

# W대역 통신시스템 성능 분석 시뮬레이터 구현

조연기\*, 김기철\*, 표성민\*\*, 조한신<sup>o</sup>

## Implementation of a W-Band Communication System Simulator for Performance Analysis

Yeongi Cho\*, Kichul Kim\*, Seongmin Pyo\*\*, Han-Shin Jo<sup>o</sup>

요약

본 논문에서는 MATLAB의 app designer tool을 이용하여 W대역 통신시스템의 성능 분석 시뮬레이터를 구현하였다. 시뮬레이터에 사용되는 채널 모델의 경우, ITU-R에서 제안한 경로 손실 및 대기 환경에 의한 감쇠 모델과 3GPP에서 제안한 채널 모델을 적용하였으며, 시스템 파라미터, 채널 및 대기 환경, 변복조 방식과 채널코딩 방식, 안테나 변수를 입력 변수로 받아 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과는 BER 시뮬레이션을 통한 BER 성능과 link-level 시뮬레이션을 통한 SNR 성능을 제시하고, BER 조건을 만족하는 SNR 및 송수신 시스템의 통달거리를 출력한다. ITU-R에서 제안한 시스템 파라미터로 시뮬레이션을 수행한 결과, QPSK 변조 방식과 LDPC 코딩을 적용하는 경우 맑은 날에는 20km 이상의 거리에서도 BER=10<sup>-6</sup>을 만족한다. 그러나 대기 환경에 민감한 W대역의 특성상, 강우량이 20mm/hr인 환경에서는 강우 감쇠로 인해 통달거리가 3.87km까지 감소하며, 이득이 높은 대신 빔 폭이 좁은 안테나 패턴을 적용하였기 때문에 1°의 빔 정렬 오차만 발생해도, 모든 시나리오에서 BER 조건을 만족하지 못한다. 본 논문에서 제안한 시뮬레이터는 시스템 파라미터, 채널 환경, 채널 코딩, 안테나, 등 다양한 입력 파라미터 세팅값에 따라 다양한 결과를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있어, 향후 W대역 통신 시스템의 성능 예측을 위한 도구로써 유용할 것으로 사료된다.

**Key Words** : W-band, simulator, rainfall attenuation, channel model, link-level simulation, beam alignment

### ABSTRACT

In this paper, we implemented a simulator for performance analysis of W-band communication system. System parameters, channel and atmospheric environment, modulation and demodulation method, channel coding method, and antenna variables are simulated as input variables. The simulation results show BER and SNR performance through BER simulation and link-level simulation, and the transmission distance of the sending/receiving system. As a result of performing the simulation with the system parameters proposed by ITU-R, applying QPSK modulation and LDPC coding satisfies BER=10<sup>-6</sup> even at a distance of 20km or more on a clear day. However, in an environment with precipitation of 20mm/hr, the transmission distance is reduced to 3.87km due to rainfall attenuation. In addition, since an antenna pattern with a narrow beamwidth is applied to obtain high gain, if a beam alignment error occurs, the transmission distance is rapidly reduced.

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

• First Author : Hanbat National University Department of Electronic Engineering, chosmoke@hanbat.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Hanbat National University Department of Electronic Engineering, hsjo@hanbat.ac.kr, 정회원

\* Agency for Defense Development, kimkc@add.re.kr, 정회원

\*\* Hanbat National University Department of Information and Communication Engineering, spyo@hanbat.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202104-074-D-RN, Received April 1, 2021; Revised May 3, 2021; Accepted May 19, 2021

The simulator proposed in this paper has the advantage of obtaining various results according to the setting value of the input parameter. Therefore, it will be useful for predicting the performance of the W-band communication system.

## 1. 서 론

미래의 전장 환경은 점차 인공지능화, 무인화, 초연결 네트워크화가 서로 융합되는 전자전으로 확장되고 있기 때문에, 엄청나게 증가된 정보량을 실시간으로 전송하기 위해서 넓은 대역폭을 확보할 뿐만 아니라, 통신 속도의 혁신적인 향상을 위한 새로운 패러다임의 군사용 통신시스템이 필요하다<sup>1)</sup>. 현재 국내외 민수분야에서는 밀리미터파(mm-Wave)를 이용한 5세대(5G) 이동통신망 구축 및 Ka대역(26.5-40GHz)을 이용한 군집 초소형 위성(CubeSat Constellation)의 초고속 인터넷망 상용화 준비, 테라헤르츠파(THz) 및 준테라헤르츠파(Sub-THz)를 이용한 6세대(6G or Beyond 5G) 이동통신망 표준화 및 기술 확보에 박차를 가하고 있는 상황이다<sup>2-4)</sup>. 따라서, 차세대 미래 전장의 군용 통신 시스템에서 사용할 주파수의 고갈 문제를 해결하고 동시에 통신 속도의 향상을 위해 더 넓은 주파수 대역을 사용하기 위해서는 W대역(75-110GHz) 통신시스템 핵심기술의 조기 확보가 절실한 상황이다.

W대역은 mm-Wave의 특성과 Sub-THz의 특성을 모두 보유하고 있어, 안테나, RF/IF, 기저대역 하드웨어를 극소형으로 구현 가능하다는 장점이 있지만, 짧은 파장으로 인한 높은 경로 손실, 대기환경에 민감한 특성, 높은 직진성으로 인한 빔 정렬 오차, 등의 이유로 실질적인 상용화가 어려운 상황이다. 추가적으로, W대역의 단점 중 하나인 높은 경로 손실을 보상하기 위해서는 높은 이득을 갖는 안테나가 요구된다. 그러나 안테나 이득이 증가할수록 안테나의 방사 빔폭은 협소해지는 물리적 관계를 가지며, 협소한 빔폭은 비가시선(Non-Line of Sight, NLOS) 채널 환경뿐만 아니라 W대역 통신시스템 송수신기 사이에 가시선(Line of Sight, LOS)이 확보되어도 안테나의 빔 정렬이 정확하지 않으면, 빔 정렬 오차에 의해 무선통신의 성능이 급격히 감소한다. 그러나 W대역은 현재 개발 중인 5G 대역에 비해 최대 10배 이상의 높은 대역폭 사용을 통해 초 광대역 통신시스템 구성이 가능하며, W대역보다 한단계 낮은 V대역(40-75GHz)에 비해 오히려 대기에 의한 전파 감쇠가 적다. 따라서 W대역을 이용하는 통신시스템에 관한 연구는 향후 주파수 할

당 현황 및 대기 전파 감쇠를 고려했을 때, 원거리 통신용으로 최대의 대역폭을 활용 가능한 대역이다.

현재 국내외 여러 나라 및 기관에서 W대역을 활용하기 위한 연구를 진행하고 있는 상황이다. 그러나 대부분의 연구는 W대역에서 사용 가능한 시스템 회로 및 안테나 기술과 같은 하드웨어 연구에 집중되어 있으며, 개발한 하드웨어를 이용하여 통신 성능을 테스트하는 방식을 수행하기 때문에 modulation coding scheme(MCS) level 및 채널 환경의 변화, 빔 정렬 오차가 발생하는 등, 다양한 측면에서의 통신 성능을 분석할 수 없다는 한계가 존재한다.

통신시스템을 운용하기 위해서는 실제 상황에서 발생할 수 있는 여러 시나리오를 고려하여 통신 성능을 분석할 필요가 있으며, 본 논문에서는 다양한 시나리오에서 W대역의 통신 성능을 분석하기 위한 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 MATLAB의 app designer 툴을 이용하였으며, 시스템의 파라미터, 안테나, 빔 정렬 오차, 기저대역 및 채널 환경, 등의 다양한 파라미터 변화에 따른 시스템의 성능을 예측할 수 있도록 구성하였다. 시뮬레이션 결과는 채널 환경 및 변복조 레벨, 채널코딩에 따른 비트오류율(BER)과 통신시스템 파라미터, 빔 정렬 오차, 경로 손실, 잡음지수, 등의 입력 변수에 따른 시스템의 신호대잡음비(SNR) 결과를 보여준다. 그 후, 두 결과를 이용하여 BER 기준을 만족하는 최대 통달거리를 출력한다.

