

밀리미터파 5G 이동통신을 위한 물리계층 모뎀의 구현

김 준 우*, 방 영 조°, 박 윤 옥*, 김 일 규*, 김 태 중*

Physical Layer Modem Implementation for mmWave 5G Mobile Communication

Jun-woo Kim*, Young-jo Bang°, Youn-ok Park*, Ilgyu Kim*, Tae Joong Kim*

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 5G 이동통신 시스템의 일환으로 한국전자통신연구원이 개발중인 Giga KOREA 5G의 물리계층 모뎀의 구조에 대하여 설명한다. Giga KOREA 5G 기술은 셀 당 최대 100 Gbps급 용량을 가진 기지국으로 개인별 1Gbps급 모바일 서비스를 제공하기 위해 밀리미터파 (10~40 GHz) 기반의 광대역 이동통신의 원천기술 및 시제품을 개발하는 것을 목표로 하고 있으며, 이러한 요구조건을 충족하기 위해 물리계층은 고속 대용량 기지국 및 단말 플랫폼과 이에 탑재되는 OFDM TDD 방식의 고성능 모뎀으로 구현되었다. Giga KOREA 5G 모뎀의 주요 기능으로는 주파수 집성 및 단말의 수신 빔 탐색, 대용량 데이터 송수신을 위한 고속의 채널 부호화 및 복호화, 고속 변복조 기능 등이 있다.

Key Words : Giga KOREA 5G, Carrier Aggregation, mmWave, OFDM, TDD, Beamforming

ABSTRACT

This paper describes the physical layer modem structure of Giga KOREA 5G system which is being developed by ETRI as a 5G telecommunications prototype. The objective of Giga KOREA 5G system is supporting maximum 100 Gbps data rate for each cell with wide-bandwidth baseband station and mobile station prototypes in mmWave (10~40 GHz) environment. To achieve this objective, its physical layer is composed of high performance baseband station as well as mobile station and their OFDM TDD modems. The important features of Giga KOREA 5G physical layer are carrier aggregation, multiple receiving beam searching in mobile station, high data rate channel encoder and decoder and high speed modulation and demodulation functions.

I. 서 론

최근 국내외에서는 5G 이동통신에 밀리미터파의 광대역 주파수를 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1,2]. 한국전자통신연구원이 주도하여 개발중인 Giga KOREA 5G도 밀리미터파 대역의 주파수 자

원을 이용하여 대용량 데이터를 고속으로 전송할 수 있는 원천 기술 및 시제품 개발을 목표로 하고 있다.

본 논문에서는 이러한 광대역 고속 이동통신을 지원하기 위한 물리계층의 구조와 그 구현 및 시험 환경에 대해 기술한다. Giga KOREA 5G의 물리계층은 대용량 데이터의 고속 처리를 위한 병렬화 와 파이프

※ 본 논문은 미래창조과학부 「범부처Giga KOREA사업」 [GK15N0100, 밀리미터파 5G 이동통신 시스템개발]의 지원을 받아 수행되었습니다.

♦ First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, jwkim74@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, yjbang@etri.re.kr, 정희원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, parkyo@etri.re.kr, igkim@etri.re.kr, aisma@etri.re.kr

논문번호 : KICS2015-11-370, Received November 21, 2015; Revised December 18, 2015; Accepted December 18, 2015

라인을 수행하는 동시에, 이를 작은 면적에 효율적으로 구현하고 있으며, 또한 RF모듈 및 Layer 2/3와의 고속 인터페이스에도 많은 주의를 기울였다.

Giga KOREA 5G는 그림 2와 같이 1 GHz의 대역폭을 8개의 125 MHz Frequency assignment (FA)로 나누어 활용하는 Carrier aggregation (CA) 구조이다 [3]. 기지국이 송수신하는 각각의 3차원 빔은 8개의 FA로 구성되며, 단말은 동시에 최대 4개의 FA로 하향링크를 수신하고, 1개의 FA로 상향링크를 송신한다.

사용된 통신방식은 TDD (Time Division Duplex) 방식의 OFDM (Orthogonal Frequency Division

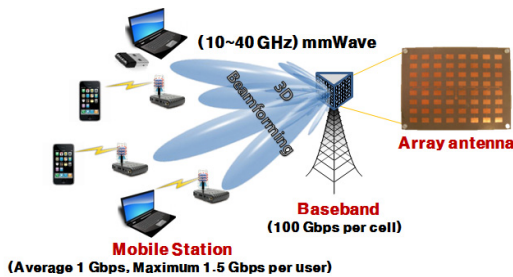


그림 1. Giga KOREA 5G 시스템의 개요.
Fig. 1. The concept of Giga KOREA 5G system.

