

초고주파 근거리 통신의 실내 무선 환경 연구

신동일, 김우성*, 박양재
가천대학교 컴퓨터공학과

Study on Indoor Wireless Environment of mmWave WLAN Communication

Dong-II Shin, Woo-Seong Kim*, Yang-Jae Park
Dept. of Computer Engineering, Gachon Univ.

요 약 최근 UHD, AR, VR 등 초고화질 미디어 데이터 전송에 대한 요구가 증가함에 따라 이를 위한 다양한 기술들이 활발하게 개발되고 있고, 그 중 IEEE 802.11ad 표준의 상용화가 진행 중에 있다. 본 논문에서는 초고주파(mmWave)를 기반으로 근거리 통신을 지원하는 IEEE 802.11ad 표준 기반 모듈을 이용하여 실내 무선 환경을 분석하기 위해 테스트 베드를 구축하고 다양한 실내 무선 환경에 대한 측정 실험 결과를 소개하고 분석한다. 모듈로 데이터 전송을 통해 SNR(Signal to Noise Ratio), Throughput 등의 데이터를 수집하는 방법으로 비교하며, 모듈의 빔 패턴과 폭을 측정하여 복도 및 사무실의 실내 환경에서 미치는 영향을 비교하였다. 이를 통해 벽의 신호 반사로 더 높은 SNR 값을 보여 실외보다 실내에 더 적합하다는 것을 확인하였고, LoS(Line of Sight)가 아닐 때의 손실을 벽면의 반사된 신호가 보완할 만큼 충분하지 않다는 것을 확인하였다. 결론적으로 초고주파 무선랜의 실내 사용에 적합하다고 판단되며 차후 추가적인 실험 구성에 유용하게 활용될 수 있다.

주제어 : mmWave, IEEE 802.11ad, Boresight, 실내 무선 환경, 측정

Abstract Recently, as the demand for transmission of ultra-high quality media data such as UHD, AR, and VR increases, various technologies for this have been actively developed and IEEE 802.11ad standard have been commercialized. In this paper, a test bed is constructed to analyze the indoor wireless environment using the IEEE 802.11ad standard based on mmWave, and the experimental results of various indoor wireless environments are introduced and analyzed. We compared the data from the module by data transmission, such as signal to noise ratio(SNR) and throughput. And we measured the beam pattern and width of the module and compared the effects on the indoor environment of the corridor and the office. This shows that the signal reflection of the wall shows higher SNR values and is more suitable to use for indoor than outdoor. It is confirmed that the loss when not in line of sight(LoS) is not enough to compensate the wall reflected signal. As a result, it is judged to be suitable for the indoor use of the mmWave LAN and can be usefully used for further experiments.

Key Words : mmWave, IEEE 802.11ad, Boresight, Indoor Wireless Environment, Measurement

1. 서론

최근 고화질 UHD 영상 데이터를 비롯하여 VR/AR과

같은 가상 및 증강 현실을 위한 미디어 데이터 전송에 대한 요구가 급격히 늘어나고 있다. 이에 기존 2.4 또는 5 GHz 대역에서 Gbps급의 IEEE 802.11ac/ax [4] 와 같은

*This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (No. NRF-2017R1C1B1006607)

*Corresponding Author : Wooseong Kim (wooseong@gachon.ac.kr)

Received November 16, 2017

Revised December 22, 2017

Accepted January 20, 2018

Published January 28, 2018

무선랜 기술이 연구되고 있지만 채널 간섭으로 인한 성능 저하의 문제와 상기 미디어 데이터를 전송하는데 필요한 다중 안테나 기술은 점차 작아지는 스마트 디바이스들에 채용되기에 기술적인 어려움이 있다. 그에 따라 지난 수년간 60 GHz 대역의 초고주파 전송 기술에 대한 연구자들의 많은 관심이 집중되었으며 최근 이동 통신을 위한 기술이 표준화 단계에 이르렀다[1,7,14].

