

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Testování sítí 5G pro obecné použití a aplikace v průmyslu a energetice

Vít Pobořil

Vedoucí: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pobořil** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **491890**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Testování sítí 5G pro obecné použití a aplikace v průmyslu a energetice

Název bakalářské práce anglicky:

An 5G Networks Testing for General Utilization and Applications in Industry and Energetics

Pokyny pro vypracování:

Proveďte analýzu vlastností sítí 5G, zejména z pohledu využití v průmyslu a energetice (Industry 4.0, Smart Grid). Realizujte praktické testy a jejich vyhodnocení. Navrhněte metodiku pro testování a vyhodnocení specifických situací pomocí platformy F-Tester.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Lytvyn, I.: Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti, diplomová práce, ČVUT v Praze, 2020
- [2] F-Tester - měření datových sítí [online] Dostupné na: <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: **21.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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 poděkoval vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, vedení práce a za zapůjčení zařízení F-Tester. Také bych rád poděkoval za umožnění testování v testbedu průmyslu 4.0 v CIIRC ČVUT.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze, 19. května 2022

Abstrakt

Tématem této bakalářské práce je testování mobilních sítí páté generace. Pro testování je použita platforma pro měření parametrů komunikačních sítí F-Tester. Práce se zabývá vylepšením použitelnosti zařízení F-Tester 5G pro provádění walk testů a návrhem metodiky pro testování specifických situací. Testována je veřejná pozemní mobilní síť i neveřejná průmyslová 5G síť v CIIRC ČVUT.

Klíčová slova: testování mobilních sítí, mobilní síť 5G, F-Tester, průmysl 4.0, inteligentní síť

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

Abstract

This bachelor's thesis deals with 5G networks testing. Mobile network measurements are performed using the F-Tester platform. The focus of this thesis is on improving the usability of the F-Tester 5G device for walk testing and designing a testing methodology for specific scenarios. Subject to testing are both a public land mobile network and a non-public industrial 5G network at CIIRC CTU.

Keywords: Mobile networks testing, 5G Mobile networks, F-Tester, Industry 4.0, Smart Grid

Title translation: An 5G Networks Testing for General Utilization and Applications in Industry and Energetics

Obsah

1 Úvod	1	5.2 Vymezení měřicích stran a přenosové trasy	21
2 Vývoj mobilních sítí, přehled jednotlivých generací	3	5.3 Síťové protokoly	22
2.1 Přehled Generací	3	5.3.1 TCP	22
2.2 Tabulka generací	4	5.3.2 UDP	22
3 5G Sítě	5	5.4 Měření TCP protokolem	22
3.1 Úvod	5	5.4.1 Download a Upload	23
3.2 Standardizace	5	5.4.2 RTT	23
3.3 Rádiový přenos	6	5.5 Měření UDP protokolem	23
3.3.1 Kódování a modulace	6	5.5.1 Downlink a Uplink	23
3.3.2 MIMO	6	5.5.2 Zpoždění paketů IPTD	23
3.3.3 Beamforming	7	5.5.3 Kolísání zpoždění paketů IPDV (jitter)	24
3.3.4 Scheduler	7	5.5.4 Chybovost paketů IPER	24
3.4 New Radio	7	5.5.5 Ztrátovost paketů IPLR	24
3.4.1 Enhanced Mobile Broadband	8	5.5.6 Soubor identifikačních parametrů	24
3.4.2 Ultra Reliable Low Latency Communications	8	5.6 Soubor rádiových parametrů	24
3.4.3 Massive Machine Type Communications	9	5.6.1 Rádiové parametry	25
3.5 Network Slicing	9	5.6.2 Limitní hodnoty	25
3.6 Architektura 5G	9	5.7 Měřicí nástroj iPerf3	25
3.7 Režimy nasazení	10	5.8 Měřicí nástroj FlowPing	26
3.7.1 NSA	10	6 Testovací platforma	27
3.7.2 SA	10	6.1 F-Tester	27
3.8 Pásmo 5G	11	6.2 F-Tester 5G	27
3.8.1 FDD a TDD	13	6.2.1 Telit FN980	28
3.9 Agregace pásem	14	6.3 Úpravy pro měření za chůze	29
3.10 DSS	14	6.4 Testování pomocí platformy F-Tester	31
3.11 VoNR	14	6.4.1 iPerf3 TCP	32
4 5G v obecném použití, průmyslu a energetice	15	6.4.2 iPerf3 UDP	32
4.1 5G a ostatní mobilní sítě v Česku	15	6.4.3 FlowPing	33
4.1.1 Využívaná pásma	15	6.5 Vztah metodiky ČTÚ a metodiky provedených testů v této práci	33
4.1.2 Využívaná pásma 5G	16	7 Testování sítě 5G pro průmyslové použití	35
4.2 Průmysl 4.0	17	7.1 Měření propustnosti v jednotlivých bodech laboratoře	36
4.3 Průmysl 4.0 a 5G	17	7.2 Naměřené propustnosti a plán laboratoře	38
4.3.1 Ukázka schématu testbedu průmyslu 4.0	18	7.3 Rádiové parametry	39
4.4 Smart Grid	19	7.4 Naměřené propustnosti pro oba směry současně	41
4.4.1 Komunikace ve Smart Grid	19	7.5 Walk testy v okolí laboratoře	42
4.5 Smart Grid a 5G	20	7.6 Měření zpoždění ve smyčce	43
4.5.1 Network Slicing ve Smart Grid	20		
5 Metodika ČTÚ	21		
5.1 Úvod	21		

7.7 Měření stability rychlosti UDP protokolem.....	44
7.8 Vliv vnějších faktorů na přenosové parametry	44
8 Testování sítě 5G pro obecné použití	47
8.1 Testování v budově FEL/FS ...	48
8.1.1 Měření propustnosti na hlavních chodbách	48
8.1.2 Měření zpoždění ve smyčce na hlavních chodbách	51
8.1.3 Testování v sedmém patře ...	52
8.1.4 Souhrnné výsledky	53
8.2 Walk testy v kampusu	55
8.2.1 Měření propustnosti	55
8.2.2 Vyhodnocení vztahu rádiových parametrů a propustnosti	56
8.2.3 Měření zpoždění ve smyčce ..	57
9 Závěr	59
A Literatura	61
B Seznam zkratk	65
C Přiložené soubory	69

Obrázky

3.1 Posloupnost kódování a modulace v mobilních komunikacích [4]	6	8.8 Trasa walk testu v kampusu.	55
3.2 5G trojúhelník z IMT-2020 [6]	8	8.9 Ukázka grafu závislosti propustnosti na čase pro směr downlink při walk testu v kampusu	56
3.3 Architektura mobilní sítě [4]	9	8.10 Závislost RSRP na čase při walk testu v kampusu	57
3.4 Režimy nasazení NSA a SA [4]	11	8.11 Závislost SINR na čase při walk testu v kampusu	57
3.5 Podporovaná pásma mobilními sítěmi jednotlivých generací [15]	12	8.12 Závislosti RTT na čase při walk testu v kampusu	58
4.1 Schéma testování autorů z Aalborg University [23]	18		
4.2 Schéma testbedu průmyslu 4.0 [24], ve kterém probíhalo praktické měření	19		
6.1 Vnitřní konfigurace zařízení F-Tester 5G	28		
6.2 Konfigurace access pointu	29		
6.3 Měřicí konstrukce	30		
6.4 Měřicí konstrukce v měřicím batohu	31		
6.5 Grafické uživatelské rozhraní zařízení F-Tester 5G na mobilním telefonu	32		
7.1 Plán Laboratoře průmyslu 4.0	38		
7.2 Závislost naměřených propustností v laboratoři na RSRP	41		
7.3 Ukázka závislosti propustnosti na čase ve směru uplink naměřené při walk testu před laboratoří.	42		
8.1 Trasa walk testů v budově FEL na hlavních chodbách	48		
8.2 Ukázka závislosti propustnosti na čase ve směru downlink při walk testu v druhém patře	49		
8.3 Závislost RSRP na čase při walk testu v druhém patře budovy FEL	50		
8.4 Závislost SINR na čase při walk testu v druhém patře budovy FEL	50		
8.5 Ukázka závislosti RTT na čase pro test ve druhém patře	51		
8.6 Trasa walk testů v sedmém patře budovy FEL	52		
8.7 Ukázka grafu závislosti propustnosti na čase ve směru downlink pro test v sedmém patře.	53		

Tabulky

2.1 Teoretické přenosové rychlosti mobilních sítí dle generací	4
3.1 Vybraná kódová označení pásem [13]	13
4.1 Aktuálně využívané technologie mobilních sítí na jednotlivých frekvenčních pásmech [19]	16
4.2 Poskytovatelé mobilních sítí 4G a jimi používaná pásma [19]	16
4.3 Používané kmitočty 5G v České republice [19]	16
4.4 Požadavky na konektivitu v rámci tří hlavních úrovní [26]	20
5.1 Limitní hodnoty rádiových signálů pro jednotlivá kmitočtová pásma mobilních sítí [29]	25
7.1 Propustnost v bodě 3 při různých velikostech okna v laboratoři	37
7.2 Zvolené parametry testu iPerf3 TCP pro testy v laboratoři	37
7.3 Propustnosti v bodech laboratoře	39
7.4 RSRP a nejvyšší režim MIMO v bodech v laboratoři	40
7.5 Naměřené propustnosti v laboratoři pro oba směry současně	42
7.6 Naměřené hodnoty RTT a jitter v laboratoři a nastavený bitový tok .	43
7.7 Ztrátovost paketů při UDP testu v laboratoři	44
8.1 Zvolené parametry testu iPerf3 TCP pro měření v budově FEL	49
8.2 Naměřené propustnosti na hlavních chodbách ve směru downlink v budově FEL	49
8.3 Naměřené propustnosti na hlavních chodbách ve směru uplink v budově FEL	49
8.4 Naměřené hodnoty RTT a jitter na hlavních chodbách v budově FEL .	51
8.5 Naměřená ztrátovost paketů v budově FEL	52
8.6 Souhrnná tabulka výsledků naměřených v budově FEL	54
8.7 Zvolené parametry testu iPerf3 TCP při walk testu v kampusu	55
8.8 Naměřené propustnosti při walk testu v kampusu	55
8.9 Naměřené hodnoty RSRP při walk testu v kampusu	56
8.10 Naměřené hodnoty SINR při walk testu v kampusu	56
8.11 Naměřené hodnoty RTT a jitter při walk testu v kampusu	58
8.12 Ztrátovost paketů při walk testu v kampusu	58

Kapitola 1

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na testování mobilních sítí páté generace pomocí platformy F-Tester. Testování je zaměřeno na mobilní sítě pro obecné použití a na mobilní sítě pro průmyslové použití. Jako mobilní síť pro obecné použití je testována veřejná pozemní mobilní síť 5G tuzemského operátora. Pro průmyslové použití je testována privátní 5G síť v laboratoři průmyslu 4.0.

Cílem práce je analyzovat vlastnosti sítí 5G, a to nejen pro obecné použití, ale i pro průmyslové a energetické aplikace v oblastech jako je Industry 4.0 a Smart Grid. Dále je cílem navrhnout metodiku pro testování a vyhodnocení specifických situací v sítích 5G pomocí platformy F-Tester.

Výsledkem práce jsou výsledky měření zvolených sítí.

Kapitola 2 stručně popisuje vývoj mobilních sítí a jejich jednotlivé generace, které vedly až k současným sítím generace páté.

Kapitola 3 popisuje a analyzuje vlastnosti sítí páté generace, dále ukazuje výhody oproti předchozí generaci.

Kapitola 4 je věnována současnému použití mobilních sítí 5G u běžných operátorů a uplatnění sítí 5G v aplikacích v průmyslu a v energetice.

Kapitola 5 shrnuje metodiku ČTÚ pro měření mobilních sítí elektronických komunikací, kterou byla inspirována metodika měření použitá v této práci.

Kapitola 6, kterou začíná praktická část této práce, popisuje platformu F-Tester a provedené vylepšení použitelnosti zařízení F-Tester 5G pro provádění walk testů.

Kapitola 7 popisuje testování průmyslové 5G sítě v testbedu průmyslu 4.0 v CIIRC ČVUT.

Kapitola 8 se zabývá testováním veřejné mobilní sítě pro obecné použití.

Kapitola 9 je závěr, kde jsou diskutovány výsledky práce, měření a shrnuty možnosti uplatnění mobilních sítí 5G v průmyslu a energetice.

Kapitola 2

Vývoj mobilních sítí, přehled jednotlivých generací

Mobilní sítě mají 40 let dlouhou historii, za kterou prošly výraznými změnami. První analogové systémy 1. generace se objevily v 80. letech a byly zaměřeny na telefonii. Sítě druhé generace přinesly navýšení přenosových rychlostí, které umožnilo digitální hlasové přenosy a textové služby (SMS). Mobilní sítě druhé generace dále přinesly podporu mobilních dat v rámci sítí GPRS a EDGE. Třetí generace mobilních sítí umožnila další navýšení rychlosti přenosu, které umožnilo přenášet multimédia. Mobilní systémy čtvrté generace se primárně zaměřily na další navyšování přenosových kapacit a na snížení hodnot zpoždění. [1] Sítě páté generace jsou popsány v kapitole 3.

2.1 Přehled Generací

V následujícím seznamu jsou uvedeny vybrané mobilní systémy v rámci jednotlivých generací, které byly vybrány z [1].

- První generace 1G
 - NMT (Nordic Mobile Telephone)
 - AMPS (Advanced Mobile Telephone System)
 - TACS (Total Access Communication System)
- Druhá generace 2G
 - GSM (Global System for Mobile Communication)
 - GPRS (General Packet Radio Service)
 - EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution)
- Třetí generace 3G
 - UMTS (Universal Mobile Telecommunication System)
 - HSPA (High Speed Packet Access)
 - HSPA+

- LTE (Long Term Evolution)
- Čtvrtá generace 4G
 - LTE-A (Long Term Evolution - Advanced)
- Pátá generace 5G
 - NR (New Radio)

2.2 Tabulka generací

Tabulka technologií mobilních systémů uvádí jejich teoretické přenosové rychlosti (po HSPA+ převzato z [1], LTE a LTE-A z [2], NR z [3]) a jejich zažité označení číslem generace, včetně mezistupňů [1]. Uvedeny jsou nejvyšší teoretické přenosové rychlosti, které je možné v rámci vybraných technologií dosáhnout.

Tabulka 2.1: Teoretické přenosové rychlosti mobilních sítí dle generací

Generace	Technologie	Teoretická rychlost
2,5G	GPRS	171 kbit/s
2,75G	EDGE	473,6 kbit/s
3G	UMTS	2 Mbit/s
3,5G	HSDPA	14,4 Mbit/s
3,5G	HSPA+	42 Mbit/s
3,9G	LTE	300 Mbit/s
4G	LTE-A	1 Gbit/s
5G	NR	20 Gbit/s

Kapitola 3

5G Sítě

3.1 Úvod

Mezi motivacemi pro vývoj mobilních sítí páté generace bylo navyšování přenosových rychlostí a snížení zpoždění oproti sítím čtvrté generace. Síť 5G se ale primárně zaměřují na to, přinést podporu většímu množství služeb a zařízení. Mezi takové služby se řadí vedle vysokorychlostního mobilního připojení také podpora IoT (Internet of Things) a aplikací vyžadujících vysokou spolehlivost. [4] Nároky na síť 5G lze ilustrovat třemi kategoriemi požadavků [4]:

- Podpora vylepšeného mobilního vysokorychlostního připojení (Enhanced Mobile Broadband) – teoretické přenosové rychlosti až v mnoha Gbit/s, stabilní přenosová rychlost alespoň 100 Mbit/s, kapacita celkové propustnosti až 10 Tbit/s na km²
- Podpora masivního IoT – zařízení s velmi nízkou spotřebou a s velmi nízkými požadavky na množství přenesených dat, velmi vysoká hustota zařízení až 1 milion zařízení na km²
- Řízení systémů zásadního významu (Mission Critical Control) – velmi vysoká dostupnost alespoň 99,999 %, velmi nízké zpoždění 1 ms, extrémní mobilita až do 100 km/h

Na síť páté generace se nahlíží jako na platformu pro inovace, protože se zaměřuje na široké spektrum aplikací. [4]

3.2 Standardizace

Od doby, co organizace 3GPP (3rd Generation Partnership Project) vydala standard pro třetí generaci mobilních sítí, jak má v názvu, vydala poté i standardy 4G a 5G. Standard 5G byl organizací 3GPP vydán v červenci 2016 v rámci dokumentu Release 15. Další vylepšení sítí 5G byla popsána v 3GPP Release 16 a 17. [4] 5G síť popsané v Release 15 byly primárně zamýšleny pro nasazení v rámci veřejných mobilních sítí. S nárůstem zájmu o privátní síť

pro průmyslové použití byly v Release 16 klasifikovány dvě hlavní kategorie 5G sítí podle jejich použití. První kategorií jsou veřejné pozemní mobilní sítě (PLMN), které jsou určeny pro poskytování mobilních služeb veřejnosti, typicky na celém území daného státu. Tyto sítě jsou provozovány mobilním operátorem. Druhou kategorií jsou privátní sítě (NPN), které pokrývají vybranou oblast, typicky továrnu nebo kampus. Sítě NPN bývají provozovány soukromou organizací, obvykle zaměřenou na průmysl. [5]

3.3 Rádioový přenos

Mobilní sítě a bezdrátové sítě obecně mají unikátní přístup ke sdílení rádiového spektra mezi mnoho uživatelů. Zároveň umožňují uživatelům připojení za jejich pohybu. Kvůli tomu se v bezdrátových sítích využívají vysoce adaptivní přístupy, ve kterých je velmi důležité kódování, modulace a plánování (scheduling). [4]

3.3.1 Kódování a modulace

Při přenosu dat přes mobilní kanál se musí počítat s negativními faktory, jako je šum, útlum, zkreslení a interference. Pro spolehlivý přenos se používá kombinací kódování a modulací. Nejdříve se při kódování přidávají do dat, která mají být přenesena, bity navíc. Přidání těchto bitů je obvykle nějaká forma korekce chyb (FEC), například turbokódy nebo polární kódy. Poté se modulací vytváří signál, který je reprezentací zakódovaného toku dat. Digitální modulace se provádí s ohledem na aktuální stav negativních jevu v daném kanálu tak, aby bylo spolehlivě přeneseno co nejvíc bitů. Dále se provádí tzv. pulse shaping, kdy se šířka pásma přenosu přizpůsobí šířce kanálu. Nakonec se provádí modulace, aby se mohl přenést signál v podobě elektromagnetické vlny na požadované frekvenci. [4]

Pro tyto kroky je nutné, aby základnová stanice (BTS) znala aktuální parametry kanálu. Proto 3GPP definuje indikátor kvality kanálu CQI. Příjemce periodicky vyhodnocuje CQI a posílá jej základnové stanici. CQI zpráva obsahuje hodnotu SNR, která ovlivňuje schopnost příjemce rozpoznávat přijaté bity. Scheduler v rámci základnové stanice vyhodnocuje tuto informaci a přizpůsobuje podle toho alokaci rádiového spektra pro příjemce a vybírá podle toho vhodná kódovací a modulační schémata. [4]



Obrázek 3.1: Posloupnost kódování a modulace v mobilních komunikacích [4]

3.3.2 MIMO

Pro rádioový přenos v moderních mobilních sítích a Wi-Fi sítích se používá technologie Multiple Input Multiple Output pro zvýšení přenosové kapacity.

