

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Testování a analýza datových toků v sítích 5G

Roman Martínek

Vedoucí: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Obor: Elektronika a komunikace

Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Martínek** Jméno: **Roman** Osobní číslo: **499180**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Testování a analýza datových toků v sítích 5G

Název bakalářské práce anglicky:

Testing and Analysis of Data Flows in 5G Networks

Pokyny pro vypracování:

Provedte analýzu vlastností sítí 5G u vybraných operátorů a v typových lokalitách (husté a méně husté osídlení), případně i v kampusové síti pro průmysl. Realizujte praktické testy a jejich vyhodnocení pomocí platformy F-Tester. Zaměřte se na využití kapacity pro různé typy toků (UDP, TCP) a chování při různé míře zatížení sítě.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Vít Pobořil - Testování sítí 5G pro obecné použití a aplikace v průmyslu a energetice, bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2022
- [2] Marek Oplištil - Možnosti mobilních sítí pro realizaci požadavků gigabitových přenosů, bakalářská práce, ČVUT v Praze, 2022
- [3] F-Tester - měření datových sítí, online: <https://f-tester.fel.cvut.cz>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D. katedra telekomunikační techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **25.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych vyjádřil své poděkování vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi, Ph.D. za jeho rady a odborné vedení, které mi poskytl během tvorby této bakalářské práce. Také bych rád poděkoval Ing. Zbyňku Kocurovi, Ph.D. za jeho cennou pomoc prostřednictvím konzultací ohledně použité měřicí sestavy.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

.....

podpis autora práce

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi LTE a 5G, které se hojně využívají v mobilních sítích. Přínosem práce je podrobné popsání situace v České republice v oblasti veřejných i privátních mobilních 5G sítích. To bylo možné nejen na základě rozsáhlé rešerše, ale i díky měřením pomocí zařízení F-Tester a exkurzím, při kterých byly zjištěny informace od odborníků v dané oblasti. Při samotném testování sítě operátora O2 bylo nastíněno, jak může nesprávné nastavení testu u protokolu TCP ovlivnit výsledek měření. Následně byly v rámci měření sítě operátora Vodafone navrženy vlastní testy, které byly přizpůsobeny specifickým lokalitám. Testy odhalily problémy, které mohou nastat při stacionárním měření i při měření za jízdy. Testování rovněž potvrzuje, že v současné době je ve veřejných mobilních sítích mezi LTE a 5G výrazná podobnost, zejména pokud jde o přenosové rychlosti.

Klíčová slova: LTE, 5G, Mobilní sítě, F-Tester, Mobilní operátoři

Vedoucí: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Abstract

This bachelor's thesis focuses on LTE and 5G technologies, which are extensively utilized in mobile networks. The contribution of this thesis lies in providing a detailed description of the situation in the Czech Republic regarding both public and private mobile 5G networks. This was possible not only through profound research but also by conducting measurements using F-Tester and engaging in excursions that facilitated insights from industry experts. During the testing of the O2 operator's network, it was shown how incorrect TCP test settings can affect measurement results. Throughout the measurement of Vodafone operator's network, custom tests were designed and adapted to specific locations. These tests revealed issues that can occur during stationary and on-the-move measurements. Furthermore, the testing indicates that there is a pronounced similarity between LTE and 5G on public mobile networks at the moment, particularly in terms of data rates.

Keywords: LTE, 5G, Mobile networks, F-Tester, Mobile operators

Title translation: Testing and Analysis of Data Flows in 5G Networks

Obsah

1 Úvod	1	4.6 Modulace a multiplexování v 5G	18
2 Historický vývoj mobilních sítí	3	4.6.1 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)	18
2.1 První mobilní sítě	3	4.7 Massive MIMO	19
2.2 3G a starší generace	3	4.8 MEC (Multi-access Edge computing)	20
2.3 Přechod k novějším sítím	4	4.9 Industry 4.0	20
3 Vývoj technologie LTE	5	4.9.1 5G pro použití v průmyslu	21
3.1 LTE (Release 8 a Release 9)	5	5 Situace v ČR	23
3.1.1 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)	5	5.1 Operátoři v ČR	23
3.1.2 OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)	6	5.2 Používaná pásma pro LTE a 5G	24
3.1.3 SC-FDMA (Single-carrier Frequency Division Multiple Access)	6	5.2.1 Vyšší frekvenční pásma	26
3.1.4 MIMO	7	5.2.2 Aplikace v průmyslu	26
3.1.5 Beamforming	8	6 Metodiky testování sítí	29
3.2 LTE-Advanced (Release 10)	9	6.1 Protokoly v internetu	29
3.2.1 Struktura LTE-A	9	6.1.1 TCP a UDP	30
3.2.2 Relaying	10	6.2 Pokyny ČTÚ	30
3.2.3 MU-MIMO (Multi-User MIMO)	10	6.2.1 Měření parametrů pomocí protokolu TCP	30
3.2.4 CA (Carrier Aggregation)	11	6.2.2 Měření parametrů pomocí protokolu UDP	31
3.2.5 FDD a TDD	11	6.2.3 Rádiové parametry	31
3.3 Novější verze technologie LTE	12	6.2.4 Iperf3	32
4 5G síť	13	6.2.5 FlowPing	32
4.1 Standardizace 5G	13	7 Praktická část	33
4.2 5G NR (5G New Radio)	13	7.1 Měřicí zařízení F-Tester	33
4.2.1 eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	14	7.1.1 Webové rozhraní	33
4.2.2 URLLC (Ultra-reliable and Low-latency Communications)	14	7.1.2 Testy a scénáře	34
4.2.3 mMTC (Massive Machine Type Communications)	15	7.1.3 Zobrazení výsledků	35
4.3 Architektura 5G NR	15	7.1.4 Mobilní verze pro měření technologie LTE a 5G	35
4.3.1 Non-Standalone	15	7.2 Základní ověřování chování sítě	37
4.3.2 Standalone	15	7.2.1 Měření sítě operátora O2 v MHD	37
4.4 Rádiové spektrum 5G	16	7.2.2 Walk test v blízkosti menšího města	39
4.4.1 Rádiové spektrum 5G NR	17	7.3 Shrnutí dílčích výsledků	41
4.5 Network slicing	18		

7.4 Stacionární měření sítě operátora Vodafone	41
7.4.1 Stacionární měření sítě v malém městě	41
7.4.2 Stacionární měření sítě v hustě osídlené lokalitě	45
7.4.3 Porovnání výsledků obou měření	47
7.5 Měření propustnosti v metru ...	48
7.6 Testování pokrytí sítě Vodafone při jízdě v MHD	51
7.6.1 Další přechod mezi základnovými stanicemi	53
8 Shrnutí a návrh metodických doporučení	55
9 Závěr	57
A Literatura	59
B Seznam zkratk	65
C Příložená data	69

Obrázky

3.1 Srovnání OFDM a OFDMA [6] ..	6	7.9 Hodnoty rádiových parametrů při měření	43
3.2 4x4 MIMO [9]	7	7.10 Průběh propustnosti při použití UDP scénáře (odpoledne)	44
3.3 Princip metody Beamforming [1].	8	7.11 Průběh RTT při použití UDP scénáře (odpoledne)	45
3.4 Struktura LTE-A [1]	9	7.12 Naměřená ztrátovost paketů (odpoledne)	46
3.5 Porovnání MU-MIMO a SU-MIMO [12]	10	7.13 Místo měření a pozice základnových stanic v Řepích [18, 19]	48
3.6 Typy agregace v kmitočtovém spektru [1]	11	7.14 Vyzařovací kabel používaný v metru	48
4.1 Tři koncepty technologie 5G NR [23]	14	7.15 Naměřená propustnost v metru (v jednom směru)	49
4.2 Srovnání architektur NSA a SA [24]	16	7.16 Průběh RTT v metru (v jednom směru)	50
4.3 Nově definovaná frekvenční pásma [25]	17	7.17 Průběh průměrného RTT v autobuse (v jednom směru)	51
4.4 Massive MIMO anténa [26]	19	7.18 Průběh RTT v autobuse (v jednom směru)	52
4.5 Privátní 5G síť a její použití v průmyslu [30]	21	7.19 Průběh RSRQ v autobuse (v jednom směru)	53
5.1 Pokrytí operátora O2 v České republice [20]	23	7.20 Průběh rádiových parametrů v autobuse (v jednom směru)	54
5.2 Radio Dot od firmy Ericsson [38]	27		
6.1 Srovnání modelu ISO/OSI a TCP/IP [15]	29		
7.1 Webové rozhraní zařízení F-Tester	34		
7.2 Nastavení scénářů a testů ve webovém rozhraní	34		
7.3 Měřicí sestava použitá pro měření technologie LTE a 5G	36		
7.4 Naměřená propustnost v tramvaji	37		
7.5 Polohy základnových stanic a trasa tramvaje [19]	38		
7.6 Polohy základnové stanice a trasa walk testu [19]	39		
7.7 Naměřená propustnost při walk testu	40		
7.8 Závislost propustnosti na čase (odpoledne)	43		

Tabulky

2.1 Přehled starších generací mobilních sítí [2]	4
5.1 Přehled vybraných virtuálních mobilních operátorů [31]	24
5.2 Přehled frekvenčních pásem 4G a 5G sítí v ČR [20, 34, 35]	25
5.3 Využití frekvencí v okolí 3,6 GHz [20, 34]	26
7.1 Nejvyšší sestupné rychlosti v závislosti na velikosti okna	42
7.2 Nejvyšší sestupné rychlosti naměřené v panelovém domě	46



Kapitola 1

Úvod

Obecně v každém vědeckém odvětví dochází k pokroku. Ani v oblasti telekomunikací tomu není výjimkou. Tento obor je ve srovnání s dalšími vědeckými odvětvími relativně nový, ale i přesto v něm došlo k nespočetně zdokonalení a změnám, a to za obdivuhodně krátkou dobu. V této práci jsou představeny technologie LTE a 5G, které se dnes používají téměř ve všech částech světa. Na začátku teoretické části je poskytnut přehled starších mobilních sítí, ze kterých nové mobilní sítě postupem času vzešly. Dále jsou detailně vysvětlena zlepšení, díky kterým LTE i 5G předčilo starší generace. V navazující části je popsána aktuální situace v České republice týkající se operátorů a jejich infrastruktury pro 4G a 5G sítě. Kromě toho je zmíněna implementace privátních 5G sítí do průmyslu včetně důvodů, které k této inovaci vedou. Práce také obsahuje popis metodiky testování sítí, která vychází z doporučení Českého telekomunikačního úřadu. Ta se zabývá především nástroji pro testování mobilních sítí. V praktické části je nejdříve představena měřicí sestava se zařízením F-Tester, pomocí které byla prováděna veškerá měření. Hlavní náplní je testování mobilních sítí operátorů O2 a Vodafone, jež využívají technologii LTE a 5G. Práce se rovněž zabývá zkoumáním jevů, které vznikají v souvislosti se specifickými podmínkami v daném místě nebo při přechodu do jiné lokality. Součástí práce jsou naměřená data, která byla získána při testování mobilních sítí díky zařízením F-Tester.

Kapitola 2

Historický vývoj mobilních sítí

2.1 První mobilní síť

Zásadní princip komunikace v nejmodernějších mobilních sítích je založen na struktuře, která se skládá z tzv. buněk. Pozoruhodné na myšlence vytvořit síť pomocí jednotlivých buněk je to, že byla představena již v roce 1947 firmou AT&T (American Telephone and Telegraph). Ačkoliv se v té době buňkový princip nedal plně využít, stal se stavebním kamenem pro dnešní mobilní síť. Buňkový princip je založen na tom, že velké území je pokryto pomocí menších buněk, které se částečně překrývají. Koncový účastník je vždy přepojen tak, aby měl co nejlepší podmínky. Velký rozvoj odstartoval na začátku osmdesátých let, protože se mobilní síť staly tématem ve všech částech světa. V této době se také objevují analogové mobilní systémy označované jako 1G, které měly definované standardy. Proto je zřejmé, že zde započalo dělení mobilních sítí na jednotlivé generace, které se ujalo a je v současnosti běžně používáno. [1]

2.2 3G a starší generace

Zatímco systémy 1. generace byly pouze národní systémy, novější generace mají téměř celosvětový rozměr, a to i díky globalizaci. Protože se u následujících generací často liší přenosové rychlosti jednotlivých systémů v rámci jedné generace¹, je běžně používán určitý kompromis ve značení (například 2,75G – technologie EDGE). Díky tomuto značení lze rozlišit, jaká technologie je novější, což v podstatě implikuje, která technologie bude mít vyšší

¹Například u 3. generace lze dosáhnout pomocí technologie UMTS teoretické rychlosti až 2 Mbit/s směrem k uživateli, zatímco HSPA+ (označení 3,5 G) poskytuje až 42 Mbit/s ve stejném směru. [2]

přenosovou rychlost. [2] Přehled starších generací byl vložen do tabulky 2.1, která byla převzata z [2].

Generace	Příklady	Vlastnosti generace a použití
1G	NMT (Nordic Mobile Telephone)	<ul style="list-style-type: none"> • Analogové systémy • Různé regiony • Hlavně pro přenos hlasu
	AMPS (Advanced Mobile Telephone System)	
	TACS (Total Access Communication System)	
2G	GSM (Global System for Mobile Communication)	<ul style="list-style-type: none"> • Digitální systémy • Pro přenos hlasu • Spolehlivě přenáší data
	GPRS (General Packet Radio Service) – 2,5G	
	EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) – 2,75G	
3G	UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)	<ul style="list-style-type: none"> • Přenos multimédií
	HSPA (High Speed Packet Access)	
	HSPA+ – 3,5G	

Tabulka 2.1: Přehled starších generací mobilních sítí [2]

2.3 Přechod k novějším sítím

I když je dobré znát principy mobilních sítí, které patří do starších generací, tak během vývoje došlo k mnoho změnám a vylepšením. Rádiové spektrum je navíc velice používané, většina použitelných frekvencí, na kterých je možnost vysílat data, je již využita pro různé technologie. [3] Proto už je v dnešní době normální, že operátoři vypínají starší generace mobilních sítí, aby uvolnili frekvenční pásma novějším i rychlejším generacím. To se přesně dělo v České republice na podzim v roce 2021, kdy T-Mobile vypnul² 3G síť ve frekvenčním pásmu 2100 MHz, aby posílil technologie LTE (Long Term Evolution) a 5G. [4] Proto je důležitější zaměřit se na tyto novější technologie mobilních sítí.

Ačkoliv by bylo možné zařadit nejstarší verzi technologie LTE do 3. generace mobilních sítí [2], raději jsou jednotlivé verze LTE popsány samostatně a detailněji, a to z několika důvodů. Jedním z nich je běžné používání a dostupnost LTE. V dnešní době téměř každý vlastní chytrý telefon, který technologii LTE či její novější verzi používá. Hlavní důvody jsou však nové principy a vylepšení, díky kterým se technologie LTE stala celosvětově používanou. Tyto novinky LTE se poté staly stavebním kamenem pro nejmodernější mobilní síť.

²To, že došlo k vypnutí 3G sítě, neznamená, že technologie 2G byla vypnuta ještě dříve. Jak je totiž uvedeno v [4], mobilní telefony, které nepodporují VoLTE (Voice over LTE), stále využívají 2G, která má po České republice dobré pokrytí a pro hovory a SMS je postačující.

Kapitola 3

Vývoj technologie LTE

3.1 LTE (Release 8 a Release 9)

Zařazení LTE do správné generace mobilních sítí je spíše subjektivní, avšak většina zastává názor, že tyto dvě zmíněné verze LTE (vydané v prosinci 2008 a 2009) ještě nepatří do 4G. Ty jsou označovány jako „3,9G“, tedy tvoří mezistupeň mezi 3G a 4G. [2] Tento názor vznikl, protože některé parametry těchto verzí LTE nedosahují potřebných hodnot pro 4G, které stanovila standardizační organizace ITU (International Telecommunication Union). Šířka pásma se typicky pohybuje v rozmezí 1 MHz až 20 MHz. [1] Jeden z parametrů je maximální teoretická přenosová rychlost ve směru downlink, kterou ITU specifikovalo jako 100 Mbit/s pro mobilní komunikaci a 1 Gbit/s pro připojení v pevném bodě. [5] Podle informací z [1] však LTE (Release 8) dosahuje teoreticky 300 Mbit/s směrem k uživateli při použití prostorového multiplexu 4x4 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) a 64QAM (Quadrature Amplitude Modulation). To znamená, že nesplňuje podmínku pro připojení v pevném bodě. I přesto oproti starším technologiím dosahuje vyšších rychlostí, a to hlavně pomocí principů zmíněných v následujících sekcích.

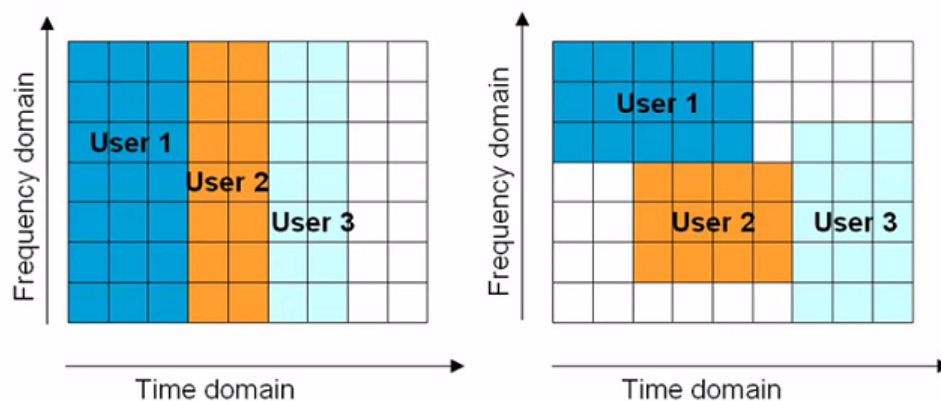
3.1.1 OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

OFDM je modulační princip, který je založen na tom, že vysílaná data jsou přenášena pomocí jednotlivých nosných vln. Tyto dílčí nosné vlny jsou vzájemně ortogonální, protože jsou vysílány na frekvencích, které jsou od sebe vzdálené o Δf . Rozstup Δf je ideálně převrácenou hodnotou doby trvání OFDM symbolu. Díky tomu spolu přenášené datové toky neinterferují. Přenos pomocí více nosných vln byl využíván již dříve, například u technologie HSPA. Zatímco tam bylo použito pouze několik nosných vln, u OFDM to jsou stovky

či tisíce nosných vln. Na dílčí nosné vlny je aplikována modulace, a to například QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16QAM nebo 64QAM. Z jednotlivých nosných vln je poté pomocí IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) vytvořen modulovaný signál v časové oblasti, který lze vysílat. [1]

3.1.2 OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)

Pokud se zaměříme na LTE, podle 3GPP (3rd Generation Partnership Project) jsou od sebe jednotlivé subnosné frekvence vzdálené 15 kHz. Ve směru downlink se u LTE používá OFDMA, což je varianta OFDM. [1] U OFDMA je oproti OFDM využito časový i frekvenční multiplex. Rozdíl je znázorněn na obrázku 3.1. To znamená, že u OFDMA může v jednom čase komunikovat více uživatelů. [6]



Obrázek 3.1: Srovnání OFDM a OFDMA [6]

3.1.3 SC-FDMA (Single-carrier Frequency Division Multiple Access)

OFDMA má plno výhod, ale není prakticky vhodná pro komunikaci ve směru uplink. Většina zařízení, ze kterých chceme vyslat signál, je mobilní, a tudíž mají omezenou kapacitu baterie. Při použití OFDMA by se energie v baterii spotřebovala příliš rychle, a to kvůli velké hodnotě poměru mezi maximálním a průměrným vyslaným výkonem z mobilního zařízení. [1] Tento poměr vyjadřuje veličina PAPR (Peak to Average Power Ratio) definována v rovnici 3.1, která má tvar

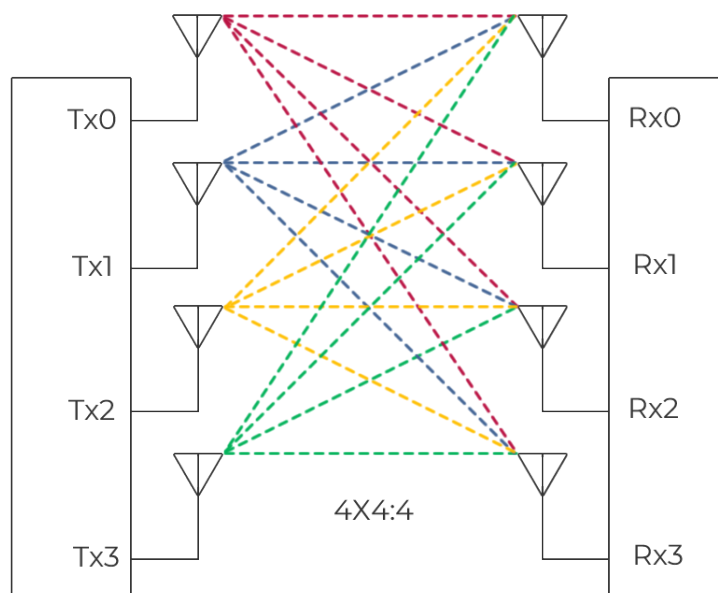
$$\text{PAPR}(s) = 10 \log_{10} \frac{\max |s(t)|^2}{\mathbb{E}\{|s(t)|^2\}}, \quad (3.1)$$

kde maximální okamžitý výkon signálů značí $\max |s(t)|^2$ a $\mathbb{E}\{|s(t)|^2\}$ je střední hodnota výkonu signálu. Tato rovnice byla převzata z [7].

