creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

채널 특성을 고려한 5G MIMO 통신 시뮬레이터

5G MIMO communication simulator considering channel characteristic

2023년 2월

서울대학교 대학원

전기・정보 공학부

박 태 희

채널 특성을 고려한 5G MIMO 통신 시뮬레이터

5G MIMO communication simulator considering channel characteristic

지도 교수 남 상 욱

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2023년 2월

서울대학교 대학원
전기·정보 공학부
박 태 희

박태희의 공학석사 학위논문을 인준함
2023년 2월

위 원 장	이 정 우	(인)
부위원장	남 상 욱	(인)
위 원	오 정 석	(인)

초 록

5G가 세계 최초로 한국에서 상용화 되었고 최근 5G 이동통신 기술이 발달함에 따라 차량 및 단말기에 5G 기술을 접목시켜 통신 기술 수준을 향상시키려는 노력이 계속되고 있다. 그럼에도 불구하고 레이다 시스템의 경우 상용 툴(REMCOM)이 존재하는 반면, 5G 환경에서의 이동통신과 같은 다른 분야에 대해서는 해석이 한정적인 상황이다. 이와 더불어 5G 이동통신 기술이 발달함과 더불어 무선 통신 채널에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 송신기와 수신기 사이에 존재하는 공간을 나타내는 채널은 통신의 성능을 좌지우지할 수 있는 파라미터이며, 특히 현재 이루어지고 있는 대다수의 통신이 무선이라는 점에서 점점 그 가치 및 중요성이 대두되고 있다.

본 논문에서 제시한 연구내용을 통해 레이다/통신시스템 뿐만 아니라 시나리오(채널 및 순서도)의 변경을 통해 다양한 전파 응용 시스템 해석으로 확장할 수 있다. 추가로 동적 환경에서의 해석 플랫폼 또한 구축함으로써 실제 운용 환경을 더 현실적으로 모사한다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 5G mm-Wave대역용 통신 시뮬레이터를 제안하며, 해당 시뮬레이터는 실제 통신 프로세스 및 시스템 구조(송수신기: 최신 기지국과 단말기 구조를 반영)를 반영하였을 뿐만 아니라, 3GPP에서 규정한 내용을 준수하고 있다. 본 논문에서 제시한 '채널 특성을 고려한 MIMO 5G 통신 시뮬레이터'의 경우 기존의 QAMCOM사의 모델과 System Vue이라는 상용 툴을 Reference 모델로 삼아 개발을 진행하였으며, 해당 툴의 단점을 극복(MIMO 기능 추가, 전반적인 통신 프로세스 지원가능 등등) 하였다는 측면에서 가치가 있다. 그 외에도 사용자가 직접 코드에 접근하지 않고도, 혹은 코드에 대한 전문적인 지식이 없어도 해당 시뮬레이터를 사용할 수 있게끔 JSON 파일이라는 형식을 활용하여 기개발 모델과 차별성을 확보하였다.

5G 통신 시스템을 설계함에 있어 가장 중요한요소 중 하나라고 할 수 있는 채널 모델의 경우 크게 2가지로 모델링을 진행하였다. 첫째는 부분적인 채널의 경향 및 결과 값을 보고 전체의 채널을 통계적으로 모사하는 Statistical 한 방법을 사용하였으며, 이외의 다른 방법으로는 주어진 환경의 전파전파현상을 물리 이론을 바탕으로 정확하게 예측하는 Deterministic한 방법을 활용하였다. 본 논문에서 제시한 5G 통신 시뮬레이터는 앞에서 제시한 2가지 방법으로 모델링한 채널 하에서

얻은 통신 성능을 보여준다. 결과를 보고 채널의 상태를 결정 짓는 파라미터(Pilot Subcarrier의 개수, 송신기의 송신 전력, 송수신기간 거리 등등)의 타당한 값들을 주어진 환경에 따라 파악할 수 있다. 즉 해당 5G 통신 시뮬레이터를 통해 사용자는 자신이 원하는 시나리오 하에서의 통신성능을 확인할 수 있고 이 결과값을 분석하여 주어진 환경에 맞는 채널 파라미터 값을 얻을 뿐만 아니라 송신기에서 실제 보낸 신호와 수신기에서 받은 신호 간의 차이를 나타내는 EVM(Error Vector Magnitude)과 같은 파라미터를 통해 통신성능이 확인 가능하다.
주요어 : 5G, 통신 시뮬레이터, 채널, MIMO

학 번 : 2021-25248

목 차

제 1 장 서 론 1

제 2 장 5G 통신 시스템 시뮬레이터 3
제 1 절 시뮬레이터 Overview 3
제 2 절 시뮬레이터 구성 6
2.1. Source 6
2.2. Waveform Modulation (Demodulation) 6
2.3. Tx & Rx Analog 9
2.3.1 PA 9
2.3.2 Mixer 10
2.4. Channel 12
2.5. Channel Estimation & Equalization 16

제 3 장 정적 환경 5G 통신 시뮬레이터 20
제 1 절 RF 소자의 비선형성 보상 알고리즘 20
제 2 절 MIMO 통신 기술 25
제 3 절 Beamforming 27

제 4 장 채널 모델링 31
제 1 절 AWGN 채널 31
제 2 절 Deterministic 채널 32
제 3 절 Statistical 채널 37

제 5 장 동적 환경 5G 통신 시뮬레이터 45
제 1 절 동적 환경 고유 파라미터 분석 및 정의 45
제 2 절 결과 및 분석 50

제 6 장 사용자용 매뉴얼 53

제 7 장 결 론 60

참고문헌 62

Abstract 64

표 목차

[표 1] 다양한 5G 변조 방식에 따른 3GPP EVM 요구사항 5
[표 2] PA OIP3 값에 따른 MSE & 소요 시간 비교 23
[표 3] NYU 교내 측정 종합 결과 38
[표 4] 동적 환경 고유 파라미터 45
[표 5] 동적 환경 고유 파라미터 48
[표 6] OFDM Symbol 주기..... 52
[표 7] 파라미터 설명 54

그림 목차

[그림 1] 5G 통신 시뮬레이터 Block Diagram 3
[그림 2] 5G 통신 시뮬레이터 프로세스..... 3
[그림 3] 그림으로 표현한 EVM..... 5
[그림 4] QAM 변조 Block Diagram 6
[그림 5] OFDM 변복조 Block Diagram..... 8
[그림 6] OFDM 기본원리..... 8
[그림 7] CP를 활용한 OFDM 신호 8
[그림 8] 5G 통신 시뮬레이터 RF 소자(PA, Mixer) 9
[그림 9] 1dB Gain Compression & Third Order Intercept Point 10
[그림 10] PA의 OPI3값에 따른 EVM 성능변화 10
[그림 11] Mixer LO 신호 11
[그림 12] IQ Mixer의 Block Diagram..... 11
[그림 13] The linear filter channel with additive noise..... 12
[그림 14] Frequency Division in OFDM..... 12
[그림 15] Circular Convolution과 CP가 붙은 Linear Convolution와 비교 14
[그림 16] 시나리오 별 CIR 비교 14
[그림 17] 5G 통신 시뮬레이터 Subcarrier Mapping..... 17
[그림 18] Frequency Selective & Flat Fading Channel 17
[그림 19] 5G NR MIMO-OFDM Pilot Arrangement 17
[그림 20] 5G 통신 시뮬레이터 Signal Allocation..... 18
[그림 21] 전송 방식 별 PAPR 비교..... 20
[그림 22] PA의AM-AM/AM-PM 특성 21

[그림 23] Spectral Regrowth.....21
[그림 24] Interpolation 정의.....22
[그림 25] Up-sampling.....22
[그림 26] Anti-imaging Filtering.....22
[그림 27] Decimation 정의.....23
[그림 28] ACPR 비교.....23
[그림 29] Up-sampling 값에 따른 신호 관측 대역 확보.....24
[그림 30] SystemVue 결과와 비교검증.....24
[그림 31] Massive MIMO Overview.....25
[그림 32] Massive MIMO 내부 모식도.....26
[그림 33] Galaxy S21 모델 안테나 구조.....27
[그림 34] Beamforming(좌측: Downlink & 우측: Uplink) 28
[그림 35] Beamforming 모식도(Uplink 기준).....28
[그림 36] CST를 통한 단일 패치 안테나 AEP (Active Element Pattern) 29
[그림 37] AWGN 크기 및 Beamforming 각도에 따른 시뮬레이터 결과.....30
[그림 38] 5G 채널 모델 분류.....32
[그림 39] Raytracing 환경 (CAD File) 33
[그림 40] Raytracing 시뮬레이션 시나리오 Tx & Rx 구조...33
[그림 41] Raytracing 시뮬레이션 시나리오.....34
[그림 42] Raytracing 시나리오 구분에 따른 통신 성능 비교 34
[그림 43] Raytracing 시나리오 별 CIR 비교.....35
[그림 44] Raytracing 시나리오 별 채널 Response 비교.....35
[그림 45] 이상적인 상황의 경우 통신 성능 비교.....36
[그림 46] NYU 교내 측정 결과 예시.....38
[그림 47] NYU 채널 시뮬레이터의 CIR 결과 값.....38
[그림 48] NYU 채널 시뮬레이터 GUI 39
[그림 49] Interface 융합.....40
[그림 50] NYU 채널 시뮬레이터의 채널 Response Plot.....40
[그림 51] NYU 채널 시뮬레이터의 채널 Response Plot.....40
[그림 52] 통신 성능 비교 (독립변수: 시나리오 Type) 41
[그림 53] 통신 성능 비교 (독립변수: Environment).....42
[그림 54] 통신 성능 비교 (Tx Power 세기) 43
[그림 55] 통신 성능 비교 (Tx-Rx간의 거리) 44
[그림 56] 동적 환경 시나리오 Graphical Plot.....46
[그림 57] 동적 환경 시나리오 세분화.....47
[그림 58] 정적 환경의 나열로 표현한 동적 환경 시나리오....47
[그림 59] CIR Plot(1st Correlated Region) 48
[그림 60] CIR Plot(2nd Correlated Region).....48

[그림 61] 동적 환경 5G 통신 시뮬레이터 결과 50
[그림 62] OFDM Symbol 구조 52
[그림 63] 5G 통신 시뮬레이터 Interface 구조 53
[그림 64] SystemParameter.json file 구조 53
[그림 65] solver_info.json file 구조 55
[그림 66] 시나리오 별 Raytracing을 통해 얻은 해석 결과물 55
[그림 67] Input_Route.json 파일의 구성 및 설명 56
[그림 68] NYU 채널 시뮬레이터 결과물을 통해 채널 매트릭스를 도출하는 과정 57
[그림 69] 5G 통신 시뮬레이터에 넣을 채널 매트릭스 도출 ... 57
[그림 70] 툴 실행 방식 58
[그림 71] 최종 결과 58
[그림 72] 경로(Directory) 변경 59
[그림 73] 툴 실행 방식 59
[그림 74] 최종 결과 59
[그림 75] 5G 통신 시뮬레이터 최종 Interface Diagram 60

제 1 장 서 론

5세대 무선 네트워크 기술을 의미하는 5G가 세계 최초로 대한민국에서 상용화가 되면서 당시 까지만 하더라도 대한민국 국내만이 아닌 온 세계의 이목이 대한민국에 집중되었다. 하지만 국내에서의 5G 개발에 대한 연구 및 투자가 예상보다 더디게 되면서 첫 상용화를 했을 당시 정부를 비롯해서 많은 국내 기업 및 통신사가 홍보했던 5G를 사용함으로써 얻을 수 있는 효과(초고속, 초저지연, 초연결)를 온전히 누리지 못하는 상황이다. 5G 상용화를 이미 마치고 차세대 이동통신의 주인공이 될 가능성이 큰 6G 연구를 이미 시작한 몇몇의 나라와 비교해 볼 때 현시점까지의 국내 상황은 부정적이라고 판단할 수 있다. 이와 더불어 최근 정부 산하기관에서 5G 연구 개발 관련한 책임을 물어 국내 통신사의 5G mm-Wave 주파수 대역 할당을 일방적으로 취소를 하는 등 현 시점 기준 이후의 미래에 대한 전망도 그리 밝지 않은 상황이다.

이런 악조건의 상황에서 본 논문에서는 앞서 말한 혜택을 누릴 수 있는 그러나 아직 국내에서는 상용화되지 않은 5G mm-Wave 대역(약 24~71GHz)에서 동작하는 통신 시뮬레이터를 제안한다. 본 연구에서는 3GPP에서 정의한 5G 표준을 준수하면서 다양한 변조 방식을 지원하는 Baseband 시스템과 EM 해석을 포함할 수 있는 RF시스템까지의 전반적인 통신 프로세스를 해당 시뮬레이터에 구축하였다. 추가로 실제 상용화 되어있는 최신 모델(삼성 모델기준)의 구조를 해당 시뮬레이터의 송수신기에 반영하여 실제 운용 환경을 더 현실적으로 모사할 수 있다는 장점을 확보하였으며, 기 개발 모델과 비교했을 때 사용자가 전문적인 지식이 없어도 쉽게 사용할 수 있다는 점에서 큰 차별성을 확보하였다.

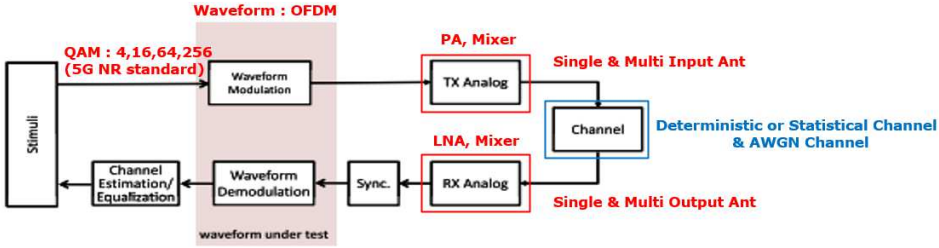
2장에서는 5G 통신 시스템 시뮬레이터의 구성 및 기본적인 동작 원리를 소개한다. 3장에서는 통신의 주체라고 할 수 있는 송신기(Tx)와 수신기(Rx)가 고정된 경우, 통신 성능을 보여주는 정적 환경하에서의 시뮬레이터에 대한 내용을 서술한다. 해당 3장에서의 세부 내용으로는 실제 통신시 불가피하게 발생되고 통신 관점에서는 큰 악영향을 주는 RF소자의 비선형성을 보상하기 위한 알고리즘과 대다수의 통신이 이루어지고 있는 MIMO(Multi-Input and Multi-Output)상황에서 활용되는 통신 기술 및 통신에 활용되는 주파수가 올라감에 따라 그 중요성이 부각되고 있는 Beamforming을 포함한다. 즉 해당 파트에서는 본 논문에서 제시한 시뮬레이터를 활용하여 앞서 소개한 기술 및 알고리즘의 효과를 검증한다. 4장에서는 현재 통신 분야에서 가장

활발하게 연구되고 있는 분야 중 하나라고 할 수 있는 채널을 다룬다. 해당 시뮬레이터는 채널의 가장 기본이라고 할 수 있는 AWGN 채널, 그리고 각각 Statistical & Deterministic방법으로 모델링한 채널을 입력받은 후 그 결과를 EVM(Error Vector Magnitude)라는 파라미터를 통해 나타낸다. 5장에서는 3장에서 제시한 경우와 다르게 사용자(단말기)가 움직이는 경우를 고려한 동적환경 통신 시뮬레이터를 소개한다. 앞서 3장에서 다룬 정적환경과는 다르게 추가로 고려해주어야 하는 동적환경 고유 파라미터를 소개 및 분석하고 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 분석한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문에서 제시한 시뮬레이터 프로그램을 보다 쉽게 사용할 수 있게 사용자용 매뉴얼을 소개한다.

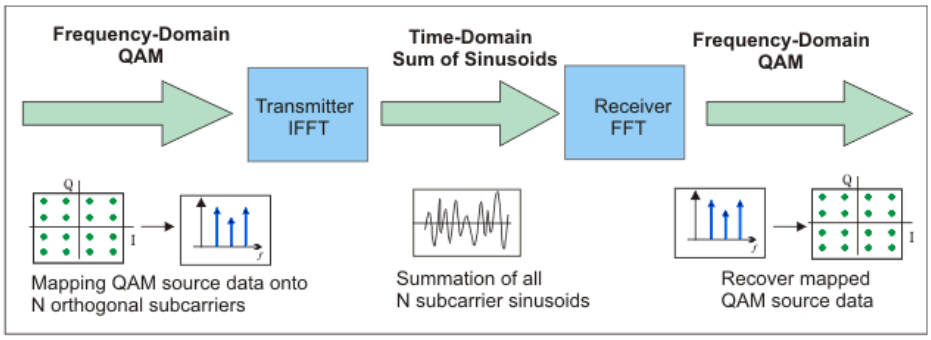
제 2 장 5G 통신 시스템 시뮬레이터

제 1 절 시뮬레이터 Overview

해당 논문에서 제시한 5G 통신 시뮬레이터의 전반적인 Block Diagram은 그림 1에서 제시한 바와 같다.



[그림 1] 5G 통신 시뮬레이터 Block Diagram



[그림 2] 5G 통신 시뮬레이터 프로세스

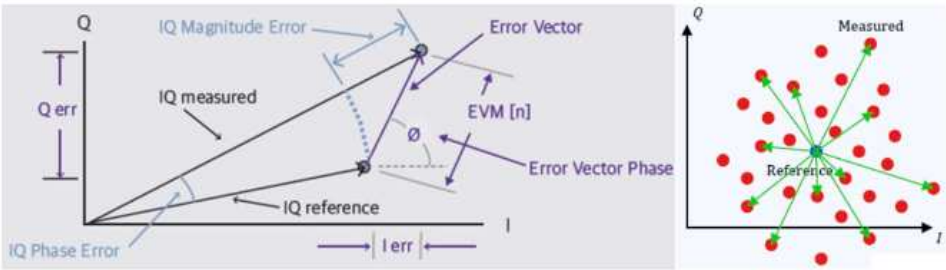
그림 1의 제시된 Block Diagram의 경우 QAMCOM이라는 통신 회사에서 개발한 모델을 차용하였으며, 본 논문에서 제안한 5G 통신 시뮬레이터는 해당 Diagram에서 수정 및 보완을 진행하여 구축하였다[1]. 5G 통신 시뮬레이터를 이루는 모든 Block을 Matlab 코드로 구축하였으며, 송신기가 전송하고자 하는 신호를 만들어 주는 소스단부터 송신기에서 보낸 신호를 채널 및 각종 RF 소자를 거친 후 수신단에서 받게 될 때까지의 전반적인 통신 프로세스를 다룬다. 이론적으로 보면 송신기에서 보낸 신호를 수신기에서 그대로 왜곡 없이 받으면 좋지만 실제의 경우 증폭과 Up & Down Conversion 용도로 사용되는 RF 소자의 비선형성이 존재하고, 이와 더불어 송수신기 간의 공간을 나타내는 채널에 의해 왜곡이 발생된다. 따라서 해당 시뮬레이터는 그림 2에서 제시된 바와

같이 송신기의 IQ Constellation에 찍힌 신호와 수신기에서의 IQ Constellation에 찍힌 신호 간의 차이를 EVM(Error Vector Magnitude)과 MSE(Mean Square Error)라는 2가지 파라미터를 통해 표현한다. 2개의 파라미터 중 EVM의 경우 통신 관련 논문 및 서적에서 많이 등장하는 용어로써 통신시 발생되는 왜곡의 전체적인 지표를 나타내는 가장 유용한 지표 중에 하나이다. 다양한 시나리오 하에서 통신 성능을 파악할 경우 일반적으로 IQ 좌표계를 통해 왜곡 문제를 파악하고 해결을 진행한다. 본 논문에서 가장 많이 등장하는 용어이자 시뮬레이터의 결과를 나타내는 EVM은 쉽게 말하면 송신기에서 보낸 신호와 수신기가 받은 신호가 얼마나 멀리 떨어져 있는지를 의미한다. 그림 3의 단일 신호 기준의 경우 그림을 보게 되면 송신기에서 보낸 신호가 참조 신호가 되고 수신기에서 받은 신호가 측정신호라고 보게 될 경우 이 2개의 벡터 간 차이를 Magnitude로 표현하게 되고 EVM은 그 차이점의 정규화 비율을 가리키게 된다. 하지만 실제 통신이 이루어지는 경우에는 송신기에서 1개의 QAM 변조 신호만 보내지 않고 여러 개의 신호를 보내며 이는 자연스럽게 수신기에서 받은 신호의 개수와 동일하게 된다. 따라서 그림 3의 다중 신호 기준을 나타낸 그림을 보면 알 수 있듯이 이 경우 송수신 신호 간 차이를 나타내는 벡터의 크기는 모든 심볼(N개)을 모두 고려해주어야 한다. 여기서 정규화를 해주기 위해 사용되는 값(Normalization Reference)은 크게 2가지로 나뉘게 되지만 해당 시뮬레이터에서는 해당 값을 참조 신호들의 RMS(Root Mean Square)값으로 놓고 계산을 하였으며 단위 또한 일반적으로 사용되는 dB 또는 백분율 중 백분율을 해당 값의 단위로 선정하였다.

$$\mathbf{Magnitude} = \sqrt{I_{err}{}^2 + Q_{err}{}^2} \tag{1-1}$$

$$\mathbf{Magnitude} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}(I_{err}{}^2 + Q_{err}{}^2)} \tag{1-2}$$

$$\mathbf{EVM} = \frac{\mathbf{Magnitude}}{\mathbf{Normalization\ Reference}} \tag{2}$$



[그림 3] 그림으로 표현한 EVM(좌측: 단일 신호 기준, 우측: Multi 신호 기준)

만약 통신이 잘 되는 환경일 경우 실제 비선형성을 유발하는 RF 소자와 왜곡을 발생시키는 채널을 통과한다고 하더라도 송수신기 IQ Constellation에 찍힌 신호 간의 차이가 적을 것이고 반대의 경우에는 이 차이가 클 것이다. 이를 앞서 말한 2가지 파라미터(EVM & MSE) 관점에서 보게 되면 전자의 경우는 해당 파라미터들의 절댓값이 클 것이며 후자의 경우는 작게 된다. 다시 말해서 해당 시뮬레이터는 다양한 채널 하에서 송신기에서 보낸 QAM 신호를 EVM 혹은 MSE 라는 결과값을 통해 수신기에서 얼마나 제대로 정확하게 받는지를 나타낸다. 따라서 사용자는 해당 시뮬레이터를 통해 시뮬레이션을 돌린 후 얻은 결과값(EVM & MSE)과 표 1과 같이 3GPP에서 제시한 표준 값과의 비교를 통해 사용자가 입력한 시나리오의 특성을 파악할 수 있고, 더 나아가 5G만 가지고 통신이 가능한 지역(Standalone)인지 4G의 도움을 받아야만 통신이 가능한 지역(Non-standalone)인지를 구별 가능할 수 있다. 참고로 실제 미국에서 이미 상용화 된 5G mm-Wave대역을 지원하는 삼성전자 단말기(Mobile Phone)의 경우 거의 대다수의 통신이 Non-standalone으로 진행되고 있는 상황이다.

Modulation Scheme	Required EVM
QPSK	17.5%
16QAM	12.5%
64QAM	8%
256QAM	3.5%

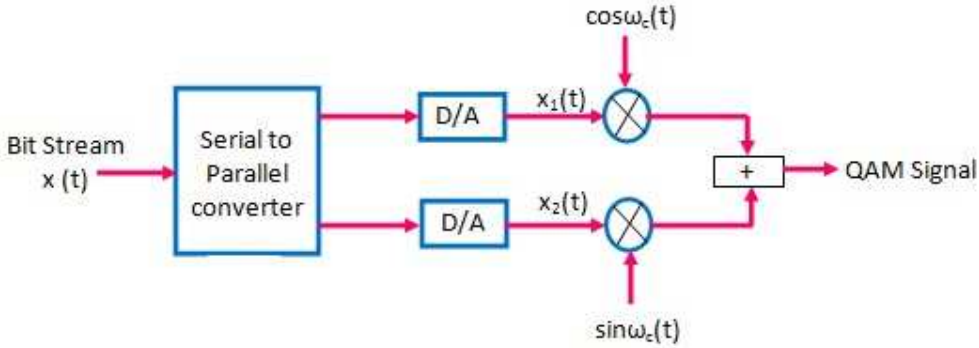
[표 1] 다양한 5G 변조 방식에 따른 3GPP EVM 요구사항

제 2 절 시뮬레이터의 구성

그림 1의 5G 통신 시뮬레이터를 크게 나누어 보면 5개 파트로 구분이 가능하다. 이 5개 파트는 Stimuli(Source), Waveform Modulation & Demodulation, Tx & Rx Analog, Channel, Channel Estimation & Equalization Block에 해당이 된다.

2.1. Source (Stimuli)

먼저 Stimuli Block의 경우 송신 신호를 생성해주는 단계로써 송신하고자 하는 직렬 Bit Stream을 받아 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)신호로 변조해주는 Block을 말한다. 해당 Block에서 사용되는 QAM 변조의 경우 변조 차수를 3GPP에서 규정한 5G NR 표준에 따라 4~256 QAM 변조까지 가능하게끔 구축하였다. QAM 변조란 독립된 2개의 채널(In-phase, Quadrature)를 사용하여 진폭과 위상을 바꾸는 기법이다. 다시 말해서 QAM은 진폭을 바꾸는 ASK와 위상을 바꾸는 PSK가 결합된 방식을 뜻한다[2].



