

다중사용자 환경에서 마이크로파전력전송 효율향상을 위한 RDA기반의 EBGs 안테나 설계

구태범*, 김명기*, 유흥균^o

RDA-Based EBGs Antenna Design for improving Microwave Power Transmission efficiency in Multiuser Environment

Taebum Gu*, Myunggi Kim*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

마이크로파전력전송은 무선전력전송에 사용하는 다른 방법과 비교했을 때 장거리로 전력을 전송할 수 있어 다양하게 활용될 수 있지만 거리가 멀수록 고주파가 될수록 경로감쇄가 심해지기 때문에 전송효율이 나빠지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 다중사용자 환경에서 마이크로파전력전송 효율향상을 위한 Electromagnetic Band Gap structure(EBGs)를 사용한 안테나를 설계하고 성능을 평가하며 중간주파수를 사용한 헤테로다인 위상공액회로를 설계하여 RetroDirective Array(RDA) 특성을 확인한다. 시뮬레이션 결과 본 논문에서 설계한 EBGs가 있는 안테나가 EBGs가 없는 안테나보다 약 5 ~ 12%의 성능향상과 3 dB 빔 폭이 좁아지며 위상공액회로를 통과하면 신호가 역지향성을 가진다.

Key Words : communication, signal processing, Neutral systems, Communication Sciences, Network

ABSTRACT

Microwave Power Transmission(MPT) can be used variously because it can transmit electric power over long distance compared to other methods used for Wireless Power Transmission(WPT). However, since the path becomes long and the frequency becomes high, the transmission efficiency becomes worse. In this paper, we design an antenna using Electromagnetic Band Gap structure(EBGs) to improve MPT efficiency in multiuser, evaluate the performance. A heterodyne phase conjugate circuit using Intermediate Frequency(IF) is designed to verify RetroDirective Array(RDA) characteristics. Simulation results show that the antenna with EBGs designed in this paper has about 5 ~ 12% performance improvement and 3 dB angular width narrower than the antenna without EBGs, and the signal has retrodirective if it passes through the phase conjugate circuit.

※ 본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구 결과임.

※ 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).

♦ First Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, xoqjam5@naver.com, 학생회원

° Corresponding Author : Department of electronic engineering, Chungbuk National University, ecomm@cnu.ac.kr, 정회원

* Department of electronic engineering, Chungbuk National University, aneovh1212@naver.com, 학생회원

논문번호 : 201906-110-A-RN, Received June 19, 2019; Revised July 4, 2019; Accepted July 4, 2019

I. 서 론

무선전력전송은 최근에도 활발하게 연구되고 있는 분야이며 그중에서도 마이크로파를 이용한 무선전력전송 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻³⁾. 마이크로파전력전송은 WPT에 사용하는 다른 방법과 비교하여 원거리 전력 전송을 할 수 있어 다양한 애플리케이션에도 활용될 수 있지만 전송효율이 많이 떨어지는 특징이 있으며 자유공간에서의 주파수 및 진파 방출은 규제되므로 인체에 미치는 영향을 고려해야한다⁴⁾.

$$FSPL(dB) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147.55 \quad (1)$$

식 (1)은 자유공간 경로손실 방정식이다. 이 식에 따르면 자유공간 경로손실은 거리(d)가 멀어질수록 주파수(f)가 고주파로 갈수록 경로손실이 증가하게 된다⁵⁾. 즉, MPT는 원거리 전력전송에 사용될 수 있지만 거리가 멀어질수록 전력전송 효율이 떨어지는 문제가 발생하게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해서는 송신기에서 전력을 집중시켜 수신기에 전송해야 할 필요가 있다.

송신기에서 전력을 집중시켜 보내는 방법으로는 높은 이득을 가지는 안테나를 사용하는 방법과 빔포밍을 하는 방법 등 다양한 방법들이 존재한다. 본 논문에서는 EBGs를 사용하여 안테나의 이득을 높이며 위상공액회로를 이용하여 RDA 기반의 빔포밍을 활용하여 전력전송 효율을 높이는 방법을 제안한다.

