

인지 무선 시스템에서 전송 오류가 전송 용량에 미치는 영향에 대한 분석

준회원 이 상 욱*, 종신회원 임 창 현**

Analysis of Effects of Nonideal Channels on the Throughput of CR Systems

Sang-Wook Lee* Associate Member, Chang-Heon Lim** Lifelong Member

요 약

인지 무선(cognitive radio) 시스템은 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 과정을 통하여 주 사용자(primary user)의 출현 여부를 판단하는데, 스펙트럼 감지와 데이터 전송을 동시에 수행하기는 어렵기 때문에 통상적으로 스펙트럼 감지와 데이터 전송을 번갈아 가면서 실시한다. 이런 시스템 구조에서 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)를 함께 사용할 때 부 사용자의 데이터 전송량을 최대로 할 수 있는 스펙트럼 감지 시간 및 그에 따른 최대 전송 용량에 대한 연구 결과^[8]가 이미 발표된 바 있다. 하지만 이 결과는 개별 부 사용자 단말과 융합 센터 사이에 이상적인 전송 채널을 전제로 한 것이어서 전송 오류에 따른 영향을 반영하고 있지 않다. 이에 본 논문에서는 부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 환경을 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링한 후, 부 사용자가 확보할 수 있는 전송 용량과 이를 최대로 하는 스펙트럼 감지 시간을 분석하였다. 분석 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 융합 규칙을 사용하는 경우보다 전송 오류로 인한 전송 용량(throughput)의 손실이 작은 것으로 나타났다.

Key Words : cognitive radio, cooperative spectrum sensing, nonideal channel

ABSTRACT

CR systems performs spectrum sensing operation to detect the appearance of primary users. However, since it is not feasible to do spectrum sensing and data transmission simultaneously, they typically operate alternatively in a time domain. There have been an effort[8] to investigate the optimal spectrum sensing duration for maximum throughput for the scheme with cooperative spectrum sensing. This is based on an assumption that the communication channels between each secondary user and the fusion center are ideal and does not consider the effects of transmission error. Motivated by this, we here model the channels as binary symmetric channels and examined its effect on the maximum throughput and the associated optimal sensing duration. Analysis shows that the performance degradation due to the transmission error is smaller for the case of using the AND fusion rule than for the OR fusion rule.

I. 서 론

무선 통신은 사용의 편리함과 서비스 질의 향상

덕분에 지난 십여 년 동안 이용자가 빠르게 증가해 왔다. 반도체 기술의 발전과 고속 통신 기술의 등장으로 오늘날의 무선 통신은 음성 정보 전송 뿐만

* 부경대학교 전자공학과 (lashid1212@pknu.ac.kr) ** 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (chlim@pknu.ac.kr)
 논문번호 : KICS2009-03-134, 접수일자 : 2009년 3월 30일, 최종논문접수일자 : 2009년 9월 2일

아니라 다양한 형태의 데이터를 고속으로 전송할 수 있게 되었다. 무선 통신 서비스를 제공하기 위해서는 우선적으로 해당 서비스를 전달하는데 사용할 주파수 대역이 필요하다. 그런데 현재 사용 가능한 주파수 자원은 한정되어 있고 향후 예상되는 무선 통신 주파수 수요는 계속 늘어날 것으로 보이기 때문에 머지않아 주파수 부족현상이 발생할 것으로 예측된다.

한편, FCC에서 발표한 조사 결과^[1]에 따르면 이미 할당된 주파수 대역의 상당 부분에 대한 이용률이 상당히 낮은 것으로 드러났다. 이는 주파수 부족 현상이 단지 사용 가능한 주파수 자원이 적다는 점뿐만 아니라 할당된 주파수 자원의 이용 효율이 낮다는 점에도 기인한다는 사실을 시사하는 것이다. 이를 계기로 주파수 할당 방식을 기존의 독점적인 할당 방식에서 좀 더 유연한 방식으로 전환하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 가장 유력한 방안은 해당 주파수 대역에 대한 우선 사용권을 확보하고 있는 주 사용자가 해당 주파수 대역을 사용하고 있지 않을 때 다른 사용자, 즉 부 사용자(secondary user)가 해당 대역을 사용할 수 있도록 허용하는 것이다.

