

주파수 선택적 페이딩 맵 기반 효율적 무선 에너지 하비스팅 알고리즘

박지호*, 황유민*, 송유찬*, 김진영*

Efficient RF Energy Harvesting Algorithm based on Frequency Selective Fading Map

Ji Ho Park*, Yu Min Hwang*, Yu Chan Song*, and Jin Young Kim*

요 약

최근, 휴대용 무선 통신 단말기 사용이 보편화 되고 다양한 통신 기술이 서비스되면서 단말의 소형화, 사용 지속성 측면에서 에너지 효율이 중요하게 다루어지고 있다. 단말이 지속적으로 다양한 통신서비스를 제공받기 위해 단말 주변 수 m 내에서 RF 에너지 신호를 방사하는 source로부터 RF 신호를 자원으로 무선으로 전력을 충전하는 무선 에너지 하비스팅 시나리오를 가정한다. 본 논문에서는 무선 에너지 하비스팅 효율을 증대시키기 위해 RF 신호를 송신하는 송신부(Tx)와 에너지 하비스팅 장치인 수신부(Rx)간 주기적으로 할당된 전체 주파수 범위 내에서 하비스팅 효율 맵을 형성하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘을 통해서 주파수에 따른 페이딩 정도를 파악하고 가장 높은 효율 값을 갖는 주파수를 선택하여 source 신호로 송신하여 에너지 하비스팅 효율 최적화를 달성한다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 제안한 알고리즘을 통해 가장 높은 효율을 갖는 신호는 가장 낮은 효율의 신호에 비해 동일 거리에서 최대 4.45dB 이득이 있음을 확인하였다.

Key Words : RF energy harvesting algorithm, Frequency selective fading, Small-scale fading, Frequency diversity, Fading map.

ABSTRACT

Recently, with developments of various networks, devices and various services, energy efficiency has become one of the most crucial issues with respect to sustainability of mobile devices. For connecting to networks seamlessly to offer services, a scenario of RF energy harvesting which supplies energy to wireless devices with RF signals is assumed. To increase the efficiency of RF energy harvesting, this paper proposes a RF energy harvesting algorithm which is based upon a frequency selective fading map. Through the algorithm, a receiver of mobile device can get fading information at each frequency and select a frequency which has the best quality. At the end, the simulation result demonstrates its superiority by showing a 4.45dB improvement in comparison to a deep fading frequency point.

I. 서 론

최근, 휴대용 무선 통신 단말기 사용이 보편화 되고 다양한 통신 기술이 서비스되면서 단말의 소형화, 사용 지속성 측면에서 에너지 효율이 중요하게 다루어지고 있다. 에너지 효율 증가를 위한 여러 기술 중, 소비되거나 미사용 되는 에너지를 재사용하여 에너지를 재생산하는 무선 에너지 하비스팅이 많은 이슈가 되고 있다[1]. 에너지 하비스팅은 기기 주변의 환경 에너지, 태양, 바람과 같은 자연에너지 등을 수

거하여 사용하는 에너지 기술이며, 소비되거나 미활용되는 에너지를 수확 또는 폐이용하여 에너지를 재생산하는 것이라고 할 수 있다[2]. 이러한 에너지 하비스팅 기술에는 RF 에너지, 압전효과, 빛 이용 에너지, 태양전지, 바이오 연료전지, 역학적 에너지, 열에너지 기술 등이 있으나, 본 논문에서는 여러 가지 환경 에너지 중에서 RF 에너지에 집중하여 RF 에너지 하비스팅 시스템이 탑재된 무선 통신 단말로부터 효과적으로 에너지 하비스팅을 할 수 있는 에너지 하비스팅 효율 증대 기법을 다룬다. 현재 RF 에너지 하비스팅을 위한 무

*이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A5A1011478)

*광운대학교 유비쿼터스 통신 연구실 (jihopark@kw.ac.kr, yumin@kw.ac.kr, yuchan@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr)

