

IEEE 802.22 WRAN에서 Bussgang 정리를 이용한 스펙트럼 센싱

정희원 황 성 수*, 종신회원 김 석 찬*^o

Spectrum Sensing using Bussgang Theorem for IEEE 802.22 WRAN

Sung Sue Hwang* *Regular Member*, Suk Chan Kim** *Lifelong Member*

요 약

최근 무선 통신 시스템에서 제한된 스펙트럼 자원의 효율적 활용은 많은 사람들의 관심이 집중된 분야이다. 무선 인지 기술은 비어 있는 주파수 대역을 찾고 활용하는 기술로 스펙트럼의 효율적 사용을 가능하게 한다. 특히 무선 인지 기술에서 기존 사용자의 신호를 검출하는 센싱 기술은 가장 핵심적인 기술이라고 할 수 있다. 이 논문은 Bussgang 정리를 이용한 스펙트럼 센싱 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 수신 신호에 Bussgang 정리를 적용하여 신호와 가우시안 잡음 사이의 통계적 특성 차이를 계산하고 이를 바탕으로 신호의 존재 여부를 판단한다. 이 방법은 잡음 파워 추정 없이 잡음 불확실성의 영향을 받지 않고, 아주 낮은 SNR (signal-to-noise power ratio)에서도 신호를 검출 할 수 있다. IEEE 802.22 WRAN (wireless regional area network)을 기반으로 12개의 ATSC (advanced television systems committee) A/74 DTV(Digital Television) 신호를 이용한 모의실험으로 제안한 방법의 성능을 평가하고, 제안한 방법의 이론적인 문턱값을 분석한다.

Key Words : spectrum sensing, cognitive radio, Bussgang theorem, WRAN, ATSC DTV

ABSTRACT

Utilization problem of the limited spectrum is the one of the most important issues in wireless communication systems. Cognitive radio technique which is finding and utilizing frequency holes is also one of those techniques. Specially, the spectrum sensing technique to detect the primary user signal is a core technology in cognitive radio area. In this paper, we propose the spectrum sensing algorithm using Bussgang theorem. The proposed algorithm calculates the statistical difference between the Gaussian noise and the primary user signal by applying Bussgang theorem to the received signal. The algorithm is not affected by noise uncertainty and can detect the primary user signal in the very low SNR environment. We evaluate the algorithm through computer simulations with 12 ATSC A/74 DTV signal captures based on IEEE 802.22 WRAN and formulate the sensing threshold for the proposed scheme.

1. 서 론

대부분의 사용 가능한 스펙트럼은 이미 기존 시

스템들에게 할당 되어 있다. 그러나 할당된 스펙트럼들이 실제로 효율적으로 사용되고 있지는 않다. 이와 관련한 FCC (federal communication commission)

※ 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

* 부산대학교 전자전기공학과 통신시스템 연구실(hss@pusan.ac.kr), (sckim@pusan.ac.kr) (° : 교신저자)
논문번호 : #KICS2009-06-238, 접수일자 : 2009년 6월 3일, 최종논문접수일자 : 2009년 8월 19일

의 보고서를 통해 할당된 스펙트럼의 사용률이 시간이나 지역에 따라서 15%에서 85%까지 변한다는 사실을 알 수 있다^[1]. 이에 IEEE는 2004년에 CR (cognitive radio)^[2]기반의 WRAN (wireless regional area network) 국제 표준 제정을 위해 802.22 WRAN WG (working group)을 설립했다.

WRAN 시스템의 기본적인 개념은 먼저 기존 사용자 (PU, primary user) 신호를 검출하고, 사용되고 있지 않는 채널 (idle channel)을 찾고, 이 채널을 광대역 무선 통신에 활용하는 것이다. 이 과정에서 PU 신호 검출을 위한 스펙트럼 센싱 기술은 WRAN 시스템의 가장 기본적이면서 중요한 요소이다. 이렇듯 중요한 센싱 기술을 평가하기 위해서 WRAN WG은 Sensing Tiger Team을 구성했으며, 이들은 제안된 센싱 방법들의 센싱 성능, 센싱 시간, 복잡도 등을 고려하여 센싱 방법들을 평가, 분류한다.

