

DC 바이어스 OFDM 기반 동시 무선 정보 및 전력 전송 설계 및 실험

황 사 일*, 최 계 원^o

Design and Experiment of DC-Biased OFDM-Based Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

Sa Il Hwang*, Kae Won Choi^o

요 약

RF 무선 전력 전송은 변화하는 시대의 흐름에 맞춰 무선에 의한 편의성을 제공함과 동시에 효과적인 충전 시스템의 필요성을 반영하는 하나의 패러다임이다. 본 논문에서는 동시 무선 정보 및 전력 전송이 가능한 DC 바이어스 OFDM 기반의 SWIPT 시스템을 제안한다. 제안된 시스템에서 무선 전력 전송은 변조되지 않은 고전력 연속 파를 통해 이루어지며, 정보 전송의 경우 변조된 신호를 통해 이루어진다. 이러한 SWIPT 신호를 처리하기 위한 수신단 회로는 소비 전력 및 회로 복잡성을 최소화하여 설계되었으며, 수신된 신호를 정류하고 전력 및 정보 신호로 분할하는 역할을 한다. 제안된 수신단 회로를 구현하고 실험을 통해 제안된 SWIPT 시스템의 성능을 확인하고 유효성을 검증하였다.

Key Words : Wireless power transfer, RF power transfer, SWIPT, DC-biased OFDM, Rectifier, Energy harvesting

ABSTRACT

Wireless power transfer is a paradigm that reflects the need for an efficient charging system providing convenience. In this paper, we propose a DC-biased OFDM-based SWIPT(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) system. In the proposed system, wireless power transfer is performed through unmodulated high-power continuous wave, and information transfer is performed through small modulated signal. We designed receiver circuit for processing the SWIPT signal to minimize power consumption and circuit complexity. The receiver circuit serves to rectify and divide the received signal into power and information signal. We have fabricated the proposed receiver circuit and implemented for experiment of simultaneous transmission of information and power. Through the experiments, the performance of the proposed SWIPT system was verified.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2019-2016-0-00311)

♦ First Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, fortyone@g.skku.edu, 학생회원

o Corresponding Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, kaewonchoi@skku.edu, 종신회원

논문번호 : 201910-245-D-RN, Received October 18, 2019; Accepted November 4, 2019; Accepted November 4, 2019

I. 서 론

최근 5G의 상용화에 힘입어 사람과 사물, 환경이 하나의 네트워크망에서 상호작용하며 교류하는 초연결 사회가 도래했다. 이를 위한 다양한 IoT 디바이스 및 센서 시장이 확대되고 있으며, 소비자들의 요구에 맞추어 수많은 제품들이 소형 나노화되고 있다. 향후 엄청난 수의 IoT 기기를 가동하는 것이 중요한 이슈가 될 것으로 예상되고 있으며, 이에 관한 주요 문제는 IoT 기기 가동을 위한 전원 공급에 있다. 배터리의 교체 및 유선 연결을 통해 전원을 공급하는 기존의 방식은 기하급수적으로 늘어나는 기기들을 위한 적합한 솔루션이 될 수 없다.

이러한 추세에 맞추어 버려지는 에너지를 수확하여 활용하는 에너지 하베스팅 기술 및 무선 전력 전송은 여러 기기의 효과적인 작동을 위한 새로운 전원 기술로 주목받고 있다. 그중에서도 RF를 이용한 무선 전력 전송은 장거리에서 전력을 전달할 수 있으며, 이러한 특징으로 저전력 IoT 장치의 전원 공급에 적합한 솔루션으로 주목받고 있다. 또한, RF의 특성상 전력 전송과 동시에 정보를 전송할 수 있기 때문에 보다 큰 발전 가능성을 지니며 이에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다.

