VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

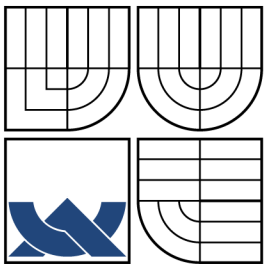
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE H2H A M2M KOMUNIKACE V MOBILNÍ SÍTI LTE-ADVANCED

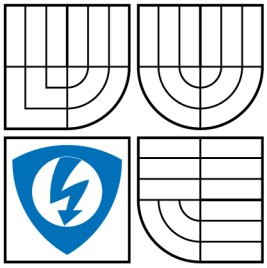
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE JOSEF ČÍHAL
AUTHOR

Brno 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE H2H A M2M KOMUNIKACE V MOBILNÍ SÍTI LTE-ADVANCED

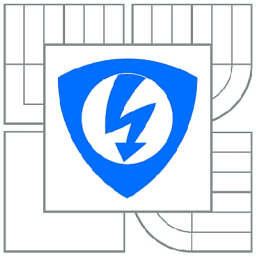
SIMULATION OF H2H AND M2M COMMUNICATION IN LTE-ADVANCED MOBILE NETWORK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — JOSEF ČÍHAL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JIŘÍ HOŠEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student:	Josef Číhal	***ID:***	154692
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Simulace H2H a M2M komunikace v mobilní síti LTE-Advanced

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci bakalářské práce se bude nutné seznámit s problematikou M2M (Machine-to-Machine) a H2H (Human-to-Human) komunikace v mobilní síti čtvrté generace (LTE-Advanced). Cílem teoretické části práce bude rozbor vlivu M2M komunikace na dodržení smluvených podmínek kvality služeb (QoS) pro H2H provoz. Praktická část práce bude realizována v simulačním prostředí NS-3 (Network Simulator 3), kdy bude vytvořen model sítě LTE-Advanced s datovým provozem reprezentujícím jak H2H, tak M2M komunikaci. Funkčnost vytvořeného modelu bude ověřena formou simulací zaměřených na propustnost sítě a zatížení základnové stanice mobilní sítě LTE (eNodeB).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] M2M communications: a systems approach. 1st ed. Editor David Boswarthick, Omar Elloumi, Olivier Hersent. Chichester: John Wiley, 2012, xxiii, 308 s. ISBN 978-1-119-99475-6.
[2] JOHNSON, Chris. Long term evolution: IN BULLETS. 2nd ed. Northampton: CreateSpace, 2012, 592 s. ISBN 978-1478166177.

Termín zadání:	9.2.2015	***Termín odevzdání:***	2.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hošek, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce „Simulace H2H a M2M komunikace v mobilní síti LTE-Advanced“ se zabývá teoretickým rozborem H2H (Human to Human) a M2M (Machine to Machine) komunikace v mobilní síti čtvrté generace (LTE/LTE-Advanced). Dále se zabývá vlivem M2M komunikace na dodržení smluvených podmínek kvality služeb (QoS) pro H2H provoz. Na základě teoretického rozboru byl vytvořen model M2M a H2H komunikace pomocí NS-3 (Network Simulator 3). Poslední část bakalářské práce se zabývá ověřením funkčnosti vytvořeného modelu formou simulací zaměřených na klíčové parametry provozu jako je zpoždění, propustnost a vytížení základnové stanice (eNodeB).

KLÍČOVÁ SLOVA

M2M, H2H, LTE-Advanced, LTE, NS-3, simulace, eNodeB

ABSTRACT

This bachelor thesis „Simulation of H2H and M2M communication in LTE-Advanced mobile network“ focuses on theoretical study of H2H (Human to Human) and M2M (Machine to Machine) communication in fourth-generation of mobile network (LTE/LTE-Advanced). It also focus on the influence of M2M communication to compliance with the agreed terms of quality of service (QoS) for H2H traffic. Based on the theoretical analysis was created model of H2H and M2M communication using NS-3(Network Simulator 3). Last part of bachelor thesis deals with verification of the functionality of created model through simulations focusing on the key operational parameters such as delay, throughput and load of base station (eNodeB).

KEYWORDS

M2M, H2H, LTE-Advanced, LTE, NS-3, simulation, eNodeB

ČÍHAL, Josef *Simulace H2H a M2M komunikace v mobilní síti LTE-Advanced*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 65 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Simulace H2H a M2M komunikace v mobilní síti LTE-Advanced“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno ....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. a panu Ing. Pavlu Maškovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno ....

podpis autora(-ky)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic

http://www.six.feec.vutbr.cz

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno . . . . . .

. . . . . .

podpis autora(-ky)

EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

OP Výzkum a vývoj
pro inovace

OBSAH

Úvod **11**

1 Mobilní sítě LTE/LTE-A a M2M komunikace **12**
1.1 Teoretický rozbor 3GPP 12
1.1.1 Vydání (Release) 13
1.2 Teoretický rozbor LTE a LTE-Advanced 16
1.2.1 Mobilní sítě v ČR 16
1.2.2 Obecný popis LTE 18
1.2.3 Obecný popis LTE-Advanced 20

2 Typy komunikací v mobilních sítích **21**
2.1 Teoretický rozbor H2H 21
2.1.1 Obecný popis H2H 21
2.1.2 Obecný popis VoLTE 21
2.2 Teoretický rozbor M2M 22
2.2.1 Obecný popis M2M 22
2.2.2 Přetížení mobilní sítě LTE M2M komunikací 22
2.2.3 Teoretický rozbor D2D komunikace 23
2.3 Porovnání M2M a H2H komunikace 27

3 Simulační prostředí NS-3 **28**
3.1 Obecný popis NS-3 28
3.1.1 LENA (LTE-EPC network simulator) 29
3.1.2 Ostatní použitý software 30

4 Praktická část bakalářské práce **32**
4.1 Simulace Ad hoc sítě v NS-3 32
4.2 Simulace LTE mobilní sítě v NS-3 35
4.3 Simulace předávání dat mezi Ad hoc sítí a LTE mobilní sítí 36
4.4 Výsledky a výstupy simulace předávání dat mezi sítí Ad hoc a mobilní sítí LTE 45
4.4.1 Vizualizace topologie a komunikace simulované sítě 45
4.4.2 Analýza paketů 49
4.4.3 Parametry přenosu mobilní sítí LTE 50
4.4.4 Výstup z konzole 55
4.5 Problémy vyskytující se v simulaci a návrh jejich řešení 56
4.5.1 Agregace dat na síťovém uzlu MTCG 56
4.5.2 Vytížení základnové stanice eNodeB 57

5 Závěr **58**

Literatura **59**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **61**

Seznam příloh **64**

A Obsah přiloženého CD **65**

A.1 Bakalářská práce-text 65

A.2 Bakalářská práce-kódy 65

A.2.1 Adhoc_cast.cc 65

A.2.2 LTE_cast.cc 65

A.2.3 Adhoc+LTE.cc 65

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Partnerský projekt 3GPP [5] 12
1.2 Předpověď počtu připojení dle generací mobilní sítě [7] 17
1.3 Předpověď celosvětově přenesených dat pomocí mobilních sítí [7] . . . 17
1.4 Architektura mobilní sítě LTE [3] 19
2.1 Příklad D2D služby typu Ad hoc [16] 25
2.2 Příklad D2D služby typu Agent [16] 25
2.3 Příklad D2D služby typu Mesh [16] 26
3.1 LTE/EPC architektura síťového simulátoru LENA [14] 29
3.2 Uživatelské prostředí vývojového prostředí Eclipse 30
4.1 Vytvořený .xml soubor zobrazený pomocí vizualizačního nástroje NetAnim 33
4.2 Ukázka QoS otagovaného UDP paketu pomocí programu Wireshark . 34
4.3 Zobrazení komunikace v LTE mobilní síti pomocí vizualizačního nástroje NetAnim 35
4.4 NetAnim zobrazující topologii sítě před spuštěním animace 46
4.5 NetAnim zobrazující komunikaci v rámci Ad hoc sítě 47
4.6 NetAnim zobrazující předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE 48
4.7 Analýza paketů v Ad hoc síti pomocí síťového analyzátoru Wireshark 49
4.8 Analýza paketů v mobilní síti LTE pomocí síťového analyzátoru Wireshark 50
4.9 Výpis souboru UlPdcpStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě 52
4.10 Výpis souboru UlMacStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě 53
4.11 Výpis souboru UlRlcStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě 54
4.12 Část výpisu z konzole vývojového prostředí Eclipse po skončení simulace předávání dat do LTE mobilní sítě 55

SEZNAM TABULEK

1.1 Rozdělení mobilních sítí podle generací [3] 18
2.1 Porovnání vlastností H2H a M2M komunikace [13] 27
4.1 Tabulka parametrů přenosu dat s užitím QoS třídy BestEffort(0) pro obě aplikace 33
4.2 Tabulka parametrů přenosu dat s užitím QoS třídy Voice(6) pro VoIP aplikaci 34

ÚVOD

M2M (Machine-to-Machine) komunikace se v posledních letech začíná značně rozmáhat a to díky jejímu širokému spektru užití. Tato komunikace s sebou přináší mnoho výhod ale i nevýhod, například může způsobovat přetížení mobilní sítě. M2M komunikace je blíže popsána v kapitole 2.2. Dále je v této kapitole ještě popsána H2H (Human-to-Human) komunikace a její srovnání s M2M komunikací, protože každá z popisovaných druhů komunikací má jiné požadavky na mobilní síť a jiné vlastnosti komunikace [1][3].

Za velkým rozvojem M2M komunikace stojí také rozvoj mobilní sítě LTE (Long Term Evolution) a novější verze LTE-Advanced. Oproti starším sítím 2. a 3. generace nabízejí mnoho výhod, například vyšší přenosové rychlosti, snížení doby navázání spojení a jiné. Tyto mobilní sítě jsou blíže popsány za srovnámím M2M a H2H komunikace v kapitole 1.2 [1][3].

V kapitole 3 je popsáno simulační prostředí NS-3 (Network Simulator 3) a další programové vybavení pro vytváření simulací. Vytváření simulací probíhalo ve vývojovém prostředí Eclipse pomocí programovacího jazyka C++ a s využitím knihovny NS-3.

V rámci této práce byly vytvořeny 3 modely sítí. První vytvořený model, viz kapitola 4.1, se zabývá komunikací v rámci Ad hoc sítě. Druhý vytvořený model, viz kapitola 4.2, se zabývá komunikací v rámci mobilní sítě LTE. Nejdůležitější je však v této práci právě 3. vytvořený model popsaný v kapitole 4.3. Jedná se o simulaci popisující kombinaci předchozích dvou modelů. V tomto modelu se nachází uzly představující Ad hoc síť, tedy 4 pohyblivé uzly, 5 nepohyblivých uzlů a sběrný uzel MTCG. Dále se v tomto modelu nachází uzly, které představují mobilní síť LTE, tedy uzly UE (MTCG), eNodeB, PGW a Remote Host. Cílem tohoto modelu bylo simulovat předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE.

Výsledkem této práce je zjištění možností simulace Ad hoc a LTE mobilní sítě. Byl tedy vytvořen podklad pro případné pokračování rozšiřování simulací a další řešení problémů, které v této práci nebyly vyřešeny.

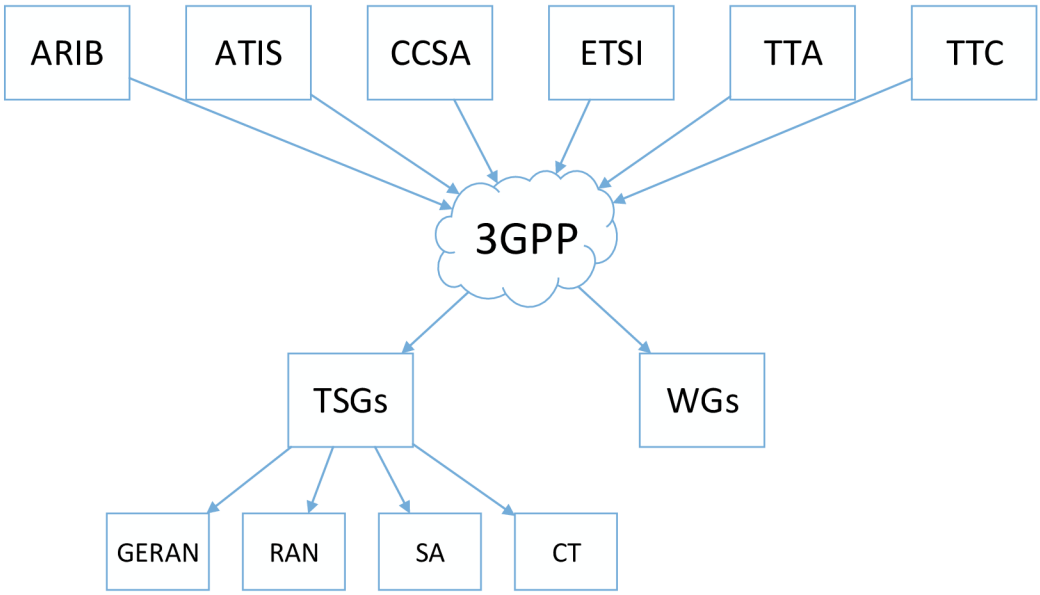
1 MOBILNÍ SÍTĚ LTE/LTE-A A M2M KOMUNIKACE

Na začátku této kapitoly je popsán partnerský projekt 3GPP, tento projekt vytváří standardy a specifikace pro mobilní sítě. Následuje kapitola, ve které je popsán aktuální stav mobilních sítí v České republice a jsou zde také popsány mobilní sítě LTE a LTE-Advanced.

1.1 Teoretický rozbor 3GPP

3GGP (The 3rd Generation Partnership Project) je partnerský projekt spojující 6 organizací kterými jsou [5]:

- ARIB (Association of Radio Industries and Businesses),
- ATIS (Alliance for Telecommunications Industry Solutions),
- CCSA (China Communications Standards Association),
- ETSI (European Telecommunications Standards Institute),
- TTA (Telecommunications Technology Association),
- TTC (Telecommunication Technology Committee).



Obr. 1.1: Partnerský projekt 3GPP [5]

Toto společenství vytváří standardy a specifikace pro telekomunikaci. Partnerství vzniklo v prosinci roku 1998 za účelem vytvoření mobilní sítě 3. generace neboli 3G mobilní síť [5].

3GPP specifikace vznikají prací několika pracovních skupin, kterými jsou takzvané TSGs (Technical Specification Groups), což jsou skupiny pracující na technických specifikacích a WGs (Working Groups), což jsou pracovní skupiny. TSGs se dále dělí na:

GERAN

GERAN neboli GSM/EDGE Radio Access Network specifikuje GSM mobilní technologii a to včetně GPRS i EDGE. Skládá se z dalších 3 pracovních skupin [5].

RAN

RAN neboli Radio Access Network specifikuje UTRAN (UMTS Terrastrial Radio Access Network) a E-UTRA (Evolved Universal Terrastrial Radio Access) známá jako LTE. Skládá se z dalších 5 pracovních skupin [5].

SA

SA neboli Service and System Aspects specifikuje požadavky služeb a celkovou architekturu 3GPP systémů. Dále je zodpovědný za koordinaci projektů. Skládá se z dalších 5 pracovních skupin [5].

CT

CT neboli Core Network and Terminals specifikuje jádro sítě a terminálové části 3GPP. Skládá se z dalších 4 pracovních skupin [5].

1.1.1 Vydání (Release)

3GPP vydává takzvaný Release ve kterém jsou specifikovány standardy a technologie. Tento projekt vydal několik Releasů, jmenovitě se jedná o [5]:

- Release 1999,
- Release 4,
- Release 5,
- Release 6,
- Release 7,
- Release 8,

- Release 9,
- Release 10,
- Release 11,
- Release 12 (plánován na březen 2015),
- Release 13 (plánován na březen 2016).

Release 8

Z hlediska této práce je nejdůležitější právě Release 8, jelikož se jedná o Release, ve kterém je poprvé představena mobilní síť LTE, která je pro tuto práci klíčová.

Tento Release 8 vyšel v roce 2008 a představil již zmiňovanou mobilní síť LTE s kompletně novým radiovým rozhraním a páteřní sítí, což způsobuje výrazné vylepšení výkonu přenosu dat v porovnání s předchozími systémy. Spolu s mobilní sítí LTE byly v rámci Release 8 představeny nové vlastnosti [5]:

- až 300 Mb/s downlink a 75 Mb/s uplink,
- zpoždění do 10 ms,
- implementace v šířkách pásma 1, 3, 4, 5, 10, 15 či 20 MHz pro umožnění více scénářů nasazení,
- OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) pro downlink,
- SC-FDMA (Single-carrier frequency-division multiple access) pro uplink,
- MIMO (Multiple Input Multiple Output) antény,
- paketově spínaná síť.

Release 9

Release 9 vyšel v roce 2010 a přinesl řadu vylepšení funkcí, které byly zavedeny v Release 8. Dále došlo k vývoji síťové architektury a představení nových služeb. Výpis nejdůležitějších parametrů či funkcí, které přišly s tímto Releasem [5]:

- zavedení LTE femtobuněk v podobě domácích eNodeB neboli HeNB (Home eNodeB),
- funkce SON (Self Organising Network) neboli funkce samostatně organizované sítě, kterou je například optimalizace kanálu s náhodným přístupem,
- eMBMS (evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service) pro efektivní dodávání stejného multimediálního obsahu do více míst,
- LCS (Location Services) neboli služba pro určování polohy mobilního zařízení.

Release 10

Release 10 vyšel v roce 2011. Přinesl podstatné navýšení kapacity a propustnosti mobilní sítě LTE, zároveň došlo k zavedení různých vylepšení pro dosažení vyššího výkonu mobilní sítě LTE pro mobilní zařízení nacházející se ve větší vzdálenosti od základnové stanice eNodeB. Výpis nejdůležitějších parametrů či funkcí, které přišly s tímto Releasem [5]:

- představení LTE-Advanced s až 3 Gb/s downlink a 1,5 Gb/s uplink,
- CA (Carrier Aggregation), který umožňuje kombinaci až 5 samostatných nosných k dosažení výsledné šířky pásma až 100 MHz,
- MIMO antény s konfigurací až 8x8 pro downlink a 4x4 pro uplink,
- zavední přenosových uzlů pro podporu heterogenních sítí HetNets (Heterogenous Networks), které obsahují širokou škálu velikostí buňek,
- eICIC (Enhanced Inter-Cell Interference Coordination) neboli zvýšená koordinace rušení mezi jednotlivými buňkami zvyšuje výkon směrem k okraji buňky.

