

IoT를 위한 RF 신호 기반의 에너지 하베스팅 네트워크 기술

이 기 송

군산대학교

I. 서 론

기존의 통신 및 네트워크 분야에서는 유선의 전력 케이블을 이용하여 센서에 전력을 공급해주고, 센서는 이렇게 공급받은 전력을 이용하여 데이터를 측정하고, 유선의 통신 케이블을 통해 이를 공유하였다. 이러한 경우 네트워크 구성 비용이 크게 증가하게 되며, 설치할 수 있는 센서의 수도 한정된다. 이를 해결하기 위한 대안 방안으로써 유선의 케이블 대신 배터리를 센서에 내장하여 전력 공급원으로 사용하고, 무선 통신 기능을 센서에 탑재하여 데이터를 공유하는 무선 네트워크 기술이 제안되었다. 하지만 이 경우에도 센서의 배터리 수명이 다하는 경우, 수많은 센서의 배터리를 하나씩 교환해 줘야 되는 번거로움이 발생할 뿐만 아니라, 네트워크 유지 비용도 크게 상승하는 문제점이 있다.

이러한 센서의 전원 문제를 해결하기 위해 최근 에너지 하베스팅 네트워크(Energy Harvesting Network: EHN) 분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 에너지 하베스팅이란 열, 진동, 빛, RF 신호 등과 같은 주변의 환경 에너지로부터 에너지를 획득하여 전원으로 사용하는 기술을 말한다. 즉, 버려지거나 활용되지 않은 자원으로 부터 에너지를 수확하고 재생산할 수 있으므로, 최근 신재생 에너지 기술로써 그 중요성이 점점 커지고 있다. 특히 무선 통신 및 네트워크 분야에서는 RF 신호를 이용하여 에너지 하베스팅을 하게 되면 정보와 전력의 동시 전송(Simultaneous information and power transfer: SWIPT)이 가능하다는 이점이 있다. 또한, 송신기(Transmitter)의 하드웨어에 RF 에너지 발생을 위한 추가적인 모듈 장착이나 수정이 필요치 않으며, 수신기(Receiver)에서도 RF 에너지를 획득하기 위한 모듈만 추가 장착하면 기존의 통신을 위한 안테나 및 모듈을 그대로 공유하여 사용할 수 있다. 또한, 열, 진동, 빛 등의 다른 환경 에너지는 지형이나 기상 등의 영향을 많이 받지만, 현대 사회에는 RF 신호가 어느 곳이라도 산재해 있으므로 이러한 외부 환경적 요

소에 비교적 영향을 덜 받는다. 이 뿐만 아니라, 센서 및 디바이스에 무선으로 전력을 전송하기 위해 제안된 자기 유도 및 자기 공진 방식과 비교하더라도 RF 에너지 하베스팅은 다음과 같은 장점을 갖는다. 자기 유도 방식은 전력 전송 가능 거리가 수 mm~cm 정도로 매우 짧으므로 제한된 application에서만 사용이 가능하다^[1]. 또한, [그림 1]과 같은 자기 공진 방식은 안테나 지름의 2~3배 정도까지 전력 전송 거리를 확장시켰으나, 공진 특성으로 인해 자기장의 전달이 방향성을 갖기 때문에 넓은 범위에 산재하는 많은 수의 디바이스를 동시에 충전하기에는 한계가 있다^[2].

RF 신호를 이용한 에너지 하베스팅의 경우, 획득할 수 있는 전력의 양은 자기 유도나 자기 공진 방식에 비하여 적지만, RF 신호가 전 방향으로 방사한다는 특성으로 인해 넓은 범위에 분포하는 많은 수의 센서를 동시에 충전할 수 있으며, 거리도 수 m 이상으로 확장이 가능하다. 특히 사물인터넷(Internet-of-Thing: IoT)의 경우, 수 mW의 전력으로도 센서의 동작이 가능하므로, 위와 같은 장점을 갖춘 RF 신호를 이용한 에너지 하베스팅이 더 적합한 무선충전 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 RF 신호를 이용하여 정보와 전력



[그림 1] 자기공진 기반의 무선전력전송^[2]

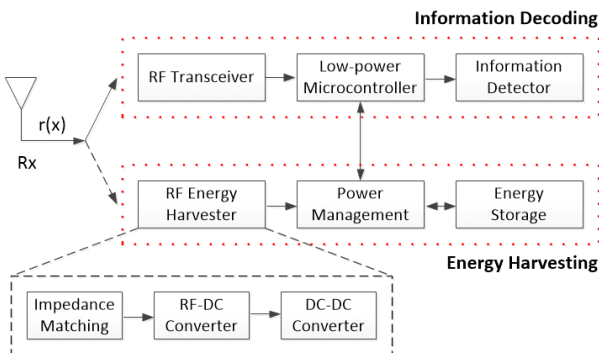
을 동시에 전송할 수 있는 에너지 하베스팅 네트워크 기술 및 연구 동향을 다룰 것이다.

