

통화량이 많은 상황에서 인지 무선 시스템을 위한 Cyclostationarity 기반 스펙트럼 센싱 기법

김 영 제*, 심 정 윤*, 윤 석 호°, 장 용 업**, 정 길 수**

A Cyclostationarity-Based Spectrum Sensing Scheme for Cognitive Radio Systems in High Traffic Circumstances

Youngje Kim*, Jeongyoon Shim*, Seokho Yoon°, Yong-Up Jang**, Kilsoo Jeong**

요 약

인지무선 통신 시스템에서는 2차 사용자가 1차 사용자의 주파수 대역 점유 여부를 판단하는 스펙트럼 센싱을 수행한다. 실제 인지무선 통신 시스템에서는 센싱 구간 동안 1차 사용자 신호가 임의로 중간에 들어오거나 나가는 통화량이 많은 상황이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 통화량이 많은 상황에 알맞은 cyclostationarity 기반 스펙트럼 센싱 기법을 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 제안한 cyclostationarity 기반 검출 기법이 기존의 통화량이 많은 상황을 위한 에너지 검파 기법 및 통화량이 많은 상황을 고려하지 않은 cyclostationarity 기반 검출 기법보다 우수한 센싱 성능을 가짐을 보인다.

Key Words : cyclostationarity, spectrum sensing, high traffic circumstance

ABSTRACT

In cognitive radio (CR) systems, the secondary user (SU) performs the spectrum sensing to determine the presence of the primary user (PU) on the PU's frequency band. In practical cases, the PU would arrive and depart randomly in the sensing duration of the SU, which is referred to as the high traffic circumstance. In this paper, we propose a cyclostationarity-based spectrum sensing scheme for CR systems in high traffic circumstances. From numerical results, it is confirmed that the proposed scheme outperforms both the energy detector proposed for high traffic circumstances and the conventional cyclostationarity-based spectrum sensing scheme.

I. 서 론

최근 무선통신의 발전과 함께 주파수 자원이 국가의 중요한 희소 자산으로 인식 되고 있다. 이에 스펙트럼 환경을 인지하여 유휴 주파수 스펙트럼을

확인하고 이를 효율적으로 사용할 수 있는 인지무선 (cognitive radio: CR) 시스템이 크게 주목 받고 있다^[1]. CR은 2차 사용자가 (secondary user: SU) 주파수 대역 내 1차 사용자의 (primary user: PU) 신호 스펙트럼을 감지한 후 시간적, 공간적으로 비

* 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012R1A2A2A01045887), 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업(NIPA-2012-H0301-12-1005), 국방과학연구소 "국내외 주파수 관련 정책조사 및 적용 연구"과제의 일환으로 수행하였음.

◆ 주저자 : 삼성탈레스, youngje99.kim@samsung.com, 정희원

° 교신저자 : 성균관대학교 정보통신대학, syoon@skku.edu, 종신회원

* 성균관대학교 정보통신대학, hobbangdk@skku.edu

** 국방과학연구소, yongup.jang@add.re.kr, ksjjong@add.re.kr

논문번호 : KICS2012-10-489, 접수일자 : 2012년 10월 9일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 12일

어있는 주파수 대역을 PU에게 간섭을 주지 않는 범위에서 사용하는 시스템이다^[2]. 이러한 CR 시스템의 운용을 위해서는 PU의 주파수 대역 사용여부를 판단하는 스펙트럼 센싱 (spectrum sensing) 기술의 신뢰성이 높아야 한다.