Problém řeší SC-FDMA, protože zatímco OFDMA přiřazuje jeden modulační symbol k jedné subnosné, SC-FDMA přenáší jeden modulační symbol po jednotlivých částech na více subnosných. V časové oblasti to znamená, že doba trvání modulačního symbolu bude kratší než u OFDMA. Vše je možné díky použití DFT (Discrete Fourier Transform) na blok modulačních symbolů, který má menší velikost než samotná OFDM, která následuje. Výsledný signál pak bude mít podobné vlastnosti, jako kdyby obsahoval pouze jednu nosnou vlnu. I když je OFDMA rychlejší, použití SC-FDMA znamená menší hodnoty parametru PAPR, tudíž i menší spotřebu energie. [1, 2]

3.1.4 MIMO

MIMO je další vylepšení, které přinesla technologie LTE. Zatímco v předchozích sekcích byly probrány frekvenční a časové metody multiplexování, tato metoda používá prostorové multiplexování. Jednoduchý rádiový přenos se nejčastěji popisuje jako jedna vysílací anténa a jedna přijímací anténa. MIMO oproti tomu využívá více vysílacích i přijímacích antén, což přináší nové výhody. Typické označení druhu MIMO je podle počtu na vysílací a přijímací straně. Jedna z verzí je znázorněna na obrázku 3.2.



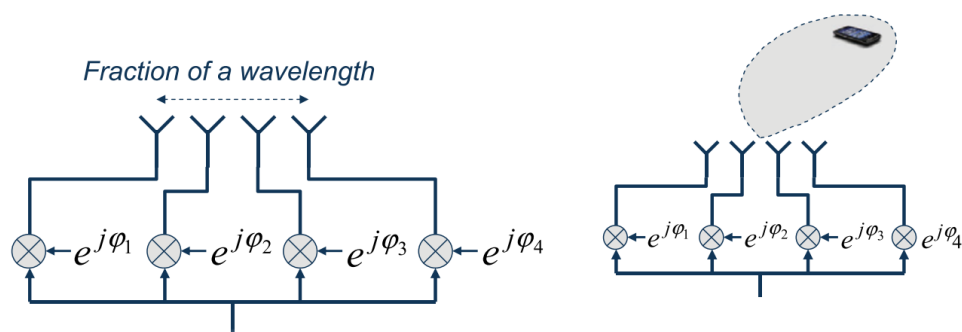
Obrázek 3.2: 4x4 MIMO [9]

Existují dva způsoby, jak lze MIMO využít. První z nich není založen na prostorovém multiplexování, ale pouze na prostém faktu, že je použito více antén. Na těchto anténách jsou přenášena stejná data, což sice nezvýší propustnost sítě, ale zajistí vyšší spolehlivost komunikace. V reálných podmínkách mezi vysílací a přijímací anténou nemusí být pouze volný prostor, ale i mnoho překážek, kvůli kterým dochází k odrazům. S více anténami pak narůstá pravděpodobnost, že se vyslaný signál dostane do cíle. [8]

Druhý a důležitější typ využití MIMO je založen na prostorovém multiplexování. Tato technika je běžně používána v moderních mobilních sítích. Každá anténa vysílá jiná data a každá přijímací anténa zpracovává data od všech vysílacích antén. Tato jednotlivá data je poté potřeba rozlišit na přijímací straně a složit zpátky v jeden datový tok. Toho je dosaženo použitím digitálního zpracování signálu. Vcelku je pak docíleno mnohonásobně větší propustnosti a efektivnějšího využití rádiového spektra. [1, 8]

3.1.5 Beamforming

Beamforming je další z technik, která využívá většího počtu jednotlivých antén na vysílací straně. Každá anténa má svůj vyzařovací diagram. Je logické, že tento vyzařovací diagram je výhodné nasměrovat do lokace, kde se zrovna nachází koncové zařízení. To znamená, že se výkon zbytečně nevyzařuje do prostoru, kde není potřeba, což způsobí zvýšení síly signálu v lokaci, na kterou je vyzařovací paprsek nasměrován. Toho je dosaženo pomocí fázového posunu a malé vzdálenosti mezi jednotlivými anténami, což je naznačeno na obrázku 3.3. [1]



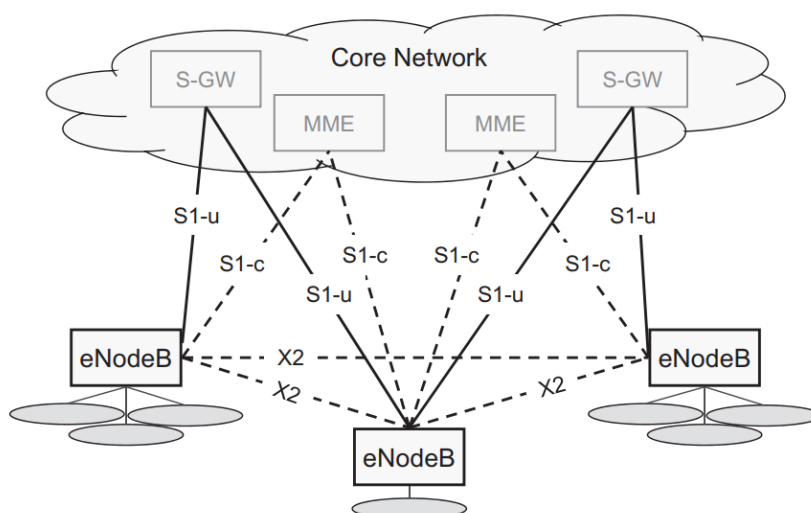
Obrázek 3.3: Princip metody Beamforming [1]

3.2 LTE-Advanced (Release 10)

Technologie LTE-Advanced (dále LTE-A), zkompletovaná v roce 2010 [1], se již právoplatně řadí mezi mobilní sítě 4G, protože splňuje podmínky, které byly uvedeny na začátku podkapitoly 3.1. Podle [10] je technologie LTE-A schopna dosáhnout až 1 Gbit/s jak ve směru downlink, tak ve směru uplink. [5] zase uvádí, že je možné dosáhnout rychlosti 3,3 Gbit/s v jednom sektoru základnové stanice nejen pomocí 8x8 MIMO a modulace 128QAM, ale i díky agregované šířce pásma o velikosti 100 MHz. Podrobněji vysvětlená zlepšení, která technologie LTE-A přinesla, jsou uvedena dále.

3.2.1 Struktura LTE-A

Struktura LTE-A je znázorněna na obrázku 3.4, který byl převzat z [1]. Jednotlivé základnové stanice se označují jako eNB (Evolved Node B) a každá z nich je většinou rozdělena do sektorů, ve kterých se nachází koncová zařízení. Základnové stanice patří do přístupové části sítě (E-UTRAN – Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network) a komunikují spolu pomocí prostředí X2. [10] Každá základnová stanice je také propojena pomocí prostředí S1-c k MME (Mobility Management Entity) a pomocí S1-u k S-GW (Serving Gateway). MME i S-GW již patří do jádra sítě (EPC – Evolved Packet Core). MME se primárně stará o šifrovací klíče, autentifikaci a autorizaci koncových zařízení. S-GW zajišťuje směrování i přeposílání paketů. Důvod je takový, že S-GW sice není přímo připojeno k internetu, ale cesta do internetu přes S-GW vede. [1, 2]



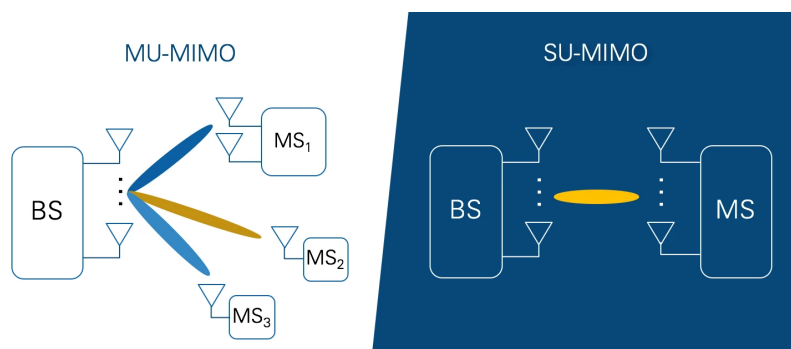
Obrázek 3.4: Struktura LTE-A [1]

3.2.2 Relaying

Relaying je výhodná metoda, jak rozmístit jednotlivé základnové stanice a pokrýt efektivně co nejvíce území. Z ekonomického hlediska se nevyplatí stavět pouze základnové stanice eNB. Místo toho se používají RN (Relay Node), které jsou umístěny mezi základnovou stanicí (eNB) a koncovým zařízením. Oproti klasickým eNB mají menší spotřebu a dělí se na dva typy. První z nich se uplatní, pokud je koncové zařízení daleko od eNB, protože RN zvýší dosah základnové stanice. RN ale nefunguje pouze jako jednoduchý opakač signálu, data totiž umí jak demodulovat a dekodovat, tak kódovat a modulovat. Zatímco první typ používá stejné frekvence, druhý typ v komunikaci mezi eNB a RN nepoužívá stejnou frekvenci jako mezi RN a koncovým zařízením. [10]

3.2.3 MU-MIMO (Multi-User MIMO)

Metoda MIMO, která byla popsána v sekci 3.1.4 a týkala se technologie LTE (Release 8 a Release 9) je zaměřena primárně na typ SU-MIMO (Single-User MIMO). I když MU-MIMO bylo možné použít již v LTE (Release 8), LTE-A zdokonaluje MU-MIMO do takové formy, že je velice výhodné ji použít. [1] Zdroj [10] uvádí, že koncová zařízení u SU-MIMO využívají celou šířku pásma základnové stanice, zatímco u MU-MIMO³ mohou uživatelé přistupovat do stejného kanálu současně. Hlavní princip vychází opět z velkého počtu vysílacích antén. Jestliže chce komunikovat více uživatelů, jednotlivé antény se zaměří na různá koncová zařízení tak, aby v jednom čase pokryly všechny uživatele. Tím se zefektivní komunikace v rámci buňky, protože nikdo nemusí čekat, až bude smět komunikovat. [11] Srovnání MU-MIMO a SU-MIMO je zobrazeno na obrázku 3.5.

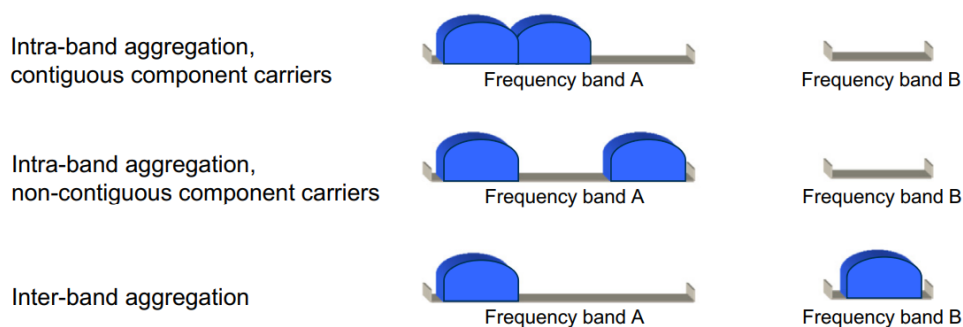


Obrázek 3.5: Porovnání MU-MIMO a SU-MIMO [12]

³MU-MIMO se nepoužívá jen u mobilních sítí. Tato metoda je běžně implementována i u zařízení, jako je router. Na něm jsou většinou jednotlivé antény dobře viditelné.

3.2.4 CA (Carrier Aggregation)

Nejdůležitější novinkou, kterou přinesla technologie LTE-A, je Carrier Aggregation, což znamená používání více frekvenčních pásem najednou. Zásadní také je, že tato metoda pouze rozšiřuje vlastnosti původní technologie LTE, protože je s LTE zpětně kompatibilní. Pokud koncové zařízení nepodporuje funkci CA, stále je umožněna komunikace přes klasické LTE (využití pouze jednoho frekvenčního pásma). [1] Rozmezí jednotlivých středních frekvencí u LTE-A může být jakýmkoliv násobkem 300 kHz, kde číslo, kterým násobíme, je přirozené. Každý takový blok se střední frekvencí a okolními subnosnými se nazývá CC (Component Carrier). Existují 3 typy agregace s ohledem na umístění CC v kmitočtovém spektru. [10] To je znázorněno na obrázku 3.6, kde jsou použity dvě CC. LTE-A umožňuje využití až 5 CC o velikosti 20 MHz za pomoci FDD (Frequency Division Duplexing) nebo TDD (Time Division Duplexing), což opět mnohonásobně zvyšuje propustnost sítě. [10]



Obrázek 3.6: Typy agregace v kmitočtovém spektru [1]

3.2.5 FDD a TDD

FDD a TDD jsou dva možné způsoby, jak komunikovat ve směru downlink a uplink. Při použití FDD probíhá komunikace směrem k uživateli a od uživatele na jiných frekvencích. Sice není efektivně obsazeno rádiové spektrum, ale je dosaženo většího pokrytí, což znamená menší počet základnových stanic. TDD používá pro downlink i uplink stejné frekvence, takže komunikace v obou směrech nesmí probíhat ve stejný čas. I když se TDD i FDD jeví jako plynulé výměny dat, TDD je oproti FDD half-duplex režim. Jednou z výhod metody TDD je flexibilita při změně kapacity sítě. [13]

■ 3.3 Novější verze technologie LTE

S postupem času vyšla nová verze LTE-A (Release 12), která disponuje duální konektivitou. Z toho vyplývá, že koncové zařízení může komunikovat s více základnovými stanicemi eNB současně. Další výhodou je kombinace TDD a FDD při komunikaci přes více frekvenčních pásem. [10]

LTE-A PRO (Release 13) přináší důležité vylepšení v CA, protože umožňuje použití až 32 CC o velikosti 20 MHz. S takovou agregovanou šířkou pásma je teoreticky možné dosáhnout rychlosti přes 3 Gbit/s. [10]

Kapitola 4

5G síť

Ačkoliv technologie LTE dosahuje úctyhodných rychlostí, neustálé nároky na lepší parametry mobilních sítí vedly k vyvinutí výkonnějších 5G sítí. První pohled na 5G síť je stejný jako na 4G, tedy vytvořit pro veřejnost mobilní síť se spolehlivým pokrytím. V tomto případě je kromě zajištění vysoké přenosové rychlosti i výzva v podobě implementace do již vybudované telekomunikační infrastruktury. Další odvětví, kde se 5G začíná uplatňovat, je IoT (Internet of Things), ve kterém se využívají privátní 5G síť.

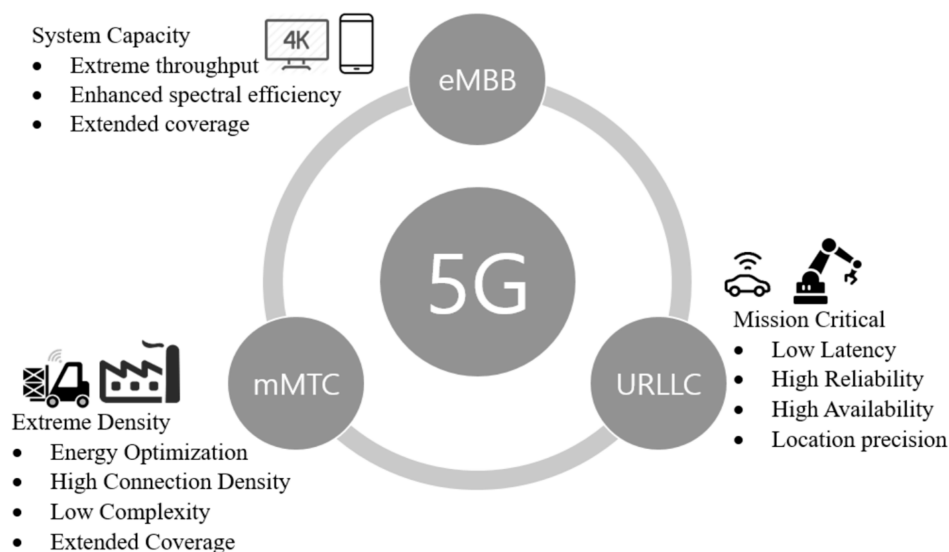
4.1 Standardizace 5G

Standardizace nejnovějších mobilních sítí je proces, který běžně trvá několik let, protože na něm pracuje mnoho organizací a musí být zaručeno, aby podmínky ve standardech vyhovovaly všem. Jednoduše řečeno, ITU nejdříve stanoví podmínky, které standardy musí splňovat, a standardizační organizace je poté vytvoří. Mezi ně patří například 3GPP nebo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). [10] Pokrok v technologii LTE, který obsahuje kapitola 3, je popsán především pomocí jednotlivých vydání organizace 3GPP (Release 8, Release 9 atd.). U 5G je to naprosto identické, protože první standardizace 5G se objevila v 3GPP Release 15 (2016 až 2018). Další vydání, která následovala, byla Release 16 (2018 až 2020) a Release 17 (2020 až 2022). [21]

4.2 5G NR (5G New Radio)

5G NR je konkrétní technologie spadající pod 5G síť. Předpoklady a stanovené podmínky, které musí 5G NR splňovat, byly shrnuty v dokumentu IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020), jenž byl vydán organizací ITU. Tyto podmínky plynou ze třech konceptů, které byly

představeny v tomto dokumentu a dohromady tvoří technologii 5G NR [10], což je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Tři koncepty technologie 5G NR [23]

4.2.1 eMBB (Enhanced Mobile Broadband)

Koncept eMBB se zaměřuje na zvýšení přenosových rychlostí primárně pro aplikace, které používají uživatelé veřejné mobilní sítě. Jedním z důvodů, proč je potřeba vyšších přenosových rychlostí, je rapidní nárůst počtu koncových zařízení (mobilní telefony, tablety, chytré hodinky atd.), které zvyšují množství přenesených dat v mobilní síti. [22] V dokumentu IMT-2020 bylo definováno několik parametrů určených přímo pro použití v rámci eMBB. Špičková rychlost technologie 5G NR musí dosahovat 20 Gbit/s ve směru k uživateli a 10 Gbit/s ve směru od uživatele. Špičková spektrální účinnost ve směru downlink má dosahovat 30 bit/s/Hz a 15 bit/s/Hz ve směru uplink. Zpoždění by nemělo přesahovat 4 ms v rámci User Plane a 20 ms pro Control Plane. Technologie 5G NR by měla být funkční i při pohybu o rychlosti 500 km/h, avšak s nižšími přenosovými rychlostmi. [10]

