

자기 상관 함수의 주기성을 이용한 레이더 신호 검출

임 창 현[°], 김 형 중^{*}, 김 창 주^{**}

Detection of a Radar Signal Using the Periodicity of its Autocorrelation Function

Chang Heon Lim[°], Hyung Jung Kim^{*}, Chang Joo Kim^{**}

요 약

펄스 레이더 신호는 주기적으로 일정한 펄스를 반복하는 형태를 갖는다. 따라서 주기의 정수배가 되는 시간 간격만큼 떨어진 신호 샘플들은 큰 자기 상관 값을 갖는다. 본 논문에서는 이러한 자기 상관 특성을 활용하여 레이더 신호를 검출하는 방식을 제안한다. 그리고 펄스 레이더 신호의 주기가 알려지지 않은 경우를 다루기 위하여 레이더 펄스의 주기를 추정하는 방식도 제안한다. 마지막으로 모의 실험을 통해 제안한 방식의 레이더 신호 검출 성능을 분석하고, 에너지 검파 방식과 그 성능을 비교하고자 한다.

Key Words : cognitive radio, spectrum sensing, radar, autocorrelation, energy detection

ABSTRACT

A pulse radar signal exhibits periodic appearance of pulses in time. So it leads to a high correlation between two samples separated in time by multiples of its period. In this paper, we present a spectrum sensing technique for a radar signal which exploits the periodicity of its autocorrelation function and a radar pulse interval estimation scheme in order to address the case that the radar pulse interval is not known a priori. Finally, we evaluate the sensing performance of the proposed scheme through computer simulation and compare its performances with those of energy detection.

I. 서 론

인지 무선(cognitive radio)^[1,2] 시스템은 스펙트럼 센싱 과정을 통해 우선 사용자(primary user)가 일시적으로 사용하지 않는 대역을 파악한 후 이를 활용하는 시스템이다. 이 기술은 현재 스펙트럼 고갈 문제를 해결할 수 유망한 방법으로 인식되고 있으며 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 스펙트럼 센싱 방식은 크게 정합 필터(matched filter) 방식, 에너지 검파

(energy detection) 방식^[3,4], 특징 추출(feature extraction) 방식으로 구분할 수 있다^[5]. 정합 필터 방식은 이상적인 환경에서는 스펙트럼 센싱 성능이 가장 우수하지만, SNR이 낮은 환경에서는 동기를 확보하기 어려워 우수한 성능을 기대하기 어렵고, 센싱 대상 신호에 대한 정보를 모두 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 에너지 검파 방식은 수신 신호의 에너지만을 가지고 신호 존재 여부를 파악하는 방식이기 때문에, 센싱 대상 신호에 대한 정보를 거의 필요로 하지 않음

* 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임[11-911-01-112, My-F 이용 융합서비스 기술개발]

[°] First Author and Corresponding : Pukyong National University Department of Electronic Engineering, chlim@pknu.ac.kr, 종신회원

^{*} Radio Analysis Research Section, Electronics and Telecommunication Research Institute), acekim@etri.re.kr, 정회원

^{**} Radio Analysis Research Section, Electronics and Telecommunication Research Institute), cjkim@etri.re.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-01-015, Received January 25, 2016; Revised April 16, 2016; Accepted May 12, 2016

며 구현이 간단하다는 장점이 있으나, 잡음 전력의 불확실성에 대하여 매우 취약한 것으로 알려져 있다. 특징 추출 방식은 센싱 대상 신호의 일부 특성을 기준으로 삼아 신호 존재 여부를 파악하는 방식으로, 이때 판단 기준으로 삼을 수 있는 특성으로는 파일럿(pilot), 주기적 정상성(cyclostationarity), 전력 스펙트럼, 자기 상관(autocorrelation) 등이 있다.

최근 레이더 대역이 인지 무선 기술이 적용 대상으로 많은 관심을 모으고 있다. 예를 들면 S 밴드 같은 경우에는 TV 대역보다 넓고, 해당 대역의 이용 효율이 낮은 것으로 알려져 있다⁶⁾. 따라서 이를 다른 통신 서비스가 공유할 수 있다면 해당 스펙트럼의 이용 효율을 상당히 개선할 수 있다.

