

USRP 기반 LTE 기지국-단말 통신 테스트베드 구현

곽민상, 이현우, 송재오, 박해동, 유호영*

충남대학교 전자공학과

e-mail : mskwak.cas@gmail.com, hwlee.cas@gmail.com, josong.cas@gmail.com,
hdpark.cas@gmail.com, hyyoo@cnu.ac.kr

USRP Based LTE eNodeB and User Equipment Communication Testbed

Minsang Kwak, Hyunwoo Lee, Jaeho Song, Haedong Park and Hoyoung Yoo*

Department of Electronics Engineering

Chungnam National University

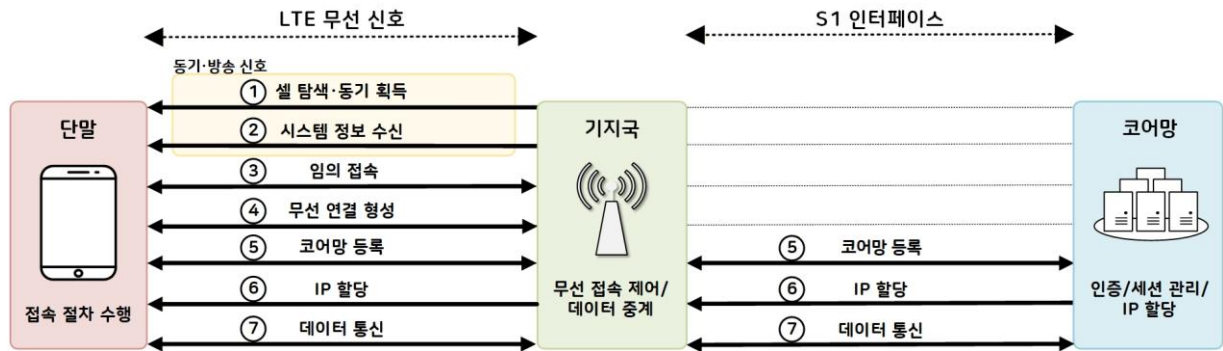
Abstract

This paper presents the implementation and verification of a Long Term Evolution (LTE) Evolved Node B (eNodeB)-user equipment communication testbed using two Universal Software Radio Peripheral (USRP) devices and two personal computers. The proposed testbed uses srsRAN 4G to operate the Evolved Packet Core (EPC), eNodeB, and user equipment functions in a Software Defined Radio (SDR) environment. One computer operates the EPC and eNodeB, while the other operates the user equipment. The USRP devices are directly connected through coaxial cables to provide controlled uplink and downlink paths and reduce external wireless-channel effects. Experimental results confirm successful cell search, system information reception, random access, Radio Resource Control (RRC) connection, core network registration, Internet Protocol (IP) address allocation, and IP packet communication with 0% packet loss. The implemented testbed provides a controlled environment for LTE access procedure analysis and future 5G based SDR communication testbed development.