CR 시스템을 위한 대표적인 스펙트럼 센싱 기법으로는 에너지 검파와 (energy detection) cyclostationarity 기반 센싱 기법이 있다. 에너지 검파는 구현이 간단하고, PU 신호에 대한 사전 정보를 필요로 하지 않는다는 장점을 가진다. Cyclostationarity 기반 센싱 기법은 수신 신호 통계량이 가지는 주기성을 이용하여 스펙트럼 센싱을 하는 기법으로^[3], 에너지 검출 기법보다 잡음에 대한 민감도가 낮아 복잡도는 높지만 더 좋은 센싱 성능을 보인다. 이제까지의 스펙트럼 센싱 기법들은 대부분 센싱 구간 동안 PU 신호가 존재하거나 존재하지 않는 두 가지 경우만을 가정한 통화량이 적은 상황에서 연구되었다^[4,5]. 그러나 실제 CR 시스템에서는 센싱 구간 동안 PU 신호가 임의로 중간에 들어오거나 나가는 통화량이 많은 상황이 발생할 수 있다.

최근 이러한 통화량이 많은 상황을 고려한 스펙트럼 센싱 기법이 연구되었으나^[6], 가장 간단한 형태의 센싱 방법인 에너지 검파에 적용하는 정도의 초기 연구가 수행된 실정이다. 통화량이 많아지는 상황에서는 스펙트럼 센싱 성능이 상당히 저하되므로^[5], 더욱 신뢰성 높은 스펙트럼 센싱 기법이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 에너지 검파보다 복잡도는 증가하지만 성능은 더 우수한 것으로 알려진 cyclostationarity 기반 센싱 기법을 채택하여 이를 통화량이 많은 상황에 알맞도록 함으로써, 기존의 스펙트럼 센싱 기법들 보다 나은 성능을 얻도록 하는 cyclostationarity 기반 센싱 기법을 제안한다. 구체적으로는 수신 신호의 spectral correlation density (SCD)를 구하고, 이를 통화량이 많은 상황에 적용하여 새로운 검정 통계량을 생성한다. 모의실험을 통해 제안한 cyclostationarity 기반 검출 기법이 통화량이 많은 상황에서 에너지 검출 기법보다 우수한 성능을 가짐을 보인다.

II. 시스템 모델

센싱 구간 동안 임의로 PU 신호의 존재 유무가 변하는 통화량이 많은 상황에서 수신 신호의 모형은 다음과 같이 귀무가설 H_0 과 대립가설 H_1 에 따

라 표현된다.

$$H_0: y[n] = \begin{cases} x[n] + w[n], & \text{for } n = 1, 2, \dots, J_0, \\ w[n] & \text{for } n = J_0 + 1, J_0 + 2, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

$$H_1: y[n] = \begin{cases} w[n] & \text{for } n = 1, 2, \dots, J_1, \\ x[n] + w[n], & \text{for } n = J_1 + 1, J_1 + 2, \dots, N, \end{cases} \quad (2)$$

여기서 N 은 관측 샘플 수, $x[n]$ 는 송신된 PU 신호 샘플이고, $y[n]$ 는 수신신호 샘플, $w[n]$ 는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 덧샘플 백색 가우시안 잡음 샘플이다 (additive white Gaussian noise: AWGN). H_0 은 PU 신호가 샘플 $n = J_0$ 와 샘플 $n = J_0 + 1$ 사이에서 임의로 사라지는 상황을, H_1 은 PU 신호가 샘플 $n = J_1$ 와 샘플 $n = J_1 + 1$ 에서 임의로 나타나는 상황을 각각 가정하며, 가설 검정 결과 H_0 로 판단되면 PU 신호가 없다고 판단하고, H_1 으로 판단되면 PU 신호가 대역을 점유하고 있다고 판단한다.

SU는 PU 신호의 유무를 판단할 문턱값 (threshold) γ 를 검정 통계량 (test statistic) $S[n]$ 과 비교하여 $S[n] > \gamma$ 이면 H_1 으로 판단하고, $S[n] < \gamma$ 이면 H_0 로 판단한다.