인지 무선(cognitive radio) 시스템은 수신 신호를 분석하여 주변 상황을 인식하고 그 결과에 따라 시스템의 동작 방식을 최적화하는 통신 방식으로서, 기본적으로 스펙트럼 감지 기능을 보유하고 있기 때문에 앞에서 언급한 유연한 주파수 접근(opportunistic spectrum access) 방안을 실현할 수 있는 적절한 기술로 인식되고 있다^[2]. 다시 말해 부 사용자가 스펙트럼 감지 기능을 활용하여 주 사용자가 해당 대역을 사용하고 있지 않을 때 그 대역을 사용함으로써 주파수 이용 효율을 향상시킬 수 있다.

주 사용자의 출현 여부를 개별 부 사용자 차원에서 결정할 수도 있지만, 무선 채널 환경에서 흔히 발생하는 페이딩 현상으로 인한 오류를 줄이기 위하여 여러 부 사용자의 판단을 융합(fusion)하여 최종 판단을 하는 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)에 대하여 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 이 방식은 공간적으로 흩어져 있는 부 사용자들이 개별적으로 스펙트럼 감지를 통해 판단한 결과를 융합 센터로 전송하고, 융합 센터는 융합 규칙에 따라 이들 판단을 종합하여 최종 결론을 도출하는 형태이다^{[3],[4]}.

기본적으로 인지 무선 시스템에서 부 사용자는 주 사용자의 통신 활동에 방해가 되지 않아야 하므

로 스펙트럼 감지 기능을 중단 없이 계속해서 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 현실적으로는 스펙트럼 감지와 데이터 전송을 함께 수행하기 어렵기 때문에 일정 시간 간격으로 스펙트럼 감지 기능과 데이터 전송을 번갈아 가며 실행하는 방안을 사용한다. 이러한 주기적 감지 방식(periodic sensing)은 하나의 전송 프레임에 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용하는데, 이 때 스펙트럼 감지에 할당된 시간이 길면 길수록 오류 경보 확률(false alarm probability)은 낮아져 스펙트럼 활용 가능성이 높아지지만 다른 한편으로 데이터 전송 시간은 짧아져 데이터 전송량이 줄어들게 되는 특징이 있다. 최근 발표된 연구 결과^[8]에서는 스펙트럼 감지 정확도를 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대로 하는 스펙트럼 감지 시간을 분석한 바 있다. 융합 센터를 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식에서는 개별 부 사용자가 각자 판단한 스펙트럼 감지 결과를 융합 센터로 전송해야 한다.

협력 스펙트럼 감지는 부 사용자가 융합 센터로 보내는 데이터의 형태에 따라서 soft combining과 hard combining으로 구분된다. soft combining은 부 사용자들이 스펙트럼 감지를 위해 측정한 데이터를 전송하는 방식이고, hard combining은 부 사용자들이 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부에 대한 판정 결과를 전송하는 방식이다. 최근에는 시스템 운용에 상대적으로 부담이 적은 hard combining 방식에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. hard combining 방식을 사용할 경우 융합 센터에서는 정해진 융합 규칙에 의해서 최종적인 감지 결과를 도출하는데, 대표적인 융합 규칙으로는 AND 융합 규칙, OR 융합 규칙 등이 있다^{[6],[7]}.

[8]에서는 이들 전송이 완벽한 전송 채널을 통해 이루어진다고 가정하였기 때문에 전송 오류를 고려하지 않았다. 하지만 실제 환경에서는 이를 보장할 수 없기 때문에 전송 오류에 의한 영향을 고려할 필요성이 있다. 이에 본 논문에서는 인지 무선 시스템에서 개별 부 사용자와 융합 센터간의 전송 채널을 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링하고, 이로 인해 발생하는 전송 오류가 전송 용량 및 최적 스펙트럼 감지 시간에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다.

