

무선에너지하비스팅 시스템을 위한 효율적인 스펙트럼 센싱 기법

황유민*, 신요안**, 김동인***, 김진영*

An Efficient Spectrum Sensing Technique for Wireless Energy Harvesting Systems

Yu Min Hwang*, Yoan Shin**, Dong In Kim*** and Jin Young Kim*

요 약

스펙트럼 센싱은 인지무선 (cognitive radio) 시스템을 동작시키기 위한 주요한 기법이며 인지무선 시스템을 통해 최근 주목받고 있는 무선에너지하비스팅 시스템에 에너지 하비스팅 효율을 개선할 수 있다. 최근 스펙트럼 센싱을 위한 다양한 기술이 연구되었는데, 그 중에서 가장 널리 쓰이고 있는 에너지 검출 (energy detection) 기술이 있다. 그러나 2차 유저 (secondary user; SU) 가 주파수 페이딩 (frequency fading) 및 쉐도잉 (shadowing)에 의해 영향을 받을 수 있기 때문에, 에너지 검출은 실제 무선 통신에서 숨겨진 단말기 문제 (hidden terminal problem)를 갖는다. 협력 스펙트럼 센싱 (cooperative spectrum sensing)은 SU의 공간적 다양성을 이용하여 이 문제를 해결할 수 있습니다. 그러나 다중 보조를 처리하여 데이터를 증가시키는 문제가 있기 때문에 우리는 적응형 스펙트럼 센싱 알고리즘을 사용하는 시스템 모델을 제안하고 성능을 시뮬레이션 한다. 이 알고리즘은 기본 사용자 (primary user; PU)의 수신 신호의 신호 대 잡음비 (signal to Noise Ratio; SNR)에 따라 단일 에너지 검출과 협동 에너지 사이의 감지 방법을 선택하는 방법을 이용한다. 시뮬레이션 결과를 통해 적응형 스펙트럼 센싱이 인지무선 시스템에서 더 효율적이라는 것을 확인한다.

Key Words : Cognitive Radio (CR), Adaptive Spectrum Sensing, Energy Detection, Cooperative Sensing, RF energy harvesting.

ABSTRACT

Spectrum sensing is a critical functionality of Cognitive Radio(CR) systems and the CR systems can be applied to RF energy harvesting systems to improve an energy harvesting rate. There are number of spectrum sensing techniques. One of techniques is energy detection. Energy detection is the simplest detection method and is the most commonly used. But, energy detection has a hidden terminal problem in real wireless communication, because of secondary user (SU) can be affected by frequency fading and shadowing. Cooperative spectrum sensing can solve this problem using spatial diversity of SUs. But it has a problem of increasing data by processing multiple secondary. So, we propose the system model using adaptive spectrum sensing algorithm and system model is simulated. This algorithm chooses sensing method between single energy sensing and cooperative energy according to the received signal's Signal to Noise Ratio (SNR) from Primary User (PU). The simulation result shows that adaptive spectrum sensing has an efficiency and improvement in CR systems.

I. 서 론

무선 단말의 급증으로 인해 희소한 무선 주파수 자원과 스펙트럼 할당 정책이 서로 대립하고 문제가 되고 있다. 무

선 통신의 발전은 방대한 양의 데이터와 높은 데이터 전송률을 가진 서비스를 제공하기 위해 더 많은 스펙트럼 자원을 필요로 한다. 그리고 더 많은 스펙트럼 자원의 요구는 공공 전파 스펙트럼의 부족 문제를 더욱 심화시키고 있는데 이는

※본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2014R1A5A1011478).

*광운대학교 전자공학과 소속 유비쿼터스 통신 연구실 (yumin@kw.ac.kr),(jinyoung@kw.ac.kr).