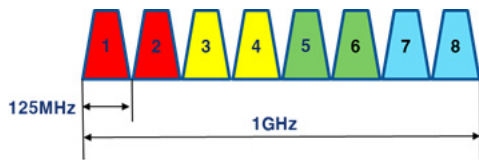


그림 2. Giga KOREA 5G의 주파수 집성 구조.
Fig. 2. The Carrier Aggregation of Giga KOREA 5G system.

표 1. Giga KOREA 5G의 주요 파라미터들
Table 1. Parameters of Giga KOREA 5G

Parameters	Value
Bandwidth per FA (MHz)	125
Sampling frequency (MHz)	184.32
Subcarrier spacing (kHz)	180
Number of subcarriers per FA (total)	694
FFT size	1,024
OFDM symbol length (us)	5.56
Cyclic prefix length (Samples)	128
Subframe length (us)	200
Number of samples during 1 ms subframe	184,320
Number of OFDM symbols per subframe	32

Multiplexing) 신호이다. 표 1은 Giga KOREA 5G의 주요 파라미터들을 보이고 있다.

II. Giga KOREA 5G 물리계층 모뎀의 구현

2.1 기지국 모뎀의 구현

Giga KOREA 5G의 기지국은 셀당 최대 100 Gbps 급 전송용량을 가지므로 물리계층은 대용량 데이터의 고속 변복조 및 부호화, 복호화 기술뿐 아니라 RF 모듈 및 Layer 2/3 와 고속의 인터페이스도 가능해야 한다. 기지국의 물리계층은 RF단과 디지털 IF 인터페이스를, Layer 2/3과는 고속 Serial 인터페이스를 가진다.

2.1.1 하향링크 송신기

Giga KOREA 5G의 기지국 송신기는 8개의 FA로 동기 심플, 제어채널 및 데이터 채널 등을 전송한다. 각각의 FA 신호는 별도의 송신 경로에서 184.32 Msps로 변조된 뒤, 8배 Interpolation 및 FIR 필터를 통해 1.47 Gbps의 신호로 바뀌어 송출된다. 채널 부호화의 고속 동작을 위해, 소스 데이터는 코드 블록으로 나뉘어진 뒤, 다수개의 부호화기를 통해 동시에 부호화가 진행된다. 이 때 각각의 코드 블록에 곱해지는 의사잡음 부호 역시 코드 블록 개수만큼 동시에 생성되어야 하므로 고속의 의사잡음 부호기 초기화 알고리즘이 적용되었다^{4,5)}.

Giga KOREA 5G의 기지국은 Cell 내 모든 영역을 빈틈없이 서비스하기 위하여 고정형 빔포밍 안테나를 사용하므로 하향링크 송신기에서 빔포밍을 위하여 별도의 기능을 갖출 필요는 없으나, 빔간 간섭 완화를 위해 특별히 고안된 Reference 신호를 전송하는 기능

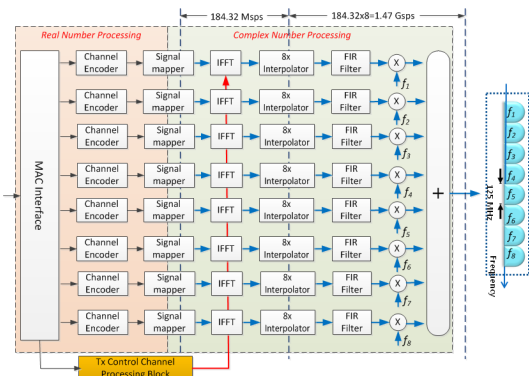


그림 3. 하향링크 송신기의 구조.
Fig. 3. The downlink transmitter of Giga KOREA 5G system.

을 포함하고 있다⁶⁾.

2.1.2 상향링크 수신기

기지국 상향링크 수신기에서는 단말이 송신하는 데이터 채널, 제어 채널, 상향링크 랜덤 액세스 채널, 사운딩 채널 등의 복조와 복호를 수행한다.

