논문 2012-49TC-3-2

에너지 수집 기능이 있는 인지 무선 시스템의 협력 스펙트럼 센싱 기법

(Cooperative Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems with Energy Harvesting Capability)

박 성 수*, 이 석 원**, 방 극 준***, 홍 대 식****

(Sungsoo Park, Seokwon Lee, Keukjoon Bang, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 에너지 수집(energy harvesting) 기능이 있는 무선 센서 노드(sensor node)들이 인지 무선 시스템의 스펙트럼 센싱 신뢰성 및 정확도를 높이기 위하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행하는 무선 센서 네트워크를 제안한다. 각 센서 노드들이 태양광, 풍력 등으로부터 에너지를 자체적으로 수집하여 전원으로 이용할 때, 수집되는 에너지의 양에 따라 적응적으로 스펙트럼 센싱을 수행하고, 그 결과를 융합 센터(fusion center)로 전송하는 적응적 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 무선 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드의 수와 수집되는 에너지의 통계적인 특성에 따라 스펙트럼 센싱의 성능이 어떻게 달라지는지 보이고, 센서 노드의 에너지 검출기에 사용되는 표본의 개수를 조절함으로써 융합 센터에서 오검출 확률을 최소화할 수 있음을 보여준다.

Abstract

In this paper, we investigate cooperative spectrum sensing scheme for sensor network-aided cognitive radio systems with energy harvesting capability. In the proposed model, each sensor node harvests ambient energy from environment such as solar, wind, mechanical vibration, or thermoelectric effect. We propose adaptive cooperative spectrum sensing scheme in which each sensor node adaptively carries out energy detection depending on the residual energy in its energy storage and then conveys the sensing result to the fusion center. From simulation results, we show that the proposed scheme minimizes the false alarm probability for given target detection probability by adjusting the number of samples for energy detector.

Keywords : Cognitive radio, cooperative spectrum sensing, energy harvesting

Ⅰ. 서 론

최근 전파 이용의 급속한 확산 및 광대역 멀티미디어 서비스의 증가에 따라 주파수 자원에 대한 요구가 급증하고 있으며, 무선 통신 기술의 발전은 이러한 주파수 자원 수요의 증가를 가속화 시키고 있다. 하지만 FCC(Federal Communications Commission)의 분석에 따르면 이미 할당된 주파수 대역이 실제로는 시간과 장소에 따라 15~80%만 사용되고 있다.[1] 따라서 주파수 부족 문제 해결과 주파수 이용 효율 극대화를 위해 실제로 사용되지 않고 비어 있는 주파수를 찾아서 통신하는 인지 무선(cognitive radio) 기술이 주목받고 있다.[2]

인지 무선 기술 중 스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술은 부사용자(secondary user)가 주변의 전파환경을

* 정회원, ** 학생회원, **** 평생회원-교신저자, 연세대학교
(Yonsei University)
*** 평생회원, 인덕대학교
(Induk University)
※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018938)
접수일자: 2011년11월28일, 수정완료일: 2012년3월19일

능동적으로 감지하여 비어있는 스펙트럼을 찾아내는 기술로 인지 무선 기술의 근간을 이룬다. 하지만 무선 통신 환경에서는 페이딩(fading)이나 쉐도잉(shadowing) 등의 영향으로 스펙트럼 센싱 결과의 정확성이 떨어질 수 있다. 스펙트럼 센싱이 부정확하면 해당 주파수를 사용 중인 주사용자(primary user)에게 허용량 이상의 간섭을 미치거나, 비어있는 주파수 대역을 효율적으로 찾아내 이용할 수 없으므로, 신속하고 정확한 스펙트럼 센싱 기술의 개발이 필요하다.

스펙트럼 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이기 위하여 다수의 부사용자들이 센싱 정보를 공유하는 협력 스펙트럼 센싱(cooperative spectrum sensing) 기술이 제안되었다.[3~6] 협력 스펙트럼 센싱은 다수의 부사용자가 개별적으로 센싱한 정보를 공유하여 페이딩 및 쉐도잉 등에 의한 영향을 완화하여 스펙트럼 센싱의 성능을 높일 수 있다.

