

랜덤 포레스트를 이용한 W-대역의 경로손실 분석

Path loss analysis of W-band using random forest

조연기*, 김기철**, 박주만**, 최증원*, 조한신*★

Yeongi Cho*, Kichul Kim**, Juman Park**, Jeong Won Choi**, Han-Shin Jo**★

Abstract

The W-band (75-110GHz) is a band that can utilize at least 10 times more bandwidth than the existing 5G band. Therefore, it is one of the bands suitable for future mobile communication that requires high speed and low latency, such as virtual and augmented reality. However, since the wavelength is short, it has a high path loss and is very sensitive to the atmospheric environment. Therefore, in order to develop a W-band communication system in the future, it is necessary to analyze the characteristics of path loss according to the channel environment. In this paper, to analyze the characteristics of the W-band path loss, the random forest technique was used, and the influence of the channel parameters according to the distance section was analyzed through the path loss data according to various channel environment parameters. As a result of the simulation, the distance has the highest influence on the path loss in the short distance, and the other channel environment factor is almost ignored. However, as the distance section became longer, the influence of distance decreased while the impact of clutter and rainfall increased.

요약

W-대역(75-110GHz)은 기존 5G 대역에 비해 최소 10배 이상의 대역폭 활용이 가능한 대역이다. 따라서 가상 및 증강 현실과 같이 빠른 속도와 저지연이 요구되는 미래 이동통신에 적합한 대역 중 하나이다. 그러나 파장이 짧아 높은 경로손실을 가지며, 대기 환경에도 매우 민감한 특성을 가진다. 따라서 향후 W-대역 통신 시스템 개발을 위해서는, 채널 환경에 따른 경로손실의 특성을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 W-대역 경로손실의 특성을 분석하기 위해 랜덤 포레스트 기법을 이용, 다양한 채널 환경 파라미터에 따른 경로손실 데이터를 통해 거리 구간에 따른 채널 파라미터의 영향성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 근거리에서의 경로손실은 거리가 가장 높은 영향성을 가지며, 채널 환경 요소는 거의 무시된다. 그러나 거리 구간이 길어질수록 거리의 영향성이 감소하는 동시에 클러터와 강우량의 영향성이 증가하였다.

Key words : Atmospheric loss, Path loss, Rainfall attenuation, Random forest, W-band

* Dept. of Electronic Engineering, Hanbat National University

** Defense Space Technology Center, Agency for Defense Development

★ Corresponding author

Email : hsjo@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1132

※ Acknowledgment

This work was supported by the Agency for Defense Development (ADD) under Grant UD200019ED.

Manuscript received Feb. 28, 2022; revised Mar. 19, 2022; accepted Mar. 24, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

향후 이동통신 서비스는 가상 및 증강 현실 기기의 보편화로 인해 100Gbps 이상의 데이터 전송이 요구될 것으로 예상된다[1]. 데이터 전송 속도를 높이기 위한 가장 간단한 방법은 더 넓은 주파수 대역을 사용하는 것이다. 그러나 현재 사용하고 있는 대역에서 주파수 대역을 넓히는 것은 실질적으로 매우 어려운 상황이며, 따라서 향후 더 높은 대역폭을 사용하여 혁신적인 통신속도 향상을 가져오기 위해서는 새로운 주파수 대역을 발굴 및 통신시스템 핵심기술의 조기 확보가 필요하다.

W-대역(75-110GHz)은 mm-Wave의 특성과 Sub-THz의 특성을 모두 보유하고 있어, 안테나, RF/IF, 기저대역

하드웨어를 극소형으로 구현 가능하다는 장점이 있으며, 기존 5G 대역에 비해 최대 10배 이상의 높은 대역폭 사용이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 짧은 파장으로 인한 높은 경로 손실과 대기 환경에 민감한 특성으로 인해, 몇몇 고정 통신 시스템만이 이용되고 있는 상황이다.

본 연구는 W-대역 주파수 확보를 위해, W-대역의 경로손실 모델을 분석하고 채널 환경에 따른 경로 손실을 계산한다. 그 후, 랜덤 포레스트 기법을 이용하여 경로손실 계산에 사용된 채널 파라미터들이 주는 영향성을 근거리, 중거리, 장거리 통신 구간에 따라 분석하였다.

