

논문 2011-48TC-11-10

압축감지 기술을 채용한 에너지 검출 스펙트럼 센싱

(Energy Detector-Aided Spectrum Sensing Using Compressive Sensing)

이 재 혁*, 전 차 을*, 황 승 훈**

(Jae-Hyuck Lee, Cha-Eul Jeon, and Seung-Hoon Hwang)

요 약

본 논문은 에너지 검출기를 사용하여 1차 사용자를 감지하는 경우, 압축 감지 기술을 채용하여 나이퀴스트율 보다 낮은 표본화율을 사용하여 기존의 에너지 검출기만으로 기존보다 넓은 주파수 대역을 감지하는 경우를 가정한다. 스즈키 채널 하에서 시뮬레이션을 통해 넓은 주파수 대역을 센싱하는 과정에서 나이퀴스트 표본화율보다 낮은 표본화율에 따른 오보확률과 감지확률을 통해 센싱 성능을 고찰한다.

Abstract

In this paper, we investigate the energy detector to detect a primary user. And employ the compressed sensing method to get the lower sampling rate than Nyquist sampling rate. In more wide bandwidth we using the small samples than Nyquist sampling rate samples to recover original signal. we investigate the performance of energy detector with compressive sensing method under suzuki channel. The performance is investigated by simulation and compared to that of conventional energy detector.

Keywords : Cognitive radio, compressive sampling, energy detector, wideband spectrum sensing

I. 서 론

미연방통신위원회인 FCC (Federal Communications Commission)는 주파수 사용 효율을 높이고 새로운 응용 서비스 도입을 용이하게 하기 위하여 인지 무선 (Cognitive Radio : 이하 CR) 개념에 관한 규정 관련법을 제정하였다^[1]. 이는 특정 사업자에게 특정 주파수를 할당해 독점적 이용권을 부여하는 과거의 주파수 자원 관리 정책과 달리 이용권 제약 없이 누구나 이용할 수 있도록 한다는 것이다. 즉, 정책 당국의 인위적인 분배

와 독점적 이용권 부여가 주파수 이용 효율을 저해시킴에 반해, 주파수를 이용하고자 하는 자들끼리 서로 주파수를 공유하게 되면 주파수 부족현상이 해소되고 보다 효율적으로 주파수 자원을 이용할 수 있게 된다는 것이다. CR 기술은 주변 무선 환경을 인지하고 학습하여, 스스로 무선 환경에 최적의 파라미터를 결정해 타 기기에 간섭을 주지 않고 무선 통신하는 것을 기초로 한다^[2].

CR 기술을 활용하기 위해 특정 대역의 스펙트럼 검출 기본 기술로서 정합 필터, 신호 형태 검출, 에너지 검출 방식 등 이들 기술을 바탕으로 다양하고 폭넓은 연구가 시도 되고 있다. CR 시스템은 1차 사용자의 신호에 대한 정보를 알기 어렵기 때문에 신호 정보가 필요한 정합 필터 방식이나 신호 형태 검출 방식은 적절하지 못할 뿐만 아니라 복잡하기도 하다. 반면 에너지 검출 방식은 특정대역의 주파수의 에너지를 측정, 신호의 존재 유무를 감지하는 방식이므로 앞서 언급했던 검

* 학생회원, 동국대학교 전자공학과
(Dongguk University-Seoul, Korea)

** 정회원, 동국대학교 전자전기공학부
(Dongguk University-Seoul, Korea)

※ 이 논문은 2009년도 대한민국 정부(교육과학기술부)의 재원으로 시행하는 한국연구재단 국제협력사업의 지원으로 수행된 연구결과임

(과제번호: F01-2009-000-10188-0)

접수일자: 2011년6월3일, 수정완료일: 2011년11월14일

출 방식에 비하여 단순하여 빠른 스펙트럼 검출이 가능하다.