4.2.2 URLLC (Ultra-reliable and Low-latency Communications)

Přepokládá se, že toto odvětví 5G sítí najde uplatnění v automatizaci výroby nebo u automobilů. Jednotlivá auta by mezi sebou komunikovala pomocí sítě, takže by bylo možné zabránit některým nehodám. Uplatnění by mohlo najít

i ve zdravotnictví, kde by zařízení využívající koncept URLLC kontrolovala zdravotní stav člověka a v případě potřeby přivolala záchrannou službu. [22] Oba tyto příklady použití mají společné to, že implementovaná síť by měla stejné požadavky. Obrovský důraz je zde kladen na zpoždění, protože oproti eMBB nesmí přesahovat 1 ms (User Plane). Další důležité kritérium je spolehlivost, jež musí být u těchto sítí opravdu vysoká. [10]

■ 4.2.3 mMTC (Massive Machine Type Communications)

Tento koncept je podobně jako URLLC zaměřen na IoT, avšak tentokrát se soustředí především na počet zařízení, která mohou být připojena v určité oblasti ve stejnou dobu. Dokument IMT-2020 předepisuje minimální hodnotu, a to milion zařízení na jeden kilometr čtvereční. Kvůli velkému množství zařízení musí být navrhována tak, aby měla nízkou spotřebu energie a dlouhou životnost. [10] Jejich uplatnění by bylo možné najít například v průmyslovém odvětví a chytrých domácnostech, kde ve většině případů plní úlohu senzorů. [22]

■ 4.3 Architektura 5G NR

Jedna z výzev vývoje 5G NR bylo podobně jako u 4G zajistit zpětnou kompatibilitu s předchozí technologií, což je důležité hlavně z ekonomického hlediska. Proto organizace 3GPP k tomuto problému přistoupila tak, že navrhla dvě základní architektury 5G NR. [10]

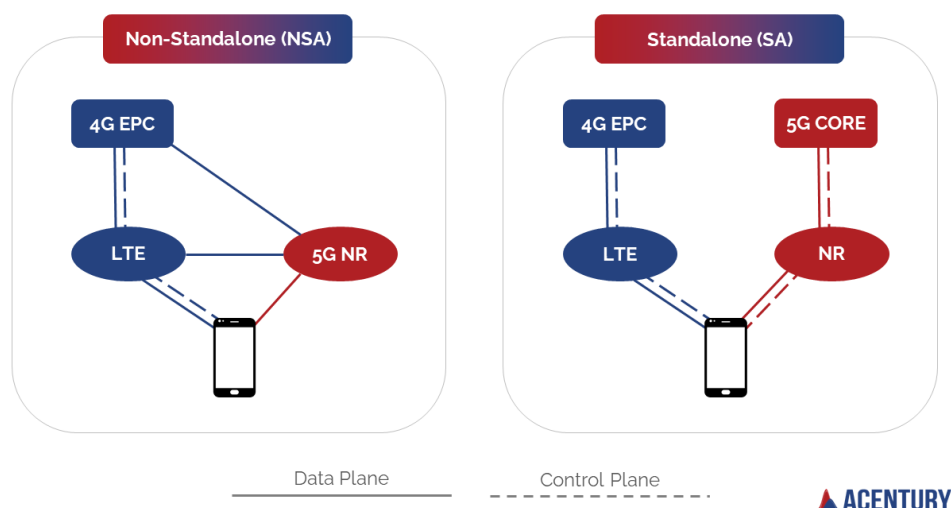
■ 4.3.1 Non-Standalone

První architektura se značí jako NSA (Non-Standalone) a vyznačuje se tím, že tvoří mezistupeň mezi 4G a 5G, takže maximálně využívá již vybudovanou strukturu pro LTE. Součástí této architektury je stejné jádro sítě jako u technologie LTE, tedy EPC. Koncové zařízení může v tomto případě použít jak přístupovou síť LTE, tak přístupovou síť 5G NR, která se nazývá 5G RAN (5G Radio Access Network). Rozdíl je však v tom, že zatímco User Plane může být přenášena přes obě přístupové sítě, komunikace v rámci Control Plane probíhá pouze přes LTE RAN. [10, 21]

■ 4.3.2 Standalone

Architektura SA (Standalone) oproti NSA používá pouze 5G NR RAN (nebo pouze LTE RAN a EPC), která zajišťuje přenos dat pro Control Plane

i User Plane. Na vrcholu této architektury se u 5G NR nachází NGC (Next Generation Core), což je jádro sítě, které nahrazuje EPC. Graficky jsou tyto rozdíly zobrazeny na obrázku 4.2. Přínos této architektury spočívá v tom, že NSA sice výhodně využívá strukturu LTE, ale má pouze některé vlastnosti 5G sítě. Architektura SA již splňuje podmínky 5G sítě všech tří konceptů zmíněných v podkapitole 4.2. [10, 21]



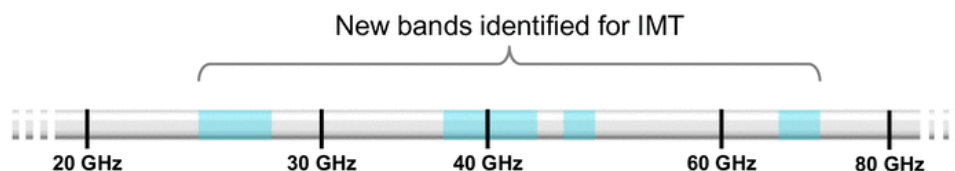
Obrázek 4.2: Srovnání architektur NSA a SA [24]

4.4 Rádiové spektrum 5G

Technologie 5G mohou podobně jako její předchůdci používat frekvence v rozsahu 450 MHz až 6 GHz. V současné době jsou právě tyto frekvence hojně zastoupené v mobilních komunikacích. Nevýhodou je, že tato část rádiového spektra není zas tolik rozsáhlá a je značně zaplněna dalšími službami. Jedním z klíčových aspektů 5G je možnost využít velkou šířku pásma, díky které je možné dosáhnout vysoké propustnosti sítě a nízkého zpoždění. Proto jsou pro 5G síť vyhrazena i nová frekvenční pásma. [25]

V 5G komunikacích jsou pro přenos používána i frekvenční pásma, která jsou umístěna přibližně mezi kmitočty 24 GHz a 86 GHz. Některá nově definovaná pásma jsou zobrazena v rádiovém spektru na obrázku 4.3. Elektromagnetické vlny o frekvenci ve zmíněném rozmezí patří do milimetrových vln (občas se ale milimetrové vlny uvádí až od frekvence 30 GHz). Tento název plyne z velikosti jejich vlnové délky, protože například pro elektromagnetickou vlnu s frekvencí 30 GHz platí, že její vlnová délka bude přibližně 10 mm (ve vakuu). Výhodou těchto pásem je implementace velké šířky pásma, což by na nižších frekvencích

nebylo možné. V některých případech může šířka pásma dosahovat až několik stovek MHz v rámci jedné nosné frekvence. [25]



Obrázek 4.3: Nově definovaná frekvenční pásma [25]

Z předchozích informací by se na první pohled mohlo zdát, že použití vyšších frekvencí přináší pouze výhody. To, že pro některé služby jako jsou rozhlasové stanice (frekvence okolo 100 MHz), televizní vysílání, či starší generace mobilních sítí, byly zvoleny nižší frekvence, má své opodstatnění. U elektromagnetických vln s vysokými kmitočty je běžný značný útlum. [25] Ve srovnání s vlnami s nižšími frekvencemi hůře pronikají skrz překážky, protože jsou více absorbovány materiály. Pro elektromagnetické vlny s delší vlnovou délkou je jednodušší přenášet informaci na dlouhé vzdálenosti a pokrýt rozlehlé území. Lze usoudit, že pro milimetrové vlny jsou již překážky jako městská zástavba, lesy či atmosférické podmínky opravdu zásadní. Právě proto celkový koncept 5G sítí směřuje k tomu, že se musí zvýšit počet jednotlivých buněk a že budou pokrývat menší oblast. Tím také vznikne poměrně robustní síť.

4.4.1 Rádiové spektrum 5G NR

Pro technologii 5G NR byly definovány dva frekvenční rozsahy, ve kterých se nachází jednotlivá frekvenční pásma. První z nich se označuje FR1 (Frequency range 1) a obsahuje pásma v rozsahu 410–7125 MHz, jež se označují n65 až n256. U většiny těchto pásem jsou použity stejné duplexní metody jako u LTE, tedy FDD a TDD. U každého pásma je přesně specifikováno, pro jaký region (Evropa, Asie atd.) bylo zavedeno. Podobné je to i u FR2 (Frequency range 2), které má rozmezí frekvencí 24,25–52,6 GHz a jednotlivá pásma se označují od n257 do n512. Frekvenční rozsahy FR1 a FR2 se liší v možnostech uspořádání subnosných frekvencí. Ve FR1 to může být například 50 MHz, nebo až 100 MHz v rámci jedné nosné. Těmto šířkám odpovídají ve stejném pořadí vzdálenosti subnosných frekvencí, jejichž hodnoty jsou 15 kHz a 30 kHz. Ve FR2 je možné použít i šířku pásma 200 MHz se vzdáleností subnosných 60 kHz, a dokonce i 400 MHz s odstupem subnosných 120 kHz. [25]

4.5 Network slicing

Network Slicing je metoda, která má své počátky ve starších generacích mobilních sítí, ale klíčovou se stala až pro 5G komunikaci. Koncept 5G je vytvořit síť, která má mnoho rozličných uplatnění, a proto je u ní obzvláště důležité tato jednotlivá odvětví oddělit. Princip je postaven na tom, že různá využití jsou oddělena virtuálně, tudíž sdílí stejné fyzické prostředky pro komunikaci. Metoda Network slicing může být implementována v přístupové síti (RAN) i v jádru sítě (NGC). Konečným výsledkem je flexibilní způsob, jak operátor může poskytovat unikátní 5G síť podle potřeb zákazníka, pro kterého se tyto síť jeví jako nezávislé. Příkladem může být automatizace výroby, ve které bude kladen důraz na nízké zpoždění, zatímco u další sítě bude upřednostněna velká šířka pásma, protože přenáší živý video přenos ve vysoké kvalitě. [10, 25]

4.6 Modulace a multiplexování v 5G

Podobně jako ve 4G je multiplexování u 5G sítí obecně založeno na metodě OFDM, která byla popsána v sekci 3.1.1. I zde se nejčastěji používá kvadraturní amplitudová modulace, či jednodušší modulace v podobě některé z variant klíčování (například QPSK). [25]

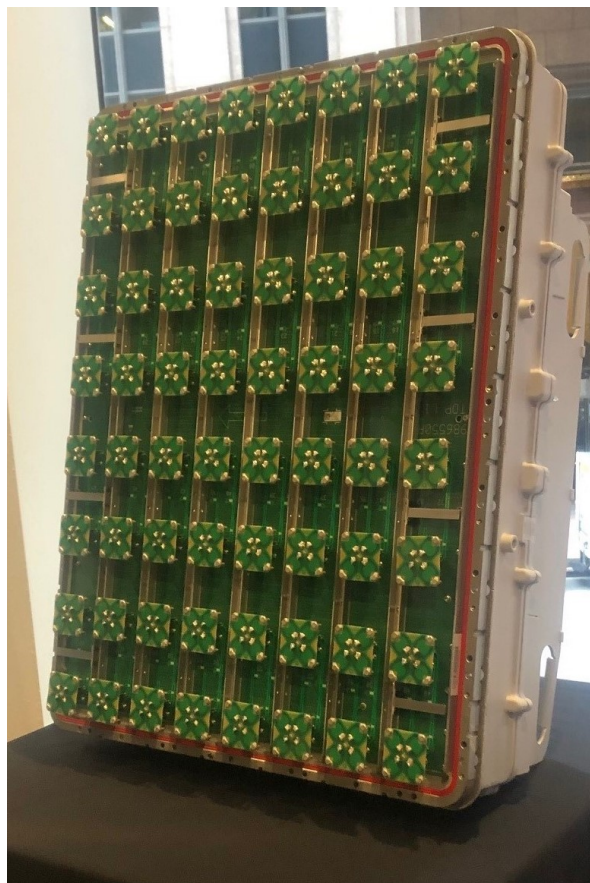
4.6.1 NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)

Další zajímavá myšlenka, která by v 5G sítích zajistila multiplexování, je NOMA. Jak už z názvu plyne, NOMA oproti OFDM není založena na ortogonalitě jednotlivých subnosných frekvencí. NOMA umožňuje vysílat různá data na stejné frekvenci, takže efektivněji využívá rádiové spektrum. Multiplexování je zajištěno tím, že odlišné signály mají jiné výkonové úrovně. [22]

Příkladem může být buňka, ve které se nachází dvě koncová zařízení. První se nachází blíž k základnové stanici, a proto má vyšší SNR (Signal-to-Noise Ratio) než druhé. Ze základních znalostí v oblasti telekomunikace plyne, že kapacitu kanálu ovlivňuje šířka pásma a SNR, tedy poměr výkonu užitečného signálu a výkonu šumu. U multiplexování založeném na ortogonalitě by obě zařízení komunikovala ve stejném čase na odlišných frekvencích. U metody NOMA základnová stanice přiřadí oběma zařízením jiný výkon signálu. To je provedeno tak, aby byl druhému zařízení přiřazen vyšší výkon, čímž se částečně kompenzují horší podmínky. Důležitým faktorem je, že obě zařízení použijí stejné frekvence, takže je dostupná větší šířka pásma. [22]

4.7 Massive MIMO

V kapitole 3 byly představeny základní principy technologie MIMO. V 5G sítích byl tento koncept prostorového multiplexování opět zdokonalen. V rámci technologie Massive MIMO jsou implementovány antény do struktur, které jsou často maticově uspořádané a obsahují desítky, někdy až stovky antén (anténní řady)⁴. Reálný příklad je zobrazen na obrázku 4.4. Díky tomu lze dosáhnout efektivního prostorového multiplexování pro více uživatelů a adaptivního směřování paprsku s vysokým ziskem. Potvrzuje se zde i flexibilita obecné MIMO technologie. Je nutno říci, že využití Massive MIMO se liší pro jednotlivé frekvence. Pokud se zaměříme na nižší frekvence (pro 5G NR je to FR1), problém spočívá hlavně v omezené šířce pásma, a proto je důležitá vysoká spektrální účinnost, kterou právě technologie Massive MIMO poskytuje. [22]



Obrázek 4.4: Massive MIMO anténa [26]

⁴Mnohdy se používá křížová polarizace dvou elementů v každém místě maticové anténní řady, protože to umožňuje zvýšení počtu nezávislých datových toků. [22]

Oproti tomu vysoké frekvence, které se řadí do FR2, mají mnohonásobně větší šířku pásma. To znamená, že lze dosáhnout vysokých přenosových rychlostí jako 10 Gbit/s pouhým použitím dvou datových toků, jež využívají prostorové multiplexování a modulační schéma 16QAM. V tomto případě není důraz kladen na vyšší spektrální účinnost, protože jak již bylo řečeno, nevýhoda těchto frekvencí spočívá ve vysokém útlumu při šíření v reálném prostředí. Hlavní důvodem použití technologie Massive MIMO pro pásma v rozsahu FR2 je právě kvůli částečné kompenzaci útlumu, protože zajišťuje větší spolehlivost komunikaci a kvalitnější pokrytí. [22]

Na druhou stranu komunikace přes vyšší frekvence skrývá důležitou výhodu. Obecně platí, že pro vyšší frekvence je možné využít menší antény. Tím pádem jich lze použít více a je možné umístit je do různých typů zařízení, aniž by zabíraly zbytečně mnoho prostoru. Dalším přínosem je, že se při výrobě použije méně materiálu, což snižuje výrobní cenu.

4.8 MEC (Multi-access Edge computing)

V podkapitole 4.3 byla architektura 5G NR popisována především pomocí jádra sítě, přístupové sítě a koncového zařízení. MEC je nová verze architektury 5G sítě, kterou je možné implementovat. Základem je přesunutí zdrojů využívaných pro aplikace koncových uživatelů na okraj sítě (typicky mezi přístupovou sítí a jádrem sítě). MEC také může být součástí segmentu vytvořeného pomocí metody Network slicing. [25]

Díky MEC není potřeba komunikovat s datovými centry a výpočetní kapacita je blízko uživatele, což přináší mnoho výhod. Nejdůležitější z nich jsou snížení latence, poskytnutí velké šířky pásma a zvýšení ochrany proti odcizení dat. Proto je architektura MEC použita u aplikací v reálném čase, u kterých jsou zmíněné parametry kritické pro správné fungování. Mezi tyto systémy patří AR (Augmented Reality), VR (Virtual Reality), živé přenosy, monitorování polohy nebo komunikace mezi vozidly. [27]

4.9 Industry 4.0

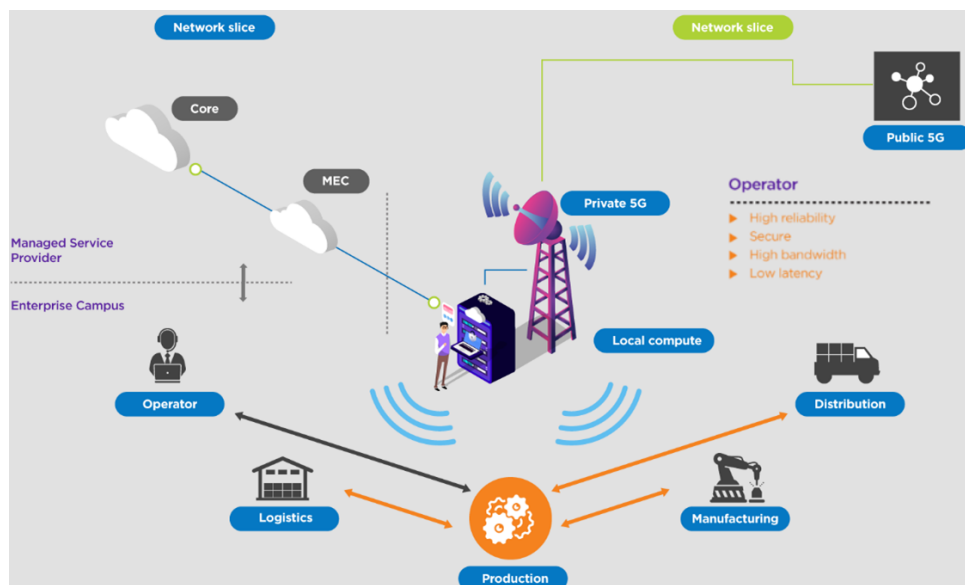
Samotné uplatnění 5G sítě v průmyslu spadá pod pojem Industry 4.0, který daleko přesahuje i obor telekomunikace. Název označuje čtvrtou průmyslovou revoluci spojující digitální technologii s výrobními procesy. To umožňuje zefektivnit výrobu a vylepšit kvalitu finálních produktů. Dalším typickým znakem je zvýšení automatizace výroby, v níž dochází k rozhodnutím v reálném

čase. Mezi používané technologie patří IoT, cloud computing, robotika, umělá inteligence a strojové učení. Kvůli hromadnému použití digitálních technologií musí být kladen důraz na kybernetickou bezpečnost. [28]

4.9.1 5G pro použití v průmyslu

IoT je stavebním kamenem pro automatizaci výroby a využívá velké množství senzorů, které sbírají informace přímo z výroby. Tyto obrovské objemy dat musí být co nejrychleji a spolehlivě zpracovány a zanalyzovány tak, aby na ně bylo možné reagovat v reálném čase. Proto je v současné době nejlepší volbou právě technologie 5G splňující podmínku malého zpoždění a vysoké spolehlivosti. Té je dosaženo například pomocí robustních MCS (Modulation and Coding scheme) a CQI (Channel Quality Indicator) tabulek. [25]

Celkovou vizí však není sbírat pouze data z výrobní linky, ale vytvořit chytrou továrnu, kde budou shromažďovány informace ze všech procesů výroby. Z pohledu logistiky to může být přesné sledování zásilek, a tím pádem i lepší odhadování času dodání výrobních prostředků. Dalším důležitým aspektem je využití autonomních vozidel, která musí mít přehled o svém okolí a neustále udržovat komunikaci s ostatními automobily. To znamená implementaci velkého počtu senzorů a zpracování značného přenosu dat. Díky nízkému zpoždění lze provádět vizuální inspekce pomocí kamer a rychle reagovat na aktuální stav výrobku. Celkový koncept použití privátní 5G sítě je znázorněn na obrázku 4.5. [29]

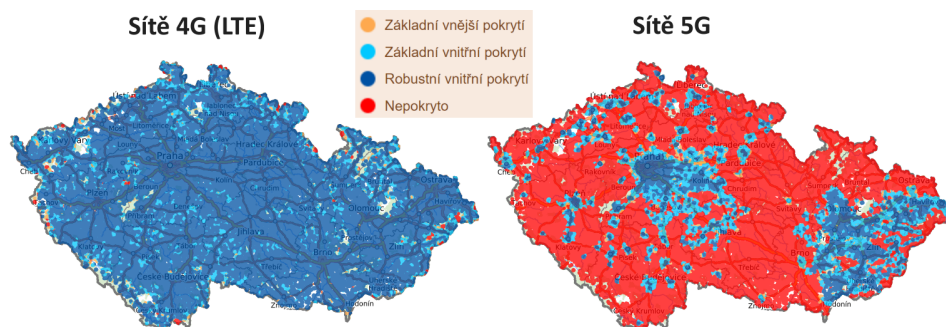


Obrázek 4.5: Privátní 5G síť a její použití v průmyslu [30]

Kapitola 5

Situace v ČR

Veřejné 5G sítě jsou používány v České republice již několik let, ale i přesto má v současnosti určitou výhodu technologie LTE, protože má lepší pokrytí. To je znázorněno na obrázku 5.1, který byl vytvořen pomocí [20].



