

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

MODELOVÁNÍ MECHANIZMŮ VÍCENÁSOBNÉHO PŘÍSTUPU DO
MOBILNÍ SÍTĚ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK TINKA

BRNO 2014



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

MODELOVÁNÍ MECHANIZMŮ VÍCENÁSOBNÉHO PŘÍSTUPU DO MOBILNÍ SÍTĚ

MODELLING OF MECHANISMS FOR MULTIPLE ACCESS TO MOBILE NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK TINKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ HOŠEK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Zdeněk Tinka

ID: 125672

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Modelování mechanismů vícenásobného přístupu do mobilní sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci teoretické části diplomové práce bude nutné nejprve nastudovat problematiku datových přenosů v mobilních 3G a zejména 4G sítí. Dále pak bude věnována pozornost mechanismům "Mobile Data Offloading" s využitím sítí podle standardu IEEE 802.11 jako doplňkové přenosové technologie. Praktická část práce bude zaměřena na modelování datových přenosů v mobilních a bezdrátových sítích v simulačním prostředí Network Simulator, version 3 (NS-3). Cílem bude vytvořit simulační scénáře kombinující technologie IEEE 802.11 a LTE, kde se bude mobilní stanice pohybovat mezi přístupovými body těchto sítí a podle aktuální kvality spojení (měřené pomocí SNR) vybírat výhodnější technologii pro přenos svých dat. Všechny teoretické poznatky včetně simulačních výsledků budou přehledně sepsány ve formě závěrečné zprávy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GAST, M.: 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition. Sebastopol: O'Reilly Media, 2005, ISBN: 978-0596100520.
- [2] JOHNSON, C.: Long Term Evolution In Bullets, 2nd Edition. Northampton: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012, ISBN: 978-1478166177.
- [3] M2M communications: a systems approach. 1st ed. Editor David Boswarthick, Omar Elloumi, Olivier Hersent. Chichester: John Wiley, 2012, ISBN 978-1-119-99475-6.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 28.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Jiří Hošek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Diplomová práce „Modelování mechanismů vícenásobného přístupu do mobilní sítě“ se ve své první části zabývá problematikou bezdrátových sítí. V této diplomové práci je vytvořena základní topologie bezdrátové sítě standardu 802.11g, jež je využita pro simulaci klíčových identifikátorů sítě v závislosti na pohybu mobilního uzlu a vybraného způsobu řešení kolizí. V další části je vytvořena topologie mobilní sítě LTE, která podobně jako topologie bezdrátové sítě standardu 802.11g slouží k simulaci klíčových parametrů. Výstupem obou částí jsou grafy, jež jsou automaticky vygenerovány a spuštěny po dokončení simulací. V poslední části je vytvořena topologie offload mechanismů sestávající ze sítě 802.11g a sítě LTE. Výsledkem jsou implementované offload algoritmy sloužící k přepínání datového provozu na základě porovnávání klíčových parametrů obou sítí.

KLÍČOVÁ SLOVA

NS3, Network Simulator 3, Wi-Fi, 802.11g, simulace, bezdrátové prostředí, SNR, LTE, datový offloading

ABSTRACT

The diploma thesis „Mechanisms modelling of multi access into mobile wireless network“ is focusing the wireless network. The diploma thesis contains basic network topology of wireless standard 802.11g and utilizes key identifiers of mobile node in dependency on the distance and collision controlling function for simulation purposes. In the next part of this thesis is created LTE mobile network topology, which serves for finding key identifiers. In the last part is created offload topology containing both - 802.11g and LTE network. As the result are implemented offloading algorithms, which ensure data traffic switching based on comparing 802.11g and LTE key identifiers. Automatically generated and shown figures providing the key statistics are the main output of this thesis.

KEYWORDS

NS3, Network Simulator 3, Wi-Fi, 802.11g, simulation, wireless environment, SNR, LTE, traffic offload

TINKA, Zdeněk *Modelování mechanismů vícenásobného přístupu do mobilní sítě*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 80 s. Vedoucí práce byl Ing. Jiří Hošek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Modelování mechanismů vícenásobného přístupu do mobilní sítě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

(podpis autora)

Rád bych touto cestou poděkoval všem, co mi pomáhali při vypracování semestrálního projektu. Jmenovitě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Maškovi.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této diplomové 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)

OBSAH

Úvod	13
1 Typy sítí	14
1.1 Bezdrátové WLAN sítě	14
2 Bezdrátové lokální sítě podle standardu IEEE 802.11	15
2.1 Struktura bezdrátové sítě a způsoby přenášení dat	16
3 Mobilní sítě	17
3.1 Historie sítí 1G a 2G	17
3.2 UMTS sítě	17
3.2.1 Struktura UMTS sítě	18
3.3 LTE sítě	18
3.3.1 Struktura LTE sítě	19
4 Mobile data offloading	22
5 Měření v bezdrátových sítích	24
5.1 Kvalitativní parametry fyzické vrstvy	24
5.1.1 SNR	24
5.1.2 RSSI	25
5.1.3 BER	25
5.1.4 PER	25
5.2 Kvalitativní parametry vyšších vrstev systému	25
5.2.1 Přenosová rychlost	25
5.2.2 Zpoždění	26
5.2.3 Chybovost	26
6 Simulace bezdrátové sítě WiFi	27
6.1 Tvorba simulace	28
6.2 Popis zdrojového souboru bezdrátové sítě 802.11g	29
6.2.1 Topologie	29
6.2.2 Mobilita stanice	31
6.2.3 Přiřazení adresového prostoru a protokolového zásobníku	33
6.2.4 Definice aplikace	33
6.2.5 FlowMonitor	34
6.2.6 Gnuplot	35
6.3 Implementace funkcí pro výpočet SNR a propustnosti	37

6.4	Rozbor zdrojového kódu pro realizaci klíčových identifikátorů	38
7	Výsledky simulace wifi sítě a její výstupy	40
7.1	Výsledky simulace	40
7.1.1	Síla signálu	41
7.1.2	Propustnost	42
7.1.3	SNR v závislosti na zvyšující se vzdálenosti od přístupového bodu	42
7.1.4	Datový provoz	45
8	Architektura sítě LTE v simulačním prostředí NS-3	46
8.1	Aplikace LENA v simulačním prostředí NS-3	46
8.2	Návrh vlastní topologie sítě LTE	48
8.3	Funkce pro výpočet parametru SNR pro síť LTE	50
8.3.1	Tracing	50
8.3.2	Výsledky simulace bezdrátové sítě LTE a její výstupy	52
9	Topologie vícenásobného přístupu do bezdrátových sítí	57
9.1	Úvod k offload mechanismům	57
9.2	Vlastní navržená topologie vícenásobného přístupu do bezdrátových sítí	58
9.2.1	Přepínání komunikace na základě parametru SNR	60
9.2.2	Přepínání komunikace na základě propustnosti sítí	62
9.3	Výsledky simulací offload scénáře	63
9.3.1	Přepínání komunikace na základě parametru SNR	63
9.3.2	Přepínání komunikace na základě srovnání propustností sítí WiFi a LTE	64
10	Závěr	70
	Literatura	71
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	75
	Seznam příloh	77
A	Seznam zdrojových souborů a jejich výstupů	78

