

인지 무선 통신 시스템에서 에너지 제한적 개방 루프 협력 센싱 기법에 대한 연구

A Study on Performance Evaluation of Energy-Constrained Open-Loop Cooperative Sensing in Cognitive Radios

노 고 산* · 임 성 목** · 왕 한 호†
(Gosan Noh · Sungmook Lim · Hanho Wang)

Abstract - In cognitive radios, secondary users can use the spectrum exclusively allocated to a primary wireless system if the secondary users detect the spectrum in idle states. Because the secondary users can utilize the idle state of the spectrum, the utilization rate of the spectrum can be improved. The idle states can be detected by using secondary users' sensing schemes. However, the wireless channel environment where secondary users perform the spectrum sensing is not very friendly to secondary users because the signal-to-noise ratio of the received primary signal is very low. Hence, cooperative sensing scheme where more than one secondary user take part in the spectrum sensing is generally used in cognitive radios. In this paper, we investigate the cooperative sensing performance for machine-to-machine communication devices operated by batteries with limited energy. In general, the energy consumed for the spectrum sensing increases as the length of the sensing period and the number of cooperative sensing nodes. Accordingly, even though the total amount of the consumed energy is the same, an energy allocation methodology how to distribute the energy to the sensing period and sensing nodes can achieve the optimum sensing performance, which is numerically analyzed.

Key Words : Cognitive radios, Spectrum sensing, Energy saving

1. 서 론

인지 무선 통신(cognitive radios) 시스템은 1차 사용자(primary user)에게 배타적으로 할당되어있는 주파수 자원이 유휴 상태(idle state)로 사용되지 않고 있을 때 해당 주파수 자원을 2차 사용자(secondary user)가 활용할 수 있도록 하여 주파수 활용률을 높이고자 제안된 무선 통신 기법이다[1]. 그러나 1차 사용자가 사용하지 않는 기간에만 2차 사용자의 주파수 자원 사용이 허용되므로 2차 사용자는 주파수 자원이 1차 사용자에게 의하여 사용되고 있는지 센싱(sensing)을 통하여 확인하여야 한다[2].

2차 사용자가 1차 사용자의 주파수의 사용 상태를 센싱하기 위하여 에너지 검출 기법, 신호의 통계적 특성을 이용한 검출 기법, 상관기를 사용하는 기법 등 다양한 기법을 사용할 수 있다[3]-[7]. 2차 사용자의 경우 1차 사용자의 신호를 검출함에 있어 동기를 맞추기 어려운 문제점이 있어, 신호 수신에 위한 동기 획득이 필요 없는 에너지 검출 기법이 가장 널리 연구되고 있다[3]. 에너지 검출 기법은 미리 정해진

길이의 시간동안 1차 사용자의 수신 신호를 수신하여 수신 신호의 전력을 측정하여 1차 사용자가 주파수를 점유하고 있는지 판단하게 된다. 다만, 2차 사용자의 무선통신이 이루어지는 장소는 1차 사용자로부터 매우 멀리 떨어져 있다고 일반적으로 가정하고 있다[3][4]. 따라서 1차 사용자 신호의 에너지를 검출하고자 하여도 신호 대 잡음비가 매우 낮은 상태에서 센싱이 이루어져야 한다는 문제가 있다. 1차 사용자의 신호를 수신하는 시간(센싱 기간)을 길게 하여 더 많은 수신 전력을 축적하면 검출 정확도가 증가하게 된다. 또는 복수의 2차 사용자가 센싱을 실시하여 센싱 된 정보를 모아 1차 사용자의 통신 유무를 판단한다. 이러한 센싱 기법을 협력 센싱 기법이라고 한다[5]. 센싱의 성능은 센싱 기간이 길수록, 센싱 기간이 동일하다면 센싱에 참여하는 2차 사용자 수가 많을수록 향상 된다[5]-[7].