II. W-대역 경로손실 모델

W-대역은 높은 주파수를 사용하기 때문에 매우 높은 경로손실을 가지며, 동시에 대기 환경에 민감한 특성을 가진다. 따라서 우리는 주파수, 거리, 대기 환경을 고려한 W-대역의 경로손실 모델을 구현하였다. W-대역의 총 경로손실은 다음과 같다[2].

$$L_{total} = L_{free} + L_{ag} + L_{rain} + L_{ctt}, \tag{1}$$

여기서 L_{free} 는 자유공간 경로손실을 의미하며, L_{ag} 는 대기 가스에 의한 감쇠, L_{rain} 은 강우 감쇠, L_{ctt} 는 클러터에 의한 손실을 의미한다. 본 연구의 목표는 W-대역의 경로손실에 영향을 주는 파라미터를 찾고, 통신 거리에 따른 파라미터의 상관성 및 영향성을 분석하는 것이다. 따라서 색도잉, small-scale fading과 같이 랜덤한 요소는 고려하지 않는다.

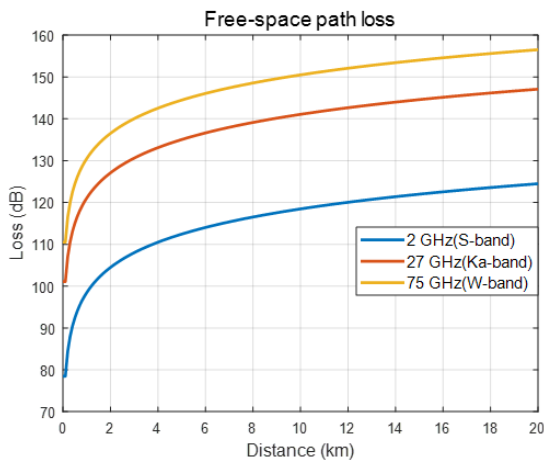


Fig. 1. Free-space path loss.
그림 1. 자유공간 경로손실

1. 자유공간 경로손실

자유공간 (Free-space)이란 송신기와 수신기 사이에 흡수, 반사, 굴절 등의 방해 요소가 전혀 없다고 가정된 공간을 의미하며, 자유공간 경로손실(free-space path loss, FSPL)은 자유공간에서 송신 안테나에서 수신 안테나까지의 직선경로에서 신호의 주파수와 거리에 의해 발생하는 손실을 의미한다. 위성통신 또는 경로상에 장애물이 없는 가시거리(Line-of-sight, LOS) 환경에서 수신 신호의 강도를 예측하기 위해 주로 사용되는 기본적인 경로손실 모델이며, 거리가 d km이고 주파수가 f GHz일 때, FSPL은 다음과 같다[3].

$$L_{free} [dB] = 20\log(f) + 20\log(d) + 92.45, \tag{2}$$

그림 1은 주파수와 거리의 변화에 따른 FSPL을 보여준다. FSPL은 주파수와 거리의 제곱에 비례한다. 따라서 W-대역의 FSPL은 기존 무선통신에 주로 이용되는 다른 대역보다 더 높은 FSPL을 가지는 것을 확인할 수 있다.

2. 대기 가스에 의한 감쇠

대기 가스에 의한 감쇠는 신호가 대기를 통해 전파될 때, 대기에 포함된 산소 및 수증기에 의한 신호의 흡수 또는 산란으로 인해 발생하는 감쇠를 의미한다. 대기 가스에 의한 감쇠는 다음과 같이 계산된다[4].

