

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Jan Motyčka



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**IMPLEMENTACE MECHANISMŮ ZAJIŠŤUJÍCÍCH "RAN
SLICING" V SIMULAČNÍM NÁSTROJI NETWORK
SIMULATOR 3**

IMPLEMENTATION OF MECHANISMS ENSURING "RAN SLICING" IN THE SIMULATION TOOL NETWORK
SIMULATOR 3

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jan Motyčka

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Aneta Koláčková

BRNO 2021



Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Jan Motyčka

ID: 82091

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Implementace mechanismů zajišťujících “RAN Slicing” v simulačním nástroji Network Simulator 3

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Diplomová práce se bude zabývat implementací mechanismů pro sdílení síťových prostředků v rámci mobilních sítí 5G NR (New Radio). Teoretická část práce bude obsahovat detailní popis komunikačních mechanismů v nově implementovaných heterogenních systémech a to jak z pohledu Standalone (SA), tak i Non-Standalone (NSA). Praktická část bude zahrnovat vytvoření komunikačního scénáře v síťovém simulačním nástroji Network Simulator 3 (NS-3) s modulem LENA 5G. Ve vytvořeném scénáři budou ověřeny techniky adaptivního sdílení prostředků především pro přístupovou a transportní část heterogenního systému. Výstupy práce budou přehledně prezentovány a diskutovány. Výstupem diplomové práce bude detailní analýza nově nastupujících komunikačních systémů 5G NR s ohledem na sdílení síťových prostředků. A vytvoření simulačního scénáře v Network Simulator 3 s modulem LENA 5G.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Network Simulator 3: Documentation, A Discrete-Event Network Simulator [online], 2019. Dostupné z: <https://www.nsnam.org/doxygen/>

[2] REZENDE, Pedro HA; MADEIRA, Edmundo RM. An adaptive network slicing for LTE radio access networks. In: 2018 Wireless Days (WD). IEEE, 2018. p. 68-73.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Aneta Koláčková

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá principy technologie network slicing v sítích 5G, zejména pak v radiové přístupové části RAN (Radio Access Network). V teoretické části práce jsou představeny základní principy sítí 5G a network slicing jak v části jádra sítě CN (Core Network) tak radiové přístupové sítě RAN. V praktické části je vytvořen simulační scénář v simulátoru NS3 s modulem LENA 5G. Výsledky této simulace jsou názorně prezentovány a diskutovány s ohledem na přínos technologie RAN slicing.

KLÍČOVÁ SLOVA

5G NR, RAN slicing, Network slicing, NS3 simulátor

ABSTRACT

This thesis deals with the topic of network slicing technology in 5G networks, mainly on the RAN part. In the theoretical part, basic principles of 5G network slicing in core network part and RAN part are presented. Practical part contains a simulation scenario created in NS3 simulator with LENA 5G module. Results of this simulation are presented and discussed with the emphasis on RAN slicing.

KEYWORDS

5G NR, RAN slicing, Network slicing, NS3 simulator

MOTYČKA, Jan. *Implementace mechanismů zajišťujících "RAN Slicing" v simulačním nástroji Network Simulator 3*. Brno, 2021, 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Aneta Kolářková

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Implementace mechanismů zajišťujících “RAN Slicing” v simulačním nástroji Network Simulator 3“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Anetě Koláčkové především za její trpělivost, odborné vedení, konzultace, a podnětné návrhy k práci.

Také děkuji manželce, že mě i přes naše pracovní vytížení v průběhu celého studia podporovala a hlavně za to, že dala život našemu malému synovi, který se v průběhu mého studia narodil. Děkuji Ti, Ivanko.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 15 |
| 1 5G NR | 17 |
| 1.1 Motivace | 17 |
| 1.2 Oblasti využití | 19 |
| 1.3 Implementace 5G sítí | 20 |
| 1.3.1 Non Standalone a Standalone implementace | 20 |
| 1.3.2 Non-standalone option 3 | 20 |
| 1.3.3 Standalone option 2 | 21 |
| 1.3.4 Standalone option 4 | 21 |
| 1.3.5 Implementace užitá v současné praxi | 22 |
| 2 Network slicing v 5G sítích | 25 |
| 2.1 RAN slicing | 25 |
| 2.2 Core Network slicing | 26 |
| 3 RAN slicing | 29 |
| 3.1 RAN slicing model | 30 |
| 3.2 L1 - Fyzická vrstva | 31 |
| 3.3 L2 - PDCP, RLC, MAC | 32 |
| 3.4 L3 - RRC | 32 |
| 4 Simulátor NS-3 s modulem LENA 5G | 35 |
| 4.1 NS-3 simulátor | 35 |
| 4.1.1 Dostupnost a instalace | 35 |
| 4.2 LENA modul | 35 |
| 4.3 LENA 5G (NR) modul | 37 |
| 4.3.1 Architektura modulu NR | 37 |
| 4.3.2 Části spektra BWP (Bandwidth Part) | 39 |
| 4.3.3 Parametr numerology | 40 |
| 5 Simulační scénář | 43 |
| 5.1 Přenosy URLLC | 43 |
| 5.2 Parametry simulace | 44 |
| 5.3 Výsledky simulace | 45 |
| 5.3.1 Spektrum bez rozdělení | 46 |
| 5.3.2 Část spektra vyhrazena pro URLLC | 49 |
| 5.3.3 Porovnání dosažených hodnot přenosů | 52 |

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| 5.4 | Vyhodnocení výsledků simulace | 55 |
| Závěr | | 57 |
| Literatura | | 59 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Implementace Non-standalone option 3 | 20 |
| 1.2 | Implementace Standalone option 2 | 21 |
| 1.3 | Implementace Standalone option 2 | 22 |
| 2.1 | Network slicing | 26 |
| 3.1 | RAN slicing model | 30 |
| 3.2 | Mapování uživatelů na frekvenci a čas | 32 |
| 4.1 | LENA modul topologie | 36 |
| 4.2 | Architektura modulu NR - převzato z [13] | 38 |
| 4.3 | Architektura modulu NR - RAN část - převzato z [13] | 38 |
| 4.4 | Koncept rozdělení spektra pomocí CC a BWP | 39 |
| 4.5 | Vrstva BWP/CC Manager a vrstvy MAC a PHY | 40 |
| 4.6 | Parametr numerology v modulu NR | 41 |
| 5.1 | Přenosy v rámci simulačního scénáře | 45 |
| 5.2 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B) | 46 |
| 5.3 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B) | 47 |
| 5.4 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B) | 48 |
| 5.5 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B) | 48 |
| 5.6 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), RAN slicing . | 49 |
| 5.7 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), RAN slicing | 50 |
| 5.8 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), RAN slicing | 51 |
| 5.9 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), RAN slicing | 51 |
| 5.10 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), srovnání . . . | 52 |
| 5.11 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), srovnání . . | 53 |
| 5.12 | Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), srovnání . . | 54 |
| 5.13 | Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), srovnání . | 54 |

Úvod

Tato práce si klade za cíl seznámit se s nově nastupující pátou generací mobilních sítí 5G NR (New Radio) a to nejen s principy její architektury, začlenění do stávajících sítí, ale zejména jedním ze základních principů této nové technologie a to je tzv. Network Slicing. Jedná se o rozdělení sítě na jednotlivé logické části, kdy každá z těchto částí je schopna poskytovat různé parametry poskytovaných služeb. Tím je dosažena vysoká flexibilita poskytovaných služeb a zároveň je díky tomu síť 5G schopna obsluhovat požadavky současných moderních technologických novinek, které mnohdy mají protichůdné požadavky na služby poskytované sítí. Některé služby vyžadují vysokou propustnost (např. virtuální realita), zatímco jiné vyžadují velké množství připojených zařízení, které ale nepřenáší velké objemy dat (IoT – Internet of Things), nebo např. pro jejich bezchybný provoz je vyžadován spolehlivý přenos s velmi nízkou prodlevou, jako je např. komunikace mezi vozidly.

Práce se nejprve zabývá detailní analýzou nově nastupujících komunikačních systémů 5G NR s ohledem na sdílení síťových prostředků a to jak v radiové přístupové síti RAN (Radio Access Network), tak v jádru sítě CN (Core Network). Slicing v radiové přístupové části (RAN slicing) je poté podrobně rozebrán a vysvětleny jeho základní principy. V praktické části práce je představen simulátor Network Simulator 3 a vytvořen simulační scénář ilustrující funkci RAN slicing v nastupujících sítích 5G. Výsledky této simulace jsou přehledně prezentovány a diskutovány.

1 5G NR

Sítě páté generace označované jako 5G NR (New Radio) navazují na předchozí síť čtvrté generace LTE a dále rozvíjí komunikační prostředky tak, aby byly schopny vyhovět požadavkům moderní společnosti. Ta je čím dál více prolnta s technologií, která začíná zasahovat i do dříve nemyslitelných oblastí lidského života. To klade stále vyšší požadavky na konektivitu. Proto jsou síť páté generace přirozeným vývojovým článkem telekomunikačních sítí, který reflektuje vývoj a směřování moderní společnosti.

1.1 Motivace

Rozvoj digitální ekonomiky a společnosti patří dnes k hlavním trendům současnosti. Dochází k velmi rychlému vývoji v oblasti digitalizace a rozvoji moderních prostředků, jako jsou např. chytrá města, internet věcí IoT (Internet of Things) nebo souhrn technologií označovaný jako průmysl 4.0. Všechny tyto služby se neobejdou bez vysokorychlostních sítí, případně sítí schopných přenést velké množství dat, nebo s co nejnižší odezvou. Zároveň je potřeba zajistit bezpečnost takové sítě, protože bude napojena na velmi citlivou infrastrukturu a vyvstává obava ze zneužitelnosti dat, případně jiných kybernetických hrozeb.

Nový standard sítí 5G představuje nejmodernější technologii, která je založena na konvergenci bezdrátových a pevných sítí a díky tomu je schopna zajistit plošnou dostupnost služeb, a to i pevné připojení MFCN (Mobile Fix communications Networks). Proto se radiová složka stává pouze jednou součástí celého komplexu sítě 5G. Pevné a bezdrátové síť společně začínají tvořit rozsáhlou komunikační platformu, k níž jsou připojovány další systémy, čímž se může více přizpůsobit potřebám konkrétních uživatelů.

Vzhledem k tomu, že síť 5G mají obsloužit různá odvětví, předpokládá se výrazný nárůst počtu připojených zařízení, s čímž se výrazně zvyšují nároky na schopnosti přenosu velkých objemů dat. To s sebou přináší potřebu přenést tato data také od základnových stanic do jádra sítě, nebo mezi jednotlivými základnovými stanicemi. Proto se síť 5G neobejdou bez vysokorychlostní transportní sítě tvořené optickými vlákny. Nárůst zařízení bude mnohonásobný oproti stávajícímu stavu, kdy jsou stále primárně obsluhovány chytré telefony, případně zařízení s mobilním internetem.

Nově se do telekomunikační infrastruktury připojují i prvky z oblasti automatizace průmyslu, virtuální reality nebo dopravy. Každé z těchto odvětví vyžaduje odlišné parametry přenosu a proto síť páté generace musí být schopny poskytnout každému případu použití vhodné komunikační prostředky. Velkým přínosem v

oblasti optimalizace využití síťových prostředků je jejich rozdělení na menší celky a jejich dynamické přidělování uživatelským terminálům. Tato technologie je označována jako network slicing. Její pomocí lze obsloužit více přenosů a garantovat u nich parametry vyžadované daným přenosem. Proto je tato technologie velmi důležitým prvkem sítí páté generace.

1.2 Oblasti využití

Využití sítí 5G se předpokládá ve velkém množství odvětví a také v mnoha oblastech života obyvatel. Jsou to např. průmyslové aplikace jako jsou robotizované výrobní linky, dále je možné využití v dopravní infrastruktuře, kdy rozvoj v této oblasti pomalu směřuje k celkové automatizaci dopravy. K tomu je nutné zajistit vysoce spolehlivou komunikaci mezi jednotlivými prvky, protože případné chyby by mohly mít velký dopad na bezpečnost provozu. Automatizace dopravní infrastruktury bude jedním ze základních prvků konceptu chytrých měst (smart city).

Dalším odvětvím, které bude profitovat z přínosů sítě 5G je energetika, která se připravuje na zavedení chytré rozvodné sítě (smart grid), kdy je možné vyhodnocovat data z velkého množství senzorů rozmístěných v rozvodné síti a umožní tak lepší plánování a optimalizaci výroby a dodávky energií. Sensory ve velkém množství využívá především nastupující technologie IoT (Internet of Things – internet věcí). Sensory budou ve velkém sbírat data, která lze dále vyhodnocovat a následně opět optimalizovat služby poskytnuté zákazníkům, případně z dat získávat vědomosti o využití služeb, věcí nebo lokalit, případně data využívat pro různé předpovědi.

V neposlední řadě bude z vysokorychlostního připojení těžit zábavní průmysl, kdy lze díky vysoké propustnosti např. streamovat videa ve velmi vysokém rozlišení, případně streamovat obsah pro rozšířenou, či virtuální realitu.

Celkově bude nasazeno velké množství nových zařízení, které budou připojeny do nové sítě 5G, což bude klást vysoké požadavky nejen na spolehlivý a rychlý přenos dat, ale daleko důležitější se stane také důraz na zabezpečení takové sítě. Pokud máme do sítě napojeny prvky kritické infrastruktury stejně jako velké množství senzorů a jiných uživatelských zařízení, dá se očekávat daleko větší dopad případných kybernetických útoků. Proto pro zajištění bezpečnosti bude nutné v reálném čase analyzovat velké množství dat. Z toho důvodu vzroste podíl využití umělé inteligence [1].

