НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра обчислювальної техніки

ЗВІТ

з дисципліни «Мобільні мережі»

на тему:

«Розгортання тестового стенду 5G мережі з системою моніторингу метрик»

Виконав:
студент групи ІО-26
Ярослав Латипов

Перевірив:
Юрій Кулаков

Київ — 2025

Зміст

1 Вступ

Мережі п’ятого покоління (5G) є ключовою технологією сучасних телекомунікацій, що забезпечує високу швидкість передачі даних, низьку затримку та підтримку великої кількості підключених пристроїв. Для дослідження та тестування 5G протоколів необхідне створення тестового середовища, яке дозволяє моделювати роботу мережі без фізичного обладнання.

Мета роботи: розгорнути повнофункціональний тестовий стенд 5G мережі з автоматичним збором метрик та візуалізацією продуктивності.

Завдання:

- Розгорнути ядро 5G мережі (5G Core Network) на базі Open5GS
- Налаштувати симулятор радіомережі UERANSIM
- Реалізувати систему збору метрик з використанням InfluxDB
- Створити дашборд для візуалізації метрик в Grafana
- Імплементувати симулятор трафіку з різними моделями поведінки користувачів

2 Архітектура системи

2.1 Компоненти 5G Core Network

Для побудови ядра мережі використано Open5GS v2.7.6 — відкриту реалізацію 5G Standalone Architecture. Система включає 11 мережевих функцій (Network Functions):

- **AMF** (Access and Mobility Management Function) — управління доступом та мобільністю

- **SMF** (Session Management Function) — управління сесіями передачі даних
- **UPF** (User Plane Function) — обробка користувацького трафіку
- **NRF** (NF Repository Function) — реєстр мережевих функцій
- **SCP** (Service Communication Proxy) — проксі для міжсервісної комунікації
- **AUSF** (Authentication Server Function) — сервер автентифікації
- **UDM** (Unified Data Management) — управління даними користувачів
- **UDR** (Unified Data Repository) — репозиторій даних
- **PCF** (Policy Control Function) — управління політиками QoS
- **NSSF** (Network Slice Selection Function) — вибір мережевого зрізу
- **BSF** (Binding Support Function) — підтримка прив’язки сесій

2.2 Симулятор радіомережі

UERANSIM v3.2.7 використано для симуляції gNB (базової станції 5G) та UE (користувацьких пристроїв). Симулятор підтримує протоколи NGAP (зв’язок з AMF), NAS (Non-Access Stratum) та RRC (Radio Resource Control).

2.3 Мережева топологія

Всі компоненти розгорнуто в Docker-контейнерах у виділеній мережі 10.10.0.0/16 зі статичним призначенням IP-адрес:

- MongoDB: 10.10.0.2 (база даних підписників)
- NRF: 10.10.0.12, SCP: 10.10.0.35
- AMF: 10.10.0.50, SMF: 10.10.0.7, UPF: 10.10.0.8
- PCF: 10.10.0.27, AUSF: 10.10.0.11, UDM: 10.10.0.13
- UERANSIM gNB: 10.10.0.23

3 Реалізація

3.1 Контейнеризація

Створено Docker-образ для Open5GS з увімкненими Prometheus метриками на порту 9090. Для кожної мережевої функції реалізовано:

1. Шаблони конфігураційних файлів YAML з плейсхолдерами змінних
2. Ініціалізаційні скрипти для підстановки IP-адрес через sed
3. Автоматичний запуск демона після конфігурації

Приклад опису сервісу AMF в docker-compose.yml:

Лістинг 1: Docker Compose конфігурація AMF

```
amf:
  image: open5gs:local
  container_name: amf
  depends_on:
```

```
    - nrf
    - scp
  env_file:
    - .env
  volumes:
    - ./config-templates/amf:/mnt/amf
    - ./log:/var/log/open5gs
  networks:
    net5g:
      ipv4_address: ${AMF_IP}
  command: /bin/bash /mnt/amf/amf_init.sh
```

Ініціалізаційний скрипт виконує підстановку змінних та запуск сервісу:

Лістинг 2: Ініціалізаційний скрипт AMF

```
#!/bin/bash
cp /mnt/amf/amf.yaml /etc/open5gs/

sed -i 's|AMF_IP|'$AMF_IP'|g' /etc/open5gs/amf.yaml
sed -i 's|SCP_IP|'$SCP_IP'|g' /etc/open5gs/amf.yaml
sed -i 's|NRF_IP|'$NRF_IP'|g' /etc/open5gs/amf.yaml

exec open5gs-amfd -c /etc/open5gs/amf.yaml
```

