

USRP 기반 인지 무선 테스트베드에서 2차 사용자의 스펙트럼 센싱 시간 및 성능에 미치는 측정 샘플수 영향 분석

이철웅*, 이규민*, 노병희^o, 오지명**, 강성진**, 김도경**

Analysis of the Influence of the Number of Measurement Samples on Spectrum Sensing Time and Performance of Secondary Users in USRP-Based Cognitive Radio Testbeds

Cheol-woong Lee*, Gyu-min Lee*, Byeong-hee Roh^o, Jimyeong Oh**,
Sungjin Kang**, Do-kyung Kim**

요 약

최근 무선통신 기술의 발달 및 무선장비 수의 증가로 많은 인지무선 기술들이 제안되고 있다. 제안된 인지무선 기술들을 실체계 기반 환경에서 분석하기 위해 USRP 기반 인지무선 테스트베드들이 제안되었으나, 이들은 센싱 시간 산정에 대해 명확한 기준을 제시하고 있지 않다. 본 논문에서는 USRP 기반 인지무선 테스트베드에서 부사용자의 성능을 보장하는 센싱 시간 한계를 측정하기 위한 방법에 대해 설명한다. 첫째로, 최소 센싱 시간 측정을 위한 테스트베드의 구조에 대해 설명하고, 둘째로, 구축된 테스트베드를 이용한 실험 방법 및 결과에 대해 설명한다. 산출된 USRP의 최소 센싱 시간은 향후 진행될 인지무선관련 연구에서 실체계를 위한 센싱 시간 산정에 명확한 기준을 제시할 수 있다.

Key Words : USRP, GNU-Radio, Software Defined Radio, Cognitive Radio, Spectrum Sensing Time

ABSTRACT

Recently, many cognitive radio schemes have been proposed due to the development of wireless communication technology and increasement of the number of wireless devices. Therefore, many USRP-based cognitive radio testbeds have been proposed to analyze the schemes in a real-world. However, they do not provide any criteria for setting sensing time of the secondary user. In this paper, how to measure the sensing time limit to guarantee the performance of the secondary user in a USRP-based cognitive radio testbed is described. First of all, the architecture of the cognitive radio testbed and the experimental method and results will be described. The sensing time can be a clear criterion for setting the sensing time in future cognitive radio related studies.

* 본 연구는 LIG넥스원의 지원을 받아 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0001-9287-7034) Dept. of Computer Engineering, Ajou University, cjfdnd369@ajou.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-2509-4210) Dept. of Computer Engineering, Ajou University bhroh@ajou.ac.kr, 중신회원

* (ORCID:0000-0002-6384-795X) Dept. of Computer Engineering, Ajou University, mybrand@ajou.ac.kr, 학생회원

** LIG Nex1 Co. Ltd. {jimyungoh, sungjin.kang, kimdokyoun}@lignex1.com

논문번호 : 201808-235-A-RN, Received August 4, 2018; Revised September 29, 2018; Revised October 1, 2018

I. 서 론

최근 무선통신 기술의 발달 및 무선장비 수의 증가로, 특정 대역 주파수 자원에 대한 수요가 급증하고 있다. 인지무선(CR, Cognitive Radio)은 이러한 문제를 해결하기 위한 기술로서, 부사용자(SU, Secondary User)는 주사용자(PU, Primary User)가 사용하지 않은 기간동안 주파수를 사용함으로써 PU의 간섭을 방지하고 주파수 사용 효율을 향상시킬 수 있다.

기존의 CR 관련 연구들은 시뮬레이터 SW를 기반으로 성능분석을 수행하고 있으나, 시뮬레이터는 실제 주파수 사용 환경을 반영하기 힘든 문제점이 있다. 따라서, 최근에는 제안된 CR 기술들을 실제계 기반 환경에서 분석하기 위하여 USRP (Universal Software Radio Peripheral)를 사용한 CR 테스트베드들이 제안되고 있다.

에너지 감지기법의 성능을 향상시키기 위해 SU가 수신하는 신호에 대한 임계값을 상황에 따라 변경하는 적응적 알고리즘들이 제안되었¹⁻³⁾, CR 테스트베드를 이용하여 성능검증을 수행하였다. CR 테스트베드 구축 연구⁴⁻⁷⁾는 USRP 기반 CR 테스트베드를 구축하여 SU의 센싱 성능을 분석하였다. CR MAC 프로토콜의 성능분석 및 검증연구⁸⁻¹⁰⁾는 기존 또는 제안하는 CR MAC 프로토콜의 성능을 자체 구축한 테스트베드를 통해 검증하였다.

