

무선 에너지 하베스팅 인지 무선 네트워크에서 최적의 채널 선택 정책을 이용한 채널 선택

정준희*, 황유민*, 차경현*, 김진영*

Channel Selection Using Optimal Channel-Selection Policy in RF Energy Harvesting Cognitive Radio Networks

Jun Hee Jung*, Yu Min Hwang*, Gyeong Hyeon Cha*, and Jin Young Kim* *Lifelong Member*

요 약

최근 무선 에너지 하베스팅 기술이 센서와 같은 소형 IoT 디바이스들의 크기 제한으로 인한 배터리 부족 문제의 해결방법으로 각광을 받고 있다. 이 기술이 기존의 인지무선 네트워크에 적용된다면 인지 유저들의 운용시간 증가로 인한 네트워크 처리량의 증가를 기대할 수 있다. 본 논문에서는 인지 유저(Cognitive User)가 근처에서 동작 중인 우선 유저(Primary User)의 특정 거리 안에 존재할 때 우선 유저가 전송한 통신 신호로부터 무선 에너지 하베스팅을 하고 특정 거리 밖에 존재할 때 비어있는 채널을 골라 통신을 하도록 한다. 이 때 우선 유저와 인지 유저는 Homogeneous Poisson Point Process 형태로 분포되어 있고 통신을 하고 있는 수신자들과 일정한 거리로 떨어져있다. 위와 같은 네트워크 모델에서 주어진 여러 가지 조건하에 인지 유저 네트워크 처리량을 최대화할 수 있는 전송파워, 인지 유저 밀도 제안하고 앞으로의 연구방향을 제시한다.

Key Words : RF Energy Harvesting, Cognitive Radio(CR), Independent Homogeneous Poisson Point Process(IHPPP), Channel Selection Policy.

ABSTRACT

Recently, RF energy harvesting technology is a promising technology for small-size IoT(Internet of Things) devices such as sensor to resolve battery scarcity problem. When applied to existing cognitive radio networks, this technology can be expected to increase network throughput through the increase of cognitive user's operating time. This paper proposes a optimal channel-selection policy for RF energy harvesting CR networks model where cognitive users in harvesting zone harvest ambient RF energy from transmission by nearby active primary users and the others in non-harvesting zone choose the channel and communicate with their receiver. We consider that primary users and secondary users are distributed as Poisson point processes and contact with their intended receivers at fixed distances. Finally we can derive the optimal frame duration, transmission power and density of secondary user from the proposed model that can maximize the secondary users' throughput under the given several conditions and suggest future directions of research.

I. 서 론

인지 무선 기술은 비어있는 주파수 대역을 센싱하고 활용함으로써 주파수 효율을 증가시킨다. 최근 연구는 이러한 인지 무선 기술에 무선에너지 하베스팅 기술을 적용해서 별도의 에너지 공급 없이 자급자족이 가능한 인지 무선 네트워크 환경을 만드는 방향으로 이뤄지고 있다. 점차 무선통신 기술이 발달함에 따라 단순히 문자를 전송하는 수준을 넘어서 다

양한 멀티미디어 서비스 이용이 가능한 3G, 4G를 사용하는 사람들의 숫자가 날이 갈수록 증가하고 있다. 늘어만 가는 수요를 만족하기 위해 시간이 지날수록 점점 더 많은 주파수 대역이 필요하지만 주파수 자원은 한정되어있고 한정된 주파수대역도 이미 기존 사용자들에 의해 대부분이 사용되어지고 있다. 그래서 주파수 자원 부족 현상은 앞으로 더욱 심화될 것으로 전망된다. 인지무선(CR, Cognitive Radio)에서 주파수 대역을 센싱해서 사용되고 있지 않은 주파수 대역을

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

*광운대학교 유비쿼터스 통신 연구실 (junheez@kw.ac.kr, yumin@kw.ac.kr, chagyeonghyeon@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr)

접수일자 : 2015년 7월 4일, 수정완료일자 : 2015년 8월 23일, 최종게재확정일자 : 2015년 9월 10일

찾아서 사용하는 무선 통신 기술로써 주파수 활용률이 낮은 지역에서 사용된다면 네트워크 성능 향상을 기대할 수 있다. 하지만 아직까지 우선 유저에 대한 간섭문제, 인지 유저의 Qos 보장 문제 등 여러 가지 제약 조건으로 인해 다양한 방향으로의 연구가 필요하다 [1].