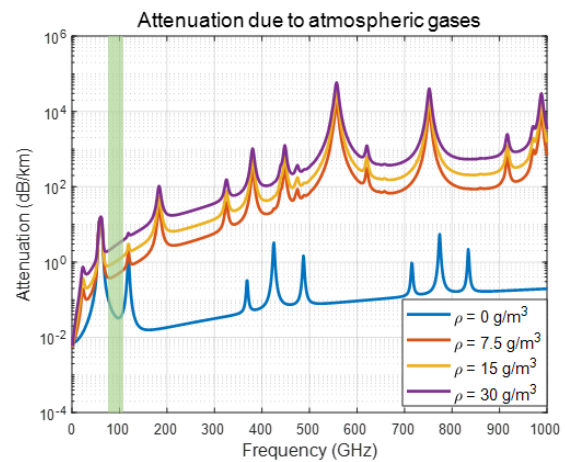


Fig. 2. Attenuation due to atmospheric gases.
그림 2. 대기가스에 의한 감쇠

$$L_{ag} [dB/km] = \gamma_o + \gamma_w = 0.1820fN''(f), \tag{2}$$

식 (2)에서 γ_o 는 산소 질소와 같은 건조한 공기에 의한 감쇠, γ_w 는 수증기에 의한 감쇠를 나타내며, $N''(f)$ 는 주파수에 따른 복합 굴절률을 나타내며 이에 관련된 자

세한 수식은 ITU-R P.676에 제시되어 있다[4]. 그림 2는 대기 중 수증기 밀도에 따른 대기가스에 의한 감쇠를 보여준다. 그림과 같이 수증기 밀도가 높을수록 감쇠가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3. 강우 감쇠

강우 감쇠는 빗방울에 의한 신호의 감쇠로, 전파의 주파수가 높아져 빗방울의 크기가 파장에 대해 무시할 수 없는 수준이 되는 경우, 전파가 빗방울에 의해 산란하면서 신호의 감쇠가 발생된다. ITU-R 권고문에서는 이러한 강우 감쇠 모델을 제안하였으며, 10 GHz 이하의 주파수 대역에서는 무시 가능한 수준이며, 10 GHz 이상의 주파수 대역에서는 다음과 같이 계산된다[5].

$$L_{rain}[\text{dB/km}] = kR^\alpha, \quad (3)$$

여기서 R 은 시간당 강우량을 의미하며, k 와 α 는 각각 주파수, 편광 상태 및 신호 경로의 고도 각에 의해 결정되는 파라미터로, 자세한 내용은 ITU-R 권고문 P.838에 제시되어 있다[5].

그림 3은 시간당 강우량에 따른 강우 감쇠를 보여준다. 10 GHz 이하의 대역에서는 높은 강우량에서도 감쇠가 거의 없지만, 그 이상의 대역에서는 강우량이 증가할수록 높은 감쇠를 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

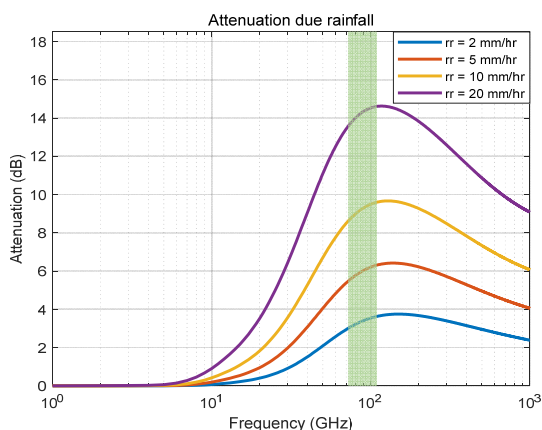


Fig. 3. Attenuation due to rainfall.
그림 3. 강우 감쇠

4. 클러터 손실

클러터는 지상의 빌딩 또는 초목과 같은 장애물을 의미한다. 신호의 경로상에 클러터가 존재하는 경우, 클러터에 의해 발생하는 전파 손실을 클러터 손실이라 하며, ITU-R P.2108에서는 10-100 GHz 사이에서 지상경로에서 발생하는 클러터 손실과 지상과 우주 사이의 경

로에서 발생하는 클러터 손실 모델을 제안하고 있다[6]. 본 논문에서는 이 중 지상 경로에서 발생하는 클러터 손실 모델을 이용하였으며, 지상경로에서 $p\%$ 의 위치 확률 (percentage of location)을 초과하지 않는 클러터 손실은 다음과 같이 계산된다.

$$L_{clt} = -5\log(10^{-0.2L_l} + 10^{-0.2L_s}) - \sigma_{cb}Q^{-1}(p/100), \quad (4)$$

여기서, $Q^{-1}(p/100)$ 는 역의 정규분포함수를 의미하며, L_l , L_s , σ_{cb} 는 주파수와 거리에 관한 함수로 ITU 문서에 제시되어 있다[7].

