

Analýza lokalizačních metod v kampusové 5G síti

Analysis of Localization Methods in Campus 5G Network

Matěj Serbus

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Libor Michalek, Ph.D.

Ostrava, 2023

Zadání bakalářské práce

Student:

Matěj Serbus

Studijní program:

B0714A060010 Telekomunikační technika

Téma:

Analýza lokalizačních metod v kampusové 5G síti
Analysis of Localization Methods in Campus 5G Network

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cíle práce bude teoretický popis lokalizačních metod v pro LTE/5G v rámci 3GPP Rel-14 až Rel-17. Hlavním cílem práce bude navrhnout sestavu pro měření a analýzu přenosu lokalizace s využitím 5G kampusové sítě.

Řešení bude obsahovat tyto cíle:

1. Proveďte rešerši v oblasti lokalizačních metod v LTE i 5G, proveďte srovnání z pohledu možné přesnosti a spolehlivosti metod.
2. Navrhněte sestavu měření pro analýzu a zjištění přesnosti lokalizace koncového terminálu s využitím kampusové 5G sítě.
3. Sestavte alespoň jednu úlohu do cvičení odborného předmětu s tematikou lokalizace v mobilní síti 5G.
4. Výsledky vyhodnoťte.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] GARCÍA, Adrián Cardalda; MAIER, Stefan; PHILLIPS, Abhay. *Location-Based Services in Cellular Networks: from GSM to 5G NR*. Artech House, 2020.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Michalek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2021

Datum odevzdání: 30.04.2023

Garant studijního programu: doc. Ing. Petr Šiška, Ph.D.

V IS EDISON zadáno: 05.10.2022 12:24:26

Abstrakt

V této bakalářské práci jsem provedl porovnání lokalizačních metod v LTA a 5G. Hlavní cíl bylo navržení sestavy pro měření hodnot timing advance vztaženou k LTE a 5G, k čemuž jsem využil program Nemo Outdoor s připojeným mobilním telefonem Xiaomi Mi 10 Pro a vývojovým kitem s čipovou sadou RM530N-GL. Data jsem následně vizualizoval a podrobněji popsal. Díky získaných dat jsem vytvořil úlohu do předmětu zabývajícím se lokalizací v 5G síti.

Klíčová slova

LTE, 5G, 3GPP, Lokalizace, Timing advance, RM530N-GL, Xiaomi Mi 10 Pro, Quectel, Qualcomm, Nemo Outdoor

Abstract

In this bachelor thesis, I made a comparison of localization methods in LTA and 5G. The main objective was to design a setup to measure timing advance values relative to LTE and 5G, for which I used the Nemo Outdoor software with a connected Xiaomi Mi 10 Pro mobile phone and a development kit with the RM530N-GL chipset. I then visualized the data and described it in more detail. With the data I obtained, I created an assignment for a course dealing with localization in a 5G network.

Keywords

LTE, 5G, 3GPP, Localization, Timing advance, RM530N-GL, Xiaomi Mi 10 Pro, Quectel, Qualcomm, Nemo Outdoor

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat Ing. Liboru Michalkovi, Ph.D. za trpělivost a výpomoc při vytváření a vypracování této bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	7
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Lokalizační metody pro LTE a 5G	12
1.1 LTE	12
1.2 Technologie 5G	17
2 Měření v kampusové síti pomocí Nemo Outdoor	22
2.1 Kampusová 5G NR síť	22
2.2 Nemo Outdoor Drive Test Solution	22
2.3 Zapojení měřící sestavy	23
2.4 Využití modulu RM530N-GL	24
2.5 Využití aplikace iPerf3 pro měření	24
2.6 Sestrojení sestavy pro měření lokalizace v LTE a 5G	26
2.7 Nastavení Nemo outdoor	27
2.8 Měření kampusového LTE makro buňky	27
2.9 Měření první trasy	29
2.10 Měření druhé trasy	31
3 Návrh laboratorní úlohy	33
3.1 Úloha měření Timing Advance pro LTE a 5G síť	33
4 Vyhodnocení měřených výsledků	36
Závěr	37

Použitá literatura

38

Přílohy

39

Seznam použitých zkratek a symbolů

LTE	– Long Term Evolution
4G	– Fourth Generation
5G	– Fifth Generation
5G NR	– 5G New Radio
3GPP	– The 3rd Generation Partnership Project
IoT	– Internet of Things
mMTC	– massive Machine Type Communications
eMBB	– enhanced Mobile Broadband
URLLC	– Ultra Reliable Low Latency Communications
LPWA	– Low Power Wide Area
GNSS	– Global Navigation Satellite System
LORAN	– LONg RANge Navigation
DL-TDoA	– Download Time Difference of Arrival
UL-TDoA	– Uplink Time Difference of Arrival
OTDOA	– Observed Time Difference of Arrival
RSTD	– Reference Signal Time Difference
PRS	– Positioning Reference Signal
SRS	– Sounding Reference Signal
Multi-RTT	– Multi Round-Trip Time
RTT	– Round-Trip Time
NR ECID	– New Radio Enhanced Cell ID
E-CID	– Enhanced Cell ID
DL-AoD	– Downlink Angle of Departure
UL-AoA	– Uplink Angle of Departure
UE	– User Equipment
eNB	– Evolved Node B
CID	– Cell Id

AoA	– Angle-of-Arrival
A-GNSS	– Assisted - Global Navigation Satellite Systems
LMU	– Location Measurement Unit
SoL	– Safety of Life
TA	– Timing Advance

Seznam obrázků

1.1	Typy měření pomocí E-CID [1]	13
1.2	Ukázka OTDOA zjištění lokalizace [3]	14
1.3	Trilaterace v rámci TA	16
1.4	Trojúhelník možných využití 5G NR [5]	18
2.1	Zapojení sestavy připravené pro měření	23
2.2	Vývojový kit s čipovou sadou RM530N-GL	24
2.3	Výpis spuštěného iPerf3	25
2.4	DOTy v aparátře	26
2.5	Rack se zapojenými DOTy	26
2.6	Mapa trasy měření kampusové venkovní LTE buňky	27
2.7	Mapa trasy prvního měření	29
2.8	Mapa trasy druhého měření	31

Seznam tabulek

1.1	Porovnání LTE lokalizačních metod	17
1.2	Porovnání 5G NR lokalizačních metod	21
2.1	Hodnoty TA a vzdálenosti pro kampusové LTE buňky	28
2.2	Hodnoty LTE TA první trasy	29
2.3	Hodnoty 5G TA první trasy	30
2.4	Hodnoty LTE TA druhé trasy	31
2.5	Hodnoty 5G TA druhé trasy	32

Úvod

Dnes už je naprosto běžná věc využívat mobilní telefon sloužící pro připojení k mobilní síti, která nám poskytuje i internetové připojení. V dnešní době se už častěji setkáváme s pojmem jako je 5G. Nejen že se jedná o novou formu mobilní sítě, ale jedná se i o možnost využít mobilní síť k jiným účelům. 5G se začíná častěji využívat ve zdravotnictví, automobilovém průmyslu a také průmyslu 4.0. Výborná věc na 5G síti je v tom, že se může postarat o formu lokalizace různých zařízení, což může usnadnit výstavbu infrastruktur, protože nebude potřeba dodatečných technologií a vše může pracovat za pomoci jedné celistvé sítě.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout sestavu pro měření a následnou analýzu přesnosti lokalizace s využitím kampusové 5G sítě. Bude se měřit za pomoci nástroje Nemo Outdoor Drive Test Solution s připojenými přijímači. Nakonec bude vytvořena úloha do cvičení odborného předmětu v této oblasti za pomoci zkušeností získaných při mém měření.

Teoretická část této bakalářské práce bude zaměřena na rozbor lokalizačních metod, které lze využít pro LTE/5G v rámci 3GPP Rel-14 až Rel-17. Zde bude porovnáno jak jsou jednotlivé metody přesné a spolehlivé.

Praktická část bude popisovat naměřené hodnoty a jejich porovnání, co je v jakých ohledech lepší či horší. Poslední krok práce bude vytvořit úlohu pro využití v předmětu, který se bude zabývat tématikou lokalizace v mobilní síti 5G a poté zhodnotit finální výsledky.

Kapitola 1

Lokalizační metody pro LTE a 5G

Tato kapitola bude zaměřena na popis využitých technologií a jejich funkcí a poté zde bude podrobně popsáno a porovnání jednotlivých lokalizačních metod pro LTE a 5G.