일반적으로 빔포밍을 하기 위해서는 Multiple-Input and Multiple-Output(MIMO) 시스템으로 전력송신기를 구성하는데 기존 MIMO 시스템에서는 수 와트의 전력을 소모하므로 전력전송 효율을 높이기 위해서는 복잡한 빔포밍 연산을 하는 것은 적합하지 않다⁶⁾. 반면 RDA는 사전정보 없이 신호를 수신한 방향으로 송신을 하는 특성이 있으며⁷⁾, 디지털 계산이 필요 없기 때문에 구현이 간단하며 더 빠르게 빔포밍을 할 수 있다⁸⁾. 따라서 무선전력전송 효율을 높이기 위해서는 RDA 기반의 빔포밍을 활용하는 송신기를 구성하는 것이 디지털 연산을 요구하지 않으므로 무선전력전송에 있어서 훨씬 유리하다.

본 논문에서는 2.45 GHz에서 동작하는 마이크로스트립 패치 안테나를 설계하였다. 마이크로스트립 패치 안테나는 자유 공간으로 방사되는 대신 지상 평면을 따라 전자기파를 유도하는 표면파가 발생하여 안테나의 효율과 이득을 감소시키는 특징이 있다⁹⁾. 따라서 표면파를 억제시키거나 제거하여 안테나의 효율과 이

득을 높여야 한다. EBGs는 안테나를 설계할 때 표면파를 억제할 수 있으며 이러한 특성으로 소자들 간의 상호 결합을 줄이는 역할을 하며 안테나 방사 패턴과 이득을 향상시킨다¹⁰⁻¹³⁾. 따라서 EBGs를 적용한 안테나를 사용하는 것이 안테나의 이득을 높일 수 있으며 이는 무선전력전송 효율을 높일 수 있다.

본 논문에서는 EBGs를 적용한 안테나를 설계하여 EBGs가 없는 안테나와 성능을 비교하여 분석한다. 또한, 위상공액회로를 설계하여 RDA 특성을 확인한다.

II. 시스템 모델

2.1 다중 사용자에서의 RDA 기반의 MPT 시스템

RDA는 사전정보 없이 디지털 계산 없이 신호를 수신한 방향으로 위상공액하여 신호를 송신하는 특성이 있다. 즉, 간단하게 빔포밍을 구현할 수 있다. 따라서 RDA 기반 송신기를 구성하면 각각의 사용자가 보내는 신호를 수신하여 위상공액 후 수신한 방향으로 전력을 집중시켜 송신할 수 있다.

그림 1은 다중 사용자에서의 RDA 기반 MPT의 개략도이다. 각각의 유저들이 보낸 Pilot을 안테나에서 수신하면 위상 공액 회로를 거쳐 Pilot의 방향으로 전력을 전송하는 시스템이다.

그림 2는 위상공액회로로서 헤테로다인 형태를 기반으로 구성한다¹⁴⁾. 중간주파수를 거친 후 다시 원래의 주파수로 변환될 때 위상공액이 발생한다.

$$LPF(\cos(w_{RF}t + \varphi) \times \cos(w_{RF} - \varphi t)) = \cos(w_{IF}t + \varphi) \quad (2)$$

$$LPF(\cos(w_{IF}t + \varphi) \times \cos(w_{RF} + \varphi t)) = \cos(w_{RF}t - \varphi) \quad (3)$$

식 (2)는 첫 번째 lowpass filter(LPF)를 거친 결과

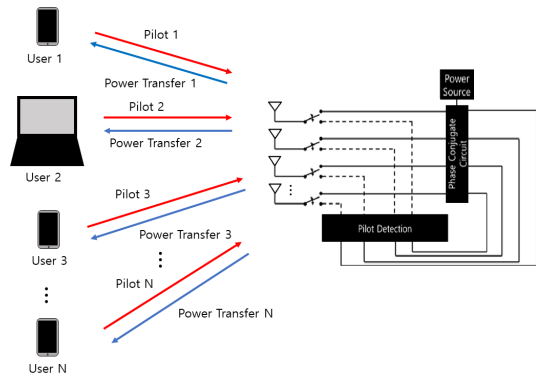


그림 1. 다중 사용자에서의 RDA 기반 MPT의 개략도
Fig. 1. Schematic of the RDA-based MPT in multiuser