본 논문에서는 에너지 수집(energy harvesting) 기능이 있는 무선 센서 노드(sensor node)들이 인지 무선 시스템의 스펙트럼 센싱 신뢰성 및 정확도를 높이기 위하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행하는 무선 센서 네트워크를 제안한다. 각 센서 노드들이 태양광, 풍력 등으로부터 에너지를 자체적으로 수집하여 전원으로 이용하면, 외부의 전원 공급 없이도 지속적으로 스펙트럼 센싱을 수행할 수 있다.[7] 이때, 각 센서 노드들은 수집되는 에너지의 양에 따라 적응적으로 스펙트럼 센싱을 수행하고, 그 결과를 융합 센터(fusion center)로 전송한다. 융합센터는 각 센서 노드들로부터 센싱 결과를 취합하고 이를 결합하여 스펙트럼 점유 여부에 대한 최종적인 판정을 한다.

본 논문에서는 에너지 수집을 통해 적응적으로 스펙트럼 센싱을 수행하는 개별 센서 노드로부터 취합한 센싱 결과를 융합 센터에서 연판정할 때, 수집되는 에너지의 통계적인 특성에 따라 스펙트럼 센싱의 성능이 어떻게 달라지는지 모의실험을 통해 평가한다.

Ⅱ. 센서 네트워크 기반 협력 스펙트럼 센싱 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 주사용자가 존재하고 그 주위에 협력 스펙트럼 센싱을 수행하는 K개의 센서 노드와 융합 센터가 존재하는 센서 네트워크 기반 인지 무선 시스템을 가정한다. 협력 스펙트럼 센싱은 페이딩 및 쉐도잉 등에 의한 스펙트럼 센싱의 성능 열화를 완화시키기 위하여 각 센서 노드의 센싱 결과를 공유함으로써 스펙트럼 센싱의 정확도를 향상시키는 것을 목적으로 한다.

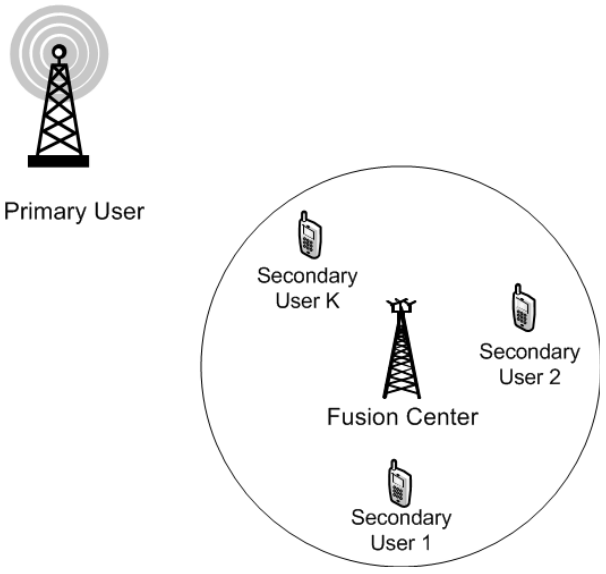

그림 1. 협력 스펙트럼 센싱 모델
Fig. 1. Cooperative spectrum sensing model.

각 센서 노드는 고정된 전원 공급이나 배터리 교체 없이 주변 환경으로부터 수집한 에너지만을 이용하여 주사용자의 스펙트럼을 센싱하고, 센싱 결과를 융합 센터로 전달한다. 각 센서 노드가 한 슬롯 당 수집하는 에너지는 평균 λ_e인 포아송 계수 과정 (Poisson counting processes)을 따른다고 가정한다.[8]

센서 노드는 수집한 에너지를 배터리나 슈퍼 캐패시터 등의 에너지 저장장치[9]에 저장한 후, 저장된 에너지를 사용하여 스펙트럼 센싱을 수행하고 그 결과를 융합 센터에 보고한다. 융합 센터는 센서 노드들의 센싱 결과를 취합하여 최종적으로 채널이 이용 가능한지 여부를 판별한다.