배터리 없이 무선으로 IoT 기기를 동작시키기 위해서는 데이터 통신과 전력 전송이 상호 간에 아무런 방해 없이 조화롭게 작동되는 것이 중요하다. 일부 연구에서 저자는 RF 무선 전력 전송과 데이터 통신을 동시에 수행하여 단일 장치 무선 전력 센서 네트워크의 작동을 유지하며, 복수의 장치로 작업을 확장시켰다^[1,2]. 소개된 논문에서는 그림 1과 같이 데이터 통신과 전력 전송에 각기 다른 수신기 하드웨어를 사용하였으며, 데이터 통신에는 2.4GHz, 전력 전송에는 920MHz를 사용하였다. 여기에서 정보 및 전력의 두 신호는 각각 데이터 및 전력 전송을 위해 분리된 송신기 장치에서 동시에 별도로 전송됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 복잡성, 크기, 비용 감소와 동시에 수신단의 효율성을 높이기 위해서 시뮬레이션 및 실험적인 접근법을 사용하여 동시 무선 정보 및 전력 전송을 위한 새로운 수신단 아키텍처를 제안한다. 그림 2에 나타난 것처럼 제안된 시스템에서는 데이터 통신과 전력 신호를 하나의 OFDM 변조 신호로 결합함으로써 데이터 통신 및 전력을 동시에 전송할 수 있다. 시스템에 인가되는 신호는 전력 전송을 위한 DC 성분과 데이터 통신용 정보 전송을 위한 AC 성분으로 구성되며, 이에 따라 제안된 수신단 노드는 신호를 데

이터 및 전력 부하로 분리한다. 수신단은 정보 및 전력 수신기 모두 가능한 통합 수신기 모델을 사용한다.

제안된 수신단 회로를 구현하고 실제 테스트 베드 구축을 위해 NI USRP-2942R, RF Combiner, NI PXIe-1073, NI 5782 및 전압 증폭기 등이 사용되었으며 Labview 및 오실로스코프, 스펙트럼 분석기를 통해 실험 결과를 확인하였다.

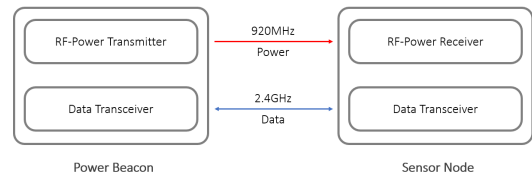


그림 1. 무선 전력 센서 네트워크
Fig. 1. Wireless powered sensor network

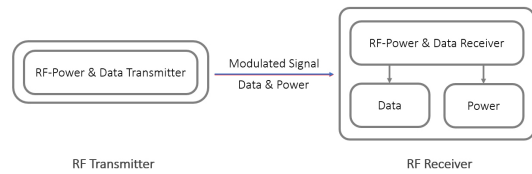


그림 2. DC 바이어스 OFDM 기반 SWIPT 시스템
Fig. 2. DC-biased OFDM-based SWIPT

II. SWIPT 시스템

제안된 SWIPT 시스템에서 송신단은 전력과 정보를 동시에 무선으로 전송한다. 이때, 전력 신호 크기는 평균적으로 통신 신호 크기보다 훨씬 크다.

송신단에서 반송파 주파수의 소스 신호는 로컬 오실레이터(LO)에 의해 생성되며, 생성된 신호는 RF Splitter에 의해 전력 및 통신 신호의 경로로 분할된다. 통신 신호의 경로에는 Digital Signal Processor, DAC, 믹서, 필터, 증폭기가 있으며, DAC(Digital-to-Analog Converter)를 거친 기저 대역 변조 신호는 믹서를 통해 반송파 주파수로 상향 변환된 후 전송을 위해 필터링 및 증폭된다. 전력 신호의 경로에는 전력량 제어를 위한 가변 감쇠기, 충분히 높은 전력을 전달하기 위한 고전력 증폭기(High Power Amplifier : HPA)가 있다. 각각의 경로를 통과한 전력 및 정보 신호는 RF Combiner에 의해 하나의 신호로 결합되어 안테나를 통해 전송된다.

그림 3은 제안된 SWIPT 방식의 주파수 영역 신호를 보여주며, 920MHz 반송파 주파수의 전력 신호가 상대적으로 높은 전력을 갖는 반면, 통신 신호의 총

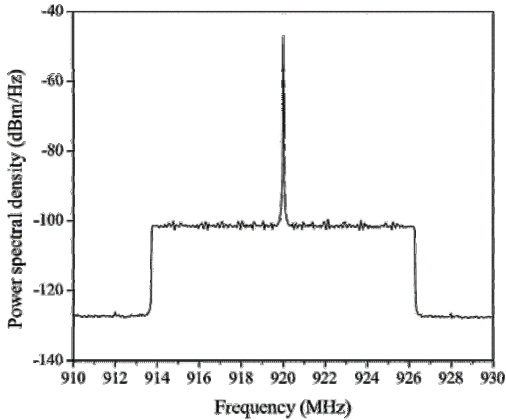


그림 3. 제안된 SWIPT 방식의 주파수에 따른 전력
Fig. 3. Power over frequency of proposed SWIPT schemes

