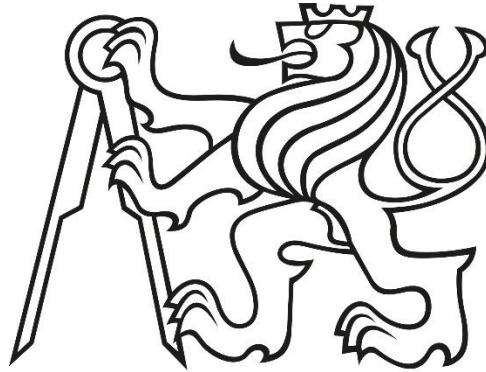


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky



Implementace algoritmu pro přidělování komunikačních  
prostředků pomocí teorie her a jeho vyhodnocení  
v emulované síti

Bakalářská práce

2018

Tomáš Ouředník



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ouředník** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **434767**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Síťové a informační technologie**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Implementace algoritmu pro přidělování komunikačních prostředků pomocí teorie her a jeho vyhodnocení v emulované mobilní síti**

Název bakalářské práce anglicky:

**Implementation and Performance Evaluation of Game Theoretic Radio Resource Allocation Algorithm in Emulated Mobile Network**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s přidělováním prostředků pro uživatele mobilních sítí a platformou OpenAirInterface pro emulaci mobilních sítí. Do OpenAirinterface implementujte centralizovanou verzi algoritmu pro přidělování rádiových prostředků založeném na teorii her. Implementovaný algoritmus porovnejte s existujícími algoritmy v emulované síti.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. Ilai, A. Leshem, 'Game Theoretic Dynamic Channel Allocation for Frequency-Selective Interference Channels.', arXiv preprint arXiv:1705.02957 (2017).
- [2] N. Nikaein, et al., 'OpenAirInterface: A flexible platform for 5G research.', ACM SIGCOMM Computer Communication Review 44.5 (2014): 33-38.
- [3] F. Kaltenberger, et al., 'The OpenAirInterface application programming interface for schedulers using Carrier Aggregation.', Wireless Communication Systems (ISWCS), 2016 International Symposium on. IEEE, 2016.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Plachý, katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Plachý  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Implementace algoritmu pro přidělování komunikačních prostředků pomocí teorie her a jeho vyhodnocení v emulované síti zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ...

.....

Jméno Příjmení

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl velmi poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Janu Plachému za neuvěřitelnou ochotu a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Bez jeho cenných rad a zkušeností by tato práce nikdy nemohla vzniknout.

*Anotace* – S narůstajícím počtem mobilních uživatelů a s jejich širokým spektrem požadavků na mobilní připojení, narůstají nároky na přidělování prostředků. Pro splnění požadavků mobilních uživatelů, musí být známy informace o uživatelích (kvalita kanálu, objem dat pro vysílání, atd.) na centrálním prvku, který prostředky přiděluje (základnová stanice). Nicméně sběr těchto informací probíhá na stejných prostředcích, které využívají uživatelé pro přenos jejich dat. Tudíž při velkém počtu uživatelů dochází k omezení jejich propustnosti. Tento problém lze vyřešit pomocí decentralizovaného přidělování prostředků, kdy si uživatelé sami rozhodují o přidělování prostředků.

V této bakalářské práci je prozkoumán decentralizovaný plánovač, založený na teorii her, využívající fiktivní hru. Pro otestování jeho funkcionality je navržena centralizovaná verze, z důvodu omezení současných platforem pro emulaci mobilních sítí, která je implementována a otestována. Pro emulaci mobilní sítě byla zvolena platforma OpenAirInterface<sup>TM</sup>.

*Klíčová slova* – Mobilní sítě, LTE-A, Přiřazování prostředků, Emulace, OpenAirInterface<sup>TM</sup>, Plánovače

*Abstract* - The increasing number of mobile users and their wide range of applications and services leads to higher requirements for the allocation of communication resources. To properly allocate communication resources information about the mobile users, such as channel quality, have to be collected at the central node, i.e. base station. However, collecting information about mobile users exploits the same communication resources which are exploited for communication of mobile users. Thus, with large number of mobile users, their communication capacity would be affected. Therefore, an option of decentralized communication resource allocation, where mobile users decide on resource allocation themselves, comes to solve this issue.

This bachelor thesis examines a decentralized resource allocation algorithm based on game theory with fictitious play. To test its functionality, we design a centralized version, due to the limitation of current mobile network platform, implement it and do a performance evaluation. As the mobile network emulation platform OpenAirInterface<sup>TM</sup> is selected.

*Keywords* – Mobile networks, LTE-A, Resource allocation, Emulation, OpenAirInterface<sup>TM</sup>, Scheduling

# Obsah

Seznam obrázků .....	VII
Seznam tabulek .....	VII
Seznam algoritmů.....	VII
1. Úvod .....	1
2. Mobilní síť.....	3
2.1. Přehled mobilních technologií pro přenos hovoru a dat.....	3
2.2. Topologie sítě LTE.....	4
2.2.1. RAN .....	5
2.2.2. EPC a její komponenty .....	6
2.3. Protokolová architektura LTE .....	6
2.3.1. User plane protocol .....	7
2.3.2. Control plane protocol.....	8
2.4. Kanály v LTE .....	9
2.5. Link adaptation .....	10
2.6. Quality of Service.....	10
3. Scheduler (plánovač).....	11
3.1 Příklady plánovačů.....	12
4. Open air interface.....	14
4.1. Využití a možnosti OAI.....	14
4.2. Architektura OAI .....	14
4.3. Plánovač v OAI .....	15
5. Implementovaný plánovač .....	17
6. Implementace plánovače do OAI .....	19
7. Ověření funkcionality implementovaného plánovače .....	22
8. Závěr .....	26
Reference.....	27
9. Přílohy.....	29
Příloha A: Popis původního plánovače .....	29
Příloha B: Scénář OSD .....	29

## Seznam obrázků

Obr. 1 Topologie sítě LTE.....	4
Obr. 2 Přidělování prostředků uživatelům [9].....	5
Obr. 3 User plane protocol.....	7
Obr. 4 Control plane protocol.....	8
Obr. 5 Mapování kanálů.....	9
Obr. 6 Plánovač typu best CQI pro jeden komunikační kanál.....	12
Obr. 7 Plánovač typu RR.....	13
Obr. 8 Protokoly používané pro OAI.....	14
Obr. 9 Průběh volání funkcí plánovače OAI.....	15
Obr. 10 Rozložení eNB a UEs v emulaci 1.....	22
Obr. 11 Rozložení eNB a UEs v emulaci 2.....	23

## Seznam tabulek

Tab. 1 Používaná modulace pro jednotlivé CQI [15].....	10
Tab. 2 Třídy podle QCI [9].....	11
Tab. 3 Definice proměnných pro algoritmy.....	17
Tab. 4 Výsledky emulace pro Full buffer.....	23
Tab. 5 Výsledky emulací pro SCBR.....	24
Tab. 6 Výsledky emulací pro rozložení 1 a 2, provoz typu full buffer.....	24

## Seznam algoritmů

Alg. 1 Distribuované přidělování prostředků uživatelům.....	18
Alg. 2 Centralizovaný algoritmus.....	18

# 1. Úvod

Počet uživatelů mobilních sítí stále narůstá a tento trend je očekáván i v budoucnosti [1]. S novými službami a aplikacemi uživatelů taktéž narůstá i objem přenesených dat na uživatele, což motivuje vývoj mobilních sítí. Sítě příští, páté, generace jsou navrhovány pro podporu až milionu připojených účastníků na čtvereční kilometr [2]. Pro dosažení tohoto se při vývoji počítá krom centralizované sítě, kdy řízení probíhá v hlavním bodu (nebo určité skupině bodů) sítě, tak i s použitím decentralizované, která má výhodu v tom, že nepotřebuje řídicí bod. V případě decentralizované, je řízení řešeno všemi účastníky v komunikačním dosahu.

S narůstajícím počtem uživatelů a s jejich širokým spektrem požadavků na mobilní připojení, narůstají požadavky na přidělování prostředků, které cílí na splnění požadavků uživatelů [3]. Přidělování prostředků řídí plánovač, který má na starosti optimalizovat provoz v síti podle nastavených priorit a efektivně tak využít kapacitu sítě. Jednou z možností přiřazování prostředků je decentralizované přiřazování založené na teorii her, kdy hráči (mobilní uživatelé) sami rozhodují, jak si dostupné prostředky rozdělí. Toto je výhodné v případě, kdy je počet uživatelů vysoký a přenos informací o uživatelích (např. kvalita kanálu) by vedl ke snížení celkové propustnosti sítě. Teorie her je obor aplikované matematiky, která analyzuje konfliktní rozhodovací situace, které mohou nastat kdekoliv, kde dochází ke střetu zájmů. V teorii her hráči, v tomto případě reprezentovaní mobilními uživateli spolu hrají hru o komunikační prostředky. Cílem teorie her pak je najít takové řešení rozdělení prostředků, kdy všichni hráči budou spokojeni na základě definované hry. Příkladem může být [4], kde hráči hrají hru s cílem dohodnout se na přidělených komunikačních prostředcích, aniž by docházelo k výměně informací mezi uživateli. V tomto případě spolu hráči hrají tzv. fiktivní hru, která postupně vede k optimálnímu rozdělení (rozdělení s nejvyšší síťovou propustností) vysílacích kanálů mezi uživatele.

Navržené plánovače je potřeba před reálným nasazením ověřit ať už matematickou analýzou či simulací. Simulace spočívá ve vytvoření počítačového modelu, který se chová a na vstupní data reaguje podobně jako mobilní síť. Simulace lze vytvořit pomocí různých programovacích jazyků, například jazyka C, prostředí MATLAB, které je ve velké míře využíváno v akademické sféře pro jednoduchost přípravy simulace a rychlosti získání výsledků, nebo NS-3, který obsahuje široké spektrum funkcionalit pro komunikaci uživatelů, a tudíž stačí jen doimplementovat navržený algoritmus. [5]. Problém vyhodnocení kvality mobilní sítě pomocí simulace spočívá v tom, že je velmi složité vytvořit úplný model reálného hardwaru a jeho parametrů za různých podmínek.

Jednou z možností, jak vyřešit tento problém, je využití emulace zařízení, což znamená, že celý hardware je naprogramován nebo je použit přímo software, který je spouštěn na specializovaném hardwaru, čímž je umožněno emulovat podmínky velice blízké reálnému hardwaru. Emulace je výpočetně náročnější než simulace, kvůli mnohem přesnější replikaci reálného prostředí, na druhou stranu, ale přináší mnohem přesnější výsledky při měření a emulovaný hardware může být upraven jednoduššími změnami než na reálný hardware. Jednou z platforem pro simulaci a emulaci mobilní sítě je OpenAirInterface™ (OAI) [6], která obsahuje protokolovou strukturu sítě čtvrté generace a postupně se rozšiřuje i o prvky generace páté.



Tato bakalářská práce se zaměřuje na implementaci plánovače založeného na teorii her do OAI a ověření jeho funkčnosti a síťové propustnosti v porovnání s původním řešením.

