

반사 증폭기를 이용한 후방산란통신 거리 향상 연구

Improved Backscattering Communication Range Using Reflection Amplifiers

최 정 현 · 유 한 열 · 김 상 길

Jeonghyeon Choi · Hanyeol Ryu · Sangkil Kim

요 약

차세대 통신 기술이 발달함에 따라 저전력 무선 통신에 대한 필요성이 높아지고 있다. 저전력 통신 기술 중 후방 산란 통신은 수 pJ/bit의 무선 통신 에너지 효율을 가지지만, 거리가 짧다는 단점이 있다. 본 연구에서는 반사 증폭기를 활용해 후방산란 통신 거리를 개선하기 위한 연구를 수행했다. 반사 증폭기, 하이브리드 커플러, 고격리 배열 안테나를 설계하여 능동 후방산란 태그를 설계했다. 소프트웨어 정의 라디오를 이용해 신호를 송수신하여 제안한 후방산란 태그를 사용하였을 때 동일 위치에서 후방산란된 신호의 크기가 1.5배 가량 증가했다. 또한 수동 태그 대비 후방산란 태그의 통신 거리가 40 cm 증가하는 것을 실험적으로 확인했다. 제안하는 증폭반사 태그 설계 기술은 초저전력 실내 근거리 사물인터넷 네트워크에 응용할 수 있다.

Abstract

As next-generation communication technologies advance, the demand for low-power wireless communication continues to grow. Among low-power communication technologies, backscatter communication offers a wireless communication energy efficiency of a few picojoules per bit but has the drawback of a limited range. This study explored methods for improving the communication range of backscatter systems by utilizing a reflective amplifier. A backscatter tag was designed by integrating a reflective amplifier, a hybrid coupler, and a high-isolation antenna array. Using software-defined radio (SDR) to transmit and receive signals, the magnitude of the backscattered signal increased approximately 1.5 times when employing the proposed backscatter tag at the same location. Additionally, the experimental results demonstrated that the communication range of the backscatter tag was extended by 40 cm compared to that of a passive tag. The proposed amplified reflection tag design technology can be applied to ultralow-power indoor short-range Internet of Things (IoT) networks.

Key words: Low-Power Communication, Active Backscatter Communication, Array Antenna, Software Define Radio, Internet of Things

I. 서 론

차세대 통신 기술 중에서 사물인터넷(IoTs, internet of things) 네트워크 구성을 위해서는 저전력 무선 통신 기술

이 필요하다^[1]. 특히나, 다양한 저전력 통신 기술 중에서 후방 산란 통신(backscattering communication)은 수 pJ/bit 수준의 무선 통신 에너지 효율을 가지고 있어서 많은 주목을 받고 있다^[2]. 후방 산란 통신은 RFID(radio frequency

「이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00237172).」

부산대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pusan National University)

· Manuscript received January 9, 2025 ; Revised January 19, 2025 ; Accepted February 25, 2025. (ID No. 20250109-002)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

identification), 저전력 센서, 목표 추적 등 다양한 분야에서 활용하고 있다. 송신부에서 송출한 무선 전력을 활용하여 통신하는 방식이기 때문에 전파 감쇄에 취약하다. 또한, 수신부에서는 별도의 고주파 송신기 없이 부하 변조 기법을 사용하여 수신된 고주파 신호를 변조하여 재방사하기 때문에 매우 낮은 무선 통신 전력을 사용한다. 이러한 특징 때문에 후방산란 통신은 다른 무선 통신 기술에 비해서 상대적으로 짧은 통신 거리를 가진다^[3].

본 논문에서는 후방산란 통신 기술의 통신 거리를 개선하기 위해서, 반사 증폭기(reflection amplifier)를 활용하여 능동 후방산란(active backscatter) 태그 구조를 이용해 신호-잡음 비율(SNR, signal-to-noise ratio)을 개선했다. 제안하는 능동 후방산란 태그는 수신된 무선 신호를 증폭하여 반사하기 때문에 통신 거리의 개선을 기대할 수 있다. 증폭 반사기는 매우 낮은 전력으로 수신 신호를 증폭하여 반사할 수 있으며, 증폭 반사기에 인가되는 입력 전압이 낮을수록 높은 전력 증폭 이득을 가지기 때문에 후방산란 통신에 적합하다. 또한, 격리도(isolation)가 높은 배열 안테나를 사용하여 SDR의 송출 전력을 높여도 수신부로 전달되는 잡음을 상대적으로 낮게 유지할 수 있어서 통신 거리를 개선할 수 있었다.