[그림 4] QAM 변조 Block Diagram

2.2. Waveform Modulation (Demodulation)

QAM 변조를 거친 신호는 Waveform Modulation (Demodulation) Block을 거치게 된다. 해당 Block에서는 QAM 신호를 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)신호로 바꿔주게 되며, 신호처리 관점으로는 Frequency Domain에서 Time Domain으로 변환해주는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 취해주게 된다. Demodulation Block의 경우 수신단의 RF 소자(LNA, Mixer)를 거친 신호에 OFDM 복조를 취해주게 되며 신호 처리 관점으로는 Time Domain에서

Frequency Domain으로 변환해주는 FFT(Fast Fourier Transform)를 취해준다. OFDM이란 상호 직교성을 갖는 Multi-Subcarrier를 이용하여 신호를 변조 및 다중화 하는 방식을 말한다. 여기서 핵심 개념은 상호 직교성이라는 뜻으로써 두 신호 사이의 직교성(Orthogonality)를 뜻하며 이는 서로 다른 주파수를 갖는 신호의 곱을 기본 주기동안 적분한 결과가 0이 되는 경우를 의미한다. 다시 말해서 기본 주기의 역수인 기본 주파수가 같은 경우, 서로 다른 주파수를 갖는 신호들이 기본주기와 같은 길이를 갖는 Time-Limited 신호라면 (3)의 식과 같이 직교성이 성립하게 된다[3].

$$\frac{1}{T}\int_0^T e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt = \frac{1}{T}\int_0^T e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T} t} dt = \begin{cases} 1, k = i \\ 0, otherwise \end{cases} \quad (3)$$

그림 5의 변조 파트를 통해 얻어진 OFDM 신호는 다음과 같다.

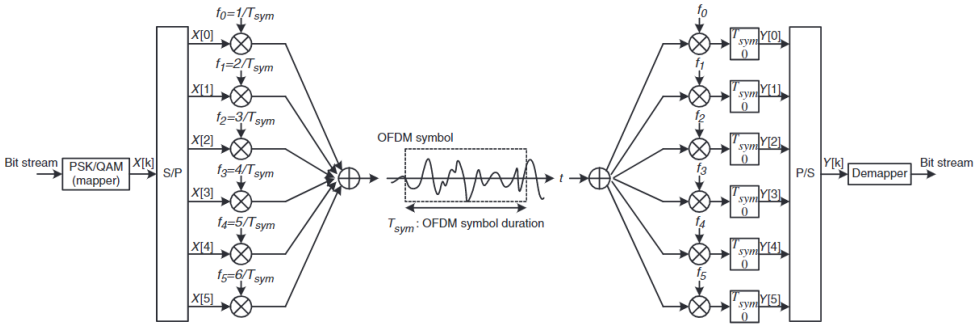
$$x_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi k \Delta f (t - lT_{sym})} \quad (4)$$

여기서 l, k, $\mathbf{f_c}$, $\mathbf{T_{sym}}$, $\mathbf{\Delta f}$, $\mathbf{f_k}$ 는 각각 신호 인덱스, Subcarrier 인덱스, Subcarrier 주파수, 신호 주기, Subcarrier 간격, k번째 Subcarrier 주파수를 나타내며, $\mathbf{X_l[k]}$ 는 l번째 OFDM 심볼의 k번째 Subcarrier에 실려 전송되는 데이터 심볼을 의미한다. OFDM 복조의 경우 앞서 말한 직교성이 빛을 발하게 된다. OFDM 전송 방식에서 사용되는 Subcarrier는 서로 직교하는 특성을 갖기 때문에 수신단에서는 받은 신호를 기본 주기동안 적분만 해줌으로써 Subcarrier 간 간섭(Inter Carrier Interference)없이 온전하게 데이터 심볼을 복조 할 수 있게 된다[3].

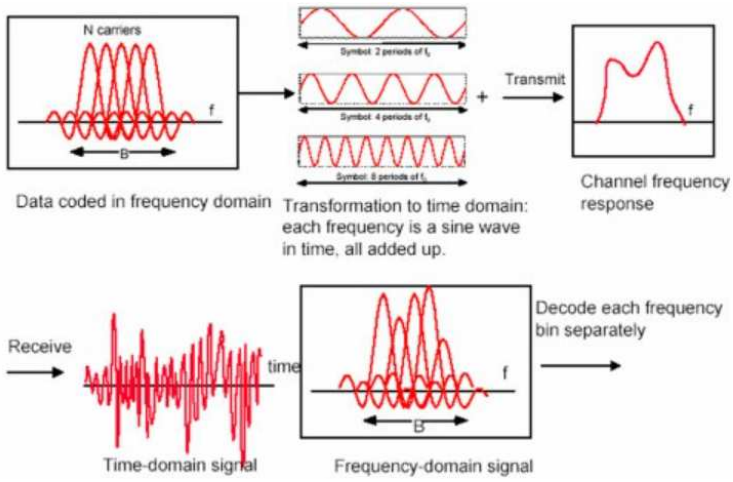
$$\begin{aligned} Y_l[k] &= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{\infty} y_l[t] e^{-j2\pi k \Delta f (t - lT_{sym})} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi i \Delta f (t - lT_{sym})} \right\} e^{-j2\pi k \Delta f (t - lT_{sym})} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi (i-k) \Delta f (t - lT_{sym})} dt \end{aligned} \quad (5)$$

하지만 (5)식을 통해 얻은 결과는 실제 통신 상황에서 발생하는 채널의 영향과 RF 소자의 비선형성 그리고 잡음을 전혀 고려하지 않았으며, 실제의 경우 이런 영향이 존재하여 통신의 악영향을 끼친다. 그림 6을

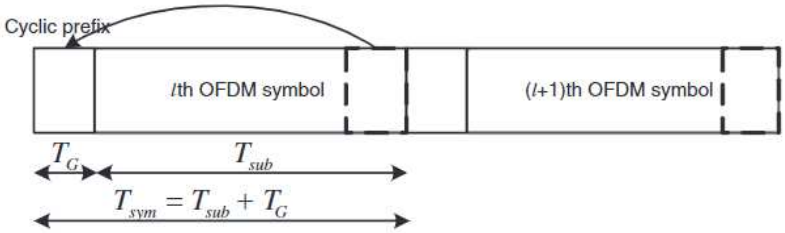
보면 OFDM 변조단계와 복조단계 사이에 채널이 존재하는 것이 보이며, 이로 인한 신호의 왜곡이 발생되고 있음이 확인 가능하다. 왜곡의 영향을 최대한 줄이기 위해 실제 통신에서는 그림 7처럼 신호 뒤쪽의 일부분을 그대로 복사해서 앞쪽으로 덧붙여서 보내는 Cyclic Prefix 개념을 도입하게 된다. 그 이유는 통신이 진행되는 대다수의 채널이 다중경로 채널이기 때문이다. 해당 채널을 거치게 된 신호는 Subcarrier간의 직교성이 깨지게 된다. 따라서 이 영향을 줄이기 위해 실제 통신에서는 채널의 최대 지연확산보다 약간 더 길도록 CP라고 불리는 일종의 보호구간 **(T_G)** 을 삽입하게 된다. 추가로 CP를 사용하는 이유가 존재하는데 이는 채널 파트에서 설명하도록 하겠다.



[그림 5] OFDM 변복조 Block Diagram



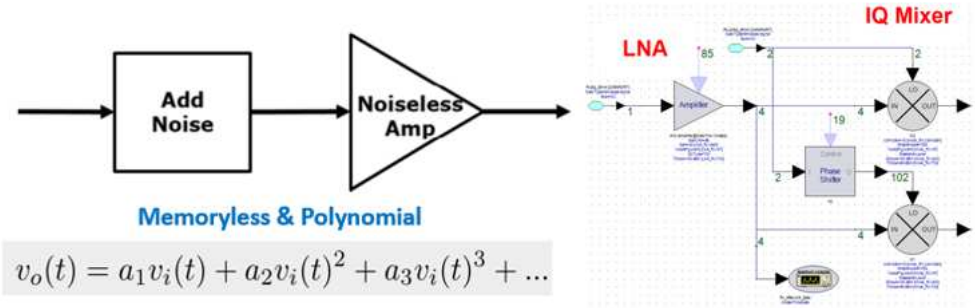
[그림 6] OFDM 기본원리



[그림 7] CP를 활용한 OFDM 신호

2.3. Tx & Rx Analog

다음은 Tx & Rx Analog Block이다. 해당 Block에서는 RF 소자들이 위치하게 되며, 해당 시뮬레이터에서는 신호 증폭을 위한 PA(Power Amplifier)와 Up & Down Conversion을 위한 Mixer가 존재한다. PA의 경우는 [4]에서 제시한 모델을 그대로 사용하였으며 [4]에서 제시한 Mixer의 경우 기존의 레이다용이 아닌 통신 관점에서 변형을 완료하였다. 자세한 내용은 Mixer 파트에서 서술하도록 하겠다.

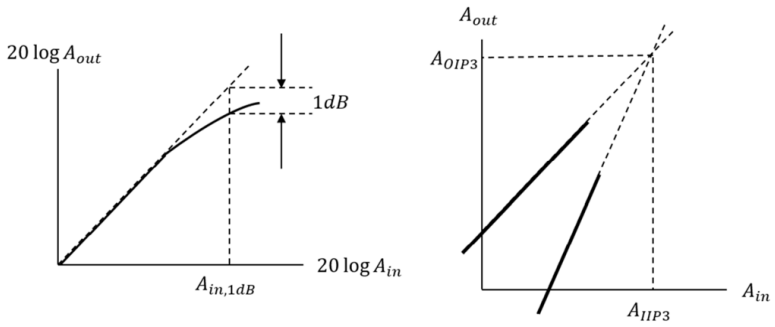


[그림 8] 5G 통신 시뮬레이터 RF 소자(PA, Mixer)

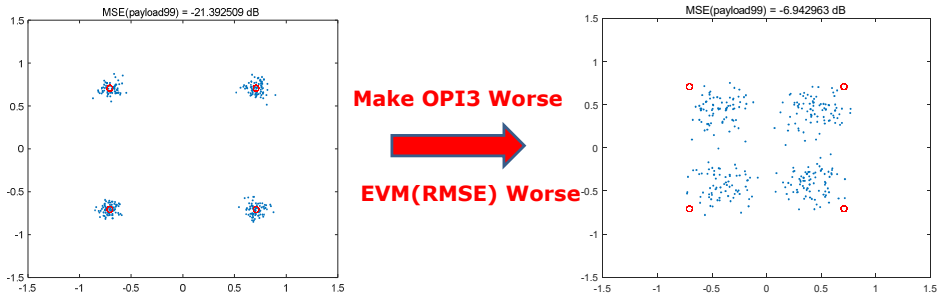
2.3.1 PA (Power Amplifier)

먼저 PA의 경우 1dB Gain Compression Point(P1)과 Third Order Intercept Point(IIP3 & OIP3)정보를 가지고 모델링 하였다. PA 소자를 모델링 하기 위해 먼저 잡음 지수를 파라미터로 선정하여 PA를 추가함으로써 발생하는 잡음 전력을 구하였다. 추가로 잡음과 함께 가장 중요한 특성이라고 할 수 있는 비선형성은 그림 8에 제시된 3차 성분까지 고려한 다항식을 통해 근사화 하였다. 해당 식의 결과를 통해 고조파 왜곡(Harmonic Distortion)성분을 구하였고, 이상적인 PA 이득과 1dB만큼 차이나는 지점인 1dB Gain Compression Point를 식으로 구하였으며 그림 9에서 점선은 입력 전력에 따른 이상적인 출력 전력을 의미한다. 추가로 PA 입력 신호에 2개 이상의 주파수 성분을 가지는 Two Tone 신호를 인가하여 Intermodulation 성분을 알아냈다. 이를 통해 기준 주파수에 나오는 출력 전력과 Intermodulation으로 인해 발생되는 출력전력이 같아지는 지점을 Intercept Point(교차점)이라고 하며, 해당 정의를 활용하여 Third Order Intercept Point(3차 교차점)을 도출하였다[4]. 해당 PA의 경우 [4]에서 제안한 모델에 추가 변형을 가하지 않았으므로 더 자세한 내용은 [4]를 참고하길 바라며, 사용자는 본 논문에서 제시한 통신 시뮬레이터의 Input 변수인 OPI3, P1등의 값에 의해 변화되는 PA의

출력 스펙트럼 값들(출력 전력, ACPR, ...등등)과 EVM의 성능을 통해 앞서 제시한 2가지 파라미터(P1 & OIP3)를 활용하여 PA를 성공적으로 모델링 하였음을 확인할 수 있다.



[그림 9] 1dB Gain Compression Point & Third Order Intercept Point

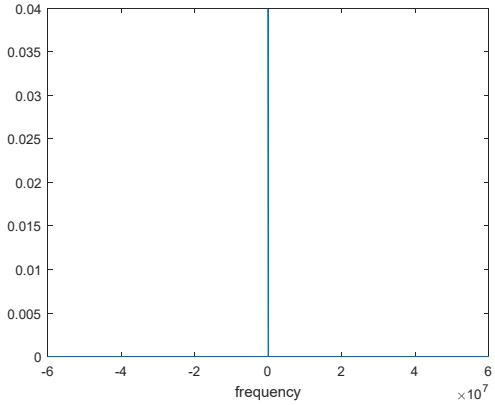


[그림 10] PA의 OPI3값에 따른 EVM 성능변화

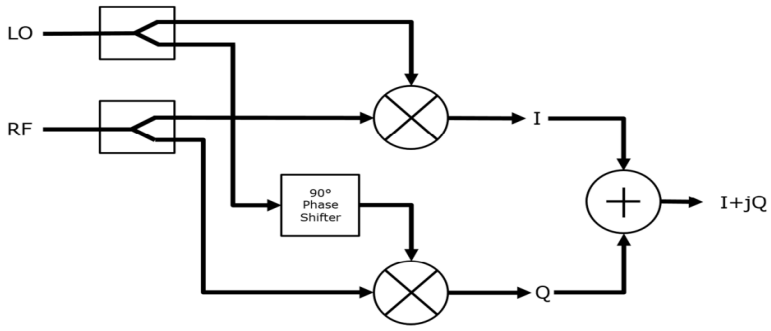
2.3.2 Mixer

다음은 Mixer에 대한 설명이다. 해당 시뮬레이터에서는 Mixer의 행동 모델링을 위해 SystemVue라는 툴에서 지원하는 IQ Mixer 모델을 차용하였다. 그림 12는 SystemVue에서 보인 IQ Mixer의 Block Diagram이다. LO 신호와 RF 신호가 Power Divider를 통해 나뉘어서 2개의 Mixer에 각각 들어가게 되는데, 이때 들어가게 되는 LO신호에 Mixer 별로 90도 위상차를 주게 된다. 그 결과 각 Mixer에는 I와 Q신호가 나오게 되며, 2개의 Mixer를 통해 나오게 되는 출력 신호는 I +JQ 로 표현이 가능하다. 하지만 실제의 경우 Power Divider와 Phase shifter의 비이상적인 특성이 의도치 않게 발생하게 되며, 뿐만 아니라 두 믹서의 비이상적인 동작으로 인해 결과적으로 발생되는 I와 Q신호 간의 위상 & 이득 차이가 발생한다. 이를 IQ Imbalance라고 하며 해당 값을 IQ Mixer의 모델링을 할 때 반영하였다. 추가로 Mixer 그 자체로 인해 발생되는 비선형성을 고려해주기 위해 Mixer 동작 시에 발생하는 신호 누설 또한

Mixer 모델링에 고려하였다[4]. 다만 [4]에서 제안한 Mixer는 레이다용으로 개발된 Mixer이므로 통신용으로 개발하기 위해 적당한 변형이 불가피했다. 전자(레이다)의 경우 Mixer의 입력으로 송신단의 PA의 출력과 LNA를 통과한 신호가 들어가 이 두 신호 간의 주파수 차이를 활용하여 레이다 신호처리가 수행된다. 후자(통신)의 경우에는 Mixer의 입력으로 송신단의 PA 출력이 아닌 LO 신호가 들어가게 된다. 따라서 Mixer의 또 다른 입력이 되는 LO 신호는 그림 11과 같으며, 그림을 통해 알 수 있듯이 LO의 중심 주파수는 0Hz가 된다. 따라서 본 논문에서 제시한 5G 통신 시뮬레이터에서는 RF 소자 행동을 모델링 한 후 DC 신호에 앞서 RF 소자 모델링을 통해 도출한 성분을 부여해준다. 쉽게 말해서 시뮬레이터의 전반적인 신호 처리는 모두 Baseband에서 진행이 되며 IQ Mixer의 LO의 주파수는 5G mm-Wave 대역 주파수가 아닌 0Hz인 DC를 넣어주어 RF 소자의 특성만 부여해줄 뿐 시뮬레이션을 진행할 때는 Up & Down Conversion을 굳이 해주지 않았다. Reference 모델로 삼았던 QAMCOM사의 모델에서도 이와 같은 과정으로 시뮬레이터를 구축하였음을 확인하였으며, 그 결과 본 시뮬레이터의 시뮬레이션 소요 시간을 대폭 줄일 수 있었다.



[그림 11] Mixer LO 신호

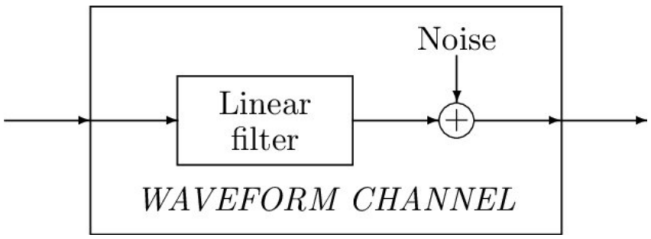


[그림 12] IQ Mixer의 Block Diagram

2.4. Channel

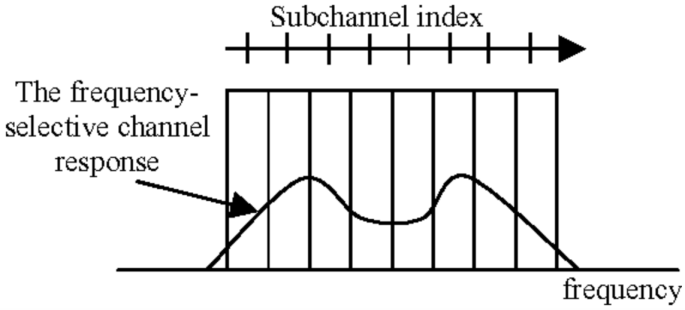
다음은 채널 Block이다. 앞단에서 설계한 RF 소자를 통과한 후 송신 안테나를 통해 전송된 신호가 채널을 거치게 되며, 채널에 의한 왜곡의 영향을 받아 수신기 안테나를 통해 들어오게 된다. 현실 상황에서 고려되는 대다수의 채널은 다중경로 채널이 되게 되고, 이는 신호 처리 관점에서 보면 그림 13에서와 같이 선형 필터 기능을 가지게 된다. 일반적으로 신호가 채널을 거치게 될 경우 OFDM 변조된 신호(**s[n]**)는 채널의 Time Domain 성분이라고 할 수 있는 CIR(Channel Impulse Response)와 Linear Convolution이 되고, AWGN 성분(**w[n]**)이 추가적으로 더해지게 된다. Linear Convolution은 ＊와 같은 기호로 표현이 가능하다.

$$r[n] = h[n] * s[n] + w[n] \tag{6}$$



[그림 13] The linear filter channel with additive noise

OFDM의경우 각 Subcarrier에 신호를 실어 전송하므로 사용 가능한 스펙트럼을 여러 개의 작은 스펙트럼으로 나누게 된다. 그렇게 될 경우 전체 대역을 이용한 고속의 데이터 전송은 각 Subcarrier 관점에서 보게 될 때 저속의 데이터 전송이 되게 된다. 그림 14를 통해 주파수 관점에서 해석하게 되면 각 채널(Subchannel)내에서 각각의 Subcarrier를 통해 실리게 된 신호가 겪게 되는 채널은 Frequency Selective 혹은 Flat Fading 채널의 영향을 받게 된다[3][5].



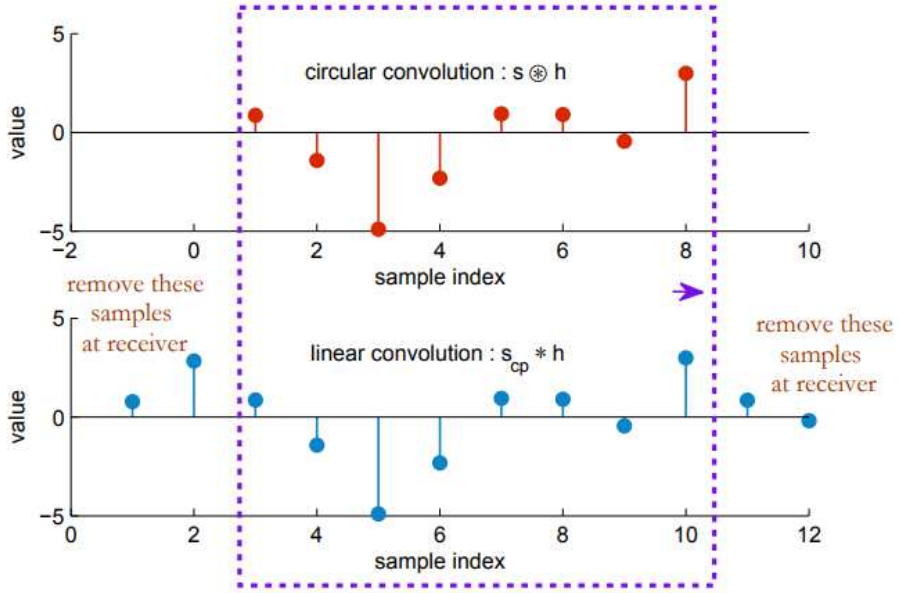
[그림 14] Frequency Division in OFDM

OFDM을 통해 구분화 된 각각의 채널(Subchannel)내에서는 주로 Frequency Flat 채널이 존재하게 되고 이는 각 채널내에 존재하는 채널의 효과를 간단한 Frequency Domain에서의 Equalizer로 보상해주는 것을 가능하게 한다. 추가로 OFDM 신호 처리 과정에서 사용되는 FFT(DFT) 혹은 IFFT(IDFT) 특성을 보면, Time Domain에서 두 시퀀스의 Circular Convolution이 Frequency Domain에서 두 시퀀스의 곱셈과 동일하다는 것을 알고 있다[6].

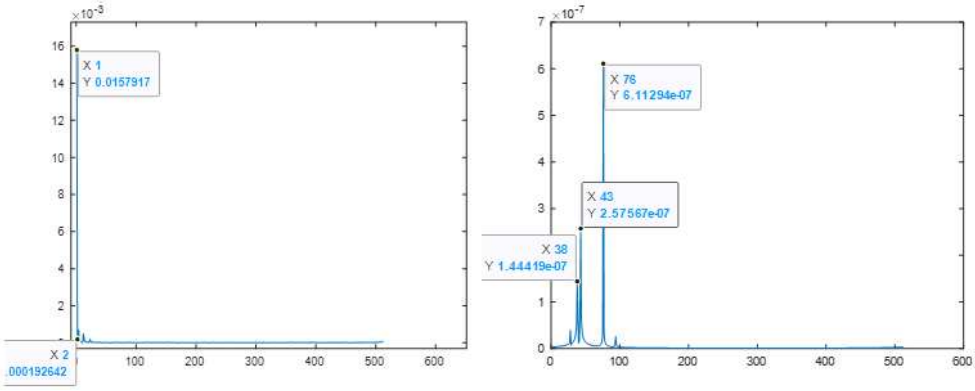
$$\boldsymbol{h[n] \otimes s[n] \equiv H[k]S[k]} \tag{7}$$

하지만 자연에 존재하는 채널은 Linear Convolution을 수행하게 됨에 따라 앞서 (6)에서 제시한 식에서 Noise 성분을 고려해주지 않는다고 가정하면 이제는 Linear Convolution을 통해 Circular Convolution에서 얻은 결과와 동일한 값을 도출해주는 작업이 필요하다. 이 때 중요한 역할을 하게 되는 것이 앞서 말했던 CP(Cyclic Prefix)이다. 쉽게 말하면 채널의 입력으로 들어가게 되는 신호에 CP를 추가하면 채널에 의해 전달된 Linear Convolution이 수신단에서 Circular Convolution으로 나타나게 된다. 예를 들어 채널을 거치게 되는 신호의 시퀀스의 길이가 8이고 CIR의 길이가 3이라고 했을 때 이 두 시퀀스를 Circular Convolution을 취해준 결과의 길이는 8이 된다. 동일한 대상을 Linear Convolution 해줄 경우 그 결과의 길이는 두 시퀀스의 길이를 합친 것에 1을 뺀 값으로 나오게 될 것이다. 이렇게 되면 길이도 다르고 결과 값 성분도 다르게 되는 결과가 나오게 되는데 이때 CP를 더해주게 되면 상황이 달라지게 된다. CP 길이를 2라고 하게 되면 채널을 거치게 되는 신호의 시퀀스의 길이는 8이 아닌 10이 되고 이를 CIR과 Linear Convolution을 해주게 될 경우 나오게 되는 결과 값의 길이는 그림 15처럼 12가 된다. 이 결과 얻게 된 신호의 중간부분만 획득하게 되면 그림 15과 같이 Circular Convolution을 해준 것과 동일한 결과를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 되기 위해서 충족해야 할 조건은 CP 최소길이가 적어도 CIR 길이보다 1만큼만 작은 값이어야 한다는 점이다. 여기서 CIR의 길이란 CIR 시퀀스에서 크기가 Dominant한 성분의 개수를 나타낸다. 그림 16를 보게 되면 좌측의 CIR은 Umi(Urban Micro Cell) & LOS(Line of Sight)환경에서 얻은 CIR이고 우측의 CIR은 Umi(Urban Micro Cell) & NLOS(Non-Line of Sight)환경에서 얻은 CIR이다. 전자의 경우 앞서 설명한 원리에 따르면 CIR의 길이가 그림 16처럼 500개가 넘는다고 하더라도 Dominant한 성분이 1개 이기

때문에 CP의 길이가 2만 되도 충분하게 되지만 후자의 경우는 CIR의 Dominant한 성분이 최소 76번째까지는 존재하기 때문에 CP의 길이는 최소 75보다는 길어야 된다. 하지만 CP의 길이의 경우 3GPP에서 5G 표준으로 정한 길이가 있기 때문에 표준 길이보다 더 긴 길이의 CP가 필요한 시나리오(CIR의 Dominant한 성분이 많은 시나리오)에서는 실제로도 5G NR 표준을 준수한 5G mm-Wave 통신이 불가능하다는 것을 해당 시뮬레이터를 통해 확인이 가능하다.