별도의 에너지 공급 없이 주변의 여러 에너지원들로부터 에너지를 수집해서 스마트기기들의 자급자족을 가능하게 하는 에너지 하비스팅(Energy Harvesting) 기술이 최근 높은 관심을 끌고 있다. 에너지 하비스팅 기술이 바디 센서와 같은 소형 IoT 기기들에 적용된다면 이러한 기기들이 가지는 배터리 부족 문제를 해결해서 별도의 배터리 교체 없이 반영구적인 운용이 가능할 것으로 기대된다.

에너지 하비스팅 기술은 자기유도 방식, 자기 공명 방식 그리고 RF 방식이 있는데 본 논문에 적용된 기술은 RF 방식을 사용하는 무선에너지 하비스팅 기술이다. 이 기술은 주변 기기들이 보내는 RF 신호를 수집, DC에너지로 변환하는 기술이다 [2]-[4]. 이론상으로 무선에너지 하비스팅 기술의 에너지 변환효율을 보면, 자유 공간 환경에서 40m 거리로부터 에너지를 수집, 변환할 수 있는 최대 파워는 주파수 2.4GHz, 900MHz에서 각각 7uW와 1uW이다. 실제 실험 환경 (915MHz)에서 무선에너지 하비스팅을 했을 때, 11m, 0.6m 거리에서 수집된 파워는 각각 1uW, 3.5mW 으로 이론보다 더 낮은 효율을 보이고 있다 [2]. 비록 무선에너지 하비스팅의 에너지 변환효율이 낮아서 사용될 수 있는 어플리케이션에 한계가 있지만, 다가오는 미래에 무선통신 기술의 발달과 고성능 안테나 설계로 인해 좀 더 높은 에너지 변환효율을 가지게 되면 수많은 분야에서 다양한 형태로 사용될 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 인지 유저가 우선 유저로부터 무선 에너지 하비스팅을 하는 인지무선 네트워크 모델을 가정한다. 인지무선 네트워크에서 모든 유저들은 독립적인 HPPP(Homogeneous Poisson Point Process)로 분포되어 있고 이러한 시스템은 기하학적인 모델로 모델링할 수 있다 [5]. 인지 유저와 우선 유저의 거리가 너무 멀면 무선에너지 하비스팅 효율이 극도로 낮아지기 때문에 우선 유저 주변으로부터 적절한 무선에너지 하비스팅 효율을 얻을 수 있는 하비스팅 구역(Harvesting Zone)을 설정하였다. 따라서 인지 유저는 운용 중인 우선 유저의 하비스팅 구역 안에 위치해 있을 때 무선에너지 하비스팅 모드로 동작하고 하비스팅구역 밖에 위치해 있을 때는 데이터 전송 모드로 동작한다. 각 모드에서 주파수 대역에 존재하는 우선유저의 밀도를 측정해서 현재 운용 중인 모드에 적합한 채널을 선택한다. 본 논문의 목표는 인지 유저의 전송 파워, 밀도를 최적화해서 인지 유저의 네트워크 처리량을 최대화하는 것이다.

따라서 본 논문은 II장에서 인지 유저의 네트워크 처리량을 최대화하기 위한 기하학 모델의 수학적 정의를 하고 최선의 채널 선택 정책을 제시한다. III장에서는 시뮬레이션을

통해 시스템 모델을 적용하여 구현한 무선에너지 하비스팅 인지무선 네트워크의 성능을 다양한 측면에서 분석할 것이며, 마지막으로 IV장에서는 본 논문의 결론을 내고 마친다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 사용한 무선에너지 하비스팅 인지무선 네트워크 모델은 우선 유저와 인지 유저가 각각 δ_p , δ_s 의 밀도를 가지고 Homogeneous Poisson Point Process 형태로 분포되어 있다. 동작하지 않는 우선 유저는 인지 유저의 동작에 영향을 미치지 않으므로 δ_p 는 데이터 전송 중인 우선 유저의 밀도라고 가정하고 앞으로 지칭하는 우선 유저는 운용 중인 우선 유저를 의미한다. 우선 유저와 인지 유저의 Poisson point process를 $\phi_p = \{X\}$ 와 $\phi_s = \{Y\}$ 로 표기 한다 ($X, Y \in R^2$). 그리고 우선 유저와 인지 유저의 각 송신기는 고정된 파워, P_p , P_s 로 전송 신호를 보낸다. 우선 유저는 인지 유저가 무선에너지 하비스팅을 할 수 있는 반지름 d_H 로 되어있는 하비스팅 구역을 가지고 있다. 인지 유저가 이 하비스팅 구역 안에 위치하게 되면 에너지 하비스팅 모드로 바꾸고 우선 유저의 전송 신호로부터 무선에너지 하비스팅을 시작하게 된다.