출력은 전력 신호에 비해 훨씬 작다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 제안된 SWIPT 방식의 시간 영역 신호를 보여준다. 해당 신호에서 DC 구성요소는 전력을 전달하고, DC 구성요소 주위의 AC 구성요소는 데이터를 전달한다. 제안된 SWIPT 신호는 PAPR이 매우 낮기 때문에 HPA가 효율적으로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

전송된 신호는 수신단 안테나에 의해 수신되며, 수신단은 1) 수신된 전력 신호를 DC로 변환하고 2) 통신 신호로부터 정보를 검색한다. 본 논문에서는 이러한 기능을 수행하기 위한 수신단 회로에 중점을 두며, 이에 대한 자세한 내용은 III, IV장에서 다룬다.

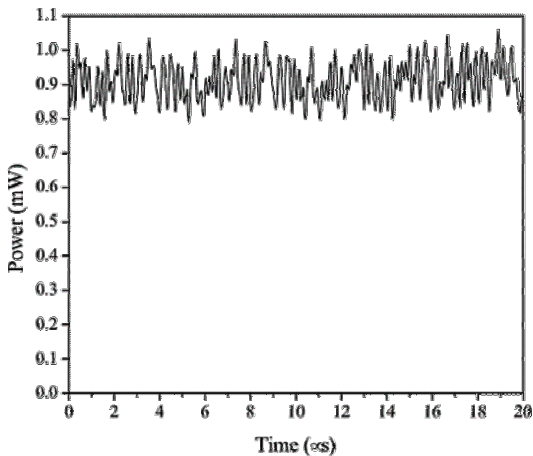


그림 4. 제안된 SWIPT 방식의 시간에 따른 전력
Fig. 4. Instantaneous power over time of proposed SWIPT schemes

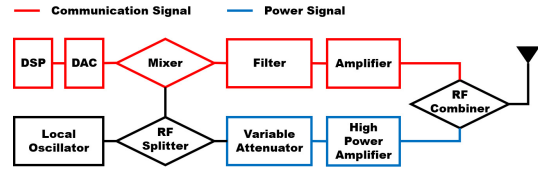


그림 5. 송신단 구조
Fig. 5. Transmitter architecture

실제 실험을 위한 구성에서 신호 발생을 위해 USRP-2942R을 사용하였으며 스펙트럼 분석기를 통한 확인 작업을 거쳤다. 그림 5에 RF 송신단 구조를 나타내었다.

III. 수신단 모델

본 논문의 주요 목표는 제안된 SWIPT 시스템 수신단 회로를 설계하고 분석하는 것이다. 이를 위해 본 III장에서는 수신단 회로에 관해 설명한다. 수신단에서 수신한 신호에는 RF와 베이스밴드 신호가 공존하며, 이러한 RF 및 베이스밴드 신호는 다시 전력 및 통신 신호를 구성한다^[3].

전체 수신단 회로는 그림 6에 나타난 것처럼 안테나, 매칭 네트워크, 정류기, 필터, 통신 분기 및 전력 분기의 총 여섯 부분으로 나눌 수 있다.

안테나에서 정류기로 최대의 전력을 전달하기 위해서는 안테나와 정류기 사이의 임피던스가 일치해야 한다. 매칭 네트워크는 안테나와 정류기 사이의 임피던스를 일치시키기 위해 사용된다.

정류기는 입력 RF 신호를 출력 베이스밴드 신호로 변환하는 비선형 회로이다. 정류기는 N-stage Dickson charge pump 구조가 적용되었으며 이는 IV장에서 다룰 것이다.

정류기에서 나오는 베이스밴드 신호는 인덕턴스 L_{filter} 와 커패시턴스 C_{filter} 를 가진 LC 필터에 의해 형성되며, 필터를 거친 신호는 전력 분기 및 통신 분기로 나뉜다.