Tato technologie spočívá v současném použití více antén na vysílací i přijímací straně. Technika beamforming používá více antén se stejným datovým tokem, aby se zvýšil zisk a nasměroval signál, což zlepší dosah a sníží interference. Při použití prostorového multiplexování v rámci MIMO se posílají různé datové toky různými anténami, čímž se zvýší propustnost. Síť 5G přináší masivní MIMO systémy, které nasazují velké množství antén na základnové stanice, typické jsou soustavy 8x8, tvořící 64 polarizovaných antén. [6]

■ 3.3.3 Beamforming

Při komunikaci se stále větším počtem zařízení narůstá vzájemné množství komunikace, a tím i vzájemné rušení. Technologie Beamforming umožňuje směřování vyzařovaných paprsků bez nutnosti natáčení fyzické antény, přímo na jednotlivá zařízení, čímž se snižuje vzájemné rušení. [7]

■ 3.3.4 Scheduler

Práci plánovače přenosu dat (scheduler) určuje multiplexovací mechanismus mobilní sítě. Síť 2G využívají TDMA (Time Division Multiple Access), u sítí 3G se využívá CDMA (Code Division Multiple Access). Síť 4G a 5G jsou založeny na OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). U starších sítí se pro přenos dat využívalo přepojování okruhů, zatímco moderní síť 4G a 5G využívají výhradně přenos dat pomocí paketů. [4]

■ Multiplexování a Modulace

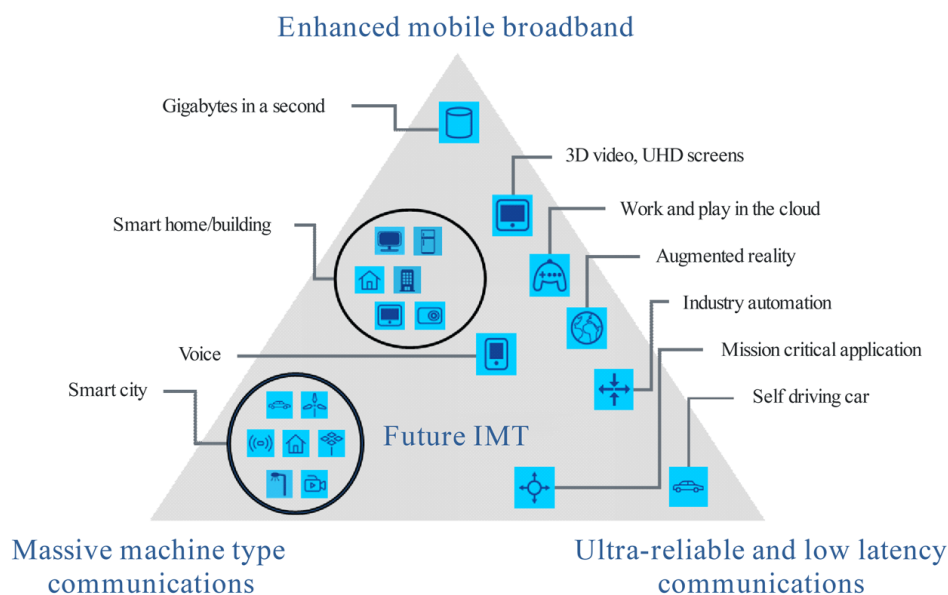
Multiplexování je u sítí 4G i 5G řešeno podobně. U obou generací mobilních sítí se pro směr downlink používá OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Ortogonální multiplexování s frekvenčním dělením je technika založená na OFDM (Ortogonální frekvenční multiplex). OFDM je technika založená na rozdělení spektra na více subnosných frekvencí, které jsou vzájemně ortogonální. [4] Pro samotnou modulaci se typicky používá skupina modulací QAM (kvadraturní amplitudová modulace), jako jsou QPSK (2 bity na symbol), 16 QAM (4 bity), 64 QAM (6 bitů) a 256 QAM (8 bitů). [8]

■ 3.4 New Radio

Výsledkem nových přístupů v rádiovém přenosu popsaném v kapitole Rádiový přenos, je nové rádiové rozhraní. Toto nové rádiové rozhraní pro síť 5G se nazývá NR (New Radio). Nové rádiové rozhraní přináší kromě zvýšení přenosových rychlostí tři hlavní scénáře použití sítí 5G. [4]

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – navýšení přenosových rychlostí
- uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) – pro operace vyžadující minimální odezvu jako autonomní řízení a průmyslové aplikace

- mMTC (Massive Machine Type Communications) – konektivita pro velké množství zařízení nenáročných na spotřebu a přenosové rychlosti



Obrázek 3.2: 5G trojúhelník z IMT-2020 [6]

■ 3.4.1 Enhanced Mobile Broadband

eMBB je vylepšené mobilní vysokorychlostní připojení, navazuje na mobilní připojení přes síť 4G a přináší oproti nim především navýšení přenosových rychlostí a snížení zpoždění. Požadavky na teoretické přenosové rychlosti v rámci eMBB jsou 20 Gbit/s ve směru downlink a 10 Gbit/s ve směru uplink. Těchto přenosových parametrů by mělo být dosaženo za ideálních podmínek, předpokládající využití všech prostředků sítě pro jeden terminál. Za stejných podmínek se očekává dosažení spektrální efektivity až 30 b/s/Hz pro downlink při 8 streamech a 15 b/s/Hz pro uplink při 4 streamech. V rámci eMBB se očekává zpoždění 4 ms. Minimální požadavky na přenosové rychlosti v rámci uživatelského zážitku jsou 100 Mbit/s ve směru downlink a 50 Mbit/s ve směru uplink. [3]

■ 3.4.2 Ultra Reliable Low Latency Communications

uRLLC značí ultra spolehlivou komunikaci s velmi nízkou odezvou, jedná se o scénář použití, kde je hlavním cílem dosažení co nejnižší odezvy, konkrétně do 1 ms. Dalším požadavkem v rámci uRLLC je velmi vysoká spolehlivost 99,9999 %. [3] uRLLC se uplatní v průmyslové automatizaci, autonomním řízení vozidel a u kritických aplikací, vyžadujících nejvyšší spolehlivost. (obrázek 3.2)

3.4.3 Massive Machine Type Communications

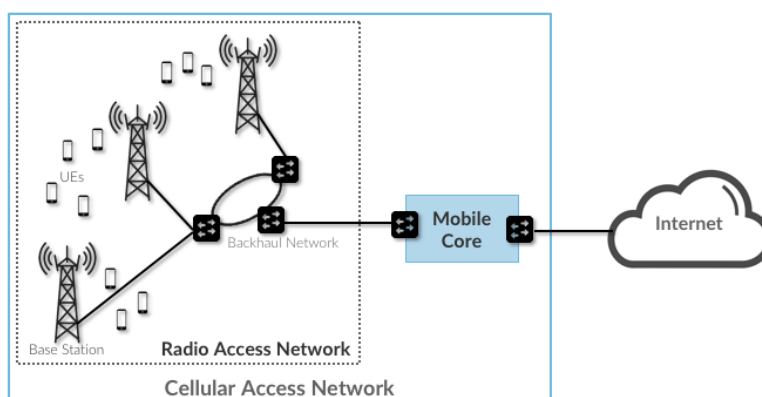
mMTC značí masivní komunikaci typu M2M (machine to machine). Jedná se o scénář použití pro velké množství zařízení nenáročných na spotřebu, týkajících se oblastí jako je IoT a domácí automatizace. U těchto zařízení se očekává spotřeba, která jim umožní výdrž na baterii až 10 let. Mezi tyto zařízení patří například senzory a monitorovací systémy v rámci Smart city. Požadavek na hustotu konektivity pro mMTC je 1 milion zařízení na čtvereční kilometr. [9]

3.5 Network Slicing

Klíčovou inovativní funkcí sítí 5G je Network Slicing. Jedná se o použití síťové virtualizace, díky čemuž se vytvoří více virtuálních sítí na stejné fyzické infrastruktuře. Network Slicing umožňuje přidělení unikátní skladby parametrů každé virtuální síti podle specifických potřeb dané aplikace, pro kterou bude síť využívána. Mezi tyto parametry patří kapacita a přenosové rychlosti. Mezi scénáře použití, kde najde Network Slicing uplatnění patří např. IoT nebo Smart Grid. [10]

3.6 Architektura 5G

Architekturu mobilních sítí tvoří dvě základní části, jádro sítě (Mobile Core) a rádiová přístupová síť (Radio Access Network). Na schématu je jako UE označeno uživatelské vybavení, resp. jednotlivé terminály. Rádiová přístupová síť zajišťuje obsluhu rádiového spektra a je tvořena základnovými stanicemi. Organizace 3GPP označuje základnové stanice v sítích 5G jako gNB (next generation Node B). V sítích 4G jsou základnové stanice označovány jako eNB (evolved Node B). Jádro sítě (Mobile Core) zajišťuje mnoho funkcionalit, mezi které patří zajištění internetové konektivity, dodržení standardů QoS a monitorování pohybu uživatelů pro zajištění nerušeného připojení. [4]



Obrázek 3.3: Architektura mobilní sítě [4]

■ 3.7 Režimy nasazení

Sítě 5G jsou implementovány ve dvou hlavních režimech nasazení [4]:

- Standalone 5G (SA)
- Non-standalone 5G (NSA)

Oba režimy nasazení využívají základnové stanice 5G, které poskytují RAN páté generace. Rozdíl mezi nasazením v režimu NSA a SA spočívá především v použité generaci technologií na straně jádra sítě.

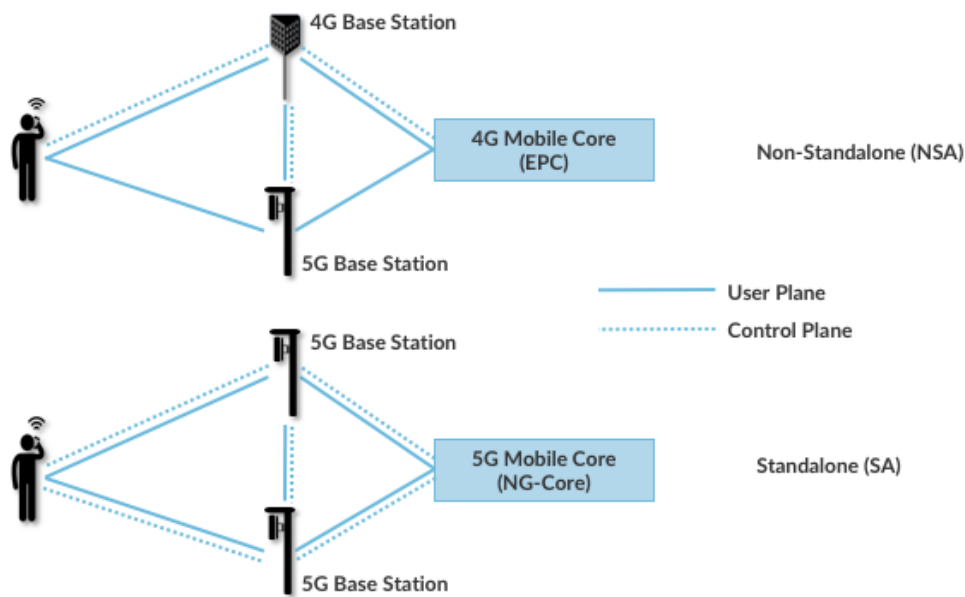
U NSA architektury se kombinuje RAN páté generace s jádrem čtvrté generace (EPC), zatímco u architektury SA je rádiová přístupová síť páté generace připojena na jádro sítě páté generace (NG-Core). [4]

■ 3.7.1 NSA

První implementace sítí 5G jsou obvykle v režimu NSA, neboť se v tomto režimu využívá stávající infrastruktura na straně jádra sítě, a to jádro sítí čtvrté generace EPC. [11] Sítě páté generace jsou zde použity pro navýšení kapacity a rychlostí přenosu po boku sítí 4G. V případě sítí v režimu NSA se používá RAN páté generace společně s RAN čtvrté generace. Přes síť čtvrté generace probíhá v režimu NSA provoz v rámci Control Plane i User Plane. Základnové stanice páté generace jsou zde použity pro přenos datového provozu pouze v rámci User Plane. [4] Režim NSA se dá také vysvětlit tak, že signalizace a datový přenos probíhá v síti LTE, zatímco přes 5G se realizuje jen datový přenos. Mezi výhody 5G sítí v režimu NSA patří jejich snadnější implementace s využitím části stávající infrastruktury. Tyto výhody jsou vykoupeny neúplnou funkcionalitou, kterou přináší 5G. [12]

■ 3.7.2 SA

Síť 5G označujeme za SA, pokud technologii 5G využívá nejen rádiová přístupová síť, ale i jádro sítě. SA síť nespolečá na EPC, ale využívá novou architekturu NG-Core. Pro provoz SA 5G není třeba jejich současného provozu se sítěmi 4G, protože v rámci SA architektury zvládne 5G zpracovat provoz v obou rovinách (Control Plane i User Plane). [4] Režim SA lze také popsat tak, že signalizace i datový přenos probíhá v síti 5G [12]. Standalone síť je oproti NSA síti plnohodnotnou sítí 5G a umožňuje všech funkcionalit, které 5G přináší. Mezi tyto technologie patří koncepty pro 5G služby, nacházejících uplatnění v rámci chytrých měst a továren. 5G SA síť dále podporuje koncept Network Slicing. [12]



Obrázek 3.4: Režimy nasazení NSA a SA [4]

3.8 Pásma 5G

Mobilní sítě 5G využívají mnoho frekvenčních pásem z různorodých frekvenčních rozsahů. Oproti sítím 4G se zaměřují i na frekvenční rozsahy nad 6 GHz, kde se využívají takzvané milimetrové vlny. Pátá generace tak reaguje na narůstající požadavky na přenosovou kapacitu v mobilních komunikacích.

Nejzákladnější dělení na dva základní frekvenční rozsahy je následující [13]:

- Frequency Range 1 (FR1) - sub-6GHz, 410–7125 MHz
- Frequency Range 2 (FR2) - mmWave, 24250–52600 MHz

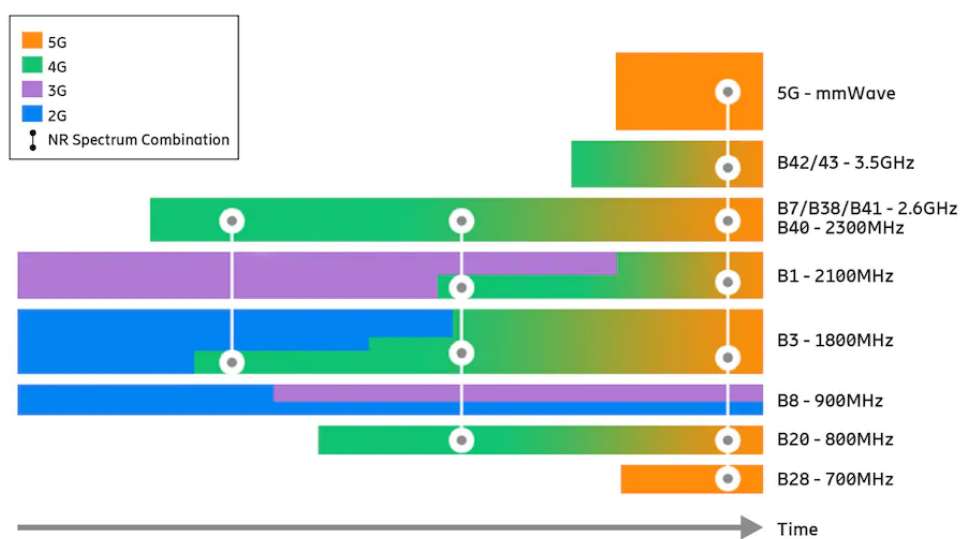
Frekvenční rozsah 1 (FR1) se nazývá sub-6GHz. Původně byl zamýšlen jako rozsah pod 6 GHz, ovšem později se začalo uvažovat o dalších frekvenčních pásmech, která by mohla být přidána do tohoto rozsahu, a tak byl FR1 rozšířeno až po 7,125 GHz a původní označení zůstalo. FR1 navazuje na tradiční mobilní sítě použitím obdobných kmitočtů a předpokládá se, že obslouží většinu datového provozu. [13] FR1 se někdy dále dělí na nízká pásma (low bands) a střední pásma (mid bands).

Nízká pásma (low bands) jsou frekvenční pásma v kmitočtech od 700 MHz do 1 GHz. Disponují nižší přenosovou kapacitou než pásma na vyšších frekvencích kvůli menším šířkám pásem. Sítě 5G, využívající frekvence v nízkých pásmech mají největší dosah a dobrý průnik do budov. Jsou vhodné pro celoplošné pokrytí. [14]

Střední pásma (mid bands) zahrnují frekvenční pásma od 1 GHz do 6 GHz. Tato pásma nabízí díky větším šířkám pásem vyšší rychlosti než v případě nízkých pásem. Mají menší dosah než nízká pásma a horší průnik do budov.

Používají se pro zvýšení přenosových kapacit. Tato pásma jsou ideální pro nasazení masivního MIMO. [14]

Frekvenční rozsah 2 (FR2), označovaný jako mmWave, využívá frekvence nad 24 GHz, které nabízí velké šířky pásem. Tato pásma jsou pro mobilní síť novinkou, kterou přinesly síť 5G. Někdy je tento frekvenční rozsah označován jako vysoká pásma (high bands). Ve vysokých pásmech se využívají takzvané milimetrové vlny (mmWave). V Evropě se jedná o pásma 24,25–27,5 GHz. [15] Tato pásma nabízí díky velkým šířkám největší kapacitu sítě, která umožňuje přenosové rychlosti až v desítkách Gbit/s. Pro umožnění přenosu v tomto pásmu musí základnová stanice i terminál podporovat beamforming. Nevýhodou milimetrových vln je jejich velmi omezený dosah, mají špatný průnik stavbami a špatně se šíří za zhoršeného počasí. [14] Ve FR2 se používá masivní MIMO. [15]



Obrázek 3.5: Podporovaná pásma mobilními sítěmi jednotlivých generací [15]

Organizace 3GPP přiděluje jednotlivým pásmům označení, které se obvykle označuje kódem podle uvedené tabulky 3.1.