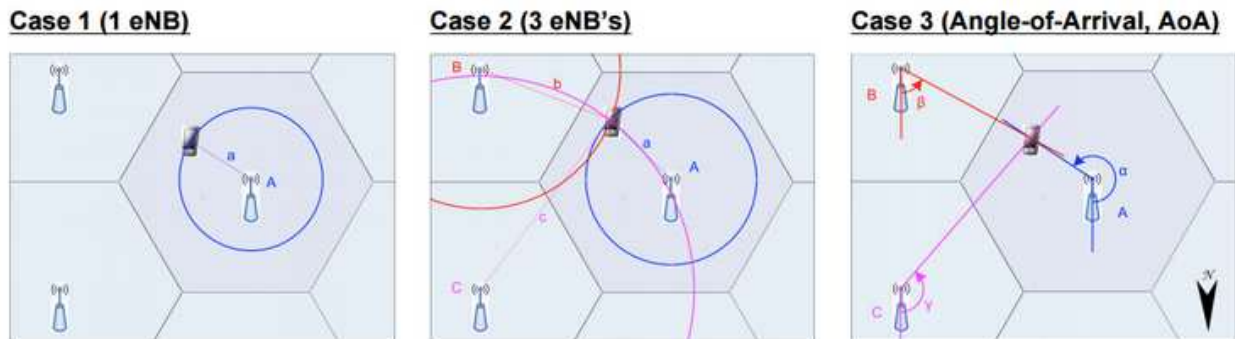
1.1 LTE

LTE neboli Long Term Evolution se může doslovně přeložit jako dlouhodobý rozvoj. Toto je projekt na kterém spolupracuje skupina 3GPP, který formálně spadá pod 3G standardy, ale nedosahuje rychlostí, které definují 4G sítě, tím pádem se někdy můžeme setkat s označením 3.95G pro již zmíněné LTE. Dá se říct, že díky této technologii se urychlil vývoj 4G. Primárním cílem LTE bylo zpřístupnění vysokorychlostního internetu pro větší masu mobilních zařízení, protože se internet stával čím dál tím více využívaný. V ČR bylo LTE experimentálně zkoušeno již od roku 2012, ale až v roce 2021 bylo zajištěno plné pokrytí.

1.1.1 E-CID

Jedná se o technologii vytvořenou pro LTE, která je vylepšením předchozí CID. Přesnost záleží na velikosti buněk, proto je méně přesná než ostatní technologie, ale za to je jednodušší na implementaci a je podporována velkou škálou zařízení a sítí. Poloha je určována za pomoci zeměpisných souřadnic v eNB a následně za pomoci rádiového signálu [1] [2].

Můžeme se setkat se třemi typy měření:



Obrázek 1.1: Typy měření pomocí E-CID [1]

1. Odhad vzdálenosti pomocí jednoho eNB
2. Měření vzdálenosti pomocí tří eNB
3. Měření úhlů (AoA) pomocí minimálně dvou eNB

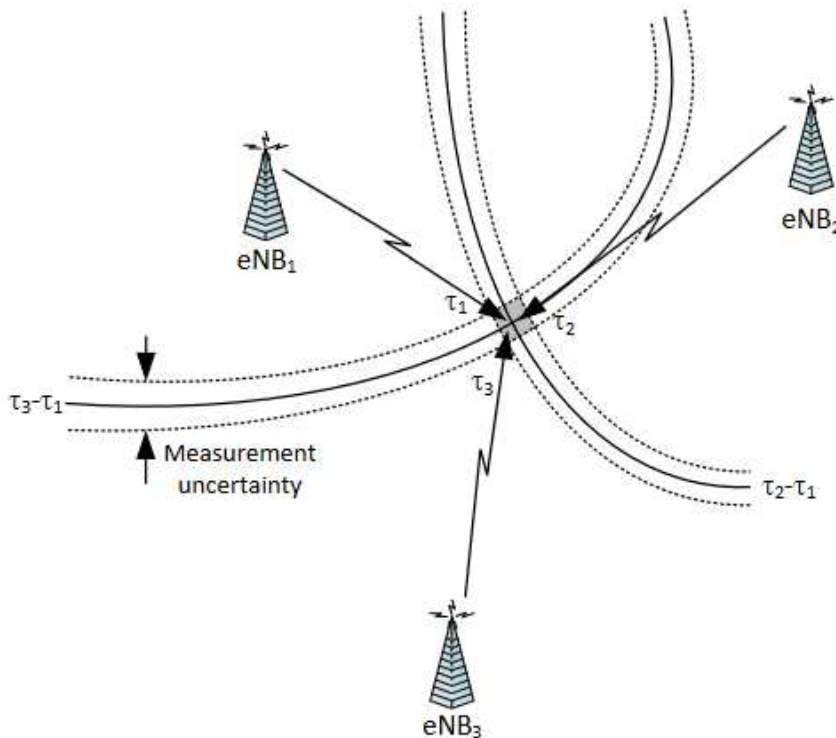
Měření v prvním případě je možné pouze v okruhu daného eNB. V dalších dvou případech se jsou metody přesnější, protože využívají více eNB pro měření. V prvních dvou případech je měřeno přímo pomocí přístroje a uživatelských zařízení a ve třetím případě je měřeno základnovou stanicí v síti [1] [2].

1.1.2 A-GNSS

Jedná se vlastně o vylepšení výkonu GPS systému. U klasického GPS v mobilním zařízení je GPS přijímač odpovědný za všechny příjem satelitních signálů, ale v případě A-GNSS je jsou satelitní signály ještě podpořeny daty poskytnuty mobilní sítí, které napomáhají k urychlení procesu získávání satelitního signálu. Zde jsou data jako například: referenční čas, referenční poloha, viditelný satelitní seznam, atd... Díky těmto informacím se jedná o velice přesnou lokalizační metodu [2].

1.1.3 OTDOA

Metoda OTDOA, neboli metoda pozorovaného časového rozdílu příchodu se primárně používá, pokud není možno použít GNSS. Jak už z názvu vyplývá je to metoda lokalizace využívající downlink, která byla představena v Rel-9 3GPP. Využívá uživatelského zařízení pro měření času příchodu (ToA) obdrženého od jednotlivých základnových stanic v síti. Pro zjištění minimálně zeměpisné šířky a délky je zapotřebí měření z alespoň tří různých eNB. Na obrázku níže lze vidět příklad lokalizace za pomoci OTDOA. eNB_1 je využita jakožto referenční základnová stanice pro měření a výpočet OTDOA je dále počítán ve vztahu: $t_{2,1} = \tau_2 - \tau_1$ a $t_{3,1} = \tau_3 - \tau_1$ [3].



Obrázek 1.2: Ukázka OTDOA zjištění lokalizace [3]

1.1.4 UTDOA

Jedná se o alternativu metodu OTDOA využívající uplink, která byla standardizována v Rel-11 3GPP. Hlavní rozdíl od OTDOA je v tom, že měření časové domény probíhá na uplinkovém signálu. Samotné měření je prováděno na základnové stanici a následně je pozice vypočítána na LMU[4][5]. Výhody oproti downlink metodám:

- UTDOA kompatibilní s každým UE.
- Není vyžadováno žádných specifických signálů, díky přenosu po běžné uplink lince.

1.1.5 RF Fingerprinting

Toto je metoda, která se v praxi skoro vůbec nevyužívá. Spočívá v tom, že mobilní zařízení získává takzvané otisky z blízkých základnových stanic a díky toho je možno lokalizovat zařízení. Otisky v sobě zahrnují parametry jako: síla signálu, časování a úroveň šumu, z okolních základnových stanic a jsou zapisovány do RF mapy. RF mapa se využívá pro optimalizaci a plánování sítě. Je tvořena například zařízením jako je spektrální analyzátor, který získává údaje o rádiových signálech v požadované oblasti, následně je vytvořena mapa, kterou je možno vizualizovat v pomoci softwarových nástrojů. Metoda dokáže lokalizovat v oblasti i zařízení bez souhlasu uživatele, proto můžou vznikat obavy ohledně soukromí [2][5].

1.1.6 LTE Timing Advance

Základnová stanice vysílá hodnotu časového předstihu (TA) do mobilního zařízení, aby zjistila jestli signály odcházejí ve správný okamžik. Hodnota TA nařídí mobilnímu zařízení, ať své vysílání zpozdí o určitou dobu a tím se zaručí, že signál dorazí do základnové stanice v přesný čas. TA jednotky jsou 11 bitové kladné číslo pohybující se od 0 do 1282. Tato jednotka je vypočítána základnovou stanicí na základě vzdálenosti mezi ní a mobilním zařízením. Vždy je zohledněno i zpoždění způsobené vzdáleností, takže pokud se bude mobilní zařízení od základnové stanice vzdalovat nebo přibližovat, tak signály vždy dorazí ve vhodnou dobu [6].

