

Simulation of Mobile Network Implementation With srsLTE and OAI

Moch. Fahru Rizal ^{#1}, Prajna Deshanta Ibnugraha ^{#2}, Sandy Krisna Mukti ^{#3}, Malik Abdul Aziz ^{#4}

School of Applied Science, Telkom University, Bandung, Indonesia

¹ mfrizal@telkomuniversity.ac.id

² prajna@telkomuniversity.ac.id

³ sandykm@student.telkomuniversity.ac.id

⁴ malikabdulazis@student.telkomuniversity.ac.id

Abstract

Open Air Interface is a telecommunications infrastructure development platform that aims to create an open source 4G/5G telecommunications network. This technology can replace commercial 4G/5G network infrastructure and or interconnect with existing 4G/5G cellular networks. This study aims to create test-beds of 4G OAI and srsLTE in a limited non-commercial scope, using USRP B205-mini and B210 which runs 4G standard cellular services using a single-site scheme. The results of srsLTE and OAI integration have adequate performance in power of -32.6 dBm and a Power to Signal Ratio of 19.54 dB.

Keywords: Open Air Interface, srsLTE, EPC, 4G Test-bed

Abstrak

Open Air Interface merupakan platform pengembangan infrastruktur telekomunikasi yang bertujuan menciptakan jaringan telekomunikasi 4G/5G yang bersifat *opensource*. Teknologi ini mampu menggantikan infrastruktur jaringan 4G/5G komersial dan atau melakukan interkoneksi dengan jaringan seluler 4G/5G yang sudah ada. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan implementasi test-bed 4G OAI dan srsLTE di lingkup terbatas non komersial dengan menggunakan USRP B205-mini dan B210 yang menjalankan layanan standar seluler 4G dengan skema single-site. Hasil pengujian dari infrastruktur tersebut mampu menghasilkan *power* sebesar -32.6 dBm dan Power to Signal Ratio sebesar 19.54 dB.

Kata kunci : Open Air Interface, srsLTE, EPC, 4G Test-bed

I. PENDAHULUAN

Telekomunikasi merupakan kebutuhan primer untuk saat ini. Salah satu dukungan layanan telekomunikasi tersebut adalah infrastruktur. Namun jangkauan infrastruktur telekomunikasi tersebut tidak selalu memiliki cakupan yang baik. Hal tersebut dapat disebabkan oleh hambatan teknis, ekonomis ataupun lokasi yang terpencil. Untuk menjawab tantangan tersebut, salah satu solusi yang dapat diusulkan adalah pembangunan infrastruktur telekomunikasi pada lingkungan non-komersil dan mandiri. Hal tersebut menjadi tujuan dari penelitian ini dengan mengusulkan dan membuat implementasi *test-beds single site 4G cellular services*.

Komponen utama yang dapat dilibatkan dalam implementasi tersebut adalah OAI (Open Air Interface) dan srsLTE. Komponen OAI menyediakan implementasi yang sesuai standar dari subset Rilis 10 LTE, termasuk elemen kunci dari jaringan seperti UE, eNB, MME, HSS, SGW dan PGW pada peralatan komputasi standar berbasis Linux. OAI adalah sebuah platform perangkat lunak sumber terbuka yang digunakan untuk

pengembangan teknologi komunikasi nirkabel, terutama dalam konteks jaringan seluler seperti 4G (LTE) dan 5G [1]. Platform ini memungkinkan para pengembang untuk merancang, menguji, dan mengimplementasikan berbagai aspek protokol dan teknologi jaringan nirkabel dengan cara yang fleksibel. Salah satu fitur utama dari OAI adalah sifatnya yang *opensource*.

