

DGS Rectenna를 이용한 Wake-Up 수신기 시스템 설계

Wake-Up Receiver System Design Using the DGS Rectenna

최태민 · 이석재 · 이희종 · 임종식* · 안 달* · 한상민

Taemin Choi · Seok-Jae Lee · Heejong Lee · Jongsik Lim* · Dal Ahn* · Sang-Min Han

요 약

본 논문에서는 저전력 센서를 위한 평면형 구조의 Rectenna 시스템을 설계하여 수신 센서의 wake-up 회로에 응용함으로써, 유효 주파수 신호의 입사시에만 동작되는 수신기 시스템을 제안하였다. 2.4 GHz 대역의 평면형 집적성이 가능한 Rectenna 시스템 설계를 위해 기존 여파기를 DGS 형태로 설계하여 다이오드에 의한 고조파 성분인 4.8 GHz, 7.2 GHz 신호를 제거와 DC-path를 위한 2.4 GHz 주 신호원의 제거를 수행하였다. 설계된 Rectenna의 변환 출력 전압 분석을 통해 수신기 시스템의 공급 전원의 스위칭 회로 구동에 활용함으로써 저전력 센서 수신기 시스템의 동작 여부를 평가하였다. 제안된 시스템은 수신 센서의 신호 수신 여부에 따른 저 잡음 증폭기 동작 점검에 의해 wake-up 성능이 평가되었으며, 실험 결과 우수한 동작 성능을 나타내었다.

Abstract

In this paper, a new design of a planar rectenna system and its application to a wake-up receiver operating for incoming signal with a specified frequency are proposed for low-power sensor system applications. The planar and integrable rectenna system is designed with DGSs(Defected Ground Structures) at 2.4 GHz. The DGSs reject harmonic components of 4.8 and 7.2 GHz and eliminate 2.4 GHz fundamental frequency for DC-path filtering. The rectenna system has been evaluated for the conversion output voltages, and applied to the switching of a power supply at the low-power sensor receivers. The proposed system has been evaluated for the wake-up performance by testing a low-noise amplifier operation. From the experimental results, the proposed receiver system presents excellent operation performances.

Key words : Rectennas, Defected Ground Structures(DGSs), Receiver Systems, Low-Power Systems, Wake-up

I. 서 론

최근 주요한 이슈로 대두되고 있는 무선 전력 전송 기술은 1960년대 미 항공우주국의 SPS(Space Power Satellite) 프로젝트로부터 비롯되었다^[1]. 이는 인공위성에 설치되어진 태양 전지판에서 효율적으로

생성된 전기 에너지를 지구로 전송하기 위해 RF 신호로 변환하고, 지구에서 다시 DC 전원으로 변환을 하는 과정에서 전력의 손실을 최소화 하는 변환 기술이 요구되었다. Rectenna는 검출기를 의미하는 Rectifier와 Antenna의 합성어로 수신부에서 송신된 RF 신호를 DC 전원으로 변환하는 장치로, RF 무선 신

「이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초 연구 사업(2010-0015301) 및 Global Research Network Program 사업(KRF-2009-220-D00074)의 지원을 받아 수행된 것임.」

순천향대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University)

*순천향대학교 전기통신공학과(Department of Electrical and Communication Engineering, Soonchunhyang University)

· Manuscript received November 25, 2011 ; Revised January 10, 2012 ; Accepted January 11, 2012. (ID No. 20111125-02S)

· Corresponding Author : Sang-Min Han (e-mail : smhan@sch.ac.kr)

호 전송의 유일한 원거리 무선 전력 전송 방법으로 고려되어 다양한 설계 방법이 연구되어 왔다^{[2]~[7]}. 또한, 유비쿼터스를 필두로 한 무선 통신 기술의 다분화로 저전력 무선 센서 기반의 energy scavenging 전력 생산 연구^[8]와 집적 가능한 시스템 구조 연구가 이슈가 부각되고 있으며^[9], 시스템 소형화 및 집적화를 위한 RF 소자 설계 기술^{[10],[11]} 등이 시스템 설계 기술과 함께 복합적 요소로 주목되고 있다.

본 논문에서는 저 전력 무선 센서의 전원 기술로서 Rectenna의 구조를 평면화된 설계를 통해 시스템 PCB 면적을 최소화하는 설계 방법을 제안하였으며, DGS(Defected Ground Structure) 기술을 이용하여 기존의 Rectenna보다 심플한 구조를 갖고, 평면 안테나 및 주요 시스템 PCB와 집적이 가능한 설계를 구현하였다. 또한, 제안된 Rectenna 구조를 저 전력 수신기 시스템에 적용하여 Wake-up 기능을 갖는 수신기 시스템을 구현하였다.