실내 초고주파 통신은 이동 통신 이전에 실내 무선랜 환경을 위한 표준화가 진행되었다[13]. 실내 가전제품 간의 초고주파 전송 기술은 대표적으로 TV와 셋탑 박스 간의 HD급 비디오 전송을 위한 Wireless HDMI [15] 기술을 비롯하여 무선랜 표준인 IEEE 802.11ad [8] 에 기반한 통신 기술이 상용화 단계에 접어들었다. 802.11ad 기반 초고주파 무선랜은 근거리 통신을 지원하고 전파의 직진성을 가지고 있으며 낮은 투과율의 특성을 지니므로 반사가 많은 환경에서 성능에 영향을 미친다[1,6].

본 논문에서는 실내 특성에 따른 통신 환경을 분석하기 위해 Tensorcom 사의 802.11ad 모듈을 이용하여 다양한 전파 특성 및 성능 측정 실험 결과를 분석하였다.

2. 관련연구

2.1 초고주파 무선랜 채널 및 전송률

초고주파 무선랜 표준인 IEEE 802.11ad는 물리계층 및 MAC 계층에 대한 표준으로 동작 주파수 및 채널 설정, 다중 접속을 위한 MAC 동작 방식을 서술하고 있다. 802.11ad의 동작 주파수는 60 GHz의 초고주파 대역을 사용하며, 6개의 2.16 GHz의 대역폭을 가지는 채널로 구성되어 있다. 해당 채널 대역은 비면허 대역으로 비용 없이 사용할 수 있는 장점이 있다. 802.11ad는 광대역 채널을 사용하여 Gbps의 데이터 전송률을 보장하는 것을 주요 목표로 단일 캐리어로는 13개의 MCS(Modulation Coding Scheme)을 제공하고 있다. 최저 코딩률인 MCS 0는 직접 주파수 확산 방식으로 BPSK를 지원하며 27.5 Mbps의 데이터 전송을 지원한다. 이는 낮은 수신 감도인 -78 dBm에서도 동작할 수 있도록 설계되었으며 제어 메시지 전송을 위해 적합하다. 그 외 MCS 1 ~ 5 까지는 BPSK에 보다 높은 코딩률을 적용하여 최소 385 Mbps에서 1.25 Gbps까지 지원한다. MCS 6 ~ 9에서는 QPSK에 기반하여 1.5 ~ 2.5 GHz의 데이터 전송률을 지원하고 16 QAM을 사용하는 MCS 12에서는 최고 4.6 Gbps까지 가

능하다. 상기 단일 캐리어 방식 외에 OFDM을 사용하는 다중 캐리어의 경우 MCS 13 ~ 24를 지원할 수 있으며, 최대 6.75 Gbps의 전송률을 지원할 수 있다[2].

2.2 초고주파 무선랜 채널 특성

60 GHz를 사용하는 802.11ad의 경우 초고주파 채널 특성을 가지고 있다. 초고주파는 짧은 전파 길이를 가지고 상대적으로 낮은 투과율로 인해 경로 손실이 기존 마이크로파 대역(2.4 또는 5 GHz ISM 대역)에 비해 상대적으로 매우 크다. 따라서 사람에게 의해서도 신호가 차단되거나 다소 두꺼운 유리에서도 신호가 반사되는 것을 확인할 수 있다. 또한 초고주파 무선랜은 직진성이 강하므로 송수신기 사이의 시야 LoS(Line of Sight) 여부가 수신 신호 품질에 큰 영향을 줄 수 있다[3].

초고주파 무선랜은 IEEE 802.11ad 표준화 작업 그룹에 의해 실내에서의 채널 모델을 위한 연구가 수행되었다. 초고주파의 페이딩 특성으로는 60 GHz의 높은 주파수에 의한 전파 지연의 직진성으로 마이크로파의 경우보다 상대적으로 영향이 적다. 페이딩 특성에 따른 신호 영향은 심볼간 간섭 ISI(Inter-Symbol Interference)에 의해 신호대 잡음비(SNR: Signal to Noise Ratio)가 낮아진다[5].

