

인지 무선에서 OFDM 신호에 대한 스펙트럼 센싱 방식

임 창 헌*

Spectrum Sensing Techniques for OFDM Signals in Cognitive Radio

Chang Heon Lim*

요 약

인지 무선 기술은 우선 사용자(primary user)가 사용하지 않는 주파수 대역을 이차 사용자(secondary user)로 하여금 사용할 수 있게 하는 기술로서 최근 심화되고 있는 주파수 자원 부족 문제를 해결할 수 있는 유망한 방안으로 인식되고 있다. 인지 무선에 있어 핵심적인 기능은 임의의 주파수 대역을 분석하여 해당 대역을 우선 사용자가 사용하고 있는지 여부를 판단하는 것인데, 이를 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)이라 한다. 최근 OFDM에 기반한 변조 기술이 LTE나 무선랜 등 여러 가지 무선 통신 시스템에 널리 사용되고 있다. 따라서 OFDM 방식을 기반으로 신호를 전송하는 우선 사용자 시스템이 많아졌다. 그러므로 인지 무선에 근거한 이차 사용자 시스템 입장에서는 OFDM 전송 방식에 기반한 무선 신호의 존재 여부를 정확히 판단하기 위한 스펙트럼 센싱 기능을 확보하는 것이 더욱 중요해지고 있다. 이에 본 논문에서는 OFDM 방식에 기반한 무선 신호를 대상으로 한 최근의 스펙트럼 센싱 연구들을 소개하고자 한다.

Key Words : cognitive radio, spectrum sensing, OFDM, DSA

ABSTRACT

Cognitive radio allows secondary users to access the idle frequency bands of primary users opportunistically and has been recognized as a promising approach to the problem of scarcity of radio spectrum which has been deteriorating recently. A crucial element of cognitive radio is the functionality of spectrum sensing which determines whether some frequency band is occupied by a primary user or not. In recent years, OFDM based transmission techniques have been widely adopted in wireless communication systems such as LTE and WLAN, et. al. Thus there now exist many primary users using OFDM based transmission systems. Therefore spectrum sensing strategies for OFDM based signals are getting more important than ever. Motivated by this, we introduce some of spectrum sensing methods for OFDM based signals which have been published in the literature.

I. 서 론

최근 무선 통신 서비스에 대한 수요가 늘어나는 동시에 다양화되면서 이를 제공하는데 필요한 주파수 규모도 커지고 있다. 하지만 가용 스펙트럼 자원이라

는 것이 그 양이 제한적인 자원의 성격을 갖고 있어 이러한 추세는 주파수 자원 고갈이라는 상황을 초래할 것이라는 우려가 커지고 있다. 주파수 자원 고갈 문제를 해소할 수 있는 방안과 관련해서는 지난 수십년간 주파수 이용 효율을 개선하기 위한 방향으로 많

* 본 연구는 2017년도 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 [B0718-16-1001, 군 주파수(Military Spectrum) 이용 고도화 기술 개발]

• First Author : Pukyong National University Department of Electronic Engineering, chlim@pknu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2017-08-217, Received August 16, 2017; Revised August 28, 2017; Accepted August 29, 2017

은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 노력 중의 하나로 최근에 많은 관심으로 모으고 있는 것이 인지 무선(cognitive radio) 기술^[1]이다.

인지 무선 기술이란 주변 전파 환경을 인식하고 그에 알맞게 통신 방식 등을 적절하게 조절하는 상당히 포괄적인 개념이었다. 하지만 최근에는 동적 스펙트럼 접근(dynamic spectrum access)을 실현할 수 있는 기술로 인식되어, 우선 사용자(primary user)가 사용 권한을 갖고 있는 주파수 대역이 일시적으로 사용되지 않고 있을 때 이를 이차 사용자(secondary user)가 사용할 수 있는 기회를 제공하는 기술로 알려져 있다. 이런 특성 때문에 인지 무선에 있어 가장 중요한 요소 기술은 우선 사용자가 일시적으로 사용하지 않는 대역을 찾아내는 스펙트럼 센싱(spectrum sensing)^[2] 기술이다.

