

NS-3 기반의 mmWave 대역 채널 모델링 및 RF 성능 검증 Channel Modeling and RF Performance Verification in mmWave Bands Based on NS-3

이 승 민*, 서 준 석**, 장 홍 제*, 최 명 렬**

Seung-Min Lee*, Jun-Seok Seo**, Hong-Je Jang*, Myung-Ryul Choi**

Abstract

This paper implements a channel model for mmWave bands using an NS-3-based 5G system-level simulator and analyzes the reliability and validity of the implemented model through RF performance verification. The channel model for RF performance verification in the mmWave bands consider parameters such as characteristics defined in 3GPP TR 38.901, beam-forming, antenna configuration, scenarios, among others. Furthermore, the simulation results verify compliance within the ranges permitted by the 3GPP standards and verify reliability in indoor environmental scenarios by exploiting the Radio Environment Map (REM). Therefore, the channel model implemented in this study is applicable to the actual design and establishment of 5G networks, presenting a method to evaluate and validate RF performance by adjusting various parameters.

요 약

본 논문은 NS-3 기반의 5G 시스템 레벨 시뮬레이터를 활용하여 mmWave 대역의 채널 모델을 구현하고, RF 성능 검증을 통해 구현한 모델의 신뢰성과 유효성을 분석한다. mmWave 대역의 RF 성능 검증을 위한 채널 모델은 3GPP TR 38.901에서 정의하는 채널의 특성, 빔포밍, 안테나 구성, 시나리오 등의 파라미터를 고려하여 구성한다. 또한, 시뮬레이션 결과는 3GPP 표준에서 허용하는 범위 내에 있음을 확인하고, REM(Radio Environment Map)을 활용하여 실내 환경 시나리오에서 신뢰성을 증명한다. 따라서 본 연구에서 구현한 채널 모델은 실제 5G 네트워크의 설계 및 구축에 적용이 가능하며, 다양한 파라미터 변경으로 RF 성능을 평가하고 검증하는 방법을 제시한다.

Key words : NS-3, mmWave, Channel Modeling, RF performance, 3GPP

* Dept. of Electrical and Electronic Eng, Hanyang University

** S.M.A.R.T Industry Division Future Communication Technology Center, Korea Technology Laboratory

★ Corresponding author

E-mail : choimy@hanyang.ac.kr Tel : +82-400-5214

※ Acknowledgment

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy of Korea(Projet: P0014270)

Manuscript received Dec. 22. 2023; revised Dec. 25. 2023; accepted Dec. 27. 2023

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

5G NR(5th Generation New Radio)는 차세대 이동 통신으로 초고속(eMBB, enhanced Mobile Broadband), 초저지연(URLLC, Ultra-Reliable Low Latency Communication), 초연결성(mMTC, massive Machine Type Communication)등을 제공하여 통신 네트워크의 새로운 패러다임으로 대두되고 있다[1]. 5G는 mmWave 대역에서 효과적인 신호 처리 및 전송을 위한 시스템 설계가 필요하기 때문에 다중 경로, 감쇠, 신호의 전달 경로, 장애물과의 연관성 등의 다양한 요구 사항을 충족하여야 한다. 또한, 5G의 채널 모델링은 신호의 전달 경로 예측, 통신 시스템 설계, RF 성능 평가에 활용되어 5G 네트워

크를 실제 환경에 구축하기 위한 성능 개선 및 최적화에 활용된다. 본 논문은 mmWave 대역의 채널 모델을 5G 시스템 레벨 시뮬레이션인 NS-3(Network Simulator-3)을 활용하여 구현한다[2]. 특히, 시뮬레이션 결과는 3GPP의 레퍼런스와 비교하여 분석하고, 구현한 모델의 RF 성능을 검증하기 위해 REM(Radio Environment Map)을 활용한다.

II. 본론

3GPP(3rd Generation Partnership Project)는 5G mmWave 대역의 채널 성능을 평가하기 위한 표준과 다양한 툴을 개발하고 있다. 본 논문은 3GPP TR (Technical Report) 38.901인 “0.5~100GHz 이상의 주파수 스펙트럼을 위한 채널 모델에 대한 연구”를 고려하여 mmWave 대역의 채널 모델링을 NS-3로 구현한다 [3][4].

