

협력 인지 무선 네트워크 양자화 비트 수 할당기법의 감지성능분석

신인태
국방기술진흥연구소

Detection Performance Analysis for Quantization Bit Allocation in Cooperative Cognitive Radio Networks

Intae Shin

Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement (KRIT)

요약 국방 분야에서 무인 및 유·무인 복합체계 발전이 강조되며, 향후 통신 소요 개체 수 증가에 따른 주파수 자원 부족 문제가 발생할 것이 우려되고 있다. 특히, 전시에는 기존 계획에 의해 확보한 통신 인프라에 발생할 수 있는 비상상황에 대비하여 통신 자원 준비가 필요하다. 이를 해결하기 위한 다양한 기술 중, 인지 무선(CR: Cognitive Radio) 기술은 주파수 자원 사용권을 가지지 못한 무선 기기가 스펙트럼 환경 측정을 통해 통신할 수 있게 하는 기술이다. 인지 무선 시스템에서 수 개의 무선 기기가 협력하여 스펙트럼 환경을 측정할 수 있는데 이 과정에서 측정된 정보의 양자화는 필수적인 과정이며, 이를 고려한 시스템의 정확한 스펙트럼 감지성능분석이 중요하다. 본 논문에서는 부 사용자마다 다른 양자화 비트 수를 활용하였을 때, 인지 무선 시스템의 감지성능을 시뮬레이션 수행을 통해 분석결과를 제시하였다.

Abstract There is a concern that there will be a shortage of frequency resources due to the increase in the amount of communication required in the future. The issue known as spectrum scarcity is emphasized due to the implementation of unmanned and manned-unmanned teaming systems. Particularly during wartime, it is crucial to allocate communication resources for potential emergency situations within the preplanned communication infrastructure. Among the various techniques proposed to address this issue, cognitive radio allows wireless devices that do not possess a spectrum license to communicate through spectrum environment sensing. Multiple wireless devices can collaborate for spectrum sensing, and quantization of the sensing information is essential. This paper presents the results of a performance analysis for a cooperative cognitive radio network using a quantization bit allocation scheme obtained through simulations.

Keywords : Drone, UAS, UAV, MUM-T, Cognitive Radio, Spectrum Sensing

1. 서론

우크라이나 전쟁에서 인공지능, 인공위성 등 다양한 첨단기술이 전쟁의 양상에 영향을 주며, 첨단기술의 국방적용에 대한 중요성이 인식되고 있다. 특히, 해당 전쟁에서 드론의 활약이 두드러지는데, 단순 정찰 임무뿐만 아니라 표적 무기체계를 직접 타격하는 등 다양한 임무

수행에 활용되고 있다[1].

한편, 우리나라 정부에서도 「국방혁신 4.0」을 발표하며, 첨단과학기술 및 무인 체계의 국방적용에 주목하고 있다[2,3]. 정부는 해당 정책을 통해 인공지능 기반의 핵심 첨단전력 확보와 유·무인 복합전투체계 구축을 단계적으로 추진하겠다고 발표했다. 또한, 무인 체계의 효율적 전력화를 위해, 필요한 주파수를 확보하고 활용하는

*Corresponding Author : Intae Shin(KRIT)

email: comsit@krit.re.kr

Received July 6, 2023

Accepted August 10, 2023

Revised July 21, 2023

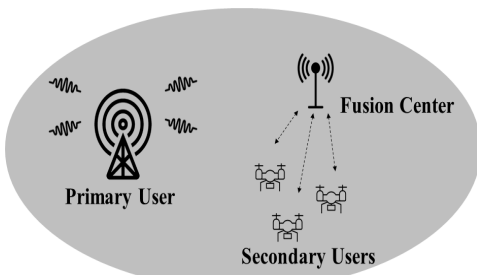
Published August 31, 2023

기술을 개발하는 등의 기반체계 구축이 필요하다고 인식하고 있다.