스펙트럼 센싱의 대상이 되는 신호는 다양한 전송 방식을 갖고 있지만, 최근에 등장한 무선 전송 기술 중의 상당 기술은 OFDM 방식에 토대로 두고 있다. 예를 들면 IEEE 802.11a/g, IEEE 802.16 WiMAX, LTE, DVB-T 등이 있다. 대표적인 인지 무선 표준안 중의 하나인 IEEE 802.22^[3]에서 센싱 대상으로 하는 신호 중의 하나가 DVB-T 인데, 이 또한 OFDM 방식을 사용하고 있다. 따라서 스펙트럼 센싱 관점에서 임의의 대역에서 OFDM 신호의 존재 여부를 알아내는 것이 그 만큼 중요해졌다.

본 논문에서는 최근에 발표된 OFDM 신호에 대한 스펙트럼 센싱 기술들을 소개하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 1장의 서론에 이어 2장에서는 스펙트럼 센싱에 대한 간략한 소개를 한다. 그리고 3장에서는 OFDM 신호에 대하여 주요 연구 결과들을 형태별로 기술한다. 또한 4장에서 시뮬레이션을 통해 주요 스펙트럼 센싱 방식의 스펙트럼 센싱 성능을 비교한 결과를 제시하고, 5장에서 결론을 맺고자 한다.

II. 스펙트럼 센싱 기술 개요

스펙트럼 센싱 방식^[2]은 크게 3가지 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째는 감지하고자 하는 신호의 특성을 모두 알고 있는 경우에 사용할 수 있는 방법으로 정합 필터(matched filter)를 사용하는 것이다. 이 방식은 AWGN 환경에서 가장 좋은 감지 성능을 보이는 방식이지만 스펙트럼 센싱 대상의 종류가 다양한 경우에 해당 방식마다 그에 대한 정합 필터가 있어야 하기 때문에 구현 측면에서 부담스럽다는 단점을 지닌다. 그리고 스펙트럼 센싱을 하는 환경이 신호 대 잡음비가

매우 낮을 수 있기 때문에 우선 사용자의 신호와 동기를 맞추는 것 자체가 쉽지 않다. 동기를 맞출 수 있는 경우에만 정합 필터의 성능을 기대할 수 있다는 점을 고려하면 정합 필터 방식은 스펙트럼 센싱 방식으로 적당하지 않다.

두 번째로는 통신 신호가 갖는 특성을 활용하는 방식으로 특성 검파(feature detection)라는 방식이다. 대표적인 특성으로는 해당 신호가 갖는 주기성^[4,7]이나 전력 스펙트럼 형태, 파일럿 특성 등이 있다. 일반적으로 디지털 통신 신호는 일종의 주기성(cyclostationarity)를 가지며 이는 신호의 종류마다 다를 수 있다. 따라서 수신 신호에서 이런 특징을 추출함으로써 우선 사용자의 출현 여부 및 종류를 추정할 수 있다. 그러나 이 방식은 주기성을 파악하는 과정 자체가 비교적 복잡하다는 단점을 갖고 있다.

세 번째로는 에너지 검파(energy detection)^[8] 방식이 있는데, 이는 수신 신호의 에너지를 측정하고 이를 임의의 기준값과 비교하여 우선 사용자의 활동 여부를 결정하는 방식이다. 이 방식은 단순히 수신 신호의 에너지를 측정된 값을 활용하는 방식이기 때문에 앞서 언급한 방식에 비해 매우 간단하다는 장점이 있으며, 감지하고자 하는 우선 사용자 신호의 특성을 전혀 모르는 경우에도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그렇지만 잡음 전력을 정확히 모르는 경우에 이로 인해 스펙트럼 센싱 성능이 상당히 떨어진다는 단점이 있다.