CR 환경에서는 SU의 센싱 시간이 네트워크 성능에 막대한 영향을 미치는데 반해, 기존의 CR 테스트베드 관련 연구들은 센싱 시간에 영향을 미치는 파라미터 설정에 대한 명확한 기준을 제시하지 않는다. 특히, nRORA⁷⁾는 클라우드 기반 CR 테스트베드를 이용하여 센서 사이의 거리, 에너지 감지기법의 임계값에 의한 detection probability의 변화, antenna gain에 의해 요구되는 센서 사이의 최소 거리, 센서의 이동속도에 따른 최소 센싱 간격 등 다양한 성능지표를 보였으나, 이러한 성능지표 또한 SU의 센싱 한계를 산출할 수 없다.

본 논문에서는 USRP를 사용하는 CR 테스트베드에서 SU의 센싱 시간에 영향을 미치는 파라미터를 다양하게 적용하여 SU의 센싱 성능을 보장하는 센싱 시간 한계를 산출한다. 세부적으로, 정확한 성능분석을 위한 테스트베드 구조에 대해 설명하며, 최소 센싱 시간 산출을 위한 실험 방법과 성능 분석 과정을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 USRP의 하드웨어 구조에 대해 간략히 설명하고, 기존의 USRP 기반 CR 테스트베드 구축 연구에 대해 알아본

다. 3장에서는 SU의 성능을 보장하는 최소 센싱 시간을 산출하기 위한 CR 테스트베드의 구조에 대해 설명한다. 4장에서는 실험 파라미터 및 결과에 대해 설명하며, 5장에서 결론을 내린다.

II. 배경 및 관련연구

2.1 USRP 개요

USRP는 CR 분야에서 사용되는 대표적인 하드웨어 플랫폼들중의 하나이다¹¹⁾. USRP는 Ettus Research에 의해 설계된 SDR (Software Defined Radio) 플랫폼으로, 그림 1과 같이 이더넷 컨트롤러, FPGA (Field Programmable Gate Array), 교체 가능한 도터보드를 포함하는 마더보드로 구성된다.

USRP와 연결된 호스트는 이더넷 컨트롤러를 통해 명령을 전달할 수 있다. USRP는 호스트로부터 받은 명령을 FPGA로 전달하며, FPGA는 명령에 따라 신호를 DAC (Digital Analog Converter)를 통해 도터보드에 전달하여 TX 프로세스를 수행한다. 또한, 외부로부터 수신한 신호는 ADC (Analog Digital Converter)를 거쳐 FPGA를 통해 이더넷 컨트롤러로 전달되어 호스트로 전달된다. USRP에는 신호의 발생 및 수집이 모두 가능한 TX1/RX1 도터보드와 신호의 수집만 가능한 RX2 도터보드가 있으며, 두 개의 RF (Radio Frequency) 스위치에 의해 신호를 발생시킬지 수집할지가 결정된다.

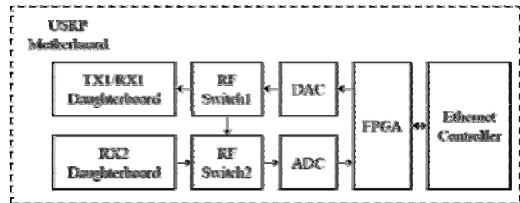


그림 1. USRP의 하드웨어 구성도
Fig. 1. Hardware Architecture of the USRP

2.2 USRP 기반 CR 테스트베드 연구

적응적 에너지 감지기법의 성능분석 및 검증 연구¹¹⁻¹³⁾는 에너지 감지기법의 성능을 향상시키기 위해 SU가 수신하는 신호에 대한 임계값을 상황에 따라 변경하는 적응적 알고리즘을 제안했다. 또한, USRP 기반의 CR 테스트베드를 이용하여 성능검증을 수행하였다. 이들은 false alarm probability와 detection probability에 대한 ROC 커브^{11,12)}, 단일 노드가 측정된 평균 SNR값에 대한 false alarm probability와

detection probability^[3] 등 제안방법을 검증하기 위한 다양한 성능지표를 보였으나, SU의 센싱 한계를 측정하기 위한 성능지표는 보이지 않았다.

