

## 2-섹션 분기선 결합기를 이용한 동시 정보 및 전력 전송용 고효율 정류기 배열

# Highly Efficient Rectifier Array Using a Two-Section Branch-Line Coupler for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT)

이다주<sup>1</sup> · 김기철<sup>2\*</sup> · 박주만<sup>3\*</sup> · 오준택<sup>4</sup>

Daju Lee<sup>1</sup> · Kichul Kim<sup>2\*</sup> · Juman Park<sup>3\*</sup> · Juntaek Oh<sup>4</sup>

### 요 약

본 논문은 2-섹션 분기선 결합기를 이용한 동시 정보 및 전력 전송 (SWIPT)용 정류기 배열을 설계한 결과를 제시한다. 정류기 배열을 구성하기 위해 2-섹션 분기선 결합기 기반의 전류 재사용 방식을 적용하여 넓은 입력 전력 범위에서 높은 정류 효율을 얻었다. 격리 포트에서 전력 신호를 반사하고, 정보 신호만을 수신할 수 있도록 U형 2차 대역 저지 필터를 제안 및 설계하였다. 설계된 정류기 배열의 부정류기는 전압 체배 구조를 적용하였으며, 입력 전력에 따른 임피던스 변화를 최소화하여 입력 전력에 따른 매칭 안정도를 높였다. 제안한 정류기 배열은 2.45 GHz에서 최대 74.7 %의 효율을 얻었으며, 13 dBm~32 dBm의 넓은 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 효율을 가졌다.

### Abstract

This study presents a rectifier array with a two-section branch-line coupler for simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT). The branch-line coupler-based power recycling technique is introduced to combine two sub-rectifiers to maintain high rectification efficiency within a wide input power range. A U-shaped 2<sup>nd</sup> order band stop filter is proposed to reflect a power signal and transmit an information signal to the isolated port of the coupler. A voltage doubler topology is adopted for the sub-rectifiers to minimize the impedance change to the input power. The proposed rectifier array achieves a wide input power range of 13 dBm~32 dBm for a power conversion efficiency (PCE) > 50 %, with a peak PCE of 74.7 % at 2.45 GHz.

Key words: Branch-Line Coupler, Rectifier Array, SWIPT, Wide Input Power Range, Wireless Power Transfer

### I. 서 론

최근 무선 통신 기술의 급격한 발달로 다양한 전자기

기들이 무선으로 다중 연결되어 정보를 공유하고 동작하게 됨에 따라서, 전자기기들의 전력 소모가 커짐에 따라 자유로운 위치에서 무선으로 충전 가능한 마이크로파 기

「이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 사업의 일환으로 수행되었음(UD200019ED)」

충실대학교 전자정보공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

\*국방과학연구소 국방우주기술센터(Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0003-4614-4248>), 2: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-1652-5576>),

3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-3452-9327>), 4: 조교수(<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>),

· Manuscript received June 28, 2021 ; Revised July 12, 2021 ; Accepted July 19, 2021. (ID No. 20210628-066)

· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

반 무선 전력 전송 기술에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 이를 기반으로 마이크로파 방식의 무선 전력 전송 기술과 무선 통신 기술이 결합된 SWIPT(simultaneous wireless information and power transfer, 동시 정보 및 전력 전송)기술이 최근 주목받고 있으며, SWIPT 기술을 통해서 앞으로 무선 IoT 기기의 기술 고도화와 사용 편의성의 향상을 통해 IoT 시장이 확장될 수 있다.

SWIPT 기술의 개념 정립을 위해서 정보 신호와 전력 신호를 송수신하는 다양한 방식이 연구되고 있다<sup>[3][4]</sup>. 이 중 주파수 분할 방식은 그림 1과 같이 안테나로 수신된 전력 및 정보 신호를 순환기를 통과하여 대역 저지 필터에 의해서 정보 신호만을 선택적으로 얻게 되고, 반사된 비변조된 전력 신호를 정류부에서 획득할 수 있다. 이 방식은 송신부의 전력 증폭기의 선형 성능이 높지 않아도 되며, 정류기가 넓은 대역폭을 가질 필요가 없다는 장점이 있다<sup>[4]</sup>. 하지만 수신 신호의 전력 세기나 대역폭에 따라서 정류기의 효율이 급격하게 달라질 뿐만 아니라, 정류기의 반사손실 또한 달라지기 때문에 수신부로 향하는 정보 신호와 함께 누설되는 전력 신호의 크기가 매우 커지게 되는 문제점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 2-섹션 분기선 결합기를 이용하여 전력 재사용을 통해 정류 효율을 높이고, 정보 신호와 전력 신호를 효과적으로 분배 가능한 주파수 분할 방식의 SWIPT용 정류기 배열을 제안하였다.

