

인접 채널 누설이 에너지 검파 기반 스펙트럼 센싱에 미치는 영향

Effects of Adjacent Channel Leakage on an Energy Detection Based Spectrum Sensing

임 창 현 · 김 형 중* · 김 창 주*

Chang Heon Lim · Hyung Jung Kim* · Chang Joo Kim*

요 약

1차 사용자(primary user)는 자신에게 할당된 대역을 사용하여 통신을 수행하는데, 이때 송신 신호의 전력은 대부분 해당 대역에 집중되어 있지만, 일부는 인접 대역으로 넘어간다. 이 때문에 인접 대역이 비어 있더라도 오경보율이 예상보다 크게 발생할 수가 있다. 이전 연구 중에 인접 대역 누설 현상이 스펙트럼 센싱에 미치는 영향을 분석한 것이 있지만, 이때 페이딩을 고려하지 않았다. 본 논문에서는 페이딩 채널 환경에서 인접 대역 누설이 에너지 기반 스펙트럼 센싱 성능에 미치는 영향을 검파 확률과 오경보 확률 측면에서 분석하고자 한다.

Abstract

When a primary user transmits over some frequency band assigned to it, most of its transmission power tends to be concentrated in the band but a small portion of it spreads into the adjacent bands. Thus the false alarm probability for the adjacent bands can be higher than expected, even though no primary users are active in the bands. A previous work evaluated the effects of the adjacent channel leakage on the performance of an energy detection based spectrum sensing but it did not take into account the fading phenomenon. In this paper, we analyze the effects of the adjacent channel leakage on an energy detection based spectrum sensing scheme in terms of detection probability and false alarm probability in a fading environment.

Key words: Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Adjacent Channel Leakage, Energy Detection, Feature Detection

I. 서 론

인지 무선(cognitive radio)^[1] 시스템은 기회적 스펙트럼 접근이라는 개념을 실현할 수 있는 수단으로서, 기본적으로 1차 사용자(primary user)의 활동 유무를 판단할 수 있는 스펙트럼 센싱 기능을 보유하고 있다.

인지 무선 시스템이 사용하는 스펙트럼 감지 방식^[2]으로는 정합 필터(matched filter) 방식과 에너지 검파(energy detection) 방식 그리고 특징 추출(feature extraction) 방식으로 분류할 수 있다. 정합 필터는 가장 우수한 검파 성능을 가질 수는 있지만, 1차 사용자 신호의 형태를 정확하게 알아야 한다는 제약이 있고, 낮은 SNR 환경에서 동기

「본 연구는 미래창조과학부 및 한국방송통신전파진흥원의 방송통신 인프라 원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음[11-911-01-112, My-F 이용 융합서비스 기술개발].」

부경대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pukyong National University)

*한국전자통신연구원 신호처리분석연구실(Radio Analysis Research Section, Electronics and Telecommunication Research Institute)

· Manuscript received February 4, 2014 ; Revised March 20, 2014 ; Accepted March 31, 2014. (ID No. 20140204-015)

· Corresponding Author: Chang Heon Lim (e-mail: chlim@pknu.ac.kr)

화가 어려워 우수한 검파 성능을 기대하기 어렵다는 단점을 지니고 있다. 에너지 검파 방식은 1차 사용자의 신호에 대한 정보를 필요로 하지 않으면서 구현이 간단하다는 장점이 있다. 특징 추출 방식에는 통신 신호의 주기성을 활용하는 방식과 전력 스펙트럼의 형태를 활용하는 방식 등이 있다.

일반적으로 어떤 1차 사용자이든 자기가 우선적으로 사용할 수 있는 주파수 대역이 있고, 이를 통해 통신 신호를 전송한다. 이때 통신 신호가 갖는 전력의 대부분은 해당 대역에 집중되어 있지만, 일부는 인접 대역으로 넘어간다. 따라서 이러한 인접 대역 누설 현상은 스펙트럼 센싱 성능에 영향을 줄 수 있다^{[3]~[6]}. 기존 연구는 참고문헌 [6]에서 인접 대역 누설이 스펙트럼 센싱에 미치는 영향을 분석을 했지만, 페이딩을 고려하지 않았다. 본 논문에서는 페이딩 채널 환경에서 인접 채널 누설이 에너지 검파 기반 스펙트럼 센싱에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 방안을 제시하고자 한다.