V době psaní práce ještě nebylo plně integrováno rozhraní, které odděluje kód plánovače od kódu základnové stanice, a proto implementace proběhla změnou přímo v kódu základnové stanice. Z důvodu nemožnosti implementovat decentralizovanou verzi plánovače, je do OAI implementována jeho centralizovaná verze. Obě tyto varianty a převod decentralizované verze na centralizovanou jsou popsány.

Následující kapitola pojednává o vlastnostech sítí čtvrté generace, které se týkají přiřazování prostředků. Ve třetí kapitole je rozebrána problematika přiřazování prostředků s příklady jednoduchých plánovačů. Čtvrtá kapitola obsahuje popis struktury a možností OAI a původní plánovač. Pátá kapitola se zabývá zadaným plánovačem a jeho centralizovanou a decentralizovanou verzí. Šestá kapitola obsahuje popis změn v kódu. V sedmé kapitole je rozebrán scénář a výsledky emulace. Osmá kapitola obsahuje závěr.

## 2. Mobilní sítě

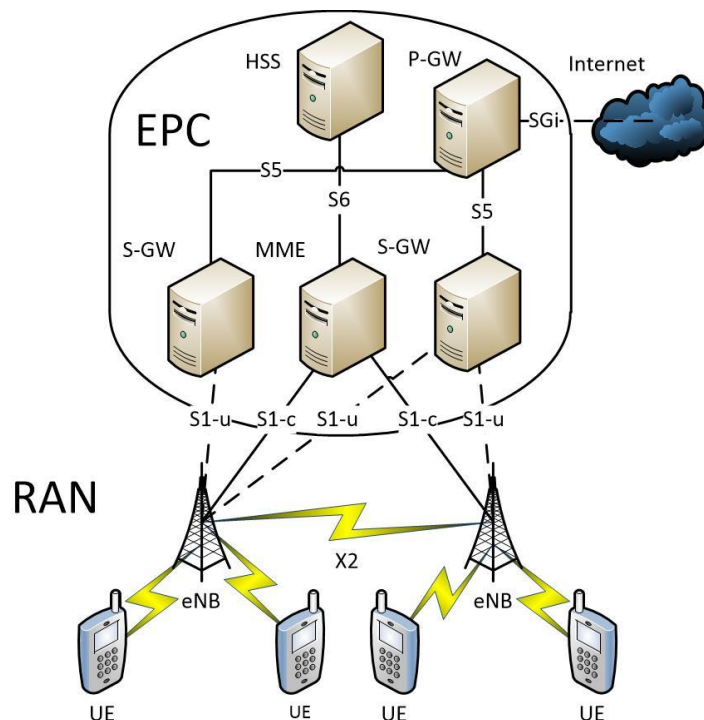
V této kapitole jsou popsány mobilní sítě, včetně jejich vývoje. Dále jsou zde uvedeny základní vlastnosti mobilních sítí čtvrté generace Long Term Evolution – Advanced (LTE-A) jako je topologie sítě, struktura rámce a přenosové kanály, které se využívají pro přenos dat a přidělování prostředků mobilním účastníkům.

### 2.1. Přehled mobilních technologií pro přenos hovoru a dat

Zatímco mobilní buňkové sítě první generace (1G) byly čistě analogové, sítě druhé generace (2G) byly již digitální. Dva nejpoužívanější standardy mobilních sítí druhé generace jsou Global system for Mobile communications (GSM) a Code Division Multiple Access (CDMA). Systémy 2G, stejně jako systémy 1G, byly navrženy pouze pro podporu hlasové komunikace s využitím technologií přepojovaných okruhů (Circuit Switching – CS). Později, díky novým standardům, také podporovaly přenos dat, a to díky přidání prvků pro efektivní paketový provoz s podporou paketového přepojování (Packet switched – PS), které využívali standardy General Packet Radio Service (GPRS) a Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) [7]. Při vývoji sítí třetí generace (3G), byl kladen důraz na vysokou přenosovou rychlost dat [8]. Pro sítě 3G byla zvolena technologie Universal Mobile Telecommunications Service (UTMS). Stejně jako sítě předchozí generace, byla síť UMTS tvořena částí podporující hlavně hlasovou komunikaci CS a částí podporující rychlou paketovou komunikaci PS. V průběhu vývoje sítí 3. generace došlo ke vzniku Third Generation Partnership Project (3GPP), který v současné době pomocí standardů (Releases), definují nové funkcionality mobilní komunikace. V Release 8 z konce roku 2008 se poprvé objevuje „Long Term Evolution – Evolved Packet System (LTE – EPS)“ [8]. Po finalizaci standardizace, která se objevila později v rozšíření Release 9, se zvažoval další směr vývoje a byla zahájena práce na nové generaci mobilní sítě, která by splňovala požadavky Mezinárodní telekomunikační unie nazvané IMT-Advanced. V rámci dalších standardů 3GPP byly standardizovány technologie pro LTE a později LTE Advanced (LTE-A) a LTE Advanced Pro (LTE-A Pro). První definice základních parametrů technologií pro 5G se objevila v Release 15 z prosince 2017. 5G cílí na minimalizaci komunikačního zpoždění, a to až pod 1ms a zvýšení kapacity sítě, a to jak přenosové rychlosti, tak i počtu připojených uživatelů. Základem pro sítě 5G by mělo být využití milimetrových vln a technologií jako Massive MIMO (využití více antén pro komunikaci), Beamforming (směřování signálu pomocí antén k uživateli) a softwarově definovaného rádia.

## 2.2. Topologie sítě LTE

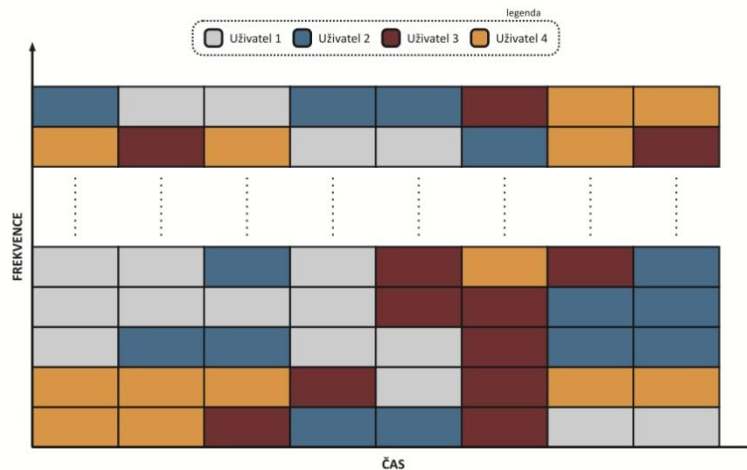
Architektura LTE se dělí na dvě části, a to rádiovou část, tzv. Radio Access network (RAN) a jádro sítě, tzv. Evolved Packet Core (EPC). Jednotlivé rozhraní, které jednotlivé prvky v síti propojují, jsou vidět na Obr. 1. V LTE a LTE-A se pro vícenásobný přístup ve směru k uživateli využívá orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA) a v opačném směru single-carrier frequency-division multiple access (SC-FDMA).



Obr. 1 Topologie sítě LTE.

Rádiová komunikace mezi základnovými stanicemi a mobilními zařízeními uživatelů (UE) probíhá v tzv. frames, které trvají 10 ms a skládají se z tzv. sub-frames. Jeden sub-frame trvá 1 ms, což je doba, která je označována taktéž jako Transmission Time Interval (TTI). Jeden TTI se pak dále skládá ze dvou časových slotů. Ve frekvenční oblasti je celková šířka pásma rozdělena na subkanály o šířce pásma 15 kHz s 12 po sobě jdoucími, rovnoměrně rozloženými OFDM subnosnými.

Časově-frekvenční rádiový zdroj, který tvoří 12 frekvenčních subkanálů po dobu 0,5 ms, se nazývá Resource Block (RB). V jednom TTI tudíž jsou dva RB, což je základní přidělitelná jednotka pro uživatele, viz Obr. 2. Vzhledem k tomu, že šířka subkanálu je pevná, počet RB závisí na dostupné šířce pásma.



Obr. 2 Přidělování prostředků uživatelům [9].

OFDMA má výhodu ve vysoké škálovatelnosti a minimálních interferencích, díky využití tzv. cyklické předpony, kdy se část vysílaných dat kopíruje na začátek vysílání. SC-FDMA je používáno ve směru od uživatele z důvodu nižší energetické náročnosti. Nevýhoda SC-FDMA, ale spočívá v tom, že UE při vysílání musí převést všechny subnosné na jednu nosnou se stejnou modulací. RBs poté musí být přiděleny uživatelům souvisle (např. druhý až pátý RB) nebo periodicky (např. 1, 3, 5 atd. s pevnou periodou) [10]. V LTE je mapování všech zdrojů řízeno schedulerem (viz 3. Scheduler (plánovač)) [7].

### 2.2.1. RAN

Základní částí rádiové přístupové části LTE je Evolved UTRAN (E-UTRAN). Která vychází z rádiové části používané v sítích UMTS, ale je upravena, tak aby dosahovala parametrů a podporovala technologie používané v LTE jako například OFDMA a MIMO [11].

Jednotlivé základnové stanice v LTE jsou si v architektuře rovné a nazývají se evolved NodeB (eNB). eNB je zodpovědné za řízení a správu všech funkcí souvisejících s rádiovým přístupem včetně veškeré rádiové komunikace mezi uživatelem a jádrem sítě. Jedná se o procesy typické pro základnové stanice předchozí generace (např. šifrování a dešifrování uživatelských dat, modulace a demodulace, prokládání atd.) a funkce RNC (např. sledování síťových funkcí, plánování provozu, kontrola úrovně výkonu atd.) a další funkce, jako správa potřebné signalizace, výběr obsluhující eNB pro UE atd.

Pro komunikaci eNB s dalšími prvky EPC se používají dvě rozhraní. Jedná se o rozhraní S1, které se používá k připojení eNB do EPC a rozhraní X2, které propojuje eNB se sousedními eNB. Zatímco rozhraní X2 je volitelné, rozhraní S1 je povinné, protože je využíváno pro veškerou nezbytnou signalizaci a výměnu dat. Rozhraní S1 může převzít funkce X2, ale komunikace probíhá nepřímo a pomaleji [12].

### 2.2.2. EPC a její komponenty

Jádro sítě LTE bylo navrženo s cílem zjednodušit celkovou architekturu. EPC prošlo zásadním vývojem z jádra sítě GSM/GPRS používaného pro 2G a 3G. Jádro LTE podporuje pouze přepojování paketů, tzn., že oproti předchůdcům už nepodporuje přepojování okruhů. Části jádra jsou popsány v následujících sekcích.

