

# 인지 라디오 RF 하베스팅 IoT 네트워크의 자원 최적화

서 동 호\*, 남 해 운\*, 오 장 훈°, 최 세 영<sup>oo</sup>

## Optimization of the Resource for Cognitive Radio RF Harvesting IoT Networks

Dongho Seo\*, Haewoon Nam\*,  
Janghoon Oh°, Seyeong Choi<sup>oo</sup>

### 요 약

본 논문에서는 RF 에너지 수집이 가능한 인지 무선 IoT 센서로 구성된 다중 채널 네트워크 환경에서 협력적 센싱 방식을 이용한 시스템의 네트워크 처리량 성능을 분석한다. 이를 위해 센싱 시간에 따른 최적화 문제를 도출하고 Monte-Carlo 모의 실험을 통하여 최적화 센싱 시간과 이에 따른 네트워크 전체 처리량 및 에너지 수집량 성능을 검증하고 분석한다.

**Key Words** : Cognitive radio, Energy harvesting  
Cooperative spectrum sensing, IoT  
sensor

### ABSTRACT

In this paper, we analyze the performance of the network throughput in the multi-channel network environments in which cooperative sensing is used. The network consists of the cognitive wireless IoT sensors which are capable to harvest RF energy. We optimize the sensing time and verify the network throughput / energy harvesting performance by using Monte-Carlo simulation.

## I. 서 론

최근 초소형 센서를 이용한 IoT 네트워크 시스템 기술 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이에 따라 초소형 센서의 성능 향상 및 수명 연장을 위한 효율적인 에너지 관리 기술들이 주목받고 있으며 그 중에서도 에너지 수집 (Energy harvesting) 기술은 무선통신 시스템의 다양한 분야에서 제한된 에너지 자원을 사용하여 네트워크의 수명을 효과적으로 연장할 수 있는 핵심 기술로써 주목받고 있다<sup>1,2)</sup>.

본 논문에서는 RF 에너지 수집이 가능한 인지 무선 초소형 IoT 센서로 구성된 다중 채널 네트워크 환경에서 협력적 센싱 (Cooperative sensing) 방식을 이용한 센싱 성능 향상과 센싱 시간의 최적화 도출을 위해 Monte-Carlo 모의실험을 진행하며, 이를 통한 네트워크의 전체 처리량과 RF 에너지 수집량 결과와 성능 분석을 제시하고자 한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는  $K$ 개의 우선 사용자 (Primary User, PU) 채널과 충전 가능한 배터리를 가진  $N$ 개의 인지 IoT 센서로 이루어진 네트워크 환경을 고려한다.  $k$ -PU ( $k = 1, 2, \dots, K$ ) 송수신기와 IoT 센서 네트워크까지의 거리 및  $i$ -센서와  $j$ -센서간의 거리를 각각  $R_k$ ,  $r_{i,j}$ 로 정의하며 ( $i \neq j$ ),  $R_k \gg r_{i,j}$ 라고 가정한다. 센서는 에너지 검파 방식을 이용하여 PU의 채널 사용 여부를 확인하며, 이 때  $M$ 개의 표본을 통해 얻은 에너지 값  $E_n$ 은 표본의 숫자가 충분히 크다면 ( $M \geq 10$ <sup>3)</sup>) 중심 극한 정리에 의해 식 (1)과 같이 평균과 분산 값을 갖는 정규 분포로 근사화 시킬 수 있다<sup>4,5)</sup>.  $H_0$ 와  $H_1$  가설은 각각 우선 사용자가 해당 채널을 사용하지 않을 때와 사용할 때를 의미하며 이때  $v_k(n)$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_v^2$ 인 부가백색가우스잡음이라 가정하며 신호  $s(n)$ 의 평균과 분산은 각각 0과  $\sigma_s^2$ 이다.