[그림 15] Circular Convolution과 CP가 붙은 Linear Convolution와 비교



[그림 16] 시나리오 별 CIR 비교 (좌측: LOS & 우측: NLOS)

이젠 앞서 서술한 개념 및 지식을 가지고 해당 시뮬레이터에서 채널을 어떻게 처리하였는지 신호 처리 관점에서 설명을 진행하도록 하겠다. 참고로 해당 시뮬레이터의 경우에는 송수신기 안테나 개수 및 구조, Subcarrier 개수 등등 사용자 임의로 설정이 가능하지만 본 논문에서는 설명의 편리성을 위해 2 by 2 MIMO & 512개의 Subcarrier인 상황을

가정하여 서술하도록 하겠다.
먼저 각자 다른 주파수를 갖는 Subcarrier에 해당되는 채널 매트릭스를 512개 생성한다. 여기서 Subcarrier간 Spacing은 5G mm-Wave대역의 표준에 따라 120kHz로 가정하였으므로 Subcarrier 간 주파수의 차이는 120kHz가 된다. 어떠한 방법으로 채널 매트릭스를 생성하였는지는 추후 4장 채널 모델링 파트를 참고하길 바란다.

$$H_{total} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix} \cdots\cdots \begin{pmatrix} A_{512} & B_{512} \\ C_{512} & D_{512} \end{pmatrix} \tag{8}$$

Convolution을 해주어야 하므로 각 매트릭스 별로 동일한 위치에 존재하는 성분들만 골라서 나열한 후 시퀀스를 만들고 이를 Time Domain으로 변환하여 CIR을 획득한다.

$$H_{total} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & \cdots & A_{512} \\ B_1 & B_2 & B_3 & \cdots & B_{512} \\ C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_{512} \\ D_1 & D_2 & D_3 & \cdots & D_{512} \end{pmatrix} \xrightarrow{IFFT} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_{512} \\ b_1 & b_2 & b_3 & \cdots & b_{512} \\ c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{512} \\ d_1 & d_2 & d_3 & \cdots & d_{512} \end{pmatrix} \tag{9}$$

가정한 상황이 2 by 2 MIMO인 상황이므로 각 송신 안테나의 입력신호가 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$이라고 할 때 수신 안테나의 출력신호는 $(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2)$가 된다.

$$\begin{aligned} y_1 &= a * x_1 + b * x_2 \\ y_2 &= c * x_1 + d * x_2 \end{aligned} \tag{10}$$

각 송신 안테나에 들어가는 신호의 시퀀스는 기존의 512가 아닌 CP를 붙여서 채널과 Linear Convolution을 취해준다. 이 경우 CP 길이는 36이된다.

$$H_{total} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_{512} \\ b_1 & b_2 & b_3 & \cdots & b_{512} \\ c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{512} \\ d_1 & d_2 & d_3 & \cdots & d_{512} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} & \cdots & x_{1,548} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} & \cdots & x_{2,548} \end{pmatrix} \tag{11}$$

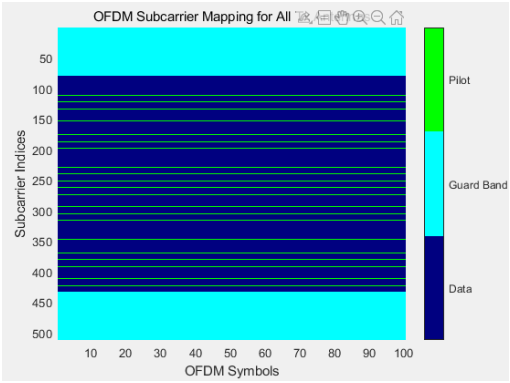
이로써 RF 소자의 출력 신호에 채널을 통과시켜주는 과정을 완료하였다.

2.5. Channel Estimation & Equalization

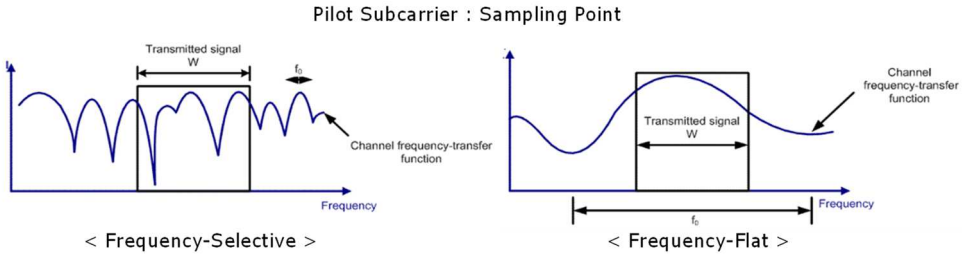
이제는 송수신기 모두 서로 아는 신호인 Pilot 신호를 통해 채널을 Estimation을 해준 후 해당 성분을 수신기에서 Compensation 시켜 줌으로써 원 신호를 복원하게 된다. 그 과정은 (11)이라는 식의 입력 신호에 기존의 RF 소자의 출력 신호가 아닌 1이라는 신호를 넣어주게 되면 해결이 된다. 즉 N이 Subcarrier와 CP의 개수의 합이라 하게 될 경우 $\mathbf{x}_{1,N}$, $\mathbf{x}_{2,N}$ 에 1이라는 신호를 넣어주게 되면 (12-1)와 같이 Time Domain에서의 각각의 송수신 안테나 간의 존재하는 채널의 값 혹은 채널이 신호에 미치는 왜곡 성분을 알 수 있게 된다. 채널의 왜곡을 Compensation 해주는 과정은 OFDM 복조를 거친 후의 수신단에서 취해 주게 되므로 Frequency Domain에서의 채널 성분을 FFT를 통해 구하게 된다(12-2). 다음과 같이 Pilot 신호가 실린 Subcarrier를 Pilot Subcarrier라고 불리게 된다. 실제 통신에서는 신호를 보낼 때 Data Subcarrier와 Pilot Subcarrier를 동시에 보내게 되고 이를 해당 시뮬레이터에 구현한 것이 그림 17이다. 참고로 해당 그림에 존재하는 Guard Band Subcarrier의 경우는 ISI(Inter Symbol Interference)를 제거해주기 위해 사용하였다. 사용하고자 하는 Subcarrier 개수가 동일할 경우 Data Subcarrier의 개수가 크면 클수록 Data Rate 관점에서 이득을 보기 때문에 Pilot Subcarrier 개수(N)를 최대한 줄이는 것이 중요하다. 이와 동시에 적은 수를 사용하더라도 채널을 최대한 정확하게 Estimation하는 것이 중요하다. 현재까지 LS, MMSE 방법과 같은 다양한 채널 Estimation방법이 제시되었으나 해당 시뮬레이터에서는 채널 Estimation 방법으로 Interpolation 기법 만을 고려해주었다. 추가로 Pilot Subcarrier를 어떻게 할당할지에 대한 방법도 그림 19에서 제시한 것처럼 3가지가 존재한다[7]. 각각의 장점이 존재하겠지만 그림 17에서 보면 알 수 있듯이 해당 시뮬레이터에서는 그림 19의 (b)방법을 차용하였다. 이럴 경우 Pilot Subcarrier가 샘플링 포인트가 되게 되고 Frequency Selective한 채널의 경우 보다 Frequency Flat한 경우가 더 적은 Pilot Subcarrier 개수를 필요로 한다. 이는 실제 사용자가 시뮬레이터에 넣어주는 채널의 특성에 따라 달라지는 값이고 아직 3GPP에서도 표준으로 규정하지 않아 해당 시뮬레이터의 결과 값(EVM & MSE)을 보고 사용자가 능동적으로 타당한 Pilot Subcarrier 개수를 조절하게끔 구축하였다.

$$h_{esti} = \begin{pmatrix} a_1 + b_1, & \cdots & \cdots & a_N + b_N \\ c_1 + d_1, & \cdots & \cdots & c_N + d_N \end{pmatrix} \tag{12-1}$$

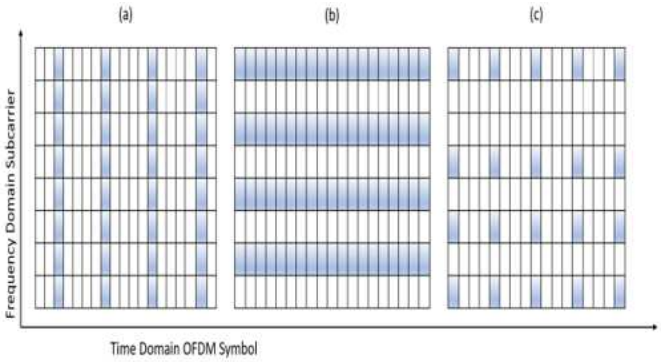
$$H_{esti} = \begin{pmatrix} A_1 + B_1, & \cdots & \cdots & A_N + B_N \\ C_1 + D_1, & \cdots & \cdots & C_N + D_N \end{pmatrix} \tag{12-2}$$



[그림 17] 5G 통신 시뮬레이터 Subcarrier Mapping Diagram



[그림 18] Frequency Selective & Flat Fading Channel



Pilot symbols arrangements
(a) Block-type (b) Comb-type (c) 2D grid type
[그림 19] 5G NR MIMO-OFDM Pilot Arrangement

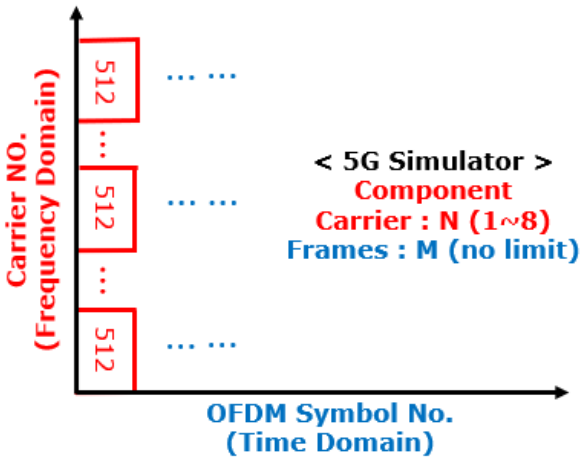
이를 통해 채널을 Estimation한 것을 이젠 Compensation을 해주는 작업이 마지막으로 남게 된다. 채널을 통과한 신호는 LNA(저 전력 증폭기)와 Down Conversion을 위한 Mixer를 거치게 되고 이 후 OFDM

복조(FFT 과정)가 된다. 이렇게 얻게 된 신호에는 채널의 왜곡 & RF 소자의 비선형성 & AWGN 등의 영향에 의해 실제 보낸 신호와 많이 다르게 될 것이다. 그 중 채널의 왜곡 성분은 Pilot Subcarrier를 통해 예측을 했기 때문에 해당 성분을 수신단에 수신된 신호에 나눠 줌으로써 Compensation을 취해주게 된다. 결국 본 논문에서 제안한 5G 통신 시뮬레이터의 경우 송신기에서 보낸 신호 **S[k]** 와 수신기에서 Compensation 과정까지 취해서 받게 된 신호 $\hat{S}[k]$간의 차이를 EVM & MSE라는 파라미터로 결과값을 보여주게 되는 것이다.

$$h[n] \otimes s[n] \equiv H[k]S[k] = R[k] \tag{13-1}$$

$$\hat{S}[k] = \frac{R[k]}{\hat{H}[k]} \tag{13-2}$$

이외에도 시뮬레이터를 개발함에 있어 가장 중요한 점이라고 할 수 있는 현실 상황과의 유사성 확보를 위해 실제 5G mm-Wave대역에서 사용되고 있는 Carrier Aggregation(CA)기능을 추가하였다. 통신에 사용하고자 하는 주파수 대역이 올라가게 됨에 따라 하나의 광대역 주파수 Block을 사용하는 것이 어려워진 상황임에도 Data Rate 향상의 수요는 꾸준히 존재하는 상황이다. CA는 여러 개의 서로 다른 대역에서 얻은 주파수 Block을 하나의 연속적인 대역폭으로 묶어 광대역을 확보(Data Rate 증가)하는 기술이다[8]. 5G-mmWave의 경우 다른 Band의 주파수를 묶는 것이 아닌 같은 Band에 존재하는 주파수 Block만 묶어 광대역을 확보하는 Intra-Band CA만 사용하고 있다. CA를 통해 묶여지는 주파수 Block을 Component Carrier(CC)로 불리게 되며, 실제 5G mm-Wave



[그림 20] 5G 통신 시뮬레이터 Signal Allocation

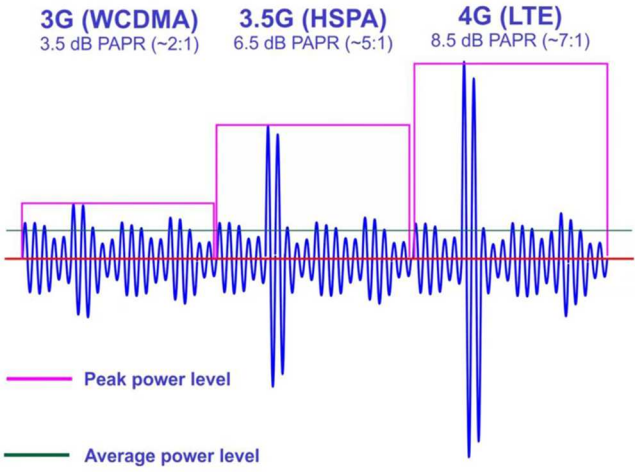
단말기에서 최대 지원할 수 있는 값인 8CC까지 CA가 가능하게끔 시뮬레이터에 구축하였다. 간략하게 설명하자면 실제 5G mm-Wave가 사용되는 n260 Band(37~40GHz)를 사전에 미리 여러 개로 쪼개서 각 CC별로 중심 주파수를 지정해 준 후 사용자가 시뮬레이터에 입력해준 CC값에 따라 각 CC별로 시뮬레이션이 돌아가게 된다. 예를 들어 시뮬레이터의 입력 변수인 CC값에 8을 넣어주게 되면 각각 중심 주파수가 다른 8개의 CC들이 독립적인 시뮬레이션을 진행하게 되고, 이를 마지막에 더해줌으로써 광대역 통신을 할 수 있게 된다. 통신이 사용하고자 하는 주파수가 점점 고주파수 대역으로 올라감에 따라 주파수 효율이 굉장히 중요하게 되었고, 이에 따라 실제 5G mm-Wave 통신에서도 TDD(Time Division Duplexing)이 아닌 FDD(Frequency Division Duplexing)으로 이루어지기 때문에 보다 쉽게 CA 기능을 시뮬레이터에 구현 가능하였다. 앞서 말한 과정은 5G mm-Wave가 활용하는 다른 대역인 n261 Band에서도 동일한 과정을 따르며, 이로써 Intra-Band CA에 대한 설명을 마치도록 하겠다.

해당 2장을 마치기 전에 마지막으로 명시하고 싶은 점은 해당 시뮬레이터는 기지국(Base Station 혹은 gNodeB)과 단말기(Mobile Phone)간 네트워크가 형성(Synchronization)된 시점 이후의 통신을 다룬다는 점이다. 실제 통신을 할 경우에는 해당 시뮬레이터에서 다룬 것처럼 바로 신호를 주고받지 않는다. 맨 초기에 기지국이 먼저 단말기 쪽으로 Beam Sweeping을 하게 되고 단말기는 가장 큰 세기로 받게 된 Beam을 쏜 기지국에게 자신의 위치 및 수신 전계 세기 등등에 대한 정보를 전달한다. 이렇게 망이 형성된 후에 단말기와 기지국은 Pilot과 같은 통신의 성능을 결정짓는 Control 정보가 실린 신호와 Data가 실린 신호를 서로 주고받게 된다. 해당 과정(Synchronization)의 경우 Matlab 기반의 코드로 구현하기까지 많은 시간이 필요로 하기에 기지국과 단말기 간의 망이 형성된 그 이후에 발생되는 통신 프로세스만 고려하였음을 밝힌다.

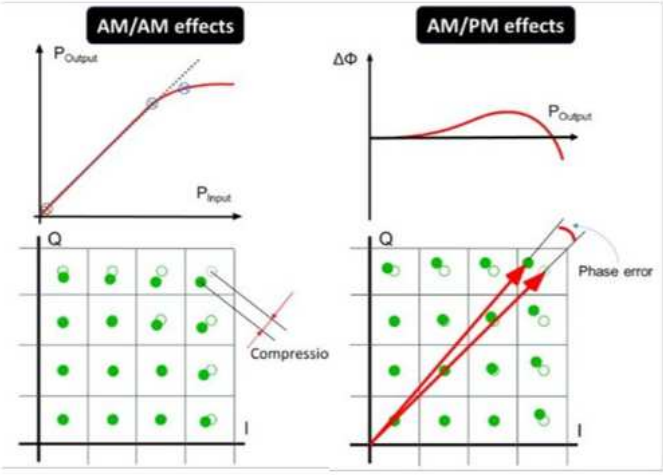
제 3 장 정적 환경 5G 통신 시스템 시뮬레이터

제 1 절 RF 소자의 비선형성 보상 알고리즘

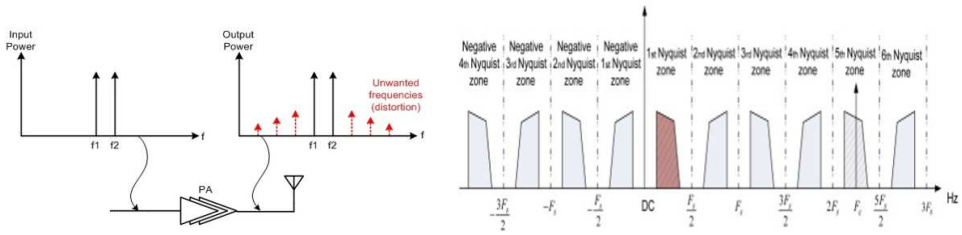
모바일 단말의 사용자 수의 증가와 전송하고자 하는 데이터 양의 급격한 증가로 인해, 전송 신호의 적절한 대역폭을 이용함과 동시에 데이터 전송 속도 향상의 필요성이 대두되었다. 그에 따라 대다수의 통신이 주파수 효율성을 고려한 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 같은 Multi-Carrier를 이용한 전송방식을 사용하여 사용자 간 상호간섭을 최소화하고 다중 경로 페이딩 채널 환경에 강인하게 구축이 되어있다. 그러나 높은 데이터 전송 속도를 달성하기 위한 QAM 변조 방식을 이용한 OFDM 시스템은 신호의 Envelope이 일정하지 않다는 단점이 존재한다. 그에 따라 그림 21과 같이 이전 세대에 사용했던 다중 차원 진폭 변조 방식의 경우보다 전송하고자 하는 신호의 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 크고, 신호의 왜곡을 최소화하기 위해서는 선형성이 증가된 PA를 사용해야 한다. 그림 22와 같이 AM-AM, AM-PM등의 비선형성적인 특성을 가지는 PA는 신호의 왜곡을 야기시키게 되고, 왜곡된 전송 신호는 그림 23의 경우와 같이 인접 대역 스펙트럼을 증가시키는 스펙트럼 재성장(Spectral Regrowth)현상[9]과 대역 내 신호 왜곡을 발생시킨다.



[그림 21] 전송 방식 별 PAPR 비교

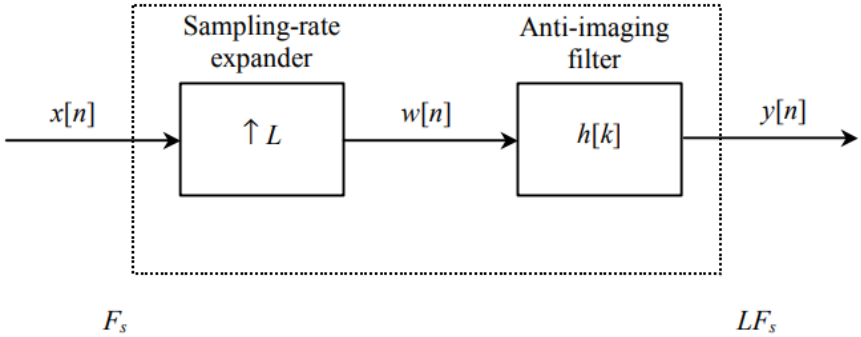


[그림 22] PA의AM-AM/AM-PM 특성

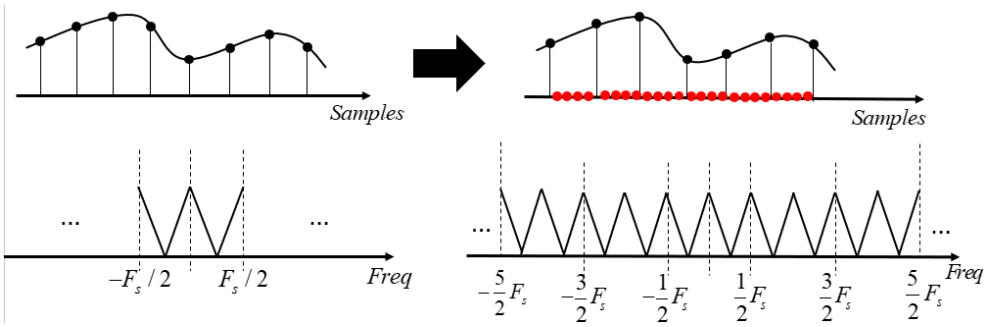


[그림 23] PA의 비선형성에 의해 발생하는 Spectral Regrowth

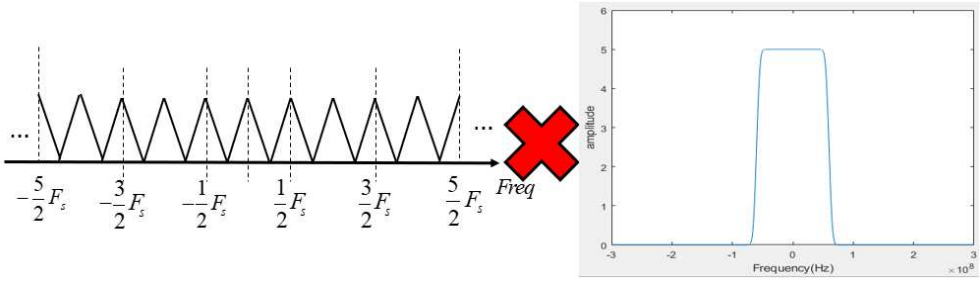
인접 대역의 간섭 성분이 증가할수록 ICI(Inter Channel Interference)가 증가하게 되고, 이는 대역 내 신호의 BER(Bit Error Rate) 열화 및 전송 신호의 EVM 성능 악화를 초래한다. 해당 절에서는 통신의 악영향을 끼치는 PA의 비선형성의 영향을 적절한 신호처리를 통해 보상하는 알고리즘을 소개한다. 해당 알고리즘은 기 개발 모델(QAMCOM)에서 제안하였으며, 본 논문에서는 직접 개발한 5G 통신 시뮬레이터에 해당 알고리즘을 적용하여 결과를 도출하였고, 시뮬레이터를 통해 확인한 알고리즘의 효과를 SystemVue라는 툴로 비교 검증하였다. 소개하고자 하는 알고리즘의 핵심은 PA 전 후 단계에 각각 Interpolation & Decimation 신호 처리를 해준다는 것이다. 여기서 Interpolation이란 그림 24처럼 Up-sampling 후 Anti-image Filtering을 해주는 것을 가리킨다. 그림 23처럼 PA의 비선형성에 의해 우리가 관측하고자 하는 대역(In-band)바깥쪽에 Out of Band Emission이 발생하게 되고, 이는 In-band 대역까지 Mirroring되어 In-band에 왜곡을 발생시키게 된다. 따라서 이를 해소하기 위해 PA 전 단계에 Interpolation을 통해 In-band 대역에만 신호가 존재하게끔 PA 입력 신호를 만들어준다[10].



