

오픈소스를 활용한 End-to-End 지능형 이동통신 네트워크 구축

권혁선, 최호성, 이상연, 김건, 이성진, 이종석, 김유빈, 유현민, 김우중*, 홍인기
경희대학교, *인텔 코퍼레이션

gurtjs@khu.ac.kr, to6044@khu.ac.kr, sangyeon@khu.ac.kr, ssjj3552@khu.ac.kr, howrhee@khu.ac.kr,
dbqls15@khu.ac.kr, yhm1620@khu.ac.kr *woojoong.kim@intel.com, ekhong@khu.ac.kr

Implementation of an End-to-End Intelligent Mobile Network using Open Source

Hyuksun Kwon, Hoseong Choi, Sangyeon Lee, Geon Kim, Sungjin Lee, Jongseok Rhee, Yuvin Kim,
Hyunmin Yoo, Woojoong Kim*, Een Kee Hong
Kyunghee University, *Intel Corporation

요약

본 연구에서는 범용 하드웨어와 오픈소스로 공개되는 OpenAirInterface (OAI)의 DU/CU 소프트웨어, Aether 프로젝트의 SD-RAN 소프트웨어를 활용하여 end-to-end 지능형 이동통신 네트워크를 구축하는 과정을 소개한다. 기존의 독립적이고 비용이 높은 이동통신 장비 시장의 진입 장벽을 낮추기 위해 software-defined RAN 및 open RAN 기술과 private 5G 기술을 사용하였다. Software-defined Radio (SDR) 장비와 범용 서버를 활용하여 구축한 네트워크에 상용 단말기를 연동하고, 네트워크에서 발생하는 로그를 분석하여 3GPP 표준 준수 여부를 확인하였다. 이를 통해 학계에서도 저비용으로 네트워크를 구축하고 연구 및 성능 최적화를 시도할 수 있는 방향성을 제시한다.

I. 서론

서버 엔터프라이즈 및 인공지능 분야에서 큰 성공을 거둔 오픈소스 생태계가 통신 분야에 접어들어 따라, 독립적으로 이루어졌던 이동통신 장비 시장의 진입 장벽이 대폭 낮아지게 되었다 [1], [2]. 더 나아가, 오픈소스로 공개된 radio access network (RAN) 및 Core 소프트웨어가 등장함에 따라, 사용자가 직접 이동통신 네트워크를 구축할 수 있게 되었다 [3], [4]. 본 논문에서는 범용 하드웨어와 오픈소스 소프트웨어를 활용하여 사용자가 직접 이동통신 네트워크의 구조를 설계하고 구축하는 과정을 소개한다. 또한 구축한 네트워크에 상용 단말기를 연동하여 해당 네트워크의 상용화 및 연구 개발 측면에서의 가능성을 입증한다.

II. 본론

기존에는 전 세계 이동통신 장비 시장을 특정 장비사가 독점하고, 각 나라마다 소수의 이동통신사가 주파수를 독점하는 형태로 구성되어 있어 학계에서 이동통신 네트워크 시스템을 구축하는 것은 비용적으로 큰 어려움이 있었다. 본 연구에서는 software-defined RAN 및 open RAN 기술, private 5G 기술을 활용하여 직접 이동통신 네트워크를 구축하는 데 성공하였다.

A. Software-defined RAN

하드웨어 기반 프로그래밍은 고난이도의 hardware description language (HDL)를 활용하여 논리를 설계하고 물리적인 회로를 직접 반도체 공정을 거쳐 생산해야 하기 때문에 일반 사용자가 접근하는 것이 거의 불가능하다. 반면, 소프트웨어 기반 프로그래밍은 C++나 Python 등의 대중적인 언어를 사용하므로 더 많은 개발자에게 열려 있으며, 범용 하드웨어만 확보되면 자유롭게 프로그래밍이 가능하다. 기존에는 소프트웨어 기반으로 RAN을 구성하는 것이 성능의 한계가 있었지만, 컴퓨팅 파워의 발전으로 인해 해당 접근법으로도 네트워크의 요구사항을 충족할 수 있게 되었다. 따라서 범용 하드웨어에 오픈소스 RAN 소프트웨어를 빌드하여 유연성과 확장성을 극대화할 수 있는 software-defined RAN 기술이 도입되었다.