Release 11

Release 11 byl vydán v roce 2013 byl postaven na Release 10, tedy přináší zlepšení dříve představených funkcí. Výpis nejdůležitějších parametrů či funkcí, které přišly s tímto Releasem [5]:

- vylepšení CA (Carrier Aggregation), MIMO (Multiple Input Multiple Output), přenosových uzlů a eICIC (Enhanced Inter-Cell Interference Coordination),
- došlo k zavedení nových frekvenčních pásem,
- zavedení koordinovaného multipoint přenosu a příjmu pro umožnění současné komunikace s více buňkami,
- zavedení pokročilejších přijímačů.

Release 12

Release 12 byl vydán v roce 2015. Přinesl mnoho vylepšení a funkcí, především pro FemtoCells, CA (Carrier Aggregation) a jiné. Výpis nejdůležitějších parametrů či funkcí, které přišly s tímto Releasem [5]:

- vylepšení FemtoCells (duální připojení, samostatná konfigurace a jiné),
- zavedení FDD/TDD CA,
- vylepšení technologie MIMO,

- zavedení technologie D2D (Device-to-Device) komunikace, která je popsána v kapitole 2.2.3,
- vylepšení eMBMS.

Release 13

Release 13 ještě vydán nebyl, avšak jeho vydání se předpovídá na průběh roku 2016. V této době jsou známy určité vlastnosti a vylepšení, které budou v rámci tohoto Release vydány. Výpis nejdůležitějších předpokládaných vylepšení [5]:

- zavedení LTE do nelicencovaného spektra,
- vylepšení CA (Carrier Aggregation) a to především zvýšení maximálního počtu nosných z 5 na 32,
- vylepšení MTC (Machine-Type Communication),
- vylepšení D2D komunikace z důvodu nasazování do pokročilých služeb například pro veřejnou bezpečnost,
- využití Full-Dimension MIMO, kdy standardní MIMO mělo až 8 anténních portů, avšak studie ukazuje, že je možné zavézt až 64 anténních portů,
- zavedení služby pro určování polohy uvnitř objektů (Indoor positioning), což má zlepšit přesnost určování pozice například při nouzovém hovoru.

1.2 Teoretický rozbor LTE a LTE-Advanced

V této kapitole je rozebrána současná situace mobilních sítí v ČR a také předpověď využití mobilních sítí po celém světě. Dále jsou v této kapitole stručně popsány mobilní sítě 4. generace LTE a LTE-Advanced.

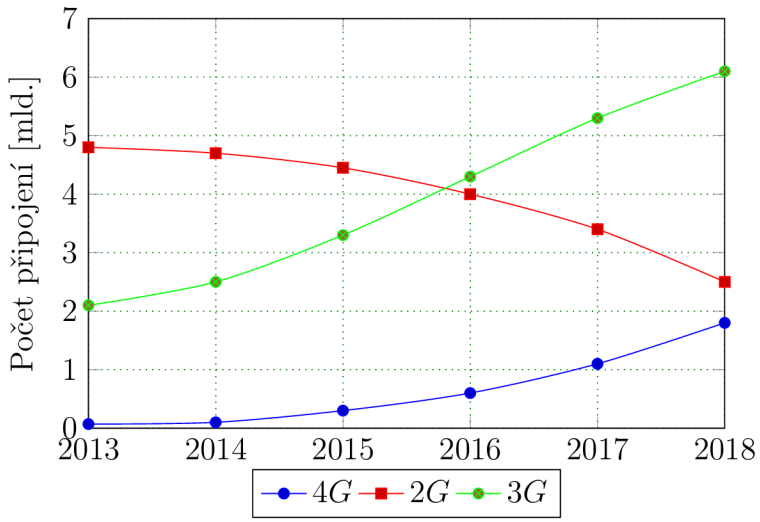
1.2.1 Mobilní sítě v ČR

V současné době se nejčastěji setkáváme s 3. generací (3G) a 4. generací (4G) mobilních sítí. S 3. generací mobilní sítě se můžeme setkat ve většině měst ČR, se 4. generací se zatím můžeme setkat pouze ve velkých městech (Praha, Brno, Ostrava, Mladá Boleslav) [4]. Jelikož se rok od roku zvyšuje poptávka po mobilních datech a co nejvyšší rychlosti, tak se mobilní operátoři T-Mobile, Vodafone a O2 v posledních letech velmi snaží o zavedení této generace na co největší území ČR [4].

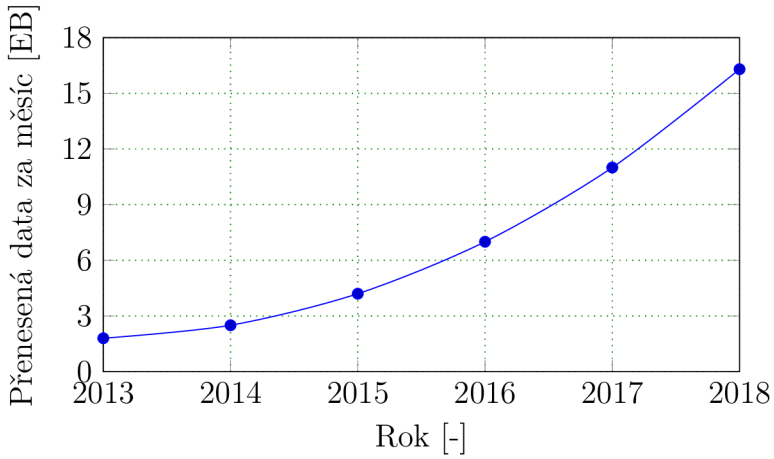
I přes značnou snahu zavádět mobilní síť 4. generace, stále existují místa (horské oblasti, odlehlá místa, vesnice), ve kterých se setkáváme pouze s mobilní sítí 2. generace. Tato generace postačuje na základní H2H a M2M komunikaci, avšak

pro náročnější komunikaci je potřeba zavádění mobilních sítí 3. a 4. generace i na tato místa [4].

Toto tvrzení potvrzuje i předpověď firmy Cisco. Ta předpovídá, že do roku 2018 na celém světě velmi výrazně vzroste celkový mobilní datový tok, jehož 51 procent by podle předpovědi mělo proběhnout právě přes mobilní síť 4G. Dále předpovídá úbytek 2G připojení, ale také nárůst 4G připojení a výrazný nárůst 3G připojení viz grafy na Obr. 1.2 a Obr. 1.3 [7].



Obr. 1.2: Předpověď počtu připojení dle generací mobilní sítě [7]



Obr. 1.3: Předpověď celosvětově přenesených dat pomocí mobilních sítí [7]

Tab. 1.1: Rozdělení mobilních sítí podle generací [3]

Generace	Standard	Typ	Maximální teoretická přenosová rychlost
1G	NMT, TACS	analogový	Nepřenáší digitální signál
2G	GSM, GPRS,EDGE, CDMA2000	digitální	307 Kb/s
3G	UMTS, HSPA+, LTE, HSUPA	digitální	172,8 Mb/s
4G	WiMAX-Advanced, LTE-Advanced	digitální	3 Gb/s

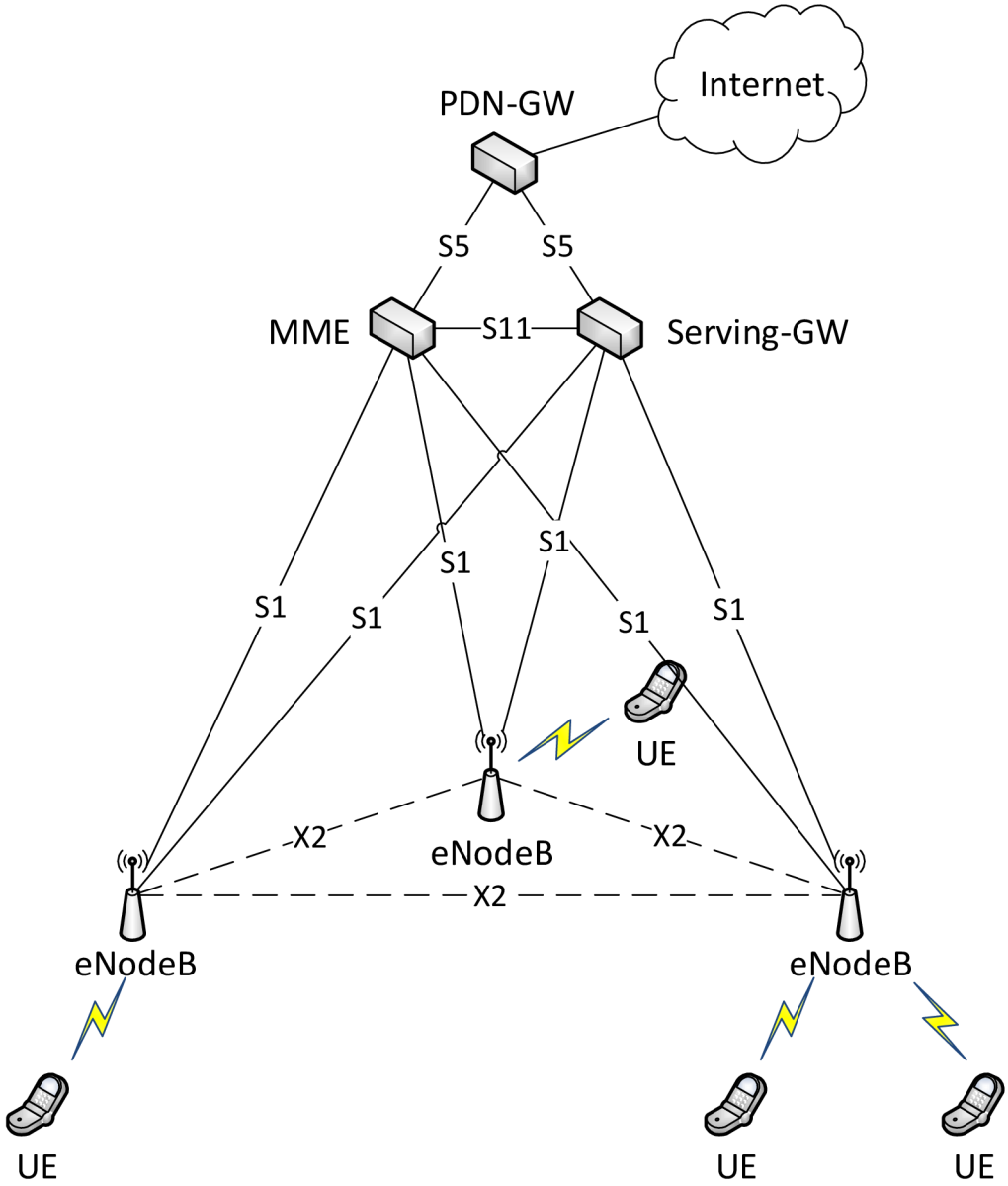
1.2.2 Obecný popis LTE

V poslední době dochází k velkému nárůstu využívání mobilní sítě 4. generace zvané LTE (Long Term Evolution). Oproti starším generacím nabízí mnohem lepší parametry. Některé z důležitých parametrů jsou:

- oproti HSPA (High Speed Packet Acces) výrazně redukuje potřený čas na změnu stavu. Z klidového stavu do doby plného připojení by nemělo trvat déle než 100 ms,
- zpoždění mezi koncovými zařízeními by nemělo být větší jak 5 ms čímž je LTE srovnatelné s pevným síťovým vedením,
- oproti starším mobilním sítím byla navýšena propustnost, která za ideálních podmínek bez použití MIMO technologie, dosahuje až 100 Mb/s,
- podporuje technologii MIMO která ještě zvýší propustnost mobilní sítě LTE (např. pro uspořádání 2x2 MIMO se dosáhne rychlosti až 150 Mb/s pro DL a až 75 Mb/s pro UL) [3].

Mobilní síť LTE je optimalizovaná pro služby vyžadující přepojování paketů (například VoLTE), avšak obsahuje funkce pro práci s přepojováním okruhů CSFB (Circuit switch fall back). LTE umožňuje propojení se stávajícími technologiemi jakými jsou například GSM, UMTS nebo CDMA2000. Mezi další funkce, které přináší mobilní síť LTE patří funkce SON, která umožňuje automatickou konfiguraci, optimalizaci, hledání chyb a jejich následné řešení [2].

Mobilní síť LTE využívá takzvanou plochou architekturu (Flat architecture), ve které se nenachází RNC (Radio Network Controller), jak bylo zvykem u starších mobilních sítí. Oproti UMTS NodeB má mobilní síť LTE ekvivalent v podobě „evolved“NodeB nebo častěji užívané eNodeB, která je BTS (Base Transiever Station) pro mobilní síť LTE [2].



Obr. 1.4: Architektura mobilní sítě LTE [3]

1.2.3 Obecný popis LTE-Advanced

Mobilní síť LTE-Advanced vznikla vylepšením stávající mobilní sítě LTE. Poprvé byla tato mobilní síť představena v 3GPP Release 10. Mobilní síť LTE-Advanced již spadá do 4. generace mobilních sítí (4G). Oproti mobilním sítím předchozích generací se vyznačuje lepšími parametry. Mobilní síť LTE-Advanced je teprve na začátku, tudíž lze očekávat jistý vývoj a vylepšení parametrů. Výpis nejdůležitějších změn [3][5]:

- došlo k nárůstu propustnosti na 3 Gb/s pro DL a 1,5 Gb/s UL,
- zvýšení spektrální účinnosti z původních 16 b/s/Hz na 30 b/s/Hz,
- byl zvýšen maximální počet současně aktivních účastníků.

Velmi podstatnou změnou oproti mobilní síti LTE je užití agregace nosné (Carrier Aggregation - CA). Pomocí agregace nosných frekvencí došlo k rozšíření šířky pásma a následnému navýšení propustnosti mobilní sítě LTE-Advanced. Tato agregace může být užita jak pro TDD (Time-division duplexing) tak i pro FDD (Frequency-division duplexing) [5].

Další podstatnou změnou oproti mobilní síti LTE je možnost využití technologie MIMO v konfiguraci 8x8 MIMO pro DL a 4x4 MIMO pro UL. Užitím této vylepšené technologie dochází k dalšímu navýšení propustnosti mobilní sítě LTE-Advanced [5].

Mobilní síť LTE-Advanced umožňuje užití tzv. RNs (Relay Nodes) neboli přenosových uzlů. Tyto přenosové uzly přináší navýšení efektivity plánování v heterogenních sítích (kombinace velkých a malých buněk). Tyto přenosové uzly jsou nízkovýkonové základnové stanice, které umožňují zlepšení pokrytí a navýšení kapacity v okrajových částech buněk [5].

Posledním velkým přínosem mobilní sítě LTE-Advanced bylo zavedení CoMP (Coordinated Multi Point operation) v rámci Release 11. Důvodem zavedení technologie CoMP byla potřeba zlepšit výkonnost mobilní sítě LTE-Advanced na okrajích buňky. V případě, že se zařízení UE nachází na společných okrajích 2 buněk (mezi 2 eNodeB), jsou zavedeny 2 módy vysílání z těchto eNodeB směrem k zařízení UE pro zlepšení vlastností přenosu. Prvním módem je Joint Transmission neboli spojený přenos, kdy jsou data přenášena k UE ve stejný čas na stejné frekvenci z obou eNodeB. Dalším módem přenosu je mód Dynamic Point Selection neboli dynamický výběr vysílacího bodu. Funkce tohoto módu spočívá v tom, že obě zmiňované eNodeB jsou připravené vysílat, ale vždy bude vysílat pouze jedna [5].

2 TYPY KOMUNIKACÍ V MOBILNÍCH SÍTÍCH

V této kapitole jsou rozebrány možnosti komunikace v mobilních sítích. Jedná se o komunikaci H2H (Human-to-Human) a komunikaci M2M (Machine-to-Machine). V rámci popisu M2M komunikace je v kapitole zařazen i popis D2D (Device-to-Device) komunikace z důvodu podobnosti pojmenování. Konec této kapitoly se zabývá porovnáním H2H a M2M komunikace.

2.1 Teoretický rozbor H2H

V této kapitole bude stručně popsán obecný popis H2H komunikace. Dále je zde více popsána jedna z možných H2H komunikací a to VoLTE.

2.1.1 Obecný popis H2H

Když je řeč o H2H komunikaci tak se jedná o komunikaci člověka s člověkem prostřednictví nějakého zařízení. V H2H komunikaci musí být vždy na obou koncích komunikace člověk. Za H2H komunikaci považujeme například telefonování, posílání SMS a jiné. Služby H2H můžeme rozdělit na 4 QoS (Quality of Service) třídy: konverzační, streaming (vysílání), interaktivní a na pozadí [8].

S příchodem mobilních sítí 4. generace byla vyvinuta nová technologie VoLTE (Voice over LTE) zajišťující hlasovou komunikaci, která oproti starším technologií přináší mnoho výhod.

2.1.2 Obecný popis VoLTE

VoLTE se zaměřuje na technologii Voice over IP v mobilní síti LTE. Tato technologie by měla dlouhodobě nahradit stávající technologii přepínání okruhů, se kterou se můžeme setkat u mobilních sítí starších generací jako jsou například GSM, UMTS nebo CDMA [3].

VoLTE má oproti předchozí technologii přepínání okruhů mnoho výhod [3][6]:

- možnost hovoru přes mobilní síť LTE bez nutnosti ukončit probíhající datové připojení,
- vysoká rychlost navazování spojení. Spojení se naváže do 2 sekund,
- oproti předchozím technologiím nabízí vyšší kvalitu hovoru a to i lepší než technologie HD Voice.

Technologie VoLTE začíná být postupně nasazována do komerčního provozu, nicméně do úplného nasazení VoLTE se bude v mobilní síti LTE využívat takzvané technologie CSFB (Circuit Switch Fall Back), která při inicializaci hovoru přepne zařízení z užívané mobilní sítě LTE do mobilních sítí 2. nebo 3. generace (2G nebo 3G). Z překladu Circuit Switch Fall Back je jasné, že přepojení na starší generace mobilních sítí znamená návrat k technologii přepojování okruhů [4][6].