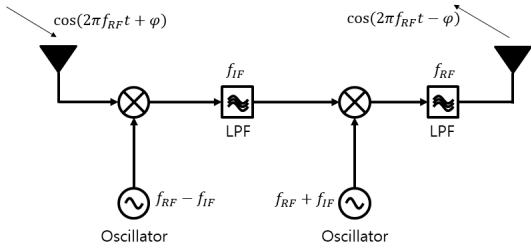


그림 2. 중간주파수를 사용한 헤테로다인 위상공액회로
Fig. 2. Heterodyne phase conjugate circuit using IF

이고 식 (3)은 두 번째 LPF를 거친 결과이다. 위와 같은 원리로 위상공액회로를 구현할 수 있으며 RDA 특성이 나타난다.

2.2 EBGs를 포함한 패치 안테나 설계

마이크로스트립 패치 안테나는 자유 공간으로 방사되는 대신 지상 평면을 따라 전자기파를 유도하는 표면파가 발생하여 안테나의 효율과 이득을 감소시킨다^[10]. EBGs 구조는 안테나를 설계할 때 표면파를 억제할 수 있으며 이러한 특성으로 소자들 간의 상호 결합을 줄이는 역할을 하며 안테나 방사 패턴과 이득을 향상시킨다^[11-14].

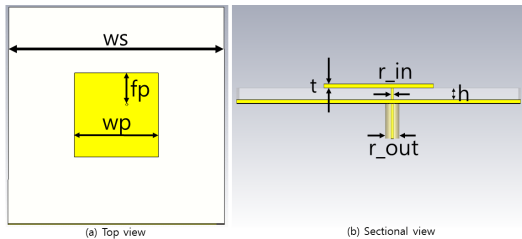


그림 3. EBGs가 없는 패치 안테나 구조
Fig. 3. The structure of patch antenna without EBGs

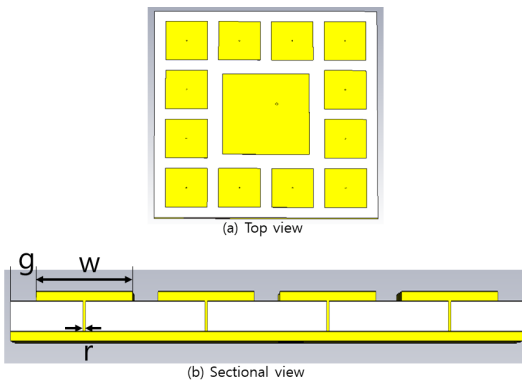


그림 4. EBGs가 있는 패치 안테나 구조
Fig. 4. The structure of patch antenna with EBGs

그림 3, 4는 EBGs의 유무에 따른 안테나 구조를 나타낸 것으로 안테나의 동작 주파수의 중심 주파수는 2.45 GHz에 맞추어 설계하였으며, 급전 방식은 동축선 급전 방식을 사용하였다. 또한 패치, 그라운드, EBG는 Copper를 사용하여 설계했으며 안테나의 기판은 Rogers RO4003(lossy)를 사용했으며 유전율(ϵ_r)은 3.55이다. EBG는 the mushroom-like EBGs로 설계되었으며 4x4 배열로 설계한 뒤 패치와 겹치는 내부의 EBG 4개를 삭제하여 설계하였다.

2.3 EBGs 배열 안테나 구조

설계한 EBGs 안테나를 1X4로 구성한 것으로 그림 5의 구조를 가지며 패치간의 거리는 0.654λ만큼 떨어져 있으며 패치사이의 EBG는 2g만큼 거리를 두고 설계하였다.