1. 3GPP TR 38.901의 채널 모델

3GPP TR 38.901의 주파수 스펙트럼은 차세대 네트워크의 설계 및 성능 평가를 위해 무선 통신의 동작 분석을 통한 채널 모델링이 필요하다. mmWave 대역의 채널 모델은 전파 특성이 복잡하고 민감하기 때문에 다양한 환경에 5G를 적용하기 위해 채널의 다양한 특성을 고려해야 한다. 특히, 채널 모델링은 넓은 주파수 스펙트럼에서 대역폭 확보에 효과적이며, RF 성능 분석을 통해 신뢰성 있고 효율적인 설계를 가능하다.

Table 1. mmWave channel model generation step.

표 1. mmWave 채널 모델 생성 단계

Step	Process
1	Set Scenario, antenna parameters
2	Assign propagation condition(LOS/NLOS)
3	Calculate Pathloss
4	Generate Correlated Large & Small Scale Parameters
5	Generate arrival & departure angles
6	Set antenna polarization
7	Generate Channel Coefficient
8	Apply pathloss and shadowing

3GPP TR 38.901은 5G의 성능 평가에 3D SCM (Spatial Channel Model)을 채널 모델을 활용하며, 표

1의 과정을 통해 모델을 생성한다.

$$PL_{LOS} = 32.4 + 17.3\log(d_{3D}) + 20\log(f_c) \quad (1)[3]$$

또한, 채널 모델의 안정성과 신뢰성 향상으로 RF 성능을 분석과, 고주파 대역의 통신을 구현하기 위해 본 논문에서는 채널 모델의 LOS(Line of Sight) 확률을 고려한다. 수식 1은 LOS 경로 손실을 나타내며, 수식에서 f_c 는 중심 주파수이며, d_{3D} 는 그림 1의 실내 환경에서 기지국과 단말에 대한 거리를 통해 계산한다.

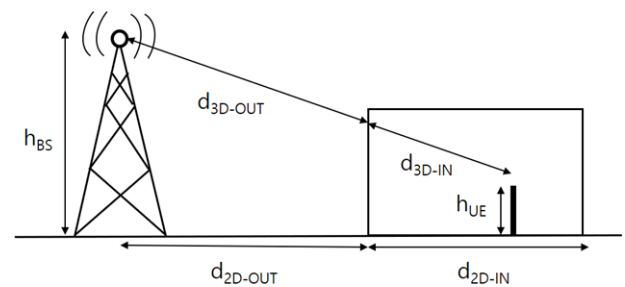


Fig. 1. Distance of BS and UE in indoor environments. 그림 1. 실내 환경에서 기지국과 단말의 거리[3]

또한, 기지국과 단말의 안테나 특성을 고려한 채널 모델링은 무선 통신 환경에서 신호 강도 및 방향성에 영향을 준다. 이를 통해 빔을 형성하여 5G의 통신 성능 및 품질 향상을 위한 빔포밍 기술에 활용된다. 안테나 모델은 그림 2와 같이 3GPP에서 정의한 모델로 M_g 개의 열, N_g 개의 행의 패널로 구성되며, 안테나는 수평 방향으로 $d_{g,H}$ 의 간격으로 수직 방향으로 $d_{g,V}$ 의 간격으로 배치된다. 또한, 안테나 패널은 단일 편광($P=1$)이나 이중 편광($P=2$)로 설정할 수 있으며, 본 연구에서는 이중 편광으로 설정한다.

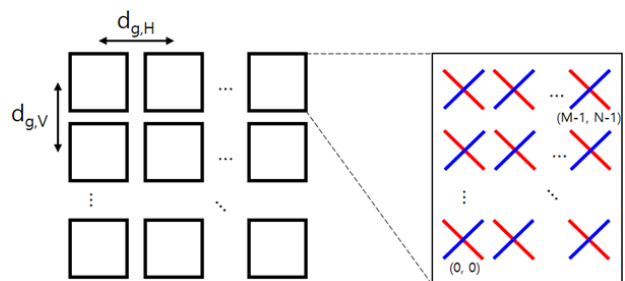


Fig. 2. Antenna Mode of 3GPP. 그림 2. 3GPP의 안테나 모델[3]

$$A_{E_y}(\theta'') = -\min\left\{12\left(\frac{\theta'' - 90^\circ}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_V\right\}$$

$$\theta_{3dB} = 65^\circ, SLA_V = 30dB \quad (2)[3]$$

$$A_{EH}(\phi'') = -\min\left\{12\left(\frac{\phi''}{\phi_{3dB}}\right)^2, A_m\right\}$$

$$\phi_{3dB} = 65^\circ, A_m = 30dB \quad (3)[3]$$

$$A''(\theta'', \phi'') = -\min\{-|A_{EV}(\theta'') + A_{EV}(\phi'')|, A_m\} \quad (4)[3]$$