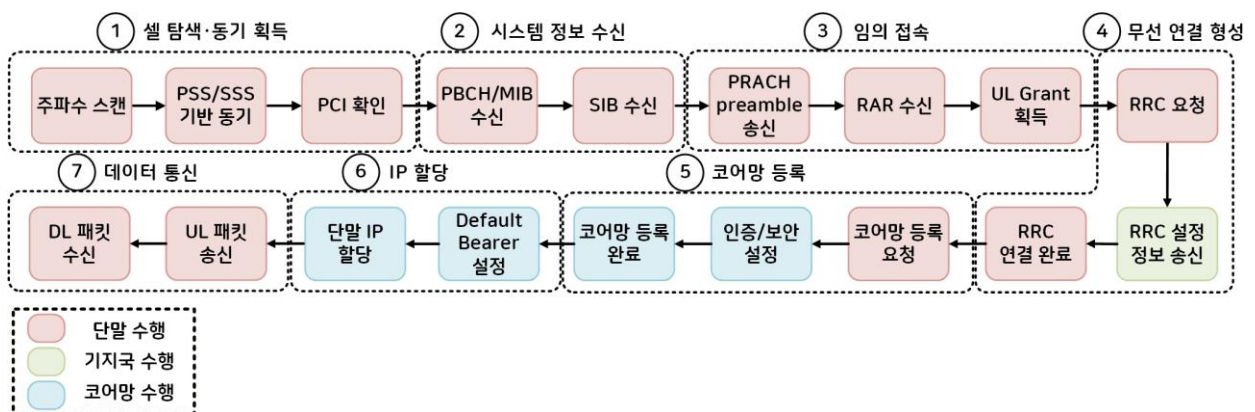
I. 서론

이동통신 시스템은 단말, 기지국, 코어망이 연동되어 무선 접속과 데이터 통신을 수행하는 구조로 이루어진다. 이러한 절차를 분석하기 위해서는 단말과 기지국의 접속 과정, 코어망 등록, 주소 할당 및 데이터 통신 흐름을 확인할 수 있는 실험 환경이 필요하다. 그러나 실제 상용망 기반 실험은 주파수 사용, 망 접근성, 반복 실험, 조건 제어 측면에서 제한이 크다. 특히 접속 절차와 데이터 통신 흐름을 분석하려면 기지국과 단말의 동작을 실험자가 직접 제어할 수 있는 환경이 요구된다. 따라서 실제 망과 유사한 접속 절차를 통제된 조건에서 재현할 수 있는 테스트베드가 필요하다[1].

본 논문에서는 Universal Software Radio Peripheral (USRP)와 공개 이동통신 소프트웨어인 srsRAN 4G를 이용하여 Long Term Evolution (LTE) 기지국-단말 통신 모사 환경을 구성하고, 접속 및 데이터 통신 절차를 검증한다. 특히 소프트웨어 기반 LTE 망 구성과 USRP 기반 송수신 구조를 결합하여 기지국과 단말의 동작을 실험 환경에서 재현한다. 이를 통해 실제 상용망에 의존하지 않고, 통제된 실험 환경에서 LTE 접속 절차와 Internet Protocol (IP) 기반 데이터 통신을 재현하고 검증할 수 있는 기지국-단말 통신 테스트베드를 구현하고자 한다.



(a) 구성 요소 간 통신 흐름



(b) 단계별 세부 절차

그림 1. LTE 기지국-단말 접속 및 데이터 통신 절차

II. LTE 기지국-단말 통신 모사 구조

2.1 srsRAN 4G 기반 LTE 망 구성

본 연구에서는 LTE 기지국-단말 통신 테스트베드 구현을 위해 srsRAN 4G를 사용하였다. srsRAN 4G는 LTE 코어망, 기지국, 단말 기능을 소프트웨어 형태로 제공하므로, 범용 컴퓨터 기반에서 LTE 망 구성 요소를 구현할 수 있다[2]. 이를 통해 실제 상용망에 직접 접속하지 않고도 LTE 접속 절차와 데이터 통신 흐름을 실험실 환경에서 확인할 수 있다. srsRAN 4G에서 코어망은 단말의 접속 관리, 주소 할당 및 데이터망 연결을 담당하고, 기지국은 무선 접속 제어와 상·하향 데이터 전달을 수행한다. 단말은 기지국 신호를 탐색한 뒤 코어망 등록과 주소 할당을 거쳐 데이터 통신을 수행한다.