전력 분기에서는 인덕턴스 L_{power} 를 가진 인덕터

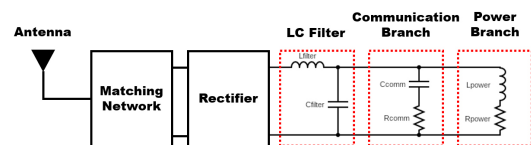
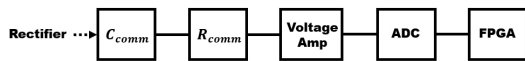


그림 6. 수신단 구조
Fig. 6. Receiver architecture

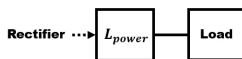
가 통신 신호를 차단하고, 저항 R_{power} 를 사용하여 전력 부하에 전력 신호를 전달한다. 전력 부하에 걸친 전압은 베이스밴드 전압 $V_P(t) = V_P^0(t)$ 로 나타낼 수 있으며, 수신단에서 수확된 전력은 전력 부하에 전달되는 전력 $V_P^0(t)^2/R_{power}$ 이다.

통신 분기에서는 커패시턴스 C_{comm} 을 가진 커패시터가 전력 신호를 차단하는 동안 통신 신호를 저항 R_{comm} 을 통해 통신 부하로 전달한다. 통신 부하에 걸친 전압은 $V_C(t) = V_C^0(t)$ 로 나타낼 수 있으며 아날로그-디지털 변환기(ADC)는 통신 부하에 걸친 전압을 샘플링한다. 샘플링된 신호는 CP 제거, 고속 푸리에 변환(FFT), 복조의 과정을 통해 데이터 수신 프로세스를 거친다.

그림 7은 통신 및 전력 분기의 실제 실험을 위한 구성을 나타낸다. 실제 실험을 위한 구성에서 통신 분기를 지난 신호의 ADC, SNR 및 BER 테스트를 위해 NI 5782 및 NI PXIe-1073을 사용한다. 이때, ADC 측의 낮은 입력 임피던스로 인해 전력의 상당수가 소모되는 문제가 발생할 수 있으므로 ADC 이전에 전압 증폭기를 거친다. 전압 증폭기는 신호의 증폭 및 버퍼의 역할을 하며 매우 높은 입력 임피던스로 인해 전력 소모가 거의 없다.



(a) Communication Branch



(b) Power Branch

그림 7. 전력 및 통신 분기 구성도
Fig. 7. Power and communication branch diagram

IV. 정류기

4.1 다이오드

수신된 신호로부터 에너지를 수확하는 정류 회로의 중요한 고려 사항 중 하나는 약한 입력 RF 전력으로 작동할 수 있어야 한다는 것이다. 이러한 사항을 고려할 때, 가장 중요한 구성 요소는 다이오드이다. 일반적으로 안테나에서 얻은 신호의 피크 전압은 다이오드 임계값보다 작다. 다이오드가 순방향 바이어싱 되지 않는다면 정류가 발생하지 않으며 정류 없이 회로

는 의도된 동작을 수행할 수 없기 때문에 가능한 최저 턴온 전압을 가지는 다이오드를 선정하는 것이 바람직하다. 또한, 비교적 높은 주파수에서 동작하므로 빠른 스위칭 시간을 갖는 다이오드가 사용될 필요가 있다. 쇼트키 다이오드는 반도체-반도체 접합 대신 금속-반도체 접합을 사용하여 접합부가 훨씬 빠르게 동작하고 낮은 순방향 전압 강하를 제공한다.

관련 연구를 검토한 결과 일반적으로 흔히 사용되는 RF 다이오드는 1) Avago Technologies HSMS-286x series 2) Skyworks SMS7630 series 3) Macom MA4Exxxx series의 크게 세 가지 종류가 있다.

표 1은 해당 다이오드들의 데이터 시트에 근거한 SPICE Model 파라미터를 보여준다. 해당 파라미터 가운데 정류기 회로의 성능을 결정하는 주요 파라미터로 Saturation current(I_S), Series resistance(R_S), Zero-bias Junction Capacitance(C_{j0}), Breakdown Voltage(B_V)를 뽑을 수 있다^[4]. 높은 I_S 를 갖는 다이오드는 높은 순방향 전류를 발생시키므로 부하 구동에 유리하며, 낮은 R_S , C_{j0} 를 가지는 다이오드가 전력 손실이 적다. 또한, B_V 는 다이오드가 포함된 정류 회로의 입력 전력 범위를 가능하는 척도가 되며 B_V 가 높을수록 더 높은 입력 전력을 수용할 수 있다.