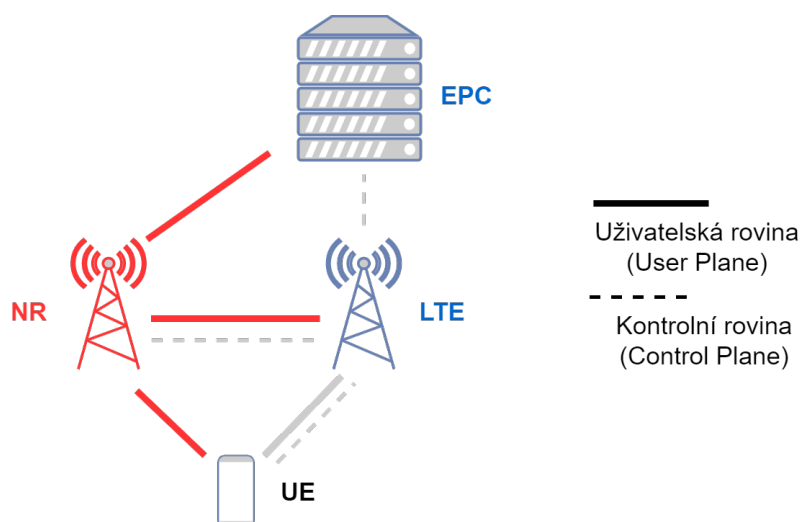
1.3 Implementace 5G sítí

1.3.1 Non Standalone a Standalone implementace

Sítě 5G mohou být implementovány různým způsobem. V současné době je definováno pět různých způsobů implementace [2]. Samostatná implementace SA (Standalone) se vždy skládá pouze ze sítě jedné generace, zatímco nesamostatná implementace NSA (Non Standalone) vždy obsahuje dvě generace přístupové technologie, tedy 4G LTE a 5G NR. Jedny z prvních implementací sítě 5G budou buďto Standalone option 2, Standalone option 4 nebo Non-standalone option 3, protože tyto způsoby jsou již standardizovány [2].

1.3.2 Non-standalone option 3

Přístupová síť RAN pro implementaci NSA option 3 se skládá ze základnových stanic LTE, tedy eNodeB, které jsou uvažovány jako hlavní (master) a dále ze základnových stanic technologie 5G, tedy gNodeB, které jsou podružné (slave).



Obr. 1.1: Implementace Non-standalone option 3

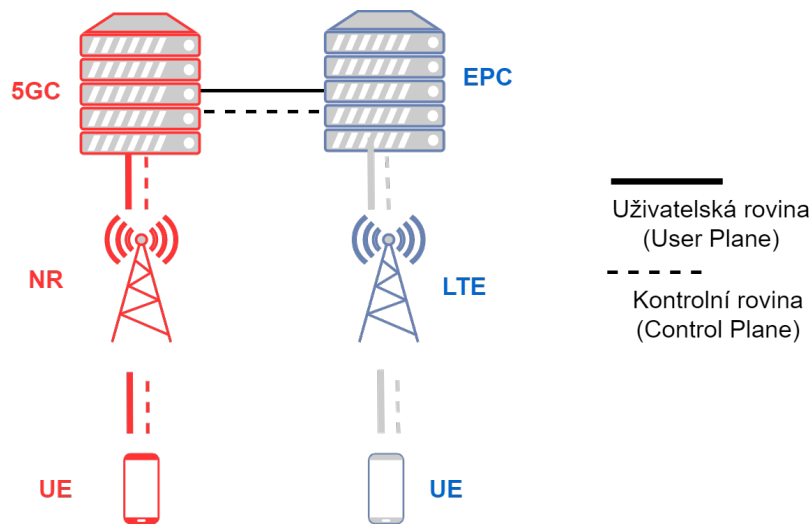
Tato implementace nezahrnuje jádro sítě 5GC (5G Core), a proto nemůže být optimalizována pro všechny služby, které přináší technologie 5G, pouze pro širokopásmový přenos. Zároveň se může stát, že bude nutné zachovat v síti jádro technologie LTE EPC (Evolved Packet Core) déle, než kdyby byla technologie LTE samostatně implementována, bez přidání technologie 5G možností NSA option 3.

Implementace NSA option 3 je velmi rychle proveditelná vzhledem k tomu, že staví nad stávajícími technologiemi 4G LTE, která vyžaduje pouze minimální úpravu. Také uživatelská zařízení, která podporují pouze stávající technologii 4G LTE jsou

podporována i nadále a v případě technologie 5G stačí novým zařízením podporovat protokoly radiové přístupové sítě NR (New Radio). To vše je pro operátory velmi výhodné z hlediska nákladů a také rychlosti nasazení a s tím spojenou konkurenční výhodou na trhu.

1.3.3 Standalone option 2

SA option 2 je implementací, při které vedle sebe fungují a spolupracují technologie 4G LTE a 5G NR. Radiová přístupová síť RAN se skládá pouze ze základnových stanic technologie 5G, tedy gNodeB a je připojena přímo do jádra 5G sítě, 5GC (5G Core). Vedle toho funguje samostatně technologie 4G LTE se svými základnovými stanicemi eNodeB připojenými do jádra EPC. Až na úrovni jádra sítí dochází k vzájemnému propojení a interakci obou technologií.



Obr. 1.2: Implementace Standalone option 2

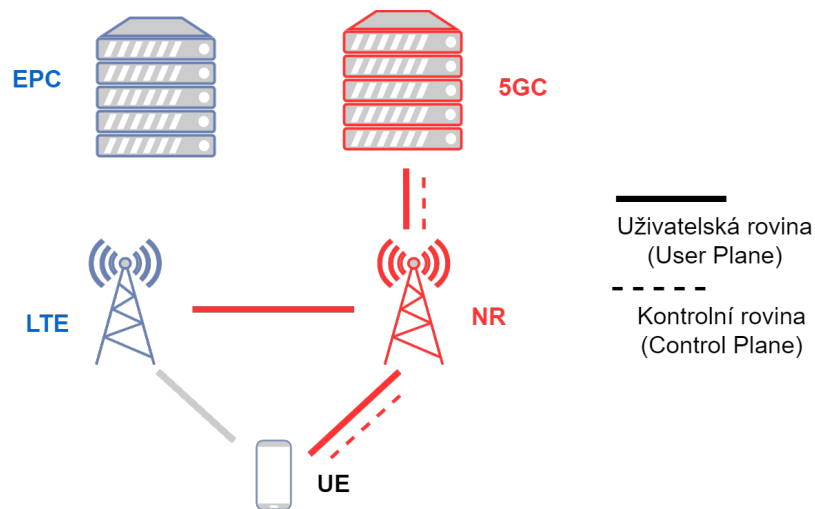
Toto řešení přináší velkou výhodu v plném nasazení sítě 5G se všemi jejími funkcemi jako je např. v této práci dále popisovaný network slicing, neboli rozdělení sítě na více samostatných logických částí.

Nevýhodou tohoto způsobu implementace je čas potřebný pro nasazení celé technologie, protože je potřeba nejen nová radiová přístupová síť NR, ale také jádro sítě 5GC. To celý proces zpomaluje a prodražuje. Také nová uživatelská zařízení musí podporovat nejen protokoly radiové části, ale rovněž jádra sítě.

1.3.4 Standalone option 4

Jakkoliv je implementace option 2 vhodná z hlediska implementace kompletní sítě 5G včetně všech jejích částí, tak přechod ze stávající NSA implementace je velmi

neefektivní a to z důvodu neschopnosti využití stávajících již implementovaných LTE prostředků pro síť NR. Pro tuto fázi rychlejšího a efektivnějšího přechodu k samostatné implementaci je vhodné využít SA Option 4.



Obr. 1.3: Implementace Standalone option 4

Oproti Option 2 také přechází plně nasazení 5G sítě, ovšem s tím rozdílem, že stávající LTE síť slouží jako jakási podpora nové 5G sítě. Proto tam, kde je to potřeba, lze vhodně doplnit o prostředky sítě LTE. Tím je možné v této přechodné fázi z implementace NSA k SA dosahovat daleko lepších přenosových rychlostí, než pokud by síť NR spoléhala pouze na své přenosové prostředky. Existují stávající LTE implementace, kde díky shlukování nosných CA (Carrier Aggregation) lze v této fázi dosahovat daleko vyšších přenosových rychlostí než u současných prostředků vyhrazených pro NR.

1.3.5 Implementace užitá v současné praxi

Cílem při implementaci sítě 5G je jeho samostatná varianta, aby byla síť schopna využít všech prostředků a vylepšení, které tato technologie poskytuje. Operátoři mají nyní k dispozici pouze omezené spektrum pro síť páté generace. V České republice se pak jedná o uvolněné pásmo 700MHz a také pásmo v řádu nižších GHz, konkrétně 3,4-3,6 GHz [3]. Stávající LTE síť v mnoha místech dosahuje vysokých rychlostí a vzhledem k přiděleným kmitočtům pro síť 5G nelze zatím naplno využít jejich potenciál. Na mnoha místech je LTE síť plně dostatečná. Proto je přechod k sítím 5G postupný a využívá stávající infrastrukturu operátorů, což je výrazně finančně efektivnější než budovat kompletní síť 5G vedle stávající infrastruktury. Proto jsou uvedené možnosti NSA option 3 nejrozšířenějším způsobem implementace

sítí 5G a postupně vedou k samostatné implementaci SA option 2. Existují i další způsoby implementace, tyto však vhodně doplňují přechod mezi nesamostatnou a samostatnou implementací. Příkladem budiž výše zmiňovaná SA option 4.

2 Network slicing v 5G sítích

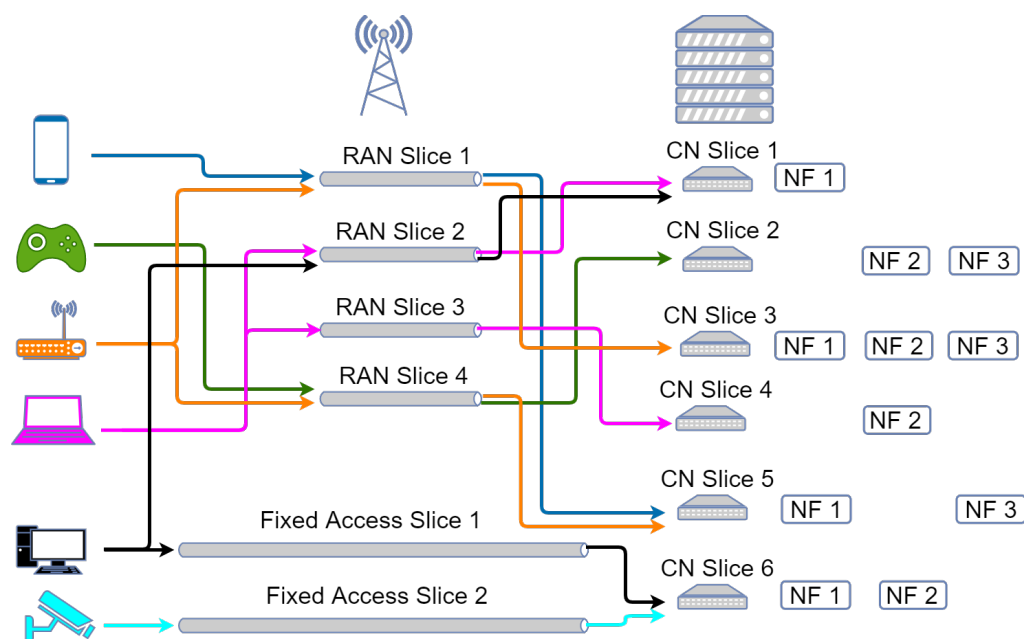
Network slicing představuje rozdělení sítě na jednotlivé virtuální části sítě (slice), které mohou být individuálně nadimenzovány a nastaveny tak, aby byly schopny splnit požadavky určitých aplikací a uživatelů. Jde o jednu ze zásadních funkcionalit budoucích sítí 5G, díky které jsou operátoři schopni provozovat hned několik logických sítí na jedné společné fyzické infrastruktuře. Toto přináší spoustu výhod jak pro náklady na nasazení nových sítí, tak pro jejich provoz, zároveň však klade vysoké požadavky na funkčnost sítě jako je např. velmi nízká latence, vysoká propustnost až 10 Gb/s, nebo vysoká spolehlivost přenosu. Tyto požadavky není často možné dosáhnout jednotným nastavením celé sítě. Zde vyvstává výhoda logického rozdělení sítě na více sítí, kdy každou jednu logickou část lze optimalizovat tak, aby splňovala pouze určité požadavky, které jsou jiné ze strany např. široké veřejnosti, firemní klientely nebo např. potřeb moderních odvětví jako jsou komunikace mezi vozidly nebo chytrá města.

Každá logická část sítě (slice) může být optimalizována tak, aby splnila určité požadavky a určité chování sítě. Např. lze nastavit určité specifické chování sítě, aby co nejlépe vyhovovala některým aplikacím. Např. různě bude nastavena logická část pro přenos URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications – Ultra spolehlivý přenos s nízkou latencí), eMBB (enhanced Mobile Broadband), nebo pro IoT (Internet of Things – Internet věcí), kdy u IoT aplikace nemusí být vůbec implementována např. podpora pro mobilitu zařízení. Ilustrace možného využití network slicing je na Obr. 2.1.

Dále je možné jednotlivé logické části nastavit tak, aby splňovaly požadavky uživatele. Jde např. o vyhrazení síťových prostředků tak, aby i v době nejvyššího vytížení sítě byla garantována určitá minimální kapacita, kterou může uživatel využít.

2.1 RAN slicing

Radiová přístupová síť RAN v sítích 5G-NR se v dnešních nesamostatných (Non-standalone) implementacích skládá nejen z nových základnových stanic gNodeB, ale především ze základnových stanic technologie LTE eNodeB. Všechny tyto základnové stanice v sobě obsahují sadu protokolů potřebných pro obsluhu jak roviny uživatelských dat (user plane), tak roviny kontrolní (control plane). Původní základnové stanice eNodeB musí být schopny komunikace jak s novým 5G Core, tedy jádrem sítě 5G, tak i s původním jádrem technologie LTE, EPC (Evolved Packet Core) a to z důvodu možné implementace nové 5G sítě do stávající sítě LTE a postupné migrace k samostatné (standalone) implementaci. Nutná koexistence nové



Obr. 2.1: Network slicing

sítě vedle stávající proto přináší jistá omezení pro novou přístupovou technologii stejně jako nutnost přidání nových funkcionalit do stávající technologie, aby byla kompatibilní s technologií novou a vhodně se zapracovala do její struktury.

Použití tzv. RAN slicing umožňuje operátorům vytvořit logickou část sítě, která má stejné vlastnosti jako 5G síť při samostatné (Standalone) implementaci, ale za využití sdílení stávajících prostředků. Klíčovou roli v tomto hraje virtualizace funkcí sítě (NFV – Network Functions Virtualization) a softwarově definované sítě (SDN – Software Defined Network)[4], kdy je možné z jedné základnové stanice eNodeB vytvořit několik virtuálních eNodeB a je možné přidělovat síťové prostředky v reálném čase tak, aby byly splněny požadavky uživatele jednotlivých logických částí. Každá logická část může mít své jedinečné vlastnosti, případně některé vlastnosti sdílí s jinými logickými částmi.