III. 통화량이 많은 상황에 알맞은 에너지 검파

통화량이 많은 상황에서 에너지 검파를 적용하였을 때, H_0, H_1 가정 각각에 대하여 n 이 J_0, J_1 일 때 각각 PU 신호가 떠나고 도착한다면 문턱값과 검정 통계량의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$S[n] = \sum_{n=J_0+1}^N y^2[n] - \sum_{n=1}^{J_1} y^2[n] \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \gamma \quad (3)$$

이는 (1), (2)의 신호 모형에 일반화된 우도비 검파를 (generalized likelihood ratio test) 적용한 형태이다. 보기를 들어 $J_0 = 0$ 로 가정하면,

$S[n] = \sum_{n=J_1+1}^N y^2[n]$ 이 되어 PU 신호가 존재하는 구간에서 수신신호의 에너지를 얻는 형태가 된다. 또

한 $J_1=0$ 로 가정하면, $S[n] = \sum_{n=J_0+1}^N y^2[n]$ 이 되어

PU 신호가 없는 구간에서 수신신호의 에너지를 얻는다. 여기서 J_0, J_1 은 임의의 값이므로 아래 절에서 설명하는 바와 같이 J_0, J_1 값들에 대한 평균값을 취해서 검정통계량 $S[n]$ 을 구한다.

3.1. PU 신호가 랜덤하게 도착하는 경우

PU 신호가 랜덤하게 도착하는 경우 $J_0=0$ 으로 둘 수 있으며, $\Pr\{J_1\}$ 을 PU 신호가 J_1 번째 샘플에서 도착할 확률이라 하고, 이는 포와송 과정을 (Poisson process) 따른다고 가정한다. 이 경우, $\Pr\{J_1\} = [1 - e^{-\lambda_a T}] \cdot [e^{-\lambda_a T}]^{J_1}$ 이 된다^[6]. 여기서 λ_a 는 PU 신호의 들어오는 비율이고 T 는 샘플링 간격이다. $S[n] = \sum_{n=J_1+1}^N y^2[n]$ 에서 J_1 에 대한 평균을 취한 검정 통계량 $S_1[n]$ 은 다음과 같다.

$$S_1[n] = \sum_{J_1=0}^{N-1} [1 - e^{-\lambda_a T}] \cdot [e^{-\lambda_a T}]^{J_1} \left[\sum_{n=J_1+1}^N y^2[n] \right] = \sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_a T n}] y^2[n]. \quad (4)$$

3.2. PU 신호가 랜덤하게 떠나는 경우

PU 신호가 랜덤하게 떠나는 경우에는 $J_1=0$ 으로 둘 수 있다. PU 신호가 랜덤하게 도착하는 경우와 마찬가지로 PU 신호가 J_0 번째 샘플에서 떠날 확률은 $\Pr\{J_0\} = [1 - e^{-\lambda_d T}] \cdot [e^{-\lambda_d T}]^{J_0}$ 이고, 여기서 λ_d 는 PU 신호의 떠나는 비율이다.

$S[n] = \sum_{n=J_0+1}^N y^2[n]$ 에서 J_0 에 대한 평균을 취한 검정 통계량 $S_0[n]$ 은 아래와 같다.

$$S_0[n] = \sum_{J_0=0}^{N-1} [1 - e^{-\lambda_d T}] \cdot [e^{-\lambda_d T}]^{J_0} \left[\sum_{n=J_0+1}^N y^2[n] \right] = \sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_d T n}] y^2[n] \quad (5)$$

(4), (5)로부터 H_1, H_0 상황에서 모두 동일한 검정 통계량 $S[n]$ 을 이용할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 제안한 Cyclostationarity 기반 스펙트럼 센싱 기법

Cyclostationarity 기반 검출 기법은 PU 신호가 특정한 주기가 있는 신호일 경우 그 특정 주파수에서 SCD가 주기성에 따라 값을 갖고, 특정 주기를 가지지 않는 AWGN의 경우에는 거의 0의 SCD 값을 가진다는 사실을 이용한다. SCD를 얻기 위해 먼저 다음과 같이 cyclic autocorrelation function을 (CAF) 계산한다^[7].

$$R_y^\alpha(\tau) = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{1}{A} \int_{-A/2}^{A/2} y\left(t + \frac{\tau}{2}\right) y^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi\alpha t} dt \quad (6)$$

여기서 α 는 cyclic frequency이고 아래와 같이 정의된다.