본 논문의 2장에서는 현재 국내외에서 개발 중인 W대역의 통신기술 동향에 관해 서술하며, 3장에서는 본 연구를 통해 구현한 시뮬레이터에 대한 설명 및 각 블록의 기능에 대해 설명한다. 그리고 4장에서는 시뮬레이터를 이용하여 분석한 W대역 통신시스템의 성능을 평가하고 마지막으로, 5장에서 본 연구를 통해 얻은 결론을 서술하고, 추후 연구 계획을 끝으로 마무리한다.

## II. W대역 통신기술 동향

### 2.1 국외 W대역 통신기술 동향

W대역은 최근 자동차 레이더, 백홀 통신, mmWave 레이더 및 이미징 분야에서 최근 주목을 받고 있다. 현재 W대역에 대한 통신 표준 기술이 제안

되지 않았지만, 밀리미터 대역의 장점을 살려서 초고속의 밀리미터파 대역 무선 통신을 가능하게 하는 채널 특성 모델링, 파일럿 신호 설계, 빔 트레이닝, 채널 추정, 고 지향성 빔포밍 등 다양한 연구가 진행되고 있는 상황이다.

베이징 대학교에서는 광통신과 무선 통신의 장점을 접목한 새로운 형태의 통신시스템을 제안하고, OOK 변조 및 직접 감지 복조를 이용하여 1.2 km의 전송 거리에서 최대 7Gbps의 높은 전송 속도를 보여주는 것을 검증하였으며<sup>5)</sup>, 후난 대학은 W대역 통신을 위해 새로운 OFDM 전송 시스템을 설계하였다<sup>6)</sup>. 이 시스템은 intra-symbol frequency-domain averaging(ISFA)를 사용하여 채널 추정을 최적화하고 DFT-Spread를 사용하여 OFDM 신호의 peak-to-average power ratio(PAPR)을 줄이는 특징을 가지고 있다. 이탈리아 트렌토 대학교에서는 W대역에서 동작하는 광대역 위성 연결을 위해 제한된 시간 간격과 제한된 대역폭에서 펄스 에너지의 집중 균형을 최적화하는 prolate spheroidal wave function(PSWF) 파형을 제안하였으며<sup>7)</sup>, Nokia Bell lab에서는 수-Gbps를 위한 무선 데이터 링크용 16 element W-band phased array 송/수신기 칩셋을 제안하였다<sup>8)</sup>. 이 칩셋은 70-100GHz에서 작동하며 최대 30 Gbps의 속도를 가질 수 있으며, phased array 빔포머를 사용하는 dual-polarization 송/수신기를 가지는 특징을 가지고 있다. 또한, University of Rome-Tor Vergata에서는 Italian Space Agency(ISA)에서 추진중인 W-band analysis and verification(WAVE) 사업의 일환으로 geostationary(GEO) 위성통신에서 W-band 송신에 대한 연구를 진행하고 커버리지, 상향/하향 링크의 주파수 대역, 링크 budget을 연구하였다<sup>9)</sup>. Finland의 VTT space lab에서는 2018년부터 Isoflux 타입의 방사패턴을 가져 넓은 지표면 커버리지를 가질 수 있게 하며, Dual circular polarization 안테나를 이용하는 W&Q-band용 저비용 cube 위성 개발을 진행하고 있는 상황이다<sup>10)</sup>.

통신시스템 구조 및 회로 기술의 경우, UCSD에서는 W대역용 광대역 위상 천이기 회로 기술을 발표하였다<sup>11)</sup>. 개발된 위상 천이기는 수동소자 기반과 능동소자 기반의 천이기로 나누어져 있으며, 11, 22.5, 45, 90°의 총 5단 수동소자 기반의 차동 위상천이기는 저대역 통과특성을 갖는  $\pi$ 네트워크로 스위칭 가능한 LC 회로를 구성하여 원하는 위상 천이를 제공하며, 180도 위상 반전기는 BiCMOS 기반의 능동 증폭기 방식으로 설계하여 높은 선형성을 확보하였다. 프랑스의 툴루즈 대학에서는 W 대역 복조기에 적용하기 위한

NMOS 소자 최적화 기술을 발표하였다<sup>12)</sup>. cold 바이어스 조건에서 NMOS 소자의 스위칭에 의한 각 켜짐 및 꺼짐 상태에서의 입력 임피던스를 계산하고, 이를 기반으로 이론적인 하향 변환 복조기의 변환 손실을 이론적으로 유추하였다. 이를 토대로 최소의 변환 손실과 최대의 이득 1dB 압축지점을 갖는 NMOS 소자 크기를 결정하여 이를 설계에 적용함으로써 CMOS 기반 W 대역 복조기의 가능성을 보여주었다. 제작된 회로는 76mW의 DC 전력을 소모하고, 76.8GHz의 RF 신호를 인가하고 76GHz의 캐리어 신호를 인가하였을 때 14.5dB의 변환이득을 갖는 IF 신호를 생성하는 결과를 얻었다.

## 2.2 국내 W대역 통신기술 동향

국내에서는 서울과학기술대학교에서 90GHz 대역에서 16-QAM OFDM 통신시스템을 제안하고, 실험을 통해 3GHz 대역폭을 가지는 6개의 채널을 통해 6Gbps의 데이터 전송속도를 가지는 것을 검증하는 연구를 수행하였으며<sup>13)</sup>, 군과 연세대학교에서는 93.5-94.5GHz 대역에서 직교 파형을 이용하여 동시에 전송, 고해상도 이미지를 얻을 수 있는 W-band MIMO frequency-modulated continuous wave(FMCW) 레이더 시스템을 개발하였으며<sup>14)</sup>, 한밭대학교에서는 FMCW 응용을 위한 우수한 성능의 W대역 도파관 진압조정발진기를 구현하고 성능 분석을 수행하였다<sup>15)</sup>. 고려대학교는 ray-tracing 기반 채널 모델링 기법인 line-of-sight(LoS)모델과 two-ray 모델에 기초하여 밀리미터파 대역에서 장거리 통신 시스템 구현을 위한 무선 채널 모델을 구현하였다<sup>16)</sup>. 이 모델은 지구의 곡률과 밀리미터파의 대기 중 감쇠 특성을 고려하여 기존 모델을 밀리미터파 장거리 통신시스템에 적합하도록 수정하고 송수신기 간 거리에 따른 전파의 감쇠도를 예측하였으며, 한국전자통신연구원은 국내 환경에 적용할 수 있는 빔방울 크기분포를 이용하여 밀리미터파 대역의 경우감쇠의 확률분포를 계산하였다<sup>17)</sup>. 서균관대학교는 Marchand balun을 캐리어 신호의 넓은 입력 범위를 갖도록 설계하고, 추가적인 매칭단 없이 낮은 삽입 손실을 갖게 하는 W 대역용 단일 길버트 셀 기반의 하향 변환 복조기 회로 기술을 발표하였다<sup>18)</sup>.

이와 같이, 현재 국내외에서 W대역에 관련된 연구를 진행하고 있으며, 지상 레이더, 위성 통신, 등 다양한 종류의 무선 통신 서비스에 대한 기술개발 및 성능 분석을 수행하고 있는 상황이다.