CR 테스트베드 구축 연구^[4-7]는 USRP 기반 테스트베드를 구축하고, SU의 센싱 결과를 보였다. MATLAB/Simulink^[4], GNU-Radio^[5,6], LabView^[7]와 같은 SDR용 소프트웨어 플랫폼을 이용하여 다양한 CR 테스트베드를 구축했으나, 구현 결과를 보이기 위한 간단한 성능지표만을 보였다. R. A. Rashid et al.^[5]은 에너지 감지기법의 최적 임계값을 찾기 위해 SU가 한 번에 처리하는 샘플 수에 따른 탐지 확률 (detection probability)을 보였으나, 31.59ms로 고정된 센싱 시간을 적용 및 실험하여 센싱 시간에 의한 detection probability를 확인할 수 없다. 또한, nRORA[7]는 클라우드 기반 CR 테스트베드를 이용하여 센서 사이의 거리, 에너지 감지기법의 임계값에 의한 탐지확률의 변화, 안테나 이득 (antenna gain)에 의해 요구되는 센서 사이의 최소 거리, 센서의 이동속도에 따른 최소 센싱 간격 등 다양한 성능지표를 보였으나, 이러한 성능지표 또한 SU의 센싱 한계를 산출할 수 없다.

CR MAC 프로토콜의 성능분석 및 검증연구^[8-10]는 기존 또는 제한하는 CR MAC 프로토콜의 성능을 자체 구축한 CR 테스트베드를 이용하여 검증했다. 이들은 구현 결과를 보이기 위해 CR MAC 프로토콜의 기본적인 성능지표만을 보였다. CogMAC^[9]는 USRP, WARP와 LabView 기반의 테스트베드를 이용하여 센싱 시간에 따른 goodput을 보였으나, 이는 MAC 프로토콜의 성능지표를 보인 것으로 탐지 확률 보장을 위한 최적의 센싱 시간을 알기 어려운 문제가 있다.

III. USRP 센싱에 영향을 주는 파라미터 측정 방법

본 장에서는 SU의 성능을 보장하는 USRP의 최소 센싱 시간 산출을 위한 CR 테스트베드의 구성과 성능지표의 정의 및 측정방법에 대해 설명한다. 또한, CR 테스트베드를 구성하는 PU 시스템 및 SU 시스템의 구조 및 동작에 대해 설명한다.

3.1 테스트베드 구성

기존 USRP 기반 CR 테스트베드 연구들에서는 PU 시스템을 위한 호스트와 SU 시스템을 위한 호스트를 별도로 구성한다. 이렇게 구축한 CR 테스트베드에서는 성능지표의 정확한 측정을 위해 PU 시스템과 SU

시스템에서 추가적으로 시간동기화 알고리즘을 동작시키거나, 성능측정을 위한 별도의 서버를 필요로 한다.

본 논문에서는 PU 시스템과 SU 시스템의 시간을 동일하게하기 위한 그림 2와 같은 CR 테스트베드를 구축하였다. 데스크톱에 리눅스 기반의 가상머신을 설치하여 호스트를 구성하였으며, 이렇게 구성된 호스트와 PU와 SU의 물리적 장비에 해당하는 USRP가 이더넷을 통해 연결된다. USRP는 N210을 이용하며, 이는 기가비트 이더넷 스트리밍을 지원하기 때문에, 호스트와 각 USRP는 기가비트 이더넷을 이용하여 연결된다. PU와 SU에 해당하는 USRP에 명령을 전달하기 위한 응용으로는 uhd_siggen_base.py와 spectrum_sense.py의 수정본을 사용하였으며, 각 USRP에 다른 대역의 IP 주소를 할당하여 하나의 호스트가 USRP를 구별하여 명령을 전달할 수 있도록 테스트베드를 구성하였다.

본 논문에서는 SU의 성능을 보장하는 최소 센싱 시간을 산출하기 위한 성능지표로서 탐지확률을 사용한다. 탐지확률 P_d 는 false alarm probability를 포함하지 않는 개념으로, X 를 PU 시스템의 응용이 USRP에 명령을 내린 결과로 정의하고 (0: PU가 활동하지 않음, 1: PU가 활동함), Y 를 SU 시스템의 응용이 주변 신호를 센싱하여 인지한 PU의 활동여부라 정의할 때, 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_d = P(X = Y|t) \tag{1}$$

P_d 는 같은 시간 t 에 대해 PU 시스템의 응용이 USRP에 명령을 내린 결과와 SU 시스템의 응용이 USRP로부터 수신한 신호를 바탕으로 결론지은 PU의

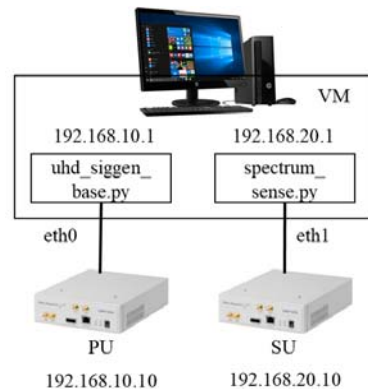


그림 2. CR 테스트베드의 구조
Fig. 2. Structure of CR Testbed

활동여부가 일치하는 비율으로 정의한다.