2.2 Core Network slicing

Jádro sítě (CN – Core Network) bylo tradičně navrženo jako jedna síťová architektura, která slouží více účelům a požadavkům a zajišťovala zpětnou kompatibilitu s předchozími generacemi sítí. Ovšem aktuální evoluce využívající virtualizaci za pomoci NFV (Network Functions Virtualization) a SDN (Software Defined Network) dává možnost vytvořit škálovatelnou síť, která je daleko flexibilnější a zároveň optimalizovaná vzhledem k požadavkům jednotlivých uživatelů. Stejně jako v případě

RAN slicing, i zde dochází k rozčlenění stávající síťové infrastruktury na více logických částí, kdy každá část poskytuje svou specifickou konektivitu. Je možné jednotlivé části vytvořit na stejné infrastruktuře, případně na různých infrastrukturách samostatně. Toto řešení přináší značnou flexibilitu v návrhu jádra sítě. Důležitým aspektem v architektuře 5G sítí je oddělení uživatelské (User plane) a kontrolní roviny (Control Plane), což přináší výhody v jejich konfiguraci. Např. uživatelská rovina může být rozložena podle požadavků každé části v závislosti na jejich nárocích ohledně mobility, objemu přenesených dat nebo co nejkratší doby odezvy. Některé služby jako je eMBB mají vysoké nároky na objem přenesených dat a mohou být dále rozděleny na další části a k nim přiřadit specifické funkcionality tak, aby byla zachována maximální spolehlivost a efektivita přenosu, a dále mohou využívat výkonný hardware, zatímco některé méně náročné přenosy mohou využívat méně výkonný hardware, což přispívá k efektivnímu využití zdrojů jádra sítě. Dále lze tímto oddělením přesunout uživatelskou rovinu blíže k uživatelům, a tím dále snížit dobu odezvy RTT (round trip time) a zároveň snížit nároky na transportní síť. Zatímco tímto způsobem se přiblíží uživatelská rovina blíže k uživateli, kontrolní rovina může být umístěna centrálně, čímž dojde i k zjednodušení její obsluhy a konfigurace [5].

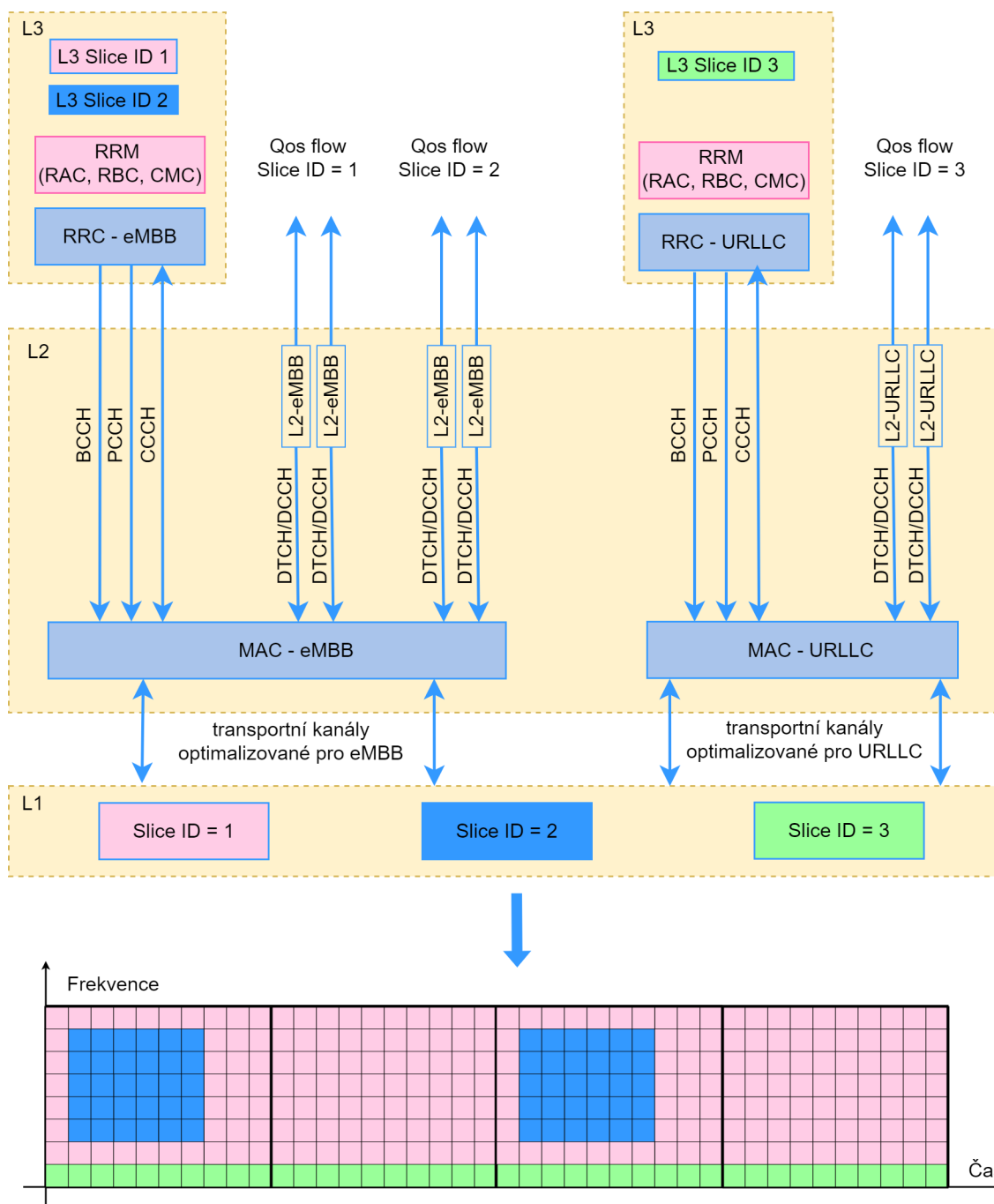
3 RAN slicing

RAN slicing představuje mapování souboru konfigurovatelných pravidel na jednotlivé logické části přístupové sítě tak, aby celá logická část byla schopna poskytnout požadované parametry spojení. Každá tato část přístupové sítě je jasně definovaná svým identifikátorem a jsou na ni aplikována pravidla dle nastavených požadavků na funkčnost sítě a to jak pro uživatelskou rovinu, tak pro rovinu kontrolní. Některé funkce sítě mohou být sdíleny více logickými částmi, není tedy nutné některé části konfigurovat samostatně, což vede k lepší výkonnosti a efektivitě 5G sítě. V případě kontrolní roviny jsou definovány společné funkce pro zařízení, která jsou v idle módu, tedy nemají aktivní spojení. Dále každá jednotlivá část může mít navíc definované vlastní funkce kontrolní roviny, které mohou být pro každou část jiné. V případě roviny uživatelské je možné, aby každá část měla definovanou vlastní sadu protokolů v závislosti na poskytované službě, tedy např. délce zasílaných paketů.

Pro řízení přístupu k jednotlivým částem sítě lze využít obecná pravidla pro přístup, ovšem pro určité specifické využití částí sítě je možné nastavit pravidla přístupu tak, aby např. uživatelskému zařízení, které pracuje v jedné části sítě, byl povolen přístup pouze v případě, že takováto část sítě je aktivní. Zařízení o této skutečnosti může, ale nemusí být informováno. Nastávají dva případy, kdy v jednom může zařízení být dopředu informováno o specifické konfiguraci přístupové sítě předem, zejména pokud jde o jinou než výchozí konfiguraci. V druhém případě zařízení žádá o přístup ke službě poskytované logickou částí jádra sítě a přístupová síť podle toho poté přidělí radiové prostředky tak, aby zařízení byla poskytnuta vyžádaná služba.

Aby mohla přístupová síť přidělit radiové prostředky jednotlivým logickým částem sítě, je zapotřebí tyto prostředky vhodným způsobem spravovat. Přidělovat prostředky lze buď staticky, nebo dynamicky. Při statickém přidělování jsou logické části pevně vyhrazené radiové prostředky po určenou dobu. Toto nastavení umožňuje garantovat přidělení radiových prostředků logické části sítě. Oproti tomu při dynamické správě prostředků jsou každé logické části přiděleny prostředky na základě priority a požadavků. Požadavky na přidělení prostředků jsou zasílány do centrálního plánovače (central scheduler), který vyhodnocuje celkový aktuální provoz, požadované množství prostředků od jednotlivých logických částí sítě a také priority každé části. Na základě toho poté přiděluje radiové prostředky. Toto řešení umožňuje lepší optimalizaci využití radiových prostředků podle aktuální situace v přístupové síti [6] [7].

3.1 RAN slicing model



Obr. 3.1: RAN slicing model

Aby bylo možné vytvořit logickou část radiové přístupové sítě, je potřeba ji jasně identifikovat a definovat její vlastnosti na základě služby, jejíž parametry musí splňovat. Dále je potřeba ji řídit a spravovat, a proto je potřeba přidat nové informační bloky a prvky protokolů a to na všech vrstvách. Na Obr 3.1 je zakreslena celková

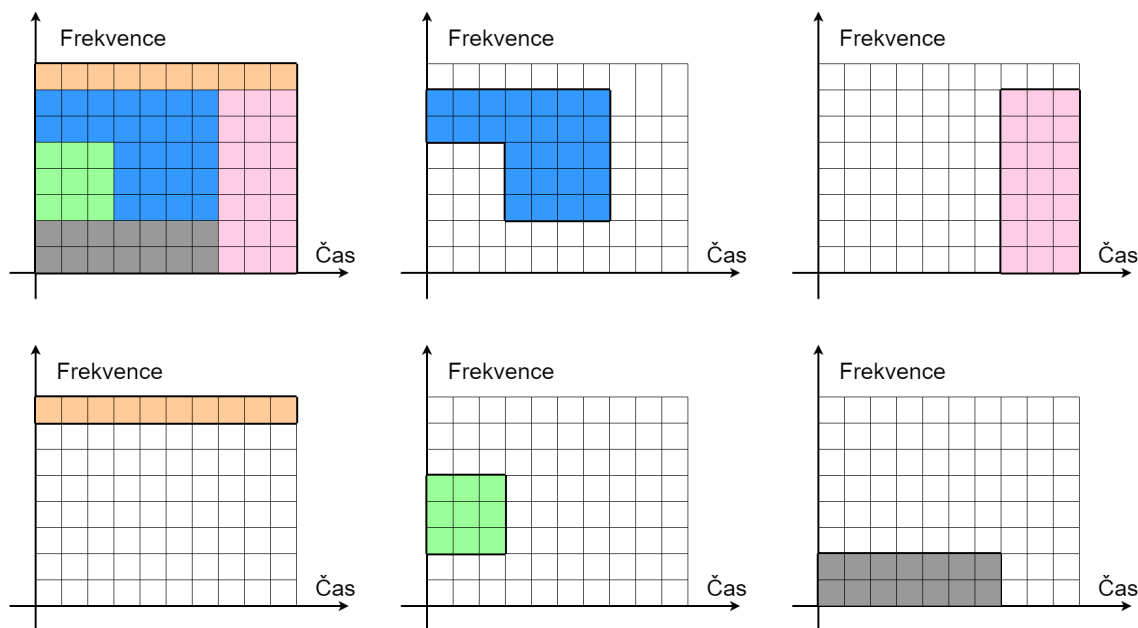
ilustrace principu RAN slicingu přes vrstvy L1 až L3. Jsou zde ilustrovány tři logické části, kdy dvě z nich (slice ID 1 a 2) přenáší data přes eMBB, zatímco slice ID 3 využívá přenos URLLC. K tomu jaký typ přenosu logická část používá slouží tzv. S-NSSAI (Single Network Slice Selection Assistance Information). S-NSSAI nese informaci zvanou SST(Slice-Service type), tedy typ služby - standardní hodnoty jsou eMBB, URLLC, MIoT. Dále může nést informaci o dalším dělení logických částí tzv. SD (Slice Differentiator). Uživatelské zařízení UE zasílá NSSAI (Network Slice Selection Assistance Information) a ten se skládá z maximálně osmi S-NSSAI. Na tomto základě je pak požadavek vyhodnocen a přidělen požadovaný počet logických částí dle nastavení a dostupnosti [8].

3.2 L1 - Fyzická vrstva

Fyzická vrstva L1 poskytuje linkové vrstvě L2 přenosové služby ve formě transportních kanálů, které definují jak budou data přenášena. Vrstva L1 také vytváří odpovídající strukturu radiových prostředků (např. struktura dle frekvence a času). Proto, aby L1 mohla poskytnout odpovídající radiové prostředky podle potřeb vyšších vrstev – každá logická část může mít jiné požadavky – je nutné, aby každá logická část měla přiřazen identifikátor tak, aby bylo možné tyto požadavky specifikovat.

Přiřazení odpovídajících prostředků, tedy mapování jednotlivých slotů vyhrazených pro různé části je ukázáno na Obr. 3.2. Symboly vyznačené jednou barvou jsou vyhrazeny jedné části.

Takto vytvořené části mohou každá být zvlášť nakonfigurována a optimalizována v závislosti na požadovaných parametrech přenosu. Toto segmentování radiových prostředků dále znamená, že referenční a kontrolní signály nemusí být vysílány přes celou šířku pásma, ale mohou být vysílány vždy v rámci každé jedné části a to opět pro každou část jiným způsobem. Tento přístup také umožňuje dynamické přidělování prostředků podle aktuálních požadavků.



Obr. 3.2: Mapování jednotlivých uživatelů na frekvenci a čas.

3.3 L2 - PDCP, RLC, MAC

Linková vrstva L2 obsahuje podvrstvu přístupu k médiu MAC (Medium Access Control), která má na starost časování a multiplexování přenosu paketů přes transportní kanály vyhrazené fyzickou vrstvou L1. Vrstva L2 dále obsahuje podvrstvy PDCP a RLC. V sítích NR (New Radio) je přidána vrstva SDAP (Service Data Adaptation Protocol), která má na starosti tzv. QoS Flows, což jsou datové přenosy spravované jádrem sítě 5GC splňující určitou hladinu QoS.

Linková vrstva L2 zajišťuje chování QoS (Quality of Service) na úrovni přeposílání paketů a to pro provoz, který probíhá v odpovídající logické části radiové přístupové sítě. Proto je nutné na základě jednotlivých částí určit prioritu pro plánování odesílání paketů pro každou logickou část a využití radiových prostředků každou částí, stejně jako nastavení fungování podvrstev RLC a PDCP [6] [7].