존에 WRAN에 제안된 센싱 기법에는 energy detection^[3], cyclostationary detection^[4], covariance based detection^[5], maximum minimum eigenvalue detection^[6], signature based detection^[7] 등이 있으며, 각각의 방법들은 서로 다른 장단점을 가지고 있다. energy detection은 신호에 대한 사전 지식이 필요 없고 단순하다는 장점이 있으나, 낮은 SNR에서 신호를 검출하지 못한다. 또한 기계적인 오차 및 온도 변화 등 여러 가지 문제로 발생한 잡음 에너지 추정 오차 (noise uncertainty)가 센싱 성능의 한계를 만든다^[8]. cyclostationary detection은 낮은 SNR에서 높은 센싱 성능을 보이지만, 역시 잡음 에너지 추정 오차로 인한 성능 저하가 있다. 수신 샘플의 공분산 행렬을 이용하는 covariance based detection과 공분산 행렬의 최대 고유값과 최소 고유값을 이용하는 maximum minimum eigenvalue detection은 잡음 에너지 추정 오차의 영향을 받지 않으나, 낮은 SNR에서 신호의 특성 보다 채널 특성이 센싱 성능을 결정하며 센싱 성능이 높지 않다. ATSC DTV 신호의 동기신호가 가지는 상관을 이용한 signature based detection은 DTV 신호를 구별할 수 있다는 장점이 있으나 반복적인 상호 상관을 계산하여 계산량이 많고, 낮은 SNR에서 센싱 성능이 낮다.

이 논문에서 우리는 Bussgang 정리를 이용한 스펙트럼 센싱 방법을 제안 한다. 제안하는 센싱 방법은 Bussgang 정리를 이용하여 가우시안 잡음과 PU 신호 사이의 통계적 특성 차이를 계산한다. 제안하는 방법은 앞서 설명한 방법들과 달리 잡음 에너지

추정 오차의 영향을 받지 않으며 낮은 SNR에서도 높은 검출 성능을 보인다.

II. 센싱 시스템 모델

스펙트럼 센싱의 목적은 수신 신호 바탕으로 두 가지 가정 (H_0, H_1)을 구별하는 것이다. M 개의 안테나를 가진 단일 센서가 있는 경우를 가정할 때 i 번째 안테나를 통해 수신된 수신 신호 $r_i[n]$ 는 아래와 같다.

$$H_0 : r_i[n] = w_i[n] \tag{1}$$

$$H_1 : r_i[n] = s[n] * h_i[n] + w_i[n] \tag{2}$$

여기서 $s[n]$ 은 PU로부터 전송된 신호, $h_i[n]$ 은 PU로부터 i 번째 안테나까지의 채널 임펄스 응답, $w_i[n]$ 은 가산성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN)이다. ($i=1,2,\dots,M$) 식 (1)의 가정 H_0 는 PU 신호가 존재하는 않는 경우를 의미한다. 그러므로 $r_i[n]$ 에는 오직 가우시안 잡음만이 존재한다. 반면 식 (2)의 가정 H_1 은 검출 대상이 되는 $s[n]$ 이 존재하는 상황을 의미한다.

센싱 기법의 성능 기준에는 P_{MD} (probability of missed detection)와 P_{FA} (probability of false alarm)가 있다. P_{MD} 는 가정 H_1 에서 센싱 알고리즘이 PU 신호를 검출하지 못하는 확률이고, P_{FA} 는 가정 H_0 에서 PU 신호가 존재한다고 판단할 확률이다. 좋은 센싱 기법은 낮은 P_{MD} 와 P_{FA} 를 동시에 필요로 하지만 일반적으로 두 가지를 동시에 달성하기는 어렵다.