III. OFDM의 특성을 이용한 스펙트럼 센싱

스펙트럼 센싱 문제는 임의의 주파수 대역에서 우선 사용자 신호의 존재 유무를 파악하는 것으로 스펙트럼 센싱에 사용할 수신 신호를 $r(n)$ 이라고 할 때 다음과 같이 가설 검정(hypothesis testing) 문제로 규정할 수 있다.

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

위 식에서 H_0 , H_1 은 각각 우선 사용자 신호가 존재하지 않는다는 가설과 존재한다는 가설을 가리킨다. 그리고 $w(n)$ 은 n 번째 잡음 샘플을 가리키는 것으로 AWGN으로서 평균이 0이고 분산이 σ_w^2 라고 한다. 또한 $s(n)$ 은 수신된 우선 사용자 신호의 n 번째 샘플을 나타내는 것으로 페이딩 특성 등이 이미 반영된 것이다.

3.1 CP의 특성을 이용한 방식

OFDM 신호는 심볼간 간섭을 제거하고 부반송파(subcarrier)간의 직교성(orthogonality)를 보장하기 위하여 CP(cyclic prefix)를 사용한다. N 개의 부반송파를 사용하고 CP의 길이가 L 샘플인 경우에 OFDM 심볼의 구성은 그림 1에 나타난 바와 같다.

그림 1에서 보는 바와 같이 CP는 OFDM 심볼의 후반 L 샘플과 동일하다. 이와 같이 단일 OFDM 심볼 안에서 동일한 신호가 일정 시간 간격을 두고 존재한다는 점을 활용한 스펙트럼 센싱 연구로 참고 문헌 [9-15] 등이 있다.

[9]는 DVB-T 방식에 대한 스펙트럼 센싱 방식으로 식(2) 검정 통계량을 사용하는 방식을 제안하였다. 이 방식은 가설에 따라 그림 1의 CP와 그와 동일한 샘플간의 상관도가 가설에 따라 많이 달라진다는 특징을 활용한 것으로 해당 OFDM 신호에 대한 CP의 길이와 유효 심볼 길이를 알고 있다는 사실을 전제하고 있다.

$$\Lambda_{CP} = \max_{\theta} \left| \sum_{k=\theta}^{\theta+L-1} r^*(k)r(k+N) \right| \quad (2)$$

위 식에서 θ 는 CP의 시작 위치를 가리키는데, 그 위치는 $0 \sim N+L-1$ 사이의 값을 가질 수 있다. 식 (2)는 각 θ 에 대하여 그림 1에서 표시한 2개 영역의 샘플들 간에 상관값의 크기를 계산한 후, 그 중 가장 큰 값을 검정 통계량(test statistic) Λ_{CP} 로 사용한다는 것을 수학적으로 나타낸 것이다.

[10]은 유효 심볼 길이 N 은 알지만 CP의 길이를 알지는 못하는 경우에도 N 샘플 간격 사이의 평균 상관값이 가설에 따라 달라진다는 관점에 ML(maximum likelihood) 검파 이론을 적용하여 다음과 같은 검정 통계량 $\hat{\rho}_{ML}$ 을 유도하였다.

$$\hat{\rho}_{ML} = \frac{1}{M-N} \frac{\sum_{k=0}^{M-N-1} Re[r(k)r^*(k+N)]}{\hat{\sigma}_r^2} \quad (3)$$



그림 1. OFDM 심볼의 구조
Fig. 1. Structure of an OFDM symbol

위 식에서 $\hat{\sigma}_r^2$ 는 수신 신호의 평균 전력을 의미하고, M 은 검정 통계량 계산에 사용되는 수신 신호 샘플 갯수를 가리킨다.