[그림 24] Interpolation 정의 (Up-sampling & Anti-imaging Filter)

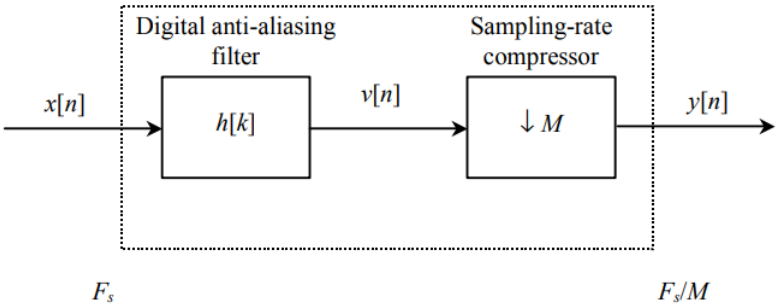


[그림 25] Up-sampling

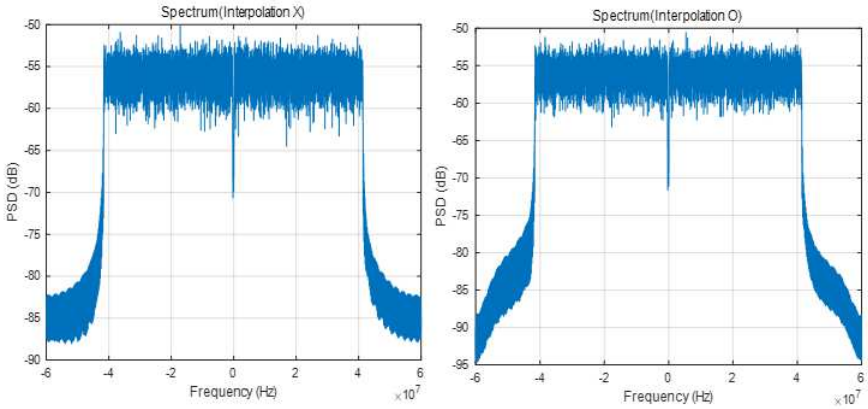


[그림 26] Anti-imaging Filtering

Interpolation을 통해 얻은 신호가 PA를 통과하게 되면 PA의 출력 신호에 Decimation을 취해준다. 이로써 PA로 인해 원하지 않는 대역에 발생된 Emission을 그림 26에 소개된 Anti-aliasing Filter를 통해 제거한 후, Interpolation의 Up-sampling을 통해 확장된 신호 대역폭을 Down-sampling주게 된다. 다음과 같은 알고리즘을 해당 시뮬레이터에 적용하여 ACPR(Adjacent Channel Power Ratio)과 MSE 관점에서 결과를 얻었고, 그림 28는 그 중 ACPR의 결과를 나타낸다. 모든 조건은 동일한 상태에서 PA를 통과하고 난 신호의 스펙트럼을 알고리즘을 적용하기 전과 후로 나눈 결과이며, 그림을 보게 되면 알고리즘을 적용함에 따라 시뮬레이션 소요 시간은 좀 걸리긴 했으나 ACPR 값이 약 5dB이상 차이나는 결과를 보이게 된다.(다른 채널에 영향을 주는 정도 감소)



[그림 27] Decimation 정의 (Anti-imaging Filter & Down-sampling)



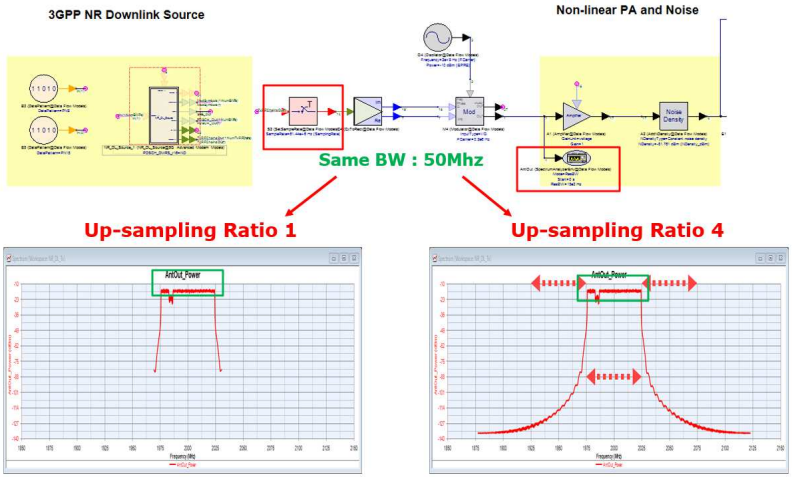
[그림 28] ACPR 비교 (좌측: 알고리즘 적용 X & 우측: 알고리즘 적용 O)

또 다른 하나의 파라미터인 MSE의 경우, PA의 비선형성을 나타내는 대표적인 지표 중 하나인 OIP3값을 바꿔가면서 시뮬레이션을 진행하였다. 원신호와 3차 왜곡 신호가 포화되지 않고 계속 증가한다는 가정하에 두 전력 점이 같아지는 지점의 출력 값을 뜻하는 PA의 OPI3는 그 값이 낮으면 낮을수록 해당 PA의 비선형성의 정도가 크다는 뜻이다. 본 논문에서는 PA의 비선형성의 크기에 따른 해당 알고리즘의 효과를 보기 위해 시뮬레이터의 입력 변수인 PA의 OIP3 값을 변수로 삼아 다음과 같은 결과를 도출하였다.

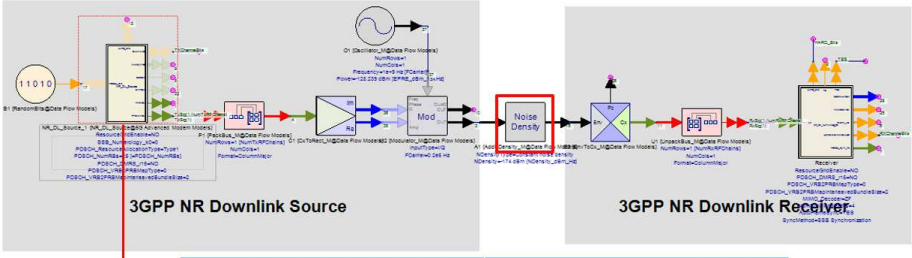
PA OIP3 [dBm]	MSE [dB]		Time [s]	
	Inter& Deci X	Inter& Deci O	Inter& Deci X	Inter& Deci O
40	−21.5	−21.6	2.56	2.73
35	−21.0	−22.0	2.52	2.88
30	−20.7	−21.4	2.53	2.84
25	−17.7	−20.5	2.6	2.82
20	−13.7	−15.6	2.5	2.84
15	−6.1	−6.4	2.47	2.81

[표 2] PA OIP3 값에 따른 MSE & 소요 시간 비교

표 2의 결과를 분석하자면 OIP3값에 따라 그 정도는 다르지만, 알고리즘을 사용하였을 때가 그렇지 않았을 때보다 MSE 관점에서 더 정확하게 계산한 것임을 확인할 수 있다. 물론 소요시간 또한 증가하지만 그 증가폭이 크지 않다는 점과 통신의 관점에서는 보낸 신호와 받은 신호 간의 차이를 나타내는 MSE가 더 핵심이라 점에 근거하여 이는 큰 고려사항이 되지 않을 거라 생각한다. 실제로 수행되는 통신의 경우 또한 앞서 말한 알고리즘의 신호처리를 하드웨어를 통해 수행하게 되고, 표 2의 결과를 통해 본 논문에서 소개한 5G 통신 시뮬레이터 또한 실제 수행되는 통신을 따르고 있음을 확인된다. 이에 대한 결과를 그림 29 & 30의 경우처럼 SystemVue를 통해 비교 진행하였으며 해당 상용 툴에서 보인 결과 또한 Interpolation의 Up-sampling의 정도에 따라 BER이 더 정확하게 나오는 것이 확인된다.



[그림 29] Up-sampling 값에 따른 신호 관측 대역 확보



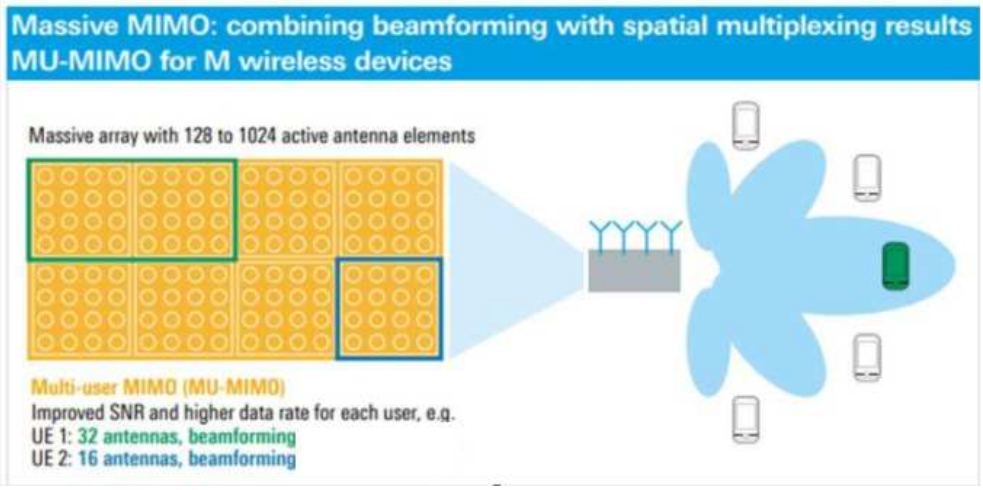
Up-sampling Ratio	BER
1	0.058
2	0.013
4	0.0007739
8 ~	0

Interpolation & Decimation O → Noise Tolerance ↑

[그림 30] SystemVue 결과와 비교검증

제 2 절 MIMO 통신 기술

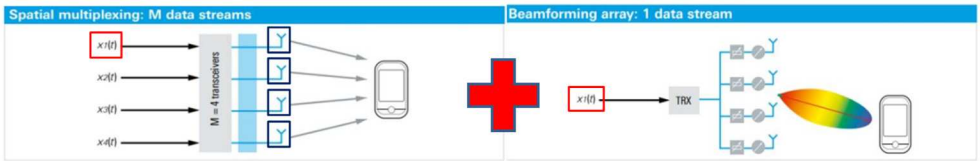
MIMO는 다중 입출력을 뜻하는 용어로써 송수신기에 여러 안테나를 사용해 통신 용량을 높이는 기술이다. 사용 가능한 주파수의 폭이 제한되고, 하나의 기지국이 다수의 사용자를 동시에 지원할 때 간섭이 생기는 등의 하나의 안테나만 사용할 경우(SISO)발생되는 문제점을 보완하고자 MIMO 기술이 등장하게 되었고 현재 대다수의 통신에서 사용이 되고 있다. 추가로 mm-Wave 대역은 짧은 파장으로 인해 안테나 간의 거리가 감소함에 따라 거대한 Array 안테나 효과를 기대할 수 있는 것처럼, 그림 31와 같은 Massive MIMO에 유리하다. MIMO 기술은 크게 Spatial Diversity, Spatial Multiplexing 그리고 Beamforming 측면에서 장점을 나타내게 되는데, Beamforming에 대한 자세한 설명은 다음 절에서 서술하고 해당 절에서는 Spatial Diversity와 Spatial Multiplexing에 중점을 두도록 하겠다. Spatial Diversity는 다수의 송신 안테나를 이용해 똑같은 정보를 여러 번 전송하여 오류 확률을 감소시키는 기술이고, Spatial Multiplexing는 다수의 송신 안테나를 통해 여러 개의 정보를 전송하여 전송속도를 향상시키는 기술이다. 그림 32은 그림 31에서 제시한 Massive MIMO의 내부 모식도를 나타낸 그림이다. Massive MIMO의 경우 앞서 말한 3개의 기술이 혼합된 것으로 다중 사용자를 동시에 지원하기 위해 MIMO를 확장한 형태이다.



[그림 31] Massive MIMO Overview

Massive MIMO를 이루는 여러 개의 Subarray는 각각의 사용자를 담당하게 되며 이때 각 사용자 별로 Downlink를 통해 기지국으로부터 받는 정보를 다를 것이므로 그림 32의 좌측 그림처럼 각각의 사용자를

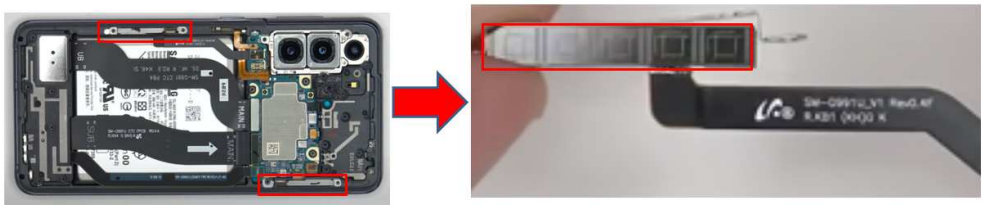
담당하는 Subarray 별로는 Spatial Multiplexing이 수행된다. 각 Subarray 내부에는 그림 32의 우측 그림과 같이 여러 개의 안테나가 존재하게 되고 이때 동일한 Subarray를 이루고 있는 안테나는 Beamforming이 수행됨과 동시에 신호 품질 성능을 위한 Spatial Diversity도 같이 수행된다. 해당 시뮬레이터는 해당 Subarray와 단말기 간의 통신을 고려하며, 이 때의 기지국과 단말기 안테나의 개수는 삼성전자 네트워크 사업부와 LSI 사업부에서 개발한 최신 모델의 구조를 반영하였다. 해당 송수신 안테나 개수는 시뮬레이터에 사용자가 임의로 입력 가능하며, 이를 통해 V2V(Vehicle to Vehicle), V2N(Vehicle to Network), V2I(Vehicle to Infra) 등등으로 확장이 가능하다.



[그림 32] Massive MIMO 내부 모식도

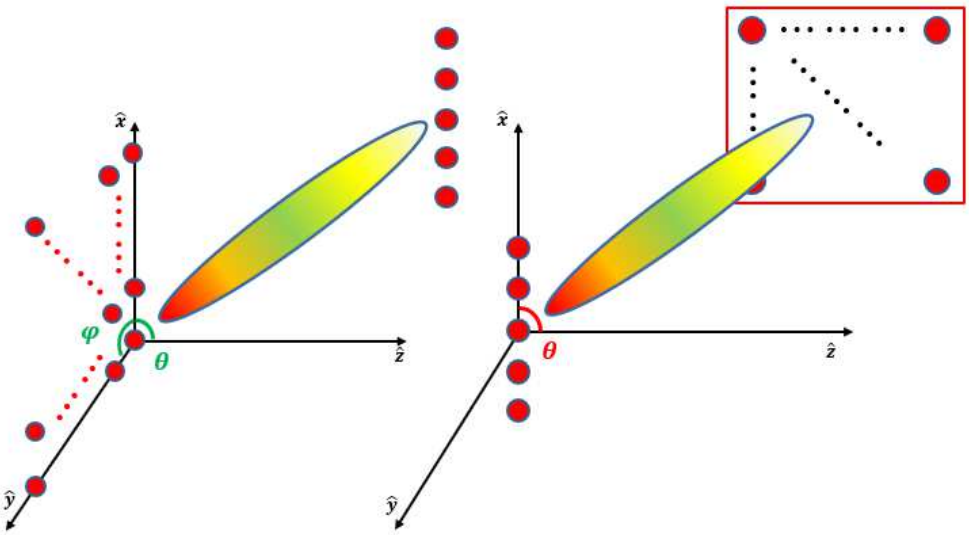
제 3 절 Beamforming

앞서 말한 3개의 MIMO 기술 중 하나인 Beamforming은 원하는 방향으로 전송 신호를 발생시켜 다른 단말의 간섭을 최소화하고 이득을 최대화하는 기술을 지칭한다. 앞서 서술했듯이 본격적인 통신이 이루어지기 전에 네트워크를 형성하는 Synchronization이 선행된다. 이 단계에서 기지국과 단말기는 서로의 위치를 서로 파악하게 되고 그 방향으로 빔을 형성해서 주고받게 된다. 따라서 해당 시뮬레이터에서는 r((Tx와 Rx간의 거리), **φ** (Azimuth Angle), **θ** (Elevation Angle)로 표현되는 기지국과 단말기의 위치를 서로 안다는 전제하에 구축을 하였다는 점을 다시한번 상기시키고자 한다. 기지국과 단말기는 실제 2가지 방향(Downlink & Uplink)으로 통신이 이루어진다. 그림 33처럼 5G mm-Wave를 지원하는 최신 단말기의 경우 안테나는 1D Array로 5개의 안테나로 이루어졌으며, 5G Small cell을 지원하는 기지국(gNodeB)의 경우 2D Array로 512개의 안테나로 이루어져 있다(삼성 네트워크 사업부 발표기준 2020년 말 출시 모델 구조 반영).

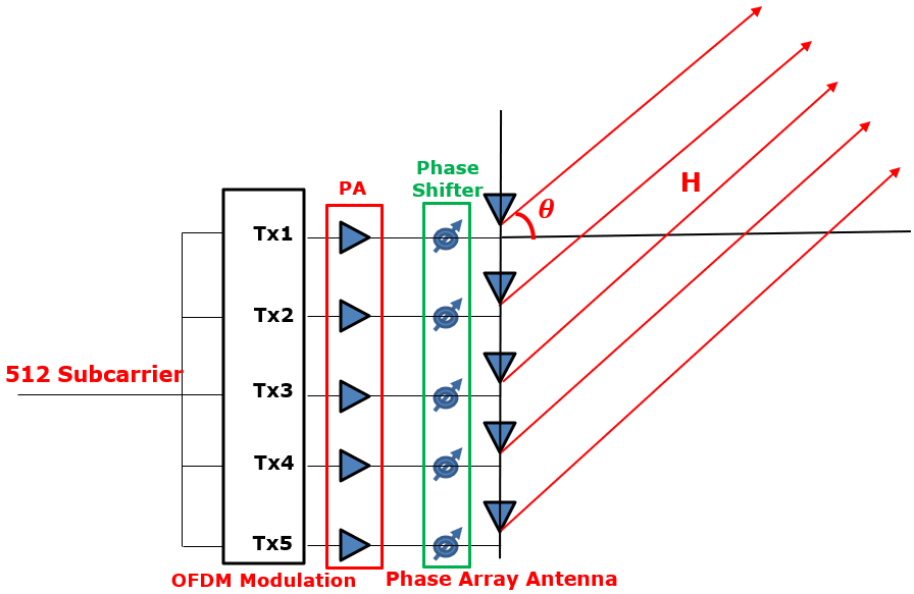


[그림 33] Galaxy S21 모델 안테나 구조

Downlink & Uplink를 모두 고려해주기 위해 해당 시뮬레이터에는 그림 34와 같은 1D Array Beamforming과 2D Array Beamforming을 모두 구축하였다. 송신기에서 Beamforming을 통해 특정방향으로 조향한 신호는 수신 안테나 별로 각각 다른 위상으로 받게 되고 이런 위상차를 모두 고려하여 동위상으로 맞춰준 후 수신기의 모든 안테나를 통해 받은 신호를 Combining을 해주게 된다. 설명의 편리성을 위해 Uplink를 예시로 들어 설명을 하자면 그림 35처럼 Uplink Beamforming을 위해 5개의 Phase Array 안테나를 활용하였다. 송신기에서 신호를 보내주는 Beamforming각도(송신기 기준 수신기가 있는 방향)가 **θ** 라고하면 각 송신 안테나 간의 위상차는 $\boldsymbol{\psi = kd\sin\theta}$ 로 해주었고, 안테나 간의 간격은 $\frac{\lambda}{2}$ 로 설정하였다. 2D Array의 Beamforming의 경우(Downlink)



[그림 34] Beamforming (좌측: Downlink & 우측: Uplink)



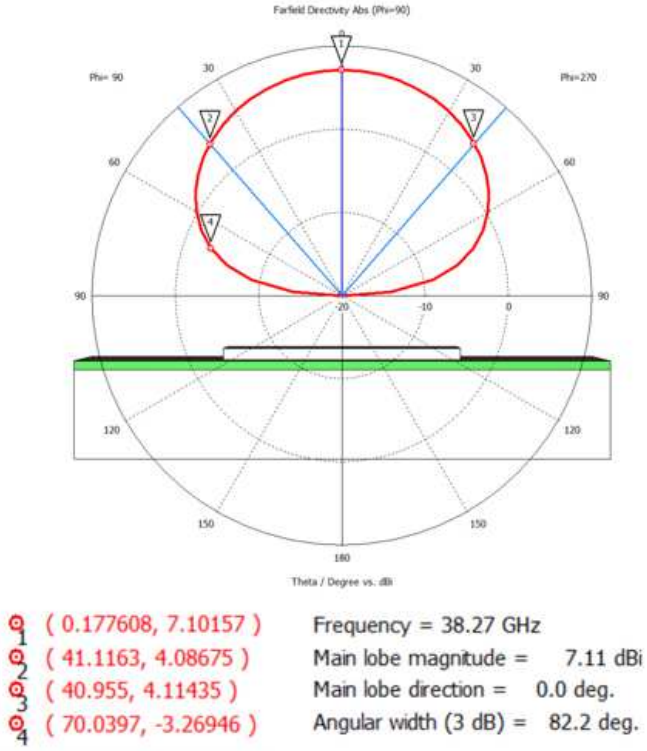
[그림 35] Beamforming 모식도(Uplink 기준)

Beamforming 각도가 φ, θ 가 되고, 송신안테나가 XY Plane에 존재하게 될 경우를 고려하여 다음과 같은 위상 차(x축: $\psi_x = kd_x \sin\theta\cos\varphi$ y축: $\psi_y = kd_y \sin\theta\sin\varphi$)로 설정하였다. 참고로 안테나 간의 간격은 $\frac{\lambda}{2}$ 로 Uplink의 경우와 동일하게 해주었다[11]. 실제 통신에서는 Beamforming 조향 각도에 따른 Beamforming 이득이 존재하게 된다. 다만 해당 시뮬레이터는 수천 혹은 수만 λ 를 대상으로 하는 Far-field이므로 해당

값을 반영하기 위해서는 Active Element Pattern만 고려해 주면 되었다.

$$\textbf{BeamformingGain} = \textbf{AEP(ActiveElementPattern)} \times \textbf{AF(ArrayFactor)} \quad (14)$$

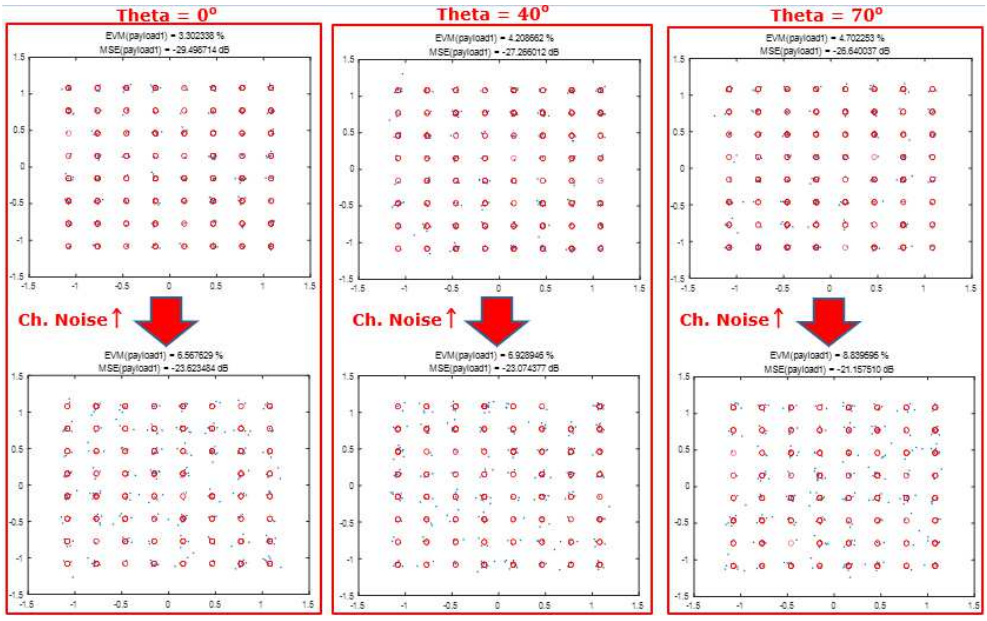
따라서 CST라는 상용 툴을 활용하여 핸드폰과 유사한 환경에서 Patch antenna 5개를 깔아 시뮬레이션을 진행했고 그 결과 Mutual Coupling이 없다 즉 각 Patch antenna의 Beam pattern은 서로 영향을 거의 주지 않음이 확인되었다. 해당 사실을 통해 실제로 단말기 안테나를 통해 5개의 빔을 동시 생성한 후 전송하는 것은 각각 독립적으로 5개의 빔이 각 안테나에 의해 생성 및 전파되는 것과 동일하다는 가정을 내렸고, 그림 36과같이 단일 Patch Antenna의 Beam pattern을 통해 Active element pattern을 구하였다. 이 때 송신기에서 조향 해준 각도가 **0°** 일경우가 Mainlobe였고 **40°** 에서는 **0°** 에 비해 3dB떨어지는 즉 power scale로는 0.5배의 신호의 세기가, **70°** 에서는 10dB 즉 Power scale로는 **0°** 에 비해 0.1배 세기만 전달되는 결과를 확인하였다.



[그림 36] CST를 통한 단일 패치 안테나 AEP(Active Element Pattern)

이를 통신 관점에서 해석하면 **0°** 일때보다 **40°** , **70°** 경우 점차적으로 Channel 상태가 더 안 좋다는 것으로 해석 가능하다. 해당 사실은 그림

37에 제시된 바와 같이 시뮬레이터의 결과로도 확인이 가능 했는데, 채널이 좋으면(**θ = 0°**)통신 성능이 좋고 채널이 안 좋은 즉 송신기가 **40°** 혹은 **70°** 방향으로 신호를 보낼 때는 정상적인 통신 성능을 만족하지 못하는 것을 해당 시뮬레이터에서 보여준다. 해당 그림의 첫째 줄이 AWGN이 양호한 크기를 가질 경우의 결과이며, 두번째 줄이 AWGN 성능이 악화되었을 경우의 결과이다. 다음과 같이 AWGN의 크기와 무관하게 Mainlobe를 가리킬 때(**0°** 로 조향) 통신성능이 제일 우수하며, Mainlobe방향과 벗어날수록 5G 통신 시뮬레이터에서의 통신 성능이 열화 된다는 사실을 통해, Antenna Pattern을 고려하여 Beamforming 각도에 따라 달라지는 통신 결과를 보였음을 확인할 수 있다.



