임피던스 직접 정합 방법에 의한 Rectenna 시스템 소형화 설계

Compact Rectenna System Design Using a Direct Impedance Matching Method

최 태 민 · 한 상 민

Taemin Choi · Sang-Min Han

요 약

본 논문에서는 고조파 공진 억제 특성을 갖는 원형 섹터 안테나와 임피던스 직접 정합 방법을 이용하여 소형화된 rectenna 시스템을 설계하였다. 원형 섹터 안테나의 고조파 억제 특성을 이용하여 정류 회로의 대역 통과 여파기 기능을 수행하였으며, 임피던스 직접 정합 방법에 의해 다이오드 정합 회로를 생략하는 설계가 이루어졌다. 따라서 제안된 시스템의 정류 회로는 대역 통과 여파기와 정합 회로 없이 구현되었으며, 정밀한 동축 급전 공정을 사용하여 시스템의 성능 열화 없이 급전 위치를 변화하며, 안테나 뒷면에 집적하였다. 최적의 정합 특성으로 2.5 GHz 대역에서 설계된 rectenna 시스템은 실험 결과, 52 % 이상의 변환 효율과 1.5 V 이상의 우수한 변환 전압 특성을 나타내었다.

Abstract

In this paper, a compact rectenna system is designed using a circular sector antenna with harmonic-rejecting characteristics and a direct impedance matching method. The system is designed with bandpass filtering performed by the harmonic-rejection of the circular sector antenna and without impedance matching circuit for the diodes by the direct impedance matching technique. Therefore, while the rectifying circuit of the proposed system can be implemented without a bandpass filter and a impedance matching circuit, it is integrated on the back side of the antenna using precise fabrication techniques for coaxial feedings without degrading the system performances corresponding to the feeding points. From the experimental results, the optimized rectenna system has presented excellent performances of a conversion efficiency of more than 52 % and a conversion voltages of more than 1.5 V at 2.5 GHz.

Key words : Rectennas, Active Integrated Antennas, Low-Power Rf Systems, Circular-Sector Antennas, Impedance Matching

I. 서 론

근거리 무선 접속 기술의 집약체인 유비쿼터스 센서 네트워크(USN: Ubiquitous Sensor Network)는 센서의 배터리 수명과 교체 편의성 등에 의해 네트워크의 가용 기간이 결정된다. 따라서 무선 RF를 이

용한 전력 공급 및 충전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 요구되는 부가 회로의 소형화는 센서 네트워크의 성공적 운영을 결정하게 된다^{[1][2]}. rectenna 시스템은 RF 신호를 DC 전원으로 변환하는 장치로서 마이크로웨이브를 이용한 원거리 무선 전력 전송 방법으로 연구되어 왔다^{[3][4]}. 이는 센서 네

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

· Manuscript received November 30, 2012 ; Revised February 18, 2013 ; Accepted February 19, 2013. (ID No. 20121130-01S)

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

트위크 내의 수많은 센서들을 충전하는 효율적인 방식으로 고려되고 있으며, 임피던스 정합 기술^{[5]~[7]}, 고 효율화 및 소형화^{[8],[9]}의 기술적 이슈가 계속 논의되고 있다.

본 논문에서는 원형 섹터 안테나의 고조파(Harmonic) 제거 특성^[8]과 안테나 급전점 조정에 의한 임피던스 직접 정합 방법을 이용한 소형화된 정류 회로를 갖는 rectenna 시스템을 제안하였다. 설계된 시스템은 기존 정류 회로의 대역 통과 여파기(BPF)와 임피던스 정합 회로가 제거되어 부하 저항과 다이오드만으로 구성되어 소형화된 형태로 센서 디바이스에 장착된다. 본 논문은 서론에 이어 제2장에서 원형 섹터 안테나 직접 정합 방법을 이용한 rectenna 설계에 대해 기술하고, 제3장에서는 시스템의 제작 및 측정을 통한 성능 평가를 하였으며, 끝으로 제4장에서 결론을 맺었다.