그림 4는 50%의 위치 확률에서의 클러터 손실을 보여준다. 경로의 길이가 길어질수록 클러터 손실이 증가하지만 2 km 이상의 거리에서는 추가적인 손실이 크지 않아 수렴하며, 10 GHz 이상의 주파수 대역에서는 주파수에 의한 클러터 손실 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

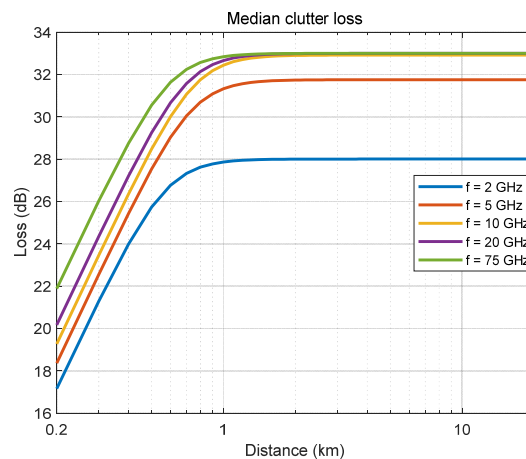


Fig. 4. Clutter loss.
그림 4. 클러터 손실

III. 랜덤 포레스트를 이용한 중요도 계산

1. 랜덤 포레스트 기법

II장에서 설명한 경로손실 모델을 통해, 우리는 W-대역의 경로손실을 계산할 때, 다양한 변수들을 고려해야 한다는 점을 확인하였다. 따라서 각 변수들의 중요도를 분석하기 위해, 우리는 랜덤 포레스트 기법을 이용, 거리 구간을 나누고, 각 거리 구간에서 발생하는 경로손실에 대해 변수 중요도를 계산하였다. 랜덤 포레스트 방법은 의사결정트리 모델의 과적합을 해결하기 위해, 그림 5와 같이 다수의 의사결정트리를 취합하여 학습성능을 높이는 앙상블 모형이다.

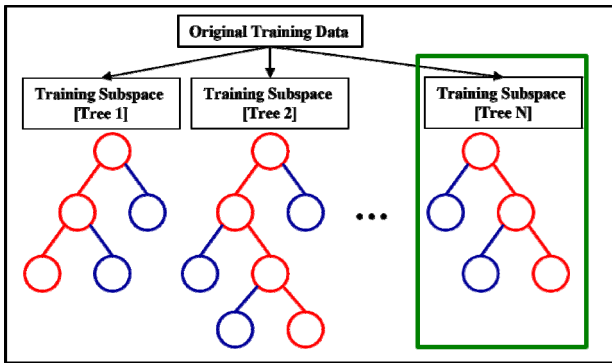


Fig. 5. Decision tree of random forest.
그림 5. 랜덤 포레스트의 의사결정트리

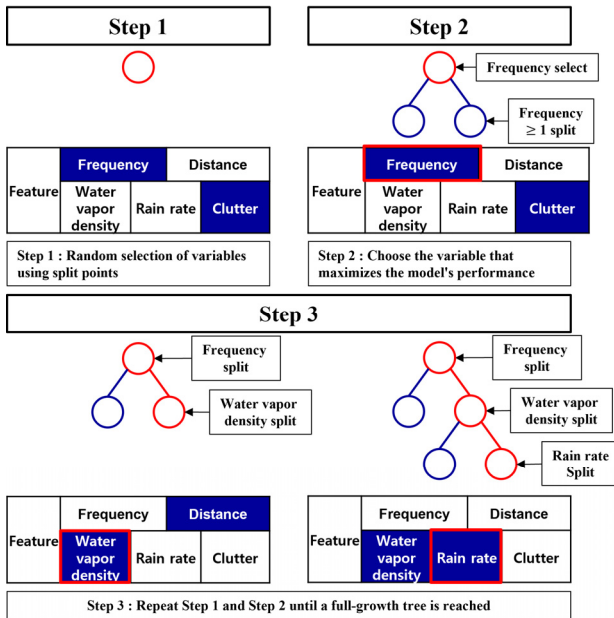


Fig. 6. Decision tree creation process.
그림 6. 의사결정트리 생성 과정

그림 6은 의사결정트리의 생성 과정을 보여준다. 부트스트랩 샘플링을 통해 전체 데이터 세트에서 추출된 샘플 데이터를 이용, 첫 번째 분기점에 사용할 변수를 무작위로 2개 선택한다. 그 후 모델의 성능을 최대로 하는 해당 변수와 split point를 찾고 다음 분기점으로 이동, 이를 반복하여 하나의 의사결정트리를 생성한다. 랜덤 포레스트는 랜덤한 데이터와 변수로 분개된 독립적인 각 트리를 융합하기 때문에 안정성과 예측력을 높이는 것이 가능하다.