## II. 회로 설계

그림 2는 제안하는 SWIPT용 정류기 배열의 블록도이

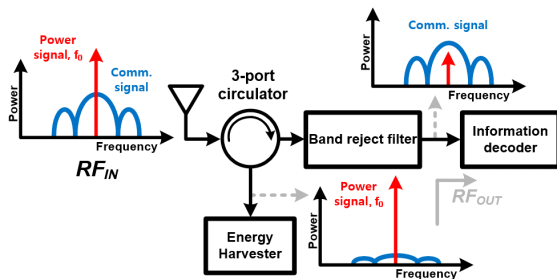


그림 1. 주파수 분할방식 SWIPT 수신기 블록도  
Fig. 1. Block diagram of FS SWIPT receiver.

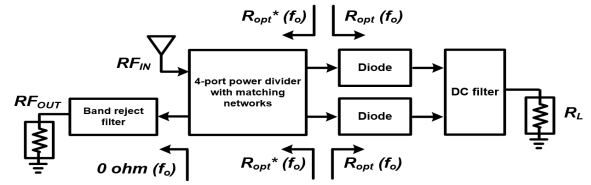
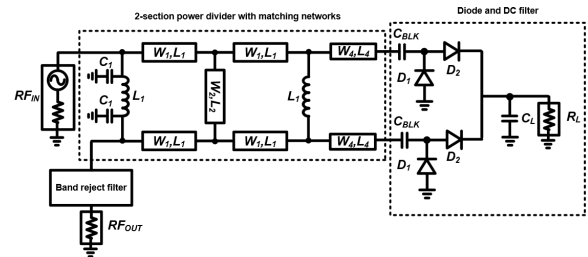


그림 2. 제안하는 정류기 배열 블록도  
Fig. 2. Block diagram of proposed rectifier array.

며, 4포트 전력 분배부, 다이오드, 대역 저지 필터부로 이루어져 있으며, 동작 원리는 다음과 같다. 안테나로 입력된 비변조 전력 신호와 변조 정보 신호가 동시에 입력될 때, 비변조 전력 신호는 전력 분배부에 의해서 2개의 정류부로 나뉘어 신호가 인가가 된다. 이때, 전력 신호의 입력 전력에 따라서 정류부의 임피던스가 달라져 전력 분배부 사이의 부정합이 발생하면, 다이오드로 인가된 전력 신호가 안테나와 수신부 입력으로 반사된다. 이 중 복조부로 반사된 신호는 대역 저지 필터에 의해서 재반사되어 2개의 다이오드로 인가되면서, 부정합과 관계없이 전력이 재사용되어 넓은 입력 전력에 따라서 높은 효율을 가질 수 있다<sup>[5]~[7]</sup>. 변조 정보 신호는 대역 저지 필터부를 선택적으로 통과하여 수신부 입력으로 전달할 수 있다.

그림 3은 제안하는 SWIPT용 정류기 배열의 도식도이다. 변조 신호의 효과적인 전달을 위해서 광대역 특성을 지면서 작은 크기로 구현 가능한 집중 소자 기반의 2-섹션 분기선 결합기로 구성하였다. 제안한 결합기는 추가적인 매칭단 없이 정류부의 최적 임피던스의 복수 정합되어 낮은 삽입손실을 가진다<sup>[7]</sup>.

정류부는 전압 체배기 구조를 사용하여, 높은 전압 스위칭을 견디면서 입력 전력에 따른 다이오드의 커패시턴스



변화가 작아지도록 하였다. 효과적으로 DC 전력을 얻기 위해서 정류부 배열의 출력을 결합하여 DC 통과 필터와 부하로 구성된 출력부를 연결하였다.