Vzorec pro výpočet vzdálenosti jednotky TA:

$$N_{TA} = 16 * T_a * T_s$$

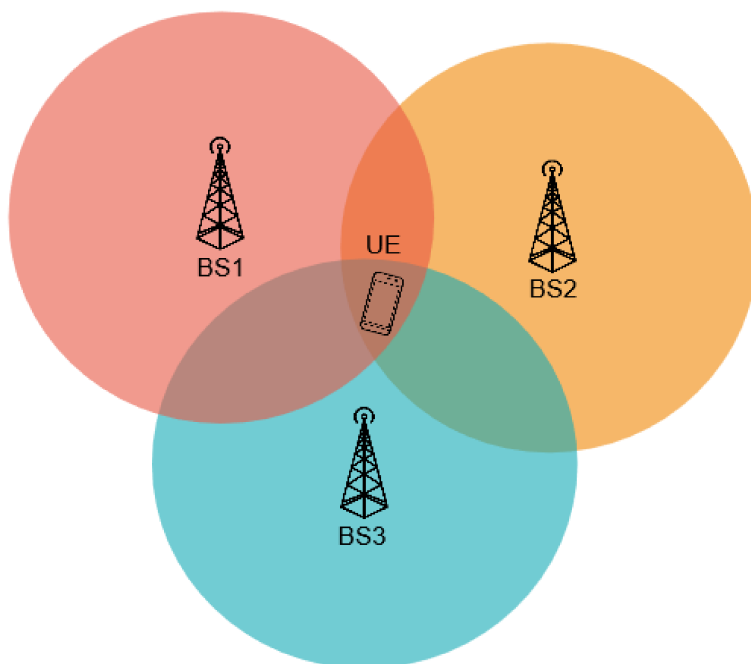
Z toho po dosazení vyplyne:

$$T_s = \frac{16}{30720000} = 0.5208 \mu s$$

Což odpovídá vzdálenosti:

$$(3 * 10^8 * 0.5208 * 10^{-6}) / 2 = 78.125m$$

Když je hodnota $TA = 0$ jedná se o případ kdy mobilní zařízení je ve velice blízké vzdálenosti. Pokud je hodnota větší, tak ze vzorce vyplývá, že zařízení je vzdáleno od základnové stanice ve kružnici o poloměru 78.125 m vzhledem pro $TA = 1$. Kdyby vzdálenost byla rovna například od 78.125 m do 156.25 m jednalo by se o $TA = 2$. Takto by byly hodnoty násobeny až do maxima, což je $TA = 1282$ [6].



Obrázek 1.3: Trilaterace v rámci TA

Za pomocí hodnoty časového předstihu (TA) je možné také lokalizovat mobilní zařízení (UE), jak lze vidět na obrázku 1.3. Jedná se o velice nepřesnou metodu lokalizace, jelikož hodnoty TA jsou vždy od sebe v rozmezí nepřesného počtu metrů, tudíž lze pouze odhadnout přibližnou polohu zařízení, podle informací ze tří okolních základnových stanic (BS).

1.1.7 Porovnání LTE lokalizačních metod

Tabulka 1.1: Porovnání LTE lokalizačních metod

Technologie	Přesnost	Výhody	Nevýhody
E-CID	Střední	Relativně levné, funguje s jakýmkoliv mobilním zařízením	Požaduje kalibraci pro dosažení optimální přesnosti
A-GNSS	Vysoká	Velice přesná synchronizace satelitů díky atomových hodin a trojrozměrného určování polohy	Potřeba přímé viditelnosti (nevhodné ve vnitřních prostorech a městech)
OTDOA	Střední	Jednoduchá implementace, nízká cena	Potřebuje synchronizovanou síť, závislost na operátorovi
UTDOA	Střední	Nepotřebuje dodatečný hardware, nezasahuje do ostatních bezdrátových systémů	Dražší cena, vyžaduje více základnových stanic
RF Fingerprinting	Střední	Nízká cena, zajišťuje důvěrnost přenášených zpráv	Vyžaduje hodně známých parametrů signálu

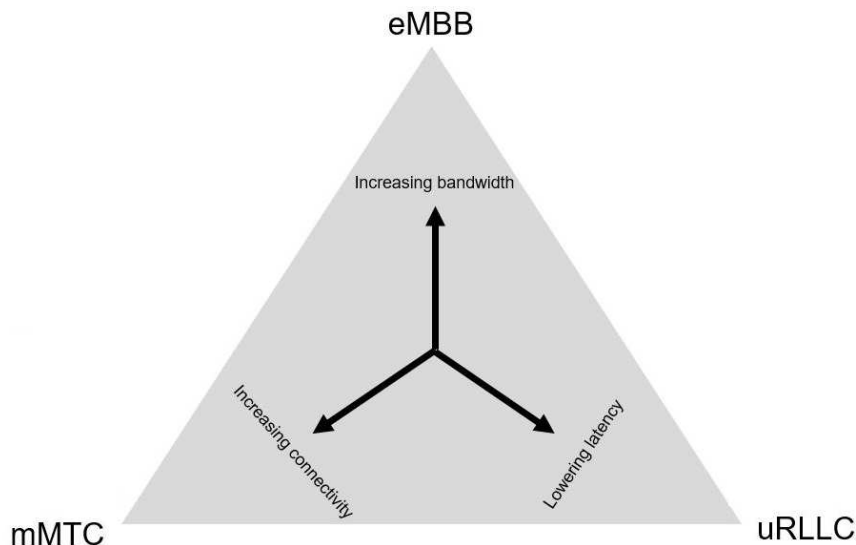
[7]

Ve výše zobrazené tabulce 1.1 jsou popsány jednotlivé technologie použité pro lokalizaci uživatelského zařízení z hlediska přesnosti, výhod a nevýhod. V rámci přesnosti se bere v potaz reálná pozice oproti zjištěné pozici za pomoci dané technologie, zde vyniká A-GNSS, jelikož se jedná o formu lokalizace za pomoci GPS podpořené daty poskytnuté v mobilní síti, ale potom z hlediska nasazení je méně výhodná, protože je potřebné mít zajištěnou přímou viditelnost s GPS družicemi. Využití technologií je závislé na mnoha parametrech např. cena instalace, možnosti pokrytí, náročnost údržby, proto je vždy důležité si určit jaké parametry jsou pro nás důležité [7].

1.2 Technologie 5G

Postupem času a vývojem LTE sítě začínají dosahovat svých limitů. Pro toto existuje mnoho důvodů od vysokého nárůstu využití mobilních telefonů, přes aplikace náročnějších na šířku pásma, až po velký počet propojených zařízení vytvořených pro IoT. Proto 3GPP vyvinuli mobilní síť páté generace neboli 5G. Tento vývoj byl postaven na výzkumu vedeného společností Qualcomm. Tato nová generace vznikla pro nové možnosti využití mobilní sítě, aby měli dostatek kapacity pro poskytování nových služeb. Nabízí vysokou rychlost, vynikající spolehlivost a minimální míru latence. Proto se počítá, že 5G bude mít velký dopad na průmysl, dopravu, zdravotnictví, zemědělství a tak dále. 5G je první z generací, která nebyla vyvinuta pouze pro mobilní zařízení. Hlavní velký rozdíl je v tom, že oproti ostatním generacím využívá vysoké frekvence ve spektru milimetrových vln, které začínají na 24 GHz.

1.2.1 Využití 5G NR sítě



Obrázek 1.4: Trojúhelník možných využití 5G NR [5]

Na obrázku 1.1 je znázorněn trojúhelník funkcí pro 5G NR Release - 15. Každý z těchto okruhů má svůj specifický cíl pro využití:

- **mMTC** už bylo vyvinuto jakožto část 3GPP Rel-13/14 pro LPWA technologie, které zahrnují i NB-IoT. Jeho cílem je propojit velké množství různých zařízení do IoT. mMTC využívá rozsáhlé množství aplikací pro: chytré domácnosti, chytré města, kontrolu dopravy, chytré parkování nebo i užití v Průmyslu 4.0. Aplikace využívající mMTC nepotřebují velké šířky pásma nebo vysoké přenosové rychlosti a díky tomu sází na nízké náklady a dlouhou výdrž baterie [5].
- **URLLC** bylo představeno v 3GPP Release - 15 pro velice spolehlivou komunikaci s velice nízkou latencí. Aplikace jsou podobné jako u mMTC, mnohé z nich nemají výhody díky velké šířce pásma a vysokým přenosovým rychlostem. Aspekty jako úspora baterie nebo nízká cena, jsou také vedlejší. Nejdůležitější je dostupnost, spolehlivost a hlavně komunikace v reálném čase, proto se využívá v aplikacích, které zahrnují autonomní řízení, průmyslové automatizace a vzdálenou kontrolu u lékařských zákroků [5].
- **eMBB** je z těchto směrů 5G NR zaměřena na extrémní datový přenos, velké množství připojených zařízení a pro rozsáhlé mobilní širokopásmové služby. Jedná se vlastně o lepší verzi 4G v rámci vývoje. Díky tomu si můžeme počítat se zrychlením a bezproblémovým používáním mobilního internetu, proto je zaměřen na využití v obchodních centech, stadiónech a veřejných místech, kde by byl běžně problém s připojením, kvůli velikého množství zařízení [5].

