

장거리 사물 인터넷 기기를 위한 간섭에 강인한 ACK 기술

이일구

성신여자대학교 융합보안공학과 조교수

Robust Acknowledgement Transmission for Long Range Internet of Things

Il-Gu Lee

Assistant Professor, Department of Convergence Security Engineering, Sungshin University

요 약 와이파이 기반의 사물인터넷 장치는 사회, 경제, 산업에 막대한 영향을 미치고 있다. 그러나 와이파이가 같은 비면허 대역에서 동작하는 무선 전송 기술은 간섭에 취약하다. 장거리의 밀집 네트워크에서 무선 연결을 시도하는 경우에는 동적으로 변하는 간섭 상황과 비대칭적인 간섭 조건 때문에 성능 열화가 발생한다. 본 논문에서는 장거리 사물인터넷을 위한 ACK 전송 방법을 제안한다. 본 연구 논문에서 제안한 방법에 따르면, 송신 장치와 수신 장치의 간섭 상황이 다른 비대칭적 간섭 환경에서 송신 장치가 간섭 레벨을 측정 후 응답 프레임의 전송 속도를 추천해 응답 프레임의 전송 성공률을 향상시킨다. 그리고 고품질의 무선 채널 환경이 보장되는 경우에는 더 높은 전송 속도로 전송할 수 있다. 성능 평가 결과에 따르면 제안하는 방법에 의해 비대칭 간섭 상황에서 20 MHz 대역폭 전송 모드에서 스루풋이 최대 9 Mbps 향상됨을 알 수 있다.

주제어 : 비대칭 간섭, 밀집 네트워크, 사물인터넷, 장거리, 무선 네트워크, 응답 프레임

Abstract Wi-Fi enabled Internet of Things (IoTs) had a substantial impact on society, economy and industry. However wireless connectivity technologies in unlicensed band such as Wi-Fi are vulnerable to interferences. They also face difficulty providing wireless connectivity over long range in dense networks due to the dynamically changed interference effect and asymmetric interference conditions. In this paper, robust acknowledgement transmission scheme is proposed for long range IoTs. According to the proposed scheme, it is possible to control the transmission rate of the transmission success rate of the response frame by adjusting the transmission rate of the response frame when the interference is present asymmetrically. It is also possible to use higher data rate when high quality link is guaranteed. The evaluation results demonstrated the proposed scheme improves the aggregate throughput by at most 9 Mbps when 20 MHz bandwidth transmission mode was adopted.

Key Words : Asymmetric Interference, Dense Network, Internet of Things, Long Range, Wireless Network, Acknowledgement

1. 서론

통신과 네트워크 기술의 빠른 발전에 힘입어 사물인터넷 (Internet of Things, IoTs) 시대를 넘어 이제는 만

물인터넷 (Internet of Everything, IoE) 시대로 발전하고 있다[1,2]. 사물인터넷 환경에서는 통신 기능과 센서 기능이 내장된 장치들이 인터넷에 연결되어 주변의 정보를 수집하고 다른 장치와 정보를 주고 받으며 적절한 결정

*This work was supported by the Sungshin University Research Grant of 2017-2-11-038/1

*Corresponding Author : Il-Gu Lee (iglee@sungshin.ac.kr)

Received July 9, 2018

Accepted September 20, 2018

Revised August 9, 2018

Published September 28, 2018

을 스스로 내릴 수 있는 반면에, 만물 인터넷은 사람, 사람, 데이터, 프로세스 등의 세상의 모든 사물이 인터넷에 연결되어 새로운 가치와 경험을 전 산업 분야에서 창출하는 기술을 의미한다. 이것은 사물인터넷에서 확장되어 사람, 사물, 클라우드를 연결하는 세상의 도래를 뜻한다.

이와 같이 서비스 범위와 수용 용량 관점에서 획기적으로 강화된 사물인터넷이 가능하려면 무엇이 가장 중요할까? 사물인터넷 장치의 송수신 능력도 중요하지만, 무선 사물인터넷 장치의 전파 도달 거리와 단말 수용량을 결정짓는 가장 중요한 환경적 요소로 잡음과 간섭을 고려할 수 있다[3-8].