접수일자 : 2015년 4월 24일, 수정완료일자 : 2015년 5월 18일, 최종 게재 확정일자 : 2015년 5월 28일

선 충전 기술 중, 전통적으로 많이 사용되고 있는 두 개의 권선 코일 사이에 유도전류가 발생하게 하는 전자기 유도방식, 송/수신부 코일의 주파수를 일치시켜 공진이 되는 방식으로 충전하는 자기공명방식과 무선센서, RFID, 이식용 의료기기 등 낮은 전력을 요구하는 전자기기에 무선으로 파워를 전달할 목적으로 개발되고 있는 전자과 방식이 있다. 이러한 방식들 중, 현재 전자기유도 현상을 이용한 전자기유도 방식 무선 충전만이 일부 스마트 단말에 적용된 상황이다. 그러나, 전자기유도식 무선 충전은 디바이스와 어댑터가 접촉되어야 하는 한계가 있으며, 에너지 도달거리가 수 cm로 매우 짧다 [3-4]. 본 논문에서는 수 m까지 에너지 전달이 가능하며 WSN(Wireless Sensor Network)에 적용 사례가 있는 전자과 방식을 가정한다. 본 논문에서는 RF 에너지 하베스팅 효율을 증대시키기 위해 에너지 하베스팅 장치인 수신부(Rx)와 에너지 하베스팅을 위한 무선 RF 신호를 송신하는 송신부(Tx)간 주기적으로 할당된 전체 주파수 범위 내에서 하베스팅 효율 맵을 형성하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘을 통해 주파수에 따른 페이딩 정도를 파악하고 형성된 맵에서 가장 높은 효율값을 가지는 주파수를 선택하여 Source 신호로서 송신하여 에너지 하베스팅 효율 최적화를 달성하는 시스템 모델을 제안한다. 이를 통해 공기중에 최대의 전위차를 가지는 RF 신호를 수신할 수 있도록 송신신호의 주파수를 적응적으로 변화시켜 송신하여 최종적으로 수신부에서 에너지 하베스팅 효율을 증대시키는 목적을 가지고 있다.

II. 시스템 모델

그림 1은 본 논문의 전체 시스템 모델로서 무선 통신 기지국과 RF 에너지 하베스팅이 이루어지는 것을 나타낸 것이다. 그림 1에서 무선 통신 기지국은 Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, 가시광 통신 및 3G, LTE 등의 RF 신호를 방사하여 수신부와 데이터 통신이 가능하고 한편으로 그 에너지를 하베스팅 할 수 있는 무선 통신 시스템을 이용하는 것으로 가정한다. 또한 무선 통신 단말기는 RF 에너지 하베스팅 장치를 포함하고 있고, 무선 통신 기지국과 데이터 통신을 수행하며, RF 에너지 하베스팅 장치를 이용하여 에너지를 수집한다. RF 에너지 하베스팅 장치는 무선 전력 에너지를 수신할 수 있는 수단으로 정류 안테나(Rectenna)를 사용한다. 여기서, 정류 안테나를 의미하는 rectenna는 정류기(rectifier)와 안테나(antenna)가 합쳐진 단어로, 정류기와 안테나가 조합된 구조를 통해 마이크로파를 직류전원으로 변환한다.

그림 2는 RF 에너지 수집기가 탑재된 무선 통신 단말과 무선 기지국간에 Data flow와 Energy flow가 반복적으로 동작됨에 따라 하베스팅 효율을 최적화하는 시스템 모델이다. 무선 통신 단말에 탑재된 Rectenna는 대기 중의 전파를 에

너지원으로써 수집한다. 현재, RF 에너지 하베스팅 시스템을 이용하여 각종 센서 및 디바이스 기기를 구동할 수 있을 정도로 전력을 얻기 위해서는 비교적 큰 RF 전력을 수신해야 한다. 그러나 이를 위해 높은 전력을 무분별하게 방사할 경우, 인체의 유해성이 가장 큰 문제가 된다. 따라서 본 논문에서는 국가별로 제한한 허용 전력 기준에 부합하는 것을 기준으로 한다.