[11]은 CP와 다중 경로 채널에 의해 발생하는 수신 신호의 자기 상관 행렬의 구조상 특징이 가설에 따라 달라진다는 사실에 GLRT(generalized likelihood ratio test) 방법을 적용하여 검정 통계량을 제안하였다. 그리고 [12]는 타이밍과 주파수 동기 오차가 있을 때 CP와 파일럿 신호의 상관 특성을 이용하여 OFDM 신호를 탐지하는 방안을 제시하였다. [13-14]는 잡음 전력과 신호 전력을 모르는 환경에서 2차 상관 특성이 우선 사용자 신호 유무에 따라 달라진다는 사실에 GLRT 방법을 적용하여 검정 통계량을 결정하였다. 이 방법은 상관 특성을 이용한다는 측면에서 [9], [10]에서 제기한 접근 방식과 유사하다. 하지만 후자의 방식은 시간 간격에 따라 달라지는 2차 상관값의 평균이 우선 사용자 신호의 존재 유무에 따라 달라지는 점을 활용하는 방식이고, 전자의 방식은 시간 간격별로 나타나는 2차 상관값의 패턴이 변한다는 사실을 이용한다는 측면에서 상이하다. [13-14]에서 제안한 검정 통계량은 다음과 같다.

$$\max_{\theta} \frac{\sum_{i=0}^{N+L-1} |R_i|^2}{\sum_{k \in S_0} \left| R_k - \frac{1}{L} \sum_{k \in S_0} \bar{R}_i \right|^2 + \sum_{j \notin S_0} |R_j|^2} \quad (4)$$

위 식에서 θ 는 동기화 오차를 가리키는 양으로서, 측정된 수신 샘플이 CP의 시작 위치에서 시간적으로 얼마나 떨어져 있는가를 나타낸다. 그리고 S_0 는 CP에 속하는 수신 샘플 번호의 집합을 가리킨다. 또한 R_i 의 정의는 다음과 같다.

$$R_i = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} r^*(i+k(N+L))r(i+k(N+L)+N) \quad (5)$$

$i = 0, \dots, L+N-1$

위 식에서 K 는 연산에 사용되는 OFDM 심볼 개수를 나타낸다. 그리고 식 (4)에서 \bar{R}_i 는 $R(i)$ 의 실수부를 의미한다.

3.2 파일럿의 특성을 이용한 방식

OFDM 신호에 포함되어 있는 파일럿 신호 성분을 이미 알고 있는 경우에 OFDM 수신 신호와 파일럿

신호간의 상관도를 측정함으로써 OFDM 신호의 존재 유무를 판단할 수 있다. 이러한 개념에 기초하여 [9]는 DVB-T 방식에 대한 스펙트럼 센싱 방식으로 다음의 검정 통계량을 사용하는 방식을 제안하였다.

$$A_p = \max_{\theta} \left| \sum_{k=\theta}^{\theta+N+L-1} r^*(k)m(k-\theta) \right| \quad (6)$$

위 식에서 $m(k)$ 는 파일럿 신호를 나타낸다. θ 는 CP의 시작 위치를 가리키는데 만약 그 위치를 모르는 경우에는 $0 \sim N+L-1$ 사이의 값을 순차적으로 적용해서 가장 큰 값을 갖는 경우의 값을 검정 통계량 A_p 로 사용한다. 이 방식은 페이딩 채널 환경에서는 OFDM 수신 신호에 페이딩 채널 특성이 반영되어 해당 신호에 포함되어 있는 파일럿 신호 성분이 $m(k)$ 와 다를 수 있기 때문에 그로 인한 스펙트럼 센싱 성능에 손실이 다소 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해소한 방식이 [16]에서 제안한 방법이다.

[16]은 동일한 파일럿 신호를 갖는 OFDM 심볼들 간의 상관성을 이용하여 OFDM 신호의 존재 유무를 판정하는 방법을 제안하였다. 동일한 파일럿 신호를 포함한 l 번째 수신 OFDM 심볼과 m 번째 수신 OFDM 심볼간에 다음과 같은 자기 상관 함수 $R(l, m)$ 를 정의할 수 있다.

$$R(l, m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} r_m(n)r_l^*(n) \quad (7)$$