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Typy sítí	14
2.1	Základní topologie bezdrátové sítě	15
3.1	Struktura a klíčové elementy technologie UMTS	19
3.2	Řešení jednotlivých systémů od GSM po LTE	20
6.1	Softwarová organizace NS-3	27
6.2	Vývojové prostředí NS-3 v Eclipse	28
6.3	Topologie bezdrátové sítě WiFi	29
6.4	Jednotlivé modely pro zajištění mobility	32
6.5	Provoz zachycený pomocí Wiresharku	37
7.1	Síla signálu v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu	41
7.2	Propustnost přístupového bodu	43
7.3	Graf SNR v závislosti na čase	44
8.1	Topologie sítě LTE vytvořená prostřednictvím aplikace LENA	46
8.2	Rozvržení datové roviny a protokolového zásobníku LTE sítě v prostředí NS-3	48
8.3	Vytvořená topologie sítě LTE	49
8.4	Hodnoty parametru SNR se vzrůstající vzdáleností od eNB při šířce pásma 15 RB	53
8.5	Hodnoty propustnosti se vzrůstající vzdáleností od eNB při šířce pásma 15 RB	54
8.6	Hodnoty parametru SNR se vzrůstající vzdáleností od eNB při šířce pásma 25 RB	55
8.7	Hodnoty propustnosti se vzrůstající vzdáleností od eNB při šířce pásma 25 RB	56
9.1	Topologie a rozmístění offload scénáře	58
9.2	Vývojový diagram funkce pro přepínání mezi sítěmi Lte a WiFi na základě SNR	61
9.3	Vývojový diagram funkce pro přepínání mezi sítěmi Lte a WiFi na základě propustnosti	62
9.4	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 15 RB, přepínání SNR	64
9.5	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 15 RB, přepínání SNR	65
9.6	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 25 RB, přepínání SNR	65
9.7	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 25 RB, přepínání SNR	66

9.8	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 15 RB, přepínání propustnost	67
9.9	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 15 RB, přepínání propustnost	67
9.10	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 25 RB, přepínání propustnost	68
9.11	Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 25 RB, přepínání propustnost	69

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled standartů 802.11	16
3.1	Souhrnné srovnání technologií pro datové přenosy v mobilních sítích .	21
9.1	Adresy jednotlivých síťových uzlů	59
A.1	Seznam souborů jednotlivých scénářů včetně jejich výstupů	79
A.2	Seznam souborů offload scénáře včetně jejich výstupů	80

ÚVOD

Celulární mobilní sítě jsou v současnosti často přetěžovány množstvím mobilního datového provozu. Důvodem tohoto přetěžování je rapidní nárůst předplacených mobilních služeb obsahujících datová připojení a také vzrůstající počet aplikací pro chytré telefony, jež ke své funkčnosti vyžadují on-line připojení k datovým službám. Jedním z řešení odstraňujícím problém přehlcenosti mobilních sítí je přesměrování mobilní datové zátěže na bezdrátové sítě WiFi, v případě jejich dostupnosti. Přenesením datové zátěže z primárních přístupových technologií mobilních sítí do infrastruktur sítí WiFi lze získat speciální datovou kapacitu a vylepšit celkovou výkonnost mobilních sítí.

Tato diplomová práce se zaměřuje na analyzování a zpracování kvalitativních parametrů bezdrátové sítě 802.11g a LTE v simulačním prostředí *NS-3* (Network Simulator 3). Mezi analyzované parametry se řadí zejména propustnost, odstup signál šum (SNR) a také síla signálu, vše v závislosti na čase a vzdálenosti.

Po prostudování teoretické části bude v simulačním prostředí NS-3 sestaven návrh topologií bezdrátových sítí 802.11g a LTE. Následně budou analyzovány jednotlivé kvalitativní parametry obou sítí. Na základě výsledků bude vytvořena topologie offload mechanismů, ve kterém budou implementovány dvě metody přepínání provozu mezi 802.11g a LTE sítí – na základě parametru SNR a kontinuálním srovnáváním propustností obou sítí.

1 TYPY SÍTÍ

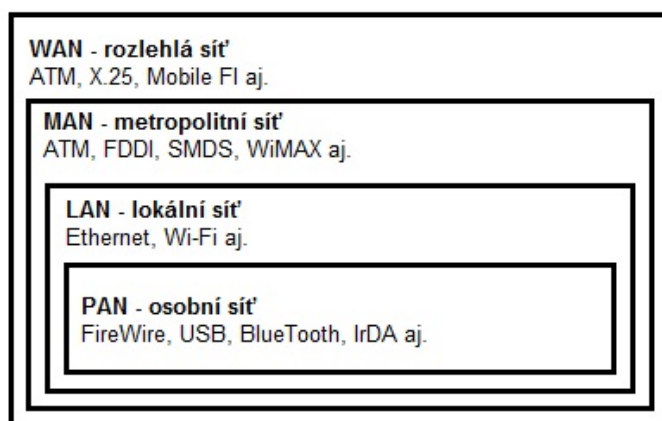
Počítačové sítě jsou rozlišovány na základě počtu propojených zařízení a velikosti území, na kterém jsou rozloženy. Základní rozdělení sítí je následující: [27]

WAN (Wide Area Network) - pokrývá velká území o rozloze desítek až stovek kilometrů a umožňují tak propojení různých národních, metropolitních nebo regionálních sítí. Typickým příkladem sítě WAN je Internet.

MAN (Metropolitan Area Network) - je rozsáhlé území, které slouží k propojení celého města.

LAN (Local Area Network) - je síť propojující menší (lokální) fyzické oblasti jako domy, kanceláře, skupiny budov atd. V současné době jsou velmi rozšířeny bezdrátové lokální sítě WLAN (Wireless Local Area Network).

PAN (Personal Area Networks) - je síť propojující komunikační zařízení jako mobily, počítače aj. na velmi malé vzdálenosti v řádech metrů. Charakteristické rozdělení sítí včetně nejpoužívanějších komunikačních technologií je uvedeno v 1.1.



Obr. 1.1: Typy sítí

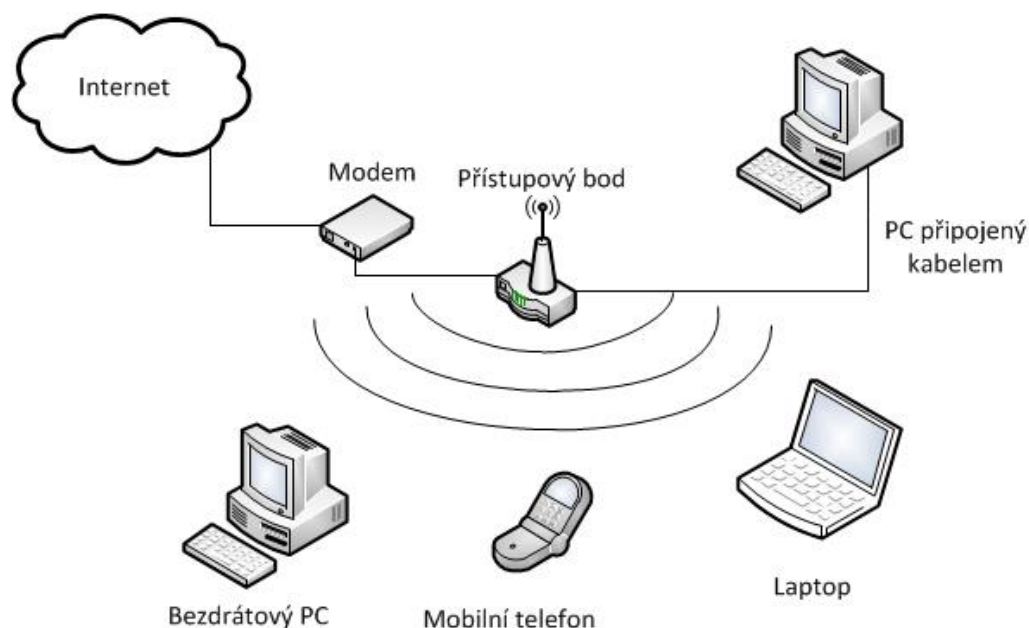
1.1 Bezdrátové WLAN sítě

Bezdrátové lokální sítě jsou oblíbené zejména svou jednoduchostí sestavení. Poskytují prostředky pro vícenásobné a sdílení jednoho média na malých plochách. Nejčastěji jsou WLAN sítě využívány v domácnostech, kancelářích nebo malých firmách bez nutnosti fyzického propojení zařízení se směrovačem pomocí kabeláže.