잡음은 송신 장치에서 전송된 신호가 수신 장치에 도달할 때 원치 않게 발생되어 신호와 섞이는 불규칙적이고 예측할 수 없는 신호다. 이 잡음은 무선 장치 내부에서 발생할 수도 있고, 자연이나 인공적인 잡음과 같이 외부에서 발생하는 잡음일 수 있다. 한편, 간섭은 수신해야 하는 신호 이외의 신호가 외부 무선 장치에서 발생해 수신해야 하는 신호와 중첩되어 나타나는 교란 현상을 말한다. 이러한 잡음과 간섭을 해결하기 위해, 다양한 코딩 방식, 에러정적 기술, 필터링 기술들이 연구 개발되었지만, 초경량, 초저가, 초저전력의 사물인터넷에서는 복잡한 기술은 적용할 수 없다[9-11].

IEEE 802.11 무선랜 표준은 변조 및 코딩 모드에 따라 데이터 전송 속도를 정의하고 있으며, 제어 응답 프레임의 전송 속도 선택 방법을 정의하고 있다[9,10]. 무선랜 표준에 의하면 ACK 프레임의 전송 속도는 DATA 프레임의 전송 속도 이하이면서, 기본 전송 속도 중에서 가장 높은 속도로 전송해야 한다. 예를 들어 IEEE 802.11 무선랜 장치는 수신한 프레임이 54 Mbps 전송 속도였다면, BSS 기본 전송 속도 세트인 6, 12, 24 Mbps 중 가장 높은 전송 속도인 24 Mbps로 전송할 수 있다.

그러나 무선 통신 환경은 간섭 상황 또는 링크 품질에 따라 송신 장치와 수신 장치의 채널 환경이 다를 수 있다. 예를 들어 여러 개의 BSS로 구성된 밀집 네트워크에서 응답 프레임을 수신하는 상황을 가정하면, 송신 장치와 수신 장치가 겪는 간섭이 비대칭적인 네트워크 상황이 빈번하게 발생할 수 있다. 송신 장치의 간섭 상황을 알지 못하는 수신 장치에서 보낼 수 있는 전송 속도 중 가장 높은 속도로 응답 프레임을 전송하는 경우에 송신 장치의 간섭이 크다면 응답 프레임 전송에 실패할 수 있다.

반대로, 무선랜 장치가 고품질 링크 상황에서 통신하

는 네트워크 환경에서는 IEEE 802.11 표준에서 규정한 속도보다 높은 속도로 전송되는 것이 성능면에서 우수하다. 특히, 무선랜 표준이 발전하면서 전송 효율을 높이기 위해 응답 프레임에 많은 정보가 포함되어 프레임 길이가 길어지고 있는 추세여서 응답 프레임의 전송 효율 향상이 중요해지고 있다. 그러나 지금까지의 무선랜 장치는 고품질 링크 상태에서도 제한된 BSS 기본 전송 속도 세트 중 하나로만 응답 프레임을 전송할 수 밖에 없었다.

본 논문의 2장에서는 종래 무선랜 기술의 한계점을 분석하고, 3장에서는 장거리 사물인터넷을 위한 간섭에 강인한 ACK 전송 기법을 서술하고 ACK 전송 보호 방법을 설명한다. 4장에서 제안하는 방법의 성능을 평가하고, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 종래 무선랜 기술의 한계 분석