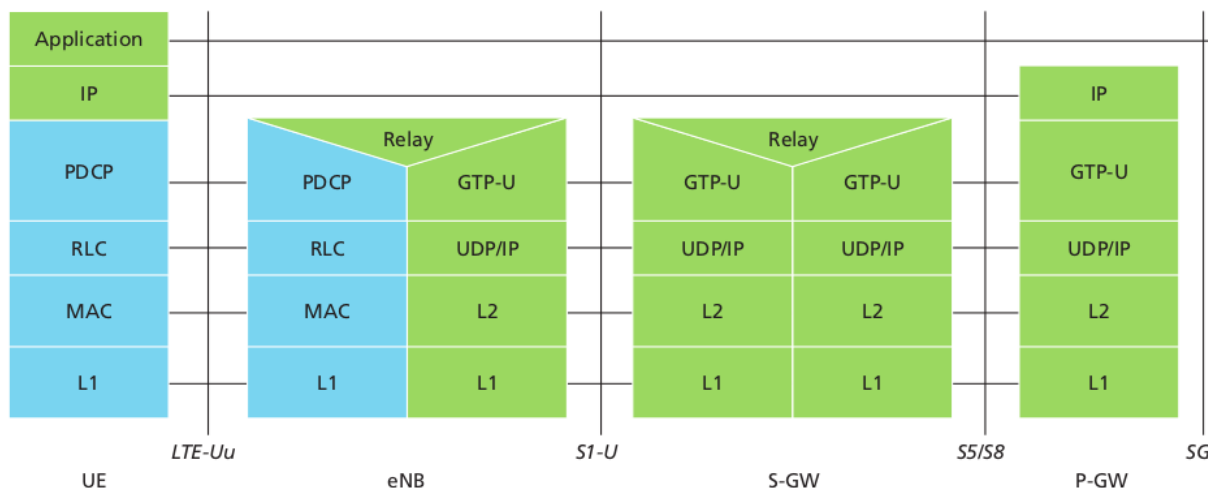
- Mobility management entity (MME) – MME řídí handover (přepojení UE od jedné eNB k jiné), a vybírá vhodnou gateway (GW) pro UE, pomocí níž jsou vyměňovány zprávy. Z pohledu jádra je MME hlavním řídicím uzlem přístupové sítě LTE, který umožňuje autentizaci koncového uživatele prostřednictvím Home Subscriber Server (HSS). Dále je MME zodpovědné za aktivaci a deaktivaci jednotlivých nosných pro UE, které slouží k zajištění požadované kvality služby UE [13].
- Serving Gateway (S-GW) – SGW působí jako „kotva“ během pohybu UE mezi jednotlivými eNB a zajišťuje vzájemnou propojitelnost s jinými technologiemi 3GPP jako GPRS / GSM a UMTS. Dále řídí a ukládá nastavení UE, např. parametry IP přenosu a informace o směrování v síti.
- Packet Data Network Gateway (P-GW) – P-GW slouží jako router mezi koncovým bodem EPS a externími sítěmi např. internetem. Zajišťuje přidělování IP adres jednotlivým UE, P-GW také podporuje funkci vynucování politik (Quality of Service – QoS) a filtrování paketů.
- Home Subscriber Server (HSS) – Sloučením Home location register (HLR) a Authentication Center (AuC), které byly přítomné již v sítích 2G a 3G, vznikla centrální databáze HSS. HSS má na starosti správu informací o uživateli v databázi. Databáze HSS obsahuje například identifikaci uživatele International Mobile Subscriber Identity (IMSI) a Mobile Subscriber ISDN Number (MSISDN) nebo telefonní číslo účastníka. Dále pak informace o uživatelském profilu – stav přihlášeného účastníka a nastavení QoS jako je maximální povolená přenosová rychlost nebo povolené třídy provozu (viz 2.6. Quality of Service). HSS je taktéž klíčovým prvkem v zabezpečení komunikace, vzájemné ověřování sítě a terminálu a šifrování radiové části.

### 2.3. Protokolová architektura LTE

V LTE se protokoly dělí na dvě skupiny na tzv. User plane protocol (protokoly přenášející uživatelská data) a tzv. Control plane (protokoly řídicí komunikaci). Obě vrstvy jsou dále rozdělené do několika podvrstev, jak je vidět na Obr. 3 a Obr. 4.

### 2.3.1. User plane protocol

IP pakety pro UE jsou zapouzdřeny v protokolech vyobrazených na Obr. 3. Na rozhraní S1 a S5/S8 se používá specifický 3GPP GPRS tunelovací protokol (GTP) [14]. Protokoly, které jsou využívány pro komunikaci mezi UE a eNB na obrázku Obr. 3 znázorněna modře, patří mezi ně Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) a vrstva Medium Access Control (MAC).

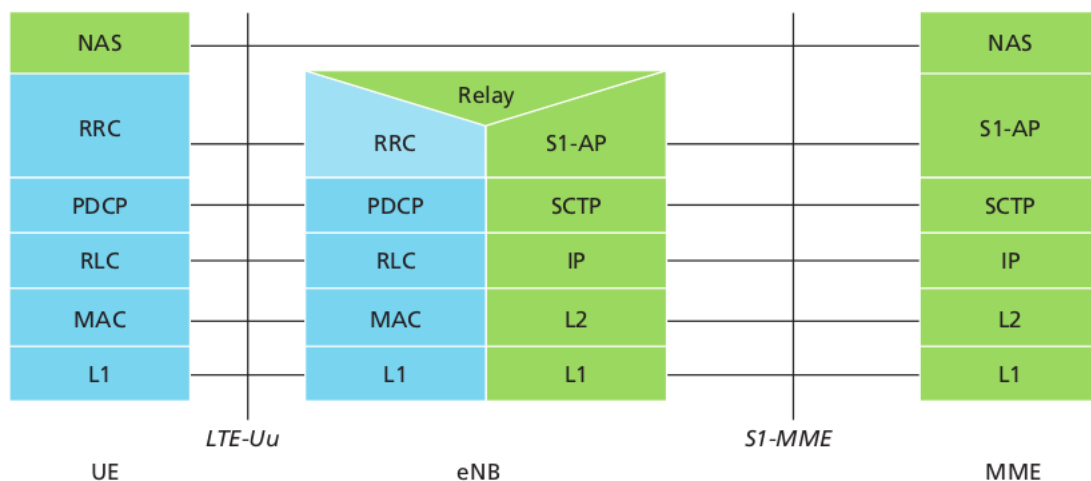


Obr. 3 User plane protocol.

- GTP-U – Tunelovací protokol pro předávání IP paketů skrze rozhraní S1-U, S5 a X2.
- Packet Data Convergence Protocol – Protokol obsahuje funkce jako např. komprese hlaviček pro zefektivnění přenosu, ochrana integrity spojení, šifrování a dešifrování dat a znehodnocení dat při expiraci nebo duplikaci [11].
- Radio Link Control – Protokol na straně eNB upravuje délku segmentů z PDCP na segmenty vyhovující pro přenos MAC vrstvou. Má tři provozní režimy (transparent, acknowledged a unacknowledged) a každý z nich nabízí různé úrovně spolehlivosti pomocí přidání servisních bitů, které slouží pro potvrzování správně přenesených dat (režim acknowledged).
- Medium-Access Control – Vrstva MAC propojuje vrstvy RLC a PHY, prostřednictvím logických a transportních kanálů [11]. K tomuto propojení využívá MAC multiplexing a demultiplexing mezi logickými a transportními kanály. Dále protokol podporuje QoS (viz 2.6. Quality of Service) tzn., že plánovač může pomocí přidělování radiových prostředků jednotlivým UE plánovat a prioritizovat provoz pro splnění vyjednané parametrů QoS.
- Physical Layer (Fyzická vrstva) – Primárně slouží k mapování bitů na symboly a jejich přenos přes rádiové rozhraní. Je využívána ke kódování a dekódování, modulaci a demulaci. Dále je zodpovědná za kontrolu a případné přeposílání chybných paketů. Tento mechanismus má v LTE na starosti Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ), který dočasně uloží poškozená data, která jsou zkombinována s přeposlaným paketem a zvýšit tím pravděpodobnost úspěšného přijetí paketu.

## 2.3.2. Control plane protocol

Protokolová architektura pro řízení komunikace mezi UE a MME je znázorněna na Obr. 4. Modře zbarvená část označuje protokoly Access Stratum (AS), které se využívají k zabezpečení spojení. Spodní vrstvy mají stejné funkce jako pro uživatelskou rovinu s tím rozdílem, že pro řídicí rovinu neexistuje žádná funkce komprese záhlaví paketu. Protokol Radio Resource Control (RRC) je v protokolech AS označován jako Layer 3 (L3). Jedná se o hlavní řídicí funkci v AS, která je zodpovědná za vytvoření rádiových nosičů a konfiguraci všech nižších vrstev pomocí RRC signalizace mezi eNB a UE.

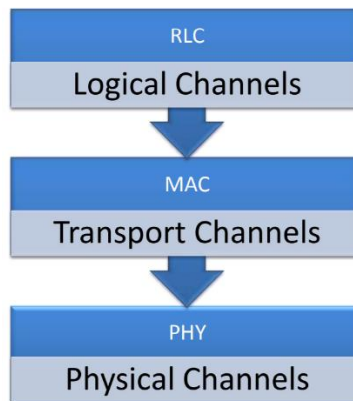


Obr. 4 Control plane protocol.

- Non-Access Stratum – NAS má na starosti řízení mobility tzn. udržování připojení a aktivních relací s UE při pohybu, hovorů, správa identit a relací tzn. vytváření, udržování a ukončení spojení.
- Radio Resource Control – RRC protokol zajišťuje přenášení signalizace z NAS, broadcastové vysílání systémových informací a paging. U jednotlivých spojení zajišťuje zahájení, správu, ukončení spojení, bezpečnostní funkce včetně správy klíčů, funkce mobility, funkce správy QoS a dále pak měření, oznamování a vyhodnocování hlášení UE [11].

## 2.4. Kanály v LTE

Pro zabezpečení flexibility a možnosti různých režimů přenosu dat, byl zaveden standard pro E-UTRAN, který dělí kanály na logické, transportní a fyzické. Mapování jednotlivých typů kanálů je znázorněno na Obr. 5. Dále jsou zde uvedeny příklady některých důležitých kanálů pro přidělování sdílených prostředků.



Obr. 5 Mapování kanálů.

Fyzická vrstva LTE využívá vlastní kanály, definované pro vzestupný i sestupný směr, z nichž každý má předem definovaný účel. Fyzické kanály obsahují data z transportních kanálů vyšších vrstev a jsou přenášeny pomocí přidělených RBs. Dále se pak využívají pro synchronizaci, identifikaci a pro odhad rádiového kanálu.