2.2 LTE 접속 및 데이터 통신 절차

그림 1은 LTE 기지국-단말 접속 및 데이터 통신 절차를 나타낸다. 그림 1(a)는 구성 요소 간 통신

흐름을, 그림 1(b)는 단계별 세부 절차를 나타내며, ①~⑥은 접속 절차, ⑦은 접속 후 데이터 통신 절차에 해당한다[3]. 기지국은 동기 신호와 시스템 정보를 포함한 방송 정보를 주기적으로 송출하며, 단말은 설정된 주파수 대역에서 기지국 신호를 탐색한다. 이후 단말은 Primary Synchronization Signal/Secondary Synchronization Signal (PSS/SSS)을 이용하여 셀 동기를 획득하고, Physical Cell Identity (PCI)를 확인하여 접속 대상 셀을 식별한다. 셀 동기 획득 후 단말은 Physical Broadcast Channel (PBCH)를 통해 Master Information Block (MIB)를 수신하여 기지국의 기본 정보를 획득한다. 이후 System Information Block (SIB)를 통해 망 접속 및 임의의 접속에 필요한 시스템 정보를 수신한다. 시스템 정보 수신에 완료되면 단말은 Physical Random Access Channel (PRACH) 프리앰블을 기지국으로 송신하여 임의의 접속을 요청한다. 기지국은 Random Access Response (RAR)를 전송하고, 단말은 RAR에 포함된 Uplink Grant (UL Grant)를 통해 상향 전송 허가를 획득한

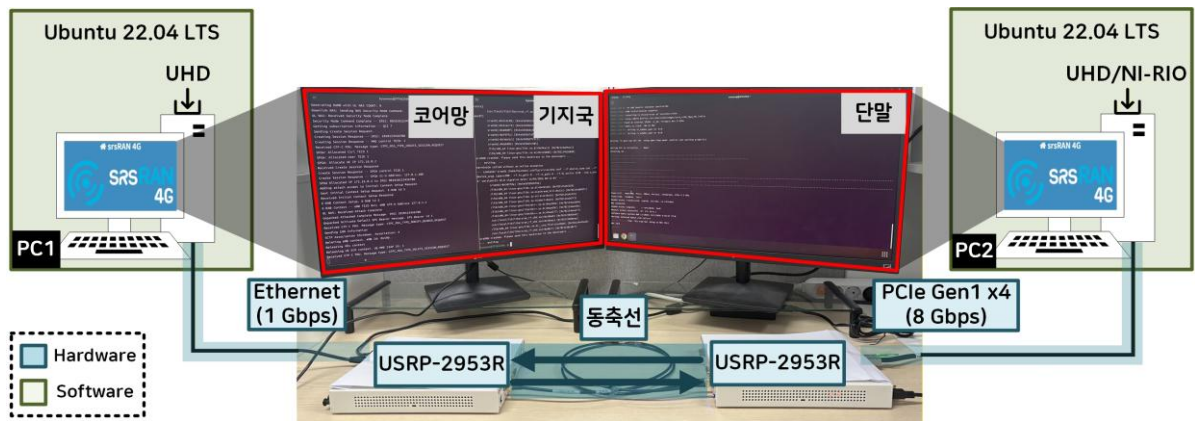


그림 2. USRP 기반 LTE 기지국-단말 통신 테스트베드 구성

뒤 Radio Resource Control (RRC) 연결 요청을 전송한다. 이후 기지국은 단말과의 무선 제어 연결을 설정하기 위해 RRC 설정 정보를 전달하고, 단말이 RRC 연결 완료 메시지를 전송함으로써 단말과 기지국 사이의 RRC 연결이 형성된다. 이후 단말은 기지국을 경유하여 코어망 등록 요청을 전달하고, 코어망은 가입자 정보 확인과 인증 및 보안 설정을 수행한다. 이때 기지국은 S1 인터페이스를 통해 단말과 코어망 사이의 제어 메시지를 중계한다. 코어망 등록이 완료되면 단말에 기본 IP 연결을 제공하는 데이터 전달 경로인 Default Bearer가 설정되고, 단말에 IP 주소가 할당된다. 이로써 단말은 LTE 망에 접속된 상태가 되며, 할당된 IP 주소와 Default Bearer를 기반으로 IP 데이터 통신을 수행할 수 있다. 이때 단말이 상향(Uplink, UL) 방향으로 송신한 IP 패킷은 기지국을 거쳐 코어망으로 전달되고, 코어망의 응답 패킷은 하향(Downlink, DL) 방향으로 기지국을 거쳐 단말에 전달된다.