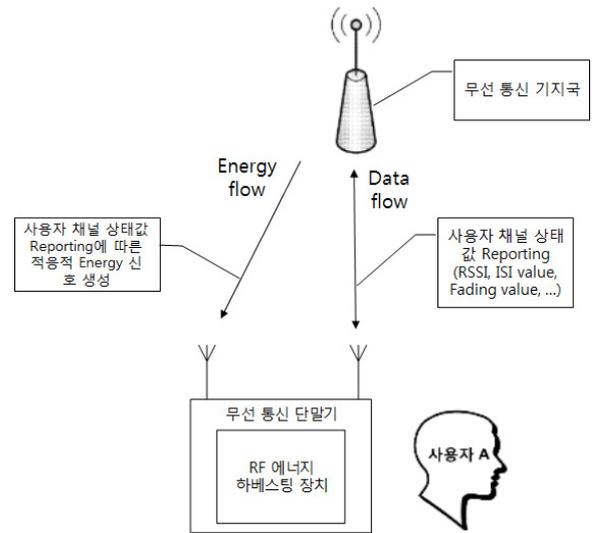


그림 1. RF 에너지 하베스팅 적용 무선 통신 기지국.

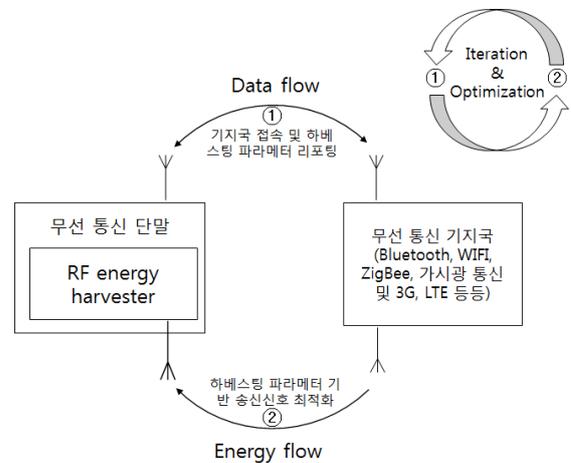


그림 2. 에너지 하베스팅 효율 최적화 시스템 모델.

그림 3은 실내 small-scale fading 환경에서의 최적 송신 신호 전송 예시이다. 이러한 실내 small-scale fading을 고려하여 사용자(Receiver) 입장에서는 고정적인 채널 환경을 설정한다. 이후, 시간에 대해 크게 변하지 않는 채널 coefficient를 획득하고 이를 기지국(Source)에 전송하여 최적의 송신 신호를 송출하게 된다. 이에 대한 기본 조건들은 다음과 같다.

- 무선 에너지 하베스팅을 위한 RF 신호 송신부와 수신부는 고정됨.

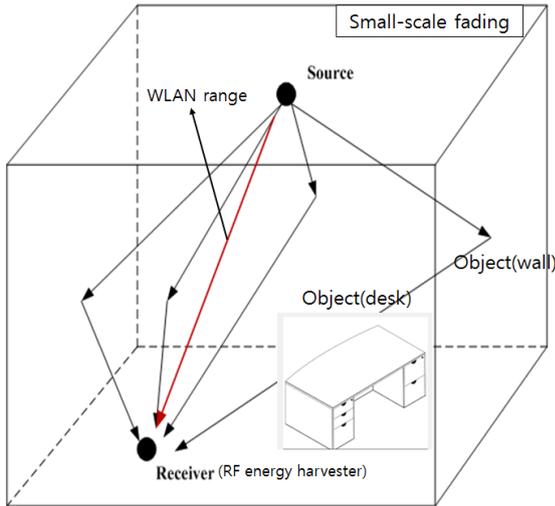


그림 3. 실내 fading 환경에서 최적 신호 전송 예시.