압축 감지 기술은 나이퀴스트율 이하로 아날로그 신호를 샘플 할 수 있는 기법이다^[3]. 이 기법으로 신호는 기존의 신호 샘플 방법보다 적은 수의 측정값으로 표현이 가능하며 또한 선형 프로그래밍을 이용하여 측정값으로부터 본래 신호를 높은 확률로 복원할 수 있다. 이를 통해 압축 감지 기술은 같은 신호를 획득하는데 소모 되는 측정 시간 및 ADC(analog-to-digital converter) 자원의 양을 크게 감소시키는 장점을 갖는다.

에너지 검출 방식을 사용한 CR 시스템에서 기존의 정해진 대역보다 넓은 대역을 감지하고자 한다면 기존의 경우 보다 더 많은 샘플 수가 필요한 것은 당연하며 소모 되는 측정 시간 또한 길어진 것이다. 압축감지 기술의 CR 시스템에서 사용은 Z. Tian 논문^[4]에서와 같이 주기신호를 이용해 1차 사용자를 판단하는 경우에서 기존 보다 넓은 대역의 감지를 위해 필연적으로 요구되는 높은 샘플링 비율을 줄이기 위해 압축 감지 기술의 적용을 통해 더 넓은 대역에 대한 센싱을 하고 있다. 만약 압축 감지 기술을 에너지 검출 방식과 결합한다면 더 적은 샘플 수만으로 본래 신호를 복원하여 1차 사용자의 존재 여부를 판정할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 에너지 검출기를 이용하여 기존의 감지하였던 대역 보다 넓은 대역에 대한 스펙트럼 검출 방식에서 에너지 검출 방식과 압축 감지 기술을 추가하는 방안을 제안한다. 시뮬레이션을 통하여 압축 감지 기술을 사용하는 방법에 있어 최적의 샘플 수 측정값을 유도하고 이를 기존의 에너지 검출기 복수개를 사용한 경우의 결과와 비교한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 에너지 검출 방식과 압축 감지 기술의 방식을 설명하고, III장에서는 제안하는 스펙트럼 검출기의 성능을 알아본다. 끝으로 IV장 결론으로 구성 되어있다.

II. 에너지 검출 방법과 압축 감지 기술

1. 에너지 검출 방법

에너지 검출 방식은 그림 1에서 보는 바와 같이 앞서 언급했던 검출 방식에 비하여 단순하며, 해당 신호의 중심 주파수를 선택하고 대역폭을 결정하기 위해 대역 통과 필터에 통과 시킨 후, 제곱을 하여 적분하는 방법으로 특정대역의 주파수의 에너지를 측정신호의

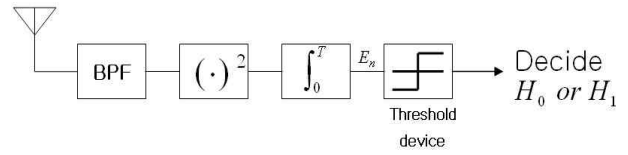


그림 1. 에너지 검출기 블록 다이어그램
Fig. 1. The block diagram of energy detector.

주파수의 에너지를 측정신호의 존재 유무를 감지하는 방식이다.

다음은 에너지 검출기의 성능 테스트를 위한 가정은 아래와 같다.

$$H_0 : y(t) = n(t) \quad \text{Channel Vacant}$$

$$H_1 : y(t) = x(t)*h(t) + n(t) \quad \text{Channel Occupied}$$

여기서 $y(t)$ 는 Secondary 사용자가 수신한 신호 이고, $x(t)$ 는 1차 사용자가 전송한 신호이다. $n(t)$ 는 AWGN(Additive White Gaussian Noise)를 나타내고, $h(t)$ 는 채널의 크기 이득을 나타낸다. 일반적인 에너지 검출기에서 AWGN만 고려한 채널의 이론적인 검출 확률 및 오보 확률은 다음과 같이 정의 되어있다.^[5]

$$P_D = P\{y > \lambda \mid H_1\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{2}) \quad (1)$$

$$P_{FA} = P\{y > \lambda \mid H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (2)$$

여기서 λ 는 임계값 이고, γ 는 SNR이며, m 은 시간-대역폭의 곱이다. $Q_m(\cdot, \cdot)$ 은 Generalized Marcum Q-function이다. $\Gamma(\cdot, \cdot), \Gamma(\cdot)$ 는 각각 complete gamma 그리고 incomplete gamma 함수이다. 여기서 수식 (2) 오보 확률은 γ 와 독립적임을 알 수 있다. 왜냐하면 H_0 인 경우에 1차 사용자의 신호가 없기 때문에 다른 채널 환경에서도 이 오보 확률은 변하지 않고 단지 임계값과 m 값만이 영향을 미친다.