지금까지 발표된 레이더 신호 검출 방식⁷⁻¹²⁾은 대부분 간단한 펄스 검출 방식이며, 에너지 검파를 기반으로 하고 있다. 초기 방식⁷⁾들은 비교적 짧은 측정 구간 동안의 수신 에너지를 측정하여 그 값이 일정 수준 이상이 되면 레이더 신호가 존재하는 것으로 판단하는 형태였다. 이 방식은 간단하기는 하지만 측정 구간이 짧기 때문에 잡음이나 무선랜 신호에 의한 영향을 구분할 수 없으며, 에너지 검파 방식에 속하므로 기본적으로 잡음 전력의 불확실성에 취약하다는 단점을 갖는다. 레이더 신호를 다른 통신 신호와 구분하기 위하여 펄스가 일정 간격으로 발생하는지를 판단하여 레이더 신호의 존재 여부를 판단하는 방식도 발표된 바 있다⁸⁾. [8]의 방식은 전력의 변화를 통해 펄스의 존재 여부를 검출하기 때문에 순간 전력의 변화가 큰 경우에는 펄스를 탐지하는데 문제가 없지만, 펄스 압축(pulse compression)을 도입하여 순간 전력의 변화가 작아지는 경우에는 우수한 성능을 기대하기 어렵다. 펄스 압축을 사용한 방식에 대해서는 수신 신호의 에너지를 이용하는 방식보다는 정합 필터나 자기 상관을 이용하는 것이 발표된 바 있다⁹⁾. 또한 주파수 분석을 통하여 레이더 신호 존재 여부를 파악하고, 다른 통신 신호와 구별하는 방법이 제안된 바 있다¹⁰⁾. 한편, 5 GHz 대역의 무선랜에 적용하는 DFS(dynamic frequency selection) 기술¹¹⁾은 레이더 신호 검출 방식을 규정하고 있지는 않지만, 간섭 신호의 존재 여부를 판단하는 기준으로 에너지 검파를 사용하기 때문에 여전히 동일한 문제점을 갖는다. 또한, 에너지 검파 기반 방식에서 적절한 주파수 대역을 좀 더 신속하게 결정하기 위한 연구¹²⁾ 발표된 바 있다.

본 논문에서는 레이더 신호가 주기 신호인 점에 착안하여, 자기 상관 함수의 주기성을 이용한 레이더 신호 검출 방식을 제안한다. 또한 주기가 알려지지 않은

경우를 다루기 위해 레이더 펄스의 주기를 추정하는 방식을 제안한다. 제안한 방식은 상관 관계를 이용하는 것이므로 레이더 펄스의 구체적인 형태에 따라 검출 성능이 달라지지 않으며, 펄스 압축 방식 적용 여부에 따른 영향이 없다는 장점을 갖는다.

본 논문은 서론에 이어 2장에서 제안하는 레이더 신호 검출 방식을 소개한다. 그리고 3장에서는 모의 실험을 통해 제안한 방식의 성능을 분석한 결과를 기술하고 아울러 에너지 검파 기반 방식과의 성능을 비교한 결과를 제시하고자 한다. 그리고 4장에서 결론을 맺는 것으로 구성하였다.

II. 제안하는 레이더 신호 검출 방식

펄스 레이더 신호는 일정한 시간 간격으로 동일한 형태의 펄스가 반복되는 특징을 갖는다. 따라서 주기의 정수배에 해당하는 시간 간격만큼 떨어진 신호 샘플 간에는 상관도가 높게 나타난다. 기존의 스펙트럼 센싱 연구에서 OFDM 신호의 검출 방식으로 자기 상관을 사용한 방법¹³⁾이 발표된 바 있다. OFDM 신호의 경우에는 한 심볼 내에서 동일한 신호 샘플이 한번 반복되고, 이들 샘플 사이의 시간 차에 대응되는 자기 상관 값이 크게 나타난다. 이와 비교하여 펄스 레이더 신호의 경우에는 펄스가 일정한 시간 간격으로 반복적으로 나타나기 때문에 주기 뿐만 아니라 그 정수배만큼 떨어진 샘플 간에 자기 상관 특성이 크게 나타난다는 차이점이 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 활용하여 펄스 레이더 신호를 검출하는 방안을 제시하고자 한다.