II. 능동 후방산란 태그 설계 및 측정

본 연구에서는 와이파이, 블루투스 등으로 널리 활용되는 2.4 GHz ISM(industry-science-medical) 주파수 대역에서 후방산란 송수신 태그 시스템을 설계했다. 제안하는 증폭 반사 능동 태그는 그림 1과 같이 반사 증폭기 회로, 90° 하이브리드 커플러, 2×1 배열 안테나로 구성된다. 송

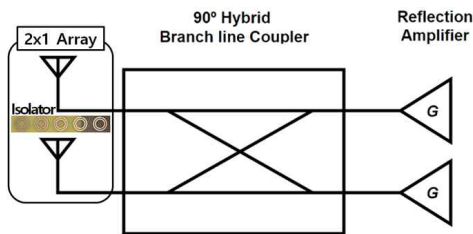


그림 1. 후방산란 증폭 반사 태그 블록도
Fig. 1. Block diagram of backscatter tag.

신부 및 신호처리는 소프트웨어 정의 라디오(SDR, software defined radio)를 이용하여 구성했다.

2-1 능동 반사 증폭기 태그 설계

그림 2와 같이 반사 증폭기는 포트가 1개인 능동 회로이기 때문에, 반사 증폭을 위해서는 입력 반사계수는 1 이상의 값을 가져야 한다($\Gamma_{in} > 1$).

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0^*}{Z_{in} + Z_0^*} \quad (1)$$

식 (1)에 따라 반사계수가 1 이상이 되기 위해서는 $Re\{Z_{in}\}$ 이 발진을 하지 않는 범위 내에서 음의 값을 가져야 한다. 본 연구에서는 GaAs HJ-FET 트랜지스터를 사용해 소스와 드레인에 Open stub를 연결하여 공통 소스 증폭기(common source amplifier)를 설계했다^[4]. CAD tool ADS(advanced design system)를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였으며 드레인에 연결된 스텐브(stub)는 길이에 따라 주파수 대역이 달라지며, 소스에 연결된 스텐브는 길이가 짧아질수록 2.4 GHz에서 이득이 증가한다. 또한 소스에 연결된 커패시터는 이득이 불안정하게 변하는 것을 방지한다. 소자 배치를 위해 소스 스텐브의 길이를 늘려 반사 증폭 이득이 감소했지만, 게이트와 소스 사이에 커패시터를 연결해 추가적인 이득을 얻어 낼 수 있었다. 이처럼 소자의 크기와 증폭 반사를 위한 이득을 적절하게

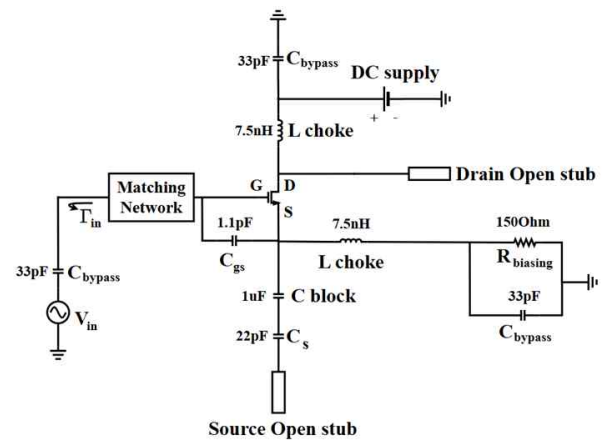


그림 2. 제안하는 반사 증폭기 회로도
Fig. 2. Proposed schematic of reflection amplifier.

표 1. 반사 증폭기 설계 파라미터(단위: mm)

Table. 1. Design parameter of reflection amplifier (unit: mm).

W1	0.78	L1	5.4	L5	2.1
W2	0.5	L2	5.07	L6	1.2
W3	0.58	L3	4.6	L7	2.5
L4	10.43	L8	1.3		

고려하여 설계를 진행하였다. 설계한 반사증폭기는 각 microstrip line 주변에 Via를 배치해 CPWG(coplanar waveguide with ground) 형태로 설계하여 유전체의 두께와 회로의 크기를 줄였다. 그림 3과 같이 매칭 네트워크는 short stub 구조를 활용하여 구현했고, 상세한 설계 변수는 표1에 정리되어 있다. 증폭 반사기 설계에 사용한 기판은 그림 4와 같이 두께 0.6 mm의 FR-4($\epsilon_r = 4.4$, $\tan \delta = 0.02$)이며, 트랜지스터는 CEL사의 NE3509M04를 사용하였다. 커패시터는 Murata사의 GRM 소자를 사용했으며 인덕터는 Coilcraft사의 04202HP 소자를 사용하였다.