**승실대학교 정보통신전파공학부 소속 통신및정보처리 연구실 (yashin@ssu.ac.kr).

***성균관대학교 정보통신공학부 소속 무선통신 연구실 (dikim@skky.ac.kr).

접수일자 : 2017년 12월 11일, 최종게재확정일자 : 2017년 12월 18일

스펙트럼 자원을 효율적으로 관리하는 방법론의 개발과 제 시가 필요하게 되는 원동력이 되고 있다. 또한 무선 스펙트럼의 감지 및 분석 기술은 무선 에너지 하비스팅 시스템에서 에너지 하비스팅 효율 개선을 위해서도 주요한 역할을 수행할 수 있는 기반 기술이다. 주파수 스펙트럼은 할당된 대역에 대한 독점적인 사용 권한이 있는 고정된 방식으로 정부 기관에 의해 주 사용자 (PU) 에게 라이선스가 부여된다. 인지무선 (CR) 기술은 허가된 스펙트럼의 낮은 사용 [1]에 대한 해결책으로 동적 스펙트럼 자원 관리를 채택하여 스펙트럼 할당의 효율성을 향상시킬 수 있다. 또한, CR 시스템은 주변 환경을 인식하는 지능형 무선 통신 시스템이며, 미연방통신위원회 (FCC)는 비허가 무선 기기가 비어있는 주파수 대역, 특히 비어있는 TV 방송 대역을 기회적으로 사용하는 정책을 개발하고 있다 [2]. CR 구현은 스펙트럼 감지, 동적 주파수 선택, 적응 변조 및 광대역 주파수 기민성 RF 프론트-엔드 (front-end) 회로 [4]를 비롯한 많은 기술적 문제에 직면해 있다. 이는 CR 사용자가 간섭없이 허가되지 않은 대역을 사용해야하므로 CR 사용자가 허가된 사용자의 존재 또는 부재를 탐지해야 함을 의미한다. 이 기술은 CR의 가장 중요한 기법인 스펙트럼 센싱으로 알려져 있다. 스펙트럼 센싱 성능을 향상시키기 위해 CR 사용자 간의 협력 감지가 이미 제안된 바 있다. 협동 감지에서 CR 사용자는 감지 정보를 공유하며 결과적으로, CR 사용자는 주 사용자를 탐지하고 주파수 선택성 페이딩 및 쉐도잉의 효과를 감소시킬 수 있는 더 나은 기회를 갖을 수 있다. 이러한 배경을 바탕으로 우리는 본 논문에서 스펙트럼 센싱을 이용하는 무선 에너지 하비스팅 시스템을 위한 단일 감지와 협동 감지 사이의 적응 감지를 제안한다. 우리는 시스템의 복잡성을 줄이기 위해 에너지 검출 기술을 적용한다.

이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 에너지 검출에 기반한 적응 스펙트럼 센싱 기법의 시스템 모델을 소개한다. 3 장에서 시뮬레이션 결과를 제시하고 마지막으로 4 장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 인지무선통신 기반 무선에너지하비스팅 시스템

인지무선 통신 환경에서 CR 사용자는 주사용자의 우선 통신을 보장하는 범위 내에서 정보 교환 혹은 에너지 하비스팅이 가능하며, 스펙트럼 센싱 결과로부터 주사용자의 유무에 따라 정보 교환, 채널 이동, 에너지 충전 등 3가지의 동작을 수행 가능함. 인지무선통신 기반의 무선에너지하비스팅은 기존의 인지무선통신 환경과는 달리 CR 사용자의 에너지 충전 모드를 반영한 시스템 모델에 기반하며, 무선단말에서 데이터의 복원과 에너지의 충전이 공존하므로 에너지 효율과 주파수 효율을 향상시키기 위한 스펙트럼 센싱 기법이 필

요로 한다. 본 연구에서는 희소한 스펙트럼을 가지고 있는 CR 시스템에서 주어진 상황을 적응적으로 스펙트럼 센싱하는 기법을 제안하고, 에너지 하비스팅 효율을 증가하는 방안을 제공한다. 또한 CR에서의 스펙트럼 접근 기술을 적용하여 주사용자의 허가 대역을 동적으로 사용하거나 주사용자가 전송하는 RF 신호로부터 에너지를 충전하는 방법을 통해 에너지 하비스팅 효율을 개선할 수 있다.