1.2.2 DL-TDoA

je nástupcem technologie OTDOA pro LTE. Je založeno na měření RSTD. Jedná se o metodu, kde mobilní zařízení měří čas, který uplyne od příjmu PRS z různých základových stanic a srovná s časem příchodu z referenční stanice. Má navržené PRS, tak aby dovolilo mobilním zařízením vidět více signálů ze sousedních buněk. Parametry jako výkon, šířka pásma a plánování procesů jsou zde nakonfigurovány, aby signál bylo možno dekodovat na dálku a zároveň se minimalizovalo rušení v běžném provozu stanic. Hlavní výhody oproti LTE PRS je flexibilita konfigurace signálu [5][8].

1.2.3 UL-TDoA

je založeno na stejných principech jako DL-TDOA, až na to, že časový rozdíl měření provádí základnová stanice. Z pohledu mobilních zařízení je jednodušší UL-TDoA pro její jednoduchost, protože nevyžaduje žádné specifické umístění pro měření. Jediné co musí mobilní zařízení dělat je přenášení SRS. Sice pro mobilní zařízení je to jednodušší, ale implementace této sítě je složitější [5][8].

1.2.4 Multi-RTT

vzniklo na základě RTT využívaného v LTE, ale ten je založen na výkonu signálu, takže proto v 5G NR bylo toto vyřešeno představením nové poziční metody. Tato metoda provádí navíc RTT měření na sousedních základnových stanicích, což umožňuje pouze trilaterální algoritmus měření za pomoci časování. Zde je rozdíl oproti NR ECID, který měří výkon pouze sousedních buněk, zatímco Multi-RTT využívá více RTT měření pro obě základnové stanice, jak obsluhující, tak sousední. Hlavní výhodou této metody je, že přesnost určování polohy není závislá na synchronizaci základnové stanice, ale právě díky toho je zvýšené zatížení sítě v důsledku generování dodatečné uplinkové signalizace[5][9].

1.2.5 NR ECID

je naprosto rozdílná od metody ECID použité v LTE. Měření už není závislé na RTT, ale provádí opravy polohy pouze už s Multi-RTT. Další rozdíl je v tom, že se u této metody neočekává, že mobilní zařízení nebude provádět žádné specifické měření. Místo toho by měl hlásit informace, které jsou dostupné v době žádosti. Měření se zde provádí na základě synchronizačního signálu nebo na základě referenčního signálu stavu kanálu [5].

1.2.6 DL-AoD

je založena na měření sestupných signálů PRS z různých paprsků přijatých mobilním zařízením. Měření probíhá na mobilním zařízení, a poté je ohlášeno zpět do sítě. Sít dále podporuje určení polohy na základě UE, ale pouze za předpokladu, že sít vysílá lokaci základové stanice, informace o paprsku a směr, kterým je paprsek přenášen. Pokud pomocné údaje jsou vysílány za pomoci

polohovacích systémových informačních bloků, tak je možné tuto metodu provést kompletně na straně UE bez jakéhokoliv specifického uplinkového přenosu [5][8].

1.2.7 UL-AoA

je přesně opačná metoda oproti DL-AoD, protože zde základnová stanice identifikuje ze kterého směru přicházejí uplinkové signály. Měření pouze probíhá na straně základnové stanice, proto u této metody není podporován žádný režim založen na UE [5][8].

1.2.8 5G Timing Advance

Probíhá velice podobně jako u LTE je zde využit mechanismus časového předstihu (TA) pro úpravu časování přenosů mezi základnovou stanicí a mobilním zařízením. V 5G je TA využito i ke synchronizaci přenosu signálu po uplinkovém kanálu z mobilního zařízení do základnové stanice. Zde se jednotky TA pohybují v rozmezí od 0 do 3846. Hodnota TA se dynamicky mění vzhledem ke vzdálenosti mezi základnovou stanicí a mobilním zařízením. 5G TA mechanismus se klíčový pro návrh 5G sítě, pomáhá totiž zajistit spolehlivost a efektivitu komunikace mezi stanicí a zařízením [5][10].

Vzorce pro výpočet jednotky TA v 5G:

$$T_{TA} = (N_{TA} + N_{TA,offset}) * T_c$$

$$N_{TA} = T_A * 16 * 64 / 2^\mu$$

$$T_c = \frac{1}{480k * 4096} = 0.509ns$$

Ve vzorci se zobrazuje $N_{TA,offset}$, odkazující na TimingAdvanceOffset, kde jeho hodnoty jsou 0, 25600 a 39936, což v našem případě kampusové sítě je základních 25600. Dále je důležitý Subcarrier Spacing 15 kHz, 30 kHz a 60 kHz, který je následně důležitý pro výpočet samotné vzdálenosti, protože jestli budeme počítat s 15 kHz, tak vzdálenost pro TA = 1 bude 78.125 m stejně jako u LTE. Pro 30 kHz bude TA = 1 = 39.06 m a při 60 kHz bude TA = 1 = 19.53 m. Tento parametr tedy udává jaká je přesnost sítě, což znamená čím větší kmitočet tím bude spočítána větší přesnost [5][10][11].

1.2.9 Porovnání 5G NR lokalizačních metod

Tabulka 1.2: Porovnání 5G NR lokalizačních metod

Technologie	Přesnost	Výhody	Nevýhody
NR ECID	Střední	Nízká cena, využití v oblastech s malým počtem základnových stanic	Nevhodná do vnitřních prostorů
DL-TDoA	Velmi vysoká	Nízká latence pro zjištění polohy v reálném čase	Potřeba synchronizace mezi základnovými stanicemi
UL-TDoA	Vysoká	Nízká latence pro zjištění polohy v reálném čase, není potřeba velké množství základnových stanic	Hrozí ohrožení přesnosti odrazem a difrakcí signálu
Multi-RTT	Velmi vysoká	Využití většího počtu kmitočtů dodává vysokou přesnost, ověření o přijmutí signálu	Náročná implementace, potřebná synchronizace mezi základnovými stanicemi
DL-AoD	Velmi vysoká	Dobrá kvalita signálu díky přenosu do určeného směru	Vyšší cena, omezený dosah vzdálenosti
UL-AoA	Vysoká	Využití v oblastech s malým počtem základnových stanic, nízká latence	Vyšší cena, omezený dosah vzdálenosti

[5][12]

V tabulce 1.2 jsou popsány metody lokalizace v rámci 5G NR z hlediska přesnosti, výhod a nevýhod. Lze si všimnout, že z hlediska přesnosti jsou lepší metody využívající downlink signál. Což je, ale ve většině vykoupeno náročnější implementací či vyšší pořizovací cenou. Zatím co nejméně přesná metoda vychází na NR ECID, který sice není tak moc přesný, ale za to je velice levný na implementaci, jelikož je možno ho nastavit na již funkční infrastrukturu a nevyžaduje dodatečný hardware [5][12].

Kapitola 2

Měření v kampusové síti pomocí Nemo Outdoor

2.1 Kampusová 5G NR síť

8. července 2020 byla úspěšně spuštěna kampusová 5G síť ve spolupráci s T-Mobile, jedná se o vůbec první založenou privátní průmyslovou 5G síť v České Republice. Pokrývá několik budov a venkovní koridor. Tyto prostory se řadí do Smart Factory neboli univerzitní malé továrny s robotizovanou linkou a prvky Průmyslu 4.0 [13][14].

Od března 2022 ve spolupráci s CESNET byla nasazena experimentální technologie milimetrových vln pro 5G NR na Fakultě elektrotechniky a informatiky. Technologie zaručuje výkonný baseband, rádiovou jednotku konfigurovanou 8x100MHz (2x2 MIMO) v pásmu 26.5-27.3 GHz a šířkou rádiového kanálu 800 MHz. Díky toho je možné provádět vysokorychlostní rádiové datové přenosy s velice nízkou latencí [15].

