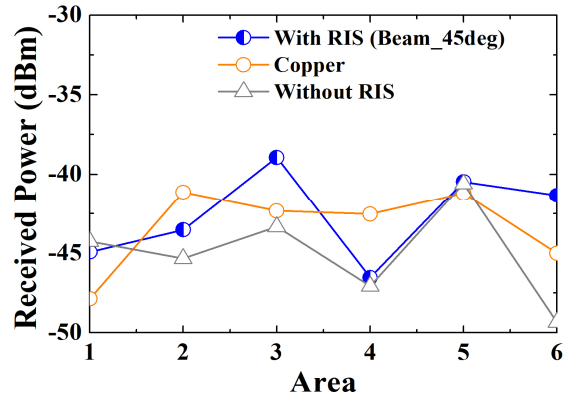
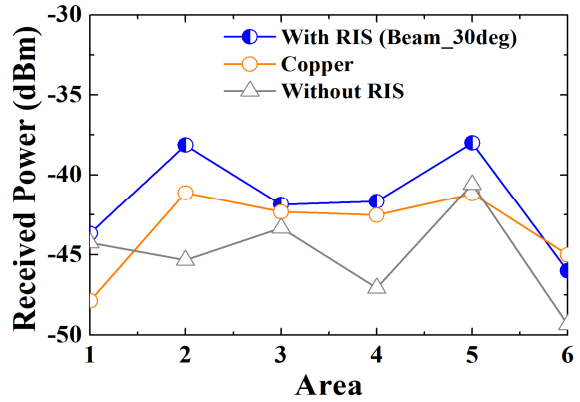
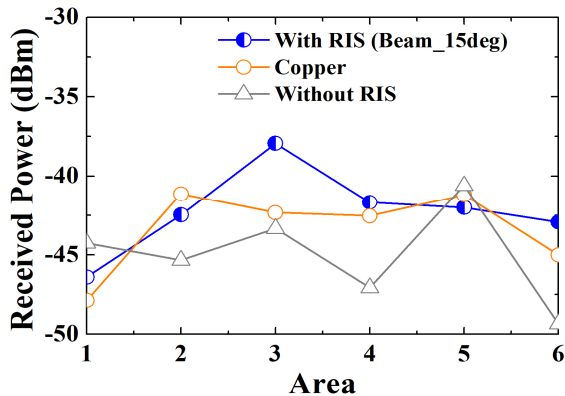
표 3. 수신전력 측정 결과

Table 3. Received power measurement results

	X	Copper plate	RIS
$\theta=15^\circ$ (d=6.65m)	-40.8dBm	-34.6dBm	-31dBm
$\theta=30^\circ$ (d=3.7m)	-36.13dBm	-32.67dBm	-31dBm
$\theta=45^\circ$ (d=2.75m)	-29.8dBm	-30.33dBm	-32.2dBm
$\theta=60^\circ$ (d=2.25m)	-33.6dBm	-38dBm	-35dBm



(a)



(b)

그림 8. 제안한 1-bit 재구성 지능형 표면의 측정환경 (a) 복도-실내 환경 (b) 동일 크기 반사판과 비교한 수신전력 측정 결과

Fig. 8. Proposed 1-bit RIS measurement environments (a) corridor to indoor measurement environment (b) received power measurement results compared to the same size copper plate

그림 8(a)는 송신안테나와 수신안테나가 각각 복도와 실내 환경에 위치하였을 때의 측정환경을 나타낸다. 측정환경 구성은 수신전력 측정을 위해 송신안테나와 1-bit 재구성 지능형 표면 사이의 거리를 2m로 고정하였으며, 수신안테나와 1-bit 재구성 지능형 표면 사이의 거리를 5m로 고정하였다.