수식 (3)은 레일레이 페이딩 환경에서의 검출 확률이고 다음과 같이 정의 되어있다.

$$P_D = e^{-\frac{\lambda}{2} \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^k} + \left(\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right)^{m-1} \times \left(e^{-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma})}} - e^{-\frac{\lambda}{2} \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda\bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})}\right)^k} \right) \quad (3)$$

그림 2에서는 수식 (1) - (3)을 이용하여 각각 AWGN, 레일레이 페이딩 환경에서의 에너지 검출기의 이론적인 성능을 보여주고 있다. SNR이 10dB 이고, 0.1 오보 확률 기준에서 AWGN만 고려한 경우는 90%가 넘는 검

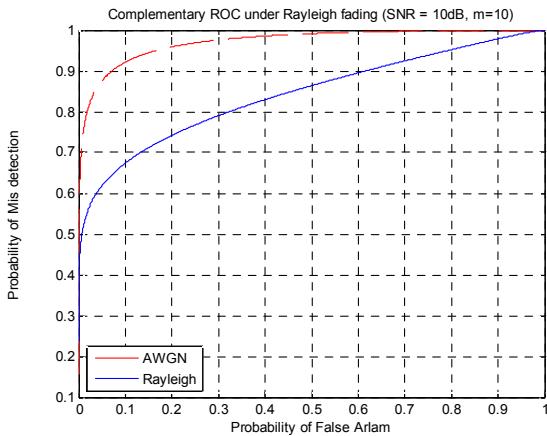


그림 2. AWGN과 Rayleigh Fading 하에서 에너지 검출기의 이론적인 성능 ROC 그래프 (SNR= 10dB, m=10)[6]

Fig. 2. Theoretical Performance of Energy Detector plotted ROC graph under only AWGN or Rayleigh Channel (SNR= 10dB, m=10)

출 확률을 보이거나 레일레이 페이딩 환경에서는 약 20% 이상 성능이 감소된 68% 정도의 검출 확률을 나타내고 있다. 그림 2를 통해서 다시 한 번 에너지 검출기의 성능이 페이딩 환경에서 급격히 악화됨을 알 수 있다.

2. 압축 감지 기술^[7]

본 논문에서는 기존의 스펙트럼 검출 방식 중에 가장 간단한 에너지 검출 방법을 사용할 때, 보다 넓은 대역을 감지하기 위해 압축 감지 기술을 사용하는 것을 제안한다.

압축 감지 기술은 성진 신호를 적은 수의 기저 함수들로 표현하는 방법을 기초로 하는 방법이다. 따라서 성진 신호에 대한 정의 및 해석이 필요하다.

2.1 신호의 성진 특성

아날로그 복소수(또는 실수) 신호 $f(t)$ 를 샘플링 한 길이가 N 인 벡터는 N 차원 복소수(또는 실수) 벡터 $f \in C^N$ 으로 표현된다. 벡터 f 는 직교정규화 기저 $\psi_1 \dots \psi_N \in C^N$ 로 표현되는 N 차원 변환 영역에서 다음의 식 (4)로 표현된다.

$$f = \sum_{i=1}^N s_i \psi_i = \psi s \quad (4)$$

상기의 식 (4)에서 $\{s_i\}_{i=1}^N$ 는 신호 f 를 직교정규화 기저 $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ 의 선형 결합 형태로 표현 시 사용되는

계수이며, $s_i = \langle f, \psi_i \rangle$ 로 표현된다. 이 경우에 \langle, \rangle 는 벡터간의 내적을 표현한다. 그리고 s 는 N 차원 복소수 공간 C^N 의 벡터로 s_i 를 원소로 갖는다. ψ 는 직교정규화 기저 $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ 를 열로 갖는 $N \times N$ 크기의 행렬로 변환행렬이라고 한다.