인지 무선 통신은 기기 간 통신(machine-to-machine communication, M2M)을 위한 적합한 통신 환경을 제공한다[8][9]. 많은 수의 기기종 M2M 노드가 동작하는 통신환경에서 인지 무선 통신의 유휴 주파수 자원을 찾아내고 간섭을 피하는 기술이 필수적이기 때문이다. M2M 통신의 대표적인 응용 분야는 원격 의료 진료 서비스인데, 이 경우 또한 몸에 부착된 많은 수의 의료 센서들에 무선 통신 기능을 부여하고, 측정된 바이오 정보를 수시로 무선 통신을 이용하여 전송하게 된다[9]. 이 때 안전한 정보 전송을 위하여 정확한 센싱에 의하여 간섭 없는 주파수 자원을 획득하는 것은 필수적이다. 다만 의료용 센서와 같이 배터리로 동작할 수밖에 없어 에너지 제한적인 상황에 있는 경우 효율적인 에너

† 교신저자, 정회원 : 상명대학교 정보통신공학과 조교수

E-mail : hhwang@smu.ac.kr

* 비 회원 : 한국전자통신연구원 선임 연구원

** 비 회원 : 한국교토대학교 전자공학과 조교수

접수일자 : 2013년 11월 14일

수정일자 : 2013년 11월 27일

최종완료 : 2013년 11월 28일

지 관리가 필요하며, 간접 제어를 위한 센싱에 있어서도 센싱의 정확도를 향상시키면서 에너지 효율적인 기법을 개발하기 위한 분석적인 접근이 필요하다.

본 논문에서는 인지 무선 통신 환경에서 동작하는 M2M 기기들이 에너지 효율적으로 센싱 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 연구하고자 한다. 일반적으로 가장 널리 사용되는 에너지 검출 기법에 의한 센싱을 고려하며 에너지 효율적인 협력 센싱을 위한 성능 평가 지표를 도출한다. 지금까지 진행된 협력 센싱 기법 연구에서 센싱 정확도를 향상시키기 위한 다양한 기법들이 제안되었으나[3]-[7], 센싱을 위하여 사용되는 에너지를 고려한 센싱 성능을 분석하는 연구는 진행되지 않았다.

에너지 검출 기법을 사용하는 센싱의 경우 센싱 시간과 센싱에 참여하는 2차 사용자 수가 증가함에 따라 센싱 성능이 향상된다[5][7]. 한편, 센싱 시간과 센싱에 참여하는 2차 사용자의 수가 증가하게 되면, 일 회 센싱을 위한 에너지 소비 또한 증가하게 되므로 결국 센싱의 정확도는 센싱을 위하여 소비된 에너지의 양의 함수임을 직관적으로 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 한정된 에너지가 주어진 가운데 센싱 시간과 2차 사용자 수에 따른 센싱 성능 trade-off 관계를 수치적으로 분석하고, 한정된 에너지 내에서 최적의 센싱 성능을 보일 수 있는 센싱 시간의 길이와 협력 센싱에 참여하는 2차 사용자 수를 결정하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

인지 무선 통신 시스템에서 복수의 2차 사용자는 1차 사용자의 주파수 사용을 검출해내기 위하여 센싱을 실시한다. 1차 사용자는 원거리에 위치하므로 2차 사용자들의 위치와 상관없이 1차 사용자와 2차 사용자들 간 거리는 동일하다고 가정할 수 있다. 따라서 모든 2차 사용자는 1차 사용자로부터 동일한 평균 수신 강도를 가지는 신호를 수신하게 된다. 이러한 가정은 본 논문이 다루고 있는 기술 분야에서 일반적으로 사용되고 있는 것이다[3]-[5].

본 논문에서 사용하는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 2차 사용자는 T_s 시간 동안 1차 사용자의 신호 유무를 센싱하고, 각 2차 사용자 사용자는 가장 널리 사용되는 에너지 검출 기법을 이용하여 센싱 결과를 얻는다. 센싱 결과는 1차 사용자의 신호가 있거나 없는 것을 판정하므로 0과 1의 이진 데이터로 표현이 가능하다. 본 논문에서 고려되는 무선 통신 시스템은 저전력 시스템으로 센싱 결과를 최소 정보로 표현하여 센싱 정보 결합 센터(fusion center)로 전송하고, 결합 센터는 수신된 센싱 정보를 바탕으로 최종적인 1차 사용자가 주파수를 사용하고 있는지 유무를 판정한다. 이 때 센싱 정보 결합 센터는 다수결에 의한 결정(majority rule)을 사용한다.