- 무선 에너지 하비스팅 공간 안의 고정된 사물이 multipath 신호와 shadowing을 일으킴.
- 간섭 모델로서 Small-scale fading 현상만 고려됨.
- 통신과 무선 에너지 하비스팅은 WLAN 범위 안에서 이루어짐.

위와 같은 기본 조건들에 따라서 결론적으로 Receiver가 최소한으로 변동하고, 고정 값으로 근사 가능한 fading을 가질 수 있도록 설정되었다. 빠르게 변동하는 fading에 대해서도 송신신호를 최적화하여 하비스팅 효율을 증대시킬 수 있으나, 시스템이 빠르게 변화하는 fading 속도에 완전히 기인하여 각 시간마다 효율 계산 및 송신 신호 최적화를 달성하기 어려운 불안정한 상태에 이를 수 있으므로, 본 논문에서는 안정성을 위해 위와 같은 조건에서 동작하는 것을 기반으로 한다.

그림 4는 특정 주파수 밴드(BW_p)에서 Receiver와 Source와의 거리(d)에 따른 송신출력(P_t) 대 수신출력(P_r) 비(K)에 대한 그래프이며, 열은 점선을 소규모 페이딩 (Small-scale fading), 굵은 점선을 대규모 페이딩 (Large-scale fading)으로 나타내었다. 본 논문에서는 그림 4와 같은 그래프를 기반으로 특정 주파수 대역에서만 선택적

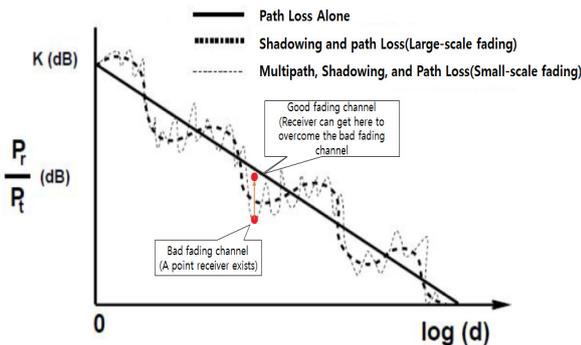


그림 4. 최적 송신 신호 전송 예시.

으로 페이딩을 일으키는 주파수 선택적 페이딩에 대해 Receiver가 자신의 채널에서 K factor를 Source 또는 Base Station으로 전달하면 실시간으로 Source에서 주파수 선택적 페이딩을 회피하기 위해 송신 신호의 대역폭을 조절한다. 즉, Bad fading channel에서 Good fading channel로 이동할 수 있도록 Reporting & Optimization을 반복하는 시스템을 구성하였다.

그림 5는 본 논문의 목표인 에너지 하비스팅 효율 최적화 달성을 위한 전체 시스템 동작 알고리즘이다. 위 알고리즘에서 최초 주파수가 할당된 source 신호로부터 Frequency adjustment / allocation 블록을 거쳐 전체 대역의 주파수별 에너지 하비스팅 맵을 형성한다. 형성된 맵을 통해 전체 대역에 대한 Small-scale fading 정도를 파악하고 K factor가 가장 높은 값을 선택하여 source 신호를 송신하여 에너지 하