$$\alpha = \pm 2f_c + \frac{I}{T_0} \quad (7)$$

여기서 f_c 는 반송파 주파수, I 는 임의의 정수, 그리고 T_0 는 송신신호 심볼주기를 의미한다. SCD는 CAF의 푸리에 변환으로 정의되며, (6)의 $R_y^\alpha(\tau)$ 을 푸리에 변환하여 다음과 같이 SCD $S_y^\alpha(f)$ 를 구한다.

$$S_y^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_y^\alpha(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (8)$$

이를 정규화한 함수를 spectral autocorrelation function $\rho_y^\alpha(f)$ 이라 하고 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_y^\alpha(f) = \frac{S_y^\alpha(f)}{[S_y(f+\alpha/2)S_y(f-\alpha/2)]^{1/2}} \quad (9)$$

본 논문에서 사용된 cyclostationarity 기반 검출 기법의 검정 통계량은 $|\rho_y^\alpha(f)|^2$ 이다^[3].

실제 SU 수신기에서는 연산 효율을 높이기 위해 그림 1과 같이 수신신호 샘플 $y[n]$ 을 주파수영역에서 $\pm \frac{\alpha}{2}$ 이동시킨 $u[n], v[n]$ 을 이용하여 근사화된 SCD $S_{uv}(f)$ 를 얻으며, 검정 통계량 $S_p[n]$ 은 다음과 같이 생성한다.

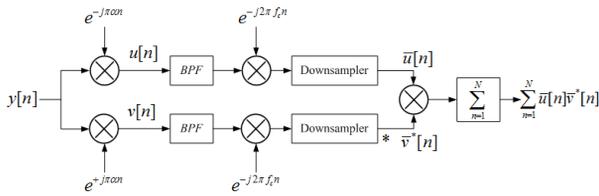


그림 1. $\bar{u}[n]$ 과 $\bar{v}[n]$ 의 상호상관을 구하는 과정
Fig. 1. The crosscorrelation of $\bar{u}[n]$ and $\bar{v}[n]$

$$S_p[n] = |\rho_y^\alpha|^2 = \frac{\left| \sum_{n=1}^N \bar{u}[n] \bar{v}^*[n] \right|^2}{\sum_{n=1}^N |\bar{u}[n]|^2 \sum_{n=1}^N |\bar{v}[n]|^2} \quad (10)$$

여기서 $\bar{u}[n]$ 과 $\bar{v}[n]$ 은 각각 $u[n]$ 과 $v[n]$ 을 대역통과 필터에 통과시키고, 복소 반송파를 제거한 후, 다운샘플링을 적용한 기저대역 신호 샘플을 나타낸다. 기존 기법에서 PU 신호가 랜덤하게 도착하는 경우와 떠나는 경우 모두 $S[n]$ 은 동일하게 나타남을 알 수 있으므로, 본 논문에서는 PU 신호가 랜덤하게 도착하는 상황을 고려하여 $S_p[n]$ 을 제안한다. (10)에 (4)를 유도하는 과정과 동일한 접근 방식을 적용하면 다음과 같이 정리된다.

$$S_p[n] = \frac{\left| \sum_{J_1=0}^{N-1} [1 - e^{-\lambda_a T}] \cdot [e^{-\lambda_a T}]^{J_1} \sum_{n=J_1+1}^N \bar{u}[n] \bar{v}^*[n] \right|^2}{\left[\sum_{J_1=0}^{N-1} [1 - e^{-\lambda_a T}] \cdot [e^{-\lambda_a T}]^{J_1} \sum_{n=J_1+1}^N |\bar{u}[n]|^2 \right] \left[\sum_{J_1=0}^{N-1} [1 - e^{-\lambda_a T}] \cdot [e^{-\lambda_a T}]^{J_1} \sum_{n=J_1+1}^N |\bar{v}[n]|^2 \right]} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_a T n}] \bar{u}[n] \bar{v}^*[n] \right|^2}{\sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_a T n}] |\bar{u}[n]|^2 \sum_{n=1}^N [1 - e^{-\lambda_a T n}] |\bar{v}[n]|^2} \quad (11)$$