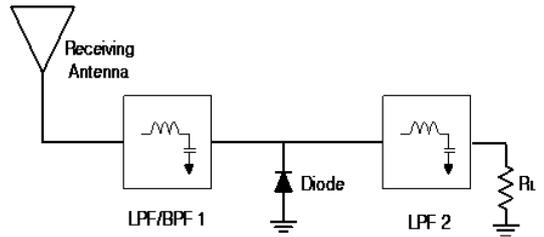
본 논문의 구성은 서론에 이어 제2장에서 DGS를 이용한 평면형 Rectenna 설계에 대해 기술하고, 제3장에서는 DGS Rectenna를 이용한 저 전력 수신기 Wake-up 시스템의 설계 및 검증을 하였으며, 끝으로 제4장 결론을 맺었다.

II. DGS를 이용한 평면형 Rectenna 설계

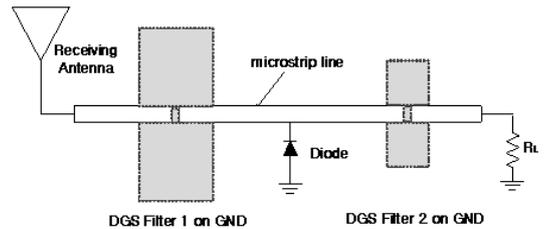
2-1 DGS Rectenna 시스템

본 논문에서는 DGS를 이용한 평면 집적형 Rectenna를 설계하였다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 기존의 Rectenna는 수신된 RF 신호의 다이오드 정류 과정에서 발생하는 고조파가 안테나로 재 방사되는 것을 막기 위한 Front-End단의 LPF 또는 BPF 1과 부하 측으로의 DC-path를 위한 LPF 2에 의해 에너지 변환이 이루어지는 동작 원리를 가지고 있다. 이를 위해 비교적 사이즈가 큰 마이크로스트립 형태의 여파기나 분산 소자를 이용한 여파기를 구성하여 별도의 납땀을 해야 하는 제작 과정을 거치게 된다. 따라서 본 논문에서는 이에 사용된 여파기를 PCB의 접지면에 DGS를 이용한 여파기로 대체함으로써 시스템의 집적화와 소형화가 가능한 설계를 구현하였다.

제안된 DGS Rectenna는 그림 1(b)에 보이는 바와 같이 기판 전면은 고주파 전송에 적합한 전송 선로



(a) 기존 rectenna 구조
(a) Conventional rectenna architecture



(b) 제안된 DGS rectenna 구조
(b) Proposed DGS rectenna architecture

그림 1. DGS rectenna 시스템 개념도

Fig. 1. Concept of the rectenna system.

인 마이크로스트립 라인을 직선으로 구성하고, 뒷면에 DGS 형태를 설계함으로 기존의 Rectenna의 구조보다 심플한 구조를 갖는다. 따라서 평면상에서 보면 마이크로스트립 라인과 다이오드만으로 구성되어 부하에 DC 전원을 공급할 수 있는 구조이며, 패치 안테나와 같은 평면형 안테나와 집적이 가능한 구조상의 장점을 가지고 있다.

2-2 DGS 여파기 설계 및 제작

제안된 DGS Rectenna는 2.4 GHz 대역의 반송파를 DC로 변환하도록 설계하였다. 이를 위해 DGS 여파기 1은 2.4 GHz 신호를 통과시키며, 다이오드에 의해 발생하는 2차 및 3차 고조파 성분인 4.8 GHz와 7.2 GHz 신호가 안테나로 재 방사되는 것을 효과적으로 저지할 수 있도록 설계하였다. 이를 위해 DGS를 이용한 저역 통과 여파기 특성을 갖는 Dumbbell 형태의 DGS를 설계하였다. Dumbbell 형태의 DGS를 Dumbbell의 크기가 커질수록 낮은 공진 특성을 가지며, 4.8 GHz와 7.2 GHz에서 효과적인 저지 특성을 위해 2단의 Dumbbell을 설계하였다.