[그림 37] AWGN 크기 및 Beamforming 각도(θ)에 따른 시뮬레이터 결과

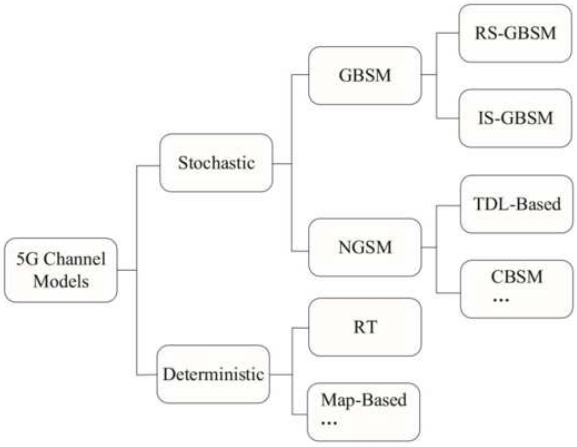
제 4 장 채널 모델링

제 1 절 AWNG 채널

통신에서의 채널이란 물리적인 뜻보다는 신호의 논리적인 또는 복합적인 통로를 의미하며, 실제 존재하는 채널에는 신호를 전달하는 과정에 방해, 제한을 가하는 요소들이 있으며 대표적으로 잡음, 감쇄, 왜곡, 간섭 등이 해당 요소에 해당된다. 시뮬레이터에서는 그 채널을 AWGN(Additive White Gaussian Noise), Deterministic, Statistical 채널로 총 3개를 고려하였다. 해당 절에서 서술하고자 하는 AWGN 이란 가장 일반적인 형태의 채널이며, 대부분의 통신시스템에서 나타나게 된다. 통신 시스템에서 열잡음이 신호에 영향을 주는 특성에 따라 이름 붙여진 잡음으로써 용어의 명칭대로 특별한 주변요소 없이 자연 상태 그대로의 랜덤 잡음이며 전 주파수 범위에서 Gaussian 분포를 띠며 고르게 존재하게 된다. 해당 채널의 경우 그림 13처럼 잡음이 곱하기 연산 과정 없이 단지 더해지는 형태를 취하게 된다. 5G 통신 시뮬레이터에서는 해당 채널을 Matlab 내장함수를 사용하여 구현하였으며, 이를 통해 채널을 통과한 신호에 백색 Gaussian 잡음을 추가하였다. AWGN 채널의 상태를 SNR로 표현하였으며, 예를 들어 SNR이 10dB가 될 경우 신호가 잡음에 비해 10배 큰 상황임을 할 수 있다. 시뮬레이터에 구현된 AWGN 채널의 경우 초기값은 30dB이며, 사용자가 이 값 또한 자유자재로 변경 가능하다.

제 2 절 Deterministic 채널

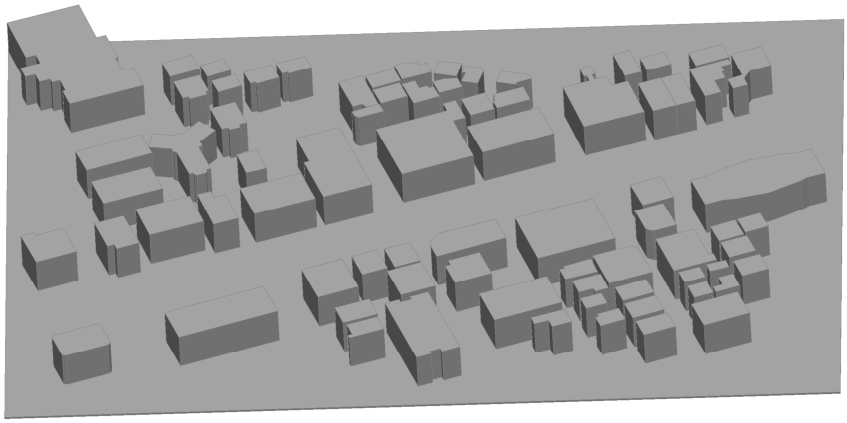
수많은 채널에 대한 연구가 이뤄짐에 따라 다양한 채널의 모델링이 수행된 시점에서 그림 38처럼 5G 채널 모델은 크게 2가지로 나뉠 수 있다.



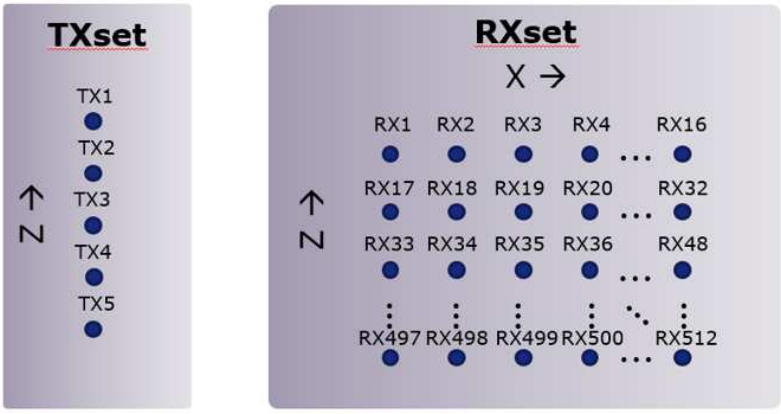
[그림 38] 5G 채널 모델 분류

하나는 수많은 실험 및 측정을 바탕으로 채널의 경향성을 통계적으로 모델링 하는 방법이 있고 다른 하나는 주어진 환경에서 이뤄질 수 있는 물리 현상을 해석한 것을 바탕으로 채널을 모사하는 방법이 존재한다. 후자의 방법이 전자의 방법보다 채널을 보다 정확하게 모델링 할 수 있다는 면에서는 장점을 가지지만, 그만큼 시간이 많이 든다는 단점이 존재한다. 각각의 장단점이 존재하는 채널 모델링 방법 중에서 해당 절에서는 Deterministic 채널모델에 대해 소개한다. Deterministic 채널의 경우 그림 38의 RT(Raytracing)에 해당하는 방법을 통해 모델링 하였으며, 해당 기법의 경우 Raytracing을 전문적으로 하는 서울대학교 다른 연구실의 도움을 받아 Raytracing 기법을 통해 채널 매트릭스를 생성하였다. 최대한 실제와 비슷하게 Raytracing 시뮬레이션 시나리오를 고안하였고, 이를 Raytracing 전문 연구실에 전달하여 채널 매트릭스를 얻은 과정은 다음과 같다. 그림 39처럼 실제 강남 한 대로를 CAD 파일로 Import하여 채널 매트릭스를 얻기 위한 Raytracing 시뮬레이션을 돌렸으며 해당 CAD 파일은 300(가로)*200(세로)[$\mathbf{m}^2$]로써 Small Cell 기지국 Coverage를 다음과 같이 선정하였다. 현재 고려하고자 하는 환경은 정적 환경이므로 송수신기는 그림 40과 같은 구조로 서로 고정된 상황을 고려하였으며 송수신기의 대상이 되는 단말기의 경우 지면을 기준으로 일반적인 사람의 키와 유사한 1.7m 떨어져 있다

설정하였고, 기지국은 지면을 기준으로 5m 떨어져서 위치하게끔 하였다.



[그림 39] Raytracing 환경 (CAD File)



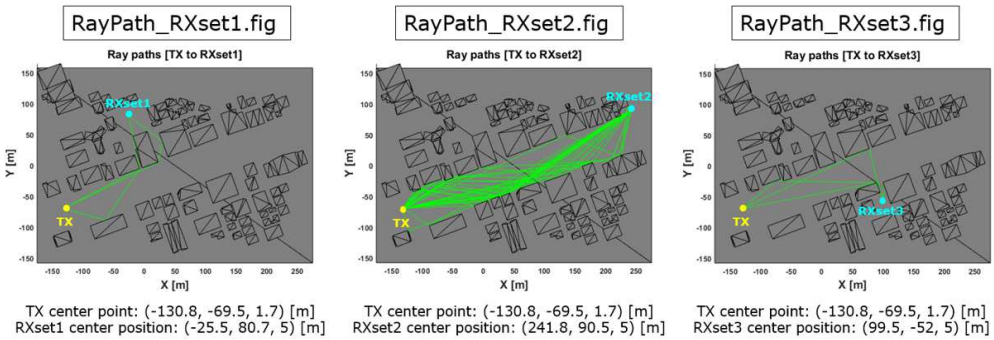
[그림 40] Raytracing 시뮬레이션 시나리오 하에서 Tx & Rx 구조

Raytracing 시뮬레이션을 통해 각 Subcarrier에 해당되는 채널 매트릭스(15)를 시뮬레이터에서 사용하는 Subcarrier 개수(512개)만큼 생성하였고, 이는 송수신 안테나 신호 간의 비율(Ratio)을 나타낸다.

$$\begin{array}{c} \\ \text{RX 1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{RX 512} \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} \text{TX1} & \cdots & \text{TX 5} \end{array} \\ \begin{pmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ c_{512,1} & \cdots & c_{512,5} \end{pmatrix} \end{array} \tag{15}$$

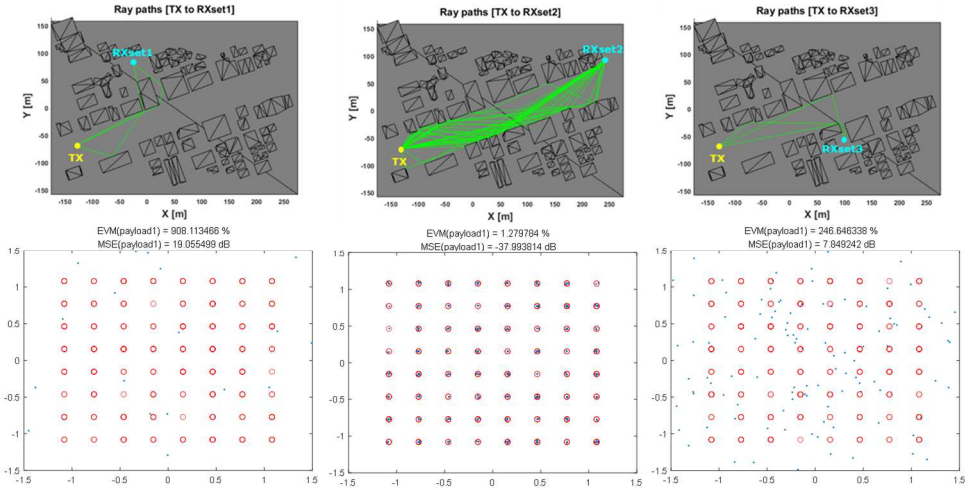
시뮬레이션상 각 수신 안테나가 받는 신호의 세기는 각 수신안테나 위치에 들어오는 Ray들의 E-field 값들을 모두 더한 값으로 표현하였다.

그림 41의 경우처럼 총 3개의 시나리오를 고려하였으며, 송신기 위치(노란색)는 고정시킨 상황에서 수신기 위치(하늘색)를 다르게 설정하여 Raytracing 시뮬레이션을 진행하였다.



[그림 41] Raytracing 시뮬레이션 시나리오

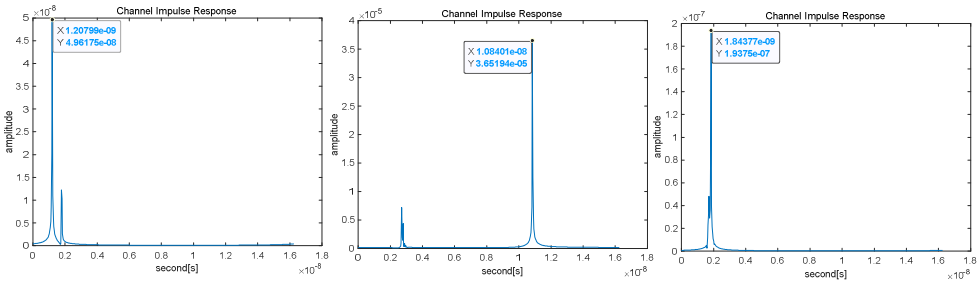
그림 41의 중간(2번째) 시나리오가 육안으로만 봐도 송수신기 사이의 Ray가 많은 것을 통해 채널이 좋은 상황임이 짐작 가능하다. 반대로 1,3번째 시나리오의 경우에는 송수신기 간 빌딩이 존재한다는 점과 둘 사이간의 Ray가 확연히 적다는 것을 통해 채널이 불안한 상황이라 짐작 가능하다. 앞서 단순히 육안으로만 예측했던 사항은 시뮬레이터로 검증이 가능했으며, 그림 42에서 제시된 것처럼 채널이 좋지 않은 1,3번째의 시나리오 하에서는 시뮬레이터의 RF Component인 PA, LNA, Mixer의 비선형성의 영향을 많이 받아 정상적인 통신이 안되지만 2번째는 잘되는 것이 확인된다.



[그림 42] Raytracing 시나리오 구분에 따른 통신 성능 비교

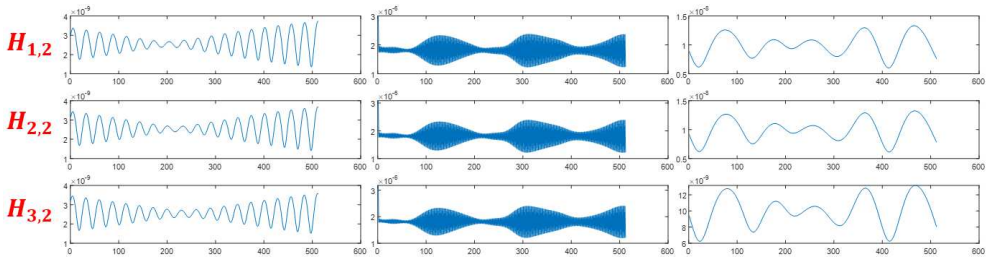
그림 42에서 제시한 결과의 타당성 검증을 위해 각 시나리오 별로 발생한 CIR(Time Domain 관점)과 채널 Response(Frequency Domain 관점)에 대한 분석을 진행하였다. 먼저 CIR을 통해 각각의 시나리오에

대한 채널 상태를 파악할 수 있었다. 그림 43에서 제시한 CIR 플롯 결과를 보게되면 2번째 시나리오가 그렇지 않은 경우(1,3번째 시나리오)에 비해 CIR 값이 컸음이 확인 되었다. 이는 그림 43에서 예시로 든 $\mathbf{h_{1,2}}$ (2번째 송신안테나와 1번째 수신안테나 사이 발생되는 CIR)이외의 모든 CIR 성분을 비교하였을때에도 동일한 경향을 보였으며 송신기에서 보낸 신호의 세기 대비 수신단에서 받는 신호의 세기를 나타내는 CIR의 크기가 크다는 것은 해당 채널의 상태가 양호하다는 것을 나타내기 때문에 CIR로도 시뮬레이터의 결과를 납득할 수 있었다.



[그림 43] Raytracing 시나리오 별 CIR 비교(좌측부터 1→ 2 →3번째 시나리오)

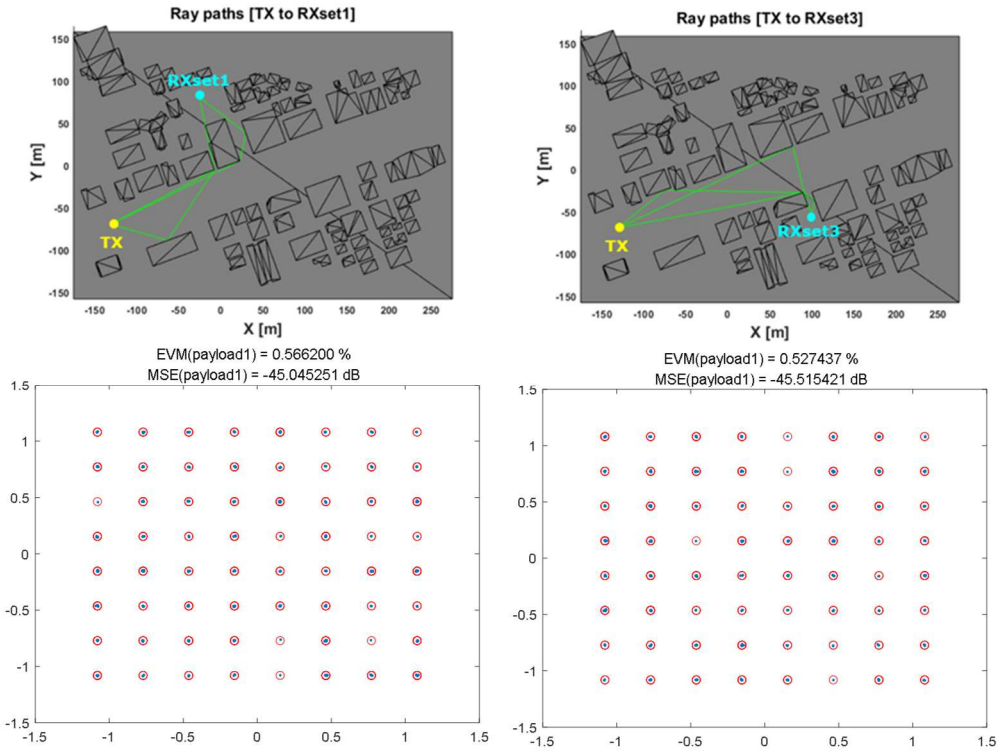
마지막으로 고정된 송신안테나와 서로 근접한 위치에 있는 수신안테나들 사이에 생성되는 채널 Response를 구하였다. Phase Array 안테나 파트에서 서술했듯이 Rx 안테나(512개)간 간격은 $\frac{\lambda}{2}$이 되고 이는 수천 혹은 수만 λ에 해당되는 송수신기 간의 거리에 비교하면 매우 작은 값이다. 이런 상황에 비추어 볼 때 $\mathbf{H_{1,2}}$, $\mathbf{H_{2,2}}$, $\mathbf{H_{3,2}}$ (2번째 송신안테나와 1&2&3번째 수신안테나간 발생되는 채널 Response)는 큰 차이 없이 매우 작은 위상 차만 존재하는 것이 이론적으로 타당해 보인다. 채널을 실제로 통과하는 신호는 Time Domain이기 때문에 Time Domain에서의 위상 차이은 Frequency Domain에서의 Delay로 보이게 되고, 이는 그림 44의 각 시나리오 별로 얻은 채널 매트릭스 플롯 결과로 확인이 가능하다.



[그림 44] Raytracing 시나리오 별 채널 Response 비교
(좌측부터 1→ 2 →3 번째 시나리오)

마지막으로 Raytracing 기법의 경우 비교 검증이 가능한 상용툴(Winprop)이 존재하여 Raytracing을 전문으로 하는 연구실의 도움을 받아 상용툴과의 비교 또한 진행하였는데, 결론만 서술하면 RMSPE(Root Mean Suqare Percentage Error)관점에서 98%이상의 정확도로를 가진 결과가 나왔다는 사실을 서술하며 검증을 마치도록 하겠다.

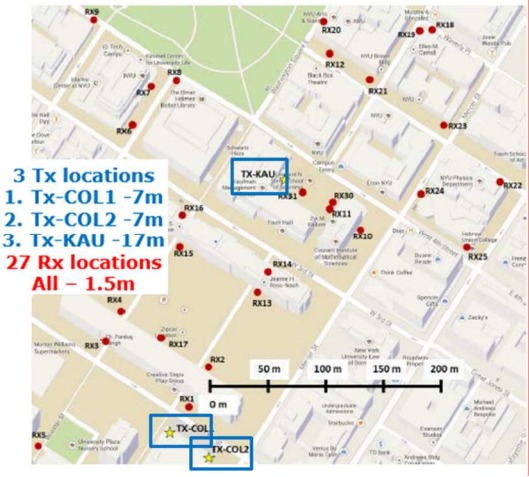
추가로 그림 42의 경우(RF 소자의 비선형성 존재 가정)가 아닌 만일의 상황을 고려해보았다. 쉽게 말해서 시뮬레이터의 RF소자의 비선형성을 유발하는 파라미터(Noise Figure, OIP3, P1...등등)를 전혀 고려하지않는 이상적인 상황 하에서 시뮬레이션을 진행하였고 그 결과 깨끗한 결과가 나왔다는 사실을 통해 1,3번째시나리오 하에서는 실제 통신이 이루어지기 힘들다는 결과를 도출할 수 있었다. 1,3번째 시나리오에서 가정한 환경은 실제 존재하는 non-standalone지역 (5G만으로 통신이 불가능한 지역)으로 대응해서 해석 가능하며, 해당 절에서는 Raytracing을 통해 얻은 채널을 활용하여 송수신기 위치에 의해 변화되는 채널의 상태에 따라 다양한 통신 성능이 나오는 것을 확인 할 수 있었다.



[그림 45] 이상적인 상황(RF 소자 비선형성 OFF)의 경우 통신 성능 비교

제 3 절 Statistical 채널

해당 절에서는 Statistical(Stochastic)채널모델에 대해 소개한다. 해당 시뮬레이터에서는 Statistical 채널 모델을 고려해주기 위해 NYU에서 개발한 채널 시뮬레이터를 활용 및 변형하였다. NYU(New York University) 그룹은 본 논문에서 제안한 통신 시뮬레이터의 동작 주파수인 mm-Wave대역뿐만 아니라 6G의 주파수 대역인 sub Terahertz 대역에 걸쳐 Urban Micro-cell(UMi), Macro-cell(UMa)과 Rural Macro-cell(RMa) 그리고 실내 환경에서 수많은 측정을 진행하여 그 결과 총 1TB 이상의 데이터를 수집하였다. NYU 그룹에서는 측정 결과의 일반성을 확보하고자 NYU 교내를 포함한 다양한 장소에서 측정을 진행하였으며, 실측 결과를 통해 PDP(Power Delay Profile) 혹은 CIR을 뽑아냈다[12]. 여러 측정 시나리오 중 하나만 예시를 들어 설명하자면 그림 46의 좌측 그림은 UMi에서 측정한 경우를 나타낸다. 해당 그림의 파란색 Box가 송신기라고 할 때 송신기는 지면 기준으로 7m 혹은 17m가 떨어져 있는 상황이고 빨간색 점이 각각의 수신기의 위치를 나타낸다. 이 수신기는 모두 지면 기준으로 1.5m 떨어져 있다. 우측 그림은 좌측 그림과 같은 측정 환경에서 송신기가 2번째 위치(COL2)에 있을 때 각각의 수신기에 대응되는 여러가지 파라미터 값을 보여준다. 해당되는 파라미터로는 수신기의 경도(Longitude) & 위도(Latitude), 송수신기 간의 환경(LOS or NLOS), 송수신기 사이의 거리, Path Loss(Received Power)등이 포함된다. 측정 결과 표를 보면 PL(Path Loss)열의 '-'로 기입되어 있는 항이 존재하게 되는데, 이는 해당 송수신기 순서쌍의 경우 수신되는 신호가 없다는 뜻이다. 표 3의 Box 부분이 측정 결과를 정리한 값이며 송신기가 해당 위치(COL2)에 있을 때, 수신기가 31~425m 떨어져서 수신을 한다고 하더라도 200m 이상 떨어진 경우에는 PDP가 측정되지 않은 것이 확인된다. 이외에도 그림 46의 좌측과 같은 시나리오 하에서 측정을 진행했을 경우 얻게 되는 종합적인 결과(송신기가 다른 경우) 또한 표 3을 통해 확인이 가능하다. 이렇게 측정을 통해 얻은 데이터를 기반으로 해당 그룹은 그림 47처럼 1TB의 대용량 CIR에 대한 값을 가지고 있다고 서술한다[13].