B. Open RAN

Open RAN은 기존의 RAN을 개방형 표준과 인터페이스로 전환하여 유연성과 확장성을 향상시키는 것을 목표로 한다. 핵심 원칙은 open standard와 open interface를 통해 다양한 벤더의 장비가 상호 운용될 수 있도록 하고, 지능형 기능을 담당하는 RAN intelligent controller (RIC)을 도입하여 네트워크의 성능을 지능적으로 개선하는 xApp, rApp이라는 소프트웨어 어플리케이션을 제공하는 것이다. 이러한 표준과 인터페이스는 네트워크 운영자에게 특정 장비사에 종속되지 않는 유연한 솔루션 통합을 가능케 하며, RAN의 각 구성 요소 간 원활한 통신을 보장한다.

특히, open RAN은 whitebox 하드웨어를 활용해 RAN을 구축할 수 있는 것이 큰 장점이다. 화이트박스 하드웨어는 벤더 종속 전용 장비를 대체하며, 범용 네트워크 장비로 구성되어 비용 절감 및 확장성 향상에 기여한다. 또한 open RAN은 오픈소스 생태계를 형성하는 것을 장려하며, 소프트웨어 구성 요소는 마이크로서비스(microservices) 형태로 제공되어 네트워크 기능을 유연하게 추가, 삭제, 수정할 수 있다. 이러한 마이크로서비스는 범용 오픈소스 도구를 통해 구현되어 네트워크 구축과 관리의 진입 장벽을 낮추고, RIC 내에서 구동되는 xApps와 rApps를 통해 네트워크 최적화 및 관리를 지원한다.

C. Private 5G

Private 5G는 이동통신사 주파수와는 별도로, 특정 사용자가 구독형으로 사용할 수 있는 주파수이다. 특정 조직이 독립적으로 폐쇄형 모바일 네트워크를 운영할 수 있어 고도의 보안을 제공한다. 주파수는 각 나라별로 정해진 특정 주파수 대역에서 운영된다. 특히 Private 5G는 산업 분야에서 주목받고 있으며, 제조 현장의 수많은 기기들이 네트워크에 연결되어 실시간으로 데이터를 처리하고, 자동화 시스템을 운영하는데 강점을 갖는다.

D. End-to-end 지능형 이동통신 네트워크 구축 과정

본 연구에서는 범용 radio unit (RU) 장비인 USRP B210을 통해 무선 신호 처리부를 구성하고, 범용 서버 Intel NUC과 오픈소스 소프트웨어를 활용하여 DU/CU, 실시간 RIC, Core를 구성하였다 (그림 1). DU/CU 소프트웨어로는 OpenAirInterface (OAI), RIC과 Core, 지능형 인터페이스

소프트웨어로는 SD-RAN 프로젝트에서 제공하는 오픈소스 소프트웨어를 사용하였다. 이러한 오픈소스 활용은 네트워크 기술 진입 장벽을 낮추고, RAN 스택과 컨트롤러의 가상화를 통해 연구 커뮤니티가 새로운 아이디어를 시험할 수 있는 환경을 제공한다.

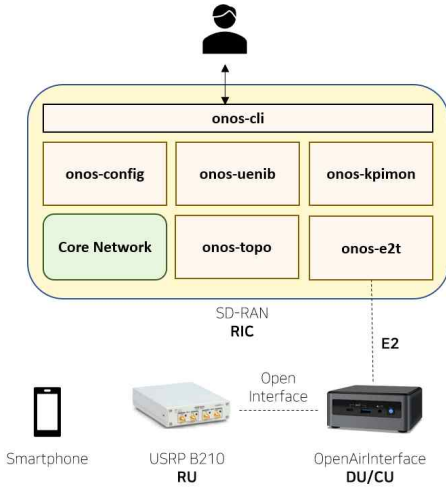


그림 1. End-to-end 지능형 이동통신 네트워크 구조

SD-RAN 프로젝트는 OAI DU/CU가 실시간 RIC과 호환될 수 있도록 커스터마이징하여 O-RAN 표준에서 지정한 E2 인터페이스를 에뮬레이트하였다. 결과적으로 기지국과 코어 네트워크 간의 인터페이스는 E2AP를 준용하여 E2 메시지를 송수신을 확인할 수 있었고 기존 3GPP 표준과의 호환성을 유지하였다 [2].