다이오드와 부하 사이에 위치한 DGS 여파기 2는 생성된 DC 성분만이 부하에 전달되는 저역 통과 여

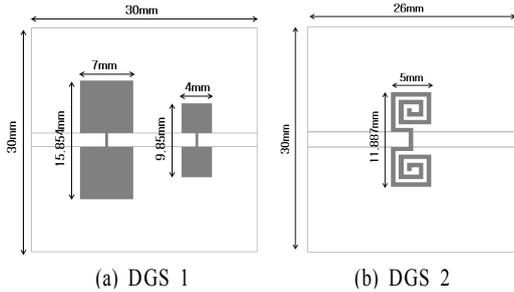


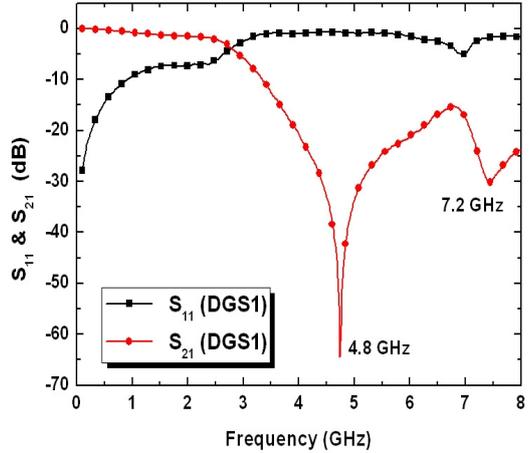
그림 2. DGS 여파기 레이아웃
Fig. 2. Layouts of the DGS filters.

파기의 특성을 가져야 한다. 따라서 다이오드 부분에 존재하는 주요 에너지원인 2.4 GHz를 효과적으로 제거하는 대역 저지 특성을 갖는 Spiral 형태의 DGS를 설계하였다. Spiral 형태의 DGS는 구조가 복잡하지만 저주파에서 유리하고, 특성 대역의 신호를 감쇄시키는데 효과적이다. 부하 측으로의 고조파 성분 방사는 매우 미미하고 정합이 되지 않았으므로 4.8 GHz와 7.2 GHz 저지는 고려하지 않았다. 설계한 DGS 회로의 레이아웃과 설계 사이즈를 그림 2에서 나타내었다. 설계는 유전율이 4.5이고, 두께가 1 mm 인 FR4 기판을 사용하였다.

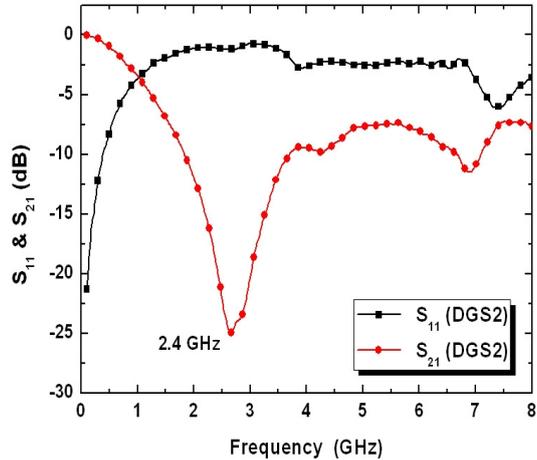
제작된 DGS 여파기를 네트워크 분석기(Agilent E5071C)로 측정하여 결과를 그림 3에 나타내었다. DGS 여파기 1은 통과 대역인 2.4 GHz에서 -2 dB의 삽입 손실을 갖고, 저지 대역인 4.8 GHz, 7.2 GHz에서 -65.1 dB, -32.5 dB의 저지 특성을 얻었다. DGS 여파기 2는 통과 대역인 DC 부근에서 0 dB의 삽입 손실을 갖고, 저지 대역인 2.4 GHz에서 -22.6 dB의 저지 특성을 얻음을 확인하였다.

2-3 DGS Rectenna 시스템 제작 및 성능평가

앞에서 설계된 DGS 여파기를 바탕으로 Rectenna 시스템을 설계하였다. 그림 4는 설계된 DGS Rectenna의 레이아웃을 보여주고 있다. 안테나를 통해 수신된 2.4 GHz RF 신호는 DGS 여파기 1에 의해 제한 통과되어 Avago Technologies사의 Schottky 다이오드(HSMS-2850)에 의해 에너지 변환을 수행하였다. 다이오드에 의한 에너지 변환은 높은 출력 전압을 얻기 위해 2단의 다이오드를 사용한 주파수 체배 회로를 구성하였으며, 50옴으로 구성된 안테나 및



(a) DGS 1



(b) DGS 2

그림 3. DGS 여파기 성능
Fig. 3. Performances of the DGS filters.