수신된 데이터 채널 신호는 서브 프레임 단위로 복조되며, 복조 결과인 LLR (Log Likelihood Ratio) 값을 채널 복호기로 넘겨줄 때에는 데이터 전달 시간을 줄이기 위해 여러 비트의 LLR 값이 동시에 전송된다. 기본 복조 단위는 32개의 OFDM 심볼로 구성된 200 us 길이의 서브프레임이다.

제어 채널은 전송되는 제어 정보에 따라 몇 가지의 포맷으로 나뉘므로, 제어채널 복조부에는 각 제어 채널 포맷에 따라 적합한 복조를 수행할 수 있도록 자원 추출부 및 채널 추정기 등이 적절히 구현되었다⁷⁾.

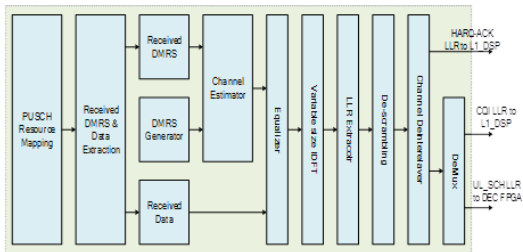


그림 4. 데이터 채널 복조부의 구조
Fig. 4. The data channel receiver of Giga KOREA 5G.

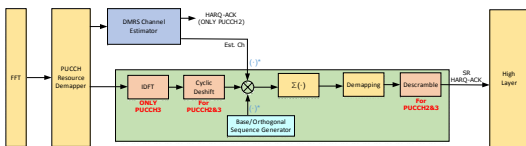


그림 5. 제어 채널 복조부의 구조
Fig. 5. The control channel receiver of Giga KOREA 5G.

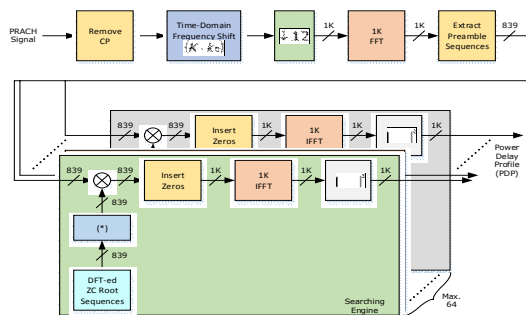


그림 6. 상향링크 랜덤 액세스 채널 수신부의 구조
Fig. 6. The uplink random access channel receiver of Giga KOREA 5G.

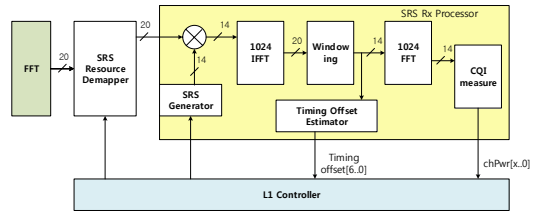


그림 7. 상향링크 사운딩 채널 수신부의 구조
Fig. 7. The uplink sounding channel receiver of Giga KOREA 5G.

상향링크 랜덤 액세스 신호를 위해 전송되는 랜덤 액세스 신호 및 상향링크 채널 품질 측정 및 주기적 시각 동기를 위해 전송되는 사운딩 채널은 각각 최대 4개씩을 동시에 복조할 수 있도록 설계되었다⁸⁾. 그림 6과 7은 각각 상향링크 랜덤 액세스 채널 수신부와 사운딩 채널 수신부의 구조를 보이고 있다.

2.1.3 기지국 채널 부호화기 및 복조화기

기지국과 단말은 동일한 방식의 채널 부호화기 및 복조화기를 사용하고 있다. 각각의 FA당 450 Mbps의 처리용량을 가져며, 데이터 채널은 터보 부호화 및 복호화, 제어채널은 Tail-biting convolutional codes (TBCC) 부호화 및 비터비 복호화를 이용한다. 터보 디코딩은 Maximum Log-MAP 방법으로 구현되었다^{9,10)}. 그림 8의 채널 복조화기는 8개의 FA 입력을 처리하기 위해 동일한 구조의 채널 복조화기 8개가 배치된 모습을 보이고 있다. 채널 복조화기는 데이터 채널 복조기의 복조결과인 LLR 값을 다수개의 Low-Voltage Differential Signaling (LVDS) 채널을 이용하여 수신한다.