Obrázek 5.1: Pokrytí operátora O2 v České republice [20]

Jedná se o pokrytí operátora O2 v České republice. Lze pozorovat, že 5G sítěmi jsou zatím pokryta především větší města. Spolehlivější pokrytí 5G je však pouze otázkou času, a proto je jisté, že vliv 5G sítí v budoucnosti poroste, dokud se neobjeví novější technologie.

5.1 Operátoři v ČR

V současné době jsou v České republice tři přední mobilní operátoři. Jsou nimi T-Mobile Czech Republic, Vodafone Czech Republic a O2 Czech Republic. Všichni tito operátoři poskytují služby prostřednictvím 2G a 4G sítí s kvalitním pokrytím. V hustěji osídlených oblastech běžně nabízejí pokrytí pomocí 5G sítě.

Pro upřesnění je dobré zmínit, že mobilních operátorů v České republice je velké množství, což potvrzuje i zdroj [32]. Většinou se však jedná o virtuální mobilní operátory, kteří se vyznačují tím, že nedisponují vlastní veřejnou

mobilní komunikační sítě. To znamená, že tito operátoři mají vlastní značku, reklamy a cenovou politiku, ale infrastrukturu si pronajímají od větších operátorů, konkrétně právě od T-Mobile Czech Republic, Vodafone Czech Republic a O2 Czech Republic. V tabulce 5.1 jsou uvedeny informace o známějších virtuálních mobilních operátorech v České republice. [32]

Poskytovatel	Provozovatel veřejné mobilní komunikační sítě	Obchodní značka pod kterou je služba poskytována
COOP Mobil s.r.o.	Vodafone Czech Republic a.s.	COOP Mobil
ČEZ Prodej, s.r.o.	O2 Czech Republic a.s.	Mobil od ČEZ
KlokanMobil, s.r.o.	Vodafone Czech Republic a.s.	Klokanmobil
SAZKA a.s.	Vodafone Czech Republic a.s.	SAZKAmobil
Tesco Mobile ČR s.r.o.	O2 Czech Republic a.s.	Tesco Mobile

Tabulka 5.1: Přehled vybraných virtuálních mobilních operátorů [31]

5.2 Používaná pásma pro LTE a 5G

V podkapitole 2.3 bylo zmíněno, že většina frekvencí rádiového spektra je již použita. Z toho vyplývá, že legální vysílání v určité části rádiového spektra se stává velice drahou záležitostí. Každý operátor s vybudovanou mobilní komunikační sítí má přesně stanovená frekvenční pásma, kde může vysílat. Ty jsou vymezena na základě získaných licencí, za které nese odpovědnost ČTÚ (Český telekomunikační úřad). V tabulce 5.2 jsou uvedeny základní informace o frekvenčních pásmech, která se v ČR používají v rámci technologie 4G a 5G (novější verze LTE a 5G NR). Hlavní tři operátoři jsou již dále označováni obchodní značkou.

V tabulce 5.2 se vyskytuje pojem DSS (Dynamic Spectrum Sharing). To je technologie, která zajišťuje, že LTE i 5G mohou paralelně sdílet stejnou část rádiového spektra. To znamená, že díky DSS je možné komunikovat přes jednu anténu pomocí LTE nebo 5G například podle toho, jakou technologií je schopen komunikovat koncový uživatel. [33]

Pásmo	Operátoři	Použitá technologie	Dostupná šířka kanálu
700 MHz (B28 + n28)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile • Vodafone 	5G (NSA) (O2 pouze 4G)	<ul style="list-style-type: none"> • 2×10 MHz • 2×10 MHz • 2×10 MHz
800 MHz (B20)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile • Vodafone 	4G	<ul style="list-style-type: none"> • 2×10 MHz • 2×10 MHz • 2×10 MHz
1800 MHz (B3 + n3)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile • Vodafone 	DSS 4G + 5G (O2 DSS nepoužívá)	<ul style="list-style-type: none"> • 2×20 MHz (LTE) (nebo 2×15 MHz) • 2×10 MHz (5G NR NSA) • 2×20 MHz • 2×20 MHz
2100 MHz (B1 + n1)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile • Vodafone 	DSS 4G + 5G (O2 DSS nepoužívá)	<ul style="list-style-type: none"> • 2×20 MHz (LTE) • 2×15 MHz (5G NR NSA) • 2×20 MHz • 2×20 MHz
2600 MHz (B7)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile • Vodafone 	4G	<ul style="list-style-type: none"> • 2×20 MHz • až 2×25 MHz • až 2×20 MHz
TDD 2600 MHz (B38)	<ul style="list-style-type: none"> • O2 • T-Mobile 	4G	<ul style="list-style-type: none"> • 25 MHz • 25 MHz

Tabulka 5.2: Přehled frekvenčních pásem 4G a 5G sítí v ČR [20, 34, 35]

Oficiální zdroj [20] nebyl vždy přesný, protože operátoři tyto podrobné informace nezveřejňují. Považují je za část svých obchodních znalostí a postupů. Proto byla nutná konzultace ohledně frekvenčních pásem s některými zakladateli webu [18]. Pásma a jejich šířky byly neustále kontrolovány všemi měřeními pomocí F-Testeru (kapitola 7). V tabulce 5.2 se vždy jedná o pásmo využívající FDD, pokud není specifikováno jinak. Je to zřejmé i kvůli šířce kanálu, která je pro FDD uvedena jednou pro downlink a jednou pro uplink. To plyne ze sekce 3.2.5.

Další důležitá frekvenční pásma jsou v okolí 3,6 GHz. V současné době jsou již vydražena a vlastněna jednotlivými operátory. Oproti pásmům v tabulce 5.2 se používají i u fixních sítí nebo u privátních sítí. Jejich přehled je zobrazen v tabulce 5.3, která byla vytvořena pomocí [20, 34].

Pásmo	Operátor	Frekvence [MHz]	Podrobnosti
TDD 3500 MHz (n78)	<ul style="list-style-type: none"> • T-Mobile • Vodafone 	<ul style="list-style-type: none"> • 3480 až 3540 • 3540 až 3600 	využito pro 5G NR
TDD 3700 MHz (B43 + n77)	<ul style="list-style-type: none"> • Vodafone • O2 • Nordic Telecom 	<ul style="list-style-type: none"> • 3600 až 3640 • 3640 až 3700 • 3700 až 3800 	<ul style="list-style-type: none"> • koupeno od operátora • PODA (leden 2023) • 4G LTE nebo 5G NR

Tabulka 5.3: Využití frekvencí v okolí 3,6 GHz [20, 34]

Je zajímavé, jak jednotliví operátoři zacházejí s těmito pásmy ve veřejných sítích. Zatímco Vodafone téměř neimplementoval pásma v okolí 3,6 GHz v Praze, O2 má pomocí těchto pásem pokrytou rozsáhlou část města. [20] To nemusí být způsobeno pouze jinou strategií, protože Vodafone má také odlišnou infrastrukturní společnost. O2 a T-Mobile spolupracují se společností CETIN.

5.2.1 Vyšší frekvenční pásma

V posledních letech probíhá testování 5G sítí, které pro komunikaci používají vysoké frekvence (rozmezí FR2). Do testování se zapojil například operátor O2 (také CETIN), který nejprve musel dostat povolení od ČTÚ. Při měření byly použity frekvence od 26,5 GHz do 27,3 GHz, takže šířka kanálu měla hodnotu 800 MHz. To je mnohonásobně více než u nižších frekvenčních pásem. Díky tomu bylo možné dosáhnout rychlostí až 5 Gbit/s. Předpokládá se, že tyto 5G sítě s vysokou rychlostí naleznou uplatnění ve veřejných institucích, v nemocnicích i ve firmách. [36]

Díky exkurzi do laboratoře společnosti CETIN bylo zjištěno, že v některých místech Prahy jsou již experimentálně nasazeny buňky používající tyto vyšší frekvenční pásma.

5.2.2 Aplikace v průmyslu

V současné době probíhá implementace privátních 5G sítí do některých firem v České republice. Jedním z příkladů je Škoda Auto, která si nechala nainstalovat privátní 5G síť od operátora Vodafone. Jedná se o opravdovou 5G SA síť, jež využívá frekvence v licencovaném pásmu. Infrastruktura je postavena na základě technologií společnosti Nokia. Mobilní privátní síť lze uplatnit třeba při automatickém parkování aut pomocí řízených vozíků. [37]

Dalším příkladem je firma Continental, konkrétně pobočka v Brandýse nad Labem. Exkurzi měl na starosti Ing. Jakub Hamerník, který byl zároveň průvodcem a od kterého byly získány následující informace.

Závod v Brandýse nad Labem vyrábí různé příslušenství do aut (např. displeje, ovládací panely). Některé výrobní linky jsou téměř plně automatizované a využívají průmyslové roboty značky KUKA. Doposud byla pro komunikace používána technologie Wi-Fi (Wireless Fidelity), ale postupně se chystá implementace nové privátní 5G sítě, která by měla být zprovozněna pro testování již v půlce června roku 2023. Důvody přechodu na privátní 5G síť jsou její vlastnosti a nové možnosti, které 5G přináší. Konkrétně se jedná o 5G SA síť ve frekvenčním pásmu 3500 MHz od společnosti T-Mobile na základě technologií firmy Ericsson. Pro pokrytí bude použit Ericsson Radio Dot System složený z jednotlivých přístupových bodů. Ericsson Radio Dot je zobrazen na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2: Radio Dot od firmy Ericsson [38]

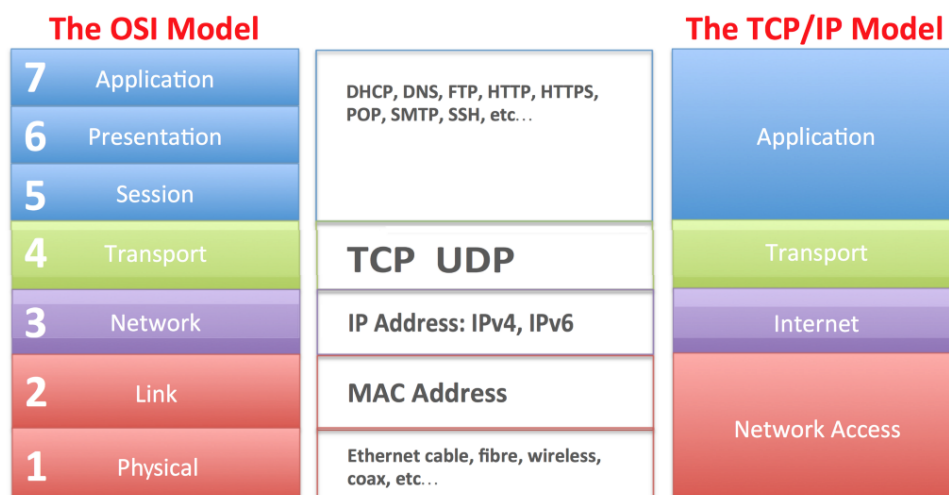
Je jisté, že oproti veřejným 5G sítím, bude tato privátní síť více zatížena ve směru uplink. Dalším faktem je, že výrobní linky jsou co nejvíce u sebe kvůli šetření místem. Většina částí je navíc uzemněna. To může mít za následek vznik hluchých míst v halách. Privátní 5G síť nalezne uplatnění nejen u zmíněných výrobních linek, ale i při používání VR či při vzdálené správě. Dalším budoucím projektem firmy Continental je geolokace pomocí 5G sítě, která umožňuje vysokou přesnost určení polohy.

Kapitola 6

Metodiky testování sítí

6.1 Protokoly v internetu

Na začátku osmdesátých let byl navržen referenční model ISO/OSI (International organization of Standardization – Open System Interconnection), což je pouze teoretický síťový model. Obsahuje 7 vrstev, což se ukázalo být jako zbytečně moc. Proto je dnešní internet založen na modelu TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Ten obsahuje pouze 4 vrstvy, protože některé vrstvy byly z důvodu zjednodušení a praktické implementace sdruženy. Oba tyto modely mají stejnou 4. vrstvu, která se nazývá transportní. Ta zajišťuje přizpůsobení mezi pakety a tokem dat. Transportní vrstva využívá právě dva základní síťové protokoly, které jsou zmíněny dále. [14] Struktury obou modelů jsou znázorněny na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1: Srovnání modelu ISO/OSI a TCP/IP [15]

■ 6.1.1 TCP a UDP

TCP a UDP (User Datagram Protocol) jsou dva základní protokoly zajišťující přenos dat po síti. V počítačových sítích je mnoho rozličných aplikací, které potřebují přenášet data různým způsobem. U některých služeb je vyžadována velká spolehlivost datového přenosu i za cenu přenosové rychlosti (e-mail, finanční transakce atd.). Takové služby obvykle využívají protokol TCP, jehož hlavním mechanismem je kontrola, zda odeslaná data dorazila do cílové destinace. Pokud se data během přenosu ztratí nebo poškodí, dochází k retransmisi. Dalším znakem protokolu TCP je schopnost přizpůsobit se podle aktuální dostupné kapacity sítě. Aplikace jako streamování videí, videohovory a on-line hry používají protokol UDP, protože potřebují vysokou přenosovou rychlost a nízkou latenci. UDP oproti TCP neposkytuje spolehlivé doručení informací, pokud při přenosu dojde k poškození nebo ztrátě dat. V situacích, kdy se jedná o malé objemy ztracených dat, bývá běžné, že příjemce tyto chyby ignoruje, protože se výrazně neprojeví na celkové kvalitě přenosu. [14]

■ 6.2 Pokyny ČTÚ

V březnu roku 2021 vydal ČTÚ přesné metodické pokyny, jak měřit a vyhodnocovat datové parametry mobilních sítí. Pokyny rozdělují na základě toho, zda se jedná o protokol TCP nebo UDP. Dále se soustředí na rádiové parametry, které v mobilní komunikaci hrají důležitou roli. Následující sekce vycházejí právě ze zmíněného metodického pokynu [39].

■ 6.2.1 Měření parametrů pomocí protokolu TCP

Pro vyhodnocování datových parametrů mobilních sítí při použití protokolu TCP specifikoval ČTÚ tři základní parametry, které vypovídají o úrovni poskytovaného přístupu k internetu. Dva z nich se týkají rychlosti stahování dat informací, konkrétně TCP propustnost ve směru k uživateli (download) a TCP propustnost ve směru od uživatele (upload). Běžně se pro ně používají výrazy sestupná a vzestupná rychlost. Třetím parametrem je RTT (Round-trip Time), tedy zpoždění ve smyčce. RTT značí dobu, která je zapotřebí pro to, aby se odeslaná informace dostala do cíle a do původní destinace bylo posláno potvrzení o doručení. [39]

6.2.2 Měření parametrů pomocí protokolu UDP

Podobně jako u TCP je u UDP definována sestupná a vzestupná rychlost. Tentokrát se nazývají uplink a downlink a měří se na síťové vrstvě (TCP na transportní vrstvě). Dalším podobným parametrem je zpoždění paketu IPTD (IP packet transfer delay) představující dobu, která uplyne mezi odesláním a příjmem paketu. Oproti TCP jsou definovány tři nové parametry. První z nich se označuje IPDV (IP packet delay variation) a nazývá se kolísání zpoždění paketů. Běžně se používá název jitter a představuje časový rozdíl mezi očekávaným doručením paketu a reálným doručením paketu. U mobilních sítí jitter nejčastěji nabývá jednotek, desítek nebo stovek milisekund. Dalším kritériem měření je chybovost paketů značená jako IPER (IP packet error ratio). Tato veličina vyjadřuje poměr přenesených paketů, které obsahovaly chyby, k celkovému množství poslaných paketů. Tento poměr se poté nejčastěji převede na procenta. Poslední parametr se obvykle také vyjadřuje v procentech, protože se jedná o poměr paketů, které nebyly doručeny, k celkovému množství odeslaných paketů. Značí se jako IPLR (IP packet loss ratio). [39]

6.2.3 Rádiové parametry

Kromě SNR jsou používány další čtyři rádiové parametry, které dobře slouží k posouzení kvality připojení. První z nich se nazývá RSRP (Reference Signal Received Power) a vyjadřuje výkon zachyceného referenčního signálu, takže se nejčastěji používá jednotka dBm. [39]

RSRQ (Reference Signal Received Quality) je poměrová veličina, a proto je jednotkou dB. Konkrétně se jedná o poměr mezi výkonem nosné vlny a výkonovou úrovní rušení. Používá se pro měření kvality signálu. [40]

RSSI (Received Strength Signal Indicator) je podobný parametr jako RSRP. Liší se v tom, že již neměří výkon pouze zachyceného referenčního signálu, ale jakýkoliv zachycený signál včetně interference a šumu. RSSI je navíc měřeno přes celou šířku pásma. [41]

SINR (Signal to Interference & Noise Ratio) je opět poměrová veličina, podobná parametru SNR. Jedná o poměr výkonu signálu k součtu interference a šumu. [39]

V metodickém pokynu jsou předepsány pouze limitní hodnoty parametrů RSRP a SINR pro všechna používaná kmitočtová pásma. Hodnoty RSRP jsou přesně stanoveny pro neobydlené území, obydlené území, silniční koridory a železniční koridory. [39]

■ 6.2.4 Iperf3

Iperf3 je první ze dvou měřicích nástrojů (testů), které jsou součástí metodického pokynu ČTÚ. Jedná se open-source nástroj (režim klient/server), který dokáže měřit většinu datových parametrů pro protokoly TCP i UDP. U protokolu TCP je možné změnit velikost segmentu i hodnotu TCP okna. Pro UDP platí, že klient může vytvořit datový tok o jednoznačně specifikované přenosové rychlosti. Lze také měřit parametry IPLR a IPTD. [39]