다만 측정을 진행한 복도-실내 환경은 1-bit 재구성 지능형 표면과 수신안테나 사이의 각도 설정에 한계가 있어 $\theta=25^\circ\sim 45^\circ$ 인 경우에 대해서 측정을 진행한 뒤 그림 8(b)에 수신전력 측정 결과를 나타내었으며, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ 인 위치에서 측정한 수신전력 결과를 정리하여 표 4에 나타내었다. 재구성 지능형 표면에 수직으로 송신신호가 입사할 경우, 1-bit 재구성 지능형 표면과 수신안테나 사이의 각도 $\theta=30^\circ$ 인 위치(Area 2)에서의 수신전력은 -38.13dBm 으로 반사판을 적용한 경우의 수신전력 -41.13dBm 대비 $+3\text{dB}$ 로 약 2배의 성능 향상을 보였으며, 아무것도 적용되지 않은 일반 실험 환경에서의 측정한 수신전력 -45.33dBm 과 비교하여 $+7.2\text{dB}$ 로 약 5.25배 가량 수신전력 향상을 보였다. 각도 $\theta=45^\circ$ 인 위치(Area 6)에서 측정한 수신전력은 -41.33dBm 으로 반사판을 적용했을 때의 수신전력 -45dBm 대비 $+3.67\text{dB}$ 로 약 2.33배의 성능 향상을 확인하였으며, 아무것도 적용되지 않은 일반 실험 환경에서의 수신전력 -49.33dBm 과 비교했을 때는 $+8\text{dB}$ 로 약 6.31배에 해당하는 수신전력 향상을 보였다. 그림 7과 그림 8에서 진행된 실내-실내 환경 및 복도-실내 환경에서의 수신전력 측정 결과를 통해 1-bit 재구성 지능형 표면과 수신안테나와의 거리가 약 2.75m 이내에 위치하였을 때 송신안테나의 무지향성 문제로 측정된 수신전력이 감소하였다. 하지만 수신안테나와의 거리 d 가 3.7m 이상 비교적 멀리 위치하였을 때의 수신전력 향상은 아무것도 적용하지 않은 일반적인 실험 환경 대비 최소 $+5.13\text{dB}$ 로 약 3.26배 이상의 수신전력 향상을 확인하였다.

표 4. 수신전력 측정 결과
Table 4. Received power measurement results

	X	Copper plate	RIS
Area 2 ($\theta=30^\circ$)	-45.33dBm	-41.13dBm	-38.13dBm
Area 6 ($\theta=45^\circ$)	-49.33dBm	-45dBm	-41.33dBm

III. 결 론

본 논문에서는 5GHz 대역에서 동작하는 1-bit 재

구성 지능형 표면을 설계하였다. 설계한 단위 구조는 핀 다이오드 상태에 따른 표면 전류의 분포 변화를 이용하여 목표 주파수 대역에서 $180^\circ\pm 20^\circ$ 의 위상차를 갖도록 하였다. 구조 시뮬레이션 결과 5.03GHz~5.67GHz의 640MHz 동작 대역폭에서 2.18dB 미만의 반사계수와 $180^\circ\pm 20^\circ$ 의 위상차를 가짐을 확인하였다. 성능을 검증하기 위해 단위 구조를 16x10 배열하여 구조를 제작하였으며, 실내-실내 및 복도-실내 환경에서의 수신전력 측정을 진행하였다. 측정 결과 1-bit 재구성 지능형 표면과 수신안테나 사이의 거리 d 가 약 3.7m 이상 멀어졌을 때 수신전력 향상은 $+5.13\text{dB}$ 이상으로 약 3.26배 이상의 수신전력이 향상되었으며, 실내-실내 환경의 $\theta=15^\circ$ ($d=6.65\text{m}$) 위치에서의 수신전력은 $+9.7\text{dB}$ 로 약 9.33배의 가장 큰 수신전력 향상을 확인하였다.

References

[1] S. Dey and M. A. Shukoor, "Implementation of 3-Bit Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) for Sub-6 GHz Range Based on Modified Square loop FSS and Tunable Varactors", 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Bangalore, India, pp. 973-977, Dec. 2022. <https://doi.org/10.1109/MAPCON56011.2022.10047303>.

[2] S. Armour, A. Doufexi, B.-S. Lee, A. Nix, and D. Bull, "The impact of power limitations and adjacent residence interference on the performance of WLANs for home networking applications", in IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 47, No. 3, pp. 502-511, Aug. 2001. <https://doi.org/10.1109/30.964139>.