2.1 비대칭적 간섭 네트워크 환경

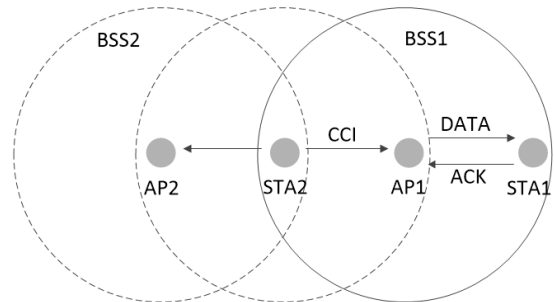


Fig. 1. Asymmetric Interference Network Condition

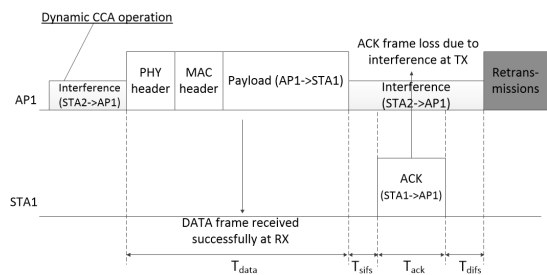


Fig. 2. Ack Frame Loss in Asymmetric Interference Network Condition

Fig 1은 비대칭 간섭 네트워크 환경을 보여준다. 비대칭 간섭 네트워크 환경은 송신 장치와 수신 장치가 겪는 간섭이 송수신 쪽이 서로 다른 경우를 의미한다. 예를 들

면, 송신 장치가 숨겨진 노드 (Hidden node)에 의해 간섭을 받고 있지만, 수신 장치는 간섭이 없거나, 수신 장치가 숨겨진 노드에 의해 간섭을 받고 있지만, 송신 장치는 간섭을 받지 않는 경우이다. 이 네트워크에는 복수개의 AP (Access Point)와 STA (Station)들로 구성된 복수개의 BSS가 있다. BSS1에는 AP1과 STA1이 있고, BSS2에는 AP2와 STA2이 포함되며, STA2는 BSS1과 BSS2의 중첩된 영역에 위치해서 AP1에도 접속할 수 있다고 가정한다. 여기서 AP1이 데이터 송신 장치이고, STA1이 데이터 수신 장치이다. STA2는 중첩된 노드로서 AP1의 간섭원이다. AP1은 IEEE 802.11ax 표준에 정의된 동적 수신감도 제어 (Dynamic Sensitivity Control, DSC) 기술을 사용하면 다른 BSS에 위치한 STA2이 만든 동일 채널 간섭 (Co-Channel Interference, CCI)이 영향을 미치지더라도, 데이터를 전송할 수 있다[14]. AP1은 DSC 기술을 이용해 CCA (Clear Channel Assessment) 레벨을 동적으로 변경할 수 있다[15].

Fig 2와 같이 STA1은 데이터를 수신하면 AP1에게 ACK 프레임에 응답 프레임으로 전송한다. IEEE 802.11 표준에 의하면 ACK 프레임 전송 속도는 데이터 프레임의 전송 속도 이하이면서, BSS의 기본 전송 속도 세트 중에서 가장 높은 전송 속도로 선택된다. 예를 들어, 데이터 프레임이 54 Mbps 이었다면, 24 Mbps 전송 속도로 Ack 이 전송된다. 그런데, STA2는 AP1에 의한 간섭원으로 작용하고 있으므로 STA1이 BSS의 사용할 수 있는 전송 속도 중에서 가장 높은 속도로 응답 프레임을 전송하면, 응답 프레임은 간섭에 의해 손실될 수 있다.

이와 같이 비대칭 간섭 네트워크 환경에서 무선랜 장치가 상대방의 비대칭적 간섭 상황을 고려하지 않고 프레임을 전송한다면 프레임 충돌이 빈번하게 발생해 재전송 횟수가 증가할 수 있다. 이로 인해 네트워크 스루풋과 채널 사용 효율이 열화된다. 특히, 송신 장치가 간섭을 겪더라도 IEEE 802.11ax 표준에서 사용하는 동적 수신 감도 제어 사용해 높은 속도로 프레임을 전송한다면, 수신 장치는 송신 장치 측의 간섭 상황을 인지하지 못하고 응답 프레임의 손실 확률이 높아진다.

2.2 고품질 네트워크 환경

Fig 3은 AP1이 STA1으로 RTS (Request to Send) 프레임과 데이터 프레임을 전송하고, STA1이 AP1으로 CTS (Clear to Send) 프레임과 ACK 프레임을 전송하는

네트워크 환경이다. 이 네트워크에서 동작하는 무선랜 장치는 RTS와 CTS 프레임은 최대 전송 파워로 전송하고, 데이터와 ACK 프레임은 상대적으로 낮은 파워로 전송하는 안전 모드 전송 방식을 사용한다.