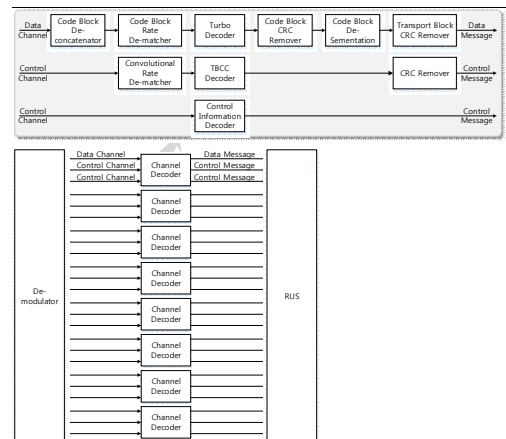


그림 8. 채널 복조화기의 구조
Fig. 8. The channel decoder of Giga KOREA 5G.

2.1.4 기지국 모델의 인터페이스

기지국 안테나로 수신된 데이터는 디지털 IF (Intermediate Frequency)와 A/D 변환기를 거친 뒤, Xilinx의 AURORA 인터페이스를 통해 모뎀 FPGA로 전송되며, 각각의 AURORA transceiver는 한 FA당 184.32 Msps의 데이터를 처리한다. 디지털 IF의 시험 결과 Error vector magnitude (EVM) 2~3%의 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다.

Layer 2/3로부터는 데이터의 복조를 위한 매개변수들을 수신하고 각종 측정값 및 제어채널 복조 결과 등을 알려주어야 하는데, 이러한 기능은 고속의 PCIe (Peripheral Component Interconnect Express)를 통해 수행된다.

2.2 단말 모델의 구현

Giga KOREA 5G의 단말은 사용자당 최대 1.5 Gbps급 전송용량을 가지며, 이의 지원을 위해 물리계층은 기지국과 마찬가지로 고속의 변복조, 부호화, 복호화, 및 타 계층과의 인터페이스가 가능하도록 설계되었다.

단말 물리계층은 RF단 및 Layer 2/3와 고속의 Serial 인터페이스를 가지며, 이와는 별도로 하향링크의 3차원 빔포밍 신호 중 가장 우수한 신호를 찾기 위한 빔 탐색 회로 및 RF 인터페이스를 갖추고 있다. 고속의 A/D 및 D/A 변환에 특히 유의하였고, 병렬 구조의 채널 코덱을 파이프라인으로 동작시켜 속도와 면적 모두의 최적화를 추구하였다.

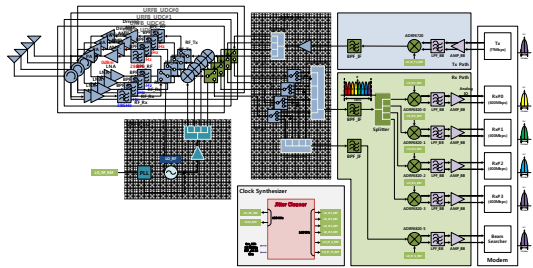


그림 9. 단말기의 전체 구조
Fig. 9. The user equipment structure of Giga KOREA 5G.

2.2.1 상향링크 송신기

상향링크 송신기는 대용량 데이터를 처리하는 과정에서 채널 부호화기의 지연시간이 한 서브프레임 이상 걸리기 때문에, 두 개의 채널 부호화기가 사용되었다.

2.2.2 하향링크 동기 획득기

단말은 4개의 FA를 통해 A/D 변환된 신호를 수신

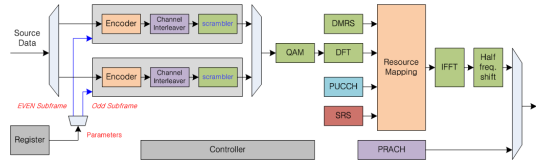


그림 10. Giga KOREA 5G 상향링크 송신기의 구조
Fig. 10. The uplink transmitter of Giga KOREA 5G.

하는데, 이와는 별도로 빔 탐색 및 동기 획득을 위한 별도의 A/D 변환신호 수신 경로가 마련되어 있다. 단말 동기 획득기는 이 경로를 통해 4개의 단말 안테나로부터 획득한 신호에 대해 각각 동기를 획득하고 채널 품질을 측정하여 가장 수신 품질이 우수한 안테나의 신호를 복조부가 수신하도록 결정한다.

복조가 진행되고 있는 동안에도 동기 획득기는 계속 모든 단말 안테나의 수신 신호에 대해 순차적으로 시각 동기 탐색 및 채널 품질 측정을 수행하여 가장 수신 품질이 우수한 안테나를 복조기가 선택하도록 하며, 필요시 핸드오버 절차를 Layer 2/3에 요청한다.