III. Bussgang 정리를 이용한 스펙트럼 센싱

Bussgang 정리[9]는 real gaussian stationary process가 비메모리 비선형 함수를 통과할 때에 입력과 출력의 상호 상관이 입력의 자기 상관과 비례한다는 것이다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$K_g = \frac{E\{x[n] \cdot g(x[n+k])\}}{E\{x[n] \cdot x[n+k]\}} \tag{3}$$

여기서 $x[n]$ 은 real gaussian stationary process이고, $g(x)$ 는 비메모리 비선형 함수이고, K_g 는 비례상수이다. 만일 입력 $x[n]$ 의 평균이 0이고, 분산이 1일 경우에 이론적인 비례상수 K_g 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

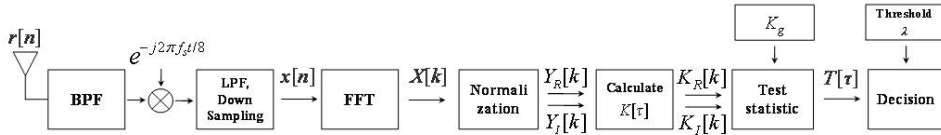


그림 1. IEEE 802.22 WRAN에서 Bussgang 정리를 이용한 스펙트럼 센싱 블록도

$$K_g = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot g(x) e^{-x^2/2} dx \quad (4)$$

$$K_i[0] = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{r}_i[n] \cdot g(\bar{r}_i[n]) \quad (7)$$

여기서 이론적인 비례상수 K_g 는 단지 사용된 $g(x)$ 에 의해서 결정된다. 만일 gaussian stationary process가 아닌 검출 대상 신호가 수신 신호 내에 존재한다면, 계산된 샘플 비례 상수와 이론적인 비례상수 K_g 는 차이가 있게 된다. 이러한 차이를 이용하여 우리는 PU 신호의 존재 여부를 판단 할 수 있다. 수신기 i 에서의 샘플 비례상수 $K_i[\tau]$ 는 식 (5)와 같이 정의한다.

$$K_i[\tau] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \bar{r}_i[n] \cdot g(\bar{r}_i[n+\tau])}{\sum_{n=0}^{N-1} \bar{r}_i[n] \cdot \bar{r}_i[n+\tau]} \quad (5)$$

여기서 $\bar{r}_i[n]$ 은 $r_i[n]$ 을 평균이 0, 분산이 1로 정규화한 신호, τ 는 시간 지연($-N, \dots, N$), N 은 수신 신호의 샘플 수이다. 신호 존재 여부를 판단하기 위한 검정 통계량은 식 (6)과 같이 정의 한다.

$$T[\tau] = \sum_{i=0}^{M-1} (K_i[\tau] - K_g)^2 \quad (6)$$

이렇게 계산한 $T[\tau]$ 가 미리 결정된 문턱값 λ 보다 큰 경우에 PU 신호가 존재하는 것으로 판단하고, $T[\tau]$ 가 λ 보다 작은 경우에 PU 신호가 없는 것으로 판단 한다.

문턱값 λ 는 시스템에서 요구되는 P_{FA} 에 맞추어 결정할 수 있다. 먼저 H_0 에서 수신 신호는 가우시안 잡음만이 존재한다. $\tau = 0$ 를 사용할 경우에 $K_i[0]$ 의 분포는 수신 신호의 분산을 나타내므로 $N \gg 1$ 일 때, $\sum_{n=0}^{N-1} \bar{r}_i[n]^2 \approx 1$ 라 가정할 수 있다. 이때 $K_i[0]$ 는 아래식과 같이 수신 신호와 비메모리 비선형 함수 출력의 상호 상관과 같다.

여기서 잡음만이 존재하는 수신신호는 각 샘플이 독립 가우시안 확률 변수이고 왜곡된 신호와의 곱 또한 각각 독립이므로, $K_i[0]$ 는 중심극한정리 (Central Limit Theorem, CLT)에 근거하여 평균이 K_g 이고 분산이 σ_g^2 인 가우시안 분포를 따른다.