본 논문에서는 I 장 서론에 이어 II 장에서는 본문에서 고려하는 스펙트럼 감지 시스템 모델에 대해서 기술하고 III 장에서는 부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 오류가 전송 용량과 최적 스펙트

럼 감지 시간에 미치는 영향에 대하여 수학적으로 분석하였다. 그리고 IV장에서는 이에 대한 수치 분석 사례를 제시하고, 마지막으로 V장에서 결론을 제시하였다.

II. 시스템 구성

부 사용자들이 스펙트럼을 이용하기 위해서는 우선적으로 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 감지해야 한다. 만약 i 번째 부 사용자가 샘플링 주파수 f_s 의 속도로 수신 신호를 샘플링한다면, 해당 부 사용자가 n 번째 수신한 신호 $r_i(n)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_i(n) = \begin{cases} s(n) + u(n), & H_1 \\ u(n), & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s(n)$ 은 주 사용자 신호의 n 번째 샘플을 나타내는 것으로 평균은 0이고 분산은 σ_p^2 인 통계적인 양이라고 가정한다. 그리고 $u(n)$ 은 수신 잡음을 나타내는 것으로 평균이 0이고 분산은 σ_u^2 인 CSCG (circularly symmetric complex gaussian) 잡음으로 가정한다. 그리고 $s(n)$ 과 $u(n)$ 은 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다. 부 사용자는 수신한 신호 $r_i(n)$ 를 근거로 하여 주 사용자의 활동 유무를 판단하게 되는데, 이는 통계학의 가설 검정 (hypothesis testing) 문제로 볼 수 있으며, 여기에 관련된 두 가지 가설(hypothesis)은 “주 사용자가 채널을 사용하고 있다”와 “그렇지 않다”로 설정할 수 있는데 이들을 편의상 각각 H_1, H_0 로 표시하고자 한다.

현재까지 알려진 스펙트럼 감지 방법으로는 정합 필터(matched filter)를 이용한 방법, 에너지를 사용한 방법, 그리고 신호의 주기성(cyclostationarity)을 이용한 방법이 있다. 이 중에서 수신 신호의 에너지를 토대로 한 스펙트럼 감지 방법은 그 구조가 간단하고 주 사용자가 어떤 형태의 신호를 사용하더라도 적용할 수 있기 때문에 가장 널리 사용되는 방법이다. 본 논문에서도 이를 사용하여 스펙트럼 감지를 수행하는 것으로 가정한다.

주기적인 스펙트럼 감지를 사용하는 인지 무선 시스템은 하나의 프레임의 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용하는데, 스펙트럼 감지 슬롯의 길이를 τ 라고 하고 이 기간 동안

수신한 샘플의 개수를 N 이라고 할 때 스펙트럼 감지에 사용할 신호의 시험 통계량(test statistic) Y 는 다음과 같이 정의한다.

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |r(n)|^2 \quad (2)$$

위 식에서 N 은 τf_s 보다 크기 않은 자연수를 나타내는 것으로 본 논문에서는 편의상 $N = \tau f_s$ 으로 가정한다. 만약 N 이 충분히 큰 수라고 한다면 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라 Y 의 통계 분포는 정규 분포(normal distribution)에 가깝게 된다. 주 사용자 신호는 복소 PSK 변조 신호라고 가정된 상태에서 어떤 가설이 유효하냐에 따라 Y 의 확률 밀도 함수는 다음 중 하나로 나타낼 수 있다^[8].