3.4 L3 - RRC

Síťová vrstva L3 obsahuje RRC (Radio Resource Control) protokol a také funkce RRM (Radio Resource Management) jako je RBC (Radio Bearer Control), RAC (Radio Admission Control) a CMC (Connection Mobility Control), které obstarávají aktivaci a správu radiových přenašečů RB (Radio Bearer).

Pro každé uživatelské zařízení UE (User Equipment) může být alokováno více

datových přenašečů (DRB) na jednu PDU (Protocol Data Unit). Pro každou logickou část probíhá přenos dat po různých datových přenašečích RB, protože provoz na různých částech probíhá v různých PDU. Je proto nutné na této vrstvě specifikovat alokovanou kapacitu pro každou logickou část, dále možnosti RRC protokolu a pravidla RRM, která řídí fungování každé části.

V případě, že existuje na sdílených radiových prostředcích více logických částí najednou, musí výše zmiňované RRM, RBC, RAC a CMC zařídit každé části požadovaný počet prostředků a také vyřešit případné konflikty, ke kterým může docházet. Proto by měla být např. specifikována kapacita, kterou má každá část povolenu využívat. Zde záleží na přístupu, zda půjde např. o maximální možnou bitovou rychlost přenosu celou částí, nebo např. počtem datových přenašečů. Dále by měla být nastavena priorita pro každou část a to z důvodu vyřešení možných konfliktů při požadavcích na přidělení radiových prostředků.

RRC protokol může být individuálně nastaven pro každou část zvlášť pokud bude probíhat po dedikovaných datových přenašečích pro signalizaci, tedy takových, které nejsou sdílené s ostatními logickými částmi. Pokud je více částí nastaveno tak, aby sdílely běžné logické kanály jako je BCCH (Broadcast control channel), PCCH (Paging Control Channel) a CCCH (Common Control Channel), pak je nutné zajistit, aby UE bylo schopno odlišit signalizaci od různých logických částí. Dále by UE mělo znát identifikátor logické části tzv. Slice ID, které může být vysíláno na úrovni BCCH, tím pádem umožňuje UE lépe vyhodnotit proces při selekci [6] [7].

4 Simulátor NS-3 s modulem LENA 5G

4.1 NS-3 simulátor

NS-3 simulator je simulátor pracující na základě diskretních událostí a je určen zejména pro studijní účely a výzkum a je a chce i nadále zůstat v režimu open source. NS-3 byl vyvinut tak, aby poskytoval otevřenou simulační platformu pro výzkum a studium komunikačních sítí. S tímto simulátorem tedy lze vytvořit scénáře, které by bylo složité vytvořit s reálnými systémy a to ve velmi dobře konfigurovatelném a kontrolovaném prostředí. Dále je vhodný pro studium a pochopení principů fungování komunikace v různých síťových infrastrukturách. Tento simulátor je hojně využíván i v jiných odvětvích a to především díky jeho rozšiřitelnosti o další moduly [9] [10].

4.1.1 Dostupnost a instalace

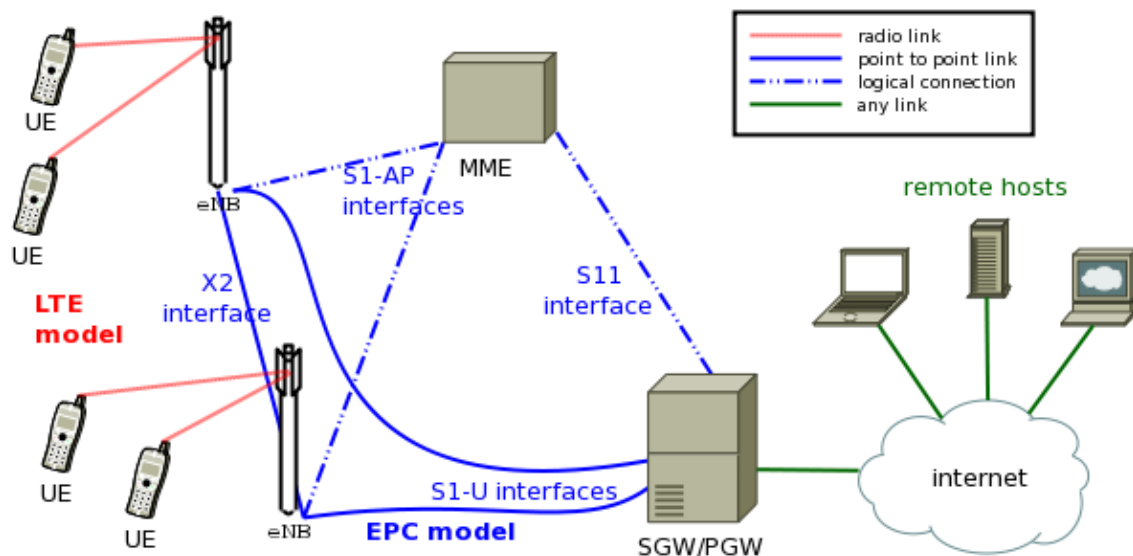
Simulátor NS3-3 je dostupný v době psaní diplomové práce ve verzi 3.33 a to konkrétně na webu organizace nsnam, dostupné z adresy <https://www.nsnam.org/>. Tato organizace simulátor spravuje a pravidelně vydává nové verze, na jejichž vývoji se aktivně podílí také velmi početná komunita. Pro začátky práce se simulátorem NS-3 je poskytnut velmi podrobný manuál [11] a rovněž webové wiki stránky s detailním popisem podporovaných operačních systémů a způsobu instalace simulátoru. Rovněž jsou zde podrobně rozepsány všechny funkce simulátoru včetně všech jeho součástí a je zde uveden příklad kódu, pro lepší pochopení funkčnosti simulátoru a pro dosažení požadovaných parametrů simulace.

4.2 LENA modul

LENA modul slouží pro návrh systému LTE. Na Obr. 4.1 je přehled simulačního modelu LTE-EPC.

LTE model byl navržen tak, aby podporoval návrh a vyhodnocování následujících aspektů systému LTE : Správa radiových prostředků RRM (Radio Resource Management) Plánování paketů s ohledem na QoS (QoS-aware Packet Scheduling) Řízení mezibuňkových interferencí ICI (Inter-cell Interference) Dynamický přístup ke spektru DSA (Dynamic Spectrum Access) Aby bylo možné modelovat LTE systémy tak, aby bylo možné správně vyhodnocovat výše zmíněné aspekty, tyto požadavky byly brány v úvahu:

- Na úrovni radiového vysílání, minimální rozlišení modelu musí být nejmenší jednotka alespoň 1 RB (Resource Block). Toto je základní jednotka užitá pro



Obr. 4.1: LENA modul topologie

přidělování prostředků. Bez tohoto rozlišení by nebylo možné přesně modelovat plánování paketů a mezibuňkovou interferenci (ICI).

- Simulátor musí být schopen nadimenzovat simulovaný scénář až na desítky základnových stanic eNodeB a stovky uživatelských zařízení UE (User Equipment). Toto pravidlo vylučuje simulátory, které mají rozlišení na úrovni radiového přenosu až na úroveň symbolů a to z toho důvodu, že na takovéto úrovni by bylo nutné implementovat všechny signálové procesy na fyzické (PHY) vrstvě. To by znamenalo obrovskou výpočetní náročnost, která by s sebou přinášela velké ztížení prováděných simulací. Simulátory pracující na této úrovni jsou z toho důvodu většinou limitovány na jednu základnovou stanicí eNodeB a jedno nebo několik uživatelských zařízení.
- Mělo by být možné nastavit různé buňky tak, aby každá využívala jinou nosnou frekvenci a šířku pásma. Měla by být možnost nastavit šířky pásma tak, aby se vzájemně překrývala, a to z důvodu podpory dynamického licencování spektra.
- Aby simulace byla co nejbližší reálným implementacím, simulátor by měl podporovat MAC Scheduler API publikované společností FemtoForum [12]. Očekává se, že toto rozhraní bude používáno výrobcí Femto buněk pro implementaci algoritmů časování a správu radiových prostředků RRM (Radio Resource Management). Díky podpoře tohoto rozhraní jsou dodavatelé zařízení schopni testovat v simulátoru stejné algoritmy, které poté budou nasazeny v reálných zařízeních
- Simulační model LTE by měl obsahovat své vlastní API definované v [12]. Není očekávána kompatibility binární ani datové struktury s implementacemi

dodavatelů, a proto v případě, že je použit MAC scheduler od určitého dodavatele, je nutné vložit vrstvu, která zajistí kompatibilitu. Tato podmínka je nutná pro nezávislost simulátoru na implementacích jednotlivých dodavatelů technologií.

- Model se užívá pro simulaci přenosu IP paketů vyššími vrstvami. Je třeba vzít v úvahu, že LTE plánování paketů a správa radiových prostředků RRM nepracuje přímo s IP pakety, ale s datovými jednotkami PDU (Packet Data Unit) vrstvy RLC (Radio Link Control), které jsou získány segmentováním a skládáním IP paketů, které provádí RLC entity. Proto by funkčnost RLC vrstvy měla být modelována přesně.

4.3 LENA 5G (NR) modul

Modul LENA byl vyvinut pro potřeby simulace především LTE sítí a LENA 5G (NR) modul na tento přirozeně navazuje. Tento modul vytvořila a spravuje organizace CTTC (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya) a je dostupný na webu <https://gitlab.com/cttc-lena/nr>, který je zpřístupněn až po odeslání emailu s požadavkem o poskytnutí přístupu k modulu.

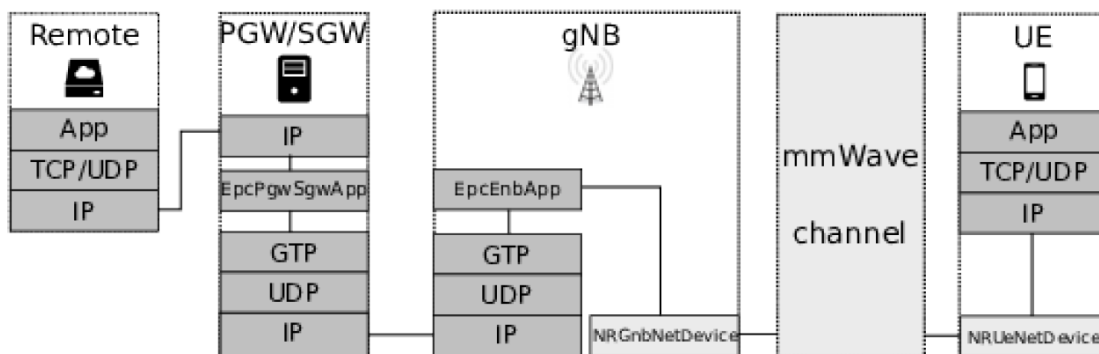
Jeho vývoj se zakládal na modulu mmWave zabývajícím se 5G sítěmi pracujícími v pásmu 30GHz - 300 GHz. Tento modul obsahuje důležitý prvek a to tzv. carrier aggregation, neboli flexibilní shlukování nosných tak, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů přenosu pro jednotlivé uživatele. Tímto dochází k efektivnějšímu využití radiových prostředků.

Koncept představený v modulu mmWave byl dále rozvíjen a byl vytvořen nový NR modul, který slouží k simulaci funkčnosti 5G sítí v souladu s 3GPP Release 15 NR specifikace. Pro tuto práci zabývajícím se RAN slicingem je tento modul nejvhodnější a to zejména díky konceptu rozdělení použitého spektra na jednotlivé části tzv. BWP (Bandwidth part) a také konceptu numerologie, díky kterému je možné upravit strukturu radiového rámce a tím simulovat různé typy přenosů podle potřeby délky slotu a tedy zejména přenosů s velmi nízkou latencí URLLC (Ultra Reliable Low Latency) a přenosů s extra velkou šířkou pásma eMBB (enhanced Mobile Broadband).

4.3.1 Architektura modulu NR

NR modul byl vytvořen pro potřebu simulací typu end-to-end, přehled tohoto typu simulace je zachycen na Obr. 4.2.

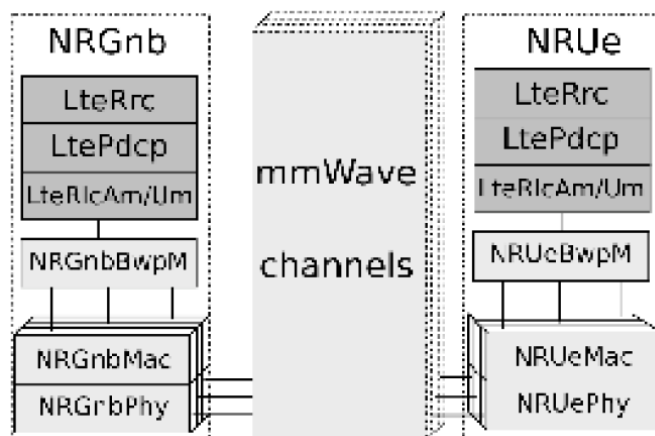
Jak je zde vidět, NR modul staví na stávajícím modulu LENA a přebírá z něj vyšší vrstvy a také jádro sítě CN (core network). Takto převzaté komponenty jsou



Obr. 4.2: Architektura modulu NR - převzato z [13]

na obrázku vyznačeny tmavě šedou barvou, zatímco světle šedou jsou vyznačené komponenty NR modulu. Vlevo je tzv. vzdálený host (Remote), který je připojen do SGW/PGW (Serving Gateway/ Packet Gateway). Dále je paket zapouzdřen protokolem GTP a přenesen za pomoci IP protokolu do gNB (gNodeB). V tomto případě tedy toto propojení přes IP protokol představuje transportní část sítě, jehož topologie může být různá, případně pro zjednodušení simulace je vytvořen přímým spojem. V gNB je poté přenesen přes NR třídu NR Gnb Net Device a na straně mobilního zařízení potom NR Ue Net Device. Pokud dojde k úspěšnému přenosu, je dále předán protokolům vyšších vrstev.