위 식에서 $r_m(n)$ 은 m 번째 OFDM 심볼의 n 번째 수신 신호를 가리킨다. 이 방식은 동일한 채널 특성을 반영한 수신 신호 샘플에 대하여 상관 정도를 측정하는 방식이기 때문에 수신 신호 샘플에 포함된 파일럿 신호 성분은 동일하다고 할 수 있다. 이때 하나의 자기 상관 함수 $R(l, m)$ 값을 검정 통계량으로 사용하기보다 이런 양를 여러 개 합하여 검정 통계량으로 사용하는 편이 스펙트럼 센싱 성능을 향상시키는데 효과적이다. 이에 따라 새로운 검정 통계량을 $C(\nu)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$C(\nu) = \frac{1}{S_\nu} \sum_{m-l=\nu} R(l, m) \quad (8)$$

위 식에서 S_ν 는 $m-l=\nu$ 인 $R(l, m)$ 의 개수이다. 이때 최종적인 검정 통계량은 다음과 같이 정의하

여 사용한다.

$$T_{NP} = |C(\nu)| \quad (9)$$

이 방식은 파일럿 신호가 반복된다는 점을 활용한 것으로, 그 성능이 CP의 길이와 상관없이, 파일럿 신호의 길이가 CP에 비해 길기 때문에 상대적으로 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 파일럿 신호에 대한 정보가 없는 경우에는 사용하기 어렵다.

3.3 주기적 정상성(cyclostationarity) 이용한 방식

어떤 확률 과정이 주기적 정상성을 갖는다는 것은 해당 확률 과정의 평균과 자기 상관 함수가 주기 함수라는 것을 의미한다. 그런데 자기 상관 함수 $R_r(n, \tau)$ 가 주기 함수이면 다음과 같이 푸리에 급수로 전개할 수 있다.

$$R_r(n, \tau) = \sum_{\alpha \in Q} R_r(\alpha, \tau) e^{j2\pi\alpha n} \quad (10)$$

이때 $R_r(\alpha, \tau)$ 를 cyclic autocorrelation function(CAF)이라고 하고, 이 값이 0이 되지 않는 α 를 cyclic frequency(CF)라고 하며 그의 집합을 Q 로 표시한다.

주어진 신호 $r(n)$ 의 길이가 M 일 때 CAF 추정값 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{R}_r(\alpha, \tau) = M^{-1} \sum_{n=0}^{M-\tau-1} r(n)r^*(n+\tau) e^{-j2\pi\alpha n} \quad (11)$$

그리고 $\hat{R}_r(n, \tau)$ 에 대한 공분산 행렬을 $\hat{\Sigma}$ 라고 할 때, 검정 통계량 Ψ_r^α 를 다음과 같이 계산하는데, 이는 $\hat{R}_r(n, \tau)$ 성분간의 상관도를 제거하고 정규화하는 의미를 갖고 있다.

$$\Psi_r^\alpha = M \hat{R}_r(\alpha, \tau) \hat{\Sigma}^{-1} \hat{R}_r(\alpha, \tau)^* \quad (12)$$

검정 통계량 Ψ_r^α 는 χ^2 분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 최종적으로 검정 통계량 Ψ_r^α 을 임계값과 비교하여 α 가 CF가 되는지 여부를 판정한다. $\hat{R}_r(n, \tau)$ 가 여러 가지 τ 에 대해서 주기성을 가질 때 $\hat{R}_r(\alpha, \tau)$ 는

길이가 1 이상인 벡터가 되기 때문에, 주기적 정상성을 이용하는 방법은 계산량이 다른 방법에 비해 커질 수 있음을 알 수 있다.

주기적 정상성을 이용한 스펙트럼 센싱 방법은 수신 신호로부터 CF와 CAF를 추정한 후, 출현 가능한 수신 신호의 CF 특성과 일치하는 지를 판단하는 것이다. 이때 CF가 일치하는 지를 결정하기 위해 가설 검정 방식을 사용한다. [4-6]에서는 이러한 방법을 WiMAX, LTE에 적용한 사례를 제시하였다.