$$Y \sim \begin{cases} N(\sigma_u^2, \frac{1}{N}\sigma_u^4) & \text{가설 } H_0 \\ N((\gamma+1)\sigma_u^2, \frac{1}{N}(2\gamma+1)\sigma_u^4) & \text{가설 } H_1 \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 $N(a, b)$ 는 평균이 a , 분산이 b 인 정규 분포를 나타내며, $\gamma = \sigma_p^2 / \sigma_u^2$ 는 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)로서 주 사용자의 신호와 잡음의 전력 비율을 의미한다. 에너지 검파기를 이용한 스펙트럼 감지 방식은 부 사용자가 측정된 수신 에너지의 크기를 검파 임계값 λ 와 비교하여 주 사용자의 채널 사용 여부를 판단한다. 위의 식(3)의 확률 밀도 함수를 토대로 하여 부 사용자별 오류 정보 확률 P_{FA} 과 검파 확률 P_D 를 수학적으로 나타내면 다음과 같다^[8].

$$P_{FA} = P(Y > \lambda | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1\right) \sqrt{\tau f_s}\right) \quad (4)$$

$$P_D = P(Y > \lambda | H_1) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right) \quad (5)$$

협력 스펙트럼 감지 방식에서는 개별 부 사용자들이 스펙트럼 감지를 통해 주 사용자의 출현 여부를 판정한 후 그 결과를 융합 센터로 보내고, 융합 센터에서는 정해진 융합 규칙에 이를 종합하여 최종 판정 결과를 도출한다. 이 때 개별 부 사용자

융합 센터 사이의 전송 채널이 이상적이지 않다는 것으로 표현하는 방법으로 해당 채널을 오류 확률이 P_E 인 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링하고자 한다. 그리고 융합 규칙으로 AND 규칙과 OR 규칙을 고려하기로 한다.

III. 성능 분석

[8]에서는 주 사용자 검출 확률을 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대로 하는 최적의 스펙트럼 감지 시간을 도출하였다. 이 연구에서는 주 사용자가 활동하지 않는 것을 제대로 판단한 경우나 주 사용자가 활동하지만 이를 잘못 판단한 경우 모두에 대한 전송 용량을 고려하였지만, 본 논문에서는 편의상 전자의 경우만을 전송 용량에 고려하여 스펙트럼 감지 시간이 τ 일 때 전송 용량 $R(\tau)$ 를 다음과 같이 정의하고자 한다.

$$R(\tau) \equiv \frac{T-\tau}{T} C_0 P(H_0)(1-P_{FA}) \quad (6)$$

위 식에서 T 는 전송 프레임의 길이를 나타하고, P_{FA} 는 오류 정보 확률을 나타내며, $P(H_0)$ 는 주 사용자가 스펙트럼을 사용하지 않을 확률을 가리킨다. 그리고 C_0 는 주 사용자가 존재하지 않는 상황에서 확보할 수 있는 채널 용량을 가리키는 것으로 부 사용자의 신호 전력을 σ_s^2 라고 하면 $C_0 = \log_2(1 + \sigma_s^2/\sigma_u^2)$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 개별 부 사용자 단말이 갖는 검파 성능이 동일하다고 가정한다.

부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 환경을 이진 대칭 채널(symmetry channel)로 가정하였기 때문에 부 사용자 단말에서 발생하는 오류 정보 확률과 검파 확률을 각각 P_{FA} , P_D 라고 하면 전송 오류를 감안한 오류 정보 확률 $P_{FA,E}$ 과 검파 확률 $P_{D,E}$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,E} = (1-P_E)P_{FA} + P_E(1-P_{FA}) \quad (7)$$

$$P_{D,E} = (1-P_E)P_D + P_E(1-P_D) \quad (8)$$

여기에 식 (4)과 (5)를 대입하면 $P_{FA,E}$ 와 $P_{D,E}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,E} = (1-2P_E) \times Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) + P_E \quad (9)$$

$$P_{D,E} = (1-2P_E) \times Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma+1}}\right) + P_E \quad (10)$$