$T[0]$ 는 M 차 카이제곱 분포를 따른다. $T[0]$ 의 누적 분포함수는 아래 식(8)과 같다.

$$F_T(y) = \int_0^y \frac{1}{2^{M/2} \sigma_g^M \cdot \Gamma(M/2)} u^{M/2-1} e^{-u/2\sigma_g^2} du \quad (8)$$

여기서 $\Gamma(x)$ 는 gamma 함수이다. 누적 도수함수에 P_{FA} 와 λ 를 대입한 관계식은 $F_T(\lambda) = 1 - P_{FA}$ 이다. 최종적으로 문턱값은 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$\lambda = F_T^{-1}(1 - P_{FA}) \quad (9)$$

문턱값은 P_{FA} 와 분산 σ_g^2 의 함수이며, σ_g^2 는 비메모리 비선형 함수에 의해서 결정된다.

표 1. ATSC DTV Captured Data Files

ATSC DTV Captured Data File	legend
WAS_68_36_05232000_ref	
WAS_86_48_07122000_ref	
WAS_51_35_05242000_REF	
WAS_49_39_06142000_opt	
WAS_32_48_06012000_OPT	
WAS_3_27_06022000_REF	
WAS_47_48_06132000_opt	
WAS_311_48_06052000_ref	
WAS_311_35_06052000_ref	
WAS_06_34_06092000_ref	
WAS_49_34_06142000_opt	
WAS_311_36_06052000_ref	
Average over 12 DTV files	

IV. IEEE 802.22 WRAN에서 스펙트럼 센싱

WRAN의 PU 신호에는 ATSC DTV 신호와 무선 마이크 신호가 있다. 이 논문에서는 제안한 센싱 방법으로 ATSC DTV 신호 검출만을 다룬다. ATSC DTV 신호는 8VSB (vestigial sideband modulation) 변조를 사용하고 샘플링 주파수 f_s 는 21.5244MHz이고, 주파수 파일렛은 2.69MHz에 존재한다. ATSC DTV 신호는 시간축, 주파수축에서 가우시안 분포를 따르므로 III에서 제안한 방법을 그대로 적용할 수 없다. 그러나 파일렛이 있는 대역만을 필터링한 신호는 주파수축에서는 가우시안 분포를 따르지 않으므로, 이 특성을 이용해서 ATSC DTV 신호를 센싱 할 수 있다.

그림 1은 단일 수신기를 가진 단일 센서가 존재할 경우에 제안한 스펙트럼 센싱 방법의 블록도를 나타낸다. 수신 신호를 대역폭 6MHz의 IF (intermedia frequency) 대역 필터링을 하고, DTV 주파수 파일렛이 기저대역에 오도록 한다. 파일렛 필터링을 위해 대역폭 $BW = N_{FFT} / TZ$ 를 가지는 기저 대역 필터를 통과 시킨다. 여기서 N_{FFT} 는 이산 푸리에 변환의 크기를 의미하고, T 는 센싱 단위 시간 5ms, Z 는 센싱 시간 계수를 의미한다. 예를 들어 Z 가 1,2,3,...일 때, 센싱 시간 TZ 는 5, 10, 15,...ms로 늘어난다. 파일렛 필터의 출력 신호를 다운 샘플링 인자 $\text{floor}(f_s / BW)$ 로 다운 샘플링하고 이산 푸리에 변환하여 주파수 신호 $X[k]$ 로 변환한다. 만일 H_0 의 경우에 다운 샘플링 이후의 신호 $x[n]$ 은 화이트 가우시안 신호이므로, $x[n]$ 을 이산 푸리에 변환한 $X[k]$ 도 역시 화이트 가우시안 신호이다. 그러나 H_1 에서는 파일렛 톤의 영향으로 $X[k]$ 가 화이트 가우시안 분포를 따르지 않는다.