주기가 P 인 펄스 레이더 신호가 시간 n 에서 갖는 샘플을 $s(n)$ 이라 하고 잡음 샘플을 $w(n)$ 이라 할 때, 레이더 신호 유무에 따라 수신 레이더 신호 $x(n)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다²⁾.

$$x(n) = \begin{cases} w(n) & H_0 \\ h(n)s(n) + w(n) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 가설 H_0 와 가설 H_1 은 각각 레이더 신호가 존재하지 않는 경우와 존재하는 경우를 가리키며, $w(n)$ 은 AWGN으로 가정하고, $h(n)$ 은 시간 n 에서 페이딩 채널의 이득을 나타낸다.

수신된 펄스 레이더 신호 $x(n)$ 에 대하여 시간 차이가 m 만큼 나는 신호 샘플간의 자기 상관 함수를 $r_x(m) = E[x(n)x^*(n+m)]$ 이라고 정의할 때,

$s(n)$ 은 주기가 P 이므로 $r_x(P)$ 는 레이더 신호 존재 여부에 따라 그 값이 많이 차이가 날 것으로 예상할 수 있다. 이런 개념에 기초하여 기존 연구^[8]에서는 검정 통계량 ρ_P 을 다음과 같이 정의한 바 있다.

$$\rho_P = \frac{\frac{1}{2M} \sum_{k=0}^{M-1} \text{Re}[x(k)x^*(k+P)]}{\hat{\sigma}_x^2} \quad (2)$$

위 식에서 $\hat{\sigma}_x^2$ 는 수신 신호의 평균 전력을 의미하며, M 은 검정 통계량(test statistic) 계산에 사용되는 수신 신호 샘플 갯수를 가리킨다.

검출 대상이 펄스 레이더 신호처럼 주기 신호인 경우에는 $r_x(P)$ 뿐만 아니라 $r_x(lP)$, $l=1,2,\dots$ 등이 레이더 신호 존재 여부에 따라 그 값 차이가 크게 나타날 것이기 때문에, 이런 양들을 모두 이용하는 것이 검출 성능 향상을 위해 바람직하다고 예상할 수 있다. 이에 본 논문에서는 식(2) 대신에 새로운 검정 통계량 T_P 를 다음과 같이 제안한다.

$$T_P = \sum_{l=1}^L \rho_{lP} \quad (3)$$

위 식에서 L 은 자기 상관 계산에 사용되는 샘플간 최대 시간 차이가 현재 주어진 수신 레이더 샘플에 대하여 주기의 몇 배까지 허용 가능한 지를 나타내는 값이다. 식(3)을 검정 통계량으로 하는 검출 방식은 레이더 신호의 주기를 미리 아는 경우에 적용할 수 있다. 그러나 그렇지 않은 경우에는 바로 적용하기 어렵다.

레이더 펄스의 주기를 미리 알지 못하는 경우를 다루기 위하여, 본 논문에서는 레이더 신호의 주기가 여러 가지 이산적인 값 중의 하나로 제한될 때, 레이더 신호의 존재 여부를 판정하는 방법을 제안하고자 한다. 어떤 레이더 신호에 대한 주기를 정확하게 알수록 식(3)의 값이 커질 것이라고 예상할 수 있다는 점을 활용하여, 본 논문에서는 레이더 신호의 펄스 주기를 알지 못하는 경우에 펄스 레이더 신호의 존재 여부를 판단하기 위한 검정 통계량을 다음과 같이 설계한다.

$$\max_P T_P > \lambda \quad (4)$$

위 식에서 λ 는 검출 임계값을 나타낸다. 이때 T_P 를 구성하는 요소인 $\{\rho_{lP}, l=1,2,\dots,L\}$ 은 서로 통

계적으로 독립적인 양이 아니기 때문에, 이들의 합에 해당하는 T_P 의 통계적 분포를 수학적으로 도출하기는 어렵다. 따라서 목표로 하는 오경보 확률을 달성하기 위한 검출 임계값 λ 를 모의 실험을 통하여 결정하는 것으로 한다. 본 논문에서 제안하고자 하는 레이더 신호 검출 방식은 최종적으로 식(4)의 검정 통계량을 사용하는 방식이며, 이는 식(3)을 검정 통계량으로 하는 검출 방식에 레이더 신호 주기 추정 기능을 덧붙인 것으로 볼 수 있다.