정수 $K \ll N$ 에 대해 벡터 s 의 원소들 중 K 개의 0이 아닌 값과 $(N-K)$ 개의 0인 값으로 구성될 때, s 는 K -성진 벡터라고 한다. 또한, 이 경우에 신호 f 는 ψ -영역에서 K -성진 특성을 갖는다고 한다.

2.2 측정값 획득 및 신호의 복원

아날로그 신호를 이산시간 신호로 표시하는 과정은 신호의 획득 방법에 관계없이 일반화된 식으로 표현할 수 있다. 이 과정에서 획득한 신호의 정보를 측정값이라고 하여 y_j 로 표현한다. 측정값은 획득 방법에 따라 정의된 획득 커널 $\phi_j(t)$ 과 아날로그 신호 $f(t)$ 간의 내적으로 정의되며, 이는 식 (5)로 표현된다.

$$y_j = \langle f(t), \phi_j(t) \rangle, j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

상기 식 (5)에서 M 은 측정값의 개수를 나타내며, \langle, \rangle 는 연속신호(continuous signal)들 간의 내적을 나타낸다. 측정값은 이산시간 신호 f 에 대해서도 표현할 수 있으며, 이를 수식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$y_j = \langle f, \phi_j \rangle, j = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

식 (6)에서 ϕ_j 는 $\phi_j(t)$ 의 길이가 N 인 이산시간 표현 식이며, 식 (5)의 측정값과 식 (6)의 측정값 y_j 가 동일한 값을 갖도록 선택된다.

압축 감지 기술은 신호 f 가 K -성진 특성을 가지고 있다는 가정으로부터 출발한다. 본 기술에서 신호의 획득은 신호 자체를 샘플하는 대신에 압축된 형태의 측정값을 직접 얻는 것에 목표를 둔다. 즉, 측정값의 개수 M 은 N 보다 작게 선택한다. 측정값을 선택하는 한 가지 방법으로는 신호 f 에 대한 성진 벡터 s 의 원소들 중에서 K 개의 0이 아닌 원소들을 획득하는 것이다. 그러나 일반적으로 성진 벡터의 0이 아닌 원소 위치는 미리 알고 있지 않으며, 또한 여러 신호에 대해 성진 벡터의 0이 아닌 원소 위치는 다르다. 따라서 상기의 방법은 측정방법으로 이용될 수 없다.

Φ 가 ϕ 를 행으로 갖는 $M \times N$ 크기의 측정 행렬이라고 하고 y 가 측정값을 원소로 갖는 $M \times 1$ 크기의 측

정벡터라고 할 때, 측정 벡터 y 는 식 (4)를 이용하면 다음의 식 (7)과 같이 행렬의 형태로 표현된다.

$$y = \Phi f = \Phi \Psi s = \theta s \text{ 여기서 } \theta = \Phi \Psi \quad (7)$$

상기 식(7)에서 θ 는 $M \times N$ 크기의 행렬로 감지 행렬이라고 하며, 측정 벡터와 성긴 벡터간의 관계를 나타낸다.

압축 감지 기술에서 신호 f 는 측정 벡터 y 로부터 복원된다. 측정 벡터 y 와 신호 f 간의 관계는 식(7)으로 표현되며, $M \times N$ 크기의 측정 행렬 Φ 로부터 신호 f 를 미지수로 갖는 $y = \Phi f$ 가 과소 결정된 방정식임을 알 수 있다. 즉, 주어진 측정 벡터 y 에 대해 하나 이상의 해 f 가 존재하며, 따라서 일반적인 방법으로는 측정벡터 y 로부터 신호 f 를 완벽하게 복원할 수 없다. 그러나 신호는 특정 변환 영역에서 성긴 특성을 가지기 때문에 측정 벡터는 식 (8)와 같이 감지 행렬 θ 의 일부열로 선형 결합된 형태로 표현되며, 이 경우에 미지수의 개수는 수학적의 개수보다 작거나 같게 된다.

$$y = \sum_{i \in T} \theta_i s_i = \theta_T s_T \quad (8)$$

상기의 식 (8)에서 T 는 s 의 지원 영역으로 $[1, N] \supset T$ 이며, $|T| = K$ 를 만족한다. θ_i 는 감지행렬 θ 의 i 번째 열을 표현하며, θ_T 는 감지행렬 θ 의 $M \times K$ 크기의 부분 행렬로 T 의 색인에 해당하는 열로 구성된다. s_T 는 $K \times 1$ 크기의 벡터로 s 의 0이 아닌 원소로만 구성된다.