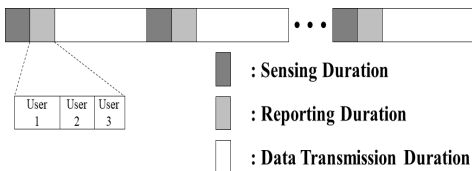
미래 첨단 무기체계 운용과 관련한 주파수 부족 문제를 해결하기 위해 다양한 연구들이 수행되었다[4-7]. 이 중, 같은 대역의 주파수 자원을 효율적으로 공유하여 사용하는 인지 무선 네트워크 기술은 주파수 사용권을 가지지 않은 부 사용자가 스펙트럼 환경 분석을 통해 주파수 자원을 활용할 수 있도록 하는 기술이다[7].

인지 무선 네트워크에서 스펙트럼 환경을 정확히 분석하기 위해, 여러 부 사용자가 협력하여 스펙트럼을 감지하는 시스템이 고안되어 많은 연구가 있었다[8-10]. 해당 시스템에서 부 사용자가 검출한 정보를 양자화하여 전달할 때에 발생하는 실제적인 왜곡 현상을 반영하여 감지성능을 분석하는 연구가 있었으며[11,12], 부 사용자가 수행하는 양자화 과정의 수준을 다르게 설정하여 시스템의 정보 전달량을 분석하는 연구도 있었다[13]. 하지만, 해당 양자화 과정의 수준을 달리하였을 때, 인지 무선 시스템의 본질적인 감지성능을 분석한 연구는 수행되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 협력 인지 무선 네트워크에서 부 사용자가 다른 수준의 양자화를 수행하였을 때에 시스템의 감지성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 먼저, 연구에 활용되는 시스템 모델에 대해 설명하고, 감지성능을 수식으로 도출한다. 마지막으로 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 성능 분석결과를 제시한다.



(a) Organization of the cooperative CR network



(b) Frame Structure of the cooperative CR network

Fig. 1. System model of the cognitive CR network.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 Fig. 1(a)와 같이 하나의 주 사용자 (PU: Primary User)와 세 개의 부 사용자(SU: Secondary User)가 존재하는 상황을 고려한다. SU들은 PU 신호에 대한 독립적인 에너지 검출 기반의 스펙트럼 센싱을 수행하며, 각 SU는 모두 같은 수신 신호 대 잡음 비(SNR: Signal to Noise Ratio)를 가지는 상황을 가정한다. 또한, SU들의 검출 정보를 전송받아 종합하는 융합 센터 (FC: Fusion Center)가 있는 환경을 가정하며, FC는 종합된 정보를 분석하여 최종적으로 SU들의 통신 가능 여부를 판단한다.

본 장에서는 위 협력 인지 무선 시스템 모델에 따른 통신환경 및 프레임 구조, 그리고 채택한 양자화 기법을 소개하고, 각 환경에 따른 감지성능을 수식으로 도출한다.

2.1 수신 채널 모델

SU는 PU의 관심 주파수 영역 상 존재 여부를 판단하기 위해 이진 가설 검정을 이용할 수 있는데, k 번째 SU에 의해 관찰되는 m 번째 수신 신호 $y_k(m)$ 은 PU의 존재 여부에 따라 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k(m) \sim \begin{cases} N(0, \sigma_n^2) & : H_0 \\ N(0, \sigma_n^2 + \sigma_s^2) & : H_1 \end{cases} \quad (1)$$

Eq. (1)에서 σ_n^2 은 가산성 백색 가우스 잡음(AWGN: Additive White Gaussian Noise)의 분산이며, σ_s^2 은 SU가 수신받은 신호의 세기(Power)이다. 상기에 가정한 것과 같이 모든 SU가 같은 SNR을 가진다.