2.3 초고주파 무선랜 빔포밍

2.2 절에서 논의한 802.11ad 무선랜의 높은 경로 손실을 보상하기 위해 초고주파 무선랜에서는 지향성 안테나를 이용한 빔포밍이 적용될 수 있다[2]. 빔포밍은 안테나 특성에 따라 특정 방향으로 신호를 집중시키는 것으로 전방향 안테나 방사보다 높은 안테나 이득을 취할 수 있는 장점이 있다. 안테나 어레이에 위상 제어를 통한 빔 방향을 제어 할 수 있고 선형 어레이 방식이나 원형 형태의 어레이 방식을 사용할 수 있다. 또는 패치, 혼 형태의 지향성 안테나를 이용하여 특정 방향으로만 신호를 발산할 수 있다[9]. 지향성 안테나는 안테나 이득이 높고 적은 사이드 빔을 생성할 수 있으나, 요구되는 방향에 따라 섹터 별로 안테나를 설치해야 하는 단점이 있다. 이 외에 Yagi 안테나, End-fire 안테나와 같이 적은 손실과 함께 특정 방향으로 빔을 생성하는 어레이 안테나와 초밀도 MIMO(Massive Multi Input Multi Output)를 지원하는 패치형 스마트 안테나가 사용되고 있다. 802.11ad는 이러한 빔포밍을 위한 표준을 지원하고 있다[2].

3. 실험 및 결과

3.1 실내 초고주파 무선랜 측정 환경

실내 초고주파 무선랜 성능 측정을 위해 현재 상용화 단계에 있는 802.11ad 모듈을 이용한 두 대의 랩탑(Laptop PC) 송수신기를 사용하였다. 802.11ad 모듈은 USB 3.0으로 PC에 연결되어 있으며 Tensorcom 사의 칩셋을 이용하여 제작된 것으로 단일 캐리어 전송만 지원한다. 따라서 해당 송수신기의 경우, MCS 레벨 7까지 지원하며 실제 최대 패킷 데이터 전송률은 약 1.1 Gbps 정도이다. 802.11ad 모듈은 IEEE 802.11ad의 물리계층 및 MAC 기능을 수행하며 랩탑 PC의 USB 드라이버를 통해 제어 메시지 및 패킷 데이터의 송수신을 담당한다. 본 논문의 실험환경은 CPU i7 7700HQ, 메모리 4GB 및 GPU가 장착된 랩탑 PC를 사용하였다.

본 실험에 사용된 802.11ad 모듈은 End-fire 안테나를 사용하고 있으며, Tx와 Rx를 위해 각 2개씩 사용하였다. End-fire 안테나는 Yagi 안테나와 같이 안테나 어레이로 되어 있으나 안테나 간 위상이 180°로 역전되어 있다는 것이 차이점이다. End-fire 안테나는 이런 점에서 Yagi 안테나와 같이 지향성 빔 형태를 생성하지만 이득이 적다. 하지만 안테나 개수에 따라 빔 폭이 적은 형태의 빔을 형성할 수 있는 장점이 있다.

3.3 초고주파 실내 측정 실험 결과

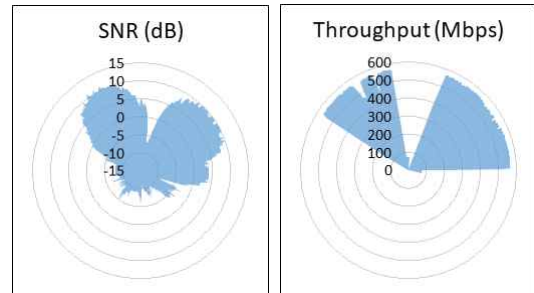
3.3.1 빔 패턴 측정

실험에 사용된 802.11ad 모듈에서는 동적 위상 설정이 불가하고 End-fire 안테나 어레이에서 스위칭 안테나 간격 설정을 통해 빔 패턴을 설정할 수 있다. 본 실험을 위해 송수신 장치의 간격은 2 m로 고정하고 송신 장치에서 UDP 패킷 트래픽을 MCS 2로 고정 변조하여 보낸다.