Tato technologie je levné nahrazení VoLTE, avšak má určité nevýhody. Mezi tyto nevýhody patří například [6]:

- navýšení času spojení v důsledku přepojování mobilních sítí,
- je potřeba současného pokrytí mobilní sítě LTE a sítí 2G nebo 3G,
- největším problémem je ukončení probíhajícího datového spojení v mobilní síti LTE kvůli přepojování do starších generací mobilních sítí.

2.2 Teoretický rozbor M2M

V této kapitole je stručně popsán obecný popis M2M komunikace. Dále je v této kapitole rozebrána problematika přehlcení mobilní sítě M2M komunikací. Na konci této kapitoly je popsána D2D komunikace, která představuje velkou inovaci v mobilních sítí.

2.2.1 Obecný popis M2M

V dnešní době roste trend využívání zařízení, která jsou samočinná a nepotřebují ke své obsluze člověka. Aby byl využit potenciál těchto zařízení, musí být připojena do jedné sítě (Internetu). Takto začaly vznikat nové směry v komunikaci senzorových zařízení (embedded zařízení) jako je například Internet of Things (IoT), Internet of Objects (IoO) a později také Machine to Machine (M2M). V současnosti se můžeme setkat se zařízeními, která zjišťují zdravotní stav, v chytré domácnosti, kde se systém chová autonomně dle přednastavených parametrů nebo například automatické zjišťování stavu vodoměru, plynoměru či elektroměru. Tato zařízení se nachází také v automobilech (navigace, zabezpečení a jiné) [1].

2.2.2 Přetížení mobilní sítě LTE M2M komunikací

S M2M komunikací v mobilní sítí LTE je spojený problém přetížení mobilní sítě LTE, avšak toto není problém pouze mobilní sítě LTE, ale také mobilních sítí 3. generace, nicméně mobilní sít LTE je považována jako primární komunikační kanál pro M2M

komunikaci. Toto přetížení může vzniknout čtyřmi způsoby [1]:

- synchronizované přetížení,
- nepředvídatelné přetížení,
- nárazové přetížení,
- nekontrolované přetížení.

Synchronizované přetížení

Zařízení odesílají data v jistých intervalech, nejčastěji v celé hodiny. V případě, že je více těchto zařízení, tak dochází k synchronizovanému zatěžování mobilní sítě, které často vede k přetížení mobilní sítě [1].

Nepředvídatelné přetížení

V případě, že je větší počet M2M zařízení instalován bez vědomí operátora. Operátor nemůže předvídat tuto skutečnost a nemůže tak nadimenzovat mobilní síť na takovéto zatížení a proto dojde k přetížení mobilní sítě [1].

Nárazové přetížení

Některá zařízení (např. dohledová a zabezpečovací zařízení jako jsou kamery a senzory) generují malé množství dat. Avšak za určitých podmínek (např. narušení zabezpečeného prostoru, neobvyklá událost) tato zařízení generují ohromné množství dat, které způsobí přetížení mobilní sítě [1].

Nekontrolované přetížení

V případě že se několik zařízení snaží ve stejnou dobu připojit k síti zcela nepředvídatelně. Třeba když vypadne signál mobilní sítě v určitém místě, kde se nachází tato skupina zařízení a najednou se začne tato skupina zařízení snažit připojit k té samé mobilní sítí. V tomto případě dochází k přetížení mobilní sítě [1].

2.2.3 Teoretický rozbor D2D komunikace

V důsledku neustále rostoucího počtu zařízení, velikosti multimediálního obsahu a aplikací roste zároveň i poptávka po mobilním přenosu dat. Z obavy z nedostatku kapacity mobilní sítě bylo nutné vytvořit řešení tohoto problému. Jednou z podmínek řešení tohoto problému bylo zavedení služby za minimální dodatečné náklady. Jedním z možných řešení je zavedení D2D komunikace, která byla přidána do LTE mobilní sítě až v rámci 3GPP Release 12 [5]. Z obecného hlediska se zdá být jistá

podobnost mezi D2D a M2M, avšak v případě D2D komunikace se jedná o přímou komunikaci dvou blízkých UE (User Equipment) v rámci mobilní sítě LTE, kdežto u M2M komunikace se jedná o komunikaci přístrojů, které nepotřebují ke své funkci člověka, v rámci mobilní sítě [16].

Zavedením D2D technologie se dosáhne zlepšení určitých parametrů jakými jsou například [16]:

- snížení zátěže eNodeB,
- zlepšení využití spektra,
- větší celková propustnost,
- menší spotřeba energie.

Zavedením D2D se umožní užití nových peer-to-peer či pozičně založených aplikací a služeb, v dnešní době označovaných jako ProSe (Proximity Services).

Rozdělení D2D komunikace

Na základě několika kritérií rozdělujeme D2D komunikaci na 3 typy služeb [16]:

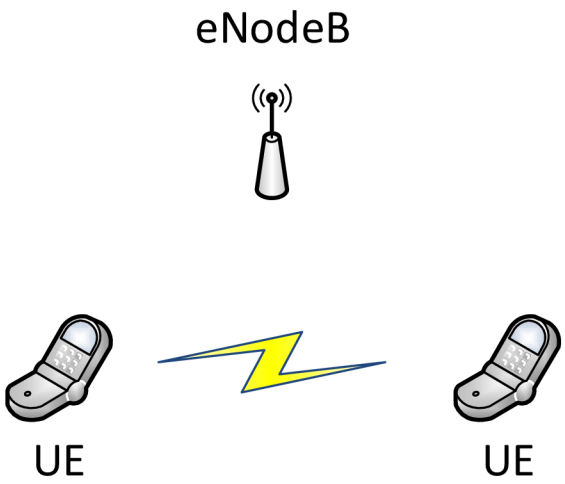
- Ad hoc,
- Agent,
- Mesh.

D2D služba typu Ad hoc

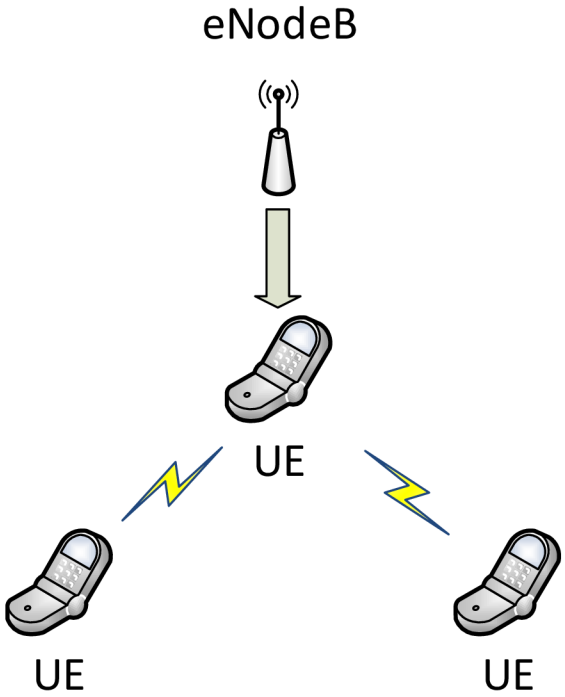
D2D služba typu Ad hoc popisuje stav, kdy několik samostatných zařízení nacházející se v blízké vzdálenosti vytvoří samostatný D2D komunikační cluster (shluk) a v rámci tohoto clusteru si zařízení vyměňují data či multimediální obsah. Jedním z příkladů užití této služby je například hraní mobilních her s více hráči, kteří se nachází blízko sebe viz Obr. 2.1 [16].

D2D služba typu Agent

D2D služba typu Agent popisuje stav, kdy zařízení, která chtějí stahovat stejná data či multimediální obsah z eNodeB, vytvoří D2D komunikační cluster, poté se vybere jedno zařízení CH (Cluster Head) jako zástupce zařízení v daném clusteru. CH poté stáhne z eNodeB požadovaná data či multimediální obsah, který pak distribuuje k ostatním zařízením v daném clusteru viz Obr. 2.2. Jelikož stanice eNodeB zašle daná data pouze CH a ne všem zařízením čímž se sníží zatížení stanice eNodeB [16].



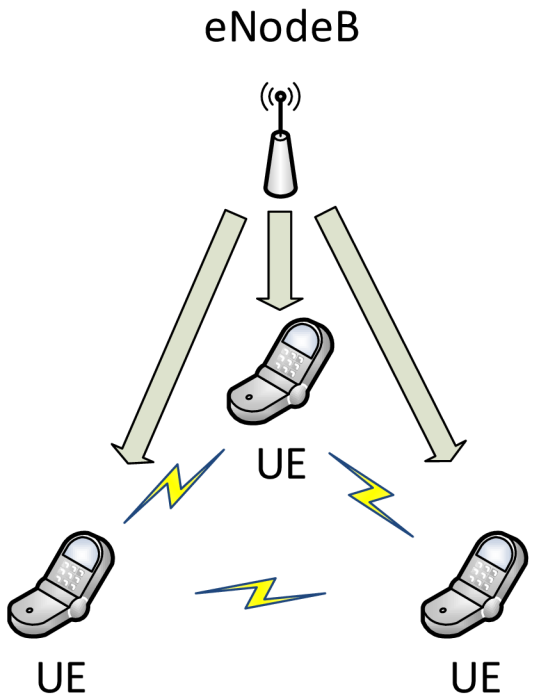
Obr. 2.1: Příklad D2D služby typu Ad hoc [16]



Obr. 2.2: Příklad D2D služby typu Agent [16]

D2D služba typu Mesh

D2D služba typu Mesh popisuje stav, kdy D2D komunikační cluster vznikne podobně jako v případě D2D služby typu Agent, avšak v tomto případě se data či multimediální obsah rozdělí na několik částí. Každé zařízení si stáhne z eNodeB svou část dat a zbytek částí si zařízení vymění mezi sebou viz Obr. 2.3. Tím tedy stanice eNodeB vyšle pouze jednou určitý objem dat místo toho, aby stejný objem dat posílala každému zařízení zvlášť, tím tedy dochází ke snížení zatížení stanice eNodeB [16].



Obr. 2.3: Příklad D2D služby typu Mesh [16]

2.3 Porovnání M2M a H2H komunikace

M2M a H2H komunikace se liší v mnoha parametrech. Mezi nejdůležitější parametry patří velikost dat, která se přenáší během komunikace, počet zařízení či QoS, které má rozdílné třídy pro M2M komunikaci a H2H komunikaci. Porovnání nejdůležitějších parametrů viz Tab. 2.1 níže.

Tab. 2.1: Porovnání vlastností H2H a M2M komunikace [13]

Parametr	H2H	M2M
Hustota zařízení	Počet zařízení se neustále zvyšuje, ale potenciál počtu M2M je mnohem větší.	Obrovský nárůst počtu zařízení za poslední roky, což byl jeden z důvodů zavedení IPv6.
Objem dat	Většina datového provozu je download, který využívá značnou šířku pásma např. pro stahování dat, Web či video streaming.	Většina datového provozu je upload, který využívá malou šířku pásma např. upload dat z vodoměru. Avšak např. kamerový dohled může vyžadovat větší šířku pásma.
Napájecí baterie	U H2H zařízení můžeme jednoduše koupit novou a stávající vyměnit.	U M2M zařízení musí tato baterie vydržet mnohem déle než u H2H.
Zpoždění	Je zde jistá tolerance zpoždění a to dokonce i v hlasové komunikaci.	Některé aplikace jsou určeny pro řízení v reálném čase. Naléhavé/ nouzové aplikace mají nízkou toleranci.
Zabezpečení	U H2H zařízení je většinou známo, že zařízení bylo odcizeno.	U M2M je potřeba zabezpečení, případně i utajení zařízení z důvodu náročnosti pravidelné kontroly zařízení.
Dimenzování	U H2H se jedná o normální dimenzování, které nepotřebuje speciální přístup.	Z důvodu velkého počtu připojení v určitý čas je potřeba řádně nadimenzovat mobilní síť, aby nedocházelo k přetížení.

3 SIMULAČNÍ PROSTŘEDÍ NS-3

V této kapitole je stručně popsán NS-3 (Network Simulator 3), jeho vlastnosti a možnosti viz kapitola 3.1. Následuje stručný popis simulačního modelu projektu LENA (LTE-EPC Network Simulator) viz kapitola 3.1.1, který byl užit v praktické části této práce. Dále je v této kapitole popsán software, který byl užit v praktické části této práce spolu s NS-3 (VMware Player, Eclipse, Wireshark) viz kapitola 3.1.2.

3.1 Obecný popis NS-3

NS-3 (Network Simulator 3) je simulátor diskrétních událostí. Čas je v takovýchto simulacích nerovnoměrný, to znamená, že simulátor přechází v čase k další události. Existují 3 typy simulátorů [15]:

- diskrétní simulátor,
- simulátor diskrétních událostí,
- simulátor spojitých událostí.

V naprosté většině aplikací se užívá simulace diskrétních událostí. Tento simulátor je zaměřený na výzkum a vzdělání. Jeho hlavní výhodou je, že se jedná o svobodný software pod licencí GNU GPLv2, díky které je veřejně k dispozici a to jak pro použití, výzkum i vývoj [9].

NS-3 podporuje rozvoj simulačních modelů, které jsou dostatečně reálné na to, aby se NS-3 dal použít jako emulátor sítě v reálném čase. NS-3 umožňuje implementaci protokolů z reálného světa. Jádro simulace NS-3 podporuje výzkum jak IP tak non-IP sítí. Většina uživatelů se však zaměřuje na bezdrátové/IP simulace, které zahrnují modely pro Wi-Fi, WiMAX, LTE pro 1. (vrstva síťového rozhraní) a 2. (síťová vrstva) vrstvu referenčního síťového modelu TCP/IP a množství statických a dynamických směrovacích protokolů, kterými jsou například OLSR (Optimized Link State Routing Protocol) a AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) pro IP aplikace [9].

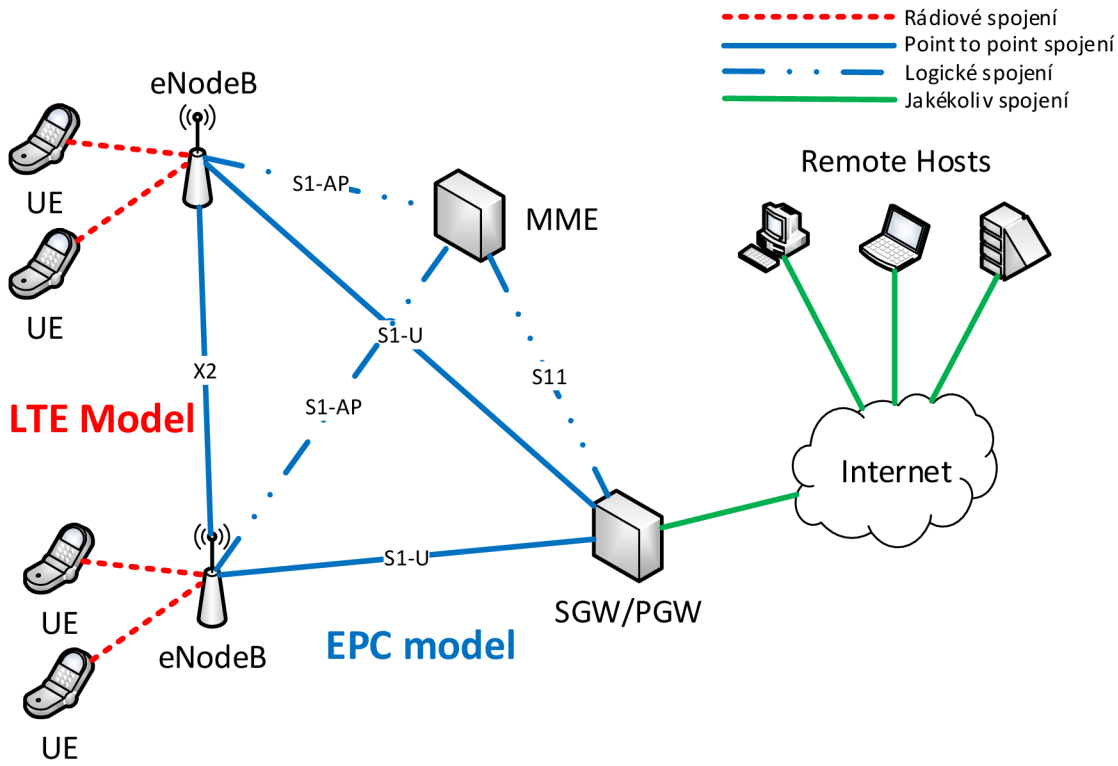
Jednou z mnoha výhod NS-3 je, že každé 3 měsíce je vydána nová verze s novými a ověřenými modely [9].

NS-3 je knihovna určená pro programovací jazyk C++, která poskytuje uživateli sadu síťových simulačních modelů. Vlastní simulace tak probíhá ve vývojovém prostředí pomocí této knihovny a jazyka C++. NS-3 obsahuje mnoho vizualizačních nástrojů mezi které patří například NetAnim či Python Visualizer [9].

3.1.1 LENA (LTE-EPC network simulator)

LENA neboli LTE-EPC network simulator je open-source produkt, který se zaměřuje na simulace LTE/EPC (Evolved Packet Core) viz Obr. 3.1. LENA je softwarový nástroj vydaný CCTC (The Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya).

LENA umožňuje navrhování a testování například SON (Self Organized Network) algoritmů, Radio Resource Managment algoritmů, vyvažování zátěže a Mobility Managment, řešení HetNets (Heterogenous Networks), řešení sítí Multi-RAT (Radio Access Technologies) a kognitivních systémů LTE [14].



Obr. 3.1: LTE/EPC architektura síťového simulátoru LENA [14]

LENA je založena na velmi populárním síťovém simulátoru NS-3, který je více rozebrán v předchozí kapitole 3.1 [14].