II. 에너지 하베스팅 네트워크 구조

에너지 하베스팅 네트워크의 수신 노드에는 정보 해석(Information Decoding: ID)과 전력 획득(Energy Harvesting: EH)을 위한 모듈이 각각 존재한다. 수신 노드는 두 가지 모드 중 한 모드를 선택하여 동작할 수도 있고, 시간이나 전력 등의 자원을 적절히 배분하여 동시에 두 모드의 동작을 지원할 수도 있다. [그림 2]는 이와 같은 수신노드의 개념도를 나타낸다.

수신 노드의 정보 해석을 위한 모듈은 RF 신호를 통해 정보를 주고받는 RF transceiver, 데이터를 처리하고 관리하는 low-power microcontroller, 미가공 데이터를 의미 있는 데이터로 변환해 주는 information detector로 구성된다. 반면, 전력 획득을 위한 모듈은 RF 신호로부터 에너지를 획득하는 RF energy harvester, 획득한 전력을 실시간으로 정보 해석을 위해 사용할 것인지, 여분의 에너지로써 배터리에 저장할 것인지를 결정하는 power management 회로, 획득한 전력을 추후에 사용하기 위해 저장하는 energy storage로 구성된다. 여기서 RF energy harvester는 안테나에서 획득할 수 있는 전력을 최대화하기 위한 impedance matching 회로, 교류의 RF 신호를 DC 신호로 변환하고 증폭해 주기 위한 RF-DC converter와 DC-DC converter로 이루어져 있다.

III. 에너지 하베스팅 네트워크 연구 동향



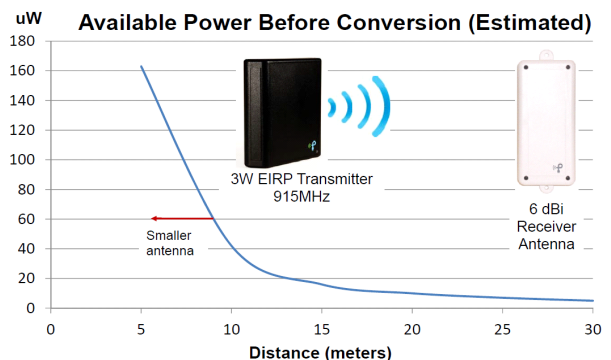
[그림 2] 에너지 하베스팅 네트워크 수신 노드 개념도

3-1 RF 에너지 하베스팅 기술

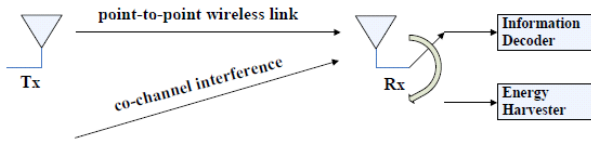
‘저전력의 RF 에너지의 획득이 실제로 가능한가?’에 대한 물음에 답하기 위하여 RF 에너지 하베스팅의 가능성(feasibility) 검증을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대표적으로 수신 노드에서 획득한 RF 에너지를 고효율의 DC 에너지로 변환하기 위한 RF-DC 변환 시스템에 대한 연구가 진행되었으며^[3], 실제 RF 에너지 하베스팅 시제품을 제작한 후 런던에서 도시 규모의 실험을 통해 기술의 실용성과 호환성을 검증하고자 하는 연구도 수행되었다^[4]. 이를 통해 대기 중에 존재하는 ambient RF 신호로부터 초당 수 uW의 전력을 수집할 수 있음을 보였다. 미국의 Powercast사에서는 915 MHz의 주파수에서 최소 -11 dBm의 크기를 갖는 수신 신호로부터 에너지 획득이 가능한 RF 에너지 하베스팅 모듈을 만들어 시판하였다^[5]. [그림 3]은 미국의 Powercast사에서 개발한 RF 에너지 하베스팅 모듈 P2110의 거리에 따른 획득 가능한 에너지량을 보여준다.