II. 원형 섹터 안테나의 직접 정합 방법을 이용한 Rectenna 설계

그림 1은 기존의 일반적인 설계에 의한 rectenna 구조를 나타내고 있다. 안테나를 통해 들어온 RF 신호는 대역 통과 여파기(BPF)를 통과하여 Schottky 다이오드에 의해 DC를 포함한 고조파 성분을 생성하게 된다. 여기서 생성된 고조파 성분의 안테나를 통한 재방사를 저지하기 위해 대역 통과 여파기를 사용하며, 반사된 고조파 신호는 다이오드에 의해 재사용되어 변환 효율을 높게 된다. 또한, 양단이 50 옴 부하에 대해 설계된 대역 통과 여파기의 정합을 위해 다이오드와의 사이에 최소한의 정합 회로가 요구된다. 다이오드에서 생성된 DC 전원은 DC 성분만을 통과시키는 저역 통과 여파기(LPF)를 통과하여 부하 저항에 전달된다. 본 논문에서는 원형 섹터 안테나와 임피던스 직접 정합 방법에 의해 그림의 점

그림 1. Rectenna 시스템 구조

Fig. 1. Configuration of the rectenna system.

(a) 원형 섹터 안테나 레이아웃

(a) Layout of the circular sector antenna

(b) 반사 손실 측정 결과

(b) Measured return loss

그림 2. 원형 섹터 안테나

Fig. 2. Circular sector antenna.

선부분인 대역 통과 여파기와 임피던스 정합 회로가 제거된 간단한 구조의 정류 회로를 구현하였다.

그림 2(a)는 2.5 GHz에서 설계된 원형 섹터 안테나의 레이아웃을 보이고 있다. 원형 섹터 안테나의 고조파 억제 특성은 섹터의 크기가 120도이고, 섹터 면으로부터 30도 이격된 선(x축) 상에 급전하여 얻을 수 있으며, 공진 주파수는 원형 패치 안테나의 공진 주파수 설계에 기초하여 설계되어진다^[8]. 사용된 기판은 유전율 2.2, 두께 31 Mils인 RT/Duroid 5880을 사용하였으며, 반경 r 은 19.8 mm이고, 50옴 정합 점은 중심으로부터 2.79 mm 떨어진 점이다. 그림 2(b)는 50옴 정합된 원형 섹터 안테나의 반사 손실을 나타내고 있다. 측정된 중심 주파수는 2.505 GHz이고, 대역폭은 30 MHz이다. 일반적인 안테나의 공진 특성에 의해 얻을 수 있는 5.0 GHz와 7.5 GHz 대역에

그림 3. 원형 섹터 안테나의 입력 임피던스 측정 결과
Fig. 3. Measured input impedance of circular-sector antenna.

서의 2차 및 3차 공진은 발생하지 않았으며, 3.97 GHz와 6.24 GHz에서 약한 공진 현상이 관찰되었다. 따라서 설계된 원형 섹터 안테나를 사용할 경우, 다이오드에서 생성된 고조파 성분의 신호들이 안테나를 통해 재방사되지 않으므로, 이 역할을 수행하는 rectenna의 첫 단 대역 통과 여파기의 생략이 가능함을 알 수 있다. 본 논문에서는 입력 임피던스의 조절을 위해 급전점을 x 방향을 따라 이동하며 임피던스의 변화를 측정하였다. 그림 3은 급전점이 외각으로 이동함에 따른 입력 임피던스의 변화를 실수와 허수로 나누어 나타낸 그래프이다. 실수와 허수 임피던스 모두 비교적 일정한 경향성을 보이며 변화함을 알 수 있다. 이를 이용하여 정류 회로의 임피던스에 맞는 직접 정합 급전점을 찾게 된다.

그림 4는 2단 다이오드와 4단의 LC 저역 통과 여파기, 부하 저항으로 구성된 정류 회로의 회로도를 보이고 있다. 마이크로파 주파수에서 동작하기 위해 스위칭 속도가 높은 Schottky 다이오드로 Agilent Technologies사의 HSMS-2850을 사용하였고, 높은 변환 전압을 얻기 위해 2단의 다이오드로 구성하였다. 2단의 다이오드는 동일한 출력 전력에서 2배의 출력 전압을 얻을 수 있어 높은 전력으로 구동하는 소자의 전원으로 활용이 가능하다^{[4],[10]}. 4단의 저역 통과 여파기 회로는 $L_1=4.7$ nH, $C_1=2.7$ pF, $L_2=5.6$ nH, $C_2=2.2$ pF로 설계되었다. 정류 회로의 입력 임피던스는 부하 저항에 의해 영향을 받으므로 부하 저항의 변화에 대한 임피던스 변화를 측정하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 4. Rectenna 정류회로의 회로도
Fig. 4. Rectifying circuit for the rectenna.

그림 5. 부하 저항의 변화에 따른 정류 회로 입력 임피던스 측정 결과
Fig. 5. Measured input impedances of the rectifying circuit for variable load resistances.