주요 파라미터, 납땜 및 부품 수급의 용이성, 가격 등의 종합적인 사항을 고려하여 본 SWIPT 시스템에는 Skyworks SMS7630 다이오드가 사용되었다.

표 1. SPICE Model 파라미터
Table 1. SPICE Model parameters

Parameter	Units	SMS7630	HSMS286	MA4E2054
I_S	A	5E-6	5E-8	3E-8
R_S	Ω	20	6	11
N	-	1.05	1.08	1.05
TT	sec	1E-11	-	-
C_{j0}	pF	0.14	0.18	0.13
M	-	0.4	0.5	0.5
E_g	eV	0.69	0.69	0.69
X_{ti}	-	2	2	-
F_C	-	0.5	-	-
B_V	V	2	7	5
I_{bv}	A	1E-4	1E-5	1E-5
V_j	V	0.34	0.65	0.4

4.2 Charge pump

제안된 SWIPT 수신단 회로에는 N-stage Dickson charge pump를 고려한다^[5]. N-stage Dickson charge pump의 회로도도 그림 8과 같이 2N 개의 다이오드 및 2N 개의 커패시터로 구성된다. 모든 커패시터는 동일한 커패시턴스를 가지며 커패시턴스 크기의 경우 RF 신호에 대해 제로 임피던스를 가지고 베이스밴드 신호를 차단할 수 있을 만큼 충분히 커야 한다.

N-stage Dickson charge pump의 기능은 다음과 같다. 순방향 전압 손실이 없는 이상적인 다이오드를 가정할 때, 음의 반주기 동안 홀수 번호의 커패시터는 홀수 번호의 다이오드를 통해 입력 RF 신호와 동일한 전압과 이전 짝수 번호의 커패시터 전압의 합만큼 충전되며, 반대로 짝수 번호의 커패시터는 양의 반주기 동안 짝수 번호의 다이오드를 통해 비슷한 방식으로 충전된다. 다이오드는 전류를 일정한 방향으로 흐르게 하는 성질을 가지고 있기 때문에 전하가 역류하는 것을 방지하는 편도 밸브의 역할을 한다. N-stage Dickson charge pump의 커패시턴스는 RF 신호에 대한 임피던스가 0이 될 정도로 크기 때문에 RF 신호의 관점에서 정류기의 커패시터는 단락 회로이다. 반면 베이스밴드 신호의 관점에서 커패시터는 베이스밴드 전류 신호를 완전히 차단하는 역할을 하므로 개방회로로 볼 수 있다. 그림 9와 10에서는 각각 베이스밴드

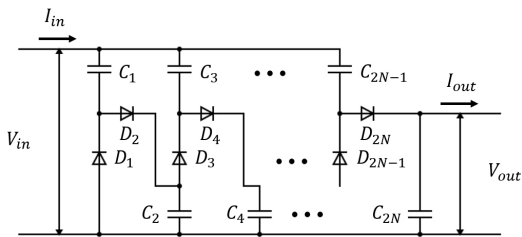


그림 8. N-stage Dickson charge pump 회로도
Fig. 8. N-stage Dickson charge pump schematic

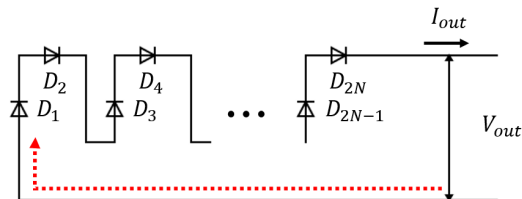


그림 9. 베이스밴드 신호 관점에서의 N-stage Dickson charge pump
Fig. 9. N-stage Dickson charge pump from the point of view of a baseband signal

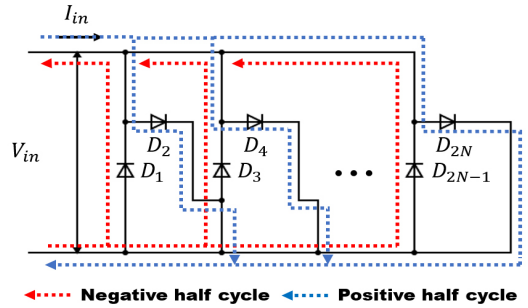


그림 10. RF 신호 관점에서의 N-stage Dickson charge pump
Fig. 10. N-stage Dickson charge pump from the point of view of a RF signal

및 RF 신호의 관점에서 정류기 회로를 보여준다.