K -성긴 벡터의 완벽복원을 위해서는 $|T| = K$ 를 만족하는 임의의 T 에 대해서 식 (8)는 유일한 해를 가져야 한다. RIP은 임의의 T 에 대해 식 (8)가 유일한 해를 가지기 위한 감지 행렬 θ 의 충분조건을 제시하며 다음의 식 (9)로 표현된다.

$$1 - \epsilon \leq \frac{\|\theta v\|_{l_2}^2}{\|v\|_{l_2}^2} \leq 1 + \epsilon \quad (9)$$

상기의 식 (9)에서 $0 < \epsilon < 1$ 이며, v 는 임의의 $3K$ -성긴 벡터이다. 감지 행렬 θ 가 식 (9)를 만족하는 경우에 감지 행렬 θ 는 RIP을 가진다고 한다. 압축 감지 기술을 이용하면 RIP을 가지는 감지 행렬 θ 를 이용하여 생성한 측정 벡터 y 로부터 임의의 K -성긴 벡터 f 를 완벽하게 복원해낼 수 있다.

III. 제안하는 방법

3.1 제안하는 방법

본 논문에서 제안하는 방법은 상기의 2.2에서 설명한 압축 감지 기술을 사용하기 위해서는 신호 f 가 K -성긴 특성을 가지고 있다는 가정으로부터 출발한다. CR 시스템에서의 경우 각 주파수상에서 1차 사용자들이 성긴 특성을 보이게 되므로 압축 감지 기술을 적용할 수 있다.

가정하는 시나리오는 coarse sensing을 한 후, 그 결과를 토대로 fine sensing을 통해 최종으로 CR 시스템이 기존의 유저가 있는지를 판단하는 과정이며, 여기서 coarse sensing은 에너지 검출기를 사용해 신호의 에너지만을 검출하여 1차 판단을 내리게 된다. 에너지 검출기는 상기에서 설명한 것과 같이 가장 간단하며 사전 정보가 필요하지 않다는 장점을 가지게 된다. 에너지 검출기를 통해 빠르게 1차로 판단을 하게 되며, 그 결과를 토대로 fine sensing을 통한 최종판단을 내리게 된다. 보편적으로 coarse sensing의 판단 과정은 CR 시스템이 사용하고자 하는 전 주파수 대역에서 일어나게 된다.

1차 판단을 내리는 과정에서 기존의 에너지 검출기가 사용자들의 존재 유무를 판단하는 주파수 대역보다 넓은 주파수 대역을 감지하기 위해서는 복수개의 에너지 검출기를 사용하는 방법을 사용하는 방법이 있다. 만약 하나의 에너지 검출기를 사용하여 기존의 검출하였던 주파수 대역보다 넓은 주파수 대역을 검출하고자 한다면, 이는 더 많은 샘플이 필요하게 되는 것을 의미하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 방법은 에너지 검출기에 압축감지 기술의 적용을 통해 나이퀴스트율을 만족하지 않는 샘플을 사용하여 하나의 에너지 검출기에서 더 넓은 주파수 대역에 대한 사용자의 존재 유무를 판단하는 과정에 있다.

또한 시뮬레이션을 통해 나이퀴스트율을 만족하는 샘플 수를 M 으로 정의하며 압축 감지 기술을 사용하는데 사용한 샘플 수는 K 로 정의하여 최종적으로 압축 감지 기술을 적용한 에너지 검출기에 대한 성능 비교를 통해 최적화된 샘플 비율을 시뮬레이션을 통해 제안한다.

3.2 시뮬레이션 결과

본 논문에서 레일레이 페이딩과 로그 노말 쉐도잉의

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. The simulation parameters.