III. Rectenna 시스템 제작

본 장에서는 설계된 원형 섹터 안테나와 정류 회로를 제작하여 직접 정합에 의한 최적 시스템을 구현하였다. 설계된 원형 섹터 안테나와 정류 회로는 각각 동축 급전 방식의 프로토타입으로 설계하여 기관 양면에 구현함으로써 시스템 form-factor를 최소화하였다. 일정한 임피던스 특성과 급전 회로의 특성을 유지하기 위해 Via Hole의 내부와 회로 기관 접촉면을 도금하여 급전 구성의 실험적 오차를 줄이고자 하였다.

그림 6(a)에서 보이는 바와 같이 마이크로스트립 패치 형태로 설계된 원형 섹터 안테나의 접지면 뒤에 회로를 접착하고, 동축 급전 방식으로 연결하여 심플하고 소형화가 가능하도록 구성하였다. Via hole의 구성은 그림 6(b)와 같이 hole 공정 이후에 hole 내부에 copper를 이용한 코팅을 하여 via와의 접촉을 좋게 하여 항상 일정한 동축 급전 특성을 유지할 수 있도록 하였다. 정류 회로 기관의 뒷면은 모

(a) Rectenna 구조 단면
(a) Cross-section of the rectenna configuration

(b) Via 공정 구조
(b) Via construction

그림 6. 동축 급전을 이용한 회로 단면도
Fig. 6. Cross-section of the coaxial-fed circuit.

두 식각되어 안테나 접지면과 밀착함으로써 접지면을 공유하도록 제작되었다. 또한, 공통 접지면에서 정류 회로와 안테나를 연결한 via 주위는 원형으로 식각하여 신호 선인 via와 접지면 간에 Short가 되지

그림 7. 급전 위치에 따른 원형 섹터 안테나의 입력 임피던스 변화
Fig. 7. Input impedance trance of the circular sector antenna for feeding points.

표 1. 급전 위치에 따른 입력 임피던스 값
Table 1. Input impedance values of feeding points.

Feeding point	Input impedance(Ohm)
A	$32+j47$
B	$71+j14$
C	$68-j35$
D	$59-j60$
E	$30-j64$

않도록 전기적으로 고립(isolation)시키는 공정처리를 하였다.

직접 정합 방식을 적용하기 위해 다양한 급전점을 갖는 원형 섹터 안테나를 설계하였다. 그림 2(a)에서 나타낸 A-E 위치에서 동축 급전을 하여 각 안테나의 입력 임피던스를 관찰하였다. 측정된 임피던스의 궤적(trace)은 그림 7에서 보는 바와 같으며, 각 점의 입력 임피던스 값을 표 1에서 나타내었다. A-E의 안테나 중심으로부터의 거리는 각각 1, 2, 3, 4, 6 mm이다.

측정된 정류 회로와 안테나의 입력 임피던스를 비교하여 최적의 정합점을 설계하였다. 300옴 부하를 갖는 정류 회로의 입력 임피던스와 공액정합 임피던스인 원형 섹터 안테나의 입력 임피던스를 급전점 B점 y방향 0.5 mm 지점에 설정하였다. 설정된 안테나의 입력 임피던스는 $68-j35$ 옴으로 정류 회로와 동축 급전 연결에 의해 직접 정합하였다.

IV. 시스템 측정 및 성능평가

제작된 rectenna 시스템의 성능 측정을 위해 아래 그림 8과 같이 측정 셋업을 구성하였다. 측정은 무반향실(anechoic chamber)에서 진행되었으며, 신호발생기에서 발생시킨 2.5 GHz의 CW RF 신호는 충분한 전송 전력 확보를 위해 전력증폭기를 통해 증폭된 후 방사되었다. 안테나 면에서의 수신 전력은 파워 미터를 통해 측정하였으며, 수신 RF 전력에 대한 변환 DC 전압을 측정하였다. 측정시 안테나 간의 원거리계 최소 거리 d 는 0.13 m 이상이고, 변환된 전압은 멀티미터로 측정하였다.

그림 9는 제안된 원형 섹터 안테나의 직접 정합 방식을 이용한 rectenna의 변환 효율과 변환 전압을

그림 8. Rectenna 시스템 측정 셋업

Fig. 8. Measurement set-up for the rectenna system.

(a) 변환 효율

(a) Conversion efficiencies

(b) 변환 전압

(b) Conversion voltages

그림 9. 측정된 rectenna의 변환 효율 및 변환 전압

Fig. 9. Measured conversion efficiencies and conversion voltages of the proposed rectenna.