Tabulka 3.1: Vybraná kódová označení pásem [13]

kódové označení	frekvence [MHz]
n1	2100
n2	1900
n3	1800
n5	850
n7	2600
n8	900
n12	700
n20	800
n25	1900
n28	700
n34	2100
n38	2600
n39	1900
n40	2300
n41	2500
n50	1500
n51	1500
n66	1700/2100
n70	2000
n71	600
n74	1500
n77	3700
n78	3500
n79	4700
n257	28000
n258	26000
n260	39000
n261	28000

■ 3.8.1 FDD a TDD

V mobilních sítích se uplatňují dva hlavní koncepty rozdělení frekvenčního spektra pro přenos ve směrech downlink a uplink. Frekvenční dělení FDD (Frequency Division Duplex) rozděluje dané frekvenční pásmo na dvě části, kdy jedna část pásma je vyhrazena pro směr downlink a druhá část pro směr uplink. Přenos probíhá ve stejný čas v obou směrech. Časové dělení TDD (Time Division Duplex) využívá celou šířku frekvenčního pásma pro přenos ve směrech downlink i uplink. Přenos probíhá v jednom čase pouze pro jeden ze směrů. Přenos ve směrech downlink a uplink probíhá zvlášť v různých časových slotech. [16]

3.9 Agregace pásem

Koncept agregace pásem (CA), byl poprvé představen u sítí LTE-A. Jeho cílem je zvýšit přenosovou kapacitu pro jednotlivé terminály pomocí sdružování nosných. Jednotlivá sdružovaná pásma jsou označována jako nosná komponenta. LTE-A podporuje šířku frekvenčního pásma nanejvýš 20 MHz. LTE-A nabízí kombinování až pěti pásem současně, čímž lze dosáhnout celkové šířky pásma až 100 MHz. Agregace pásem je možná jak pro sousedící komponenty, tak pro nesousedící komponenty. Při sdružování nesousedících komponent se nejedná o přenos v jednom pásmu, což vyžaduje více vysílačů a přijímačů. [1]

5G sítě podporují agregaci až 16 nosných komponent. Sdružování nosných LTE-A a NR je možné a nazývá se duální konektivita (DC). Agregace pásem je používána u frekvenčních pásem z FR1 i FR2. Sdružování nosných je možné u FDD i TDD. [16]

3.10 DSS

Dynamické sdílení spektra (Dynamic Spectrum Sharing) je technologie umožňující sdílení určitého frekvenčního pásma pro síť LTE i 5G. Tato technologie se používá zejména ve středních pásmech využívajících FDD. Principem DSS je použití spektra, původně používaného pro síť LTE, pro síť LTE a 5G zároveň. V rámci DSS se konfiguruje MBSFN (Multimedia Broadcast Single Frequency Network) tak, aby se umožnilo použití MBSFN podrámců pro periodický přenos NR synchronizačních signálních bloků (SSB). [17]

3.11 VoNR

Voice over New Radio je VoIP, ale přes mobilní síť 5G. Jedná se o obdobu technologie VoLTE, která se používá u sítí LTE. VoNR umožňuje přenos hlasu společně s daty na principu paketů. Oproti VoLTE, které přineslo rychlejší spojování hovorů a lepší kvalitu hovoru, než při hovorech přes síť 2G a 3G, přináší VoNR další zrychlení spojování hovorů a vylepšení kvality hovoru. Stejně jako VoLTE podporuje VoNR současně volání a používání mobilních datových služeb. [18]

Kapitola 4

5G v obecném použití, průmyslu a energetice

Jako mobilní sítě pro obecné použití jsou v této kapitole chápány veřejné pozemní mobilní sítě. V rámci toho byl proveden stručný popis stavu mobilních sítí v Česku. V dalších částech této kapitoly jsou vysvětleny termíny Průmysl 4.0 a Smart Grid, dále je rozebráno uplatnění sítí 5G v těchto oblastech.

4.1 5G a ostatní mobilní sítě v Česku

V Česku jsou tři hlavní operátoři, kteří poskytují veřejné pozemní mobilní sítě. Jedná se o společnosti T-Mobile Czech Republic, O2 Czech Republic a Vodafone Czech Republic. V Česku jsou aktuálně provozovány mobilními operátory sítě 2G, 4G a 5G. Tyto sítě využívají různá pásma, jejichž využívání se v průběhu let měnilo. Mobilní sítě dále poskytují společnosti Nordic Telecom a PODA, které provozují sítě LTE [19], nejedná se ale o plošné mobilní služby, ale o fixní internetové připojení přes mobilní síť (FWA).

4.1.1 Využívaná pásma

Sítě druhé generace GSM, které obsluhují převážně hlasové služby na starších zařízeních bez podpory VoLTE, využívají pásmo 900 MHz. Pásmo 900 MHz bylo dříve využíváno operátorem Vodafone i pro LTE. Pro GSM se dále využívá pásmo 1800 MHz, které se pro GSM dříve využívalo ve větší míře, ale většina tohoto pásma byla uvolněna ve prospěch LTE. Pro plošné pokrytí sítěmi LTE je využíváno pásmo 800 MHz. Další pásma využívaná pro LTE jsou 2100 MHz, 2600 MHz a 3700 MHz. Pásmo 2100 MHz bylo dříve využíváno pro sítě 3G, které jsou dnes již vypnuty. [19] Aktuálně využívané technologie mobilních sítí na jednotlivých frekvenčních pásmech v Česku jsou uvedeny v tabulce 4.1. V tabulce 4.2 jsou uvedena využívaná frekvenční pásma pro sítě 4G jednotlivými poskytovateli Česku.

Tabulka 4.1: Aktuálně využívané technologie mobilních sítí na jednotlivých frekvenčních pásmech [19]

frekvenční pásmo	technologie
700	NR
800	LTE
900	GSM
1800	GSM, LTE, NR
2100	LTE, NR
2600	LTE
3500	NR
3700	LTE, NR

Tabulka 4.2: Poskytovatelé mobilních sítí 4G a jimi používaná pásma [19]

poskytovatel	frekvenční pásmo
T-Mobile, O2, Vodafone	800 (20)
T-Mobile, O2, Vodafone	1800 (3)
T-Mobile, O2, Vodafone	2100 (1)
T-Mobile, O2, Vodafone	2600 (7)
O2	2600 (38) TDD
O2, PODA, Nordic Telecom	3700 (43)

4.1.2 Využívaná pásma 5G

Mobilní sítě 5G začali operátoři v Česku spouštět v druhé polovině roku 2020. Operátoři v Česku využívají pro sítě páté generace následující kmitočtová pásma, která spadají výhradně do FR1. Všechny komerční 5G sítě českých operátorů jsou spuštěny v režimu NSA. Někteří operátoři, především Vodafone, využívají technologii DSS. [19]

Tabulka 4.3: Používané kmitočty 5G v České republice [19]

operátor	frekvenční pásmo	šířka kanálu	
T-Mobile	700 (n28)	10 Mhz	NSA
O2	1800(n3)	10 Mhz	NSA
T-Mobile (metro)	1800 (n3)	20 Mhz	NSA,DSS
Vodafone (metro)	1800 (n3)	20 Mhz	NSA,DSS
O2 (metro)	2100 (n1)	15 Mhz	NSA
Vodafone	2100 (n1)	15 Mhz	NSA,DSS
Vodafone	2100 (n1)	20 Mhz	NSA,DSS
T-Mobile (metro)	2100 (n1)	15 Mhz	NSA,DSS
Vodafone	3500 (n78)	40 Mhz	NSA
O2	3700 (n77)	40 Mhz	NSA

Frekvenční pásmo 3500 MHz má přiděleno i operátor T-Mobile a společnost CentroNet, ale nejsou jimi momentálně využívána. Operátor T-Mobile má dále přiděleno pásmo TDD 2600 MHz, které také v současnou chvíli nevyužívá. Všichni tři hlavní operátoři mají přidělena pásma 700 MHz, ale svou část využívá v tuto chvíli pouze T-Mobile pro 5G. [19] V budoucnu lze očekávat aukce dalších kmitočtů. Především se mluví o přidělu pásem v oblasti 26 GHz (24,25 – 27,5 GHz) [20], které by umožnily provoz 5G sítí v FR2, což by mohlo umožnit přenosové rychlosti v gigabitech za sekundu.

4.2 Průmysl 4.0

Probíhající čtvrtá průmyslová revoluce je označována jako průmysl 4.0 (Industry 4.0). S průmyslem 4.0 se zavádí pojem chytrá továrna (smart factory) [21]. Průmysl 4.0 je založen na kyberneticko-fyzikálních systémech, které jsou umístěny v chytrých továrnách. Dále zde dochází k propojení internetu věcí (IoT) s výrobou, což umožňuje systémům vzájemné sdílení dat, jejich analýzu a případné rozhodování na základě těchto dat. Mezi technologie, které se uplatňují v průmyslu 4.0 se řadí robotika, umělá inteligence, rozšířená realita a průmyslové IoT (IIoT). [22]

Průmysl 4.0 přináší mnohé, zejména [21]:

- Umožňuje vzájemnou komunikaci strojů, zařízení, senzorů a lidí přes IoT
- Přidání schopnosti samostatného rozhodování systémů z oblasti automatizace a robotiky
- Vznik kyberneticko-fyzikálních systémů, které sdílejí data v reálném čase
- Vyšší integraci technologií a prediktivní analýzu umožňující zvýšení efektivity a snížení nákladů výroby

Pilíře průmyslu 4.0 jako je automatizace, automatické řízení a velké množství propojených zařízení kladou vysoké nároky na konektivitu. Mezi tyto požadavky se řadí velmi vysoká spolehlivost, velmi nízká odezva a vysoké přenosové kapacity. Nejvyšší spolehlivost je vyžadována při řízení systémů zásadního významu (mission-critical control). Kvůli těmto požadavkům nemohou podniky v éře průmyslového IoT spoléhat pouze na bezdrátové služby v nelicencovaných pásmech, jako je Wi-Fi, ZigBee a LPWAN. [21]

4.3 Průmysl 4.0 a 5G

5G sítě nabízí využití nejen pro komerční mobilní sítě, ale i pro průmyslové aplikace. S příchodem průmyslu 4.0 je vyžadována kvalitní konektivita (kapitola dříve), klíčovou oblastí pro průmyslové aplikace jsou ultra spolehlivé komunikace s nízkou odezvou (uRLLC). 5G sítě nabízí možnosti připojení pro široké spektrum zařízení a díky tomu mohou hrát klíčovou roli v průmyslu. Hlavní užitek z průmyslu 4.0 využívající 5G budou společnosti zaměřené

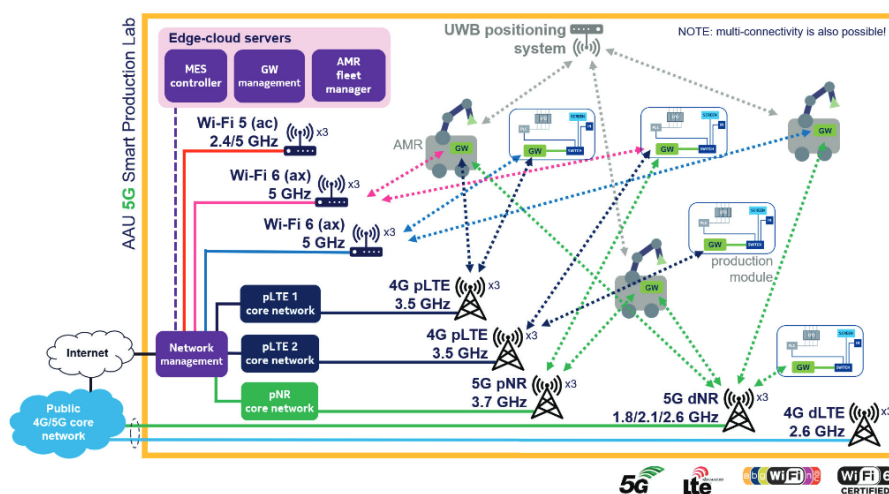
na provozní technologie, v sektorech jako je výroba a logistika. V těchto společnostech mohou být ve velkém využívány různé scénáře použití automatizace, které mají přísné nároky na dostupnost, spolehlivost, odezvu a bezpečnost. Tyto nároky mohou být ekonomicky splněny pomocí technologie 5G. Průmyslové 5G sítě se řadí do kategorie neveřejných sítí NPN. Privátní sítě ve výrobě mohou obsluhovat velké množství zařízení, jako jsou například roboti a senzory. Použití privátních sítí v průmyslu je žádoucí kvůli velmi vysokým požadavkům na bezpečnost, soukromé sítě mívají omezený přístup do internetu, což umožňuje ochranu vůči vnějším útokům. Privátní sítě dále na rozdíl od veřejných umožňují přístup pouze vybraným zařízením ve vymezené oblasti. To umožňuje využití plné kapacity sítě pro vlastní zařízení. [5]

3GPP dále zavádí dělení neveřejných sítí NPN na dvě kategorie [5]:

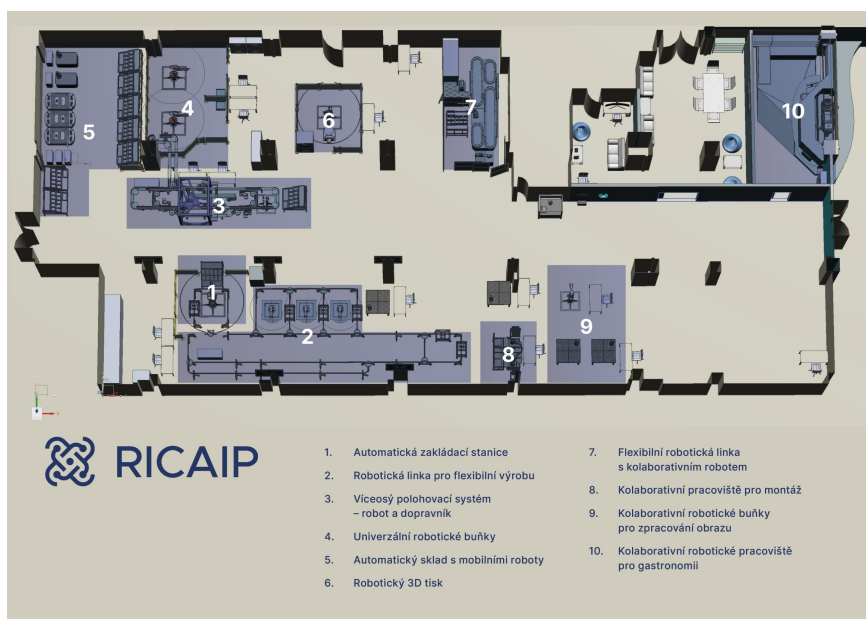
- Stand-alone NPN – privátní síť, která je nezávislá na síťových funkcích poskytovaných mobilním operátorem, dále je zcela izolovaná od veřejné pozemní mobilní sítě
- Public network integrated NPN – privátní síť využívající pro svůj provoz veřejnou pozemní mobilní síť

4.3.1 Ukázka schématu testbedu průmyslu 4.0

Akademici z dánské Aalborg University využili řadu bezdrátových technologií pro komunikaci v rámci jejich testbedu průmyslu 4.0. Zkoumali mimo jiné odezvy v bezdrátových sítích Wi-Fi, mobilních sítích 4G a 5G. Zaměřili se na průmyslové využití privátních sítí, ale i veřejných mobilních sítí. Na obrázku 4.1 je ukázka schématu testování bezdrátových řešení komunikace v rámci testbedu průmyslu 4.0. Na druhém obrázku 4.2 se nachází schéma testbedu průmyslu 4.0 v CIIRC ČVUT, ve kterém probíhalo praktické měření privátní 5G sítě v rámci této práce.



Obrázek 4.1: Schéma testování autorů z Aalborg University [23]



Obrázek 4.2: Schéma testbedu průmyslu 4.0 [24], ve kterém probíhalo praktické měření

4.4 Smart Grid

Smart Grid, česky inteligentní síť, je elektrická napájecí síť, která má schopnost rychle regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie v závislosti na aktuální situaci v síti. Inteligentní síť integruje moderní komunikační prostředky a automatizaci do energetiky. Principem inteligentní sítě je obousměrná komunikace mezi stranou výroby a stranou spotřeby energie v reálném čase. Všechny prvky v síti jsou důkladně monitorovány a řízeny. [25] V současnosti bývají inteligentní sítě vnímány jako jeden z hlavních bodů aktuálních energetických strategií. [26] V inteligentních sítích se generuje a zpracovává značné množství dat, pro jejichž přenos se využívá velké množství datových cest mezi velkým množstvím zařízení. Všechny důležité informace jsou centrálně sdíleny. Kvůli vysokým nárokům na konektivitu je odpovídající komunikační systém klíčovým prvkem v inteligentních sítích budoucnosti. [26]

4.4.1 Komunikace ve Smart Grid

Komunikační úrovně inteligentní sítě lze rozdělit na tři hlavní úrovně, které propojují uvedené části přenosové sítě [27]:

- Páteřní síť (Backbone Network) – propojení centrálního systému se stanicemi VVN
- Síť páteřního připojení (Backhaul Network) – propojení na úrovni VN
- Přístupová síť (Access Network) – úroveň NN, připojení koncových uživatelů do Smart Grid

Kapitola 5

Metodika ČTÚ

Při testování mobilních i pevných sítí elektronických komunikací je vhodné vycházet z ucelené metodiky. Měřicí metody použité v rámci této bakalářské práce jsou inspirovány touto metodikou ČTÚ, ze které byl proveden výtah. Dále zde byly přidány stručné popisy protokolů TCP a UDP a vysvětlení jednotek rádiových parametrů mobilních sítí.

5.1 Úvod

Český telekomunikační úřad (ČTÚ) v rámci svých pravomocí provádí měření datových parametrů mobilních sítí. V březnu 2021 vydal ČTÚ novou metodiku pro měření mobilních sítí; Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací, verze 2.3.[29] Metodika vymezuje pokyny pro měření mobilních sítí, kterými se ČTÚ řídí při kontrolních měření mobilních sítí, které mohou být stacionární, anebo za pohybu (typicky drive-testy). [29]

Měřicí metody v metodice ČTÚ vycházejí z dokumentů, které vydalo Sdružení evropských regulačních orgánů v oblasti elektronických komunikací BEREC (The Body of European Regulators for Electronic Communications). [29]

ČTÚ o své metodice uvádí [29]:

„Účelem tohoto dokumentu (dále jen „Metodika“) je popsat a sjednotit postup pro měření a vyhodnocování datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací, a to z hlediska kvality přístupu koncového uživatele k službě přístupu k internetu, popřípadě i k dalším službám.“

5.2 Vymezení měřících stran a přenosové trasy

Měřicí server je měřicí strana, která v sestupném směru poskytuje data protější straně (terminálu), na její vyžádání. Měřicí server je zařízení připojené k internetu, a to s dostatečnou propustností, která nebude limitovat samotné měření. Měřicí server, jež je součástí Měřicího systému elektronických komunikací má dostatečně kapacitní konektivitu do peeringového uzlu NIX.CZ. [29]

Měřicí terminál je měřicí strana na protější straně od měřicího serveru. Tato strana je v případě datového přenosu v sestupném směru příjemcem dat. Obsahuje měřicí nástroje, aby mohla provádět měření v souladu s touto metodikou. Výkon měřicího terminálu musí být dostatečně vysoký, aby nezkrusoval výsledky měření. [29]

Přenosová trasa se skládá z přenosových uzlů, kde po sobě jdoucí uzly jsou spojeny. Měřicí terminál je prvním přenosovým uzlem a Měřicí server je posledním přenosovým uzlem. Pro měření se využívá základní měřicí interval o délce 1 sekunda [29]

■ 5.3 Síťové protokoly

Testování v rámci metodiky ČTÚ i v rámci měření v této práci probíhá měření v protokolech TCP a UDP, které jsou hojně využívány v rámci internetového provozu.