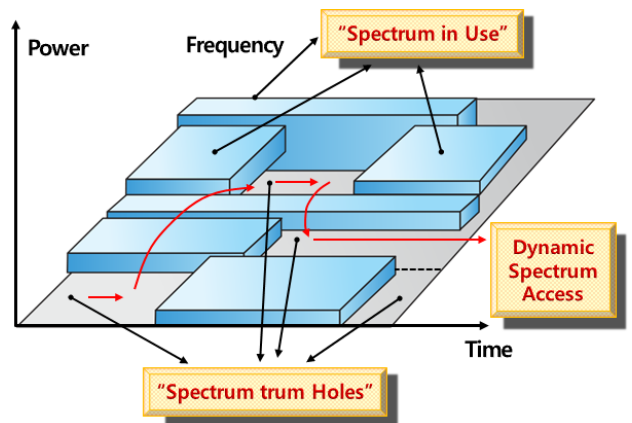


그림 1. RF 에너지 하비스팅 융합 무선망을 위한 인지 무선 통신 기술

기존의 스펙트럼 접근 기술은 스펙트럼 센싱 정보를 기반으로 주사용자가 사용하지 않는 대역을 찾아서 기회적으로 접근하여 정보를 교환함으로써 CR 시스템의 용량을 증대하는 것에만 치중함. 하지만 무선 에너지 하비스팅을 도입한 CR 시스템에서는 스펙트럼 센싱 결과를 기반으로 정보 교환을 위한 스펙트럼 접근과 에너지 충전을 위한 스펙트럼 접근을 모두 고려하여 스펙트럼 효율 및 에너지 효율을 증가시켜야 한다.

무선망에서는 주파수가 부족해지는 현상이 나타나므로 무선 인지 통신(CR) 기술을 이용한 센싱 기술을 통해 동적으로 무선단말들이 주파수를 공유하면 주파수 이용 효율을 크게 개선할 수 있을 뿐만 아니라 빈 주파수 대역을 기회적으로 이용하는 등의 무선에너지하비스팅으로 확장된 연결 동작이 가능하다.

2.2 적응형 스펙트럼 감지 시스템

인지 무선 시스템은 스펙트럼 감지를 통해 빠르고 정확하게 백색 공간(white space)을 확보해야 한다. 백색 공간을 검출하는 스펙트럼 감지 방법 중 하나가 에너지 검출 방법인데, 에너지 검출은 주 사용자 정보없이 검출함으로써 가장 간단한 구조를 가지므로 가장 널리 사용된다. 그러나 단일 에너지 감지에는 숨겨진 단말 문제 (hidden terminal problem)가 있다. 보조 사용자는 실제 통신 환경에서 주파수 딥 페이딩 및 쉐도잉의 영향을 받을 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 협동 감지(cooperative sensin)가 제안되었으

며, 협동 감지는 협력적인 보조 사용자에게 더 나은 스펙트럼 센싱 성능을 가져다준다. 그러나 오버 헤드 트래픽과 같은 추가 문제가 발생할 수 있기 때문에, 단일 감지 및 협동 감지를 적응 적으로 선택함으로써 2 차 사용자의 SNR 상태에 따른 적응 형 스펙트럼 감지 방법을 제안한다. 2 차 사용자가 안정적으로 스펙트럼을 탐지하기에 충분한 SNR을 가지고 있다면, 알고리즘은 단일 감지를 진행한다. 그렇지 않고 2 차 사용자가 신뢰성있게 검출하기에 충분한 SNR을 갖지 않으면, 협력 감지를 진행한다. 그림 2는 제안된 적응형 감지 시스템의 블록도이다.