본 논문의 목적은 에너지 제한적 환경에서 최적의 센싱 성능을 이끌어 내는 것을 목표로 하며, 따라서 협력 센싱을 수행함에 있어 실제적으로 필요한 에너지를 정의한다. 2차 사용자가 센싱하기 위하여 사용되는 에너지 단위를 E_s 로 정의한다. 실제 에너지 검출 기법을 사용하게 되면 센싱 성능은 센싱 시간인 T_s 에 따라 증가하게 되지만, 동시에 센싱에 사용되는 에너지 또한 증가하게 된다. 협력 센싱을 수행

하기 위하여 각 단말은 결과를 피드백하기 위한 에너지를 소비하게 되며 노드 별 E_C 만큼의 에너지를 소비한다.

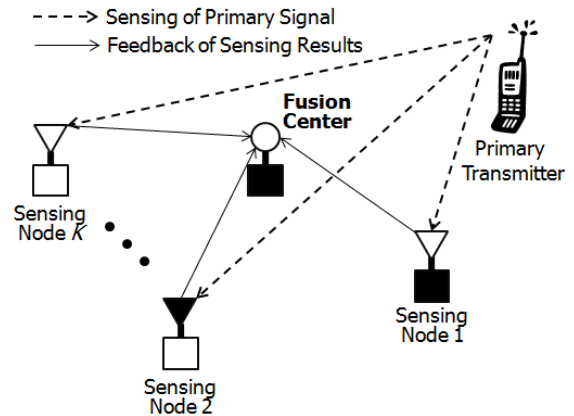


그림 1 협력 센싱을 위한 시스템 모델
Fig. 1 System model for cooperative sensing

2.2 에너지 제한된 센싱 기법의 성능 평가

본 논문에서 가정하고 있는 에너지 검출 기법을 사용하고 있는 경우 센싱 시간에 따른 센싱의 정확도는 다음과 같은 수식으로 표현된다[3][7].

$$P_D(T_s) = Q\left(\frac{1}{1+\gamma} Q^{-1}(P_{FA}) - \sqrt{T_s} \gamma\right) \quad (1)$$

수식 (1)에서 γ 는 1차 사용자와 2차 사용자 사이의 신호 대 잡음비이며, P_{FA} 는 1차 사용자의 수신 신호가 존재하지 않음에도 불구하고 1차 사용자의 신호가 있다고 잘못된 검출 결과가 발생할 확률이다. 일반적으로 동일한 신호 대 잡음을 가정하였을 때 목표로 하는 P_{FA} 값을 낮추게 되면 P_D 값은 증가하도록 두 값은 상호 연관되어 변화하며 P_{FA} 을 목표값으로 고정하고 T_s 에 따라 센싱에 의한 검출 확률을 관찰하게 된다[3].

저전력 에너지를 사용하여 에너지 제한적 환경에서 동작하는 무선 통신 네트워크에서 센싱을 위하여 할당 되어 있는 최대 에너지를 E 라고 하고, K 개의 2차 사용자가 센싱에 참여하는 협력 센싱 기법을 사용하게 되며, 이 때 소비되는 에너지 E_T 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_T = K \cdot E_C + M \cdot E_s \quad E_T \leq E \quad (2)$$

수식 (2)에서 E_s , E_C 는 2차 사용자 각각의 센싱 성능을 개선하기 위한 에너지를 정량화한 것이다. 한 개의 센싱 샘플 구간에 소비된 에너지가 E_s 라고 할 때 센싱 시간 T_s 를 M 개의 센싱 샘플 구간으로 표현하게 되면, 센싱 샘플 구간이 증가함에 따라 센싱 시간이 증가하는 것을 이산적으로 표현하여 계산할 수 있게 된다. 수식 (2)에서 K 는 협력 센싱을 수행하는 2차 사용자의 수가 된다. 협력 센싱 또한 센싱 정보를 제공하는 노드의 수가 증가하게 되면 센싱 정확도가 향상되게 되므로, 수식 (2)로부터 협력 센싱에 참여하

는 2차 사용자의 수를 증가시키는 것과 센싱 기간을 증가시키는 것이 센싱 정확도를 향상시키는 것에 미치는 기여도에 대하여 알아 볼 필요가 있다.