3-2 Point-to-point 링크 구조에서의 RF 에너지 하베스팅 네트워크 기술

송신기와 수신기가 각각 1개씩 존재하는 간단한 point-to-point 링크 구조를 갖는 에너지 하베스팅 네트워크에서는 SWIPT를 가능하게 하기 위한 송수신 노드의 동작 방안 및 설계에 대한 연구가 초창기에 활발히 진행되었다. 먼저, 송수신 노드에서 채널 상황 정보(Channel State Information: CSI)를 정확히 알고 있다고 가정하고, 이에 따라 송신 노드에서의 채널 적응적 파워 컨트롤(power control) 및 수신 노드에서의



[그림 3] Powercast사의 P2110 모듈의 획득 가능한 에너지량^[5]



[그림 4] SWIPT를 위한 시간 스위칭^[6]

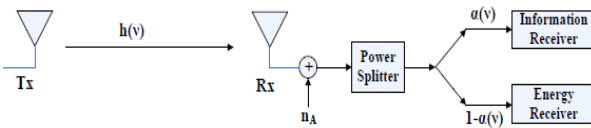
정보 해석과 전력 획득에 할당하는 시간을 조절하는 시간 스위칭(time switching) 기법에 대한 연구가 진행되었다^[6].

또한, [그림 5]와 같이 송수신 노드에서 CSI를 정확히 알고 있다고 가정하고, 이에 따라 수신 노드에서의 수신한 전체 RF 에너지를 적절한 레벨로 나누고, 정보 해석을 위한 회로와 전력 획득을 위한 회로로 분배해주는 파워 스플리팅(power splitting) 기법에 대한 연구도 존재한다^[7].

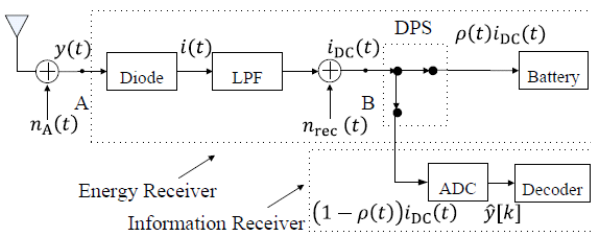
뿐만 아니라 [그림 6]에서 볼 수 있듯이, 정보 해석과 전력 획득을 위해 따로 독립적으로 존재하던 모듈을 통합하여 SWIPT를 위한 효율적인 수신 노드의 회로 디자인에 대한 연구 역시 수행되었다^[8].

3-3 Multi-receiver가 존재하는 셀룰러 환경에서의 RF 에너지 하베스팅 네트워크 기술

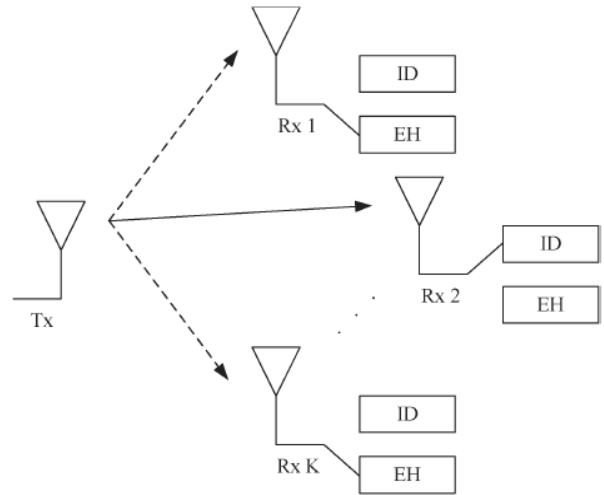
네트워크에 다수의 수신기가 존재하는 경우, [그림 7]과 같이 한 쌍의 노드가 통신을 하는 동안 발생하는 RF 신호를 이용하여 그 외의 다른 노드들은 전력을 획득할 수 있다.