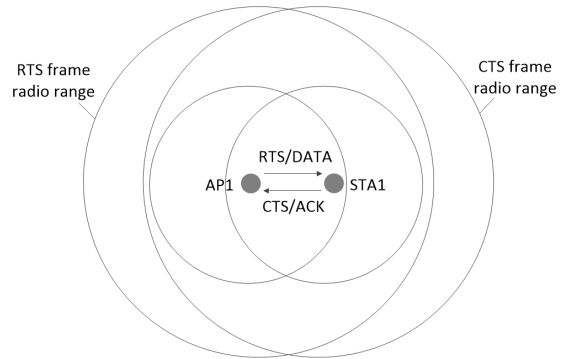


Fig. 3. RTS/CTS Transmission for High Quality Network

이 경우에는 데이터와 ACK 프레임의 전송 범위가 줄어들지만, 인접한 BSS 에 속한 STA에 간섭 영향을 줄 확률이 줄어들어 간섭 관점에서 고품질 링크 확보가 가능해진다. 고품질 링크 상황이라면, STA1이 BSS의 기본 전송 속도 세트의 상한 속도보다 높은 속도로 응답 프레임을 전송하더라도, AP1은 응답 프레임을 수신할 수 있다.

3. Robust ACK 전송

3.1 Robust ACK 전송 방식

무선랜 장치는 정해진 규칙에 따라 데이터 프레임의 전송 속도와 응답 프레임의 전송 속도를 선택하고, 전송 속도를 기초로 채널 점유 기간을 계산한다. 동일한 네트워크에 속한 이웃 장치들은 수신 프레임의 기간 정보를 기초로 NAV (Network Allocation Vector) 값을 설정하므로, 응답 프레임을 전송하는 장치가 NAV에 영향을 주는 응답 프레임 전송 속도를 임의로 선택할 수 없다. 본 장에서는 이 문제를 해결하기 위한 ACK 전송 방법을 설명한다.

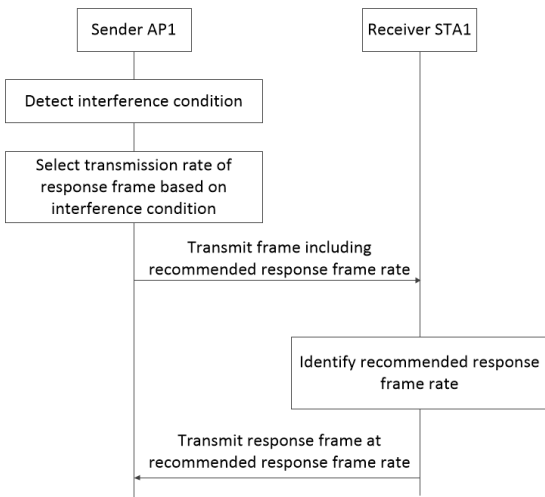


Fig. 4. Transmission method for Robust ACK

Fig 4는 송신 장치와 수신 장치간의 Robust ACK 전송 방법에 따라 통신하는 흐름도를 보여준다. 송신 장치인 AP1은 채널 상태를 측정해 간섭 상황을 판단하고 응답 프레임에 추천하는 전송 속도를 포함한 데이터 프레임 전송한다. 즉, 송신 장치는 간섭 상황을 측정해 성공적으로 수신할 수 있는 응답 프레임 전송 속도를 수신 장치에게 전달하고 수신 장치는 송신 장치가 추천한 응답 속도에 기반해 응답 프레임을 전송한다.

OFDM 기반의 IEEE 802.11a/n/ac/ax 는 동일 채널 간섭이 존재할 때 성능 열화가 심하게 발생하지만, IEEE 802.11b 는 스프레드 스펙트럼 (Spread Spectrum) 방식을 사용하므로 상대적으로 간섭에 강하다 [16-18]. 그러므로 데이터 프레임은 OFDM 신호로 전송하고, ACK 프레임은 간섭에 강한 스프레드 스펙트럼 방식으로 전송하면 비대칭적인 간섭 상황에서 여러 확률을 낮출 수 있다.