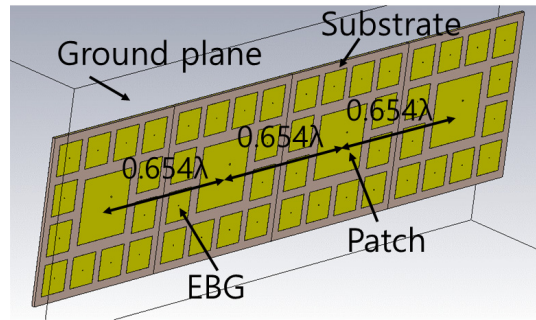


그림 5. EBGs가 있는 1X4 배열 안테나 구조
Fig. 5. Geometry of 1X4 array antenna with EBGs

III. 시뮬레이션 및 결과

3.1 EBGs 안테나 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 CST 2012 툴을 이용하여 안테나 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 하는데 필요한 파라미터는 표 1에 기술하였다.

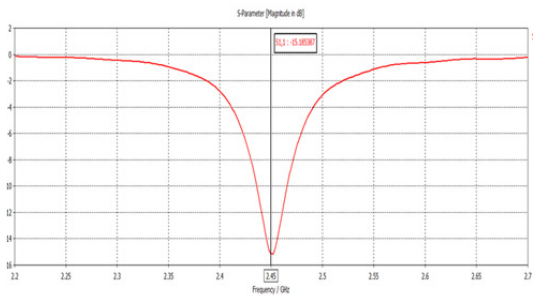
표 1. 설계된 안테나의 파라미터
Table 1. Parameters of designed antennas

Parameters	value
ws	80 mm
wp	31.15 mm
fp	11.667 mm
t	0.035 mm
h	1.5 mm
r_in	0.4 mm

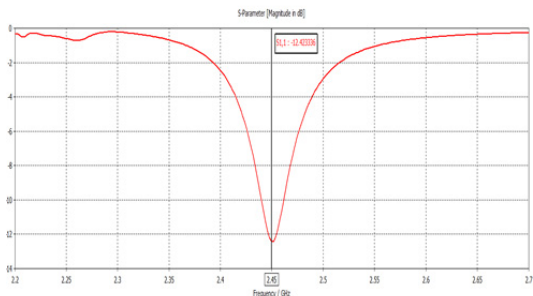
Parameters	value
r_out	2 mm
g	4 mm
w	15 mm
r	0.2 mm
Target Frequency	2.45 GHz

그림 6, 7은 그림 3, 4의 구조를 가진 단일안테나의 반사손실과 방사패턴을 나타낸 것으로 EBGs 유무에 따른 안테나의 반사손실과 안테나 이득을 비교하였다. EBGs 유무에 따른 반사손실은 2.45 GHz에서 -15.18 dB, -12.42 dB로 나타나며, 안테나 이득은 7.2 dBi, 7.6 dBi로 나타난다. 따라서 EBGs를 사용한 안테나의 반사손실은 약 2.76 dB 증가하지만 전체적인 안테나 이득은 약 0.4 dBi 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8, 9는 EBGs가 유무에 따른 1X4 배열 안테나의 방사패턴을 나타낸 것으로 그림 5에서 설계한 EBGs가 있는 1X4 배열 안테나를 EBGs가 없는 1X4 배열 안테나와 위상차($\Delta\varphi$)를 0°, 120°, 180°를 주면서 시뮬레이션하고 안테나 이득과 3 dB 빔폭을 비교하였다.