2 BEZDRÁTOVÉ LOKÁLNÍ SÍTĚ PODLE STANDARDU IEEE 802.11

Pojem bezdrátové lokální sítě (WLAN - Wireless Local Area Networks) je v informatice označení pro několik standardů IEEE 802.11 popisujících bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích. Tato technologie nejčastěji využívá bezlicenčního frekvenčního pásma, proto je ideální pro sestavení levné a výkonné sítě bez nutnosti využití kabeláže.

Komunikační model standardu 802.11 popisuje obrázek 2.1. Základem je bezdrátový přístupový bod (tzv. access point), jenž umožňuje připojení koncových stanic k Internetu. Koncové stanice mohou disponovat bezdrátovým adaptérem. V takovém případě lze dané zařízení připojit k přístupovému bodu prostřednictvím bezdrátové sítě. Adaptéry slouží k vyhledávání širokopásmových signálů, jež vysílají přístupové body. Tyto signály slouží jako prostředek pro identifikaci konkrétních bezdrátových sítí a k připojení ke konkrétnímu přístupovému bodu. Mezi zařízení, jež mohou obsahovat bezdrátové adaptéry, patří např. laptopy, mobilní telefony, PDA, tablety, stolní počítače apod.



Obr. 2.1: Základní topologie bezdrátové sítě

2.1 Struktura bezdrátové sítě a způsoby přenášení dat

V současné době lze pro připojení do bezdrátových sítí využít celou řadu zařízení. Pro jejich kompatibilitu při vzájemné komunikaci bylo vytvořeno množství mezinárodních standardů, jež jsou souhrnně publikovány jako standard 802.11. Provoz ve WLAN sítích je dosažen prostřednictvím frekvenčního pásma 2,4 a 5 GHz. Přehled WLAN standardů zobrazuje tabulka 2.1 [1].

Tab. 2.1: Přehled standartů 802.11

Standard	Pásmo [GHz]	Max. rychlost [Mbit/s]	Dosah signálu [m]	Přenos signálu na fyzické vrstvě
Původní IEEE	2,4	2	~35	DSSS
IEEE 802.11a	5	54	~25	OFDM
IEEE 802.11b	2,4	11	~35	DSSS
IEEE 802.11g	2,4	54	~25+	OFDM
IEEE 802.11n	2,4 nebo 5	600	~50	OFDM,MIMO

Klíčovou roli ve všech typech WLAN sítí hraje tzv. identifikátor SSID (Service Set Identifier), což je řetězec až 32 ASCII znaků, kterým jsou jednotlivé sítě jednoznačně odlišeny. SSID identifikátor je v pravidelných intervalech vysílán všemi směry. Stanice daný identifikátor využívají pro připojení do dané sítě.

3 MOBILNÍ SÍTĚ

3.1 Historie sítí 1G a 2G

Historický vývoj mobilních sítí byl započat roku 1857 Clarkem Maxwellem, který sepsal teorii o možném přenosu signálu prostřednictvím elektromagnetického záření [17]. Tato teorie vedla k sestavení prvního rádiového vysílače v roce 1901. První předchůdce mobilního telefonu byl vynalezen až v roce 1940 ve Spojených státech amerických a posléze v Evropě v roce 1950. Tyto telefony však byly limitovány svou váhou a také vysokou cenou.

Za opravdu první generaci mobilních sítí se dají považovat tzv. 1G sítě. Tyto sítě umožnily mobilní telefonování. Mobilita však byla omezena pouze na určitá území, protože sítě byly budovány jako národní. Nejznámější standardy 1G sítí byly AMPS (Advanced Mobile Phone System), TACS (Total Access Communication Systems) a NMT (Nordic Mobile Telephone).

V roce 1990 byly zavedeny tzv. 2G sítě, konkrétně se jednalo o síť GSM (Global System for Mobile communications) operující na frekvenci 900 MHz. GSM umožňovala přenos řeči a dat (9,6 kbit/s) s přístupem do sítí PSTN a ISDN. Operátoři 2G sítě také zavedli první přídatné služby jako fax, paging, posílání textových zpráv aj. Byl také zaveden první datový přenos pomocí služeb WAP, HSCSD a také MLS. Následoval vývoj sítě GPRS (Global Packet Radio Service), jež se označuje jako meziskok mezi 2G a 3G sítěmi a označuje se 2,5G síť [25]. GPRS je paketová služba, jež umožňuje připojení k Internetu, případně k jiným sítím, pro uživatele GSM mobilních telefonů. Teoretická rychlost paketových přenosů pomocí technologie GPRS dosahuje až 171,2 kbit/s. Poskytuje tak uživatelům rozhraní pro doručení dat (zejména obrázkových) zapouzdřením do paketů. Vzhledem k masivnímu růstu Internetu vzrostla důležitost paketových přenosů a byla tak vytvořena technologie EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), jež využívala odlišné mechanismy pro modulaci dat. Technologie EDGE přinesla zvýšení přenosové rychlosti až na hodnotu 384 kbit/s.

3.2 UMTS síť

Síť UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) byla navržena jako nástupce sítí 2. generace a označuje se jako 3G síť [24]. Je založena na technologii GSM. UMTS kombinuje širokopásmovou přístupovou metodu k médiu (W-CDMA) spolu s technologií TDMA (Time Division Multiplex Access). Maximální reálná přenosová rychlost se u uživatelů pohybuje v rozmezí 2-8 Mbit/s. Vzhledem k obsáhlému

tématu nejsou UMTS sítě v rámci této práce rozepsány do hloubky.

3.2.1 Struktura UMTS sítě

Základní struktura UMTS sítě se dělí následovně (viz obrázek 3.1 [13]).

- UE (User Equipment) - uživatelská stanice,
- UTRAN, GERAN - obecná rádiová přístupová síť,
- CN (Core Network) - jádro sítě.

UE je uživatelská stanice (mobilní telefon či terminál) schopný přistupovat k UMTS síti. Často je její název přebírán z GSM standardů Mobile Terminal (MT) nebo Mobile Station.