3.1.2 Ostatní použitý software

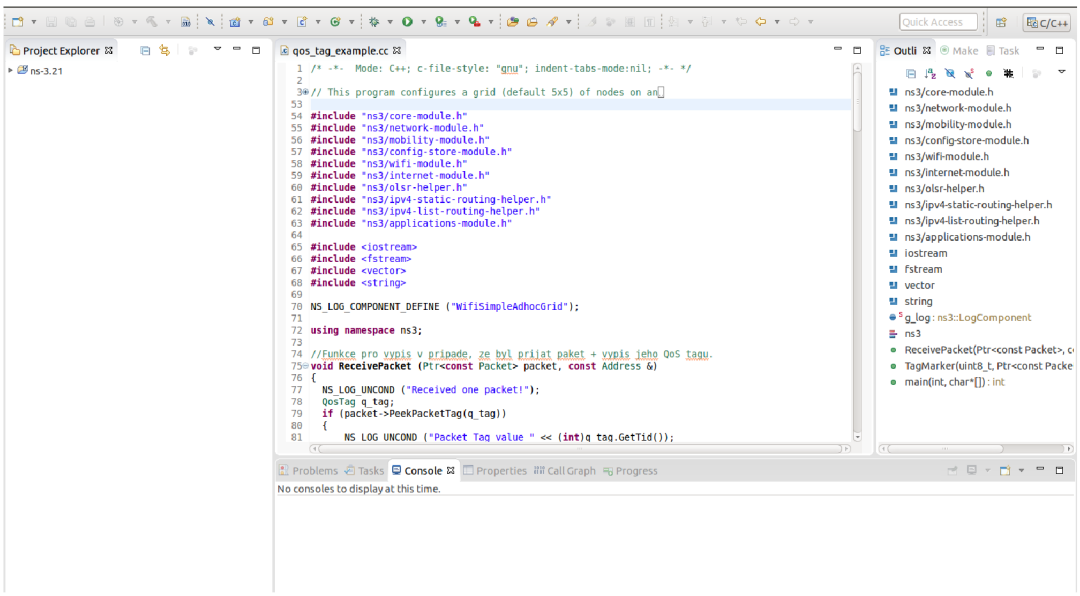
VMware Player

VMware Player je virtualizační software od firmy VMware. Tento software umožňuje spustit virtuální aplikace, případně virtuální stroje. Jednou z velkých výhod tohoto virtualizačního software je, že je nabízen zdarma k nekomerčním účelům. VMware Player obsahuje stejné virtualizační jádro a mnoho stejných funkcí jako VMware Workstation, avšak VMware Workstation nabízí dodatečné funkce, za které si uživatel musí zaplatit [10].

Pro praktickou část této práce postačí VMware Player, díky němuž je možné vytvoření virtuálního stroje s operačním systémem Ubuntu. V tomto systému bude probíhat celá praktická část této práce.

Eclipse

Eclipse je vývojové prostředí IDE (Integrated Development Environment), které je zobrazeno na Obr. 3.2, je určeno pro velké množství programovacích jazyků (jednotlivé programovací jazyky lze přidat pomocí pluginů neboli balíčků). Program Eclipse obsahuje kompilátor, debugger a mnoho dalšího, avšak nelze v něm například navrhovat grafického uživatelského rozhraní GUI (Graphical User Interface). Toto grafické rozhraní však není pro tuto práci potřeba [11].



Obr. 3.2: Uživatelské prostředí vývojového prostředí Eclipse

Wireshark

Wireshark umožňuje analýzu počítačových sítí. Lze v něm analyzovat různé komunikační protokoly. Program umožňuje zachytávání veškeré komunikace na připojeném médiu a tuto komunikaci dále analyzovat. Program může zachytávat z několika typů sítí (Ethernet, IEEE 802.11 atd.). Zachycenou komunikaci lze filtrovat podle zvolených požadavků (IP adresa, protokol atd.). Jeho podstatnou výhodou je, že se jedná o software, který je zdarma pod licencí GNU (General Public License) [12].

4 PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

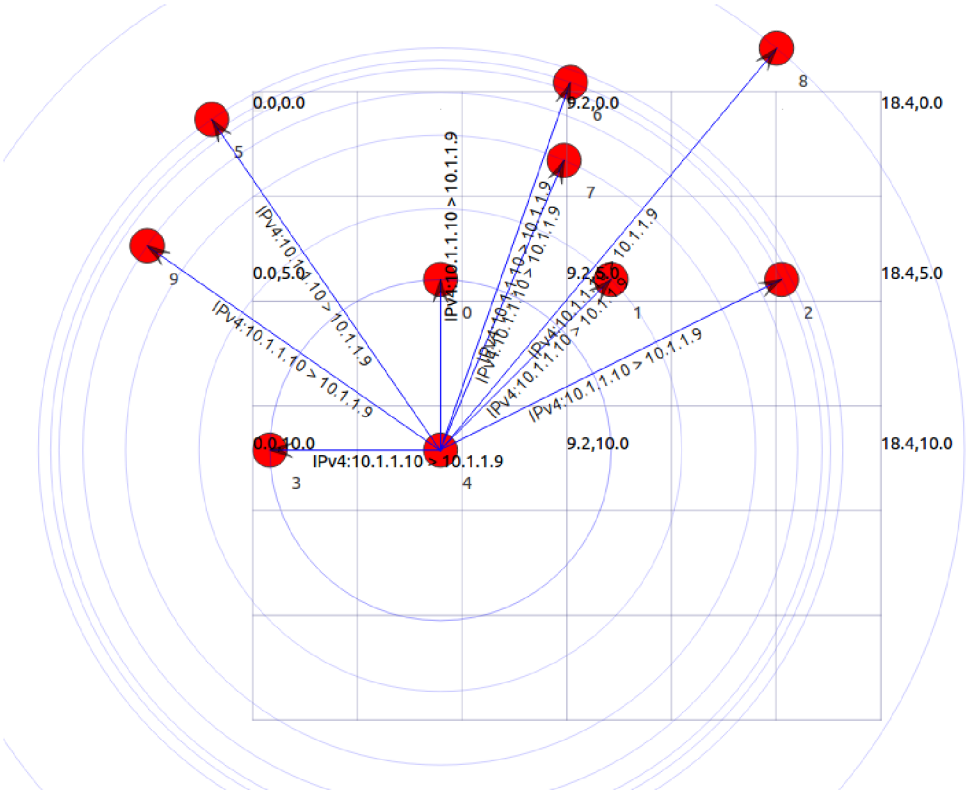
V této kapitole je popsáná praktická část bakalářské práce včetně problematiky tvorby simulací. V krátkosti jsou zde popsány vytvořené simulace Ad hoc sítě kapitola 4.1 a simulace mobilní sítě LTE kapitola 4.2. Podrobněji popsána je až tvorba a problematika simulace předávání dat ze sítě Ad hoc do mobilní sítě LTE kapitola 4.3. Následuje kapitola 4.4 s výsledky poslední simulace a kapitola 4.5 s nevyřešenými problémy této simulace.

4.1 Simulace Ad hoc sítě v NS-3

Při řešení bakalářské práce byla vytvořena simulace, která znázorňuje komunikaci:

- 5 pohyblivých stanic představujících H2H VoIP (Voice over Internet Protocol) komunikaci pomocí transportního protokolu UDP (User Datagram Protocol),
- 4 nepohyblivých stanic představujících senzory s M2M datovou komunikací pomocí transportního protokolu TCP (Transmission Control Protocol),
- 1 nepohyblivé stanice představující bránu, do které je směrována veškerá komunikace z výše uvedených zařízení.

Všechna tato zařízení komunikují v rámci Ad hoc sítě pomocí bezdrátové sítě WiFi, kde je využit standard IEEE 802.11g. Do simulace byla i implementovaná podpora kvality služeb (QoS). Pro porovnání výsledků při různém nastavení QoS byla prvně provedena simulace s implementací QoS třídy BestEffort (0) pro oba typy zařízení (H2H a M2M) a poté byla změněna QoS třída pro H2H zařízení na třídu Voice (6). Na základě výstupů (konzole, .pcap a .xml) byla ověřena funkčnost této simulace. Byla ověřena změna přenosových parametrů pro jednotlivé aplikace v závislosti na třídě kvality služeb QoS viz Tab. 4.1 a Tab. 4.2. Data do tabulek byla zjištěna pomocí konzolového výstupu simulace. Pomocí výstupu simulace v podobě souboru .pcap bylo možno tento soubor analyzovat pomocí síťového analyzátoru Wireshark a ověřit si tak například, zda byla správně definována QoS třída, užitý transportní protokol nebo zdrojovou a cílovou IP adresu viz. Obr. 4.2. U .xml výstupu byla pomocí nástroje NetAnim ověřena mobilita a komunikace uzlů během simulace viz Obr. 4.1.



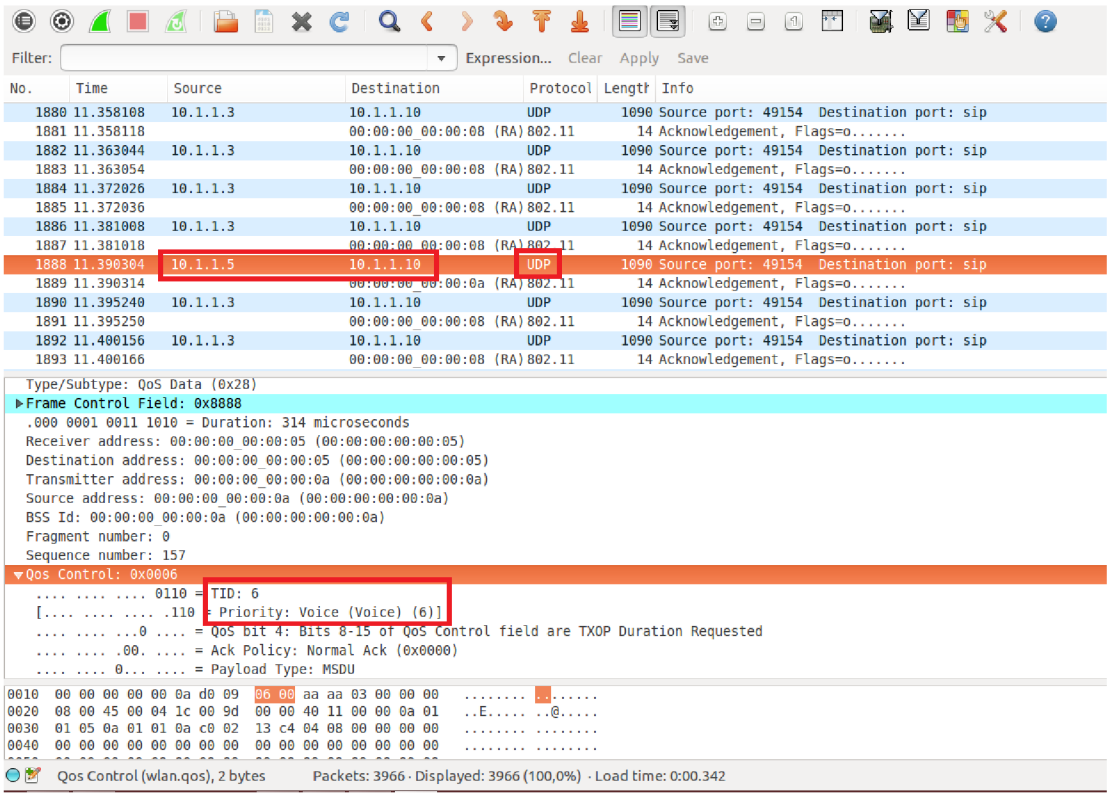
Obr. 4.1: Vytvořený .xml soubor zobrazený pomocí vizualizačního nástroje NetAnim

Tab. 4.1: Tabulka parametrů přenosu dat s užitím QoS třídy BestEffort(0) pro obě aplikace

Aplikace	H2H (VoIP)	M2M (FTP)
Flow ID	3	6
QoS Tag	Best Effort(0)	Best Effort(0)
Source Address (adresa zdroje)	10.1.1.3	10.1.1.6
Tx Packets (odeslané pakety)	854	233
Rx Packets (přijaté pakety)	491	233
Delay (zpoždění)	4123 ms	40 ms
Lost Packets (ztracené pakety)	3	0

Tab. 4.2: Tabulka parametrů přenosu dat s užitím QoS třídy Voice(6) pro VoIP aplikaci

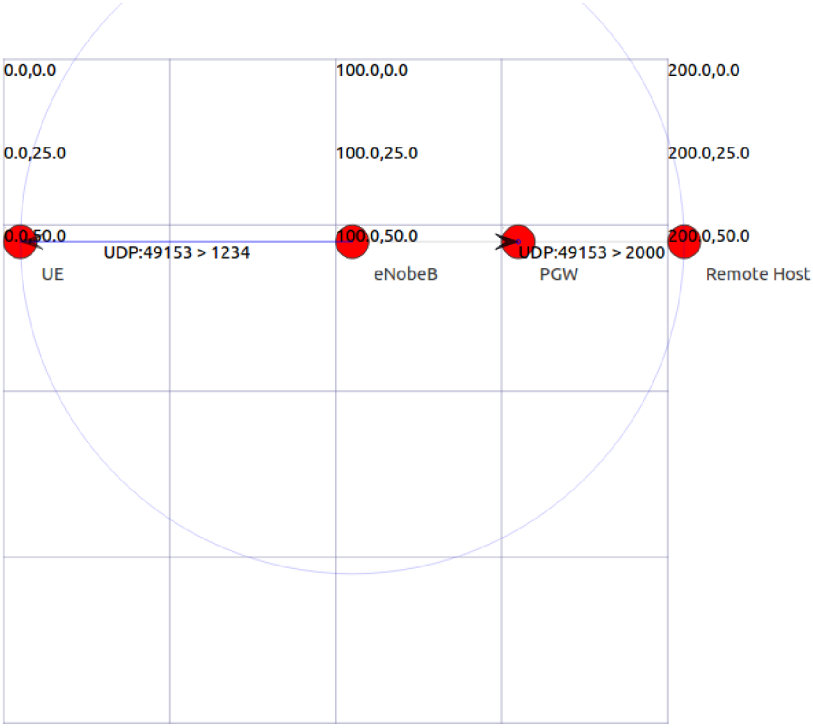
Aplikace	H2H (VoIP)	M2M (FTP)
Flow ID	3	6
QoS Tag	Voice(6)	Best Effort(0)
Source Address (adresa zdroje)	10.1.1.3	10.1.1.6
Tx Packets (odeslané pakety)	854	10
Rx Packets (přijaté pakety)	794	9
Delay (zpoždění)	780 ms	500 ms
Lost Packets (ztracené pakety)	57	0



Obr. 4.2: Ukázka QoS otagovaného UDP paketu pomocí programu Wireshark

4.2 Simulace LTE mobilní sítě v NS-3

Jako příprava pro výslednou simulaci byla vytvořena simulace LTE mobilní sítě, ve které bylo důležité vytvořit funkční model LTE mobilní sítě s přenosem dat z UE (User Equipment) přes eNodeB, PGW (Packet Data Network Gateway) až k Remote Host (vzdálené zařízení) a opačně. Tato část byla klíčová pro vytváření výsledné simulace v rámci bakalářské práce. Výstupem této simulace je vytvoření souboru .pcap, který bylo možné dále analyzovat pomocí síťového analyzátoru Wireshark, dále souboru .xml, který bylo možné dále analyzovat pomocí nástroje NetAnim viz Obr. 4.3.



Obr. 4.3: Zobrazení komunikace v LTE mobilní síti pomocí vizualizačního nástroje NetAnim

4.3 Simulace předávání dat mezi Ad hoc sítí a LTE mobilní sítí

Praktickou částí této bakalářské práce bylo také vytvoření simulace předávání dat mezi Ad hoc sítí a LTE mobilní sítí. Tato simulace má základ vytvořený kombinací předchozích dvou simulací popsaných v kapitolách 4.1 a 4.2. V této simulaci se nachází 9 uzlů (5 nepohyblivých uzlů a 4 pohyblivé uzly), které komunikují pomocí Ad hoc sítě (standard IEEE 802.11g) se sběrným uzlem MTCG. Na tomto MTCG uzlu se nachází 2 síťová rozhraní, jedno pro Ad hoc síť a druhé pro mobilní síť LTE, uzel MTCG je tedy v rámci LTE mobilní sítě jako uzel UE. Z UE jsou data zaslána na základnovou stanici eNodeB. Z eNodeB data pokračují pomocí P2P (Point-to-Point) spojení přes PGW (Packet Data Network Gateway) až do Remote Host, který představuje vzdálený přístup.