V. 모의실험 결과

본 장에서는 모의실험을 통해 제안한 통화량이 많은 상황을 위한 cyclostationarity 기반 센싱 기법의 receiver operating characteristic (ROC) 성능을 기존 기법의 ROC 성능과 비교하였다. 모의실험은 통화량이 많은 상황을 가정하여 다음과 같은 환경

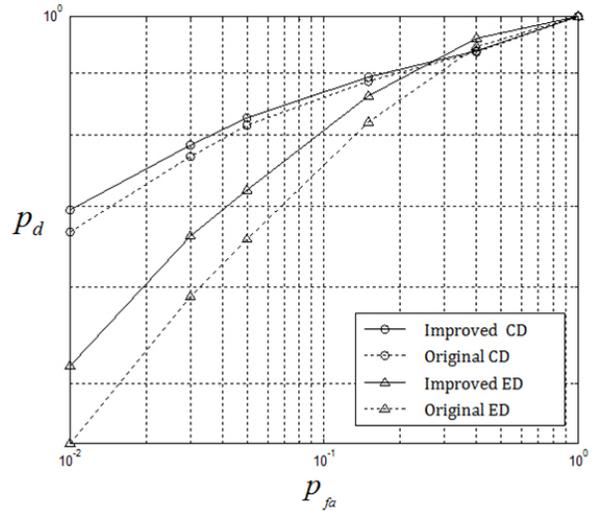


그림 2. 통화량이 많은 AWGN 환경에서 스펙트럼 센싱 기법들의 ROC 성능 비교
Fig. 2. ROC performances of proposed and conventional schemes over AWGN channel in high traffic environments.

에서 수행되었다. PU 신호는 binary phase-shift keying (BPSK) 변조 방식을 따르고, 신호 대 잡음비는 (signal-to-noise ratio: SNR) -5 dB이며, $N=100$, 오경보 확률 P_{fa} 는 0.01, 0.03, 0.05, 0.15, 0.4, 1에서 실험하였다. 모의실험에서는 오경보 확률 P_{fa} 를 이용하여 문턱값을 설정할 수 있다^[8]. 통화량이 많은 상황의 수신 신호 모델을 반영하기 위해서 수신 신호를 일부 샘플 기간 동안 없다가 도착하는, 혹은 존재하다가 떠나는 모델을 사용하였다. 이 때 몇 샘플동안 신호가 없다가 도착하는지, 혹은 있다가 떠나는지는 $[0, M]$ 의 균일한 분포를 가지는 확률 변수로 생성하였다.

그림 2는 통화량이 많은 상황을 가정하여 AWGN 환경에서 cyclostationarity 기반 기법과 기존 기법의 ROC 성능을 보여 준다. 여기서 P_d 는 검출 확률 (detection probability) 나타내고, CD는 cyclostationarity 기반의 센싱 기법을, ED는 에너지 검출 기법을 나타낸다. 그리고 original은 통화량이 많은 상황을 고려하지 않은 센싱 기법을, improved는 통화량이 많은 상황을 고려한 검출 기법을 나타낸다. 그림 2에서 에너지 검출 기법과 cyclostationarity 기반 검출 기법 모두 통화량이 많은 상황을 고려한 검출 기법의 성능이 우수함을 알 수 있으며, 특히 제안한 cyclostationarity 기반 검출 기법이 기존의 통화량이 많은 상황을 고려한 에너지 검출 기법 보다 ROC 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 PU의 출입이 있는 통화량이 많은 상황에 알맞은 cyclostationarity 기반 스펙트럼 센싱 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 수신 신호의 SCD를 구하고, 이를 통화량이 많은 상황에 적용하여 PU 신호가 랜덤하게 도착하거나 떠나는 시점에 대한 평균을 취해 최종 검정 통계량을 생성하였다. 모의실험을 통해 통화량이 많은 상황에서 제안한 cyclostationarity 기반 스펙트럼 센싱 기법이 기존의 통화량이 많은 상황을 위한 에너지 검파 기법 및 통화량이 많은 상황을 고려하지 않은 cyclostationarity 기반 검출 기법보다 우수한 ROC 성능을 가짐을 보였다.