수식 (2)에서 주어진 에너지 한도 내에서 협력 센싱에 참여할 수 있는 노드의 수는 다음 식과 같이 주어진다.

$$K = \lfloor \frac{E - M \cdot E_s}{E_c} \rfloor \quad (3)$$

$\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크지 않은 최대 정수가 된다. 에너지 한도 E 값은 고정되어 있으므로 E_s 가 증가하게 되면 협력 센싱 노드 수가 감소하게 되고, 개별 2차 사용자의 센싱 성능에 대한 중요도를 낮추고, 협력 센싱에 의한 센싱 성능 개선 효과에 중요도를 강조하기 위하여, 센싱 기간을 감소시키고 K 값을 증가시켜 협력 센싱에 참여하는 2차 사용자 수를 증가시키면 된다.

본 논문에서 고려하고 있는 이진 센싱 정보 피드백에 의하여 다수결 결정방식을 사용하는 것에 의한 센싱 성능을 평가해 보면, K 개의 2차 사용자 중 k 개의 2차 사용자가 1차 사용자의 신호가 수신된 것으로 판단하는 경우 이항 분포(Binomial distribution)에 의해서 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$P_D(k) = P_D^k \cdot (1 - P_D)^{K-k} \quad (4)$$

협력 센싱 기법에서 다수결에 의하여 1차 사용자 신호 검출이 결정되려면 협력 센싱에 참여하는 총 K 개의 2차 사용자 중 $\lfloor \frac{K}{2} \rfloor$ 이상의 2차 사용자가 1차 사용자의 신호가 검출되었음을 보고하여야 한다. $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 큰 최소 정수를 의미한다. K 개의 2차 사용자들로부터 이진 피드백을 수신하는 센싱 정보 결합 센터에서 다수결에 의한 결정 기법을 사용하였을 때 1차 사용자의 검출 확률(detection probability)은 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$P_D(K) = \sum_{k=\lfloor \frac{K}{2} \rfloor}^K \binom{K}{k} \cdot P_D(k) \quad (5)$$

수식(5)를 이용하여 센싱을 위하여 에너지가 제한된 상황에서 협력 센싱에 의하여 도달할 수 있는 1차 사용자 신호의 검출 확률을 평가할 수 있다.

그림 2에 수식 (5)를 이용한 검출 확률을 도시하였다. 수신 신호 대 잡음비가 -10dB인 상황을 고려하였다. -10dB은 1차 사용자가 매우 먼 거리에서 신호를 송신하는 인지 무선 통신 센싱 시나리오에서 일반적으로 가정하는 수치에 해당한다[3]-[5]. 그림 2 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 검출 확률은 특정한 센싱 샘플 구간의 수에서 최대값을 갖는다. 이러한 결과가 관찰되는 이유는 개별 노드의 센싱 정확도가 일정 값 이상을 유지해 주어야 협력 센싱을 하는 것에 의한 성능 개선 효과를 볼 수 있기 때문이다.

너무 작은 M 값을 사용하게 되면 센싱에 참여하게 되는 노드 수는 증가하나 개별 센싱 노드의 센싱 정확도가 너무 낮아 부정확한 센싱이 될 수 있으며, 너무 큰 M 값을 사용하게 되면 협력 센싱에 참여하는 노드 수가 매우 적어지므로