Níže jsou popsány nejdůležitější části definice simulace.

```
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/ipv4-static-routing-helper.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/aodv-module.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/dsdv-helper.h"
```

Na začátku každé simulace musí být deklarováno, jaké moduly se mají načíst, jelikož simulace bude dále s těmito moduly pracovat. V případě, že by tyto moduly nebyly deklarovány, by simulace neproběhla a byla by vypsána chyba, že určité části kódu nedávají smysl.

```
using namespace ns3;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("Adhoc+LTE");
int main (int argc, char *argv[])
{

  LogComponentEnable("PacketSink", LOG_LEVEL_INFO);
  //LogComponentEnable("UdpClient", LOG_LEVEL_INFO);
  LogComponentEnable("Adhoc+LTE", LOG_LEVEL_ALL);
  uint16_t numberOfNodes = 1;
  uint32_t nstaWifi = 5;
  uint32_t nmobWifi = 4;
  double simTime = 25;
  double distance = 60.0;
  bool enableFlowMonitor = true;

  CommandLine cmd;
    cmd.AddValue("numberOfNodes", "Number of eNodeBs + UE pairs",
       numberOfNodes);
    cmd.AddValue("simTime", "Total duration of the simulation [s])"
       , simTime);
    cmd.AddValue("distance", "Distance between eNBs [m]", distance)
       ;
    cmd.AddValue("EnableFlowMonitor", "Povoleni Flow Monitor",
       enableFlowMonitor);
    cmd.Parse(argc, argv);
```

V další části se definují parametry, které umožňují LOGování (zaznamenávání informací) požadovaných parametrů. Například povolení LOGu pro **PacketSink** způsobí, že pokaždé když bude přijat koncovou stanicí paket, se tato skutečnost s příslušnými informacemi (čas, zdroj komunikace, velikost a celková velikost z tohoto zdroje) vypíše do konzole během běhu simulace. Dále se v této části vytváří proměnné, které ulehčují případnou úpravu parametrů simulace bez nutnosti měnit celou simulaci. Například definice proměnné **nstaWifi** určuje počet nepohyblivých stanic, které se nachází v simulaci.

```
  Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();

  Ptr<PointToPointEpcHelper>  epcHelper = CreateObject<
     PointToPointEpcHelper> ();
    lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);
    lteHelper->SetEnbAntennaModelType ("ns3::IsotropicAntennaModel"
       );
  ConfigStore inputConfig;
```

```
inputConfig.ConfigureDefaults();

cmd.Parse(argc, argv);

Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();
AnimationInterface::SetConstantPosition (pgw, 20, 10);

NodeContainer remoteHostContainer;
  remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> remoteHost = remoteHostContainer.Get (0);
AnimationInterface::SetConstantPosition (remoteHost, 20, 20);
InternetStackHelper internet;
  internet.Install (remoteHostContainer);
```

V této části byla definována část simulace s LTE mobilní sítí. Pomocí definice: **`lteHelper->SetEnbAntennaModelType ("ns3::IsotropicAntennaModel");`** byl nastaven model antény na eNodeB na isotropický typ. Dále bylo velmi důležité vytvoření uzlu **PGW** pomocí definice: **`Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();`**, jeho následné umístění na souřadnice (20, 10) a určení stálé pozice pomocí **SetConstantPosition**. Obdobně byl vytvořen i uzel vzdáleného přístupu (**Remote Host**). Užitím **InternetStackHelper** a jeho následná instalace na daná zařízení umožní funkci UDP, TCP a IP protokolů na daných uzlech. Zároveň však umožňuje užití pcap či ascii traces (trasování).

```
PointToPointHelper p2ph;
  p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("
     100Gb/s")));
  p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UintegerValue (1500));
  p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)))
     ;
NetDeviceContainer internetDevices = p2ph.Install (pgw,
   remoteHost);
Ipv4AddressHelper ipv4h;
  ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0");
Ipv4InterfaceContainer internetIpIfaces = ipv4h.Assign (
   internetDevices);

Ipv4Address remoteHostAddr = internetIpIfaces.GetAddress (1);

Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;
```

Tímto kódem bylo definováno P2P (Point-to-Point) spojení mezi PGW a Remote Host a také jeho parametry, jakými jsou například **DataRateValue** (přenosová rychlost), **MTU** (Maximum Transmission Unit) neboli maximální velikost přenášené jednotky. Pomocí **Ipv4AddressHelper** byl definován rozsah IP adres a maska sítě.

Tento rozsah byl dále nainstalován na daná zařízení. Na konci této části byl definován **Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;**, tento helper je využit dále pro definici statického směrování komunikace z WiFi (Ad hoc) uzlů až do RemoteHost.

```
NodeContainer MTCG;
NodeContainer enbNode;
  enbNode.Create(numberOfNodes);
  MTCG.Create(numberOfNodes);

Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject<
   ListPositionAllocator> ();
for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++)
  {
      positionAlloc->Add (Vector(distance * i, 0, 0));
    }
MobilityHelper mobility;
  mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel")
     ;
  mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
  mobility.Install(enbNode);
  mobility.Install(MTCG);

NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (
   enbNode);
NetDeviceContainer MTCGLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice (MTCG
   );

  internet.Install (MTCG);
Ipv4InterfaceContainer ueIpIface;
  ueIpIface = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer
     (MTCGLteDevs));

for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++)
  {
    lteHelper->Attach (MTCGLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(i));
    }
lteHelper->EnablePdcpTraces();
lteHelper->EnableMacTraces();
lteHelper->EnableRlcTraces();
```

V této části byla dokončena definice LTE mobilní sítě. Byly zde vytvořeny komunikační uzly MTCG a eNodeB. Těmto uzlům byla definována pozice pomocí **positionAlloc ->Add (Vector(distance * i, 0, 0));**. Důležitou částí simulace je užití **MobilityHelper**. Tímto helperem je možné definovat chování (pohyb)

uzlů v prostoru. Zde je pro nepohyblivé uzly užit **ConstantPositionMobilityModel**. Pomocí **MobilityHelper** lze definovat dále například rozložení uzlů do tzv. sítě (Grid) případně i náhodný pohyb uzlů pomocí užití **RandomWalk2dMobilityModel**. Dále je ve výše uvedené definici definováno přiřazení IP adres, následuje přiřazení uzlu MTCG (v této simulaci jako UE) k danému eNodeB. Na konci této části je už pouze povoleno trasování v rámci LTE mobilní sítě. Pomocí tohoto trasování je získán výpis parametrů přenosu v rámci LTE mobilní sítě v textových dokumentech **UlMacStats.txt**, **UlPdcpStats.txt** a **UlRlcStats.txt**. Tyto výpisy jsou pouze pro UL (Upload) směr, jelikož v rámci simulace bylo dosaženo pouze datového toku směrem pryč od zařízení, tedy upload. Tyto dokumenty jsou více popsány v kapitole 4.4.3.

Nyní, když byla definována mobilní síť LTE, bylo nutné definovat síť Ad hoc pracující se standardem IEEE 802.11g a její chování.

```
NodeContainer wifiStaNodes;
NodeContainer wifiMobNodes;
  wifiStaNodes.Create (nstaWifi);
  wifiMobNodes.Create (nmobWifi);

YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ()
   ;
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();
  phy.SetChannel (channel.Create ());

WifiHelper wifi = WifiHelper::Default ();
  wifi.SetRemoteStationManager ("ns3::AarfWifiManager");
  wifi.SetStandard(WIFI_PHY_STANDARD_80211g);
NqosWifiMacHelper mac = NqosWifiMacHelper::Default ();

Ssid ssid = Ssid ("ns-3-ssid");
    mac.SetType ("ns3::AdhocWifiMac",
          "Ssid", SsidValue (ssid));
```

Díky tomuto kódu byly vytvořeny **wifiStaNodes** (nepohyblivé) a **wifiMobNodes** (pohyblivé) uzly. Následují definice pomocí kterých, se vytvořila síť WiFi se standardem IEEE 802.11g. Definice **NqosWifiMacHelper mac=NqosWifiMacHelper::Default ();** značí, že se nebude uplatňovat kvalita služeb QoS. To bylo rozhodnuto po konzultaci s vedoucím této práce, jelikož původní plán byl vytvořit UDP a TCP datový tok, avšak NS-3.22 (framework LENA, který NS-3 využívá) neumožňuje předávání TCP dat z WiFi sítě do mobilní sítě LTE kvůli problému spojeným s překladem adres NAT (Network Address Translation), tedy byl vytvořen pouze UDP datový tok pro všechny uzly. Jelikož je datový tok pouze UDP nebylo nutné implementovat kvalitu služeb (QoS) a je aplikováno BestEffort pro přenos dat. Dále je zde defino-

váno, že se tato WiFi síť bude chovat jako Ad hoc síť, tedy síť bez AP (přístupového bodu), což znamená, že data z jednoho uzlu na druhý budou putovat co nejvýhodnější cestou přes ostatní uzly. I přes tuto definici se však vytvořená síť tváří jako síť s jedním AP (uzel MTCG), toto je však dáno statickým směrováním, které bylo nutné implementovat z důvodu správného předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE ve sběrném uzlu MTCG.

Jelikož již byla nadefinována Ad hoc WiFi síť, bylo nutné dále tuto síť přiřadit jednotlivým uzlům a umožnit jim tak komunikaci v rámci této sítě. Toho bylo dosaženo následujícím kódem.

```
    NetDeviceContainer staDevices;
    staDevices = wifi.Install (phy, mac, wifiStaNodes);

  NetDeviceContainer staDevices2;
    staDevices2 = wifi.Install (phy, mac, wifiMobNodes);
    mac.SetType ("ns3::AdhocWifiMac", "Ssid", SsidValue (ssid));

  NetDeviceContainer MTCGDevices;
    MTCGDevices = wifi.Install (phy, mac, MTCG);

  DsdvHelper dsdv;
```

Tímto kódem se mimo jiné implementuje již 2. komunikační rozhraní na síťový uzel MTCG, jelikož ten již na sobě má implementováno rozhraní mobilní sítě LTE. Pomocí **`DsdvHelper dsdv;`** se definuje, že jako směrovací protokol v Ad hoc síti bude využit protokol DSDV, ale jak bylo vysvětleno výše, tento protokol se v této simulaci neprojevuje z důvodu užitého statického směrování. Při užití směrovacího protokolu je totiž metrika vždy vyšší než defaultní metrika pro statické směrování, která je v NS-3 nastavena na 0.

Po vytvoření Ad hoc WiFi sítě a přiřazení této sítě daným uzlům bylo nutné tyto síťové uzly umístit do prostoru. K tomu byl opět využit **`MobilityHelper`**, avšak s tím rozdílem, že nyní nebyla pozice uzlů definována přímo, ale bylo užito rozmístění do sítě (Gridu), u kterého byla definována (x,y) výchozí pozice jednoho z uzlů a od této pozice se nacházejí další uzly posunuty o **`DeltaX`** či **`DeltaY`**, které jsou udávané v metrech. Užitím **`RandomWalk2dMobilityModel`** byl definován již dříve zmiňovaný náhodný pohyb síťových uzlů a to v daném rozmezí. Tento pohyb byl přiřazen pohyblivým síťovým uzlům a poté byl MobilityModel změněn na ConstantPositionMobilityModel a přiřazen nepohyblivým síťovým uzlům a uzlu MTCG, jelikož se nepředpokládá jejich pohyb. Užitím **`Ipv4AddressHelper stack;`** a definováním jeho parametrů byl vytvořen rozsah IPv4 adres ze kterého může být přiřazena IP adresa jednotlivým uzlům.

```
  MobilityHelper mobilityWifi;
    mobilityWifi.SetPositionAllocator ("ns3::GridPositionAllocator"
        ,
                        "MinX", DoubleValue (5.0),
                        "MinY", DoubleValue (10.0),
                        "DeltaX", DoubleValue (5.0),
                        "DeltaY", DoubleValue (10.0),
                        "GridWidth", UintegerValue (3),
                        "LayoutType", StringValue ("RowFirst"));

    mobilityWifi.SetMobilityModel ("ns3::RandomWalk2dMobilityModel"
        ,
                       "Bounds", RectangleValue (Rectangle (-50, 50,
                          -50, 50)));
    //mobilityWifi.SetMobilityModel ("ns3::
        ConstantPositionMobilityModel");
    mobilityWifi.Install (wifiMobNodes);

    mobilityWifi.SetMobilityModel ("ns3::
        ConstantPositionMobilityModel");
    mobilityWifi.Install (MTCG);
    mobilityWifi.Install (wifiStaNodes);

    internet.Install (wifiStaNodes);
    internet.Install (wifiMobNodes);

  Ipv4AddressHelper stack;
    stack.SetBase ("10.3.0.0", "255.255.255.0");
    stack.Assign (staDevices);
    stack.Assign (staDevices2);
```

Nyní přišla na řadu nejdůležitější část této simulace a to již dříve zmiňované statické směrování. NS-3.22 neumí defaultně předávat data na jednom síťovém uzlu z jednoho síťového rozhraní na druhé (WiFi - LTE). Řešením tohoto problému bylo užití statického směrování z jednotlivých uzlů do mobilní sítě LTE. Toho bylo dosaženo následující částí simulace, kde byl užit for cyklus pro jednoduší přiřazení směrování všem uzlům.

```
Ipv4InterfaceContainer WifiInterfaces;
    WifiInterfaces.Add (stack.Assign (MTCGDevices));

  for(int i=0;i<5;i++)
    {
      Ptr<Node> wifiNode = wifiStaNodes.Get(i);
```

```
    Ptr<Ipv4StaticRouting> wifiStaticRouting = ipv4RoutingHelper.
       GetStaticRouting (wifiNode->GetObject<Ipv4> ());
    wifiStaticRouting->SetDefaultRoute (WifiInterfaces.GetAddress
        (0), 1);
  }

for(int i=0;i<4;i++)
  {
    Ptr<Node> wifiNode2 = wifiMobNodes.Get(i);
    Ptr<Ipv4StaticRouting> wifiStaticRouting = ipv4RoutingHelper.
       GetStaticRouting (wifiNode2->GetObject<Ipv4> ());
    wifiStaticRouting->SetDefaultRoute (WifiInterfaces.GetAddress
        (0), 1);
    }

Ptr<Node> MTCGNode = MTCG.Get (0);
Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.
   GetStaticRouting (MTCGNode->GetObject<Ipv4> ());
  ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->
     GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
```

V této části definice simulace jsou již definovány veškeré požadované síťové prvky a jejich topologie. Nyní tedy bylo nutné přiřadit uzlům aplikaci generující datový tok, který bude vytvořenou sítí procházet.

```
OnOffHelper WIFIClientSta0 ("ns3::UdpSocketFactory",Address(
   InetSocketAddress(remoteHostAddr, 8)));
  WIFIClientSta0.SetAttribute ("OnTime",StringValue("ns3::
     ConstantRandomVariable[Constant=1]"));
  WIFIClientSta0.SetAttribute ("OffTime",StringValue("ns3::
     ConstantRandomVariable[Constant=0]"));
  WIFIClientSta0.SetAttribute ("PacketSize", StringValue ("500"))
     ;
  WIFIClientSta0.SetAttribute ("DataRate", StringValue ("0.03Mb/s
     "));

ApplicationContainer sourceAppSta0;
  sourceAppSta0 = WIFIClientSta0.Install (wifiStaNodes.Get(0));
  sourceAppSta0.Start (Seconds (0.5));
  sourceAppSta0.Stop (Seconds (simTime));

PacketSinkHelper sinkSta0 ("ns3::UdpSocketFactory",
   InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (), 8));
ApplicationContainer sinkAppSta0 = sinkSta0.Install(remoteHost);
  sinkAppSta0.Start (Seconds (0.5));
  sinkAppSta0.Stop (Seconds (simTime));
```

Pro generování datového toku byla v tomto případně vybrána **OnOff** aplikace, která je definována pomocí **OnOffHelperu**. Tento helper umožňuje nastavení různých parametrů datového přenosu. Pomocí **UdpSocketFactory** bylo definováno, že se jedná o UDP přenos dat. Definice **Address(InetSocketAddress(remoteHostAddr , 8))** slouží k určení cíle datového přenosu, v tomto případě je cílem přenosu IP adresa síťového uzlu Remote Host s portem 8. Následuje definice toho, že pokud bude aplikace v provozu (**OnTime**), tak zároveň bude probíhat definovaný datový přenos. Další definovaným parametrem byl parametr **PacketSize** čímž jsme definovali velikost paketů datového přenosu. Pomocí **("DataRate", StringValue ("0.03Mb/s"))** byla definována rychlost přenosu.

Nyní, když byla aplikace definována, bylo zapotřebí vytvořenou aplikaci přiřadit danému uzlu a určit, kdy se má daná aplikace spustit a vypnout. Jelikož je síťový uzel připravený na vysílání, bylo nutné vytvořit aplikaci pro přijímací uzel, která umožní vysílaná data přijímat. K tomuto účelu slouží **PacketSinkHelper**. Zde stačilo obdobně nadefinovat, na kterém portu má aplikace přijímat datový přenos, přiřadit tuto aplikaci síťovému uzlu, který má přijímat a určit, kdy se má aplikace spustit a kdy vypnout. Takto byly zvlášť definovány OnOff aplikace pro každý síťový uzel v Ad hoc síti určený pro vysílání datového toku. Jistou možností zjednodušení definice OnOff aplikací by bylo užití **for** cyklu k hromadnému přiřazení aplikace bez nutnosti definovat aplikaci pro každý uzel zvlášť. Definice OnOff aplikace pro každý uzel zvlášť byla zvolena z důvodu přehlednosti a možnosti definovat různé parametry pro každou aplikaci zvlášť.

```
    std::cout << "The simulation is running..." << std::endl;
  AnimationInterface anim ("Adhoc+LTE.xml");
    anim.EnablePacketMetadata (true);
    anim.UpdateNodeDescription(pgw, "PGW");
    anim.UpdateNodeDescription(remoteHost, "Remote Host");
    anim.UpdateNodeDescription (MTCG.Get (0), "MTCG");
    anim.UpdateNodeDescription (enbNode.Get (0), "eNodeB");
    for(int i=0;i<5;i++)
      {
        anim.UpdateNodeDescription (wifiStaNodes.Get (i), "STA");
      }

    for(int i=0;i<4;i++)
      {
        anim.UpdateNodeDescription (wifiMobNodes.Get (i), "MOB");
      }


  phy.EnablePcapAll("adhoc+lte_uzly");
```

```
p2ph.EnablePcapAll("lte_pcap");

FlowMonitorHelper flowMonHelper;
Ptr<FlowMonitor> monitor = flowMonHelper.InstallAll();
```

V této části je definováno vytvoření výstupu simulace v podobě souboru **Adhoc+LTE.xml**. Tento soubou je možné otevřít pomocí vizualizačního nástroje NetAnim. Pomocí tohoto nástroje je možné vizuálně pozorovat vytvořenou topologii sítě Ad hoc i mobilní sítě LTE a v čase probíhající komunikaci mezi síťovými uzly. Dále je v této části definice definováno pojmenování síťových uzlů do výstupního souboru.

Dalším krokem bylo definování výstupu simulace a to soubory **adhoc+lte_uzly.pcap** a **lte_pcap.pcap**. Tyto soubory je možné otevřít pomocí síťového analyzátoru Wireshark. Díky těmto souborům je možno pozorovat podrobné parametry jednotlivých paketů, které prošly sítí.