References

- [1] J. Lunden, S. A. Kassam, and V. Koivunen, "Robust nonparametric cyclic correlation-based spectrum sensing for cognitive radio," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 1, pp. 38-52, Jan. 2010.
- [2] J. Mitola, "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio," PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [3] S. Enserinkand and D. Cochran, "A cyclostationary feature detector," in *Proc. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, pp. 806 -810, Pacific Grove, CA, Nov. 1994.
- [4] T. S. Shehata and M. El-Tanany, "A novel adaptive structure of the energy detector applied to cognitive radio networks," in *Proc. Canadian Workshop on Information Theory*, pp. 95 -98, Ottawa, Canada, May 2009.
- [5] T. Wang, Y. Chen, E. L. Hines, and B. Zhao, "Analysis of effect of primary user traffic on spectrum sensing performance," in *Proc. Chinacom*, pp. 1 -5, Xian, China, Aug. 2009.
- [6] N. C. Beaulieu and Y. Chen, "Improved

energy detectors for cognitive radios with randomly arriving or departing primary users," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 17, no. 10, pp. 867 -870, Oct. 2010.

- [7] W. A. Gardner, "Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals," *IEEE Signal Process. Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 14-36, April 1991.
- [8] N. Han, J. Song, S. Sohn, and J. Kim, "A Spectral Correlation Based Detection Method for Spectrum Sensing in Cognitive Radio," *J. Korea Inform. Commun. Society*, vol. 31, no. 7C, pp. 672-679, July 2006.

김 영 제 (Youngje Kim)



2003년 8월 충남대학교 전자공학교육과 공학사
 2005년 8월 충남대학교 전자공학과 공학석사
 2010년 2월 충남대학교 전자공학과 공학박사
 2010년 1월~현재 삼성탈레스 전문연구원

<관심분야> Anti-jamming, Estimation Theory, Military Communication System, Synchronization

심 정 윤 (Jeongyoon Shim)



2007년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학 전자전기공학부 학사과정
 <관심분야> 통신 이론, 인지 무선 통신, 통계학적 신호처리

윤 석 호 (Seokho Yoon)



1997년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학사 (최우등)
1999년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학석사
2002년 2월 한국과학기술원 전
자전산학과 공학박사
2002년 3월~2002년 6월 MIT

박사후 연구원
2002년 7월~2003년 2월 Harvard University 박사후
연구원
2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학 전자
전기공학부 전임강사, 조교수, 부교수
2007년 IEEE 준석학회원
2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상
2011년 교육과학기술부 우수연구 인증패 수상
2012년 한국통신학회 우수논문상 수상
<관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처
리

정 길 수 (Kilsoo Jeong)



1999년 2월 영남대학교 전자
공학 학사
2003년 3월 토요하시기술과
학대학 (일본) 정보공학 석
사
2007년 3월 토요하시기술과
학대학 (일본) 전자정보공

학 박사
2007년 4월~2009년 9월 ATR (일본) 연구원
2009년 10월~2011년 10월 한국전자통신연구원 선
임연구원
2011년 11월~현재 국방과학연구소 선임연구원
<관심분야> Cognitive Radio, 이동통신, 디지털 신
호처리, 다중사용자 간섭제거

장 용 업 (Yong-Up Jang)

2003년 2월 한양대학교 전자전기공학부 학사
2010년 1월 KAIST 전기및전자공학과 박사



2010년 3월~8월 KAIST 정
보전자연구소 박사후연구원
2010년 9월~2011년 10월
KAIST IT융합연구소 선임
연구원
2011년 11월~현재 국방과학
연구소 선임연구원

<관심분야> Cognitive radio 네트워크, 협력 릴레이
네트워크, 다중사용자 MIMO 스케줄링, Limited
피드백 무선 통신 네트워크