

무선 에너지 하비스팅 인지 무선 네트워크에서 최적화 제어 정책을 이용한 선택적 스펙트럼 접근

정준희*, 황유민*, 차경현*, 김진영*

Opportunistic Spectrum Access Using Optimal Control 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

무선 에너지 하비스팅 기술은 주로 무선 통신 네트워크에서 전력소모가 적은 무선 통신 장치들을 동작시키기 위해 주변 환경으로부터 RF 신호를 수집, 에너지로 변환하는 기술로 최근 각광을 받고 있다. 이와 같은 기술과 기존의 인지무선(Cognitive Radio) 네트워크 모델을 기반으로, 본 논문에서는 적은 파워 소비를 하는 2차 유저(Secondary User)가 근처에서 동작 중인 1차 유저(Primary User)의 특정 거리 안에 존재할 때 1차 유저가 전송한 통신 신호로부터 무선에너지 하비스팅을 하고 특정 거리 밖에 존재할 때 우선 사용자에게 할당되어 있는 허가대역을 주기적으로 센싱, 선택적으로 접근하는 무선에너지 하비스팅 인지무선 네트워크 모델을 제시한다. 이 때 1차 유저와 2차 유저는 Poisson point process로 분포되어있고 통신을 하고 있는 수신자들과 일정한 거리로 떨어져있다. 위와 같은 네트워크 모델에서 주어진 여러 가지 조건하에 2차 유저 네트워크 처리량을 최대화할 수 있는 최적의 프레임 주기, 전송파워, 2차 유저 밀도 제안하고 앞으로의 연구방향을 제시한다.

Key Words : RF Energy Harvesting, Cognitive Radio(CR), Independent Homogeneous Poisson Point Process(IHPPP), Opportunistic Spectrum Access(OSA).

ABSTRACT

RF energy harvesting technology is a promising technology for generating the electrical power from ambient RF signal to operate low-power consumption devices(eg. sensor) in wireless communication networks. This paper, motivated by this and building upon existing CR(Cognitive Radio) network model, proposes a optimal control policy for RF energy harvesting CR networks model where secondary users that have low power consumption harvest ambient RF energy from transmission by nearby active primary users, while periodically sensing and opportunistically accessing the licensed spectrum to the primary user's network. 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's throughput under the given several conditions and suggest future directions of research.

I. 서 론

무선 통신 기술이 발달함에 따라 사람들은 대용량의 멀티 미디어 데이터를 전송하기도 하고 다운받아서 보기도 한다. 또한 단순히 음성 통화와 같은 2G 통신을 사용하는 사람들의 비중은 줄고 다양한 멀티미디어 서비스 이용이 가능한 3G, 4G를 사용하는 사람들의 숫자는 날이 갈수록 증가하고

있다. 후자의 수요를 만족하기 위해 시간이 지날수록 점점 더 많은 주파수대역이 필요하지만 주파수 자원은 한정되어 있고 한정된 주파수대역도 이미 기존 사용자들에 의해 대부분이 사용되어지고 있다. 그래서 주파수 자원 부족 현상은 앞으로 더욱 심화될 것으로 전망된다. 미국연방통신위원회에 의해 측정된 자료를 보면, 기존사용자에게 할당된 주파수 대역 중 70% 이상의 주파수대역이 적절히 사용되어지고 있

* 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 7일, 수정완료일자 : 2015년 8월 17일, 최종 게재확정일자 : 2015년 9월 10일

지 않다고 한다. 인지무선(CR, Cognitive Radio)에서 사용되는 선택적 주파수 접근(OSA, Opportunistic Spectrum Access)기술은 네트워크에서 1차 유저(Primary User)에게 할당된 주파수대역을 2차 유저(Secondary User)가 선택적으로 접근해서 채널 활용률을 증가시킨다. 이 기술을 적용하면 낮은 주파수 활용률로 사용되어지는 주파수대역의 활용률을 향상시킬 수 있다. 하지만 그에 따른 trade-off로 2차 유저의 신호가 1차 유저와 통신하는 수신기에게 간섭을 일으켜 전체 네트워크 처리량을 감소시킬 수 있다 [1].