본 논문은 1장 서론에 이어 2장에서는 인접 채널 누설이 존재하는 환경에 대한 시스템 모델을 소개한다. 그리고 3장에서는 인접 채널 누설이 스펙트럼 센싱에 미치는 영향을 오경보 확률과 검파 확률을 통해 정량적으로 분석하는 방안을 설명한다. 4장에서는 분석 결과에 따른 수치 결과를 제시하고, 최종적으로 5장에서 결론을 맺는 것으로 구성하였다.

II. 시스템 모델

스펙트럼 센싱은 수신한 신호를 분석하여 1차 사용자가 해당 채널을 사용하고 있는지 여부를 판단하는 것이다. 이후 1차 사용자가 활동하는 경우를 H_1 , 그렇지 않은 경우를 H_0 로 표기하기로 한다.

1차 사용자 신호를 $s(t)$ 라고 하고, 잡음 신호를 $w(t)$ 이라고 하면 수신 신호 $r(t)$ 를 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$r(t) = \begin{cases} w(t) + e(t) & H_0 \\ \rho s(t) + e(t) + w(t) & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $w(t)$ 는 대역폭인 W 인 대역 통과 신호(band-pass signal)로서 평균이 0이고, 통과 대역 내의 전력 스펙

트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 가우시안 잡음을 나타낸다. 여기에서 잡음의 대역폭을 제한한 것은 수신 필터의 특성을 반영한 것이다. 그리고 ρ 는 1차 사용자 송신기와 이차 사용자 단말기 사이에 존재하는 채널의 이득을 나타내는 것으로, 본 논문에서는 이 채널을 레일리(Rayleigh) 채널이라고 가정한다. 그리고 $e(t)$ 은 인접 채널 누설로 인한 간섭 신호 성분을 표현한 것으로, 본 논문에서는 편의상 바로 이웃한 채널의 1차 사용자에 의한 영향만을 고려하는 것으로 가정한다. 그러므로 만약 이웃 채널에 1차 사용자가 활동하고 있지 않다면 $e(t)$ 은 0이 된다.

본 논문에서는 스펙트럼 센싱 방식으로 에너지 검파 방식을 고려한다. 따라서 에너지를 시험 통계량(test statistic)으로 사용하는데, 이때 에너지 Y 의 정의는 다음과 같다.

$$Y = \int_0^T r^2(t) dt \quad (2)$$

위 식에서 T 는 에너지를 측정하는 시간을 가리킨다.

스펙트럼 센싱 대상인 주파수 대역, 즉 관심 대역에서 1차 사용자의 평균 에너지를 E_0 라고 하고, 높은 주파수 쪽의 인접 대역에 존재할 수 있는 1차 사용자의 평균 에너지를 E_R , 낮은 주파수 쪽의 인접 대역에 존재할 수 있는 1차 사용자의 평균 에너지를 E_L 이라고 한다. 본 논문에서는 인접 대역에 존재하는 1차 사용자 신호에 대한 인접 대역 누설비(ACLR)^[7] 값이 알려져 있다고 가정한다. 인접 대역 누설비는 관심 대역내의 전력을 인접 대역내의 전력으로 나눈 값이다. 만약 이웃 대역에 1차 사용자가 활동하고 있는데, 그 신호의 에너지가 E_a 이고, 인접 대역 누설비가 $ACLR$ 이라고 하면 관심 대역내로 넘어온 신호의 에너지는 $E_a/ACLR$ 이 된다. 따라서 관심 대역 내의 신호 에너지는 그만큼 상승하게 된다. 본 논문에서는 관심 대역을 기준으로 높은 주파수 쪽에 있는 인접 대역과 낮은 주파수 쪽에 있는 인접 대역에 있을 수 있는 1차 사용자 신호에 대한 인접 대역 누설비를 각각 $ACLR_R$, $ACLR_L$ 이라고 표기한다.

III. 성능 분석

3-1 오경보 확률 계산

인접 대역 누설에 따른 영향을 살펴보기 위하여 낮은 주파수 쪽의 인접 대역에 1차 사용자가 존재하는 경우를 $H_{1,L}$ 로 표기하고, 그렇지 않은 경우를 $H_{0,L}$ 이라고 표시한다. 또한, 높은 주파수 쪽의 인접 대역에 1차 사용자가 존재하는 경우를 $H_{1,R}$, 그렇지 않은 경우를 $H_{0,R}$ 이라고 나타내기로 한다.