### III. W대역 통신 성능 분석 시뮬레이터

그림 1은 제안된 W대역 통신시스템 성능 분석 시뮬레이터를 보여준다. 시뮬레이터는 MATLAB의 app designer tool을 이용하여 제작하였으며, 숫자나 텍스트를 입력할 수 있는 편집 필드, 버튼, 드롭다운, figure창과 같은 여러 블록들이 존재한다. 이 중 원하는 블록을 캔버스로 가져와 라벨을 붙여 기능을 구분하고 입력에 대한 콜백 함수를 입력한다. 주파수나 대역폭과 같은 입력 변수들의 경우, 편집 필드를 이용하여 입력한 숫자를 바로 입력으로 받을 수 있지만, 변복조 레벨, 채널 타입과 같이 정해진 범위 내에서 선택해야 하는 입력 변수들의 경우, 드롭다운 블록을 이용하여 선택지를 정해놓고 그 범위 내에서 사용자가 선택할 수 있도록 설정하였다. 표 1은 시뮬레이터에 존재하는 드롭다운 블록의 종류와 선택지를 보여준다. 콜백은 어떤 버튼을 누르거나 드롭다운 값을 변경하는 등, 블록의 상태가 바뀌었을 때 수행할 작업을 설정하는 것으로, 위 시뮬레이터의 경우 실행 버튼에 콜백 기능을 추가하여 실행 버튼을 누르면 각 입력 파라미터에 세팅된 값을 받아 시뮬레이션을 수행, 시뮬레이션이 완료되면 오른쪽 결과 창에 다양한 결과를 출력한다. 또한, hold 버튼을 눌러 시뮬레이션 결과 창에 출력된 결과 그래프를 저장, 새로운 파라미터로 시뮬

표 1. Main parameter tap의 드롭다운 목록  
Table 1. Drop-down list of main parameter tap

Dropdown menu	Value
Modulation	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Channel coding	Uncoded, Convolutional code, LDPC code
Code rate	1/2, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 6/7, 7/8, 8/9
Channel type	CDL-A, CDL-B, CDL-C, CDL-D, CDL-E
Antenna type	Isotropic, Cassegrain

레이션을 수행하고 이전 시뮬레이션 결과와 비교 분석이 가능하다.

#### 3.1 입력 파라미터

그림 1의 왼쪽 입력 파라미터 창에는 main tap에서 입력 가능한 파라미터 목록을 보여주며, 그림 2는 channel tap과 antenna tap에서 입력 가능한 파라미터 목록을 보여준다. 파라미터를 모두 입력해야 시뮬레이터가 동작하며, 각각의 파라미터 탭에 대한 설명은 다음과 같다.



그림 1. W대역 통신시스템 성능 분석 시뮬레이터  
Fig. 1. W-band communication system performance analysis simulator

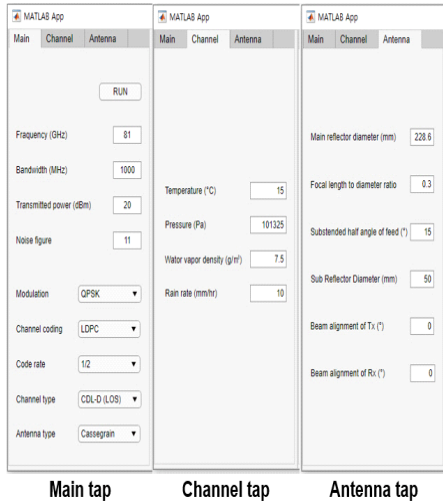


그림 2. 입력 파라미터 목록  
Fig. 2. List of input parameters

3.1.1 Main tap 파라미터

시뮬레이터의 main tap은 시뮬레이션에 필요한 통신 시스템의 파라미터와 변복조 방식, 채널코딩 방식, 채널 타입과 안테나 종류에 관한 정보를 입력하는 창이다. 시뮬레이터에 적용된 채널 모델과 채널 타입 파라미터는 3rd Generation Partnership Project (3GPP)에서 제안한 0.5-100GHz 주파수 대역에서의 채널 모델 중 cluster-delay line(CDL) 채널 모델을 이용하였다<sup>[19]</sup>. 그림 3은 CDL 채널 모델의 구조를 보여준다. 이 모델은 Ray-based 모델 중 하나로, 송신 안테나에서 발사된 신호는 물리적인 공간을 거치는 과정을 겪으며 원 신호로부터 변형되고, 수신 안테나는 변형된 송신신호의 합을 수신한다. 신호의 합은 랜덤한 진폭 및 위상을 받는 무수한 ray들의 합으로, 중심 극한 정

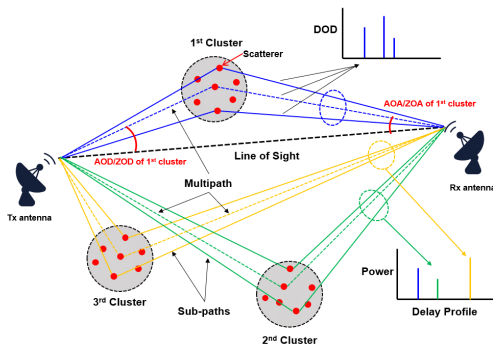


그림 3. CDL 채널모델 구조  
Fig. 3. Cluster delay line channel model structure

표 2. CDL 채널 파라미터[19]  
Table 2. CDL channel parameters

채널명	CDL-A	CDL-B	CDL-C	CDL-D	CDL-E
타입	NLOS	NLOS	NLOS	LOS	LOS
경로 수	23	23	24	13	14
$C_{ASD}$	5°	10°	2°	5°	5°
$C_{ASA}$	11°	22°	15°	8°	11°
$C_{ZSD}$	3°	3°	3°	3°	3°
$C_{ZSA}$	3°	7°	7°	3°	7°
$DS$	9.659	4.783	8.652	12.53	20.64

리에 의해 Rayleigh 분포 특성을 가진다. 채널 모델에서 언급하는 클러스터(Cluster)는 이러한 신호들의 합으로 Rayleigh 특성을 갖는 하나의 다중경로이며, 각각의 클러스터는 송수신기 위치에 따른 클러스터의 출발각과 도착각, 위상, 시간 지연 등의 파라미터를 이용하여 독립적인 Rayleigh 페이딩을 갖는 하나의 path를 생성한다.

표 2는 3GPP에서 제안한 3개의 NLOS 채널인 CDL-A, CDL-B, CDL-C와 2개의 LOS 채널인 CDL-D, CDL-E의 주요 파라미터를 보여준다. 표 2에  $C_{ASD}$ ,  $C_{ASA}$ ,  $C_{ZSD}$ ,  $C_{ZSA}$ 는 각각 채널의 수평/수직 각도에 대한 출발각/도착각의 angular spread를 의미하며,  $DS$ 는 delay spread를 의미한다. 그림 4는

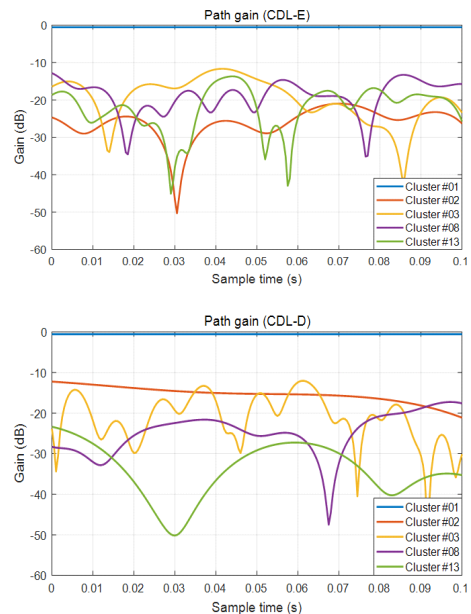


그림 4. CDL 채널의 클러스터 이득  
Fig. 4. Cluster gain of CDL channel

CDL-D 채널과 CDL-E 채널의 클러스터 이득을 보여 준다. 두 채널 모두 LOS 채널 환경을 가지기 때문에 페이딩을 겪지 않는 하나의 LOS 클러스터 이득이 존재하며, 나머지 다른 경로 이득은 각 채널의 delay profile에 따라 생성된 NLOS 클러스터를 통과하기 때문에 서로 다른 페이딩을 겪는 것을 확인할 수 있다.