3.1 AND 융합 규칙을 사용하는 경우

인지 무선 시스템의 융합 센터가 AND 융합 규칙을 사용할 때 전송 오류를 감안한 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,AND,E}^f$ 와 최종 검파 확률 $P_{D,AND,E}^f$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA,AND,E}^f = (P_{FA,E})^K \quad (11)$$

$$P_{D,AND,E}^f = (P_{D,E})^K \quad (12)$$

위 식에서 K 은 부 사용자 수를 가리킨다. 여기서 인지 무선 시스템이 목표로 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_D^f}$ 로 주어졌다면, 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률 $P_{D,E} = \sqrt[K]{\overline{P_D^f}}$ 가 된다. 그리고 $\overline{P_D^f}$ 를 사용하여 식(10)을 검파 임계값 λ 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = \sigma_u^2 \left(Q^{-1} \left(\frac{\sqrt[K]{\overline{P_D^f}} - P_E}{1-2P_E} \right) \sqrt{\frac{2\gamma+1}{\tau f_s}} + \gamma + 1 \right) \quad (13)$$

위 식에서 $Q^{-1}(x)$ 은 $Q(x)$ 의 역함수를 의미한다. 그리고 식(9)와 식(11) 그리고 식(13)을 이용하면 $P_{FA,AND,E}^f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,AND,E}^f = \{P_E + (1-2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^K \quad (14)$$

위 식에서 $\alpha \equiv \sqrt{2\gamma+1} Q^{-1} \left(\frac{\sqrt[K]{\overline{P_D^f}} - P_E}{1-2P_E} \right)$ 이다. 식 (14)는 AND 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템이 주 사용자에 대한 목표 검파 확률 $\overline{P_D^f}$ 을 유지하면서 어느 정도의 오류 정보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. 여기에서 눈여겨 볼 것은 Q 함수의 특성 때문에 $Q^{-1}(\cdot)$ 함수의 인자로 사용될 값은 다음의 부등관계를 만족시켜야 한다.

$$P_E < \sqrt[K]{P_D^f} < 1 - P_E \quad (15)$$

식(15)로부터 $P_E < 1 - P_E$ 이므로 $P_E < \frac{1}{2}$ 이어야 한다. 식(15)는 P_E 가 0일 때는 $\overline{P_D^f}$ 가 임의의 값을 가질 수 있지만 그렇지 않은 경우에는 P_E 값에 따라서 $\overline{P_D^f}$ 의 범위가 축소된다는 것을 의미한다. 따라서 이 범위에 속하지 않는 $\overline{P_D^f}$ 는 달성할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그리고 식(6)과 식(14)를 사용하면 AND 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템의 전송 용량 $R_{AND,E}(\tau)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{AND,E}(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C_0 P(H_0) \times \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^K\right] \quad (16)$$

식(16)에서 $R_{AND,E}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에 대하여 연속이므로 이 구간 내에서 최대값을 갖는다. 그리고 τ 가 증가할 때 $\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)$ 는 단조 감소하고, $P_E < \frac{1}{2}$ 라는 조건아래에서 $[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^K]$ 는 단조 증가하기 때문에 $R_{AND,E}(\tau)$ 함수는 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 따라서 $R_{AND,E}(\tau)$ 를 최대로 하는 τ 를 구하는 방법은 $R_{AND,E}(\tau)$ 에 대한 미분 값이 0이 되는 τ 를 구하는 것이다. $R_{AND,E}(\tau)$ 에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{R_{AND,E}(\tau)}{C_0 P(H_0)} = & -\frac{1}{T} + \frac{1}{T} \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^K \\ & - K(1 - 2P_E) \frac{\gamma\sqrt{f_s} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})^2}{2}\right) \times \\ & \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^{K-1}\right] \quad (17) \end{aligned}$$

식 (17)를 0이 되게 하는 τ_{opt} 를 명시적(explicit)으로 나타내는 식을 구하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색(numerical search)을 사용하여 구하기로 한다.