3.2 PU 시스템 구현

PU 시스템은 USRP에 신호를 발생시키는 명령을 전달하는 파이썬 기반 프로그램인 `uhd_siggen_base.py`에 2-상태 마코프 연쇄 기반 PU 채널 모델^[12]을 적용해 구현하였다.

그림 3은 PU 시스템에 적용된 2-상태 마르코프 연쇄 모델의 상태를 나타낸다. 2-상태 마르코프 연쇄 모델은 외부 입력에 의해 결정된 α ($\alpha \geq 0$) 및 β ($\beta \leq 1$)의 의해 확률적으로 동작한다. 해당 모델은 OFF-상태부터 시작하며, β 확률로 OFF-상태를 그대로 유지하고, $1-\beta$ 확률로 ON-상태로 천이한다. 모델이 현재 ON-상태에 존재하는 경우, α 확률로 ON-상태를 유지하고, $1-\alpha$ 확률로 OFF 상태로 천이한다.

그림 4는 α 와 β 가 0일 때 2-상태 마르코프 연쇄 모델이 적용된 PU 시스템의 동작을 나타낸다. PU 시스템은 메인 쓰레드와 신호발생 쓰레드로 구분된다. 메인 쓰레드는 사용자에게 의해 정해진 이산단위시간

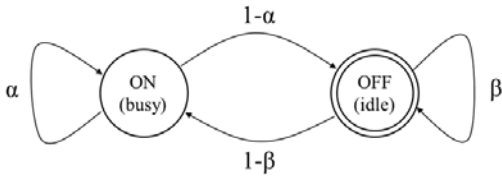


그림 3. PU 시스템의 2-상태 마르코프 연쇄 모델
Fig. 3. 2-state markov chain model of PU system

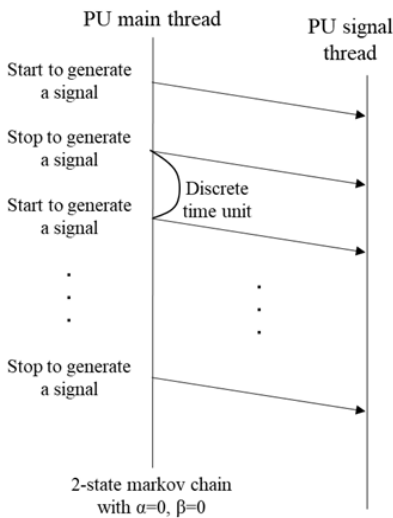


그림 4. $\alpha, \beta = 0$ 일 때 PU 시스템의 동작 예시
Fig. 4. Operation example of the PU system when $\alpha, \beta = 0$

(Discrete Time Unit)마다 α 와 β 에 따라 확률적으로 신호의 발생 여부를 결정하게 된다. 즉, PU 시스템은 자신의 상태를 최소 이산단위시간만큼 유지하고, 이후 확률적으로 신호의 발생여부를 결정한다. 그림 4에서 PU 시스템은 α 와 β 가 0으로 설정되어있기 때문에, 자신의 상태를 이산단위시간마다 변경하며 신호발생 쓰레드에 해당 명령을 전달한다. 신호발생 쓰레드는 메인 쓰레드의 명령을 호스트에 연결된 PU 시스템의 USRP로 전달한다.

PU 시스템은 P_i 를 측정하기 위해, 신호의 발생 여부를 변경하는 시점마다 현재 시간을 기록한다. 즉, PU 시스템은 PU의 상태가 ON-상태에서 OFF-상태 또는 OFF-상태에서 ON-상태로 변경되는 경우, 현재 시간을 파일로 기록하게 된다.

3.3 SU 시스템 구현

SU 시스템은 USRP를 이용하여 사용자가 지정한 대역의 주파수 이용 상황을 확인하는 파이썬 기반 프로그램인 `usrp_spectrum_sense.py`를 수정하여 구현하였다.