수식 2은 안테나 요소의 수직 방사 패턴(dB)을 나타내며, 수식 3는 수평 방사 패턴(dB)을 나타낸다. 또한, 안테나 요소의 최대 방향 이득인 $G_{E,max}$ 은 8[dBi]로 설정한다. 수식 4는 3D 안테나 요소의 패턴을 결합하는 방법(dB)을 나타낸다.

2. NS-3 기반의 채널 모델 구현

5G 네트워크는 실제 환경에 구축하기 위해 다양한 요구사항을 충족하고, 최적화된 네트워크를 배치할 필요가 있다. NS-3는 네트워크 시뮬레이터로 특정 시나리오에 대한 5G의 환경 구현을 제공하는 시뮬레이터이다. 본 논문은 5G mmWave 대역의 채널 모델을 NS-3의 클래스를 확장 및 변경하여 구현한다.

가. NS-3와 5G-LENA의 개요

NS-3는 이산 이벤트 기반의 시뮬레이터로 전체 스택에 대한 시뮬레이션을 제공하여 통신 프로토콜, 표준, 네트워크에 대한 유연한 확장성을 제공한다. 본 연구는 NS-3의 모듈을 기반으로 하는 CTTC(Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya)의 5G mmWave 셀룰러 네트워크 시뮬레이터인 5G-LENA[5] 활용하였다.

이 시뮬레이터는 고도화되고, 정교한 프로토콜 스택을 구현할 수 있기에 통신 프로토콜 계층 간의 평가와 중단 간의 성능 분석이 가능하다. 본 논문에서 구현한 모델의 분석과 검증을 위한 클래스는 Channel Condition Model, Propagation Loss Model, Antenna Array Model, Radio Environment Map 등의 클래스를 활용하여 각 하위 클래스의 인스턴스를 생성하여 구현한다.

나. 채널 모델 구현

본 논문에서 구현한 mmWave 대역의 채널 모델은 실내 환경의 개방형(Open)과 혼합형(Mixed) 중에서 개방형의 시나리오만을 고려하며, 네트워크의 RF 성능을 분석하는 목적을 가진다. 5G는 mmWave 대역을 활용하여 빠른 데이터 전송 속도를 제공하고 유연한 주파수 대역 활용으로 다양한 지역 및 환경에 대한 향상된 네트워크 성능을 제공한다.

그림 3은 구현한 채널 모델의 실내 환경의 시나리오에

대한 레이아웃이며, 3D 공간 내에 12개의 기지국이 3m의 높이로 균등하게 배치되어 있다. 단말은 기지국과의 거리를 기반으로 각 기지국마다 10개의 단말을 선정하여 총 120개의 단말로 시뮬레이션을 진행한다.

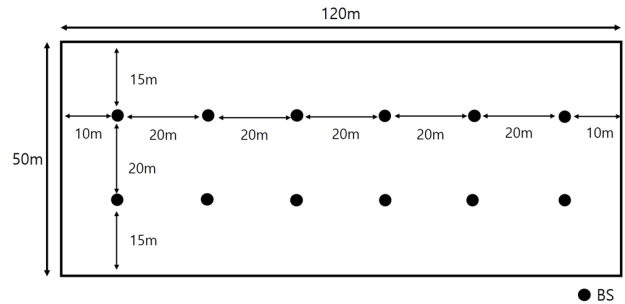


Fig. 3. Layout of indoor scenarios.
그림 3. 실내 환경 시나리오의 레이아웃[3]

mmWave 대역은 빠른 데이터 전송 속도를 제공하며, 전파의 특성으로 장애물의 영향을 많이 받는다. 본 논문에서 구현한 환경은 장애물이나 벽이 없이 직접 통신이 가능하여 LOS 확률을 활용한다. LOS는 장애물에 대한 예측으로 안테나 구성, 신호 감도 등의 특성을 고려할 수 있어 무선 네트워크의 성능 평가 및 최적화에 활용된다. 이는 네트워크 설계와 배치의 최적화, 신호 감쇠를 감안하여 통신 성능을 향상시킬 수 있다.