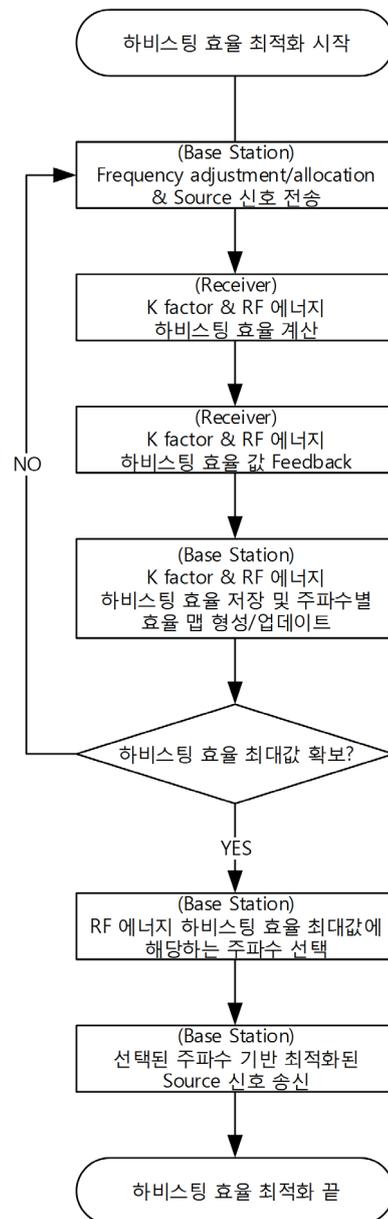


그림 5. 에너지 하비스팅 효율 증가를 위한 시스템 알고리즘.

비스팅 효율을 최적화 시킨다. 여기서, 송신 신호의 대역폭을 adjustment/allocation 하는 방법은 기지국이 사용자에게 할당한 대역폭을 구체적으로 알 수 없으므로 각 시스템이 가지고 있는 고유의 주파수 스케줄링 기법에 적용적으로, 동시에 자체적으로 adjustment/allocation 할당하는 알고리즘을 탑재하여 응용하여야 한다(i.e. 전체 대역폭을 100등분 또는 1000등분하여 각 주파수 별 하비스팅 효율 맵 형성). 또한 조절의 의미는 대역폭 범위의 변화 및 대역폭 이동 두 가지를 말하지만, 본 논문에서는 대역폭 이동만 이동하여 문제를 해결하는 것으로 가정하였다. 대역폭의 범위를 조절하여 페이딩 맵을 형성하는 시스템 알고리즘도 하나의 기술적 이슈로서 추후 연구하고자 한다.

Ⅲ. 성능평가 및 분석

그림 6은 채널에 따른 주파수 선택적 페이딩(Frequency selective fading)을 나타낸다. 전체 주파수 대역을 1번부터 6번 채널까지 분할하여 채널 상태를 측정하였을 때, 각 채널에 따라 다른 채널 상태를 보이며, 특히 2번 채널은 가장 낮은 채널 상태를 보여주고 있다. 이는 주파수 선택적 페이딩 현상으로 설명된다. 주파수 선택적 페이딩은 어떤 특정 주파수 대역에서만 선택적으로 페이딩이 일어나는 현상으로, 해당 특정대역이 깊은 페이딩에 빠져 신호 왜곡이 발생할 확률이 높아진다. 무선 에너지 하비스팅의 경우 페이딩에 영향을 많이 받는 채널은 낮은 레벨의 신호로 인해 동일 시간 내에 획득할 수 있는 에너지 하비스팅 효율을 저하시키게 된다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위한 방안으로 전체 대역의 주파수별 에너지 하비스팅 맵을 형성한다. 형성된 맵을 통해 전체 대역에 대한 Small-scale fading 정도를 파악하고 K factor가 가장 높은 값을 선택하여 source 신호를 송신하여 에너지 하비스팅 효율을 최적화시킨다.

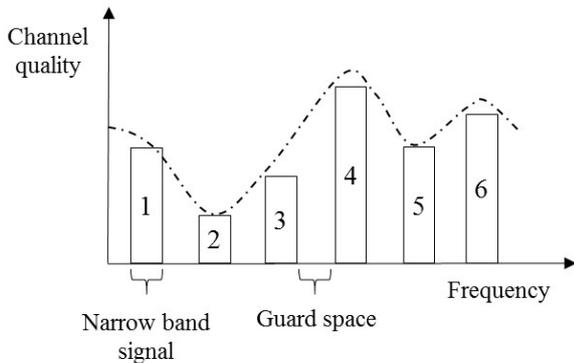


그림 6. 주파수 선택적 페이딩 예시.