- Downlink Shared Channel (DL-SCH) – používá se k přenosu dat v sestupného směru, a to jak řídicích, tak provozních.
- Paging Channel (PCH) – Je zodpovědný paging, tzn. UE je přes tento kanál informováno, že eNB má data pro toto zařízení. UE je tímto vyzváno k zahájení komunikace pro příjem dat.
- Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH) – Informuje UE o modulačním schématu použitém pro PDCCH.
- Physical Downlink Control Channel (PDCCH) – Fyzický kanál, který přenáší Downlink Control Information (DCI). DCI podporuje 10 různých formátů, které mohou přenášet informace týkající se plánování zdrojů, modulace a kódování, a to směrem k i od uživatele [9].
- Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) – Tento kanál nese uživatelská data a signalizaci vyšší vrstvy. Tento kanál spojuje DL-SCH a PCH z transportní vrstvy.
- Physical Uplink Control Channel (PUCCH) – Obsahuje řídicí informace pro vzestupný směr, včetně indikátorů kvality kanálu (CQI - viz 2.5. Link adaptation).
- Uplink Shared Channel (UL-SCH) – Transportní kanál pro komunikaci ve vzestupném směru, podobně jako DL-SCH v sestupném.
- Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) – Přenáší uživatelská data a signalizaci vyšší vrstvy. Odpovídá transportnímu kanálu UL-SCH.



## 2.5. Link adaptation

Kvůli časovým změnám kvality přijímaného signálu, způsobených především pohybem účastníků v síti je využito Link adaptation (LA), které kompenzuje okamžité změny vlastností přenosového kanálu. Pro úpravu datové rychlosti LA používá Adaptive modulation and coding (AMC). AMC volí modulaci a schéma kódování kanálů (MCS) na zdrojích přidělených plánovačem [15], dle kvality přijímaného signálu.

Princip LA spočívá v tom, že UE pravidelně informuje eNB o kvalitě kanálu, pomocí indikátoru kvality kanálu (CQI). Čím vyšší je CQI, tím lepší je kanál. Na základě přijatého CQI, které je vypočteno z naměřeného Signal to noise ratio (SNR), může být provedena adaptace spojení z eNB. Tab. 1 obsahuje index CQI, modulační a kódovací schéma, které danému CQI odpovídá.

Tab. 1 Používaná modulace pro jednotlivé CQI [15].

CQI Index	Modulation	Code Rate x 1024	Efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0.1523
2	QPSK	120	0.2344
3	QPSK	193	0.3770
4	QPSK	308	0.6016
5	QPSK	449	0.8770
6	QPSK	602	1.1758
7	16QAM	378	1.4766
8	16QAM	490	1.9141
9	16QAM	616	2.4063
10	64QAM	466	2.7305
11	64QAM	567	3.3223
12	64QAM	666	3.9023
13	64QAM	772	4.5234
14	64QAM	873	5.1152
15	64QAM	948	5.5547

## 2.6. Quality of Service

LTE-A dle specifikace 3GPP TS 23.203 [16] umožňuje rozlišovat několik různých druhů nosných služeb (bearers) s různými požadavky na kvalitu služby. QoS je založen na třídách a každý typ nosné je v síti rozlišován pomocí QoS Class Identifier (QCI). Dle QCI je v této specifikaci definováno 9 tříd (13 v Release 12 a 15 v Release 14) v závislosti na čtyřech přenosových parametrech, viz Tab. 2. Hodnota QCI se využívá v přístupové síti (jmenovitě eNB) jako odkaz na parametry pro nastavení uzlů, které řídí předávání paketů, například plánovací váhu nebo konfiguraci protokolů transportní vrstvy [17].

První parametr (GBR/Non-GBR) určuje, zda je garantována přenosová rychlost Guaranteed Bit rate (GBR) nebo ne Non-GBR. Pro GBR jsou rádiové prostředky přidělovány prioritně, tak aby byla dodržena požadovaná přenosová rychlost [9]. Tudíž pro Non-GBR nemusí zbýt prostředky a může dojít k prodávám při přenosu dat. Velikost přiřazených prostředků závisí na požadavku služby a na velikosti aktuálně dostupných prostředků v síti.

Druhý parametr (Priorita) definuje prioritu zpracovávání paketů. V okamžiku, kdy je přenosový bod přetížen jsou pakety s vyšší prioritou zpracovány dříve než pakety s nižší prioritou.

Parametr zpoždění paketů představuje maximální dovolené zpoždění pro danou třídu QCI.

Poslední parametr, chybovost a ztrátovost paketů, který uvádí maximální počet chybně přenesených paketů, který je tolerován ze strany zařízení.

Tab. 2 Třídy podle QCI [9].

QCI	GBR/Non-GBR	Priorita	Zpoždění paketů	Chybovost a ztrátovost paketů	Příklad služby
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Hlasový hovor (konverzace)
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Video hovor (konverzace)
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Streamované video
4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Real-time hry
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Signalizace
6	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Hlas, video (přímý přenos)
7	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Video (zpožděný stream, film)
8	Non-GBR	8	300	$10^{-6}$	WWW, FTP, email, messaging
9	Non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Jako QCI 8, ale nižší priorita

### 3. Scheduler (plánovač)

Plánovač řídí přidělování rádiových zdrojů, tj. času a frekvence, mezi uživatele, které je spolu sdílí a umožňuje tak optimalizovat využití kapacity sítě [18]. Plánování cílí na optimalizaci různých parametrů sítě, například na propustnost, komunikační zpoždění nebo odezvu, toho může být dosaženo například prioritním přiřazováním prostředků jednomu nebo jedné skupině uživatelů. Plánovač se nachází v eNB a přiděluje radiové zdroje jak pro směr k uživateli, tak pro směr od uživatele. Nejmenší jednotka rádiových zdrojů, která může být UE přiřazena je subframe, tj. 2 po sobě jdoucí RB.

Plánovač každý TTI provádí dvě operace, a to buď odděleně, nebo dohromady. První operací je seřazení všech uživatelů, kteří chtějí vysílat, do listu podle nastavené metriky. Druhá operace je výpočet počtu RB, který bude jednotlivým uživatelům přiřazen. Tyto operace mohou být provedeny na základě různých kritérií, jako je CQI hlášené od UE – buď aktuální nebo průměr za určitý čas, doba, po kterou UE nevysílalo, průměrná rychlost komunikace za určitou dobu atd. Plánovací algoritmy můžeme kategorizovat do dvou rodin: stateless a stateful. První rozhodují pouze na základě informací, které jsou k dispozici na stávajícím TTI (např. poslední hlášené CQI nebo naplnění bufferu UE), zatímco druhý jmenovaný využívají informace o plánování přes více TTI.

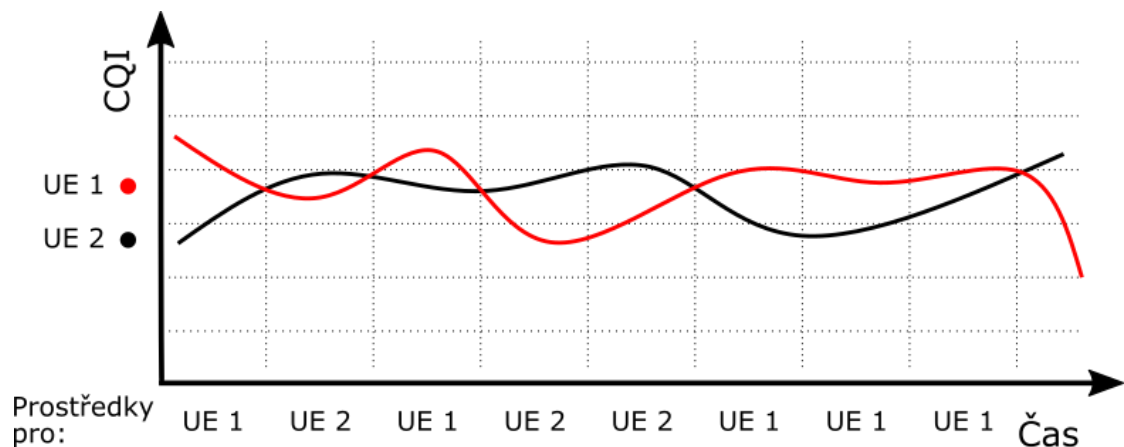
### 3.1 Příklady plánovačů

- **Best CQI** – Jak naznačuje název, tato strategie přidělování zdrojů uživatelům preferuje vždy účastníka s nejlepšími podmínkami rádiového spojení, jak je znázorněno na Obr. 6. Plánování je prováděno na základě přijaté informaci o CQI od UE na eNB. Díky této strategii je možné dosáhnout nejvyšší síťové propustnosti [19], ale na UE, které budou vzdálenější od eNB nepříjde řada, dokud budou mít UE s lepším CQI co vysílat. Komunikační prostředky jsou přiděleny uživatelům, kteří maximalizují následující matriku.

Metrika  $m_{i,k}$  pro  $i$ -tého uživatele na  $k$ -tém RB:

$$m_{i,k}^{Best\ CQI} = d_k^i(t)$$

Kde:  $d_k^i(t)$  je očekávaná datová propustnost  $i$ -tého uživatele na  $k$ -tém RB



Obr. 6 Plánovač typu best CQI pro jeden komunikační kanál.

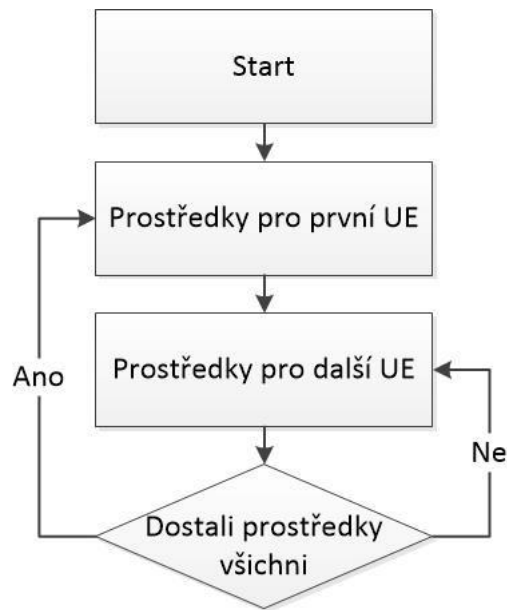
- **Round Robin (RR)** – Přiřazování prostředků podle RR probíhá tak, že prostředky jsou přidělovány tak, aby každý uživatel dostal část prostředků. Tímto je zaručeno, že všichni uživatelé dostanou komunikační prostředky, avšak bez ohledu na kvalitu komunikačních kanálů či jejich požadavků. Dále je RR snadno implementovatelný, proto je používán mnoha systémy. Jelikož RR nezohledňuje informace o kvalitě kanálu, má to mít za následek nižší síťovou propustnost než Best CQI [19]. Průběh plánovacího cyklu RR je zobrazen na Obr. 7. Pokud během některého TTI není dostatek RBs pro všechny uživatele, v dalším TTI se s přiřazováním začíná od uživatele, který jako první nedostal prostředky.

Metrika  $m_{i,k}$  pro  $i$ -tého uživatele na  $k$ -tém RB:

$$m_{i,k}^{RR} = t - T_{i,S}$$

Kde:  $t$  je aktuální čas

$T_{i,S}$  je čas kdy naposledy uživatel dostal prostředky



Obr. 7 Plánovač typu RR.