[그림 5] SWIPT를 위한 파워 스플리팅^[7]



[그림 6] SWIPT를 위한 integrated 수신 노드 architecture^[8]

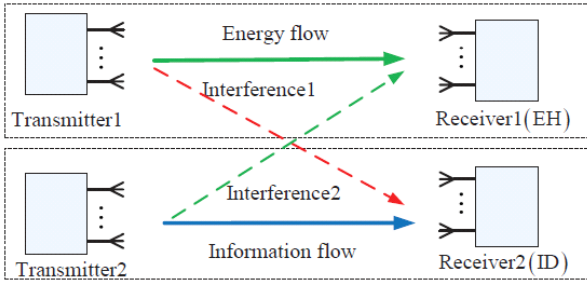


[그림 7] Multi-receiver가 존재하는 셀룰러 환경의 에너지 하베스팅 네트워크^[10]

Multi-receiver 환경의 에너지 하베스팅 네트워크에서는 에너지 하베스팅 조건을 고려하여 시스템의 성능을 향상시키기 위한 자원 관리 기법에 대한 연구가 활발하다. 한 예로, 에너지 하베스팅 네트워크에서의 에너지 효율성(energy efficiency)을 최대화하기 위한 스케줄링, 파워 할당, 파워 스플리팅 기법에 대한 연구가 수행되었다^[9]. 최근에는 실제 네트워크 특성을 반영하기 위해 채널 추정 오차가 존재하는 환경에서 네트워크의 에너지 효율성 향상을 위한 자원 할당 기법 역시 제안되었다^[10]. 또한, 다중 사용자 직교 주파수 분할(Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 기반의 에너지 하베스팅 네트워크에서 시스템 throughput을 최대화하기 위한 파워 할당, 시간 스위칭, 파워 스플리팅을 연계한 계층 교차적 자원 관리 기법에 대한 연구도 존재한다^[11].

3-4 다중 안테나/Relay 기반의 RF 에너지 하베스팅 네트워크 기술

다중 안테나(Multi-antenna) 기반의 에너지 하베스팅 네트워크에서는 다중 안테나 프로세싱 기법에 대한 연구가 활발하다. 대표적으로 다중 안테나 환경에서 에너지 하베스팅 조건을 만족시키면서 데이터 전송률을 최대화할 수 있는 안테나 선택 및 안테나 covariance matrix 최적화 연구가 진행되었고^[12], [그림 8]과 같이 2개의 수신 노드가 존재하는 다

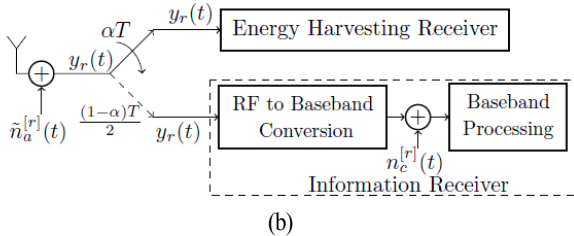
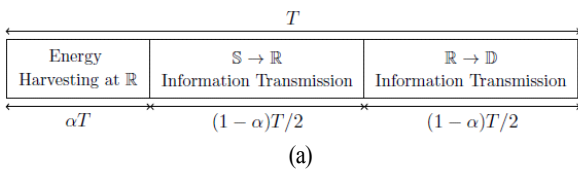


[그림 8] 에너지 하베스팅 네트워크에서 SWIPT 성능에 대한 간섭 채널 영향^[13]

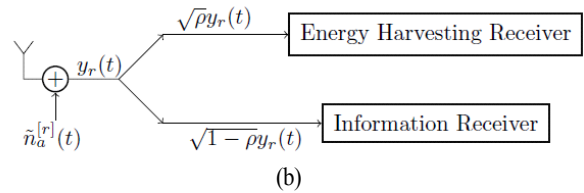
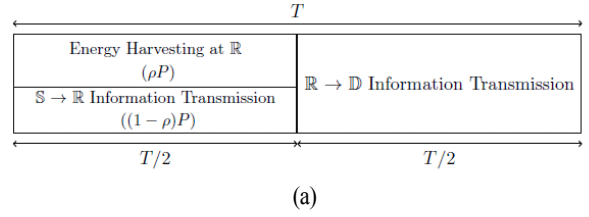
중 안테나 에너지 하베스팅 네트워크에서 SWIPT 성능에 대한 간섭 채널의 영향을 분석한 연구도 존재한다^[13].

릴레이(Relay) 기반 에너지 하베스팅 네트워크에서는 새로운 릴레이 프로토콜 정의 및 릴레이 동작 방안에 대한 연구가 활발하다. 예를 들어, 릴레이 기반 에너지 하베스팅 네트워크에서 릴레이 노드는 자체 전원을 갖고 있지 않는 무전원 노드로써, 송신기가 전송하는 RF 신호로부터 전원을 충전한 후 이를 이용하여 수신기에 데이터를 전송해주는 역할을 수행한다. 이와 관련하여, [그림 9]와 [그림 10]에서 볼 수 있듯이 에너지 하베스팅을 위한 시간 스위칭 기반/파워 스플리팅 기반의 relay 프로토콜 및 동작 방안에 대한 연구^[14] 및 relay 선택 방안에 대한 연구가 수행되었다^[15].