IV. 스펙트럼 센싱 방식 비교

본 절에서는 3절에서 소개한 여러 가지 스펙트럼 센싱 방식들을 비교하는 결과를 제시하고자 한다. 비교 기준으로는 계산량과 해당 검출 방식이 필요로 하는 OFDM 신호 관련 정보 그리고 검출 성능을 고려하였다. 비교 대상으로 선택한 스펙트럼 센싱 알고리즘으로는 CP의 상관도를 이용한 방식^[9], 자기 상관 (autocorrelation)을 이용한 방식^[10], GLRT 기반 방식^[13], 주기적 정상성을 이용한 방식^[4], 에너지 검파 방식^[8]을 선택하였다.

4.1 검출에 필요한 OFDM 신호 정보와 계산량 비교

5가지 방식에 대하여 복소 곱셈 계산량을 비교하면 표 1에 나타낸 바와 같다. GLRT 방식의 계산량을 나타내는 식에서 K 는 $\left\lfloor \frac{M-N}{N+L} \right\rfloor$ 로 표현할 수 있는 값으로 수신 신호에 포함된 OFDM 심볼의 개수와 관련이 있다. 여기에서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크지 않은 최대 정수를 의미한다. 그리고 주기적 정상성의 계산량과 관련한 식에서 L_{sw} 는 검정 통계량을 계산하는 과정에서 사용되는 윈도우의 길이를 나타낸다. 그리고 이 계산량은 주기적 정상성에서 고려하고자 하는 CF가 한 개인 경우에 대한 결과이다. 만약 이것이 1개 이상이 되면 공분산 행렬 $\hat{\Sigma}$ 의 역행렬을 계산해야 하기 때문에 계산량은 빠르게 증가하게 된다. CP 상관이라고 표시된 방식은 한 개의 OFDM 신호에 대한 계산량을 표시한 것이고, 수신 데이터에 포함된 OFDM 심볼 개수가 1개 이상으로 늘어난다면 그 만큼의 계산량도 선형적으로 증가한다. 표에서 보듯이 여러 가지 방식 중에서 자기 상관 방식이 OFDM 신호의 특성을 활용하면서 검출에 필요한 OFDM 신호 정보와 계산량이 적음을 알 수 있다.

표 1. 검출에 필요한 사전 정보 및 계산량 비교
Table 1. Comparison of a priori information and computational complexity required for detection

Sensing scheme	Computational complexity	a priori information
CP correlation	$(N+L) \times L$	L, N
Autocorrelation	$2M-N$	N
GLRT	$(N+L)(K+N+2L)$	L, N
Cyclostationarity	$M/2 \times \log_2 M + M + 2L_{sw} + 13$	N
Energy detection	M	None

4.2 검출 성능 비교

스펙트럼 센싱 방식의 검출 성능 비교 방식으로는 Monte Carlo 기법을 사용한다. 실험 조건으로는 오경보 확률을 0.1로 설정하였고, 센싱 시간은 5 ms로 하였다. 그리고 채널 환경으로는 ITU-R M.1225 outdoor to indoor and pedestrian channel A 모델^[17]을 사용하였다. 그리고 OFDM 신호로는 802.11a와 802.11n 신호를 사용하였다.

그림 2는 802.11a 신호에 대하여 여러 가지 스펙트럼 센싱 방식의 검파 확률을 비교한 것이다. 범례에서 “CP correlation”은 [9] 방식을, “autocorrelation”은 [10] 방식을, 그리고 “GLRT”는 [13] 방식을, “cyclostationarity”는 [4] 방식을 의미한다. 그리고 그림 2의 (a)는 잡음 전력 불확실성이 0 dB인 경우이고, 그림 2의 (b)는 잡음 전력 불확실성이 1 dB인 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 잡음 전력 불확실성이 없다면 에너지 검파 방식이 그 단순함에도 불구하고 가장 성능이 우수하지만, 잡음 전력 불확실성이 존재하면 그 성능이 상당히 열화된다는 것으로 확인할 수 있다. 실제 환경에서 잡음 전력의 불확실성이 존재한다는 점을 고려하면 [9]와 [13]의 스펙트럼 센싱 방식이 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 3은 IEEE 802.11n 신호에 대하여 여러 가지 스펙트럼 센싱 방식의 검파 확률을 비교한 것이다. 이때 송신 안테나는 1개로 설정하였다. 기본적으로 802.11n^[18]과 802.11a^[19]는 전송 규격이 매우 비슷하기 때문에 그림 2의 검파 성능과 비슷한 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