V. 실험 결과

5.1 수신단 회로 제작

이 절에서는 설계한 수신단 회로의 제작에 대해 다룬다. 첫 번째로, 우리는 회로의 간결성, 사이즈를 고려해 1단 Dickson charge pump를 적용하여 수신단 회로를 설계하고 제작했다. 수신단 회로는 920MHz의 반송파 주파수를 위해 설계되었으며, 그림 11과 12는 각각 수신단의 회로도 및 사진을 보여준다. 그림 11에서 도시된 커패시터, 인덕터, 저항 파라미터는 $C_{rect} = 22pF$, $L_{filter} = 10\mu H$, $C_{filter} = 680pF$, $C_{comm} = 10\mu F$, $R_{comm} = 100\Omega$, $L_{power} = 100\mu H$ 이다.

그림 12는 실제 제작된 수신단 보드의 사진이며,

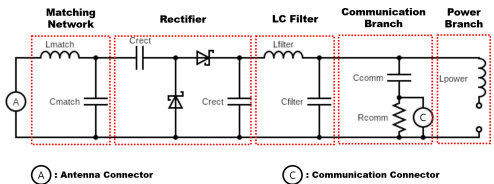


그림 11. 수신단 회로도
Fig. 11. Receiver board schematic

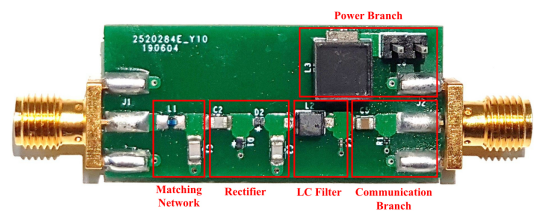


그림 12. 수신단 사진
Fig. 12. Receiver board photo

기판은 FR4, 1mm(Permittivity : 4.8)를 사용하였다.

5.2 시뮬레이션 및 실험 결과

우리는 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 상용 시뮬레이션 도구인 ADS(Advanced Design System)을 사용하였다.

먼저 그림 13, 14에 전력 전송 실험 결과를 나타내었다. 이 테스트를 위해서 신호 발생기(Tektronix TSG4100A)를 수신단 안테나 커넥터에 직접 연결하여 RF 신호를 공급하고, 소스 미터(Keithley SMU2461)를 사용하여 부하 제어 및 수확 전력을 측

정한다.

그림 13에서는 전력 부하에 따른 수확 전력을 보여준다. 정류기에서 수확된 전력은 전력 부하가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 만약 다이오드 B_V 를 초과할 경우 영구적인 손상이 발생할 수 있기 때문에 전력 부하를 더 높은 수준까지 증가시키지 않았다.

그림 14에서는 안테나 전력에 따른 에너지 수확 효율을 나타냈다. 에너지 수확 효율은 모든 전력 부하에 대해 안테나 전력이 증가함에 따라 함께 증가함을 알 수 있으며, 전력 부하 $R_{power} = 180\Omega$ 에서 최대 45%

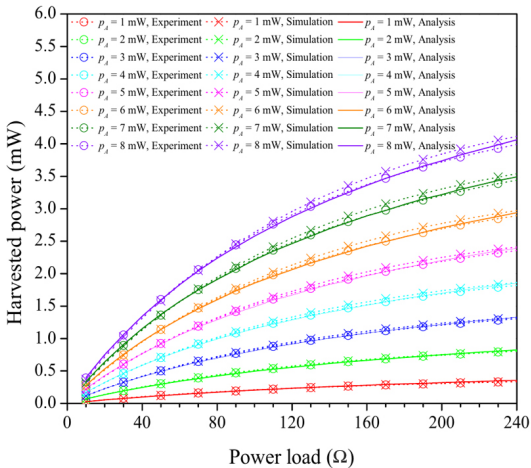


그림 13. 전력 부하에 따른 수확 전력
Fig. 13. Harvested power according to the power load for various antenna power