(a) w/o EBGs



(b) w EBGs

그림 6. 안테나의 반사손실
Fig. 6. Return loss of antenna

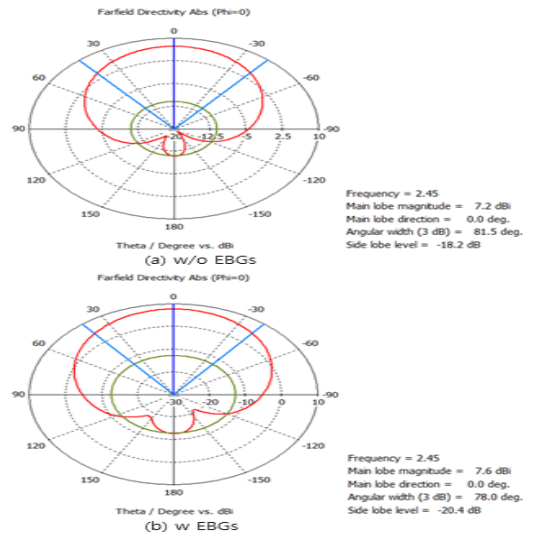
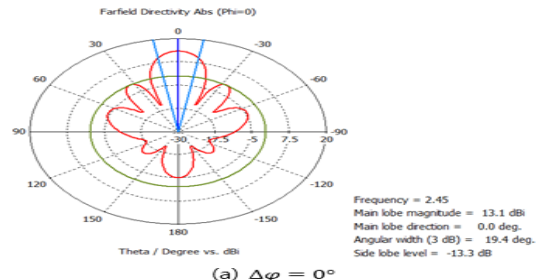
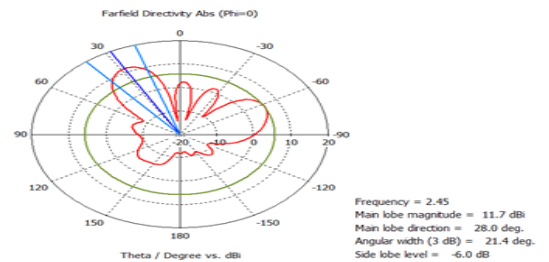


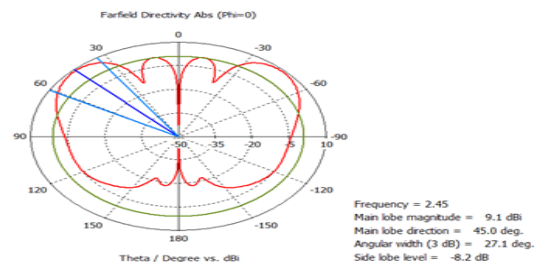
그림 7. 안테나의 방사패턴
Fig. 7. Radiation pattern of antenna



(a) $\Delta\varphi = 0^\circ$



(b) $\Delta\varphi = 120^\circ$



(c) $\Delta\varphi = 180^\circ$

그림 8. EBGs가 없는 1X4 배열 안테나의 방사패턴
Fig. 8. Radiation pattern of 1X4 array antenna without EBGs

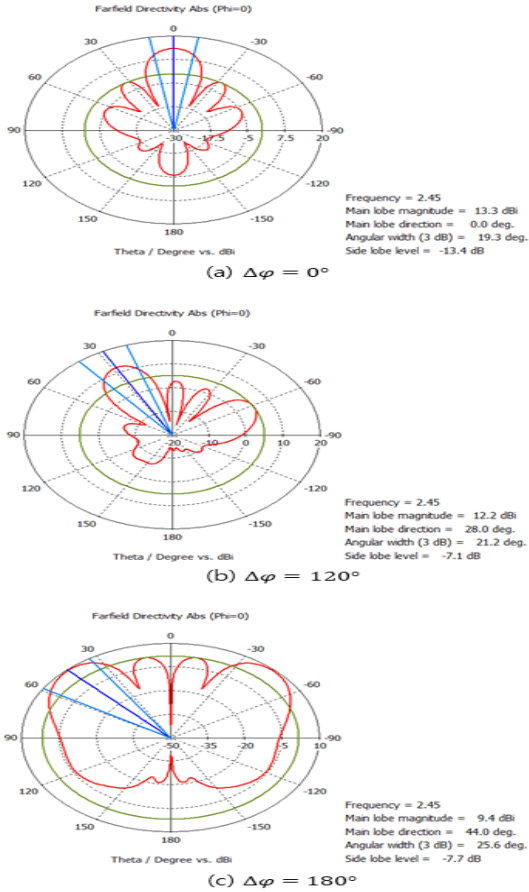


그림 9. EBGs가 있는 1X4 배열 안테나의 방사패턴
 Fig. 9. Radiation pattern of 1X4 array antenna with EBGs