그림 5는 `usrp_spectrum_sense.py`를 GNU-Radio 블록구조로 나타낸 것이다.

`usrp_source`는 사용자가 지정한 대역에서 샘플들을 읽고, 이를 스트림 형식으로 쓴다. `s2v`는 스트림 형식을 벡터 형식으로 바꾸며, `ffter`는 벡터 형식의 샘플에 `fft`를 적용한다. `c2mag`는 각 주파수 성분 값을 제공해주어 결과를 분석할 수 있도록 해주고, 이를 `stats` 블록에 넘긴다. `stats` 블록함수는 메시지 큐를 인자로 받아, 이에 `c2mag`의 결과를 집어넣는다. `usrp_spectrum_sense.py`는 메시지 큐로부터 `c2mag`의 결과를 얻어 특정 대역의 센싱 결과를 출력한다.

기존 `usrp_spectrum_sense.py`는 센싱하는 최소 주

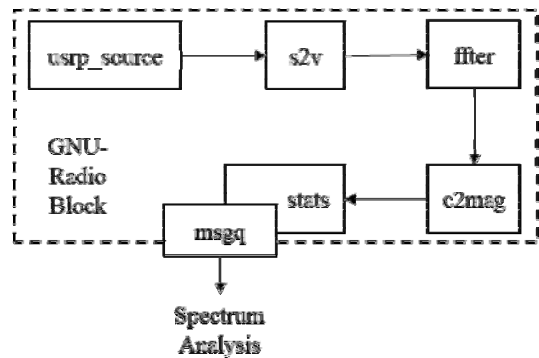


그림 5. SU 시스템의 GNU-Radio 블록구조
Fig. 5. GNU-Radio block structure of the SU system

파수와 최대 주파수를 사용자로부터 입력받아 sample rate 만큼의 대역을 dwell_delay에 해당하는 시간동안 센싱하고, tune_delay에 해당하는 시간동안 센싱하는 대역을 변경하는 과정을 반복한다. 그러나, 본 논문에서는 SU 시스템의 성능을 보장하는 최소 센싱 시간을 산출한다. 따라서, 센싱하는 대역의 중심 주파수를 입력받아 sample rate 만큼의 대역을 센싱하고, 센싱 결과가 stats 블록의 메시지 큐에 도착한 여부를 확인하여 PU의 활동여부를 판단한다.

PU의 활동 여부를 판단하기 위해, SU 시스템은 USRP가 센싱한 대역을 샘플 수만큼의 fft bin으로 나누어 각 bin에서의 신호 세기가 임계값을 넘는지 확인한다. 이때, 신호 세기가 임계값을 넘는 fft bin이 하나라도 존재할 경우 SU 시스템은 PU가 활동하는 것으로 판단하며, PU 시스템이 발생시키지 않는 모든 신호 세기의 합을 의미하는 noise floor는 0dB로 고정하였다.

IV. 실험결과

실험을 위하여 USRP는 N210 모델을 사용하였다. 명령을 전달하기 위한 소프트웨어 플랫폼으로는 GNU-Radio^[13]를 사용하였다. 호스트는 Intel Core i7-3770@3.4GHz의 프로세서를 가진 데스크톱에 설치된 리눅스 기반의 가상머신이다. 가상머신의 메모리는 2 기가바이트, 프로세서 개수는 1개이다.

USRP와 GNU-Radio에서는 파라미터로써 센싱 시간을 이용하지 않고, 센싱 시간이 상황에 따라 조금씩 변화하는 모습을 보인다. 따라서, USRP의 sample rate와 SU 시스템이 주파수 성분 분석을 위해 한 번에 처리하는 샘플의 수를 변화시키면서 USRP의 평균 센싱 시간과 SU 시스템의 Pd를 측정하는 실험을 수행하였다. 보다 자세한 실험 방법 및 결과는 다음의 각 절에서 설명한다.