Table 2. Parameters of Indoor environments Scenario.

표 2. 실내 환경 시나리오의 파라미터

Parameters	Value
Carrier Frequency	30 GHz
Bandwidth	40 MHz
Subcarrier Spacing	60 kHz
Room Size	120m * 50m * 3m
Channel Model	3GPP TR 38.900 Table 7.5-6 Part 2[4]
Propagation Model	3GPP 38.900, Indoor Hotspot
ISD(Inter-site distance)	20 m
BS Tx Power	23 dBm
UE deployment	100% Indoor, 10 UEs per BS, randomly dropped
UT mobility v (horizontal plane)	3 km/h
Mim BS-UE distance(2D)	0 m

표 2는 시뮬레이션 시나리오에 대한 주요 파라미터, 표 3은 기지국의 파라미터, 표 4는 단말의 파라미터를

Table 3. Parameters related BS in Indoor environments.

표 3. 실내 환경에서 기지국 관련 파라미터[6]

Parameters	Value
BS antenna array	One TXRU per panel per polarization 1 TXRU : 4x8(3GPP elements)
TXRU mapping weights	3GPP TR 38.897 5.2.2 TXRU model-1, 2D sub-array partition model
BS Antenna Configuration	$(M, N, P, M_g, N_g) = (4, 8, 2, 1, 1)$ $(d_V, d_H) = (0.5, 0.5)\lambda$ Boresight direction is perpendicular to the ceiling
BS antenna pattern	See wall-mount in Table A.2.1-7 in TR 38.802 [6]
BS antenna height	3 m
BS antenna gain	8 dBi
Noise figure for BS	7 dB

다른다. mmWave 대역은 방향성을 고려한 시나리오 구성이 중요하기 때문에 기지국과 단말 모두 3GPP의 안테나 모델을 사용하고, TXRU(Transmit Radio Unit)을 통해 무선 시스템을 구성하며, sub-array로 분할하여 안테나 이득을 최대화한다. 특히, 빔 선택 기준은 빔포밍의 수신 전력을 최대화하기 위해 DFT 빔 중에서 최적의 빔을 선택한다. 특히, 빔은 azimuth 영역에서 $0 \sim 180^\circ$ 를 zenith 영역에서 $0 \sim 180^\circ$ 를 포함한다.

Table 4. Parameters related UE in Indoor environments.

표 4. 실내 환경에서 단말 관련 파라미터

Parameters	Value
UE antenna array	1 TXRU : 2x4(3GPP elements)
UE array orientation	$\Omega_{UT,\alpha}$ uniformly distributed on $[0, 360]$ degree, $\Omega_{UT,\beta} = 0$ degree, $\Omega_{UT,\gamma} = 0$ degree
UE Configuration	$(M, N, P, M_g, N_g) = (2, 4, 2, 1, 2)$ $(d_V, d_H) = (0.5, 0.5)\lambda$ $(d_{g,V}, d_{g,H}) = (0, 0)\lambda$ $\Theta_{mg,ng} = 90$ $\Omega_{0,1} = \Omega_{0,0} + 180$ The polarization angles are 0 and 90
UE antenna pattern	See Table A.2.1-8 in TR 38.802
UE antenna height	1.5 m
UE antenna gain	5 dBi
Noise figure for UE	10 dB

다. REM(Radio Environment Map) 개요

NS-3의 REM은 기지국 기준의 DL(DownLink)와 UL(UpLink)의 2D 레이아웃을 통해 무선 통신 시스템의

성능 및 품질의 검증 방안이다[7]. REM은 커버리지 영역, 빔 형태, 단말의 커버리지 등을 시각화하여 시뮬레이션 결과 분석에 유용하며, 송신 장치로 기지국을 선정한 DL REM과 단말로 선정한 UL REM을 활용한다. 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 분석하기 위해 SNR에 대한 REM만을 다루며, 이를 활용하여 구현한 채널 모델을 검증한다.