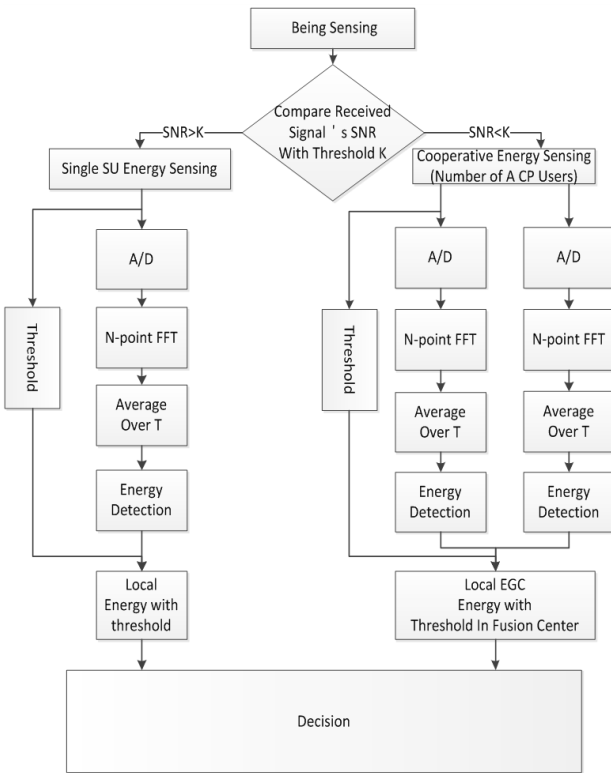


그림 2. 제안하는 적응형 스펙트럼 감지 시스템의 블록도

III. 검출 확률 및 EGC 결합

기존 감지 방식과 제안된 협력 스펙트럼 감지 방식 간의 성능 비교를 위한 시스템 모델을 설명한다. 두 가지 감지 방식은 다음과 같이 k^{th} 시간의 스펙트럼 감지에 대해 공통적으로 두 가설을 갖는다.

$$\begin{aligned} H_0 : y(k) &= v(k), \\ H_1 : y(k) &= hs(k) + v(k), \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h 는 페이딩 계수, $s(k)$ 는 주 사용자로부터 전송된 신호이고 $v(k)$ 은 독립적인 가우시안 랜덤 변수로서 모델링된 additive white Gaussian noise (AWGN) 이다.

H_0 은 주 사용자의 부재를 의미하고 H_1 은 주 사용자의 존재를 의미한다. H_1 셀이 테스트되고 있다면 i^{th} CR 사용자의 수신신호 $y_c^i(k)$ 에 대한 확률밀도함수 (probability density function; PDF)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$f_{y_c^i}(y|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{(y-\overline{S_C})^2}{2}}, \quad (2)$$

여기서 $\overline{S_C}$ 주 사용자로부터 전송된 신호의 평균 크기이다. H_0 cell 이 테스트되고 있다면, $y_c^i(k)$ 의 PDF는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{y_c^i}(y|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} e^{-\frac{y^2}{2}}. \quad (3)$$

각각의 CR 사용자가 1 차 사용자의 존재 여부를 결정한 후, 결과는 무선 채널을 통해 융합 센터로 재전송된다. 그런 다음 융합 센터는 M 명의 CR 사용자로부터 수신된 신호를 결합하여 최종 결정을 내립니다. H_1 셀과 H_0 셀을 테스트 할 때 융합 센터에서 결합된 결과의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{y_F}(y|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi M\sigma_F^2}} e^{-\frac{(y-\overline{S_F})^2}{2}}, \quad (4)$$

$$f_{y_F}(y|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi M\sigma_F^2}} e^{-\frac{y^2}{2}}, \quad (5)$$

여기서 $\overline{S_F} = \sum_{i=1}^M \overline{S_F^i}$ 와 $\overline{S_F^i}$ 는 i^{th} CR 유저로부터 전송된 신호의 평균 크기이다.

주어진 결정 임계값에 대한 검출 확률은 이벤트 확률로서 정의되며, 셀에 대응하는 출력 결정 변수는 결정 임계값을 초과하며 이는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$\begin{aligned} P_D &= \int_{\gamma}^{\infty} f_{y_F}(y|H_1) dy \\ &= \int_{\gamma}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi M\sigma_F^2}} e^{-\frac{(y-\overline{S_F})^2}{2}} dy, \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 P_D 는 H_1 cell의 탐지 확률이다. 그리고 그 탐지 확률을 다음과 같이 표현한다.

$$P_D = \int_{\gamma-s_F}^{\infty} \frac{1}{M\sigma_F^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

$$= Q\left(\frac{\gamma-s_F}{M\sigma_F^2}\right), \quad (7)$$

여기서 $Q(\cdot)$ 는 Q function 이다.

우리는 스펙트럼 감지 결정을 위한 EGC와 결정 결합 방식을 제안한다. 1 차 사용자의 송신 신호는 랜덤 신호이므로 스펙트럼 검출 규칙으로 에너지 검출기를 사용한다. 다수의 안테나로부터의 신호를 결합하는 다양한 기술이 알려져있는데, 그 중 한가지인 equal gain combining (EGC)에서 각 신호 브랜치는 신호 진폭에 관계없이 동일한 요소에 가중치를 적용하는 방법을 사용한다. EGC는 MRC (maximum ratio combining)보다 구현이 간단하며 채널 진폭 추정이 불필요한 장점이 있다. 각 로컬 감지 결과는 EGC를 사용하여 결합된다.