다음으로 주파수 신호 $X[k]$ 를 실수와 허수로 나누고, 각각 평균이 0, 분산이 1이 되도록 식 (10)과

같이 정규화한다.

$$Y_R = \frac{X_R[k] - \widehat{m}_R}{\widehat{\sigma}_R}, Y_I = \frac{X_I[k] - \widehat{m}_I}{\widehat{\sigma}_I} \quad (10)$$

여기서 $X_R[k], X_I[k]$ 는 각각 $X[k]$ 의 실수부와 허수부이고, $\widehat{m}_R, \widehat{m}_I$ 와 $\widehat{\sigma}_R, \widehat{\sigma}_I$ 는 각각 $X_R[k], X_I[k]$ 의 추정 평균, 추정 표준편차이다. 다음으로 $Y_R[k], Y_I[k]$ 를 이용하여 비례 상수 $K_R[\tau], K_I[\tau]$ 를 각각 식(5)를 이용하여 계산한다. 마지막으로 검정통계량 $T[\tau]$ 는 식 (11)과 같이 정의 한다.

$$T[\tau] = (K_R[\tau] - K_y)^2 + (K_I[\tau] - K_y)^2 \quad (11)$$

$\tau = 0$ 인 경우 이론적인 문턱값 분석을 위해 검정통계 $T[0]$ 의 누적분포함수가 요구된다. 검정 통계량 $T[0]$ 는 평균이 0인 두개의 가우시안 확률 변수의 제곱의 합이다. 따라서 $T[0]$ 는 2차 카이제곱 분포를 따른다. $T[0]$ 의 누적분포함수는 아래와 같다.

$$F_T(x) = 1 - e^{-x/2\sigma_y^2} \quad (12)$$

여기서 σ_y^2 는 $K_R[0], K_I[0]$ 의 분산이고, sum-process의 특징을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 최종적으로 얻은 문턱값은 아래 식(13)과 같다.

$$\lambda = -2\sigma_y^2 \cdot \ln(P_{FA}) \quad (13)$$

문턱값은 σ_y^2 와 P_{FA} 에 의해 결정되며, 센싱 시간과 잡음의 분산은 관련이 없다.

V. 모의 실험

모의실험을 통해서 제안한 센싱 방법의 ATSC DTV 신호 센싱 성능을 평가하고, WRAN에 제안된 방식 중에 비교적 성능이 좋은 MME (the maximum minimum eigenvalue detection) 방법과 비교한다. DTV 신호의 초기 신호 처리 과정은 [11]을 따르고, [12]의 센싱 과정과 센싱 시나리오 2를 바탕으로 모의실험을 진행 하였다. 표 1은 성능 평가에 사용한 12개 ATSC DTV 파일과 그림 5의 레전드를 나타내고, 사용한 파라미터는 표 2와 같다.

그림 2, 3, 4는 센싱 시간 5ms, 10ms, 20ms에서

표 2. ATSC DTV Captured Data Files

Parameters	value
Number of FFT (N_{FFT})	2048
Time Delay (τ)	0
Sampling Frequency (f_s)	21.5244MHz
Sensing Time (TZ)	5, 10, 20ms
Lowpass Filter Bandwidth(BW)	N_{FFT} / TZ
Probability of false alarm(P_{FA})	10%

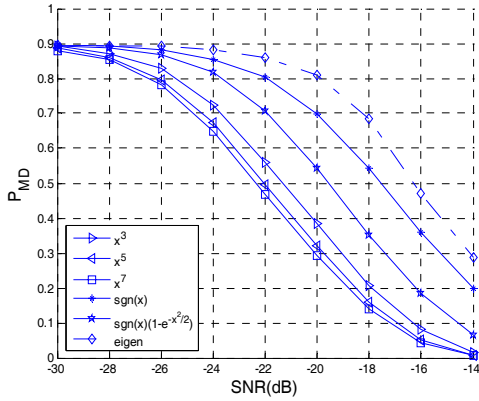


그림 2. 평균 센싱 성능 (5ms)