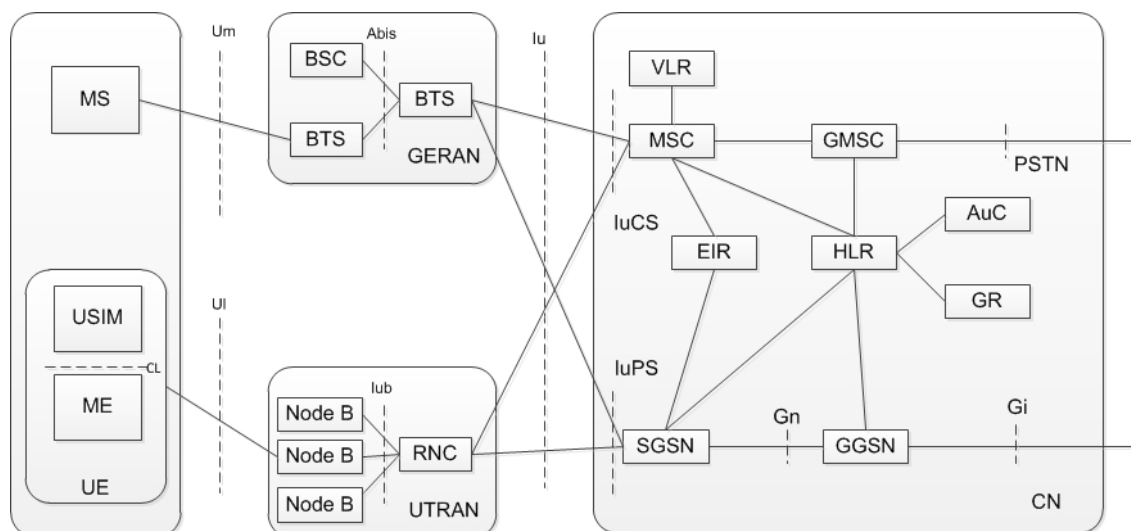
UTRAN/GERAN je obecná rádiová přístupová síť. Uživatelské stanice komunikují s rádiovou přístupovou sítí (RAN - Radio Access Network). Může se jednat o nově vybudovanou síť s mnohonásobným přístupem W-CDMA na kmitočtech 1900-2200 MHz označovanou UTRAN. (UMTS Terrestrial Radio Access Network) nebo o standardní GSM rádiovou síť na kmitočtech 900 nebo 1800 MHz nazývanou GERAN (GSM EDGE Radio Access Network). Standard GERAN sestává z BTS (Base Transceiver Station) a BSC (Base Station Controller). Standard UTRAN sestává ze základnových stanic označovaných jako Node B (Base). Jedná se o ekvivalent pojmu BTS v GSM sítích a RNC (Radio Network Controller), tedy ovladače rádiové sítě. RNC je tak ekvivalentem BSC v GSM sítích.

CN (Core Network - jádro sítě) je vnímán jako soubor služeb poskytovaných UMTS sítí a rozhraní k ostatním službám, do nichž může uživatel sítě přistupovat. Především se jedná o přístup do jiných telefonních sítí nebo například do Internetu. Jádro sítě je rozděleno do tzv. domén, podle použité metody přepojování. Jádro sítě je tak rozděleno do dvou následujících metod přepojování:

- Okruhově spínaná doména (CS) - používá se pro přepojování okruhů k přenosu telefonních hovorů.
- Paketově spínaná doména (PS) - používá se pro přepojování paketů k přenosu dat (GPRS, EGPRS, HSPA) a SMS.

3.3 LTE síť

LTE (Long Term Evolution) je nejmodernější telekomunikační architektura definovaná prostřednictvím 3GPP generace (Generation Partnership Project) [23]. LTE následuje standardy GSM/GPRS/EDGE, jež jsou označovány jako druhá generace systémů (2G) a standardy HSPA/UMTS, jež jsou označovány jako třetí generace systémů (3G). Jednotlivé standardy jsou od sebe odlišeny jak svým bezdrátovým rozhraním, tak jádrem celé sítě.



Obr. 3.1: Struktura a klíčové elementy technologie UMTS

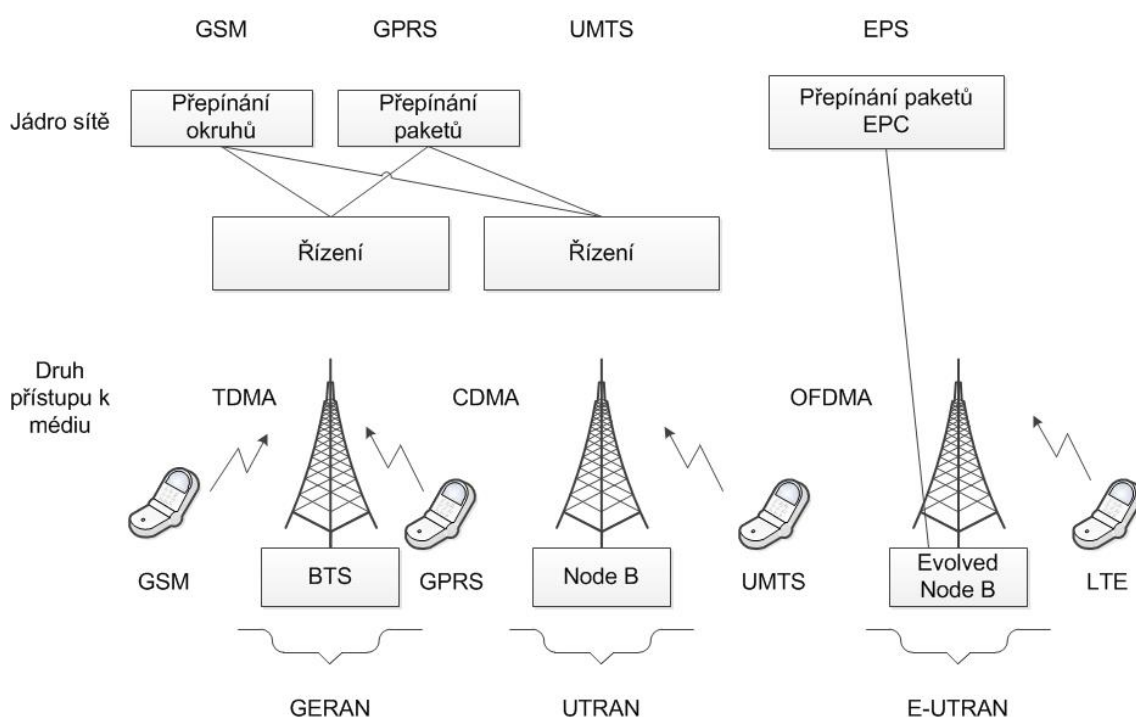
3.3.1 Struktura LTE sítě

Před zahájením popisu samotné struktury sítě LTE jsou pro ucelenější představu zopakovány technologie GSM, GPRS a UMTS, jež do značné míry umožnily vytvoření sítě LTE [14].

Systém GSM byl vyvinut z primárního důvodu podpory služeb v reálném čase, tedy telefonování, které pro svou optimalizaci vyžadovaly sestavení spojení přepínáním datových okruhů. Prvním krokem k vývoji paketové sítě pro přenos digitálních dat byl rozvoj sítě GSM a vytvoření systému GPRS, jenž využíval stejně jako systém GSM přístup k médiu TDMA (na obrázku 4 vlevo dole). K dosažení vyšších přenosových rychlostí byl následně vyvinut již zmíněný systém UMTS, jenž na rozdíl od předchozích sítí disponoval přístupem k médiu CDMA (Code Division Multiple Access). Systém UMTS (uprostřed na obrázku 3.2) již disponuje zvlášť rozhraním pro služby v reálném čase (rozhraní pro spínání okruhů) a zvlášť pro datové služby (rozhraní pro paketové spínání). Systém UMTS využívá dynamického přidělování IP adresy, kdy v okamžiku sestavení datového spojení je UE IP adresa přidělena a v okamžiku rozpojení služby je zase IP adresa odebrána.