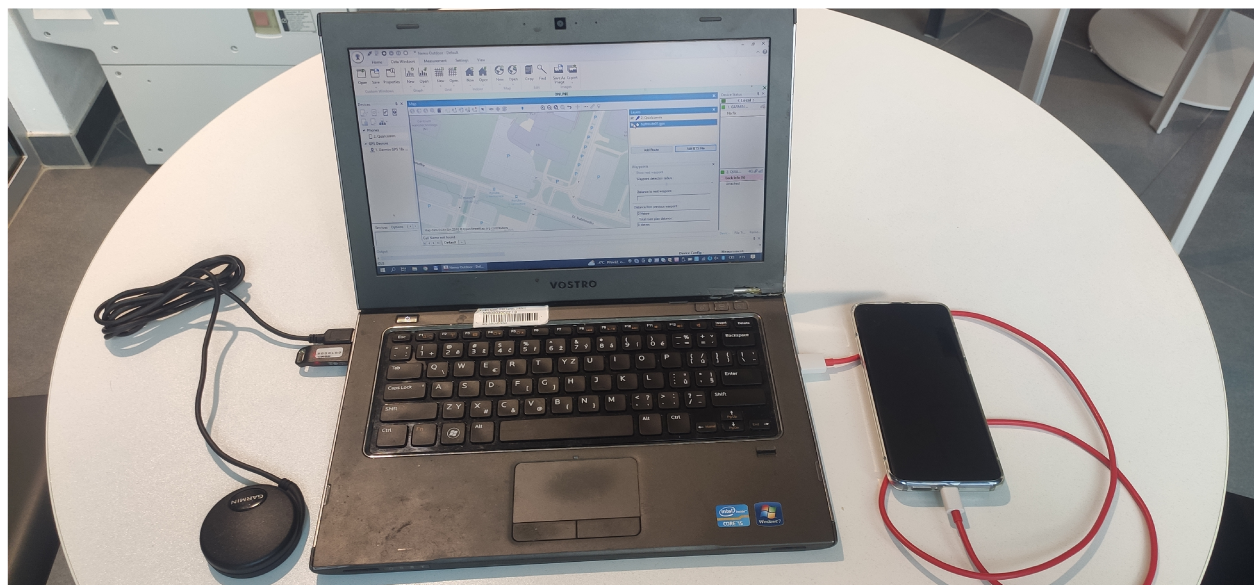
2.2 Nemo Outdoor Drive Test Solution

Jedná se o platformu, která umožňuje provozovatelům, výrobcům a uživatelům mobilních sítí sledovat, testovat a optimalizovat tyto sítě. Je složeno ze řady softwarových a hardwarových nástrojů, které zprostředkovávají sběr a analýzu síťových dat [16].

Mezi hardwarovou část lze zařadit jakékoliv přenosné zařízení, které disponuje potřebnými měřicími funkcemi a také slouží ke shromažďování informací jako je například kvalita, síla a pokrytí signálu [16].

Nemo Outdoor software vytvořený společností Keysight Technologies slouží pro podrobnou analýzu a vizualizaci zachycených dat. Umožňuje uživatelům tyto data zpracovávat a analyzovat. Ze zobrazených zpráv lze následně získat přesný přehled o výkonu a chodu sítě a to následně je možno využít pro její optimalizaci [16].

2.3 Zapojení měřící sestavy



Obrázek 2.1: Zapojení sestavy připravené pro měření

Na obrázku 2.1 je zobrazen notebook s připojeným mobilním zařízením Mi 10 Pro, které má odblokované servisní porty a je nastaveno jako modem pro příjem LTE a 5G NR signálu, dále je připojen GPS modul Garmin 18x USB, který slouží pro kontrolu GPS polohy s mobilním zařízením. Následně je spuštěn program Nemo Outdoor a připraven k měření potřebných dat.

2.4 Využití modulu RM530N-GL

Primárně jsem pro měření využíval kombinaci mobilního telefonu Mi 10 Pro a Garmin 18x USB GPS, ale pro zjištění dat ještě z dalšího zařízení jsem využil vývojového kitu ve kterém je nainstalován čip RM530N-GL vyvíjen společností Quectel. Předpokládám, že díky tohoto čipu budu schopen sbírat data s větší přesností oproti telefonu Mi 10 Pro.



Obrázek 2.2: Vývojový kit s čipovou sadou RM530N-GL

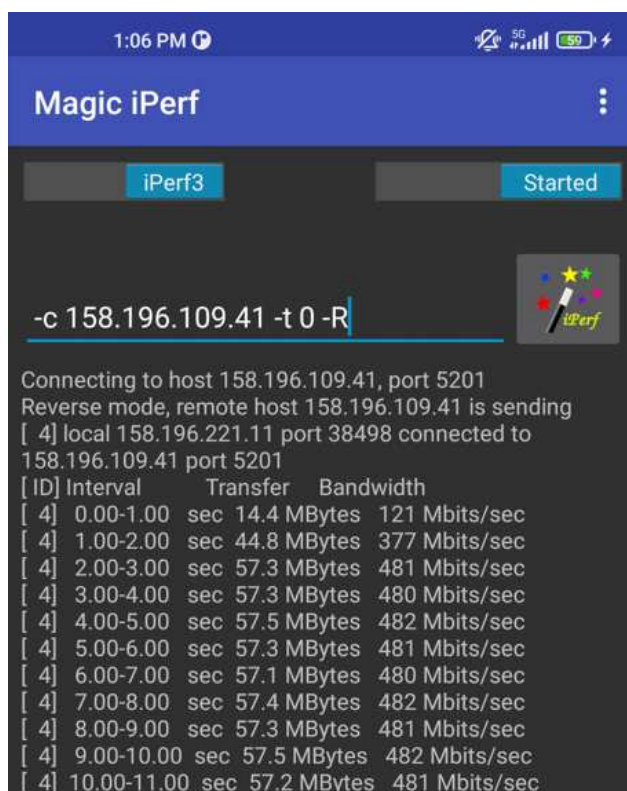
2.5 Využití aplikace iPerf3 pro měření

Jedná se o nástroj sloužící k aktivnímu měření v IP sítích. Je vydán spoluprací ESnet a Lawrence Berkeley National Laboratory, kteří zodpovídají za jeho vývoj a nové rozšíření nebo vylepšení. iPerf3 je znám hlavně díky jeho měření s dosažením maximální šířky pásma. Podporuje různé protokoly jako například UDP, TCP a SCTP [17].

V mém případě jsem tento nástroj využil pro zajištění komunikace mobilního zařízení a základnové stanice, jelikož 5G NR vrstva je aktivní pouze pokud probíhá aktivní provoz na zařízení, musím zajistit, aby byla tato vrstva aktivní, proto jsem využil jsem příkazu `iperf3 -c 158.196.109.41 -t 0 -R`, který umožňuje aktivní přenos pro zajištění 5G NR vrstvy.

Následující znaky znamenají:

- `-c` = nastavení se do módu klienta
- `-R` = běží v reverse modu
- `-t 0` = nastavení času pro přenosu, 0 = nepřetržitý



The screenshot shows the Magic iPerf application interface. At the top, the status bar displays the time 1:06 PM, signal strength, 5G connectivity, and battery level. The app title is "Magic iPerf". Below the title, there are two buttons: "iPerf3" and "Started". The command `-c 158.196.109.41 -t 0 -R` is entered in a text field. Below the command, the app shows the following output:

```
Connecting to host 158.196.109.41, port 5201
Reverse mode, remote host 158.196.109.41 is sending
[ 4] local 158.196.221.11 port 38498 connected to
158.196.109.41 port 5201
```

[ID]	Interval	Transfer	Bandwidth
[4]	0.00-1.00 sec	14.4 MBytes	121 Mbits/sec
[4]	1.00-2.00 sec	44.8 MBytes	377 Mbits/sec
[4]	2.00-3.00 sec	57.3 MBytes	481 Mbits/sec
[4]	3.00-4.00 sec	57.3 MBytes	480 Mbits/sec
[4]	4.00-5.00 sec	57.5 MBytes	482 Mbits/sec
[4]	5.00-6.00 sec	57.3 MBytes	481 Mbits/sec
[4]	6.00-7.00 sec	57.1 MBytes	480 Mbits/sec
[4]	7.00-8.00 sec	57.4 MBytes	482 Mbits/sec
[4]	8.00-9.00 sec	57.3 MBytes	481 Mbits/sec
[4]	9.00-10.00 sec	57.5 MBytes	482 Mbits/sec
[4]	10.00-11.00 sec	57.2 MBytes	481 Mbits/sec