- **Proportional fairness (PF)** – Na rozdíl od předešlých zmíněných, PF uvažuje kromě CQI i dobu po kterou uživatel, který má co vysílat, nevysílal. Plánovač se rozhoduje podle průměrné rychlosti. Uživateli, který aktuálně nevysílá, klesá průměrná rychlost k nule, s tím roste jeho priorita pro obsluhu plánovačem a uživatel se dostává na řadu s vysíláním.

Metrika  $m_{i,k}$  pro  $i$ -tého uživatele na  $k$ -tém RB:

$$m_{i,k}^{PF} = d_k^i(t) / \bar{R}^i(t)$$

Kde:  $d_k^i(t)$  je očekávaná datová propustnost  $i$ -tého uživatele na  $k$ -tém RB  
 $\bar{R}^i(t)$  je průměrná rychlost  $i$ -tého uživatele před  $t$ -tým TTI

- **Weighted fair (WF)** – WF řadí pakety do různých front podle toho k jaké službě patří. Každé frontě je přidělena váha, která určuje zlomek celkové šířky pásma, dostupného pro danou frontu. Přiřazování šířky pásma pro každou službu je provedeno na základě váhy přidělené jednotlivým frontám, a nikoliv na základě aktuálního počtu paketů.
- **Resource Preemption (RP)** – V některých případech není spravedlnost mezi jednotlivými uživateli vyžadována a lze proto definovat několik typů prioritních schémat. Jednou z možností je definování uživatelů s vysokou prioritou (nebo skupin uživatelů). Uživatelé, kteří chtějí přenášet data, se řadí do různých front podle jejich priority. Jednotlivé fronty jsou poté odbavovány sestupně, podle priority. Tento přístup může být využit pro rozlišování mezi GBR a non-GBR toky za předpokladu, že plánovač implementuje některé techniky, aby se zabránilo tzv. hladovění aplikací a uživatelů s nízkou prioritou.

## 4. Open air interface

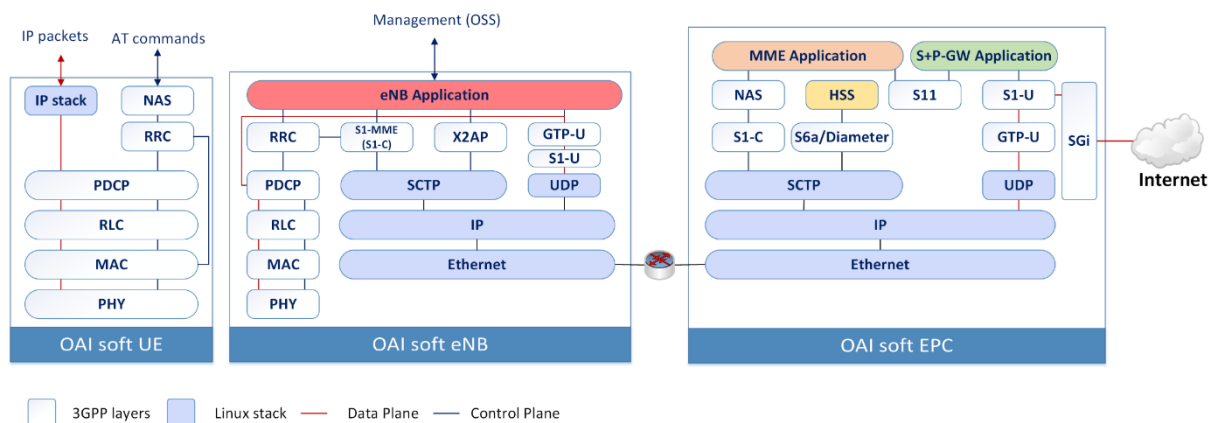
V současné době operátoři stále více využívají softwarově definované sítě. To znamená, že specifický hardware je nahrazován softwarovým řešením, které pracuje na univerzálních procesorech (např. x86, ARM) a umožňuje zrychlit vývoj a zlevnit a urychlit nasazení nových prvků do sítě. Proto OpenAirInterface™ Software Alliance (OSA) vyvíjí opensource platformu, která umožňuje emulaci mobilních sítí pro potřeby vývoje a výzkumu, nazvanou Open Air Interface (OAI).

### 4.1. Využití a možnosti OAI

Platforma OAI zahrnuje kompletní balík protokolů 3GPP v E-UTRAN a v EPC, které je možné během emulace sledovat např. s využitím programu Wireshark. OAI podporuje různé konfigurace emulace (např. eNB nebo eNB + EPC), a to i v kombinaci se simulací některých síťových prvků jako je např. UE, kdy se UE chová podle scénářů OpenAirInterface Scenario Descriptor (OSD). Scénář OSD se skládá ze 4 částí, a to nastavení testovacího prostředí, topologie, síťového provozu a simulace. Simulace poté probíhá ve třech hlavních krocích a to inicializace, provedení simulace a její následné vyhodnocení. Navíc OAI dokáže pracovat jak s reálným hardwarem, např. vyvíjeným v EURECOMu [20], tak i s běžně dostupným na trhu. Možnost připojit různé mobilní telefony nebo spektrální analyzátoři dovoluje snadno ověřit parametry různých částí sítě. Program obsahuje mimo oaisimu (simulace UE a eNB) i další nástroje, pro simulaci různých částí LTE-A.

### 4.2. Architektura OAI

OAI se skládá ze dvou samostatných částí a to openairinterface5g, kterou tvoří kód pro UE (OAI soft UE) a eNB (OAI soft eNB), a openair-cn, která obsahuje zdrojový kód sloužící k emulaci EPC (OAI soft EPC, skládající se z MME, HSS a entity SPGW, která zastává funkci SGW a PGW). Celou architekturu protokolů OAI a jejich provázanost je znázorněna na Obr. 8. Na obrázku jsou vidět použité protokoly jak LTE-A, tak i Linuxu, pro jehož prostředí je OAI vyvíjeno.

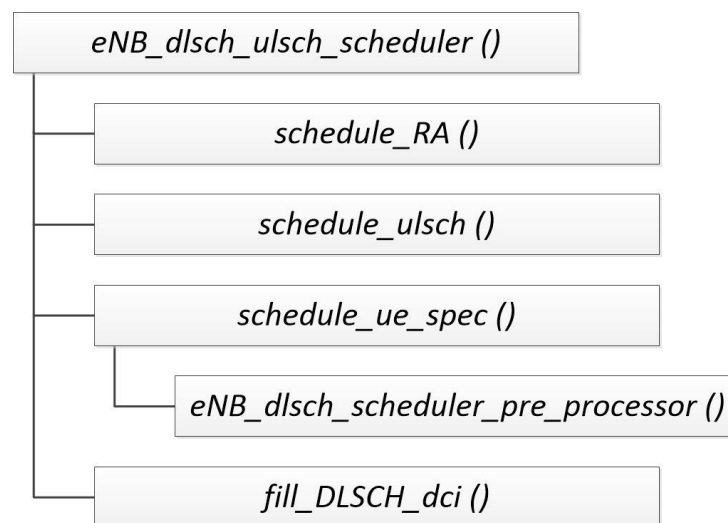


Obr. 8 Protokoly používané pro OAI.

### 4.3. Plánovač v OAI

Struktura plánovače OAI je zdokumentovaná v [21], kde jsou popsány hlavní části kódu a možnosti využití emulace k ověření funkcionality různých plánovačů. Hlavní část plánování v OAI probíhá ve funkci `eNB_dlsch_ulsch_scheduler`. Ta je volána každé TTI a průběh volání funkcí, které jsou do ní vnořené je znázorněno na Obr. 9. Názvy volaných funkcí se odvíjejí od čísla TTI nebo aktuálním provozu. Každá funkce je zodpovědná za určitou operaci:

- `schedule_RA ()` - implementuje plánování náhodného přístupu
- `schedule_ulsch ()` - implementuje plánování pro směr od uživatele
- `schedule_ue_spec ()` - řídí procedury HARQ, plánuje přiřazení RB pro UE podle zvoleného algoritmu
- `fill_DLSCD_dci ()` - vytváří mapy alokovaných RB pro jednotlivé UE



Obr. 9 Průběh volání funkcí plánovače OAI.

Plánovací algoritmus je implementován ve funkci `eNB_dlsch_scheduler_pre_processor ()`. Tato funkce volá další funkce, tak aby byly prostředky přiděleny na základě implementovaného plánovače. Mezi vstupní proměnné této funkce patří např. počet dostupných RB označený  $n$ , které mají být přiděleny  $i$  aktivním UE, a počet RB požadovaných jednotlivými UE  $i$  označené  $Re q_i$ . Jako návratová hodnota této funkce je potom list obsahující informaci o tom, které RBs byly UEs alokovány (viz 6. Implementace plánovače do OAI). Pro přehlednost funkcionality této funkce, jsou zde uvedeny volané funkce:

- `dlsch_scheduler_pre_processor_reset ()` – vynulování tabulky alokace RBs z minulého TTI
- `store_dlsch_buffer ()` – načtení informací o UE z logických kanálů
- `assign_rbs_required ()` – výpočet MCS a potřebných RBs pro UE
- `sort_UEs ()` – seřazení UEs v seznamu podle určených kritérií
- `maxround ()` – kontrola, jestli není aktivní HARQ proces
- `maxCQI ()` – vyhledání nejvyššího CQI přes všechny nosné
- `dlsch_scheduler_pre_processor_allocate ()` – alokace kanálů pro UEs

Původní stateful plánovač v OAI, postupuje podle následujícího algoritmu:

1. Příprava dat potřebných pro plánování;
2. Výpočet maximálního počtu RBs pro každé UE,  $\overline{RB} = n/i$ ;
3. Přiřazení  $RB_i = \min\{Re\ q_i; \overline{RB}\}$  jednotlivým UE  $i$ ;
4. Seřazení UEs do seznamu podle několika kritérií: podle času od posledního vysílání, aktuální CQI, naplnění bufferu atd. Přesná kritéria pro třídění jsou poměrně komplikovaná a pro úplnost jsou uvedena v příloze.
5. Smyčka přes seřazený seznam s UE a přidělení  $RB_i$  každému UE, kterému ještě nebylo přiděleno  $Re\ q_i$  RB, do té doby, než není přiděleno všech  $n$  RB.

Původní plánovač cílí na zajištění spravedlivého přidělování zdrojů napříč jednotlivými UE, poskytnutím minimálního množství prostředků pro každého z nich (krok 3) a navíc zohlednit kvalitu signálu (krok 4, zohlední CQI při řazení CQI).

## 5. Implementovaný plánovač

Cílem této práce je implementovat centralizovanou verzi plánovače založeného na teorii her, konkrétně na modifikovaném algoritmu typu fiktivní hry. Zvolený plánovač je popsán v [4], kde je plánovač navržený v decentralizované podobě tzn., že přidělování komunikačních kanálů si uživatelé řeší sami, navíc bez znalosti toho, jak se rozhodují ostatní uživatelé v komunikačním dosahu. Uživatelé, zde vystupují jako hráči a hrají spolu tzv. fiktivní hru s cílem najít ideální přidělení kanálů (řešení hry) hráčům a tím maximalizovat propustnost sítě. Hra probíhá v cyklech, jejichž úplný algoritmus je v Alg. 1. Nalezené řešení postupně konverguje k optimálnímu přidělení kanálů, a to rychlostí zvoleného kroku  $\alpha$ . Zvolený krok určuje, jakou váhu bude mít při rozhodování aktuální fiktivní funkce kanálu a jakou fiktivní funkce kanálu v minulém TTI. Fiktivní funkce kanálu reprezentuje užitnou hodnotu (přenosovou kapacitu) daného kanálu pro dané UE.