표 2의 결과에서, EBGs가 없는 안테나로 배열 안테나를 구성하는 것보다 EBGs가 있는 안테나로 배열 안테나를 구성한 경우 안테나 이득이 증가하고 3 dB 빔폭은 감소하여 안테나 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 위상차에 따라서 약 0.2 dBi에서 0.5 dBi 까지 안테나 이득이 증가하는 것을 확인하였으며 이는 약 5 ~ 12.2%의 성능향상을 의미한다.

표 2. 시뮬레이션 결과
 Table 2. Simulation results

$\Delta\varphi$	antenna gain		3 dB angular width	
	without EBGs	with EBGs	without EBGs	with EBGs
0°	13.1 dBi	13.3 dBi	19.4°	19.3°
120°	11.7 dBi	12.2 dBi	21.4°	21.2°
180°	9.1 dBi	9.4 dBi	27.1°	25.6°

3.2 위상공액회로 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 3에 기술하였다. 그림 10은 Advanced Design System(ADS) 툴을 이용한 위상공액회로 시뮬레이션 결과이다. 입력신호 위상공액회로를 거친 출력신호의 차이를 비교하면 약 120° 차이가 발생한다. 즉, 입력신호의 위상은 60°이므로 출력신호의 위상이 약 -60°가 된다. 따라서 위상공액이 잘 된다는 것을 확인할 수 있으며 RDA 특성을 확인할 수 있다.

표 3. 위상공액회로 시뮬레이션 파라미터
 Table 3. Phase conjugate circuit simulation parameters

Parameters	value
Target Frequency	2.45 GHz
Intermediate Frequency	1.45 GHz
Input Signal Phase	60°
Simulation time length / step	100 ns / 1 ps
Lowpass Filter type	Butterworth
Phase Noise	-84 dB @ 10 kHz -104 dB @ 100 kHz
Mixer Noise Figure	14 dB

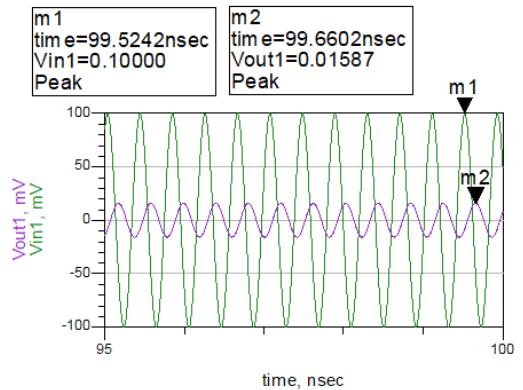


그림 10. 위상공액회로 시뮬레이션 결과
 Fig. 10. Phase conjugate circuit simulation result

IV. 결론

본 논문에서는 다중사용자 환경에서 RDA 기반의 무선전력전송을 위한 EBGs 안테나를 설계하여 같은 조건하에 EBGs의 유무에 따른 1X4 배열 안테나를 시뮬레이션하고 안테나 이득과 3 dB 빔폭을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 EBGs가 없는 안테나의 경우 위

상차에 따라 9.1 dBi ~ 13.1 dBi의 안테나 이득을 가지는 반면 EBGs가 있는 안테나의 경우 9.4 dBi ~ 13.3 dBi로 약 5 ~ 12.2%의 성능향상을 얻었으며, 3 dB 빔폭 또한 좁아져 에너지를 집중해서 보낼 수 있었다. 그리고 위상공액회로를 사용하여 디지털처리 없이 빠르고 간단하게 RDA 특성이 나타나는 것을 확인했다. 즉, 유저가 Pilot을 보낸 방향으로 전력을 집중해서 송신할 수 있다. 따라서 RDA기반의 EBGs 안테나를 사용하면 무선전력전송 효율을 높일 수 있다.