\* 본 연구는 한국연구재단 논문연구과제(NRF-2017R1D1A1B03027926) 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-3394-3422) Dept. of Elec. and Comm. Eng., Hanyang University, johnseo@hanyang.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0071-4228) Dept. of Info. and Comm., Kyungmin University, janghoh@kyungmin.ac.kr, 정회원

oo Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-1888-9165) Dept. of Info. and Comm. Eng., Wonkwang University, sychoi@wku.ac.kr, 종신회원

\* (ORCID:0000-0001-9847-7023) Dept. of Elec. and Comm. Eng., Hanyang University, hnam@hanyang.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201903-485-A-LU, Received March 4, 2019; Revised April 2, 2019; Accepted April 10, 2019

$$E_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |x_n(m)|^2 \sim \begin{cases} \mathbf{N}(\sigma_v^2, \frac{1}{M}\sigma_v^4), & H_0 \\ \mathbf{N}\left(\left(\frac{\sigma_s^2|h_k|^2}{\sigma_v^2} + 1\right)\sigma_v^2, \frac{\sigma_v^4}{M}\left(\frac{2\sigma_s^2|h_k|^2}{\sigma_v^2} + 1\right)\right), & H_1. \end{cases} \quad (1)$$

$h_k$ 는  $k$ -PU와 IoT 센서 사이의 채널 이득이며 앞에서 가정한  $R_k \gg r_{i,j}$  조건을 통해 모든 센서와  $k$ -PU 사이의 채널 이득은 동일하며, 한 프레임 안에서 그 값은 변하지 않는다고 가정한다. 각 센서는 경관정 값(hard decision)을 이용하여 따라서  $E_n$ 이 문턱값( $\eta$ )보다 클 경우 PU가 해당 채널을 사용한다고 판단하며 그렇지 않을 경우 비어있다고 판단한다.

프레임이 시작될 때 모든 센서는 식 (2)와 같이 잔류 에너지( $E_{R,n}$ )를 스펙트럼 센싱과 데이터 전송을 위해 필요한 최소 에너지 기준값( $E_{th}$ )과 비교하여 2진 표시자(binary indicator,  $\psi_n$ ) 값을 정하여 그림 1와 같이 해당 프레임에서의 동작을 결정한다.

$$\psi_n = \begin{cases} 1, \dots E_{R,n} \geq E_{th} \\ 0, \dots otherwise \end{cases} \quad (2)$$

$\psi_n$ 이 1인 경우엔  $K$ 개의 채널 중 하나에 할당되어  $\tau_s$  동안 센싱을 진행하고  $\tau_t$  동안 데이터를 전송하며,  $\psi_n$ 이 0인 경우  $\tau_s$  동안에는 Idle 상태로 대기하며 센싱이 끝난 후 PU가 사용 중이라고 판단된 채널에 할당되어  $\tau_t$  동안 무선 전력 수집을 진행한다.  $k$ -채널에서 수집할 수 있는 평균 에너지는 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$E_k^H = \tau_t \mu p_a^{[k]} P_d^{[k]} \sigma_v^2 (\gamma_k + 1) \quad (3)$$

이때,  $\mu$ 와  $\sigma_{s,k}^2$ 는 각각 에너지 수집 효율과 PU 송신기의 송신 파워를 의미한다. 모든 센서는 오직 하

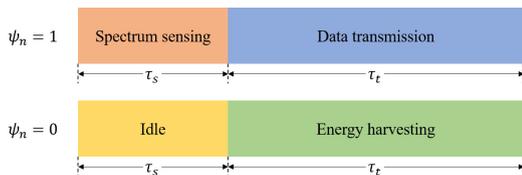


그림 1. 2진 표시자에 따른 프레임 내의 동작  
Fig. 1. The active mode in a frame based on a binary indicator

나의 채널에만 할당되며 이 또한 식 (4)와 같이 2진 표시자( $I_{n,k}$ )를 이용하여  $n$ -센서가  $k$ -채널에 할당될 경우 이 값은 1로 나타내며 그 외의 채널에 대해서는 모두 0의 값을 갖게 된다.