III. 모의 실험

성능 평가를 위해 사용하는 레이더 신호는 펄스 폭은 $1 \mu\text{s}$, 레이더 펄스 반복 주기(PRI)는 $10 \mu\text{s}$, 레이더 신호의 전체 길이는 $100 \mu\text{s}$ 로 설정하였다. 그림 1은 모의 실험에서 사용하는 펄스 레이더 신호를 나타낸 것이다. 제안한 방식은 사용 가능한 레이더 펄스 주기로 $90 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $110 \mu\text{s}$ 를 전제하였다. 그리고 샘플링 속도는 10 MHz 로 하였다. 또한 레이더 신호 검출을 위해 레이더 신호를 관측하는 시간은 $50 \mu\text{s}$ 로 하였다. 이때 관측 시간의 시작점은 $0 \sim 50 \mu\text{s}$ 이내의 균일 분포를 갖는 것으로 설정하였다. 그리고 검출 임계값 λ 는 목표 오경보 확률이 0.1 이 되도록 설정하였다. 또한 채널은 도플러 주파수 영향을 반영하는 레일리 페이딩 채널로 가정하였다.

그림 2는 식(2)의 검정 통계량을 사용하는 기존의 스펙트럼 센싱 방식과 식(3)의 검정 통계량을 사용하는 방식에 대한 레이더 신호 검출 성능을 비교한 것이다. 이때는 잠정적으로 레이더 신호의 주기가 알려져 있는 것으로 설정하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 본 논문에서 제안한 후자의 성능이 우수함을 알 수 있다. 따라서 식(3)에 기초한 검정 통계량을 사용

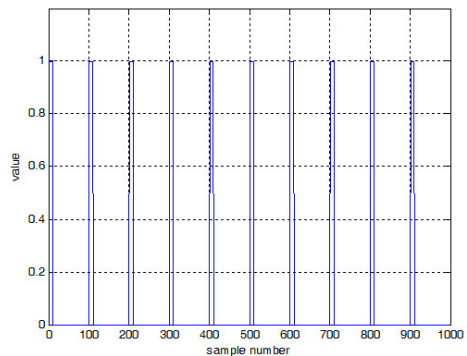


그림 1. 모의 실험에 사용한 레이더 신호 형태
Fig. 1. Pulse radar signal for simulation

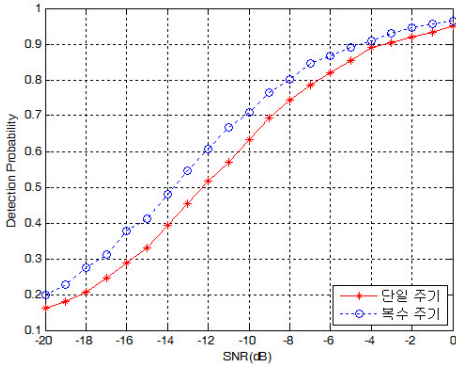


그림 2. 주기를 정확히 알 경우, 식(2)와 식(3)에 근거한 레이더 신호 검출 방식의 성능 비교
Fig. 2. Performance comparison of radar signal detection schemes based on (2) and (3) for the case of a perfect period estimation

하는 방식이 자기 상관의 주기성을 충분히 활용하는 방식이기 때문에 식(2)에 기초한 방식에 비해 이점이 있음을 알 수 있다.

그림 3은 식(2)에 기초한 레이더 신호 검출 방식을 전제로 레이더 신호의 주기가 10 μ s라고 생각하는 경우와 9 μ s라고 생각하는 두 가지 경우에 대하여 레이더 신호 검출 성능을 비교하여 보았다. 전자는 레이더 신호의 주기를 정확하게 아는 경우에 해당하고, 후자의 경우는 그렇지 않은 경우에 해당한다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 주기를 정확하게 알지 못하면 레이더 신호 검출 성능이 매우 떨어짐을 알 수 있다.