Situace v přístupové radiové síti RAN je zobrazena na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Architektura modulu NR - RAN část - převzato z [13]

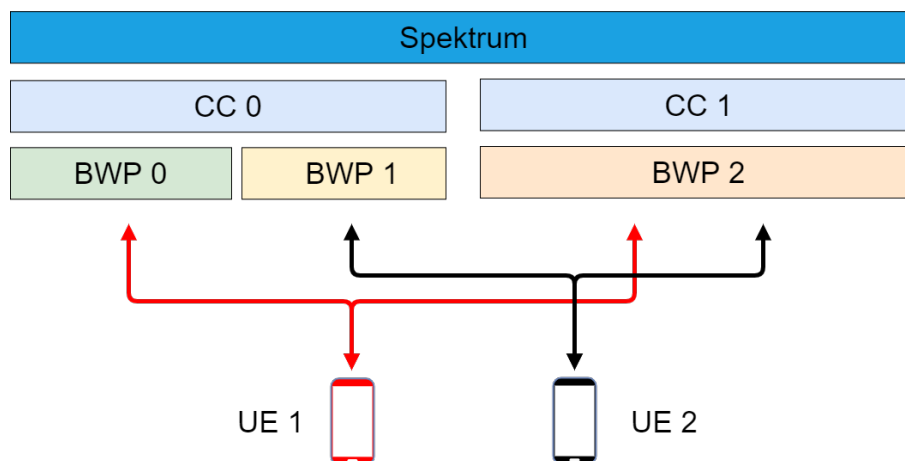
Jsou zde zobrazeny jednotlivé třídy jak na straně gNodeB a uživatelského terminálu na straně druhé. Protokoly vyšších vrstev v podobě RRC, PDCP a RLC jsou převzaty z původního LTE modulu LENA. Nově implementovanou částí jsou

třídy reprezentující vrstvy MAC a fyzickou vrstvu PHY. Nad těmito vrstvami se nachází ještě virtuální vrstva NRGnBwpM a NRUEBwpM, která vytváří jednu ze ztěžejných funkcí NR modulu, a to správu a přidělování různých částí spektra (BWP - Bandwidth Part) podle uživatelsky nastavených parametrů.

4.3.2 Části spektra BWP (Bandwidth Part)

Koncept rozdělení spektra na jednotlivé části je jedním ze ztěžejných konceptů NR modulu. Díky tomuto dělení je možné nejen redukovat interference, ale hlavně směřovat různé typy přenosů do různých částí pásma, kterým lze nastavit různé vlastnosti. Tím lze docílit funkčnosti RAN slicing, kdy každému typu přenosu jsou dedikovány oddělené části pásma. V budoucnu by mělo dojít v reálných 5G sítích k dynamickému přidělování částí pásma a to na základě vytíženosti sítě a požadavků uživatelských terminálů v okolí gNodeB. Tuto funkcionalitu zatím NR modul nenabízí, v současnosti je nutné před spuštěním simulace definovat počet částí, na které chceme celé spektrum rozdělit, nastavit jejich vlastnosti a přiřadit jim provoz, který na ně bude směřován. Tyto parametry pak již nelze v průběhu simulace dynamicky měnit.

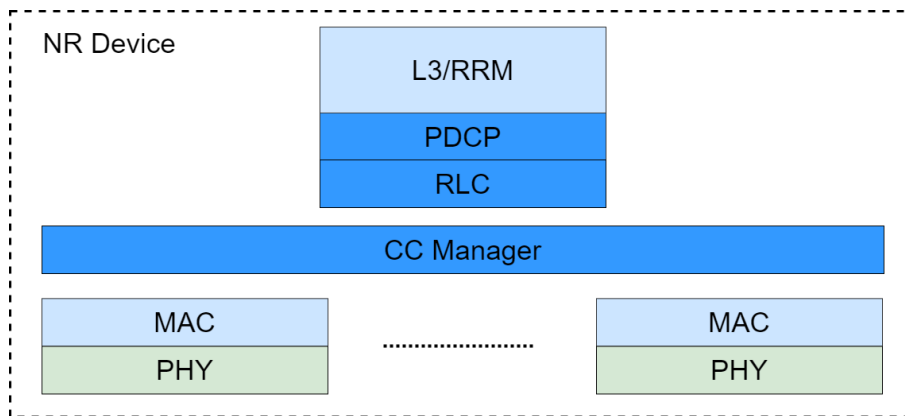
Důležitým konceptem přejatým z původního modulu LENA je koncept tzv. Component Carrier (CC), který umožňuje toto směřování provozu do jednotlivých částí spektra skrze shlukování nosných (Carrier Aggregation). Každému CC může být přidělena jedna nebo více částí spektra. Tento princip je ilustrován na obr. 4.4, kde vyhrazené spektrum je rozděleno na dvě CC části, která každá zajišťuje přenos od jedné nebo více částí BWP. Každý uživatelský terminál může pro různé typy přenosů využívat různé části spektra dle nastavení.



Obr. 4.4: Koncept rozdělení spektra pomocí CC a BWP

Jakýkoliv uzel v simulaci je schopen vysílat a přijímat datové toky v různých

částech BWP. Lze tedy každý jeden nosič (Bearer) nasměrovat do jiné části BWP, nebo je rozdělit přes více těchto BWP částí spektra. Každý uzel může pracovat s více částmi BWP, ale tyto části musí být vzájemně ortogonální. Je možné rozdělit pásmo spojitě tak, že jednotlivé části na sebe navazují, nebo je možné zvolit různé části spektra, které na sebe nenavazují. Aby tato funkčnost dělení spektra mohla být implementována, bylo nutné zařadit výše zmiňované třídy *NRGnBwpM* a *NRUeBwpM*. Slouží právě k nastavení pravidel pro směrování toku dat na různé části spektra a jeho realizaci. Na obr. 4.5 uvedeno pod názvem "CC manager". Každá z vytvořených částí BWP, může mít svou vlastní vrstvu PHY a MAC s jinak definovanými vlastnostmi.



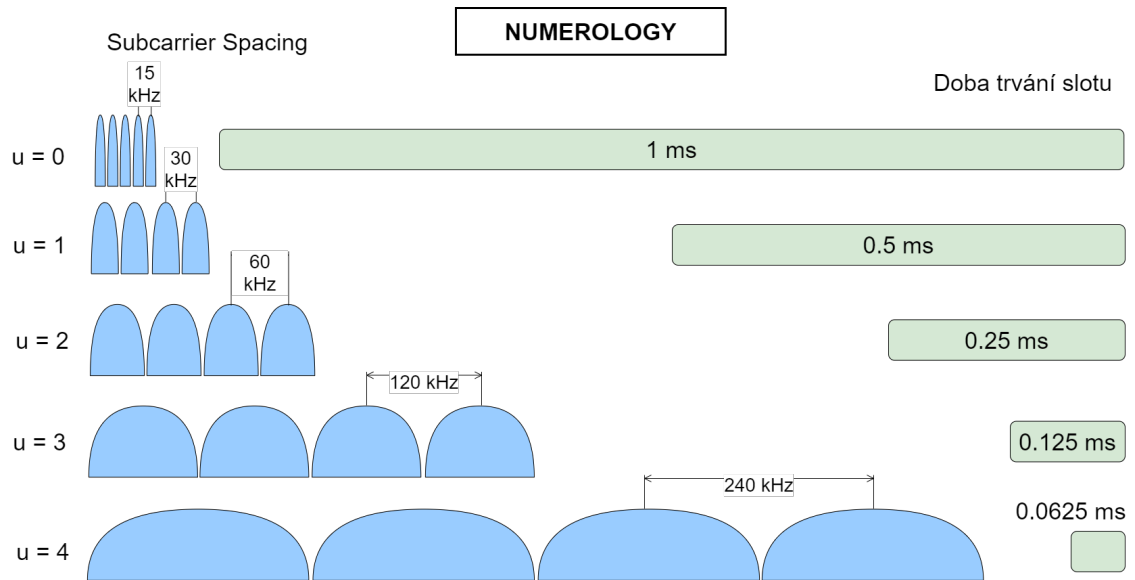
Obr. 4.5: Vrstva BWP/CC Manager a vrstvy MAC a PHY

Každá část je definována svou centrální frekvencí a šířkou pásma a také charakteristikou přenosového kanálu dle 3GPP. Při komunikaci přes určitou část, NR modul komunikuje přes fyzickou vrstvu PHY a MAC vrstvu, dále přes jeden kanál a jednu dvojici antén. Pro každou z vytvořených částí proto vytvoří vše tak, že je na každou vrstvu nahlíženo jako na jeden celek skládající se z výše uvedených částí [14] .

4.3.3 Parametr numerology

Dalším důležitým konceptem, který je nutný pro simulaci zahrnující RAN slicing je tzv. numerologie. Díky nastavení tohoto parametru lze nastavit dobu trvání slotu. To je podstatné pro dosahování požadovaných parametrů nutných pro různé typy přenosů. Například přenos typu eMBB (enhanced Mobile BroadBand) je využíván pro velké objemy dat a vyžaduje tedy vysokou propustnost, a proto je vhodná dlouhá doba trvání slotu. Naproti tomu jdou požadavky na přenos URLLC (Ultra Reliable Low Latency), tedy přenos s nízkou latencí, kde není propustnost stěžejním parametrem přenosu. V tomto případě je potřeba dosáhnout co nejnižší latence, tedy zpož-

dění přenosu. Toho lze dosáhnout nastavením nejkratší doby trvání slotu. Ukázka rozdělení slotů s různými délkami trvání napříč spektrem je zobrazena na Obr. 4.6. Je zde ilustrována jak doba trvání slotu tak odstup jednotlivých sub-nosných SCS (Subcarrier Spacing).



Obr. 4.6: Parametr numerology v modulu NR

5 Simulační scénář

Pro simulaci funkčnosti RAN slicing je vhodné využít právě modulu NR, který zahrnuje výše zmíněné komponenty, které byly rozebrány v předchozích kapitolách a to zejména koncept rozdělení spektra na jednotlivé části BWP a potom parametr "numerology", který nastavuje délku trvání slotu. Díky tomu je možné simulovat různé způsoby směřování přenosů s odlišnými požadavky na různé části spektra, které mají vhodně definované parametry tzv. na míru typu přenosu. Tímto lze simulovat RAN slicing s pevně nastaveným rozdělením spektra.

Pro simulaci v této práci byl zvolen scénář, kdy jedna základnová stanice gNodeB je vhodně zatížena uživatelskými terminály tak, aby byl ilustrován přínos technologie RAN slicing. Přínos RAN slicing se zejména při simulaci projeví nejvíce při velkém zatížení gNodeB. Pokud by spektrum bylo přístupné všem typům přenosů, nelze ideálně nastavit parametry pro jednotlivé typy přenosů a zejména nelze vyčlenit část spektra pro určitý typ přenosu tak, aby byl schopen splnit požadavky ať už na propustnost nebo zpoždění. Přínos RAN slicing bude ilustrován srovnáním dvou totožných scénářů, ovšem v prvním případě nebude spektrum rozděleno a bude sloužit všem tokům dat. Takto bude simulován scénář bez aktivního RAN slicing. Ve druhém případě bude ve spektru vyhrazena jedna část BWP pro přenosy typu URLLC, tedy přenos s nízkou latencí. Na zbylou část potom bude směřován zbylý provoz. Vhodným nastavením parametrů pro obě části BWP by mělo dojít ke zlepšení parametrů přenosu URLLC, a to právě při velkém zatížení gNodeB. Tím, že pro tento přenos vyčleníme část spektra, požadavky na nízkou latenci by měly být splněny. Tato ilustrace je vhodná zejména pro přenos typu URLLC, kdy v reálných scénářích mohou být nízká latence a vysoká spolehlivost přenosu naprosto klíčovými parametry. Jejich nesplnění mohou mít v některých případech i fatální následky. Proto je nutné parametry takového přenosu garantovat i při vysokém zatížení. Na tento typ přenosu je simulační scénář zaměřen a cílem je dále ověřit, které parametry mají největší vliv na zlepšení zpoždění přenosu URLLC. V průběhu simulace budou vhodně ověřeny různé parametry přenosu tak, aby se blížily požadavkům na reálné uživatelské scénáře.

5.1 Přenosy URLLC

Přenos typu URLLC (Ultra Reliable Low Latency), je přenos, který musí splňovat velmi vysokou spolehlivost, stejně jako velmi nízkou latenci. Jde o přenos, který je využíván v kritických aplikacích a nedodržení předepsaných parametrů může vést k rozsáhlým následkům. Tento typ přenosu se v budoucnu bude využívat např. ve výrobním sektoru pro automatizaci provozu, telemedicína, dále v elektrických

Tab. 5.1: Parametry typických URLLC přenosů dle 3GPP [15].

| Parametry přenosů URLLC | | | |
|-------------------------|--------------|----------|--------------------|
| Typ přenosu | Spolehlivost | Zpoždění | Velikost paketu[B] |
| Průmysl | 99.9999 | 2 ms | 100 |
| Distribuce elektřiny | 99.9999 | 5/15 ms | 100/250 |
| Doprava | 99.999 | 5/10 ms | UL 5220/DL 2083 |
| AR/VR | 99.999 | 1/4/7 ms | 32/200/4096 |

rozvodných sítích, VR/AR neboli virtuální/rozšířená realita a v neposlední řadě také doprava, tedy vozidla schopná komunikovat nejen mezi sebou, ale také s dopravní infrastrukturou. Pro určité typy přenosů jsou v [15] uvedeny typické parametry pro daný typ přenosu a služby. Tyto parametry shrnuje tabulka Tab. 5.1.

5.2 Parametry simulace

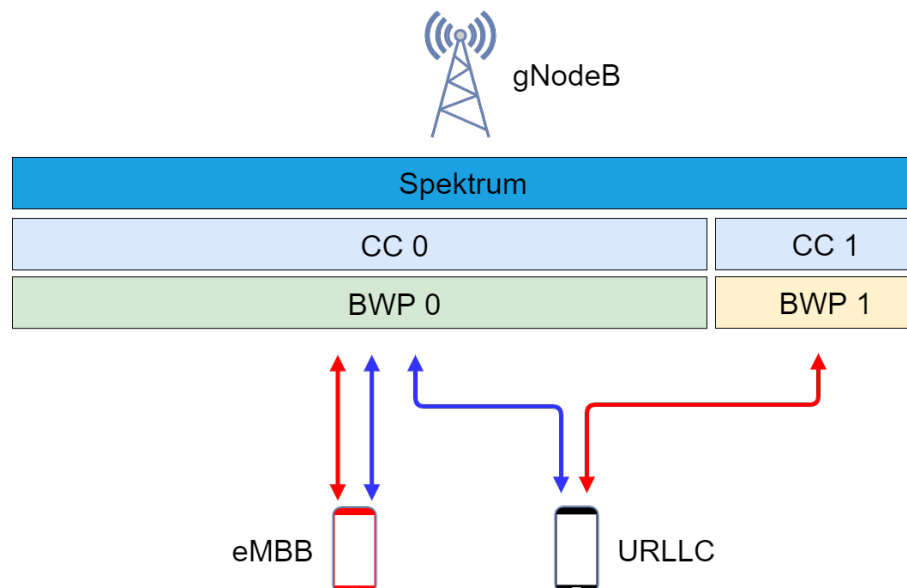
Simulační scénář pro ověření funkce a přínosu RAN slicing bude obsahovat 1 základnovou stanici gNodeB a uživatelské terminály tak, aby bylo možné ukázat přínos dedikování jedné části spektra pouze pro jeden typ přenosu, v našem případě URLLC. Maximální možný počet uživatelských terminálů je 40 pro nastavení antény gNodeB v rastru 4 krát 8 a to z důvodu omezení ze strany NS3 simulátoru s modulem NR, kdy při větším počtu zařízení dochází ke kolizi s periodicitou signálu SRS (Sounding Reference Signal). Jedná se o referenční signál, kterým uživatelský terminál informuje o kvalitě kanálu. Jako optimální z hlediska stability výsledků simulace byl zvolen počet celkem 20ti uživatelských terminálů rozmístěných v mřížce okolo gNodeB, přičemž 10 terminálů bude využívat přenos eMBB a tím simulovat zatížení sítě, a 10 terminálů bude využívat přenos URLLC. Pro účely simulace RAN slicing byly zvoleny parametry, které ukazuje tabulka Tab. 5.2.