무선 에너지 하비스팅 효율은 수신 안테나의 신호 세기로 다음과 같이 표현된다.

$$P_r = A_c S_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \cdot \frac{G_t P_t}{4\pi d^2} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t P_t, \quad (1)$$

여기서, 위 식 (1)은 Friis의 식으로 전력 이득 G_t 로 전력 P_t 를 송신하고 있는 안테나에 대하여 전력 이득 G_r 의 수신 안테나와 수신 전력 P_r 을 획득하는 식을 나타낸다[5]. Friis 식에 대한 각 파라미터는 다음과 같다.

- λ : 신호 파장.
- P_t : 송신 신호 전력.
- P_r : 수신 안테나에서의 수신 신호 전력.
- G_t : 송신 안테나에서의 이득.
- G_r : 수신 안테나에서의 이득.
- $A_e = G_r \lambda^2 / 4\pi$: 수신 안테나의 유효 범위.
- $S_r = G_t P_t / 4\pi d^2$: 수신 안테나에서의 신호 전력 밀도.

본 논문에서는, small-scale fading의 영향을 최소화 할 수 있는 수신 신호를 선택하여 무선 에너지 하비스팅을 경우를 고려하여 아래와 같은 수식으로 나타내었다.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_r G_t + f_s(t), \quad (2)$$

한편, 급증하는 실내 활동과 대부분의 스마트 및 웨어러블 디바이스들의 충전이 실내에서 이루어지므로 본 논문에서는 실내 환경에서의 무선 에너지 하비스팅을 가정하였다. 실내 환경에서의 무선 에너지 하비스팅 모델을 위해 Friis 식을 [6]에 제시된 실내 페이딩 모델에 적용하였다. 실내 환경에서의 신호 전송은 송신부에서 수신부까지 다음과 같은 전파 모델이 적용 된다: 1) LOS(Line of Sight), 2) CR(Ceiling Reflection), 3) FR(Floor Reflection), 4) SR(Side Reflection). 이러한 전파 모델이 적용되어 수신 단에서의 임펄스 함수는 아래와 같다.

$$h(t) = A_1\delta(t-T_1) + A_2\delta(t-T_2) + A_3\delta(t-T_3) + A_4\delta(t-T_4) + A_5\delta(t-T_5), \quad (3)$$

여기서, $A_1\delta(t-T_1)$ 은 LOS환경으로 전송된 신호를 나타내며, $A_2\delta(t-T_2)$, $A_3\delta(t-T_3)$, $A_4\delta(t-T_4)$ 는 바닥, 벽면으로 인해 반사된 신호를 나타낸다. 또한, $A_5\delta(t-T_5)$ 는 천장으로 반사된 신호를 의미한다. 반사되는 각 신호에 대한 전송 경로가 같다고 할 때, LOS 신호와 비교하여 각 반사 신호가 송신부에 도달하기까지의 지연 시간은 동일하다 ($T_2 = T_3 = T_4$). 이러한 실내 환경에서의 신호 전파모델을 Friis 수식 (1)에 적용할 경우, 아래와 같이 표현된다.

$$A_1 = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 + f_{s1}(t), \tag{4}$$

또한, 반사되어 수신되는 신호들은 아래와 같이 표현된다.

$$A_i = k_i \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 + f_{si}(t), \tag{5}$$