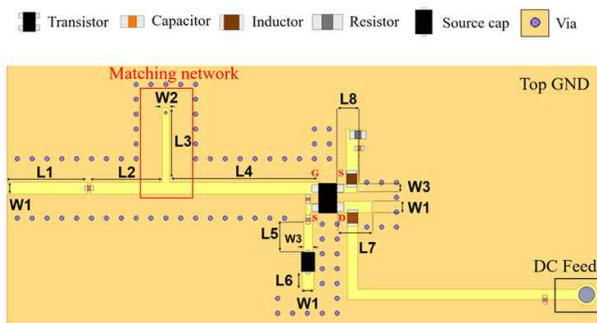


그림 3. 반사 증폭기 배치도

Fig. 3. Reflection amplifier layout.

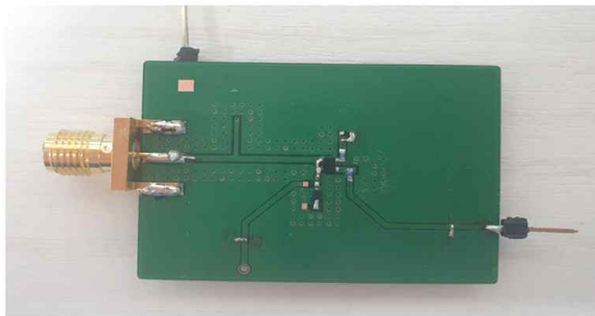


그림 4. 제작된 반사 증폭기

Fig. 4. Fabricated reflection amplifier.

제작된 전력 증폭기의 측정 결과는 그림 5에 나타나 있다. Rohde & Schwarz ZNLE6 Vector Network Analyzer를 사용하여 증폭기의 성능을 측정했으며, 설계한 증폭기는 입력 전력(P_{in}) -40 dBm 기준 2.4 GHz에서 1.5 V의 전압을 인가했을 때 6.6 dB의 이득을 가진다. 이때 소비 전력은 15 mW로 나타났다. 측정치와 설계치의 차이는 주로 부정확한 트랜지스터 모델에 기인했다. 본 연구에서는 제조사에서 제공한 기본적인 소자 모델을 사용했으며, 패키지 정보의 부재로 인해서 오차가 발생했다. 90° 하이브리드 커플러는 2.4 GHz 대역에서 $|S_{21}|$, $|S_{31}| > -4$ dB, $|S_{11}|$, $|S_{41}| < -25$ dB를 만족하도록 설계를 진행한다. 커플러는 가장 기본적인 90도 하이브리드 커플러의 형태로 설계하여 크기를 줄였으며, 측정 결과 2.4 GHz 주파수 대역에서 S_{21} 과 S_{31} 이 각각 -3.5 dB, -4 dB, $|S_{11}|$ 과 $|S_{41}|$ 이 -25 dB,

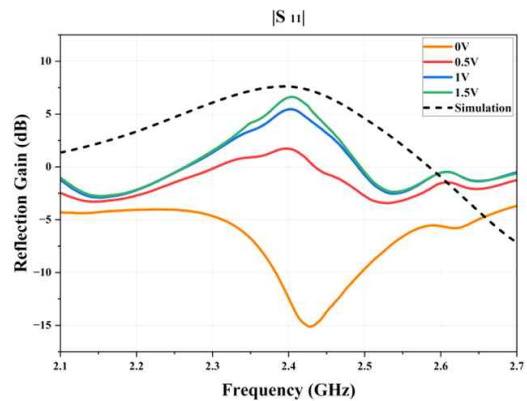
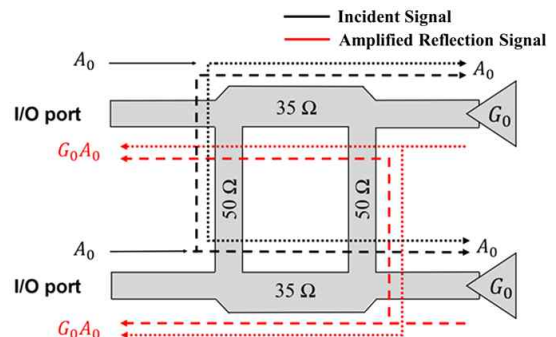
그림 5. 반사 증폭기 측정: $|S_{11}|$ Fig. 5. Measured reflection amplifier: $|S_{11}|$.