4.1 센싱 성공률을 보장하는 최소 센싱 시간 측정

본 절에서는 USRP 기반 CR 테스트베드에서 센싱 성공률을 보장하는 최소 센싱 시간을 산출하기 위한 실험 결과를 보인다. 표 1은 최소 센싱 시간 측정을 위한 실험 파라미터를 보인다. PU의 이산단위시간은 1초로 설정하였고, 총 실험 시간은 1분이다. PU 시스템과 SU 시스템의 sample rate는 각 실험마다 동일하게 설정하였으며, 각각 0.5MSps, 1MSps, 2MSps이다. PU 시스템이 ON 상태일 때, 특정 시간에 SU 시스템에서 측정하는 신호의 최대 세기는 -40dB에서 -

표 1. 최소 센싱 시간 측정을 위한 실험 파라미터
Table 1. Experimental parameters for measuring the minimum sensing time

Parameter	Value		
Center frequency (MHz)	433.5		
FFT threshold (dB)	-80		
Discrete time unit (ms)	1000		
Total experiment time (secs)	60		
Sample rate of PU/SU (MSps)	0.5	1	2
	32	64	128
The number of samples	256	512	1024

60dB까지이다. 또한, PU 시스템이 OFF 상태일 때, 특정 시간에 SU 시스템에서 측정하는 신호의 최대 세기는 -100dB이다. 따라서, SU 시스템의 FFT threshold는 -60dB와 -100dB의 평균값인 -80dB로 설정하였다. SU 시스템이 한 번에 처리하는 샘플의 수는 32개부터 1024개까지 2배씩 증가시키면서 실험을 수행하였다.

그림 6은 PU 및 SU의 sample rate와 SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수에 따른 평균 센싱 시간을 나타낸다. 평균 센싱 시간은 SU 시스템이 매번 센싱 결과와 해당 시간을 출력하도록 해서, 각 시간 사이의 차이를 평균계산해서 구했다. 실험결과를 확인했을 때, USRP의 sample rate를 1MSps 또는 2MSps로, SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수를 32개에서 256개로 설정하면 평균 센싱 시간이 1ms 이하가 됨을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 각각 PU가 활동할 때, 그리고 활동하지 않을 때 PU 및 SU의 sample rate와 SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수에 따른 detection probability를 나타낸다. 그림 7을 보면, PU가 활동할

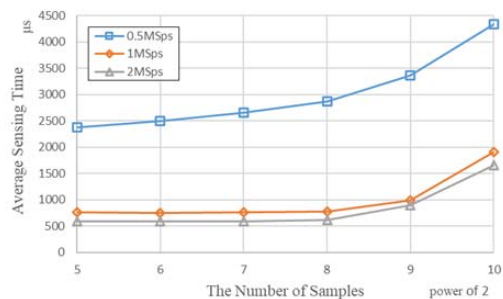


그림 6. Sample rate와 처리하는 sample의 수에 따른 평균 센싱 시간
Fig. 6. Average sensing time according to the sample rate and the number of samples processed

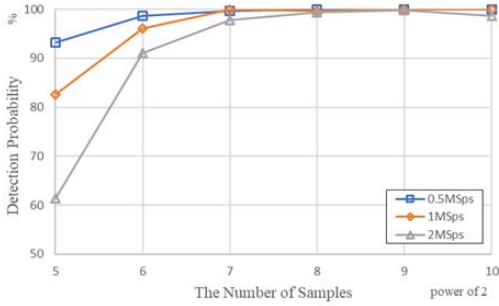


그림 7. PU의 상태가 항상 ON일 때, sample rate와 처리하는 sample의 수에 따른 SU의 detection probability
Fig. 7. When state of the PU is always ON, the detection probability of the SU according to the sample rate and the number of samples processed

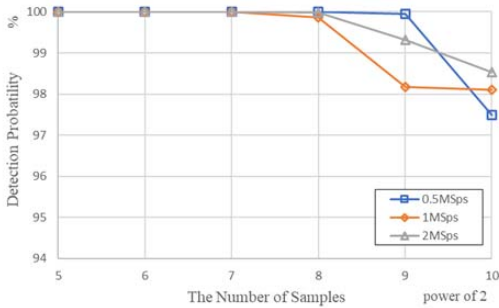


그림 8. PU의 상태가 항상 OFF일 때, sample rate와 처리하는 sample의 수에 따른 SU의 detection probability
Fig. 8. When state of the PU is always OFF, the detection probability of the SU according to the sample rate and the number of samples processed

때의 detection probability는 sample rate가 0.5MSps 또는 1MSps이고, SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수가 128개 이상일 때 가장 높음을 알 수 있다. 또한, 그림 8을 보면, PU가 활동하지 않을 때의 detection probability는 모든 sample rate에 대해 샘플의 수가 256개 이하일 때 가장 높음을 알 수 있다.

본 절의 실험 결과를 종합했을 때, USRP 기반의 테스트베드에서 PU 및 SU 시스템은 sample rate를 1MSps로 설정하고, SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수는 128개 또는 256개로 설정하는 것이 detection probability를 보장하면서 센싱 시간을 최소로 할 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2 PU 활동에 따른 센싱 성공률 측정

본 절에서는 CR 테스트베드의 센싱 시간을 최소로 만들기 위한 파라미터를 적용하여 실험한 결과를 보인다.