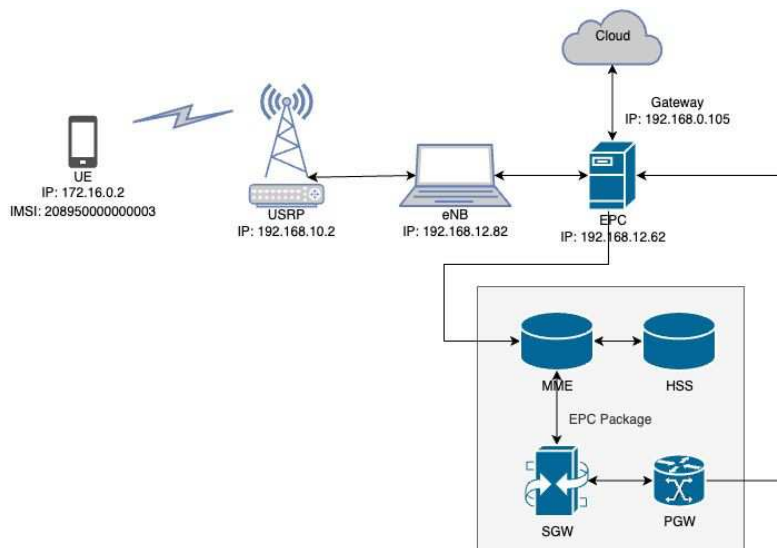
Selain itu, OAI memiliki arsitektur yang modular, sehingga pengguna dapat mengadaptasi komponen-komponen tertentu sesuai dengan kebutuhan pada lapisan fisik, lapisan kontrol akses media, atau protokol lapisan atas. Jika dibandingkan dengan srsLTE, OAI memiliki fitur lengkap dan memberikan kinerja yang baik, namun memiliki struktur kode yang agak rumit [1]. OAI pernah diterapkan dalam berbagai skema test-beds untuk riset maupun praktek pengajaran [2]. Studi kasus lain menunjukkan bahwa OAI dapat digunakan untuk mengimplementasikan, menguji, dan melakukan validasi terkait penjadwalan MAC dalam lingkungan terbatas[3].

Komponen yang lain yaitu srsLTE (softwarized radio system for LTE, saat ini berubah menjadi srsRAN[4]) merupakan platform perangkat lunak *opensource* yang awalnya digunakan untuk mengimplementasikan dan menguji jaringan seluler 4G pada lingkungan terbatas. Platform ini memberikan akses ke berbagai komponen jaringan seperti eNodeB (base station) dan EPC (Evolved Packet Core). srsLTE memiliki beberapa keunggulan antara lain kemampuan untuk beradaptasi dengan berbagai perangkat keras yang berbeda dan mendukung fitur LTE seperti VoLTE (Voice over LTE) dan MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) [5].

Upaya untuk membandingkan antar *opensource* software 4G/5G terdapat dalam thesis Takaam Sadeu (2023) maupun penelitian Reddy R et al (2023) tidak secara spesifik menyebutkan *hybrid* antara OAI dan srsLTE (srsRAN) [6], [7]. Demikian pula artikel oleh Tichy J et al. yang hanya spesifik melakukan pengujian untuk IoT [8]. Sedangkan penelitian yang membahas penggunaan test-bed untuk tujuan spesifik, riset keamanan misalnya pada paper Tichy J et. al, De Britto et. Al, Issa Ali dan lain-lain [8][2][9], [10].

II. ARSITEKTUR DAN METODE

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat yang diintegrasikan dengan *logical addressing*. Arsitektur yang digunakan pada sistem yang diusulkan adalah sebagai berikut:

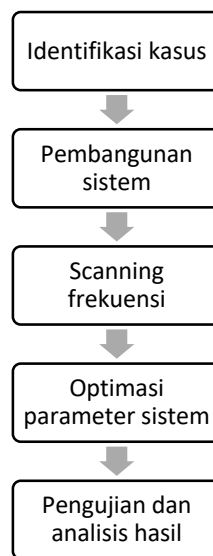


Gambar 1 Arsitektur Sistem

eNB (enhanced NodeB) adalah komponen utama base station dalam jaringan 4G. eNB berfungsi mengatur komunikasi antar perangkat seluler seperti smartphone dan tablet dengan jaringan seluler. Selain itu, eNB juga mengoptimalkan penggunaan spektrum dan memastikan kualitas layanan yang baik. Hal tersebut melibatkan aktivitas manajemen alokasi frekuensi, pengendalian daya, dan proses hand-off antar sel eNB [5].