EPS (Evolved Packet System) je technologie založená na protokolu IP. Služby sestavované v reálném čase a taktéž datové služby využívají protokol IP. IP adresa je zařízení UE přidělena ihned po zapnutí zařízení, po jeho vypnutí ji systém následně odebere. Přístup zařízení do systému LTE je řešen prostřednictvím přístupu OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplex Access), jehož využitím lze využívat mnohem vyšších přenosových rychlostí, než v předchozích sítích. Nejvyšší teoretická přenosová rychlost v uplinku tak činí až 170 Mbit/s, při využití technolo-

gie MIMO (Multiple Input, Multiple Output) lze v downlinku dosahovat rychlosti až 300 Mbit/s. Jádru sítě (tzv. EPC) poskytuje podporu přístupu nejenom do systému EPS, ale také do systémů WiMAX a bezdrátových systémů 802.11. Systém LTE je sestaven základnovými stanicemi (tzv. eNB - Evolved Node B), jež tvoří základní strukturu systému. Jednotlivé základnové stanice eNB jsou mezi sebou vzájemně propojeny rozhraním X2 a v případě eNB, jež jsou připojeny k jádru systému EPS, se propojovací rozhraní nazývá S1. Důvodem přesunu odpovědnosti řízení z řídicích center na samotné základnové stanice eNB bylo umožnění vyšších přenosových rychlostí a snížení času potřebného pro handover (přepojení zařízení UE z jednoho eNB do druhého).



Obr. 3.2: Řešení jednotlivých systémů od GSM po LTE

V tabulce 3.1 je znázorněno srovnání maximálních přenosových rychlostí v jednotlivých generacích mobilních bezdrátových sítí [9].

Tab. 3.1: Souhrnné srovnání technologií pro datové přenosy v mobilních sítích

Generace	Sítě	Rychlost dat
1G	AMPS, NMT, TACS	5 - 9 kbit/s
2G	GSM, GPRS, EDGE	9,6 - 64 kbit/s
3G	UMTS, HSDPA, HSUPA, HSPA+	2 - 73,5 Mbit/s
4G	LTE, Advanced LTE	100 Mbit/s <

4 MOBILE DATA OFFLOADING

Mobile data offloading je anglický pojem, jenž v češtině reprezentuje různé způsoby rozložení datové zátěže v mobilních bezdrátových sítích. V současnosti se na trhu s bezdrátovými zařízeními vyskytuje velké množství různých přístrojů, jako např. mobily, tablety atd. V souvislosti s množstvím daných přístrojů je evidován enormní nárůst objemu přenesených dat v 3G a zejména v 4G systémech. Je běžné, že meziroční nárůst přenesených dat dosahuje až desetinásobek hodnoty z předešlého roku. Otázka rozložení zátěže bude vzhledem k velkému nárůstu dat v mobilních bezdrátových sítích hrát do budoucna významnou roli.

Mezi obecná řešení zabývající se rozkladem zátěže v mobilních bezdrátových sítích se řadí např. následující:

- direct tunneling (přímé tunelování) prostřednictvím uzlu SGSN (Serving GPRS Support Node),
- gateway offloading (rozložení zátěže na brány sítě),
- traffic policing/shaping-based offloading (rozložení zátěže založené na řízení/tvarování provozu),
- rozložení za pomoci bezdrátových standardů 802.11 (WiFi offloading).

V praxi patří mezi nejznámějšího offloadingová řešení např. systém 3W, jež byl vyvinutý společností KT Corporation. Daný systém je tvořen propojením sítí WCDMA, 802.11 a WiBro (odvozená od sítě WiMAX).

Direct tunneling umožňuje uzlu SGSN sestavení přímého spojení (tzv. tunelu) mezi RNC (Radio Network Controller) a bránou GPRS (GGSN). Prostřednictvím daného spojení lze vynechat z přenosové cesty uzel SGSN a snížit tak zátěž, která je na tento uzel běžně kladena. Signalizace o provozním zatížení je však nadále řízena uzlem SGSN. [7]

Gateway offloading byl vytvořen v návaznosti na metodě direct tunnelingu. Tato metoda využívá k rozložení zátěže bránu (offloading gateway), jež je vložena mezi RNC a SGSN. Brána monitoruje datový provoz mobilních aplikací a rozlišuje, zda je žádáno připojení k Internetu anebo pouze služby poskytované operátorem. Pokud je žádána služba poskytovaná operátorem, brána nedělá nic. Pokud je pro provoz aplikace vyžadováno připojení k internetu, brána zajistí vynechání uzlů SGSN a GGSN ze sestaveného spojení, což vede ke snížení provozní zátěže a směrování provozu k nejbližšímu internetovému peeringovému uzlu.

Traffic policing/shaping-based offloading využívá hloubkové kontroly paketů (DPI - Deep Packet Inspection) jež udává, kteří operátoři mohou kontrolovat pakety datového provozu. Kontrolou se zjišťuje třída provozu, na jejímž základě je následně přiřazena řada přednastavených datových operací (např. komprese dat, cachování obsahu apod.).

WiFi offloading slouží ke snížení zátěže spektra 3G sítí využitím alternativní sítě 802.11 (WiFi) pro přenos dat. V případě, že se např. mobilní telefon vyskytuje v lokalitě s přístupem k některé z bezdrátových sítí 802.11, umožňuje výchozí nastavení telefonu preferovat připojení k této síti namísto některé z mobilních bezdrátových sítí (3G, 4G).

5 MĚŘENÍ V BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍCH

Tématika měření veličin v bezdrátových sítích byla zahájena v důsledku nutnosti porozumění jistým vlivům na výsledné chování bezdrátových sítí. Tyto vlivy byly zkoumány také s ohledem na QoS (Quality of Service - termín pro rezervaci a řízení datových toků v telekomunikačních sítích) a způsoby rozdělení frekvenčních pásem v 802.11, 3G a 4G sítích. Měření parametrů je rozdělováno pomocí vrstevnatého modelu, kde jsou jednotlivé vrstvy nezávislé a snadno reprezentovatelné. V dalším textu bude měření kvalitativních parametrů bezdrátových sítí rozděleno na parametry fyzické vrstvy a parametry vyšších vrstev systému [8].

5.1 Kvalitativní parametry fyzické vrstvy

Měření kvalitativních parametrů na fyzické vrstvě je obvykle prováděno přímo anebo nepřímo. Přímá metoda využívá pro zjištění definovaných parametrů nějakého zařízení, nejčastěji prostřednictvím spektrálního analyzátoru, či jiných ekvivalentních analyzátorů spektra a modulací. Měření nepřímou metodou probíhá automaticky prostřednictvím samotných síťových prvků. Nejčastěji měřené parametry mohou být např. SNR (Signal to Noise Ratio - poměr signál šum), RSSI (Received Signal Strength Indication - síla přijímaného signálu) a také BER (Bit Error Rate - bitová chybovost) a PER (Packet Error Rate - paketová chybovost). V dalším textu jsou tyto parametry hlouběji rozvedeny.

5.1.1 SNR

Parametr SNR je definován jako výkonový poměr mezi užitečným signálem (smysluplnou informací) a šumu na pozadí komunikačního kanálu (nechtěný signál)

$$SNR = \frac{Sila_uzitecneho_signalu}{Sila_sumu} \quad (5.1)$$

Poněvadž mohou mít různé signály různě široký dynamický rozsah mezi nejvyšší a nejnižší velikostí síly, je funkce SNR často prezentována v logaritmickém měřítku. Funkce SNR je v takovém případě definována následovně.

$$SNR = Sila_uzitecneho_signalu - Sila_sumu[dB] \quad (5.2)$$

Obě měřené veličiny musí být měřeny ve stejném bodě v síti. [8]

5.1.2 RSSI

RSSI je míra, jež reprezentuje úroveň přijímaného rádiového signálu a jedná se o standardní automaticky měřenou hodnotu. RSSI je indikátorem síly přijímaného signálu v bezdrátovém prostředí, jež je získána prostřednictvím antény. Získaná hodnota signálu závisí na použité frekvenci pásma, na vzdálenosti od vysílače, výkonu vysílače a také zisku antény. Čím vyšší je výsledná hodnota přijatého signálu, tím kvalitnější a silnější signál je. [8]

5.1.3 BER

V digitální tématice značí bitová chybovost počet přijatých bitů datového proudu protékajícího komunikačním kanálem. Bitová chybovost může být způsobena šumem, přeslechy na komunikačních médiích, zkreslením anebo chybami bitové synchronizace.