에너지 검파 기반 스펙트럼 센싱 장치에서 사용하는 검파 임계값을 λ 라고 하면, 오경보 확률 P_{FA} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA} = P[Y > \lambda | H_0] \quad (3)$$

그리고 식 (3)을 총 확률 정리(total probability theorem)를 이용하여 전개하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA} = P[Y > \lambda | H_0, H_{0,L}, H_{0,R}]P[H_{0,L}, H_{0,R}] + P[Y > \lambda | H_0, H_{0,L}, H_{1,R}]P[H_{0,L}, H_{1,R}] + P[Y > \lambda | H_0, H_{1,L}, H_{0,R}]P[H_{1,L}, H_{0,R}] + P[Y > \lambda | H_0, H_{1,L}, H_{1,R}]P[H_{1,L}, H_{1,R}] \quad (4)$$

참고문헌 [8]에 따르면 임의의 확률 변수 Y 가 임계값 λ 보다 클 확률은 다음과 같이 유수 정리(residue theorem)를 이용하여 계산할 수 있다고 알려져 있다.

$$P[Y > \lambda] = \int_{\lambda}^{\infty} f_Y(y) dy = \sum_{k_0} \text{res} \left[M_Y(z) \frac{\exp(\lambda z)}{z}, z_{k_0} \right] \quad (5)$$

위 식에서 $f_Y(y)$ 와 $M_Y(z)$ 는 확률 변수 Y 의 확률 밀도 함수와 MGF(Moment Generating Function)이며, z_{k_0} 는 $M_Y(z)$ 의 극점을 가리킨다. 본 논문에서는 이런 사실을 이용하여 식 (4)의 $P[Y > \lambda | H_0, H_{0,L}, H_{0,R}]$, $P[Y > \lambda | H_0, H_{0,L}, H_{1,R}]$, $P[Y > \lambda | H_0, H_{1,L}, H_{0,R}]$, $P[Y > \lambda | H_0, H_{1,L}, H_{1,R}]$ 을 계산하려고 한다. 이를 위해서는 네 가지 조건에 대한 확률 변수 Y 의 MGF를 결정해야 한다. 참고문헌 [9]에 따르면 $M_Y(z)$ 의 일반적인 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_Y(z) = (1 + N_0 z)^{-N+1} (1 + (1 + \bar{\gamma})N_0 z)^{-1} \quad (6)$$

위 식에서 $N \equiv TW$ 이다. 그리고 $\bar{\gamma}$ 는 관심 대역 및

인접 대역에 있는 1차 사용자 신호 성분의 평균 에너지를 N_0 으로 나눈 값을 의미하는데, $H_0, H_{L,i}, H_{R,j}$ 가 유효한 조건에서 $\bar{\gamma}$ 를 $\bar{\gamma}_{ij}$ 라고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\gamma}_{00|H_0} = 0 \quad (7)$$

$$\bar{\gamma}_{01|H_0} = \frac{E_R}{ACLR_R N_0} \quad (8)$$

$$\bar{\gamma}_{10|H_0} = \frac{E_L}{ACLR_L N_0} \quad (9)$$

$$\bar{\gamma}_{11|H_0} = \frac{E_L}{ACLR_L N_0} + \frac{E_R}{ACLR_R N_0} \quad (10)$$

그리고 참고문헌 [9]의 부록의 결과를 활용하여 오경보 확률을 계산하면 다음과 같다.

$$P_{FA} = A(\lambda, N, N_0)P[H_{0,L}]P[H_{0,R}] + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{01|H_0})P[H_{0,L}]P[H_{1,R}] + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{10|H_0})P[H_{1,L}]P[H_{0,R}] + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{11|H_0})P[H_{1,L}]P[H_{1,R}] \quad (11)$$

위 식에서 $A(\lambda, N, N_0)$, $B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma})$ 의 정의는 다음과 같다.

$$A(\lambda, N, N_0) = \sum_{m=0}^{N-1} \frac{\lambda^m \exp(-\lambda/N_0)}{N_0^m \Gamma(m+1)} \quad (12)$$

$$B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\lambda}{(1+\bar{\gamma})N_0}\right) & N=1 \\ \left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N-1} \exp\left(-\frac{\lambda}{(1+\bar{\gamma})N_0}\right) - \frac{1}{1+\bar{\gamma}} \sum_{m=0}^{N-2} \left(1 + \frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N-m-1} \times \sum_{n=0}^m \frac{\lambda^n \exp(-\lambda/N_0)}{N_0^n \Gamma(n+1)} & N \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

