

5G K-SimLink: 5G NSA를 위한 개방형 모듈화 링크 레벨 시뮬레이터 개발

정지훈*, 박상우*, 왕우완*, 박기승*, 유승민*, 임승찬*, 조명식*, 하대환*,
강준혁*, 박현철*, 성영철*

5G K-SimLink: Development of Open-Source Modular Link-Level Simulator for 5G NSA

Jihoon Chung*, Sangwoo Park*, Woowan Wang*, Giseung Park*, Seungmin Yoo*,
Seung-Chan Lim*, Myung-sik Cho*, Daehan Ha*, Joonhyuk Kang*, Hyuncheol Park*,
Youngchul Sung*

요약

본 논문은 5세대 이동통신을 위한 표준에 알맞은 링크 레벨 시뮬레이터의 구현에 대해 다루었다. 5세대 이동통신의 특징점을 선별하여 분석하였으며, 이를 따르도록 시뮬레이터를 구현하였다. 구현한 시뮬레이터인 5G K-SimLink는 블록 별로 모듈화가 되어있으며 최신 표준을 따른다는 점에서 다른 시뮬레이터와 차별성을 갖는다. 더 나아가, 5G K-SimLink와 다른 여러 회사의 결과값들과 비교하여 본 시뮬레이터가 의미 있는 결과를 내는 것을 확인하였다.

Key Words : 5th generation, 5th generation standard, link level simulator, modular structure, object-oriented programming

ABSTRACT

We address an implementation of link level simulation following 5th generation standard. We analyzed the standard to effectively apply the key features into our simulator. Our simulator, 5G K-SimLink, which has a modular structure by functionalities of Physical layer, follows the most current standard of 3GPP to make our simulator unique. In addition, we show that our simulator achieves reasonable results through calibration with various companies.

* 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 '범부처 Giga KOREA 사업'의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. GK18S0400, 개방형 5G 표준 모델 개발)

• First Author : (ORCID:0000-0002-8462-5512) Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), j.chung@kaist.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-5508-3742) Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), jkang@kaist.ac.kr, 종신회원

* (ORCID:0000-0003-4091-7860, ORCID:0000-0001-7760-0336, ORCID:0000-0002-9737-4142, ORCID:0000-0002-1302-0452, ORCID:0000-0002-7630-8533, ORCID:0000-0001-7178-2941, ORCID:0000-0002-2771-229X, ORCID:0000-0003-4536-6690) Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) {sangwoop, wwwang, gs.park, ddb72000, seungchan.lim, ms.cho, daehan.ha, hcpark, ycsung}@kaist.ac.kr

논문번호 : 201806-A-188-RN, Received June 29, 2018; Revised September 17, 2018; Accepted January 10, 2019

I. 서 론

5세대 이동통신 기술의 국제 표준은 국제전기통신 연합(ITU)에서 IMT-2020이라는 이름으로 승인이 예 정되어 있고, 이를 위해 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서는 IMT-2020의 후보 기술을 만들고 있다. 새로운 무선접속 기술인 New Radio(NR) 및 기존 4세대 기술의 발전 모두 5G라 정 의되며 이를 위한 표준은 조기 상용화를 위한 Release 15(Phase 1)와 IMT-2020의 최종 규격을 위한 Release 16(Phase 2)으로 나누어 진행 중이고, Phase 1의 경우에는 2018년 9월에 완성되었다^[1]. 본 논문은 5G 표준 중 Release 15를 기반으로 한 링크 레벨 시뮬레이터(link level simulator, LLS)의 구조 및 기능 블록도, 테스트 시나리오 등에 관한 내용을 기술한다. 본 시뮬레이터의 명칭은 5G K-SimLink이며, 객체 지향 프로그래밍(object-oriented programming, OOP)과 개방형을 특징으로 갖는다. 객체 지향 프로그래밍과 개방형은 본 시뮬레이터에 필요한 세부 기능들을 수행하는 세부 컴포넌트들을 모듈화하여 구현하고 공개 함으로써 실현되었다. 이러한 객체 지향 프로그래밍과 개방형을 기반으로, 본 시뮬레이터는 여러 사용자가 손쉽게 특정 시나리오에 적합한 세부 모듈을 수정 및 확장할 수 있게 하며, 궁극적으로는 각 사용자의 목적 에 알맞은 5G 시뮬레이터 구현을 가능하게 한다. 특히 본 시뮬레이터는 Release 15의 목적 중 하나인 enhanced Mobile Broadband(eMBB, 초고속통신)에 초점을 두고 있으며, 현재 표준화가 완료된 Non-standalone(NSA) 상황에서 구현되었다. 본 논문 의 본문에는 먼저 4G에서 5G로 변화하는 통신 시스템에 따른 변화와 이러한 변화를 반영하기 위한 5G K-SimLink 개발 방식에 관해 기술하며, 결론에서는 검증 결과 그래프를 통해 본 시뮬레이터의 성능에 대 해 기술한다.