IV. 결 론



[그림 9] 시간 스위칭 기반 릴레이 기법^[14]



[그림 10] 파워 스플리팅 기반 릴레이 기법^[14]

기존 무선 네트워크의 경우, 센서에 유선 케이블을 연결하거나 배터리를 장착하여 전력을 공급해 주었다. 이러한 방법은 네트워크의 확장성과 적용 범위의 다양성을 제한하며, 비용 및 편의성 측면에서도 한계를 보인다. 하지만 RF 신호로부터의 정보 해석과 전력 획득의 2가지 기능이 동시에 구현 가능하다면 위에 언급한 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 통신 및 네트워크 분야의 기술력과 파급력을 한 단계 더 끌어올릴 수 있다. 특히, 통신 기술의 발전에 비해 상대적으로 연구 진행 속도가 늦었던 센서의 전원 문제 해결을 통해, 기존의 기술적 한계 극복 및 사회 현안 문제 해결에 기여할 수 있는 새로운 ICT 융합 패러다임 창출이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 에너지 하베스팅 네트워크 기술은 최근 화두가 되고 있는 IoT 시스템 구현에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 사물 간의 통신을 위해서는 심미성이나 센서 부착의 안전성 측면에서 봤을 때 사물 내부에 센서가 내장되어야 한다. 이러한 상황에서는 센서의 배터리 교체가 쉽지 않으므로, 무전원으로 동작하는 센서를 개발하기 위한 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다. 그러므로 에너지 하베스팅 네트워크 기술은 사물 간의 통신 및 센서의 배터리 문제를 해결하기 위한 IoT의 핵심 기술이라고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 에너지 하베스팅 네트워크 기술은 열악한 환경적 특성으로 인해 사람의 접근이 쉽지 않은 재난 안전망 및 군사 통신망 등에도 직접적으로 적용이 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Hirai, T. W. Kim, and A. Kawamura, "Study on intelligent battery charging using inductive transmission of power and information", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 2, pp. 335-345, Mar. 2000.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Sci. Express*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [3] T. Le, K. Mayaram, and T. Fiez, "Efficient far-field radio frequency energy harvesting for passively powered sensor networks", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 43, no. 5, pp. 1287-1302, May 2008.
- [4] M. Pinuela, P. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715-2726, July 2013.
- [5] Powercast documentation, Available: <http://Powercastco.com/>
- [6] L. Liu, R. Zhang, and K.-C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 288-300, Jan. 2013.
- [7] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Wireless information and power transfer: A dynamic power splitting approach", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 9, pp. 3990-4001, Sept. 2013.
- [8] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4757-4767, Nov. 2013.
- [9] D. W. K. Ng, E. S. Lo, and R. Schober, "Wireless information and power transfer: energy efficiency optimization in OFDMA systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 12, pp. 6352-6370, Dec. 2013.
- [10] K. Lee, J. Hong, "Energy-efficient resource allocation for simultaneous information and energy transfer with imperfect channel estimation", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 4, pp. 2775-2780, Apr. 2016.
- [11] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer in multiuser OFDM systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, pp. 2282-2294, Apr. 2014.
- [12] S. Zhao, Q. Li, Q. Zhang, and J. Qin, "Antenna selection for simultaneous wireless information and power transfer in MIMO systems", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 5, pp. 789-792, May 2014.
- [13] J. Park, B. Clerckx, "Joint wireless information and energy transfer in a two-user MIMO interference channel", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 4210-4221, Aug. 2013.
- [14] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013.
- [15] I. Krikidis, "Simultaneous information and energy transfer in largescale networks with/without relaying", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 3, pp. 900-912, Mar. 2014.

≡ 필자소개 ≡

이 기 송



2007년 8월: 한국정보통신대학교 전자공학과
(공학사)

2009년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과
(공학석사)

2013년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과
(공학박사)

2013년 9월~2015년 2월: 한국전자통신연구

원 연구원

2015년 3월~현재: 군산대학교 정보통신공학과 조교수

[주 관심분야] Energy Harvesting Networks, Wireless Power Transfer,
Network Optimization