Parameter	Value
Carrier frequency	900MHz
SNR	3dB or 6dB
K/M	0.1~0.9
Center Frequency	2000Hz ,20000Hz
Sample Period	0.33ms
Sensing Time	3.3ms
Mobile Speed	3km/h

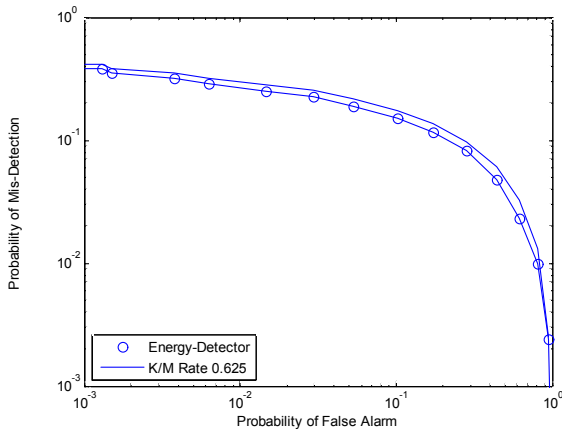


그림 3. Rayleigh Fading 하에서 에너지 검출기와 압축 감지기술을 더한 에너지 검출기의 성능비교 (SNR = 6dB, m = 10)

Fig. 3. Performance comparison between energy detectors with and without CS in Rayleigh fading.

곱으로 표현 할 수 있는 스즈키 채널을 고려하였다. 본 논문에서는 감지 할 수 있는 주파수 범위에 대해 기존의 에너지 검출기와 압축 감지 기술을 적용한^[8] 에너지 검출기의 성능을 비교 한다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터들은 표 1에 정리하였다.

그림 3과 그림 4는 스즈키 레일리에 페이딩 채널하에서 기존의 에너지 검출기와 압축 감지 기술(K/M = 0.625)을 적용한 에너지 검출기의 성능을 비교한 ROC(Receive Operation Characteristics)그래프이다. 기존 에너지 검출기와 제안하는 압축 감지기술을 적용한 에너지 검출기의 성능을 비교하기 위하여 SNR(Signal to Noise Ratio)는 6dB로 고정하고 같은 주파수 대역만을 시뮬레이션 한 결과 압축 감지 기술을 적용한 경우의 성능이 보통의 에너지 검출기보다 성능 면에서 하락한 것을 쉽게 확인 할 수 있다. 이는 압축 감지 기술을 사용하여 나이퀴스트율을 만족하지 않는

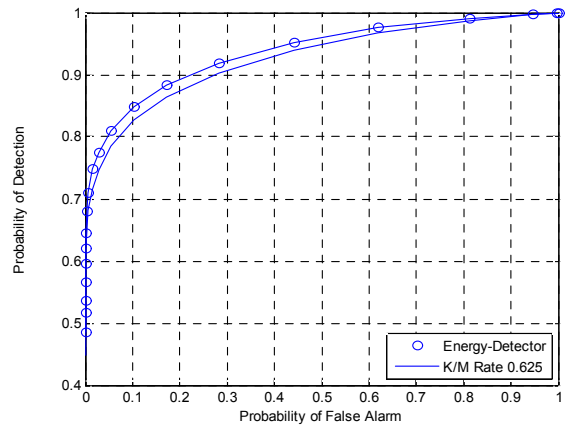


그림 4. Rayleigh Fading 하에서 에너지 검출기와 압축 감지기술을 더한 에너지 검출기의 성능비교 (SNR = 6dB, m = 10)

Fig. 4. Performance comparison between energy detectors with and without CS in Rayleigh fading.

샘플링을 통해 원 신호를 복원하는 경우 정확히 원 신호를 복원하지는 못하기 때문이다.