II. 본 론

2.1 5G의 특징점

Release 15에서 기존의 LTE-A Pro 시스템과 대비 하여 크게 1. Numerology 및 waveform, 2. 5G 채널 모델, 3. 하이브리드 빔포밍 구조, 4. Reference signal, 5. 채널코딩의 변화를 꼽을 수 있다^[2,3]. 이러한 변화점 에 대해 자세히 기술하자면 다음과 같다.

2.1.1 Numerology 및 waveform

Numerology의 변화는 subcarrier spacing이 기존 LTE-A Pro에서는 15kHz로 고정되었지만, 5G NR 표준에서는 사용하는 주파수 대역에 따라, 15, 30, 60, 120, 240kHz와 같이 subcarrier spacing을 유동적인 변화를 허용하였다 [표 1]. 이에 따라 기존 100MHz로 제한되었던 최대 대역폭 또한 numerology에 따라 6GHz 이하 대역은 100MHz, 6GHz 이상 대역은 400MHz로 변화하였다. Waveform의 경우, LTE-A Pro과 마찬가지로 orthogonal frequency division multiplexing(OFDM)과 single carrier frequency division multiplexing(SC-FDM)을 지원하지만, 다양한 subcarrier spacing에 따른 cyclic prefix(CP) 길이의 변화가 반영되었다.

표 1. Numerology에 따른 subcarrier spacing, 서브프레임당 슬롯 수, 슬롯당 심볼 수의 관계 [2]
Table 1. Subcarrier spacing, number of slots per subframe and symbols per slot determined by numerology [2]

Numerology(μ)	$2^{\mu} \times 15$ [kHz]	number of slots per subframe	number of symbols per slot
0	15	1	14
1	30	2	14
2	60	4	14
3	120	8	14
4	240	16	14
5	480	32	14

2.1.2 채널 모델

5G 채널 모델의 경우 6GHz 이하의 주파수 대역뿐만 아니라 6GHz 이상의 고주파 대역의 반송파 신호를 송수신할 경우의 물리적 채널 환경을 반영하기 위한 채널 모델이 [5]에 기술되었다. 위 문서에서는 LLS를 위한 채널 모델로 clustered delay line(CDL) 모델과 tapped delay line(TDL) 모델을 기술하고 있고, NLOS 환경을 위한 CDL-A, CDL-B, CDL-C(TDL-A, TDL-B, TDL-C) 모델과, LOS 환경을 위한 CDL-D, CDL-E(TDL-D, TDL-E) 모델의 파라미터가 정의되었다.

2.1.3 하이브리드 빔포밍

현재 5G eMBB에서는 높은 대역에서의 신호 감쇄를 상쇄하기 위해 4G 대비 많은 수의 안테나를 사용한다. 이렇게 많은 안테나를 사용하기 위해서 5G NR