EPC (Evolved Packet Core) terdiri dari MME (Mobility Management Entity), HSS (Home Subscriber Server), SGW (Serving Gateway), dan PGW (Packet Data Network Gateway). EPC adalah bagian dari jaringan LTE yang mengelola komunikasi data dan suara antara perangkat seluler dan layanan internet. MME bertanggung jawab atas manajemen mobilitas perangkat seluler, sementara HSS menyimpan informasi pengguna dan autentikasi. SGW dan PGW bertindak sebagai gerbang yang menghubungkan perangkat seluler dengan internet. Proses komunikasi dimulai ketika perangkat seluler ingin terhubung ke jaringan. MME bertanggung jawab untuk mengelola permintaan ini dan menginisiasi proses autentikasi dengan bantuan HSS untuk memverifikasi identitas pengguna. Setelah autentikasi berhasil, MME mengarahkan perangkat seluler ke SGW yang akan mengontrol lalu lintas data antara perangkat seluler dan jaringan internet. Selanjutnya, PGW mengatur akses perangkat seluler ke layanan internet dan mengelola alamat IP perangkat seluler. Selama sesi komunikasi, MME terus memantau perangkat seluler dan mengelola perpindahan antar sel eNB. SGW dan PGW memastikan pengiriman data yang efisien dan aman [5].

Penelitian ini membangun arsitektur dan melakukan analisa terkait dengan hasil implementasi secara terstruktur. Proses-proses tersebut dapat ditunjukkan pada diagram blok berikut:



Gambar 2 Tahapan Proses

Penelitian ini menggunakan skema *single site* untuk lingkungan terbatas sebagai studi kasus. Scanning frekuensi dilakukan untuk melihat *existing* network dengan memperhatikan parameter *cell_id*, Detect Ratio, PSR (Power to Signal Ratio) dan Power [11]. Optimasi parameter sistem dilakukan untuk menghasilkan sinyal yang baik. Parameter analisis untuk sistem yang dibangun juga menggunakan variabel yang sama dengan variabel *scanning*.

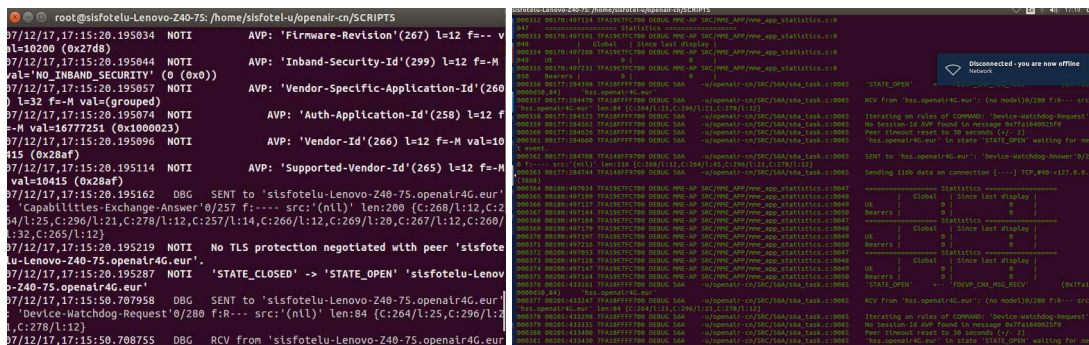
Untuk membatasi *scope* penelitian, maka konfigurasi hanya untuk *single-site* saja dan tidak termasuk aplikasi untuk *multi-site* (handover misalnya). Implementasi test-bed juga dibatasi hanya untuk penggunaan riset dan pembelajaran (misalnya untuk sistem komunikasi seluler), dan tidak untuk kepentingan komersial. Selain itu terdapat limitasi penggunaan frekuensi, sehingga power dari test-bed harus diatur supaya tidak mengganggu frekuensi komersial eksisting yang ada di site.

III. IMPLEMENTASI ARSITEKTUR TESTBEDS

Bagian ini membahas mengenai implementasi *test-beds*, konfigurasi dan tahapan instalasinya.

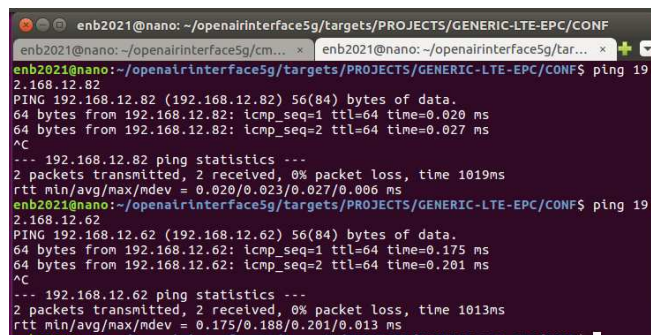
A. Arsitektur eNB dan EPC

Tahapan pertama pada EPC adalah konfigurasi HSS untuk menyimpan data identitas user. Paket tersebut sudah terintegrasi dengan mysql. Konfigurasi pada HSS yaitu mengubah isi file *hss.conf* yaitu pada nama user, password dan nama databasenya. Penambahan identitas IMSI, IMEI dan OPC dilakukan pada tahapan ini juga. Setelah selesai, HSS *certificate* dapat di *generate*. Langkah berikutnya adalah instalasi MME yang berfungsi sebagai kontrol utama pada paket HSS. Setelah itu MME *certificate* dapat di *generate*. Konfigurasi koneksi antara IP EPC dan IP eNb juga dilakukan di *mme.conf* pada tahapan ini. Langkah pengujian koneksi intra HSS-MME ditunjukkan dalam gambar 5 dibawah;