안테나 타입의 경우, 현재 등방성 안테나와 카세그레인 안테나 두가지 타입이 존재한다. 등방성 안테나는 안테나 이득이 모든 방향으로 균일 이득을 보이는 고정된 패턴을 가지는 것과 달리, 카세그레인 안테나의 경우 그림 2의 antenna tap에 있는 다양한 파라미터의 값에 따라 안테나의 방사 패턴이 결정된다.

### 3.1.2 Channel tap 파라미터

그림 1의 시뮬레이터에서 파라미터 탭에 있는 Channel tap을 클릭하면 온도, 기압, 대기 중 수증기 밀도, 강우량을 설정할 수 있는 입력창이 표시된다. 이는 경로 손실을 계산하는 데 필요한 파라미터들로, 본 연구에서는 국제전기통신연합(International telecommunication union, ITU)에서 제안한 전파 모델을 이용하여 총 경로 손실을 계산한다.

본 논문에서, 우리는 총 경로 손실을 계산할 때, 자유공간 경로 손실에 ITU-R에서 제안한 대기 가스에 의한 감쇠 모델과 강우 감쇠를 적용하였으며, 따라서 총 경로 손실(dB)은 다음과 같이 정의된다.

$$PL[dB] = PL_{free} + L_{gas} + L_{rain} \quad (1)$$

식 (1)에서  $PL_{free}$ 는 자유공간 경로 손실,  $L_{gas}$ 는 대기가스에 의한 감쇠,  $L_{rain}$ 은 강우 감쇠를 의미한다.

자유공간에서 거리가  $d$  km, 주파수가  $f$  GHz일 때, 자유공간 경로 손실은 다음과 같다<sup>[20]</sup>.

$$PL_{free} [dB] = 92.45 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (2)$$

그림 5는 거리에 따른 자유공간 경로 손실을 보여 준다. 자유공간 경로 손실은 거리와 주파수의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에, W대역의 자유공간 경로 손실은 기존 LTE나 5G 대역에 비해 높은 전파 감쇠를 일으키는 것을 확인할 수 있다.

대기가스에 의한 감쇠는 신호가 대기를 통해 전파될 때, 대기에 포함된 산소 및 수증기에 의한 신호의 감쇠를 의미한다. 본 연구에 적용된 감쇠 모델은 ITU에서 제안한 대기 가스 감쇠 모델을 사용하였으며<sup>[21]</sup>, 다음과 같이 계산된다.

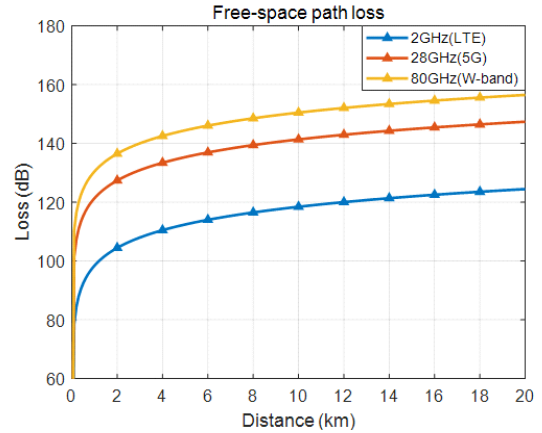


그림 5. 자유공간 경로 손실

Fig. 5. Free-space path loss

$$L_{gas} [dB/km] = 0.1820fN''(f) \quad (3)$$

식 (3)에서,  $N''(f)$ 는 frequency-dependent complex refractivity의 허수 부분으로, 주파수뿐만 아니라 수증기 밀도, 압력, 온도, 및 ITU-R에서 제안한 분광 계수(spectroscopic coefficient), 등에 의해 결정되며, 자세한 수식은 ITU-R 권고문에 제시되어 있다<sup>[21]</sup>. 그림 6은 ITU-R 권고문에서 제시한 연평균 수증기 밀도인  $7.5g/m^3$ 에서 신호의 전송 거리가 10km 일 때 주파수에 따라 발생하는 감쇠를 보여준다. W대역에서는 약 3.9-6.6 dB의 감쇠가 발생하며, 대기 수증기 밀도가 높을수록 대기 가스에 의한 신호의 감쇠량이 증가한다.

강우 감쇠는 빗방울의 산란 및 흡수에 기인하며, 10GHz 이상의 주파수를 이용하는 시스템에서 고려해

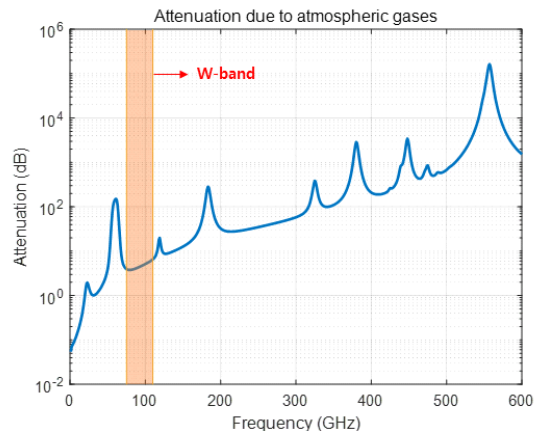


그림 6. 대기 가스에 의한 감쇠

Fig. 6. Attenuation due to atmospheric gases



야 할 감쇠 중 하나이다. 경로상에 강우량이  $R$  mm/hr 로 동일하다고 가정할 때, 강우 감쇠는 다음과 같다 [22].

$$\gamma_R [dB/km] = kR^\alpha \quad (4)$$

식 (4)에서  $k$ 와  $\alpha$ 는 주파수, 편광 상태 및 신호 경로의 고도 각에 의해 결정되는 변수이며, 자세한 수식은 ITU-R 권고문에 제시되어 있다[22]. 그림 7은 전송 거리가 1km일 때, 주파수와 강우량에 따른 강우 감쇠를 보여준다. 앞에서 설명한 바와 같이 10GHz 이하의 대역에서는 큰 영향이 없지만, W대역의 경우 호우주의보 발령 기준인 20mm/hr의 강수량에서 14dB/km 이상의 신호 감쇠를 유발하는 것을 확인할 수 있다.

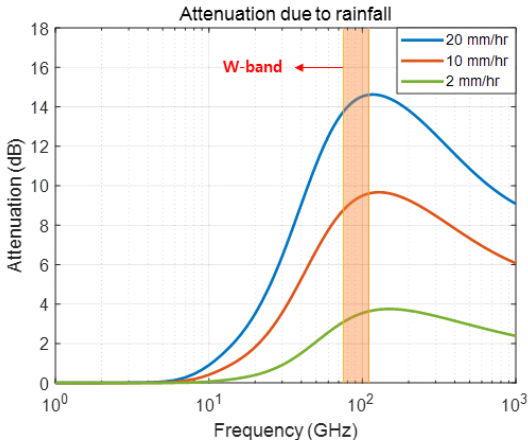


그림 7. 강우 감쇠  
Fig. 7. Attenuation due to rainfall

### 3.1.3 Antenna tap 파라미터

Antenna tap은 main tap의 antenna type 드롭다운이 Cassegrain으로 선택되었을 때 세팅하는 파라미터이다. W대역의 통신시스템에 사용 가능한 다양한 안테나 기술 중에서 높은 안테나 이득과 손실이 적은 안테나 급전구조 및 제작의 용이성 등을 고려하여 카세그레인 안테나를 시뮬레이터에 적용하였다[23]. 그림 8은 카세그레인 안테나의 구조를 보여준다. 카세그레인 안테나는 파라미달 구조를 갖는 혼 안테나를 급전부분으로 사용하며,  $D_{sub}$ 의 크기를 갖는 부반사판에 의한 첫번째 반사와  $D$ 의 크기를 갖는 주반사판에 의한 두번째 반사에 의하여 최종적인 안테나 방사패턴이 형성된다. 카세그레인 안테나 이득  $G$ 는 다음과 같다 [24].