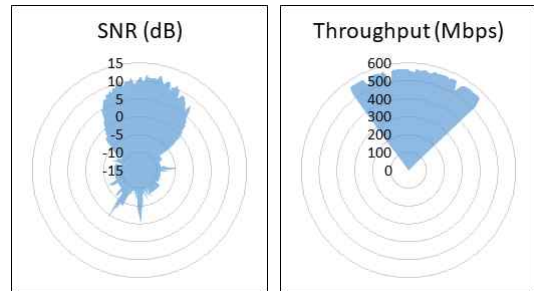
[Fig. 1]은 Boresight가 $\pm 60^\circ$ 로 정했을 때의 송신 노드의 빔 방사 형태를 측정했다. 원점을 중심으로 각 60° 로 두 개의 메인로브가 발생하며 다수의 지향성 손실에 따른 사이드로브가 원형 형태로 방사되고 있는 것을 관찰할 수 있다. Boresight 지점에 메인로브의 경우 최대 약 11 dB, 사이드로브는 약 -10 dB의 SNR을 얻었다. MCS 2의 SNR 한계치 이하 수신 신호는 자연스럽게 필터링되기 때문에 데이터 전송률 플라 그래프에서는 더 명확한 빔 형태를 확인할 수 있다. 측정 오차로 정확한 대칭 구조를 보이지는 않지만 0° 를 기준으로 좌우 약 $\pm 60^\circ$ 로

펼쳐진 모습을 확인할 수 있다.

[Fig. 2]는 $\pm 30^\circ$ Boresight의 빔 형태를 보여준다. 전체 빔 폭은 대략 60° 정도로 확인되며 메인로브와 사이드로브의 안테나 이득은 상기 $\pm 60^\circ$ 의 경우와 동일하게 수신 SNR이 각각 12와 -10 dB 정도 측정되었다. 이를 통해서 위상 기반 안테나 이득이 Boresight 방향과 무관하게 안테나 어레이 개수에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.



[Fig. 1] $\pm 60^\circ$ Boresight beam pattern



[Fig. 2] $\pm 30^\circ$ Boresight beam pattern

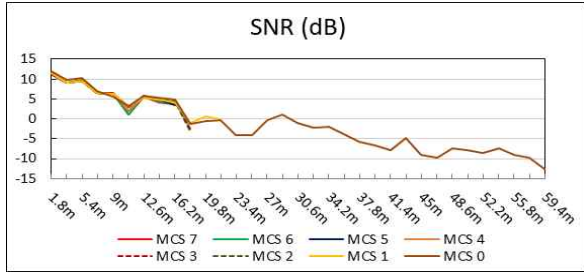
3.3.2 거리에 따른 SNR 실험

실내 복도 환경에서 거리에 따른 패킷 전송률을 각각 다른 MCS 수준을 사용하여 실험하였다. Boresight $\pm 30^\circ$ 의 빔을 형성하여 180 cm 간격으로 MCS 0 ~ 7까지 변조 레벨을 바꾸면서 수신 신호를 관측하였다. 복도 환경은 벽면과 지면의 재질에 따라 반사를 통한 분산 신호가 발생할 수 있다[6].

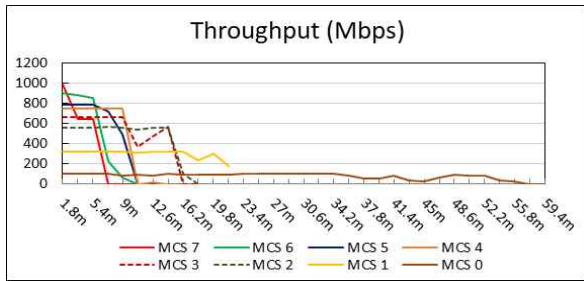
[Fig. 3]은 송수신 거리에 따른 수신 SNR 변화를 측정한 그래프이다. 첫 번째 측정인 180 cm에서 12 ~ 13 dB부터 최대 59 m에서는 -13 dB까지 떨어졌다. 따라서 FSPL 모델에 따라 $\alpha * 10 \log(0.0572) = -26$ dB이면 경로 손실 Exponent는 약 2.1 정도 된다. 이는 일반적으로 실외에서 사용되는 2.5에 비해 낮지만 실내 환경을 고려했을 때 오류가 크지는 않았다[10].