실험 파라미터는 표 2에 나타낸다. SU가 한 번에

표 2. PU 활동에 따른 탐지확률 측정을 위한 실험 파라미터
Table 2. Experimental parameters for measuring detection probability according to the activity of the PU

Parameter	Value
Center frequency (MHz)	433.5
FFT threshold (dB)	-80
Discrete time unit (ms)	1000
Total experiment time (secs)	60
Sample rate of PU/SU (MSps)	1MSps
Activity model of the PU (α, β)	$\alpha=0.3, \beta=0.7$ $\alpha=0.5, \beta=0.5$ $\alpha=0.7, \beta=0.3$
Discrete	10 30 50 100
	300 500 1000

처리하는 샘플의 수는 128개와 256개중 이론적으로 적은 센싱 시간을 나타내는 128개로 설정하였으며, PU의 활동 모델은 2-상태 마르코프 연쇄 기반 PU 채널 모델에^[12] 적용한 파라미터를 나타낸다. PU의 시간 단위는 10ms부터 1000ms까지 적용하였다.

그림 9는 PU의 활동모델과 시간단위에 따른 SU의 detection probability를 나타낸다. PU의 시간단위가 상대적으로 긴 경우, detection probability는 모두 100%에 가깝다. 하지만, PU의 시간단위가 짧은 경우, PU가 활동하지 않을 확률이 클수록 높은 detection probability를 보임을 확인할 수 있다. 이유는 그림 6과 그림 7을 보면 확인할 수 있다. PU가 활동할 경우, sample rate가 1MSps일 때의 Pd가 약 80% 이상이지만, PU가 활동하지 않을 경우, sample rate가 1MSps일 때의 Pd가 약 98% 이상이기 때문에, α 가 작고, β 가 클수록 PU 시스템이 OFF-상태에 있을 확률이 높아져서 탐지확률이 높다.

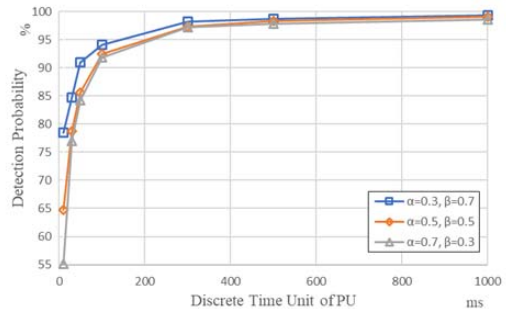


그림 9. PU의 활동모델과 이산단위시간에 따른 SU의 detection probability
Fig. 9. The detection probability of the SU according to the activity model and the discrete time unit of the PU

V. 결 론

본 논문에서는 PU 시스템 및 SU 시스템으로 구성되는 CR 테스트베드를 이용하여 SU의 성능을 보장하기 위한 USRP의 센싱 시간 한계를 측정하였다. GNU-Radio에서는 파라미터로서 센싱 시간을 이용하지 않기 때문에, USRP의 sample rate와 SU가 한 번에 처리하는 샘플의 수를 조정하면서 평균 센싱 시간 및 detection probability를 측정하였다. 실험결과, sample rate가 1MSps이고 샘플의 수가 128개 또는 256개일 때 USRP가 최소 센싱 시간을 가지게 된다. 또한, 본 논문에서는 실험을 통해 산출된 SU 시스템이 최소 센싱 시간을 갖도록 하는 파라미터를 적용하여, PU 시스템의 2-상태 마르코프 모델 파라미터와 이산단위시간에 따른 SU 시스템의 detection ratio를 보였다.

본 논문을 통해 산출된 SU의 성능을 보장하는 USRP의 최소 센싱 시간은 향후 진행될 CR 관련 연구에서 실제계를 위한 센싱 시간 산정을 위한 파라미터 설정에 명확한 기준을 제시할 수 있다.