네트워크 구축이 완료되고 단말 연결을 테스트하기 위해서 상용 단말 (Samsung Galaxy J5)에 범용 USIM 칩을 장착하여 테스트를 진행하였다. 테스트에 사용된 USIM 칩은 자체 구축한 Core 기능들 중 mobility management entity (mme), home subscriber server (hss)와 호환되는 public land mobile network (PLMN), international mobile subscriber identity (IMSI) 등의 설정들을 적용하였다.

3GPP 표준에 따르면, DU는 random access 절차에서 단말에 임시 C-RNTI를 할당하며, 이후 RRC 연결이 완료되며 C-RNTI가 할당되어 단말과의 통신을 관리한다 [6]. CU에서 생성되는 RRC 연결 설정 메시지인 RRCConnectionSetup은 단말의 연결 요청인 RRCConnectionRequest에 대한 응답으로 DU를 통해 단말로 전송된다. 반대로 네트워크는 단말의 비정상 종료나 연결 끊김을 감지한 후, 자체적으로 UE Context Release Request를 생성하여 연결을 해제하게 된다. 이는 F1AP 프로토콜을 통해 CU가 DU로 전달하는 명령으로, 네트워크에서 사용되던 자원을 회수하고 연결을 공식적으로 종료하는 역할을 한다.

실제로 단말이 자체적으로 구축한 네트워크에 연결되고 해제되는 과정에서 DU/CU에 다양한 로그들이 출력되는 것을 확인하였다. 그림 2과 그림 3은 실제로 단말이 네트워크에 연결 및 해제되면서 CU에 출력된 로그의 일부이다.

```
[F1AP] [F1AP] Received UE CONTEXT RELEASE REQUEST: Trigger RRC for RNTI cb86
[F1AP] CU Task Received F1AP_UE_CONTEXT_RELEASE_CMD
[SCTP] Successfully sent 31 bytes on stream 0 for assoc_id 584
[SCTP] Successfully sent 27 bytes on stream 1 for assoc_id 582
[SCTP] Found data for descriptor 91
[SCTP] Received notification for id 91, type 32777
[SCTP] Found data for descriptor 91
[SCTP] [GSM] Msg of length 21 received from port 38923, on stream 0, PPID 62
[F1AP] CU Task Received SCTP_DATA_IND for Instance 0
[F1AP] Calling handler with instance 0
[F1AP] F1AP_decode_successful_outcome(): F1AP_ProcedureCode_id_UEContextRelease
[F1AP] SIAP removed entry in hashtable siap_id2_siap_ids for eNB_ue_siap_id 14951629
[RRC] SIAP removed entry in hashtable initial_id2_siap_ids for ue_initial_id 1
[F1AP] Removed UE context eNB_ue_siap_id 14951629
[SCTP] Successfully sent 21 bytes on stream 1 for assoc_id 582
[RRC] ===== RRC STATE TRANSITION ===== [RABs: 1 0 5 9*****]
[RRC] [FRAME 00000][MID 00][RNTI cb86] Removed UE context
[LOG] removed_id = 919 cb86
[F1AP] Received UE CONTEXT RELEASE COMPLETE: Removing CU entry for RNTI cb86
```