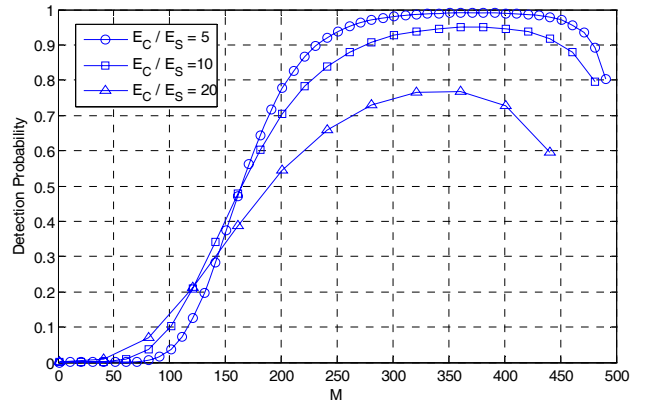


그림 2 소비되는 에너지를 고려한 검출 성능

Fig. 2 Detection probability considering consumed energy

협력 센싱의 효과를 얻을 수 없게 된다. 협력 센싱을 위하여 센싱 결과를 수신하고 처리하는 것에 센싱 샘플 수신 대비 너무 많은 에너지를 소비하게 되면 협력 센싱에 참여하는 노드의 수가 감소하게 되므로 E_C/E_s 값이 클수록 검출 정확도는 감소하게 된다.

협력 센싱의 검출 확률을 평가하기 위하여 다음과 같은 두 가지 성능 평가 기준을 제시할 수 있다. 첫 번째 성능 평가 기준은 E_s 값을 변화시키면서 개별 2차 사용자의 센싱 정확도에 의한 협력 센싱의 성능을 관찰하는 것이다. 식 (3)에서 E 와 E_c 값이 정해지면 협력 센싱에 참여하는 2차 사용자 수인 K 값도 결정된다. 따라서 이 때 성능을 검증하기 위한 성능 평가 기준은 수식에 의하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_D(K^*) = \underset{K}{\operatorname{argmax}} P_D(K) \quad (6)$$

수식 (6)에서 $P_D(K)$ 를 최대로 만드는 협력 센싱을 위한 2차 사용자 수는 K^* 이며, 수식 (3)의 관계로부터 K^* 에 대응되는 개별 노드의 센싱 에너지는 M^* 로 표현할 수 있다.

표 1에 제시되어 있는 결과와 같이 주어진 센싱 환경에 따라 센싱의 정확도를 높이기 위한 시간과 협력 센싱에 참여하게 되는 무선 단말들의 수가 변화하는 것을 볼 수 있다.

표 1 센싱 조건 별 최적화된 시스템 파라미터

Table 1 Optimized system parameter based on sensing environments

	$\gamma = -10\text{dB}$ $P_{FA} = 0.1$ $E = 500$	$\gamma = -10\text{dB}$ $P_{FA} = 0.05$ $E = 500$	$\gamma = -7\text{dB}$ $P_{FA} = 0.1$ $E = 250$	$\gamma = -7\text{dB}$ $P_{FA} = 0.05$ $E = 250$
$E_C / E_s = 5$	$M^* = 371$ $K^* = 25$	$M^* = 421$ $K^* = 15$	$M^* = 161$ $K^* = 17$	$M^* = 181$ $K^* = 13$
$E_C / E_s = 10$	$M^* = 381$ $K^* = 11$	$M^* = 421$ $K^* = 7$	$M^* = 161$ $K^* = 8$	$M^* = 161$ $K^* = 8$
$E_C / E_s = 20$	$M^* = 361$ $K^* = 6$	$M^* = 361$ $K^* = 6$	$M^* = 161$ $K^* = 4$	$M^* = 161$ $K^* = 4$

$\gamma = -10\text{dB}$ 인 경우를 가정하면, 더 낮은 P_{FA} 값을 달성하기 위하여 협력 센싱에 참여하는 노드 수 보다 각각의 센싱 노드의 센싱 정확도를 높이는 쪽으로 최적의 M^*, K^* 값이 결정됨을 알 수 있다. $\gamma = -7\text{dB}$ 인 경우가 되면 더 적은 수의 센싱 샘플 구간만을 이용하여도 최적 값이 도출된다. $\gamma = -7, -10\text{dB}$ 인 각각의 경우를 비교해 보면 $\gamma = -10\text{dB}$ 인 경우 $M^* + E_C/E_S^* K^*$ 의 값, 즉 최적의 검출 결과를 도출하기 위하여 사용한 총 에너지가 500에 근접해 있음을 알 수 있다. 500은 E 의 값으로 설정된 최대 사용 가능 에너지이다. 반면 $\gamma = -7\text{dB}$ 인 경우 $M^* + E_C/E_S^* K^*$ 의 값은 대략 300 근처가 됨을 알 수 있다. 즉 허용된 최대 에너지를 사용할 필요 없이 최적의 검출 확률을 얻을 수 있는 시스템 설정 값을 알 수 있다는 의미가 된다.