Bitová chybovost značí poměr mezi počtem chybných bitů a celkovým objemem bitů, jež byly vysílačem poslány během určitého studovaného intervalu, a vyjadřuje se v procentech. [8]

5.1.4 PER

Vzorec pro Packet Error Rate je založen na podobném principu jako vzorec pro Bit Error Rate. PER je počet nesprávně přijatých paketů dělený celkovým počtem přijatých paketů. Paket je označen jako nesprávně přijatý tehdy, pokud je alespoň jeden bit z daného paketu chybný. [8]

5.2 Kvalitativní parametry vyšších vrstev systému

Měření parametrů vyšších vrstev systému je zajišťováno prostřednictvím měřících aplikací na vyšších vrstvách vrstevového modelu ISO/OSI. Výsledné hodnoty jsou většinou dostupné přes různá konfigurační rozhraní (terminál, HTTP stránky) nebo prostřednictvím dohledových protokolů (SNMP). Mezi základní měřené parametry vyšších vrstev se řadí zejména aktuální přenosová rychlost, zpoždění, chybovost vyšších vrstev apod. Naměřené údaje jsou většinou průměrné hodnoty za určitý časový úsek.

5.2.1 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost vyjadřuje počet dopravených nebo zpracovaných bitů za určitou časovou jednotku. Přenosová rychlost je nejčastěji kvantifikována použitím veličiny

bit za sekundu (bit/s nebo bps - bit per second), často také prostřednictvím desetinných prefixů - kilobit per second, megabit per second, gigabit per second apod.

5.2.2 Zpoždění

Zpoždění v telekomunikačních sítích je měřena buď jednocestně (je sledován čas od momentu vyslání paketu ze zdroje do momentu přijmutí paketu v cíli) nebo okružní (čas jednocestného zpoždění od zdroje do cíle spolu s časem jednocestného zpoždění z cíle do zdroje).

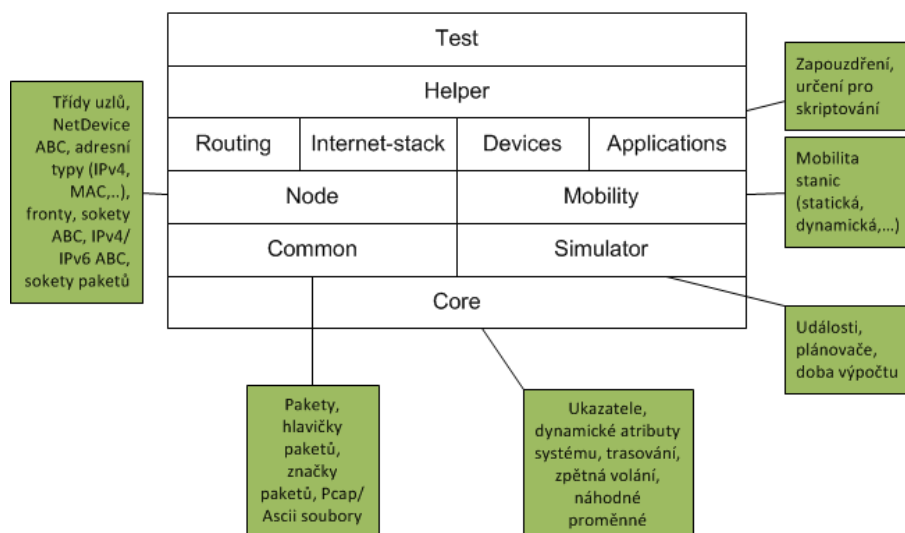
5.2.3 Chybovost

Chybovost je v tomto případě měřena ve stejných veličinách jako v případě kapitoly 5.1.3. Rozdíl je ve vrstvě měření chybných bitů, kdy je tato hodnota většinou získávána prostřednictvím aplikací na vyšších vrstvách.

6 SIMULACE BEZDRÁTOVÉ SÍTĚ WIFI

Prostředí NS-3 (*Network Simulator*) je tzv. „discrete-event“ síťový simulátor různých internetových systémů, jenž je primárně určený výzkumné a akademické účely [16]. NS-3 je volně dostupný software licencovaný pod hlavičkou GNU GPLv2.

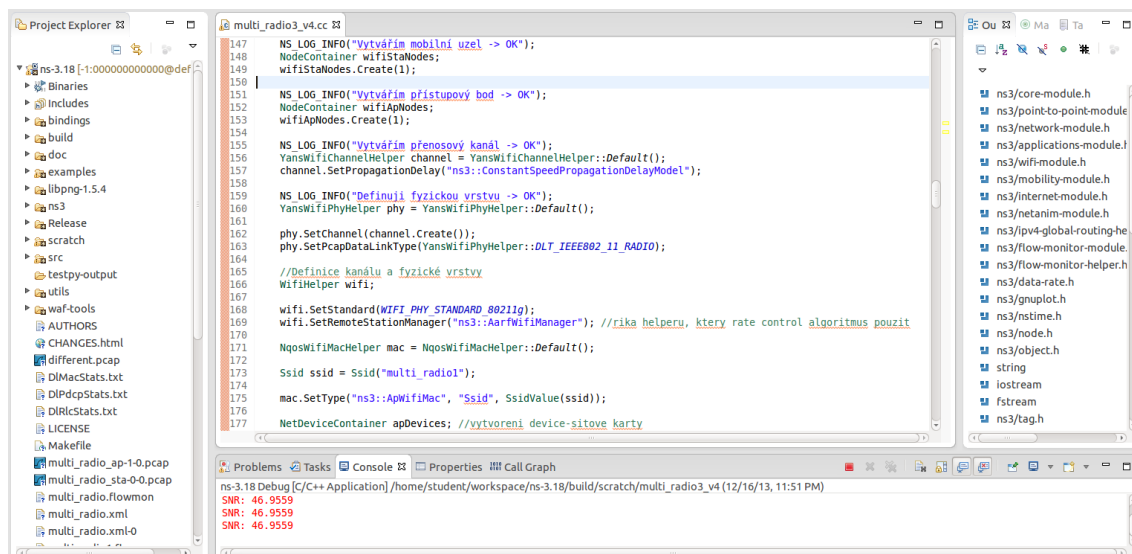
Zdrojový kód pro NS-3 je nejčastěji uložen ve složce *src*. Softwarová organizace zdrojového kódu je popsána prostřednictvím obrázku 6.1. Jádru simulátoru je umístěno ve složce *src/core* a obsahuje komponenty nutné pro vytvoření funkční topologie sítě. Mezi nejdůležitější části jádra se řadí zejména protokoly, hardware a síťových modelů (WiFi, LTE, CMDA aj.). Základní prostředek pro vytvoření datového proudu je paket. Zdrojový kód objektů typu Paket lze nalézt ve složce *src/network*. Zmíněné dva simulační moduly tvoří základní prostředky pro realizaci simulací v různých typech sítí, nejenom v sítích internetových.