3. 시뮬레이션 결과

mmWave 대역은 고성능의 통신을 제공하기 위해 빔포밍을 활용하여 네트워크를 구성하여 신뢰성을 향상시킨다. 본 논문은 구현한 채널 모델의 신뢰성 및 유효성을 분석하기 위하여 시뮬레이션 결과의 SNR을 3GPP의 레퍼런스 결과와 비교하여 통신의 성능 및 품질을 분석하였다. 시뮬레이션 결과인 DL에 대한 SNR은 모든 단말에 대해 최적의 RSRP(Reference Signal Received Power)를 고려하여 기지국에 연결하며, 30GHz 대역의 채널 모델링 결과를 활용한다.

그림 4는 시뮬레이션 결과에 대한 그래프로 3GPP에서 정의하는 Upper Bound와 Lower Bound와 평균의 결과를 레퍼런스로 하는 SNR에 대한 CDF 그래프이다 [8][9]. Upper Bound와 Lower Bound는 3GPP TR 38.901의 채널 모델과 R1-1703534와 R1-1709828의 파라미터로 구성하며, 3GPP 파트너가 수행한 결과를 바탕으로 한다[10].

구성한 채널 모델의 결과는 캘리브레이션 이전과 이후의 데이터로 구분되며, 캘리브레이션 이전의 데이터는 NS-3 모듈만으로 구성된 초기 모델의 결과이다. 이에 대해 3GPP에서 허용하는 범위 내로 시뮬레이션 결과를 캘리브레이션하기 위해 파라미터의 값을 변경하여 모델을 구현한다.

캘리브레이션을 위해 구현한 모델은 빔포밍을 사용하기 위해 cell scan을 true로 설정하여 LOS 확률로 빔포밍 벡터를 구성하던 기존의 설정을 변경하고, 빔 탐색 각도는 45° 로 설정한다. 또한, 기지국 안테나 모델링에 대한 파라미터는 수식 2~4와 같이 3개의 섹터로 각 섹터의 상하, 좌우 방위의 65° 의 3 dB 빔 폭에 대한 기존의 설정을 변경한다. 변경된 설정은 상하, 좌우 방위에서 90° 의 3 dB 빔 폭을 가진 단일 섹터를 가지며, 이를 통해 안테나는 벽의 반대 방향으로 실내 공간에 전체 대해 방사된다[11].

특히, 캘리브레이션을 위해 구현한 모델은 안테나 패널의 각도 조절에 대한 설정을 추가한다. 기본으로 설정

된 안테나 패널의 각도는 지면에 수직으로 배치되어 있으나, 전체 공간 커버하기 위해 천장에 배치하도록 변경되며, 안테나의 각도에 대한 설정을 추가한다. 기존 모델의 안테나 각도는 bearing 각도, downtilt 각도로 설정하였으며, 캘리브레이션을 위한 구현한 모델은 slant 각도를 추가한다[3]. 안테나 bearing 각도는 안테나의 지향성을 나타내는 방위각이며, downtilt 각도는 안테나의 수직 방향으로 기울어진 각도, slant 각도는 안테나의 경사도로 downtilt 각도와 달리 특정 각도로 경사진 정도를 나타낸다. 이를 통해 천장에 배치된 안테나는 공간 전체에 대한 넓은 커버리지를 제공하여 신호를 더 넓은 범위로 전파하며, 기지국의 안테나 방향을 유연하게 조절하여 신호의 전파 효율이 향상되어 모든 단말에 안정적인 신호를 제공한다.

구현한 채널 모델의 캘리브레이션 이전의 결과는 3GPP 표준에서 허용하는 범위 외의 결과를 가지며, 캘리브레이션 결과와도 많은 차이가 있다. 이는 빔포밍, 기지국 안테나 배치 등에 차이가 있으며, 캘리브레이션을 통해 신호의 품질, 커버리지 등이 개선되었음을 확인하였다. 따라서 구현한 채널 모델의 캘리브레이션 결과는 Upper bound와 Lower bound의 평균치와 유사하기 때문에 구현한 채널 모델이 3GPP의 표준에 유효함을 분석하였다.