그림 2. 단말 연결 시 CU 로그

```
[F1AP] Received UE CONTEXT RELEASE REQUEST: Trigger RRC for RNTI cb86
[F1AP] CU Task Received F1AP_UE_CONTEXT_RELEASE_CMD
[SCTP] Successfully sent 31 bytes on stream 0 for assoc_id 584
[SCTP] Successfully sent 27 bytes on stream 1 for assoc_id 582
[SCTP] Found data for descriptor 91
[SCTP] Received notification for id 91, type 32777
[SCTP] Found data for descriptor 91
[SCTP] [GSM] Msg of length 21 received from port 38923, on stream 0, PPID 62
[F1AP] CU Task Received SCTP_DATA_IND for Instance 0
[F1AP] Calling handler with instance 0
[F1AP] F1AP_decode_successful_outcome(): F1AP_ProcedureCode_id_UEContextRelease
[F1AP] SIAP removed entry in hashtable siap_id2_siap_ids for eNB_ue_siap_id 14951629
[RRC] SIAP removed entry in hashtable initial_id2_siap_ids for ue_initial_id 1
[F1AP] Removed UE context eNB_ue_siap_id 14951629
[SCTP] Successfully sent 21 bytes on stream 1 for assoc_id 582
[RRC] ===== RRC STATE TRANSITION ===== [RABs: 1 0 5 9*****]
[RRC] [FRAME 00000][MID 00][RNTI cb86] Removed UE context
[LOG] removed_id = 919 cb86
[F1AP] Received UE CONTEXT RELEASE COMPLETE: Removing CU entry for RNTI cb86
```

그림 3. 단말 연결해제 시 CU 로그

결과적으로 DU/CU 로그를 통해 이러한 과정이 3GPP 표준과 일치함을 확인할 수 있었다. 특히 단말이 네트워크에 연결되고 해제되는 절차에서 나타난 로그들은, 표준에서 정의된 RRC 메시지와 F1AP 프로토콜이 비교적 정확히 적용되어 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 본 연구에서 구축한 오픈소스 기반의 이동통신 네트워크가 3GPP 표준과의 적합성을 갖추고 있음을 검증할 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 이동통신 분야의 최신 기술과 오픈소스 소프트웨어를 통합하여 end-to-end 지능형 이동통신 네트워크를 구축하는 과정을 소개하였다. 그리고 실시간 로그를 분석하여 네트워크가 통신 표준을 준수함을 확인하여 구축한 네트워크의 신뢰성을 높였다. 결과적으로 open RAN 및 오픈소스 문화의 이점인 다양한 벤더의 상호 운용성과 쉬운 접근성을 통하여 연구 환경에서도 저비용으로 네트워크를 구축하고 성능을 최적화할 수 있는 가능성을 제시한다. 기존 이동통신 연구는 시뮬레이션 기반의 수학적 알고리즘 개발 위주로 진행되어 실제 시스템을 다루기 어렵다는 한계가 있었다. 본 연구를 통하여, 학계에서 직접 이동통신 시스템을 구축하고 소프트웨어 기술력을 강화하는 방향으로 이동통신 연구의 패러다임이 전환될 수 있도록 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

“이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2024-2021-0-02046)”
 “이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 정보통신방송기술국제공동연구사업 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2022-00207387, 5G Open RAN 기반 지능형 네트워크 슬라이싱 기술 개발)”
 “이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2024-00397520, 5G 버티컬 서비스를 위한 가상화 기반 경량형 5G 올인원 시스템 개발)”
 (Hyuksun Kwon and Hoseong Choi are co-first authors.)

참고 문헌

- [1] Sasha Sirotkin, 5G Radio Access Network Architecture: The Dark Side of 5G, John Wiley & Sons, 2020.
- [2] 유현민, 홍인기, “오픈소스를 활용한 Open RAN 테스트베드 구현 및 결과 분석,” 한국통신학회논문지, vol. 49, no. 8, pp.1159–1169, 2024.
- [3] P. Schwentek, G. T. Nguyen, H. Boche, W. Kellerer and F. H. P. Fitzek, “6G Perspective of Mobile Network Operators, Manufacturers, and Verticals,” in IEEE Networking Letters, vol. 5, no. 3, pp. 169–172, Sept. 2023.
- [4] M. Hoffmann et al., “Open RAN xApps Design and Evaluation: Lessons Learnt and Identified Challenges,” in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 42, no. 2, pp. 473–486, Feb. 2024.
- [5] M. Polesse, L. Bonati, S. D’Oro, S. Basagni and T. Melodia, “Unders tanding O-RAN: Architecture, Interfaces, Algorithms, Security, and Research Challenges,” in IEEE Communications Surveys & Tutorial s, vol. 25, no. 2, pp. 1376–1411, Secondquarter 2023.
- [6] 3GPP, “5G; NG-RAN; F1 Application Protocol (F1AP),” ETSI TS 138 473 V15.16.0, Release 15, Jan. 2022.