3-2 검파 확률

검파 확률 P_D 는 오경보 확률을 계산할 때와 마찬가지로 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_D &= P[Y > \lambda | H_1] \\
 &= P[Y > \lambda | H_1, H_{0,L}, H_{0,R}]P[H_{0,L}, H_{0,R}] \\
 &\quad + P[Y > \lambda | H_1, H_{0,L}, H_{1,R}]P[H_{0,L}, H_{1,R}] \\
 &\quad + P[Y > \lambda | H_1, H_{1,L}, H_{0,R}]P[H_{1,L}, H_{0,R}] \\
 &\quad + P[Y > \lambda | H_1, H_{1,L}, H_{1,R}]P[H_{1,L}, H_{1,R}] \quad (14)
 \end{aligned}$$

이 경우에도 식 (14)의 주요 요소인 $P[Y > T | H_1, H_{0,L}, H_{0,R}]$, $P[Y > T | H_1, H_{0,L}, H_{1,R}]$, $P[Y > T | H_1, H_{1,L}, H_{0,R}]$, $P[Y > T | H_1, H_{1,L}, H_{1,R}]$ 을 식 (5)의 관계를 활용하여 계산하려면 네 가지 조건에 대한 확률 변수 Y 의 MGF가 필요한데, 이 역시 식 (6)의 형태이다. 식 (6)의 주요 파라미터인 $\bar{\gamma}$ 는 주변 채널의 상황에 따라 달라지는데, H_1 , $H_{L,i}$, $H_{R,j}$ 이 유효한 조건에서 $\bar{\gamma}$ 를 $\bar{\gamma}_{ij}$ 라고 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\gamma}_{00|H_1} = E_0/N_0 \quad (15)$$

$$\bar{\gamma}_{01|H_1} = E_0/N_0 + E_R/ACLR_R N_0 \quad (16)$$

$$\bar{\gamma}_{10|H_1} = E_0/N_0 + E_L/ACLR_L N_0 \quad (17)$$

$$\bar{\gamma}_{11|H_1} = E_0/N_0 + E_R/ACLR_R N_0 + E_L/ACLR_L N_0 \quad (18)$$

그러므로 오경보 확률을 계산할 때와 동일하게 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_D &= B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{00|H_1})P[H_{0,L}]P[H_{0,R}] \\
 &\quad + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{01|H_1})P[H_{0,L}]P[H_{1,R}] \\
 &\quad + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{10|H_1})P[H_{1,L}]P[H_{0,R}] \\
 &\quad + B(\lambda, N, N_0, \bar{\gamma}_{11|H_1})P[H_{1,L}]P[H_{1,R}] \quad (19)
 \end{aligned}$$

IV. 수치 결과

III장에서 도출한 분석 결과를 토대로 ACLR에 따른 스펙트럼 센싱 성능을 분석해 보고자 한다. 먼저 이웃 채널에서 1차 사용자가 활동할 확률은 0.5로 설정한다. 그리고 채널마다 동일한 인접 채널 누설비를 사용하는 것으

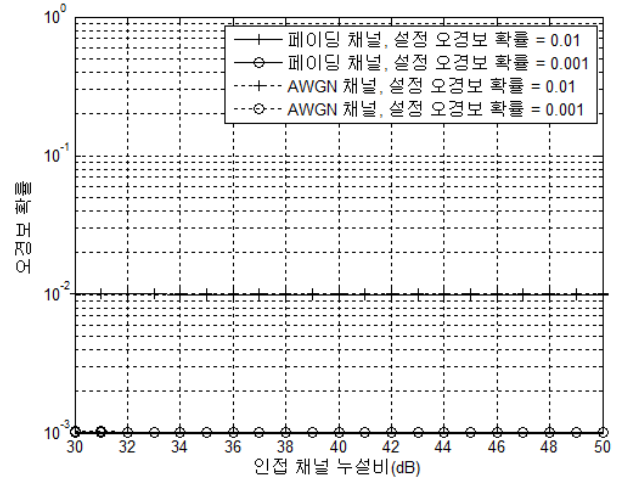


그림 1. 인접 채널의 전력이 관심 채널의 전력과 동일할 때, 인접 채널 누설 비에 따른 오경보 확률(SNR = 10 dB)

Fig. 1. False alarm probability with varying adjacent channel leakage ratio when the received power of a channel of interest is equal to that of an adjacent channel.

로 가정하였으며, 목표로 하는 오경보 확률이 10^{-2} 과 10^{-3} 인 경우를 고려하였으며, 스펙트럼 센싱에 참여하는 신호 샘플 개수^[10]를 의미하는 N 의 값은 8로 설정하였다.