Tab. 3 Definice proměnných pro algoritmy.

$N$	Počet hráčů
$K$	Počet kanálů
$M$ (nebo $M_N$ )	Počet nejlepších (nebo nejhorších) kanálů pro každého hráče
$\mathbf{a}$	Strategie hráče (volby kanálů)
$\mathbf{a}_{-n}$	Strategie ostatních hráčů (volby kanálů protihráčů)
$a_n$	Akce $n$ -tého hráče
$I_{n,k}(\mathbf{a}_{-n})$	Interference, kterou hráč $n$ měří v kanálu $k$ , pro dané $\mathbf{a}_{-n}$
$u_n$	Funkce užitečnosti $n$ -tého hráče
$h_{n,m,k}$	Odezva kanálu mezi přijímačem $n$ -tého hráče a vysílačem $m$ -tého hráče, v kanálu $k$
$h_{n,k}$	Odezva kanálu mezi přijímačem a vysílačem $n$ -tého hráče, v kanálu $k$
$P_n$	Vysílací výkon $n$ -tého hráče
$N_0$	Gaussův šum
$Q_{n,k}$	CQI $n$ -tého uživatele pro $k$ -tý kanál
$n(k)^{max}$	Uživatel (kanál) s maximální hodnotou CQI



---

*Alg. 1 Distribuované přidělování prostředků uživatelům.*

---

1) Inicializace – Výběr nějaké  $0 < \alpha < 1$  a  $\tau > 0$ . Každý hráč inicializuje svoji fiktivní užitečnost -  $\bar{U}_{n,k}(t) = u_{n,k}(0)$  pro každé  $k \in M_n$ , kde  $M_n$  je soubor jeho  $M$  nejlepších kanálů (bez interferencí).

---

2) Pro  $t = 1, \dots, T$  a pro každého hráče  $n = 1, \dots, N$

a) Výběr vysílacího kanálu

$$a_n(t) = \arg \max_k \bar{U}_{n,k}(t-1)$$

b) Měření interference pro každé  $k \in M_n$

$$I_{n,k}(t) = \sum_{m|a_m(t)=k} |h_{m,n,k}|^2 P_m$$

c) Aktualizace fiktivní funkce

$$\bar{U}_{n,k}(t) = (1 - \alpha)\bar{U}_{n,k}(t-1) + \alpha u_{n,k}(t)$$

Kde

$$u_{n,k}(t) = \log_2 \left( 1 + \frac{P_n |h_{n,(N-M+1)}|^2}{N_0 + I_{n,k}(a_{-n}(t))} \right)$$

d) Kontrola konvergence k Pure Nash Equilibrium (PNE).

(volitelé) Pokud  $t = \tau$  a  $I_{n,k}(t) \neq I_{n,k}(t-1)$  pro některé  $k \in A_n$ , návrat do bodu 1 tzn.  $t = 0$ .

---

Převodem decentralizovaného řešení, Alg. 1 z [4], na centralizované řešení je možné dosáhnout ideálního rozložení kanálů i bez fiktivní hry. V centralizované verzi je však nutné, aby eNB obsahovala všechny informace od UEs o kvalitě kanálů, reprezentovány pomocí odezev kanálů  $h_{n,(N-M+1)}$  či  $Q_{n,k}$ , označující CQI  $n$ -tého uživatele pro  $k$ -tý kanál. Plánovač tedy může rovnou přiřadit, kanály uživatelům, kteří na nich mají nejvyšší CQI, a tudíž i nejvyšší přenosovou rychlost. Přiřazování probíhá ve třech krocích. V prvním se načtou informace o UEs a kanálech. Ve druhém se sestupně, podle hodnoty CQI, seřadí UEs, a poté stejným způsobem kanály každého z nich. Ve třetím kroku probíhá smyčka přes seřazené UEs a jejich kanály, ve které se každému UE přiřadí nejlepší dostupný kanál. Úplný algoritmus centralizované verze zadaného plánovače je v Alg. 2.

---

*Alg. 2 Centralizovaný algoritmus.*

---

1) eNB načte parametry spojení ( $Q_{n,k}$ ) od všech aktivních UEs.

$$\bar{N} \subseteq N, \bar{K} \subseteq K$$

2) **while**  $\bar{K} \neq \emptyset$

$$n^{max}, k^{max} \leftarrow \operatorname{argmax}_{n \in \bar{N}, k \in \bar{K}} Q_{n,k}$$

$$A_{k^{max}} \leftarrow n^{max}$$

$$\bar{K} \leftarrow \bar{K} \setminus k^{max}$$

$$\bar{N} \leftarrow \bar{N} \setminus n^{max}$$

**end**

---

## 6. Implementace plánovače do OAI

V této části je popsána implementace centralizované verze plánovače, popsané v předchozí kapitole pomocí Alg. 1. OAI je stále ve vývoji, a tudíž některé funkcionality nemusí být k dispozici. Jedna z možností jak implementovat vlastní řešení přidělování prostředků spočívá ve využití rozhraní, které odděluje kód plánovače od kódu eNB [18], které ovšem není v současné době funkční. Plánovač je implementován takovým způsobem, aby jej bylo možné otestovat nejen pomocí emulace podle scénáře OSD, ale i s reálným hardwarem. Implementace centralizované verze zadaného plánovače vyžadovala ve funkcích plánovače OAI následující změny:

- *maxCQI ()* – změna porovnávaného CQI
- *sort\_UEs ()* – úprava kritérií pro seřazení UEs v listu
- *fill\_sort\_UEs\_RBs ()* – vytvoření funkce pro seřazení kanálů podle CQI
- *dlsch\_scheduler\_pre\_processor\_allocate ()* – přepsání funkce pro alokaci RBs

Hlavní změny v kódu jsou uvedeny zde a jsou rozděleny podle toho, ve které funkci se nachází. Hlavní funkce, která je volaná pro přidělování prostředků ve směru k uživatelům je *eNB\_dlsch\_scheduler\_pre\_processor*, která volá funkci *schedule\_ue\_spec ()*, kde, stejně jako v originálním kódu, proběhne deklarace všech potřebných proměnných a polí. Z této funkce je poté volána funkce *dlsch\_scheduler\_pre\_processor ()*, která se nachází v `\openair2\LAYER2\MAC\pre_processor.c`. Funkce *dlsch\_scheduler\_pre\_processor ()*, byla upravena a doplněna tak aby volala upravené a nové funkce. Volání těchto funkcí poté probíhá následovně:

```
store_dlsch_buffer(Mod_id, frameP, subframeP);
assign_rbs_required(Mod_id, frameP, subframeP, nb_rbs_required, min_rb_unit);

// upravená funkce pro seřazení UEs v listu, podle CQI
sort_UEs(Mod_id, frameP, subframeP, pocet_UEs, nb_rbs_required);

//naplnění pole (obsahujícího UEs a jejich kanály) indexy kanálů a seřazení podle jejich CQI
fill_sort_UEs_RBs(Mod_id, pocet_UEs, UEs_RBs);

for (int i = UE_list->head; i >= 0; i = UE_list->next[i])
{
    for (int ii = 0; ii < UE_num_active_CC(UE_list, i); ii++)
    {
        //volání funkce pro alokování
        dlsch_scheduler_pre_processor_allocate(Mod_id, UE_id, CC_id, N_RBG[CC_id], .....);
    }
}
```

Funkce *maxCQI ()* byla upravena tak, že funkce jde přes všechny RBs (for cyklus) a pokud eNB má dostupná data o UE (eNB\_UE\_stats != NULL), iterativně přepisuje hodnotu CQI na hodnotu CQI daného RB (eNB\_UE\_stats-> DL\_subband\_cqi), pokud je tato hodnota větší (eNB\_UE\_stats-> DL\_subband\_cqi[0][i] > CQI):

```
for (int i = 0; i < N_RBG; i++) {
    if (eNB_UE_stats == NULL)
        {mac_xface-> macphy_exit("maxcqi: could not get eNB_UE_stats\n");
        return -1; // not reached}
    if (eNB_UE_stats-> DL_subband_cqi[0][i] > CQI)
        {CQI = eNB_UE_stats-> DL_subband_cqi[0][i];}
}
```

Ve funkci *sort\_UEs ()* byly upraveny podmínky pro seřazení UEs tak aby jediným kritériem byla hodnota CQI, kterou má UE na některém z kanálů, původní kritéria pro seřazení UEs je uveden v příloze, část Popis původního plánovače :

```
cqi1 = maxcqi(Mod_idP, UE_id2, n);
cqi2 = maxcqi(Mod_idP, UE_id2, n);
if (cqi1 < cqi2)
    {swap_UEs(UE_list, UE_id1, UE_id2, 0);}
```

Dále byla vytvořena funkce *fill\_sort\_UEs\_RBs ()*, která naplní pole o rozměrech [počet\_UEs][počet\_kanálů] indexy kanálů a seřadí je podle jejich CQI (subcqi1 = eNB\_UE\_stats->DL\_subband\_cqi[0][i]) pro každé UE.

```
//naplnění pole indexy kanálů
for (int n = 0; n <= pocet_UEs; n++)
{ for (int i = 0; i < 13; i++)
    { UEs_RBs[n][i] = i;}
}
//seřazení kanálů podle jejich CQI pro jednotlivé UEs
for (int n = 0; n <= pocet_UEs; n++)
    { eNB_UE_stats = mac_xface->get_eNB_UE_stats(Mod_id, 0, UE_RNTI(Mod_id, n));
      for (int i = 0; i < 13; i++)
          { for (int ii = i + 1; ii < 13; ii++)
              { if (eNB_UE_stats != NULL)
                  { subcqi1 = eNB_UE_stats->DL_subband_cqi[0][i];
                    subcqi2 = eNB_UE_stats->DL_subband_cqi[0][ii];
                    if (subcqi1 < subcqi2)
                        { mem = UEs_RBs[n][i];
                          UEs_RBs[n][i] = UEs_RBs[n][ii];
                          UEs_RBs[n][ii] = mem;
                        }
                  }
              }
          }
    }
...
}
```