여파기와 매우 낮은 임피던스의 다이오드 회로의 정합을 위해 2.4 GHz에서 협대역 정합 회로를 삽입하였다. 출력 측 부하 저항과 다이오드 회로 사이에 DGS 여파기 2를 삽입하여 DC-path로 사용하였다.

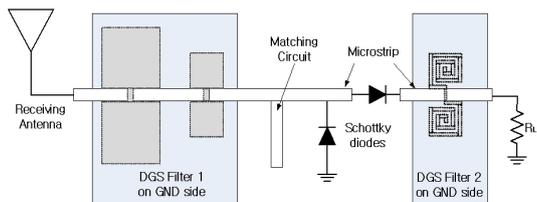


그림 4. 제안된 DGS rectenna 시스템 레이아웃
Fig. 4. Layouts of the proposed DGS rectenna system.

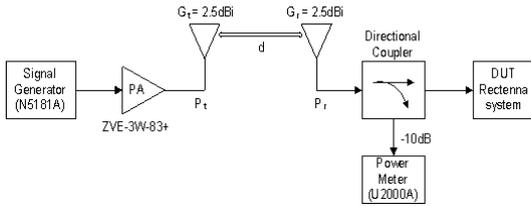


그림 5. DGS rectenna 측정 셋업
Fig. 5. Measurement setup for the DGS rectenna.

제작된 Rectenna 시스템의 성능 측정을 위해 아래 그림 5와 같이 측정 셋업을 구성하였다. 신호발생기에서 발생시킨 2.4 GHz CW RF 신호는 충분한 전송 전력을 확보하기 위해 전력 증폭기를 사용하였다. 사용된 전력 증폭기는 34 dB 이득과 35 dBm의 P_{1dB} 를 갖는 Mini-Circuits사의 ZVE-3W-83+를 사용하였으며, 안테나 출력 전력의 조절은 신호발생기 출력을 조절하였다. 수신 단에서는 안테나 수신 전력을 10 dB의 방향성 결합기를 사용하여 결합 단에 연결된 파워 미터를 통해 실시간 수신 전력에 대한 Rectenna의 특성을 측정하였다. 안테나간 거리는 원거리 조건에 의해 다음 식 (1)과 같이 계산하여 원거리 조건을 만족하는 거리에서 실험을 진행하였다.

$$Far\ Field\ Condition = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 D 는 안테나 크기($D=0.085$ m)이며 λ 는 2.45 GHz에서의 파장($\lambda=0.125$ m)이다. 따라서 안테나 간 최소 거리는 0.11 m이고, 여기서 예상 수신 전력 P_r

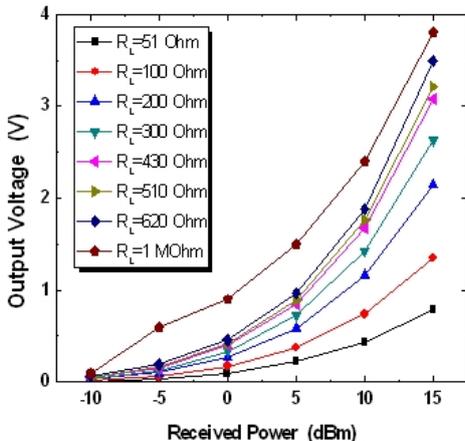
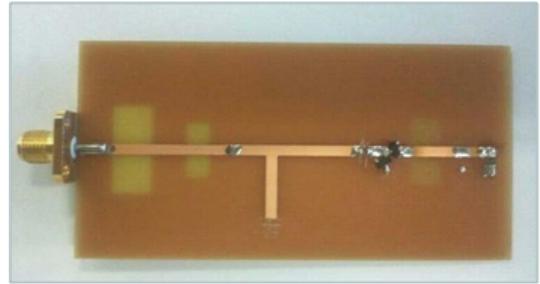
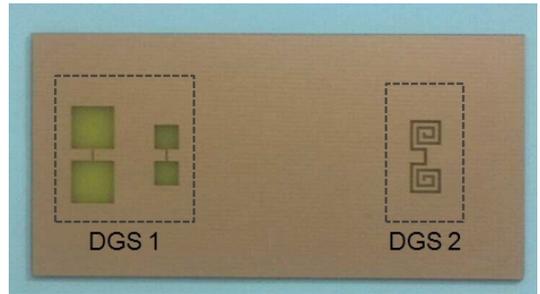


그림 6. DGS rectenna에 의한 변환 전압
Fig. 6. Conversion voltages of the DGS rectenna.