그림 1과 그림 2는 관심 대역의 $SNR E_o/N_o$ 이 10 dB이고, 인접 대역의 수신 전력과 관심 대역의 수신 전력이 동일할 때, 인접 채널 누설비에 따라 오경보 확률과 검파 확률이 어떻게 달라지는지를 보여준다. 이때 AWGN 채널에 대한 결과는 AWGN 채널에 대한 오경보 확률과 검파 확률^[11]을 사용하여 구하였다. 일반적으로 인접 채널 누설비가 작아지면 인접 채널 누설 현상이 강하게 나타난다. 하지만 그림 1과 2에서는 인접 채널 누설이 오경보 확률과 검파 확률에 미치는 영향이 거의 없음을 확인할 수 있다. 이는 그림에서 고려한 인접 채널 누설비의 범위가 스펙트럼 센싱 성능에 영향을 미칠 정도로 작지 않기 때문이다.

그림 3과 그림 4는 관심 대역의 SNR 이 10 dB이고, 인접 대역의 수신 전력과 관심 대역의 수신 전력보다 20 dB 정도 높을 때, 인접 채널 누설비에 따라 오경보 확률과 검파 확률이 어떻게 달라지는지를 보여주고 있다. 그림 1과 그림 2에 비해서는 인접 채널의 수신 전력이 크기 때문에,

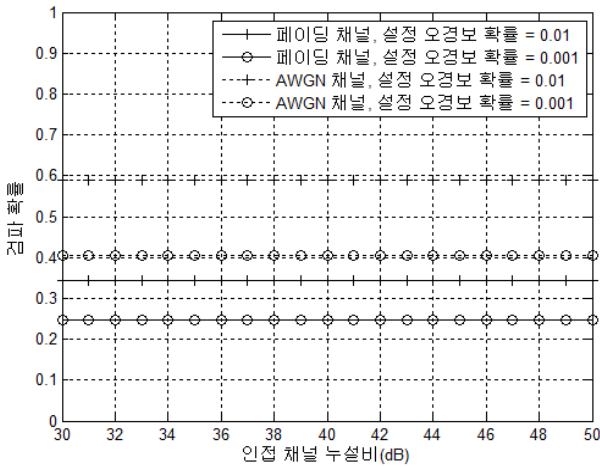


그림 2. 인접 채널의 전력이 관심 채널의 전력과 동일할 때 인접 채널 누설 비에 따른 검파 확률(SNR=10 dB)

Fig. 2. Detection probability with varying adjacent channel leakage ratio when the received power of a channel of interest is equal to that of an adjacent channel.

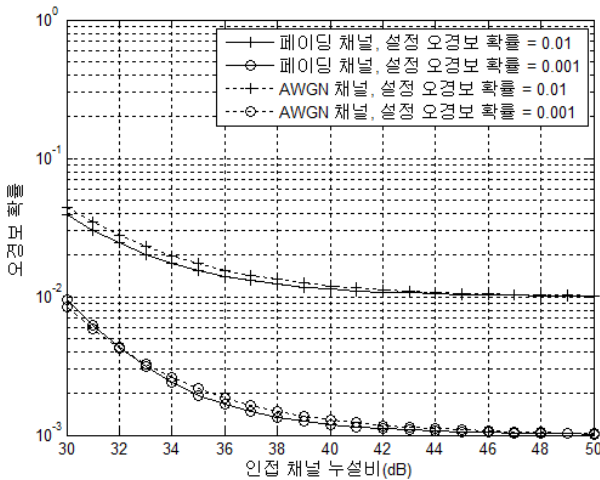


그림 3. 인접 채널의 전력이 관심 채널의 전력보다 20 dB 높을 때, 인접 채널 누설 비에 따른 오경보 확률 (SNR=10 dB)

Fig. 3. False alarm probability with varying adjacent channel leakage ratio when the received power of a channel of interest is greater than that of an adjacent channel by 20 dB.