III. 실험 환경 및 실험 결과

3.1 실험 환경

그림 2는 본 논문에서 구성한 USRP 기반 LTE 기지국-단말 통신 테스트베드 구성을 나타낸다. 실험 환경은 크게 하드웨어 환경과 소프트웨어 환경으로 구분된다.

하드웨어 환경은 두 대의 개인용 컴퓨터와 두 대의 NI USRP-2953R로 구성하였다. PC1은 코어망과 기지국 기능을 수행하도록 설정하였으며, 기지국 측 USRP와 Ethernet (1 Gbps)으로 연결하였다. PC2는 단말 기능을 수행하도록 설정하였으며, 단말 측 USRP와 Peripheral Component Interconnect Express (PCIe) Gen1 x4 (8 Gbps)로 연결하였다. 두 USRP 사이에는 동축선 2개를 연결하여 하향 및 상향

신호 경로를 분리하였다. 이를 통해 외부 무선 환경의 영향을 줄이고, 동일한 조건에서 LTE 기지국-단말 접속 절차를 검증할 수 있도록 하였다.

소프트웨어 환경은 우분투 22.04 LTS, srsRAN 4G, USRP Hardware Driver (UHD), NI-RIO 드라이버로 구성하였다. srsRAN 4G는 코어망, 기지국, 단말 기능을 소프트웨어로 구동하고 LTE 무선 설정값을 지정하는 데 사용하였다. PC1에서는 UHD를 통해 Ethernet 기반 기지국 측 USRP를 제어하였고, PC2에서는 UHD와 NI-RIO 드라이버를 통해 PCIe Gen1 x4 기반 단말 측 USRP를 인식 및 제어하였다. 즉, srsRAN 4G에서 설정한 주파수, 대역폭, 이득 등의 LTE 무선 파라미터는 UHD를 통해 USRP 장비에 적용되어 실제 송수신 동작에 반영된다.

본 실험에서는 동축선 직접 연결 환경에서 장비 입력 과부하를 방지하고 안정적인 송수신을 확인하기 위해 기지국과 단말의 송신 및 수신 이득 값을 모두 0 dB로 설정하였다. 기지국은 하향 주파수 2680.0 MHz, 상향 주파수 2560.0 MHz에서 동작하도록 설정하였다. LTE 셀은 주파수 분할 이중화 방식인 Frequency Division Duplex (FDD)로 구성하였고, 대역폭은 6개의 물리 자원 블록을 사용하는 1.4 MHz 채널 대역폭으로 설정하였다. 이러한 설정을 통해 낮은 출력 조건에서 LTE 접속 및 기본 데이터 통신을 검증하였다.

3.2 실험 결과

구성한 실험 환경에서 LTE 접속 절차와 데이터 통신을 검증하였다. 그림 3은 단말 로그 기반 LTE 기지국-단말 접속 및 데이터 통신 절차의 검증 결과를 나타낸다. 단말 로그에서는 그림 1에서 제시한 LTE 접속 및 데이터 통신 절차가 순차적으로 수행된 것을 확인할 수 있다. Found Cell 항목은 PCI 1의 셀 탐색·동기 단계를, Found PLMN 항목은 Public Land Mobile Network (PLMN) 00101 및 Tracking Area