Obrázek 2.3: Výpis spuštěného iPerf3

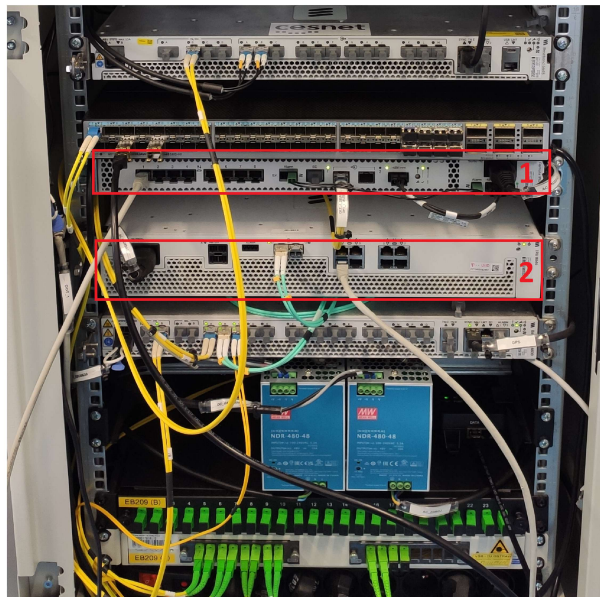
2.6 Sestrojení sestavy pro měření lokalizace v LTE a 5G

Abych mohl měřit rádiový signál vysílaný za pomoci DOTů ve venkovním prostoru, bylo za potřebu zhotovit příslušnou aparaturu pro jejich přichycení. Tu jsem proto zhotovil ze dřevěných latí, příslušných šroubů a úchytů pro určených pro DOTy a neodymových magnetů, které sloužili pro pevné uchycení na parapetu z učebny. Aparatura je vyobrazena na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: DOTy v aparatuře

DOT číslo jedna slouží pro LTE a je zapojen do IRU 2242 od společnosti Ericsson a DOT číslo dvě slouží pro 5G NR a je zapojen do IRU 8846 také od společnosti Ericsson, to lze vidět na obrázku 2.3. DOTy jsou propojeny pro komunikaci s jednotkami kabely Cat.6A.



Obrázek 2.5: Rack se zapojenými DOTy

2.7 Nastavení Nemo outdoor

Pro správný chod zařízení pro měření bylo důležité mít nainstalované potřebné ovladače jak pro Mi 10 Pro a RM530N-GL, tak pro Garmin 18x GPS. Díky ovladačům je notebook schopný vnímat mobilní zařízení jako Qualcomm modem pro příjem LTE a 5G NR signálu. Je také potřebné, aby Mi 10 Pro a RM530N-GL měli v sobě vloženou SIM kartu pro kampusovou síť, když jsou tyto okolnosti splněny je možno přejít dále k testovacímu měření timing advance pro kampusovou síť.

2.8 Měření kampusového LTE makro buňky

Níže bude popsáno testovací měření venkovní LTE buňky, která pokrývá širokou plochu kampusu. Jelikož jsem chtěl zachytit vzrůstající hodnotu timing advance postupoval jsem od samotného vysílače dále, abych si mohl ověřit zda-li mám přímý signál od vysílače nebo se jedná o signál odražený o okolní budovy, čili jsem testoval provoz v zástavě, jelikož univerzitní kampus skvěle slouží pro reprezentaci funkčnosti v zástavbě.



Obrázek 2.6: Mapa trasy měření kampusové venkovní LTE buňky

Na obrázku 2.4 je vyobrazena má trasa měření zelený bod zastupuje vysílače a další červené body jsou vybrané pro ukázkou hodnot z dané oblasti. Hodnoty timing advance budou zobrazeny v tabulce níže.

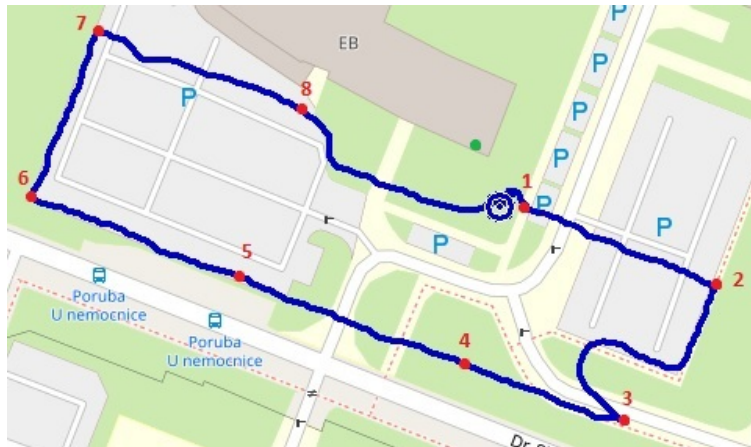
Tabulka 2.1: Hodnoty TA a vzdálenosti pro kampusové LTE buňky

Bod	Timing Advance	Vzdálenost podle TA [m]	Vypočtená vzdálenost [m]
1	1	78.125	43
2	2	156.25	66
3	2	156.25	112
4	3	234.375	136
5	4	312.5	195
6	5	390.625	273
7	5	390.625	329
8	5	390.625	
9	8	625	
10	8	625	
11	9	703.125	
12	7	546.875	
13	5	390.625	

Hodnoty vypočtené vzdálenosti jsem počítal podle pythagorovy věty vzhledem k naměřené přímočaré cestě k bodu z map a výšky vysílače. Od bodu osm už by byla vypočtená vzdálenost velice nepřesná, jelikož terénu už začínal být velice rozmanitý, proto jsem další hodnoty vzdálenosti nevyplisoval. Bohužel jde vidět, že hodnoty timing advance sedí pouze pro první bod, poté už se jedná o velké rozdíly kvůli odrazům signálu způsobeného v zástavbě. U bodu 11 lze vidět, že se hodnota měřeného timing advance vystoupala až k 9, což jak je už zmíněno je způsobeno zástavbou a také velkým poklesem výšky. Dalších přibližně 60 metrů od bodu 11 už RSRP hodnota klesla pod -136 a to vedlo ke ztrátě signálu, který následně opět naskočil po příchodu do otevřenějšího prostředí.

2.9 Měření první trasy

Na níže zobrazeném obrázku 2.7 je zobrazeno měření provedené za pomoci sestavené aparatury pro DOTy a dále budou rozvedeny naměřené hodnoty timing advance pro LTE a 5G za pomoci mobilního telefonu Mi 10 Pro a kitu s čipovou sadou RM530N-GL. Měření probíhalo v menším měřítku než měření kampusové LTE makro buňky, jelikož vyzařovací výkon DOTu je znatelně nižší oproti venkovního kampusového vysílače, jelikož jsou primárně nevrženy pro vnitřní pokrytí.



Obrázek 2.7: Mapa trasy prvního měření

Trasa vyobrazená na obrázku 2.7 se týkala konkrétně parkoviště ležící hned za fakultou FEI. Zelená tečka na mapě zastupuje vysazené DOTy a červeně jsou značeny kontrolní body měření, které jsou si zvolil po trase pro lepší představu, kde byly měřeny hodnoty v tabulkách 2.2 a 2.3. Prostor byl zvolen pro mé první zjištění pokrytí DOTů.

Tabulka 2.2: Hodnoty LTE TA první trasy

Bod	Timing advance Mi 10 Pro	Timing advance RM530N-GL	Vypočítaná vzdálenost [m]
1	1	1	27
2	1	1	71
3	1	1	74
4	1	1	53
5	1	1	67
6	2	2	109
7	2	2	99
8	1	1	58

Tabulka 2.2 ukazuje naměřené hodnoty LTE timing advance pomocí Mi 10 Pro a RM530N-GL. Dle teorie je hodnota LTE TA 1 = 78 metrů a další hodnoty jsou vypočteny pomocí původní hodnoty timing advance a připočtení nové, proto LTE TA 2 = rozmezí mezi 78 a 156 metry. Do tabulky jsem také zařadil vypočítanou vzdálenost od základnové stanice ke měřicímu zařízení. Vzdálenost je vypočítána za pomoci pythagorova věty stejně jak při měření kampusové LTE makro buňky. Z tabulky 2.2 si lze povšimnout, že hodnoty timing advance se pohybují ve správných mezích dle teorie vzhledem ke vzdálenosti.