3.2 Service Discovery

Всі мережеві функції реєструються в NRF та взаємодіють через SCP, що забезпечує:

- Централізоване виявлення сервісів
- Балансування навантаження
- Відмовостійкість системи

Конфігурація SMF для взаємодії через SCP:

Лістинг 3: Фрагмент конфігурації SMF

```
smf:
  sbi:
```

```
    server:
      - address: SMF_IP
        port: 7777
    client:
      scp:
        - uri: http://SCP_IP:7777
  pfcp:
    client:
      upf:
        - address: UPF_IP
  session:
    - subnet: 10.45.0.0/16
      dnn: internet
```

3.3 Аутентифікація UE

В MongoDB зареєстровано 10 підписників з наступними параметрами безпеки:

- IMSI: 286010000000001-010 (MCC=286, MNC=01)
- Алгоритм: MILENAGE (K, OP, AMF)
- Network Slice: SST=1 (eMBB)
- DNN: internet

3.4 Симуляція трафіку

Розроблено скрипт автоматизованої симуляції з 5 моделями поведінки користувачів:

1. **Browsing** — переривчастий трафік (імітація веб-серфінгу)
2. **Streaming** — постійний інтенсивний трафік (відео)
3. **Messaging** — рідкісні короткі пакети (месенджери)
4. **Idle** — мінімальний keepalive трафік

5. **Downloading** — пульсуючі періоди високого навантаження

Приклад реалізації моделі поведінки:

Лістинг 4: Функція симуляції трафіку

```
start_ue() {
    local ue_num=$1
    local behavior=$2

    docker exec -d ueransim bash -c \
        "cd /root/ueransim/build && \
         ./nr-ue -c /tmp/ue-$ue_num.yaml"

    sleep 5

    case $behavior in
        "streaming")
            docker exec -d ueransim bash -c \
                "ping -I uesimtun$((ue_num-1)) \
                 -i 0.2 8.8.8.8"
            ;;
        "browsing")
            docker exec -d ueransim bash -c \
                "while true; do \
                   ping -c 5 -i 0.5 8.8.8.8; \
                   sleep 10; \
                 done"
            ;;
    esac
}
```

Симулятор автоматично змінює кількість активних UE та їх поведінку кожні 30 секунд для створення реалістичного навантаження.

4 Система моніторингу

4.1 Збір метрик

Створено Python-колектор на базі influxdb-client, що виконує:

1. Запит Prometheus-ендпоінтів всіх NF кожні 30 секунд
2. Парсинг метрик формату Prometheus (підтримка labels)
3. Розрахунок KPI (Key Performance Indicators):
    - Кількість підключених пристроїв (Connected Devices)
    - Активні сесії на рівні AMF
    - PDU-сесії з QoS-політиками (SMF)
    - Сесії користувацької площини (UPF)
    - Час безвідмовної роботи мережі
4. Запис у дві таблиці InfluxDB:
    - `5g_metrics` — сирі метрики з тегами
    - `network_kpi` — агреговані KPI

Фрагмент коду колектора метрик:

Лістинг 5: Python-колектор метрик

```
from influxdb_client import InfluxDBClient, Point
from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS
import requests

ENDPOINTS = {
    'amf': 'http://10.10.0.50:9090/metrics',
    'smf': 'http://10.10.0.7:9090/metrics',
}

client = InfluxDBClient(
    url='http://influxdb:8086',
    token='my-token',
```

```
    org='primary'
)

def calculate_kpis(raw_metrics):
    kpis = {
        'connected_devices': 0,
        'active_sessions': 0,
    }

    for service, metrics in raw_metrics.items():
        for metric in metrics:
            if 'ue' in metric['name']:
                kpis['connected_devices'] += \
                    int(metric['value'])

    return kpis

def collect_metrics():
    for service, endpoint in ENDPOINTS.items():
        response = requests.get(endpoint)
        metrics = parse_prometheus(response.text)

        for metric in metrics:
            point = Point("5g_metrics") \
                .tag("service", service) \
                .field("value", metric['value'])
            write_api.write(
                bucket='5g_metrics',
                record=point
            )
```

4.2 Візуалізація в Grafana

Розроблено дашборд з такими панелями:
Верхній ряд (статистика в реальному часі):

- Connected Devices — кількість зареєстрованих UE
- Active Sessions — сигнальні з’єднання AMF
- PDU Sessions — сесії передачі даних SMF

- Data Sessions — активні потоки UPF
- Network Uptime — час роботи системи
- Network Services — кількість функціональних NF

Часові графіки:

- Динаміка підключених пристроїв (вікно 30 сек)
- Тренди сесій AMF/SMF/UPF з окремими лініями
- Heatmap активності мережі по хвилинах
- Швидкість збору метрик по сервісам

Таблиці:

- Service Health — кількість метрик/хв від кожної NF
- Live Network Status — поточний стан всіх компонентів

Приклад Flux-запиту для панелі Connected Devices:

Лістинг 6: Flux-запит для Grafana

```
from(bucket: "5g_metrics")
  |> range(start: -30s)
  |> filter(fn: (r) =>
      r._measurement == "network_kpi")
  |> filter(fn: (r) =>
      r.metric_type == "connected_devices")
  |> last()
```

5 Результати

5.1 Функціональність системи

Розгорнутий тестовий стенд успішно демонструє:

1. **Повний цикл реєстрації UE:**

- Initial Registration Request → AMF
- Authentication (AUSF, UDM)
- Security Mode Command
- Registration Accept

2. **Встановлення PDU-сесії:**
   - PDU Session Establishment Request
   - SMF allocates IP (10.45.0.0/16 pool)
   - PFCP Session Establishment (SMF-UPF)
   - GTP-U tunnel creation
3. **Передача даних:**
   - UE отримує IP-адресу через TUN-інтерфейс
   - Трафік передається через GTP-U тунель
   - UPF виконує NAT для доступу до зовнішніх мереж

5.2 Метрики продуктивності

На момент тестування з 5 активними UE дашборд показує:

- **Connected Devices: 2** — два UE успішно зареєстровані в AMF
- **Active Sessions: 2** — дві активні NAS-сесії
- **PDU Sessions: 19** — дев’ятнадцять сесій даних зі встановленими QoS-правилами
- **Data Sessions: 5** — п’ять активних GTP-U тунелів у UPF
- **Network Uptime: 6.7 хв** — система працює стабільно
- **Metrics Rate: 40-87/хв** — інтенсивність збору метрик варіюється залежно від активності NF

Графіки демонструють:

- Стрибкоподібне зростання Connected Devices при підключенні нових UE
- Стабільне утримання PDU Sessions протягом активної сесії
- Періодичні спалахи активності в Network Activity Heatmap під час реєстрації UE
- Рівномірний Service Metrics Rate, що підтверджує стабільну роботу всіх NF

5.3 Верифікація протокольного стеку

Логи підтверджують проходження повного 5G протокольного стеку:

1. **RRC** (Radio Resource Control) — встановлення з'єднання з gNB
2. **NGAP** (NG Application Protocol) — Initial UE Message до AMF
3. **NAS** (Non-Access Stratum) — Registration Request/Accept
4. **HTTP/2 SBI** — міжсервісна взаємодія через SCP
5. **PFCP** (Packet Forwarding Control Protocol) — управління UPF
6. **GTP-U** (GPRS Tunneling Protocol) — інкапсуляція користувацького трафіку

6 Висновки

В результаті виконання роботи створено повнофункціональний тестовий стенд 5G мережі, що включає:

1. Контейнеризоване ядро 5G мережі з 11 мережевими функціями (Open5GS)
2. Симулятор радіомережі з підтримкою множинних UE (UERANS
3. Автоматизовану систему збору метрик з розрахунком KPI
4. Дашборд реального часу для візуалізації продуктивності
5. Генератор реалістичного трафіку з 5 моделями поведінки

Стенд дозволяє:

- Тестувати 5G протоколи (NGAP, NAS, PFCP, GTP-U)
- Аналізувати продуктивність мережевих функцій
- Моделювати різні сценарії навантаження
- Досліджувати процеси реєстрації, автентифікації та передачі даних
- Відстежувати метрики в реальному часі

Система демонструє стабільну роботу з 10 зареєстрованими підписниками та підтримує одночасну роботу 5+ UE з різними профілями використання. Архітектура забезпечує масштабованість через Docker та service discovery via SCP.

Тестовий стенд може використовуватись для навчальних цілей, дослідження 5G протоколів та розробки нових мережевих функцій.

Література

[1] Open5GS Project. *Open Source implementation for 5G Core and EPC*. `https://open5gs.org/`

[2] UERANSIM Project. *Open source 5G UE and RAN (gNodeB) simulator*. `https://github.com/aligungr/UERANSIM`

[3] 3GPP. *TS 23.501: System architecture for the 5G System (5GS)*. Version 17.8.0, 2023.

[4] InfluxData. *InfluxDB: Time Series Database*. https://www.influxdata.com/

[5] Grafana Labs. *Grafana: The open observability platform*. https://grafana.com/