2.3 협력 센싱을 위한 센싱 정보 피드백 프로토콜

협력 센싱을 개별 2차 사용자들이 센싱 정보 결합 센터로 센싱 결과를 피드백 해주어야 하며, 식 (2)에서 고려하고 있는 이상적인 피드백 상황과 달리 임의의 개수의 2차 사용자들로부터 K 개의 센싱 결과를 수집하는 것에는 피드백 수집을 위한 프로토콜이 필요하다. 특히 본 논문은 개방 루프 기반의 협력 센싱을 주제로 한 연구로 피드백을 위한 프로토콜로 슬롯으로 전송 시간이 구분되는 알로하 방식(slotted ALOHA, 이하 ‘알로하’라고 함)의 프로토콜을 사용한다.

N 개의 2차 사용자가 센싱을 실시하여 센싱 정보 결합 센터로 센싱 결과를 피드백하고, K 개의 센싱 결과가 수집되는데 필요한 시간과 전송 회수를 분석한다. 일반적인 알로하 프로토콜에서 모든 송신기는 특정 값의 확률로 지속적인 전송을 하지만, 센싱 결과 피드백의 경우 피드백을 성공한 2차 사용자는 더 이상 전송을 하지 않게 된다. 그러나 분석상의 편의를 위하여 $N \gg K > 1$ 라고 가정한다.

임의의 슬롯에서 센싱을 완료한 N 개의 2차 사용자중 임의의 2차 사용자가 피드백 정보를 전송할 확률은 p_T 라고 한다. 이 때 특정 슬롯에서 전송이 성공할 확률 P_S 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_S = \frac{N \cdot p_T \cdot (1-p_T)^{N-1}}{1-(1-p_T)^N} \quad (7)$$

K 개의 피드백 정보가 전송되어야 협력 센싱을 위한 정보 수집이 완료된다. 그러나 알로하 프로토콜을 사용하게 되면 특정 슬롯에서 아무것도 전송되지 않거나, 두 개 이상의 2차 사용자의 피드백 전송에 의하여 충돌에 의한 데이터 손실이 발생할 수 있으므로 실제로 K 개의 슬롯만으로 피드백 정보 수집이 완료될 확률은 매우 적고 일반적으로 K 개를 초과하는 슬롯들이 사용된 후 피드백 정보 수집이 완료될 가능성이 높다. 이 때 협력 센싱을 성공적으로 마치기 위한 시간과 소비되는 에너지에 대하여 분석해 보도록 한다.

그림 3에 세 가지 협력 센싱 정보 전송 상황이 도시되어 있다. 아무 표시가 없는 사각형은 어떤 협력 센싱에 참여하는 단말도 신호를 전송하지 않는 슬롯이다. X 표시가 된 슬롯은 두 개 이상의 단말이 동시에 센싱 정보를 전송한 슬롯

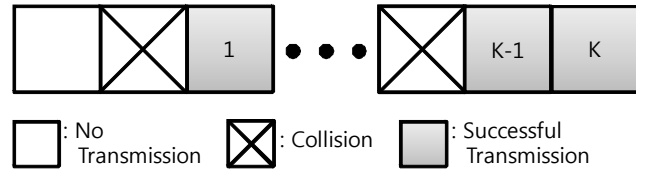


그림 3 임의의 접속 충돌 확률
Fig. 3 Collision probability in random access

이다. 이 때 두 신호의 충돌(Collision)에 의한 간섭으로 어떤 신호로 협력 센싱 정보로 활용할 수 없게 된다. 회색 음영으로 채워져 있으면서 1 부터 K 까지 숫자가 표시된 슬롯이 센싱 정보를 성공적으로 전송한 슬롯이다. 임의의 슬롯에서 아무것도 전송하지 않았거나, 충돌이 발생하여 슬롯이 소비될 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_L = (1-p_T)^N + (1-p_S)(1-(1-p_T)^N) \quad (8)$$

반대로, 특정 슬롯에서 센싱 정보가 전송되어 성공할 확률은 $P_S = 1 - P_L$ 로 표현될 수 있다.