References

- [1] S. Khang, D. Lee, I. Hwang, T. Yeo, and J. Yu, "Microwave power transfer with optimal number of rectenna arrays for midrange applications," in *IEEE Ant. and Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 155-159, Jan. 2018.
- [2] N. Shinohara, "Beam control technologies with a high-efficiency phased array for microwave power transmission in Japan," in *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1448-1463, Jun. 2013.
- [3] W. Jung and J. Park, "Research and implementation of using RF wireless power transmission system for wireless sensor nodes battery-charging power harvesting module," *J. IEIE*, vol. 48, no. 6, pp. 34-42, Nov. 2011.
- [4] S. Ishino, I. Takano, K. Yano, and N. Shinohara, "Frequency-division techniques for microwave power transfer and wireless communication system with closed waveguide," *2016 IEEE WPTC*, pp. 1-4, Aveiro, Portugal, May 2016.
- [5] P. Prajesh and Dr. R. K. Singh, "Recent advances in retrodirective system technology," *IJECET*, vol. 3, pp. 171-178, Jul.-Sep. 2012.
- [6] A. N. Parks, A. Liu, S. Gollakota, and J. R. Smith, "Turbocharging ambient backscatter communication," in *Proc. ACM Conf. SIGCOMM*, pp. 619-630, 2014.
- [7] D. S. Goshi, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Recent advances in retrodirective system technology," *2006 IEEE Radio and Wireless Symp.*, pp. 459-462, San Diego, USA, Jan. 2006.
- [8] Y. C. Guo, X. W. Shi, and L. Chen, "Retrodirective array technology," *Progress in Electromagnetics Res. B*, vol. 5, pp. 153-167, 2008.
- [9] S. F. Mahmoud and Y. M. M. Antar, "Study of surface waves on planar high-gain leaky-wave antennas," in *IEEE Ant. and Wireless Propag. Lett.*, vol. 9, pp. 1186-1189, 2010.
- [10] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Applications of electromagnetic band-gap (EBG) structures in microwave antenna designs," in *Proc. ICMMT 2002*, pp. 528-531, Beijing, China, 2002.
- [11] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications," in *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946, Oct. 2003.
- [12] Q. Luo, H. M. Salgado, A. M. Moura, and J. R. Pereira, "Dual-band antenna design using an EBG Artificial Magnetic Conductor ground plane," *2008 Loughborough Ant. and Propag. Conf.*, pp. 217-220, Loughborough, 2008.
- [13] D. Qu and L. Shafai, "The performance of microstrip patch antennas over high impedance EBG substrates within and outside its bandgap," *2005 IEEE Int. Symp. Microwave, Ant., Propag. and EMC Technol. Wireless Commun.*, vol. 1, pp. 423-426, Beijing, China, 2005.
- [14] D. Jorgensen, C. Loadman, and Z. Chen, "Retrodirective antenna systems for wireless communications," *CNSR 2003*, Session A3, pp. 20-23, Moncton, New Brunswick, Canada, 2003.

구 태 범 (Taebum Gu)



2019년 2월 : 충북대학교 전자
공학과 졸업
2019년 3월~현재 : 충북대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> 안테나 설계, 무선
전력전송, 에너지 하베스팅

[ORCID:0000-0002-3926-6186]

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자
공학과 교수
2002년 3월~2004년 2월 : 충북
대학교 컴퓨터정보통신연구
소 소장
<관심분야> 무선통신시스템, 위
성통신, B5G/6G 이동통신시
스템, 통신회로 설계 및 통신
신호 처리

[ORCID:0000-0002-7368-9860]

김 명 기 (Myunggi Kim)



2019년 2월 : 충북대학교 전자
공학과 졸업
2019년 3월~현재 : 충북대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> 통신회로 설계, 무
선전력전송, 에너지 하베스팅

[ORCID:0000-0002-9070-3927]