2.2 프레임 구조

Fig. 1(b)는 인지 무선 시스템에서 사용되는 통신 프레임을 나타낸 것이다. 해당 프레임은 IEEE 802.22를 기반으로 정의되었으며, 감지 구간(Sensing Duration), 보고 구간(Reporting Duration) 및 정보전송 구간(Data Transmission Duration)을 포함한다. 감지 구간은 2차 사용자 각각이 1차 사용자의 전력 정보를 수집하는 구간이고, 보고 구간은 해당 전력 정보를 융합 센터에 전달하는 구간이다. 감지 구간에서는 각각의 SU가 PU의 주파수 대역의 사용 여부를 판단하기 위해 M 개의 전력 정보를 수집할 수 있다. 마지막으로 정보전송 구간은 FC에서 PU가 존재하지 않는다고 판단할 경우 SU가 통신 자원을 활용하여 정보를 전송하는 구간이다.

2.3 양자화를 고려한 협력 센싱 기법

본 논문에서는 PU의 존재를 판별하기 위한 기법으로 가장 널리 활용되는 에너지 검출 기법을 채택한다. 이를 위해 각 SU는 수신 신호 관찰을 통해 얻은 축적된 에너지에 대한 정보를 지역 감지 정보로써 FC로 보낸다. 이때, 중심 극한 정리에 의해서 k 번째 SU가 M 개의 관찰을 통해 얻은 축적된 에너지, 즉 지역 감지 정보는 Eq. (2)와 같다.

$$Y_k = \sum_{m=1}^M |y_k(m)| \sim \begin{cases} N(M\sigma_n^2, 2M\sigma_n^4) & : H_0 \\ N(M(\sigma_n^2 + \sigma_s^2), 2M(\sigma_n^2 + \sigma_s^2)^2) & : H_1 \end{cases} \quad (2)$$

실제로 SU가 지역 감지 정보를 FC로 보낼 때, 양자화 과정을 거쳐서 보내게 되는데 양자화 과정을 거친 지역 감지 정보를 \hat{Y}_k 로 표현한다. FC에서는 각 SU로부터 수신된 지역 감지 정보를 합한 광역 감지 정보 T_{FC} 를 목표 감지성능을 달성하기 위한 광역 문턱 값 η 와의 대소비교를 통해 PU의 존재 여부 및 SU의 통신 가능 여부를 Eq. (3)과 같이 판단하게 된다.

$$T_{FC} = \sum_{k=1}^K \hat{Y}_k \begin{cases} < \eta & : H_0 \\ \geq \eta & : H_1 \end{cases} \quad (3)$$

k 번째 SU가 b_k 개의 비트 수를 사용하여 지역 감지 정보를 압축할 때에, 정보의 왜곡을 최소화하기 위해 Lloyd-Max 양자화 기법[14]을 채택한다. 해당 양자화 기법을 활용하면 동적인 간격을 가지는 2^{b_k} 개의 레벨을 가지게 되는데, \hat{Y}_k 가 q 번째 레벨 $l_{q,k}$ 로 양자화되는 확률 질량 함수는 Eq. (4)와 같다.

$$\Pr[\hat{Y}_k = l_{q,k}] = \int_{t_{q-1,k}}^{t_{q,k}} f_{Y_k}(x) dx = \frac{1}{2^{b_k}} \quad (4)$$

이때, $q = 1, \dots, 2^{b_k}$ 의 범위로 한정되며, $t_{q,k}$ 는 양자화 문턱 값을 나타낸다. 여기서 $t_{0,k} = -\infty$, 그리고 $t_{2^{b_k},k} = \infty$ 이다. $f_{Y_k}(\cdot)$ 는 Y_k 의 확률 밀도 함수를 의미하는데 H_0 와 H_1 의 때에 따라 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{Y_k}(x) = f_{Y_k}(x|H_0)\Pr[H_0] + f_{Y_k}(x|H_1)\Pr[H_1] \quad (5)$$