우선 유저와 인지 유저는 IHPPP 분포로 이루어져있기 때문에 우선 유저의 하비스팅 구역 안에 있는 인지 유저의 숫자, N 은 평균값 $\pi d_H^2 \delta_p$ 를 가지는 Poisson 랜덤변수로 되어 있고 따라서 이 랜덤변수의 확률밀도함수(PMF)는 다음과 같다. 따라서 위 PMF를 통해 SUs가 하비스팅 구역 밖에 위치해서 데이터를 전송할 수 있는 확률 p_o 는 다음과 같다.

$$\Pr\{N=n\} = e^{-\pi d_H^2 \delta_p} \frac{(\pi d_H^2 \delta_p)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$p_o = \Pr\{N=0\} = e^{-\pi d_H^2 \delta_p} \quad (2)$$

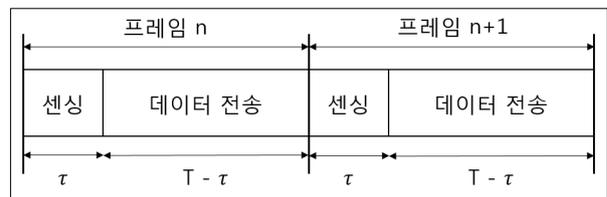


그림 1. 인지 유저의 프레임 구조.

본 논문에서는 통신환경을 path-loss하고 Rayleigh fading한 특성을 가지는 flat-fading 채널로 정의하며, 따라서 채널 게인은 exponential 랜덤변수로 모델링된다. 우선 유저와 인지 유저가 각각 원점으로부터 수신 받는 파워는 각 노드(g_X, g_Y)를 평균이 1이고 path-loss exponent가 2보다

크며, 원점으로부터 X, Y 만큼 떨어져있는 i.i.d(independent and identically distributed) exponential 랜덤변수로 가정했을 때, 각각 $g_X P_p |X|^{-\alpha}, g_Y P_s |Y|^{-\alpha}$ 로 표현된다.

본 논문의 인지무선 네트워크에서 각 인지 유저 모두에게 같은 채널 선택 정책이 적용되며 유저들의 정보(각 채널에 할당된 우선 유저, 인지 유저의 밀도 등)을 알고 있다고 가정한다. 하나의 인지유저는 별도의 충전 장치 없이 무선 에너지 하베스팅으로 얻은 에너지만을 데이터전송에 사용할 수 있고 이 때 충전된 에너지로 한번의 데이터 전송만이 가능하다. 따라서 인지 유저의 배터리는 0 또는 P_s 두 가지 상태로 정의하고 Markov chain 모델로 표현된다. 이를 state-transition probability matrix로 표현하면 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} p_o & 1-p_o \\ p_o & 1-p_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

Q의 eigenvalue를 이용해서 인지유저가 충전될 확률인 p_c 를 구하면 p_c 값은 $1-p_o$ 로 구할 수 있다.

충전이 되어있는 인지유저가 본 논문에서 가정한 HPPP 모델을 만족하기 위해 가지는 밀도는 $p_c \delta_s$ 이다. n 번째 채널을 선택할 확률을 p_k 라고 가정했을 때, n 번째 채널을 선택한 인지유저의 밀도는 $p_c \delta_s p_k$ 이다. n 번째 채널을 선택한 인지유저가 m개의 근처 인지유저로부터 방해받을 확률은 이항분포 확률에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$P_i = \pi d_i^2 / \pi d^2. \quad (4)$$

여기서 d_i 는 근처 인지유저로부터 유효한 간섭을 받을 수 있는 거리를 의미한다. 따라서 인지 유저의 에너지양과 유저 분포도 그리고 서로 다른 우선 유저의 채널을 선택할 확률을 고려했을 때, 인지 무선 네트워크의 처리량은 다음과 같이 표현되어진다.