Giga KOREA 5G의 단말은 상향링크로 데이터를 송신할 때에도 효율적인 통신을 위해 4개의 단말 안테나 중 하나를 선택하여 송신하게 되는데, 단말 동기 획득기는 4개의 단말 안테나 중 어느 안테나를 송신 안테나로 사용할지도 지정한다.

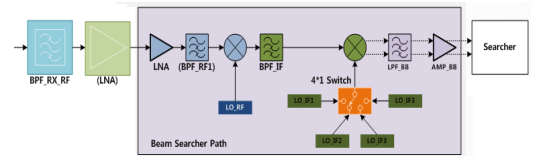


그림 11. Giga KOREA 5G 단말 동기 획득기의 RF부 인터페이스
Fig. 11. The RF interface for Giga KOREA 5G downlink time synchronizer.

2.2.3 하향링크 수신기

단말의 하향링크 수신기는 채널 추정에 필요한 파일럿 신호 발생기와 채널 추정기, 추정된 채널 값에서 기준 신호가 없는 OFDM 심볼에서의 채널 값을 추정하기 위한 보간기, Fast Fourier Transform (FFT) 모듈, 스크램블 코드 생성기 등을 포함한다. 복조결과인 LLR^[11] 값은 LVDS 인터페이스를 통해 채널 복조기로 전송된다. 그림 12는 하향링크 수신기의 구조를 보이고 있으며, 그림 13은 하향링크 수신기 중 데이터 채널 복조기의 부동소수점 및 고정소수점 성능 시뮬레이션 결과를 보이고 있다.

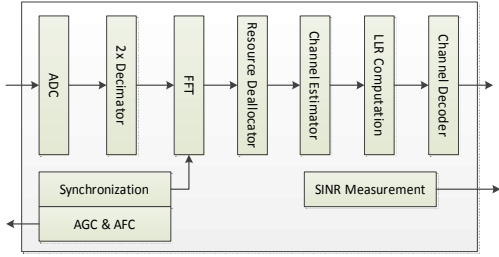


그림 12. Giga KOREA 5G 단말 하향링크 수신기의 구조
Fig. 12. The downlink receiver of Giga KOREA 5G

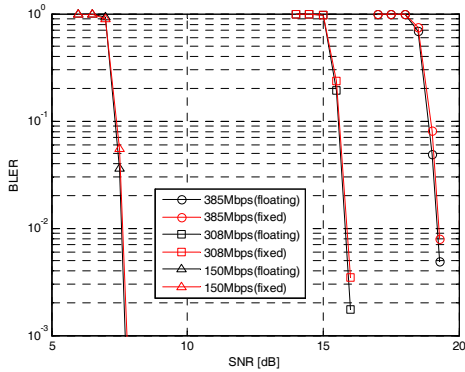


그림 13. 하향링크 데이터 채널 복조기의 성능 시뮬레이션 결과.
Fig. 13. The performance simulation result of downlink data channel demodulator.

III. 하드웨어 플랫폼 및 검증 환경

3.1 하드웨어 플랫폼의 구현

그림 14는 Giga KOREA 5G 기지국 및 단말의 플랫폼을 보이고 있다. 각각의 플랫폼은 ATCA (Advanced Telecommunications Computing Architecture) 구조이며, 모뎀 보드, 디지털 IF 보드, L1 제어 DSP 보드, Clock 보드 등이 장착된다.

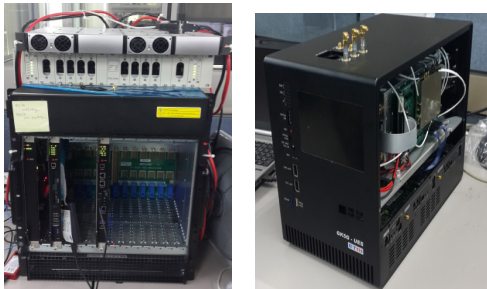


그림 14. Giga KOREA 5G 기지국 플랫폼(상)과 단말 플랫폼(하) 시제품
Fig. 14. The base station platform (left) and the mobile station platform (right) prototype

그림 15에서 보이고 있는 Giga KOREA 5G의 기지국 보드는 각 보드당 2개의 3차원 빔을 처리하도록 되어있다. 하나의 3차원 빔을 송수신하는 데에 두 개의 2천만 Gate급 FPGA가 사용되었는데, 채널 복조기가 하나의 FPGA를 차지하고, 다른 하나의 FPGA에 변조기와 복조기가 자리잡고 있다.