■ 6.2.5 FlowPing

Měřicí prostředek FlowPing pracuje pouze s protokolem UDP a je podobný testu Ping, který využívá protokol ICMP (Internet Control Message Protocol). Oproti nástroji Iperf3 je FlowPing flexibilnější, protože umožňuje generovat datové toky o proměnné přenosové rychlosti. Opět je možné měřit datové parametry, které jsou definované pro protokol UDP. [39]

Kapitola 7

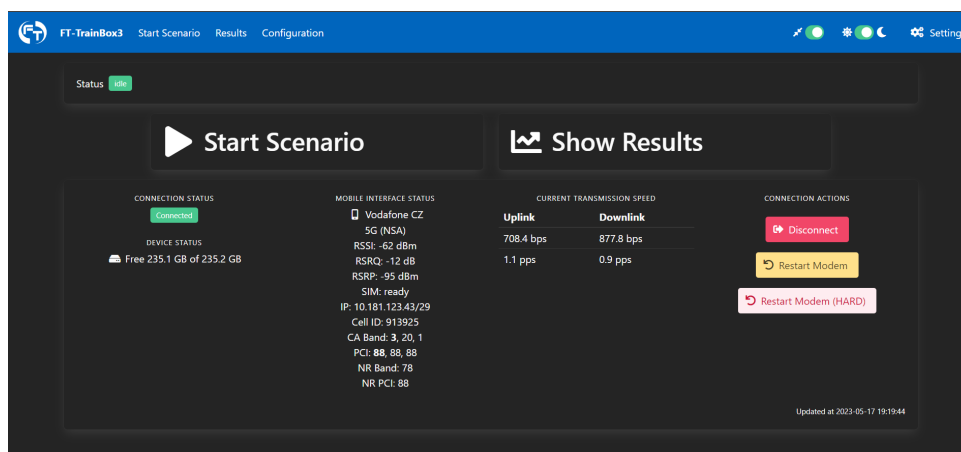
Praktická část

7.1 Měřicí zařízení F-Tester

F-Tester je přístroj, který byl vyvinut na ČVUT FEL. Způsobů, jak otestovat komunikaci v rámci sítě, je opravdu mnoho a obecně se dělí podle toho, na jaké vrstvě síťového modelu je síť testována (například ISO/OSI a TCP/IP). F-Tester měří pouze na transportní vrstvě, a proto se využívá protokolů TCP a UDP. Navíc je transportní vrstva blízko aplikační, a tudíž je F-Tester schopen dobře simulovat skutečný pohled uživatele na síť. F-Tester umí měřit většinu parametrů zmíněných v kapitole 6. Pro všechna měření byla použita varianta F-Tester 5G, ale existují i složitější verze jako F-Tester 4drive-box. Ta dokáže měřit parametry mobilní sítě až tří operátorů současně a testovat bezdrátové sítě Wi-Fi. [16]

7.1.1 Webové rozhraní

Všechna nastavení, která se týkají zařízení F-Tester, probíhají ve webovém rozhraní. To využívá protokol HTTP (Hypertext Transfer Protocol), a proto jde k přístupu použít webový prohlížeč. Je ale potřeba připojit se k zařízení F-Tester pomocí ethernet kabelu a na zařízení, přes které je F-Tester ovládán (např. PC), nastavit statickou IP adresu. Ta musí patřit do přesně definovaného rozsahu daného zařízení F-Tester. Toto webové rozhraní je zobrazeno na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1: Webové rozhraní zařízení F-Tester

7.1.2 Testy a scénáře

Jedna z nejdůležitějších částí ve webovém rozhraní je nastavení testů, které byly představeny v sekcích 6.2.4 a 6.2.5. Z vytvořených testů pak lze poskládat scénáře, a to libovolně v čase. Testy mohou být spuštěny samostatně za sebou, ve stejném čase nebo s částečným překryvem. Pro samotné scénáře platí toto nastavení analogicky. Po vhodném sestavení testů a scénářů je vytvořena požadovaná zátěž pro síť, čímž je spolehlivě otestována. Nastavení scénářů a testů je zobrazeno na obrázku 7.2.

Scenarios				Tests		
Name	Duration	Actions	Name	Type	Duration	Actions
Train-min120s	120	Execute Edit Remove Export	TCPdW256B*6	Iperf3 TCP	60	Edit Remove
Train-medium120s	120	Execute Edit Remove Export	TCPup256B*6	Iperf3 TCP	60	Edit Remove
Train-max120s	120	Execute Edit Remove Export	FP2M	FlowPing	60	Edit Remove
Short mix	30	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(D) 100s 4x128kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
FT 300s	300	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(D) 100s 4x256kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
Stacionární UDP test (FlowPing)	985	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(D) 100s 4x512kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
Stacionární TCP test	985	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(U) 100s 4x128kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
GPS test	3600	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(U) 100s 4x256kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
180	100	Execute Edit Remove Export	Iperf3TCP(U) 100s 4x512kB Cubic 1400B	Iperf3 TCP	100	Edit Remove
10x 1024 kB Iperf3 test (D)	100	Execute Edit Remove Export	Iperf3 UDP (D) 310s 5 Mbit/s	Iperf3 UDP	310	Edit Remove
FlowPing (D) 90/20	325	Execute Edit Remove Export	Iperf3 UDP (U) 310s 2 Mbit/s	Iperf3 UDP	310	Edit Remove
FlowPing drive	2000	Execute Edit Remove Export	FlowPing (D) 100s 90 Mbit/s 1400B	FlowPing	100	Edit Remove

Obrázek 7.2: Nastavení scénářů a testů ve webovém rozhraní

■ 7.1.3 Zobrazení výsledků

F-Tester naměřená data sám zpracuje a uloží na SSD (solid-state drive). F-Tester vytvoří shrnutí hlavních výsledků, které obsahuje naměřená data v tabulkách a vykreslené grafy s popisky. Toto shrnutí je možné zobrazit přímo ve webovém rozhraní nebo ve vygenerovaném souboru PDF (Portable Document Format). Souhrn výsledků obsahuje pouze základní informace o parametrech vysvětlených v kapitole 6. Pro podrobnější náhled umí F-Tester vygenerovat soubor typu JSON (JavaScript Object Notation) i CSV (comma-separated values). V těchto souborech jsou také obsažena naměřená data, která jsou součástí shrnutí. Oproti souboru typu PDF však obsahují nové informace o měření. Mezi ně patří například rádiové parametry (sekce 6.2.3), typ modulace v obou směrech, typ pásma (tedy i hodnota frekvence) a šířku pásma přijímaného signálu.

■ 7.1.4 Mobilní verze pro měření technologie LTE a 5G

Aby bylo možné měřit parametry technologie LTE a 5G v jakémkoliv geografické poloze, muselo být zařízení F-Tester zapojeno do mobilní verze, čímž se zabýval autor [17]. K zařízení F-Tester přidal například baterii, aby celá sestava byla přenosná, a nano router TP-Link TL-WR802N. Důležité pak bylo nastavení statické adresy z rozsahu zařízení F-Tester a povolení DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) serveru pro koncová zařízení. [17] Do webového rozhraní se pak lze připojit pomocí mobilního telefonu přes Wi-Fi. Finální měřicí sestava je zobrazena na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Měřicí sestava použitá pro měření technologie LTE a 5G

V rámci této bakalářské práce bylo toto zapojení použito pro všechna měření technologie LTE a 5G. Měřicí sestava byla vložena do batohu, takže se s ní dalo pohodlně pohybovat. Pro měření v sekcích [7.2.1](#) a [7.2.2](#) byla použita SIM (subscriber identity module) karta od operátora O2.

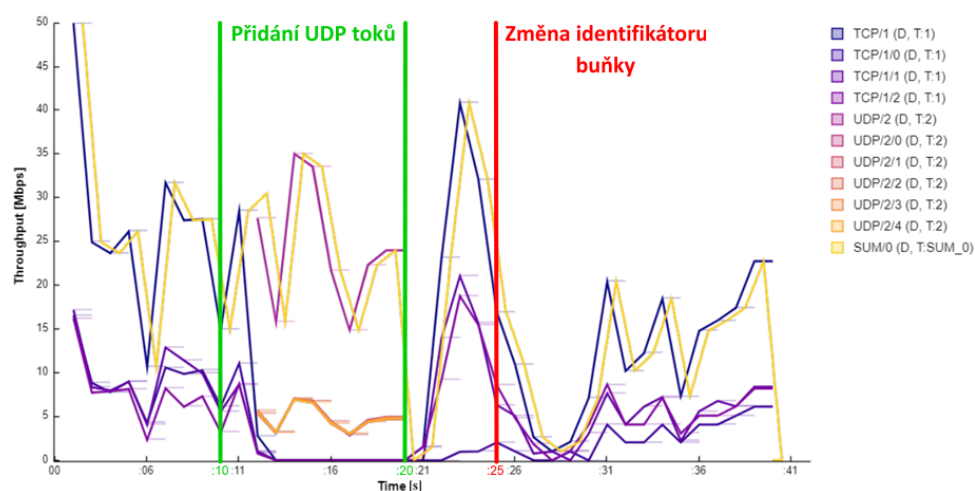
7.2 Základní ověřování chování sítě

Tato část byla zaměřena na ověření měřících postupů a identifikaci vybraných situací v mobilní síti. Současně si klade za cíl představit základní funkce zařízení F-Tester. Zatímco první testování proběhlo v hustě osídlené lokalitě za jízdy, druhé měření se uskutečnilo v řídké osídlené lokalitě v podobě walk testu. Tím bylo umožněno zkoumat chování mobilní sítě v různých prostředích s ohledem na rozdílnou zatíženost sítě.

7.2.1 Měření sítě operátora O2 v MHD

Jedno ze samotných měření probíhalo (pomocí testu Iperf3) v pražské tramvaji po dobu 40 sekund, kdy tramvaj jela ze zastávky Bertramka do zastávky U Zvonu. Naměřená propustnost technologie LTE ve směru downlink je zobrazena na obrázku 7.4. Tento graf i ostatní naměřená data jsou obsaženy v příloze C. Bylo nastaveno, aby po celou dobu scénáře (40 sekund) byly aktivní 3 toky TCP. Tyto toky měly stejné vlastnosti, a to výchozí velikost okna 128 kB s algoritmem cubic a velikost paketu 1400 B.

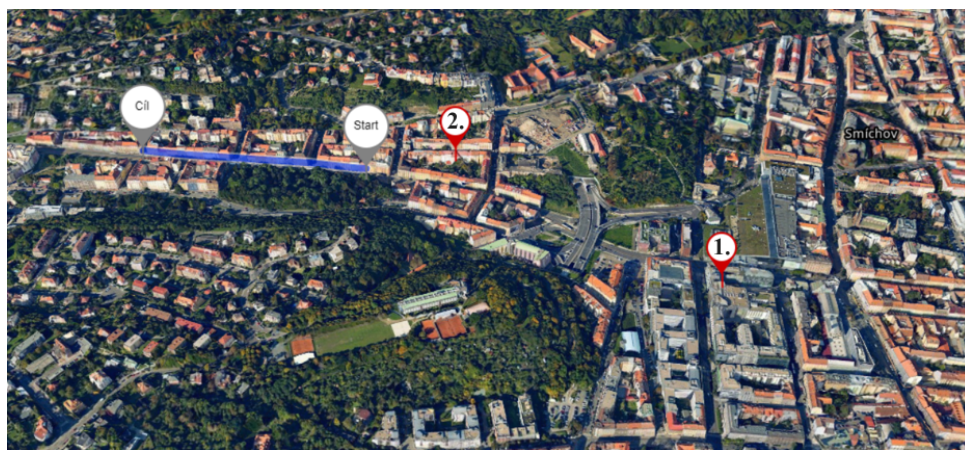
Po 10 sekundách scénáře bylo spuštěno 5 toků UDP, každý o velikosti přenosové rychlosti 20 Mbit/s a velikosti paketu 1400 B. Tyto toky byly nastaveny tak, aby trvaly pouze po dobu 10 sekund. Z obrázku 7.4 lze vyčíst, že po spuštění 5 toků UDP poznaly 3 datové toky TCP, že se kapacita sítě značně snížila, a proto klesly téměř k 0 Mbit/s. Toto chování plyne přímo z vlastností protokolu TCP. Kdyby však kapacita sítě nebyla tak malá, tak by teoreticky měla celková přenosová rychlost toků UDP dosahovat 100 Mbit/s a zbytek kapacity by měly vyplnit toky TCP.



Obrázek 7.4: Naměřená propustnost v tramvaji

Stejně výsledky lze vyčíst i z ostatních naměřených dat. Po spuštění datových toků protokolu UDP se velikost RTT přiblížila téměř k 1 sekundě, což už je vysoké zpoždění. Velikost okna naopak výrazně klesla oproti výchozí hodnotě 128 kB, dokonce pod 10 kB. Protože suma toků UDP dosahovala znatelně menších rychlostí, je zřejmé, že PLR se pohybovalo okolo 75 %. Po nahlédnutí do souboru typu CSV, který obsahuje podrobná data, lze poznat, že po celou dobu scénáře bylo použito 2x2 MIMO. Pro přenos byla použita 3 různá LTE pásma. První z nich bylo pásmo 28 (frekvence 700 MHz) o šířce pásma 10 MHz, druhé bylo pásmo 1 (frekvence 2100 MHz) o šířce pásma 20 MHz a třetí bylo pásmo 3 (frekvence 1800 MHz) o šířce pásma 15 MHz. Je tedy zřejmé, že přestože jsou rádiové prostředky dostatečné, přenosová rychlost je relativně nízká a značně kolísající v důsledku značného zatížení sítě množstvím terminálů v hustě obydlené oblasti a zaplněném dopravním prostředí.

Na obrázku 7.4 je také zajímavé chování sítě okolo 27. sekundy. Zde došlo k významnému poklesu přenosové rychlosti všech toků TCP. Součástí souboru typu CSV je identifikátor buňky (`net_cell_id`), ke které bylo zařízení F-Tester připojeno. Tento identifikátor se ve 25. sekundě změnil, což znamená, že došlo k přechodu mezi dvěma buňkami. Ideální přechod mezi buňkami by však takto vypadat neměl, protože hodnoty propustnosti klesly téměř k 0 Mbit/s a hodnoty RTT vzrostly až k 600 ms.



Obrázek 7.5: Polohy základnových stanic a trasa tramvaje [19]

Pomocí identifikátorů buněk (v souboru typu CSV) byla možná lokalizace základnových stanic. K tomu byl použit webový zdroj [18], na kterém lze najít většinu informací o základnových stanicích. Všechny důležité polohy jsou zobrazeny na obrázku 7.5, který byl vytvořen pomocí webu [19]. Dvě polohy značí start a cíl měření, další dvě představují pozici první a druhé základnové

stanice. Nutno podotknout, že rozhodnutí o předání terminálu jiné základnové stanici je složitý proces závislý na mnoha parametrech, zejména v městské zástavbě a složitější terénní konfiguraci. Vedle signálových poměrů rozhoduje i obsazení kapacity základnové stanice (v případě přetížení požadavky terminálů předává komunikaci jiným stanicím v okolí).

7.2.2 Walk test v blízkosti menšího města

Další měření se uskutečnilo v Královéhradeckém kraji, konkrétně ve městě Červený Kostelec. Narozdíl od předchozí situace se jedná o místo s nízkou hustotou terminálů a nízkým očekávaným konkurenčním provozem. Pro testování byl použit podobný scénář jako v předchozím měření (sekce 7.2.1). Jedinou změnou bylo, že od 30. sekundy byl přidán jeden tok UDP pomocí testu FlowPing. Tok UDP byl aktivní pouze po dobu 10 sekund a měl velikost přenosové rychlosti 200 Mbit/s. Zatímco v předchozím měření bylo využito pásmo 28 (frekvence 700 MHz), v tomto měření je místo něho pásmo 20 (frekvence 800 MHz) o šířce pásma 10 MHz. Zbývající dvě pásma jsou stejná jako v sekci 7.2.1 (i jejich šířky pásma). Poloha základnové stanice byla opět zjištěna pomocí [18] a vyznačena v obrázku 7.6 i s trasou walk testu.

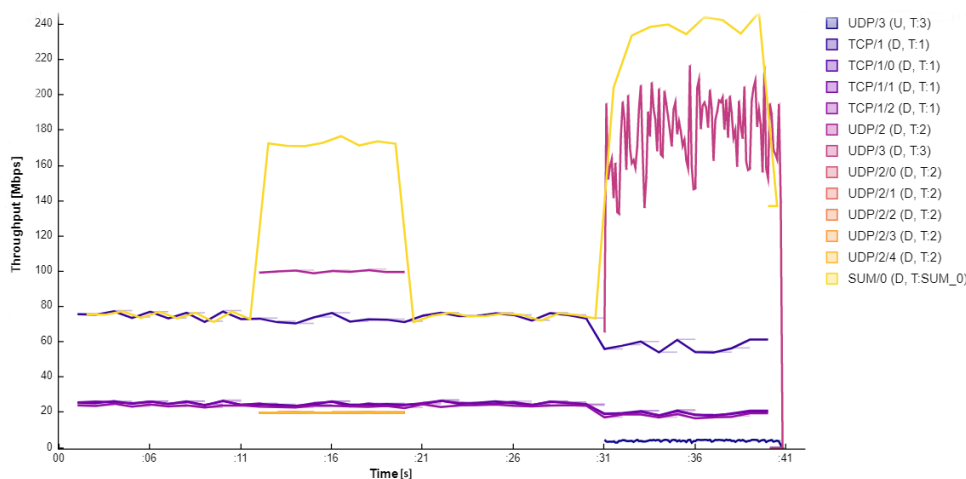


Obrázek 7.6: Polohy základnové stanice a trasa walk testu [19]

Je možné předpokládat, že buňka v menším městě bude zatížena méně než v Praze. S největší pravděpodobností zde hrála roli poloha základnové stanice a měřicího zařízení F-Tester. V tomto měření byla základnová stanice umístěna na vysokém komíně, od kterého trasa walk testu nebyla daleko, a navíc zde byla téměř přímá viditelnost. Přesný opak platí pro měření zobrazeném na obrázku 7.5. V Praze byla hustá zástavba a nepochybně tam muselo docházet k mnoha odrazům, což ovlivnilo například parametr RSRP.

V měření v sekci 7.2.1 se jeho celkové hodnoty pohybovaly kolem -90 dBm, a u pásma 1 (frekvence 2100 MHz) dokonce klesly až k -105 dBm. V tomto měření nabýval parametr RSRP vyšších hodnot, a to v rozmezí -75 dBm až -80 dBm.

Lepší podmínky potvrzují i naměřená data. Propustnost je zobrazena na obrázku 7.7, ze kterého je zřejmé, že propustnost byla vyšší. Síť neměla problém od 10. sekundy přenášet data 5 toků UDP (každý o rychlosti 20 Mbit/s) a zároveň poskytnout přenos dat pro 3 toky TCP. Náročnější tok UDP, který byl spuštěn od 30. sekundy, již nebyl tak stabilní, ale stále téměř dosahoval požadované přenosové rychlosti 200 Mbit/s. Hodnota RTT nepřesáhla po celou dobu scénáře 70 ms a retransmise i jitter jsou zanedbatelné.