Představeny jsou všechny parametry použité následně ve dvou scénářích, kdy v prvním případě bude nastaveno celkové spektrum a ve druhém bude část spektra vyhrazena pouze pro přenosy typu URLLC.

Na Obr. 5.1 je zobrazeno směřování přenosů do různých částí spektra. Modrou barvou je zobrazen scénář kdy je všechn provoz směřován na část spektra BWP0 a červeně je potom zobrazen způsob směřování URLLC přenosu na část spektra BWP1.

Tab. 5.2: Parametry simulačního scénáře.

| Parametr | Hodnota |
|--|----------------|
| Centrální frekvence části BWP0 | 29 GHz |
| Šířka pásma části BWP0 | 200 MHz |
| Centrální frekvence části BWP1 pro URLLC | 10 GHz |
| Šířka pásma části BWP1 pro URLLC | [20, 40] MHz |
| Počet uživatelů eMBB | [1, 10] |
| Počet uživatelů URLLC | [1, 10] |
| Přenosová rychlost zdroje eMBB | 1000 Mb/s |
| Přenosová rychlost zdroje URLLC | [10, 100] Mb/s |
| Velikost paketu URLLC | [100, 4096] B |



Obr. 5.1: Přenosy v rámci simulačního scénáře

5.3 Výsledky simulace

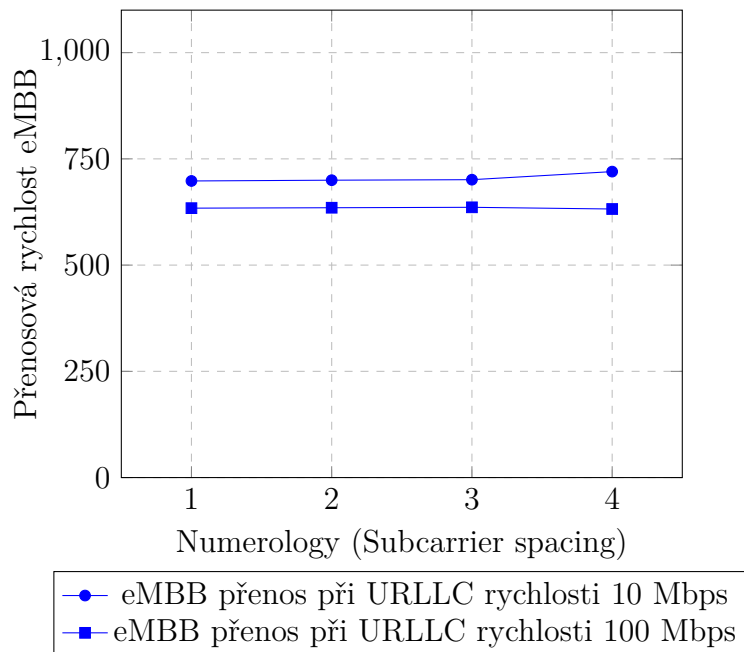
V této části jsou prezentovány výsledné hodnoty prováděných simulací. Výsledné hodnoty jsou zaneseny do grafů a jsou diskutovány jednotlivé části simulace. Dále jsou porovnány oba scénáře, kdy v prvním případě je provedena simulace bez použití technologie RAN slicing a v druhém případě je simulováno oddělení části spektra pro přenos URLLC. Výsledky dosažené simulací jsou následně vyhodnoceny a v závěru je diskutován přínos technologie RAN slicing.

5.3.1 Spektrum bez rozdělení

V první řadě je simulováno použití přenosů eMBB i URLLC, které jsou obsluhovány stejnou částí spektra. Tento scénář bude sloužit pro simulaci sítě bez implementovaného RAN slicing. V následujících grafech je poté ilustrován vliv změny parametrů pro jednotlivé přenosy, i pro nastavení přenosového spektra na dosahovaných výsledcích. Pozorován bude zejména vliv celkového zatížení na zpoždění přenosu URLLC. Zatížení bude simulováno změnou přenosové rychlosti pro uživatelské terminály a také budou pozorovány vlastnosti přenosu pro dvě různé délky paketů, které budou zvoleny tak, aby reflektovaly skutečné URLLC přenosy dle tabulky Tab. 5.1.

Nejvíce sledovaným faktorem je potom parametr numerology, tedy jak je nastaven odstup jednotlivých sub-nosných SCS (Subcarrier Spacing) pro dané přenosové pásmo. Předpoklad je takový, že zejména pro přenos s menším paketem a nižší propustností by mělo nastat zlepšení jak zpoždění u přenosu URLLC, tak současně zlepšení propustnosti pro přenos eMBB. Při použití většího paketu se vzhledem k menší šířce pásma vyhrazeného pro přenos URLLC očekává zhoršení zpoždění přenosu a to z důvodu větší náročnosti takového přenosu na šířku pásma, ale na druhé straně jeho přesměrováním do jiného pásma by se měla zlepšit propustnost přenosu eMBB v pásmu původním.

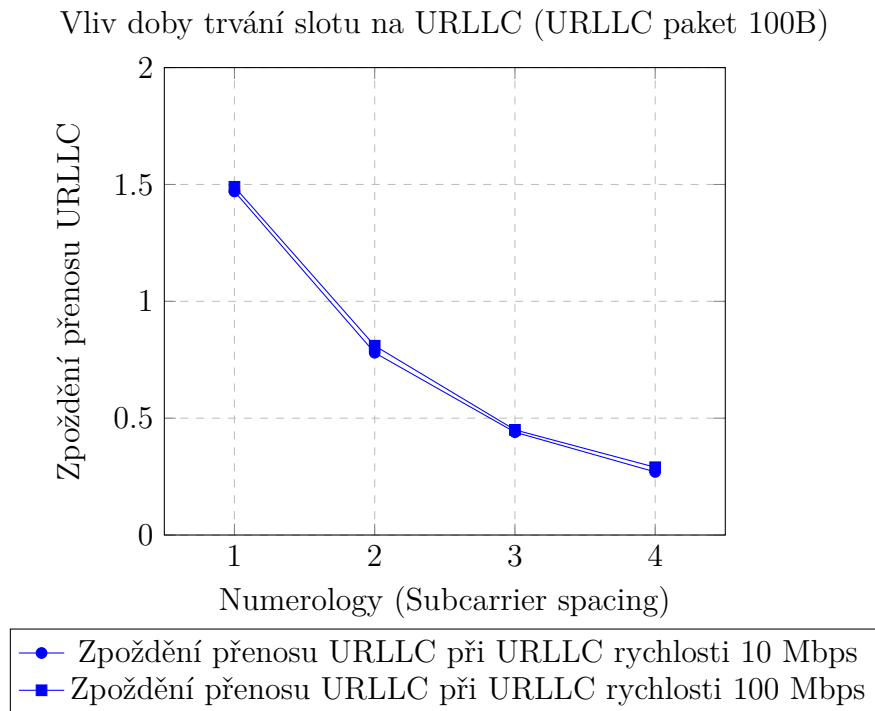
Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B)



Obr. 5.2: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B)

Z grafu Obr. 5.2 je vidět, že při použití paketu o velikosti 100B nedochází k

výraznému ovlivnění propustnosti přenosu eMBB změnou parametru numerology (SCS) a to jak pro přenosovou rychlost zdroje URLLC 10 Mbps, tak i 100 Mbps. Pouze pro vyšší rychlost dochází k větším nárokům na využití spektra, proto je celkově propustnost eMBB nižší než v případě nižší rychlosti URLLC.

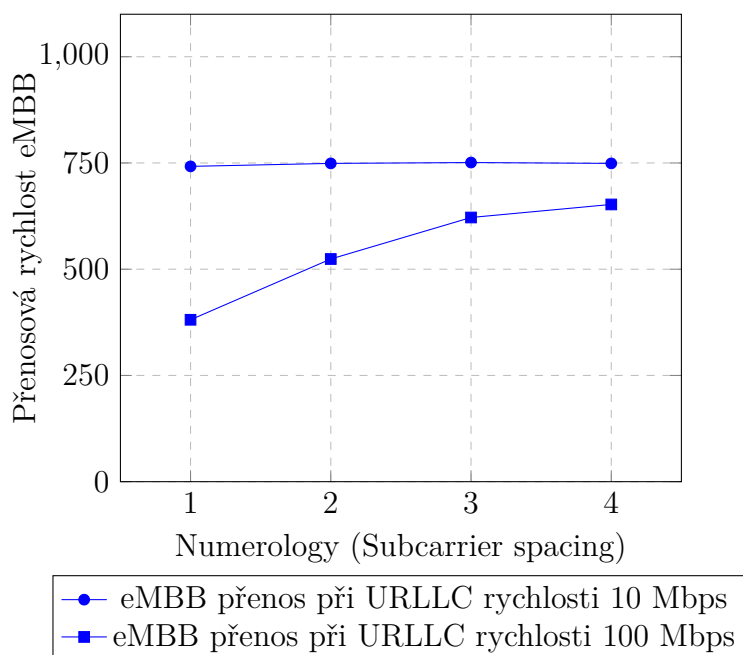


Obr. 5.3: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B)

U vlivu nastavení parametru Numerology, tedy odstupů sub-nosných SCS (Subcarrier Spacing) na zpoždění přenosu URLLC (Obr. 5.3) už je ovšem z výsledku simulací vidět, že tento parametr má velký vliv na výsledné zpoždění přenosu. Nejlepších výsledků je dosaženo pro numerology o hodnotě 4, tedy odstupů sub-nosných SCS rovno 240 kHz. To potvrzuje předpoklad vznesený v teoretické části práce, tedy že přenosům s nízkou latencí vyhovuje kratší doba trvání slotu. Pro kombinaci malého paketu tedy vyhovuje z hlediska nízkého zpoždění celkové nastavení spektra na úrovni numerology 4, neboli SCS 240 kHz. To významně neovlivní propustnost přenosu eMBB a zároveň bude zpoždění URLLC dosahovat nejlepších hodnot.

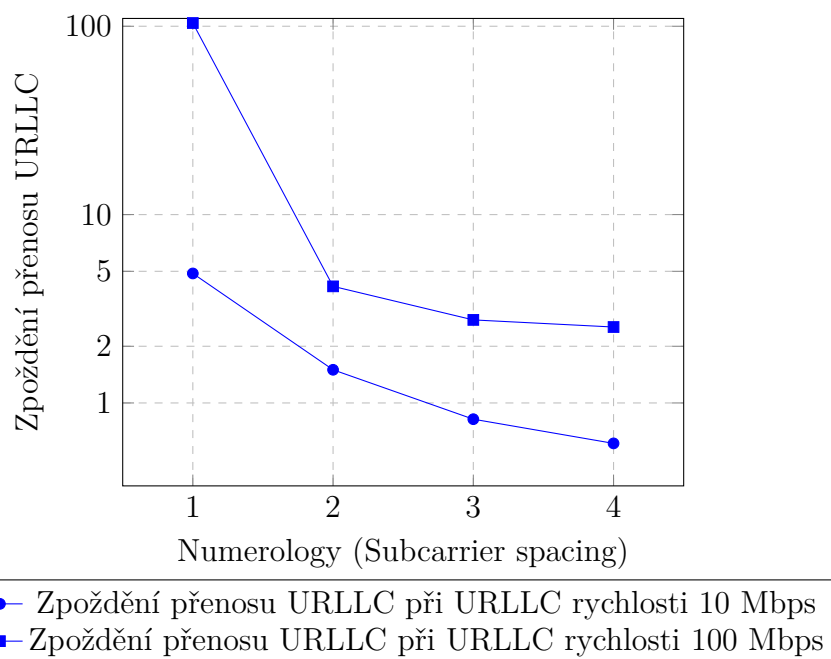
Situace při simulaci přenosu URLLC s velkým paketem (Obr. 5.4), který má simulovat náročnější reálné přenosy uvedené v tabulce č. 5.1 je výrazně odlišná. Tento přenos již má vyšší nároky na spektrum a proto při vyšším zatížení pro různé hodnoty parametru numerology (SCS) dochází zejména pro vyšší přenosovou rychlost URLLC k výraznému ovlivnění propustnosti eMBB přenosu. Pro nižší rychlosti zůstává propustnost eMBB prakticky konstantní.

Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B)



Obr. 5.4: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B)

Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B)



Obr. 5.5: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B)

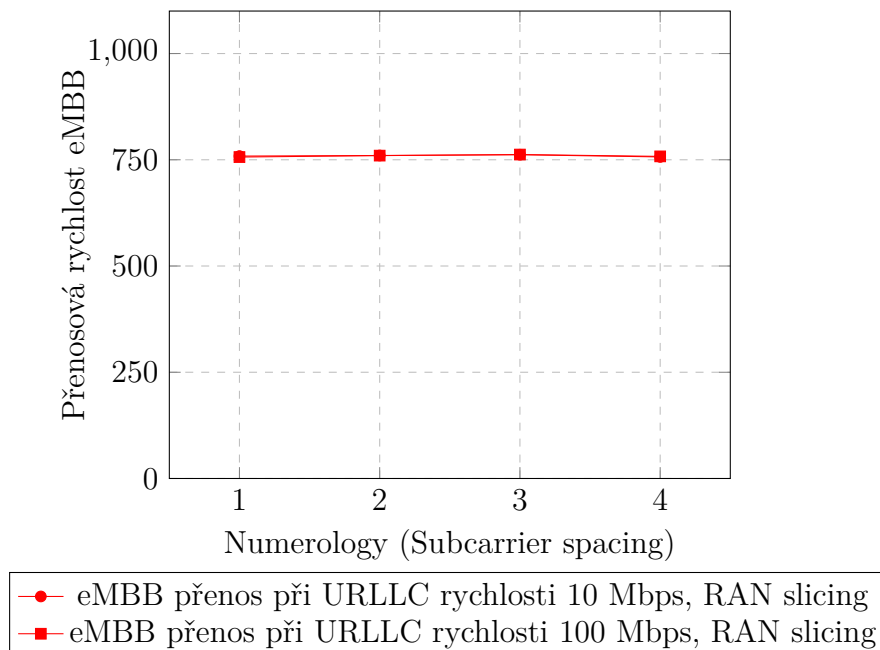
Z grafu Obr. 5.5 je vidět, že nejen propustnost eMBB u velkého zatížení byla značně omezena, ale rovněž přenos URLLC již nedosahuje nízkého zpoždění u para-

metru numerology rovno 1, tedy SCS rovno 15 kHz. To je dáno faktem, že kombinace velkého zatížení a dlouhé doby trvání slotu není vhodná kombinace pro přenos typu URLLC, kdy souběh s eMBB přenosem má za následek výrazné zvýšení zpoždění a zároveň snížení propustnosti eMBB. I při vysokém zatížení však lze dosahovat akceptovatelných výsledků a to v případě vhodně zvoleného parametru numerology, kdy pro tento scénář a určité aplikace vyhovuje již jeho hodnota 2, tedy SCS rovno 30 kHz. Při použití vyšších hodnot se parametry ještě zlepší. Pro větší přehlednost grafu (Obr. 5.5) je osa y v logaritmickém měřítku.

5.3.2 Část spektra vyhrazena pro URLLC

V druhém případě je simulováno použití mechanismů RAN slicing. A to tím způsobem, že část spektra je vyhrazena pouze pro přenosy typu URLLC, zatímco zbylá část spektra obsluhuje stávající přenosy eMBB. Tímto je simulováno reálné oddělení určitých částí sítě, jejichž provoz je směřován na jiné radiové prostředky. Díky tomu lze parametry každé části vhodně nastavit tak, aby co nejlépe splňovaly požadavky na daný přenos. I v tomto případě jsou pro potřeby simulace vhodně měněny parametry a dosahované výsledky jsou prezentovány v grafech níže.

Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), RAN slicing

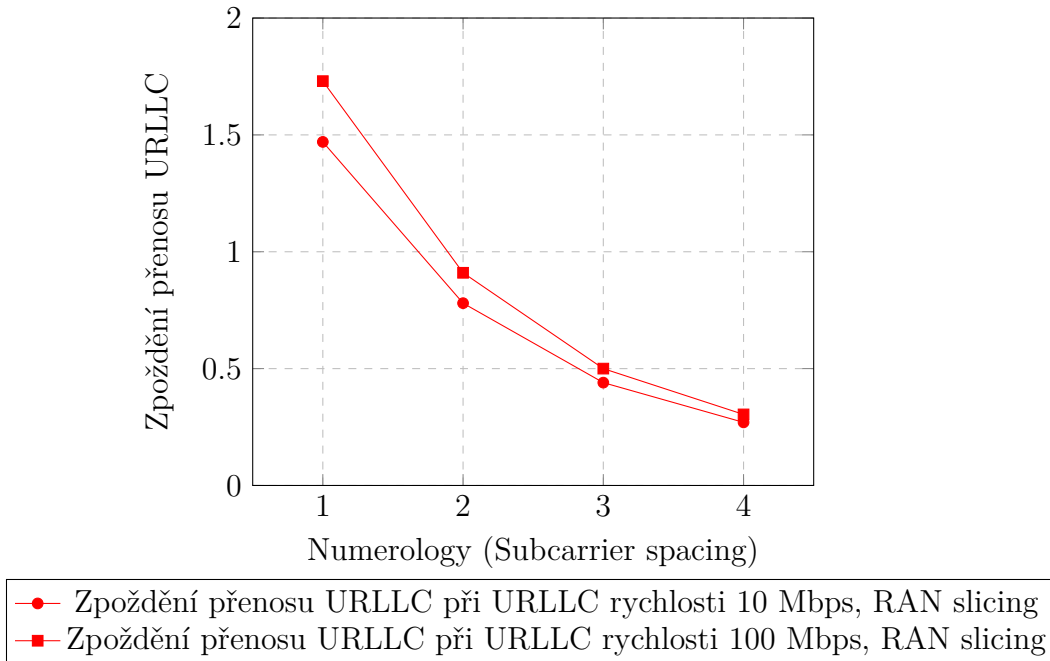


Obr. 5.6: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), RAN slicing

Stejně jako v případě před vyhrazením části spektra, z grafu Obr. 5.6 vyplývá, že při přenosu, který využívá velikost paketu 100 B, parametr numerology při simulaci

prakticky neovlivňuje přenosovou rychlost eMBB. Co je ovšem již nyní vidět je to, že celková úroveň rychlosti se zvýšila. Je to tím, že nyní není všechen provoz v síti směřován na stejné radiové prostředky.

Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), RAN slicing



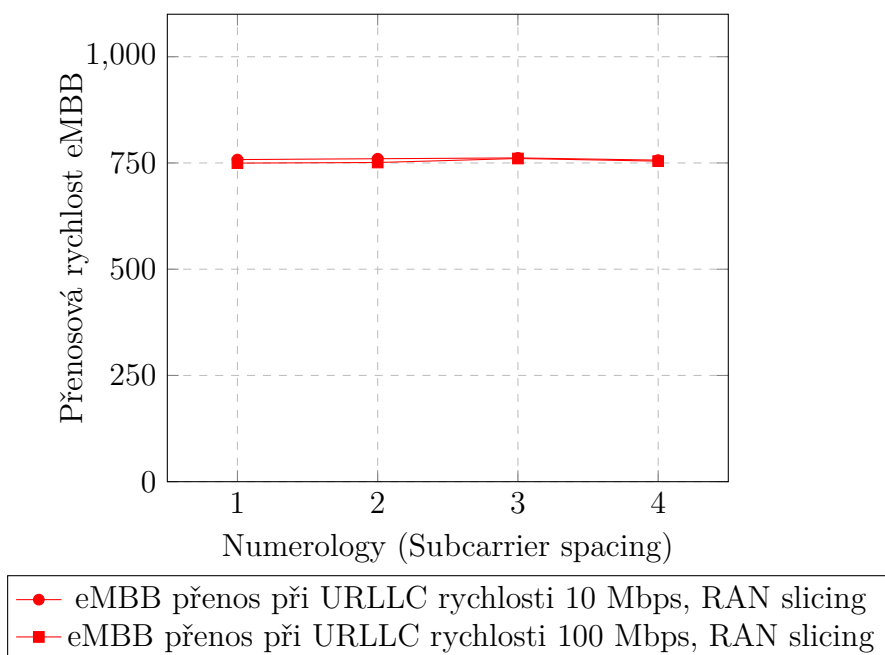
Obr. 5.7: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), RAN slicing

Pro zpoždění URLLC (Obr. 5.7) platí stejně jako v prvním případě, že parametr numerology (SCS), zde hraje významnou roli. Opět nejvyšší číslo 4 (SCS = 240kHz) vykazuje nejnižší zpoždění.

Pro paket velikosti 4096 B (Obr. 5.8) se výrazným způsobem změnil průběh závislosti rychlosti přenosu eMBB na použitém parametru numerology. Jelikož je všechen URLLC přenos směřován do jiného pásma, samotný eMBB přenos jím není nijak negativně ovlivněn.

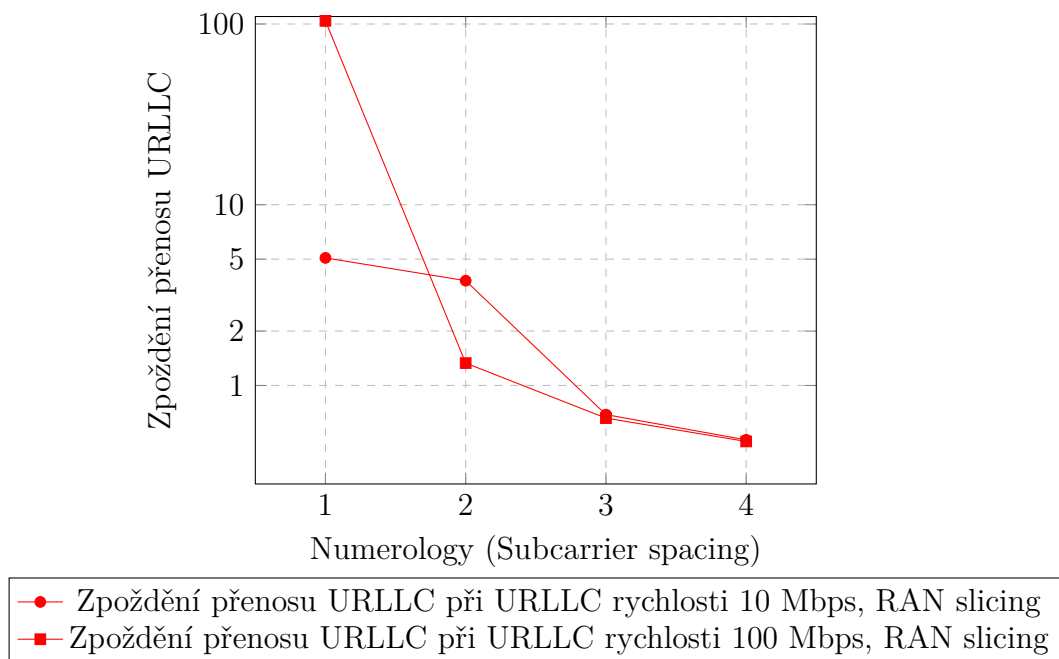
Pro zpoždění přenosu (Obr. 5.9) ovšem opět platí, že zpoždění přenosu je výrazně ovlivněno hodnotou parametru numerology. Pro větší přehlednost je osa y v logaritmickém měřítku.

Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), RAN slicing



Obr. 5.8: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), RAN slicing

Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), RAN slicing

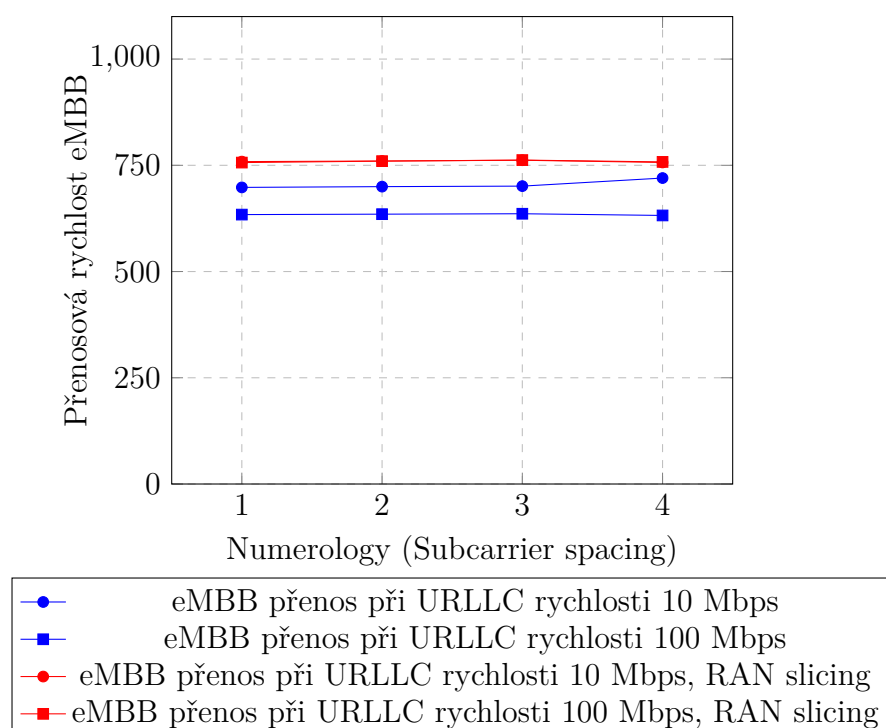


Obr. 5.9: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), RAN slicing

5.3.3 Porovnání dosažených hodnot přenosů

Výsledky dosažené v obou případech jsou uvedeny ve společných grafech níže, pro porovnání přínosu RAN slicing a také nastavených parametrů přenosů a jejich vliv na dosahované výsledky. Z grafů níže jsou vidět popisované změny dosahovaných výsledků v závislosti na měněných parametrech. Modrou barvou jsou označené dosahované parametry při jedné části spektra, tedy eMBB i URLLC je obsluhován jednou částí BWP. Červeně potom změna parametrů po oddělení přenosu URLLC do jiné části BWP, tedy využití technologie RAN slicing.

Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), srovnání



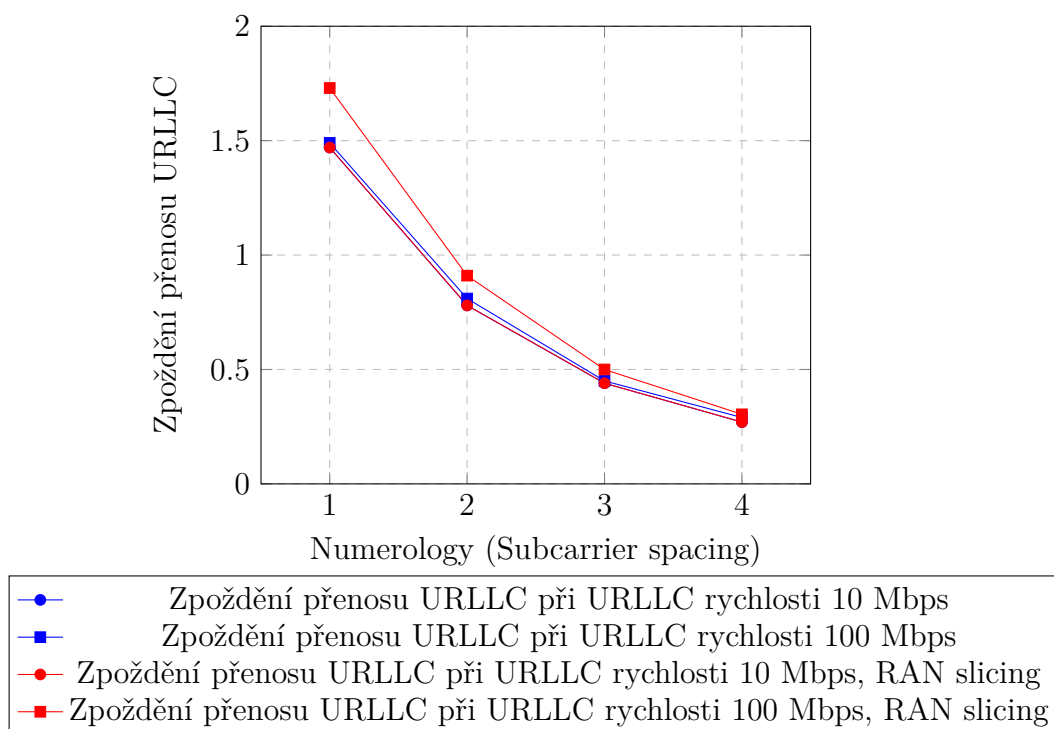
Obr. 5.10: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 100B), srovnání

V grafu Obr. 5.10 je srovnání vlivu doby trvání slotu na přenos eMBB. Zde je vidět, že přeměšováním přenosu URLLC bylo dosaženo zlepšení přenosů eMBB. Parametr numerology přenosy eMBB nijak výrazně negativně neovlivňoval.