그림 6. 커플러와 반사 증폭기 블록도

Fig. 6. Block diagram of coupler and reflection amplifier.

-30 dB로 측정되어 기존에 고려하였던 설계를 만족하여 설계되었다. 그림 6과 같이 90° 하이브리드 커플러의 특성에 의해 입출력 포트(I/O port)에서 각각 G_0 의 전력이득을 얻을 수 있다^[5].

2-2 2×1 야기-우다 안테나 배열 설계

제안하는 능동 태그 설계는 반사 증폭기와 통합된 커플러와 연결하기 위해서 2-포트 2×1 야기-우다 안테나 배열 구조를 설계했다. 평면 야기-우다 안테나는 제작이 용이하고 얇은 구조와 가벼운 무게를 가지면서 상대적으로 높은 안테나 이득을 가지는 장점이 있어서 제안하는 능동 태그에 적절하다^[6]. 하나의 기판에 제작된 2×1 배열 안테나는 두 개의 안테나가 하나의 기판에 제작되어 있어서 상호 전기적 결합(electrical coupling)이 발생하여 신호 간섭이 일어나기 쉽다. 이는 반사 증폭기의 성능이 하락하는 원인이 되기 때문에 안테나 사이에 발생하는 전기적 결합을 억제하는 것이 매우 중요하다. 안테나 사이의 간격을 넓히는 방법도 있으나, 능동 태그의 소형화를 위해서 그림 7과 같이 안테나 사이에 SRR(split-ring resonator)를 배치해서 안테나 사이의 격리도를 개선했다. 제안하는 안테나 배열은 두께 2 mm FR-4 기판에 제작됐다. 그림 8은 상세한 안테나와 공진기 구조를 보여주고 있으며, 설계 변수는 표 2에 정리되어 있다. 단일 안테나의 성

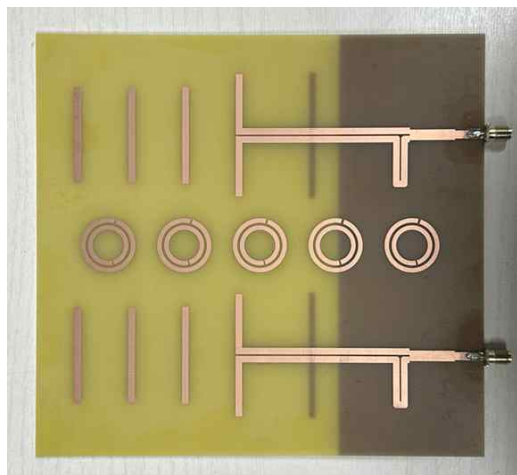
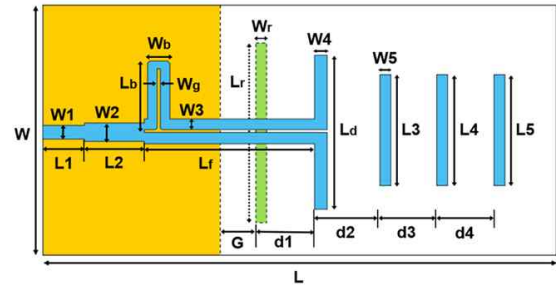
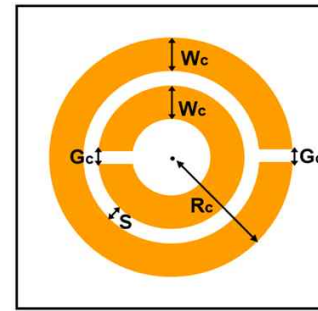


그림 7. 제안하는 2×1 야기-우다 안테나 배열
Fig. 7. Proposed 2×1 Yagi-Uda antenna array.



(a) 구조
(a) Structure



(b) SRR
(b) SRR

그림 8. 제안된 야기-우다 안테나
Fig. 8. Proposed Yagi-Uda antenna.

표 2. 안테나 및 SRR 설계 파라미터(단위: mm)

Table. 2. Design parameters of antenna & SRR (unit: mm).