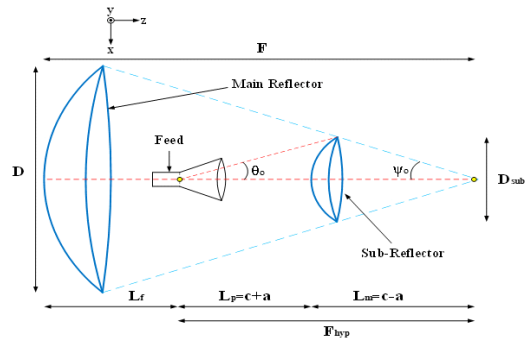


그림 8. 카세그레인 안테나 구조  
Fig. 8. Cassegrain antenna structure

$$G = G_{feed} + G_\theta \quad (5)$$

$$G_{feed} = \cos\left(\frac{\theta + \pi}{2}\right)^n \quad (6)$$

$$G_\theta = 2\pi D_o \left(\frac{n+1}{n^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{\theta_o}{2}\right) \times \int_0^{D/2} E_n J_o(k\rho \sin\theta) \rho d\rho \quad (7)$$

$$D_o = \left[ \frac{\pi(D - D_{sub})}{\lambda} \right] \cdot \left[ 1 - \cos^{2(n+1)}\left(\frac{\theta_o}{2}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \cos^n\left(\frac{\lambda_o}{2}\right) \right] \cdot 2\cot\left(\frac{\theta_o}{2}\right) \quad (8)$$

$$E_n = \frac{4}{D_p} \tan\left(\frac{\theta_o}{2}\right) \cdot \cos^{(n+2)}\left(\frac{\theta_o}{2}\right) \cdot e^{-jk\left(\frac{D_{sub}}{2}(\cot\psi_o + \cot\theta_o)\right)} \quad (9)$$

$$\Psi_o = 2\cot^{-1}(4F/D) \quad (10)$$

위 식에서,  $n$ 은 illumination taper number,  $k$ 는 wave number,  $J_o(x)$ 는 first-order Bessel function을 의미한다.

그림 9는 그림 3의 안테나 파라미터를 입력했을 때의 안테나 패턴을 보여준다. 최대 안테나 이득은 42.43 dBi이며, 0.5°에서는 39 dBi, 1°에서는 24.5 dBi로 최대 이득이 높은 대신에 좁은 빔폭을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, W대역 통신시스템은 약간의 빔 정렬 오차에도 큰 성능 저하가 발생할 수 있기 때문에, 안테나 파라미터 입력 변수에 송수신 안테나의 빔 정렬 오차를 추가하여 빔 정렬 오차값에 따

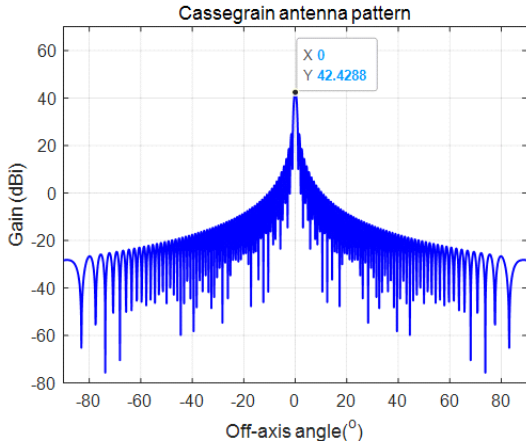


그림 9. 카세그레인 안테나 패턴  
Fig. 9. Cassegrain antenna pattern

른 통신성능을 확인할 수 있도록 시뮬레이터를 구현 하였다.

### 3.2 출력 파라미터

#### 3.2.1 BER tap 출력

시뮬레이션이 완료되면, 그림 10과 같이 BER 탭에서는 BER 시뮬레이션을 수행하고 그에 따른 결과를 출력한다. BER 시뮬레이션은 그림 11과 같은 프로세스로 동작하며, 그 후 BER 조건을 만족하는  $SNR_{th}$ 을 출력한다.  $SNR_{th}$ 는 다음과 같다.

$$SNR_{th} (dB) = E_b/N_0 + 10\log(bps \times code\ rate) \quad (11)$$

식 (11)에서,  $bps$ 는 bit per symbol을 의미한다.

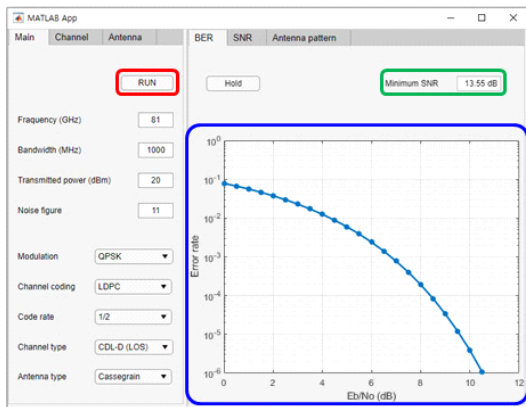


그림 10. 제안된 시뮬레이터의 BER 시뮬레이션 결과 출력  
Fig. 10. BER simulation result output of the proposed simulator

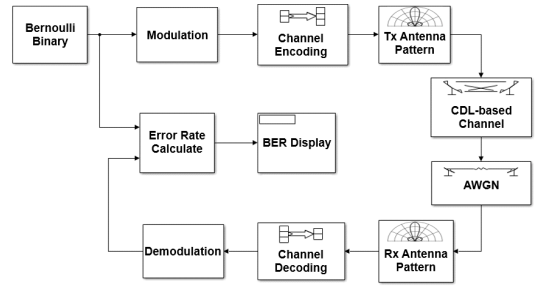


그림 11. BER 계산 블록 다이어그램  
Fig. 11. BER Measurement Block Diagram

#### 3.2.2 SNR tap 출력

그림 12는 시뮬레이션 완료 후, 시뮬레이터에 나타나는 SNR 시뮬레이션 결과 창을 보여준다. SNR 탭의 그래프 창은 통신시스템의 파라미터와 채널 파라미터를 이용하여 link-level 시뮬레이션을 수행하고, 송수신기의 거리에 따른 SNR을 출력한다. SNR을 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$SNR (dB) = P_t + G_{Tx} - PL + G_{Rx} - N \quad (12)$$

식 (12)에서  $P_t$ 는 송출 전력,  $G_{Tx}$ 와  $G_{Rx}$ 는 각각 최대 안테나 이득을 의미하며,  $N$ 은 잡음으로, 다음과 같다.

$$N = 10\log(k T) + 10\log(BW) + NF \quad (13)$$

식 (13)에서  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 절대온도,  $BW$ 는 신호의 대역폭을 의미하며,  $NF$ 는 잡음 지수를 의미한다. 그 후, BER 탭에서 출력된  $SNR_{th}$ 값을 대입하

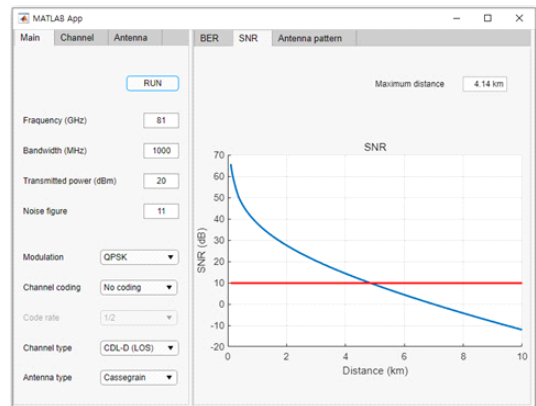


그림 12. 제안된 시뮬레이터의 SNR 시뮬레이션 결과 출력  
Fig. 12. SNR simulation result output of the proposed simulator



여 통신 성능 저하가 없는 최대 통달거리를 출력한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 안테나 타입에 따른 BER 분석

III장에서 구현한 시뮬레이터를 이용하여 통신시스템의 성능을 분석하였다. 표 3은 시뮬레이션 파라미터로, 송수신 시스템의 스펙의 경우 ITU-R에서 제안한 81-86GHz 대역의 고정 서비스 시스템의 파라미터를 이용하였다<sup>[25]</sup>. 이를 이용하여 채널코딩, 대기 환경, 빔정렬 오차 등의 변화에 따른 통신 성능을 분석하였다.