(a) 앞면
(a) Front side



(b) 뒷면
(b) Back side

그림 7. 제작된 DGS rectenna 사진
Fig. 7. Photos of the implemented DGS rectenna.

은 다음 식 (2)와 같은 계산에 의해 설정되었다.

$$P_r = P_t \times \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2} \times G_r \times G_t \quad (2)$$

여기서 P_t 는 송신 전력, G_r 은 수신 안테나 이득 G_r 은 송신 안테나 이득을 나타낸다. 실험에서 사용된 수신 전력은 -10 dBm에서 20 dBm이다.

다양한 부하 저항 값에 대한 출력 전압을 수신 전력에 따라 측정하였으며, 그 결과를 그림 6에서 나타내었다. 그림 7에서 제작된 DGS Rectenna 시스템의 전, 후면 사진을 보이고 있다.

III. DGS Rectenna를 이용한 저 전력 수신기 Wake-up 시스템

본 장에서는 앞서 설계된 평면형 DGS Rectenna 시스템을 이용하여 근거리 저 전력 시스템 응용을 위한 Wake-up 수신기 시스템을 설계하였다. 그림 8에서 보이는 것처럼 DGS Rectenna에 의해 수신된 RF 신호가 변환된 전력을 이용하여 수신기의 동작

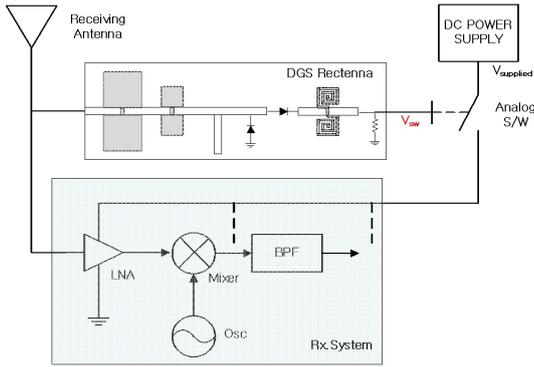


그림 8. Wake-up 수신기 시스템 구성도
Fig. 8. Configuration of the wake-up receiver system.

표 1. 수신 전력에 따른 출력 전압
Table 1. Output voltage of received power.

Received power	Vout @ $R_L=1\text{ M}\Omega$
-5 dBm	0.62 V
0 dBm	0.91 V
5 dBm	1.52 V

스위치를 작동함으로써 수신 신호가 존재하는 경우에만 수신기가 동작할 수 있도록 설계하였다.

Rectenna에 의해 변환된 DC 전원은 수신기 LNA 등에 공급되는 전원을 제어하는 역할을 하게 된다. 아날로그 스위치는 Fairchild사의 FSSA-1156을 사용하였고, 0.6 V 이상 전압 인가 시 동작하게 된다. 본 시스템 응용을 위해 설계된 Rectenna의 수신 전력에 대한 출력 전압을 스위치 동작에 적절한 레벨로 판단하여 표 1에서 정리하였다.

수신기 시스템에 사용한 저 잡음 증폭기(LNA)는 Avago Technologies사의 MGA-85563을 사용하였고, 3 V, 40 mA의 바이어스를 사용한다. 수신 전력에 따라 LNA가 동작하는 것으로 수신기 Wake-up 특성을 측정하였다. 그림 9는 수신 전력에 따른 LNA 이득을 측정하여 나타낸 것이다. 근거리 시스템 수신 전력이 -5 dBm 이상 인가 시 LNA가 동작하여 Wake-up 수신기 시스템이 작동됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 DGS를 이용한 평면형 구조의 Rectenna 시스템을 제안하였으며, 이를 이용한 근거

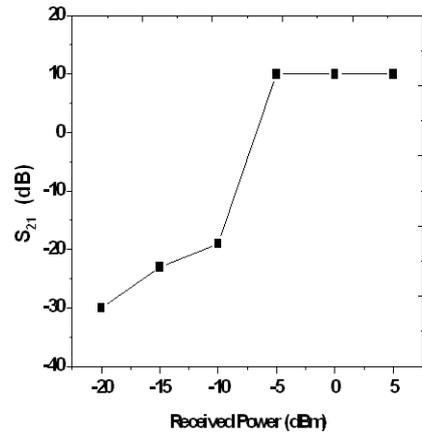


그림 9. LNA 동작에 의한 수신기 wake-up 성능평가
Fig. 9. Wake-up performance evaluation corresponding to an LNA operation.