Na konci definice simulace bylo nutné pomocí **Simulator::Stop(Seconds(simTime));** definovat, kdy se simulace má zastavit a pomocí **Simulator::Run();** její samotné spuštění.

```
  Simulator::Stop(Seconds(simTime));
Simulator::Run();
```

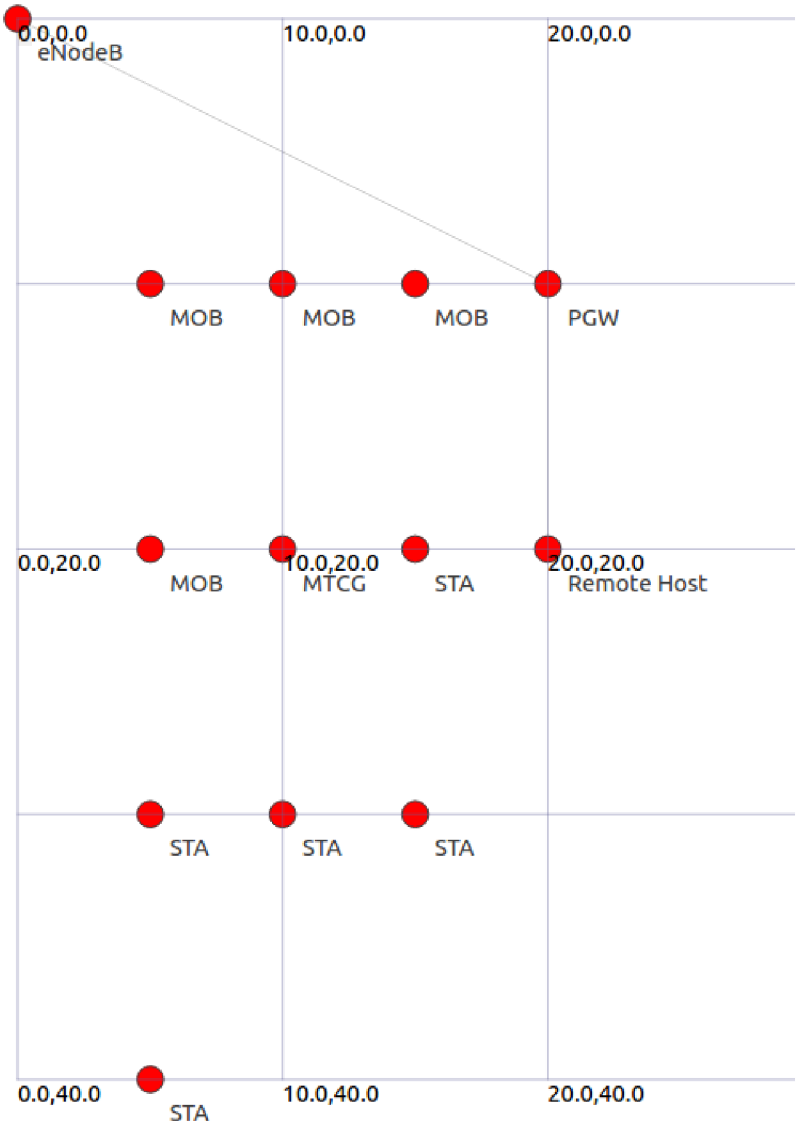
4.4 Výsledky a výstupy simulace předávání dat mezi sítí Ad hoc a mobilní sítí LTE

V této kapitole jsou popsány výsledky a výstupy, které byly zjištěny pomocí vytvořené simulace popsané v předchozí kapitole 4.3.

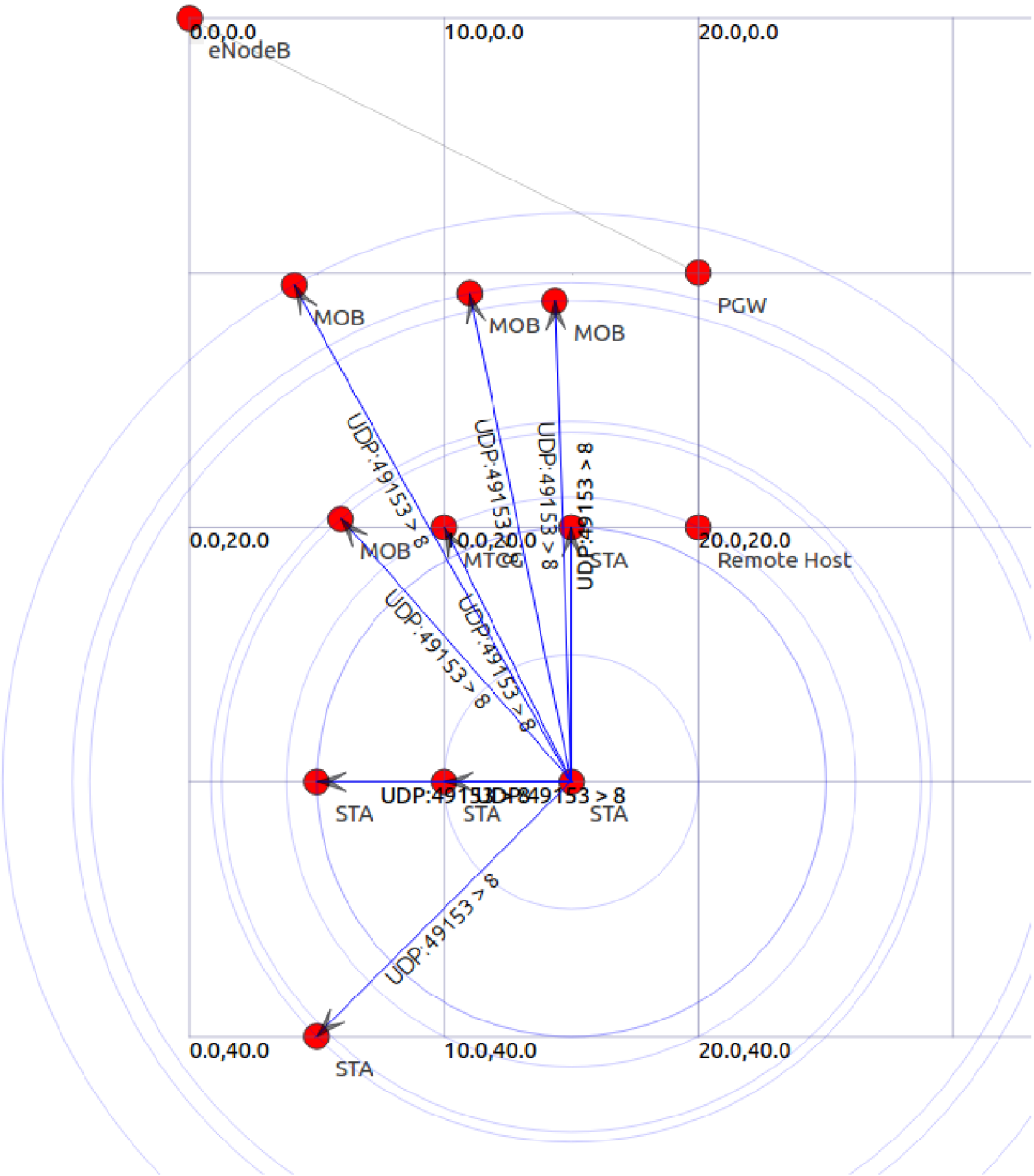
4.4.1 Vizualizace topologie a komunikace simulované sítě

Vytvořený výstup nám umožňuje zobrazení topologie viz Obr. 4.4 a aktuální datové komunikace vytvořené sítě v čase viz Obr. 4.5 a 4.6.

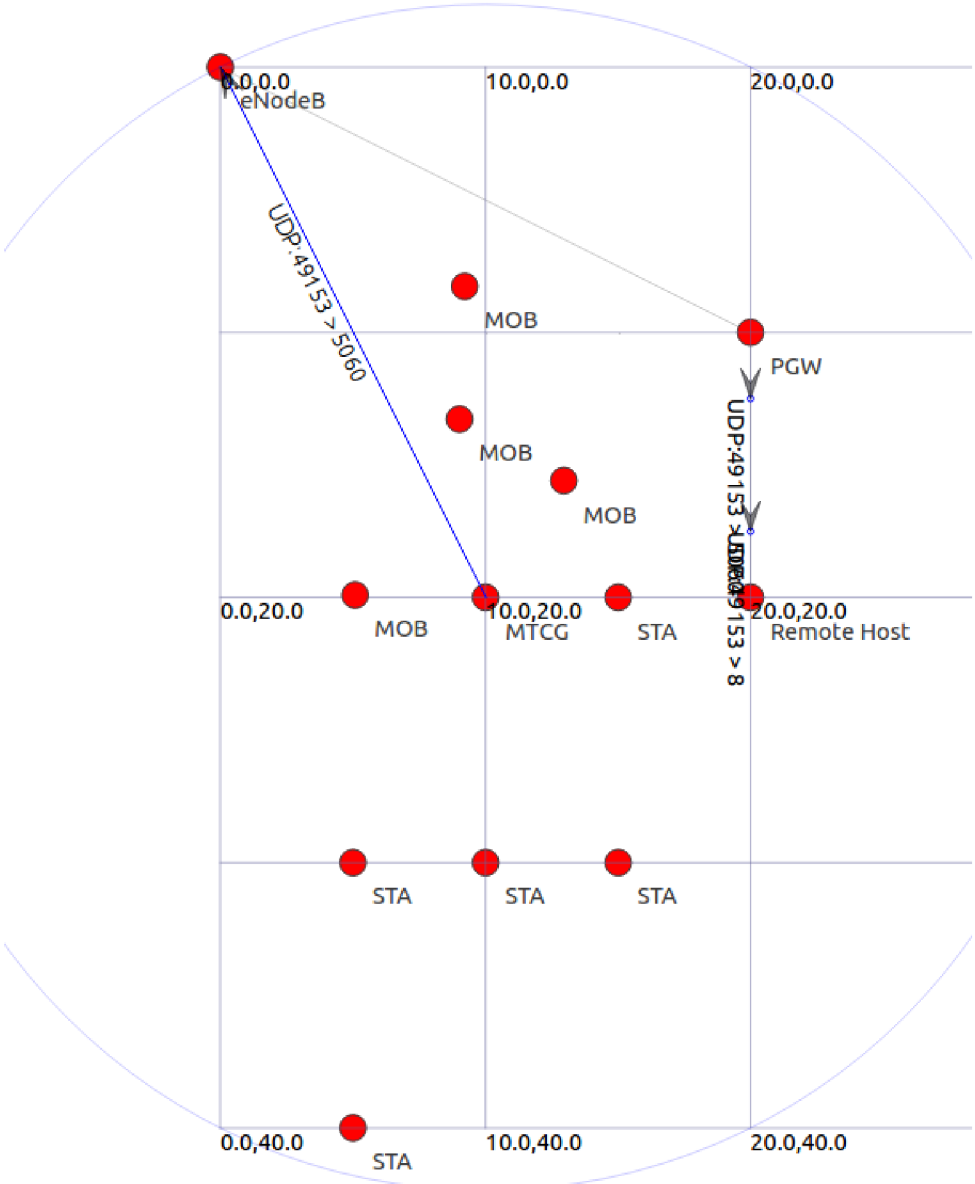
Pomocí tohoto výstupu je možno ověřit skutečnou topologii sítě a funkčnost komunikace ve vytvořené síti. Z obrázků Obr. 4.5 a Obr. 4.6 je patrná změna polohy uzlů MOB (představující pohyblivé uzly), kdežto uzly STA (nepohyblivé) zůstávají na svém místě dle definice uvedené v předchozí kapitole 4.3.



Obr. 4.4: NetAnim zobrazující topologii sítě před spuštěním animace



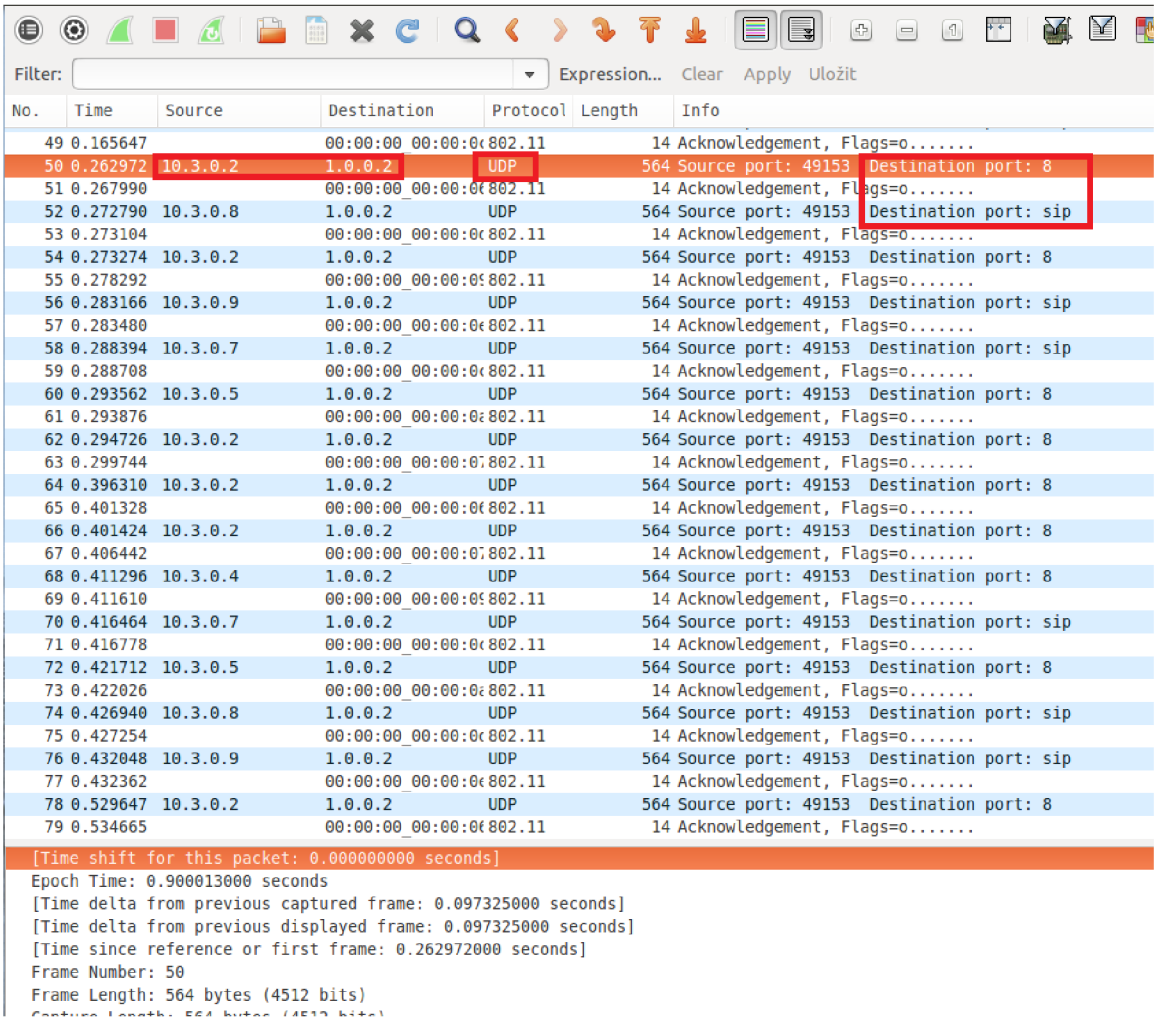
Obr. 4.5: NetAnim zobrazující komunikaci v rámci Ad hoc sítě



Obr. 4.6: NetAnim zobrazující předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE

4.4.2 Analýza paketů

Výstup v podobě souborů formátu .pcap umožňuje pozdější analýzu paketů, které prošly přes simulovanou síť. Analýzu těchto paketů nám umožňuje síťový analyzátor Wireshark. Výstupy ze simulace jsou rozděleny na adhoc+lte_uzly.pcap (komunikace v rámci Ad hoc sítě) a lte_pcap.pcap (komunikace v rámci mobilní sítě LTE).

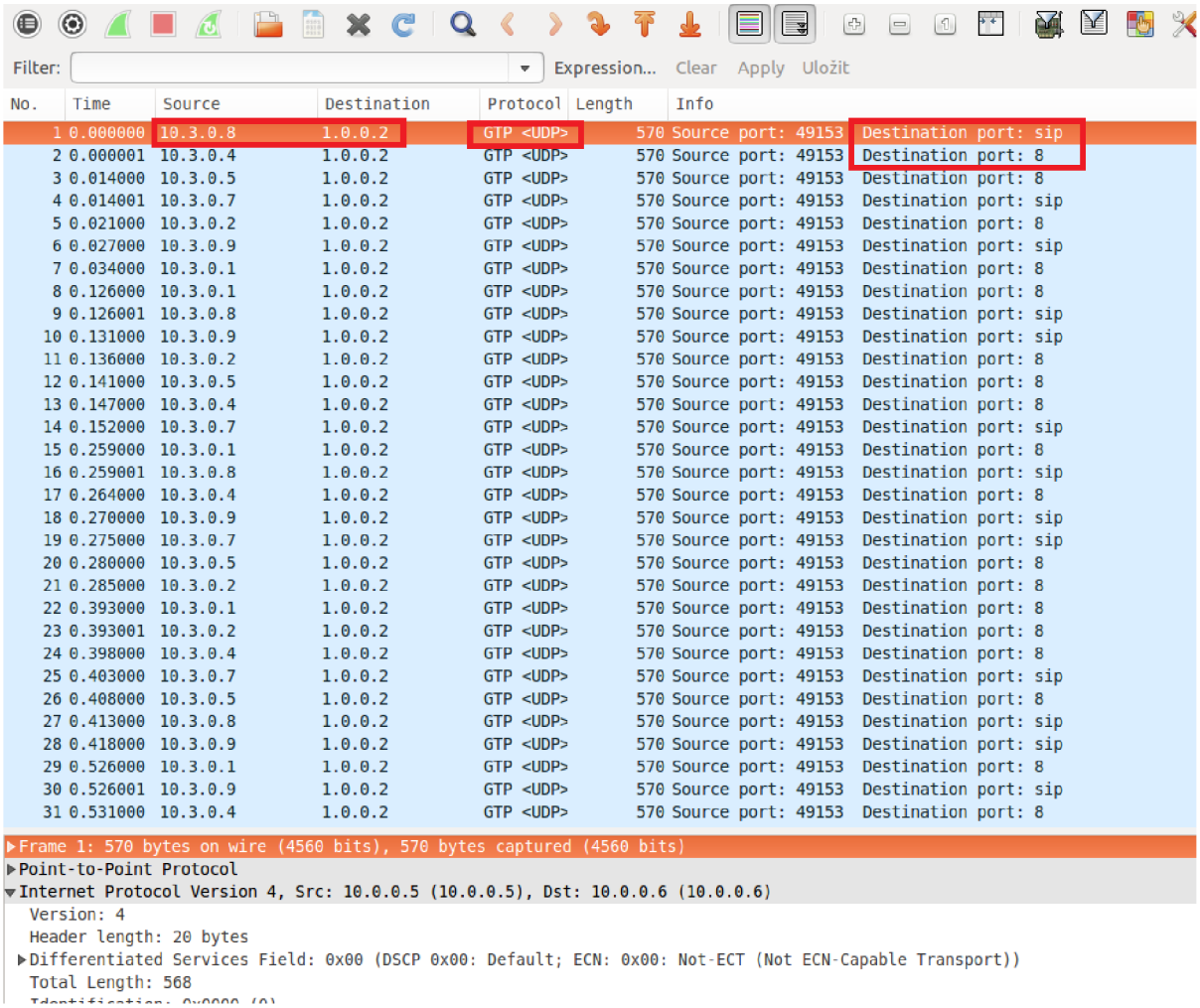


Obr. 4.7: Analýza paketů v Ad hoc síti pomocí síťového analyzátoru Wireshark

Na Obr. 4.7 je zobrazena analýza paketů procházejících v rámci Ad hoc sítě. Pomocí analyzátoru Wireshark je možné zjistit, odkud a kam jednotlivé pakety míří, jaký využívají transportní protokol, případně označení třídy kvality služby neboli QoS tag (není součástí této simulace).