변수 중요도는 랜덤 포레스트를 구축할 때, 각 변수가 얼마나 중요한 역할을 하는지를 나타내는 지표로, 각각의 의사결정 트리를 생성할 때 랜덤으로 추출되지 않은 out-of-bag(OOB) 데이터를 이용하여 계산한다. 먼저 중요도를 계산하고자 하는 변수가 실제값(real value)인

OOB 데이터 세트의 모델 출력값 r_i 와 변수가 무작위값(random value)인 데이터 세트의 모델 출력값 e_i 를 구한 뒤 아래와 같이 계산하여 변수 중요도 \bar{d} 를 계산할 수 있다[7].

$$d_i = e_i - r_i, \tag{5}$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum d_i, \tag{6}$$

여기서 \bar{d} 는 특정 변수가 랜덤하게 변형되었을 때의 성능 변화를 나타내는 변수이다. 따라서 \bar{d} 가 높을수록 중요도가 큰 변수임을 의미하며, 본 연구에서 경로손실을 결정하는데 중요한 파라미터임을 알 수 있다.

Table 1. Simulation parameters.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Range	Unit
Frequency	75~110	GHz
Path Distance	0.01~20	km
Water vapor density	0~20	g/m ³
Rain rate	0~20	mm/hr
Percentage of location	1~99	%

2. 경로손실 모델의 변수 중요도 계산

표 1은 학습에 사용된 경로손실 파라미터를 보여준다. 경로손실은 II장에서 서술한 내용을 통해 계산되었으며, 주파수와 거리는 모든 경로손실 모델에, 대기 중 수증기 밀도는 L_{ag} 에, 강우량은 L_{rain} 에, 위치 확률은 L_{ctt} 를 계산하는데 사용된다. 표 1의 파라미터 범위에 따른 경로손실을 계산하였으며, 거리 구간을 근거리(0.01~1km), 중거리(1~5km), 장거리(5~20km)로 구분, 각 거리 구간에 따라 데이터 세트를 구분지어 랜덤 포레스트를 구현하였다. 랜덤 포레스트는 각 거리 구간에서 표 1의 파라미터 변화를 통해 계산된 9,525,600개의 경로손실 데이터 세트를 이용하였으며, 각 의사결정트리에는 전체 데이터 세트의 20%인 1,905,120개를 사용, 100개의 트리를 생성하였으며, 트리 생성 과정을 통해 각 파라미터가 경로손실에 미치는 중요도를 분석하였다.

표 2~4는 거리 구간에 따른 경로손실 모델의 변수 중요도 결과를 보여준다. 주파수의 경우, 거리 구간이 길어질수록 높은 영향성을 보여주지만 다른 변수들에 비해 그 영향은 매우 미미하였다. 거리는 모든 경로손실 모델에 포함되는 가장 중요한 요소로, 근거리에서 거리의 영향이 87%로 근거리의 경로손실을 결정하는 데 있어 대

부분을 차지하지만, 중거리와 장거리에서는 거리에 대한 중요도가 절반 이하로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 대기 중 수증기 밀도의 경우, 주파수와 같이 거리 구간이 길어질수록 영향성이 증가하지만 크게 고려할 요소는 아닌 것으로 확인되었다.

그러나 강우 감쇠를 결정하는 시간당 강우량은 근거리에서는 거의 영향을 주지 않지만, 거리 구간이 길어질수록 영향성이 급격히 높아지며, 장거리 구간에서는 거리보다도 더 높은 중요도를 가지는 것을 확인하였다. 또한 클러터 손실을 결정하는 위치 확률은 특이하게 중거리 구간에서 가장 높은 영향성을 가지는 것으로 확인되었다.