표준에서는 편파 안테나(polarized antenna) 구조를 고려하고, 많은 안테나 사용에 적합한 하이브리드 빔포밍 구조를 고려하고 있다^[4]. 하지만 많은 안테나를 사용하게 된다면 빔포밍에 사용하기 위해 필요한 채널 정보 피드백을 위해 큰 오버헤드가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 표준에서는 하이브리드 빔포밍 구조에 적합하면서도 채널 피드백량을 감소시킬 수 있는 채널 정보 피드백 코드북을 설계하였다. 기본적으로 표준에 정의된 코드북의 경우 Type I, II CSIRS codebook으로 나뉜다. 각각의 경우 모두 하이브리드 빔포밍 중 아날로그 단을 위해서는 DFT 벡터를 기반으로 하는 아날로그 빔을 사용한다. 한편, 디지털 단의 경우 편파 안테나 구조에서 co-phase만을 고려하여 아날로그 빔을 결합하는 경우(Type I)와 아날로그 벡터의 크기까지 고려하여 선형 조합으로 아날로그 벡터를 결합하는 경우(Type II)로 나뉜다.

2.1.4 Reference signal

위에 서술한 하이브리드 빔포밍 구조를 지원하기 위해 채널을 추정하기 위한 레퍼런스 신호 또한 여러 변화가 이루어졌다. 먼저 안테나 수가 적을 경우 채널 정보를 추정하기 위해 사용되었던 CRS(Cell-specific Reference Signal)가 CSI-RS(Channel State Information Reference Signal)로 대체되었으며, 높은 주파수 대역을 사용하는 통신에서 크게 변화하는 페이즈를 측정하기 위해 보내는 레퍼런스 신호의 역할을 PTRS(Phase Tracking Reference Signal)가 담당하게 되었다. 특히 CSIRS의 경우 5G에서 고려하는 프레임 구조 및 빔포밍을 효과적으로 반영할 수 있도록 기지국에서 고려하는 아날로그 빔 개수별로 여러 가지 방법으로 RS를 할당하는 방법을 포함하도록 설계되었다^[2].

2.1.5 채널 코딩

5G NR 표준에서는 LDPC 부호가 채택되었으며, LTE 표준의 Turbo 부호 수준의 오류 성능을 달성하면서 낮은 복호 복잡도를 갖는다. LDPC 부호는 quasi-cyclic LDPC 부호로서 기본적으로 부호율 1/3 과 1/5을 각각 지원하는 두 가지 BG(Base Graph) 1 과 BG 2로 구성된다. 또한 코드 블록 길이와 부호율이 결정되면 BG로부터 PCM(Parity Check Matrix)를 최종적으로 생성할 수 있으며, BG 1은 상대적으로 긴 코드 블록 길이와 고부호율을 지원하고, BG 2는 짧은 코드 블록 길이와 저부호율을 지원한다.

2.2 5G K-SimLink의 특징점

그림 1의 경우, 설계한 5G K-SimLink의 모듈 기능 구조도를 나타낸다. 구조도에서 각 블록의 경우 객체 지향 프로그래밍을 기반으로 형성한 모듈을 의미하고 큰 블록의 경우 각 모듈을 포함하고 있는 class를 의미한다. 기본적으로 Parameter class에서 시뮬레이션의 시나리오, 시나리오별로 필요한 파라미터의 계산을 다루고 이 파라미터들을 이용하여 BS class, UE class, 5G channel 모듈에서 실제 시뮬레이션을 위한 동작을 실시한다. 먼저 BS class의 경우 기본적으로 기지국에서 수행하는 모듈들을 포함하고 있는데 이는 전송하는 프레임 구조 설계부터 시작해서 RS의 생성 및 할당, 채널코딩, 빔포밍, OFDM 신호 생성 등을 포함한다. 여기서 파란색 블록은 5G를 위해 4G대비 기능이 변화된 블록을 의미하고 빨간색 블록은 기존 4G에서 변화된 5G 표준의 특징점들을 반영하기 위해 만든 모듈로써 주로 빔포밍에 관련된 기능을 다룬다. 이후 이렇게 생성된 신호가 5G channel 모듈을 통해 생성한 채널을 통과하여 UE class에 전송되고 UE class에서는 받은 신호를 디코딩하는 과정을 거치게 된다. 이는 OFDM demodulation, 채널 추정, 기지국으로 피드백을 해주기 위한 계산, 신호 디택션 및 시뮬레이션의 결과를 측정하기 위한 result 모듈을 포함한다.