■ 5.3.1 TCP

Transmission Control protokol je internetový protokol zajišťující spolehlivý datový přenos. Před samotným přenosem provádí TCP handshake, což je proces zahájení a potvrzení spojení. Mezi hlavní vlastnosti TCP patří potvrzování o doručení, retransmise, pozdržení přenosu v případě zahlcení sítě a jednoduchá detekce chyb. TCP je pomalejší než UDP, neboť provádí kontrolu chyb a v případě chyb provádí retransmise chybných částí dat. Aplikace nachází TCP v podstatě všude, kde je vyžadována celistvost přenášených dat. [30]

■ 5.3.2 UDP

User Datagram Protocol nezaručuje spolehlivý datový přenos. Před samotným přenosem nenavazuje protokol UDP spojení. U UDP může tedy docházet ke ztrátě dat. UDP proto nachází uplatnění u aplikací, kterým nevádí ztráta paketů. Ačkoliv UDP provádí kontrolu chyb, chybné pakety zahazuje, díky čemuž je rychlejší než TCP. UDP protokol se používá například ve VoIP a online hrách, vyžadujících rychlou odezvu. [30]

■ 5.4 Měření TCP protokolem

Při měření protokolem TCP zvolilo ČTÚ tři základní parametry, které mají značnou vypovídající hodnotu pro koncového uživatele o kvalitě internetového mobilního připojení. Jedná se o rychlosti download, upload a zpoždění ve smyčce (RTT). [29]

■ 5.4.1 Download a Upload

Download, neboli sestupná propustnost datového toku v TCP protokolu, je přenosová rychlost datového toku ve směru k uživateli. Upload, také vzestupná propustnost datového toku v TCP protokolu, je přenosová rychlost datového toku ve směru k uživateli. Rychlosti odpovídají rychlostem na 4. transportní vrstvě ISO/OSI modelu. Rychlosti jsou uváděny v Mbit/s. [29]

■ 5.4.2 RTT

RTT (Round Trip Time), česky zpoždění ve smyčce. Jedná se o dobu od odeslání prvního bitu segmentu TCP a příjmem potvrzení o odeslání posledního bitu segmentu TCP. RTT je měřeno v milisekundách. [29]

■ 5.5 Měření UDP protokolem

Testování připojení pomocí UDP protokolu slouží k vyhodnocení schopnosti sítě poskytovat koncovým uživatelům zejména služby v reálném čase, citlivé na kolísání rychlosti připojení. Mezi takové služby patří například VoIP (Voice over IP), tyto služby využívají UDP na 4. transportní vrstvě modelu ISO/OSI. [29] Přenosová rychlost ke směru k uživateli se označuje jako downlink (sestupná rychlost). Přenosová rychlost ve směru od uživatele se nazývá uplink (vzestupná rychlost). Jako další parametry se měří zpoždění paketů IPTD (RTT), kolísání zpoždění paketů (jitter) IPDV a také chybovost paketů IPER a ztrátovost paketů IPLR (packet loss). [29]

■ 5.5.1 Downlink a Uplink

Sestupná datová rychlost od uživatele v protokolu UDP je označována jako downlink. Přenosovou rychlost vzestupnou od uživatele nazýváme uplink. Narozdíl od měření na protokolu TCP se měří u UDP přenosová rychlost na 3. síťové vrstvě modelu ISO/OSI. Rychlost se určuje podle standardu ITU-T Y.1540. [29]

■ 5.5.2 Zpoždění paketů IPTD

Zpoždění paketů, IPTD (IP packet transfer delay) je časové zpoždění mezi odesláním a příjmem paketu. Běžně se jedná o zpoždění ve smyčce RTT. Jedná se o čas mezi odesláním paketu uživatelem a příjmem paketu, který je zpětně odeslán uživateli od poskytovatele. [29]

■ 5.5.3 Kolísání zpoždění paketů IPDV (jitter)

Kolísání zpoždění paketů, označované zkratkou IPDV (IP packet delay variation), známé především jako jitter, je rozptyl zpoždění. Jedná se o hodnotu, která je rozdílem mezi typickou dobou zpoždění paketu r_{pk} a skutečným zpožděním paketu p_k . [29]

$$\text{IPDV} = \sum_{k=1}^K |p_k - r_{pk}|; [s; s, s] \quad (5.1)$$

■ 5.5.4 Chybovost paketů IPER

Chybovost paketů, označovaná jako IPER (IP packet error ratio), je poměr počtu chybně doručených paketů E_n k počtu všech odeslaných paketů S_n směrem k poskytovateli. [29]

$$\text{IPER} = \frac{\sum_{n=1}^N E_n}{\sum_{n=1}^N S_n} \cdot 100; [\%; -, -] \quad (5.2)$$

■ 5.5.5 Ztrátovost paketů IPLR

Ztrátovost paketů, packet loss, IPLR (IP packet loss ratio) je poměr počtu nedoručených paketů L_n k počtu všech odeslaných paketů S_n směrem k poskytovateli. [29]

$$\text{IPLR} = \frac{\sum_{n=1}^N L_n}{\sum_{n=1}^N S_n} \cdot 100; [\%; -, -] \quad (5.3)$$

■ 5.5.6 Soubor identifikačních parametrů

Soubor identifikačních parametrů obsahuje důležité informace o měření, jako místo a čas měření datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací. Musí být uveden přesný čas zahájení měření, a to i jednotlivých testů v rámci měření. Přesné místo je uvedeno pomocí GNSS souřadnice, které může být doplněno i adresou, pokud je známa. Dále jsou v souboru uvedeny informace o měřicím terminálu a jednoznačná identifikace měřicího zařízení. V souboru je třeba uvést, zda se jedná o stacionární, nebo nestacionární měření. [29]

■ 5.6 Soubor rádiových parametrů

Soubor rádiových parametrů obsahuje hodnoty rádiových signálů, především výkon přijímaného referenčního signálu RSRP a poměr odstupu signálu k šumu SINR. Platí zde limitní hodnoty rádiových signálů, která se vztahují pro jednotlivá kmitočtová pásma, viz tabulka. [29]

■ 5.6.1 Rádiové parametry

Pro měření úrovně a kvality signálu v mobilních sítích se používají následující rádiové parametry signálů. [31]

- RSSI (Received Signal Strength Indicator) – ukazatel celkového výkonu přijatého signálu, včetně šumu a interference, používaný obvykle u 3G sítí [dBm]
- RSRP (Reference Signal Receive Power) – ukazatel průměrného výkonu referenčního signálu, používaný obvykle u 4G a 5G sítí [dBm]
- RSRQ (Reference Signal Received Quality) ukazatel kvality signálu [dB]
- SNR (Signal to Noise Ratio) – odstup signál/šum [dB]
- SINR (Signal to Noise + Interference Ratio) – odstup signálu od šumu a interference [dB]

■ 5.6.2 Limitní hodnoty

Tabulka 5.1: Limitní hodnoty rádiových signálů pro jednotlivá kmitočtová pásma mobilních sítí [29]

Frekvenční pásmo [MHz]	RSRP pro obydlené území [dBm]	RSRP pro obydlené území [dBm]	RSRP pro silniční koridory [dBm]	RSRP pro železniční koridory [dBm]	SINR [dBm]
700	-118	-109	-118	-114	-5
800	-118	-109	-118	-114	-5
900	-118	-109	-118	-114	-5
1800	-118	-107	-118	-113	-5
2100	-118	-106	-118	-113	-5
2600	-118	-105	-118	-112	-5
3400-3800	-118	-100	-118	-109	-5

■ 5.7 Měřicí nástroj iPerf3

iPerf3 je open source nástroj pro testování výkonnosti sítě, je dostupný například pro OS Windows a Linux. Využívá princip klient/server. iPerf3 podporuje protokoly TCP, UDP a další, umožňuje široké možnosti nastavení. Nástroj iPerf3 umí měřit zpoždění, propustnost, včetně propustnosti více paralelních spojení najednou. Ve výsledcích testů je soubor datových parametrů v závislosti na parametrech testu. [29]

■ 5.8 Měřicí nástroj FlowPing

FlowPing je stejně jako iPerf3 nástroj pro testování výkonnosti sítě. Nástroj je dostupný pod licencí GNU GPLv3. Nástroj se do jisté míry podobá aplikaci Ping, která využívá protokol ICMP. Nástroj FlowPing ovšem umožňuje měřit výhradně pomocí protokolu UDP. FlowPing se liší oproti nástroji iPerf3 tím, že při testech umožňuje generovat proměnný datový tok. Dále umožňuje provádět zátěžové testy s konstantním datovým tokem. Nástroj FlowPing díky svým vlastnostem umožňuje testovat parametry sítě, které ovlivňují kvality služeb v reálném čase, například streamování videa. [29]

Kapitola 6

Testovací platforma

6.1 F-Tester

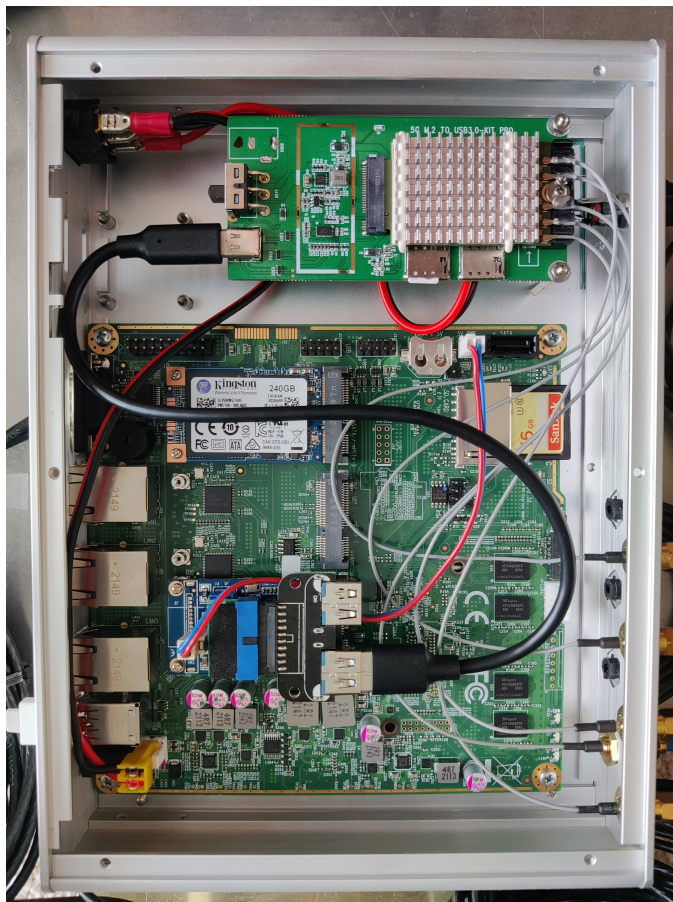
Pro testování mobilních sítí 5G v rámci této práce byla využita platforma F-Tester, vyvinutá na katedře telekomunikační techniky na FEL ČVUT v Praze.

Skupina zařízení F-Tester slouží pro měření parametrů sítí elektronických komunikací na rodině protokolu TCP/IP. V konfiguračním rozhraní F-Testeru lze definovat jednotlivé testy a ty skládat do měřicích scénářů. Výsledky měření jsou vyhodnocovány a zobrazovány do tabulek a přehledných grafů. Při testování komunikačních sítí se vyhodnocují parametry jako přenosové rychlosti, chybovost, zpoždění ve smyčce a další. F-Tester má několik variant, například F-Tester NGA 1GE pro měření pevných sítí, F-Tester 5G pro měření mobilních sítí a F-Tester 4drive-box pro měření mobilních sítí více operátorů současně. [32]

6.2 F-Tester 5G

V této práci bylo cílem testovat mobilní síť 5G, proto byla použita variant F-Tester 5G, která disponuje modemem pro síť 5G, čímž se odlišuje od varianty pro měření pevných sítí F-Tester NGA 1GE. Na přední straně zařízení se nacházejí porty označené jako Net1 a Net2 s rozhraním RJ-45 10/100/1000BASE-T, tyto porty slouží jako datové rozhraní pro testování fixních sítí. Dále je zde přítomen port označený jako Mgmt, se stejným rozhraním jako Net1, který je určen pro správu zařízení přes webové rozhraní. Ke správě je možné také využít port Console s konektorem DB9. Připojení externích zařízení je možné přes dva USB porty. Pro nano SIM karty jsou zde přítomny dva sloty. Také je zde přítomen vypínač napájení. Na zadní straně je možno nalézt pět anténních konektorů, čtyři pro antény v konfiguraci až 4x4 MIMO a jeden pro anténu GNSS. Pro napájení je zde umístěn jack konektor pro připojení ke zdroji 12 V. Na základní desce je připojena 16 GB SD karta pro firmware a mSATA SSD o kapacitě 240 GB pro ukládání scénářů a naměřených dat. V jednotce F-Tester 5G použité v této práci je do mPCIe slotu zapojena rozšiřující karta USB, do které je USB kabelem připojen 5G

M.2 to USB 3.0 KIT PRO, který disponuje slotem M.2 a dvěma sloty pro nano SIM. Do tohoto slotu je připojen 5G modul Telit FN980, z něhož jsou vyvedeny kontakty k anténním konektorům RF - SMA.



Obrázek 6.1: Vnitřní konfigurace zařízení F-Tester 5G

6.2.1 Telit FN980

Konektivitu pro mobilní sítě v zařízení obstarává 5G modul od výrobce Telit ve formátu M.2 karty. Na modulu se nachází 5G modem Snapdragon X55 od společnosti Qualcomm, který se používá i v chytrých telefonech. Podpora mobilních sítí 4G a 5G odpovídá 3GPP Rel. 15. Přítomna je podpora sítí 5G v režimech SA i NSA. Modem podporuje technologii 4x4 MIMO a modulaci až 256-QAM. Podporovaná 5G pásma jsou n1, n2, n3, n5, n7, n12, n14, n20, n28, n30, n41, n66, n71, n77, n78 a n79. Maximální propustnosti modemu v síti 5G jsou 5,5 Gbit/s pro směr downlink a 2,7 Gbit/s pro směr uplink. Starší generace mobilních sítí 4G a 3G jsou podporovány, umožněna je agregace až 7 pásem ve 4G s maximálními propustnostmi 2 Gbit/s pro downlink a 211 Mbit/s pro uplink. [33]

6.3 Úpravy pro měření za chůze

Měření provedené v této práci vyžadovala vhodné úpravy, aby bylo možné F-Tester 5G provozovat za chůze (walk test) a pohodlně ovládat. Zvoleno bylo umístění F-Testeru do batohu. Pro chůzi se zařízením bylo nutné vymyslet alternativní napájení, neboť použití síťového adaptéru nebylo možné. Jako napájení byl vybrán 12V olovený akumulátor s kapacitou 7,2 Ah. K propojení akumulátoru se zařízením byl vytvořen napájecí kabel, kde na jednom konci byly připájeny koncovky pro připojení ke kontaktům akumulátoru a na straně druhé byl připájen DC jack. Do napájecího obvodu byla přidána trubičková proudová pojistka 3,15 A, aby bylo možné obvod bezpečně rozpojit při nepoužívání zařízení a zároveň ochránit zařízení či akumulátor před případným nadproudem. K F-Testeru byly krom akumulátoru připojeny také dvě anténní sady pomocí konektorů RF – SMA. Na první anténě se nachází dva konektory, neboť se jedná o anténu 2x2 MIMO pro mobilní síť. Druhá anténa je vybavena třemi konektory, dva jsou, stejně jako u antény první, pro anténu 2x2 MIMO pro mobilní síť, třetí konektor je pro anténu GNSS. Použitím těchto dvou antén bylo dosaženo anténní konfigurace 4x4 MIMO pro data a GNSS pro záznam polohy. F-Tester se běžně spravuje přes rozhraní RJ-45 10/100/1000BASE-T. Použití ethernet kabelu pro ovládnání zařízení nebylo žádoucí, neboť kabel a další zařízení pro správu, které by bylo vybaveno portem RJ-45, by značně komplikovalo chůzi s měřicím aparátem. Další výzvou proto bylo zprovoznění bezdrátového rozhraní pro správu F-Testeru například z mobilního telefonu. Pro tento úkol se nabízelo jako vhodné využít standard bezdrátové komunikace Wi-Fi, protože je podporován chytrými telefony. Pro vytvoření Wi-Fi sítě byl k F-Testeru připojen malý router pomocí ethernet kabelu pro komunikaci a pomocí USB kabelu pro napájení. Konkrétně byl použit nano router TP-Link TL-WR802N. Router byl nakonfigurován do režimu přístupového bodu (AP), LAN byla nastavena jako statická IP z rozsahu F-Testeru, který je 172.16.1.1/24. Přesněji byla jako výchozí brána vybrána IP adresa 172.16.1.50. Pro zařízení, která se připojují do vzniklé Wi-Fi sítě byl v nastavení přístupového bodu povolen DHCP server. Tato úprava umožňuje pohodlné ovládnání F-Testeru přes Wi-Fi za použití chytrého telefonu nebo notebooku.

Wireless 2.4GHz

	Operation Mode: Access Point	
	Wireless Radio: Enabled	
	Name(SSID): TP-Link_FT5G	
	Mode: 11bgn mixed	
	Channel: Auto(Channel 7)	
	Channel Width: 20MHz	
	MAC Address: 0C:80:63:AA:E8:8E	
	MAC Address: 0C:80:63:AA:E8:8E	
LAN		DHCP Settings
MAC Address: 0C:80:63:AA:E8:8E		DHCP Server: <input type="radio"/> Disable <input checked="" type="radio"/> Enable
IP Address: 172.16.1.50		Start IP Address: <input type="text" value="172.16.1.100"/>
Subnet Mask: 255.255.255.0		End IP Address: <input type="text" value="172.16.1.199"/>

Obrázek 6.2: Konfigurace access pointu

Při umístění F-Testeru do batohu společně s akumulátorem, přístupovým bodem a anténami bylo vhodné, aby jednotlivé komponenty byly mechanicky fixovány, a aby především antény měly jasně definovanou polohu. Pro upevnění jednotlivých komponent byl vytvořen rám ze dvou hliníkových profilů, které byly spojeny k sobě pomocí šroubů a matic. Do spodní části rámu byl umístěn akumulátor. V rámu byly vyvrtány otvory pro upevnění akumulátoru a kabeláže pomocí lanek a stahovacích pásek. Do centrální části byl umístěn F-Tester na distanční sloupky, vedle něj byl připevněn přístupový bod. Pro antény byla vybrána horní část rámu. Takto vytvořená konstrukce byla umístěna do výsledného měřicího batohu.