그림 4는 본 논문에서 제안한 레이더 펄스 주기 추정방식이 레이더 펄스 반복 주기를 얼마나 정확하게 추정하는가를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 SNR이 증가하면 주기 추정 정확도가 향상되는 것

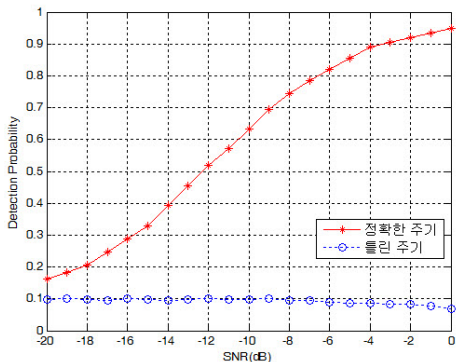


그림 3. 펄스 반복 주기의 정확성 여부에 따른 레이더 신호 검출 성능 차이
Fig. 3. Radar signal detection performance depending on the exactness of the estimated PRI

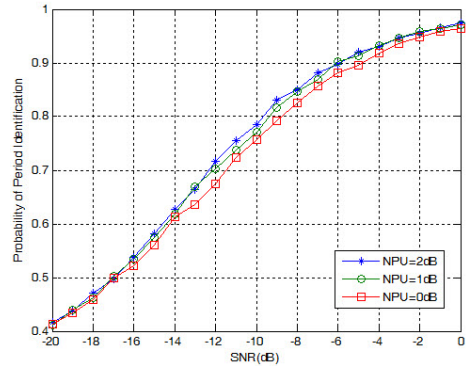


그림 4. 레이더 펄스 주기에 대한 추정 오류 확률
Fig. 4. Probability of correct PRI estimation for a given pulse radar signal

을 확인할 수 있다. 이는 SNR이 높아질수록 주기성이 보다 뚜렷하게 나타나기 때문이다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 레이더 신호 검출 방식 중에서 식(4)의 검정 통계량을 기초한 레이더 신호 검출 방식에 대하여 잡음 전력의 불확실성에 따라 오경보 확률이 어떻게 달라지는가를 비교한 것이다. 이 방식은 레이더 신호 주기를 추정하는 기능을 포함한 방식으로서 범례에서 “autocorrelation”으로 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 검파 방식의 경우에는 잡음 전력의 불확실성에 따라 많은 영향을 받는다. 하지만 식(4)의 검정 통계량을 사용하는 방식은 상대적으로 그 영향이 매우 작다는 것을 알 수 있다. 이는 식(2)의 형태에서 보는 바와 같이 자기 상관 함수 값을 수신 전력으로 일종의 정규화를 했기 때문이다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 레이더 신호 검출 방식 중에서 식(4)의 검정 통계량을 사용하는 레이더 신호 검출 방식에 대하여 SNR과 잡음 전력의 불확실성 (NPU)에 따라 검파 확률이 어떻게 달라지는가를 나

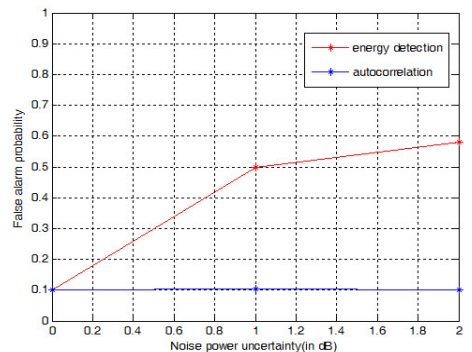


그림 5. 잡음 불확실성에 따른 오경보 확률
Fig. 5. Effects of noise power uncertainty on false alarm probability

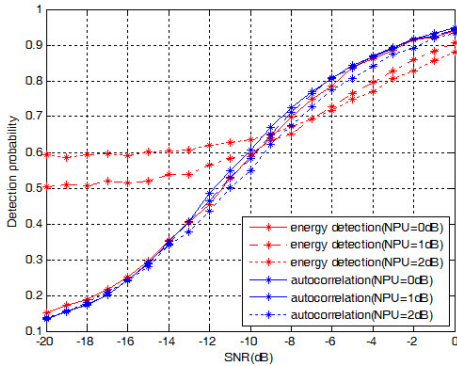


그림 6. SNR과 NPU에 따른 검파 확률
Fig. 6. Detection probability versus SNR for several NPUs