그림 4는 구현한 대역 저지 필터를 나타낸 것이며, 변조된 정보 신호는 통과시키고, 비변조 전력 신호만을 반사하기 위해서 협대역 특성의 U형 공진부를 이용한 2차 대역 저지 필터를 제안 및 구현하였다<sup>[8]</sup>. 그림 5는 제안한 2단 대역 저지 필터의 소신호 시뮬레이션 결과이며, 2.45 GHz에서 -19 dB의 삽입손실을 갖는 것을 확인하였다. 그림 6은 제안한 정류기 배열과 부정류기의 PCE(power conversion efficiency, 전력변환효율)을 나타냈으며, 부정

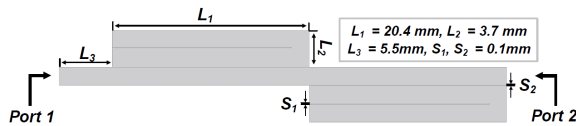


그림 4. 제안한 2차 대역 저지 필터 레이아웃  
Fig. 4. Layout of proposed 2<sup>nd</sup> order notch filter.

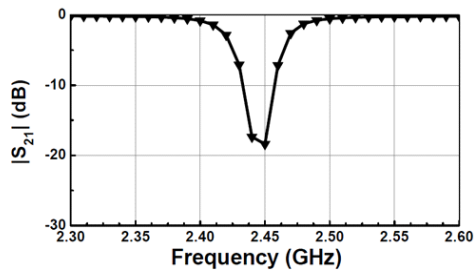


그림 5. 제안한 필터의 소신호 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulated S-parameter of the proposed filter.

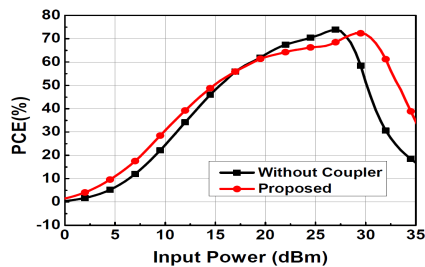


그림 6. 2.45 GHz에서 부 정류기와 제안한 정류기 배열의 PCE 시뮬레이션 결과 ( $R_L=330\Omega$ )  
Fig. 6. Simulated PCE of sub-rectifier and proposed array versus input power at 2.45 GHz ( $R_L=330\Omega$ ).

류기와 비교해서 제안한 정류기 배열은 50 %가 넘는 PCE를 갖는 입력 전력 범위가 3.5 dB 더 넓은 것으로 확인되어 전력 재사용 방식이 효과적임을 알 수 있다.

### III. 측정 결과

그림 7은 SWIPT용 2.45 GHz 정류기 배열의 사진이며, 제작된 회로의 크기는 필터를 포함하여  $30 \times 80 \text{ mm}^2$ 다. PCB는 0.813 mm의 두께와 3.38의 유전율을 갖는 Rogers사의 RO4003C를 사용하였다. 정류부를 위한 다이오드는 HSMS 2822를, 로드 저항  $R_L$ 은  $330\Omega$ 을 사용하였다. 정류기 배열의 정류 특성을 보기 위해서 E4436B 신호 생성기와 AS0825-125 전력 증폭기를 사용하여 측정하였다.

그림 8은 제안한 정류기 배열의 PCE 시뮬레이션 결과 및 측정 결과를 나타낸 것이다. PCE는  $P_{out}/P_{in}$ 의 식을 통해 얻었으며,  $P_{out}$ 은 정류기의 출력 DC 전력,  $P_{in}$ 은 정류기의 입력 전력이다. 50 % 이상의 PCE를 갖는 입력 범위가 13 dBm~32 dBm의 넓은 범위를 갖는 것을 측정 결과를 통해 확인하였다. 그림 9는 정류기 입력에서 대역저지 필

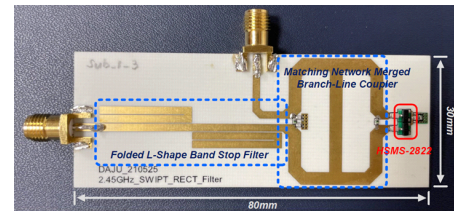


그림 7. 제작된 정류기 배열 사진  
Fig. 7. Photograph of the implemented rectifier array.