그리고, $l_{q,k}$ 는 $t_{q-1,k}$ 와 $t_{q,k}$ 사이의 무게 중심 값으로 나타내기 위해 다음 Eq. (6)과 같이 나타낸다.

$$l_{q,k} = \frac{\int_{t_{q-1,k}}^{t_{q,k}} x f_{Y_k}(x) dx}{\int_{t_{q-1,k}}^{t_{q,k}} f_{Y_k}(x) dx} = 2^{b_k} \int_{t_{q-1,k}}^{t_{q,k}} x f_{Y_k}(x) dx \quad (6)$$

다음으로, 광역 감지 정보 T_{FC} 의 확률 질량 함수는 양자화되는 \hat{Y}_k 의 경우의 수를 고려하여 다음 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr[T_{FC} = z] = \sum_{\hat{Y}_1, \dots, \hat{Y}_{K-1}} \Pr[\hat{Y}_1 = z_1] \Pr[\hat{Y}_2 = z_2] \times \dots \times \Pr[\hat{Y}_{K-1} = z_{K-1}] \Pr[\hat{Y}_K = z_K] = p_{\hat{Y}_1}(z_1) * \dots * p_{\hat{Y}_K}(z_K) \quad (7)$$

여기서 z_k 는 k 번째 SU에서 가질 수 있는 집합 A_k 내에 속하며, 광역 감지 정보가 되는 z 는 A_k 에 따라 가능한 모든 경우의 집합 A_{FC} 에 속한다. 이들 집합 A_k , A_{FC} 은 모두 해당 SU들이 활용하는 비트 수에 영향을 받는다.

최종적으로 인지 무선 시스템상의 감지성능 지표인 탐지 확률 P_D 와 오경보 확률 P_{FA} 는 다음 Eq. (8), (9)와 같이 수식화할 수 있다.

$$P_D(\mathbf{b}) = \Pr[T_{FC} \geq \eta | H_1] = \sum_{z \in \Omega} \Pr[T_{FC} = z | H_1] \quad (8)$$

$$P_{FA}(\mathbf{b}) = \Pr[T_{FC} \geq \eta | H_0] = \sum_{z \in \Omega} \Pr[T_{FC} = z | H_0] \quad (9)$$

여기서, 비트 수의 집합을 $\mathbf{b} = [b_1, \dots, b_K]$ 와 같이 표현하였으며, 시스템상의 SU가 통신하지 못하게 하는 T_{FC} 의 집합 $\Omega = \{x : (x \in A_{FC}) \cap (x \geq \eta)\}$ 를 표현하였다.

3. 감지성능분석

3.1 시뮬레이션 환경

2장에서 정의한 인지 무선 시스템의 성능을 분석하기 위해 다음 Table 1과 같은 시뮬레이션 환경을 설정하여, 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 활용하였다.

협력 인지 무선 네트워크에서 양자화 비트 수 할당기법을 적용한 감지성능들을 분석하기 위해, 비교군으로써 양자화로 인한 왜곡 효과를 받지 않은 성능을 활용하였으며, 비트 수 및 비트 수 할당에 의한 성능 변화를 잘 관찰할 수 있도록 총 비트 수 12개를 가지는 $\mathbf{b} = [4, 4, 4]$ 의 경우와 총 비트 수 9개를 가지는 $\mathbf{b} = [3, 3, 3]$, $[4, 3, 2]$, $[4, 4, 1]$ 의 성능을 비교하였다.