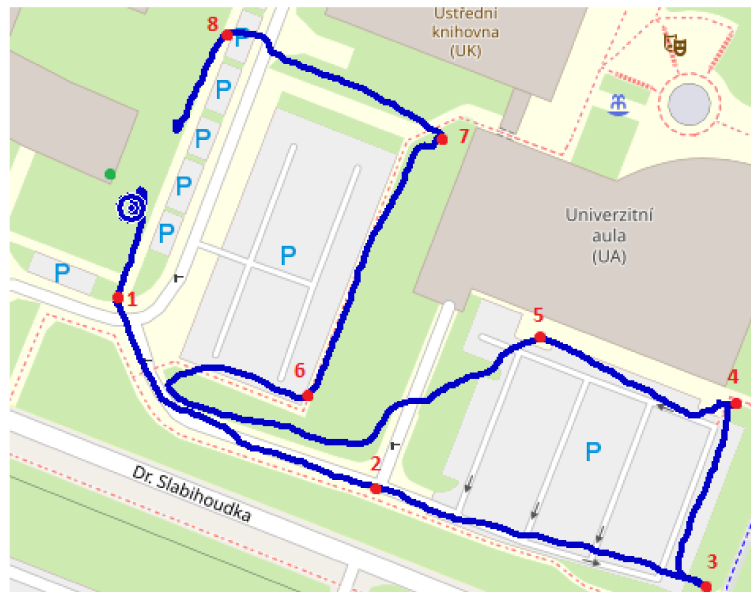
Tabulka 2.3: Hodnoty 5G TA první trasy

Bod	Timing advance Mi 10 Pro	Timing advance RM530N-GL	Vypočítaná vzdálenost [m]
1	2	1	27
2	2	2	71
3	2	2	74
4	3	2	53
5	3	2	67
6	4	3	109
7	4	3	99
8	2	2	58

Výše zobrazená tabulka 2.3 obsahuje hodnoty timing advance vztažené pro 5G. Primární rozdíl oproti LTE je, že 5G NR pracuje na subcarrier spacing 30 kHz, zatímco LTE v našem případě pracuje pouze na 15 kHz. Díky tomu hodnota timing advance pro 5G je dvakrát přesnější v rámci vzdálenosti. Oproti LTE je hodnota 5G TA 1 = 39 metrů, takže poloviční proti LTE TA 1. Ze zobrazených hodnot si lze všimnout, že díky přijímacím anténám v kitu s čipovou sadou RM530N-GL jsou hodnoty přesnější oproti hodnotám naměřených telefonem Mi 10 Pro, což je pochopitelné, protože mobilní telefon se snaží být co nejvíce kompaktní, zatímco kit s RM530N-GL dovoluje lepší přijímací antény.

2.10 Měření druhé trasy

Pro druhé měření jsem zvolil větší plochu oproti prvnímu měření, také se jedná o plochu s rozmanitějším terénem, díky většímu převýšení způsobeného vyrovnaním plochy pro parkoviště vedle budovy fakulty FEI. Tato plocha také dovozovala se více vzdálit od DOTů, proto jsem počítal se zajímavějšími výsledky měření.



Obrázek 2.8: Mapa trasy druhého měření

Na obrázku 2.8 jsou opět vyobrazeny zvolené kontrolní body pro porovnání naměřených hodnot timing advance. Zelený bod zobrazuje pozici DOTů.

Tabulka 2.4: Hodnoty LTE TA druhé trasy

Bod	Timing advance Mi 10 Pro	Timing advance RM530N-GL	Vypočítaná vzdálenost [m]
1	1	1	32
2	2	2	102
3	3	3	171
4	3	3	164
5	2	2	113
6	1	1	75
7	2	2	80
8	1	1	47

Výše zobrazená tabulka 2.4 obsahuje hodnoty LTE timing advance pro trasu na obrázku 2.8. Zde jsou vzdálenosti oproti prvnímu měření větší, proto také byla zvolena tato trasa pro druhé měření, jelikož jsem chtěl otestovat přijímané hodnoty i z větší vzdálenosti. Například u zvoleného bodu 4 nebyl přímý výhled na DOTy, ale na změně hodnoty timing advance se to zřetelně neprojevovalo.

Tabulka 2.5: Hodnoty 5G TA druhé trasy

Bod	Timing advance Mi 10 Pro	Timing advance RM530N-GL	Vypočítaná vzdálenost [m]
1	2	1	32
2	4	3	102
3	6	5	171
4	6	5	164
5	4	3	113
6	3	3	75
7	4	3	80
8	3	2	47

Tabulka 2.4 zobrazuje hodnoty timing advance naměřené pro 5G NR. Lze si povšimnout, že hodnoty měřené kitem s RM530N-GL jsou mnohem přesnější než hodnoty poskytnuty telefonem Mi 10 Pro. Tyto odchylky jsou nejspíše způsobeny rozdílností přijímacích antén a moderností čipových sad, jelikož RM530N-GL je stvořen primárně pro 5G technologii založenou na 3GPP Release 16, tím pádem poskytuje lepší potřebné předpoklady oproti telefonu Mi 10 Pro, který byl uveden do prodeje v roce 2020. Díky modernější technologii a lepším přijímacím anténám poskytuje RM530N-GL přesnější a spolehlivější data.

Kapitola 3

Návrh laboratorní úlohy

Níže bude návrh zadání a návod pro vypracování úlohy určené do odborného předmětu, která se bude zabývat tematikou lokalizace v mobilní síti. Úlohu jsem vytvořil podle mých zkušeností z měření, které je popsáno již dříve v této práci.

3.1 Úloha měření Timing Advance pro LTE a 5G síť

Zadání:

1. Ověřte si správný chod Nemo Outdoor na notebooku a zdali jsou správně připojené měřicí zařízení, poté postupovat **Home > Add > Phone > Qualcomm > nastavit porty**
 - Měřicí zařízení musím být ve správci zařízení jako **modem**
 - Zjistit ze správce zařízení a následně v Nemu nastavit **DM port = trace** a **modem = modem port**
 - Kliknout na online a vše se spustí
2. Zapojit DOTy namontované na aparaturu a ujistěte se, že LED značení bude svítit zeleně.
 - DOT1 LTE zapojen do IRU 2242 port1 (úplně v levo)
 - DOT2 NR zapojen do IRU 8846 port1 (uprostřed)
3. Připravte si iPerf3 s příkazem **iperf3 -c 158.196.109.41 -t 0 -R**, který slouží pro zajištění provozu mezi uživatelským zařízením a základnovou stanicí. Toto je potřebné, aby byla aktivní NR vrstva a získali jste správné data. Také si můžete ověřit provoz pomocí speedtestu ideálně CESNET, kde pokud je aktivní NR vrstva, tak bude rychlost downloadu nad 193 Mbps.

4. Aparaturu s DOTy si nastavte pod ideálním úhlem a směrem na plochu kde bude probíhat měření.
5. Zvolte si ideální trasu viz obrázek níže, můžete se i odpoutat od vyznačené plochy.



6. V programu Nemo Outdoor je potřeba zvolit workspace pro zobrazení potřebných parametrů v levém horním rohu **Ikona vysílače > workspace file** zvolit z výběru vytvořený workspace **TA 5G LTE**.
7. Na úplně nejvyšší liště v levém rohu spustit **recording**, kdy Nemo Outdoor začne nahrávat potřebné parametry. V tomto kroku je důležité spustit iPerf3, aby byl zajištěn správný chod NR vrstvy.
8. Pohybujte se po vybrané ploše a ideálně si zvolte body, kde by mohly být hodnoty rozdílené nebo něčím zajímavé např. zařízení nemá přímý výhled na základnovou stanici nebo se budete snažit co nejvíce vzdálit od základnové stanice. Tyto nápady jsou zcela na vás, ale ne důležité je následně v protokolu popsat.

9. Zpracujte naměřené data do tabulky viz níže, kde bude zobrazeno timing advance pro LTE a 5G NR vztaženo ke vámi zvoleným bodům. Je důležité tyto body zaznačit i na mapě a popsat proč jste si právě zvolili tyto kontrolní body. A v posledním sloupci tabulky vypočítat vzdálenost od základnové stanice k měřicímu zařízení.

Bod	Timing Advance LTE	Timing Advance 5G NR	Vypořčítaná vzdálenost [m]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			

10. V závěru popište naměřené hodnoty vztažené ke zvoleným bodům a proč jsou hodnoty timing advance pro LTE a 5G NR rozdílné a zdali vzdálenost vztažená pro danou hodnotu timing advance odpovídá reálné vzdálenosti.