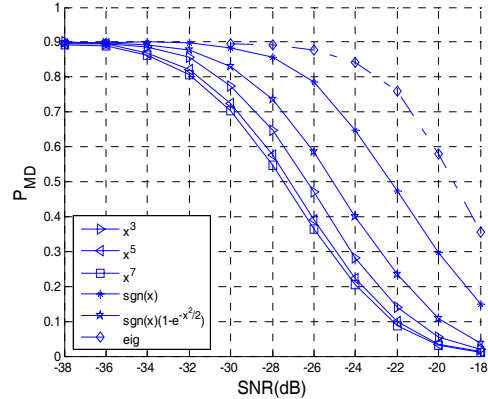


그림 4. 평균 센싱 성능 (20ms)

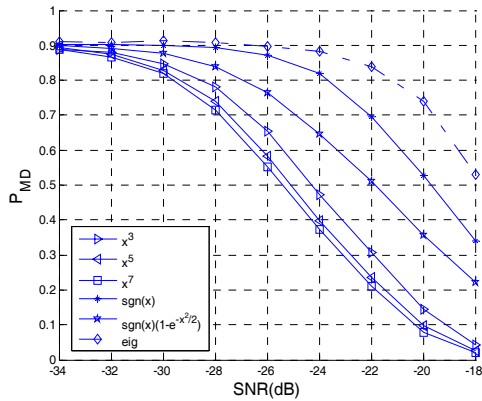


그림 3. 평균 센싱 성능 (10ms)

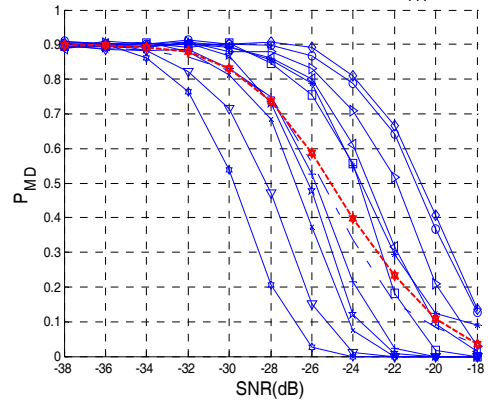


그림 5. 12 DTV 파일의 센싱 성능
g(x)=sgn(x){1-exp(-x²/2)}(5ms)

제안한 방법과 MME 방식의 12 ATSC DTV 신호에서 평균 센싱 성능을 보여준다. MME에서 공분산 행렬의 크기는 10x10을 사용했다. 제안한 센싱 방법은 센싱 시간 5ms, 10ms, 20ms에서 $P_{MD} = 0.1$ 을 달성하는데 각각 SNR = -17, -20, -22dB가 필요하며 MME 방법에 비해 필요한 SNR이 상당히 낮다. 센싱 시간이 길어지면 파일럿의 선명도가 좋아지고 파일럿 필터의 SNR이 높아지므로 센싱 시간이 길수록 센싱 성능이 향상된다. 또한 비메모리 비선형 함수에 따라서 다른 성능을 보이고, 특히 높은 차수의 지수 함수를 사용한 경우에 좋은 성능을 보인다. 그러나 알고리즘의 계산량이 $g(x)$ 에 의해서 결정되므로 필요한 센싱 성능과 계산량을 고려하여 선택해야 한다.

그림 5는 $g(x)=\text{sgn}(x)\{1-\exp(-x^2/2)\}$ 일 때, 12 DTV 파일들 각각의 센싱 성능을 나타낸다. 각 파일에서 DTV 신호가 겪은 무선 채널이 다르고 파일럿의 크

기 및 주파수 옵셋이 다르므로 상당한 센싱 성능 차이를 보인다.