표 1에 제시되어 있는 바와 같이 상황 별로 협력에 참여해야 하는 최적의 단말의 수가 정해져 있으므로 K 개의 성공적인 센싱 정보가 센싱 정보 결합 센터에 성공적으로 수신될 때 까지 걸리는 시간에 대하여 분석해 볼 필요가 있다. 다양한 경우의 수를 고려하여야 한다. 매우 운이 좋다면, 단 K 개의 슬롯만을 이용하여 성공적으로 K 개의 센싱 노드의 센싱 정보를 수집할 수 있을 것이다. 그러나 이렇게 될 확률은 매우 낮다. 연속한 K 개의 슬롯 각각에서 하나의 노드만 전송하게 되어 성공할 확률은 P_S^K 가 될 것이다. 추가적인 예로 K 개의 슬롯 중 하나의 슬롯에서 충돌 또는 아무도 전송하지 않는 상황이 발생하게 되고 $K-1$ 개 노드의 센싱 정보가 정확하게 전송된 상태에서 $K+1$ 번째 슬롯에서 마침내 K 번째 센싱 정보가 성공적으로 전송될 확률은 다음과 같이 계산될 수 있을 것이다.

$$P(K+1) = \binom{K}{1} P_L \cdot P_S^K \quad (9)$$

위에서 살펴본 바와 같이 센싱에 필요한 최소 슬롯 수는 K 개 이고, 확률적으로 K 를 초과하는 수의 슬롯들이 사용될 가능성이 높으므로 이러한 경우의 수에 대하여 확률로 일반화하여 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(K+i) = \binom{K+i-1}{i} P_L^i P_S^K \quad (10)$$

수식 (10)에서 i 의 값은 0부터 ∞ 값을 가질 수 있으므로 K 개의 센싱 정보를 성공적으로 모으기 위하여 소비되는 평균 슬롯 수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$T(K) = \sum_{i=0}^{\infty} (K+i) \cdot P(K+i) = K(1-P_L)^{-(K+1)} P_S^K \quad (11)$$

수식 (11)에서 알 수 있듯이 K 값이 미리 정해져 있는 값이므로, P_S 를 극대화 함으로써 전송 시간을 최소화할 수 있다는 결론이 도출됨을 알 수 있다.

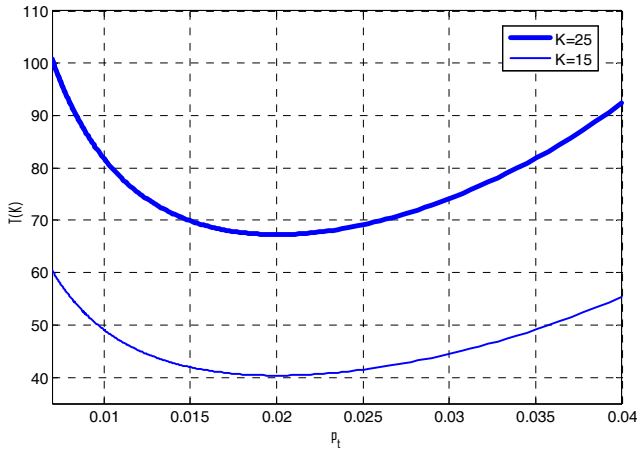


그림 4 p_t 에 따른 협력센싱 시간 최소화
 Fig. 4 Minimization of sensing time based on p_t

수식 (8)로부터 P_S 를 구해보면 다음과 같이 표현된다.