References

- [1] A. Khandakar, A. Mohammed, and A. E. Sherif, "Experimental threshold determination for secondary users using USRP and GNU-Radio," *DICTAP'15*, pp. 62-68, Bangkok, Thailand, May 2014.
- [2] D. Malafaia, J. Vieira, and A. Tomé, "Adaptive threshold spectrum sensing based on expectation maximization algorithm," *Physical Commun.*, vol. 21, pp. 60-69, Dec. 2016.
- [3] I. Sobron, I. Eizmendi, W. A. Martins, P. S. R. Diniz, J. L. Ordiales, and M. Velez, "Implementation issues of adaptive energy detection in heterogeneous wireless networks," *Sensors*, vol. 17, no. 4, Jun. 2017.
- [4] A. A. Tabassam, F. A. Ali, S. Kalsait, and M. U. Suleman, "Building software-defined radios in MATLAB simulink - A step towards cognitive radios," *ICCMS'11*, pp. 492-497, Mumbai, India, Apr. 2011.
- [5] R. A. Rashid, M. A. Sarijari, N. Fisal, S. K. S. Yusof, N. H. Mahalin, and A. C. C. Lo, "Spectrum sensing measurement using GNU radio and USRP software radio platform," *ICWMC'11*, pp. 237-242, Luxembourg, Jun. 2011.
- [6] L. Bondan, M. A. Marotta, M. Kist, L. R. Faganello, C. B. Both, J. Rochol, and L. Z. Granville, "Kitsune: A management system for cognitive radio networks based on spectrum sensing," *NOMS'14*, Krakow, Poland, May 2014.
- [7] D. B. Rawat, C. Bajracharya, and S. Grant, "nROAR: Near real-time opportunistic spectrum access and management in cloud-based database-driven cognitive radio networks," *IEEE Trans. Netw. and Serv. Management*, vol. 14, no. 3, pp. 745-755, Jul. 2017.
- [8] A. Jain, V. Sharma, and B. Amrutur, "Soft real time implementation of a cognitive radio testbed for frequency hopping primary satisfying QoS requirements," *NCC'14*, Kanpur, India, Mar. 2014.
- [9] P. Wang, J. Ansari, M. Petrova, and P. Mähönen, "CogMAC+: A decentralized MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive wireless networks," *Computer Commun.*, vol. 79, pp. 22-36, 2016.
- [10] C. J. Loubser and T. G. Swart, "Cognitive radio DAB MAC protocol performance using a CR specific simulator and software defined radio," *AFRICON'17*, pp. 139-144, Cape Town, Republic of South Africa, Sep. 2017.
- [11] National Instruments, "What is NI USRP Hardware?," Retrieved Jul., 18, 2018, from <http://www.ni.com/white-paper/12985/en/>
- [12] B. S. Kim, G. M. Lee, B. H. Roh, G. K. Choi, and I. H. Oh, "Resource allocation and control system for VoIP provision in cognitive radio networks," *KIISE Trans. Comput. Practices*, vol. 20, no. 12, pp. 688-693, Nov. 2014.
- [13] GNU Radio, "GNU Radio," Retrieved Jul., 18, 2018, from <https://wiki.gnuradio.org/>

이 철 웅 (Cheol-woong Lee)



2015년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 졸업
2017년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
2017년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 바이오 네트워킹, 모바일 임베디드시스템, 사물인터넷, 국방전술통신

오 지 명 (Jimyeong Oh)



1997년 2월 : 고려대학교 전과공학과 졸업
1999년 2월 : 고려대학교 전과공학과 석사
2004년 10월~2009년 6월 : 포스텍 이타 책임연구원
2009년 7월~현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> 통신공학, 무선이동통신, 국방전술통신, SDR 모델

이 규 민 (Gyu-min Lee)



2014년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 졸업
2016년 2월 : 아주대학교 컴퓨터공학과 석사
2016년 3월~현재 : 아주대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 인지무선네트워크, 임베디드시스템, 사물인터넷, 전술통신네트워크

강 성 진 (Sungjin Kang)



2000년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과 졸업
2002년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학 석사
2009년 7월~현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> 이동통신, 무선통신, 국방전술통신, SDR 모델

노 병 희 (Byeong-hee Roh)



1998년 2월 : KAIST 전자공학과 박사
1989년 3월~1994년 2월 : KT 연구원
1998년 2월~2000년 2월 : 삼성 전자 연구원
2014년 3월~2015년 2월 : ADD 객원연구원

2000년 3월~현재 : 아주대학교 교수

<관심분야> 이동멀티미디어통신, 사물인터넷, 국방전술통신네트워크, 네트워크보안

김 도 경 (Do-kyung Kim)



1996년 2월 : 항공대학교 통신정보공학과 졸업
2016년 2월 : 고려대학교 국방기술경영 석사
2009년 6월~현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야> 통신공학, 무선이동통신, 국방전술통신