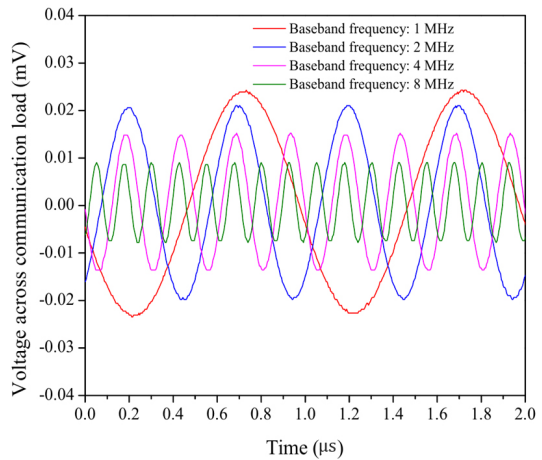


그림 15. 베이스밴드 주파수에 따른 시간 영역 신호
Fig. 15. Time-domain sine wave signals received at the communication load of the proposed receiver circuit

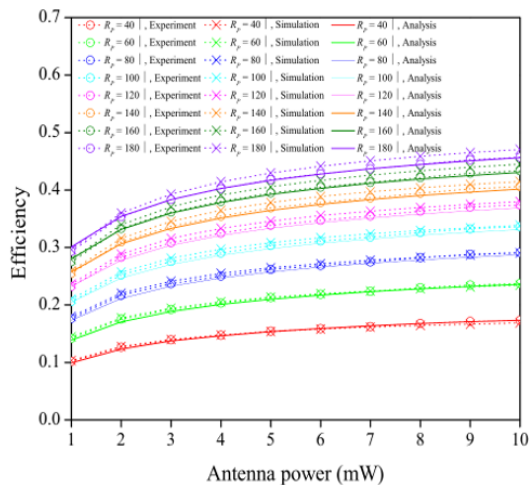


그림 14. 안테나 전력에 따른 에너지 수확 효율
Fig. 14. Energy harvesting efficiency according to the antenna power for various power loads

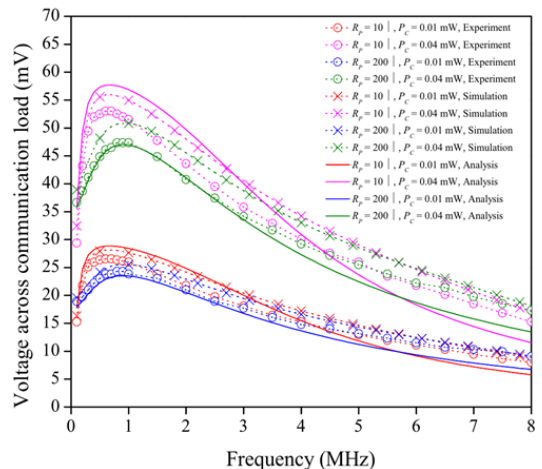


그림 16. 통신 신호 크기의 주파수 영역 변화
Fig. 16. Frequency-domain graph of the magnitude of the voltage across the communication load

의 효율을 보인다.

그림 15와 16에서는 제안된 SWIPT 수신단 회로의 통신 성능을 보인다. 이 테스트를 위해 수신단 회로에 입력되는 변조 신호는 SDR 플랫폼(NI USRP-2942R)에 의해 생성되며 전력 신호의 출력은 1mW로 고정된다. 통신 신호의 경우, 주파수의 구분을 통해 다른 신호와의 간섭을 최소화하고자 필터링을 거친다.

그림 15는 다양한 베이스밴드 주파수에 대해 통신 부하에서 수신된 시간 영역 사인과 신호를 나타낸다. 이 테스트를 위해서 통신 신호의 전력은 0.01mW, 전력 부하는 200Ω으로 설정된다. 그림 15에서, 베이스밴드 주파수가 증가함에 따라 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그림 16은 수신된 통신 신호 크기의 주파수 영역 변화를 나타낸다. 해당 그래프는 다양한 전력 부하 및 통신 신호 전력에 대한 통신 부하 전압의 크기를 주파수에 따라 보여준다. 주파수 영역 신호의 형태는 주로 LC 필터에 의해 결정되며, 더욱 정교한 필터를 채택할 수 있다.