타낸 것이다. 이때 페이딩 채널의 도플러 주파수는 10 Hz로 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지 방식 모두 SNR이 증가하면 검파 확률이 증가하지만, 에너지 검파 방식은 NPU에 따라 큰 변화를 보임을 알 수 있다. NPU가 큰 경우 에너지 검파 방식은 낮은 SNR에서도 상대적으로 높은 검파 확률을 보이지만, 이는 높은 오경보 확률을 수반한 것으로 백색 공간 (white space) 이용률을 떨어뜨린다는 측면에서 바람직하지 않은 결과이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자기 상관 함수의 주기성을 활용하면서 주기가 알려지지 않은 레이다 신호를 검출하는 방식을 제시하였다. 제한한 방식은 주기의 정수배 시간차에 대응되는 자기 상관을 모두 고려함으로써 주기만큼의 시간차에 대응되는 자기 상관만을 고려하는 기존의 방식보다 우수한 검출 성능을 확보할 수 있으며, 주기를 추정하는 기능을 가지기 때문에 주기를 미리 알 수 없는 경우에도 사용할 수 있다. 그리고 에너지 검파 방식과 비교해서는 잡음 전력 불확실성의 영향을 덜 받는다는 것을 모의 실험을 통해 확인할 수 있었다.

References

[1] J. Mitola, "Cognitive radio: making software radio more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 48-52, Aug. 1999.
[2] S. Yoo, K. Kang, H. Jung, and S. Park, "CR technology and activation plan for white space

utilization," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 779-789, Nov. 2014.

[3] F. F. Digham, M. S. Alouini, and Marvin K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
[4] Y. Kim, S. Sohn, and J. Kim, "A sliding window-based energy detection method under noise uncertainty for cognitive radio systems," *J. KICS*, vol. 33, no. 11, pp. 1105-1116, Nov. 2008.
[5] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
[6] A. Martian, C. Vlădeanu, I. Marcu, and I. Marghescu, "Evaluation of spectrum occupancy in an urban environment in a cognitive radio context," *Int. J. On Advances in Telecommun.*, vol. 3, no. 3, pp. 172-181, 2010.
[7] V. Hayes, *Report of IEEE 802 radio regulatory group relating to DFS and JPT5G proposal*, IEEE 802.RR-02/018A-d2, Jan. 2002.
[8] J. Sydor and S. Chow, *Draft Canadian analysis for BWAS and RADAR*, IEEE 802.RR-02/039r0, Mar. 2002.
[9] M. Wen and L. Hanwen, "Radar detection for 802.11a systems in 5GHz," *Int. Conf. Wirel. Commun., Netw. Mob. Comput.*, vol. 1, pp. 512-514, Sept. 2005.
[10] W. McFarland, C. Zeng, and D. Dhamdhere, *Radar detection and dynamic frequency selection for wireless local area networks*, USA 6,697,013 B2, Feb. 2004.
[11] ETSI EN 301 893 v.1.7.2, *Broadband radio access networks(BRAN); 5 GHz high performance RLAN; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE directive*, Jul. 2014.
[12] S. Kim and Y. Choi, "Fast spectrum sensing in radar-interfered airborne cognitive radio systems," *J. KICS*, vol. 37, no. 8, pp. 655-662, Aug. 2012.
[13] S. Chaudhari, V. Koivunen, and H. V. Poor "Autocorrelation-based decentralized sequential

detection of OFDM signals in cognitive radios," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 57, no. 7, pp. 2690-2700, Jul. 2009.

임 창 현 (Chang Heon Lim)



1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업
1988년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1993년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1994년 8월~현재: 부경대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 통신공학, 레이더 신호처리

김 창 주 (Chang Joo Kim)



1976년~1980년: 한국항공대학교 전자공학과 졸업
1986년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
1989년~1993년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
1979년 12월~1983년 3월: ADD 연구원

1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원
1994년~1998년: 한국전자통신연구원 전파신호처리연구실장
1999년~2001년: 한국전자통신연구원 이동통신모뎀연구부장
2003년~2010년: 한국전자통신연구원 전파기술연구부장
<관심분야> 이동통신, 전파기술, Cognitive Radio 기술

김 형 중 (Hyung Jung Kim)



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 졸업
1994년 8월: 한양대학교 전자공학과 석사
2010년 8월: 충북대학교 전파공학과 박사
1995년 8월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> CR/SDR, 디지털-RF, 이동통신 기술