Na Obr. 4.8 je zobrazena analýza paketů procházejících v rámci mobilní sítě LTE. Oproti síti Ad hoc lze v mobilní síti LTE pozorovat změnu transportního protokolu

UDP na protokol GTP. Analýzou těchto paketů bylo tedy ověřeno správné předávání paketů z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE.



Obr. 4.8: Analýza paketů v mobilní síti LTE pomocí síťového analyzátoru Wireshark

4.4.3 Parametry přenosu mobilní sítí LTE

Po skončení simulace se vytvoří soubory UlMacStats.txt, DlMacStats.txt, UlPdcpStats.txt, DlPdcpStats.txt, UlRlcStats.txt a DlRlcStats.txt. Jak je z názvů souborů patrné, „Dl“ na začátku názvu souborů znamená, že se jedná o soubor s výpisem parametrů pro download (příjem) směr k vztažným uzlům (v tomto případě pohyblivé a nepohyblivé stanice). Kdežto u „UL“ neboli upload (odesílaní) se jedná o výpis parametrů komunikace směrem od vztažných uzlů.

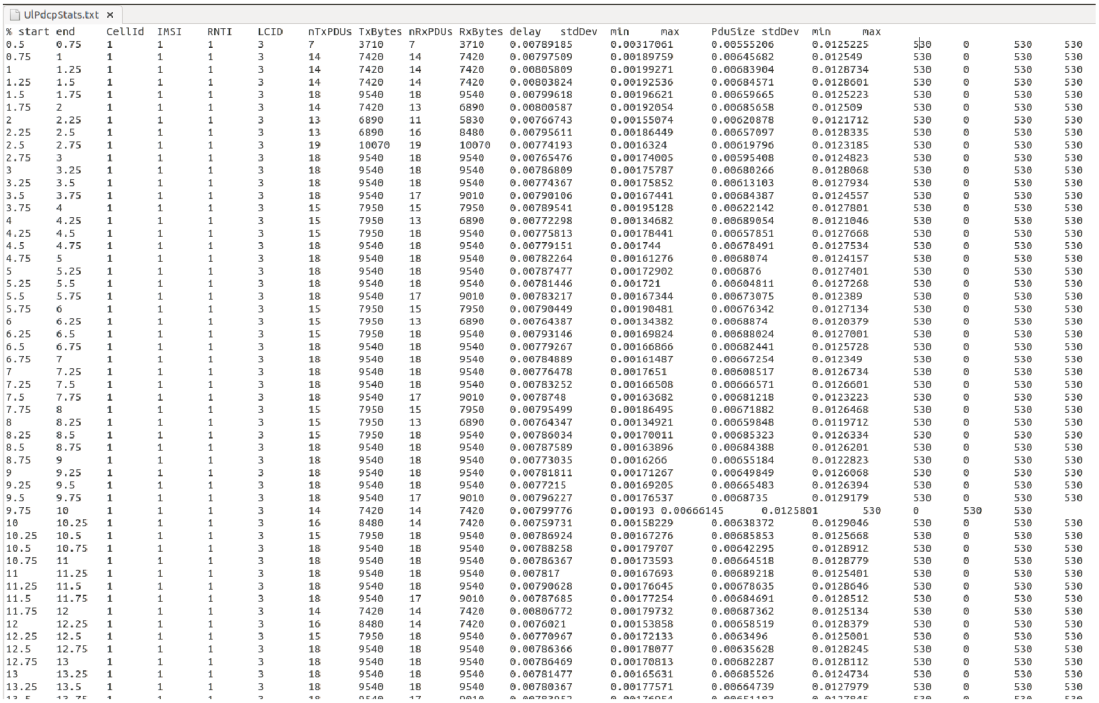
V této simulaci je vytvořen pouze upload, jelikož síťový simulátor NS-3 nepodporuje předávání TCP paketů z WiFi síťového rozhraní na rozhraní mobilní sítě

LTE. Proto byl využit transportní protokol UDP, jelikož u něj je to možné. Oproti transportnímu protokolu TCP však UDP neobsahuje takzvané potvrzovací pakety, které jsou vyslány z cílového uzlu ke zdrojovému uzlu poté, co cílový uzel obdrží vyslané pakety. Při příjmu paketů u UDP se žádný potvrzovací paket neodesílá zpět, tím tedy nevzniká datový tok směrem ke zdrojovému uzlu (download). PDCP, MAC a RLC jsou takzvané KPIs (Key Performance Indicators), jedná se tedy o ukazatele výkonu sítě.

UlPdcpStats.txt

Pomocí souboru UlPDcpStats.txt viz Obr. 4.9 je možné získat data popisující parametry mobilní sítě LTE. Mezi tyto parametry patří [9]:

- čas počátku měřeného intervalu v sekundách od startu simulace,
- čas konce měřeného intervalu v sekundách od startu simulace,
- Cell ID,
- unikátní UE ID (IMSI),
- Radio Network Temporary Identifier (RNTI),
- ID logického kanálu,
- počet vyslaných PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- celkový počet vyslaných bajtů,
- počet přijatých PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- celkový počet přijatých bajtů,
- průměrné zpoždění PDCP PDUs (protokolové datové jednotky) v sekundách,
- standardní odchylka zpoždění PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- minimální hodnota zpoždění PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- maximální hodnota zpoždění PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- průměrná velikost PDCP PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech,
- standardní odchylka velikosti PDCP PDUs (protokolové datové jednotky),
- minimální velikost PDCP PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech,
- maximální velikost PDCP PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech.



UlPdcpStats.txt

% start	end	CellId	IMSI	RNTI	LCID	nTxPDUs	TxBytes	nRxPDUs	RxBytes	delay	stdDev	min	max	PduSize	stdDev	min	max				
0.5	0.75	1	1	1	3	7	3710	7	3710	0.00789185		0.00317061		0.00555206		0.0125225		530	0	530	530
0.75	1	1	1	1	3	14	7420	14	7420	0.00797509		0.00189759		0.00645682		0.012549		530	0	530	530
1	1.25	1	1	1	3	14	7420	14	7420	0.00805809		0.00199271		0.00683904		0.012B734		530	0	530	530
1.25	1.5	1	1	1	3	14	7420	14	7420	0.00803824		0.00192536		0.00684571		0.012B601		530	0	530	530
1.5	1.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00799618		0.00196621		0.00659665		0.0125223		530	0	530	530
1.75	2	1	1	1	3	14	7420	13	6890	0.00800587		0.00192054		0.0068565B		0.012509		530	0	530	530
2	2.25	1	1	1	3	13	6890	11	5830	0.00766743		0.00155074		0.0062087B		0.0121712		530	0	530	530
2.25	2.5	1	1	1	3	13	6890	16	8480	0.00795611		0.00186449		0.00657097		0.012B335		530	0	530	530
2.5	2.75	1	1	1	3	19	10070	19	10070	0.00774193		0.0016324		0.00619796		0.0123185		530	0	530	530
2.75	3	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00765476		0.00174005		0.00595408		0.0124823		530	0	530	530
3	3.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00786809		0.00175787		0.00680266		0.012B068		530	0	530	530
3.25	3.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00774367		0.00175852		0.00613103		0.0127934		530	0	530	530
3.5	3.75	1	1	1	3	18	9540	17	9010	0.00790106		0.00167441		0.00684387		0.0124557		530	0	530	530
3.75	4	1	1	1	3	15	7950	15	7950	0.00789541		0.00195128		0.00622142		0.0127801		530	0	530	530
4	4.25	1	1	1	3	15	7950	13	6890	0.00772298		0.00134682		0.00689054		0.0121046		530	0	530	530
4.25	4.5	1	1	1	3	15	7950	18	9540	0.00775813		0.00178441		0.00657851		0.0127668		530	0	530	530
4.5	4.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00779151		0.001744		0.00678491		0.0127534		530	0	530	530
4.75	5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00782264		0.00161276		0.0068874		0.0124157		530	0	530	530
5	5.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00787477		0.00172902		0.006876		0.0127401		530	0	530	530
5.25	5.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00781446		0.001721		0.00684811		0.0127268		530	0	530	530
5.5	5.75	1	1	1	3	18	9540	17	9010	0.00783217		0.00167344		0.00673075		0.012389		530	0	530	530
5.75	6	1	1	1	3	15	7950	15	7950	0.00790449		0.00190481		0.00676342		0.0127134		530	0	530	530
6	6.25	1	1	1	3	15	7950	13	6890	0.00764387		0.00134382		0.0068874		0.0120379		530	0	530	530
6.25	6.5	1	1	1	3	15	7950	18	9540	0.00793146		0.00169824		0.00688024		0.0127001		530	0	530	530
6.5	6.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00779267		0.00166866		0.00682441		0.0125728		530	0	530	530
6.75	7	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00784889		0.00161487		0.00667254		0.012349		530	0	530	530
7	7.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00776478		0.0017651		0.00698517		0.0126734		530	0	530	530
7.25	7.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00783252		0.00166508		0.00666571		0.0126601		530	0	530	530
7.5	7.75	1	1	1	3	18	9540	17	9010	0.0078748		0.00163682		0.0068121B		0.0123223		530	0	530	530
7.75	8	1	1	1	3	15	7950	15	7950	0.00795499		0.00186495		0.00671882		0.0126468		530	0	530	530
8	8.25	1	1	1	3	15	7950	13	6890	0.00764347		0.00134921		0.00659848		0.0119712		530	0	530	530
8.25	8.5	1	1	1	3	15	7950	18	9540	0.00786034		0.00170011		0.00685323		0.0126334		530	0	530	530
8.5	8.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00787589		0.00163896		0.00684388		0.0126201		530	0	530	530
8.75	9	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00773035		0.0016266		0.00655184		0.0122823		530	0	530	530
9	9.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00781811		0.00171267		0.00649849		0.0126068		530	0	530	530
9.25	9.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.0077215		0.00169205		0.00665483		0.0126394		530	0	530	530
9.5	9.75	1	1	1	3	18	9540	17	9010	0.00796227		0.00176537		0.0068735		0.0129179		530	0	530	530
9.75	10	1	1	1	3	14	7420	14	7420	0.00799776		0.00193	0.00666145		0.0123801		530	0	530	530	
10	10.25	1	1	1	3	16	8480	14	7420	0.00759731		0.00158229		0.00638372		0.0129846		530	0	530	530
10.25	10.5	1	1	1	3	15	7950	18	9540	0.00786924		0.00167276		0.00685853		0.0125668		530	0	530	530
10.5	10.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00788258		0.00179707		0.00642295		0.012B912		530	0	530	530
10.75	11	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00786367		0.00173593		0.0066451B		0.012B779		530	0	530	530
11	11.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.007817		0.00167693		0.0068921B		0.0125401		530	0	530	530
11.25	11.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00790628		0.00176645		0.00678635		0.0128646		530	0	530	530
11.5	11.75	1	1	1	3	18	9540	17	9010	0.00787685		0.00177254		0.00684691		0.0128512		530	0	530	530
11.75	12	1	1	1	3	14	7420	14	7420	0.00806772		0.00179732		0.00687362		0.0125134		530	0	530	530
12	12.25	1	1	1	3	16	8480	14	7420	0.0076021		0.00153858		0.00658519		0.0128379		530	0	530	530
12.25	12.5	1	1	1	3	15	7950	18	9540	0.00770967		0.00172133		0.0063496		0.0125001		530	0	530	530
12.5	12.75	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00786366		0.00178077		0.0063562B		0.012B245		530	0	530	530
12.75	13	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00786469		0.00178813		0.00682287		0.012B112		530	0	530	530
13	13.25	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00781477		0.00165631		0.00685526		0.0124734		530	0	530	530
13.25	13.5	1	1	1	3	18	9540	18	9540	0.00780367		0.00177571		0.00664739		0.0127979		530	0	530	530

Obr. 4.9: Výpis souboru UlPdcpStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě

UlMacStats.txt

Pomocí souboru UlMacStats.txt viz Obr. 4.10 je možné získat data popisující parametry mobilní sítě LTE. Mezi tyto parametry patří [9]:

- čas simulace v sekundách, ve kterém je alokace indikována pomocí plánovače,
- Cell ID,
- unikátní UE ID (IMSI),
- číslo rámce,
- číslo subrámce,
- Radio Network Temporary Identifier (RNTI),
- MCS (modulační a kódovací schéma) TB (transportního bloku),
- velikost TB (transportní blok).

UlMacStats.txt

% time	cellId	IMSI	frame	sframe	RNTI	mcs	size
0.651	1	1	66	2	1	28	2292
0.657	1	1	66	8	1	28	2292
0.665	1	1	67	6	1	28	2292
0.672	1	1	68	3	1	28	2292
0.678	1	1	68	9	1	28	2292
0.685	1	1	69	6	1	28	2292
0.691	1	1	70	2	1	28	2292
0.777	1	1	78	8	1	28	2292
0.782	1	1	79	3	1	28	2292
0.787	1	1	79	8	1	28	2292
0.792	1	1	80	3	1	28	2292
0.798	1	1	80	9	1	28	2292
0.803	1	1	81	4	1	28	2292
0.808	1	1	81	9	1	28	2292
0.91	1	1	92	1	1	28	2292
0.915	1	1	92	6	1	28	2292
0.921	1	1	93	2	1	28	2292
0.926	1	1	93	7	1	28	2292
0.931	1	1	94	2	1	28	2292
0.936	1	1	94	7	1	28	2292
0.942	1	1	95	3	1	28	2292
1.044	1	1	105	5	1	28	2292
1.049	1	1	105	10	1	28	2292
1.054	1	1	106	5	1	28	2292
1.059	1	1	106	10	1	28	2292
1.064	1	1	107	5	1	28	2292
1.069	1	1	107	10	1	28	2292
1.075	1	1	108	6	1	28	2292
1.177	1	1	118	8	1	28	2292
1.182	1	1	119	3	1	28	2292
1.187	1	1	119	8	1	28	2292
1.192	1	1	120	3	1	28	2292
1.198	1	1	120	9	1	28	2292
1.203	1	1	121	4	1	28	2292
1.208	1	1	121	9	1	28	2292
1.31	1	1	132	1	1	28	2292
1.315	1	1	132	6	1	28	2292
1.321	1	1	133	2	1	28	2292
1.326	1	1	133	7	1	28	2292
1.331	1	1	134	2	1	28	2292
1.336	1	1	134	7	1	28	2292
1.341	1	1	135	2	1	28	2292
1.444	1	1	145	5	1	28	2292
1.449	1	1	145	10	1	28	2292
1.454	1	1	146	5	1	28	2292
1.459	1	1	146	10	1	28	2292
1.464	1	1	147	5	1	28	2292
1.469	1	1	147	10	1	28	2292
1.475	1	1	148	6	1	28	2292
1.577	1	1	158	8	1	28	2292
1.582	1	1	159	3	1	28	2292
1.587	1	1	159	8	1	28	2292

Obr. 4.10: Výpis souboru UlMacStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě

UlRlcStats.txt

Pomocí souboru UlRlcStats.txt viz Obr. 4.11 je možné získat data popisující parametry mobilní sítě LTE. Mezi tyto parametry patří [9]:

- čas počátku měřeného intervalu v sekundách od startu simulace,
- čas konce měřeného intervalu v sekundách od startu simulace,
- Cell ID,
- unikátní UE ID (IMSI),

- Radio Network Temporary Identifier (RNTI),
- ID logického kanálu,
- počet vyslaných RLC (Radio Link Control Protocol) PDUs (protokolové datové jednotky),
- celkový počet vyslaných bajtů,
- počet přijatých RLC PDUs (protokolové datové jednotky),
- celkový počet přijatých bajtů,
- průměrné zpoždění RLC PDUs (protokolové datové jednotky) v sekundách,
- standardní odchylka zpoždění RLC PDUs (protokolové datové jednotky),
- minimální hodnota zpoždění RLC PDUs (protokolové datové jednotky),
- maximální hodnota zpoždění RLC PDUs (protokolové datové jednotky),
- průměrná velikost RLC PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech,
- standardní odchylka velikosti RLC PDUs (protokolové datové jednotky),
- minimální velikost RLC PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech,
- maximální velikost RLC PDUs (protokolové datové jednotky) v bajtech.