VI. 결론

이 논문은 IEEE 802.22 WRAN에서 Bussgang 정리를 이용한 센싱 방법을 제안하고 문턱값을 이론적으로 분석한다. 제안한 방법은 수신신호에 Bussgang 정리를 적용하여 센싱 대상 신호와 가우시안 잡음의 통계적 특성 차이를 계산한다. 그리고 이 차이를 이용하여 수신신호에서 대산 신호의 존재 여부를 판단한다. ATSC DTV 신호는 시간축에서 가우시안 특성을 가지므로 주파수축에서 센싱되어야 한다. 제안한 방법은 센싱 시간 5, 10, 20ms에서 $P_{FA}=0.1$, $P_{MD}=0.1$ 를 SNR=-17, -20, -22dB를 달성 할 수 있다. 사용하는 $g(x)$ 가 센싱 성능과 복잡도를 결정하므로 필요한 센싱 성능을 고려하여 사용되어야 한

다. 기존의 센싱 방법들이 잡음 불확실성의 영향을 받는 것에 반해 제안한 방법은 영향을 받지 않는다.

참 고 문 헌

[1] FCC, *Spectrum Policy Task Force Report*, ET Docket No. 02-155, Nov. 2002.

[2] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," *Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden*, May 2000.

[3] S. Shellhammer, "Text on energy detector," *IEEE 802.22-07/0264r2*, Jun. 2007.

[4] Hou-Shin Chen, Wen Gao and David G.Daut, "Spectrum sensing using cyclostationary properties and application to IEEE 80.22 WRAN," in *Proc. GLOBECOM '07*, pp. 3133-3138, Nov. 2007.

[5] Y. Zeng and Y. Liang, "Covariance based signal detections for cognitive radio," in *Proc. IEEE DySpan'07*, pp. 202-207, Apr. 2007.

[6] Y. Zeng and Y. Liang, "Maximum-minimum eigenvalue detection for cognitive radio," in *Proc. IEEE PIMRC '07*, pp. 1-5, Sept. 2007.

[7] H.-S. Chen, W. Gao and D. G. Daut, "Signature based spectrum sensing algorithms for IEEE 802.22 WRAN," *IEEE ICC*, pp.6487-6492, Jun. 2007.

[8] S. Shellhammer and R. Tandra, "Performance of the power detector with noise uncertainty," *IEEE 802.22-06/0134r0*, Jul. 2006.

[9] J.J. Bussgang, "Cross-correlation function of amplitude-distorted gaussian signals", *Res. Lab. Elec., Mas. Inst. Technol., Cambridge MA, Tech. Rep.* 216, Mar. 1952.

[10] G. Giunta, G. Jacovitti, and G. Scarano, "Bussgang non-gaussianity test for stationary series" in *Proc. IEEE Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics*, pp.21-23, Jul. 1997.

[11] S. Mathur, R. Tandra, S. Shellhammer and M. Ghosh, "Initial signal processing of captured DTV Signals for Evaluation of Detection Algorithms," *IEEE 802.22-06/0158r5*, Sept. 2006.

[12] S. Shellhammer, V. Tawil, G. Chouinard, M. Muterspaugh and M. Ghosh, "Spectrum Sensing Simulation Model," *IEEE 802.22-06/0028r10*, Sept. 2006.

황 성 수 (Sung Sue Hwang)

정회원



2007년 2월 부산대학교 전자전
기정보컴퓨터공학부 졸업
2009년 2월 부산대학교 전자전
기공학과 석사
2009년 3월~현재 부산대학교
전자전기공학과 박사과정
<관심분야> 신호검출, 채널추정,
통신시스템

김 석 찬 (Suk Chan Kim)

종신회원



1993년 2월 부산대학교 전자공
학과 졸업
1995년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사 졸업
2000년 2월 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 박사 졸업
2000년 7월 한국전자통신연구

소(ETRI) 연구원

2001년 7월 Princeton대학교 박사후 과정
2002년 2월 Lehigh대학교 박사후 과정
2002년~현재 부산대학교 전자공학과 부교수
2008년~현재 부산대학교 반도체설계교육센터 센터장
<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, OFDM, UWB