Obrázek 6.3: Měřicí konstrukce



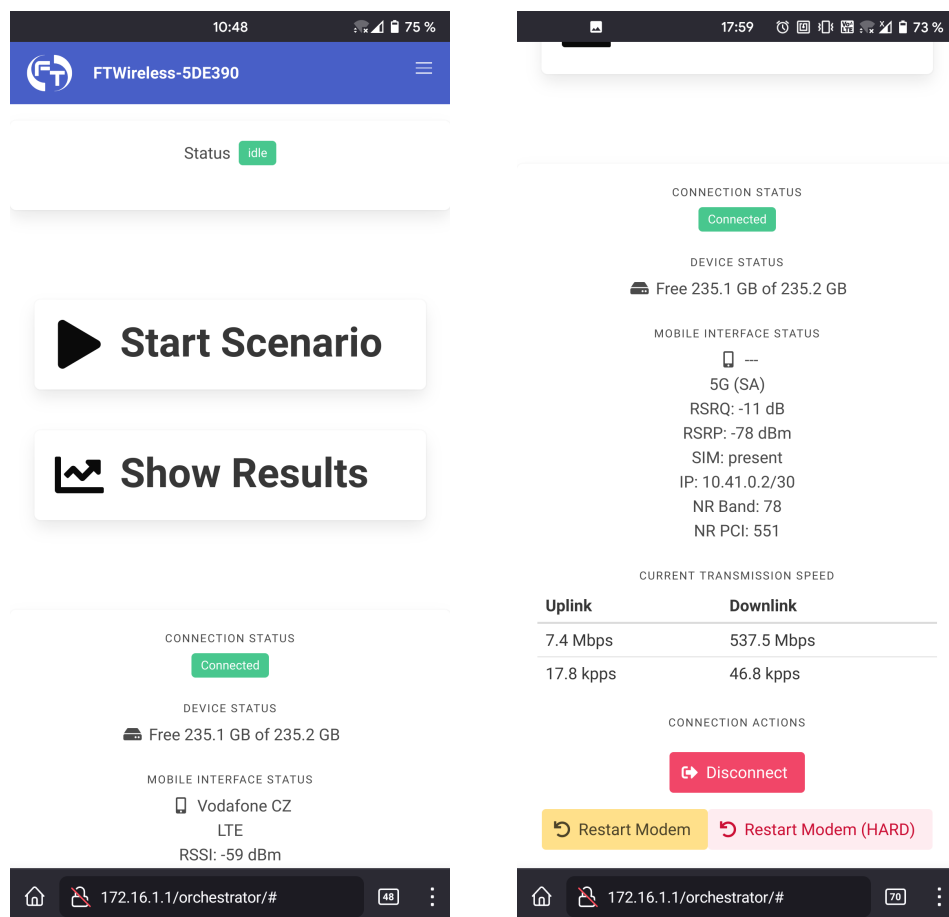
Obrázek 6.4: Měřicí konstrukce v měřicím batohu

V rámci následujících kapitol byl pro měření použit tento měřicí batoh se zařízením F-Tester 5G.

6.4 Testování pomocí platformy F-Tester

Testovací webové grafické rozhraní platformy F-Tester je přístupné přes webový prohlížeč. V předešlé sekci je popsáno připojení mobilního telefonu, sloužícího ke konfiguraci, k F-Testeru. Platforma F-Tester nabízí k měření přenosových rychlostí a dalších parametrů připojení nástroje iPerf3 a FlowPing. V rámci platformy F-tester lze vybírat z několika typů testů, především TCP a UDP testy v rámci programu iPerf3 a test FlowPing, využívající protokol

UDP. Testy se skládají do testovacích scénářů, které je poté možné opakovaně spouštět. U jednotlivých testů se nastavuje doba trvání a čas jejich začátku v rámci testovacího scénáře.



Obrázek 6.5: Grafické uživatelské rozhraní zařízení F-Tester 5G na mobilním telefonu

6.4.1 iPerf3 TCP

Test iPerf3 využívající protokolu TCP vyhodnocuje především propustnost sítě, počet retransmisí a zpoždění ve smyčce v rámci TCP. Je třeba nastavit směr přenosu downlink nebo uplink. Nástroj iPerf3 zde umožňuje nastavit až deset paralelních spojení najednou. Mezi další nastavení testu patří velikost okna a maximální velikost TCP segmentu. Dále lze vybrat varianty protokolu TCP jako Cubic, Reno nebo BBR.

6.4.2 iPerf3 UDP

Testování pomocí protokolu UDP pomocí nástroje iPerf3 se používá především pro ověření minimální propustnosti a stability připojení. Obdobně jako u TCP testu je nutné zvolit směr přenosu downlink nebo uplink a dále nastavit počet

paralelních spojení, kterých je možno nastavit až 10. Oproti TCP testu je u testu v protokolu UDP nezbytné zadat fixní bitový tok. Vynásobením počtu paralelních spojení a bitového toku se určí celkový bitový tok. Jako další parametr se nastavuje velikost UDP paketu. Ve výsledcích UDP testu se vyhodnocuje především ztrátovost paketů.

6.4.3 FlowPing

Nástroj FlowPing umožňuje testování v protokolu UDP. Kromě směru přenosu downstream a upstream lze u nástroje FlowPing vybrat i symetrický směr, při kterém probíhá přenos v obou směrech současně. Obdobně jako u iPerf3 UDP testu je třeba nastavit fixní bitový tok. FlowPing navíc umožňuje nastavit proměnlivý bitový tok, u kterého je třeba zadat počáteční a koncový bitový tok. Podporovány jsou navíc složitější časové průběhy, jako schody, dávky a pila.

6.5 Vztah metodiky ČTÚ a metodiky provedených testů v této práci

V souladu s metodikou ČTÚ byly v této práci použity měřicí nástroje iPerf3 a FlowPing. Pomocí nástroje iPerf3 TCP byly vyhodnocovány především propustnosti, které ČTÚ označuje jako download a upload. V této kapitole jsou označovány jako propustnosti ve směrech downlink a uplink. Provedeny byly i testy nástrojem iPerf3 v protokolu UDP pro vyhodnocení ztrátovosti paketů. Provedená měření parametrů IPTD a IDPV, využila nástroje FlowPing, který pracuje s protokolem UDP. V této kapitole jsou tyto parametry označovány jako RTT a jitter. Měřicí terminál pro měření v rámci této práce bylo zařízení F-Tester 5G. Měřicí server byl v případě testování sítě 5G pro průmyslové použití F-Tester NGA 1GE, připojený do lokální sítě v laboratoři pomocí rozhraní ethernet. Měřicí server v rámci testování veřejných sítí 5G byl měřicí server F-Testeru s rozhráním 10GE, umístěný na pracovišti FEL na Karlově náměstí. ČTÚ definuje soubor identifikačních parametrů. Tyto parametry jsou dostupné ve výsledcích testů ve formátech pdf a csv, které jsou dostupné v příloze C.

Kapitola 7

Testování sítě 5G pro průmyslové použití

Měření probíhalo v průmyslové 5G síti, kterou je pokryta laboratoř Průmyslu 4.0 v CIIRC (Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky). Síť byla vybudována v srpnu 2021 společností T-Mobile, která zde použila technologie od firmy Ericsson. Síť je implementována v režimu SA, na rozdíl od veřejných mobilních sítí v Česku, které jsou implementovány v režimu NSA. Jedná se o síť spadající do kategorie privátních sítí NPN. Uplatňován je zde koncept sítě uRLLC, zaměřený na zvláště spolehlivé připojení s nízkou odezvou. Používané frekvenční pásmo je 3500 MHz, označované kódem n78. Šířka pásma je 60 MHz, použitá technika užití spektra je TDD. V rámci TDD jsou využívány tři časové sloty, kdy pro směr downlink jsou vyhrazeny dva časové sloty a pro směr uplink jeden časový slot. Tyto sloty se periodicky opakují a jak je popsáno v TDD, v jeden čas je aktivní pouze přenos v jednom ze směrů.

Hlavní myšlenkou měření bylo projít laboratoř s měřicím batohem a provést testování pokrytí signálem průmyslové 5G sítě. Měřicí batoh umožňuje provádět stacionární měření i měření za chůze (walk testy). Původně bylo zamýšleno provést zde především walk testy, ale bylo zjištěno, že v laboratoři se nachází mnoho vybavení, které znemožňovalo snadný průchod laboratoří. Z tohoto důvodu bylo primárně měřeno stacionárně na vybraných bodech v laboratoři. V okolí laboratoře byla provedena jak stacionární měření, tak walk testy. Laboratoř má obdélníkový půdorys se dvěma výřezy v rozích.

Testování probíhalo ve dnech 5.4.2022, 6.4.2022 a 8.4.2022.

Cílem bylo podrobně změřit přenosové parametry 5G sítě v laboratoři a jejím okolí na jednotlivých místech laboratoře a ověřit kvalitu pokrytí. Hlavní parametry zjišťované testováním byly:

- Propustnost ve směrech downlink a uplink
- Rádiové parametry signálu
- Zpoždění ve smyčce a jitter
- Stabilita přenosových rychlostí a ztrátovost paketů
- Vliv vnějších faktorů na přenosové parametry

V případě testování pomocí protokolu TCP byla zvolena výhradně varianta protokolu cubic.

7.1 Měření propustnosti v jednotlivých bodech laboratoře

Primární měřené veličiny byly propustnosti pro směr downlink a uplink ve stanovených bodech. Pro toto měření bylo nutné vybrat vhodné body. Vybráno bylo pět bodů na pomyslné chodbě, která prochází středem laboratoře, tyto body byly označeny čísly 1-5. Dalších šest bodů, označených čísly 6-11, bylo zvoleno po obvodu místnosti, některé v rozích laboratoře nebo pokud byly nepřístupné, tak v jejich blízkosti. V samotné laboratoři bylo tedy měřeno celkem v 11 bodech. Kromě testování v samotné laboratoři bylo provedeno i testování v jejím bezprostředním okolí. Cílem bylo změřit přenosové parametry sítě za zhoršených příjmových podmínek, v místech za hranicí zamýšleného pokrytí. Mimo laboratoř byly testovány dvě oblasti, a to prosklená chodba před laboratoří a chodník v ulici Jugoslávských partyzánů před touto chodbou. V první oblasti mimo laboratoř, na chodbě, bylo vybráno šest bodů, označených c1-c6. V oblasti chodníku bylo vybráno analogicky dalších šest bodů, označených v1-v6. Umístění těchto venkovní bodů je totožné s umístěním bodů na chodbě, s tím rozdílem, že se jsou posunuty zhruba o tři metry dále od laboratoře.

Měření propustností ve směrech downlink a uplink bylo měřeno v jednotlivých bodech samostatně pro oba směry a poté současně. Testovací scénář v každém bodě trval 180 sekund a obsahoval čtyři testy. Přenos ve směru downlink probíhal prvních 60 sekund a přenos ve směru uplink následujících 60 sekund. Posledních 60 sekund byl spuštěn přenos ve směrech downlink i uplink současně. Cílem testování v obou směrech najednou bylo zjistit, zda při obousměrném přenosu dochází ke snížení přenosových rychlostí oproti přenosu v těchto dvou směrech zvlášť. Použit byl test iPerf3 TCP. U jednotlivých testů v testovacím scénáři bylo vedle délky testů nutné nastavit další parametry. Maximální velikost segmentu TCP byla zvolena 1400 B. Celkový datový tok byl tvořen šesti paralelními streamy.

Pro stanovení vhodné velikosti okna byl nejdříve vytvořen pětiminutový testovací scénář s pěti po sobě jdoucími testy. Tyto testy ve směru downlink byly o délkách 60 sekund s různými velikostmi oken 64 kB, 128 kB, 256 kB, 512 kB a 1024 kB. Byl analogicky zvolen počet šesti paralelních streamů. Maximální velikost TCP segmentu byla zvolena také 1400 B. Test byl proveden v bodě 3. Výsledky testu byly následující:

Tabulka 7.1: Propustnost v bodě 3 při různých velikostech okna v laboratoři

velikost okna [kB]	downlink [Mbit/s]	retransmise
64	180,0	ne
128	298,3	ne
256	468,6	ne
512	469,0	ano
1024	507,7	ano

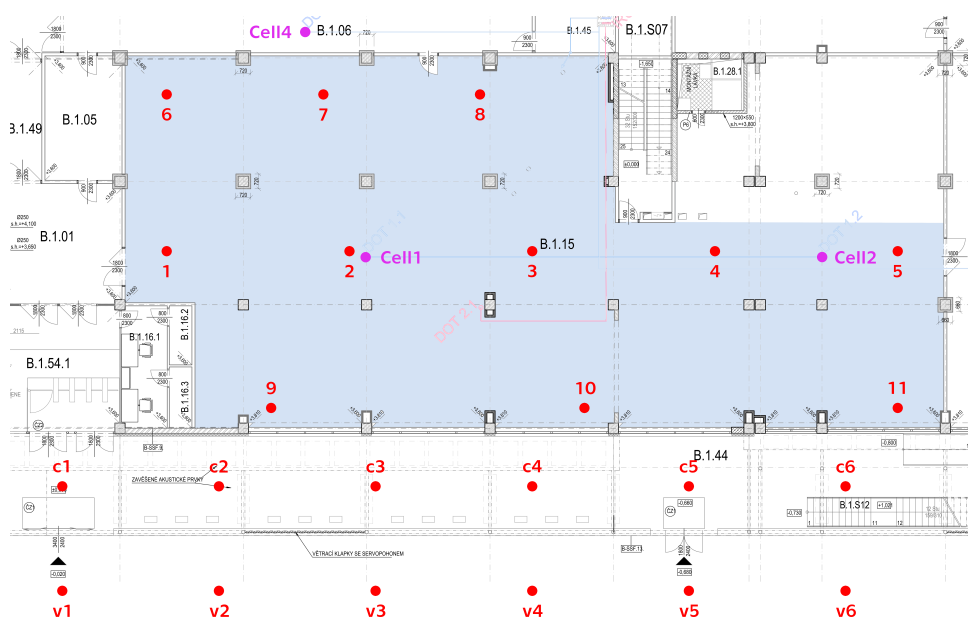
Velikost okna byla zvolena 256 kB, neboť menší velikosti oken nedokázaly využít celou kapacitu sítě a toto testování by neukázalo plný potenciál přenosové kapacity průmyslové 5G sítě. Většími velikostmi oken než 256 kB se dalo orientačně dosáhnout rychlosti vyšší až o zhruba 8 %, ale větší velikost okna by nemusela být vhodná pro situace, kde byl velmi špatný příjem. Také bylo otestováno, že s velikostí okna 512 kB a vyšší dochází k retransmisím, a to už v bodě s výbornými příjmovými podmínkami, což není žádoucí jev. MSS značí maximální velikost TCP segmentu. Zvolené parametry testu iPerf3 TCP:

Tabulka 7.2: Zvolené parametry testu iPerf3 TCP pro testy v laboratoři

délka testu	počet paralelních toků	velikost okna	MSS
60 s	6	256 kB	1400 B

7.2 Naměřené propustnosti a plán laboratoře

Všech 23 měřících bodů bylo zakresleno pomocí červených bodů do části plánu prvního nadzemního podlaží budovy CIIRC, ve kterém se nachází laboratoř Průmyslu 4.0. Prostory hlavní místnosti laboratoře byly v plánu podbarveny modře. Během měření byly v místnosti identifikovány dvě základnové stanice (přístupové body) poskytující 5G pokrytí, které byly označeny fialově jako Cell1, Cell2. Z následně dodaných plánů laboratoře bylo zjištěno, že směrem za pravý okraj plánu, po linii protínající Cell1 a Cell2, se vyskytuje ve vedlejší nepřístupné místnosti buňka Cell3, ta ale vzhledem k výsledkům měření nebyla vůbec zakreslována. Z plánu byla dále zjištěna přítomnost buňky Cell4, na chodbě vedle laboratoře.



Obrázek 7.1: Plán Laboratoře průmyslu 4.0

V tabulce jsou uvedeny naměřené průměrné propustnosti ve směrech downlink a uplink. Uvedeny jsou hodnoty měření, která probíhala v jeden čas zvlášť pro směr downlink a poté zvlášť pro směr uplink. Propustnostem ve směru downlink byly přiřazeny barvy podle barevné škály. Nejvyšší propustnosti jsou označeny zeleně, nejnižší červeně.

Tabulka 7.3: Propustnosti v bodech laboratoře

bod	downlink [Mbit/s]		uplink [Mbit/s]
1	462,9		65,8
2	488,7		65,8
3	487,4		65,9
4	379,5		65,8
5	243,8		41,8
6	470,1		65,8
7	492,5		65,7
8	456,0		65,8
9	478,0		65,8
10	455,0		65,7
11	257,8		48,3
c1	87,7		13,3
c2	109,9		23,5
c3	82,7		17,6
c4	77,6		18,1
c5	67,1		10,6
c6	30,5		2,4
v1	92,2		11,8
v2	122,6		17,4
v3	62,0		8,7
v4	44,3		3,7
v5	23,7		1,3
v6	14,1		0,5

V bodech 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, nacházejících se v levé části laboratoře byly naměřeny nejvyšší přenosové rychlosti nad 450 Mbit/s pro downlink, pro uplink se vždy pohybovaly kolem 65 Mbit/s. Ve zbylých bodech přímo v laboratoři 4, 5 a 11 je znatelný pokles přenosových rychlostí, navzdory přítomnosti buňky Cell2 v bezprostřední blízkosti, což značí, že mohla být v době měření neaktivní. Vzhledem k tomu, že v této síti s TDD se využívají dva časové sloty pro přenos ve směru downlink a jeden časový slot pro přenos ve směru uplink, očekávan byl poměr propustností ve směru downlink a uplink přibližně 2:1. Absence MIMO pro přenos ve směru uplink však způsobila výraznou nesymetrii mezi propustnostmi pro jednotlivé směry.

V tabulce jsou dále zaznamenány naměřené přenosové rychlosti v okolí laboratoře, což je dále rozebráno v sekci walk test v okolí laboratoře.

7.3 Rádiové parametry

V této sekci jsou uvedeny a vyhodnoceny vybrané rádiové parametry, které zařízení F-Tester periodicky ukládá. Podle metodiky ČTÚ jsou klíčové především parametry RSRP a SINR. Hodnotu RSRP jako rádiový parametr

měřené 5G sítě ukládá F-Tester pod označením `nr_rsrp`, hodnotu SINR obdobně `nr_sinr`. Vyhodnocován byl pouze parametr RSRP, neboť u parametru SINR byly v některých bodech s nejvyššími naměřenými propustnostmi téměř výhradně záporné hodnoty. Z tohoto důvodu nešlo tyto hodnoty považovat za relevantní.