IV. 시뮬레이션

본 절에서는 제안한 시스템 모델의 성능을 확인하기 위해 시뮬레이션 결과를 제시한다. 아래 표 1은 시뮬레이션 실험에 사용된 매개 변수이다. BPSK (Binary Phase Shift Keying) 신호는 기본 사용자의 신호에 사용되며, 검출 방법은 에너지 검출 방식을 사용한다. Combining scheme은 융합 센터에서 Cooperative sensing 데이터 처리를 위해 EGC (Equal Gain Combining)로 사용된다. FA (False Alarm Probability)는 융합 센터에서 검출 확률을 얻기 위해 각각 5% 및 10%의 검출 임계값을 갖는다. 채널 모델은 AWGN과 Rayleigh의 두 채널 모델을 사용한다.

시뮬레이션 결과는 그림 3에서 5와 같이 융합 센터에서 오경보 임계 확률 5% 인 경우의 성능 검출 확률을 나타낸다. 그림 3에서 AWGN 과 Rayleigh 채널 사이에서 검출 확률에 대한 임계 확률의 결과를 나타낸다.

Table 1. 시뮬레이션 파라미터.

Parameter	Single Sensing	Cooperative Sensing
Noise Model	AWGN / Rayleigh	AWGN/ Rayleigh
Detection method	Energy sensing	Energy Sensing
Modulation scheme	BPSK	BPSK
Combining method	-	EGC
FA	5%, 10%	5%, 10%

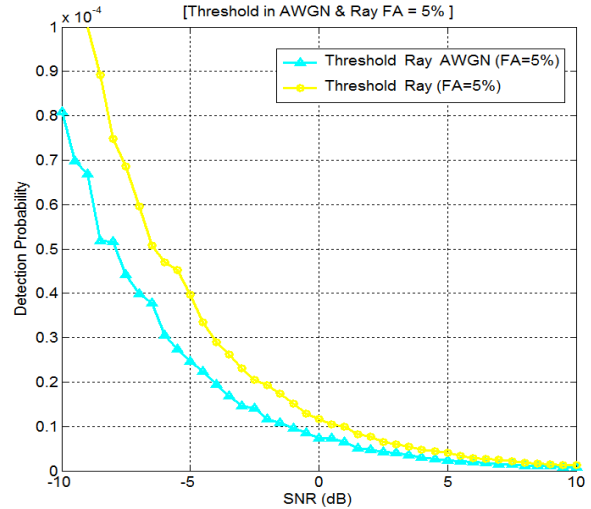


그림 3. FA = 5 %에서 AWGN과 Rayleigh 간의 탐지 임계치 확률 비교

그림 4에서 단일 감지와 협동 감지 사이의 탐지 확률 결과를 보여준다. 그림 4의 AWGN 채널에서 2 차 사용자의 SNR이 1dB 미만일 경우 단일 감지는 협조 감지보다 탐지 확률이 높게 나타나며, 반대로 2 차 사용자의 SNR이 1dB보다 높을 경우 협력 감지는 단일 감지보다 탐지 확률이 높은 것으로 나타난다. 그림 4의 Rayleigh 채널에서 2 차 사용자의 SNR은 2.5dB이다. 그림 5에서 우리는 적응 감지에서 성능 감지 확률의 향상을 확인할 수 있다. 따라서 우리는 값의 중복에 기반하여 적응형 스펙트럼 센싱 방법을 제안하고 그 성능을 실험을 통해 확인하였다.