그림 13은 표 3의 파라미터 값과 isotropic 안테나 패턴을 사용했을 때의 BER 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4와 같이, CDL-D와 CDL-E는 같은 LOS 채널이지만 서로 다른 delay profile을 가지고 있기 때문에, 상대적으로 CDL-D 채널에서 BER 성능이 약간 우수한 것을 확인할 수 있다. 그러나 카세그레인 안테나 패턴을 적용하여 두 채널의 BER 시뮬레이션을 수

표 3. 시뮬레이션 파라미터[25]  
Table 3. Simulation parameters[25]

Parameter	Value
Carrier frequency	80GHz
Bandwidth	1GHz
Transmitted power	20dBm
Noise figure	11dB
Water vapor density	7.5g/m <sup>3</sup>
Rain rate	0, 5, 10, 20mm/hr

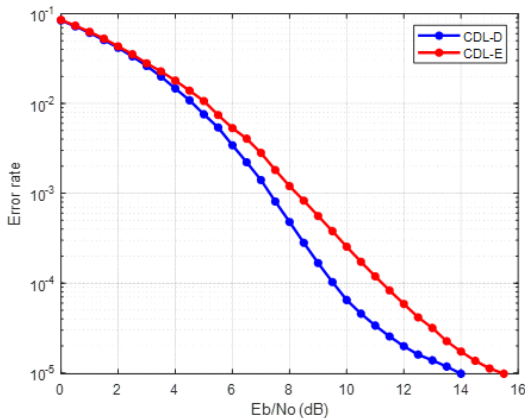


그림 13. 채널 타입에 따른 BER 시뮬레이션 결과 (등방성 안테나)  
Fig. 13. BER simulation result according to channel type (isotropic antenna)

행한 결과, 그림 14와 같이 거의 동일한 BER 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 카세그레인 안테나를 적용했을 때, 그림 15와 같이 LOS 클러스터는 최대 안테나 이득을 받아 경로 이득이 크게 증가하지만, 다른 클러스터의 경우, NLOS 클러스터이기 때문에 서로 다른 출발각과 도착각을 가지고 있어, 직진성이 강한 W대역의 전파 특성에 더해, 안테나 이득까

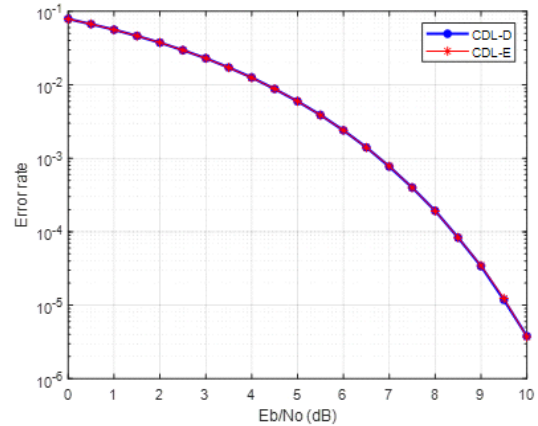


그림 14. 채널 타입에 따른 BER 시뮬레이션 결과 (카세그레인 안테나)  
Fig. 14. BER simulation result according to channel type (Cassegrain Antenna)

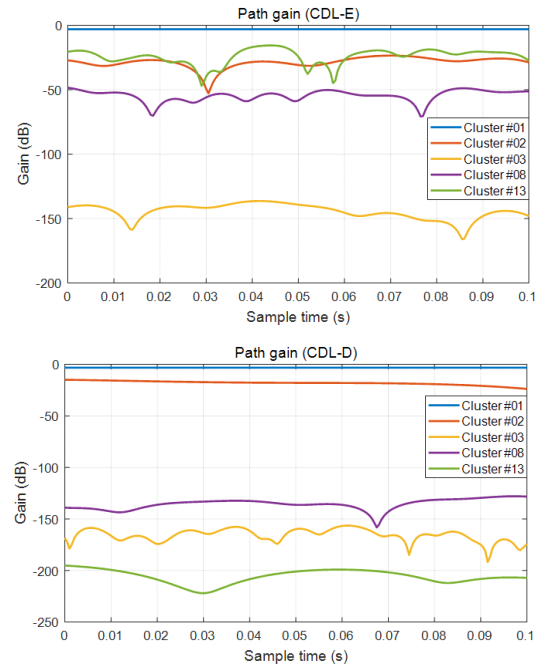


그림 15. 카세그레인 안테나를 사용했을 때의 클러스터 이득  
Fig. 15. Cluster gain with Cassegrain antenna

지 감소하면서 클러스터 이득이 크게 감소한다. 따라서 LOS 채널 환경의 경우, 채널의 delay profile과 관계없이 LOS 클러스터에만 의존하므로, 두 채널의 BER 시뮬레이션 결과가 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 따라서 W대역 통신시스템에서는 이득이 높고 빔 폭이 좁은 안테나를 사용하는 경우, LOS가 보장되고 빔 정렬이 완벽하다면, 채널은 하나의 LOS 경로만 존재한다고 가정할 수 있다.

#### 4.2 변복조 및 채널코딩에 따른 BER 분석

그림 16은 채널코딩을 사용하지 않았을 때, 변복조 레벨에 따른 BER을, 그림 17은 QPSK 변복조 방식에 컨볼루셔널 코딩을 적용했을 때, 그림 18은 QPSK 변

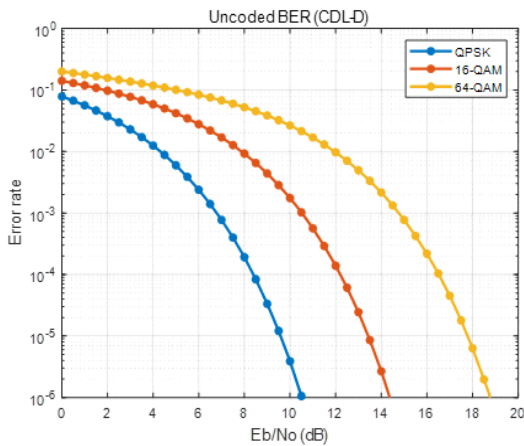


그림 16. 변복조 레벨에 따른 BER 시뮬레이션 결과  
Fig. 16. BER simulation result according to modulation and demodulation level

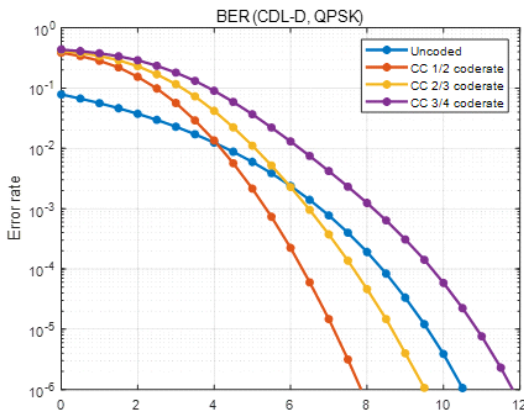


그림 17. Code rate에 따른 BER 시뮬레이션 결과 (컨볼루셔널 코딩)  
Fig. 17. BER simulation result according to code rate (convolutional coding)