리 통신용 Wake-up 수신기 시스템을 설계하였다. 제안된 Rectenna 시스템은 기존 여파기를 DGS 형태로 변환함으로써 Rectenna 구조를 평면화된 설계를 통해 소형화가 가능한 심플한 구조를 갖고, 평면 안테나 및 주요 시스템 PCB와 집적이 가능하도록 구현하였다. 이를 응용한 저 전력 수신기 시스템의 Wake-up 회로는 시스템 전원 공급 회로에 장착된 아날로그 스위치를 제안된 Rectenna에 의해 공급된 전원을 이용하여 개폐시킴으로써 수신 신호가 존재하는 경우에만 수신기가 동작할 수 있도록 설계하여 저 전력으로 수신기에 적합한 시스템 구조를 갖는다. 본 논문에서 제안된 저 전력 시스템 구조는 저 전력 센서 네트워크에 적용되어 주기적인 beacon 신호에 능동적으로 반응하며 정보를 주고 받을 뿐만 아니라, 신호의 유무에 따른 동작으로 센서의 수명을 연장할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242, Sep. 1984.
[2] J. A. C. Theeuwes, H. J. Visser, M. C. V. Beurden, and G. J. N. Doodeman, "Efficient, compact, wireless battery design", in *Proc. European Microw. Conf. 2007*, pp. 991-994, Oct. 2007.

- [3] 박동국, 서홍은, 조익현, 김예지, "2.45 GHz대 저전력용 레테나에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 20(9), pp. 862-867, 2009년 9월.
- [4] Z. Harouni, L. Cirio, L. Osman, A. Gharsallah, and O. Picon, "A dual circularly polarized 2.45 GHz rectenna for wireless power transmission", *IEEE Antennas Wireless Propaga. Lett.*, vol. 10, pp. 306-309, Apr. 2011.
- [5] J. Y. Park, S.-M. Han, and T. Itoh, "A rectenna design with harmonic-rejecting circular-sector antenna", *IEEE Antennas Wireless Propaga. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 52-54, Dec. 2004.
- [6] S. Lim, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Adaptive power controllable retrodirective array system for wireless sensor server applications", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 12, pp. 3735-3743, Dec. 2005.
- [7] 최태민, 이석재, 이희중, 임중식, 안달, 한상민, "DGS를 이용한 평면형 Rectenna 시스템 설계", 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집, 21(1), p. 78, 2011년 11월.
- [8] M. Sheets, B. Otis, F. Burghardt, J. Ammer, T. Kalarar, P. Monat, and J. Rabaey, "A (6×3) cm² self-contained energy-scavenging wireless sensor network node", in *Proc. Wireless Personal Multimedia Comm. (WPMC)*, Abano Terme, Italy, 2004.
- [9] B. Otis, Y. H. Chee, R. Lu, N. M. Pletcher, and J. M. Rabaey, "An ultra-low power MEMS-based two-channel transceiver for wireless sensor networks", in *Proc. IEEE Symp. VLSI Circuits*, pp. 20-23, Jun. 2004.
- [10] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2001.
- [11] C. -S. Kim, J. Lim, S. Nam, K. -Y. Kang, and D. Ahn, "Equivalent circuit modelling of spiral defected ground structure for microstrip line", *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 19, pp. 1109-1110, Sep. 2002.

최 태 민



2011년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2011년 3월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF/Microwave 회로 설계, RF Systems

이 석 재



2010년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
 2012년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2012년 3월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] RF 통신 시스템

이 희 종



2010년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
 2012년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2012년 1월~현재: (주) 유텔 기술연구소 연구원
 [주 관심분야] RF Front-End System

안 달



1984년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1990년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1990년 8월~1992년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원
 1992년 9월~현재: 순천향대학교 전기통신공학과 교수
 [주 관심분야] RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등

임 중 식



1991년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 1993년 2월~1999년 3월: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단 무선방송기술연구소 선임연구원
 2003년 3월~2003년 7월: 서울대학교 BK21 정보기술사업단 박사후 연구원
 2003년 7월~2004년 9월: 특허청 특허심사관
 2004년 9월~2005년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 선임연구원
 2005년 3월~현재: 순천향대학교 전기통신공학과 부교수
 [주 관심분야] 초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델

한 상 민



1996년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 1998년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2003년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2003년 10월~2004년 11월: 미국 University of California, Los Angeles (UCLA), Post-Doctoral Research Fellow
 2005년 1월~2007년 8월: 삼성종합기술원 전문연구원
 2007년 9월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 조교수
 [주 관심분야] RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Integrated Antennas