Kapitola 4

Vyhodnocení měřených výsledků

Během provádění mých měření jsem dospěl k těmto výsledkům. V první řadě jsem si vyzkoušel chování kampusové LTE makro buňky. Jelikož se jedná o venkovní vysílač jehož úkolem je zajistit pokrytí po hlavní ploše kampusu, tak je jeho vysílací výkon mnohem větší, než experimentální DOTy pro vnitřní využití, které jsem používal pro mé měření hodnot timing advance. Provedl jsem měření timing advance i pro venkovní kampusovou LTE makro buňku a zde jsem pozoroval, jaký vliv má hustá zástavba na přijímané hodnoty timing advance. Hodnoty byly velice zkreslené oproti reálné vzdálenosti, protože docházelo k veliké míře odrazů, tudíž naměřené hodnoty se neshodují s reálnou vzdáleností. Před prvním i druhým měřením bylo důležité zajistit vypnutí venkovní LTE makro buňky, jelikož docházelo ke značnému rušení způsobeného vyšším výkonem oproti DOTům. Pro první měření hodnot timing advance jsem zvolil plochu za fakultou FEI směrem k fakultní nemocnici. Měřené hodnoty timing advance pro LTE a 5G zde odpovídali vzhledem k teorii, jen u hodnot timing advance pro 5G měřených pomocí telefonu Mi 10 Pro se hodnoty lišili, což je dle mého způsobeno starším zařízením a ne tak kvalitní přijímací anténě, zatím co kit s čipovou sadou RM530N-GL je přímo navrhnuto pro spolupráci s 5G technologií a kit poskytuje i čtyři přijímací antény, což vede k přesnějším výsledkům. Pro trasu druhého měření jsem zvolil plochu, která mi dovozovala větší plochu, kde jsem mohl získávat potřebné data, také se jedná o plochu s rozmanitějším terénem oproti té v prvním měření. Druhé měření poskytlo zajímavější výsledky měření. Opět se ukázalo, že kit s RM530N-GL byl přesnější oproti telefonu Mi 10 Pro, díky modernější architektuře a lepším přijímacím anténám.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s možnostmi a typy lokalizačních metod v LTE a 5G síti v rámci 3GPP Rel-14 až Rel-17, což jsem popsal a rozebral v první části a následně vzájemně porovnal jednotlivé metody. Z hlediska mého využití jsem pracoval s parametrem timing advance, který není přímo určený k lokalizaci, ale používá se pro zajištění správného časování zpráv, které si vyměňují základnová stanice a uživatelské zařízení. Za pomoci jeho hodnoty lze zjistit přibližnou vzdálenost uživatelského zařízení od základnové stanice.

Hlavním cílem bylo navrhnout sestavu měření pro analýzu dat a následně zpracovat a vytvořit úlohu do předmětu, který se zabývá tematikou lokalizace v mobilní 5G síti. K měření dat jsem využil DOTy poskytnuté společností Ericsson, které ačkoliv jsou navrženy pro pokrytí vnitřních prostorů jsem využil ke měření prováděném ve venkovních prostorech kampusu. Byla potřeba zhotovit aparaturu, ke které byly DOTy přichyceny. Měření probíhalo za pomoci programu Nemo Outdoor a připojeného mobilního telefonu Mi 10 Pro a vývojového kitu s čipovou sadou RM530N-GL od společnosti Quectel.

Ve zhodnocení měřených dat jsem popisoval porovnání LTE a 5G timing advance a dospěl k výsledku, že RM530N-GL je vhodnější a přesnější. Také jsem si ověřil, že hodnoty 5G timing advance v kampusové síti jsou dvakrát přesnější oproti hodnotám pro LTE. Informace, které jsem získal během mého měření jsem následně promítl do vytvořené úlohy do předmětu zabývající se lokalizací v 5G síti.

Kvůli dostupného vybavení jsem nebyl úplně schopen určit přesnou polohu zařízení, ale pouze přibližnou vzdálenost od základnové stanice. Za pomoci timing advance by bylo možno získat i přesnější polohu, ale byla by k tomu potřeba tři základnových stanic. Díky změřených hodnot jednotlivých základnových stanic bych byl schopen určit polohu uživatelského zařízení, ale bohužel jsem větším počtem základnových stanic nedisponoval, tudíž jsem zpracoval výsledky jak jen bylo v mých možnostech.

Použitá literatura

- [1] THORPE, Mike a Ewald ZELMER. LTE Location Based Services Technology Introduction. Rohde & Schwarz, September 2013. Dostupné také z: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-location-based-services-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-122561.html
- [2] Positioning techniques for mobile devices in LTE. Hughes Systique [online]. Hughes Systique Corporation, 2015, July 16 2015 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.hsc.com/resources/blog/positioning-techniques-for-mobile-devices-in-lte/>
- [3] FISCHER, Sven. Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE. June 6, 2014. Qualcomm Technologies, 2014. Dostupné také z: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/otdoa_positioning_in_3gpp_lte_v1.pdf
- [4] Positioning with LTE. Ericsson, September 2011. Dostupné také z: <https://sharetechnote.com/Docs/WP-LTE-positioning.pdf>
- [5] MAIER, Stefan, Abhay PHILLIPS a Adrián GARCÍA. Location-Based Services in Cellular Networks from GSM to 5G NR. London: Artech, 2020. ISBN 9781630816346.
- [6] LTE: Timing Advance and Time Alignment Timer. How LTE Stuff Works [online]. Švédsko: KP, 2014 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <http://howltestuffworks.blogspot.com/2014/07/timing-advance-and-time-alignment-timer.html>
- [7] MAHYUDDIN, M.F.M., A. ISA, M. ZIN, A.H AFIFAH MAHERAN, Z. MANAP a M. K. ISMAIL. Overview of Positioning Techniques for LTE Technology. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering [online]. 2017, 27. september 2017, 9, 8 [cit. 2023-04-05]. ISSN 2289-8131. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/229274823.pdf>

[8]KEATING, Ryan, Mikko SAILY, Jari HULKKONEN a Juha KARJALAINEN. Overview of Positioning in 5G New Radio. 2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS) [online]. IEEE, 2019, 2019, 320-324 [cit. 2023-04-10]. ISBN 978-1-7281-2527-5. Dostupné z: doi:10.1109/ISWCS.2019.8877160

[9]GUO, Wenfei, Yue DENG, Chi GUO, Shufeng QI a Jingrong WANG. Performance improvement of 5G positioning utilizing multi-antenna angle measurements. Satellite Navigation [online]. 2022, 3(1), 14 [cit. 2023-04-10]. ISSN 2662-1363. Dostupné z: doi:10.1186/s43020-022-00078-y

[10]3GPP TS 36.213: V17.5.0. 3rd Generation Partnership Project [online]. 2023, 2023-03-30, 563 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427>

[11]Timing advance and transmission timing adjustments: V15.11.0. NR Explained [online]. Denmark: Yuan Wg (Learn with Examples), 2023 [cit. 2023-04-5]. Dostupné z: <https://www.nrexplained.com/ta>

[12]ETSI TS 138 305: V16.1.0. ETSI TS [online]. 2020, 2020-07-24, 117 [cit. 2023-04-5]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138300_138399/138305/16.01.00_60/ts_138305v160100p.pdf

[13]T-MOBILE SPUSTIL V OSTRAVĚ PRVNÍ KAMPUSOVOU SÍŤ. T-press [online]. Praha: T-Mobile, 2020, 15. července 2020 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <http://www.t-press.cz/cs/tiskove-materialy/tiskove-zpravy-t-mobile/t-mobile-spustil-v-ostrave-prvni-kampusovou-sit.html>

[14]Technická univerzita Ostrava jako živá laboratoř. VŠB-TUO [online]. Ostrava: VŠB, 2020 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/cs/o-univerzite/kampus/vsb-technicka-univerzita-ostrava>

[15]První experimentální nasazení technologie milimetrových vln pro 5G sítě v České republice. VŠB-TUO [online]. Ostrava: VŠB, 2022, 7. 4. 2022 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/cs/detail-novinky/?reportId=43407&linkBack=%2Fcs%2Fmedia%2Findex.html>

[16]NTA00002B Nemo Outdoor 5G NR Drive Test Solution. Keysight [online]. Santa Rosa, CA: Keysight Technologies, c2000-2023 [cit. 2023-04-2]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/NTA00002B/nemo-outdoor-5g-nr-drive-test-solution.html?&cc=CZ&lc=eng>

[17]IPerf [online]. United States: ESnet, 2014 [cit. 2023-04-2]. Dostupné z: <https://iperf.fr/>