Ve funkci `dlsch_scheduler_pre_processor_allocate ()` byly upraveny podmínky pro alokování kanálů uživatelům a omezen počet kanálů na jeden pro každého uživatele. Toto omezení je vytvořeno pomocí kontroly, zda už UE má přiřazen kanál (`nb_rbs_required_remaining[CC_id][UE_id] > 0`). Důvodem pro toto omezení je aby každé UE vysílalo pouze na kanálu, na kterém má nejlepší podmínky (nejvyšší CQI).

```

for (n = 0; n < 13; n++) //cyklus alokace přes seřazené kanály
{
  i= UEs_RBs[UE_id][n];
  if ((nb_rbs_required_remaining[CC_id][UE_id] > 0)
      { if (ue_sched_ctl->dl_pow_off[CC_id] != 0)
        { if (nb_rbs_required_remaining[CC_id][UE_id] >= min_rb_unit)
          { rballocc_sub[CC_id][i] = 1; //přiřazení kanálu UE
            ue_sched_ctl->rballocc_sub_UE[CC_id][i] = 1; //přiřazení kanálu UE
          }
        }
      }
  ...
}

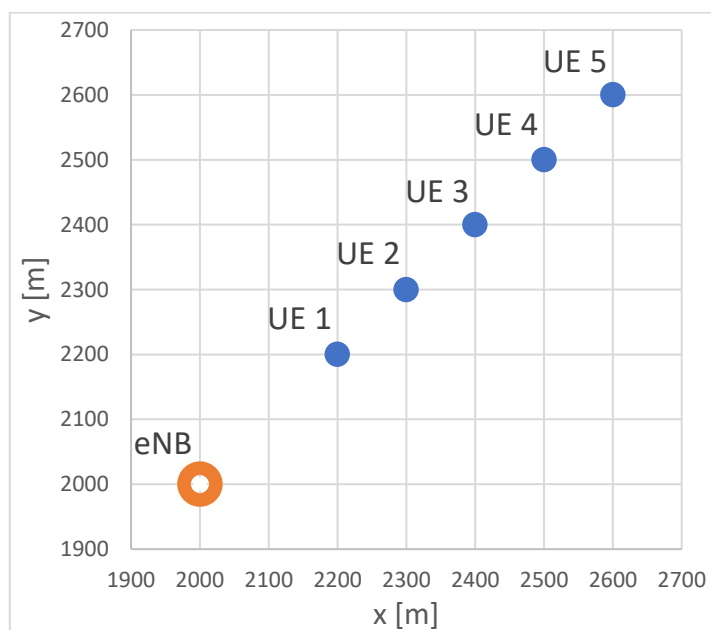
```

## 7. Ověření funkcionality implementovaného plánovače

Jelikož přidělování prostředků v LTE-A řídí eNB a OAI umožňuje emulaci eNB bez jádra sítě (EPC) byla využita tato možnost pro snížení výpočetních nároků ověření. Naměřené výsledky tedy, ale odpovídají emulaci s EPC. Ověření funkcionality proběhlo dle definovaného scénáře OSD. Ověření funkcionality poté probíhalo pomocí dvou různých rozmístění eNB a UEs a dvou typů provozu, a to small constant bitrate (SCBR) a full buffer. Emulací s různým rozmístěním UEs a eNB byla testována funkčnost OAI reflektovat předpokládané výsledky rychlosti komunikace UEs podle jejich vzdálenosti od eNB.

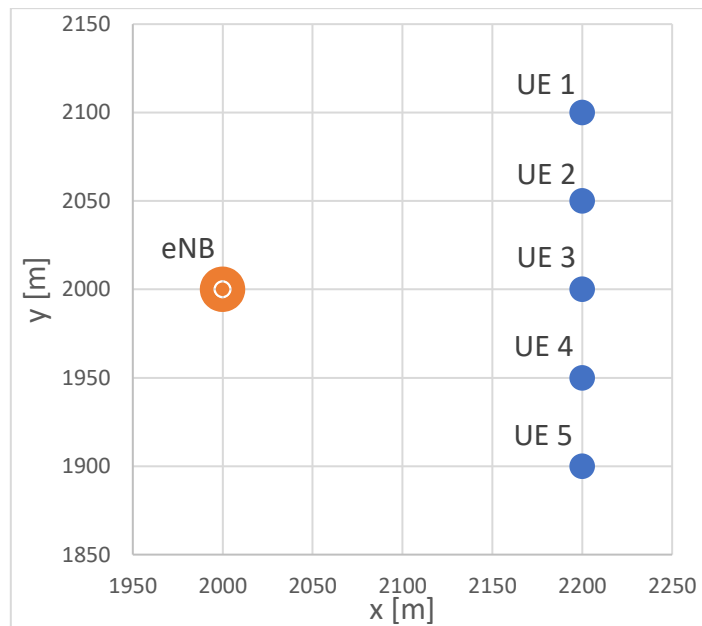
OSD scénář byl nastaven pro emulaci trvající 5000ms s 5 statickými UEs a jednou eNB, jejichž rozmístění je znázorněno na Obr. 10 pro emulaci 1 a na Obr. 11 pro emulaci 2. Celý scénář je uveden v příloze, část Příloha B: Scénář OSD. Šířka komunikačního pásma byla zvolena 5 MHz, což znamená 25 RBs. Komunikační prostředky v LTE-A (Pro) jsou alokovány ve formě tzv. Resource Block Groups (RBGs), které obsahují jeden nebo více RB. V případě 5 MHz šířky pásma platí, že jeden RBG obsahuje dva RBs [22].

Pro možnost přímého srovnání plánovačů (implementovaného a původního) byl původní plánovač testován, jak s možností využití 12 kanálů/RBGs (původní řešení) tak i s omezením na 5, což je maximální počet kanálů, který může přidělit implementovaný plánovač, jelikož scénář obsahuje 5 UE a každý má přiřazený jeden kanál.



Obr. 10 Rozložení eNB a UEs v emulaci 1.

- 7. Ověření funkcionality implementovaného plánovače



Obr. 11 Rozložení eNB a UEs v emulaci 2.

Ve výsledcích jsou porovnány počty přenesených paketů, zpoždění, propustnost a počet ztracených paketů. Při emulaci s rozložením 1 a provozem typu full buffer výsledky v Tab. 4 ukazují, že implementovaný plánovač přenesl obdobný počet paketů, ale má násobně vyšší hodnoty maximálního zpoždění při přenosu (OWD max.) než původní. Pro ověření, zda je toto zpoždění způsobeno nepravidelným generováním většího objemu dat (který má být odesláno UEs), než kolik jich může být přeneseno přes přiřazený kanál, byly plánovače otestovány i s provozem typu SCBR, tyto naměřené hodnoty jsou v Tab. 5. Z těchto hodnot je vidět, že pokud generování dat probíhá konstantně nižší rychlostí, OWD je srovnatelné s původním řešením, a to jak v případě využití 5, tak i 12 kanálů.

Z naměřených hodnot v Tab. 4 a Tab. 5 vyplývá, že pokud má plánovač k dispozici pouze 5 kanálů (jak původní, tak i implementovaný), které může přiřadit UEs, je nepravidelným generováním většího objemu dat způsobeno vysoké OWD, které v případě implementovaného plánovače způsobuje časovou expiraci paketů (data se po jednom kanálu nestačí přenést), a to má za následek i vysokou ztrátovost paketů a nižší přenosovou rychlost.

Tab. 4 Výsledky emulace pro Full buffer.

TOTAL DL RESULTS	Full Buffer		
	Implementovaný 5 kanálů	Původní 5 kanálů	Původní 12 kanálů
Total packets (TX)	10 010	10 010	10 010
Total packets (RX)	8 944	9 900	9 965
Total bytes (TX)	580 580	580 580	580 580
Total bytes (RX)	518 752	574 200	577 970
OWD MIN (one way) [ms]	2,00	2,00	2,00
OWD MAX (one way) [ms]	2 345,00	2 300,00	33,00
TX throughput [Kbit/s]	907,34	907,34	907,34
RX throughput [Kbit/s]	810,71	897,37	903,26
NB lost packet	1 066	110	45

- 7. Ověření funkcionality implementovaného plánovače

Tab. 5 Výsledky emulací pro SCBR.

TOTAL DL RESULTS	SCBR		
	Implementovaný 5 kanálů	Původní 5 kanálů	Původní 12 kanálů
Total packets (TX)	255	255	255
Total packets (RX)	255	255	255
Total bytes (TX)	47 175	47 175	47 175
Total bytes (RX)	47 175	47 175	47 175
OWD MIN (one way) [ms]	4,00	2,00	2,00
OWD MAX (one way) [ms]	8,00	7,00	6,00
TX throughput [Kbit/s]	73,73	73,73	73,73
RX throughput [Kbit/s]	73,73	73,73	73,73
NB lost packet	0	0	0

Tab. 6 Výsledky emulací pro rozložení 1 a 2, provoz typu full buffer.

Data	Rozložení 1		Rozložení 2		
	Implementovaný	Původní	Implementovaný	Původní	
eNB:0 -> UE:1	TX throughput [Kbit/s]	555,51	555,51	555,51	555,51
	RX throughput [Kbit/s]	540,53	553,85	541,91	553,8
	Loss rate	0,02697	0,00299	0,02447	0,00299
	NB Lost packets	54	6	49	6
eNB:0 -> UE:2	TX throughput [Kbit/s]	343,75	343,75	343,75	343,75
	RX throughput [Kbit/s]	258,24	343,06	340,65	315,76
	Loss rate	0,24875	0,00199	0,00899	0,08141
	NB Lost packets	498	4	18	163
eNB:0 -> UE:3	TX throughput [Kbit/s]	406,79	406,79	406,79	406,79
	RX throughput [Kbit/s]	398,05	401,51	255,41	401,51
	Loss rate	0,02147	0,01298	0,37212	0,01298
	NB Lost packets	43	26	745	26
eNB:0 -> UE:4	TX throughput [Kbit/s]	357,85	357,85	357,85	357,85
	RX throughput [Kbit/s]	353,92	357,67	355,88	353,9
	Loss rate	0,01098	0,0005	0,00549	0,01098
	NB Lost packets	22	1	11	22
eNB:0 -> UE:5	TX throughput [Kbit/s]	272,41	272,419	272,41	272,41
	RX throughput [Kbit/s]	211,32	271,33	244,79	267,65
	Loss rate	0,22427	0,00399	0,10139	0,01748
	NB Lost packets	449	8	203	35
TOTAL DL RESULTS	TX throughput [Kbit/s]	907,33	907,33	907,33	907,33
	RX throughput [Kbit/s]	810,71	903,25	814,33	884,49
	NB lost packet	1066	45	1026	252

- 7. *Ověření funkcionality implementovaného plánovače*

Při emulaci s rozdílným rozmístěním UE a eNB bylo ověřeno, že ve využitém kódu OAI (verze 0.52), chybí některé funkcionality potřebné pro úplné testování plánovačů. Z dat v Tab. 6 je vidět, že rychlost spojení při emulaci nezávisí na vzájemné poloze UE a eNB. Při implementaci kódu zadaného plánovače bylo zjištěno, že parametry, které má eNB k dispozici nejsou měřené, ale pouze vypočítané podle určitých modelů. Největší problém pak představuje reportování hodnoty CQI, které obsahuje hodnotu buď 0, nebo 15 tzn., že uživatel buď na kanálu vysílat může, nebo nemůže, z toho plyne i nereálné určení MCS a dalších parametrů komunikace mezi eNB a UE. Toto by však nemělo mít vliv při měření na reálném hardware připojeném k eNB.