또 다른 이슈로 태양열이나 풍력, 동력과 같은 여러 가지 주변 에너지원들로부터 에너지를 수집해서 배터리 교체나 별도의 충전이 필요 없는 에너지 하비스팅(Energy Harvesting) 기술이 최근 높은 관심을 끌고 있다. 에너지 하비스팅기술은 기기가 지리적으로 접근하기 어려운 위치에 있어서 배터리 충전이 어렵거나 센서처럼 작은 크기로 만들어져서 배터리 용량이 작은 경우에 사용되면 기기의 효율을 극적으로 향상시킬 수 있다. 에너지 하비스팅 기술은 자기 유도 방식, 자기 공명 방식 그리고 RF 방식이 있는데 이 중에서 위와 같은 상황에 가장 적합한 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 앞서 본 두 가지 이슈를 바탕으로 본 논문에서는 2차 유저가 1차 유저로부터 무선에너지 하비스팅을 하는 인지무선 네트워크 환경을 가정한다. 인지무선 네트워크에서 모든 유저들은 독립적인 IHPPP(Independent Homogeneous Poisson Point Process)로 분포되어있고 이러한 시스템은 기하학적인 모델로 모델링할 수 있다 [5]. 2차 유저와 1차 유저의 거리가 너무 멀면 무선에너지 하비스팅 효율이 극도로 낮아지기 때문에 1차 유저 주변으로부터 적절한 무선에너지 하비스팅 효율을 얻을 수 있는 하비스팅 구역(Harvesting Zone)을 설정하였다. 따라서 2차 유저는 통신 중인 1차 유저의 하비스팅 구역 안에 위치해 있을 때 무선에너지 하비스팅을 하고 하비스팅구역 밖에 위치해 있을 때 주파수대역을 주기적으로 센싱해서 선택적으로 비어있는 주파수대역을 이용한다. 이 모델은 2차 유저의 전송 파워, 밀도 그리고 전송 프

레이의 주기를 최적화해서 2차 유저의 네트워크 처리량을 최대화하는 것이 본 논문의 목표이다.

따라서 본 논문은 II장에서 2차 유저의 네트워크 처리량을 최대화하기 위한 기하학 모델의 수학적적인 정의를 하고 이에 필요한 여러 가지 핵심 매개변수들을 구한다. 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

무선에너지 하비스팅 인지무선 네트워크 모델은 그림 1과 같이, 1차 유저와 2차 유저가 각각 δ_p , δ_s 의 밀도를 가지고 IHPPP로 분포되어있다. 동작하지 않는 1차 유저는 2차 유저의 동작에 영향을 미치지 않으므로 δ_p 는 데이터 전송 중인 1차 유저의 밀도라고 가정하고 앞으로 지칭하는 1차 유저는 동작중인 1차 유저를 의미한다. 1차 유저와 2차 유저의 Poisson point process를 $\phi_p = \{X\}$ 와 $\phi_s = \{Y\}$ 로 표기 한다 ($X, Y \in R^2$). 그리고 1차 유저와 2차 유저의 각 송신기는 고정된 파워, P_p , P_s 로 신호를 보내며 수신기와의 거리와 방향은 무작위로 정해져있다. 1차 유저는 2차 유저가 무선에너지 하비스팅을 할 수 있는 반지름 d_H 로 되어있는 하비스팅 구역을 가지고 있다. 2차 유저가 이 하비스팅 구역 안에 위치하게 되면 에너지 하비스팅 모드로 바꾸고 1차 유저의 전송 신호로부터 무선에너지 하비스팅을 시작하게 된다.

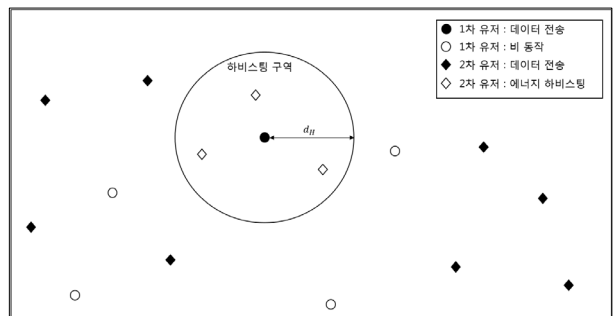


그림 1. 무선에너지 하비스팅 인지무선 네트워크 시스템 모델.