[Fig. 4]은 거리에 따른 MCS 별 평균 패킷 전송률을 보여준다. 그래프는 전체적으로 거리의 증가에 따라 전

송률이 하향되는 것을 목격할 수 있었다. 페이딩에 의한 신호 감쇄로 인해 데이터 전송률이 급격이 낮아지는 것은 반복 실험 횟수가 충분하지 못한 것으로 분석된다. [Fig. 3]와 [Fig. 4]을 비교 분석하여 각 MCS 별 요구 SNR 값을 <Table 1>과 같이 관측할 수 있었다.



[Fig. 3] SNR per distance and MCS



[Fig. 4] Throughput per distance and MCS

<Table 1> MCS-SNR

MCS	0	1	2	3	4	5	6	7
SNR(dB)	-10	-0.5	2.5	4.5	6	7.5	8.5	9.5

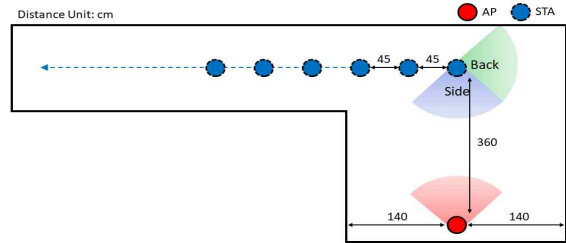
3.3.3 ‘ㄱ’ 자 복도 환경 실험

‘ㄱ’ 자 형태의 복도에서 [Fig. 5]와 같이 45cm씩 움직이며 측정하였다. 이때, 움직이는 모듈의 바라보는 방향은 고정된 모듈과 마주보는 방향(Side)과 움직이는 방향의 뒤를 바라보는 방향(Back)으로 두고 신호를 관측하였다. Boresight $\pm 30^\circ$ 일 때와 $\pm 60^\circ$ 일 때를 측정했다.

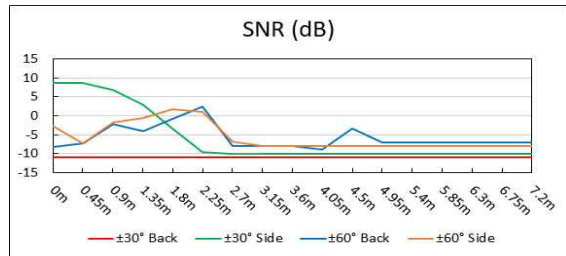
[Fig. 6]에서 $\pm 30^\circ$ Back은 통신 가능한 각도 안에 들어가기 전에 벽을 만나 신호를 수신할 수 없었다. $\pm 30^\circ$ Side는 옆으로 움직일수록 감소하며 벽 부분이 시작하는 1.4 m 이후에서도 선형으로 하락하였다.

$\pm 60^\circ$ Back은 이동할수록 증가하다가 벽 부분인 1.35 m 부근부터 잠시 감소한 뒤 다시 증가했다. 각도를 넘어서 벽이 부딪히는 부분인 2.25 m부터 감소하는 모습이

관측되었다. 4.5 m 부근에서 지면과 벽의 반사로 인해 SNR 값의 변화를 보였다. $\pm 60^\circ$ Side는 중심에서 낮은 SNR 값을 보이다 움직일수록 증가한다. 이후 Back과 마찬가지로 감소한 뒤 증가하는 모습을 보이지 않았다.