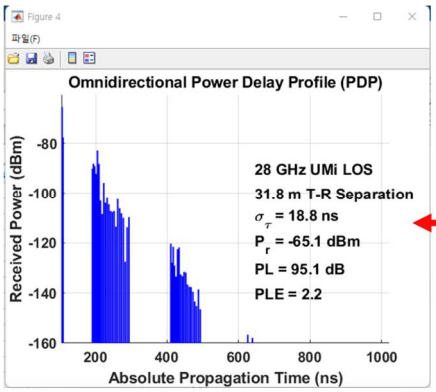


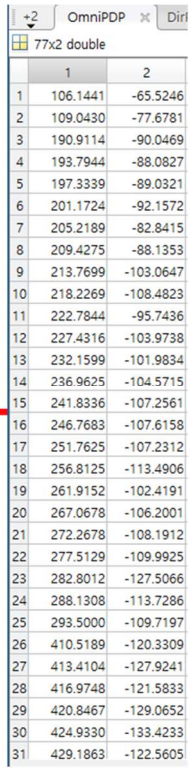
TX	RX	Lat (°)	Long (°)	Env.	3D T-R (m)	PL (dB)
COL2	1	40.7273222	-73.9973000	L	53	100.8
COL2	2	40.7275417	-73.9970833	N	73	121.4
COL2	3	40.7279056	-73.9980556	N	142	119
COL2	4	40.7280750	-73.9980167	N	155	141.4
COL2	5	40.7269861	-73.9988417	N	151	124.9
COL2	6	40.7295000	-73.9978889	N	299	-
COL2	7	40.7298361	-73.9976167	N	332	-
COL2	8	40.7297444	-73.9971278	N	318	-
COL2	9	40.7303444	-73.9983000	N	399	-
COL2	10	40.7286694	-73.9955139	N	237	-
COL2	11	40.7287806	-73.9957667	N	237	-
COL2	12	40.7300500	-73.9957083	N	370	-
COL2	13	40.7281139	-73.9966750	N	141	124.8
COL2	14	40.7283472	-73.9964389	N	171	144.5
COL2	15	40.7285139	-73.9973250	N	183	-
COL2	16	40.7287500	-73.9973000	N	209	-
COL2	17	40.7278333	-73.9975000	N	112	142.2
COL2	18	40.7301222	-73.9945389	N	418	-
COL2	19	40.7302361	-73.9948806	N	415	-
COL2	20	40.7302833	-73.9958972	N	390	-
COL2	21	40.7299306	-73.9954500	N	365	-
COL2	22	40.7290528	-73.9940278	N	351	-
COL2	23	40.7295556	-73.9946806	N	358	-
COL2	24	40.7289722	-73.9948361	N	298	-
COL2	25	40.7285361	-73.9943917	N	290	-

[그림 46] NYU 교내 측정 결과 예시

28 GHz Manhattan Measurements (RX: 1.5 m) (TX/RX Antenna Az. HPBW: 10.9°)		
TX Location (Abbr.) [height]	**Environment**	**# of Locations with Signal**
Coles Sports Center 1 (COL1) [7 m]	LOS	**2** (31 m $\leq d \leq$ 102 m)
	NLOS	**6** (61 m $\leq d \leq$ 162 m)
Coles Sports Center 2 (COL2) [7 m]	LOS	**1** (d = 51 m)
	NLOS	**7** (74 m $\leq d \leq$ 169 m)
Kaufman (KAU) [17 m]	LOS	**3** (33 m $\leq d \leq$ 54 m)
	NLOS	**7** (77 m $\leq d \leq$ 187 m)

[표 3] NYU 교내 측정 종합 결과

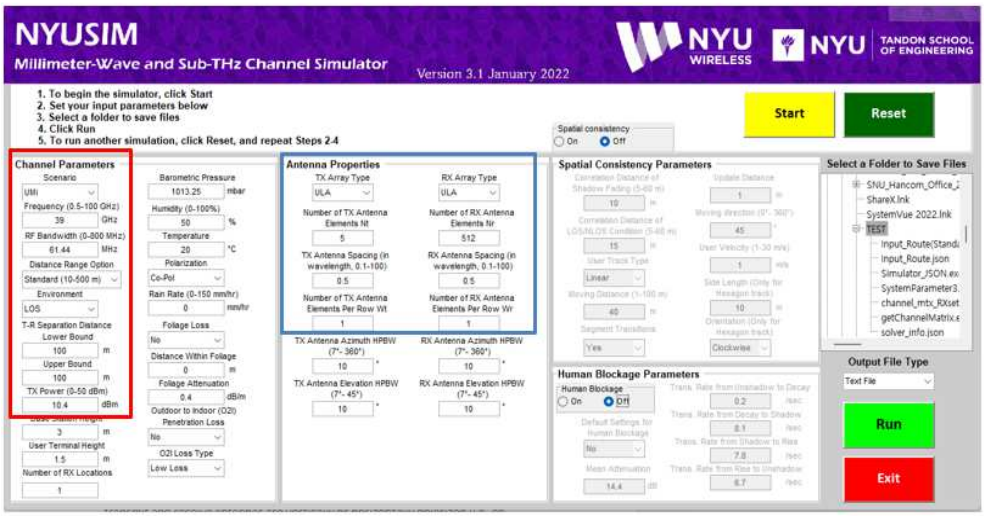




	1	2
1	106.1441	-65.5246
2	109.0430	-77.6781
3	190.9114	-90.0469
4	193.7944	-88.0827
5	197.3339	-89.0321
6	201.1724	-92.1572
7	205.2189	-82.8415
8	209.4275	-88.1353
9	213.7699	-103.0647
10	218.2269	-108.4823
11	222.7844	-95.7436
12	227.4316	-103.9738
13	232.1599	-101.9834
14	236.9625	-104.5715
15	241.8336	-107.2561
16	246.7683	-107.6158
17	251.7625	-107.2312
18	256.8125	-113.4906
19	261.9152	-102.4191
20	267.0678	-106.2001
21	272.2678	-108.1912
22	277.5129	-109.9925
23	282.8012	-127.5066
24	288.1308	-113.7286
25	293.5000	-109.7197
26	410.5189	-120.3309
27	413.4104	-127.9241
28	416.9748	-121.5833
29	420.8467	-129.0652
30	424.9330	-133.4233
31	429.1863	-122.5605

[그림 47] NYU 채널 시뮬레이터의 CIR 결과 값

NYU 채널 시뮬레이터는 앞서 말한 과정을 통해 얻은 측정 데이터를 기반으로 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행한다. 그림 48처럼 총 49개의 입력 파라미터를 갖는 GUI에 사용자가 임의의 값을 넣으면 그 조건에 맞는 CIR 샘플을 통계학적으로 예측하여 생성한다.

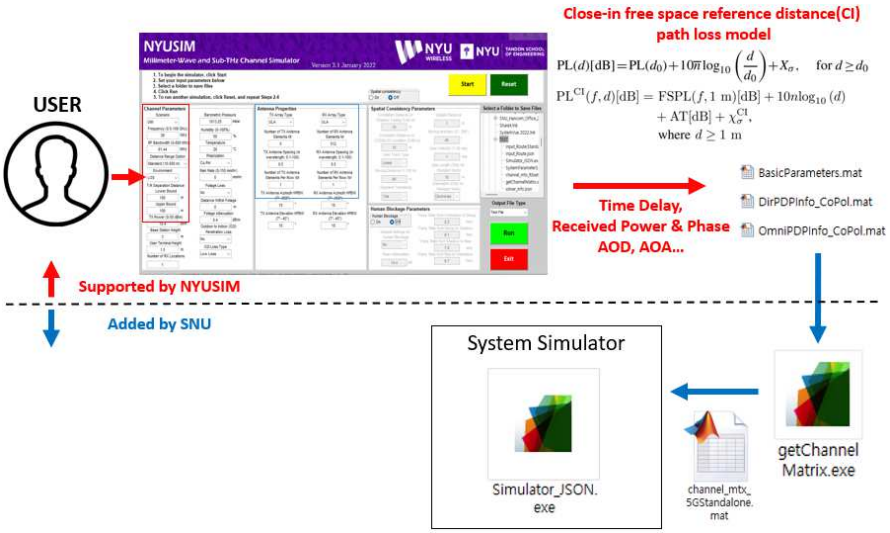


[그림 48] NYU 채널 시뮬레이터 GUI

NYU 채널 시뮬레이터의 결과(CIR)에는 각 분해 가능한 MPC(Multi-Path Component)들의 주요 파라미터가 포함되어 있다. 이를 통해 각 OFDM Subcarrier에 해당하는 MIMO 채널 계수(채널 Response의 Component)를 생성할 수 있다. 만약 ULA(Uniform Linear Arrays)가 송수신기 모두에 사용된다고 가정하면 채널 계수는 (16)의 식을 통해 계산 가능하다.

$$h_{m,k}(f) = \sum_{p} \alpha_{m,k,p} e^{j\phi_{m,k,p}} e^{-j2\pi f \tau_{m,k,p}} e^{-j2\pi d_T m \sin(\varphi_{m,k,p})} e^{-j2\pi d_R k \sin(\vartheta_{m,k,p})} \tag{16}$$

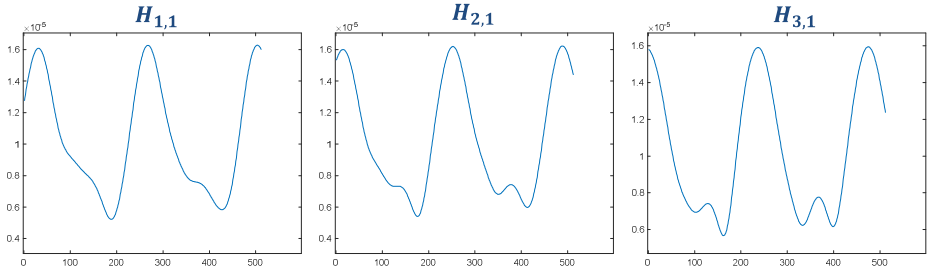
$\mathbf{h_{m,k}(f)}$는 해당되는 Subcarrier(f)에 대한 m번째 송신 안테나와 k번째 수신 안테나 사이의 MIMO 채널 계수를 나타내고, p는 해당 송수신기 순서쌍 간에 발생한 분해 가능한 MPC, α는 채널 이득의 진폭, ϕ는 위상을 나타낸다. 추가로 τ는 각 MPC의 전파 시간 지연, $\mathbf{d_T}$ 및 $\mathbf{d_R}$은 각각 송신기 및 수신기에서의 안테나 간격, φ 및 ϑ는 각각 Azimuth AOD 및 AOA를 나타낸다. 따라서 필자는 NYU 채널 시뮬레이터를 통해 얻은 CIR을 채널 매트릭스(채널 Response)로 변형해줌으로써 NYU 채널 시뮬레이터와 본 논문에서 제안한 5G 통신 시뮬레이터와의 인터페이스 융합을 완료하였다[14].



[그림 49] Interface 융합
(NYU Channel Simulator + 5G Communication Simulator)

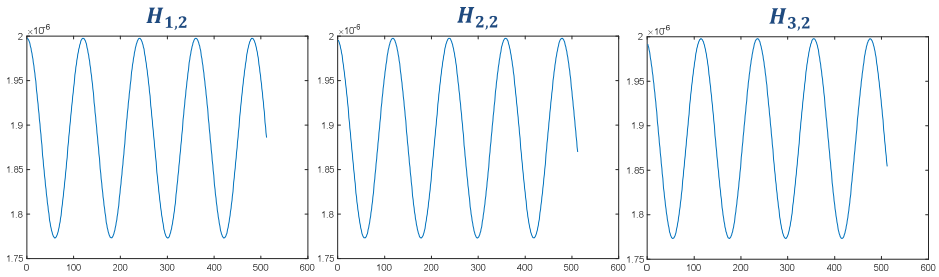
다음은 NYU 채널 시뮬레이터를 활용 및 변형하여 얻은 채널 Response의 타당성을 검증하는 부분이다. 앞서 서술했듯이 이 경우에도 수신 안테나(512개)간 간격은 $\frac{\lambda}{2}$이 되고 이는 수천 혹은 수만 λ에 해당되는 송수신기 간 거리에 비교하면 매우 작은 값이다. 이런 상황에서 시나리오 별로 얻은 채널 매트릭스 플롯 결과는 다음과 같다.

< Scenario : UMI & Environment : LOS & Distance : 100m >



[그림 50] NYU 채널 시뮬레이터의 채널 Response Plot (도심지)

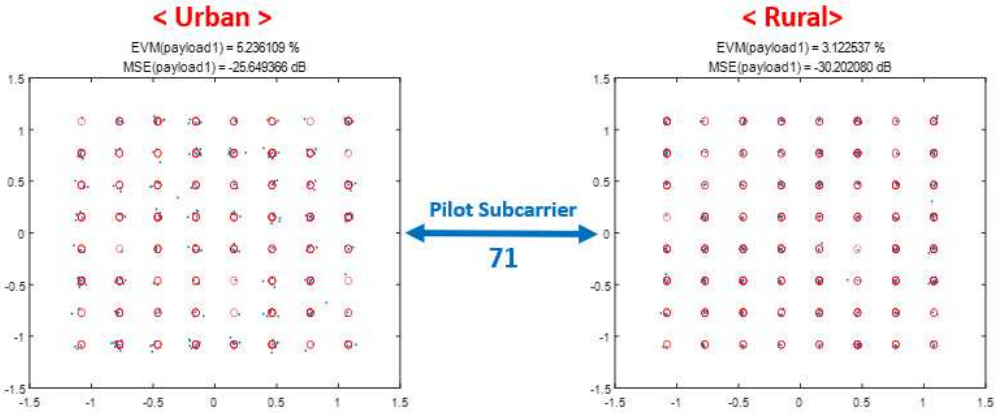
< Scenario : InH & Environment : NLOS & Distance : 50m >



[그림 51] NYU 채널 시뮬레이터의 채널 Response Plot (실내)

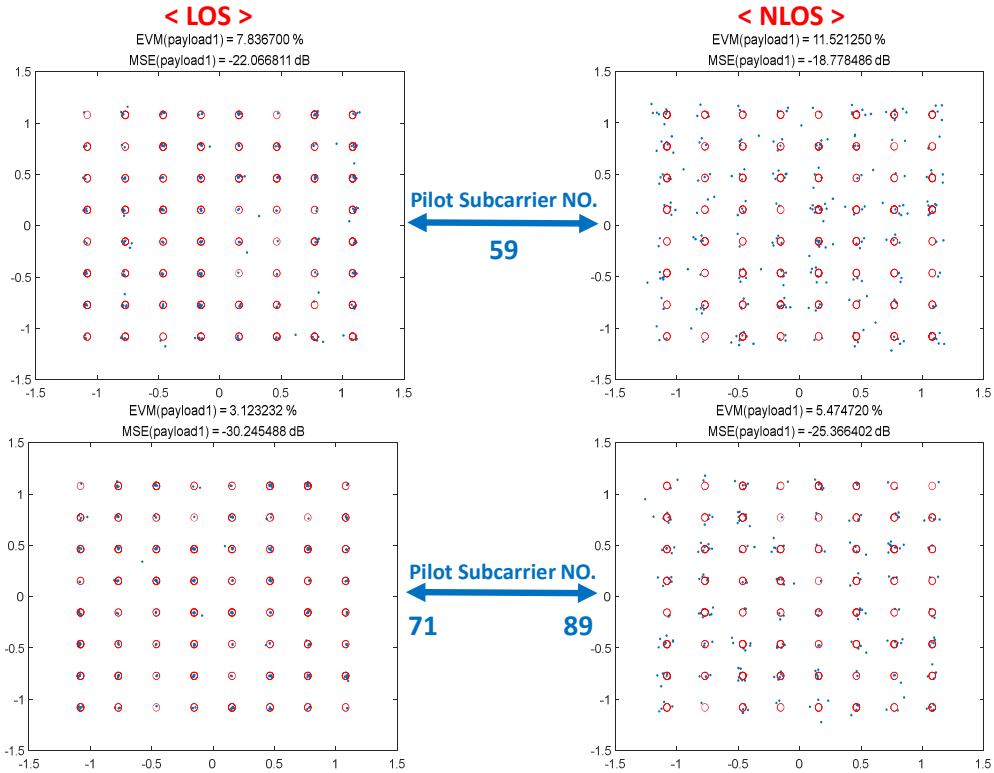
그림 50&51에서 보인 결과가 앞서 p35의 그림 44를 분석하면서 서술한 이론적인 내용에 부합된다는 점에 근거하여 해당 방법을 통해 얻은 채널 또한 타당하다고 볼 수 있다. 이 사실을 통해 본 프로그램을 사용하게 될 사용자는 NYU 채널 시뮬레이터를 활용하여 그림 50 & 51의 예시로 제시한 도심 &LOS, 실내 &NLOS 환경 이외에도 자신이 원하는 상황에서 실제 존재하는 채널을 쉽게 생성할 수 있다.

지금까지 Statistical 한 채널을 모델링 하기 위해 활용한 소프트웨어와 해당 자원을 변형하여 Statistical 한 채널을 생성한 과정, 그리고 그 결과 얻은 채널의 타당성 검증을 하였으니 이제부턴 해당 절의 핵심이라고 할 수 있는 5G 통신 시뮬레이터를 통해 얻은 다양한 시나리오 하에서의 통신 성능을 보이도록 하겠다. 이와 동시에 독자는 p16의 2.5절 Channel Estimation하는 부분에서 서술하였던 내용인 5G NR 표준(EVM)을 준수함과 동시에 Data Rate를 최대한 확보할 수 있는 Pilot 최적 개수 또한 확인이 가능하다. Pilot subcarrier개수와 CP의 길이는 채널의 상태에 의해 결정이 되고, 좋으면 좋을수록(Time Domain 관점으로는 CIR의 Dominant한 개수가 적을 수록, Frequency Domain 관점으로는 Frequency Flat에 가까울 수록) 최대한 데이터를 효율적으로 보낼 수 있게 된다. 채널의 상태를 결정짓는 요소는 크게 4가지로 나뉘게 되고 해당 요소는 시나리오 Type(Urban, Rural, 실내 등등), Environment(LOS, NLOS), 송신 전력, 그리고 송수신기간의 거리를 가리킨다. 해당 절에서는 다른 조건은 모두 동일하다고 설정한 후 이 4가지 요소를 주요 변수로 선정하여 다양한 채널 하에서의 통신 성능을 제시한다. 먼저 시나리오 Type이 독립 변수인 경우 5G 통신 시뮬레이터의 결과이다.



[그림 52] 통신 성능 비교 (독립변수: 시나리오 Type)

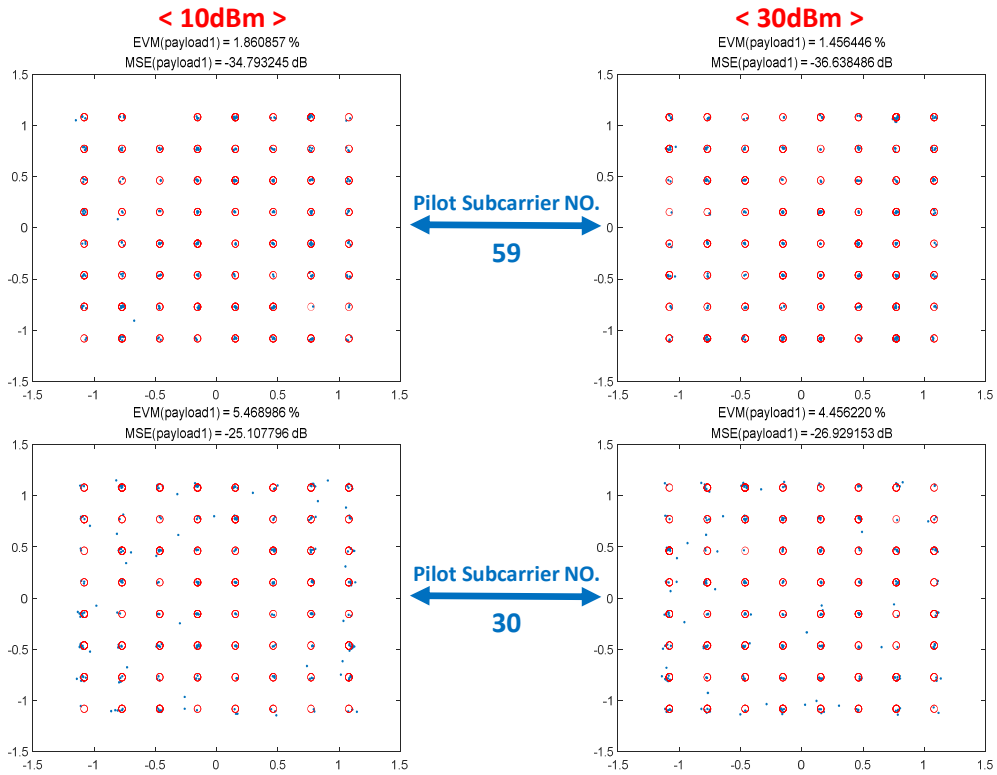
그림 52에 나타나 있듯이 다른 조건이 동일하다고 할 때, 동일한 Pilot Subcarrier의 개수를 사용하게 될 경우, 주변환경이 더 나은(Clutter 개수 적음) 시골(Rural)이 도심(Urban)보다 더 통신이 잘 되는 것이 확인된다. Data Rate 관점에서만 보면 더 적은 Subcarrier를 사용하는 것이 더 좋지만, 그렇게 되면 5G NR 표준을 맞추지 못하게 된다.



[그림 53] 통신 성능 비교 (독립변수: Environment)

다음은 두 번째 독립변수로 Environment(LOS, NLOS)인 경우이다.
독립변수를 제외한 모든 조건을 동일하게 설정하여 시뮬레이션을 진행한 결과 얻은 그림 53의 경우, 좌측이 LOS, 우측이 NLOS가 된다. 해당 그림의 첫번째 줄처럼 동일한 Pilot 개수를 사용하였을 경우, 아무래도 채널이 더 우수한 LOS의 경우가 그렇지 않은 NLOS인 경우보다 더 통신 성능이 좋았으며, EVM의 성능을 5G NR에서 정한 기준(표 1참고)으로 보게 될 경우 해당 기준을 달성하는데 필요한 Pilot Subcarrier 개수 또한 차이를 보였다.

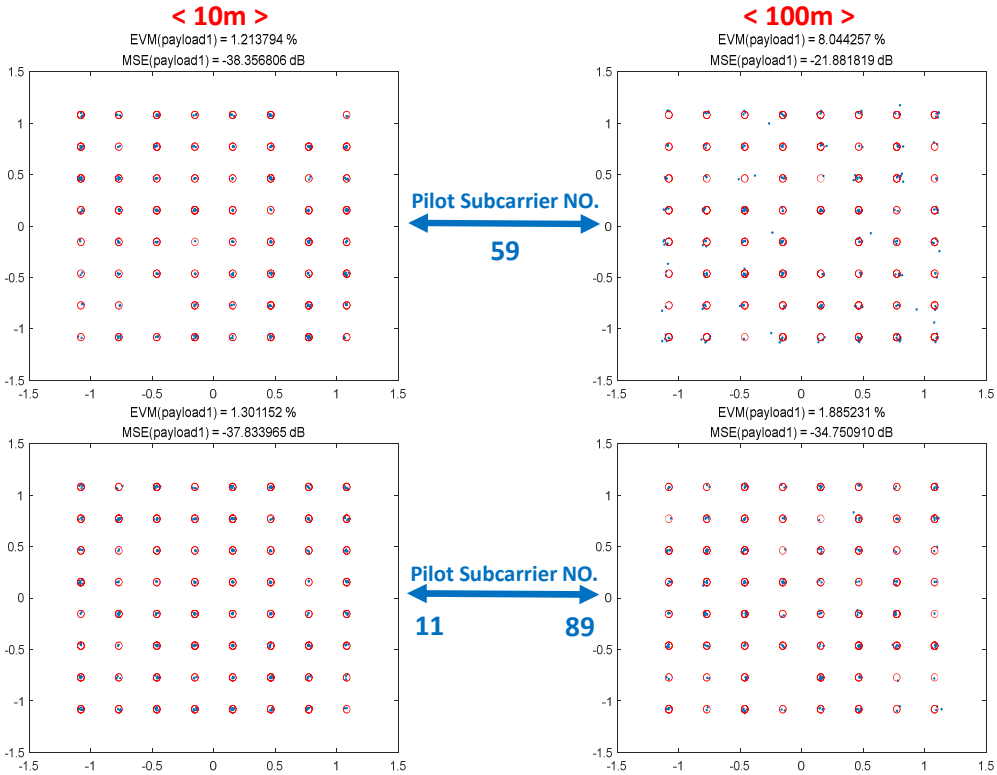
다음은 3번째 독립변수인 Tx Power 세기의 결과이다.



[그림 54] 통신 성능 비교 (Tx Power 세기)

그림 54는 Pilot Subcarrier개수를 포함한 모든 조건은 동일하고, 송신안테나에서 보내준 신호의 세기만 다르게 해줬을 경우의 결과이다. 좌측은 4.2절에서 제시한 Raytracing기법을 통해 채널 매트릭스를 얻었을 때의 송신 전력 세기(10dBm)를 사용하였고, 우측은 실제 상용화된 5G mm-Wave 단말기의 송신 전력과 최대한 유사한 값을 선정하였다. 보다 강한 전력을 사용하여 신호를 송신한다는 의미는 송신신호가 수신단으로 전달되면서 발생되는 잡음에 더 강인하다는 의미이므로 이 또한 채널이 더 양호하다는 의미가 된다. 따라서 그림 54에서처럼 동일한 Pilot Subcarrier를 사용해주어 통신 성능을 비교하게 될 경우 송신 전력의 세기가 더 클 때 더 우수한 통신 성능 결과가 나오는 것이 확인된다.

다음은 마지막 독립변수인 송수신기 간의 거리가 채널에 미치는 영향을 보여주는 결과이다.



[그림 55] 통신 성능 비교 (Tx-Rx간의 거리)

그림 55의 결과를 얻기 위해서 송수신기가 서로 가까운 경우(10m)와 보다 더 먼 경우(100m)를 비교하였다. 아무래도 송수신기 사이의 거리가 가깝게 될 경우 그렇지 않은 경우에 비해 일반적으로 Path Loss의 크기는 더 작게 되고, 신호가 전파하면서 겪게 되는 Clutter 개수 또한 작게 된다. 이는 거리가 멀면 멀수록 채널을 통과하면서 발생하는 왜곡 즉 송신 신호와 수신 신호 간의 크기 및 위상의 차이가 크다는 것이고, 이는 채널의 상태가 좋지 않다는 뜻이다. 그림 55에서 보인 시뮬레이터의 결과가 이를 뒷받침한다.