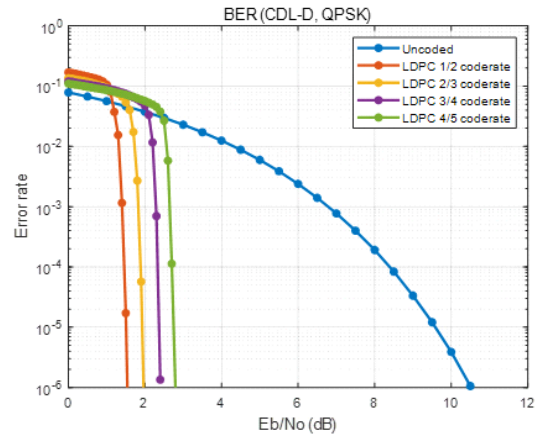


그림 18. Code rate에 따른 BER 시뮬레이션 결과 (LDPC 코딩)  
Fig. 18. BER simulation result according to code rate (LDPC coding)

복조 방식에 LDPC 코딩을 적용했을 때의 BER 성능을 보여준다. 시뮬레이션 결과, 더 높은 변복조 레벨을 사용하는 경우, BER 조건을 만족하기 위해 요구되는 SNR이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 컨볼루셔널 코딩을 적용하는 경우 code rate 3/4 이상부터는 채널 코딩의 영향이 크게 없다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 LDPC 코딩을 적용하는 경우, BER 성능이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 표 4는 BER이  $10^{-6}$ 을 만족하기 위한 최소 Eb/No 및 SNR<sub>th</sub>을 보여준다.

표 4. BER= $10^{-6}$ 을 만족하는 최소 Eb/No 및 SNR  
Table 4. Minimum Eb/No and SNR satisfying the BER= $10^{-6}$  condition

		Eb/No	SNR <sub>th</sub>
Uncoded	QPSK	10.54 dB	13.55 dB
	16-QAM	14.43 dB	20.45 dB
	64-QAM	18.85 dB	26.63 dB
Convolutional code	1/2 rate	7.92 dB	7.92 dB
	2/3 rate	9.54 dB	10.78 dB
	3/4 rate	11.88 dB	13.64 dB
LDPC code	1/2 rate	1.59 dB	1.59 dB
	2/3 rate	2 dB	3.25 dB
	3/4 rate	2.43 dB	4.19 dB
	4/5 rate	2.8 dB	4.84 dB

#### 4.3 대기 환경 및 빔 정렬 오차에 따른 SNR 성능 분석

그림 19는 빔 정렬이 완벽할 때, 대기 환경에 따른

SNR 시뮬레이션 결과를 보여주며, threshold는 QPSK, 4/5 code rate을 가지는 LDPC 코딩을 사용한다고 가정했을 때의  $SNR_{th}$ 이다. 시뮬레이션 결과, 맑은 날에는 20km 이상의 거리에서도 BER 조건을 만족하기 때문에 원활한 운용이 가능하지만, 5mm/hr의 강우량에도 강우 감쇠로 인해 SNR이 급격하게 감소하기 때문에, 통달거리는 8.36km로 감소하며, 10mm/hr와 20mm/hr의 경우, 통달거리는 각각 5.89km, 3.87km로 강우 감쇠가 급격하게 증가하여 통달거리가 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

그림 20은 송수신 안테나 모두 0.5°의 빔 정렬 오차가 발생할 때의 시뮬레이션 결과를 보여주며, 강우량에 따른 시스템의 통달거리는 각각 1.97km, 1.04km, 0.81km, 0.59km이다. 따라서 그림 18의 시뮬레이션 결과와 같은 시나리오에서 빔 정렬 오차가 발생하는 경우, 안테나의 최대 이득이 감소하기 때문에, SNR이 감소하며, 그에 따라 통달거리가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

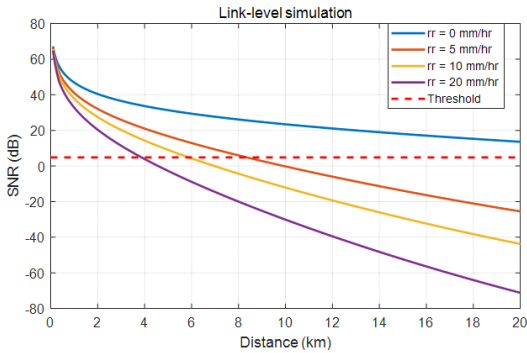


그림 19. SNR 시뮬레이션 결과 (빔 정렬 오차 없음)  
Fig. 19. SNR simulation results (perfect beam alignment)

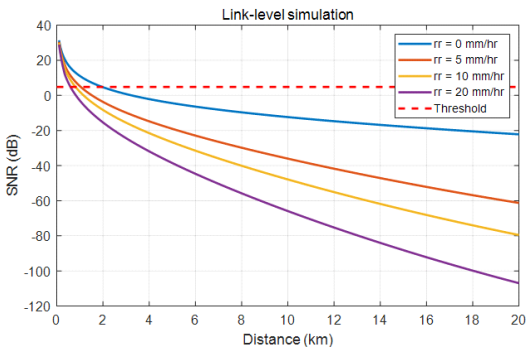


그림 20. SNR 시뮬레이션 결과 (송수신기에서 0.5°의 빔 정렬 오차 발생)  
Fig. 20. SNR simulation result (beam alignment error of 0.5° in the transmitter and receiver)

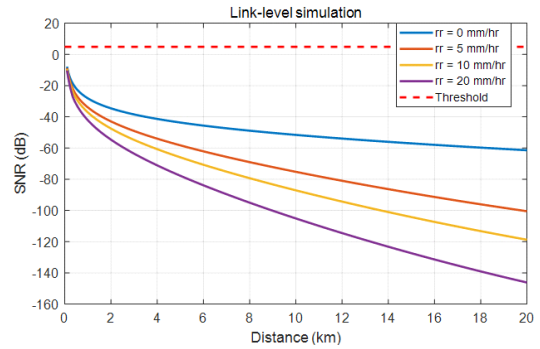


그림 21. SNR 시뮬레이션 결과 (송신기에서 1°의 빔 정렬 오차 발생)  
Fig. 21. SNR simulation result (beam alignment error of 1° in the transmitter)

그림 21은 송신 안테나에서 1°의 빔 정렬 오차가 발생하는 경우의 결과를 보여준다. 송신 안테나에서만 빔 정렬 오차가 발생하지만, 오차 각도가 너무 크기 때문에 송신안테나 모두에서 0.5°의 빔 정렬 오차가 발생하여 발생하는 안테나 이득의 감소보다, 송신 안테나에서 1°의 빔 정렬 오차가 발생하는 것이 더 높은 안테나 이득을 감소시키기 때문에 맑은 날에도 BER 조건을 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 W대역에서, 통신시스템은 매우 샤프한 형태의 빔 패턴을 가지고 있기 때문에, 빔 정렬 오차는 통신 성능을 크게 열화시킨다. 따라서 W대역 통신시스템은 강우량이 통신 성능이 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 이를 고려하여 시스템을 설계할 필요가 있으며, 빔 정렬 오차가 발생하는 경우 통신 성능이 크게 저하되기 때문에 틀어진 빔을 다시 보정해주는 정렬 알고리즘의 성능이 통신 성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 MATLAB app designer를 이용하여 W대역의 통신성능을 분석하기 위한 시뮬레이터를 구현하고 ITU-R에서 제안한 시스템 파라미터를 이용하여 성능 분석을 수행하였다. 구현한 시뮬레이터는 ITU-R의 전파 모델과 3GPP의 채널 모델을 결합한 W대역 채널을 구현하고 변복조 레벨, 채널코딩, 대기 환경 및 안테나 파라미터 등 다양한 파라미터들을 입력 변수로 받아 BER 계산, 거리에 따른 SNR 계산을 수행하고 최대 통신 가능거리를 도출하는 기능을 가진다.