W	76	Wb	5.5	L3	37	Lr	48
W1	3	Wg	0.5	L4	36	d1	28
W2	4	Wr	2.5	L5	36	d2	20.5
W3	2.5	L	170	Lb	17	d3	20.5
W4	2.5	L1	11	Ld	46.5	d4	20.5
W5	2.5	L2	17	Lf	63.75	G	8.75
Gc	1	S	0.5	Rc	11.5	Wc	1.5

능(방사패턴, 이득 등)을 분석한 다음, 배열 안테나 이론에 맞춰서 반 파장 간격으로 두 개의 안테나를 배치했다.

안테나 상호 결합을 억제하기 위한 공진기는 그림 8(b)와 같이 SRR의 구조이며, 2.4 GHz에서 공진하도록 설계했다. 그림 9는 설계한 공진기의 주파수 응답을 보여주고 있다. 주파수 응답을 바탕으로 동작 주파수(2.39~2.41 GHz)에서 최적의 반사 계수($|S_{11}|$)와 결합 계수($|S_{21}|$)를 갖

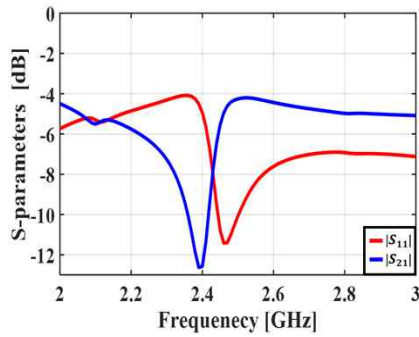


그림 9. 제안된 SRR의 주파수 응답: $|S_{11}|$ & $|S_{21}|$
Fig. 9. Frequency response of the designed SRR: $|S_{11}|$ & $|S_{21}|$.

도록 설계하였다. 그림 11은 제안한 공진기로 이루어진 표면에 평면파가 입사했을 때의 S -파라미터($|S_{11}|$ & $|S_{21}|$)를 보여주고 있다. 공진기 배열에 의해서 동작 대역폭인 2.39~2.41 GHz에서 평면파의 투과와 반사를 모두 억제하는 것을 볼 수 있다. 공진기를 능동 태그의 송신/수신 안테나 사이 가운데 배치하여 안테나 격리도를 개선했다.

2-3 안테나 제작 및 측정 결과

본 논문에서 제작된 2×1 야기-우다 안테나 배열은 그림 10과 같이 무반향실에서 주파수 응답, 안테나 이득, 그리고 방사패턴을 측정하였다. 측정한 안테나의 주파수 응답은 그림 11에 나타나 있으며, $|S_{11}|$ 는 동작 주파수 대역에서 -10 dB 이하를 만족하였고, $|S_{21}|$ 는 -30 dB 이하로 측정되었다. 특히, 주요 동작 주파수인 2.4 GHz에서 결합

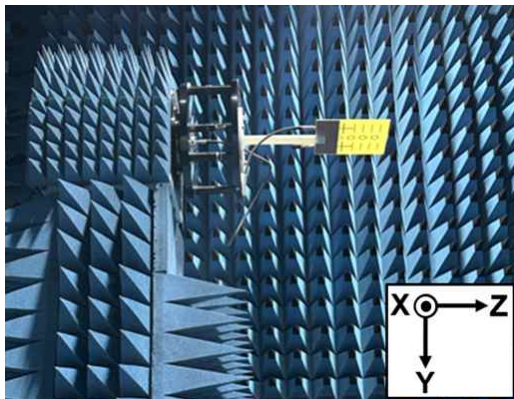


그림 10. 안테나 측정 환경
Fig. 10. Antenna measurement environment.

계수($|S_{21}|$)가 -45.06 dB, 공진기가 없을 때의 $|S_{21}|$ 는 -25.49 dB로 측정되어 공진기를 통한 높은 격리도를 성공적으로 달성했다. 측정된 방사 패턴은 그림 12와 같다. 측정된 최대 이득은 약 7 dBi로, 모의 실험의 결과(7.1 dBi)와 매우 유사함을 확인할 수 있다.