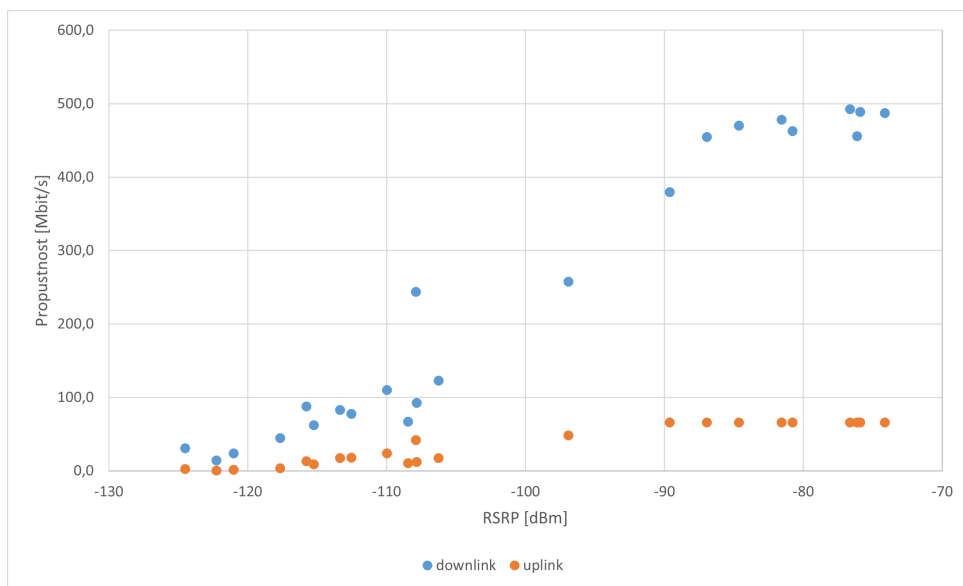
V následující tabulce jsou doplněny další zaznamenané parametry ze souborů formátu csv. Uvedena je průměrná hodnota parametru RSRP. Tato hodnota byla získána převedením všech hodnot, které F-Tester periodicky ukládal během testu v daném bodě z dBm na W, následným zprůměrováním hodnot a převedením průměrné hodnoty z W zpět na dBm. Dále je zde uveden nejvyšší režim MIMO pro směr downlink, který byl během testu dosažen. Technologie MIMO pro směr uplink nebyla během tohoto měření podporována buď na straně sítě, nebo na straně měřicího terminálu. Přenos ve směru uplink tedy probíhal výhradně v režimu 1x1 SISO.

Tabulka 7.4: RSRP a nejvyšší režim MIMO v bodech v laboratoři

	RSRP [dBm]	nejvyšší režim MIMO
1	-81	4x4 MIMO
2	-76	4x4 MIMO
3	-74	4x4 MIMO
4	-90	3x3 MIMO
5	-108	3x3 MIMO
6	-85	4x4 MIMO
7	-77	4x4 MIMO
8	-76	4x4 MIMO
9	-82	4x4 MIMO
10	-87	4x4 MIMO
11	-97	3x3 MIMO
c1	-116	2x2 MIMO
c2	-110	2x2 MIMO
c3	-113	2x2 MIMO
c4	-112	2x2 MIMO
c5	-108	2x2 MIMO
c6	-125	1x1 SISO
v1	-108	2x2 MIMO
v2	-106	2x2 MIMO
v3	-115	2x2 MIMO
v4	-118	1x1 SISO
v5	-121	1x1 SISO
v6	-122	1x1 SISO

V grafu je vynesena závislost propustností pro oba směry přenosu v závislosti na hodnotě RSRP. S narůstajícím přijatým výkonem referenčního signálu narůstaly propustnosti. Body s nejlepšími naměřenými propustnostmi 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10 měly nejvyšší hodnoty RSRP. Z tabulky lze vidět, že

v těchto bodech umožnily dobré příjmové podmínky signálu použití technologie MIMO, která umožňuje navýšení rychlosti přenosu, v nejvyšším režimu 4x4. Ve zbylých bodech laboratoře, kde byly naměřeny nižší hodnoty propustností a RSRP, byl nejvyšší dosažený režim MIMO 3x3. Zatímco ve směru downlink narůstala lehce propustnost i pro hodnoty RSRP -90 dBm a vyšší, propustnosti ve směru uplink pro RSRP -90 dBm a vyšší byly v podstatě vždy 65 Mbit/s. Je možné, že to bylo způsobeno absencí funkce MIMO pro směr uplink v rámci tohoto měření, kdy nebylo možno využít lepší příjmové podmínky signálu pouze s jednou anténou na straně vysílače i přijímače. V limitních příjmových podmínkách mimo laboratoř byly nejnižší hodnoty RSRP, v případě bodů blíž levé části laboratoře se dosahovalo i režimu 2x2 MIMO, v jiných bodech mimo laboratoř byl většinou použit jen režim 1x1 SISO.



Obrázek 7.2: Závislost naměřených propustností v laboratoři na RSRP

7.4 Naměřené propustnosti pro oba směry současně

Kvůli vzniklým problémům při testování, způsobenými rozdílnou verzí nástroje iPerf3 v měřicím terminálu a serveru, se přenosové rychlosti pro směr downlink a uplink, měřeny současně, uložily pouze u několika bodů. Jedná se o testy ze sekce, kde byly měřeny propustnosti v jednotlivých bodech laboratoře, konkrétně o poslední 60sekundovou část dříve popsaného testovacího scénáře. Jako downlink a uplink jsou zde uvedeny průměrné přenosové rychlosti v obou směrech měřené zvlášť. Hodnoty přenosových rychlostí `downlink_s` a `uplink_s` jsou průměrné přenosové rychlosti v těchto směrech při přenosu v obou směrech současně. Byla určena procentuální změna propustností naměřených pro oba směry současně oproti propustnostem naměřených zvlášť.

Při přenosu v obou směrech zvláště v této TDD síti došlo ke značnému poklesu propustnosti ve směru downlink. U propustnosti ve směru uplink došlo k minimálním změnám.

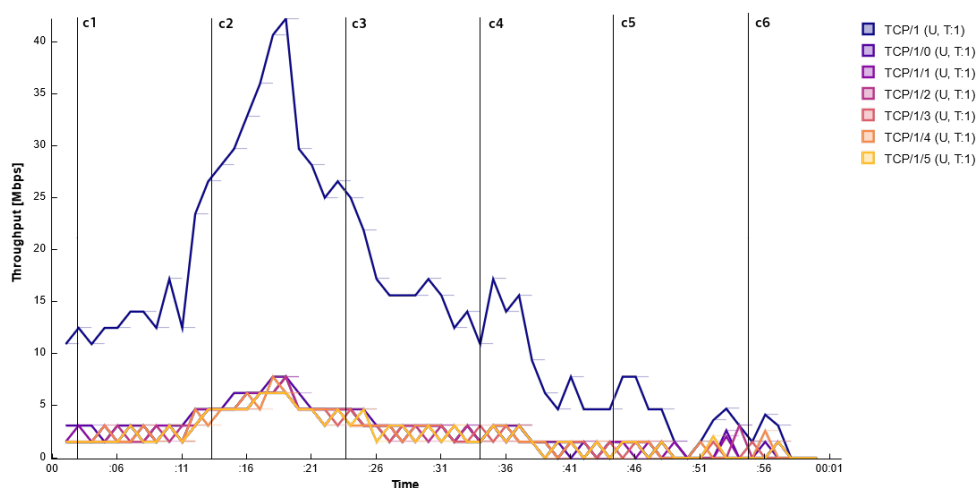
Tabulka 7.5: Naměřené propustnosti v laboratoři pro oba směry současně

bod	downlink [Mbit/s]	downlink_s [Mbit/s]	změna [%]
3	487,4	395,6	-18,8
5	243,8	173,8	-28,1
11	257,8	202,5	-21,5

bod	uplink [Mbit/s]	uplink_s [Mbit/s]	změna [%]
3	65,9	63,8	-3,2
5	41,8	43,1	3,1
11	48,3	46,2	-4,3

7.5 Walk testy v okolí laboratoře

Pro ilustraci, jak se dynamicky mění přenosové parametry sledované 5G sítě při chůzi, byly provedeny walk testy v chodbě před laboratoří v CIIRC. Trasa chůze odpovídala pohybu z bodu c1 do bodu c6, které byly do grafu vyznačeny. Sledovány byly průměrné přenosové rychlosti ve směrech downlink a uplink. Parametry testů byly zvoleny stejné jako při měření v bodech. Byly provedeny testy zvláště pro rychlosti v obou směrech.



Obrázek 7.3: Ukázka závislosti propustnosti na čase ve směru uplink naměřené při walk testu před laboratoří

V grafu lze pozorovat nejvyšší rychlosti kolem 18. sekundy, která odpovídá přibližně umístění mezi body c2 a c3. Bylo zjištěno, že při pokračování chůze za bod c6 docházelo ke ztrátě spojení, které vedlo k nevyhodnocení testu a nutnosti test opakovat. Podle umístění základnových stanic na plánu

laboratoře a okolí byla nejvyšší přenosová rychlost očekávána mezi body c4 a c5. Tato odlišnost značí, že Cell2 mohl být v době měření neaktivní a laboratoř spoléhala na pokrytí pouze ze základnové stanice 1 označené Cell1. Stejně tak byl pravděpodobně neaktivní Cell3.

7.6 Měření zpoždění ve smyčce

Pro měření zpoždění ve smyčce v průmyslové 5G síti byl použit nástroj FlowPing. Od scénáře použití 5G sítí uRLLC se očekává ve finálním stádiu implementace jednosměrné zpoždění 1 ms na síti RAN, což odpovídá zpoždění ve smyčce 2 ms. Cílem bylo změřit zpoždění ve smyčce, tedy obousměrné zpoždění, dále pak parametr jitter. Délka testu byla zvolena 60 sekund. U testu FlowPing, který využívá protokol UDP, byl zvolen symetrický konstantní bitový tok 10 Mbit/s. Velikost paketu byla nastavena na 1400 B. U venkovního bodu v3 byl test proveden ještě ve druhé variantě s bitovým tokem 2 Mbit/s. V tabulce jsou uvedena data z měření ve vybraných bodech. Byly vybrány tři body v laboratoři, bod 3 s nejlepším příjmem signálu, bod 5 s nejhorším příjmem signálu v rámci laboratoře a bod 4, umístěný mezi nimi. Z oblasti mimo laboratoř byl vybrán bod na chodbě c3 a bod v3, umístěný na chodníku před budovou. Uvedeny jsou hodnoty zpoždění ve smyčce minimálního, maximálního a průměrného. V posledním sloupci je uvedeno, zda byla síť schopna přenášet nastavený datový tok. Naměřené hodnoty RTT v laboratoři se vždy pohybovaly kolem 18 ms. V bodě v3 mimo laboratoř došlo k výraznému nárůstu RTT, protože zde síť nebyla schopna přenášet nastavený bitový tok. V bodě v3 již bylo při měření TCP protokolem zjištěno, že v tomto bodě není síť schopna splnit požadavek na propustnost 10 Mbit/s ve směru uplink. Po snížení bitového toku v tomto bodě na 2 Mbit/s se zpoždění snížilo na obvyklou hodnotu. Pokud byla síť schopná přenášet nastavený datový tok, platila průměrná hodnota RTT do 21 ms pro jakékoli místo v dosahu sítě. Tato hodnota je ještě daleko od požadavků na RTT pro scénář použití uRLLC. Jedním z důvodů je, že nastavení sítě je v současnosti optimalizováno na maximalizaci přenosové rychlosti, nikoli minimalizaci zpoždění.

Tabulka 7.6: Naměřené hodnoty RTT a jitter v laboratoři a nastavený bitový tok

bod	min RTT [ms]	průměr RTT [ms]	max RTT [ms]	jitter [ms]	bitový tok [Mbit/s]
3	17,0	17,5	18,1	1,8	10
4	17,3	18,0	18,9	1,8	10
5	17,8	18,4	19,0	1,8	10
c3	19,9	20,8	22,2	1,8	10
v3	321,8	1686,1	1962,0	4,8	10
v3	18,0	18,7	20,1	2,1	2

7.7 Měření stability rychlosti UDP protokolem

Jak je uvedeno v sekci eMBB, od 5G sítí se očekávají minimální přenosové rychlosti v rámci uživatelského zážitku 100 Mbit/s pro směr downlink a 50 Mbit/s pro směr uplink. Pro určení, zda je síť schopna spolehlivě přenášet tento bitový tok, je vhodné využít test iPerf 3 UDP, neboť umožňuje nastavení konstantního bitového toku a následné vyhodnocení ztrátovosti paketů. Byl vytvořen měřicí scénář, tvořený testem pro oba směry přenosu. Ve směru uplink byl nastaven konstantní bitový tok 50 Mbit/s. Vzhledem k naměřeným rychlostem v rámci testů v protokolu TCP, byl u tohoto UDP testu zvolen pro směr downlink oproti požadavkům navýšený bitový tok 300 Mbit/s. Oba testy využívaly pět paralelních toků, které tvořily výsledný bitový tok. Velikost paketu byla zvolena 1400 B. Délka testů byla zvolena 600 sekund. Testování proběhlo v bodě 3, který je umístěn ve středu laboratoře.

Tabulka 7.7: Ztrátovost paketů při UDP testu v laboratoři

tok	směr	průměr IPLR [%]	max IPLR [%]
udp1/0	downlink	0,00	0,00
udp1/1	downlink	0,00	1,79
udp1/2	downlink	0,00	0,00
udp1/3	downlink	0,00	0,00
udp1/4	uplink	0,00	0,00
udp2/0	uplink	0,00	0,22
udp2/1	uplink	0,00	0,56
udp2/2	uplink	0,00	0,67
udp2/3	uplink	0,00	0,67
udp2/4	uplink	0,00	0,67

V tabulce jsou uvedeny ztrátovosti paketů pro 10 datových toků, neboť každý z testů pro směr downlink a uplink byl tvořen pěti paralelními datovými toky. Nejvyšší zaznamenaná ztrátovost paketů byla 1,79 % pro tok udp1/1 (v jednom ze sekundových měřicích intervalů v průběhu testu). Průměrná ztrátovost paketů po zaokrouhlení na dvě desetinná místa byla vždy nulová, což značí velmi spolehlivé připojení.

7.8 Vliv vnějších faktorů na přenosové parametry

V rámci měření byly provedeny následující experimenty. Laboratoř průmyslu 4.0 a chodbu, na které se měřilo, totiž dělí okna s kovovými žaluziemi. Zkoumáno bylo, zda má zatažení žaluzií mezi měřicím terminálem a základnovou stanicí negativní vliv na přenosové parametry, konkrétně propustnost.

Druhá specifická situace zkoumala vliv natočení antén změnou orientace měřicího batohu, na přenosové parametry. První poloha spočívala v umístění anténních sad v měřicím batohu přibližně v jedné linii s pomyslnou přímkou

Kapitola 8

Testování sítě 5G pro obecné použití

Testování sítě 5G pro obecné použití bylo zaměřeno na veřejné mobilní pozemní síť 5G, které aktuálně nasazují mobilní operátoři v Česku. Síť 5G českých operátorů jsou nasazeny výhradně v režimu NSA. Konkrétně byla provedena měření sítě operátora Vodafone. Tento operátor byl vybrán z toho důvodu, že poskytuje služby ČVUT na základě smlouvy (firemní zákazník plus zaměstnanecké výhody). Vodafone používá technologie od společnosti Huawei na straně RAN, které umožňují funkci DSS. Měření bylo provedeno primárně v pražském vysokoškolském kampusu v Dejvicích. Zvláštní pozornost byla věnována testování mobilní sítě 5G v budově FEL a FS, která se nachází na adrese Technická 2.

Vybrané testy použité v rámci této práce a sekce, které se týkaly kampusu, byly provedeny ve všední den 6.5.2022, mezi 9. a 15. hodinou.

Použita byla SIM operátora Vodafone, bez datových a rychlostních omezení.

Měřicí terminál byl během jednotlivých měření připojen do sítě Vodafone. Jak bylo popsáno v teoretické části, pro komunikaci v síti 5G v NSA režimu je třeba současná komunikace v síti 4G. Při testování probíhala zároveň komunikace v síti 4G v pásmu 1800 MHz (3) a v síti 5G v pásmu 2100 MHz (n1), někdy se agregovalo také pásmo 4G 800 MHz (20). Šířka pásem ve frekvenčních pásmech 1800 MHz a 2100 MHz je 20 MHz. Šířka pásma v oblasti kmitočtů 800 MHz je 10 MHz. U všech těchto pásem je použito FDD.

Cílem bylo změřit přenosové parametry 5G sítě mobilního operátora. Byly provedeny následující testy za účelem zjištění následujících parametrů:

- Walk testy v budově FEL/FS
 - Propustnost ve směrech downlink a uplink
 - Rádiové parametry signálu
 - Zpoždění ve smyčce a jitter
 - Ztrátovost paketů
 - Chování sítě při přechodu mezi jednotlivými buňkami
- Walk testy v okolí FEL
 - Propustnost ve směrech downlink a uplink
 - Rádiové parametry signálu

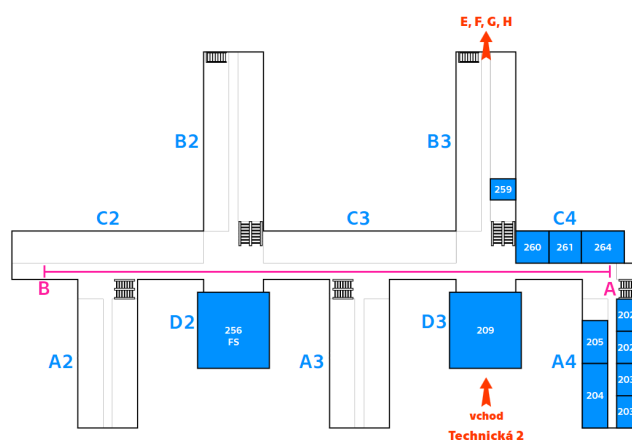
- Zpoždění ve smyčce a jitter
- Ztrátovost paketů
- Chování sítě při přechodu mezi jednotlivými buňkami

V případě testování pomocí protokolu TCP byla zvolena výhradně varianta protokolu cubic.

8.1 Testování v budově FEL/FS

Předmětem této části testování bylo změření přenosových rychlostí v síti 5G, kterých lze běžně dosahovat ve školní budově FEL a FS. Dále byla tato část testování zaměřena na vyhodnocení zpoždění ve smyčce a parametru jitter. Pro testování v budově byly zvoleny celkem čtyři chodby. V případě prvních tří chodeb se jednalo o hlavní chodby, rovnoběžné s ulicí Technická. Čtvrtá vybraná chodba se nachází v sedmém patře a je kolmá na předchozí tři.