[Fig. 5] Corridor measurement location

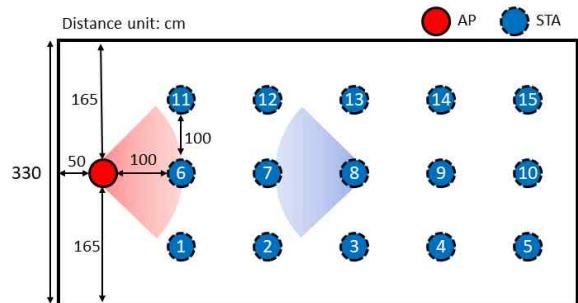


[Fig. 6] Receive SNR per distance and direction

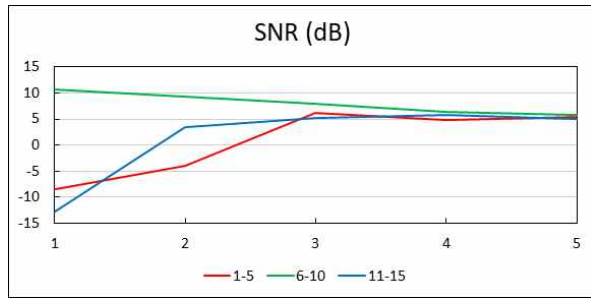
3.3.4 사무실 환경 실험

실내 사무실 환경에서 어느 정도의 Coverage를 가지는지 알아보기 위해 Boresight $\pm 30^\circ$ 로 측정하였다. [Fig. 7]와 같이 거리와 폭을 1m 간격으로 신호를 관측하였다.

측정 결과인 [Fig. 8]에서 45도 각도인 1번과 11번에서는 Boresight 대로 SNR 값이 거의 보이고 있지 않으며 $\pm 30^\circ$ 안에 들기 시작한 2번과 12번의 SNR은 이전 값보다 증가하여 3번과 13번까지 증가한 뒤 감소하는 것을 관측할 수 있었다. 정면에서 측정한 6 ~ 10번은 처음부터 거리에 따라 서서히 감소하는 결과를 나타내었다.



[Fig. 7] Office measurement location



[Fig. 8] SNR per position in the office

4. 결론

본 논문에서는 초고주파 무선랜 모듈을 사용해 다양한 실내 환경에서의 신호의 특징을 알아보았다. 802.11ad 표준 거리는 약 10 m까지 유효 범위지만 복도 측정에서는 복도 벽면의 반사의 분산 신호로 인해 약 최대 30 m까지 MCS 1의 전송률로 보낼 수 있었다. ‘ㄱ’ 자 형태의 복도에서의 측정을 통해 거리보다 LoS에 더 민감하다고 판단된다. 결론적으로 효율적인 초고주파 무선랜 이용을 위한 실험 결과를 제공하고 실험 결과를 통해 실내에서 이용하기에 충분하다고 판단되며 이후 비슷한 실내 실험 구성에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이후 후속 연구로 사람으로 인한 신호 차단이 미치는 영향에 대해 연구가 필요하다[11,12].