## 8. Závěr

V této práci byl analyzován a ověřen decentralizovaný plánovač pro přidělování komunikačních prostředků. Z důvodů současných limitů emulátorů mobilních sítí byla navržena centralizovaná varianta zadaného plánovače, která byla otestována na platformě OpenAirInterface<sup>TM</sup>.

V první části této bakalářské práce je proveden rozbor sítě LTE-A a platformy OAI. V rozboru OAI je analyzován existující plánovač, tak i funkce, které s ním souvisí. Dále pak jsou prostudovány možnosti implementace vlastního plánovače do toho prostředí a jeho otestování.

Implementovaný plánovač, založený na teorii her s využitím fiktivní hry je dále analyzován a na této analýze je navržena centralizovaná verze plánovače, kterou lze implementovat do OAI. Ověření funkcionality centralizované verze plánovače bylo provedeno pomocí emulačního scénáře, který využívá stejný kód, jako je využit při připojení reálného hardwaru, a výsledky měření jsou tudíž srovnatelné.

Implementovaný plánovač byl porovnán s původním a následně byly diskutovány naměřené výsledky. Měření na reálném hardwaru nebylo provedeno, jelikož v reálném prostředí nelze kontrolovat interference z okolí, což by mohlo vést k nepřesnosti měření. Toto měření lze provést ve speciálních komorách, kde je interference z okolí eliminována. Z důvodu nutnosti speciálních komor a časové náročnosti tohoto měření, nebylo toto měření provedeno a je plánováno jako rozšíření této práce.

Při implementaci bylo objeveno několik, pro kompletní testování plánovačů podstatných, chybějících funkcí eNB. Mezi ně patří například měření parametrů komunikačního spojení, kdy hodnoty kvality kanálu pro jednotlivé subnosné reprezentované RBs obsahovali pouze informaci, zda se na daném RB lze komunikovat či nikoliv. I přes tyto chybějící funkce v kódu OAI bylo při měření implementovaného plánovače zjištěno, že není vhodný pro přenášení velkého objemu náhodně generovaných dat, což je v souladu s cílem návrhu plánovače pro komunikaci velkého množství zařízení, reprezentované například tzv. massive Machine Type communication, komunikací vysokého počtu zařízení.

Decentralizovaná verze plánovače založeného na teorii her má svůj potenciál právě v příští generaci mobilních sítí, kvůli dalšímu nárůstu komunikujících zařízení v síti. Jako konkrétní příklad možnosti využití tohoto typu plánování může být kromě massive Machine Type communication uvedena device-to-device komunikace, kde se počítá s vysokou hustotou komunikujících zařízení [1].

Výsledky práce je možné v budoucnu rozšířit o decentralizovanou verzi plánovače, jelikož je v OAI dokončována implementace device-to-device komunikace. Dále taktéž o měření na reálném hardware.

## Reference

- [1] A. Gupta a R. Kumar, „A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,“ IEEE Access, 2015.
- [2] W. Yingmin, R. Bin, S. Shaohui a K. Shaoli, „Analysis of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G,“ IEEE, 2016 .
- [3] F. Piro a G. Capozzi, „Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey,“ IEEE, 2012.
- [4] I. Bistritz a A. Leshem, „Game Theoretic Dynamic Channel Allocation for Frequency-Selective Interference Channels,“ IEEE, 2017.
- [5] A. Schloegl, D. Harris, F. Aalamifar a L. Lampe, „Modelling Power Line Communications Using Network Simulator-3,“ IEEE Global Communications, 2013.
- [6] OpenAirInterface, „OpenAirInterface,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.openairinterface.org/>.
- [7] P. Bezpalec, „LTE (Long Term Evolution),“ České vysoké učení technické v Praze.
- [8] P. Beming, L. Frid a G. Hall, „LTE-SAE architecture and performance,“ Ericsson Review, 2007.
- [9] Z. Bečvář, P. Mach a I. Pravda, „Mobilní sítě,“ České vysoké učení technické v Praze.
- [10] S. Lee, I. Pefkianakis a A. Meyerson, „Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink,“ IEEE, 2009.
- [11] 3GPP, „Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification,“ Technical Report 36.322, 2008.
- [12] Agilent Technologies, „3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges,“ Agilent Technologies, 2009.
- [13] M. Corici, D. Vingarzan a T. Magedanz, „3GPP Evolved Packet Core - the Mass Wireless Broadband all-IP architecture,“ 2010.
- [14] S. Sesia, I. Toufik a M. Baker, „LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice,“ 2009.
- [15] F. Khan, „LTE for 4G Mobile Broadband, Air Interface Technologies and Performance,“ Cambridge University Press, 2009.
- [16] 3GPP, "Policy and charging control architecture," Technical Report 23.203, 2007.
- [17] H. Ekström, „QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System,“ IEEE Communications Magazine, 2009.

- [18] F. Kaltenberger, C. Roux a M. Buczowski, „The OpenAirInterface Application Programming Interface for Schedulers using Carrier Aggregation,“ IEEE, 2016.
- [19] G. Stea, „MAC Scheduling in LTE,“ 2012.
- [20] N. Nikaein, „OpenAirInterface Simulator/Emulator,“ 2015.
- [21] A. Viridis, G. Stea a N. Iardella, „Performance analysis of OpenAirInterface system emulation,“ IEEE, 2015.
- [22] ETSI, „Technical Specification 36.213: E-UTRA, Physical layer procedures,“ 2016.

## 9. Přílohy

### Příloha A: Popis původního plánovače

Vychází z dokumentace [21].

Nechť  $n$  je počet aktivních UEs  
pro všechny  $i \in \{0, n\}$   
    Nechť  $CQI_i$  je  $CQI$   $i$ -tého UE  
    Nechť  $r_i$  je stav HARQ procesu  $i$ -tého UE  
    Nechť  $SBR_i$  je status bufferu  $i$ -tého UE  
    Nechť  $t_i$  je čas kdy naposledy  $i$ -tý dostal přiřazená data  
    Nechť  $B_i$  je velikost bufferu  $i$ -tého UE  
    pro všechny  $j \in \{i + 1, n\}$   
        Nechť  $CQI_j, r_j, SBR_j, t_j, B_j$  jsou parametry  $j$ -tého UE  
        když  $r_i > r_j$   
            prohod' ( $i, j$ )  
        jinak když  $r_i = r_j$   
            Když  $SBR_i > SBR_j$ ,  
                prohod' ( $i, j$ )  
            jinak když  $t_i > t_j$   
                prohod' ( $i, j$ )  
            jinak když  $B_i > B_j$   
                prohod' ( $i, j$ )  
            jinak když  $CQI_i > CQI_j$   
                prohod' ( $i, j$ )  
        konec podmínky  
    konec podmínky  
konec cyklu  
konec cyklu

### Příloha B: Scénář OSD

```
<OAI_EMULATION>
<ENVIRONMENT_SYSTEM_CONFIG>
<FADING>
<LARGE_SCALE>urban</LARGE_SCALE>
<FREE_SPACE_MODEL_PARAMETERS>
<PATHLOSS_EXPONENT>3.67</PATHLOSS_EXPONENT>
<PATHLOSS_0_dB>-120</PATHLOSS_0_dB><!--pathloss at 1km -->
</FREE_SPACE_MODEL_PARAMETERS>
<SMALL_SCALE>AWGN</SMALL_SCALE>
</FADING>
<WALL_PENETRATION_LOSS_dB>5</WALL_PENETRATION_LOSS_dB>
<SYSTEM_BANDWIDTH_MB>5</SYSTEM_BANDWIDTH_MB>
<SYSTEM_FREQUENCY_GHz>2.6</SYSTEM_FREQUENCY_GHz>
<ANTENNA>
<eNB_ANTENNA>
<RX_NOISE_LEVEL_dB>-90</RX_NOISE_LEVEL_dB>
```

```

<NUMBER_OF_SECTORS>1</NUMBER_OF_SECTORS>
<BEAM_WIDTH_dB>1.13</BEAM_WIDTH_dB>
<ANTENNA_GAIN_dBi>16</ANTENNA_GAIN_dBi>
<TX_POWER_dBm>40</TX_POWER_dBm>
</eNB_ANTENNA>
<UE_ANTENNA>
<RX_NOISE_LEVEL_dB>-90</RX_NOISE_LEVEL_dB>
<ANTENNA_GAIN_dBi>5</ANTENNA_GAIN_dBi>
<TX_POWER_dBm>20</TX_POWER_dBm>
</UE_ANTENNA>
</ANTENNA>
</ENVIRONMENT_SYSTEM_CONFIG>
<TOPOLOGY_CONFIG>
<AREA>
<X_m>6000</X_m>
<Y_m>6000</Y_m>
</AREA>
<MOBILITY>
  <UE_MOBILITY>
    <UE_INITIAL_DISTRIBUTION>random</UE_INITIAL_DISTRIBUTION>
    <RANDOM_UE_DISTRIBUTION>
      <NUMBER_OF_NODES>5</NUMBER_OF_NODES>
    </RANDOM_UE_DISTRIBUTION>
    <UE_MOBILITY_TYPE>TRACE</UE_MOBILITY_TYPE>
    <TRACE_MOBILITY_FILE>static_5ues.tr</TRACE_MOBILITY_FILE>
  </UE_MOBILITY>
</eNB_MOBILITY>
  <eNB_INITIAL_DISTRIBUTION>random</eNB_INITIAL_DISTRIBUTION>
  <RANDOM_eNB_DISTRIBUTION>
    <NUMBER_OF_CELLS>1</NUMBER_OF_CELLS>
  </RANDOM_eNB_DISTRIBUTION>
  <eNB_MOBILITY_TYPE>TRACE</eNB_MOBILITY_TYPE>
  <TRACE_MOBILITY_FILE>static_1enb.tr</TRACE_MOBILITY_FILE>
</eNB_MOBILITY>
</MOBILITY>
</TOPOLOGY_CONFIG>
<APPLICATION_CONFIG>
<!-- DL -->
<PREDEFINED_TRAFFIC>
  <SOURCE_ID>0</SOURCE_ID>
  <APPLICATION_TYPE>full_buffer</APPLICATION_TYPE>
  <DESTINATION_ID>1:5</DESTINATION_ID>
</PREDEFINED_TRAFFIC>
</APPLICATION_CONFIG>
<EMULATION_CONFIG>
<EMULATION_TIME_ms>10000</EMULATION_TIME_ms>
<PERFORMANCE_METRICS>
  <THROUGHPUT>enable</THROUGHPUT>
  <LATENCY>enable</LATENCY>
  <LOSS_RATE>enable</LOSS_RATE>
</PERFORMANCE_METRICS>
<LOG> <!-- set the global log level -->

```

```
<LEVEL>trace</LEVEL>  
<VERBOSITY>medium</VERBOSITY>  
</LOG>  
<SEED_VALUE>1234</SEED_VALUE>  
</EMULATION_CONFIG>  
<PROFILE>CBA_1</PROFILE>  
</OAI_EMULATION>
```