그림 12(a)에서 측정된 방사패턴은 다소 비대칭을 보이

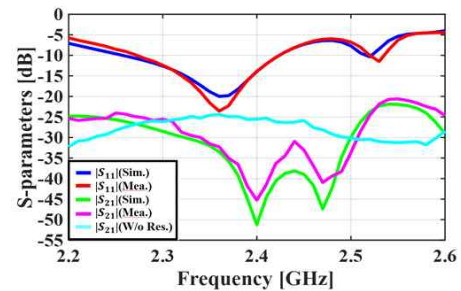
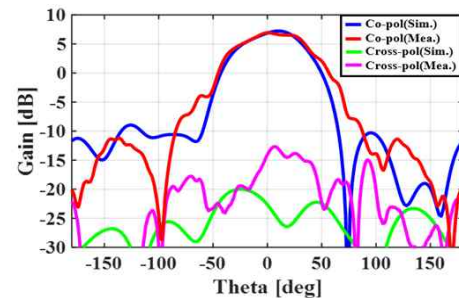
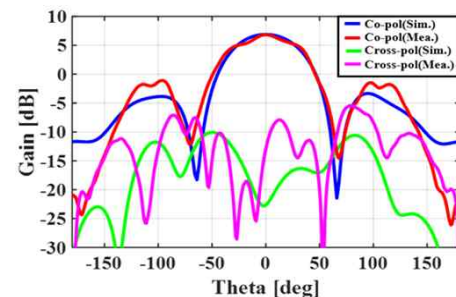


그림 11. 안테나 S -파라미터 측정: $|S_{11}|$ & $|S_{21}|$
Fig. 11. Measured antenna's S -parameters: $|S_{11}|$ & $|S_{21}|$.

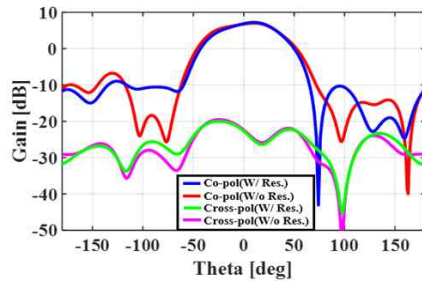


(a) $\phi = 0^\circ$ (xz-평면)
(a) $\phi = 0^\circ$ (xz-plane)

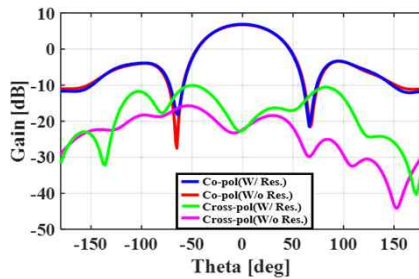


(b) $\phi = 90^\circ$ (yz-평면)
(b) $\phi = 90^\circ$ (yz-plane)

그림 12. 측정된 방사패턴
Fig. 12. Measured antenna's radiation patterns.



(a) $\phi = 0^\circ$ (xz-평면)
(a) $\phi = 0^\circ$ (xz-plane)



(b) $\phi = 90^\circ$ (yz-평면)
(b) $\phi = 90^\circ$ (yz-plane)

그림 13. 공진기 유무에 따른 안테나의 방사패턴 모의실험 결과

Fig. 13. Simulation results of antenna radiation pattern according to presence or absence of resonator.

고 있다. 대칭 구조인 안테나에서 이러한 결과가 나타나는 이유로는 하나의 포트를 50 옴으로 매칭(termination)한 후 측정하는 과정에서 평면파가 반대편 안테나를 거쳐 방사되기 때문이다. 안테나 사이에 공진기가 존재하여도 공진을 통한 $|S_{21}|$ 개선에 한계가 존재하기 때문에 구조가 대칭인 안테나에서 방사 패턴이 비대칭 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 13(a) 및 그림 13(b)는 공진기 유무에 따른 안테나 방사패턴 모의실험 결과이며, 이를 통해 공진기 구조가 안테나 이득과 방사패턴에 영향을 끼치지 않으면서 안테나의 전기적 상호 간섭을 억제함을 확인할 수 있다.

III. 통신 시스템 구현 및 통신 거리 측정

설계된 능동 태그는 GNU radio와 NI사의 USRP N200 SDR을 이용하여 성능을 검증했다. 온-오프 변조(OOK,

on-off keying) 방식을 통해 2.4 GHz의 반송파(carrier signal)에 “000110111”의 디지털 데이터를 담아서 전송하고, 능동 태그와 SDR 사이의 거리에 따라 SDR에 수신되는 신호의 크기를 측정하였다. 이때 신호의 전송 속도는 20 kbps였다. 사용된 SDR의 송출 전력은 15 dBm(EIRP : 22 dBm)이다. 무선 신호 송수신을 위해서 구성된 실험 환경은 그림 14에 나타나있으며 고격리 안테나를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때, 반사 증폭이 뚜렷하게 확인되는 최대 거리에서 거리를 조금씩 좁혀가며 신호가 포화되지 않는 지점에서 신호의 증폭을 확인했다.