1. 에너지 검출 기반 스펙트럼 센싱

t번째 슬롯이 시작할 때, 센서 노드 k는 에너지 저장장치에 저장된 잔여 에너지(residual energy)에 따라 스펙트럼 센싱을 수행할지 여부를 결정한다. K개의 센서 노드 중 스펙트럼 센싱과 센싱 결과 전달에 필요한 충분한 잔여 에너지를 가지고 있는 센서 노드의 집합을 $\boldsymbol{K_s}(t)$라고 가정한다. $\boldsymbol{K_s}(t)$에 포함된 센서 노드 k는 $L_k(t)$개의 표본을 적분하는 에너지 검출기[10~11]를 이용하여 수신 신호의 에너지 값을 계산하며, $L_k(t)$는 센

서 노드 k의 잔여 에너지량에 따라 결정된다.

센서 노드 k가 측정하는 수신 신호의 에너지 검출값 $y_k(t)$는 주사용자 신호의 존재 유무에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k(t)=\begin{cases}\sum_{l=1}^{L_k(t)}|n_k(t,l)|^2, & H_0\\ \sum_{l=1}^{L_k(t)}\left(|s_k(t,l)|^2+|n_k(t,l)|^2\right), & H_1\end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 H_0와 H_1은 각각 주사용자의 신호가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우를 나타내고, $s_k(t,l)$와 $n_k(t,l)$은 각각 센서 노드 k가 t번째 슬롯의 스펙트럼 센싱 구간동안 수신하는 주사용자 신호와 잡음의 l번째 표본을 나타낸다. 이때 $s_k(t,l)$는 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{k,p}^2$인 복소수 값을 갖는 백색 가우시안 랜덤 프로세스로 표현할 수 있고, $n_k(t,l)$은 분산이 $\sigma_{k,n}^2$인 복소수 값을 갖는 백색 가우시안 잡음으로 표현할 수 있다. 본 논문에서는 모든 센서 노드가 동일한 신호 대 잡음비 (SNR, signal to noise ratio) $\gamma=\gamma_k=\sigma_{k,p}^2/\sigma_{k,n}^2$를 갖는다고 가정한다.

2. 연판정 결합 기법

센서 노드는 수신 신호의 에너지 검출값 $y_k(t)$를 융합 센터로 전송한다. 융합 센터는 자체적으로 수행한 에너지 검출값 $y_0(t)$와 각 센서 노드들로부터 수신한 에너지 검출값 $y_k(t)$를 더하여 t번째 슬롯에서의 총 수신 에너지 검출값 $y(t)$를 계산한다. 융합 센터를 $k=0$으로 나타내면, $y(t)$는 주사용자 신호의 존재 유무에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t)=\begin{cases}\sum_{k\in\{0,\boldsymbol{K}_s(t)\}}\sum_{l=1}^{L_k(t)}|n_k(t,l)|^2, & H_0\\ \sum_{k\in\{0,\boldsymbol{K}_s(t)\}}\sum_{l=1}^{L_k(t)}\left(|s_k(t,l)|^2+|n_k(t,l)|^2\right), & H_1\end{cases} \quad (2)$$

이때 총 표본의 수 $L(t)$는 다음과 같이 정의된다.

$$L(t)=\sum_{k\in\{0,\boldsymbol{K}_s(t)\}}L_k(t) \quad (3)$$

융합 센터는 총 수신 에너지 검출값 $y(t)$를 임계값 T와 비교하여 임계값 이상이면 주사용자가 존재한다고 판단하고, $y(t)$가 임계값 T 미만일 경우 주사용자가 없다고 판정을 내린다. 임계값 T 및 $L(t)$에 따른 검출 확률 $P_d(t)$와 오경보 확률 $P_f(t)$는 다음과 같이 주어진다.[10]

$$\begin{aligned}P_d(t)&=\Pr[y(t)<T|H_1]\\&=Q\left(\sqrt{L(t)}\left(\frac{T}{(\gamma_k+1)\sigma_n^2}-1\right)\right)\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}P_f(t)&=\Pr[y(t)\geq T|H_0]\\&=Q\left(\sqrt{L(t)}\left(\frac{T}{\sigma_n^2}-1\right)\right)\end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $Q(\bullet)$는 Q-함수를 나타낸다. (4)로부터, 목표 검출 확률 P_d^t를 만족시키기 위한 임계값 T_d는 다음과 같이 결정된다.

$$T_d=(\gamma_k+1)\sigma_n^2\left(\frac{Q^{-1}(P_d^t)}{\sqrt{L(t)}}+1\right) \quad (6)$$

Ⅲ. 에너지 수집을 고려한 적응적 스펙트럼 센싱 기법

본 장에서는 각각의 센서 노드가 잔여 에너지량에 따라 스펙트럼 센싱 수행 여부 및 에너지 검출기에 사용되는 표본의 개수 $L_k(t)$를 조절하는 적응적 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다.