Table 1. Parameter values used in the simulator

Primary Network	
$\Pr[H_0]$	0.9
Secondary Networks	
The Number of SUs (K)	3
The Number of signal samples (M)	400
the possible set of quantization bit	[1,2,3,4]

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

Fig. 2와 Fig. 3에서는 목표 오경보 확률에 따른 탐지 확률 성능을 비교하였으며, SU들이 가지는 SNR이 -10dB인 환경에서 시뮬레이션이 수행되었다. 설정한 시스템 환경에서 총 비트 수가 12개로 많은 $\mathbf{b} = [4, 4, 4]$ 의 성능은 양자화로 인한 성능 열화를 배제한 이상적인 탐지성능과 큰 차이를 가지지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이는 설정한 환경에서 양자화 비트 수 4개가 원래의 정보를 나타내기엔 충분하다고 분석할 수 있다. 또한, 양자화 비트 수가 같은 세 경우의 성능을 비교하였을 때에 $\mathbf{b} = [3, 3, 3]$ 의 성능이 가장 높은 것은 모든 SU가 SNR 환경을 포함하여 모두 같은 환경을 고려했기 때문에, SU들이 똑같은 자원을 분배받아 임무를 수행하는 것이 가장 이상적인 상황이라는 것을 분석을 통해 이끌어낼 수 있다. 또한, $\mathbf{b} = [4, 3, 2]$ 성능 및 $\mathbf{b} = [4, 4, 1]$ 의 성능 비교를 통해, 양자화 비트 수가 같더라도 원래의 지역 감지 정보의 양자화 왜곡이 클수록 광역 감지 정보의 왜곡도 심해지기 때문에, 성능 열화를 더 크게 가진다는 것을 분석해 낼 수 있다. 또한, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 목표 오경보 확률이 상승할수록 총 양자화 비트 수 및 양자화 비트 수 할당기법의 활용 여부에 따른 성능 열화가 줄어드는데, 이를 통해 더 낮은 오경보 확률이 요구될수록 더 많은 양자화 비트 수를 활용하거나, 양자화 비트 수 할당기법을 활용하는 것이 더 좋은 감지성능을 가질 수 있다는 것을 분석해낼 수 있다.

추가로, Fig. 4와 Fig. 5에서는 SU의 SNR 환경에 따른 탐지 확률 성능을 비교하였으며, 인지 무선 시스템의 목표 오경보 확률이 0.025인 환경에서 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션 결과들의 종합적인 성능 우위 여부는 앞선 분석과 같았으며, Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, SNR 환경변화에는 각 성능이 비교적 강건한 성능을 가졌다. 이를 통해, 양자화 비트 수 결정 및 양자화 비트 수 할당기법의 활용 여부를 판단할 때에 SNR 환경의 변화는 결정적인 고려사항이 아닐 수 있음을 분석해낼 수 있다.

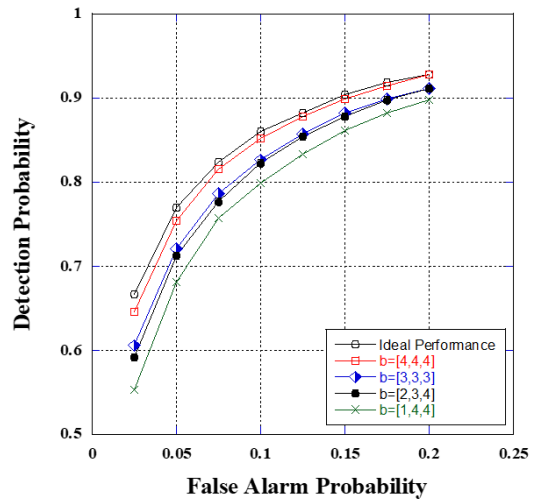


Fig. 2. The detection probability in terms of the target false alarm probability.

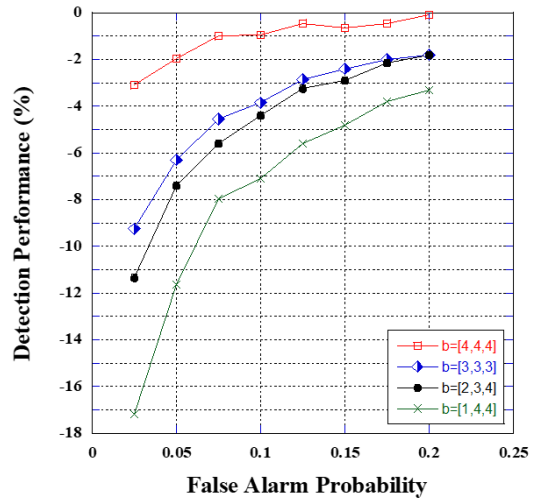


Fig. 3. The detection performance decrease rate versus the ideal case in terms of the target false alarm probability.