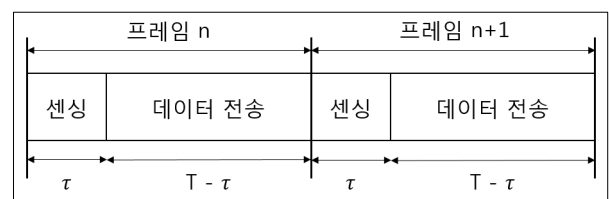


그림 2. 2차 유저의 프레임 구조.

처음 가정했듯이, 1차 유저와 2차 유저는 IHPPP 분포로 이루어져있기 때문에 1차 유저의 하비스팅 구역 안에 있는

2차 유저의 숫자, N 은 평균값 $\pi d_H^2 \delta_P$ 를 가지는 Poisson 랜덤 변수로 되어있고 따라서 이 랜덤변수의 확률밀도함수(PMF)는 다음과 같다.

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

따라서 위 PMF를 통해 SUs가 하비스팅 구역 밖에 위치해서 데이터를 전송할 수 있는 확률 p_o 는 다음과 같다.

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

본 논문에서는 통신환경을 path-loss하고 Rayleigh fading한 특성을 가지는 flat-fading 채널로 정의하며, 따라서 채널 계인은 exponential 랜덤변수로 모델링된다. 1차 유저와 2차 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.

인지무선 네트워크에서 2차 유저는 주기적으로 1차 유저에게 인가된 주파수대역을 센싱하고 비어있는 대역을 찾아서 데이터 전송을 한다. 그림 2는 2차 유저가 하비스팅 구역 밖에서 데이터전송을 할 때 전송하는 한 프레임을 센싱 시간과 데이터전송 시간으로 나누고 있다. 여기서 센싱 시간 τ 는 고정된 값이고 프레임 주기 T 에 따라 한 프레임 내에 센싱과 데이터 전송하는 시간의 비율이 달라지게 된다. T 값이 커지면 데이터 전송하는 비율이 높아져서 인지무선 네트워크의 처리량이 증가하게 되지만 그만큼 2차 유저가 1차 유저의 데이터전송에 간섭을 일으켜서 전체 네트워크 처리량이 감소할 수도 있다. 따라서 1차 유저의 outage가 발생할 확률 P_{out} 은 1차 유저의 SNR값이 제약조건으로 정한 목표 SNR값 θ_s 보다 작을 때로 정의할 수 있고, 본 논문에서는 제약조건을 넘지 않는 한도 내에서 인지무선 네트워크의 처리량 C_s 을 최대화 하고자 한다. 따라서 C_s 은 다음과 같이 정의된다.

$$C_s = \frac{T-\tau}{T}(1-P_{out})p_t \delta_s \log_2(1+\theta_s) \quad (3)$$

여기서 p_t 는 2차 유저가 데이터를 전송할 확률을 의미하며 이는 2차 유저가 하비스팅 구역 밖에 위치할 확률(P_o)과 배터리가 충전되어 있을 확률(P_f)의 곱으로 표현된다.

$$p_t = p_o P_f \quad (4)$$

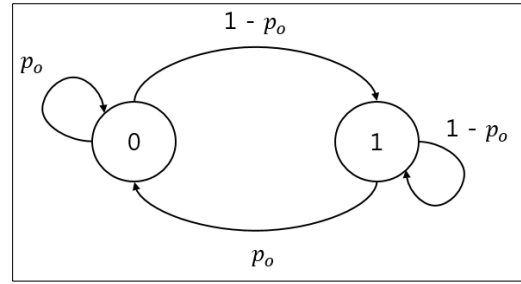


그림 3. Markov chain 모델.

앞서 언급했듯이 무선에너지 하비스팅 기술은 하비스팅 할 수 있는 에너지 효율이 낮기 때문에 본 논문에서는 인지 무선 네트워크에서 2차 유저의 배터리는 한 번의 하비스팅으로 모두 충전이 되며 한 번의 데이터 전송으로 모두 소비가 된다고 정의한다. 따라서 2차 유저의 배터리는 0 또는 P_s 두 가지 상태로 정의하고 그림 2와 같이 Markov chain 모델로 표현된다. 이를 state-transition probability matrix로 표현하면