이제, 5G K-SimLink가 어떻게 LTE 표준에서 5G NR 표준으로의 변화를 반영하였는지를 ‘1. 5G의 특징점’에서 기술한 관점에서 논하고자 한다.

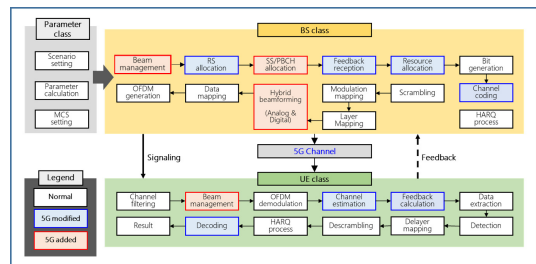


그림 1. 5G K-SimLink의 구조도
Fig. 1. Structure of 5G K-SimLink

2.2.1 Numerology 및 waveform

Numerology의 변화는 현재 표준에서 정의된 15, 30, 60, 120kHz에 대해서 구현되어 있으며, 사용자가 유동적으로 선택하여 변경할 수 있다. 또한 서브프레임 당 슬롯 수, 최대 대역폭, SS/PBCH 블록의 numerology 등이 해당 numerology에 따라 표준문서에 맞게 변화도록 구현되었다. Waveform으로는

OFDM이 구현되었고, numerology 에 따라 CP 길이, FFT 크기 등이 표준에 따라 설정된다.

2.2.2 채널 모델

고주파 대역 및 2D 배열의 편파 안테나의 특성을 반영되는 3D 채널 모델이 [5]에 기술된 내용을 기반으로 링크 레벨 시뮬레이터의 관점에서 개발되었다. 핵심적으로 CDL 기반의 모델이 핵심적으로 구현되었고, 2D 배열 안테나, 편파 안테나, 안테나 패턴, Doppler shift, 기지국 downtilt 및 slant angle, 사용자의 rotation 등이 반영되고, 시나리오에 알맞은 값들을 설정할 수 있도록 구현되었다. 또한, 간략한 검증에 위한 버전인 TDL 기반의 모델도 구현되었다.

2.2.3 하이브리드 빔포밍

5G K-SimLink에서 빔포밍의 경우 Type I CSIRS codebook^[4]을 기반으로 하여 설계하였다. 실제 하이브리드 빔포밍의 경우 아날로그 단과 디지털 단으로 나뉘지게 되는데 아날로그 단의 경우 하드웨어 제한으로 각 부반송파 별로 같은 빔포밍 구조를 사용하여 야만 하고 디지털 단의 경우 각 부반송파 별로 다른 빔포밍 구조를 사용할 수 있다. 즉, Type I CSIRS codebook을 기준으로 전체 부반송파 모두 같은 방향의 아날로그 빔을 사용하지만, 디지털 단의 경우 편파 안테나에서 각 부반송파 별로 다른 co-phase를 고려하여 사용된 아날로그 빔을 다르게 결합하도록 빔포밍 구조를 설계하였다. 수신기에서는 앞서 설명했던 구조 내에서 Type I CSIRS codebook의 codeword 별로 전송량을 측정하여 피드백 해준 후에 이를 기지국에서 사용자를 지원하는데 사용하도록 설계하였다.

2.2.4 Reference signal

하이브리드 빔포밍을 위해 각 codeword 별 전송량을 측정하기 위해서는 이를 위한 RS을 전송해주어야 한다. 하지만 다수의 안테나를 사용하기 때문에 각 사용자별로 채널을 추정하기 위해 좁은 빔을 사용하는 것은 많은 시간이 걸리고 많은 피드백량을 필요로 하여 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 5G K-SimLink 시뮬레이터에서는 먼저 동기화를 위한 신호와 브로드캐스팅을 위한 신호를 전송할 때 이를 넓은 빔을 사용하고 좁은 빔을 통해 탐색할 범위를 제한하여 채널을 추정한다^[6]. 좁은 빔의 경우 각 빔 별로 OCC(Orthogonal Cover Code)를 이용하거나 주파수, 시간 축으로 겹치지 않도록 하여 CSIRS를 전송하게 된다. 이 때 각 편파 안테나의 co-phase별로 빔을 구

성하여 CSIRS를 할당하는 것은 비효율적이므로 본 시뮬레이터에서는 CSIRS를 전송 시에 각 빔 방향에 대해 편파 안테나 별로 CSIRS를 할당하여 수신기에서 co-phase별로 기대되는 전송량을 측정하였다. 이러한 방법으로 각 codeword 별 전송량을 측정하여 빔포밍을 위한 PMI(Precoding Matrix Indicator)를 기지국으로 전송하도록 설계하였다.