3.2 OR 융합 규칙을 사용하는 경우

AND 융합 규칙을 사용하는 경우와 마찬가지로 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에 대하여 스펙트럼

감지 시간 τ 와 전송 용량 $R_{OR,E}(\tau)$ 의 관계를 유도하기로 한다. 먼저 OR 융합 규칙을 사용하는 경우 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,OR,E}^f$ 과 최종 검파 확률 $P_{D,OR,E}^f$ 을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR,E}^f = 1 - (1 - P_{FA,E})^K \quad (18)$$

$$P_{D,OR,E}^f = 1 - (1 - P_{D,E})^K \quad (19)$$

여기서 인지 무선 시스템이 목표로 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_D^f}$ 로 주어졌다면 인지 무선 시스템의 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률은 $P_{D,E} = 1 - \sqrt[K]{1 - \overline{P_D^f}}$ 가 된다. 그리고 식(10)을 이용하면 최종 검파 확률 $\overline{P_D^f}$ 을 달성하기 위한 검파 임계값 λ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \sigma_v^2 \left(Q^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt[K]{1 - \overline{P_D^f}} - P_E}{1 - 2P_E} \right) \sqrt{\frac{2\gamma+1}{\tau f_s}} + \gamma + 1 \right) \quad (20)$$

또한 식(9)와 식(18) 그리고 식(20)을 이용하면 최종적으로 $P_{FA,OR,E}^f$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR,E}^f = 1 - \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^K\right] \quad (21)$$

위 식에서 $\beta = \sqrt{2\gamma+1} Q^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt[K]{1 - \overline{P_D^f}} - P_E}{1 - 2P_E} \right)$ 이다. 식(21)은 OR 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템이 주 사용자의 검파 확률 $\overline{P_D^f}$ 을 유지하면서 어느 정도의 오류 정보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. AND 융합 규칙을 사용하는 경우처럼 식(21)에 사용된 Q함수의 특성 때문에 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에도 인지 무선 시스템이 설정할 수 있는 $\overline{P_D^f}$ 의 범위는 다음과 같이 제한된다.

$$P_E < \sqrt[K]{1 - \overline{P_D^f}} < 1 - P_E \quad (22)$$

식(22)로부터 $P_E < 1 - P_E$ 이므로 $P_E < \frac{1}{2}$ 이어야 한다. 식(21)을 식(6)에 대입하면 OR 융합 규칙

을 사용하는 인지 무선 시스템의 전송 용량 $R_{OR,E}(\tau)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{OR,E}(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C_0 P(H_0) \times [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^K \quad (23)$$

앞에서도 언급한 바와 같이 $R_{OR,E}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에 대하여 연속이고, τ 가 증가할 때 $\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)$ 는 그 값이 단조 감소하고, $P_E < \frac{1}{2}$ 조건아래에서 $[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^K$ 는 단조 증가하기 때문에 $R_{OR,E}(\tau)$ 함수는 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 그러므로 $R_{OR,E}(\tau)$ 은 $0 \leq \tau \leq T$ 구간 내에서 최대값을 갖게 된다는 것을 알 수 있다. $R_{OR,E}(\tau)$ 를 최대로 하는 τ 를 구하는 방법은 $R_{OR,E}(\tau)$ 에 대한 미분 값이 0이 되는 τ 를 구하는 것이다. $R_{OR,E}(\tau)$ 에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{R_{OR,E}'(\tau)}{C_0 P(H_0)} = & -\frac{1}{T} [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^K \\ & - K(1 - 2P_E) \frac{\gamma\sqrt{f_s} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \exp\left(-\frac{(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})^2}{2}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \times \\ & [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^{K-1} \quad (24) \end{aligned}$$

이 경우에도 식 (24)을 0이 되게 하는 τ_{opt} 를 명시적(explicit)으로 결정하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색을 사용하여 그 값을 결정하는 것으로 한다.