Obrázek 7.7: Naměřená propustnost při walk testu

Co však na tomto měření stojí za pozornost, je samotné chování toků TCP a UDP. V době, kdy byly aktivní pouze 3 toky TCP se zdá, že tyto toky TCP již plně vyplnily kapacitu sítě. To by totiž plynulo přímo ze základních vlastností protokolu TCP. Po spuštění 5 toků UDP ale překvapivě nedošlo ke zmenšení okna 3 toků TCP, a tedy ani ke značnému poklesu přenosové rychlosti. Naopak toky UDP odhalily, že veškerá kapacita sítě ještě nebyla vyčerpána. Na první pohled to vypadalo, že lze dosáhnout maximální přenosové rychlosti okolo 75 Mbit/s. Celkové hodnoty toků TCP i UDP však v prvním případě dosahovaly 175 Mbit/s, a v druhém případě dokonce 240 Mbit/s. Vše naznačuje, že u TCP toků velice záleží na konkrétním nastavení parametrů. V tomto případě byla nepřesná maximální rychlost způsobena nedostatečným počtem paralelních toků a malou velikostí okna.

7.3 Shrnutí dílčích výsledků

V sekcích 7.2.1 a 7.2.2 byly představeny základní funkce zařízení F-Tester a jejich použití při samotném měření technologie LTE. Mezi těmito měřeními jsou patrné rozdíly, které poukazují na to, jak se podmínky při měřeních mobilních sítí mohou lišit. V tomto případě to nejsou pouze vlastnosti měřené lokality, které jsou jiné, ale dokonce i celý účel daného měření. Zatímco sekce 7.2.1 je zaměřena na měření kvality připojení za jízdy, cílem sekce 7.2.2 je odhalit způsob přidělování kapacity sítě koncovým zařízením. Obě měření slouží pouze jako demonstrace dynamiky chování mobilní sítě za různých podmínek a k ladění metodiky měření. Aby bylo měření objektivní, mělo by se aspoň do určité míry řídit pravidly. O sjednocení měřících postupů se snaží i ČTÚ pomocí dokumentů [39] a [42]. I když jsou tyto metodiky určené především pro technologii LTE, je rozumné se jimi inspirovat i při měření technologie 5G. Obecně však platí, že pravidla pro měření 5G sítí nejsou ještě pevně definována. Další měření byla koncipována systematicky pro ověření metodiky pro typické scénáře v mobilní síti.

7.4 Stacionární měření sítě operátora Vodafone

V tomto měření byla použita SIM karta od operátora Vodafone, která je kompatibilní s 5G. Měření byla realizována na dvou geografických lokalitách s cílem ověřit funkčnost a kvalitu datového přenosu. V tomto případě dochází k zásadnímu rozdílu v porovnání s předchozími měřeními, neboť bylo nutné projít určitým rozhodovacím procesem, který minimalizuje zkreslení výsledků.

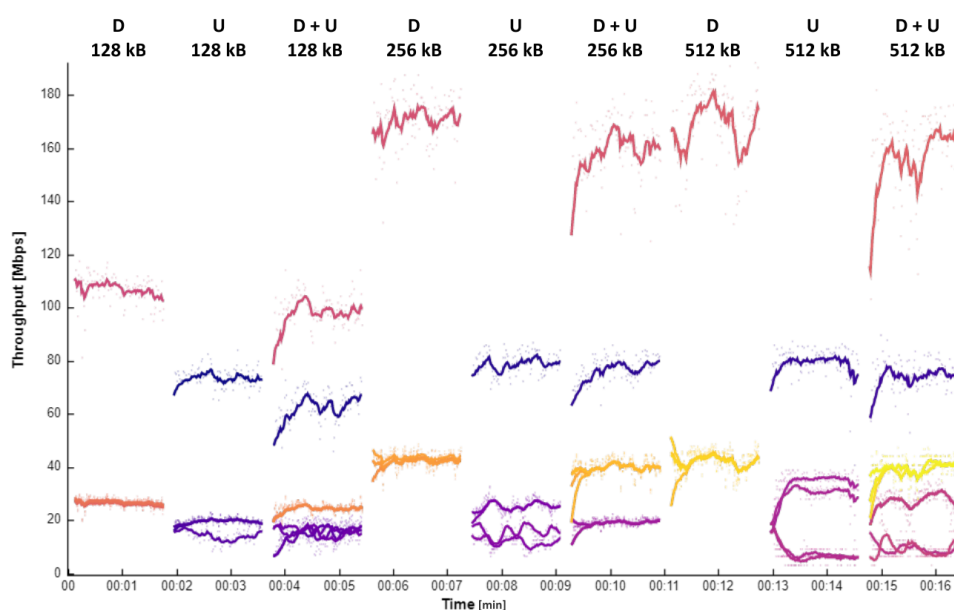
7.4.1 Stacionární měření sítě v malém městě

První měření probíhalo přímo z domu v Červeném Kostelci. Testování probíhalo stacionárně, což znamená, že se sestavou nebylo manipulováno během měření. Na základě toho byly navrženy dva dlouhotrvající scénáře, které se hodí pro tento typ testování sítě. Jeden z nich byl založen na testu Iperf3, který používal pouze protokol TCP. Celý scénář se skládal z devíti úseků, kdy každý z nich trval 100 sekund. Mezi nimi byly vloženy intervaly o délce 10 sekund, aby se úseky navzájem neovlivňovaly. Všechny úseky používají čtyři paralelní datové toky a každá trojice úseků má různou výchozí velikost okna (128 kB, 256 kB a 512 kB). U každé velikosti okna je vždy měřena sestupná rychlost, poté vzestupná rychlost a nakonec obě rychlosti dohromady. Tento scénář byl spouštěn v různých časech během dne, aby bylo možné získat co nejvíce

dat. Hlavním cílem tohoto scénáře bylo zjistit, jaké jsou aktuální maximální rychlosti mobilní sítě (dané základnové stanice). Všechna naměřená data jsou obsažena v příloze C. Vzhledem k tomu, že jsou si naměřená data ze scénářů v různých časech během dne velmi podobná, lze z nich spolehlivě získat mnoho informací. Vzestupná rychlost pro všechna velikosti okna byla téměř stejná, pouze večer mírně klesla. Průměrně však přes den dosahovala hodnoty 68,5 Mbit/s. Nastavení velikosti okna mělo však zásadní vliv na sestupnou rychlost. Maximální dosažené sestupné rychlosti během dne jsou uvedeny v tabulce 7.1. Z těchto hodnot plyne, že velikost okna 128 kB nedokázala plně využít dostupnou kapacitu sítě a že mezi velikostmi okna 256 kB a 512 kB už nejsou takové rozdíly v přenosové rychlosti. Příklad závislosti propustnosti na čase je zobrazen na obrázku 7.8. Do obrázku 7.8 byly doplněny směry datových toků (zkratky D, U a D + U) a výchozí velikosti oken.

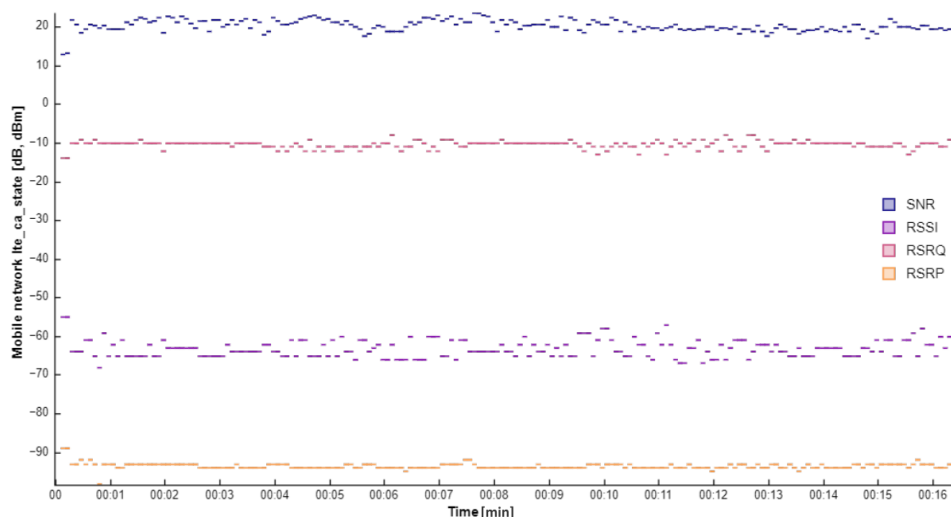
Část dne	Výchozí velikost okna	Maximální sestupná rychlost
Dopoledne	128 kB	117 Mbit/s
	256 kB	192 Mbit/s
	512 kB	196 Mbit/s
Odpoledne	128 kB	117 Mbit/s
	256 kB	188 Mbit/s
	512 kB	193 Mbit/s
Večer	128 kB	123 Mbit/s
	256 kB	187 Mbit/s
	512 kB	199 Mbit/s

Tabulka 7.1: Nejvyšší sestupné rychlosti v závislosti na velikosti okna



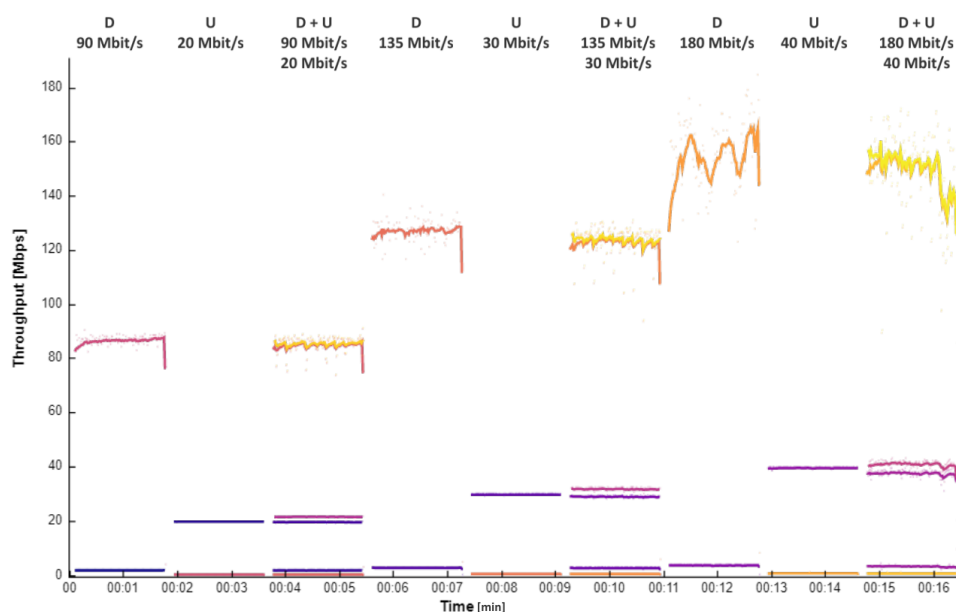
Obrázek 7.8: Závislost propustnosti na čase (odpoledne)

Dále lze pozorovat, že pokud byly v jednom úseku aktivní vzestupné i sestupné datové toky, tak se to většinou projevilo mírným snížením vzestupné i sestupné rychlosti. Výskyt retransmisí byl minimální. To, že se jednalo o stacionární měření, lze dobře poznat z rádiových parametrů, protože jsou téměř konstantní. Jejich průběh, který lze vybrat z libovolného měření, je zobrazen na obrázku 7.9. Z toho plyne, že kolísání sítě nebylo dáno změnou podmínek za pohybu, ale kolísáním zatížení sítě.



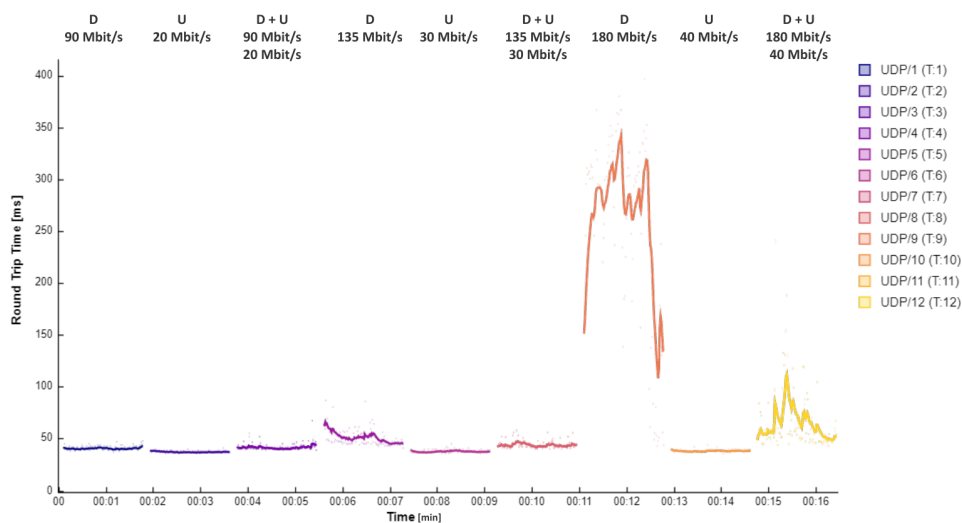
Obrázek 7.9: Hodnoty rádiových parametrů při měření

Aby bylo provedeno testování sítě i na úrovni protokolu UDP, byl navržen druhý scénář využívající test FlowPing. Tento scénář probíhal ihned před provedením, nebo po dokončení Iperf3 TCP scénáře. Struktura scénáře byla velice podobná předchozímu. U UDP však neexistuje velikost okna, a proto tentokrát docházelo ke změně velikosti konstantní přenosové rychlosti. Ta byla zvolena na základě zdroje [43], ve kterém Vodafone uvádí inzerované rychlosti pro jednotlivá pásma. Většina běžných zařízení ale používá více frekvenčních pásem najednou, a proto byla jako reference zvolena inzerovaná rychlost LTE-A (180 Mbit/s pro downlink a 40 Mbit/s pro uplink), protože také používá agregaci pásem. Konstantní datové toky byly nastaveny tak, aby nabývaly 50 %, 75 % a 100 % inzerované rychlosti. Naměřená propustnost je zobrazena na obrázku 7.10. Pro přehlednost byly do obrázku 7.10 doplněny směry datových toků (zkratky D, U a D + U) a rychlosti, jež byly pro daný úsek nastaveny. Tento scénář potvrdil dosavadní výsledky. I přestože občas došlo ke zvýšení RTT⁵ (obrázek 7.11), tak bylo možné dosáhnout předem stanovených rychlostí v obou směrech, a to při zanedbatelných hodnotách ztrátovosti paketů.



Obrázek 7.10: Průběh propustnosti při použití UDP scénáře (odpoledne)

⁵I když je pro protokol UDP definován parametr IPTD, většinou se jedná právě o RTT (kvůli využití synchronizace). [39]



Obrázek 7.11: Průběh RTT při použití UDP scénáře (odpoledne)

7.4.2 Stacionární měření sítě v hustě osídlené lokalitě

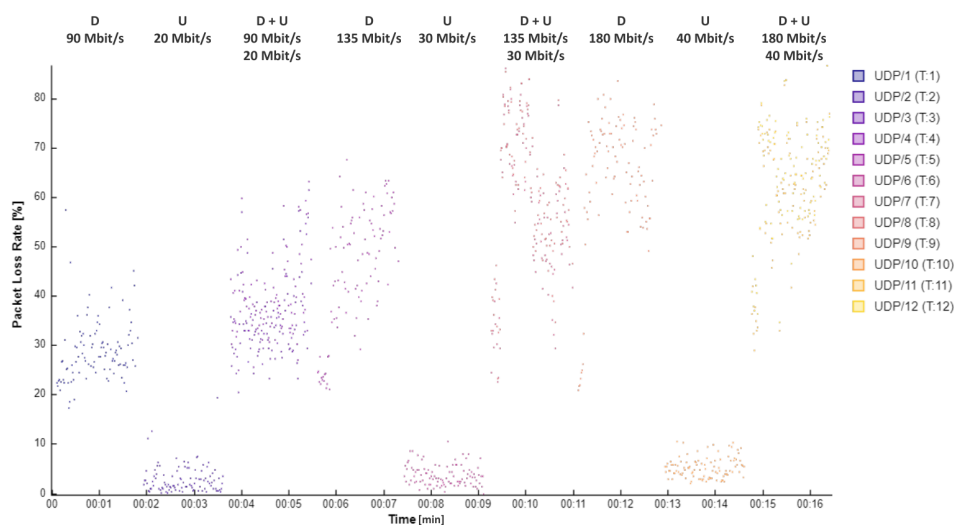
Další měření probíhalo v Praze v panelovém domě, který se nachází na sídlišti Řepy. Testování bylo provedeno identicky jako v sekci 7.4.1. Upload při scénáři Iperf3 dosahoval vysokých hodnot, za den průměrně 55 Mbit/s. Takové výsledky podporují tvrzení, že veřejné sítě jsou ve směru od uživatele méně zatížené. Maximální sestupné rychlosti během dne byly tentokrát mnohem nižší, což je patrné z tabulky 7.2. Nejvyšší sestupné rychlosti při komunikaci v obou směrech najednou bylo dosaženo dopoledne a odpoledne, a to hodnoty 14,3 Mbit/s.

I ve scénáři využívající protokol UDP byly pro sestupnou rychlost zaznamenány horší výsledky než v sekci 7.4.1. To lze vyčíst z průběhu ztrátovosti paketů, který je zobrazen na obrázku 7.12. Je možné pozorovat, že ztrátovost paketů dosahovala vysokých hodnot pro obousměrný a sestupný směr. Z naměřených dat obou scénářů lze zjistit, že večer se situace zhoršila, protože síť byla pravděpodobně více zatížena. Z tohoto důvodu bylo večer ve scénáři UDP testováno pouze 50 % inzerované rychlosti. Díky tomu nedocházelo ke zbytečnému zahlcení sítě. Zajímavé je porovnání TCP scénáře a UDP scénáře ve stejných částech dne. Například ráno nabývala sestupná rychlost při UDP scénáři průměrně 68 Mbit/s. Maximální sestupná rychlost pro TCP scénář ale ve stejnou dobu nepřesahovala hodnotu 36,5 Mbit/s. Na první pohled by se mohlo zdát, že pro TCP scénář bylo použito málo paralelních toků a nedostatečná velikost okna. To ale není pravda, protože ze sekce 7.4.1 je zřejmé, že při tomto nastavení bylo možné dosáhnout rychlosti téměř 200 Mbit/s.

V tomto měření navíc při zvýšení velikosti okna nedochází k výraznému navýšení maximální sestupné rychlosti, protože velikost okna automaticky klesla na velice nízkou hodnotu. Lze tedy s jistotou říci, že v tomto měření bylo možné dosáhnout vyšších maximálních rychlostí pomocí datových toků, které používaly protokol UDP.