Gambar 3 Uji Koneksi HSS dan MME

Konfigurasi eNb dilakukan secara paralel dengan instalasi UHD sehingga dapat terkoneksi ke USRP. Langkah berikutnya adalah instalasi Ex-MIMO driver, yaitu driver dari antenna perangkat keras USRP B210 agar antenna dapat beroperasi pada mode MIMO. Instalasi OASIM dilakukan supaya monitoring dapat terjadi meski tanpa konektivitas langsung dengan perangkat. OASIM tidak diperlukan jika menggunakan UE untuk pengujian fisik. Setelah konfigurasi eNb dan EPC selesai, maka dilakukan uji koneksi antara kedua subsistem untuk memastikan keduanya bekerja secara bersamaan. Uji koneksi dilakukan dengan ping dan traceroute antara IP eNb dan IP EPC.

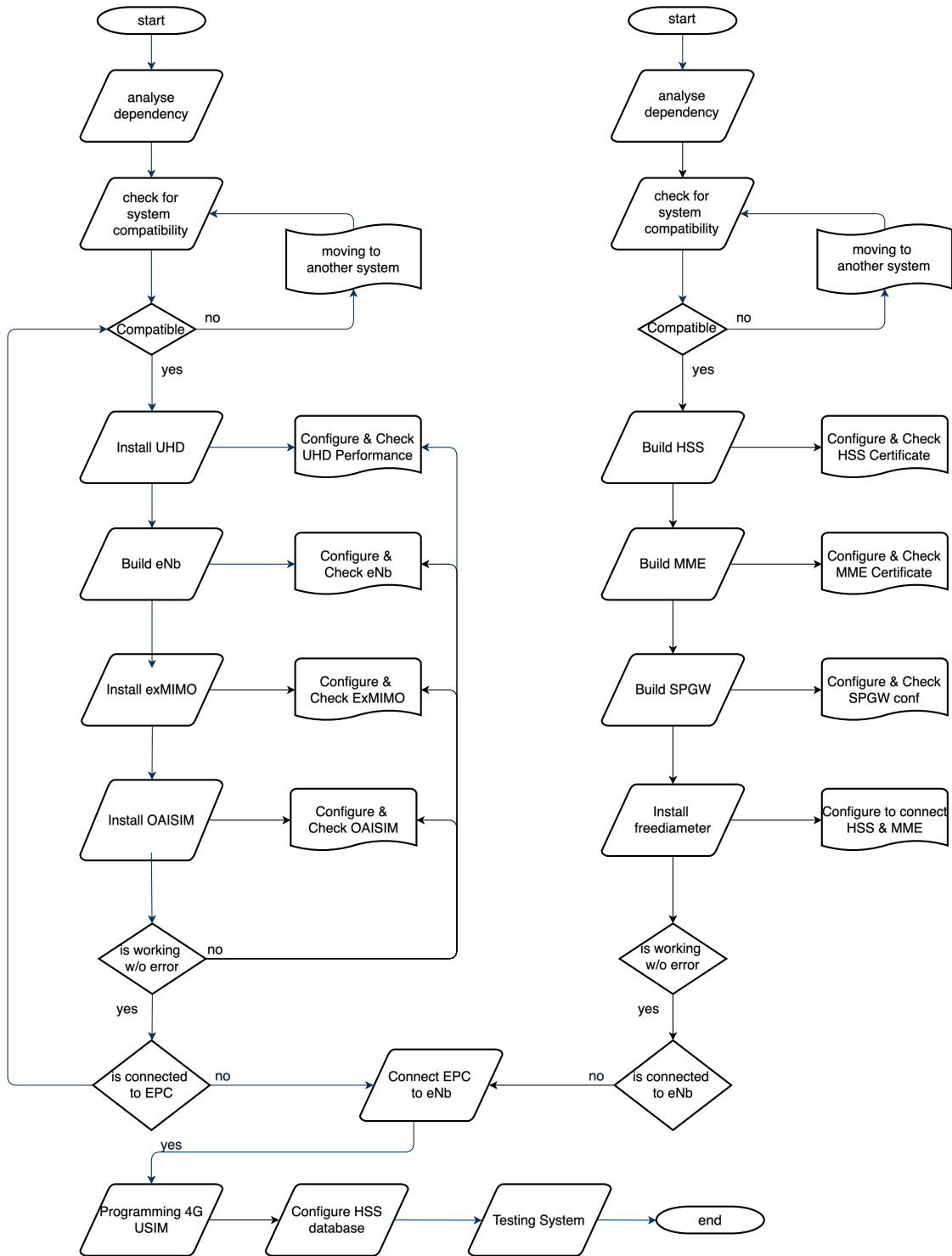


Gambar 4 Uji Koneksi eNb-EPC

Gambar diatas menunjukkan eNB dan EPC sudah bisa berkomunikasi satu sama lain. IP eNB 192.168.12.82/24, dan IP EPC 192.168.12.62/24. Untuk memastikan konektivitas dapat dilakukan dengan cat log sctp antara eNB dan EPC.

B. Flowchart Sistem

Proses konfigurasi dan tahapan instalasi secara lengkap dapat dilihat pada gambar 6 dibawah;



Gambar 5 Tahapan Konfigurasi Testbed eNB (kiri) dan EPC (kanan)

IV. PENGUJIAN DAN HASIL

Untuk pengujian diperlukan perangkat penerima, dalam hal ini adalah srsLTE pada UE. Langkah instalasi pertama adalah instalasi srsGUI dan srsLTE *packages*. Setelah itu koneksi ke eNb dan uji transmit. Gambar dibawah menunjukkan konektivitas antara srsLTE dan OAI. Pengujian terhadap interkoneksi EPC dan eNb menghasilkan *delay* rata-rata 0,243 ms dengan 0% packet loss.