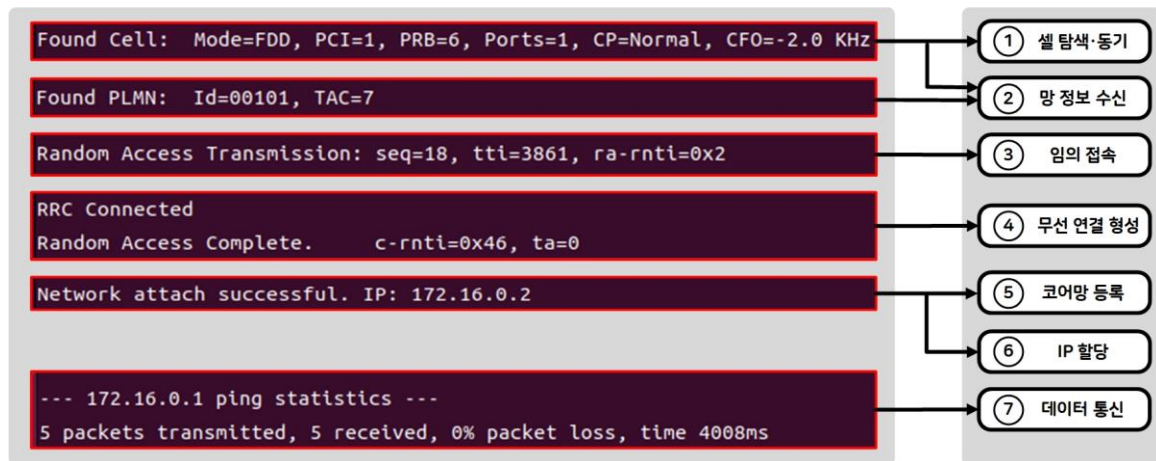


그림 3. 단말 로그 기반 LTE 기지국-단말 접속 및 데이터 통신 절차 검증

Code (TAC) 7 기반의 망 정보 수신 단계를 나타낸다. 또한 Random Access Transmission 항목은 PRACH 프리앰블 송신 기반의 임의 접속 절차에 해당하며, RRC Connected 및 Random Access Complete 항목은 무선 연결 형성 완료를 의미한다. 이후 Network attach successful 및 IP: 172.16.0.2 항목을 통해 코어망 등록과 IP 할당이 정상적으로 수행되었음을 확인하였다. 접속 완료 후에는 단말이 코어망 주소 172.16.0.1로 Internet Control Message Protocol (ICMP) 요청 패킷 5개를 송신하고 5개의 응답 패킷을 수신하였으며, 패킷 손실률 0%를 통해 단말과 코어망 사이의 데이터 통신이 정상적으로 이루어졌음을 확인하였다.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 USRP 2대와 개인용 컴퓨터 2대를 이용하여 LTE 기지국-단말 통신 모사 환경을 구성하고, 접속 절차와 데이터 통신을 검증하였다. 실험 결과, 단말의 셀 탐색, 시스템 정보 수신, 임의 접속, 무선 제어 연결, 코어망 등록 및 IP 주소 할당이 순차적으로 수행되었으며, 핑 시험을 통해 패킷 손실률 0%의 IP 패킷 송수신을 확인하였다. 또한 동축선 기반 환경에서 외부 무선 환경 변수를 줄이고, LTE 접속 및 데이터 통신을 안정적으로 확인하였다.

이를 통해 제안한 USRP 기반 LTE 기지국-단말 통신 모사 환경에서 LTE 접속 절차와 IP 기반 데이터 통신이 정상적으로 수행됨을 확인하였다. 향후에는 동일한 Software Defined Radio (SDR) 기반 실험 구조를 5G 기반 기지국-단말 통신 테스트베드로 확장하여 접속 절차와 데이터 통신 검증에 활용하고자 한다[4].

Acknowledgments

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) (No. 2022R1A5A8026986) and the Ministry of Science and ICT (MSIT) under the ITRC program (IITP-2025-RS-2024-00436406 (50%)) supervised by the IITP (Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

참고문헌

- [1] YEOH, Chun Yeow, et al. Performance Study of LTE Experimental Testbed using OpenAirInterface. In: 2016 International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE, 2016. p. 621-626.
- [2] GOMEZ-MIGUELEZ, Ismael, et al. srsLTE: An Open-Source Platform for LTE Evolution and Experimentation. In: 10th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization (WiNTECH). ACM, 2016. p.25-32.
- [3] 3GPP TS 36.300: E-UTRA and E-UTRAN; Overall Description; stage 2, 3rd Generation Partnership Project.
- [4] NIKAEIN, Navid, et al. OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research. Computer Communication Review, 2014, vol. 44, no. 5, p. 33-38.