Obr. 6.1: Softwarová organizace NS-3

V NS-3 jsou simulační jádro a modely realizovány v programovacím jazyku C++. NS-3 pro svou činnost využívá C++ knihoven, jež mohou být propojeny s hlavním programem staticky nebo dynamicky. Vytvořený program tak definuje simulační topologii sítě (WiFi, LTE apod.), její parametry a způsob simulace. Knihovna NS-3 je zabalena do Pythonu pomocí knihovny pybindgen, která převede parsováním záhlaví z NS-3 C++ do gccxml. Pygccxml automaticky vygeneruje odpovídající C++. Tyto automaticky vygenerované C++ soubory jsou sestaveny do finálního modulu NS-3 Python, který umožňuje pracovat s C++ NS-3 modely a jádrem pomocí skriptů v jazyce Python. Obrázek 6.2 ilustruje prostředí NS-3 ve vývojovém nástroji Eclipse.

Na obrázku lze vidět jak část vytvořeného zdrojového kódu (největší část obrázku), tak běžící simulaci (červená část úplně dole).



Obr. 6.2: Vývojové prostředí NS-3 v Eclipse

Obecný postup pro vytvoření simulace lze rozdělit do několika kroků: [11]

- definice topologie,
- použití modelu,
- konfigurace uzlů a linek,
- překlad,
- analýza výkonnosti,
- vizualizace.

V následujících kapitolách bude rozebrán postup vytvoření simulačního programu v simulačním prostředí NS-3.

6.1 Tvorba simulace

V této kapitole je podrobně rozveden popis simulace vytvořené v prostředí NS-3. Cílem této části bylo vytvoření topologie WiFi sítě pro získání údajů o jejích základních parametrech – SNR, síly signálu a propustnosti. Prvním úkolem bylo vytvoření zdrojového kódu pro výpočet propustnosti sítě se zvyšující se vzdáleností uzlu od přístupového bodu. Dalším úkolem bylo vytvoření zdrojového kódu pro SNR (Signal to Noise Ratio), jež by umožňovala výpočet její hodnoty v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu.

Nejprve bylo nutné nastavit základní topologii sítě. Rozbor odpovídajícího kódu je uveden v kapitole 6.2. Následující kapitoly navazují na první a zabývají se způsobem implementace požadovaných identifikátorů sítě do simulačního prostředí. Kapitola 6.4 se zabývá již samotným rozбором vytvořeného zdrojového kódu.

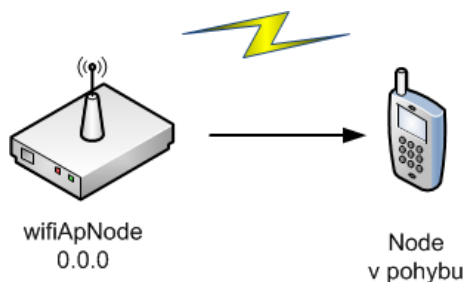
6.2 Popis zdrojového souboru bezdrátové sítě 802.11g

Prostředí NS-3 umožňuje řadu simulací a měření různých identifikátorů uvnitř různých druhů sítě. V rámci této kapitoly je upřesněn a rozebrán zdrojový kód vytvářející základní topologii, mobilitu a datový provoz.

V následujících šesti kapitolách uveden pouze popis jednotlivých částí kódu.

6.2.1 Topologie

Ve vytvořené bezdrátové síti byly vytvořeny dva uzly – přístupový bod a jeden mobilní uzel, viz obrázek 6.3. Vytvoření těchto objektů zajišťuje třída `NodeContainer`, jež se chová jako *Helper*.



Obr. 6.3: Topologie bezdrátové sítě WiFi

```
//Vytvoření mobilních uzlů
//Uzel wifiStaNodes je objekt třídy NodeContainer
NS_LOG_INFO("Vytvářím mobilní uzel -> OK");
NodeContainer wifiStaNodes;
wifiStaNodes.Create (1);

NS_LOG_INFO("Vytvářím přístupový bod -> OK");
NodeContainer wifiApNodes;
wifiApNodes.Create (1);
```

Prostředí NS-3 obsahuje množství tzv. Topology Helpers, které slouží k usnadnění často prováděných operací v rámci sestavování topologie. Mezi takové helpers

se řadí např. WifiHelper pro vytvoření přenosového kanálu, YansWifiPhyHelper pro vytvoření virtuální fyzické vrstvy aj. V další části kódu jsou dané objekty využity.

```
//Definice kanálu a fyzické vrstvy
NS_LOG_INFO("Definuji fyzickou vrstvu -> OK");
YansWifiPhyHelper phy = YansWifiPhyHelper::Default ();

NS_LOG_INFO("Vytvářím přenosový kanál -> OK");
YansWifiChannelHelper channel = YansWifiChannelHelper::Default ();
phy.SetChannel(channel.Create());
```

V tento moment jsou již vytvořeny uzly, fyzická vrstva i přenosový kanál. Přiřazením metody SetRemoteStationManager objektu wifi a nastavením jeho parametrů lze zvolit "rate control" algoritmus, tedy algoritmus řízení datového toku neboli propustnosti.

Na základě tohoto přístupu jsou tedy následně přiřazeny příslušné vlastnosti a parametry bezdrátové sítě. K přiřazení daných vlastností je využita třída WifiHelper. Jak je vidět z následujícího zdrojového kódu, prostředí NS-3 implementuje 10 různých kontrolních algoritmů. Výchozí "control rate" algoritmus v prostředí NS-3 je tzv. Arf mechanismus. Pro potřeby této práce je však nastaven Aarf algoritmus, jež vykazuje optimálnější výsledky.

```
wifi.SetStandard(WIFI_PHY_STANDARD_80211g);
//-----Algoritmy implementovane v realnych zarizenich-----
//rika helperu, ktery rate control algoritmus pouzit
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ArfWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::OnoeWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::ConstantRateWifiManager",
//                               "DataMode", StringValue
//                               ("ErpOfdmRate54Mbps"), " ControlMode", StringValue ("DsssRate1Mbps"));
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::MinstrelWifiManager");

//-----Algoritmy popsane v literature-----
wifi.SetRemoteStationManager("ns3::AarfWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::IdealWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::AmrrWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::CaraWifiManager");
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::RraaWifiManager",
//                               "ewndFor54mbps", UIntegerValue (40));
//wifi.SetRemoteStationManager("ns3::AarfcdfWifiManager");
```

Kvalita služeb QoS (Quality of Service) je zajišťována prostřednictvím třídy QosWifiManager. V případě této práce však bylo využito služeb bez QoS. Pro dosažení simulace bez QoS byla implementována třída NqosWifiMacHelper. Bylo také nutné přiřadit SSID přístupovému bodu a také oběma uzlům oznámit, že bude využita simulace bez parametrů QoS.

```
NqosWifiMacHelper mac = NqosWifiMacHelper::Default();
Ssid ssid = Ssid ("multi_radio1");

mac.SetType ("ns3::ApWifiMac", "Ssid", SsidValue (ssid));
NetDeviceContainer apDevices;
apDevices = wifi.Install (phy, mac, wifiApNodes);
mac.SetType ("ns3::StaWifiMac", "Ssid", SsidValue (ssid),
"ActiveProbing", BooleanValue (false));
NetDeviceContainer staDevices;
staDevices = wifi.Install (phy, mac, wifiStaNodes);
```

Definovanými řádky bylo přiřazení potřebných vlastností realizováno a mobilní uzel byl přiřazen přístupovému bodu s patřičnými parametry.