Gambar 6 Konfigurasi Tx-Rx Menggunakan USRP B210

A. Pengujian Monitoring Frekuensi Komersial

Pada pengujian monitoring frekuensi komersial dilakukan dengan perintah `./pdsch_ue -f 2300000000` untuk melakukan scan pada frekuensi 4G 2300 MHz pada lokasi pengujian. Perintah tersebut menghasilkan data sebagai berikut;

```
Searching for cell...
*Found Cell_id: 402 CP: Normal , DetectRatio=33% PSR=1.04, Power=-94.3 dBm
Found Cell_id: 0 CP: Normal , DetectRatio= 0% PSR=0.00, Power=-inf dBm
Found Cell_id: 0 CP: Normal , DetectRatio= 0% PSR=0.00, Power=-inf dBm
Decoding PBCH for cell 402 (N_id_2=0)
```

Gambar 7 Hasil Scan Frekuensi Komersial

Dari capture jaringan mobile di atas, dapat disimpulkan beberapa data berikut:

- Cell ID adalah nomor pengenal sel yang unik. Dalam hal ini, Cell ID-nya adalah 402.
- CP atau Cyclic Prefix menunjukkan kondisi frekuensi. Nilai CP normal berarti frekuensi tersebut dalam kondisi normal dan dapat digunakan untuk transmisi data.
- Detect Ratio menunjukkan kemudahan frekuensi untuk terdeteksi. Nilai Detect Ratio 33% berarti frekuensi tersebut dalam keadaan tidak mudah untuk terdeteksi.
- PSR atau Power to Signal Ratio menunjukkan kekuatan sinyal. Nilai PSR 1.04 dB berarti mendapatkan power untuk menguatkan sinyal sebesar 1.04 dB.
- Power menunjukkan kekuatan sinyal secara keseluruhan. Nilai power -94.3 dBm berarti kekuatan sinyal yang ada pada frekuensi tersebut dalam keadaan kurang baik karena di bawah threshold.