$$P_S = N \cdot p_T \cdot (1 - p_T)^{N-1} \quad (12)$$

수식 (12)은 p_T 의 값이 $1/N$ 에서 최대값을 갖게 됨을 p_T 에 대한 미분식으로부터 알 수 있다. 즉 수집되어야 하는 정보의 수 K 만큼 실제 센싱에 참여하고 있는 노드의 수 N 또한 센싱 성능을 최적화하기 위하여 반드시 파악해야 하는 값을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 협력 센싱 기법의 정확도를 높이는 문제에서 벗어나, 사용할 수 있는 에너지의 총량이 제한된 M2M 환경에서 인지 무선 통신 시스템의 센싱 성능을 에너지 최적화하기 위한 프로토콜을 제시하고 분석하였다. 기존의 협력 센싱 기법에서는 많은 수의 노드가 참여할수록 센싱 정확도가 향상되었던 반면, 소비되는 에너지를 고려하게 되면 일정한 수의 센싱 노드 수에서 센싱 정확도가 최대가 됨을 알 수 있었으며, 이러한 현상은 단일 센싱 노드의 센싱 시간과 협력 센싱에 참여하는 노드들의 수에 대한 관계로 분석되었다. 주어진 센싱 환경에 따라 최적의 협력 센싱 성능을 끌어내기 위한 개별 노드들의 센싱 시간 및 협력에 참여하는 최적의 노드 수가 실험을 통하여 제시되었다. 다음으로 개별 센싱 노드들이 센싱 정보를 피드백하기 위한 방법으로 슬롯화된 알로하 방식의 프로토콜을 제시하고, 이 때 협력 센싱이 완료되기까지 센싱 정보 수집에 필요한 시간을 분석하였다. 이로부터 M2M 인지 무선 통신 네트워크에서 협력 센싱이 수행되게 될 때, 협력 센싱 성능을 한정된 에너지

내에서 최적화하기 위하여 수집하여야 할 센싱 정보의 수 K 뿐만 아니라, 실제 센싱을 수행하고 있는 네트워크 내 2차 사용자의 수 N 또한 파악되어 활용되어야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A1042813)

참 고 문 헌

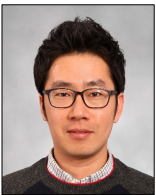
- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software morepersonal," *IEEE Personal Commun. Mag.*, vol. 6, no. 4, pp. 13 - 18, Aug.1999.
- [2] Zeyang Dai, Jian Liu, Zhi Sun and Keping Long, "Efficient secondary access with intelligent spectrum sensing in cognitive radio networks," *International Journal of Communication Systems*, 18 Sep. 2013, DOI: 10.1002/dac.2608.
- [3] Y. Zeng and Y. C. Liang, "Eigenvalue-based spectrum sensing algorithms for cognitive radio," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 6, pp. 1784 - 1793, Jun. 2009.
- [4] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H. Poor, "Collaborative cyclostationary spectrum sensing for cognitive radio systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 11, pp. 4182 - 4195, Nov. 2009.
- [5] Xin Liu and Xuezhi Tan, "Optimization algorithm of periodical cooperative spectrum sensing in cognitive radio," *International Journal of Communication Systems*, 31 May 2012, DOI: 10.1002/dac.2377.
- [6] Tugnait, J.K, "On Multiple Antenna Spectrum Sensing Under Noise Variance Uncertainty and Flat Fading," *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 60, no. 4, pp. 1823 - 1832, Apr. 2012.
- [7] S. Kim, J. Lee, H. Wang, and D. Hong, "Sensing performance of energy detector with correlated multiple antennas," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 671 - 674, Aug. 2009.
- [8] H. Wang and C. Woo, "Energy-Efficient Random Access for Machine- to-Machine (M2M) Communications," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 7, no. 1, pp. 189-200, Feb. 2013.
- [9] E. Z. Tragos, "Cognitive radio inspired M2M communications," *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2013.

저 자 소 개



노 고 산 (盧 高 山)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2007년과 2012년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 한국전자통신연구원 선임 연구원으로 근무하고 있다. 관심분야는 5G시스템이다.



임 성 묵 (林 成 默)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2005년과 2012년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 한국교통대학교 전자공학과 조교수로 근무하고 있다. 관심 연구 분야는 인지 무선 통신 시스템이다.



왕 한 호 (王 瀚 鎬)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2004년과 2010년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 상명대학교 정보통신공학과 조교수로 근무하고 있다. 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 인지 무선 통신 시스템이다.