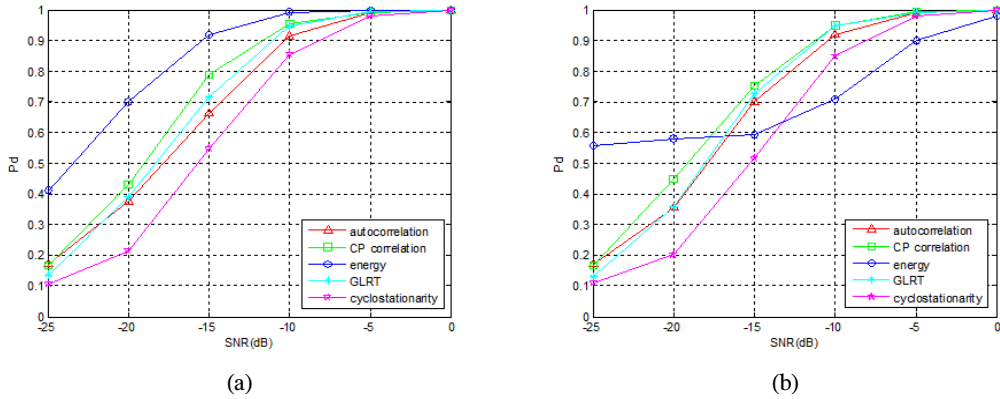


그림 2. IEEE 802.11a 신호에 대한 검파 성능 (a) 잡음 전력 불확실성 = 0 dB (b) 잡음 전력 불확실성 = 1 dB
 Fig. 2. Performance comparison of various detectors for IEEE 802.11a (a) noise power uncertainty=0 dB (b) noise power uncertainty=1 dB

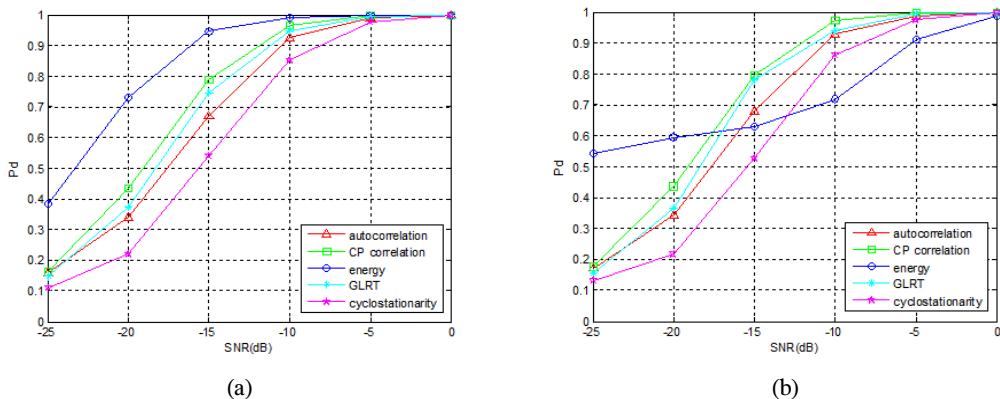


그림 3. IEEE 802.11n 신호에 대한 검파 성능 (a) 잡음 전력 불확실성 = 0 dB (b) 잡음 전력 불확실성 = 1 dB
 Fig. 3. Performance comparison of various detectors for IEEE 802.11n (a) noise power uncertainty=0 dB (b) noise power uncertainty=1 dB