Threshold PSR menurut 3GPP TS 36.101. adalah -100 dBm [11]. Threshold ini bertujuan untuk memastikan bahwa sinyal yang diterima oleh UE cukup kuat untuk dapat diproses dengan baik dan menghasilkan data yang dapat dibaca. PSR adalah parameter yang mengukur kekuatan sinyal yang diterima oleh UE untuk layanan paket. Parameter ini mirip dengan RSRP, tetapi PSR hanya mengukur kekuatan sinyal untuk layanan paket. Jika nilai PSR berada di bawah *threshold*, maka UE mungkin tidak dapat membangun koneksi atau mengalami masalah dalam berkomunikasi untuk layanan paket. Selain *threshold* yang ditentukan oleh 3GPP, operator seluler juga dapat menetapkan *threshold* sendiri berdasarkan faktor-faktor seperti ukuran sel, karakteristik antena, dan tingkat kualitas layanan (QoS) yang diinginkan.

B. Pengujian Transmit-Receive OAI

Dengan skema pengujian pada Gambar 7, maka transmitter OAI dilakukan dengan *syntax* `./pdsch_enb -f 18000000` dan pada receiver diberikan *syntax* `./pdsch_ue -f 18000000` untuk menangkap frekuensi yang sudah dikirimkan eNb.

```

UHD Warning:
The requested decimation is odd; the user should expect CIC rolloff.
Select an even decimation to ensure that a halfband filter is enabled.
decimation = dsp_rate/samp_rate -> 23 = (23.040000 MHz)/(1.000000 MHz)

UHD Warning:
The requested interpolation is odd; the user should expect CIC rolloff.
Select an even interpolation to ensure that a halfband filter is enabled.
interpolation = dsp_rate/samp_rate -> 23 = (23.040000 MHz)/(1.000000 MHz)
Setting sampling rate 5.76 MHz
Set TX gain: 70.0 dB
Set TX freq: 1900.00 MHz
- Resource Allocation Type:                Type 0
+ Resource Block Group Size:              2
+ RBG Bitmap:                             0x1fff
- Modulation and coding scheme index:     1
- HARQ process:                            0
- New data indicator:                      No
- Redundancy version:                      0
- TPC command for PUCCH:                  --
- PRB Bitmap Assignment 0st slot:
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
- PRB Bitmap Assignment 1st slot:
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
- Number of PRBs:                          25
- Modulation type:                          QPSK
- Transport block size:                     904
Type new MCS index and press Enter: UUUUUU*CSIGINT received. Exiting...
Uhdems
root@qalagrnr-X455LAB1:~/wayo/srsLTE/build/srslte/examples#
-- Asking for clock rate 16.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 16.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Asking for clock rate 32.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 32.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
Starting AGC thread...
-- Setting master clock rate selection to 'manual'.
-- Asking for clock rate 30.720000 MHz...
-- Actually got clock rate 30.720000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass

UHD Warning:
The requested decimation is odd; the user should expect CIC rolloff.
Select an even decimation to ensure that a halfband filter is enabled.
decimation = dsp_rate/samp_rate -> 31 = (30.720000 MHz)/(1.000000 MHz)

UHD Warning:
The requested interpolation is odd; the user should expect CIC rolloff.
Select an even interpolation to ensure that a halfband filter is enabled.
interpolation = dsp_rate/samp_rate -> 31 = (30.720000 MHz)/(1.000000 MHz)
Tuning receiver to 1900.000 MHz
Searching for cell...
*Found cell_id: 0 CP: Normal , DetectRatio=100% PSR=19.54, Power=-32.6 dBm
Found Cell_id: 0 CP: Normal , DetectRatio= 0% PSR=0.00, Power=-inf dBm
Found Cell_id: 0 CP: Normal , DetectRatio= 0% PSR=0.00, Power=-inf dBm
Decoding PBCH for cell 0 (N_id_2=0)
-- Asking for clock rate 23.040000 MHz...
-- Actually got clock rate 23.040000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass

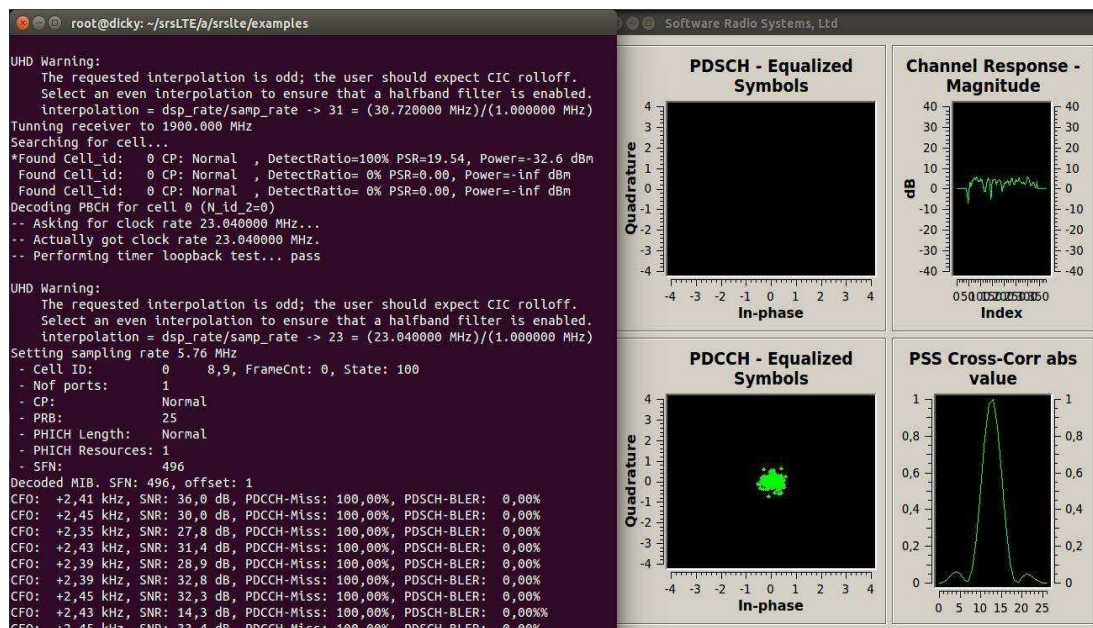
UHD Warning:
The requested interpolation is odd; the user should expect CIC rolloff.
Select an even interpolation to ensure that a halfband filter is enabled.
interpolation = dsp_rate/samp_rate -> 23 = (23.040000 MHz)/(1.000000 MHz)
Setting sampling rate 5.76 MHz
- Cell ID: 0
- Nof ports: 1
- CP: Normal
- PRB: 25
- PHICH Length: Normal
- PHICH Resources: 1
- SFN: 496
Decoded MIB. SFN: 496, offset: 1
CFO: +2.41 kHz, SNR: 36.0 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.45 kHz, SNR: 30.0 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.35 kHz, SNR: 27.8 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.43 kHz, SNR: 31.4 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.39 kHz, SNR: 28.9 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.39 kHz, SNR: 32.8 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.45 kHz, SNR: 32.3 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.43 kHz, SNR: 14.2 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%
CFO: +2.45 kHz, SNR: 33.4 dB, PDCCH-Miss: 100.00%, PDSCH-BLER: 0.00%