První tři zvolené chodby se nacházejí v přízemí, druhém a čtvrtém patře. Na schématu druhého patra budovy byla vyznačena trasa, na které bylo měřeno. Na obdobné trase bylo měřeno i v přízemí a čtvrtém patře. Měření začínalo v bodě A, ze kterého probíhala chůze s měřicím batohem do bodu B, kde test skončil.



Obrázek 8.1: Trasa walk testů v budově FEL na hlavních chodbách

8.1.1 Měření propustnosti na hlavních chodbách

Měřeny byly propustnosti ve směrech downlink a uplink. Pro měření byl zvolen test iPerf 3 TCP. Parametry testů byly zvoleny stejně jako při obdobném testování v průmyslové síti. Upravena byla délka testů na 150 sekund, která byla dostatečná pro průchod chodby v celé délce přiměřenou rychlostí. Zvoleno bylo měření propustnosti každého směru přenosu v jinou chvíli. Zvolené parametry testu iPerf3 TCP jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 8.1: Zvolené parametry testu iPerf3 TCP pro měření v budově FEL

délka testu	počet paralelních toků	velikost okna	MSS
150 s	6	256 kB	1400 B

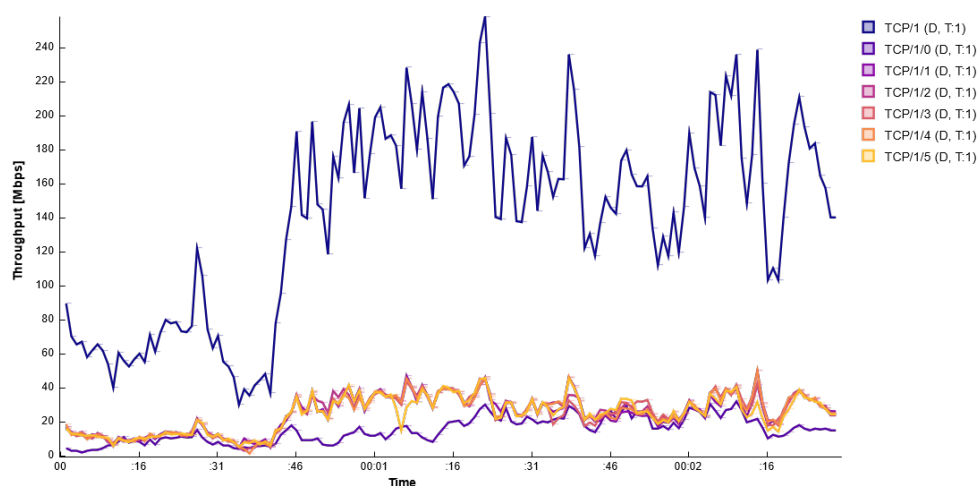
Naměřené propustnosti pro oba směry přenosu jsou uvedeny v tabulce. Uvedené jsou hodnoty propustností minimálních, průměrných a maximálních naměřených při těchto nestacionárních testech.

Tabulka 8.2: Naměřené propustnosti na hlavních chodbách ve směru downlink v budově FEL

	downlink min [Mbit/s]	downlink průměr [Mbit/s]	downlink max [Mbit/s]
přízemí	32,1	107,2	233,3
2. patro	30,2	140,8	258,6
4. patro	31,6	135,0	261,7

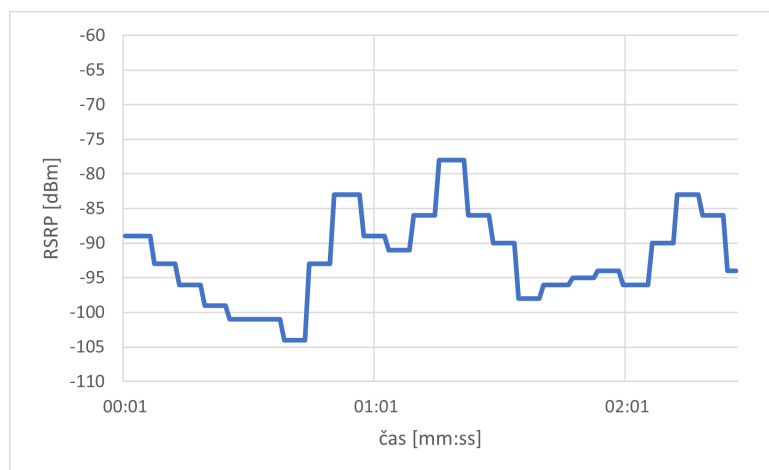
Tabulka 8.3: Naměřené propustnosti na hlavních chodbách ve směru uplink v budově FEL

	uplink min [Mbit/s]	uplink průměr [Mbit/s]	uplink max [Mbit/s]
přízemí	20,4	54,0	112,2
2. patro	7,8	63,4	115,0
4. patro	20,3	70,5	119,5

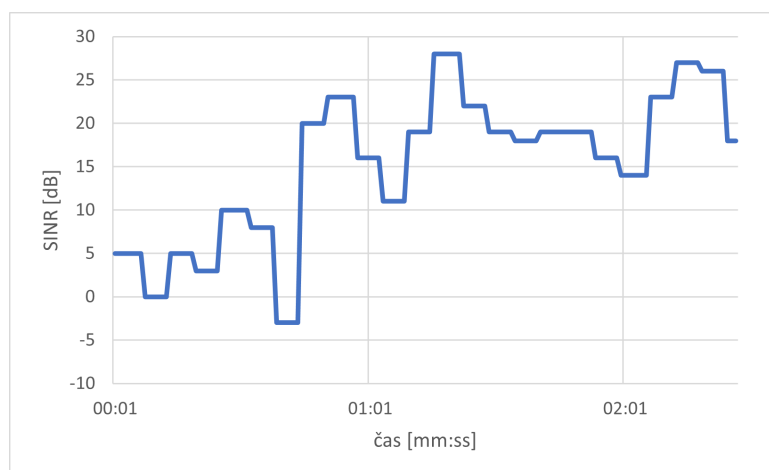
**Obrázek 8.2:** Ukázka závislosti propustnosti na čase ve směru downlink při walk testu v druhém patře

Pro test přenosových rychlostí ve směru downlink, provedený ve druhém patře, byly vyhodnoceny rádiové parametry RSRP a SINR.

Ukázka grafů závislosti parametrů RSRP a SINR pro pásmo LTE 1800 MHz (3), přes které probíhala signalizace. Grafy se vztahují k testu pro směr downlink.



Obrázek 8.3: Závislost RSRP na čase při walk testu v druhém patře budovy FEL



Obrázek 8.4: Závislost SINR na čase při walk testu v druhém patře budovy FEL

Průměrné naměřené propustnosti v jednotlivých patrech se pohybovaly kolem 110–140 Mbit/s pro směr downlink a 55–70 Mbit/s pro směr uplink. Vyšší propustnosti byly naměřeny v druhém a čtvrtém patře, v přízemí byly naměřené propustnosti nižší. U uvedeného grafu pro průběh propustnosti v druhém patře lze pozorovat nízké propustnosti přibližně do konce první čtvrtiny testu. Z vynesných grafů rádiových parametrů, obzvláště pak u grafu pro parametr SINR lze vidět souvislost mezi nízkou hodnotou SINR a nízkými naměřenými propustnostmi. Z naměřených dat, bylo dále zjištěno přepojení měřicího terminálu na jinou základnovou stanici ve 46. sekundě. Od této sekundy narostly hodnoty RSRP, SINR, se kterými narostla i propustnost.

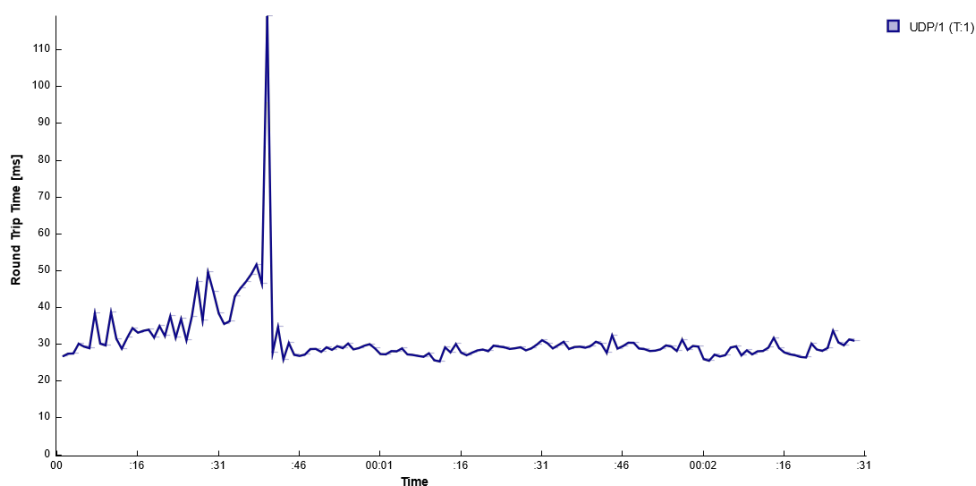
8.1.2 Měření zpoždění ve smyčce na hlavních chodbách

Pro měření zpoždění ve smyčce, byl stejně jako u měření průmyslové sítě použit nástroj FlowPing. Kromě zpoždění ve smyčce byly vyhodnocovány parametry jitter a ztrátovosti paketů. U testu FlowPing, který využívá protokol UDP, byl zvolen symetrický konstantní bitový tok 2 Mbit/s. Velikost paketu byla nastavena na 1400 B. V tabulce jsou uvedena data z měření v jednotlivých patrech. Uvedeny jsou hodnoty zpoždění ve smyčce minimálního, maximálního a průměrného.

Tabulka 8.4: Naměřené hodnoty RTT a jitter na hlavních chodbách v budově FEL

	min RTT [ms]	průměr RTT [ms]	max RTT [ms]	jitter [ms]
přízemí	26,7	29,7	37,4	3,4
2. patro	25,4	31,4	119,4	3,6
4. patro	25,8	30,0	119,2	3,5

Průměrná hodnota zpoždění ve smyčce se ve všech patrech pohybovala kolem 30 ms, hodnota jitter pak kolem 3,5 ms. Při testu v přízemí byla zaznamenána nejnižší hodnota maximálního RTT. Na ukázaném grafu, popisující průběh hodnoty RTT v čase, lze pozorovat výkyv kolem 40. sekundy. V tomto okamžiku došlo ke změně parametru cell ID, což identifikovalo přepojení měřicího terminálu na jinou základnovou stanici.



Obrázek 8.5: Ukázka závislosti RTT na čase pro test ve druhém patře

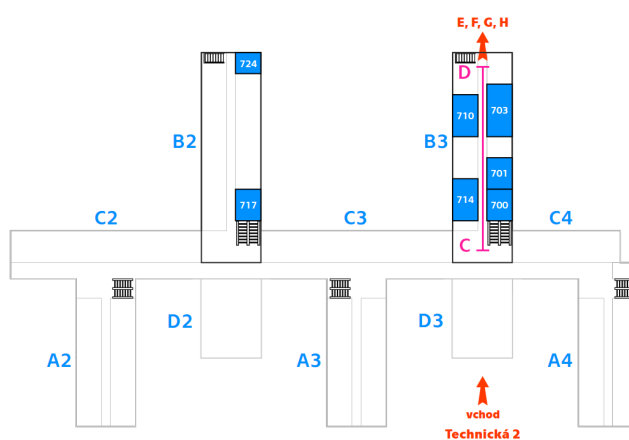
Jako další parametr byla vyhodnocována ztrátovost paketů, jejíž průměrná hodnota se pohybovala ve všech patrech kolem nuly. V přízemí byla zaznamenána vyšší maximální ztrátovost paketů, to a 11 %.

Tabulka 8.5: Naměřená ztrátovost paketů v budově FEL

	min IPLR [%]	průměrný IPLR [%]	max IPLR [%]
přízemí	0,00	0,07	11,17
2. patro	0,00	0,00	0,55
4. patro	0,00	0,02	2,33

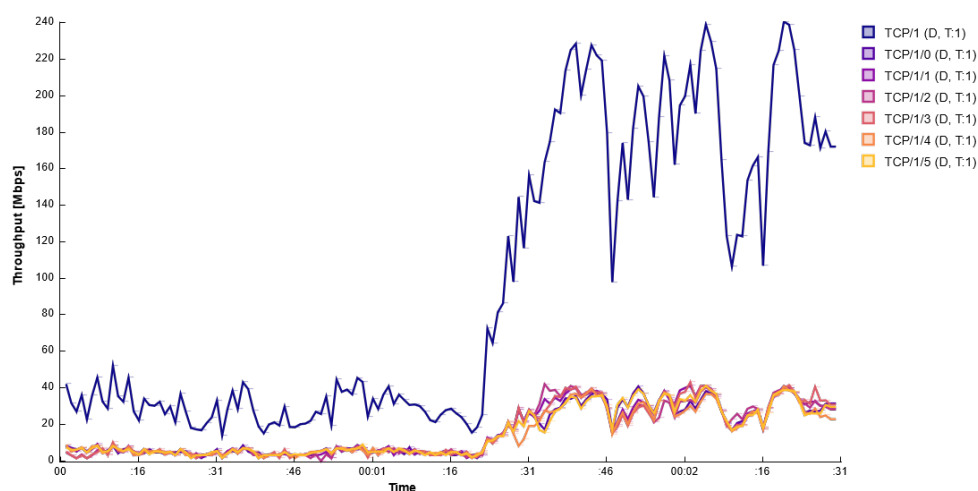
8.1.3 Testování v sedmém patře

Vedle testování parametrů, které byly testovány na předchozích třech chodbách, bylo zkoumáno chování parametrů sítě během přechodu mezi jednotlivými základnovými stanicemi.



Obrázek 8.6: Trasa walk testů v sedmém patře budovy FEL

Provedeny byly stejné testy, jako na hlavních chodbách. Na plánu je vyznačena trasa, na které bylo měřeno. Testy byly kombinací stacionární měření a měření za chůze. Testy začínaly v bodě C, kde proběhlo stacionární a měření o délce 45 sekund, poté následovala chůze do bodu D, která trvala 60 sekund. V cílovém bodě D se poté provedlo stacionární měření o délce 45 sekund. Celý test trval vždy 150 sekund. Naměřené parametry jsou uvedeny v souhrnné tabulce 8.6.



Obrázek 8.7: Ukázka grafu závislosti propustnosti na čase ve směru downlink pro test v sedmém patře.

Na začátku testu byly zaznamenány nízké hodnoty propustnosti, které souvisely se špatnými příjmovými podmínkami. V druhé polovině měření došlo ke značnému nárůstu propustnosti. Z rádiových parametrů bylo zjištěno, že v 82. sekundě měření proběhlo přepojení na jinou základnovou stanici. Od tohoto okamžiku byl zaznamenán značný nárůst propustnosti. Pomocí parametru cell ID, který se ukládá do výsledků testů byly dohledány základnové stanice, ke kterým byl měřicí terminál připojen. Bylo zjištěno, že v bodě C a v první polovině chodby původně probíhala komunikace se základnovou stanicí umístěnou v ulici Banskobystrická, poté přibližně uprostřed chodby došlo k přepojení na bližší základnovou stanici na budově CIIRC, která nabízela v druhé polovině chodby výrazně lepší příjmové podmínky signálu.

8.1.4 Souhrnné výsledky

Souhrnná tabulka obsahuje naměřené hodnoty ze všech testů provedených v budově FEL/FS, které byly popsány výše. Jedná se o výsledků testů provedených ve všech čtyřech patrech. Jsou uvedeny naměřené propustnosti pomocí testu iPerf3. V rámci testování nástrojem FlowPing jsou uvedeny hodnoty zpoždění ve smyčce, jitter a ztrátovost paketů.

Tabulka 8.6: Souhrnná tabulka výsledků naměřených v budově FEL

	přízemí	2. patro	4. patro	7. patro
min downlink [MBit/s]	32,1	30,2	31,6	14,0
průměr downlink [MBit/s]	107,2	140,8	135,0	94,7
max downlink [Mbit/s]	233,3	258,6	261,7	240,9
min uplink [MBit/s]	20,4	7,8	20,3	1,6
průměr uplink [MBit/s]	54,0	63,4	70,5	55,7
max uplink [Mbit/s]	112,2	70,5	119,5	113,0
min RTT [ms]	26,7	25,4	25,8	35,0
průměr RTT [ms]	29,7	31,4	30,0	45,7
max RTT [ms]	37,4	119,4	119,2	115,2
jitter [ms]	3,4	3,6	3,5	3,9
min IPLR [%]	0,00	0,00	0,00	0,00
průměr IPLR [%]	0,07	0,00	0,02	0,02
max IPLR [%]	11,17	0,55	2,33	3,61

8.2 Walk testy v kampusu

V této části byla jako lokalita pro testování zvolena ulice Technická před budovou FEL a další přilehlé části kampusu. Cílem bylo zjistit, jaké přenosové vlastnosti nabízí 5G síť v této oblasti. Bylo provedeno nestacionární měření pomocí testů za chůze. Trasa začínala v ulici Technická u budovy FEL/FS (v mapě vyznačeno červeně) a pokračovala ulicí dál podél budovy NTK. Trasa dále obcházela budovu FIT a poté směřovala k budově CIIRC. Po obejití budovy CIIRC vedla trasa zpět k výchozímu bodu. Zakreslení trasy do mapy bylo provedeno na webu mapy.cz zadáním zeměpisných souřadnic získaných během testu.



Obrázek 8.8: Trasa walk testu v kampusu

8.2.1 Měření propustnosti

V rámci této části testování v okolí kampusu byly vytvořeny dva testovací scénáře, vždy s jedním testem pro vybraný směr přenosu, oba o délce 660 s. Použity byly testy iPerf3 TCP s obvyklými parametry.

Tabulka 8.7: Zvolené parametry testu iPerf3 TCP při walk testu v kampusu

délka testu	počet paralelních toků	velikost okna	MSS
660 s	6	256 kB	1400 B

Z výsledků testů byly zaznamenány propustnosti pro směry downlink a uplink. Uvedeny jsou minimální, průměrné a nejvyšší naměřené propustnosti.