Část dne	Výchozí velikost okna	Maximální sestupná rychlost
Dopoledne	128 kB	32,7 Mbit/s
	256 kB	36,5 Mbit/s
	512 kB	34,4 Mbit/s
Odpoledne	128 kB	30,7 Mbit/s
	256 kB	28,7 Mbit/s
	512 kB	31,3 Mbit/s
Večer	128 kB	20,4 Mbit/s
	256 kB	16,2 Mbit/s
	512 kB	18,8 Mbit/s

Tabulka 7.2: Nejvyšší sestupné rychlosti naměřené v panelovém domě

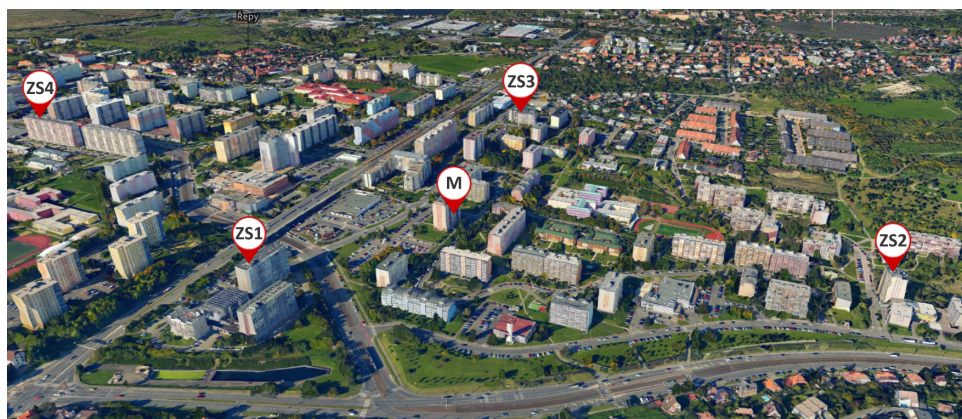


Obrázek 7.12: Naměřená ztrátovost paketů (odpoledne)

7.4.3 Porovnání výsledků obou měření

Vyšších rychlostí bylo dosaženo v prvním měření z několika důvodů. Prvním z nich byla zatíženost sítě. Je pravděpodobné, že mobilní síť v hustě osídlené lokalitě, jako je sídliště, bude v sestupném směru více vytížená než v malém městě. Je také nutno podotknout, že měření na sídlišti probíhalo ve státní svátek, takže dopoledne a odpoledne mohlo být připojeno mnohem více uživatelů než během pracovního dne. Dalším faktorem byla dostupná frekvenční pásma. Při měření v Řepích využívala technologie 5G frekvenci 2100 MHz a do toho bylo agregováno LTE pásmo o frekvenci 1800 MHz. V Červeném Kostelci bylo oproti tomu dostupné 5G pásmo n78 a k tomu tři LTE pásma o frekvencích 800 MHz, 1800 MHz a 2100 MHz. Dále se lišily podmínky pro šíření signálu, které byly určeny geografickou polohou. Z obrázku 7.9 plyne, že při měření v malém městě nabývalo SNR přibližně 20 dB, a to především kvůli přímé viditelnosti mezi anténou a základnovou stanicí. Díky vysoké hodnotě SNR mohla být téměř stále aktivní vysokorychlostní modulace 256QAM (v LTE pásmu 1800 MHz).

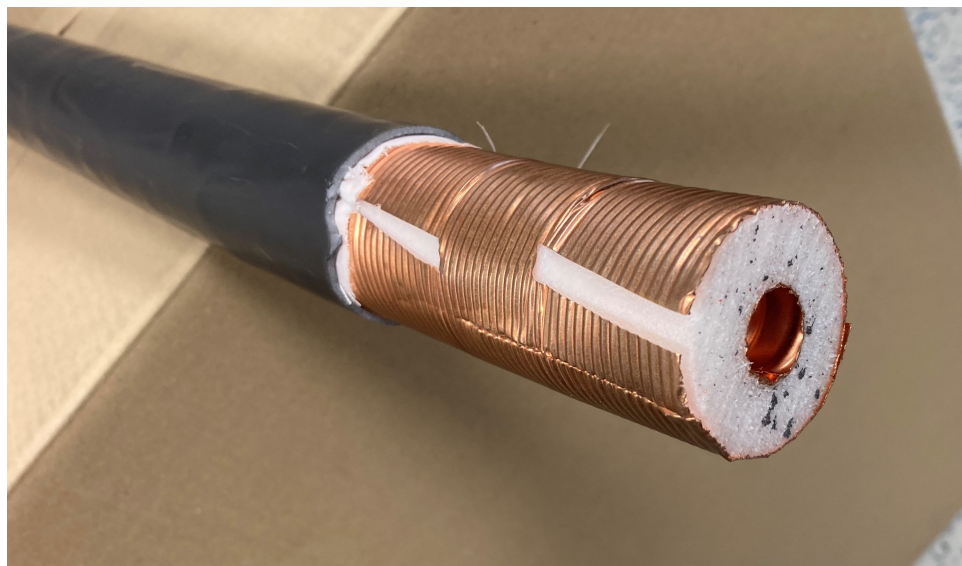
Na obrázku 7.13, který byl vytvořen pomocí [18] a [19], je zobrazeno místo měření (M) a čtyři základnové stanice (ZS1, ZS2, ZS3 a ZS4) v Řepích. Zpočátku se může zdát, že je dostupný dostatečný počet základnových stanic, takže s pokrytím nebude problém. F-Tester byl ale po celou dobu měření připojen pouze na základnovou stanicí číslo jedna (ZS1) a SNR se přibližně pohybovalo mezi 5 dB až 10 dB. Přepojením na ZS3 nebo ZS4 by ke zlepšení podmínek nedošlo, protože se nachází ještě dál. Podobně jako u ZS1 by zde nenastala přímá viditelnost mezi místem měření a základnovou stanicí. Přímá viditelnost by se zde nabízela při připojení na ZS2, jenomže místo měření se nacházelo v takové výšce, že přímý výhled na ZS2 byl kompletně zastíněn panelovým domem, který se nachází hned vedle místa měření. Výsledkem této unikátní pozice byly nižší hodnoty SNR, které měly vliv na přenosovou rychlost mobilní sítě.



Obrázek 7.13: Místo měření a pozice základnových stanic v Řepířích [18, 19]

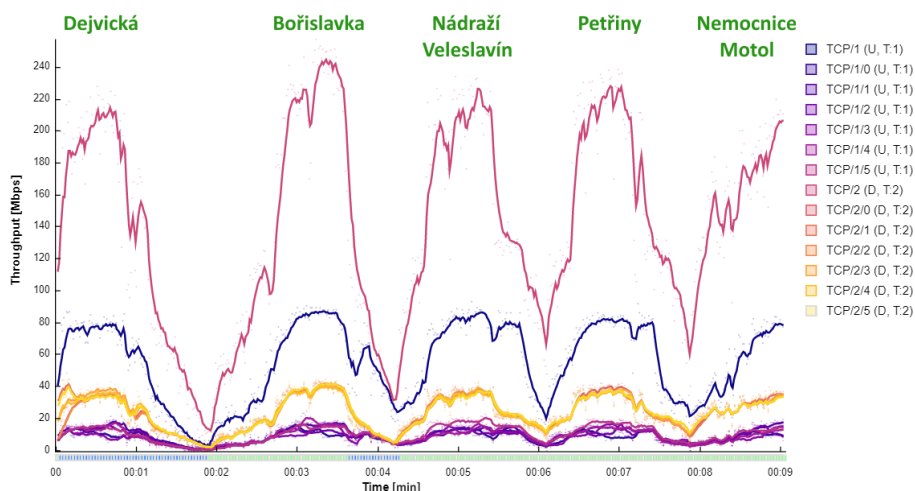
7.5 Měření propustnosti v metru

Jedno z měření probíhalo v pražském metru za účelem zjistit jakých propustností je možné dosáhnout. Testování probíhalo na úseku metra mezi stanicemi Nemocnice Motol a Dejvická na lince A (v obou směrech). Metro je specifická lokace, protože se sice jedná o měření za jízdy, ale prostory metra jsou dobře pokryty vyzařovacími kabely (obrázek 7.14). Navíc je třeba zdůraznit výjimečnost tohoto projektu, který představoval spolupráci všech tří předních mobilních operátorů (O2, Vodafone a T-Mobile).



Obrázek 7.14: Vyzařovací kabel používaný v metru

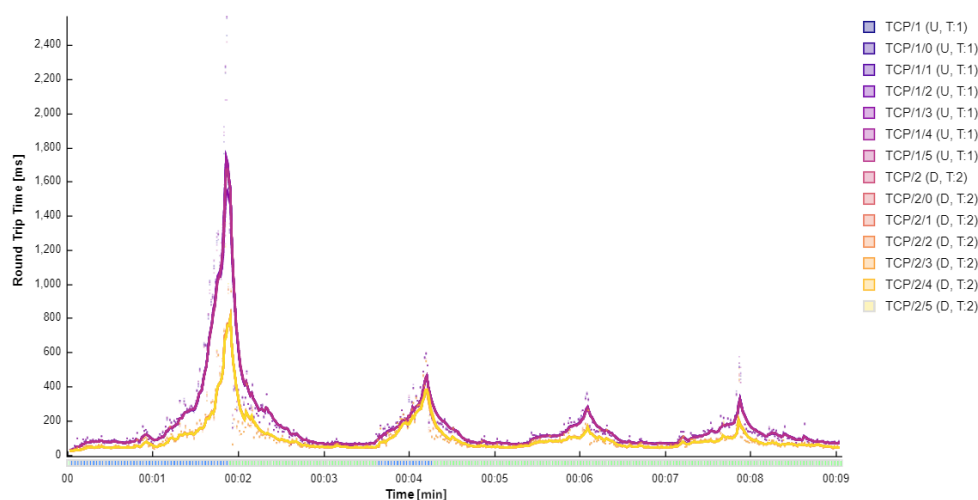
Test byl navržen tak, aby odpovídal očekávané vysoké propustnosti sítě. Zároveň se dalo předpokládat, že v některých místech přenosová rychlost klesne. I proto byl využit protokol TCP, který se v těchto místech přizpůsobil podle dostupné kapacity sítě. Konkrétně byl použit Iperf3 TCP scénář, při kterém bylo aktivních šest paralelních toků v sestupném i vzestupném směru. Jako výchozí velikost okna byla zvolena hodnota 256 kB. Na obrázku 7.15 je průběh naměřené propustnosti ve směru ze stanice Dejvická do stanice Nemocnice Motol.



Obrázek 7.15: Naměřená propustnost v metru (v jednom směru)

Z výsledku měření lze jednoznačně vyčíst, že metro bylo čtyřikrát v pohybu a objevilo se v pěti stanicích. Ve stanicích bylo možné dosáhnout sestupné rychlosti i nad 200 Mbit/s a vzestupné rychlosti okolo 80 Mbit/s. Pokaždé, když se metro dalo do pohybu, tak rychlosti v obou směrech začaly prudce klesat, protože se ve stejný moment snížily hodnoty téměř všech rádiových parametrů. Zatímco ve stanici nabývalo SNR stabilních 30 dB, při pohybu se hodnoty propadly i pod 10 dB.

U průběhu propustnosti je u časové osy ukazatel, který značí, jestli byla použita i technologie 5G (modrá), nebo pouze LTE (zelená). Je zřejmé, že i když bylo použito pouze LTE, tak bylo možné dosáhnout stejných rychlostí jako při použití 5G. Identické rychlosti byly zaznamenány i při měření v opačném směru, při kterém byla využita pouze technologie LTE. Těsně před čtvrtou minutou lze pozorovat, že došlo k přepojení z LTE na 5G. Při změně technologie se však F-Tester nepřipojil na novou buňku a nedošlo ani ke změně pásma. 5G i LTE stále používalo pásmo 1800 MHz, což potvrzuje použití technologie DSS. Mimo to bylo po většinu času aktivní LTE pásmo 800 MHz.



Obrázek 7.16: Průběh RTT v metru (v jednom směru)

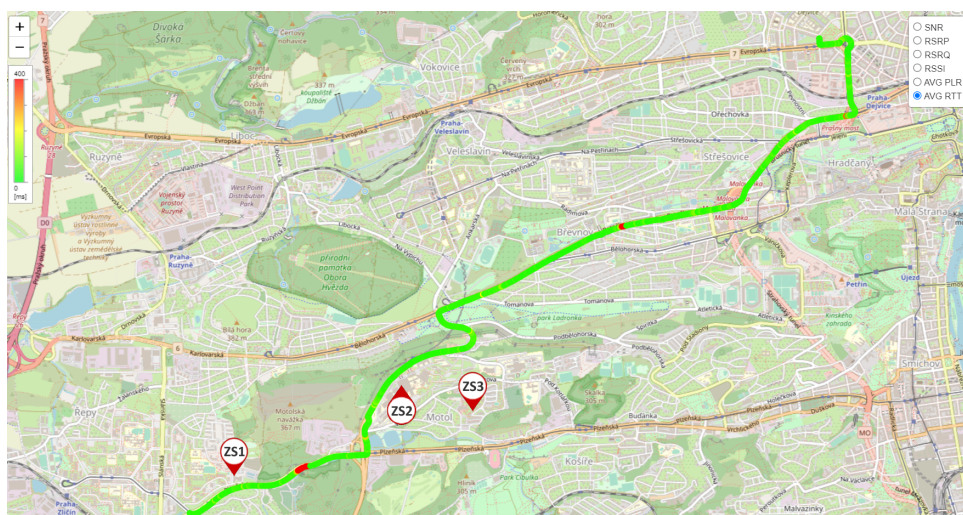
Průběh RTT (obrázek 7.16) pro toto měření potvrzuje dosavadní výsledky, neboť maxima RTT přesně kopírují minima propustnosti. V těchto místech docházelo k přechodům mezi mobilními buňkami. Tento fakt byl ověřen pomocí souborů, které obsahují detailní data o měření. Přechod kolem druhé minuty testu se ukázal jako nejvíce problémový, protože hodnoty RTT pro vzestupný i sestupný směr narostly o mnoho výrazněji než u ostatních přechodů. Mohlo by se zdát, že jde o náhodu, ale měření ve druhém směru tuto skutečnost potvrdilo. Konkrétně se jednalo o úsek mezi stanicemi Dejvická a Bořislavka, který je delší než ostatní části trasy. Z obrázku 7.16 to na první pohled vypadá, že vysoké hodnoty RTT mohly být způsobeny přepnutím z 5G na LTE. V dalším přechodu však také došlo k přepnutí z 5G na LTE a hodnoty RTT byly nižší. Navíc při měření ve druhém směru vzrostly hodnoty RTT úplně stejně, i když bylo použito pouze LTE.

Pokud se zaměříme na ostatní přechody, tak naměřená data naznačují, že buď proběhly bez větších problémů nebo se kvůli nim na krátkou dobu odpojilo LTE pásmo 800 MHz. Pásmo 1800 MHz mělo hladké přechody, a to buď v podobě 5G, nebo LTE. Problém přechodu mezi stanicemi Dejvická a Bořislavka spočíval v tom, že při něm na delší chvíli došlo k odpojení pásma 1800 MHz a lepší přechod mělo pásmo 800 MHz, které má oproti pásmu 1800 MHz poloviční šířku pásma. Tím pádem došlo k výraznému snížení propustnosti a nárůstu RTT.

7.6 Testování pokrytí sítě Vodafone při jízdě v MHD

Testování sítě bylo provedeno v autobuse v Praze mezi stanicemi Slánská a Dejvická. Toto měření může vypadat podobně jako v sekci 7.2.1, nicméně bylo provedeno s větší důkladností, což umožnilo získat podrobnější a spolehlivější výsledky. Tentokrát bylo měření provedeno v obou směrech a více se řídilo dostupnými metodikami. Jedním z doporučení bylo použití testu FlowPing. Pro účely testování byl zvolen symetrický datový tok s přenosovou rychlostí 7 Mbit/s. Tato rychlost byla zvolena z důvodu její stability a schopnosti umožnit uživatelům používat základní služby i v podmínkách s nižší kvalitou signálu. V kontrastu s předchozím měřením uvedeným v sekci 7.2.1, kde byly použity zbytečně vysoké rychlosti při měření za jízdy, byla tato rychlost volena s ohledem na realistické podmínky. V předchozím měření za jízdy bylo nastaveno i celkově 100 Mbit/s za použití protokolu UDP. Ze sekce 7.4.2 je však zřejmé, že při horších podmínkách je taková rychlost obtížně dosažitelná i při stacionárním měření.

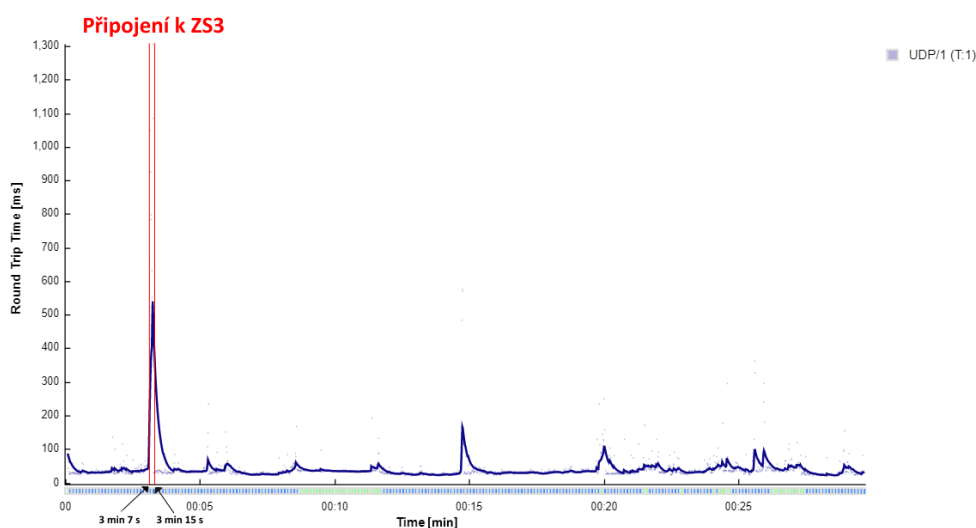
Další změnou bylo to, že v rámci tohoto měření byla využita funkce zařízení F-Tester, která umožňuje zaznamenávání zeměpisných souřadnic pomocí GPS (Global Positioning System). Díky nim je možné ve webovém rozhraní zobrazit trasu na mapě spolu s přesnými parametry měření. Trasa ze zastávky Slánská do zastávky Dejvická s průměrným RTT je zobrazena na obrázku 7.17. Do mapy byly manuálně přidány některé ze základnových stanic, ke kterým se F-Tester připojil během měření.



Obrázek 7.17: Průběh průměrného RTT v autobuse (v jednom směru)

Jedno z problémových míst se nacházelo téměř na začátku měření, konkrétně u zastávky Krematorium Motol, kde RTT narostlo více než v ostatních místech. Tomu se nelze divit, protože se jedná o úsek trasy, který se svou strukturou velice podobá údolí a nenachází se v něm základnová stanice. I z obrázku 7.17 se dá odhadnout, že v něm pravděpodobně docházelo k přechodu mezi základnovými stanicemi. Pokud se zaměříme na frekvenční pásma v celém měření, tak pro 5G bylo využito pouze pásmo 2100 MHz, které občas používalo technologii DSS. K němu se různě agregovala LTE pásma 800 MHz a 1800 MHz. Problém spočíval v tom, že na trase do zastávky Dejvická došlo po delší dobu k odpojení LTE pásma 800 MHz. Tentokrát však ze specifického důvodu.

Před průjezdem tímto úsekem bylo zařízení F-Tester stabilně připojeno k ZS1. Ve chvíli, kdy mělo dojít k přechodu mezi základnovými stanicemi, došlo na krátkou dobu k připojení k ZS3, která nedisponuje LTE pásmem 800 MHz. Hned poté se F-Tester připojil ke stabilnější ZS2, která již LTE pásmo 800 MHz používá. Tento přechod je vyznačen v klasickém průběhu RTT (obrázek 7.18). Po opuštění údolí vedla trasa kolem ZS2 a ZS3, takže se k nim zařízení F-Tester střídavě připojovalo. Tentokrát se jednalo o hladké přechody s nižším RTT, jelikož obě základnové stanice byly v těsné blízkosti trasy.