IV. 수치 분석 사례

본 절에서는 III장에서 도출한 수식을 토대로 부사용자와 융합 센터간의 전송 오류 확률 P_E 가 최적 스펙트럼 감지 시간에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 먼저 수치 분석 대상으로 하는 시스템의 구성과 관련한 파라미터 값으로 $\overline{P_D^f} = 0.9$, $T = 100ms$, $f_s = 6MHz$, $\gamma = -15dB$, $P(H_0) = 0.8$, $C_0 = 6.6582$ 로 가정하였다. 그리고 부 사용자 수 $K = 10$ 으로 하였다.

그림 1에서는 최적 스펙트럼 감지 시간 τ_{opt} 이 인지 무선 시스템의 전송 오류 P_E 에 따라서 어떻게

변하는지는 보여주고 있다. AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류 P_E 가 커질수록 최적 감지 시간 τ_{opt} 가 빠르게 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이는 $P_D \geq \frac{1}{2}$ 인 경우에 P_E 가 커질수록 최종 검과 확률 $P_{D,AND,E}^f$ 이 작아지기 때문이다. 반면에 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류 P_E 가 커질수록 최적 감지 시간이 짧아지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 $P_D \geq \frac{1}{2}$ 인 경우에 P_E 가 커질수록 최종 검과 확률 $P_{D,OR,E}^f$ 이 증가하기 때문이다.

그림 2는 전송 오류 P_E 에 따라서 $1 - P_{F,A,E}^f$ 이 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 P_E 가 증가할 때 그 값에 변화가 별로 없지만, OR 규칙을 사용하는 경우에는 상대적으로 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