```

Gambar 8 Hasil Transmit-Receive OAI

Beberapa data parameter yang didapat dari pengujian TX-RX OAI, yaitu :

- Cell_id 0
- CP atau Cyclic Prefix normal
- DetectRatio 100% (frekuensi tersebut mudah dikenali UE).
- PSR atau Power to Signal Ratio 19.54 dB
- Power sebesar -32.6 dBm (bagus)
- Pengujian dilakukan pada jarak 2m antara eNB dan UE



Gambar 9 Hasil Print Scope Output srsLTE

Hasil *scope* pada Gambar 10 diatas menunjukkan *decoding* PBCH (Physical Broadcast Channel) berdasarkan nomor Cell_id 0;

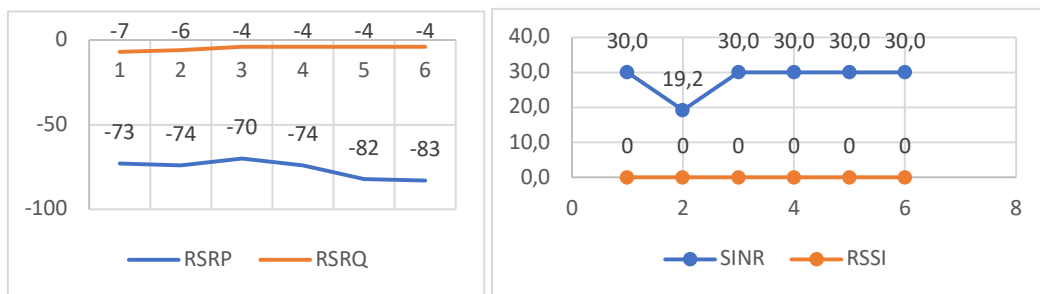
- PHICH (Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel) menunjukkan normal.