$$C_s = \frac{p_k (1 - P_i^{-N p_i P_s}) (1 - p_o) p_o \delta_s \log_2 (1 + \theta_s)}{N P_i T}. \quad (5)$$

낮은 우선 유저의 밀도를 가지는 채널은 인지 유저가 에너지 전송 모드일 때 높은 전송 성공 확률을 보장해줄 것이며 높은 우선 유저의 밀도를 가지는 채널은 인지유저가 무선 에너지 하베스팅 모드일 때 더 높은 하베스팅 확률을 보장할 것이다. 우선 유저의 밀도 정보 파악을 위한 채널 센싱 시간 τ 는 고정된 값이며 프레임 주기 T에 따라 한 프레임에 센싱이 차지하는 비율이 달라진다. 센싱 시간이 작아지면 데이터를 전송하는 시간이 길어져서 네트워크 처리량이 증가하게 되지만 임계점 이상 증가하게 되면 인지유저가 우선 유저의 데이터 전송에 간섭을 일으켜서 오히려 네트워크 처리량이

감소하게 되므로 적절한 프레임 주기 설정이 중요하다. 최종적으로 C_s 은,

$$C_s = \frac{(T - \tau) p_k (1 - P_i^{-N p_i P_s}) (1 - p_o) p_o \delta_s \log_2 (1 + \theta_s)}{N P_i T}. \quad (6)$$

가 된다. 따라서 이러한 최적 채널 선택 정책을 이용하고 전송과 위 및 인지 유저의 밀도를 최적화함으로써 네트워크의 처리량을 최대화할 수 있다.

III. 모의실험 및 성능 분석

본 논문에서 제안하는 시스템 모델의 성능 분석을 위해 설정된 파라미터는 표 1과 같다. 네트워크 모델을 HPPP이고 송신 파워는 일반적인 스마트 디바이스의 송신파워인 2Watt로 설정하였다. 네트워크 모델을 간단히 표현하기 위해서 AWGN 채널을 가정했고 하베스팅 효율을 얻을 수 있는 하베스팅 구역의 반지름을 10meter로 정의하였다.

그림 2는 outage 제약조건이 0.1일 때 일반 우선 유저의 밀도에 따른 시스템모델의 네트워크 처리량과 최적 채널 선택 정책을 적용한 시스템 모델의 네트워크 처리량을 비교한 그래프를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 최적 채널 선택 정책을 적용한 모델의 전반적인 네트워크 처리량이 전반적으로 뛰어난 것을 알 수 있다. 하지만 일정 범위를 넘어가게 되면 하베스팅 구역이 넓어져서 인지 유저가 데이터를 전송할 수 있는 지역이 협소해지게 되고 이는 네트워크 처리량 감소로 이어지게 된다.

그림 3는 outage 제약조건이 0.1일 때 일반 인지 유저의 프레임 주기에 따른 시스템모델의 네트워크 처리량과 최적 채널 선택 정책을 인지 유저에게 적용한 시스템 모델의 네트워크 처리량을 비교한 그래프를 나타낸다. 일정 수준의 프레임 주기까지는 네트워크 처리량이 증가하지만 특정 임계점을 넘어가면 센싱 시간의 비율이 작아지게 돼서 통신 불량 확률 증가로 네트워크 처리량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 모의실험 파라미터.

파라미터	값
path-loss exponent	4
d_H	10 meter
송신 파워	2 Watt
θ_p	5
θ_s	5
Noise power	-122dBm
Network model	Independent Poisson Point Process
Channel model	AWGN channel

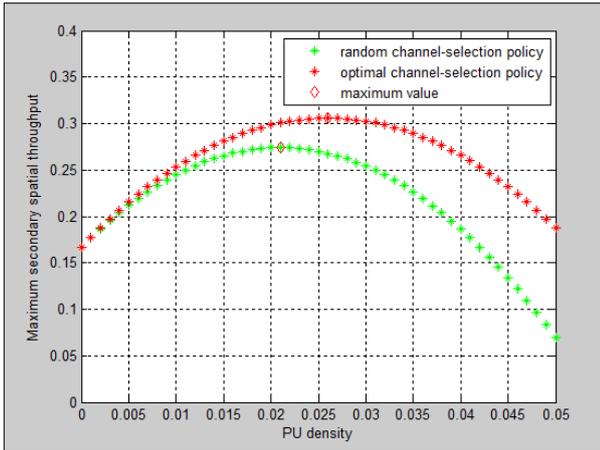


그림 2. 무선 유저의 밀도에 따른 시스템모델의 네트워크의 처리량.