V. 결론

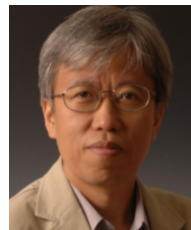
최근 OFDM 기반의 전송 방식을 채택하는 무선 통신 시스템이 늘어나고 있다. 따라서 인지 무선 환경에서 우선 사용자 또한 OFDM 기반의 전송 방식을 사용하는 경우가 많아질 것으로 예상할 수 있으며, 인지 무선 기반의 이차 사용자 입장에서 해당 시스템의 활동 여부를 판단하는 것이 중요해지고 있다. 이에 본 논문에서는 OFDM 기반의 우선 사용자 활동 여부를 판단하는 스펙트럼 센싱에 대한 그간의 연구 동향을 소개하고, 대표적인 몇 가지 방법을 비교한 결과를 제시하였다.

References

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio: making software radio more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 48-52, Aug. 1999.
- [2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Commun. Survey Tuts.*, vol. 11, pp. 116-130, Mar. 2009.
- [3] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, and Sai Shankar, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios," *First IEEE Int. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 328-337, 2005.

- [4] A. V. Dandawate and G. B. Giannakis, "Statistical tests for presence of cyclostationarity," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 42, no. 9, pp. 2355-2369, Sept. 1994.
- [5] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. V. Poor, "Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies," *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Commun.*, pp. 37-43, Aug. 2007.
- [6] A. Al-Habashna, O. A. Dobre, R. Venkatesan, and D. C. Popescu, "Second-order cyclostationarity of mobile WiMAX and LTE OFDM signals and application to spectrum awareness in cognitive radio systems," *IEEE J. Sel. Topics Sign. Process.*, vol. 6, no. 1, pp. 26-42, Feb. 2012.
- [7] A. Al-Habashna, O. A. Dobre, R. Venkatesan, and D. C. Popescu, "WiMAX signal detection algorithm based on preamble-induced second-order cyclostationarity," *IEEE Global Telecommun. Conf.*, pp. 1-5, Dec. 2010.
- [8] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," in *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-532, Apr. 1967.
- [9] L. Chen, Q. Peng, J. Wang, and S. Li, "Sensing schemes for DVB-T in cognitive radio context," *Int. Conf. Commun., Cir. and Syst.*, pp. 314-318, Jul. 2007.
- [10] S. Chaudhari, V. Koivunen, and H. V. Poor "Autocorrelation-based decentralized sequential detection of OFDM signals in cognitive radios," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 57, no. 7, pp. 2690-2700, Jul. 2009.
- [11] S. Bokharaiee, H. H. Nguyen, and E. Shwedyk "Blind spectrum sensing for OFDM-Based cognitive radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 3 Mar. 2011.
- [12] Z. Chen, T. Luan, and X. D. Zhang "Sensing orthogonal frequency division multiplexing systems for cognitive radio with cyclic prefix and pilot tones," *IET Commun.*, vol. 6, no. 1, pp. 97-106, 2012.
- [13] E. Axell and E. G. Larsson, "Optimal and near-optimal spectrum sensing of OFDM signals in AWGN channels," *Int. Workshop on Cognitive Inf. Process.*, pp. 128-133, Jun. 2010.
- [14] E. Axell and E. G. Larsson, "Optimal and sub-optimal spectrum sensing of OFDM signals in known and unknown noise variance," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 2, pp. 290-304, Feb. 2011.
- [15] D. Danev, E. Axell, and E. G. Larsson, "Spectrum sensing methods for detection of DVB-T signals in AWGN and fading channels," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor and Mob. Radio Commun.*, pp. 2721-2726, Sept. 2010.
- [16] H.-S. Chen, W. Gao, and D. G. Daut "Spectrum sensing for OFDM systems employing pilot tones," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 12, Dec. 2009.
- [17] ITU, *Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000*, Rec. ITU-R M.1225, 1997.
- [18] IEEE Part11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendments 5: Enhancement for Higher Throughput*, 2009.
- [19] IEEE Part11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band*, 1999.

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