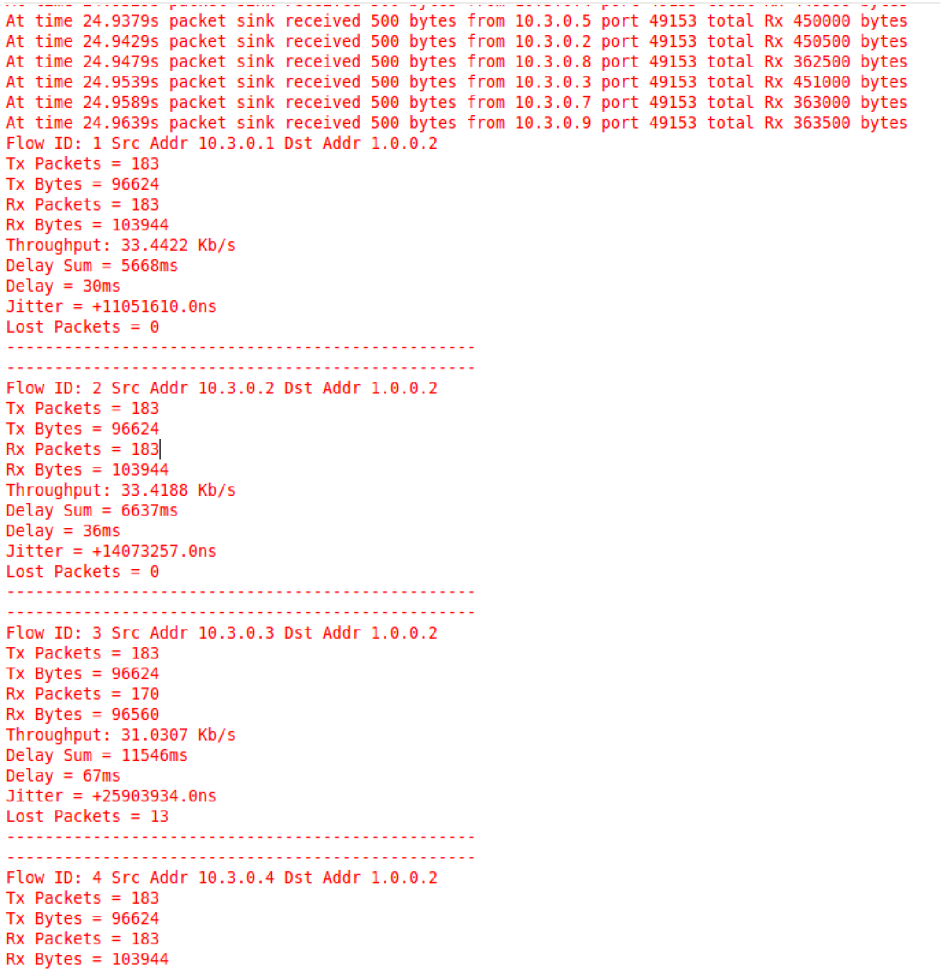
UlRlcStats.txt

% start	end	CellId	IMSI	RNTI	LCID	nTxPDUs	TxBytes	nRxPDUs	RxBytes	delay	stdDev	min	max	PduSize	stdDev	min	max	
0.5	0.75	1	1	1	3	5	3724	5	3724	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	744.8	291.388	532	1064	
0.75	1	1	1	1	3	12	7448	12	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	620.667	207.081	532	1064	
1	1.25	1	1	1	3	12	7448	12	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	620.667	207.081	532	1064	
1.25	1.5	1	1	1	3	12	7448	12	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	620.667	207.081	532	1064	
1.5	1.75	1	1	1	3	15	9576	15	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	638.4	220.269	532	1064	
1.75	2	1	1	1	3	11	6916	11	6916	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	628.727	215.205	532	1064	
2	2.25	1	1	1	3	11	6916	10	5852	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	585.2	168.233	532	1064	
2.25	2.5	1	1	1	3	13	7448	14	8512	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	608	193.189	532	1064	
2.5	2.75	1	1	1	3	17	10108	17	10108	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	594.588	176.68	532	1064	
2.75	3	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
3	3.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
3.25	3.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
3.5	3.75	1	1	1	3	16	9576	15	9044	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	602.933	187.193	532	1064	
3.75	4	1	1	1	3	12	7448	13	7980	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	613.846	199.784	532	1064	
4	4.25	1	1	1	3	13	7980	12	6916	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	576.333	153.575	532	1064	
4.25	4.5	1	1	1	3	15	8512	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
4.5	4.75	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
4.75	5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
5	5.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
5.25	5.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
5.5	5.75	1	1	1	3	16	9576	15	9044	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	602.933	187.193	532	1064	
5.75	6	1	1	1	3	12	7448	13	7980	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	613.846	199.784	532	1064	
6	6.25	1	1	1	3	13	7980	12	6916	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	576.333	153.575	532	1064	
6.25	6.5	1	1	1	3	15	8512	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
6.5	6.75	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
6.75	7	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
7	7.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
7.25	7.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
7.5	7.75	1	1	1	3	16	9576	15	9044	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	602.933	187.193	532	1064	
7.75	8	1	1	1	3	12	7448	13	7980	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	613.846	199.784	532	1064	
8	8.25	1	1	1	3	13	7980	12	6916	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	576.333	153.575	532	1064	
8.25	8.5	1	1	1	3	15	8512	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
8.5	8.75	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
8.75	9	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
9	9.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
9.25	9.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
9.5	9.75	1	1	1	3	16	9576	15	9044	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	602.933	187.193	532	1064	
9.75	10	1	1	1	3	12	7448	12	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	620.667	207.081	532	1064	
10	10.25	1	1	1	3	13	7980	13	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	572.923	147.55	532	1064	
10.25	10.5	1	1	1	3	15	8512	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
10.5	10.75	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
10.75	11	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
11	11.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
11.25	11.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
11.5	11.75	1	1	1	3	16	9576	15	9044	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	602.933	187.193	532	1064	
11.75	12	1	1	1	3	11	6916	12	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	620.667	207.081	532	1064	
12	12.25	1	1	1	3	14	8512	13	7448	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	572.923	147.55	532	1064	
12.25	12.5	1	1	1	3	15	8512	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
12.5	12.75	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
12.75	13	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
13	13.25	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	
13.25	13.5	1	1	1	3	16	9576	16	9576	0.00471429	0	0.00471429	0.00471429	598.5	181.713	532	1064	

Obr. 4.11: Výpis souboru UlRlcStats.txt vzniklého ze simulace předávání dat do LTE mobilní sítě

4.4.4 Výstup z konzole

Simulační nástroj NS-3 umožňuje výpis parametrů a událostí přímo do konzole vývojového prostředí Eclipse. V této simulaci bylo využito výpisu události (přijmutí paketu vzdáleným síťovým uzlem Remote Host) a výpis parametrů, kterými jsou například (adresa zdroje a cíle, zpoždění, propustnost a jiné). Výpis do konzole může nastat za běhu simulace (v případě když nastane definovaná událost) nebo po skončení simulace (výpis definovaných statistik a parametrů). Na Obr. 4.12 lze v horní



Obr. 4.12: Část výpisu z konzole vývojového prostředí Eclipse po skončení simulace předávání dat do LTE mobilní sítě

části pozorovat ukázku výpisu konzole v případě příjmu paketu na síťovém uzlu Remote Host. Z popisovaného výpisu lze zjistit, kdy byl daný paket přijat, jakou velikost měl přijmutý paket, odkud byl paket odeslán (IP adresa a port) a výsledná velikost přijatých paketů z jednoho zdroje datového toku.

V dolní části ukázky výpisu Obr. 4.12 lze pozorovat výpis parametrů pro jednotlivé datové toky z jednotlivých síťových uzlů směrem k cílovému síťovému uzlu Remote Host. Výpis obsahuje parametry:

- Flow ID (číselné označení datového toku),
- Src Addr (IP adresa zdrojového síťového uzlu),
- Dst Adrr (IP adresa cílového síťového uzlu),
- Tx Packets (počet vyslaných paketů),
- Tx Bytes (počet vyslaných bajtů),
- Rx Packets (počet přijatých paketů),
- Rx Bytes (počet přijatých bajtů),
- Throughput (propustnost),
- Delay Sum (celkové zpoždění),
- Delay (zpoždění),
- Jitter (kolísání zpoždění),
- Lost Packets (ztracené pakety).

4.5 Problémy vyskytující se v simulaci a návrh jejich řešení

V této kapitole jsou rozebrány problémy, které se nepodařilo vyřešit, avšak jsou navrhnuta řešení jednotlivých problémů. Prvním řešeným problémem byla agregace dat na síťovém uzlu MTCG viz kapitola 4.5.1. Následuje kapitola 4.5.2 popisující problematiku zjišťování informací ohledně vytížení základnové stanice eNodeB.

4.5.1 Agregace dat na síťovém uzlu MTCG

Součástí bakalářské práce mělo být vyřešení agregace dat na síťovém uzlu MTCG. Předpokladem této práce bylo vytvoření agregace dat (sloučení dat) ze sítě Ad hoc na rozhraní Ad hoc/LTE. V rámci řešení bakalářské práce se nepodařilo najít řešení pro tuto agregaci. Ze získaných poznatků bylo zjištěno, že agregace dat jako taková není v tuto chvíli v simulačním nástroji NS-3 podporována.

Možným návrhem řešení tohoto problému je užití aplikace `UdpEchoServer`, která přijímá pakety a odesílá je zpět. Modifikací této aplikace, aby veškerá přijatá data byla uložena do bufferu (zásobníku) a po určité době vyslána veškerá tato data k cílovému uzlu, by měla být vytvořena požadovaná agregace dat.

4.5.2 Vytížení základnové stanice eNodeB

Další součástí bakalářské práce mělo být zjištění aktuálního stavu vytížení základnové stanice eNodeB. V nastavení NS-3 se nepodařilo najít možnost získání údajů, které by vypovídaly o vytížení základnové stanice eNodeB.

Bylo dosaženo závěru, že pro získání údajů o vytížení eNodeB je potřeba vycházet z počtu přenášených dat (aktuální hodnota přenosu dat) a maximální hodnoty velikosti dat, kterou je základnová stanice zpracovávat. Vzorec pro získání zatížení eNodeB je:

$$\text{zatížení eNodeB} = \frac{\text{aktuální datový přenos}}{\text{maximální velikost dat které může eNodeB zpracovat}} * 100\,[\%] \tag{4.1}$$

Problémem je však získání hodnoty maximální velikosti dat, které může eNodeB zpracovat. K získání této hodnoty však musí být složitě předefinovány defaultní parametry mobilní sítě LTE. Jedná se například o změnu přenosového módu `Config::SetDefault("ns3::LteEnbRrc::DefaultTransmissionMode",UintegerValue(2));`, definice počtu RB (Resource block) a jiné. Implementace těchto parametrů se však při úrovni mých současných znalostí nepodařila.

5 ZÁVĚR

Na začátku této práce byla popsána problematika M2M (Machine-to-Machine) komunikace, H2H (Human-to-Human) komunikace, teoretický rozbor mobilních sítí (LTE a LTE-Advanced) a možnosti síťového simulátoru NS-3 . Pomocí informací získaných v teoretickém rozboru síťového simulátoru NS-3 byly vytvořeny 3 simulace.

První simulace, popisována v kapitole 4.1, popisovala chování komunikace v Ad hoc síti pro pohyblivá a nepohyblivá zařízení pro H2H (VoIP) aplikaci a pro M2M (FTP) aplikaci. V této simulaci bylo zkoumáno, jaký vliv má definování QoS tříd na sledované parametry. Srovnání proběhlo s hodnotami, které byly zjištěny přiřazením QoS třídy BestEffort(0) pro obě aplikace a hodnotami, které byly zjištěny přiřazením QoS třídy Voice(6) pro H2H (VoIP) aplikaci. Srovnávány byly hodnoty zpoždění. Ze srovnání vyplynulo, že vliv QoS tříd je značný. Při užití vyšší třídy Voice (6) pro H2H (VoIP) aplikaci se značně snížilo zpoždění této aplikace(z 4123 ms na 780 ms), avšak u druhé aplikace se hodnoty zpoždění zhoršily kvůli prioritizovanému přenosu.

Druhá simulace viz kapitola 4.2, popisuje přenos dat v základní topologii mobilní sítě LTE, která se skládala z UE (User Equipment), eNodeB, PGW (Packet Data Network Gateway) a Remote Host (vzdálený přístup). Tato simulace popisuje základní chování sítě, avšak tato část byla nezbytná pro vytvoření 3. simulace.

Třetí simulace viz kapitola 4.3, popisuje problematiku předávání dat ze sítě Ad hoc do mobilní sítě LTE. Tato simulace vznikla kombinací předchozích dvou simulací, avšak bylo zde řešeno mnoho problémů. Hlavní problémem byla implementace dvou síťových rozhraní na jeden síťový uzel. Tento problém byl vyřešen, avšak byly zde i jiné problémy. Dalším problémem bylo zprovoznění správného předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE. Při řešení této simulace byly nalezeny problémy ohledně zjišťování zatížení eNodeB a vytvoření agregace na sběrném uzlu MTCG. Tyto dva problémy nebyly vyřešeny, avšak byly popsány návrhy jejich řešení.

Výstupem této práce je tedy vytvoření modelu sítě Ad hoc a mobilní sítě LTE, který je připraven na případné rozšíření či jeho úpravu dle požadovaných parametrů.

LITERATURA

[1] BOSWARTHICK, David, Omar ELLOUMI a Olivier HERSENT. *M2M communications: a systems approach.* Chichester, West Sussex, U.K.: Wiley, 2012, xxiii, 308 p. ISBN 978-111-9994-756.

[2] JOHNSON, Chris. *Long term evolution in bullets.* 2. ed., version 1. Northampton: Johnson, 2012. ISBN 978-147-8166-177.

[3] SAUTER, Martin. *3g, 4g and beyond: bringing networks, devices, and the web together.* 2nd ed. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley and Sons, 2013, p. cm. ISBN 978-111-8341-483.

[4] T-Mobile Czech Republic a.s. T-MOBILE. *T-Mobile - Podpora - Mapa pokrytí.* [online]. [cit. 2014-10-22]. Dostupné z: http://www.t-mobile.cz/podpora/mapa-pokryti.

[5] 3GPP Official Page. *3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT.* [online]. [cit. 2014-10-22]. Dostupné z: http://www.3gpp.org/

[6] ELMAR, 2013 *55th International Symposium.* Zadar: IEEE, 2013, 251 - 254. ISBN 9789537044145.

[7] CISCO, 2014 *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018.*

[8] MAKRIS, Prodromos, Dimitrios N. SKOUTAS, Nikolaos NOMIKOS, Demosthenes VOUYIOUKAS a Charalabos SKIANIS. *A Context-Aware Backhaul Management solution for combined H2H and M2M traffic.* 2013 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). IEEE, 2013, s. 1-5. DOI: 10.1109/CITS.2013.6705719. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6705719

[9] NS-3 Official Page. *Network Simulator 3* [online]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: www.nsnam.org/

[10] VMware Official Page. *VMware Player* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: www.vmware.com/

[11] Eclipse Official Page. *Eclipse* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: www.eclipse.org/

[12] Wireshark Official Page. *Wireshark*[online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: www.wireshark.org/

[13] Juniper Networks, Inc., 2014 *MACHINE-TO-MACHINE(M2M)-THE RISE OF THE MACHINES , 2011.*

[14] CTCC Official Page. *LENA LTE-EPC Network simulAtor.*[online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/

[15] ZEIGLER, Bernard. Theory of modeling and simulation: *Integrating discrete event and continuous complex dynamic systems.* Vyd. 2. San Diego: Academic Press, 2000, 510 s. ISBN 01-277-8455-1.

[16] RYU, Seungwan, Sei-Kwon PARK, Nam-Hoon PARK, Sam CHUNG, Hamidreza BAGHERI, Marcos KATZ, Frank H. P. FITZEK, Daniel E. LUCANI a Morten V. PEDERSEN. *Development of device-to-device(D2D) communication based new mobile proximity multimedia service business models.* 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW). 2013, s. 237-280. DOI: 10.1007/978-3-319-04963-2_9.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
CA	Carrier Aggregation
CCSA	China Communications Standards Association
CCTC	The Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
CH	Cluster Head
CoMP	Coordinated Multi Point operation
CSFB	Circuit switch fall back
CT	Core Network and Terminals
D2D	Device-to-Device
DSDV	Destination-Sequenced Distance Vector routing
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination
eMBMS	evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service
EPC	Evolved Packed Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrastrial Radio Access
FDD/TDD	Frequency-division duplexing/Time-division duplexing
GERAN	GSM/EDGE Radio Acces Network
GUI	Graphical User Interface
HeNB	Home eNodeB
H2H	Human-to-Human
HetNets	Heterogenous Networks

HSPA	High Speed Packet Acces
IDE	Integrated Development Environment
IoO	Internet Of Objects
IoT	Internet of Things
KPIs	Key Performance Indicators
LENA	LTE-EPC Network simulator
LCS	Location Services
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MTC	Machine-Type Communication
MTU	Maximum Transmission Unit
NAT	Network Address Translation
NS-3	Network Simulator 3
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
P2P	Point-to-Point
PGW	Packet Data Network Gateway
ProSe	Proximity Services
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technologies
RB	Resource block
RLC	Radio Link Control Protocol
RNC	Radio Network Controller
RNs	Relay Nodes

RNTI	Radio Network Temporary Identifier
SA	Service and System Aspects
SC-FDMA	Single-carrier frequency-division multiple access
SON	Self Organising Network
SIP	Session Initiation Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TSGs	Technical Specification Groups
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UTRAN	UMTS Terrastrial Radio Access Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE
WGs	Working Groups

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého CD **65**

A.1 Bakalářská práce-text 65

A.2 Bakalářská práce-kódy 65

A.2.1 Adhoc_cast.cc 65

A.2.2 LTE_cast.cc 65

A.2.3 Adhoc+LTE.cc 65

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Přiložené CD obsahuje několik složek a to:

- Bakalářská práce-text,
- Bakalářská práce-kódy.

A.1 Bakalářská práce-text

Ve složce Bakalářská práce-text se nachází samotný text bakalářské práce v elektronické jako `BP_josefcihal_154692.pdf`.

A.2 Bakalářská práce-kódy

Ve složce Bakalářská práce-kódy se nachází 3 soubory s definicemi simulací. Jedná se o:

- Adhoc_cast.cc,
- LTE_cast.cc,
- Adhoc+LTE.cc.

Pro ověření funkčnosti simulace musí být využita Linuxová distribuce Ubuntu 14.04 LTS, na které musí být nainstalováno vývojové prostředí Eclipse a síťový simulátor NS-3 ve verzi 3.22.

A.2.1 Adhoc_cast.cc

Soubor `Adhoc_cast.cc` obsahuje kompletní definici simulace Ad hoc sítě popsanou v kapitole 4.1 včetně komentářů.

A.2.2 LTE_cast.cc

Soubor `LTE_cast.cc` obsahuje kompletní definici simulace LTE mobilní sítě popsanou v kapitole 4.2 včetně komentářů.

A.2.3 Adhoc+LTE.cc

Soubor `Adhoc+LTE.cc` obsahuje kompletní definici simulace předávání dat z Ad hoc sítě do mobilní sítě LTE popsanou v kapitole 4.3 včetně komentářů.