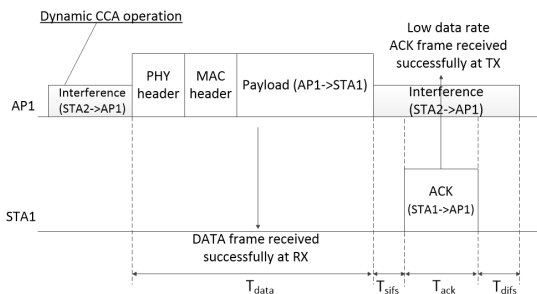


Fig. 5. Transmission in asymmetric interference conditions.

Fig 5와 같이 AP1은 STA2에 의한 간섭으로 응답 프레임 손실이 예상되는 경우에는 간섭에 강인한 전송 속도인 6 Mbps 전송 속도인 OFDM 신호를 전송하거나, 1 Mbps 인 IEEE 802.11b 프레임을 전송할 수 있다.

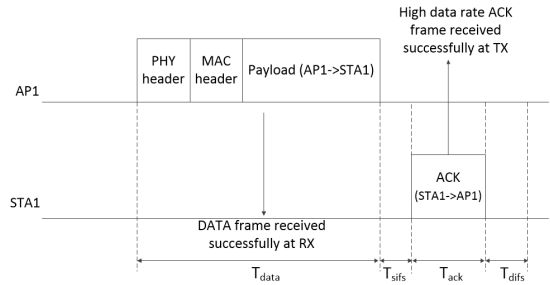


Fig. 6. Transmission for high quality network.

송신 장치 AP1과 수신 장치 STA1간에 고품질 링크 상태라고 판단되면, AP1은 전송 프레임 이하의 속도 중에서 응답 프레임 전송 속도를 선택할 수 있다. Fig 6에서처럼 데이터 전송 속도가 108 Mbps 인 경우, AP1은 고품질 링크라고 판단되면 응답 프레임 추천 속도를 종래 방식 보다 높은 속도인 54 Mbps로 선택할 수 있다. STA1은 수신 데이터 프레임에 포함된 응답 프레임 추천 속도를 확인하고 응답 프레임을 전송한다.

IEEE 802.11 표준에 따르면 응답 프레임 전송 속도는 요청 프레임의 전송 속도 이하이면서, BSS의 기본 전송 속도 세트 중에서 가장 높은 속도로 선택된다. 그러나 밀집 네트워크, 오류가 잦은 채널, 긴 데이터 프레임 전송, 비대칭 네트워크 상태 등과 같은 무선 채널 환경에서는 이러한 규칙에 의해 성능 열화가 발생할 확률이 높다. 이러한 상황에서는 응답 프레임 전달 실패로 재전송률이 커지므로 높은 전송 속도 보다 6 Mbps 로 보내는 게 더 나은 선택일 수 있으며, 혹은 OFDM 신호가 아닌 IEEE 802.11b의 1 Mbps 모드로 전송해 간섭에 강인하게 응답할 수 있다.

3.2 Robust ACK 전송 보호 방법

이 장에서는 본 연구에서 제안하는 Robust ACK 전송 방식으로 통신할 때, 송신 장치가 데이터 프레임에 추천하는 응답 프레임 전송 속도 정보를 포함해 전송하고, 기존과 다른 추천 전송 속도로 전송되는 응답 프레임을 종래의 무선 장치로부터 보호하는 방법에 대해 설명한다. 특히, 제안하는 방식을 사용하는 무선 통신 장치와 종래

의 장치가 공존하는 무선 통신 네트워크에서 추천 속도로 전송되는 응답 프레임을 보호하는 방법에 대해 설명한다.

본 논문에서 제안하는 방법을 적용한 송수신 장치와 제안하는 방법이 적용되지 않은 종래의 장치가 공존하는 경우를 고려해 보면, 송신 장치가 수신 장치에게 프레임을 전송할 때, 측정된 간섭 레벨에 따라 링크 적응 방식과 동일하게 응답 프레임의 전송 속도를 추천하고, 추천 속도를 프레임 헤더의 전송 속도 필드에 설정한다. 송신자 주변의 이웃 무선 장치는 데이터 프레임 전송 시간과 응답 프레임 전송 속도 추천 필드를 이용해 통신 장치의 채널 점유 시간을 계산할 수 있다.