4. 결론

본 연구에서는 최근 주목받고 있는 유·무인 복합체계의 발전에 따라 예상되는 주파수 부족 현상을 대비하기 위한, 인지 무선 네트워크에서 실제적인 양자화로 인한 원 데이터 왜곡을 고려한 비트 수 할당기법의 성능 분석을 수행하였다. 실제적인 양자화를 고려한 감지성능을 수식으로 표현해낼 수 있었으며, 몬테카를로 시뮬레이션

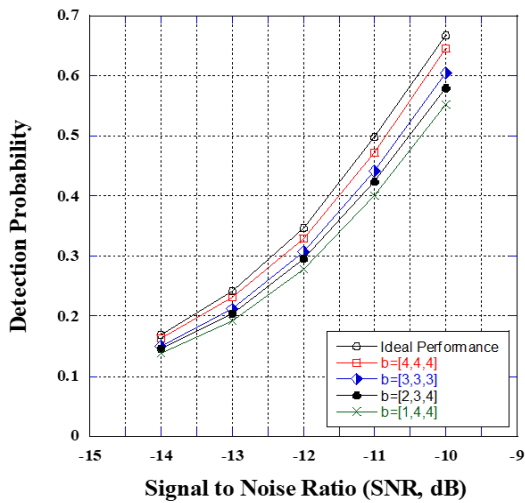


Fig. 4. The detection probability in terms of the signal to noise ratio for secondary user networks.

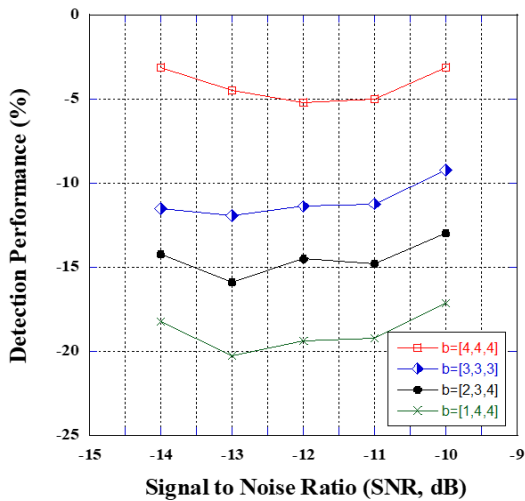


Fig. 5. The detection performance decrease rate versus the ideal case in terms of the signal to noise ratio for secondary user networks.

을 수행하여 목표 오경보 확률과 SNR 환경에 따른 성능 분석을 수행하였다.

해당 성능 분석을 통해 무인 체계를 인지 무선 네트워크상의 SU로 활용하였을 때 효율적인 시스템 설계 방안을 도출할 수 있었다. 무인 체계들이 사용하고자 하는 대역의 SNR 환경이 같고 FC로 보고하는 비트 수가 제한되어 있을 때, SU별 비트 수 할당기법은 목표 오경보 확률 성능을 낮게 설정할수록 더 효과적으로 나타났다. 그리

고 SNR 환경이 다른에는 큰 차이가 나타나지 않음을 추가로 확인할 수 있었다.

미래 유·무인 복합체계의 발전에 따라 구체적으로 예상되는 전장 환경, 즉 수많은 SU 및 실제적인 SNR 환경 등을 고려하여 추가적인 연구가 필요할 것이며, 본 연구에서 주안점을 둔 인지 무선 네트워크 외에도 인공지능을 활용한 네트워크 자원관리, 비 직교 다중접속기법 등 유·무인 복합체계 활용을 위한 통신환경 구축을 체계적으로 준비해야 할 것이다.