인접 채널 누설비가 동일하다고 하더라도 관심 채널에 나타나는 간섭 전력은 상대적으로 그 만큼 커진다고 볼

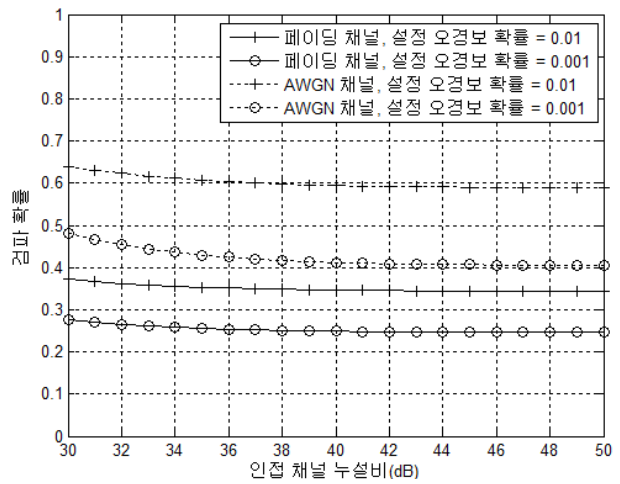


그림 4. 인접 채널의 전력이 관심 채널의 전력보다 20 dB 높을 때, 인접 채널 누설 비에 따른 검파 확률 (SNR=10 dB)

Fig. 4. Detection probability with varying adjacent channel leakage ratio when the received power of a channel of interest is greater than that of an adjacent channel by 20 dB.

수 있다. 따라서 그림에서는 보는 바와 같이 인접 채널 누설비가 작은 영역에서 오경보 확률이 당초 목표로 했던 값보다 높아지는 결과를 초래하는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 검파 확률 측면에서도 나타난다. 이들 결과들로부터 검파 확률보다는 오경보율이 인접 채널 누설 현상에 민감하다는 것을 확인할 수 있는데, 이는 인접 채널 누설에 따른 수신 전력의 변화가 1차 사용자가 활동할 때보다는 그렇지 않을 때가 상대적으로 더 크기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 인접 대역 누설비(ACLR) 값에 따라 에너지 검파 기반 스펙트럼 센싱 성능에 어떤 영향이 있는지를 정량적으로 분석하는 방법을 제시하고, 수치 결과를 제시하였다. 분석 결과에 따르면 SNR이 커질수록 인접 채널 누설이 스펙트럼 센싱 성능에 미치는 영향이 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 이 결과는 인접 채널 누설 현상이 존재하는 환경에서 검파 임계값을 결정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

References

[1] J. Mitola, G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.

[2] T. Yucek, H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *IEEE Comms. Surveys*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130. 2009.

[3] W. Webb, "On using white space spectrum", *IEEE Communications Magazine*, pp. 145-151, Aug. 2012.

[4] H. Chen, W. Gao, "Spectrum sensing for FM wireless microphone signals", *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum*, pp. 1-5, Apr. 2010.

[5] C. Song, H. Harada, "A spectrum sensing prototype for Japanese digital television signals", *Globecom*, pp. 1271-1276, Dec. 2012.

[6] T. Yu, S. Rodriguez-Parera, D. Markovic, and D. Cabrić, "Cognitive radio wideband spectrum sensing using multitap windowing and power detection with threshold adaptation", *ICC*, pp. 1-6, May 2010.

[7] ECO, *SEAMCAT Handbook*, Jan. 2010.

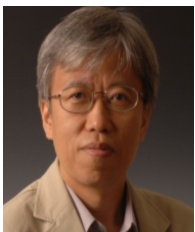
[8] X. Y. Hou, N. Morinaga, and T. Namegawa, "Direct evaluation of radar detection probabilities", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 418-424, 1987.

[9] C. H. Lim, "Adaptive energy detection for spectrum sensing in unknown white Gaussian noise", *IET Commun.*, pp. 1-9, 2012.

[10] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals", *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, Apr. 1967.

[11] F. F. Digham, M. -S. Alouini, and Marvin K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21, 24, Jan. 2007.

임 창 현



1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1993년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1994년 8월~현재: 부경대학교 전자공학

과 교수

[주 관심분야] 통신공학, 레이더 신호처리

김 형 중



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 8월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
 2010년 8월: 충북대학교 전파공학과 (공학박사)
 1995년 8월~현재: 한국전자통신연구원 책

임연구원

[주 관심분야] CR/SDR, 디지털-RF, 이동통신 기술 등

김 창 주



1976년~1980년: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년~1988년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1989년~1993년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1979년 12월~1983년 3월: 국방과학연구

소 연구원

1983년 3월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

1994년~1998년: 한국전자통신연구원 전파신호처리연구실장

1999년~2001년: 한국전자통신연구원 이동통신모뎀연구부장

2003년~2010년: 한국전자통신연구원 전파기술연구부장

[주 관심분야] 이동통신, 전파기술, Cognitive Radio 기술 등