하지만 복원된 신호는 원 신호와 정확하지는 않아도 원 신호가 가지는 특성을 근접하게 복원할 수 있기 때문에 성능의 하락을 가정한다 하여도 낮은 샘플만을 통해 복원된 신호는 원 신호로 가정할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

CR 시스템에서 가장 중요한 점은 기존의 1차 사용자가 사용하는 주파수 대역을 침범하지 않으며 1차 사용자에게 피해를 주지 않아야 한다. CR 시스템에서 가장 중요하게 고려되는 기술 중 하나인 스펙트럼 검출 기술에서 넓은 주파수 대역에서 가장 간단하게 신호의 세기를 이용하여 1차 사용자의 존재 유무를 판단하는 방법인 에너지 검출기가 보편적으로 사용되고 있다. 이 결과를 토대로 CR시스템은 좀 더 정확도 높은 방법의 스펙트럼 검출기를 통해 최종적으로 주파수 대역에서의 1차 사용자의 존재 유무를 판단하게 된다.

본 논문에서는 에너지 검출기에서 더 넓은 주파수 대역을 감지하기 위해 샘플링을 하는 과정에 기존의 신호의 복원을 위한 최소조건인 나이퀴스트를 이하로 랜덤 샘플링을 하여 원 신호를 복원할 수 있는 압축 감지기술을 적용하였다. 기존의 에너지 검출기를 사용하여 감지하던 대역 보다 큰 범위를 감지하기 위해선 더 많은

샘플을 필요로 하게 되며 결국 넓은 주파수 대역을 감지하기 위해서는 다수의 에너지 검출기를 통하거나 시간별로 여러 주파수 대역을 이동하며 감지를 하는 방법이 있다.

시뮬레이션 결과에서 나타난 것과 같이 에너지 검출기에 압축 감지 기술을 적용하게 된다면 압축 감지 기술을 적용하지 않은 경우와 비교시 성능측면에서 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. 하지만 기존보다 넓은 주파수 대역에서 1차 사용자의 존재 유무를 판단할 때, 여러 개의 에너지 검출기를 사용하지 않고 하나의 에너지 검출기만을 사용해 넓은 주파수 대역을 감지할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] FCC, "Notice of proposed rule making and order", ET, December 2003, Docket No 03-222.
- [2] Mitola, J., III, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications", in Proc. IEEE Int. Workshop on Mobile Multimedia Communication, 1999.
- [3] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Pers. Commun., vol. 6, pp. 13--18, Aug. 1999.
- [4] D.L.Donoho, "Compressed sensing", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52 pp.1289 - 1306, 2006.
- [5] Z. Tian, "Cyclic Feature based Wideband Spectrum Sensing using Compressive Sampling," Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2011.
- [6] F. F. Digham, M.-S. Alouini and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," in Proc. of IEEE Internation Conference on Communications (ICC'03), pp. 3575 - 3579, May 2003.
- [7] 백준호, 이종환, 오형주, 황승훈, "인지 무선 환경에서 스펙트럼 센싱을 위한 에너지 센싱기의 성능 개선 : 시간지연을 이용한 확인 과정", 전자공학회 TC편 45권 1호, pp. 72-77, 2008.
- [8] 황대성, 김대성, 최진호, 하정석, "압축 감지 기술과 무선통신 응용", 전자공학회 SP편 46권 5호, pp. 32-39, 2009
- [9] M. Grant, S. Boyd, "CVX : Matlab Software for Disciplined Convex Programming", <http://cvxr.com/cvx/>

저 자 소 개



이 재 혁(학생회원)
2010년 동국대학교 전자공학과 학사.
2010년~현재 동국대학교 전자공학과 석사과정 재학.
<주관심분야 : 무선 및 이동 통신 시스템>



전 차 을(학생회원)
2009년 동국대학교 전자공학과 학사.
2011년 동국대학교 전자공학과 석사.
2011년 6월~현재 LG전자 이동통신기술연구소
<주관심분야 : 무선 및 이동 통신 시스템>



황 승 훈(평생회원)
1999년 연세대학교 공학박사.
1999년 LG전자 이동통신기술연구소 책임연구원.
2003년 University of Southampton, United Kingdom, Visiting Research Fellow.
2010년 Stanford University, USA, 방문교수
2005년~현재 동국대학교 전자전기공학부 부교수.
IEEE Senior Member, IET Member, IEICE Member.
<주관심분야 : 무선 및 이동 통신 시스템>