Při porovnání vlivu na zpoždění přenosu URLLC pro paket o velikosti 100 B (Obr. 5.11) nepozorujeme výraznou změnu v dosahovaném zpoždění. K mírnému zhoršení dojde pro vyšší rychlost URLLC. Toto zhoršení se pohybuje v rámci desetin milisekund.

Přínos technologie RAN slicing se nejlépe projevil při vyšším zatížení, což lze pozorovat na grafu (Obr. 5.12). Zde je vidět, že bez použití RAN slicing docházelo

Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), srovnání

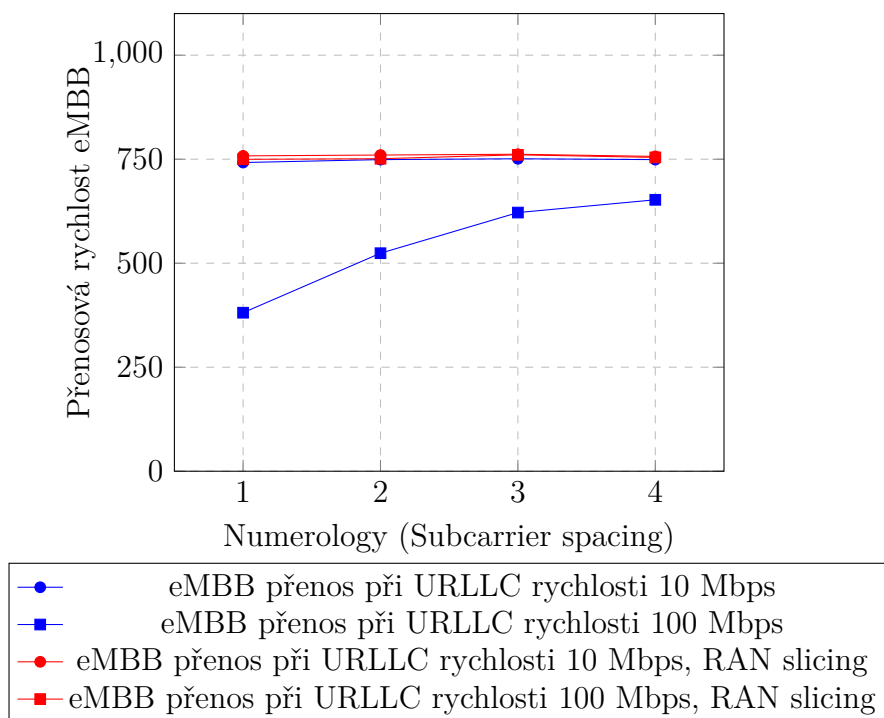


Obr. 5.11: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 100B), srovnání

při nízkých hodnotách parametru numerology (SCS - subcarrier spacing) ke značnému omezení přenosu eMBB. Po využití mechanismů RAN slicing je vidět, že k žádnému takovému omezení nedochází.

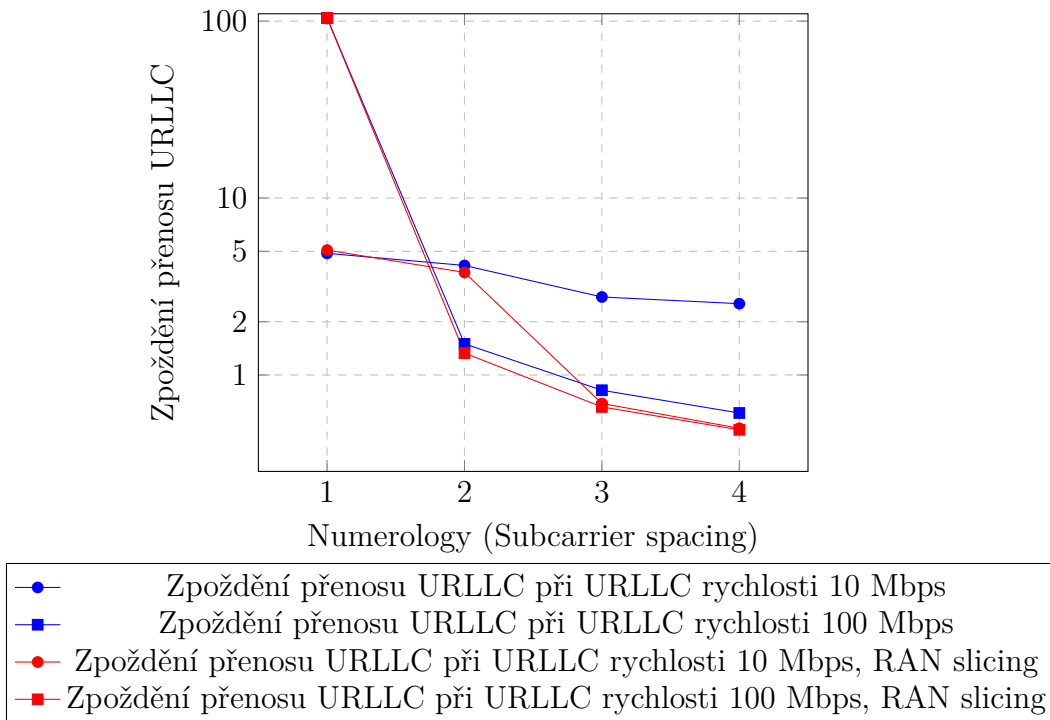
Z pozorování vlivu doby trvání slotu na zpoždění URLLC (Obr. 5.13) vyplývá, že pro přenos URLLC o velikosti paketu 4096B není vhodný parametr numerology 1 (SCS = 15kHz), kdy dochází k takovému zvýšení zpoždění přenosu, že se stává pro přenos URLLC nepoužitelný, jelikož nedosahuje hodnot uvedených v tabulce Tab. 5.1. Při parametru numerology o hodnotách 3 a 4 pak dochází k výraznějšímu zlepšení zpoždění a to zejména pro nižší rychlost URLLC. Zlepšení stejně jako v ostatních případech lze výrazně ovlivnit další optimalizací parametrů pro stávající i novou část spektra podle požadavků konkrétních přenosů.

Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), srovnání



Obr. 5.12: Vliv doby trvání slotu na eMBB (URLLC paket 4096B), srovnání

Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), srovnání



Obr. 5.13: Vliv doby trvání slotu na URLLC (URLLC paket 4096B), srovnání

5.4 Vyhodnocení výsledků simulace

Simulace byla zaměřena na ověření technik adaptivního sdílení prostředků pomocí RAN slicing. Pro názornou ilustraci byl zvolen takový scénář a pozorované parametry, aby přínos RAN slicing byl jasně viditelný. Proto byl sledován primárně vliv nastavení parametru numerology v jednotlivých částech spektra. Dle teoretických předpokladů by měl mít velký vliv zejména na zpoždění přenosu URLLC, pro který je nízké zpoždění kritické stejně jako spolehlivost. Předpoklad se simulací potvrdil, dle dosahovaných výsledků má parametr numerology dobře viditelný vliv na zpoždění přenosu URLLC stejně jako na přenos eMBB zejména při vyšším zatížení. V první části simulace byl veškerý provoz směřován na jednu stejnou část spektra, a ve druhé části mu bylo vyhrazeno samostatné pásmo, které mohlo mít odlišné parametry. Tím, že v první fázi byly přenosy ve společné části spektra, po přesměrování provozu URLLC na samostatnou část došlo zároveň ke zlepšení parametrů pro přenos eMBB. Dalším pozorovaným jevem při simulaci jsou dosahované parametry přenosu při odlišných rychlostech přenosu URLLC a ve velikosti paketu podle typu provozu dle 3GPP. Zde je vidět, že přenos s větším paketem je náročnější na radiové prostředky a více ovlivňuje přenos eMBB. Proto je vhodné tomuto provozu vyčlenit samostatné pásmo. Parametry simulace více vyhovovaly přenosu URLLC s malým paketem, který se po přesměrování na jiné pásmo zlepšil výrazněji. Výhodou malého paketu je tedy dosažení lepších výsledků co se zpoždění přenosu týče. Na druhou stranu takový přenos s sebou nese potřebu daleko vyšší režie, čímž pak činí celkový přenos daleko méně efektivní. Zde by bylo nutné optimalizovat parametry částí spektra pro konkrétní požadavky na přenos. Tímto se však práce nezabývá, primárně si klade za cíl ověřit techniky RAN slicing, kdy vhodným ilustračním prvkem je právě přenos URLLC. Tímto byly techniky RAN slicing ověřeny a výsledky simulace prezentovány i s jejich přínosy.

Závěr

V této práci jsem se zabýval nově nastupujícími technologiemi 5G NR, byly představeny základy fungování této technologie a také představeny způsoby samostatně stojící implementace SA (Standalone) a nesamostatně stojící implementace NSA (Non-standalone). V dalších částech byla provedena detailní analýza nově nastupujících komunikačních systémů 5G NR s ohledem na sdílení síťových prostředků. Byly představeny základní principy konceptu network slicing, neboli rozdělení sítě na jednotlivé samostatné logické části a to jak část radiové přístupové sítě RAN, ale také jádra sítě CN (Core Network). RAN slicing je poté podrobněji rozebrán a ilustrován. Praktická část práce zahrnuje představení simulátoru Network Simulator 3 s modulem LENA 5G (NR), díky kterému je možné implementovat celou síť LTE/NR nebo její jednotlivé prvky. Dále jsou rozebrány jednotlivé prvky modulu sloužící k simulaci RAN slicing a v poslední části práce je představen vytvořený simulační scénář v Network Simulator 3 s modulem LENA 5G a jsou prezentovány a diskutovány výsledky provedené simulace a z toho plynoucí vyhodnocení.

Prezentace přínosu technologie RAN slicing byla založena na pozorování změn parametrů přenosu při různém nastavení parametru numerology, kterým se nastavuje odstup mezi jednotlivými sub-nosnými (SCS Subcarrier Spacing). Toto bylo pozorováno při přenosech nevyužívajících technologii RAN slicing a následně porovnáno s dosahovanými výsledky při implementaci RAN slicing. Prováděnými simulacemi byl prokázán pozitivní vliv implementace technologie RAN slicing na prováděné přenosy, zejména při větším zatížení sítě. Při vyšším zatížení se po přesměrování URLLC přenosu na jemu dedikované pásmo zlepšily výsledky dosahované přenosem eMBB, stejně jako došlo ke zkrácení doby odezvy přenosu URLLC. Dalším vhodným nastavením parametrů pro jednotlivá pásma dle požadavků přenosu lze dosahované výsledky dále optimalizovat. Provedenými simulacemi a dosaženými výsledky ilustrující funkčnost a přínosy technologie RAN slicing bylo splněno zadání diplomové práce.

RAN slicing a network slicing obecně je velkým příslibem do budoucna, kdy budou 5G sítě a další budoucí generace telekomunikačních sítí daleko rychlejší, flexibilnější a efektivnější a tím připravené obsloužit veškeré požadavky na komunikační prostředky moderní společnosti.

Literatura

- [1] Implementace a rozvoj sítí 5G v České republice – Cesta k digitální ekonomice, MPO Odbor elektronických komunikací, 2020.
- [2] 5G Implementation Guidelines: NSA Option 3, GSMA, 2020.
- [3] Zpráva o průběhu a výsledcích výběrového řízení za účelem udělení práv k využívání rádiových kmitočtů pro zajištění sítí elektronických komunikací v kmitočtových pásmech 700 MHz a 3400–3600 MHz, Český telekomunikační úřad, 2021.
- [4] A. de la Oliva et al. 5G-TRANSFORMER: Slicing and Orchestrating Transport Networks for Industry Verticals. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 8, s. 78–84. doi: 10.1109/MCOM.2018.1700990.
- [5] 5G Americas White Paper – Network Slicing for 5G and Beyond, 5G Americas, 2016.
- [6] R. Ferrus, O. Sallent, J. Perez-Romero and R. Agustí On 5G Radio Access Network Slicing: Radio Interface Protocol Features and Configuration *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 5, s. 184–192. doi: 10.1109/MCOM.2017.1700268.
- [7] P. H. A. Rezende and E. R. M. Madeira An adaptive network slicing for LTE radio access networks. In *2018 Wireless Days (WD)*, Dubai, 2018. pp. 68–73. doi: 10.1109/WD.2018.8361696.
- [8] 3GPP TS 23.501 V16.4.0 (2020-03) System architecture for the 5G System (5GS); Stage 2 (Release 16), 3GPP, 2020.
- [9] G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo “An LTE Module for the NS-3 Network Simulator,” In *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques.*, 2011. pp. 415–422
- [10] G. Carneiro “NS-3: Network Simulator 3, In *UTM Lab Meeting April*, 2010, vol. 20 pp. 415–422
- [11] ns-3 Manual, Release ns-3-dev, ns-3 project nsnam, 2021.
- [12] LTE MAC Scheduler Interface Specification v1.11, The Femto Forum, 2010.
- [13] NR Module, Release 1.1, CTTC (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya), 2021.

- [14] The ACM Southeast (ACMSE 2021) conference, 5G New Radio Simulations with ns-3, Lorenza Giupponi (CTTC – Spain), 2021.
- [15] 3GPP TR 38.824 V16.0.0 (2019-03) Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC), 3GPP, 2019.