보여주고 있다. 51옴으로부터 620옴까지의 다양한 부하 저항 값에 대한 출력 전압을 수신 전력에 따라 측정하였으며, 기존의 설계 구조와 비교하여 유사한

(a) 앞면

(a) Front side

(b) 뒷면

(b) Back side

그림 10. 제작된 rectenna 사진

Fig. 10. Photographs of the implemented rectenna.

특성을 나타내었으며, via 공정의 실험적 오차와 변환 손실에 의해 효율이 약간 저하되는 특징을 나타내었다. 임피던스 직접 정합에 의해 최적의 정합을 수행하였던 300옴 부하 저항에서 최대 52 %의 변환 효율을 얻을 수 있었으며, 변환 전압은 정류 회로의 620옴 부하 저항에 대해 최대 1.5 V를 나타내었다.

그림 10은 제작된 rectenna 시스템의 전·후면 사진을 보이고 있다. 안테나의 크기는 $19.8 \times 19.8 \times 1.6 \text{ mm}^3$ 이며, 제안된 전체 시스템 PCB 크기는 기존의 설계 방식에 비해 76.7 % 소형화된 설계가 가능하였다^[8]. 또한, 전체 시스템 크기가 의존하도록 구성되어 있으므로, 추후 기관 재질의 변화를 통해 추가적인 소형화가 가능할 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 고조파 신호 제거 특성을 갖는 원형 섹터 안테나의 임피던스 직접 정합 방법을 이용하여 2.5 GHz 대역의 rectenna 시스템 소형화를 제안하였다. 제안된 rectenna 시스템은 대역 통과 여파기와 정합 회로 없이 정류 회로를 구성함으로써 시스템의 form-factor를 최소한으로 구현하였다. 또한, 정밀하고 안정적인 동축 급전 방식을 구현하여 회로의 성능 저하 없이 일정한 설계 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 rectenna 시스템은 배터리 충전에 필요한 충분한 변환 전압과 변환 효율을 나타내었으며, 최소한의 회로 실장으로 구현되었다. 이는 무선 센서 네트워크의 충전회로 뿐만 아니라, 저 전력에서 구동하는 마이크로 로봇, 인체에 삽입되는 센서와 같은 다양한 소형 전자 기기의 전력 회로 응용 기술과 접목이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. A. C. Theeuwes, H. J. Visser, M. C. V. Beurden, and G. J. N. Doodeman, "Efficient, compact, wireless battery design", *Proc. European Microw. Conf. 2007*, pp. 991-994, Oct. 2007.
- [2] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, "무선 에너지 전송 기술", ETRI 전자통신동향분석, 23(6), pp. 59-69, 2008년 8월.
- [3] 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 Propag. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 306-309, 2011.
- [4] 최태민, 이석재, 이희중, 임종식, 안달, 한상민, "DGS Rectenna를 이용한 Wake-Up 수신기 시스템 설계", 한국전자과학회논문지, 23(3), pp. 377-383, 2012년 3월.
- [5] A. S. Andrenck, Y. Ikeda, M. Nakayama, and O. Ishida, "Impedance matching in active integrated antenna receiver front end design", *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, vol. 10, pp. 16-18, Jan. 2000.
- [6] D.-J. Kim, Y.-M. Moon, S.-H. Park, Y.-E. Kim, and K.-S. Min, "A small monopole antenna with novel impedance matching structure", *Proc. European Microw. Conf. 2006*, pp. 819-822, Sep. 2006.
- [7] W. Lin, Q.-X. Chu, "A novel RFID tag antenna for matching complex impedances on 915 MHz and 2.45 GHz bands", *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. 2010*, pp. 2248-2251, Dec. 2010.
- [8] J. Y. Park, S.-M. Han, and T. Itoh, "A rectenna design with harmonic-rejecting circular-sector antenna", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 52-54, Dec. 2004.
- [9] 최태민, 이석재, 임종식, 한상민, "원형 섹터 안테나 임피던스 직접 정합 방법에 의한 Rectenna 설계", 한국전자과학회 종합학술발표회논문집, 22(1), p. 42, 2012년 11월.
- [10] T. L. Floyd, *Electronic Devices*, 8th Ed., Prentice Hall, NJ, 2008.

최 태 민

2011년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2013년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2013년 1월~현재: AAC Technologies 전임연구원
 [주 관심분야] RF/Microwave 회로 설계, RF Systems, NFC Antenna

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