ITU에서 제안한 W대역 시스템 파라미터를 이용하

여 통신성능을 분석한 결과, LDPC 채널코딩을 사용했을 때, BER 성능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 통달거리를 분석한 결과, 강우량이 많을 경우, 강우 감쇠가 급격히 증가하여 통신거리가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 연구로는 다른 주파수 대역에서 적용 가능한 채널 모델, 안테나 종류, MIMO 안테나, 등을 추가하여 시뮬레이터의 활용도를 높일 예정이며, 기계 학습을 적용, 통신성능에 가장 영향을 주는 변수들을 학습시켜 차세대 군통신 체계에 적용 가능한 통신시스템 최적화 연구를 수행할 예정이다.

### References

- [1] M. S. Jung, S. P. NamKung, and S. H. Park, "Innovation in how to combat the Army's military strategy for future combat victory," *JCCT*, vol. 6, no. 3, pp. 105-109, Aug. 2020.
- [2] S. E. Hond, I. K. Kim, and S. C. Bang, "Trends of technology developments for mmWave-based 5G mobile communications," *ETRI Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 28, pp. 107-117, Dec. 2013.
- [3] A. Gregorio and F. Alimenti, "CubeSats for future science and Internet of space: Challenges and opportunities," *IEEE ICECS*, pp. 169-172, Genova, Italy, Nov. 2019.
- [4] M. Katz, P. Pirinen, and H. Posti, "Towards 6G: Getting ready for the next decade," *IEEE ISWCS*, pp. 714-718, Oulu, Finland, Aug. 2019.
- [5] H. Jiang, C. Wang, T. Xiu, D. Wang, S. Hu, X. Zhan, and Y. Yao, "High speed wireless communication system at W-band," *IEEE ICMMT*, pp. 1-3, Guangzhou, China, May 2019.
- [6] L. Chen, J. Luo, Z. Tang, and Z. Xi, "Integration system of photon-assisted W-band millimeter wave wireless communication and free space optical communication based on OFDM signal transmission," *Optical Fiber Technol.*, vol. 52, Nov. 2019.
- [7] C. Sacchi, T. Rossi, M. Ruggieri, and F. Granelli, "Efficient waveform design for high-bit-rate W-band satellite transmissions," *IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst.*, vol. 47, pp. 974-995, Apr. 2011.
- [8] S. Shahramian, M. J. Holyoak, and Y. Baeyens, "A 16-element W-band phased-array transceiver chipset with flip-chip PCB integrated antennas for multi-gigabit wireless data links," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 66, pp. 3389-3402, May 2018.
- [9] A. Jebril, M. Lucente, M. Ruggieri, and T. Rossi, "W-band satellite transmission in the WAVE mission," *The Int. Conf. Telecommun. & Multimedia*, Crete, Greece, Jul. 2016.
- [10] VTT space lab, "Reaktor Space Lab and VTT investigate a new frequency band for telecommunications satellites," Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/reaktor-space-lab-and-vtt-investigate-new-frequency-band-telecommunications>.
- [11] S. Y. Kim, "W-band phased array systems using silicon integrated circuits," *UC San Diego Electronic Theses and Dissertations*, 2012.
- [12] C. Viallon, G. Ménéglin, and T. Parra, "NMOS device optimization for the design of a W-band double-balanced resistive mixer," *IEEE Microw. and Wirel. Components Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 637-639, Jun. 2014.
- [13] K. S. Kim, B. S. Kim, M. S. Kang, W. I. Byun, and H. C. Park, "16 QAM OFDM based W band polarization division duplex communication system with multi gigabit performance," *ETRI J.*, vol. 36, no. 2, pp. 206-213, Apr. 2014.
- [14] S. Y. Jeon, M. H. Ka, S. Shin, M. Kim, and H. Chung "W-band MIMO FMCW radar system with simultaneous transmission of orthogonal waveforms for high-resolution imaging," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 66, no. 11, pp. 5051-5064, Sep. 2018.
- [15] K. K. Ryu, J. K. Rhee, and S. C. Kim, "High performance W-band VCO for FMCW applications," *J. KICS*, vol. 37A, pp. 214-218, Apr. 2012.

[16] J. H. Kwon, D. H. Na, and Y. C. Ko, "Ray-tracing based millimeter wave channel modeling for long-distance communication systems," *J. KICS*, vol. 43, pp. 911-920, Jun. 2018.

[17] S. M. Cho, Y. S. Kim, J. K. Paek, S. S. Lee, and H. J. Kim, "Estimation of rain-attenuation for millimeter-wave propagation in domestic environments," *J. KICS*, vol. 23, pp. 1755-1763, Jul. 1998.

[18] S. K. Kim, C. Cui, G. Huang, S. Kim, and B. S. Kim, "A 77GHz low LO power mixer with a split self-driven switching cell in 65 nm CMOS technology," *IEEE Microw. and Wirel. Components Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 480-482, Aug. 2012.

[19] 3rd Generation Partnership Project, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100GHz," 2019, Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3173>.

[20] ITU-R Recommendation, ITU-R P.525-4 "Calculation of free-space attenuation," 2019, Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525/en>.

[21] ITU-R Recommendation, ITU-R P.676-12 "Attenuation by atmospheric gases and related effects," 2019, Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676/en>.

[22] ITU-R Recommendation, ITU-R P.838-3 "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," 2019, Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>.

[23] S. Pyo and K. Kim, "A study on cassegrain antenna for w-band communication system," *2020 KIMST Conf.*, online, Korea, Nov. 2020.

[24] P.-S. Kildal, "Foundations of Antenna Engineering: A Unified Approach for Line-of-Sight and Multipath," Artech, 2015.

[25] ITU-R Recommendation, ITU-R F.2107-2 "Characteristics and applications of fixed wireless systems operating in frequency ranges between 57GHz and 134GHz," 2011,

Retrieved Mar. 24, 2021, from <https://www.itu.int/md/R07-WP7C-C-0162/en>.

조연기 (Yeongi Cho)



2018년 2월 : 한밭대학교 전자 제어공학과 졸업  
 2020년 2월 : 한밭대학교 전자 공학과 석사  
 2020년 3월~현재 : 한밭대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신 시스템간의 간섭 분석 및 주파수 공유, 강화학습

[ORCID:0000-0002-5711-3765]

김기철 (Kichul Kim)



2007년 2월 : 영남대학교 전자 공학과 졸업  
 2011년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 석사  
 2016년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사  
 2007년 1월~2008년 11월 : 삼성탈레스 연구원

2016년 10월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원  
 <관심분야> RF회로 및 시스템, RF소자, MMIC, 통신시스템

[ORCID:0000-0003-1652-5576]

**표 성 민 (Seongmin Pyo)**



2002년 2월: 고려대학교 전기  
전자전파공학부 졸업  
2004년 2월: 고려대학교 전파  
공학과 석사  
2011년 2월: 고려대학교 컴퓨  
터전파통신공학과 박사  
2011년 11월~2013년 2월: 국

방과학연구소 선임연구원

2013년 2월~2017년 3월: 한밭대학교 정보통신공학  
과 조교수

2017년 4월~현재: 한밭대학교 정보통신공학과 부교수  
<관심분야> RF 및 초고주파회로, 메타물질 및 인공  
지능 안테나, 위상배열안테나 및 레이더공학

[ORCID:0000-0002-9065-4547]

**조 한 신 (Han-Shin Jo)**



2001년 8월: 연세대학교 전기  
전자공학과 졸업  
2004년 2월: 연세대학교 전기  
전자공학과 석사  
2009년 8월: 연세대학교 전기  
전자공학과 박사  
2009년 10월: University of

Texas at Austin, Postdoctoral Fellow

2011년 11월: 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원

2012년 3월~2015년 2월: 한밭대학교 전자제어공학  
과 조교수

2015년 3월~현재: 한밭대학교 전자공학과 부교수  
<관심분야> 이기종 무선네트워크, 무선통신 시스템  
간의 주파수 공유 및 양립성, MIMO 시스템, 펜  
토셀 및 소형셀 네트워크, 확률기하이론

[ORCID:0000-0002-5738-1807]