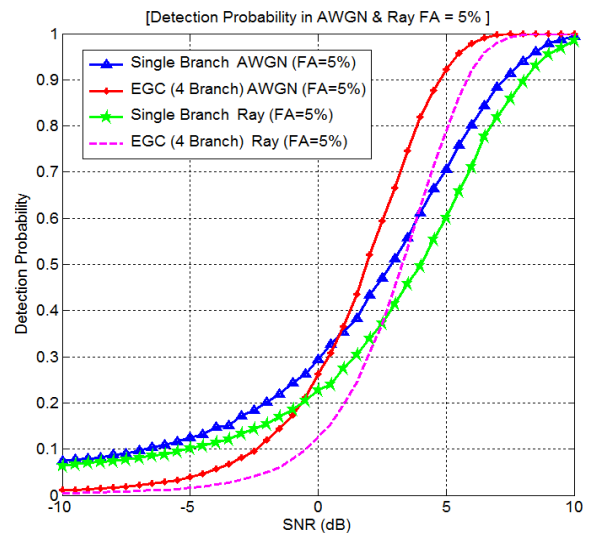


그림 4. 임계치 FA = 5 %일 때 Rayleigh와 AWGN 채널환경에서 협력 감지 및 단일 감지의 탐지 확률 비교

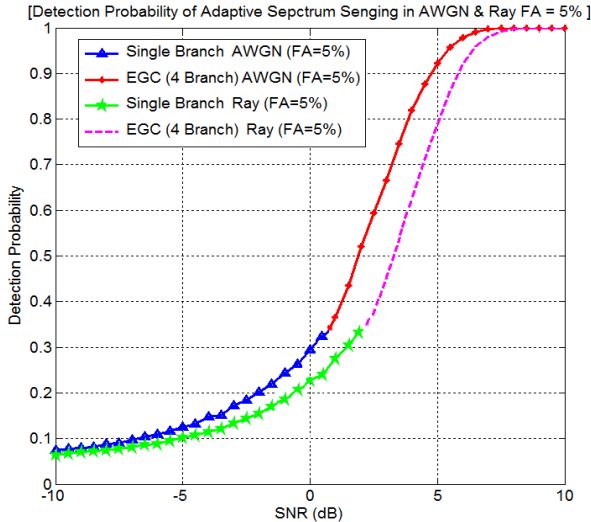


그림 5. AWGN과 Rayleigh 채널 간의 적응형 스펙트럼 감지의 탐지 확률을 비교

V. 결론

제한한 협력 센싱은 2차 사용자의 diversity 장점을 이용하여 숨겨진 터미널 문제를 해결할 수 있으며 무선에너지하비스팅 시스템에 적용하여 에너지 하비스팅 효율을 개선할 수 있는 하나의 솔루션이 될 수 있다. 그러나 협동 감지는 융합 센터로의 보고 지연 문제가 있어 전체 시스템 성능을 저하시킬 수 있다. 따라서 단일 감지와 협동 감지를 선택하고 성능 향상을 확인함으로써 2 차 사용자의 SNR 상태에 따른 적응형 스펙트럼 감지 방법을 제안하고 이에 대한 성능을 본 논문에서 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. Mitola, Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio, Royal Inst. Technol. (KTH), 2003.
- [2] Working Group on Wireless Regional Area Networks, IEEE Std. 802.22.
- [3] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, "IEEE 802.22: An introduction to the first wireless standard based on cognitive radios", Journal of communications, vol. 1, no. 1, Apr. 2006.
- [4] J. Mitola, "Special issue on software radio" in IEEE Commun. Mag., May 1995.
- [5] W. Zhang, R. K. Mallik, K. B. Letaief, "Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks", Proc. IEEE ICC, pp. 3411-3415, 2008-May-1923.
- [6] D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", Proc. Asilomar Conf. Signals Syst. Comput., vol. 1, pp. 772-776, Nov. 2004.

저자

황 유 민(Yu Min Hwang)

학생회원



- 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학 학사졸업
- 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석박통합과정

<관심분야> : 4G 이동통신, 디지털 통신, 무선에너지하비스팅, 인지무선통신

신 요 안(Yoan Shin)

종신회원

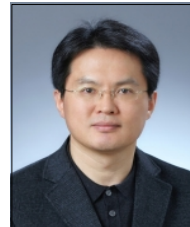


- 1992년 12월 : Univ. of Texas at Austin 전기 및 컴퓨터공학과 공학박사
- 1994년 7월 : 오스틴 소재 MCC 연구 콘소시엄 Member of Technical Staff
- 1994년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> : 차세대 이동통신 시스템, 무선측위 시스템

김 동 인(Dong In Kim)

종신회원



- 1990년 : University of Southern California 전기공학과 공학박사
- 2007년 : School of Engineering Science, Simon Fraser Univ. 정교수
- 2007년~현재 : 성균관대학교 정보통신공학부 정교수

<관심분야> : 4G/5G 이동통신, 협력통신, 에너지하비스팅

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