1. 에너지 검출 표본 개수에 따른 에너지 소모 모델

센서 노드 k의 에너지 저장장치에 저장된 초기 에너지가 $E_k(0)$이고, 에너지 저장장치의 최대 저장용량을 $E_{\max}$라고 가정하면, t번째 슬롯($t=1,2,\cdots$)에서 센서 노드 k의 잔여 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}&E_k(t)\\&=\max[E_k(t-1)-E_{k,c}(t)+E_{k,h}(t),E_{\max}],\end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $E_k(t-1)$는 $t-1$번째 슬롯의 잔여 에너지를 나타내며, $E_{k,c}(t)$와 $E_{k,h}(t)$는 각각 센서 노드 k가 t번째 슬롯 동안 사용한 에너지와 수집한 에너지를 의미한다.

$E_{k,c}(t)$는 스펙트럼 센싱을 위해 소비되는 $e_s(t)$와 융합 센터로 센싱 결과를 전송하기 위해 소비되는 e_r로 구성된다고 가정한다. 이때, $e_s(t)$는 에너지 검출기에서 사용되는 표본의 개수 $L_k(t)$에 따라 증가하며, 본 논문

에서는 다음과 같이 $e_s(t)$가 $L_k(t)$에 따라 선형적으로 증가한다고 가정한다.

$$e_s(t) = \epsilon_s L_k(t) \tag{8}$$

여기서 ϵ_s는 센서 노드 k의 에너지 검출기에서 1개의 표본을 측정하기 위해 소모되는 평균 에너지이다. 결과적으로, $E_{k,c}(t)$는 에너지 검출기에서 사용되는 표본의 개수 $L_k(t)$에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$E_{k,c}(t) = \begin{cases} \epsilon_s L_k(t) + e_r, & sensing \\ 0 & , no\,sensing \end{cases} \tag{9}$$

2. 적응적 에너지 검출 표본 개수 결정 기법

t번째 슬롯이 시작할 때, 센서 노드 k는 이전 슬롯의 잔여 에너지 $E_k(t-1)$를 바탕으로 t번째 슬롯에서 에너지 검출기에서 사용되는 표본의 개수 $L_k(t)$를 다음과 같이 결정한다.

$$L_k(t) = \begin{cases} \min[L_e(t),\, L_{\max}] & , L_e(t) \geq L_{\min} \\ 0 & , otherwise \end{cases} \tag{10}$$

여기서

$$L_e(t) = \max\left[0,\, \left\lfloor \frac{E_k(t-1) - e_r}{\epsilon_s} \right\rfloor \right] \tag{11}$$

는 이전 슬롯의 잔여 에너지 $E_k(t-1)$를 이용하여 검출 가능한 최대 표본의 개수이다. (10)과 (11)로부터 에너지 검출기가 사용할 표본의 개수 $L_k(t)$는 다음과 같은 범위에서 결정된다.

$$L_{\min} \leq L_k(t) \leq L_{\max} \tag{12}$$

(10)에서 $L_e(t) < L_{\min}$인 경우, 센서 노드 k는 스펙트럼 센싱을 수행하지 않으며 ($L_k(t) = 0$), 융합 센터로 아무 정보도 전송하지 않으므로 $E_{k,c}(t) = 0$이다.