- SFN (System Frame Number) 496 (range SFN 0-1023).
- Decoding MIB dari SFN menghasilkan CFO, PDCCH-Miss, SNR dan PDSCH-BLER yang menunjukkan adanya pergeseran frekuensi offset sehingga mengakibatkan downlink control channel tidak diterima. CFO bisa dihindari dengan memindahkan Tx sejauh 2m dari Rx.

C. Pengujian pada UE

Pengujian pada UE dilakukan dengan menggunakan aplikasi NetVelocity dengan mengukur parameter berikut:

- RSRP (*Reference Signal Received Power*)
- RSRQ (*Reference Signal Received Quality*)
- SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*)
- RSSI (*Received Signal Strength Indicator*)



Gambar 10 Pengujian pada UE

Pengujian yang dilakukan, menghasilkan SINR rata-rata sebesar 28,2 db dengan RSSI tidak terdeteksi pada aplikasi. Sedangkan RSRP dan RSRQ rata-rata sebesar -76 db dan -4,83 db, nilai ini sudah memenuhi sesuai dengan standar 3GPP TS 36.101.

V. KESIMPULAN

Implementasi jaringan mobile pada skala simulasi dapat dibangun dengan melibatkan srsLTE dan OAI. Tahapan yang digunakan untuk membangun jaringan mobile tersebut adalah *design-prototyping-evaluation-review* dan *update*. Hasil dari pembangunan tersebut menunjukkan bahwa interkoneksi EPC dan eNb menghasilkan *delay* rata-rata 0,243 ms dengan 0% *packet loss*. Pada TX-RX OAI, Power to Signal Ratio yang dihasilkan adalah sebesar 19.54 dB. Power yang dihasilkan masuk dalam kategori bagus, yaitu sebesar -32.6 dBm pada jarak 2m. Sebagai pengembangan dari penelitian ini, dapat dilanjutkan dengan implementasi *test-bed* pada skala yang lebih luas (coverage maupun capacity). Test-bed yang dibuat dapat dikembangkan pula untuk melewati service yang beragam, misalnya *edge-caching*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "oai / openairinterface5G · GitLab." Accessed: May 05, 2024. [Online]. Available: <https://gitlab.eurecom.fr/oai/openairinterface5g>
- [2] E. De Britto E Silva, N. Slammik-Kriještorac, S. A. Hadiwardoyo, and J. M. Marquez-Barja, "Bringing 4G LTE closer to students: A low-cost testbed for practical teaching and experimentation," *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 126–131, 2020, doi: 10.1145/3411170.3411231.
- [3] F. Kaltenberger, A. P. Silva, A. Gosain, L. Wang, and T. T. Nguyen, "OpenAirInterface: Democratizing innovation in the 5G Era," *Computer Networks*, vol. 176, p. 107284, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.COMNET.2020.107284.
- [4] S. R. S. (SRS), "srsRAN," 2021, [Online]. Available: <https://www.srslte.com/>
- [5] Software Radio Systems, "srsRAN 4G 23.11 Documentation — srsRAN 4G 23.11 documentation." Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/>

- [6] G. J. TAAKAM SADEU, F. DAVOLI, R. BRUSCHI, C. LOMBARDO, and S. MANGIALARDI, "A comparative Analysis for Open-Source Software for 5G Radio Access Network Emulation," 2023. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://unire.unige.it/bitstream/handle/123456789/5630/tesi24425480.pdf?sequence=1>
- [7] R. Reddy, C. Lipps, H. D. Schotten, M. Gundall, and H. Dieter Schotten, "Open Source 5G Core Network Implementations: A Qualitative and Quantitative Analysis," IEEE, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/372677745>
- [8] J. Tichý and I. J. Dostál, "4G TESTING NETWORK FOR IOT DEVICE PENETRATION TESTING SUPPORT," 2023. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/109574/F8-BP-2023-Tichy-Jakub-thesis.pdf?sequence=-1>
- [9] N. and K. N. and C. A. Issa Ali and Hakem, "Performance Analysis of Mobile Network Software Testbed," in *Human Centred Intelligent Systems*, R. J. and J. L. C. Zimmermann Alfred and Howlett, Ed., Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 305–319.
- [10] S. Wu, P. L. Yeoh, W. Hardjawana, and B. Vucetic, "Identifying Security and Privacy Vulnerabilities in 4G LTE and IoT Communications Networks," in *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2021, pp. 512–517. doi: 10.1109/WF-IoT51360.2021.9595689.
- [11] TSGR, "TS 136 101 - V14.3.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14)," 2017. [Online]. Available: <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>