그림 13, 14, 15, 16에서 살펴볼 때, 우리는 시뮬레이션 결과가 실제 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 7에서 언급한 실험 구성을 통한 실험 결과는

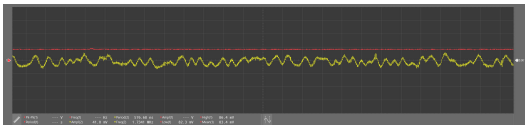


그림 17. 전력 및 통신 신호 파형
Fig. 17. Power and communication signal

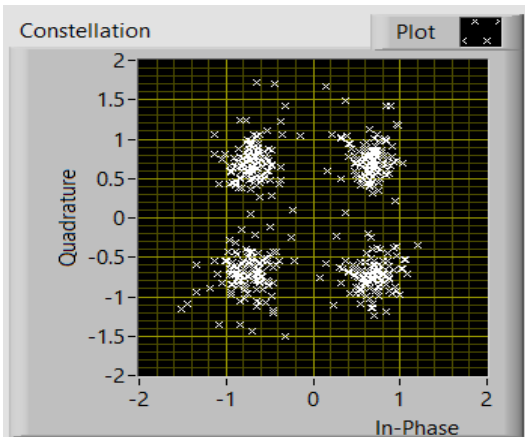


그림 18. QPSK 신호 성상도
Fig. 18. QPSK constellation

그림 17, 18에 나타나 있다. 그림 17은 오실로스코프를 통해 확인한 전력 및 통신 신호 파형을 나타내며, 그림 18은 500개의 서브 캐리어를 가진 QPSK 신호 성상도를 나타낸다.

VI. 결론

본 논문에서는 변조되지 않은 CW(Continuous Wave) 전력 신호와 변조된 통신 신호를 활용하여 동시 무선 전력 및 정보를 전송하는 새로운 SWIPT 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 전력 신호를 단일 주파수 내에 고정하므로 간섭을 최소화할 수 있다. 소비 전력을 최소화한 동시 정보 및 전력 수신이 가능한 수신단 회로를 제안하였으며 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. 추후 테스트 베드의 구현을 통해 동작 범위를 확인하고 성능 향상을 위한 다양한 방법을 모색해 볼 것이다.

References

- [1] K. W. Choi, L. Ginting, P. A. Rosyady, A. A. Aziz, and D. I. Kim, "Wireless-powered sensor networks: How to realize," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 221-234, Jan. 2017.
- [2] K. W. Choi, P. A. Rosyady, L. Ginting, A. A. Aziz, D. Setiawan, and D. I. Kim, "Theory and experiment for wireless-powered sensor networks: How to keep sensors alive," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 430-444, Jan. 2018.
- [3] A. A. Aziz, J. U. Woo, D. I. Kim, and K. W. Choi, "A novel receiver architecture for simultaneous wireless information and power transfer," the *28th JCCI Conf.*, Yeosu, Korea, May 2018.
- [4] T. W. Yoo, and K. Chang, "Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas," *IEEE Trans Microwave Theory and Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, Jun. 1992.
- [5] B. R. Marshall, M. M. Morys, and G. D. Durgin, "Parametric analysis and design guidelines of RF-to-DC dickson charge pumps for RFID energy harvesting," in *Proc. IEEE RFID 2015*, San Diego, CA, Apr. 2015.

황 사 일 (Sa Il Hwang)



2018년 2월 : 한국산업기술대학
교 메카트로닉스공학과 졸업
2018년 3월~현재 : 성균관대학
교 전기전자컴퓨터공학과 석
사과정
<관심분야> 무선전력전송
[ORCID:0000-0002-9411-8987]

최 계 원 (Kae Won Choi)



2007년 8월 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 박사
2010년 9월~2016년 8월 : 서울
과학기술대학교 컴퓨터공학
과 조교수
2016년 9월~현재 : 성균관대학
교 전기전자컴퓨터공학과 부
교수
<관심분야> 무선통신, 무선전력전송
[ORCID:0000-0002-3680-1403]