$$P = \begin{bmatrix} p_o & 1-p_o \\ p_o & 1-p_o \end{bmatrix} \quad (5)$$

two-state Markov chain의 steady-state 확률로 정의된 문제를 P 의 고유벡터 값을 이용해서 구하면 p_f 값은 $1-p_o$ 로 구할 수 있다. 따라서 p_t 는 $(1-p_o)p_o$ 로 구해지며 최종적으로 C_s 은,

$$C_s = \frac{T-\tau}{T}(1-p_o)p_o \delta_s \log_2(1+\theta_s) \quad (6)$$

가 되고 프레임 주기나 전송파워, 2차 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. 앞서 정의한 것처럼 네트워크 모델을 IHPPP이고 송신기의 송신 파워는 일반적인 단말기의 송신파워인 2Watt로 정의하였다. 네트워크 모델을 간단히 표현하기 위해서 AWGN 채널을 가정했고 하비스팅 효율을 얻을 수 있는 하비스팅 구역의 반지름을 l_{meter} 로 정의하였다.

그림 4는 outage 제약조건이 각각 0.1, 0.2, 0.3일 때 1차 유저의 밀도에 따른 시스템모델의 네트워크 처리량에 대한 그래프를 나타낸다. 그림에서 제약조건이 클수록 데이터 전송이 허용되는 2차 유저의 수가 증가하기 때문에 e^p 값이 커질수록 시스템모델의 전반적인 네트워크 처리량이 점차 증가하는 것을 볼 수 있다.

표 1. 모의실험 파라미터.

파라미터	값
path-loss exponent	4
d_H	1meter
송신 파워	2Watt
θ_p	5
θ_s	5
Noise power	-122dBm
Network model	Independent Poisson Point Process
Channel model	AWGN channel

표 2. Outage 제약조건에 대한 최적의 1차 유저 밀도와 시스템 모델의 네트워크 처리량.

	$\epsilon^p = 0.1$	$\epsilon^p = 0.2$	$\epsilon^p = 0.3$
δ^p	0.003	0.014	0.026
C_s	0.1744	0.2305	0.3058

표 3. Outage 제약조건에 대한 최적의 프레임 주기(msec)와 시스템 모델의 네트워크 처리량.

	$\epsilon^p = 0.1$	$\epsilon^p = 0.2$	$\epsilon^p = 0.3$
T	4.5	6.5	7.5
C_s	0.0224	0.0255	0.0270

1차 유저의 밀도도 네트워크 처리량에 영향을 미치는데 그 값이 커지면 일정수준까지 네트워크 처리량이 증가하지만 일정 수준을 넘어가면 네트워크 처리량이 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 1차 유저의 밀도가 증가하면 2차 유저가 무선에너지 하비스팅 할 수 있는 확률이 증가하여 배터리에 여유가 생겨서 더 자주 데이터 전송할 수 있게 된다. 하지만 일정 범위를 넘어가게 되면 하비스팅 구역이 넓어져서 2차 유저가 데이터를 전송할 수 있는 지역이 협소해지게 되고 이는 네트워크 처리량 감소로 이어지게 된다.

그림 5도 역시 outage 제약조건이 각각 0.1, 0.2, 0.3인 조건으로 시작하고 그 값이 커질수록 네트워크 처리량이 전반적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 프레임 주기가 일정량 이상 증가하면 2차 유저의 데이터전송 비율이 센싱하는 비율보다 높아져서 네트워크 처리량이 증가하게 된다. 하지만 프레임 주기가 일정 수준 이상 커지게 되면 센싱하는 시간의 비율이 프레임 주기에서 작아지게 되고, 이는 2차 유저가 1차 유저를 제 때 감지하지 못해서 outage가 발생할 확률을 증가시키게 된다. 따라서 각 제약조건에 맞는 적절한 프레임 주기로 설정해 줘야 네트워크 처리량을 최대화 할 수 있다.

그림 6은 outage 제약조건이 각각 0.1, 0.2, 0.3인 세 가지 조건에서 1차 유저의 밀도에 따른 2차 유저의 최적의 전송파워를 그래프로 나타내고 있다. 1차 유저의 밀도가 증가함에 따라 2차 유저의 최적의 전송파워가 감소하고 있는데 이는 1차 유저의 수가 증가하면 2차 유저가 1차 유저의 통신에 간섭을 일으킬 확률이 증가하게 되므로 2차 유저의 송신파워

를 감소시켜야 간섭할 확률이 줄어들어 네트워크 처리량을 감소시키지 않게 된다.