해당 파트를 마무리 하기전에 마지막으로 종합하자면 시나리오(채널)에 따라 해당 채널 하에서 통신이 가능하기위해 필요한 조건(CP의 길이, Pilot 개수, 송신 전력 세기, 통신이 가능한 송수신기 간의 거리 등등)이 다르게 된다. 본 프로그램을 사용하는 사용자는 시뮬레이터를 통해 얻은 통신 성능 결과를 보고 둘 간의 Trade-off 관계를 고려하여 타당한 값을 설정하는 것이 중요하다는 점을 다시 한번 상기시키고자 한다.

제 5 장 동적 환경 5G 통신 시뮬레이터

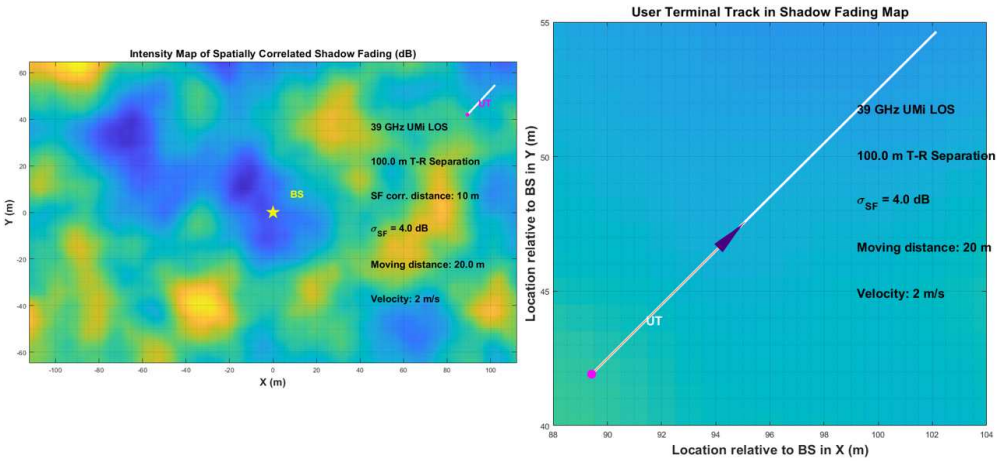
제 1 절 동적 환경 고유 파라미터 분석 및 정의

지금까지 정적환경 즉 송수신기가 서로 정지 되어있는 상황에서의 통신을 다루었다면, 해당 파트에서는 사용자가 움직이면서 통신을 하는 경우를 고려하도록 하겠다. 기지국은 실제로도 가로등에 붙어있거나 송신탑과 같이 크고 높게 고정된 위치에 설치 되어있으므로 본 논문에서 동적 상황이라 함은, 주변 환경이 움직이는 경우까지는 고려하지 않은 사용자(단말기)가 움직이는 경우로만 한정하였다. 그럼에도 정적환경 시뮬레이터를 개발하였을 때는 굳이 고려하지 않아도 되었던 동적 고유 파라미터가 존재한다. 이는 동적환경 시뮬레이터 파트에서 핵심적인 역할을 하여 해당 절에서는 이 파라미터들에 대한 설명을 하고자 한다.

Correlation Distance	Update Distance	Moving Distance	Moving Velocity	Moving Direction
10 m	2 m	20 m	2 m/s	**45°**

[표 4] 동적 환경 고유 파라미터

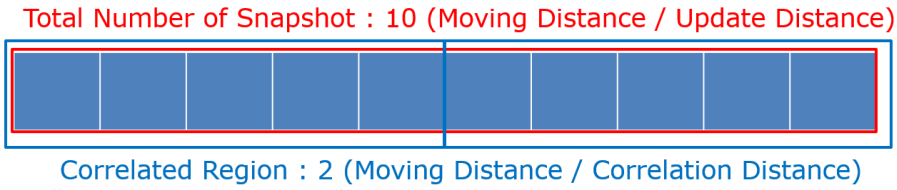
표 4에 제시된 5개의 파라미터는 동적환경 채널의 주요 파라미터를 나타낸다. 그 중 3개가 움직이는 사용자와 관련한 파라미터이고 각각 기지국과 통신을 하고 있는 사용자가 통신 중에 움직인 거리, 사용자의 속도, 사용자가 기지국을 기준으로 어떤 방향으로 가고 있는지를 나타낸다. 이 3가지 파라미터를 표 4에 기입한 수치를 반영하여 그림으로 표현하면 그림 56와 같다. 좌측 그림의 정중앙에 기지국(노란색 별)이 있다고 가정하고 사용자(단말기)를 뜻하는 UT(User Terminal)의 동선은 흰색 선(사용자가 움직인 거리와 동일)으로 표시된다. 우측 그림은 좌측 그림의 사용자 부분만 확대해서 표현한 것으로 기지국을 기준으로 **45°** 방향으로 멀어지고 있는 것이 확인된다. 해당 파트에서는 앞서 다루었던 정적환경이 아닌 그림 56과 같은 상황에서의 통신 성능을 고려한다.



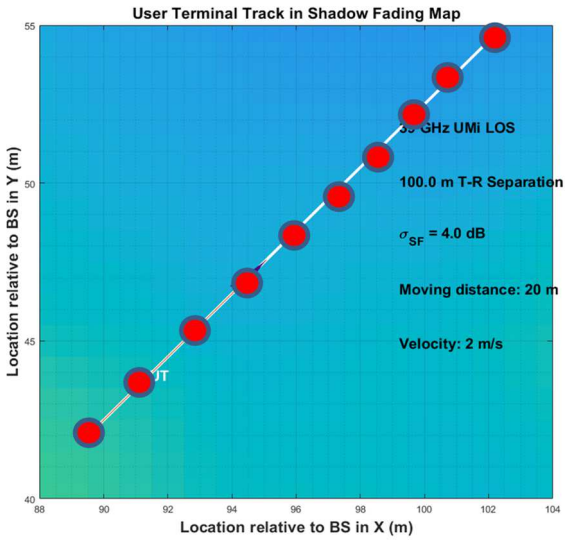
[그림 56] 동적 환경 시나리오 Graphical Plot

남은 2개 중 하나를 가리키는 Update Distance라는 파라미터는 MPC의 Small-scale parameter(전파 지연 시간, 수신 신호 세기 등등)가 갱신되는 주기를 나타낸다. 여기서 MPC의 Small-scale parameter이라함은 CIR을 의미하기 때문에 CIR이 말 그대로 Update되는 주기라고 생각하면 된다. 마지막으로 Correlation Distance라는 것은 Update Distance에 의해 주기적으로 갱신되고 Update되는 CIR들 간의 관계 간 상관관계가 유지되는 구간을 가리킨다. 사용자가 움직이면서 서로 다른 CIR을 꾸준히 생성하다가 CIR들간의 상관관계가 깨지면 즉 독립적인 CIR이 생성되게 되는 그 시점부터 사용자는 새로운 Correlation Distance 구간에 속하게 되는 것이다[15]. 따라서 Update Distance는 어떤 경우에도 Correlation Distance보다 클 수 없으며 추가로 동적인 경우를 고려해주기 위해 Snapshot이라는 개념을 도입하고자 한다. 동적환경 통신은 수많은 정적환경 통신의 연속적 나열로 해석할 수 있다. 이런 해석에 비추어 보게 되면 '순간적으로 사진을 찍는다'는 Snapshot의 용어 그 자체의 의미대로 Snapshot은 그 순간순간 발생되는 정적환경의 통신에 대응되며, 이렇게 되면 동적환경 통신은 수많은 Snapshot으로 이루어진 한 묶음이라고 볼 수 있다. 두 개의 파라미터 또한 표 4에 기입한 수치를 반영하여 그림으로 표현하면 그림 57 & 58와 같다. 사용자가 움직인 거리와 Update Distance 간의 비를 전체 Snapshot의 개수라고 할 때, 표4와 같이 Setting된 동적 환경의 경우 총 10개의 Snapshot이 발생하고 Snapshot간의 간격은 2m가 되어 그림 58의 빨간색 원과 같이 표현할 수 있게 된다. 추가로 사용자가 움직인 거리와 Correlation Distance 간의 비를 Correlated Region이라고 하게 되면 사용자가 기지국으로부터 **45°** 방향으로 움직이는 첫 10m가 첫번째 Correlated Region이 되고, 그 후에

추가로 움직인 10m가 두번째 Correlated Region이 되게 된다. 즉 종합해서 말하면 표 4에 의해 생성된 동적 채널의 경우 Snapshot의 주기이자 Update Distance에 따라 서로 다른 CIR이 10개 생성되고, 여기서 사용자가 기지국과 통신을 시작하면서 발생된 첫 5개의 CIR은 서로 연관성을 갖지만 그 후 발생된 CIR 5개는 이전의 CIR과는 전혀 무관한 독립적인 CIR을 생성되게 된다. 쉽게 말해서 정적인 경우에는 채널이 1개만 존재했다면 표 4의 동적 상황과 같은 경우에는 통신이 시작하고 끝나기까지 총 10개의 채널이 생성이 되고 2개의 전혀 다른 채널이 존재하게 된다.



[그림 57] 동적 환경 시나리오 세분화



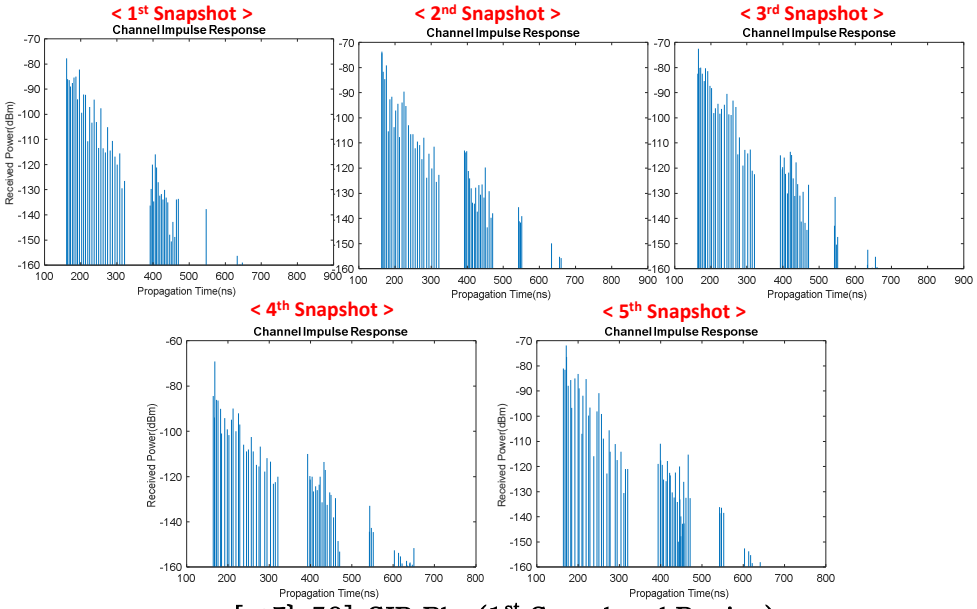
[그림 58] 정적 환경의 나열로 표현한 동적 환경 시나리오

지금까지 개념 위주로 동적 환경에서 채널이 어떻게 생성되고 존재하는지 설명을 했다면 해당 정의에 입각한 분석을 통해 이해를 돕고자 한다. 먼저 여기서 분석의 대상은 Time Domain에서의 채널 성분이라고 할 수 있는 CIR이 된다. 좀 더 쉽게 설명하기 위해 기존의 동적 환경이 아닌 표 5에 의해 생성된 동적환경을 새롭게 고려하고자 한다.

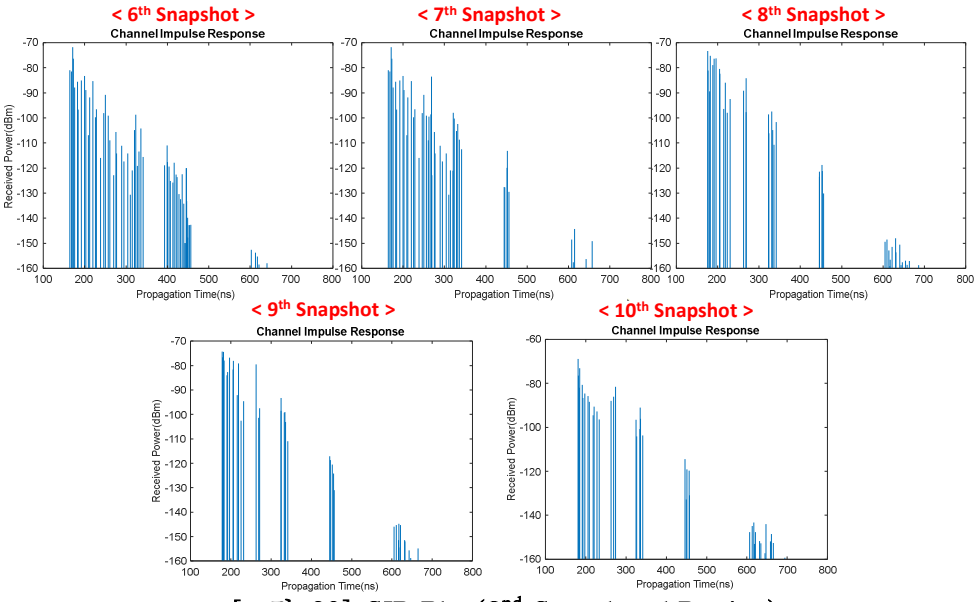
Correlation Distance	Update Distance	Moving Distance	Moving Velocity	Moving Direction
5 m	1 m	10 m	1 m/s	**45°**

[표 5] 동적 환경 고유 파라미터

다음과 같은 동적 환경에서 존재하는 CIR은 정의에 따르면 매 1m마다 생성되며 사용자가 이동한 총 10m 중 1~5m에서 생성된 5개의 CIR과 6~10m에서 생성된 5개의 CIR은 서로 독립적인 관계를 띠게 된다[15]. 이는 CIR 플롯 결과를 통해 확인 가능하며 각각 그림 59 & 60은 각각 첫번째와 두번째 Correlated Region에 존재하는 CIR을 나타낸다.



[그림 59] CIR Plot(1st Correlated Region)



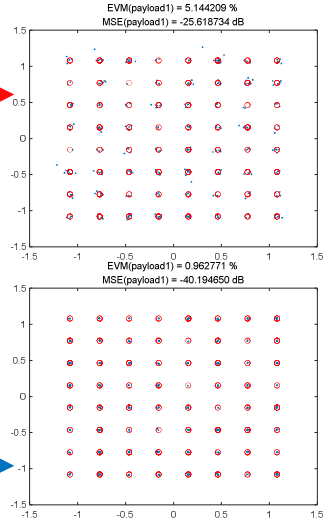
[그림 60] CIR Plot(2nd Correlated Region)

각각 동일한 그림(Correlated Region)에 존재하는 CIR들간에는 유사점이 보이나 서로 다른 그림 간에 존재하는 CIR들을 자세히 살펴보면 차이점이 눈에 띄게 여럿 보일 것이라 판단된다.

제 2 절 결과 및 분석

동적 환경에서 생성되는 채널에 대한 소개를 끝냈으니 해당 절에서는 동적 채널을 5G 통신 시뮬레이터에 넣어서 얻은 결과를 제시한 후 그에 맞는 분석을 하도록 하겠다. 참고로 해당 절에서 예시로 삼은 5G 통신 시뮬레이터에 넣어준 동적 채널은 표 4의 내용을 따른다.

Snapshot No.	EVM [%]	MSE [dB]
#1	5.16	-25.61
#2	4.82	-26.56
#3	5.2	-25.64
#4	5.46	-24.98
#5	4.8	-26.51
#6	1	-39.71
#7	0.7	-42.69
#8	0.96	-40.16
#9	0.82	-41.78
#10	0.96	-40.19



[그림 61] 동적 환경 5G 통신 시뮬레이터 결과

앞서 서술한대로 시뮬레이션 결과에서도 2개의 Correlated Region이 생겼고, EVM과 MSE 관점으로 볼 때 빨간색 Box로 표시한 1번째 Correlated Region에 존재하는 채널보다 파란색 Box로 표시한 2번째 Correlated Region에 존재하는 채널의 상태가 더 안정되었음이 확인된다. 따라서 그림 61의 결과를 통해 제한적인 동적상황이긴 하지만 동적 환경 통신 시뮬레이터를 성공적으로 구축하였다고 정리할 수 있다. 하지만 여기서 해당 절을 마무리하게 되면 현실 상황과의 긴밀성을 확보하지 못하였다는 측면에서 부족하다고 판단 할 수 있다. 실제 동적 환경 하에서 통신을 할 때, CIR을 Update하고 상호간 Correlation이 있다고 규정짓는 기준은 본 논문에서 제시했던 거리가 아닌 시간이 된다. 하지만 기존의 기준 대상이었던 거리를 사용자의 속력으로 나눠 주게 되면 시간으로 기준을 변경 가능하기 때문에 이 또한 큰 문제가 되지 않는다. 기지국과 단말기 주변의 상황이 매우 빠르게 변하고 사용자의 속도 또한 사용자의 상황에 따라 달라지기 때문에 실제 단말기는 기지국과 통신을 할 때, 채널의 정보를 주기적으로 보고하는 CSI-Report과정을 거치게 된다. 4G 기준 이 시간은 4ms가 되고, 현재까지도

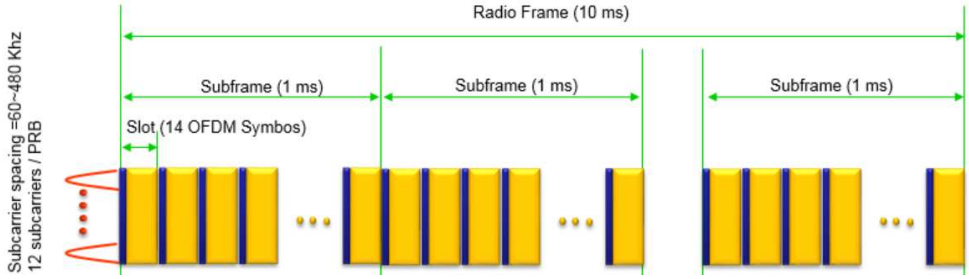
5G mm-Wave 대역을 활용하는 대다수 통신이 채널에 대한 정보를 주고받는 등의 역할을 하는 control channel은 4G망의 도움을 받는 non-standalone 방식으로 진행되기 때문에 5G-mmWave의 경우 또한 동일한 주기를 갖는다고 할 수 있다. CSI-Report라 함은 기지국(gNodeB or BS)과 단말기 사이의 무선네트워크 망이 형성(Synchronization)되고 난 후에 수행된다. 단말기는 기지국에서 보낸 Beam을 수신하고 얻은 RSRP(Reference Signals Received Power) & RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 바탕으로 CQI (Channel Quality Indicator)를 만들어 기지국에 보내준다. 단말기에서 강전계를 받으면 CQI의 높은 인덱스를 대응시켜 보내주고 약전계를 받으면 CQI의 낮은 인덱스를 대응시켜 보내주는 방식이다. CSI-Report의 정보로는 CQI 뿐만 아니라 PMI(Precoding Matrix Indicator), RI(Rank Indicator)등이 포함되며 기지국은 이 정보를 가지고 단말기에게 Scheduling(MCS 차수 조정, Resource Block 개수 조정)을 해주게 된다. 실제 통신에서 중요한 역할을 하는 CSI-Report를 본 논문에서 제안한 통신 시뮬레이터에 대응시켜보게 되면 해당 신호는 채널의 정보를 Estimation하는 용도로 사용하는 Pilot 신호와는 다른 개념이 되고, 그렇다면 CSI-Report 주기는 Correlation Time과 유사하게 해석이 가능하다. 여기서 말하는 Correlation Time 이란 Correlation Distance를 사용자의 속도로 나눠 줌으로써 얻게 되는 값(Correlation Time = Correlation Distance/User Velocity)이고, 통신을 진행하는 도중 기존에 존재하던 채널과 무관한 채널이 나오게 될 경우 기지국에서 단말기로 알려준다고 생각하면 이해가 간편하다.

통신 시뮬레이터의 입력변수인 Subcarrier 주파수 간격을 본 시뮬레이터에서의 디폴트 값인 120kHz에 맞춰 해석해보면 OFDM Symbol 1개의 주기는 표 6과 같이 되고 CP를 추가하게 되면 약 0.01ms가 된다. 그럼 OFDM Symbol의 전반적인 구조를 나타내는 그림 62에서 제시한 1개의 Subframe내부에는 약 100개의 OFDM Symbol이 들어있게 되고, 이는 그림 17의 경우를 나타낸다. 1개의 Subframe의 주기가 1ms 라는 말은 4개의 Subframe 마다 주기적으로 CSI-Report를 보내주게 된다는 뜻이다. 따라서 이에 맞춰 Correlation Distance와 사용자의 속도 값을 넣어 동적 상황을 만들어주면 실제 상황과 유사한 동적 환경의 채널을 생성할 수 있게 된다.

OFDM Symbol Duration

Parameter / Numerlogy (u)	0	1	2	3	4
Subcarrier Spacing (Khz)	15	30	60	120	240
OFDM Symbol Duration (us)	66.67	33.33	16.67	8.33	4.17

[표 6] OFDM Symbol 주기

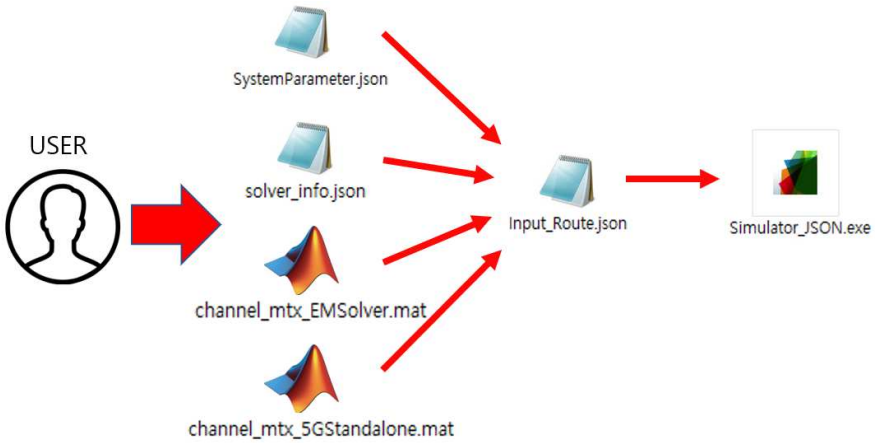


[그림 62] OFDM Symbol 구조

이로써 NYU 채널 시뮬레이터를 활용 및 변형하여 개발한 동적 환경 통신 시뮬레이터의 경우에도 실제 수행되는 통신 프로세스를 고려하여 구축하였음이 확인된다. 동적 환경 통신 시뮬레이터를 돌리기 위해 사용자는 그림 48의 NYU 채널 시뮬레이터 GUI의 'Spatial Consistency Parameters'를 ON시켜서 임의의 값을 넣어 주기만 하면 손 쉽게 동적 환경 하에서 존재하는 CIR을 생성할 수 있다. 이 후의 과정은 Statistical 채널을 활용한 정적환경 시뮬레이터를 동작시키는 과정과 동일하고 자세한 내용은 다음 파트에서 서술하도록 하겠다.

제 6 장 User Manual

본 본문에서 제안한 5G 통신 시뮬레이터는 사용자의 선택에 따라 단독 5G Simulator로 동작을 하거나, EM Solver(Ray-tracing)와 융합된 경우로 수행이 가능하며 각 사용법에 대해 하기 서술한다. 해당 파트에서는 정적 환경 & Uplink(송신기가 단말기 수신기가 기지국)의 경우를 예시로 선정했으며, 쉽게 변형을 통해 여러 시나리오로 확장이 가능함을 명시한다. 본 시뮬레이터는 Window 11 또는 Window Server 2022 OS에서 동작한다. 본 시뮬레이터의 구성은 그림 63과 같으며, 각 파일에 대해 서술한다.



[그림 63] 5G 통신 시뮬레이터 Interface 구조

<파일 구성>

SystemParameter.json: 기본적인 통신 시뮬레이터의 파라미터가 해당 파일에 위치해 있다. 전반적인 시스템의 파라미터(RF Component, Signal 관련 파라미터, 그리고 시나리오 등등)를 설정할 수 있다.


```
{
    "ParameterDefinition": {

        "systemparameter": {
            "refR": 50,
            "nframes": 1
            },

        "signalparameter": {
            "fc": 39e9,
            "scs": 120e3,
            "bw": 61.44e6,
            "Nsc": 512,
            "nPilots": 32,
            "nactsc": 320,
            "fs": 120e6,
            "nGuardsc ": 158,
            "nZP": 2,
            "nPayloads": 1,
            "nPre": 36
            },
        "QAMmodulation": {
            "M": 6
            },
        "Noise": {
            "T": 290,
            "k": 1.3806504e-23
            },
        "PA": {
            "PA_gain": 0,
            "PA_OIP3": 50,
            "PA_OIP2": 50,
            "beta": 400,
            "PA_NF": 10
            },

        "LNA": {
            "LNA_gain ": 0,
            "LNA_OIP3": 50,
            "LNA_OIP2": 50,
            "LNA_NF ": 5
            },

        "Mixer": {
            "gain_conv": 0,
            "Mixer_NF": 5,
            "Mixer_IIP3": 40,
            "Mixer_IIP2": 100,
            "phase_imbalance": 0,
            "gain_imbalance": 0,
            "sidesup": -200,
            "RFRej": -200,
            "LORej": -200,
            "LORfiso": -200,
            "table": [] ,
            "tbl_power": -10
            },
        "DSP": {
                "nDuc": 1,
                "nDdc": 1
            }
    },
    "Scenario": {
        "System":{
            "Sce": 2,
            "Environment": 0,
            "Distance": 100
        },
    "Antenna": {
            "numTxAnt": 5,
            "numRxAnt": 512,
            "numRxxx": 32,
            "numRxyy": 16,
            "theta_deg": 0,
            "phi_deg ": 0,
            "Beamforming_angle": 0
        }
    }

}
```


[그림 64] SystemParameter.json file 구조

다음에 제시된 표는 위에서 제시된 파라미터에 대하여 설명한다.