$$I_{n,k} = \begin{cases} 1 \dots allocate\ on\ k^{th}\ channel \\ 0 \dots otherwise \end{cases} \quad (4)$$

### III. 제안하는 알고리즘

IoT 센서를 할당할 때에는 채널에 따라 PU 송신기와 IoT 네트워크까지의 거리, 신호 대 잡음비 및 PU 채널의 사용 빈도가 다르므로 다양한 채널 특성을 고려하여야 한다. 본 논문에서는  $k$ -PU 채널이 사용될 확률 (active probability)을  $p_a^{[k]}$ 로 정의하며 각각의 채널은 서로 다른  $p_a$ 를 갖는다고 가정한다. 또한 PU와 IoT 네트워크 간의 거리( $R_k$ )가 센서간의 거리( $r_{i,j}$ )에 비해 매우 큰 값을 갖기 때문에 모든 센서는 동일한 채널에서 검출 확률 (detection probability)  $p_d^{[k]}$ 와 오정보 확률(false alarm probability)  $p_f^{[k]}$  성능이 동일하다고 정의할 수 있다. 융합 센터는 센싱에 참여하는 센서들( $\psi_n = 1$ )의 경관정 값과 OR 규칙을 이용하여 다음과 같이  $k$ -채널의 검출 확률과 오정보 확률을 계산할 수 있다.

$$P_d^{[k]} = 1 - (1 - p_d^{[k]})^{\sum_{n=1}^N I_{n,k}\psi_n} \quad (5)$$

$$P_f^{[k]} = 1 - (1 - p_f^{[k]})^{\sum_{n=1}^N I_{n,k}\psi_n}$$

PU가 채널을 사용하고 있지 않을 때 센싱 결과 또한 올바르게 판단했을 경우  $k$ -채널의 평균 처리량은 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_k = \frac{T - \tau_s}{T} p_a^{[k]} (1 - P_f^{[k]}) \log_2 \left( 1 + \frac{P_{t,n} |g_k|^2}{\sigma_v^2} \right) \quad (6)$$

이때  $p_{t,n}$ 은  $k$ -채널에 할당된 센서들 중 데이터 전송에 선택된 센서의 송신파워를 의미한다. 오검출확률로 인해 발생할 수 있는 PU에게 끼치는 간섭을 효과적으로 방지하기 위해 목적 검출확률( $P_{d,t}$ ) 조건을 만족한 채널에서만 데이터 전송이 가능하다. OR 규칙을 이용하여 목적 검출확률 조건을 만족하는  $k$ -채널의 할

당 센서 최소 숫자는 다음과 같다.

$$N_{\min}^{[k]} = \lceil \log_{(1-p_d^{[k]})} (1-P_{d,t}) \rceil \quad (7)$$

제안하는 알고리즘의 목적은  $\tau_s$ 의 최적화를 통하여 네트워크의 전체 처리량을 최대화 하는 것이며, 이에 대한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \max_{\tau_s} & \sum_{k=1}^K \frac{T-\tau_s}{T} (1-p_a^{[k]})(1-p_f^{[k]}) N_{\min}^{[k]} \log_2 \left( 1 + \frac{p_{t,n} |g_k|^2}{\sigma_v^2} \right) \\ \text{s.t.} & \sum_{k=1}^K I_{n,k} = 1 \quad \forall n, \\ & \psi_n \in \{0, 1\}, I_{n,k} \in \{0, 1\} \quad \forall n, k, \\ & p_{t,n} |h_k|^2 \leq I_{\max} \quad \forall k \end{aligned} \quad (8)$$

#### IV. 성능 결과 및 결론

표 1과 같이 모의실험 변수 값을 설정하여 Monte-Carlo 모의실험을 통해 채널 개수(K)와 센싱 시간( $\tau_s$ )의 변화에 따른 처리량과 에너지 수집량의 성능을 분석하였다.