수신 장치는 성공적으로 데이터 프레임을 수신한 경우, SIFS (Short Inter-Frame Space) 시간이 지난 후에 추천 속도로 ACK 프레임을 전송한다. 수신 장치 주변의 이웃한 무선 장치는 응답 프레임의 전송 속도 정보에 기초해 통신 장치의 채널 점유 시간을 계산할 수 있다.

이와 같이 통신 장치 주변의 이웃 무선 장치들은 수신 프레임의 식별자 (주소값)가 자신의 식별자와 일치하지 않으므로, 수신한 프레임의 전송 속도 정보를 기초로 통신 장치의 채널 점유 시간을 계산하고, 응답 프레임의 전송 시간까지 프레임 전송을 연기할 수 있다.

4. 성능 평가

본 논문에서 제안하는 Robust ACK 전송 기법과 종래의 무선랜 전송 기법의 성능을 비교하기 위해 IEEE 802.11 표준의 TGn Ch-D 무선 채널 모델에서 두 개의 중첩된 BSS 조건의 비대칭적인 간섭 상황을 C 프로그램으로 모델링했다. 시뮬레이션 모델은 와이파이 상용칩을 개발하기 위해 RTL (Register Transfer Level)처럼 설계한 C 프로그램 환경에서 클록 수와 고정 소숫점을 RTL과 동일하게 구현했다. 즉, 상용 칩셋과 동일한 성능과 기능을 갖는 시뮬레이션 모델로 성능 평가를 수행했다.

이 시뮬레이션 모델에서 사용하는 프레임 사이즈는 1000 byte 이고, 20 MHz 밴드폭의 5.3 GHz 주파수에서 ARF (Auto-rate fallback) 방식으로 링크 조절을 한다 [19]. 간섭 신호는 랜덤한 인터벌로 생성이 되지만, 비대칭적인 간섭 네트워크 상황을 위해 주어진 SINR 조건에 맞춰 송신 장치에만 영향을 준다. 수신 장치는 30 dB로

고정된 상태로 시뮬레이션했다.

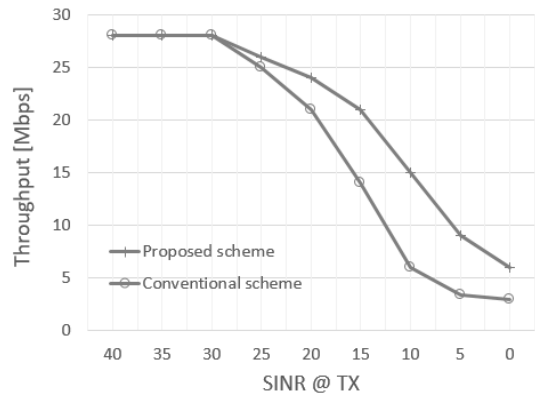


Fig. 7. Performance evaluation results

Fig 7 에서 보는 바와 같이 시뮬레이션 결과에 따르면 10 dB 영역에서 기존의 방식 대비 스루풋 성능 향상이 9 Mbps 정도로 가장 컸고, SINR 이 10 dB 보다 더 낮아지거나 더 높아지면 개선 효과가 줄어들었다. 그 이유는 SINR이 작은 구간에서는 간섭에 강한 변조 방식으로 전송하지만 채널 점유 시간이 길어져서 간섭에 영향 받는 경우가 더 늘어나기 때문이고, SINR 이 좋아지는 영역에서는 SINR이 좋아질 수록 응답 프레임의 고속 전송 효과가 점점 줄어들기 때문인 것으로 분석된다.

5. 결론

사물들이 밀집된 네트워크에서는 송신 장치와 수신 장치 간에 간섭 상황이 비대칭적인 경우가 빈번히 발생하고, 네트워크 전체의 간섭 상황이 바뀔 수 있다. 이 경우에는 장시간 데이터 프레임을 성공적으로 전송하고 응답 프레임을 수신하는데 실패해 또 다시 장시간의 데이터 프레임 재전송이 발생해야 하는 상황이 발생할 수 있는 비효율이 발생한다.