[3] J. Han, L. Li, G. Liu, Z. Wu, and Y. Shi, "A Wideband 1 bit 12×12 Reconfigurable Beam-Scanning Reflectarray: Design, Fabrication, and Measurement", in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 18, No. 6, pp. 1268-1272, Jun. 2019. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2914399>.

- [4] S. Tariq, S. I. Naqvi, N. Hussain, and Y. Amin, "A Metasurface-Based MIMO Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications", in *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 51805-51817, Mar. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069185>.
- [5] C. Liu, B. Natarajan, and H. Xia, "Small Cell Base Station Sleep Strategies for Energy Efficiency", in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 3, pp. 1652-1661, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2413382>.
- [6] G. Liyanage, K. Gimhana, S. Rathnayake, A. U. A. W. Gunawardena, and D. N. Uduwawala, "Beamforming in Intelligent Reflecting Surfaces: Simulation, Prototype Design and Field Measurements", 2023 IEEE 17th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, pp. 371-376, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICIIS58898.2023.10253550>.
- [7] K. Qu, et al., "An electromechanically reconfigurable intelligent surface for enhancing Sub-6G wireless communication signal", *Journal of Information and Intelligence*, Vol. 1, No. 3, pp. 207-216, Sep. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2023.06.009>.
- [8] P. Zheng, et al., "Field trial measurement and channel modeling for reconfigurable intelligent surface", *Digital Communications and Networks*, Vol. 9, No. 3, pp. 603-612, Jun. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.10.001>.
- [9] J. Rains, et al., "High-Resolution Programmable Scattering for Wireless Coverage Enhancement: An Indoor Field Trial Campaign", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 71, No. 1, pp. 518-530, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3216555>.
- [10] A. Araghi, et al., "Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) in the Sub-6 GHz Band: Design, Implementation, and Real-World Demonstration", in *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 2646-2655, Jan. 2022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140278>.
- [11] B. Rana, S. Cho, and I.-P. Hong, "Passive Type Polarization Independent Unit Cells for a Reconfigurable Intelligent Surfaces", *Journal of KIIT*, Vol. 21 No. 2, pp. 77-83, Feb. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.2.77>.
- [12] J. Rains, et al., "High-Resolution Programmable Scattering for Wireless Coverage Enhancement: An Indoor Field Trial Campaign", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 71, No. 1, pp. 518-530, Jan. 2023. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3216555>.
- [13] H. Yang, et al., "A 1-Bit 10 x 10 Reconfigurable Reflectarray Antenna: Design, Optimization, and Experiment", in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 64, No. 6, pp. 2246-2254, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2550178>.
- [14] X. Zhang, J. Sun, L. Ma, W. Zhang, and C.-X. Wang, "1-Bit Reconfigurable Intelligent Surface Element Design and Its Equivalent Circuit Model", 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Dalian, China, pp. 1-6, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1109/ICCC57788.2023.10233397>.
- [15] G. C. Trichopoulos, et al., "Design and Evaluation of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Real-World Environment", in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Vol. 3, pp. 462-474, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3158310>.
- [16] H. Yang, et al., "A Study of Phase Quantization Effects for Reconfigurable Reflectarray Antennas", in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 16, pp. 302-305, May 2016. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2574118>.
- [17] A. B. Constantine, "Antenna theory: analysis and design", John Wiley & sons, 2016.

저자소개

문 윤 석 (Yun-Seok Mun)



2024년 2월 : 국립공주대학교
스마트정보기술공학과(공학사)
2024년 3월 ~ 현재 :
국립공주대학교 정보통신공학과
석사과정
관심분야 : 재구성 지능형 표면,
안테나

어 승 환 (Seung-Hwan Euh)



2024년 2월 : 국립공주대학교
스마트정보기술공학과(공학사)
관심분야 : 재구성 지능형 표면,
안테나

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 : 국립공주대학교
스마트정보기술공학과 교수
관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조