그림 2는  $N=50$ ,  $P_{d,t}=0.95$ ,  $f_s=5\text{kHz}$  일 때 네트워크 전체 처리량을 보인 것이다.  $\tau_s$ 가 짧아질수록  $p_f$  값이 커지며 이는 채널의 접근 확률 (access probability)을 낮추게 되며, 반대로  $\tau_s$ 가 길어지면 데이터 전송 시간이 줄어들기 때문에 처리량이 줄어들게 된다. 따라서, 처리량의 최대화가 되는 최적화  $\tau_s$  값(약 18ms)이 존재하게 됨을 확인할 수 있다. 또한 채널의 숫자가 증가할수록 가용한 채널의 숫자가 올라가기 때문에 네트워크 전체 처리량이 증가함을 확인할 수 있다.

그림 3은 센서와 채널의 숫자에 따른 네트워크 에너지 수집량을 나타내는데 그림 2와 다르게 채널이 증가할수록 센싱에 필요한 센서의 숫자가 증가하기 때문에 상대적으로 에너지 수집에 참여하는 센서의 수가 감소로 인해 처리량과 반비례 하는 것을 확인할

표 1. 모의실험 변수 설정 값  
Table 1. Simulation parameter setting

Simulation parameter	Values
Frame length (T)	100ms
Target detection probability	0.95
Sensing power	20mW
Data transmission power ( $p_{t,n}$ )	100mW
Harvesting efficiency( $\mu$ )	0.8

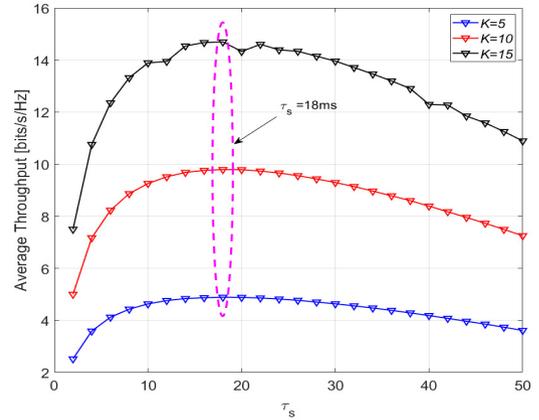


그림 2. 센싱 시간의 변화에 따른 네트워크 처리량 성능  
Fig. 2. Network throughput performance with varying sensing time

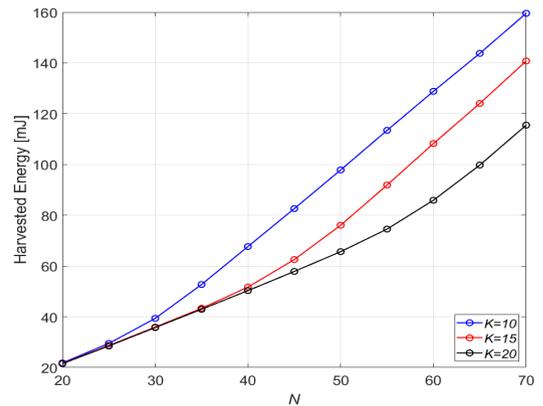


그림 3. IoT 센서 숫자의 변화에 따른 에너지 수집량 성능  
Fig. 3. Harvested energy performance with varying the number of IoT sensors

수 있다.

#### References

- [1] H. J. Visser and R. J. M. Vullers, "RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: Principles and requirements," in *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1410-1412, Jun. 2013
- [2] C. S. L. Renato and Y. H. Kim, "Multi-antenna wireless powered communications with non-linear energy harvesters," *J. KICS*, vol. 43, no. 12, pp. 2065-2068, Dec. 2018.
- [3] Z. Quan, S. Cui, and A. Sayed, "Optimal

linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 2, no. 1, pp. 28-40, Feb. 2008.

- [4] B. V. Gendenko and A. N. Kolmogorov, *Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables*, MA, USA: Addison-Wesley, 1954.
- [5] E. Peh, Y. Liang, Y. L. Guan, and Y. zeng, “Optimization of cooperative sensing in cognitive radio entworks: A sensing-throughput tradeoff view,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 5294-5299, Nov. 2009.