여기서, k_i 는 반사 계수로써 반사되는 사물 및 지면의 종류, 형태에 따라 달라진다. 본 논문에서는 반사 계수 k_i 를 0.5로 설정하여 2.4GHz 대역에서 시뮬레이션을 진행하였다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 주파수 선택적 페이딩 맵 기반 에너지 하비스팅 효율 증가 알고리즘의 성능을 테스트하기 위해 표 1과 같이 시뮬레이션 파라미터를 설정하였다. 그림 7은 참고문헌 [6]의 실내 주파수 페이딩 모델을 참고하여 송신부와 수신부 거리가 4m 일 때 실내 주파수 선택적 페이딩 맵이다. 주파수 대역은 ISM(Industrial Scientific and Medical) 대역에서 가장 널리 사용되는 Wi-Fi 주파수를 고려하여 2.401~2.473GHz 까지 설정하였다. 채널은 총 12개로 각각 22MHz의 대역을 가진다. 한편, 송신부와 수신부 사이의 거리를 4m로 설정하여 측정된 결과, 전체 주파수 대역 중, 2.426~2.448, 2.431~2.453, 2.436~2.458, 2.441~2.463GHz 대역에서의 2.455GHz는 가장 낮은 peak값(Amplitude)을, 2.441~2.463, 2.446~2.468, 2.451~2.473, 2.456~2.478GHz 대역에서의 2.463GHz는 가장 높은 peak값(Amplitude)을 보여준다. 전체 주파수 대역에서의 가장 높은 peak값과 가장 낮은 peak값의 차이는 약 4.45dB로 그 차이만큼 에너지 하비스팅 효율의 차이가 발생한다. 그림 8은 그림 7의 결과를 바탕으로 실내 거리별 신호 감쇄를 나타낸 그래프이다. 그림 7에서 가장 좋은 성능을 보여준 2.463GHz를 가장 낮은 성능을 보여준 2.455GHz와 거리별로 peak값을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 송신부와 수신부의 거리가 4m일 때 그림 7과 동일하게 약 4.45dB의 성능차이를 보여준다.

표 1. 파라미터 설명.

Parameters	Values
Frequency band	2.401GHz~2.473GHz (Wi-Fi)
Bandwidth	22MHz
Number of channels	12
Distance(Tx, Rx)	1m~20m
Channel model	Rayleigh channel
Obstacles	Multi-path model

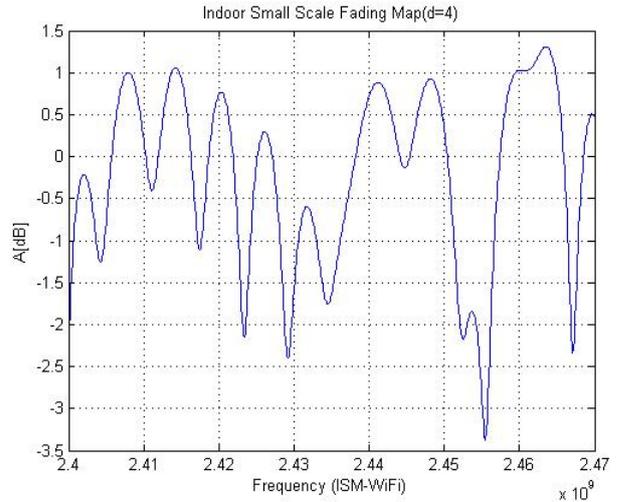


그림 7. 실내 주파수 선택적 페이딩 맵.

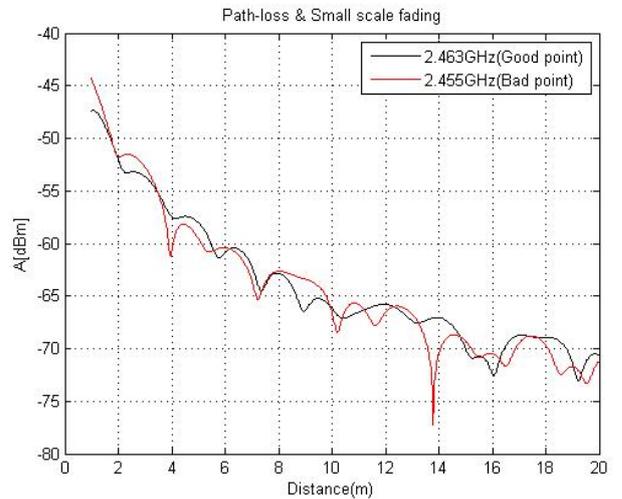


그림 8. 실내 거리별 신호 감쇄.