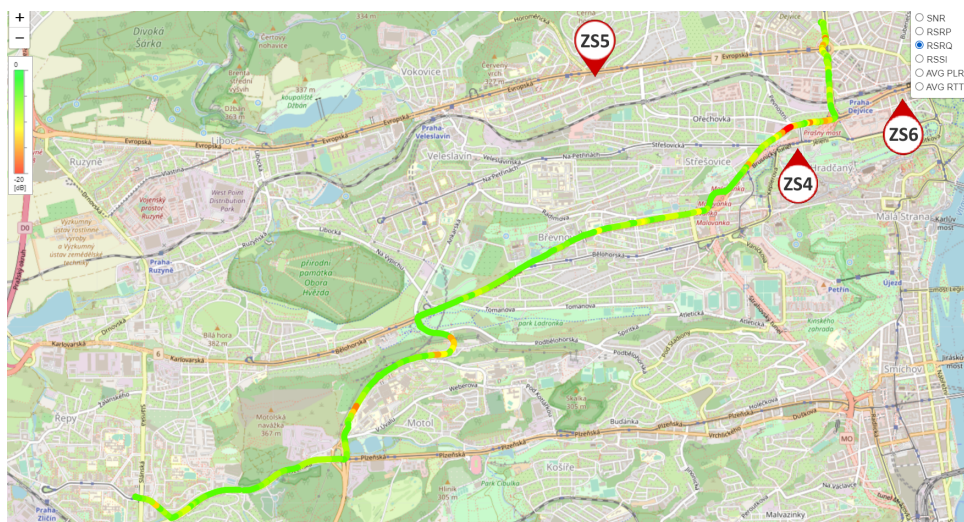


Obrázek 7.18: Průběh RTT v autobuse (v jednom směru)

Pozoruhodné bylo, že cestou zpět v tomto údolí RTT nenarostlo tolik jako cestou do zastávky Dejvická, což potvrzuje důležitost provádění měření v obou směrech. Z nasbíraných dat lze zjistit, že na trase ze zastávky Dejvická do zastávky Slánská došlo k přímému přepojení ze ZS2 na ZS1. Z dosavadních poznatků je tedy patrné, že krátkodobé připojení na vzdálenou ZS3 způsobilo vysoký nárůst RTT. V porovnání s měřením v metru, kde je zařízení omezeno na výběr z pouze dvou základnových stanic při přechodu, může být v tomto případě přechod ovlivněn i jinými základnovými stanicemi s horšími podmínkami, což představuje další problém při přechodu mezi buňkami.

7.6.1 Další přechod mezi základnovými stanicemi

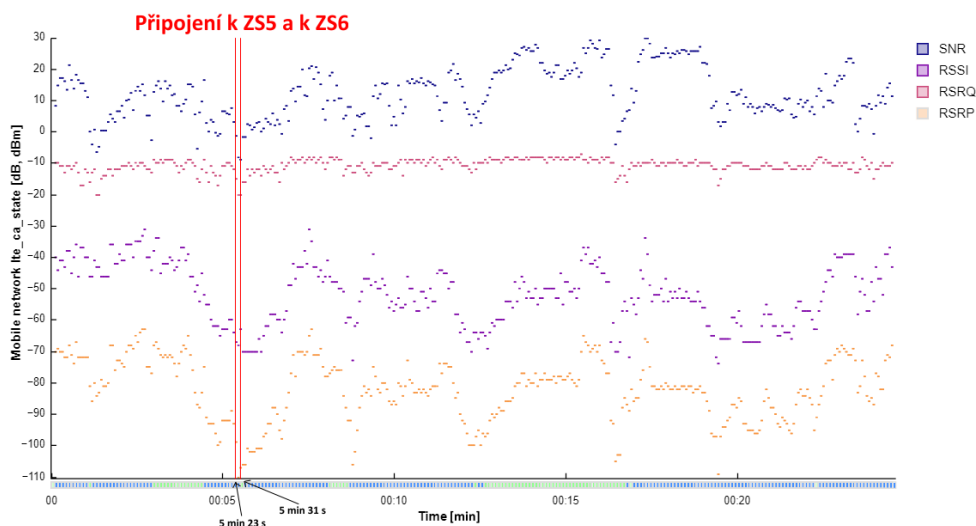
Z průběhů SNR, RSRP a RSRQ v obou směrech vyplývá, že místo s nedostatečnými hodnotami rádiových parametrů se nacházelo mezi zastávkami Prašný most a Vozovna Střešovice. Jeden z průběhů rádiových parametrů je zobrazen na obrázku 7.19, kde se jedná o trasu ze zastávky Dejvická do zastávky Slánská. V blízkosti problémového místa jsou naznačeny pozice využitých základnových stanic.



Obrázek 7.19: Průběh RSRQ v autobuse (v jednom směru)

V podstatě šlo o podobný problém jako v předchozí diskusi. F-Tester byl připojen k ZS4 a v době, kdy mělo nastat přepojení, došlo ke krátkodobému připojení k ZS5 a na malou chvíli i k ZS6. V těchto okamžicích byly hodnoty rádiových parametrů nízké. Také došlo k nárůstu RTT, protože obě základnové stanice neměly dostatečnou kvalitu signálu, což bylo způsobeno jejich polohou. Poté se F-Tester opět připojil k ZS4, která poskytovala stabilní a kvalitní připojení.

Doba, kdy bylo zařízení připojeno k ZS5 nebo ZS6 je vyznačena v klasickém průběhu rádiových parametrů (obrázek 7.20). Na první pohled se může zdát, že takový přechod nebyl vůbec potřeba, protože na konci došlo k připojení k té samé základnové stanici. Je ale důležité si uvědomit, že základnová stanice se skládá z více buněk, které mohou používat jiné frekvence a pokrývat jiné území. To znamená, že v tomto úseku trasy došlo k přechodu mezi dvěma buňkami stejné základnové stanice, protože každá z nich pokrývala jiné území.



Obrázek 7.20: Průběh rádiových parametrů v autobuse (v jednom směru)

Kapitola 8

Shrnutí a návrh metodických doporučení

V průběhu komplexního sledování a analýzy parametrů a událostí se ukazuje, že je možné identifikovat příčiny různých typů zhoršení parametrů a poklesu komunikační schopnosti. Klíčovou roli zde hrají sledované veličiny, jako je přenosová rychlost, RTT, rádiové parametry, aktuální poloha terminálu, poloha základnových stanic a použitá kmitočtová pásma a jejich šířky. Pro správné testování a analýzu komunikačního prostředí je důležité mít vhodně navržený postup skládající se z relevantních testů.

Při stacionárním měření je potřeba použít dlouhotrvající testy, které jsou opakovaně spouštěny v různých částech dne. Měření je nutné provést s ohledem na to, o jaký den se jedná (například pracovní den, víkend nebo státní svátek), protože s tím může být spojeno zatížení sítě. Je užitečné testovat pomocí protokolů TCP i UDP, aby bylo možné získat rozsáhlý přehled o výkonnosti a spolehlivosti mobilní sítě. Protože se nemění vlastnosti měřené lokality, je vhodné za běhu měnit samotné parametry testu. U protokolu TCP je důležitá volba výchozí velikosti okna a počtu souběžných toků.

Za pohybu v dopravním prostředku se mění vlastnosti prostředí, a proto je výhodné použít test, který se bude měnit minimálně a bude odpovídat reálným podmínkám. Ty lze odhadnout díky předběžnému testu, na jehož základě se provede finální test oběma směry. Pro měření odhadovaných maximálních rychlostí se více hodí test využívající protokol TCP, jehož výchozí velikost okna je zvolena s ohledem na výsledek předběžného testu. Protokol UDP je vhodný pro malé datové toky, které mohou tvořit samostatné testy nebo zůstat aktivní na pozadích větších testů.

Kapitola 9

Závěr

Kromě samotné teorie bylo účelem teoretické části popsat aktuální situaci týkající se LTE a 5G sítí v České republice. V tomto segmentu dochází k určitému prolínání teoretické a praktické části, protože v něm byly použity i informace z praktického měření a také z exkurzí do firmy Continental a laboratoře společnosti CETIN. Jedná se totiž o informace, které nejsou snadno zjistitelné. Například operátorovi T-Mobile byl položen jednoduchý dotaz, zda používá DSS (Dynamic Spectrum Sharing) na některých frekvenčních pásmech. Jedná se o technologii, která umožňuje paralelní používání LTE i 5G ve stejném kmitočtovém pásmu. Odpovědí ale bylo, že se jedná o interní informaci firmy. V úvodu praktické části byla stručně popsána měřicí sestava, která byla použita pro všechna měření. Následovaly dvě měření sítě operátora O2, u kterých se nevycházelo z dostupných metodik. Jejich cílem bylo podrobně vysvětlit, jak probíhá měření a jaké problémy mohou vzniknout kvůli nesprávnému nastavení testu. U podkapitoly 7.2.2 to byla nedostatečná velikost okna. Součástí stacionárního měření sítě Vodafone již bylo samostatné použití obou protokolů, změna velikosti okna, delší doba měření a navýšení počtu měření v různých částech dne. Z tohoto testování vyplývá, jak může hustá zástavba ovlivnit pokrytí a jak záleží na dostupných pásmech základnové stanice. Výsledky naznačují, že pro měření maximální rychlosti je výhodnější použít protokol UDP. Dále byly provedeny měření za jízdy v obou směrech ve specifických lokacích. Ty odhalily, že i při dobrém pokrytím může docházet k problémům, a to zejména při přechodech mezi buňkami, které neprobíhají identicky a bezchybně. Pokrytí sítě operátora Vodafone v hustě osídlených oblastech mimo přechody dosahovalo dobrých výsledků, protože nedocházelo k delším odpojením. To lze vyčíst z podkapitoly 7.6, kde propustnost téměř po celou dobu měření dosahovala požadovaných 7 Mbit/s. Obecně v této bakalářské práci bylo zjištěno, že pokud jde o přenosové rychlosti, LTE i 5G NSA ve veřejných mobilních sítích v reálných podmínkách dosahovaly podobných

hodnot. Použití DSS je pak prakticky ne úplně přínosné, neboť při přepnutí mezi technologiemi nebyl rozdíl v přenosové rychlosti znatelný. Navíc bylo díky exkurzi do laboratoře společnosti CETIN zjištěno, že pouhé použití DSS na frekvenčním pásmu způsobí pokles přenosových rychlostí přibližně o 20 %. Z toho vyplývá, že DSS využije plného potenciálu až při spuštění 5G SA sítí. Je zřejmé, že přenosových rychlostí v jednotkách či desítkách Gbit/s ve veřejných mobilních sítích a při reálných podmínkách bude možné dosáhnout až při použití 5G SA nebo milimetrových vln. Výsledkem této bakalářské práce je zejména zmapování zajímavých situací, jako jsou přechody mezi buňkami při složitých terénních podmínkách nebo přechody mezi buňkami v metru. Další přínos spočívá v ověření obecných metodik a doporučení konkrétních postupů pro vybrané scénáře za pohybu v dopravním prostředí nebo ve stacionárním bodě, a to v oblastech s nízkým a vysokým provozem.

Příloha A

Literatura

- [1] DAHLMAN, Erik, Stefan PARKVALL a Johan SKÖLD. *4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Oxford: Academic Press, 2011. ISBN 978-0-12-385489-6. Obrázky byly převzaty z online formy. Dostupné z: https://www.academia.edu/38394302/_ebook_4G_LTE_LTE_Advanced_for_Mobile_Broadband_pdf.
- [2] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. *Mobilní sítě* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, [2013] [cit. 2022-11-12]. ISBN 978-80-01-05305-8. Dostupné z: <http://techpedia.fel.cvut.cz/single/?objectId=4>
- [3] Výsledky filtrování. *Využití rádiového spektra* [online]. [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://spektrum.ctu.cz/kmitocty>
- [4] T-Mobile modernizuje svoji síť, 3G skončí na konci listopadu. *Tiskové centrum T-Mobile* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-11-18]. Dostupné z: <https://www.t-mobile.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-modernizuje-svoji-sit-3g-skonci-na-konci-listopadu.html>
- [5] An Introduction to 4G Technology. *4Gon Solutions* [online]. c2021 [cit. 2022-11-23]. Dostupné z: https://www.4gon.co.uk/solutions/introduction_to_4g.php
- [6] CONDE DOS REIS, Rafael Lopes. OFDMA and SC-FDMA. *4G - LTE/LTE-A Coursework for Computer Networks II* [online]. [cit. 2022-11-26]. Dostupné z: https://www.gta.ufrj.br/ensino/ee1879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/ofdma_scfdma.html#:~:text=The%20main%20difference%20between%20an,by%20both%20time%20and%20frequency.

- [7] MAŇÁK, David. *Redukce PAPR v OFDM a její simulace ve Scilabu* [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://dSPACE.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9220/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Josef Urban.
- [8] GHAYAS, Adnan. Diversity Vs MIMO: Is Antenna Diversity The Same As MIMO?. *Commsbrief* [online]. 2021 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://commsbrief.com/diversity-vs-mimo-is-antenna-diversity-the-same-as-mimo/>
- [9] 4x4 MIMO. *Halberd Bastion* [online]. c2022 [cit. 2022-12-19]. Dostupné z: <https://halberdbastion.com/resources/wireless/mimo/4x4-mimo>
- [10] ASIF, Saad Z. *5G mobile communications: concepts and technologies*. Boca Raton, [2019]. ISBN 978-1-4987-5155-1.
- [11] GHAYAS, Adnan. MU-MIMO: What Is Multi-User MIMO In 4G?. *Commsbrief* [online]. 2021 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: [https://commsbrief.com/mu-mimo-what-is-multi-user-mimo-in-4g/#:~:text=While%20MIMO%20\(Multiple%20Input%20Multiple,also%20used%20in%205G%20networks](https://commsbrief.com/mu-mimo-what-is-multi-user-mimo-in-4g/#:~:text=While%20MIMO%20(Multiple%20Input%20Multiple,also%20used%20in%205G%20networks).
- [12] 5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality. *National Instruments* [online]. 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/14/5g-massive-mimo-testbed--from-theory-to-reality--.html>
- [13] GHAYAS, Adnan. FDD Vs TDD: What Are FDD And TDD In Mobile Networks?. *Commsbrief* [online]. 2021 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://commsbrief.com/fdd-vs-tdd-what-are-fdd-and-tdd-in-mobile-networks/>
- [14] OSTERLOH, Heather. *TCP/IP: kompletní průvodce : použitelný pro veškeré operační systémy*. Praha: SoftPress, 2003. ISBN 80-864-9734-8.
- [15] Main differences between the ISO/OSI model and TCP/IP. *Informatica e Ingegneria Online* [online]. [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://vitolavecchia.altervista.org/main-differences-between-the-iso-osi-model-and-tcp-ip/>

- [16] F-Tester Uživatelská příručka: Verze 3.2. *F-Tester NGA – 5G* [online]. 22. 3. 2022 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: https://f-tester.fel.cvut.cz/portal/wp-content/uploads/2022/09/F-Tester_Devices_Manual_v3.2.pdf
- [17] POBOŘIL, Vít. *Testování sítě 5G pro obecné použití a aplikace v průmyslu a energetice* [online]. 2022 [cit. 2022-11-28]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/101344>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [18] *GSMweb.cz* [online]. c1997–2022 [cit. 2022-12-30]. Dostupné z: <https://gsmweb.cz/>
- [19] *Mapy.cz* [online]. c2022 [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [20] Veřejné širokopásmové mobilní sítě 4G a 5G. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://digi.ctu.cz/pokryti>
- [21] CHEN, Wanshi, Peter GAAL, Juan MONTOJO a Haris ZISIMOPOULOS. *Fundamentals of 5G communications: connectivity for enhanced mobile broadband and beyond*. New York: McGraw-Hill, [2021]. ISBN 978-1-260-45999-9.
- [22] VANNITHAMBY, Rath a Shilpa TALWAR. *Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. ISBN 978-1-118-97983-9.
- [23] SIDDIQI, Murtaza, Heejung YU a Jington JOUNG. 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices. *Electronics* [online]. 2019, **8**(9) [cit. 2023-01-04]. ISSN 2079-9292. Dostupné z: [doi:10.3390/electronics8090981](https://doi.org/10.3390/electronics8090981)
- [24] ACENTURY2. [What's the difference between...]. *Twitter* [online]. 28.10.2020 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://twitter.com/acentury2/status/1321456620061208576?lang=zh-Hant>
- [25] DAHLMAN, Erik, Stefan PARKVALL a Johan SKÖLD. *5G NR - The Next Generation Wireless Access Technology (2nd Edition)* [online]. Elsevier, 2021 [cit. 2023-02-25]. ISBN 978-0-12-822321-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpGNRTNG08/toc>
- [26] HARDESTY, Linda a Bevin FLETCHER. T-Mobile exec touts massive MIMO for both TDD and FDD bands. *Fierce Wireless* [online]. 2. prosince 2020 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.fiercewirele>

- /ctu/vyzva-k-uplatneni-pripominek-k-zameru-ceskeho-telekomunikacniho-uradu-udelit-pridel-radiovyh/2110-2170-mhz-pod-le-ss-20-odst.5-zakona-o-elektronickych-komunikacich/obrazky/211112zaveryprezkoumani2ghz.pdf
- [36] O2 jako první operátor testuje nejrychlejší 5G. Díky využití vyšších frekvencí dosahují rychlosti stahování až 5 Gb/s. *O2* [online]. 23. 6. 2022 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: https://www.o2.cz/spolecnost/tiskove-centrum/683052-02_jako_prvni_operator_testuje_nejrychlejsi_5G_Diky_vyuziti_vyssich_frekvenci_dosahuji_rychlosti_stahovani_az_5_Gb_s.html
- [37] Vodafone spustil mobilní privátní 5G síť ve ŠKODA AUTO. *Vodafone* [online]. 27. června 2022 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/nejen-pro-media/tiskove-zpravy/vodafone-spustil-mobilni-privatni-5g-sit-ve-skoda-/>
- [38] BUKSZPAN, Daniel. Swisscom deploys Ericsson's 5G Radio Dot small cells. *Fierce Wireless* [online]. 22. července 2019 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.fiercewireless.com/5g/swisscom-deploys-ericsson-s-5g-radio-dot-small-cells>
- [39] Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací. *Český telekomunikační úřad* [online]. 1. března 2021 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu-new/ochrana-spotrebitele/kontrola-a-mereni/metodika-pro-mereni-a-vyhodnoceni-datovych-parametru-mobilnich-siti-ek-2-3.pdf>
- [40] How to Determine Good Cellular Signal Strength. *Twilio* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.twilio.com/docs/iot/supersim/how-determine-good-cellular-signal-strength#:~:text=The%20LTE%20specification%20defines%20a,measured%20using%20a%20standard%20signal.>
- [41] LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement. *CableFree* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/>
- [42] Všeobecné oprávnění č. VO-S/1/08.2020-9. *Český telekomunikační úřad* [online]. 18. srpna 2020 [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/36864/soubory/vos1final.pdf>

- [43] Podmínky poskytování mobilních datových služeb pro smlouvy. *Vodafone* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/podminky/podminky-doplnekovych-sluzeb/podminky-poskytovani-mobilnich-datovych-12/>



Příloha B

Seznam zkratk

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G NR	5G New Radio
5G RAN	5G Radio Access Network
AMPS	Advanced Mobile Telephone System
AR	Augmented Reality
AT&T	American Telephone and Telegraph
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
CQI	Channel Quality Indicator
CSV	comma-separated values
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DFT	Discrete Fourier Transform
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eNB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core

E-UTRAN	Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplexing
FR1	Frequency range 1
FR2	Frequency range 2
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
HSPA	High Speed Packet Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things
IPER	IP packet error ratio
IPDV	IP packet delay variation
IPLR	IP packet loss ratio
IPTD	IP packet transfer delay
ISO	International organization of Standardization
ITU	International Telecommunication Union
JSON	JavaScript Object Notation
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding scheme
MEC	Multi-access Edge computing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output

MME	Mobility Management Entity
mMTC	Massive Machine Type Communications
MU-MIMO	Multi-User MIMO
NGC	Next Generation Core
NMT	Nordic Mobile Telephone
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OSI	Open System Interconnection
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PDF	Portable Document Format
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RN	Relay Node
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Strength Signal Indicator
RTT	Round-trip Time
SA	Standalone
SC-FDMA	Single-carrier Frequency Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SIM	subscriber identity module
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SSD	solid-state drive
SU-MIMO	Single-User MIMO
TACS	Total Access Communication System
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDD	Time Division Duplexing
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URLLC	Ultra-reliable and Low-latency Communications
VoLTE	Voice over LTE
VR	Virtual Reality
Wi-Fi	Wireless Fidelity
ZS	základnová stanice



Příloha C

Přiložená data

Příloha C obsahuje data, která byla naměřena v průběhu tvorby této bakalářské práce. Data slouží jako podklad pro analýzu a diskusi v hlavní části práce. Data jsou rozstríděna do složek, aby bylo zcela zřejmé, k jakým měřením se vztahují.