Ⅳ. 실 험

본 장에서는 제안된 적응적 스펙트럼 센싱 기법의 성능이 센서 네트워크를 구성하는 센서 노드의 수와 수집되는 에너지의 통계적인 특성에 따라 어떻게 달라지는지 모의실험을 통해 평가한다. 모의실험의 매개 변수들은 표 2에 정리되어 있다. 공정한 비교를 위하여 융합

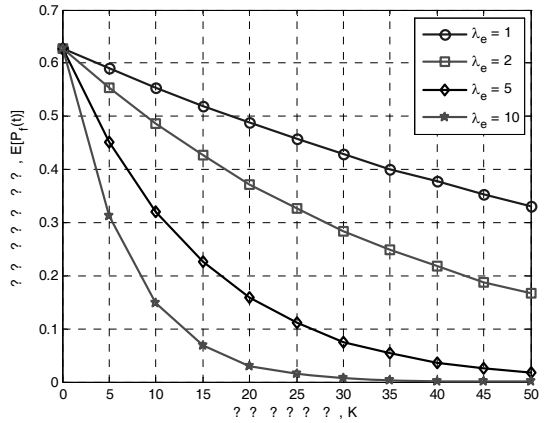

그림 2. 센서 노드의 수에 따른 평균 오경보 확률의 변화 ($L_{\max} = 10,\ L_{\min} = 5$)

Fig. 2. Average false alarm probability for varying K.

표 1. 모의실험 매개 변수

Table 1. Simulation Parameters.

매개 변수	값
K	1~50
$L_{\max}, L_{\min}$	10, 5
$\sigma_{k,p}^2,\ \sigma_{k,n}^2$	1, 1
λ_e	1, 2, 5, 10
$E_{\max},\ E_k(0)$	200, 0
$\epsilon_s,\ e_r$	5, 20
P_d^t	0.9

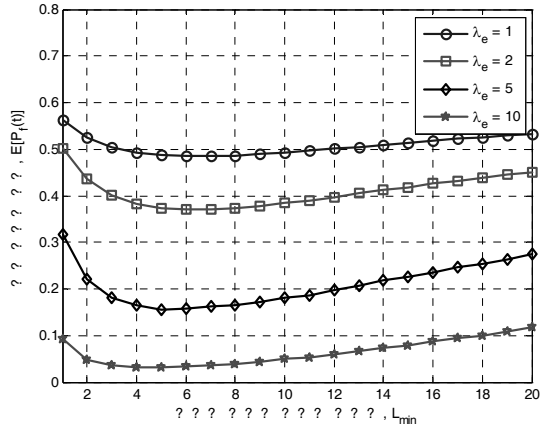

그림 3. 에너지 검출기 표본의 최소값에 따른 평균 오경보 확률의 변화 ($K = 20,\ L_{\max} = \infty$)

Fig. 3. Average false alarm probability for varying $L_{\min}$.

센터는 $L_{\max}$, $L_{\min}$에 상관없이 $L_0(t) = 5$개의 표본을 사용하는 에너지 검출기를 이용하여 수신 에너지 $y_0(t)$

를 계산한다고 가정한다. 융합 센서의 목표 검출 확률은 $P_d^t = 0.9$로 가정한다.

그림 2는 $L_{\max} = 10$, $L_{\min} = 5$일 때, 센서 노드의 수 K와 λ_e에 따른 평균 오경보 확률 $E[P_f(t)]$을 나타낸다. 융합 센터에서 목표 검출 확률 $P_d^t = 0.9$를 만족시키기 위해 임계값 T_d를 (6)에 의해 결정할 때, K와 λ_e가 증가할수록 협력 스펙트럼 센싱에 참여하는 센서 노드의 수가 증가하므로, 평균 오경보 확률은 감소한다.

그림 3은 $K = 20$, $L_{\max} = \infty$일 때, $L_{\min}$과 λ_e에 따른 평균 오경보 확률 $E[P_f(t)]$를 나타낸다. 융합 센터에서 목표 검출 확률 $P_d^t = 0.9$를 만족시키기 위해 임계값 T_d를 (6)에 의해 결정할 때, 평균 오경보 확률은 λ_e가 증가할수록 감소한다. 이는 λ_e가 증가할수록 각 센서 노드가 수집하는 에너지량이 증가하여 에너지 검출기에 사용되는 표본의 개수 $L_k(t)$가 증가하기 때문이다. 하지만 $L_{\min}$이 증가함에 따라 평균 오경보 확률은 감소하다가 다시 증가한다. 이는 $L_{\min}$이 너무 작을 경우 각 센서 노드가 융합 센터로 센싱 결과를 전송하는 빈도가 불필요하게 많아지고, $L_{\min}$이 너무 높을 경우 각 센서 노드가 에너지를 검출하는데 사용하는 표본의 개수가 늘어나는 대신 한 슬롯당 협력 스펙트럼 센싱에 참여하는 센서 노드의 수가 줄어들기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 에너지 수집 기능이 있는 센서 노드를 활용하여 협력 스펙트럼 센싱을 수행하는 무선 센서 네트워크를 제안하고, 각 센서 노드가 잔여 에너지량에 따라 스펙트럼 센싱 수행 여부 및 에너지 검출기에 사용되는 표본의 개수를 조절하는 적응적 스펙트럼 센싱 기법을 제안하였다. 제안 기법에서 센서 노드의 개수 및 평균적으로 수집되는 에너지량에 따라 에너지 검출기 표본의 개수를 조절함으로써, 오검출 확률을 최소화할 수 있음을 모의실험을 통하여 보여주었다.