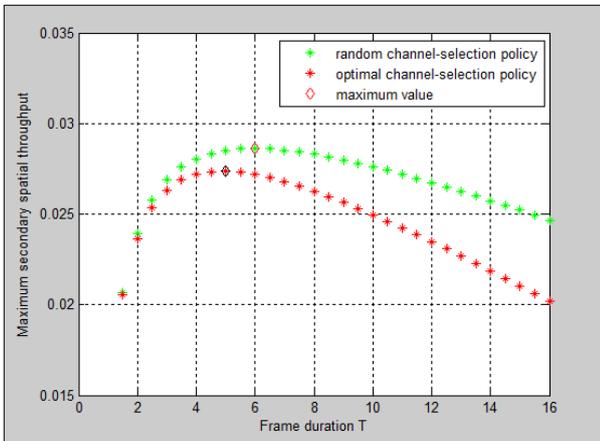


그림 3. 인지 유저의 프레임 주기에 따른 시스템모델의 네트워크의 처리량.

IV. 결론

본 논문에서는 무선에너지 하비스팅이 적용된 인지무선 네트워크 시스템 모델을 제안한다. 여기서 네트워크 모델은 HPPP 형태로 분포되어있고 무선 유저의 하비스팅구역을 제시해서 인지 유저의 위치에 따라 무선에너지 하비스팅 모드로 동작하거나 데이터 전송 모드로 동작한다. 그리고 본 논문에서 제시한 최적 채널 선택 정책을 이용하여 각 모드가 최적으로 동작할 수 있는 채널을 선택한다. 무선 유저의 밀도와 전송 파워에 따라 논문에서 제안한 시스템 모델의 네트워크 처리량이 달라지며 특정 임계값에서 최대화된다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시스템 모델은 앞으로 점점 더 중요해질 IoT의 운용시간을 늘려서 성능을 극대화함으로써 IoT로 구성된 네트워크 환경의 성능을 극대화 시킬 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Q. Zhao and A. Swami, "A Survey of Dynamic Spectrum Access: Signal Processing and Networking Perspectives," in proceedings of IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '07), vol. 4, pp. IV-1349-IV-1352, Apr. 2007
- [2] A. M. Zungeru, L. M. Ang, S. Prabaharan, and K. P. Seng, "Radio frequency energy harvesting and management for wireless sensor networks," Green Mobile Devices and Netw.: Energy Opt. Scav. Tech., CRC Press, pp. 341-368, 2012.
- [3] R. J. M. Vullers, R. V. Schaijk, I. Doms, C. V. Hoof, and R. Mertens, "Micropower energy harvesting," Elsevier Solid-State Circuits, vol. 53, no. 7, pp. 684-693, July 2009.
- [4] Pratibha, Kwok Hung Li, and Kah Chan Teh, "Channel Selection in Multichannel Cognitive Radio Systems employing RF Energy Harvesting," IEEE Early Access Articles., 2015.
- [5] S. Lee, R. Zhang, and K. Huang, "Opportunistic wireless energy harvesting in cognitive radio networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4788 - 4799, Sep. 2013.
- [6] Y. Pei, A.T. Hoang, and Y.C. Liang, "Sensing-Throughput Tradeoff in Cognitive Radio Networks: How Frequently Should Spectrum Sensing be Carried Out?" in proceedings of IEEE 18th Int'l Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC '07), 2007.

저자

정 준 희(Jun Hee Jung)

준회원



- 2015년 2월 : 광운대학교 전자융합 공학과 졸업
- 2015년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과 공학과 석사과정

<관심분야> : LBS, 협력통신, 5G 통신, 인지무선통신, 빅데이터, 항재밍 기술, 무선에너지 하비스팅

황 유 민(Yu Min Hwang)

준회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전과공학 학사졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과 공학과 석박사통합과정

<관심분야> : 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신

차 경 현(Gyeong Hyeon Cha)

준회원



- 2014년 2월 : 광운대학교 전자융합 공학과 학사졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

<관심분야> : WBAN, 위치공학, 항재밍 기술, 무선포에너지하베스팅

김 진 영(Jin Young Kim)

종신회원



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

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