그림 15. Giga KOREA 5G 기지국 모뎀 보드
Fig. 15. The base station modem board

3.2 기지국 및 단말 시스템의 검증 환경 구성

물리계층의 주요 입출력은 모뎀 검증 장치인 MAT (Modem analysis tool)를 이용하여 시험용 컴퓨터에서 확인할 수 있도록 하여 시험의 정확성을 높였다. 기지국 및 단말의 모뎀 보드에는 MAT로 데이터를 보내거나 받을 수 있도록 Aurora 인터페이스가 마련되어 있어서 다양한 검증 작업을 수행할 수 있다. 그림 16은 Giga KOREA 5G용 MAT의 모습을 보이고 있다.

MAT를 이용하여 모뎀 송신부의 기능을 검증할 때에는 송신부에서 원하는 단계의 신호를 일정 시간 동안 MAT의 메모리에 저장한 뒤, USB 인터페이스를 통해 시험용 컴퓨터로 전달하여 Matlab 환경에서 모

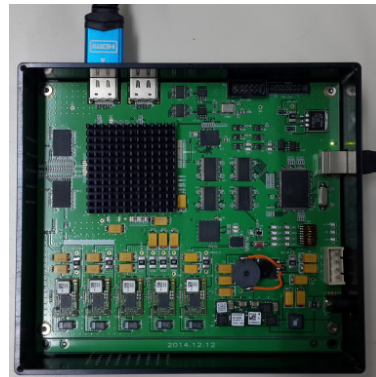


그림 16. Giga KOREA 5G용 모뎀 시험장치
Fig. 16. The modem analysis tool used in Giga KOREA 5G

템의 기능 및 성능 검증을 수행한다. 그리고 모뎀 수신부의 기능을 검증할 때에는 정확한 시뮬레이터로 만들어진 테스트용 신호를 MAT내부의 메모리에 저장한 뒤, 마치 안테나에서 수신하는 것처럼 모뎀으로 반복적으로 전달하여 모뎀의 동작을 확인할 수 있다.

MAT는 전체 시스템의 연동 단계 이전에 모뎀의 자체 검증을 위해 사용될 수도 있고, 기지국과 단말이 서로 데이터를 주고받는 연동 시험 단계에서도 모뎀의 성능을 검증하고 예기치 못한 문제가 발생했을 때 그 원인을 빨리 찾을 수 있도록 도와주기도 한다. 그림 17은 기지국과 단말의 연동 시험 단계에서 MAT를 이용하여 모뎀의 상향링크 복조 기능을 검증하는 환경을 보이고 있다.

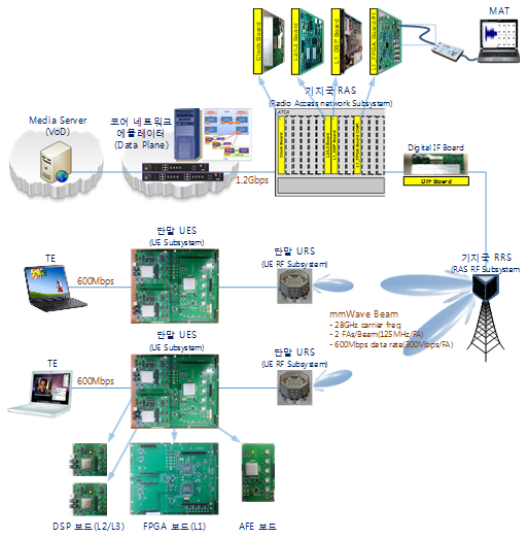


그림 17. Giga KOREA 5G 시스템의 테스트 환경.
Fig. 17. The test environment of Giga KOREA 5G

IV. 결 론

본 논문에서는 한국전자통신연구원이 주축이 되어 개발을 진행중인 Giga KOREA 5G 기지국 및 단말의 물리계층 구현 구조와 시험 환경에 대해 기술하였다. Giga KOREA 5G 시스템의 구현은 현재 물리계층 모뎀을 포함한 개별 블록의 구현 및 검증이 완료되어 전체 연동 테스트가 진행 중이며 다양한 형태의 시연이 예정되어 있다.