2.2.5 채널 코딩

채널 코딩은 5G NR 표준을 기반으로 CRC(Cyclic Redundancy Check) attachment, code block segmentation, LDPC coding과 rate matching 블록으로 구성되어 있으며, 송신단과 이에 대응되는 수신단으로 구현되었다. 또한 BG 1과 BG 2를 모두 지원할 수 있으며, 임의의 코드 블록 길이와 부호율에 대해서 채널 코딩의 오율 성능을 측정할 수 있도록 구현되었다.

III. 결 론

3.1 5G K-SimLink의 검증 결과 그래프

5G K-SimLink의 검증을 위해서, 3GPP에서 제안된 NR MIMO link level calibration 문서들을 기반으로 검증을 진행하였다^[7,8]. [7]에서는 Phase 1의 검증으로써 주로 5G 채널 모델링을 검증하기 위한 시나리오 가정을 정의하고 있고, 이는 표 2와 같이 요약할

표 2. Phase 1 검증 시나리오 가정 표
Table 2. Simulation assumptions for phase 1 calibration

	Below 6GHz	Above 6GHz
Carrier Frequency	4GHz	30GHz
Subcarrier Spacing	15kHz	60kHz
bandwidth	20MHz	80MHz
Channel Model	CDL-A and CDL-B (delay spread=100ns, UE speed=3km/h)	
TXRU mapping	1D sub-array partition model	2D sub-array partition model
Beam Selection Method	- 1: DFT beam for the strongest cluster - 2: Best beam for the maximizing receive power	
Antenna configurations	BS: (M,N,P) = (4,4,2). UE: (M,N,P) = (1,1,2)	BS: (M,N,P) = (4,8,1). UE: (M,N,P) = (2,4,1);
Antenna element radiation pattern	BS: Antenna pattern in [9] UE: Omni-directional	BS: Table A.2.1-6 in [10] UE: Table A.2.1-8 in [10]
Metrics	CDF of receive SNR w/ beamforming at SNR=0dB	

수 있다. 해당 가정에 대한 시뮬레이터의 결과로써 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 값을 **metric**으로 하여 타 여러 통신 업체들과의 결과 비교를 통해 검증을 실행하였다. 해당 비교 결과는 그림 3에서 확인할 수 있다. [8]에서는 Phase 2의 검증으로써, 주로 하이브리드 빔포밍, LDPC 채널 코딩 등의 검증을 위한 시나리오이고 이를 위한 가정은 표 3과 같다. 신호대잡음비에 대한 블록 오율을 시뮬레이터의 결과 **metric**으로 하여 타 통신 업체들의 결과와 비교하였고 이는 그림 3과 같다. 그림 2에서는 수신 신호대잡음비가 0dB 이상이며 25dB 이하인 값에서 분포하고 있으며 그림 3에서는 전송 신호대잡음비가 커짐에 따라 블록 오율이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 2와 3으로부터 5G K-SimLink의 시뮬레이션 결과가 다른 회사의 결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있으며, 이로써는 5G K-SimLink의 성능이 표준에서 요구하는 성과 크게 다르지 않다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

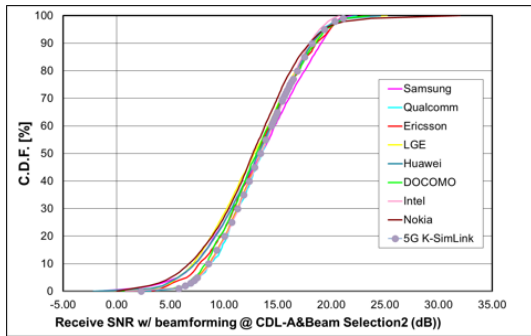


그림 2. 5G K-SimLink 검증 그래프 (Phase 1 링크 레벨 검증)
Fig. 2. Calibration result of 5G K-SimLink (Phase 1 link level calibration)