References

- [1] J. H. Yoon, The evolution of battle field emerged in the 2022 Russia-Ukraine war: unmanned, mechanized, networked, 348th Issue Brief, Institute for National Security Strategy, Korea, pp.1-10.
- [2] H. B. Son, "The future of war that technological advances will bring", *Defense & Technology*, No.527, pp.64-69, Jan. 2023.
- [3] I. Shin, D. Kim, M. Kim, I. Yoo, "A Study on Development Plan of Defense Aerial MUM-T System based on Technology Level Assessment", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.4, pp.560-566, Apr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.4.560>
- [4] G. Kim, D. Lee, S. Cho, B. Yang, "Resolving Spectrum Shortage for Operation Future Military Systems", *Journal of the Military Operations Research Society of Korea*, Vol.48, No.1, pp.103-130, Jan. 2022.
- [5] J. Kim, J. Koh, J. Kang, K. Lee, J. Kang, "Design of user clustering and precoding for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)", *MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference*, IEEE, Tampa, FL, USA, pp.1170-1175, Oct. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2015.7357604>
- [6] J. Kakar and V. Marojevic, "Waveform and spectrum management for unmanned aerial systems beyond 2025", *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, Montreal, QC, Canada, pp.1-5, Oct. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292533>
- [7] I. F. Akyildiz, W. -y. Lee, M. C. Vuran and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks", in *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.4, pp.40-48, Apr. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4481339>
- [8] M. Lee, J. Oh, C. Kim, J. Bae, Y. Kim, C. Jee, "The Development of Rule-based AI Engagement Model for Air-to-Air Combat Simulation", *Journal of Korean Military Science and Technology Society*, Vol.25,

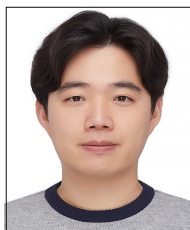
No.6, pp.637-647, Dec. 2022.

DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2022.25.6.637>

- [9] Y. Ge and P. C. Ching, "Energy Efficiency for Proactive Eavesdropping in Cooperative Cognitive Radio Networks", in *IEEE Internet of Things Journal*, Vol.9, No.15, pp.13443-13457, Aug. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IJOT.2022.3143358>
- [10] S. Yashaswini and S. Dhanasekaran, "Performance Analysis of Cooperative NOMA Systems in Cognitive Radio Network", *2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon)*, IEEE, Mysuru, India, pp.1-7, Oct. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972419>
- [11] X. Wu, L. Zhang and Z. Wu, "Quantized Soft-Decision-Based Compressive Reporting Design for Underlay/Overlay Cooperative Cognitive Radio Networks", in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, Vol.6, No.3, pp.1044-1055, Sep. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.2988479>
- [12] Y. Tani and T. Saba, "Quantization scheme for energy detector of soft decision cooperative spectrum sensing in cognitive radio", *2010 IEEE Globecom Workshops*, IEEE, Miami, FL, USA, pp.69-73, Dec. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2010.5700411>
- [13] I. Shin, W. Lee, J. Kang, J. Kang and S. Al-Araji, "Quantization bit allocation for reporting-throughput tradeoff in cooperative cognitive radio networks", *MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference*, IEEE, Tampa, FL, USA, pp.233-237, Oct. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2015.7357448>
- [14] W. Prawatmuang and D. K. C. So, "Quantized cooperative spectrum sensing for Cognitive Radio", *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, IEEE, London, UK, pp.585-589, Sep. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2013.6666204>

신 인 태(Intae Shin)

[정회원]



- 2014년 2월 : 성균관대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 2022년 1월 : 한국항공우주산업 선임연구원
- 2022년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

정보통신, 항공전자, 국방기술