REFERENCES

- [1] Eldad Perahia, Carlos Cordeiro, Minyoung Park, L. Lily Yang, "IEEE 802.11 ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi", 2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, pp. 1-5, 2010.
- [2] Thomas Nitsche, Carlos Cordeiro, Adriana B. Flores, Edward W. Knightly, Eldad Perahia, Joerg C. Widmer, "IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gigabit-per-Second Wi-Fi", IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 12, pp. 132-141, 2014.
- [3] Alexander Maltsev, Roman Maslennikov, Alexey Sevastyanov, Alexey Khoryaev, Artyom Lomayev, "Experimental Investigations of 60 GHz WLAN Systems in Office Environment", IEEE Journal On Selected Areas in Communications, Vol. 27, No. 8, pp. 1488-1499, 2009.
- [4] Der-Jiunn Deng, Kwang-Cheng Chen, Rung-Shiang Cheng, "IEEE 802.11ax: Next Generation Wireless Local Area Networks", 10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, pp. 77-82, 2014.
- [5] Martin Jacob, Christian Mbianke, Thomas Kürner, "A Dynamic 60 GHz Radio Channel Model for System Level Simulations with MAC Protocols for IEEE 802.11ad", IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2010), pp. 1-5, 2010.
- [6] Angelos A. Goulianos, Alberto L. Freire, Tom Barratt, Evangelos Mellios, Peter Cain, Moray Rumney, Andrew Nix, Mark Beach, "Measurements and Characterisation of Surface Scattering at 60 GHz", arXiv, arXiv:1710.05631, 2017.
- [7] Yong Niu, Yong Li, Depeng Jin, Li Su, Athanasios V. Vasilakos, "A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges", Wireless Networks, Vol. 21, No. 8, pp. 2657-2676, 2015.
- [8] Sai Shankar N., Debashis Dash, Hassan El Madi, Guru Gopalakrishnan, "WiGig and IEEE 802.11ad For Multi-Gigabyte-Per-Second WPAN and WLAN", arXiv, arXiv:1211.7356, 2012.
- [9] Dian Wang, Chi Hou Chan, "Multiband Antenna for WiFi and WiGig Communications", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 15, pp. 309-312, 2015.
- [10] Krystof Zeman, Martin Stusek, Jiri Pokorny, Pavel Masek, Jiri Hosek, Sergey Andreev, Pavel Dvorak, Radovan Josth, "Emerging 5G applications over mmWave: Hands-on assessment of WiGig radios", 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing(TSP), pp. 86-90, 2017.
- [11] Avishek Patra, Ljiljana Simic and Petri Mähönen, "Smart mm-Wave Beam Steering Algorithm for Fast Link Re-Establishment under Node Mobility in 60 GHz Indoor WLANs", Proceedings of the 13th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, pp. 53-62, 2015.
- [12] Hongyun Chu, Pingping Xu, "Relay Selection with Feedback Beamforming Information for NLoS 60GHz MmWave WLANs/WPANs", 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 5514-5519, 2014.
- [13] L. Lily Yang, "60GHz: Opportunity for Gigabit WPAN and WLAN Convergence", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 39, No. 1, pp. 56-61, 2009.
- [14] Theodore S. Rappaport, George R. MacCartney, Mathew

K. Samimi, Shu Sun, "Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design", IEEE Transactions on Communications, Vol. 63, No. 9, pp. 3029-3056, 2015.

- [15] Munhwan Choi, Gyu Jin Lee, Sunggeun Jin, Jonghoe Koo, Byoungjin Kim, Sunghyun Choi, 'Link Adaptation for High-Quality Uncompressed Video Streaming in 60-GHz Wireless Networks', IEEE Transactions on Multimedia, Vol. 18, No. 4, pp. 627-642, 2016.

신 동 일(Shin, Dong Il)

[학생회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 컴퓨터공학과 학사과정
- 관심분야 : 초고주파 통신, 무선랜
- E-Mail : luiten@naver.com

김 우 성(Kim, Wooseong)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울시립대학교 전자기공학부(학사)
- 2004년 2월 : 한국과학기술원 네트워크(공학석사)
- 2012년 3월 : Univ. of California, Los Angeles 네트워크(공학박사)
- 관심분야 : 차량 네트워크, 5G 네트워크
- 2015년 2월 ~ 현재 : 가천대학교 컴퓨터공학과 교수
- E-Mail : wooseong@gachon.ac.kr

박 양 재(Park, Yang Jae)

[정회원]



- 1985년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
- 1990년 8월 : 인하대학교 정보공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 인하대학교 전자계산공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2002년 12월 : 주식회사 이메디피아 원격의료연구소 연구소장
- 1993년 2월 ~ 현재 : 가천대학교 IT대학 컴퓨터공학과 교수
- 관심분야 : HCI, 모바일 네트워크, 감성공학
- E-Mail : parkyj@gachon.ac.kr