송신단에서 송신하는 신호의 크기를 기준으로 정규화(normalize) 하여 수신 신호의 크기를 비교했다. SDR과 태그 사이의 통신 거리 (d)가 70 cm일 때, 증폭기가 없는 수동 태그를 사용하면 수신된 정규화된 후방산란 신호의 크기는 0.36이었으나, 능동 태그를 사용하면 0.55로 약 1.53배 증가했다(그림 15). 능동 태그의 통신 거리가 50

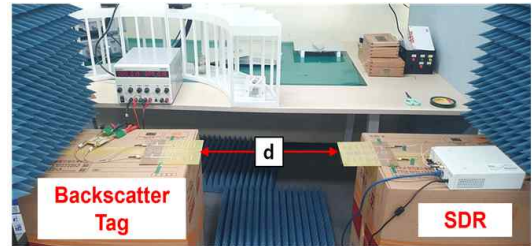


그림 14. 후방 산란 회로 실험 환경

Fig. 14. Backscatter communication experiment setup.

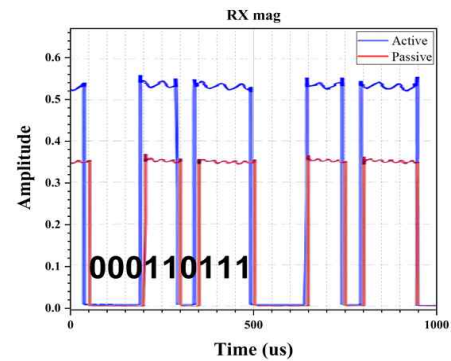


그림 15. 능동 태그와 수동 태그의 정규화된 수신 신호 크기 비교 ($d=70$ cm)

Fig. 15. Comparison of the normalized received Rx signal strength of active and passive tags ($d=70$ cm).

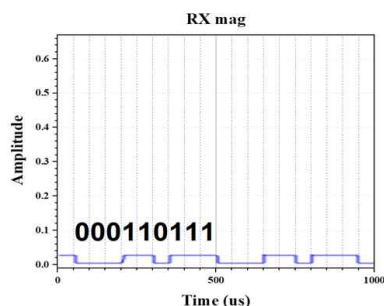


그림 16. 능동 태그를 사용했을 때의 정규화된 수신 신호 크기 ($d=2.5$ m)

Fig. 16. Normalized received Rx signal strength with an active tag ($d=2.5$ m).

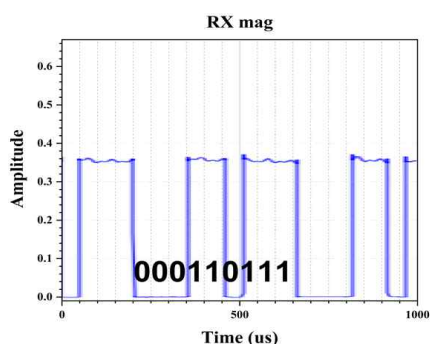


그림 17. 능동 태그를 사용했을 때의 정규화된 수신 신호 크기 ($d=110$ cm)

Fig. 17. Normalized received Rx signal strength with an active tag ($d=110$ cm).

cm 이하인 경우에는 SDR에 수신된 신호의 크기가 포화된 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 거리가 2.5 m가 되는 지점에서 정규화된 수신 신호의 크기가 0.04로 측정되는 것을 확인할 수 있었다(그림 16). 해당 거리를 넘어가게 되면, 신호의 세기가 매우 작아져 신호 특성이 명확하게 구분되지 않았다. 그림 17은 능동 태그를 사용했을 때 통신 거리를 늘려가며 정규화된 후방산란 신호의 크기가 0.36이 되는 지점에서의 파형을 보여준다. 능동 태그를 사용한 결과 수동 태그를 사용했을 때보다 거리가 40 cm 이상 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 고역리 안테나를 사용했을 때는 사용하지 않았을 때와 비교하여 통신 거리가 약 1.75배 증가하는 것을 측정을 통해서 확인할 수 있었다(통신거리 30 cm 증가).

표 3. 후방산란 시스템 간의 성능 비교

Table. 3. Performance summary and comparison between backscatter systems.