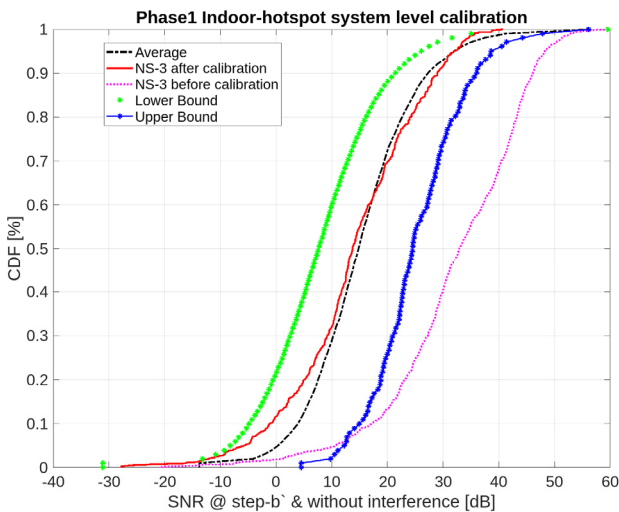


Fig. 4. CDF for system level calibration.
그림 4. 시뮬레이션 결과의 SNR 대한 CDF

표 5는 3GPP에서 허용하는 Upper Bound와 Lower Bound의 파라미터이며, 두 결과는 안테나 요소, 단말의 rotation, channel blockage에서 다른 파라미터를 가진다[12]. 특히, TR 38.897에서 다루는 안테나 요소를 활용하며, Upper Bound에서는 2D sub-array 분할로,

Table 5. Compare Parameter of Lower and Upper Bound.
표 5. Lower Bound와 Upper Bound의 파라미터 비교[10]

Parameter	Lower Bound	Upper Bound
Antenna Element	single TXRU per panel per polarization	2D sub-array partition model, Single TXRU per panel per sub-array per polarization
UE Rotation	fixed	random direction per drop, speed of 50rpm
Channel Blockage	without blocking	if block, K = 5

Lower에서는 기본 형태로 구성한다. 단말의 rotation은 Lower Bound에서는 고정되며, Upper에서는 랜덤한 방향성을 가진다. 또한, 채널 Blockage가 있는 모델은 파라미터의 시간적 가변성에 따라 조절되며, 각 링크의 LOS/NLOS 상태를 변경하지 않고 구성한다. 표 5에서 다루지 않는 이외의 파라미터는 모두 동일한 특성으로 설정한다.

본 논문은 구현한 모델의 동작 여부, 정확성, 신뢰성 검증을 위해 REM을 활용한다. REM은 채널 모델에 대

Table 6. REM for simulation results.

표 6. 시뮬레이션 결과에 대한 REM

Type	REM(SNR)
DownLink Coverage Area	
UpLink Coverage Area	
DownLink Beam Shape (BS number is 1)	
UpLink Beam Shape	
UE Coverage Area	

한 기지국과 단말의 배치, 안테나 구성, 빔 형태, 신호 강도, 신호의 간섭 영향 등을 분석하여 최적화된 상태의 네트워크 구성에 활용된다.

표 6은 DL와 UL에 대한 3가지 종류의 REM(SNR)을 나타내며, 분석을 통해 구현한 채널 모델의 신뢰성 및 정확성을 검증한다.

커버리지 영역 REM은 네트워크에서 간섭이 없는 이상적인 상황을 고려하며, 기지국의 배치에 따라 신호 강도가 상이하지만, 전체적인 신호 강도가 매우 높은 것으로 분석된다. 또한, DL의 빔 형태는 각 기지국에 대하여 시각화가 가능하며, 표 5에서는 0~12번 중 1번의 기지국에 대한 REM을 나타낸다.

빔 형태에 대한 REM은 기지국과 단말에 대한 네트워크 구성을 시각화하여 기지국과 단말의 안테나 배열, 방위각, 고도각, 안테나 요소의 이득, 수직/수평 간격 등에 대한 구성에 활용된다. 또한, 단말 커버리지 영역에 대한 REM은 UL만을 고려하여 단말의 커버리지 영역을 시각화한다. 이는 UL 빔 형태에 대한 REM을 통해 확인한 단말의 위치와 비교하여 분석하며, 각 단말의 위치에서 높은 신호 강도를 가짐을 확인하였다.