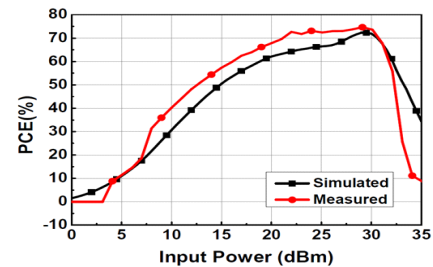


그림 8. 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과 ( $R_L=330\Omega$ )  
Fig. 8. Simulated and measured PCE versus input power at 2.45 GHz ( $R_L=330\Omega$ ).

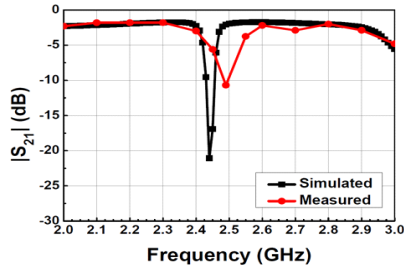


그림 9.  $|S_{21}|$  시뮬레이션 결과 및 측정 결과  
Fig. 9. Simulated and measured  $|S_{21}|$ .

표 1. 정류기 배열 성능 비교  
Table 1. Comparison of rectifier arrays.

	[5]	[6]	This work
Freq. [GHz]	2.45	5.8	2.45
Power range for PCE>50 % [dB]	24	15.5	19
Peak PCE [%]	63	81	74.5
No. of branches	3	2	2
Size [cm <sup>2</sup> ]	N/A	14	24
Need additional PD for SWIPT?	No	No	Yes

터부 출력까지의  $|S_{21}|$  결과를 나타낸 것이며 2.49 GHz의 주파수에서  $-10$  dB를 가졌으며, 공정상의 오차로 인하여 차단 주파수와 대역폭의 오차가 존재하였으나, 추후 선로 간격의 공정 오차를 고려한 보정을 통해 개선 가능하다. 표 1은 정류기 성능을 비교한 것이며, 기존 논문과 비교하여 50 % 이상의 PCE를 갖는 입력 전력의 범위가 넓으며, 최대 PCE의 값 또한 높은 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 동시 정보 및 전력 전송(SWIPT)을 위한 정류기 배열 설계결과를 제시하였다. 2차 대역 저지 필터를 결합한 2-섹션 분기선 결합기를 기반으로 전력 재사용 방식을 적용하여 넓은 입력 범위에서 정류 효율을 높였으며, 동시에 효과적으로 전력 신호와 정보 신호 분리 및 수신하였다. 제작된 정류기 배열은 2.45 GHz에서 50 % 이상의 PCE를 갖는 입력 전력 범위가 19 dB이며, 최대 PCE는 74.5 %이다.

#### References

- [1] D. Kim, H. G. Ryu, "Design of multi-user microwave wireless power transmission system and evaluation of its power transmission efficiency," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 9, pp. 809-815, Sep. 2020.
- [2] T. R. Roh, G. M. Kang, and O. S. Shin, "Feedback simplification scheme for wireless power transfer systems based on beamforming with phased array antenna," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 3, pp. 195-201, Mar. 2019.
- [3] K. W. Choi, S. I. Hwang, A. A. Aziz, H. H. Jang, J. S. Kim, and D. S. Kang, et al., "Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) for internet of things: Novel receiver design and experimental validation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 2996-3012, Apr. 2020.
- [4] H. H. Jang, K. W. Choi, and D. I. Kim, "Novel frequency-splitting SWIPT for overcoming amplifier nonlinearity," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 826-829, Jun. 2020.
- [5] Y. Y. Xiao, Z. X. Du, and X. Y. Zhang, "High-efficiency rectifier with wide input power range based on power recycling," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 6, pp. 744-748, Jun. 2018.
- [6] S. C. Wang, M. J. Li, and M. S. Tong, "A miniaturized high-efficiency rectifier with extended input power range for wireless power harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 617-620, Jun. 2020.
- [7] D. Lee, J. Oh, "Rectifier array based on efficient power recycling with extended ranges of input power and frequency," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 63, no. 5, pp. 1-5, Feb. 2021.
- [8] G. Revathi, R. Kalidoss, "A miniature 2.4 GHz 'L shaped' microstrip band stop filter with spur microstrip line and via-hole grounding," in *2019 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Chennai, Apr. 2019, pp. 176-179.