본 과제에서 구현된 고속의 물리계층 모뎀 기술은 본 과제의 다른 신기술들과 함께 최근 본격화되고 있는 밀리미터파 대역 기반의 5G 이동통신에서 표준화

및 서비스 활성화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다^{12,13}.

References

- [1] K. Kim, S. Lee, and Y. Kim, "Trends on 5G communications," *2015 Electron. Telecommun. Trends*, vol. 30, no. 1, pp. 1-11, 2015.
- [2] S. Hong, I. Kim, and S. Bang, "Trends of technology developments for mmWave-based 5G mobile communications," *2013 Electron. Telecommun. Trends*, vol. 28, no. 6, pp. 107-117, 2013.
- [3] G. Yuan, et al., "Carrier aggregation for LTE-advanced mobile communication systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 2, pp. 88-93, 2010.
- [4] H. Kim, et al., "PN sequence generation from 2-D array of shift registers," *ETRI J.*, vol. 27, no. 3, pp. 273-279, Jun. 2005.
- [5] S. Hwang, et al., "Efficient implementation of a pseudorandom sequence generator for high-speed data communications," *ETRI J.*, vol. 32, no. 2, pp. 222-229, Apr. 2010.
- [6] M. Kim and Y. Ko, "Channel estimation and analog beam selection for uplink multiuser hybrid beamforming system," *J. KICS*, vol. 40, no. 3, pp. 459-468, 2015.
- [7] D. Wang, et al., "Efficient receiver scheme for LTE PUCCH," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 352-355, 2012.
- [8] Z. Ying and C. Fa-tang, "Interference between sounding reference signal and random access preamble based on LTE uplink," *WASE Int. Conf. ICIE '09*, vol. 1, pp. 286-289, 2009.
- [9] J. Hagenauer and P. Hoehner, "A viterbi algorithm with soft-decision outputs and its application," in *Proc. IEEE GLOBECOM'89*, vol. 3, pp. 1680-1686, Dallas, TX, Nov. 1989.
- [10] Y. Kim and H. Ryu, "Blind turbo equalization system with beamforming," *J. KICS*, vol. 38, no. 10, pp. 850-857, 2013.
- [11] J. Lee and K. Kim, "Soft-decision algorithm with low complexity for MIMO systems using high-order modulations," *J. KICS*, vol. 40, no.

6, pp. 981-989, 2015.

- [12] J. Bae, et al., "Architecture and performance evaluation of mmWave based 5G mobile communication system," *ICTC 2014*, pp. 847-851, Jeju Island, Korea, Oct. 2014.
- [13] J. Lee, et al., "mmWave based cellular mobile communications recent research results from the giga KOREA project," *IEEE VTC 2014-Spring*, May 2014.

김 준 우 (Jun-woo Kim)



1996년 : 경북대학교 전자공학과 학사
 1998년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 2013년 : 충남대학교 전자공학과 박사
 1998년~2001년 : 데이콤 종합연구소 연구원

2001년~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원
 <관심분야> 디지털 신호처리, 디지털 통신

방 영 조 (Young-jo Bang)



1989년 : 연세대학교 전기공학과 졸업 공학사
 1991년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 공학석사
 1997년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업 공학박사
 1997년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> MIMO 모델 기술, 이동통신 신호처리

박 윤 옥 (Youn-ok Park)



1986년 : 한양대학교 전자공학과 학사
 1997년 : 충남대학교 컴퓨터공학과 석사
 2011년 : 충남대학교 정보통신공학과 박사
 1985년~1987년 : 삼성전자 종합연구소 연구원

1987년~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원
 <관심분야> 디지털 통신, CDMA, OFDMA, MIMO

김 일 규 (Ilgyu Kim)



1993년 : 서울시립대학교 전자공학과 학사
 1995년 : 서울시립대학교 전자공학과 석사
 2009년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1995년~2000년 : 신세계통신연구원

2000년~현재 : 한국전자통신연구원 실장 (책임연구원)
 <관심분야> OFDMA, mmWave 통신, 3GPP LTE

김 태 중 (Tae Joong Kim)



1991년 : 연세대학교 전기공학과 학사
 1993년 : 연세대학교 전기공학과 석사
 1998년 : 연세대학교 전기공학과 박사
 1998년~2000년 : 한국전자통신연구원 선임연구원

2000년~2006년 : (주) 이오닉스 수석연구원
 2006년~현재 : 한국전자통신연구원 부장 (책임연구원)
 <관심분야> 이동 통신, 3GPP LTE, mmWave 통신