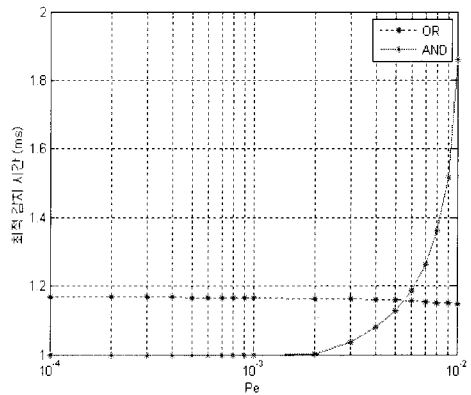


그림 1. P_E 가 최적 감지 시간 τ_{opt} 에 미치는 영향

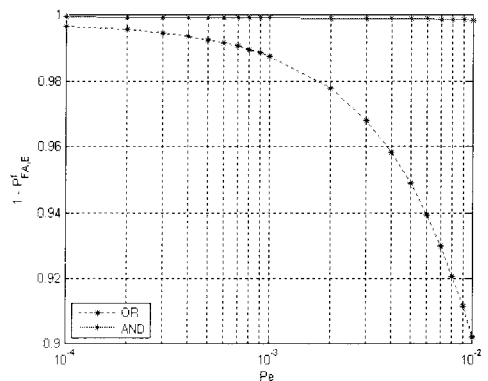


그림 2. 최적 감지 시간 τ_{opt} 일 때 P_E 가 $1 - P_{F,A,E}^f$ 에 미치는 영향

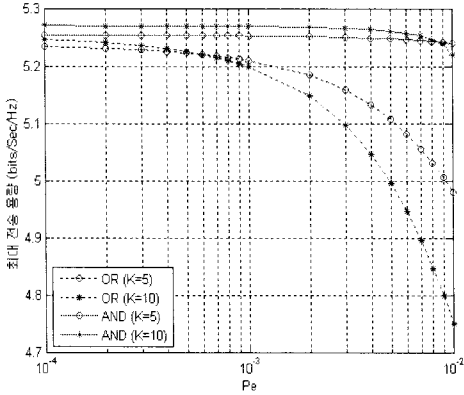


그림 3. P_E 가 최대 전송 용량에 미치는 영향

그림 3에서는 $K=5$, $K=10$ 인 경우에 최대 전송 용량이 인지 무선 시스템의 전송 오류 P_E 에 따라서 어떻게 변하지를 보여주고 있다. 이 결과는 식 (6)에서 알 수 있는 것처럼 그림 1과 그림 2의 결과로부터 유추할 수 있다. 일반적으로 전송 오류가 존재하는 경우에는 인지 무선 시스템이 사용할 수 있는 전송 용량이 작아지게 되는데 이런 현상을 그림 3에서도 확인할 수 있다. 그러나 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 용량의 감소가 크지 않지만 OR 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류가 증가함에 따라 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전송 용량은 식(6)에서도 보는 바와 같이 스펙트럼 감지 시간과 오류 경보 확률에 따라 결정되는데 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 P_E 가 증가할 때 스펙트럼 감지 시간 증가로 인한 전송 용량의 손실이 오류 경보 확률의 증가로 인한 전송 용량의 증가로 상당부분 상쇄되기 때문에 전체 전송 용량의 감소가 크지 않지만, OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 스펙트럼 감지 시간 감소로 인한 전송 용량 증가보다 오류 경보 확률의 증가로 인한 손실이 상당히 크기 때문에 결과적으로 전체 전송 용량은 많이 감소하였다. 그리고 부 사용자의 수가 많아질수록 전송 에러로 인한 채널 용량 감쇠가 더 큰 것으로 나타났다.

V. 결 론

본 논문에서는 주기적인 스펙트럼 감지를 수행하는 인지 무선 시스템에서 부 사용자와 융합 센터 간에 발생할 수 있는 데이터 전송 오류가 전송 용

량과 최적 스펙트럼 감지 시간에 미치는 영향에 대해 기술하였다. 개별 부 사용자 차원의 스펙트럼 검파 방법으로는 에너지 검파 방식을 사용하였고, 부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 환경은 이진 대칭 채널로 가정하였다. 분석 사례로는 단일 부 사용자의 경우, AND와 OR 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지방식을 사용하는 경우에 데이터 전송 오류로 인한 전송 용량과 최적 스펙트럼 감지 시간의 변화를 분석하였다. 10명의 부 사용자를 사용하는 경우에 대하여 사례 분석을 한 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 융합 규칙을 사용하는 경우보다 전송 오류에 대하여 강한 특성을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

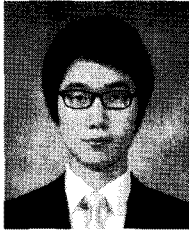
참 고 문 헌

- [1] Federal Communication Commission, "Sepectrum policy task force report, FCC 02-155", Nov. 2002.
- [2] Federal Communication Commission, "Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies, notice of proposed rule making and order, FCC 03-322", Dec. 2003.
- [3] M. Gandetto and C. Regazzoni, "Spectrum sensing: a distributed approach for cognitive terminals", IEEE J. Select. Areas Commu., vol. 25, no. 3, pp. 546-557, Apr. 2007.
- [4] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios", in Proc. IEEE ICC 2006, vol. 4, pp. 1658-1663, June 2006.
- [5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[cognitive radio communications]", IEEE commun mag., vol.4 6, no. 4, pp. 32-39, April 2008.
- [6] E. Peh and Y. Liang "Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks", WCNC 2007, pp. 27-32, March 2007.
- [7] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," in Proc. IEEE 1st Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05).

- [8] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks", IEEE trans. wireless commun., vol 7. no. 4, pp. 1326-1337, April 2008.

이 상 욱 (Sang Wook Lee)

준회원



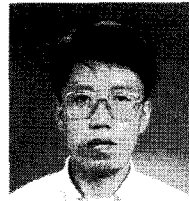
2008년 2월 부경대학교 전자공학과 (공학사)

2008년 3월~현재 부경대학교 전자공학과 (공학석사)

<관심분야> 디지털통신, 인지 무선

임 창 현 (Chang Heon Lim)

종신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1993년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994년 3월~현재 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 정교수

<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리, 오디오 부호화