Tabulka 8.8: Naměřené propustnosti při walk testu v kampusu

	min [Mbit/s]	průměr [Mbit/s]	max [Mbit/s]
downlink	12,7	93,7	224,1
uplink	12,5	74,2	128,9

8.2.2 Vyhodnocení vztahu rádiových parametrů a propustnosti

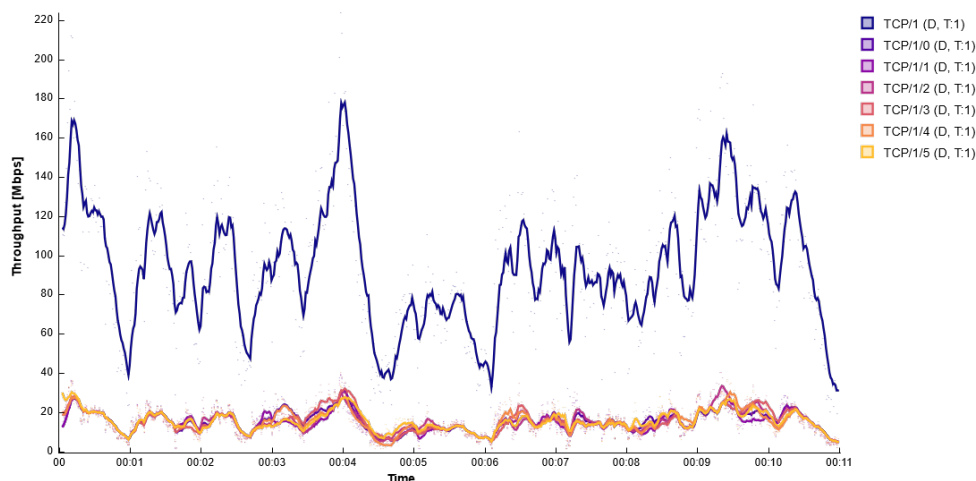
Vyhodnocován byl soubor rádiových parametrů testu ve směru downlink. Při tomto testu měřicí terminál komunikoval ve dvou frekvenčních pásmech. Při těchto testech probíhala zároveň komunikace v síti 4G v pásmu 1800 MHz (3) a v síti 5G v pásmu 2100 MHz (n1). Část testu bylo agregováno i pásmo 800 MHz (20). Vyhodnoceny byly průběhy hodnot rádiových parametrů RSRP pro pásma 1800 MHz a 2100 MHz. Hodnoty SINR byly vyhodnoceny jen pro připojení v síti 4G, neboť u hodnot SINR, kterou F-Tester zaznamenával pro 5G, byly zjištěny stejné nesrovnalosti jako při dřívějším testování průmyslové 5G sítě.

Tabulka 8.9: Naměřené hodnoty RSRP při walk testu v kampusu

	min [dBm]	průměr [dBm]	max [dBm]
4G 1800 MHz	-96	-76	-67
5G 2100 MHz	-101	-74	-65

Tabulka 8.10: Naměřené hodnoty SINR při walk testu v kampusu

	min [dB]	průměr [dB]	max [dB]
4G 1800 MHz	-6	10	19

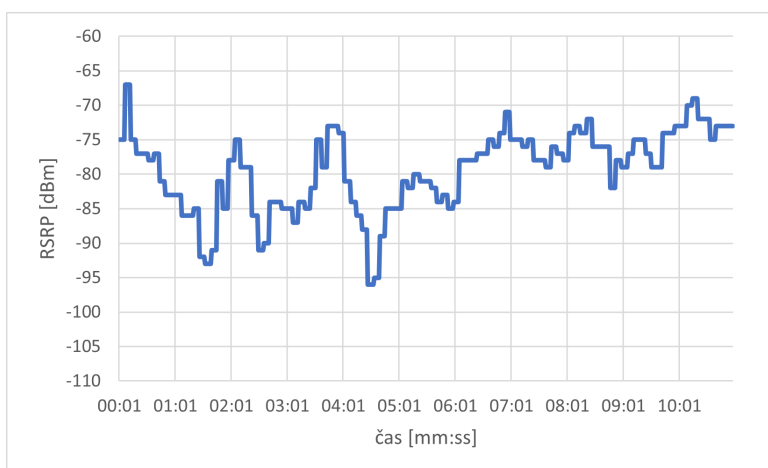


Obrázek 8.9: Ukázka grafu závislosti propustnosti na čase pro směr downlink při walk testu v kampusu

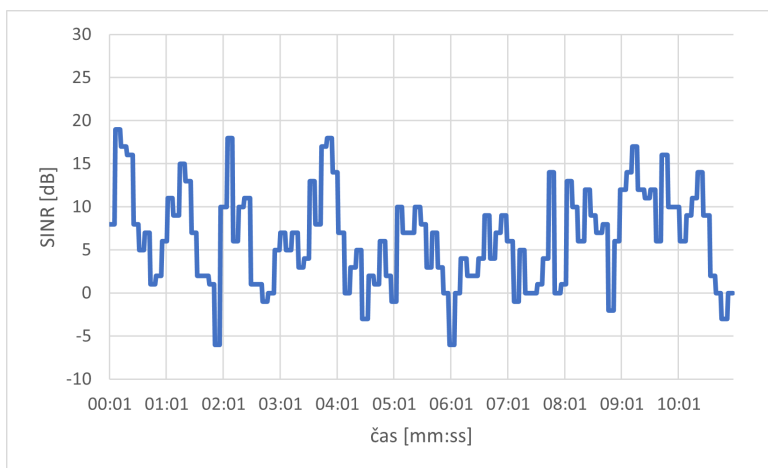
Nejvyšší hodnoty propustnosti byly naměřeny v první minutě, kolem čtvrté minuty a v intervalu mezi devátou a desátou minutou. Zároveň se jedná o časové úseky, ve kterých byla naměřena vysoká hodnota SINR. První uvedený čas odpovídá umístění ve výchozím bodě v Technické ulici. Celková

nejvyšší propustnost, které bylo dosaženo, byla naměřena při průchodu ulicí Kolejní. Vysoké propustnosti mezi devátou a desátou minutou testu bylo dosaženo před budovou CIIRC. Časový úsek s nejnižší propustností mezi pátou a šestou minutou testu odpovídal chůzi ulicí Bechyňova. Tato nízká propustnost byla způsobena špatnými příjmovými podmínkami v tomto úseku.

Pro připojení v síti 4G LTE v rámci testu pro směr downlink byly vyneseny průběhy rádiových parametrů RSRP a SINR v čase.



Obrázek 8.10: Závislost RSRP na čase při walk testu v kampusu



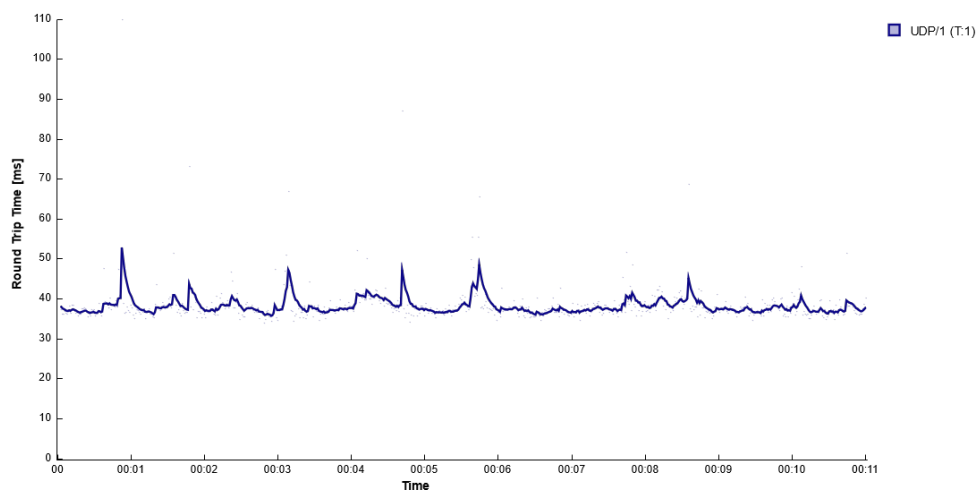
Obrázek 8.11: Závislost SINR na čase při walk testu v kampusu

8.2.3 Měření zpoždění ve smyčce

Další část testování se věnovala měření zpoždění ve smyčce. Použit byl test FlowPing s obvyklými parametry. Velikost paketu byla nastavena na 1400 B a byl zvolen symetrický bitový tok 2 Mbit/s. Test probíhal na stejné trase v kampusu, proto byla zvolena stejná délka testu 660 sekund.

Tabulka 8.11: Naměřené hodnoty RTT a jitter při walk testu v kampusu

min RTT [ms]	průměr RTT [ms]	max RTT [ms]	jitter [ms]
34,0	38,4	110,0	3,7

**Obrázek 8.12:** Závislosti RTT na čase při walk testu v kampusu

Průměrná hodnota zpoždění ve smyčce při tomto nestacionárním měření se pohybovala kolem 38 ms. Z grafu lze pozorovat výkyvy v jistých časových bodech, a to až na hodnotu RTT 50 ms. Ze zaznamenaných dat v souboru csv, konkrétně ze změny parametru cell ID, bylo zjištěno, že k těmto výkyvům dochází při přepojování mezi základnovými stanicemi. V tabulce je uvedena nejvyšší naměřená hodnota RTT 110 ms, která v grafu není vidět. To je dáno tím, že v rozhraní F-Tester byl zapnut exponenciálně vážený klouzavý průměr pro tvorbu průběhu tohoto grafu.

Tabulka 8.12: Ztrátovost paketů při walk testu v kampusu

min IPLR [%]	průměrný IPLR [%]	max IPLR [%]
0,00	0,05	2,82

Měřena byla i ztrátovost paketů UDP toku použitého pro měření, jejíž průměrná hodnota byla 0,05 %.

Kapitola 9

Závěr

Cílem teoretické části této práce bylo analyzovat vlastnosti sítě 5G. Proveden byl teoretický rozbor, ve kterém byly popsány klíčové vlastnosti mobilních sítí 5G a důležité pojmy z oblasti mobilních sítí. Síť páté generace umožňuje připojení velkého množství zařízení, mají nízkou odezvu a velké přenosové kapacity. Dále byla provedena analýza využití sítí 5G pro obecné použití a jejich aplikace v průmyslu a energetice. Z pohledu obecného použití bylo zkoumáno nasazení sítí 5G a ostatních generací mobilních sítí v Česku mobilními operátory. Z oblasti průmyslu a energetiky bylo shrnuto uplatnění sítí 5G v oblastech průmyslu 4.0 a inteligentních sítí. V průmyslu 4.0, který má vysoké požadavky na konektivitu, nachází síť 5G uplatnění jako privátní síť, které zajišťují komunikaci pro celé řady zařízení a přístrojů v rámci chytré továrny. V oblasti Smart Grid mohou síť 5G snížit náklady na výstavbu sítí páteřního připojení na úrovni VN, namísto budování optických tras.

V rámci praktické části bylo hlavním cílem práce navržení metodiky pro testování a vyhodnocení specifických situací pomocí platformy F-Tester a realizace praktických testů. Před samotným testováním bylo nutné provést úpravy pro praktické testování mobilních sítí pomocí platformy F-Tester za chůze. Zařízení z rodiny F-Tester jsou obvykle napájena pomocí síťového adaptéru. Náplní této bakalářské práce bylo měření za chůze a stacionární měření na místech, kde by použití síťového adaptéru bylo obtížné. Bylo vytvořeno napájení zařízení F-Tester 5G pomocí 12V akumulátoru a byla vytvořena měřicí konstrukce pro upevnění zařízení, akumulátoru a antén. Tato konstrukce byla vložena do výsledného měřicího batohu. Pro pohodlné spouštění testů za chůze bylo implementováno ovládání zařízení F-Tester 5G z mobilního telefonu přes Wi-Fi pomocí přístupového bodu.

Bylo provedeno seznámení se s platformou F-Tester. Byly navrženy metodiky testování, které vycházely z Metodiky ČTÚ pro měření mobilních sítí, která byla stručně popsána. Provedena byla řada testů a vyhodnocení specifických situací v mobilních sítích páté generace.

Hlavní pozornost byla věnována testování 5G sítě pro průmyslové použití, která se nachází v testbedu průmyslu 4.0 v CIIRC ČVUT. Tato síť má odlišné vlastnosti oproti veřejným mobilním sítím, nasazovanými mobilními operátory v Česku, především se liší režimem nasazení SA a jejím určením pro privátní průmyslové použití. Bylo změřeno, že zvládne poskytovat přenosové rychlosti

až kolem 500 Mbit/s a nabízí lepší odezvu než 5G sítě mobilních operátorů v režimu NSA, obvyklé zpoždění ve smyčce bylo 18 ms. Testování se také zaměřilo na vyhodnocení přenosových parametrů sítě ve specifických situacích, například v extrémních podmínkách.

Další část testů se věnovala měření komerční mobilní sítě 5G. Byly změřeny přenosové vlastnosti mobilní sítě 5G operátora Vodafone v budově FEL a jejím okolí. Provedeno bylo testování pomocí walk testů. Testováním bylo zjištěno, že průměrné přenosové rychlosti pro směr downlink se pohybují obvykle nad 100 Mbit/s a pro směr uplink obvykle nad 60 Mbit/s. Dále bylo změřeno zpoždění ve smyčce, u 5G sítě v NSA režimu se obvykle pohybovalo mezi 25–40 ms, bylo vyšší než u sítě v režimu SA. Byly vyhodnoceny specifické situace jako například přechod měřicího teminálu mezi jednotlivými základnovými stanicemi.

Výstupem práce je vytvořený měřicí batoh pro testování mobilních sítí za chůze a výsledky provedených praktických měření. Úplná naměřená data včetně grafů v pdf souborech jsou dostupná v příloze C.

Příloha A

Literatura

- [1] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. *Mobilní sítě* [online]. Praha: České vysoké učení technické, 2014 [cit. 2022-03-20]. ISBN 978-80-01-05305-8. Dostupné z: <http://techpedia.fel.cvut.cz/single/?objectId=4>
- [2] GHAYAS, Adnan. Mobile data speed with 2G, 3G, 4G and 5G cellular networks. *Commsbrief* [online]. [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://commsbrief.com/mobile-data-speed-with-2g-3g-4g-and-5g-cellular-networks/>
- [3] 3GPP Release 15 Overview. *IEEE Spectrum* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/3gpp-release-15-overview>
- [4] PETERSON, Larry a Oguz SUNAU. *5G Mobile Networks: A Systems Approach* [online]. 2020 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://github.com/SystemsApproach/5G>
- [5] ORDONEZ-LUCENA, Jose, Jesús Folgueira CHAVARRIA, Luis M. CONTRERAS a Antonio PASTOR. The use of 5G Non-Public Networks to support Industry 4.0 scenarios. In: *2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. 2019, s. 1-7. Dostupné z: [doi:10.1109/CSCN.2019.8931325](https://doi.org/10.1109/CSCN.2019.8931325)
- [6] BRANDT, David a Scott GRIFFITHS. Industrial 5G technology offers potential wireless standard. *Industrial Ethernet Book* [online]. [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://iebmedia.com/technology/industrial-5g/industrial-5g-technology-offers-potential-wireless-standard/>
- [7] What is 5G beamforming, beam steering and beam switching with massive MIMO. *Metaswitch* [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-beamforming-beam-steering-and-beam-switching-with-massive-mimo>

- [19] Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS, UMTS a LTE v České republice. *GSMweb* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>
- [20] Informace o záměru zpřístupnění pásma 26 GHz. *Český telekomunikační úřad* [online]. 20. 12. 2019 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sdeleni-o-zameru-zpristupneni-pasma-26-ghz>
- [21] RAO, Sriganesh K. a Ramjee PRASAD. *Impact of 5G Technologies on Industry 4.0* [online]. Springer, 13 March 2018 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: doi:10.1007/s11277-018-5615-7
- [22] PEARCE, Peter. Industry 4.0: How Advancements in Manufacturing Technology Are Transforming the Industry. *Plex* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.plex.com/blog/industry-40-how-advancements-manufacturing-technology>
- [23] RODRIGUEZ, Ignacio, et al. 5G Swarm Production: Advanced Industrial Manufacturing Concepts Enabled by Wireless Automation. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2021, 59(1), 48-54 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: doi:10.1109/MCOM.001.2000560
- [24] Testbed pro Průmysl 4.0 – pracoviště stvořené pro akademicko-průmyslovou spolupráci. *Národní centrum Průmyslu 4.0* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.ncp40.cz/aktuality/testbed-pro-prumysl-40-pracoviste-stvorene-pro-akademicko-prumyslovou-spolupraci>
- [25] SHABANZADEH, Morteza a Mohsen Parsa MOGHADDAM. *What is the Smart Grid? Definitions, Perspectives, and Ultimate Goals* [online]. 2013 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: doi:0.13140/2.1.2826.7525
- [26] REKA, S. Sofana, Tomislav DRAGICEVIC, Pierluigi SIANO a S. R. Sahaya PRABAHARAN. Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review. *Energies* [online]. MDPI, 2019, 12(11) [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: doi:10.3390/en12112140
- [27] VODRAZKA, Jiri. Transmission Capacity Estimation for the Medium Voltage Level of Smart Grid. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. 2017, 15(4) [cit. 2022-05-01]. ISSN 1804-3119. Dostupné z: doi:10.15598/aece.v15i4.2444
- [28] GHOSH, Indranil. Making Smart Grid more Smart With 5G Communication. *IEEE Smart Grid* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/april-2021/making-smart-grid-more-smart-with-5g-communication>



Příloha B

Seznam zkratk

3GPP 3rd Generation Partnership Project

5G Pátá generace (mobilních sítí)

AMPS Advanced Mobile Telephone System

BEREC The Body of European Regulators for Electronic Communications

BTS Base Transceiver Station

CA Carrier Aggregation

CDMA Code Division Multiple Access

CIIRC Czech Institute of Informatics, Robotics and Cybernetics

CQI Channel Quality Indicator

ČTÚ Český telekomunikační úřad

DC Dual Connectivity

DSS Dynamic Spectrum Sharing

EDGE Enhanced Data for Global Evolution

eMBB Enhanced Mobile Broadband

eNB evolved Node B

EPC Evolved Packet Core

FDD Frequency Division Duplex

FEC Forward Error Correction

FR Frequency Range

FWA Fixed Wireless Access

gNB Next generation Node B

GNSS	Global Navigation Satellite System
GSM	Global System for Mobile Communication
IIoT	Industrial IoT
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPTD	IP packet transfer delay
IPDV	IP packet delay variation
IPER	IP packet error ratio
IPLR	IP packet loss ratio
ITU-T	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Standardization Sector
LPWAN	Low Power Wide Area Access Network
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution - Advanced
M2M	Machine to Machine
MBSFN	Multimedia Broadcast Single Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mMTC	Massive Machine Type Communications
MSS	Maximum Segment Size
NG-Core	Next Generation Core
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NMT	Nordic Mobile Telephone
NPN	Non Public Network
NR	New Radio
NSA	Non-standalone
NN	nízké napětí
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PLMN	Public Land Mobile Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RSRP	Reference Signal Receive Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round Trip Time
SA	Standalone
SMS	Short Message Service
SINR	Signal to Noise + Interference Ratio
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
TACS	Total Access Communication System
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
uRLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
VoIP	Voice Over IP
VoLTE	Voice over LTE
VoNR	Voice over NR
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí



Příloha C

Přiložené soubory

Příloha obsahuje výsledky provedených testů zaznamenané v souborech pdf a csv. V souborech pdf jsou uvedena naměřená data a jejich reprezentace v grafech. V souborech csv jsou zaznamenána podrobná data výsledků testů. Soubory s výsledky jsou rozříděny ve složkách podle odpovídajících měření. Dále jsou přiloženy pořízené fotografie.