Ref.	Comm. distance (m)	Data rate (kbps)	Frequency
This work	2.5	20	2.4 GHz
[3]	0.76	1	539 MHz
[7]	5	2.5	98.5 MHz
[8]	3	9.4	915 MHz
[9]	2.1	1	2.4 GHz

IV. 결 론

본 연구에서는 후방산란 통신의 통신 거리를 향상시키기 위해서 능동 태그를 사용했으며, 반사 증폭기를 사용하여 후방산란 통신의 통신 거리를 개선할 수 있음을 실험적으로 보여주었다. 거리가 가까워짐에 따라 후방산란 신호의 증폭률이 커졌고, 미약한 신호의 크기를 약 1.5배 가량 증가시키는 실험적으로 확인할 수 있었다. 능동 태그를 사용했을 때 수동 태그와 비교하여 통신 거리가 40 cm 늘어나는 것을 볼 수 있었다. 고역리 안테나를 사용하지 않았을 때는 SDR의 송출 전력이 낮아 통신 거리가 30 cm 만큼 감소하였다. 수신된 신호를 재방사하는 후방산란 통신의 특성상 SDR의 송출 전력이 감소하면 통신 거리가 짧아짐을 확인하였으며, 따라서 고역리 안테나가 통신 거리 증가에 도움이 될 수 있음을 보여준다. 반사 증폭기의 이득을 더 키우고 안테나의 지향성을 높이면 통신 거리가 더욱 늘어나 더 먼 거리에서도 통신이 가능할 것으로 예상된다. 표 3에서 볼 수 있듯이 기존의 디지털 신호를 송수신하는 후방산란 통신 연구와 비교하였을 때 2.4 GHz의 높은 주파수 대역에서 빠른 전송 속도를 가지며 순수한 통신 거리를 보여주었다. 본 연구는 사물인터넷 네트워크와 같은 실내 근거리 초저전력 통신에서 반사증폭 능동태그를 활용한다면, 통신 성능이 획기적으로 향상되어 더욱 정밀한 통신이 가능함을 실험적으로 보여주었다.

References

- [1] Y. G. Hong, "IoT standardization trends," *The Proceed-*

- ings of the Korea Electromagnetic Engineering Society, vol. 33, no. 3, pp. 3-11, May 2022.
- [2] N. van Huynh, D. T. Hoang, X. Lu, D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim, "Ambient backscatter communications: A contemporary survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2889-2922, Oct. 2018.
- [3] V. Liu, A. Parks, V. talla, S. Gollakota, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air," *Proceedings of the ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 43, no. 4, pp. 39-50, Aug. 2013.
- [4] J. Rao, Y. Zhang, S. Tang, Z. Li, C. Y. Chiu, and R. Murch, "An active reconfigurable intelligent surface utilizing phase-reconfigurable reflection mplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 7, pp. 3189-3202, Jul. 2023.
- [5] F. Farzami, S. Khaledian, B. Smida, and D. Erricolo, "Reconfigurable dual-band bidirectional reflection amplifier with applications in van atta array," *EEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 11, pp. 4198-4207, Nov. 2017.
- [6] P. R. Grajek, B. Schoenlinner, and G. M. Rebeiz, "A24-GHz high-gain Yagi-Uda antenna array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 5, pp. 1257-1261, May 2004.
- [7] S. N. Daskalakis, J. Kimionis, A. Collado, G. Goussetis, M. M. Tentzeris, and A. Georgiadis, "Ambient backscatterers using FM broadcasting for low cost and low power wireless applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 12, pp. 5251-5262, Dec. 2017.
- [8] A. Dadkhah, J. Rosenthal, and M. S. Reynolds, "ZeroScatter: Zero-added-component backscatter communication using existing digital I/O pins," in *2019 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks(WiSNet)*, Orlando, FL, Jan. 2019, pp. 1-3
- [9] B. Kellogg, A. Parks, S. Gollakota, J. R. Smith, and D. Wetherall, "Wi-Fi backscatter: Internet connectivity for RF-powered devices," *SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 4, pp. 607-618, Oct. 2014.

최 정 현 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0009-0009-4755-4821>



2019년 3월~현재: 부산대학교 전기전자
공학부 전자공학전공 학부생
[주 관심분야] RF, 안테나 이론 및 기술,
무선 통신 및 시스템

유 한 열 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0009-0001-5511-4406>



2021년 3월~현재: 부산대학교 전기전자
공학부 전자공학전공 학부생
[주 관심분야] RF 시스템, 안테나 이론 및
기술, 무선통신 시스템

김 상 길 [부산대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학
사)
2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학
(공학석사)
2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과
(공학박사)
2015년 1월~2018년2월: Qualcomm Inc.
USA

2018년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 부교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용