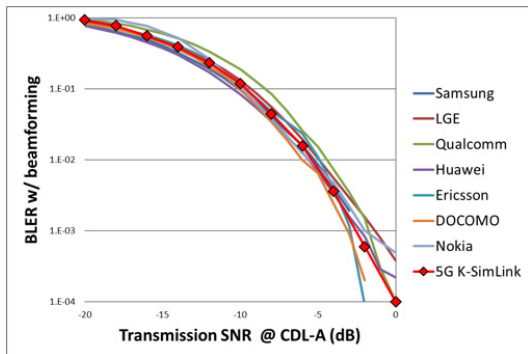


그림 3. 5G K-SimLink 검증 그래프 (Phase 2 링크 레벨 검증)
Fig. 3. Calibration result of 5G K-SimLink (Phase 2 link level calibration)

표 3. Phase 2 검증 시나리오 가정 표
Table 3. Simulation assumptions for phase 2 calibration

Carrier Frequency	4GHz
Subcarrier Spacing	15kHz
Data allocation	8 Resource Blocks
Channel Model	CDL-A and CDL-B (delay spread=100ns, UE speed=3km/h)
TXRU mapping	1D sub-array partition [11]
Beam selection	- 1: DFT beam for the strongest cluster - 2: Best beam for the maximizing receive power
Antenna configurations	BS: (M,N,P) = (4,4,2), UE: (M,N,P) = (1,1,2)
Antenna element radiation pattern	BS: Antenna pattern in [9] UE: Omnidirectional
Beamforming scheme	Analog Beamforming based on beam selection + Digital Beamforming based on ideal SVD
MIMO mode	SU-MIMO with rank=1
UE receiver type	MMSE-IRC
MCS	Coding rate: 0.1354, Modulation: QPSK
DMRS channel estimation	2D MMSE (frequency - time correlation)
Metrics	BLER w/ beamforming as a function of transmission SNR ranging from -20dB to 0dB

3.2 5G K-SimLink의 확장성

5G K-SimLink의 객체 지향 프로그래밍 및 개방형의 특성은 본 시뮬레이터의 확장성에 큰 의의를 갖는다. 본 시뮬레이터가 물리계층의 핵심 기능 구조를 모듈화해서 구현이 되었기에 Release 16과 그 이후 표준 또는 새로운 물리계층 기능의 개발 및 구현에 손쉽게 적용될 수 있다. 실제로 본 논문에서는 downlink에 대해 중점적으로 다루었지만, 구현된 downlink 시뮬레이터의 직관적인 모듈화 구조를 기반으로 uplink도 쉽게 구현을 하였으며, 최종적으로 downlink SISO, downlink MIMO, uplink SISO, uplink MIMO로 이루어진 5G K-SimLink를 구성하였다. 5G K-SimLink를 기반으로 다양한 통신 시스템의 개발 및 구현이 손쉽게 여러 사용자들의 손을 거쳐 이루어지기를 믿어 의심치 않는다.

References

[1] 3GPP Ultimate Portal, Retrieved Jun. 27, 2018, from <https://portal.3gpp.org/#55934-releases>

[2] 3GPP TS 38.211 “NR; Physical channels and modulation,” V15.0.0, Dec. 2017

[3] W. Kim, G. Park, S. Park, J. Seo, J. So, S. Yu, S.-C. Lim, J. Chung, D. Ha, J. Kang, H. Park, and Y. Sung, “Development of open-source modular link-level simulator for Pre-5G,” in *Proc. KICS Summer Conf.*, Jeju Island, Korea, Jun. 2017

[4] 3GPP TS 38.214 “NR; Physical layer procedures for data,” V15.0.0, Dec. 2017

[5] 3GPP TR 38.901 “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz,” V14.3.0, Dec. 2017.

[6] A. Ghosh, “5G mmWave Revolution & New Radio,” IEEE Webinar, Sep. 2017.