Table 2. Parameter importance of near path loss.

표 2. 근거리 경로손실의 변수 중요도

Parameters	Value	Unit
Frequency	0.3	%
Path Distance	87	
Water vapor density	0.013	
Rain rate	1.47	
Percentage of location	11.217	

Table 3. Parameter importance of intermediate path loss.

표 3. 중거리 경로손실의 변수 중요도

Parameters	Value	Unit
Frequency	1.61	%
Path Distance	37.68	
Water vapor density	1.22	
Rain rate	26.29	
Percentage of location	33.2	

Table 4. Parameter importance of long-distance path loss.

표 4. 장거리 경로손실의 변수 중요도

Parameters	Value	Unit
Frequency	1.78	%
Path Distance	40.37	
Water vapor density	5.68	
Rain rate	42.88	
Percentage of location	9.34	

이러한 시뮬레이션 결과를 통해, 단거리 통신에서는 거리가 제일 중요한 요소이며, 중거리에서는 거리와 강우량, 위치 확률을 골고루 고려, 장거리에서는 거리와 강우량을 고려해야 함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 채널 환경에 민감한 W-대역의 특성을 고려하여 W-대역에 적용되는 다양한 경로손실 모델을 설명하고 다양한 파라미터의 변화에 따른 경로손실 데이터를 수집, 랜덤 포레스트 기법을 이용하여 각 변수들의 중요도를 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 거리 구간에 따라 변수의 중요도가 변화하였으며, 근거리에서는 경로손실이 대부분 거리에만 의존하였으나, 중거리에서는 거리, 강우량, 위치 확률이 영향을, 장거리에서는 거리와 강우량에 의해 주 영향을 받는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 향후 W-대역 통신 시스템을 설계할 때, 시스템의 송수신 거리에 따라 영향을 미치는 주요 요소들만 고려하여 시스템을 설계할 수 있으며, 향후 연구에서는 시스템의 변복조 방식, 안테나 이득, 빔 정렬 오차와 같은 시스템 파라미터 변화에 따른 변수 중요도를 추출, 통신 환경에 따라 최적의 통신 성능을 위한 최적화 연구를 수행할 계획이다.

References

- [1] J. H. Jung, M. D. Kim, J. N. Lee, Y. K. Cho, K. S. Kim, H. K. Kwon, Y. S. Song, H. S. Park, E. Y. Choi, J. S. Kim and T. J. Kim, "Wireless Communication System on Very High Frequency," vol.34, no.6, pp.28-41, 2019.
DOI: 10.22648/ETRI.2019.J.340603
- [2] ITU-R Recommendation, "P.530 : Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>
- [3] ITU-R Recommendation, "P.525 : Calculation of free-space attenuation," <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/en>
- [4] ITU-R Recommendation, "P.676 : Attenuation by atmospheric gases and related effects," <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676>
- [5] ITU-R Recommendation, "P.838 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>
- [6] ITU-R Recommendation, "P.2108 : Prediction of clutter loss," <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2108/en>

[7] L. Breiman, "Random Forests," <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>

BIOGRAPHY

Yeongi Cho (Member)



2018 : BS degree in Electronic Control Engineering, Hanbat National University.
2020 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University.

2020~present : PhD candidate in Electronic Engineering, Hanbat National University.

Kichul Kim (Member)



2007 : BS degree in Electronic Engineering, Yeungnam University.
2011 : MS degree in Information and Communication Engineering, GIST.
2016 : PhD degree in Electrical and Electronic Engineering, KAIST.

2016~present : Senior researcher, Agency for Defense Development.

Juman Park (Member)



2009 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungnam University.
2011 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.
2012~present : Senior researcher, Agency for Defense Development.

Jeong Won Choi (Member)



1989 : BS degree in Computer Science and Statistics, Chungnam National University.
1993 : MS degree in Computer Science and Statistics, Chungnam National University.

1997 : PhD degree in Computer Science, Chungnam National University.

1997~present : Senior researcher, Agency for Defense Development.

Han-Shin Jo (Member)



2001 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.
2004 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : PhD degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : Post-Doc, University of Texas at Austin.

2011 : Senior Researcher, Network Division, Samsung Electronics.

2012~present : Professor, Hanbat National University.