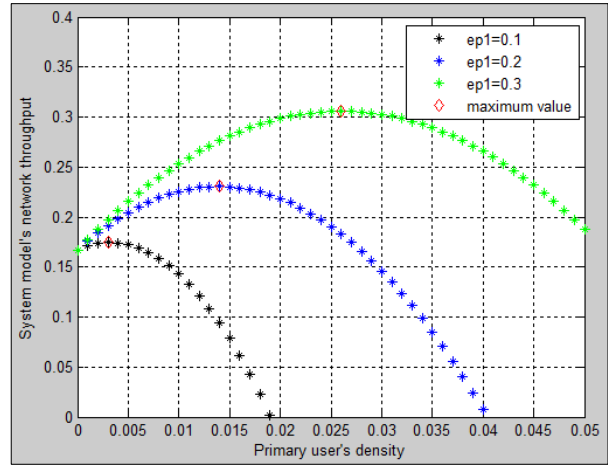


그림 4. 1차 유저의 밀도에 따른 시스템모델의 네트워크의 처리량.

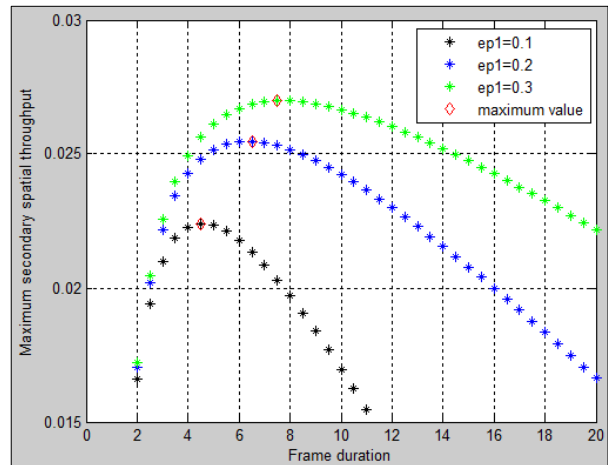


그림 5. 2차 유저의 프레임 주기에 따른 시스템모델의 네트워크의 처리량.

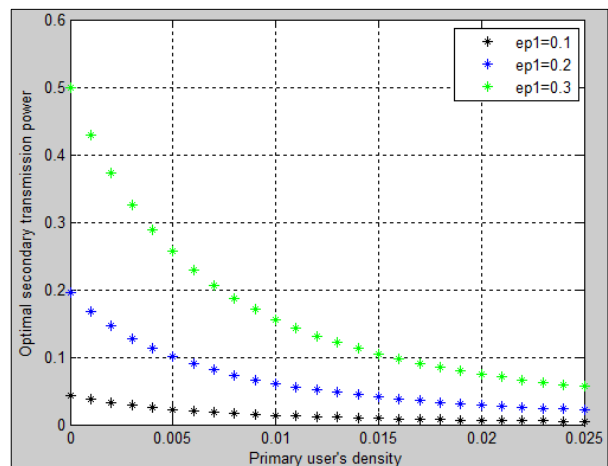


그림 6. 1차 유저의 밀도에 따른 최적의 2차 유저 송신파워.

IV. 결론

본 논문에서는 무선에너지 하비스팅이 적용된 인지무선 네트워크 시스템 모델을 제안한다. 여기서 네트워크 모델은 HPPP 형태로 분포되어있고 우선 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. 우선 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] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach, and L. Ventura, "Ambient RF energy harvesting," in proceedings of Int. Conf. Renew. Energies and Power Qual. (ICREPPQ), Mar. 2010.
- [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.
- [7] D. Cabric, S. Mishra, R. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in proceedings of Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, vol. 1, pp. 772 - 776, 2004.

저자

정 준 희(Jun Hee Jung)



준회원
 · 2015년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 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 전자융합공학과 학사졸업
 · 2014년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전과 공학과 석사과정

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

김 진 영(Jin Young Kim)



종신회원
 · 1998년 2월 : 서울대학교 전자 공학과 공학박사
 · 2001년 2월 : SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
 · 2001년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자 융합공학과 교수

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