구분	파라미터	파라미터	설명
RF parameter	system_parameter	refR	reference impedance [Ohms]
		nframes	송신하고자 하는 Frame 개수
	signalparameter	fc	중심 주파수 [Hz]
		scs	Subcarrier Spacing [Hz]
		bw	신호 BW [Hz]
		Nsc	Total Subcarrier 개수
		nPilots	Pilot Subcarrier 개수
		nactsc	Data가 실리는 Subcarrier의 개수
		fs	샘플링 주파수 [Hz] (BW보다 커야함)
		nGuardsc	Guardband Subcarrier의 개수
		nZP	Zero Padding Subcarrier의 개수
		nPayloads	송신하고자 하는 Symbol의 개수
		nPre	Cyclic Prefix의 개수
	QAM Modulation	M	QAM Modulation Order
	Noise	T	Noise Temperature [K]
		K	Boltzmann Constant [J/K]
	PA (LNA와 동일)	PA_gain	PA의 gain [dB]
		PA_OIP3	PA의 OIP3 [dBm]
		PA_OIP2	PA의 OIP2 [dBm]
		PA_NF	PA의 noise figure [dB]
	Mixer	gain_conv	Mixer gain [dB]
		Mixer_NF	Mixer의 noise figure [dB]
		Mixer_IIP3	Mixer의 IIP3 [dBm]
		Mixer_IIP2	Mixer의 IIP2 [dBm]
		phase_imbalance	IQ Mixer 채널 사이의 phase difference [deg]
		gain_imbalance	IQ Mixer 채널 사이의 gain difference [dB]
		sidesup	Suppression of the output alternate sideband [dB]
		RFRej	RF to output rejection [dB]
		LORej	LO to output rejection [dB]
		LORFIso	LO to RF isolation [dB]
DSP parameter	DSP	nDuc	Oversampling Factor
		nDdc	Downsampling Factor
Scenario	System	Sce	< Scenario Type > 0 : UMI (Urban Micro Cell) 1 : UMA (Urban Macro Cell) 2 : RMA (Rural Macro Cell) 3 : InH (Indoor)
		Environment	< Environment Type > 0 : LOS (Line of Sight) 1 : NLOS (None Line of Sight)
		Distance	Tx & Rx Antenna 간 거리 [m]
	Antenna	numTxAnt	Tx Antenna 개수
		numRxAnt	Rx Antenna 개수
		numRxxx	Rx Antenna Plane의 한 축(x축)방향의 개수
		numRxyy	Rx Antenna Plane의 한 축(z축)방향의 개수
		theta_deg	elevation 방향의 Rx Antenna의 위치 [degree]
		phi_deg	azimuth 방향의 Rx Antenna의 위치 [degree]
		Beamforming_angle	Tx에서 조향하고자 하는 각도 [degree]

[표 7] SystemParameter.json file 파라미터 설명

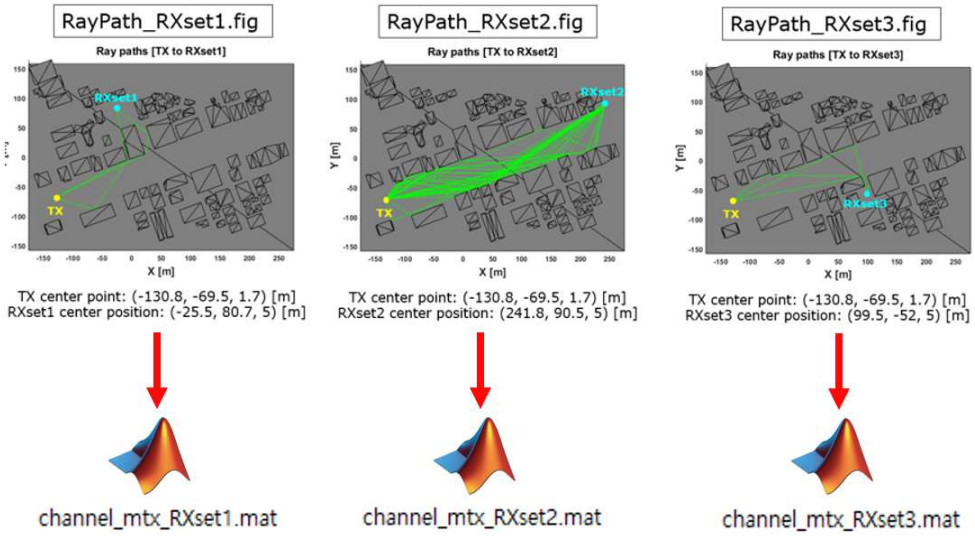
solver_info.json: 사용자가 시뮬레이션 하고자 하는 프로그램을 선택 할 수 있게끔 하는 파일이다. 해당 통신 시뮬레이터의 경우 총 2가지의 방향으로 동작이 가능하며, User가 아래의 빨간색 Box에 표시 되어있는 Raytracing 항목에 0을 입력할 경우 단독 5G 통신 시뮬레이터가 동작하고, 반면 1을 입력해줄 경우 EM Solver(Raytracing) 융합 5G 통신 시뮬레이터가 수행된다.

```
{
    "Solver_settings": {
            "MoM": 0,
            "FDTD": 0,
            "FEM": 0,
            "PO": 0,
            "Raytracing": 0,
            "System_simulation": 1
    }

}
```

[그림 65] solver_info.json file 구조

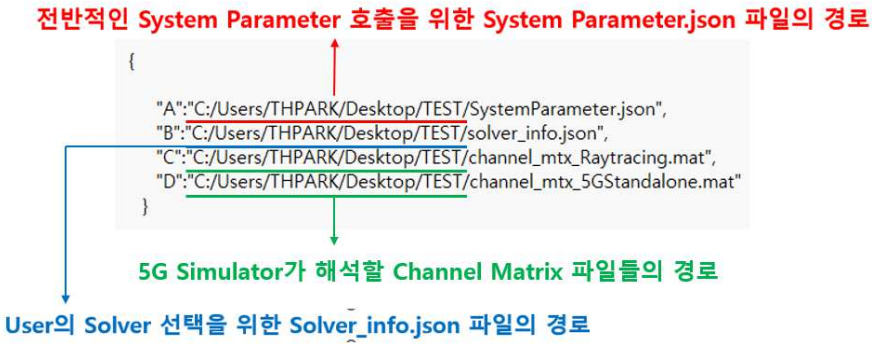
channel_mtx_EMSolver.mat: EM Solver(Raytracing)를 활용하여 얻은 Channel Matrix이며, 반드시 Simulator_JSON.exe 파일과 연동이 되어야 EM Solver(Raytracing) 융합 5G 통신 시뮬레이션이 수행된다. 해당 파일은 앞서 사용자가 solver_info.json의 Raytracing 항목에 1을 넣어줄 경우 호출이 되어 5G 시뮬레이터에 적용된다.



[그림 66] 시나리오 별 Raytracing을 통해 얻은 해석 결과물(채널 매트릭스)

channel_mtx_5GStandalone.mat: NYU에서 개발한 채널 시뮬레이터를 활용하여 얻은 채널 매트릭스에 대한 파일이며, 이 또한 반드시 Simulator_JSON.exe 파일과 연동이 되어야 단독 5G 통신 시뮬레이션이 수행된다. 해당 파일은 사용자가 solver_info.json의 Raytracing 항목에 0을 넣어줄 경우 호출이 되어 5G 통신 시뮬레이터에 적용 된다. 그림 48을 보면 알 수 있듯이 User가 임의의 값(Center Frequency, Bandwidth, Scenario Type, Tx & Rx Antenna 개수 등등)을 NYU의 채널 시뮬레이터 GUI에 입력해줄 경우 채널 매트릭스를 얻는데 필요한 값(Time Delay, Received Power & Phase, AOD, AOA 등등)을 해당 채널 SW에서 출력한다. 그 후, 앞서 얻은 결과물을 필자가 개발한 코드를 통해 5G 통신 시뮬레이터에서 필요로 하는 채널 매트릭스로 변환해주는 작업을 거치게 되고 그 결과는 5G 통신 시뮬레이터에 적용되어 해당 시나리오 하에서 통신 성능이 최종 결과물로 나오게 된다.

Input_Route.json: 앞서 설명한 2개의 json 형식의 파일과 2개의 채널 모델링 기법으로 각각 생성된 채널 매트릭스들의 경로를 설정하는 파일이다. 경로를 잘 잡아주어야 시뮬레이션이 잘 수행된다. 단 현재는 각 파일들의 경로가 모두 달라도 해당 파일에 각 파일들의 올바른 경로만 작성해준다면 User는 Matlab을 들어가지 않아도 JSON 파일 수정만을 통해 5G 시뮬레이터 Control이 가능하다. 참고로 경로 작성시 backslash(\) 대신 slash(/)를 사용하여 폴더 사이의 경로를 구분해야 시뮬레이터에서 인식이 가능하다.



[그림 67] Input_Route.json 파일의 구성 및 설명

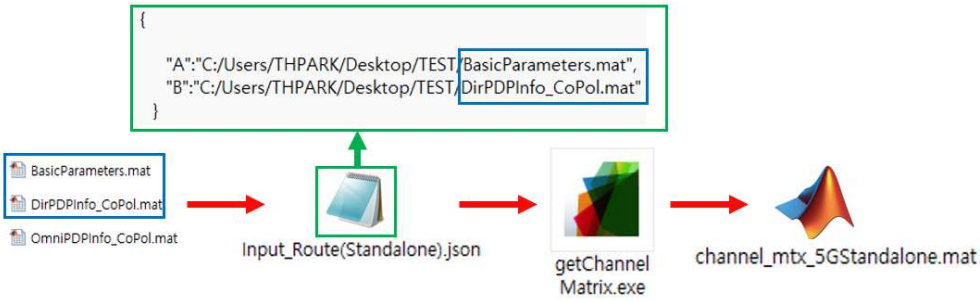
Simulator_JSON_exe: 5G 시뮬레이터 실행파일의 배포 버전으로서 더블클릭으로 실행이 불가능하고 하기에서 제시된 커맨드 명령어를 이용하여 해석을 진행할 수 있다.

시뮬레이터 사용법은 하기와 같다.

① 단독 5G 시뮬레이터 사용법

a. SystemParameter.json 수정을 통한 사용자의 파라미터 값 변경

b. 그림 48처럼 채널 시뮬레이터 GUI에 임의의 값을 넣은 후 원하는 경로를 설정해준 후 RUN을 누름

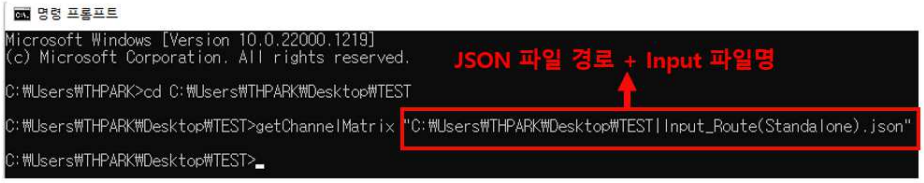


[그림 68] NYU 채널 시뮬레이터 결과물을 통해 채널 매트릭스를 도출하는 과정

c. 이전 단계의 결과물 경로를 Input_Route(Standalone).json에 입력

d. Command창 진입 후 채널 매트릭스를 도출하기 위한 Exe File실행

e. 실행하고자 하는 Exe 파일 명과 Input_Route(Standalone).json 파일 명을 포함한 해당 파일의 경로 입력



[그림 69] 5G 통신 시뮬레이터에 넣을 채널 매트릭스 도출

f. 채널 매트릭스를 도출하기 위한 Exe File과 동일한 경로에 채널 매트릭스 도출

g. solver_info.json의 Raytracing = 0으로 설정 & SystemParameter.json의 Sce & Environment 항목에 b과정에서 NYU Channel SW에 넣어줬던 값에 맞게 수정
(예를 들어 User가 UMI & LOS를 보고 싶다면 해당 단계에서 Sce : 0 & Environment : 0을 넣어줌)

h. Input_Route.json의 경로 확인
(Input File들의 올바른 경로 입력 확인)

i. Command창 진입

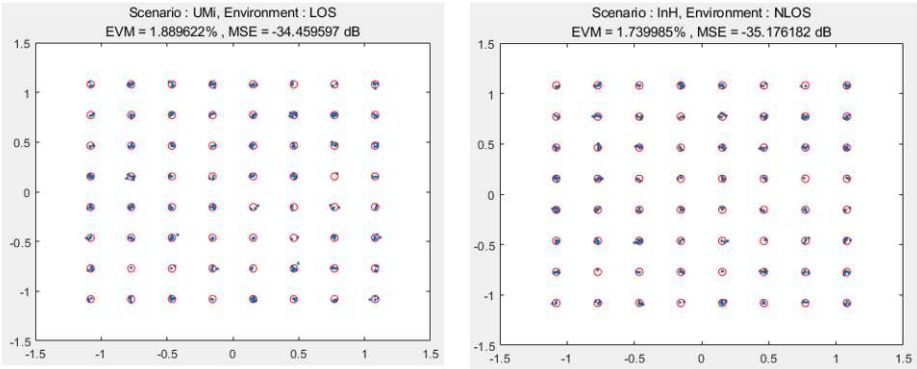
j. Simulator_JSON.exe 파일이 있는 위치로 directory change

k. 실행하고자 하는 Exe 파일 명과 Input_Route.json 파일 명을 포함한 해당 파일의 경로 입력

(Input_Route.json file이 다른 경로에 있다면 경로도 같이 써줌)

[그림 70] 툴 실행 방식

l. 시뮬레이션 수행, 최종 결과 확인



[그림 71] 최종 결과

② EM Solver(Raytracing) 융합 5G 시뮬레이터 사용법

EM Solver(Raytracing) 융합 5G 시뮬레이터 구동 방식은 단독 5G 시뮬레이터 구동 방식과 비슷하기는 하나 EM 솔버 해석 결과물을 받아와서 시뮬레이션을 수행하게 하기 위한 차이가 존재한다

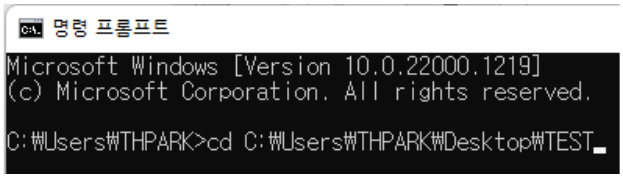
a. SystemParameter.json 파일 수정을 통한 사용자의 파라미터 변경

b. solver_info.json의 Raytracing = 1으로 설정

c. Input_Route.json의 경로 확인 (Input파일들의 올바른 경로 입력)

d. Command창 진입

e. Simulator_JSON.exe 파일이 있는 위치로 directory change



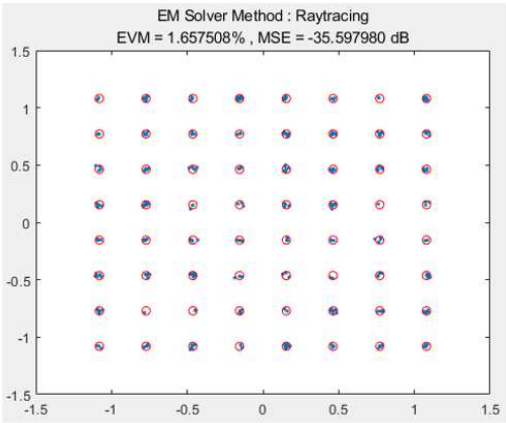
[그림 72] 경로(Directory) 변경

f. 실행하고자 하는 Exe File 이름과 Input_Route.json 파일명을 포함한 해당 파일의 경로 입력

(Input_Route.json 파일이 다른 경로에 있다면 경로도 작성)

[그림 73] 툴 실행 방식

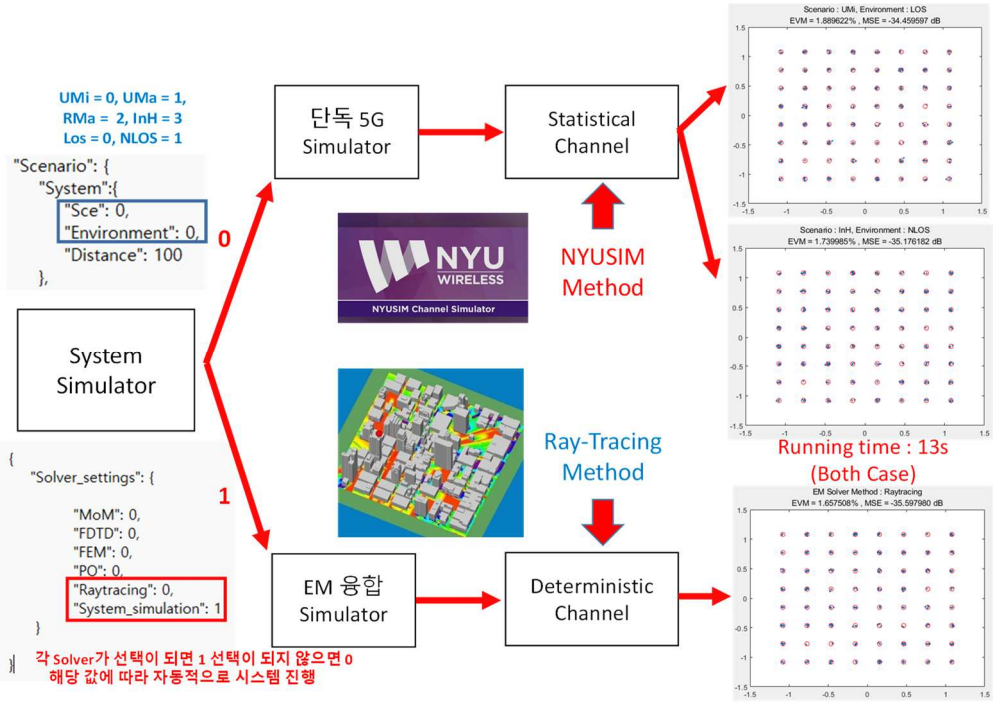
g. 시뮬레이션 수행, 최종 결과 확인



[그림 74] 최종 결과

제 7 장 결 론

본 논문에서는 5G mm-Wave 대역의 통신 성능을 제시해주는 '채널 특성을 고려한 5G MIMO 통신 시뮬레이터'를 제안한다. Baseband 부터 RF 단에 이르기까지 전반적인 통신 프로세스를 코드화 하였으며, 다양한 시나리오를 고려해 주기위해 2가지 방법으로 채널을 모델링하여 통신 시뮬레이터에 넣어 주었다. 이 외에도 사용자가 움직이면서 통신을 하는 동적 상황까지 고려해주어 통신 시뮬레이터의 완성도를 높였다.



[그림 75] 5G 통신 시뮬레이터 최종 Interface Diagram

해당 연구 성과물을 개발하면서 가장 중점을 두었던 것은 크게 3가지이다. 첫째 사용 편리성, 둘째 차별성, 마지막으로 현실과의 긴밀성이다. 먼저 본 프로그램을 사용하는 사용자의 편리성에 관련한 부분이다. JSON이라는 파일 형식을 활용하여 본 프로그램을 사용하는 누구나 프로그램을 사용하기 시작한 시점부터 결과가 나오는 시점까지 코드를 보지 않아도 된다. 말 그대로 프로그램을 사용하기 위해 추가 구매할 프로그램(Matlab)도 없고 코드에 대한 전문 지식도 따로 필요하지 않아 사용 문턱을 낮췄다. 다음은 상용 툴과의 차별성이다. 5G 통신 시뮬레이터를 개발함에 있어 기 개발 모델을 참고만 할 뿐 아니라 해당 모델의 한계를 파악하여 그 한계를 극복하였다. 그 결과 본

논문에서 제시한 통신 시뮬레이터와 일대일 비교 검증 가능한 국내 기술로 개발된 상용 툴이 따로 없는 상황이다. 마지막으로 현실과의 긴밀성 관련한 사항은 '실제 상황과 같도록 재현하는 장치'라는 시뮬레이터의 용어 정의 대로 연구를 하면서 많은 시간을 할애한 파트 중 하나이다. 필자는 삼성전자와 산학 과제를 수행하며, 보고 듣고 조사한 자료를 바탕으로 연구 개발 성과물에 현실과의 연결성을 확보하였다.

본 프로그램은 누구나 사용이 가능하게끔 무료 오픈소스로 배포될 예정이며, 특히나 다른 나라에 비해 개발이 미진한 5G mm-Wave대역 통신 분야에 종사하는 많은 사람들에 도움을 줄 수 있을 것이라 생각한다.

참고 문헌

[1] Ali Zaidi Fredrik Athley Jonas Medbo Ulf Gustavsson Giuseppe Durisi Xiaoming Chen - 5G Physical Layer Principles, Models and Technology Components (2018)

[2] B.Seo – WCDMA RF system simulator considering memory effect of a power amplifier(2019)

[3] Y. Cho, J. Kim, W. Yang, C. Kang – MIMO-OFDM Wireless Communications with Matlab (2008)

[4] T.Noh – Automotive FMCW Radar System Simulator considering Antenna Coupling(2020)

[5] Henry L. Bertoni – Radio Propagation for Modern Wireless systems (2000)

[6] Mathuranathan Viswanathan – Wireless Communication Systems in Matlab (2020)

[7] Houda Harkat, Paulo Monteiro, Atilio Gameiro, Fernando Guiomar, Hasmath Farhana Thariq Ahmed - A Survey on MIMO-OFDM Systems: Review of Recent Trends (2022)

[8] Mădălina Oproiu, Vlad Boldan, Ion Marghescu – Effects of Using & Carrier Aggregation with Three Component Carriers in a Mobile Operator's Network (2016)

[9] G. Tong Zhou - Analysis of Spectral Regrowth of Weakly Nonlinear Power

Amplifiers (2000)

[10] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer – Discrete-Time Signal Processing (2019)

[11] Constantine A. Balanis – Antenna THEORY ANALYSIS and DESIGN(2016)

[12] Shihao Ju, Shu Sun, and Theodore. S. Rappaport – NYUSIM User Manual (2022)

[13] Hangsong Yan, George R. MacCartney Jr., Shu Sun, and Theodore S. Rappaport – NYU WIRELESS TR 2016-002 Technical Report, 5G Millimeter-Wave Channel Model Alliance Measurement Parameter, Scenario Parameter, and Measured Path Loss Data List (2016)

[14] Shu Sun, George R. MacCartney Jr., and Theodore S. Rappaport – A Novel Millimeter-Wave Channel Simulator and Applications for 5G Wireless Communications (2017)

[15] Kasfia Zaman and Md Munjure Mowla – A Milimeter Wave Channel Modeling with Spatial Consistency in 5G systems(2017)

Abstract

5G MIMO communication simulator considering channel characteristic

Taehee Park

Department of Electrical and Computer engineering

The Graduate School

Seoul National University

5G was commercialized in Korea for the first time in the world, and as 5G mobile communication technology has recently developed, efforts are being made to improve the performance level of communication technology by grafting 5G technology to vehicles and terminals. Nevertheless, while a commercial tool (REMCOM) exists for radar systems, interpretation is limited for other applications such as mobile communication in a 5G environment. A channel representing a space existing between a transmitter and a receiver is a parameter that can influence communication performance, and in particular, its value and importance are gradually emerging in that most of the current communication is wireless.

Through the research presented in this paper, it can be extended to various radio application system analysis through changing the scenario (channel and flow chart) as well as the radar/communication system. In addition, by building an analysis platform in a dynamic environment, it has the advantage of being able to more realistically simulate the actual operating environment. In this paper, we propose

a communication simulator for 5G mm-Wave band, and the simulator not only reflects the actual communication process and system structure (Tx & Rx: reflects the latest base station and terminal structure), but also complies with the standards stipulated by 3GPP. In the case of the 'MIMO 5G communication simulator considering the channel characteristics' presented in this paper, the development was carried out using the existing QAMCOM Model and System Vue Tool as reference models.
It is valuable in terms of overcoming the disadvantages of the tool (adding MIMO function, enabling overall communication performance, etc.). In addition, a format called JSON File is used to secure differentiation from the existing development model so that the user can use the simulator without directly accessing the code or without professional knowledge of the code.

In the case of a channel model, which can be said to be one of the most important factors in designing a 5G communication system, modeling was conducted in two ways. First, a statistical method was used to statistically simulate the entire channel by looking at the trends and result values of the partial channels. In another way, a deterministic method was used to accurately predict the propagation of radio waves in a given environment based on physical theories. The 5G communication simulator presented in this paper shows the communication performance obtained under the channels modeled by the two methods presented above. By looking at the result, the appropriate values of the parameters (number of pilot subcarriers, Tx transmission power, distance between Tx and Rx, etc.) that determine the channel state can be identified according to the given environment. That is, through the 5G communication simulator, the user can check the communication performance under the desired

scenario. And by analyzing this result value, not only can channel parameter values suitable for the given environment be obtained, but also communication performance can be checked through a parameter called EVM (Error Vector Magnitude), which indicates the difference between the signal actually sent from the Tx and the signal received from the Rx.

Keywords: 5G, communication simulator, channel, MIMO
Student Number: 2021-25248