III. 결론

mmWave 대역은 많은 데이터를 빠른 속도로 전송하는 장점이 있기 때문에 차세대 이동통신에서 필수적이지만, 장애물이나 간섭에 대한 영향을 많이 받는다. 채널 모델링은 mmWave 대역의 단점을 해결하고, 5G가 활용되는 다양한 환경과 조건을 고려하여 RF 성능 개선 및 최적화에 활용된다.

본 논문에서 구현한 채널 모델은 NS-3 모듈을 기반으로 한 5G-LENA 시스템 레벨 시뮬레이터를 활용한다. 시뮬레이션 결과는 3GPP의 파라미터를 고려하여 캘리브레이션을 진행한다. 또한, 캘리브레이션 결과는 3GPP의 레퍼런스와 비교하여 분석한다. 따라서 시뮬레이션 결과는 3GPP의 허용 범위 내에 있기 때문에, 실제 5G mmWave 대역 구축에 활용 가능하다.

또한, mmWave 대역 채널 모델의 신뢰성 및 유효성 검증을 위해 REM을 활용하였다. 이를 통해 네트워크 시각화로 구현한 채널 모델이 실제 환경에 배치하기 위한 유효성을 분석하였다. 따라서 본 연구는 mmWave 대역의 채널 모델을 구현하며, 향후 본 연구는 다양한 시나리오에 적용되어 실제 5G 통신 환경을 구축함에 있어 네트워크 개선 및 최적화에 활용 가능하다.

References

- [1] Andrews, Jeffrey G., et al. "What will 5G be?", *IEEE Journal on selected areas in communications* 32.6, 2014, 1065-1082.
DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] Thomas R., Mathieu L., George F., Network Simulations with the ns-3 simulator, SIGCOMM'08, 2008, p.527.
- [3] TR 38.901, V16.1.0: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, 3GPP, 2019.
- [4] TR 38.900, V15.0.0: Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz, 3GPP, 2018.
- [5] "5G-LENA simulator", <https://5g-lena.cttc.es/>
- [6] TR 38.802, V14.2.0: Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects, 3GPP, 2017.
- [7] K. Koutlia, B. Bojović, S. Lagén, L. Giupponi, "Novel Radio Environment Map for the ns-3 NR Simulator", 2021 Workshop on ns-3 (WNS3 2021), 21, 2021. DOI: 10.1145/3460797.3460803
- [8] R1-1703534: Evaluation assumptions for Phase 1 NR MIMO system level calibration, 3GPP, 2017.
- [9] R1-1709828: Calibration results for Phase 1 NR MIMO system level calibration, 3GPP, 2017.
- [10] R1-1608661: Summary of [86-20] email discussion on MIMO calibration for NR, 3GPP, 2016.
- [11] R1-165850: WF on antenna placement in Indoor scenarios, 3GPP, 2016.
- [12] TR 36.897: Study on elevation beamforming / Full-Dimension(FD) Multiple Input Multiple Output (MIMO) for LTE, 3GPP, 2015.

BIOGRAPHY

Seung-Min Lee (Member)



2021 : BS degree in System Semiconductor Engineering, Sangmyung University.
2024 : MS candidate, Dept. of Electrical and Electronic Eng., Hanyang University

Jun-Seok Seo (Member)

2000 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2002 : MS degree in Electrical Engineering, Korea University.
 2002~2006 : Senior Researcher, LG Electronics.
 2006~2020 : Chief Engineer, Korea Testing Laboratory

2021~ : Director, Korea Testing Laboratory

HongJe Jang (Member)

2014 : BS degree in RF Engineering, Korea Maritime and Ocean University.
 2016 : MS degree in Mechatronics Engineering, Gwangju Institute Science and Technology.

2021~ : PhD course in Department of Electronics Engineering, Hanyang University.

2016~ : RF Application Technology Center, Korea Testing Laboratory.

Myung-Ryul Choi (Member)

1983 : BS degree, Dept. of Electronics Engineering, Hanyang University.
 1985 : MS degree, Dept. of Electrical and Computer Eng., Michigan State University.
 1991 : Ph.D degree, Dept. of Electrical and Computer Eng., Michigan State University

1991~1992 : Research Engineer and Assistant Prof., KITECH

1992~ : Professor, School of Electronics Engineering, Hanyang University