[7] R1-1715252 Calibration results for Phase 1 NR MIMO link level calibration

[8] R1-1715254 Calibration results for Phase 2 NR MIMO link level calibration

[9] 3GPP TR 36.873 “Study on 3D channel model for LTE,” V12.7.0, Dec. 2017.

[10] 3GPP TR 38.802 “Study on New Radio Access Technology Physical Layer Aspects,” V14.2.0, Sep. 2017.

[11] 3GPP TR 36.897 “Study on Elevation Beamforming/Full-Dimension (FD) MIMO for LTE,” V0.4.0, May 2015.

정 지 훈 (Jihoon Chung)



2012년 2월: 한양대학교 전자통신 컴퓨터 공학부 졸업
 2014년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사
 2014년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학부 박사과정

<관심분야> 통신 신호처리, 이동 통신 시스템

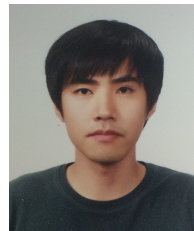
박 상 우 (Sangwoo Park)



2014년 3월: 한국과학기술원 물리학과 졸업
 2016년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사
 2016년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정

<관심분야> 통신 신호처리, 머신 러닝

왕 우 완 (Woowan Wang)



2011년 2월: 경북대학교 전자공학과 졸업
 2013년 2월: 포항공과대학교 정보전자융합공학부 석사
 2014년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 박사과정

<관심분야> 다중 접속, 다중 안테나

박 기 승 (Giseung Park)



2016년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학부 졸업
 2018년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학부 석사
 2018년 9월~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학부 박사과정

<관심분야> 통신공학, 강화학습

유 승 민 (Seungmin Yoo)



2017년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업
 2017년 2월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정

<관심분야> 전자공학, 통신공학, 물리계층 보안

임 승 찬 (Seung-Chan Lim)



2011년 2월: 홍익대학교 전자
전기공학과 졸업
2013년 2월: 포항공과대학교
전자전기공학과 석사
2015년 3월~현재: 한국과학기술
술원 전기 및 전자공학부
박사과정

<관심분야> 다중 접속, 다중 안테나, 채널부호

조 명 식 (Myung-sik Cho)



2017년 2월: 한국과학기술원 수
리과학과 졸업
2019년 2월: 한국과학기술원 전
기및전자공학부 석사
2019년 3월~현재: 한국과학기술
술원 전기및전자공학부 박사
과정

<관심분야> 통신공학, 메타러닝

하 대 한 (Daehan Ha)



2011년 2월: 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 졸업
2013년 2월: 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 석사
2013년 3월~현재: 한국과학기술
술원 전기 및 전자공학과 박사
과정

<관심분야> 전자공학, 통신공학

강 준 혁 (Joonhyuk Kang)



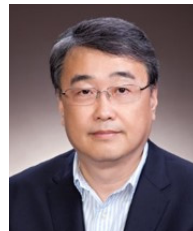
1991년: 서울대학교 제어계측
공학과 졸업
1993년: 서울대학교 제어계측
공학과 석사
2002년: The University of
Texas at Austin 전자컴퓨터
공학과 박사

2003년~2009년: ICU 부교수

2009년~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학부 정교
수

<관심분야> 무선통신, 신호처리, 인지무선통신, 실
내위치인식 등

박 현 철 (Hyuncheol Park)



1983년 2월: 연세대학교 전자
공학과 학사
1985년 2월: 연세대학교 전자
공학과 석사
1997년 8월: Georgia Institute
of Technology Electrical
Eng. 박사

2009년 3월~현재: 한국과학기술원 정교수

<관심분야> 이동통신 시스템

성 영 철 (Youngchul Sung)



1993년 2월: 서울대학교 전자
공학과 졸업
1995년 2월: 서울대학교 전자
공학과 석사
2005년 5월: Cornell University,
Electrical and Computer
Engineering 박사

2007년 2월~2010년 2월: 한국과학기술원 전기및전
자공학부 조교수

2010년 3월~2018년 8월: 한국과학기술원 전기및전
자공학부 부교수

2018년 9월~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학
부 정교수

<관심분야> 통신공학, 신호처리, 강화학습