V. 결론

본 논문에서는 에너지 하비스팅 장치인 수신부(Rx)와 에너지 하비스팅을 위한 무선 RF 신호를 송신하는 송신부(Tx) 간 주기적으로 할당된 전체 주파수 범위 내에서 하비스팅 효율 맵을 형성하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 통해 형성된 맵으로 주파수에 따른 페이딩 정도를 파악하고 맵에서 가장 높은 효율값을 가지는 주파수를 선택하여 Source 신호로서 에너지를 송신하여 에너지 하비스팅 효율 최적화를 달성한다. 제안한 알고리즘의 성능 분석을 위해 컴퓨터 시뮬레이션으로 Wi-Fi 주파수 대역에서의 페이딩 맵과 실내 거리별 신호 감쇄를 구성하고 가장 좋은 주파수에서의 신호 세기와 가장 낮은 주파수에서의 신호 세기를 분석하였다. 현재 무선 충전방식으로 사용되고 있는 전자기유도 방식은 디바이스와 어댑터가 접촉되어야 하는 한계가 있으며, 에너지 도달거리가 수 cm로 매우 짧다. 반면, 본 논문의

알고리즘이 적용되는 전자파 방식의 경우 수 m 까지 에너지 전달이 가능하다. 전자파 방식의 경우, 송신부에서 수신부로 에너지를 전달하는 과정에서 많은 fading 현상들에 따라 신호 감쇄가 발생하게 되는데, 본 논문에서 제안한 주파수 페이딩 맵을 활용하여 동일 시간 내 높은 에너지 하비스팅 효율을 얻을 수 있다. 한편, 본 논문의 시뮬레이션에서 보인 point frequency를 통해 무선 에너지 하비스팅 효율을 높이는 것은 위해 실제로 Wi-Fi 시스템에 적용하기에 데이터 송·수신을 동시에 하지 못한다는 제한 사항이 있다. Wi-Fi 시스템에서 에너지 하비스팅과 데이터 송·수신을 동시에 하기 위해서는 어떤 채널이 좋은 상태인지를 판단하고, 좋은 상태의 채널을 사용하여 에너지 하비스팅 및 데이터 송·수신 효율을 높이기 위한 알고리즘의 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] H. J. Visser and R. J. M. Vullers, "RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: principles and requirements," in Proc. of the IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1410-1423, June 2013.

[2] N. Shinohara, "The wireless power transmission: inductive coupling, radio wave, and resonance coupling," Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, vol. 1, no. 3, pp. 337-346, Sept. 2012.

[3] D. Dondi, S. Scorcioni, A. Bertacchini, L. Larcher, and P. Pavan, "An autonomous wireless sensor network device powered by a RF energy harvesting system," in Proc. of IEEE Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 2557-2562, Oct. 2012.

[4] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and W. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks," IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 20, no. 4, pp. 140-145, Aug. 2013.

[5] C. A. Balanis, Antenna theory: analysis and design, John Wiley & Sons, 2012.

[6] M. Kochln, and J. Micek, "Indoor Propagation of 2.4GHz Radio Signal: Propagation Models and Experimental Results," in Digital Technologies 2014 (DT2014), July, 2014.

저자

박 지 호(Ji Ho Park)

준회원



- 2014년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석사과정

<관심분야> : 무선 에너지 하비스팅, LBS, 협력통신

황 유 민(Yu Min Hwang)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전과공학과 졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석박통합과정

<관심분야> : 5G, 재난 통신, WPAN, LBS, 무선 에너지 하비스팅

송 유 찬(Yu Chan Song)

준회원



- 2014년 2월 : 광운대학교 전과공학과 졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과공학과 석박통합과정

<관심분야> : 4G 이동통신, 가시광통신, D2D, LBS, 빅데이터

김 진 영(Jin Young Kim)

종신회원



- 1998년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학박사
- 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신