참 고 문 헌

[1] FCC Spectrum Policy Task Force, “Report of the spectrum efficiency working group,” ET Docket No. 02-115, Nov. 2002.

[2] J. Mitola and G. Q. Maguire, “Cognitive radio: Making software radios more personal,” IEEE Pers. Commun., vol.6, pp. 13-18, Aug. 1999.

[3] Z. Quan , S. Cui , and A.H. Sayed, “An optimal strategy for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in Proc. of IEEE GLOBECOM 2007, pp. 2947-2951, Nov. 2007.

[4] G. Ganesan, Y. Li, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in Proc. of IEEE DySPAN 2005, pp. 137-143, Nov. 2005.

[5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Asymptotic performance of collaborative spectrum sensing under correlated log-normal shadowing,” IEEE Commun. Lett., vol 11, no. 1, pp. 34-36, Jan.2007.

[6] G. Noh, H. Wang, J. Jo. B-H Kim, D. Hong, “Reporting Order Control for Fast Primary Detection in Cooperative Spectrum Sensing,” Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol.60, no.8, pp.4058-4063, Oct. 2011.

[7] S. Park, S. Lee, B. Kim, D. Hong, and J. Lee, “Energy-Efficient Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting (INVITED),” Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management, 2011. CogART 2011. Fourth International Workshop on, pp. 26-29 Oct 2011.

[8] Ozel, O., Tutuncuoglu, K., Jing Yang, Ulukus, S., Yener, A., “Transmission with Energy Harvesting Nodes in Fading Wireless Channels: Optimal Policies,” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.29, no.8, pp.1732-1743, September 2011.

[9] Simjee, F., Chou, P.H., “Everlast: Long-life, Supercapacitor-operated Wireless Sensor Node,” Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED'06. Proceedings of the 2006 International Symposium on, pp.197-202, 4-6 Oct. 2006.

[10] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, “Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks,” Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 7, pp. 1326 .1337, april 2008.

[11] H. Wang, G. Noh, D. Kim, S. Kim, and D. Hong, “Advanced Sensing Techniques of Energy Detection in Cognitive Radios”, Journal of Communications and Networks, vol.12 No.1, Feb. 2010.

저 자 소 개

박 성 수(정회원)
2006년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2008년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.
2012년 연세대학교 전기전자 공학과 박사 졸업.
2012년～현재 연세대학교 전기전자공학과 박사후 연구원.
<주관심분야 : 펨토셀, 멀티홉 시스템, 다중 안테나, 인지 무선, 에너지 수집>

이 석 원(학생회원)
2008년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.
2008년～현재 연세대학교 전기 전자공학과 석박사 통합 과정.
<주관심분야 : WBAN, 초저전력 통신, CR>

방 극 준(평생회원)
1981년～1985년 연세대학교 전자공학과 공학사.
1993년～1995년 연세대학교 산업대학원 전자공학과 공학석사.
1995년～1999년 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사.
1984년～1991년 삼성전자.
1991년～1994년 (주)아리스트 벤쳐창업.
2000～현재 인덕대학교 방송영상미디어과 부교수
<주관심분야 : 디지털방송 전송방식, 방통융합>

홍 대 식(평생회원)-교신저자
1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업.
1991년～현재 연세대학교 전기 전자공학과 교수.
<주관심분야 : 디지털통신, 통신 신호처리, 4G시스템, OFDM, 멀티홉 시스템, CR, M2M>