본 연구에서는 간섭 정보를 이용해 응답 프레임의 전송 속도를 제어하는 강인한 ACK 전송 기법을 제안했다. 이를 통해, 비대칭적인 간섭이 존재하는 경우에는 ACK 프레임의 전송 속도를 간섭 레벨에 강인한 전송 속도로 낮춰 응답 프레임의 수신 성공률을 높이고, 고품질 링크가 보장되는 경우에는 응답 프레임의 전송 속도를 높여 전송 효율을 향상시킬 수 있다.

REFERENCES

- [1] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, K. Hwang. (2017). Narrow band internet of things. *IEEE Access*, 5, 20557-20577.
- [2] D. E. Culler. (2017). The once and future Internet of everything. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 20(3), 5-11.
- [3] I. Yaqoob, E. Ahmed, I. A. T. Hashem, A. I. A. Ahmed, A. Gani, M. Imran, M. Guizani. (2017). Internet of Things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. *IEEE wireless communications*, 24(3), 10-16.
- [4] J. G. Hester, J. Kimionis, M. M. Tentzeris. (2017). Printed Motes for IoT Wireless Networks: State of the Art, Challenges, and Outlooks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(5), 1819-1830.
- [5] B. Vejlggaard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, M. Sorensen. (2017). Interference impact on coverage and capacity for low power wide area IoT networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1-6.
- [6] C. D. Lee. (2017). An Adaptive Traffic Interference Control System for Wireless Home IoT Services. *Journal of Digital Convergence*, 15(4), 259-266.
- [7] D. C. Son. (2016). A Study on Algorithm for Reducing Communication Error Rate in Special Network. *Journal of Digital Convergence*, 14(11), 325-331.
- [8] J. H. Kim, J. H. Cho, D. J. Cho, D. C. Son. (2017). *Journal of Convergence for Information Technology*, 7(5), 117-122.
- [9] T. Aittomaki, V. Koivunen. (2017). Mismatched filter design and interference mitigation for MIMO radars. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(2), 454-466.
- [10] H. Al-Tous, I. Barhumi, N. Al-Dhahir. (2017). Narrow-Band Interference Mitigation Using Compressive Sensing for AF-OFDM Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(7), 6146-6159.
- [11] S. Y. Kim, Y. J. Kim, H. K. Song. (2017). Adaptive cooperative transmission with spatial phase coding for interference mitigation in the wireless cellular communication. *IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 100(1), 317-321.
- [12] ANSI/IEEE Std 802.11, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society Std. (1999). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications.
- [13] ANSI/IEEE Std 802.11e, LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society Std. (2005). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 7: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS).
- [14] M. S. Afaqui, E. G. Vilegas, E. L. Aguilera. (2016). IEEE 802.11ax: Challenges and requirements for future high efficiency WiFi. *IEEE Wireless Communications*, 99, 2-9.
- [15] I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid, R. Tafazolli. (2017). Exploiting the Capture Effect on DSC and BSS Color in Dense IEEE 802.11ax Deployments. In *ACM Proceedings of the Workshop on ns-3*, 47-54.
- [16] S. Parthasarathy, S. Kumar, R. K. Ganti, S. Kalyani, K. Giridhar. (2018). Error Vector Magnitude Analysis in Generalized Fading With Co-Channel Interference. *IEEE Transactions on Communications*, 66(1), 345-354.
- [17] I. G. Lee, M. Kim. (2016). Interference-aware self-optimizing Wi-Fi for high efficiency internet of things in dense networks. *Computer Communications*, 89, 60-74.
- [18] G. Manzi, M. Felizianim P. A. Beeckman, N. van Dijk. (2009). Coexistence between ultra-wideband radio and narrow-band wireless LAN communication systems - Part II: EMI evaluation. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 51(2), 382-390.
- [19] S. Vitturi, L. Seno, F. Tramarin, M. Bertocco. (2013). On the rate adaptation techniques of IEEE 802.11 networks for industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), 198-208.

이 일 구(Lee, Il-Gu)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 한국과학기술원 정보통신대학원 (공학석사)
- 2012년 2월 : 한국과학기술원 지식재산대학원 (경영학석사)
- 2016년 2월 : 한국과학기술원 정보보호대학원 (공학박사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 성신여자대학교 융합보안공학과 조교수
- 관심분야 : 정보통신, 정보보호, 지식재산
- E-Mail : iglee@sungshin.ac.kr