6.2.2 Mobilita stanice

Pohyb mobilního uzlu v bezdrátové síti je ve většině případů zajištěn prostřednictvím třídy MobilityModel. Pro zajištění mobility definuje prostředí NS-3 hned několik modelů, jež umožňují různé způsoby pohybu mobilních stanic. Jednotlivé modely jsou zobrazeny na obrázku 6.4. Pro správné využití třídy ns3::MobilityModel je nutné do zdrojového kódu přidat hlavičkový soubor `#include "ns3/mobility-module.h"`.

V případě realizovaného kódu však byl definován vlastní způsob pohybu využitím procedury `AdvancePosition (Ptr<Node> node, Vector vel)`. Tato procedura definuje pouze pohyb mobilního uzlu v ose X, a to o 1,5 metru za jednu sekundu.

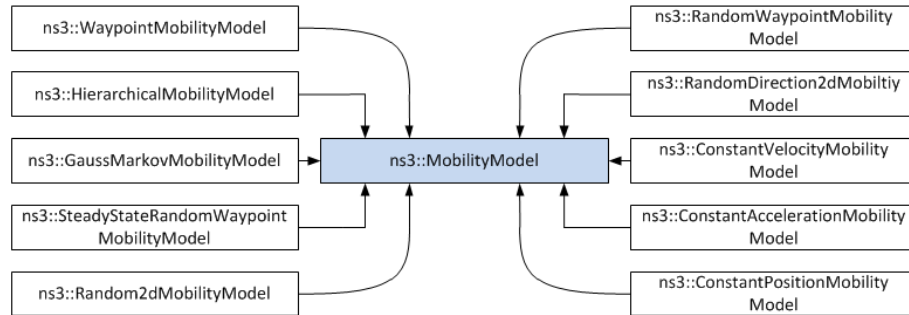
```
static void AdvancePosition (Ptr<Node> node)
{
    Vector pos = GetPosition (node);
    pos.x += 1.5;
    if (pos.x >= 1000.0)
    {
        return;
    }
    SetPosition (node, pos);

    if (g_verbose)
```

```

{
    std::cout << "x=" << pos.x << std::endl;
}
Simulator::Schedule (Seconds (1.0), &AdvancePosition, node);
}

```



Obr. 6.4: Jednotlivé modely pro zajištění mobility

Byly také nastaveny inicializační polohy obou uzlů. Pro přístupový bod byla počáteční hodnota nastavena na 0,0,0 (byl využit 3d vektor, reálně se ale pracuje s 2d – tedy X a Y osa), mobilní uzel byl umístěn jeden metr od přístupového bodu v ose X.

```

MobilityHelper mobility;

NS_LOG_INFO("Rozmístění mobilních uzlů v netAnim -> OK");
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc = CreateObject
    <ListPositionAllocator>();
positionAlloc ->Add(Vector(0, 0, 0)); // AP
positionAlloc ->Add(Vector(1, 0, 0)); // STA -- starting 1m away from AP

mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc);
mobility.Install(wifiApNodes);
mobility.Install(wifiStaNodes);
Simulator::Schedule (Seconds (1.0), &AdvancePosition, wifiStaNodes.Get
    (0));

```

6.2.3 Přiřazení adresového prostoru a protokolového zásobníku

Pro přiřazení adresního prostoru se využívá tříd `Ipv4AddressHelper` nebo `Ipv6AddressHelper` podle toho, jaký typ IP adresy je nutné přiřadit. Ve vytvořené topologii je využita IPv4. Prostřednictvím funkce `SetBase` je následně přiřazena síť 10.1.3.0, jejíž hostitelská část je následně přidělena oběma uzlům.

```
//Definice adresního prostoru a přiřazení IP adres jednotlivým //zařízením
NS_LOG_INFO("Definice adresního prostoru/přiřazení IP adres -> OK");
Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("10.1.3.0", "255.255.255.0");
address.Assign (apDevices);
address.Assign (staDevices);

Ipv4InterfaceContainer interfaceSta = address.Assign(staDevices);
Ipv4InterfaceContainer interfaceAp = address.Assign(apDevices);
NS_LOG_UNCOND("IP AP: " << interfaceAp.GetAddress(0));
NS_LOG_UNCOND("IP STA: " << interfaceSta.GetAddress(0));
```

Následně je nutné přiřadit oběma uzlům protokolové sady.

```
//Protokolový zásobník
InternetStackHelper stack;
stack.Install (wifiStaNodes);
stack.Install (wifiApNodes);
```

6.2.4 Definice aplikace

Pro účely této práce byla zvolena tzv. On/Off aplikace s rychlostí datového toku 54 Mbit/s a velikosti jednoho paketu 1500 bitů.

První řádek kódu značí vytvoření On/Off aplikace pomocí třídy `OnOffHelper`, jež využívá protokolu UDP (nespolehlivý a nespojovaný charakter). Data jsou vysílána z přístupového bodu na soketu (portu) 1025. Třída `ApplicationContainer` slouží k instalaci a manipulaci s daty prostřednictvím metod. Vytvořenému objektu je následně přidělena nastavená On/Off aplikace. Poslední dva řádky kódu již značí čas simulace, kdy je aplikace zapnuta/vypnuta.

```
OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory",
                  Address (InetSocketAddress (interfaceSta.GetAddress
(0), 1025)));
```

```

onoff.SetAttribute ("OnTime", StringValue
    ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=1]"));
onoff.SetAttribute ("OffTime", StringValue
    ("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0]"));
onoff.SetAttribute ("PacketSize", StringValue ("1500"));
onoff.SetAttribute ("DataRate", StringValue ("54000kb/s"));

ApplicationContainer apps = onoff.Install (wifiApNodes.Get (0));
apps.Start (Seconds (0.0));
apps.Stop (Seconds (120.0));

```

6.2.5 FlowMonitor

Vyhodnocení výsledků ze simulací je zajišťováno prostřednictvím frameworku FlowMonitor. V prostředí NS-3 jej lze využívat pomocí třídy FlowMonitorHelper, jež podporuje práci s následujícími veličinami:

- **timeFirstTxPacket**—čas vyslání prvního paketu,
- **timeLastTxPacket**—čas vyslání posledního paketu,
- **timeFirstRxPacket**—čas příjmu prvního paketu,
- **timeLastRxPacket**—čas příjmu posledního paketu,
- **delaySum**—suma zpoždění,
- **jitterSum**—suma zpoždění mezi vybranými pakety,
- **txBytes**—počet vyslaných bajtů,
- **rxBytes**—počet přijatých bajtů,
- **txPackets**—počet vyslaných paketů,
- **rxPackets**—počet přijatých paketů,
- **lostPackets**—počet ztracených paketů.

FlowMonitor umožňuje zjednodušení práce s uvedenými veličinami a byl použit zejména pro výpočet průměrné hodnoty propustnosti (viz dále).

```

#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"

```

Pro zpřístupnění FlowMonitoru je nutné zahrnout do zdrojového kódu předcházející hlavičky. Níže je uvedena implementace FlowMonitor ve zdrojovém kódu.

```

//Flow Monitor
FlowMonitorHelper flowMonHelper;
Ptr<FlowMonitor> monitor = flowMonHelper.InstallAll();

```

Prostřednictvím následujících řádků je definován výstup jednotlivých veličin do konsole. Je tak možné přehledně zjistit odsimulované hodnoty a případně je také zobrazit do grafů.

```

if (enableFlowMonitor)
{
double Throughput;
    monitor->CheckForLostPackets ();
Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier = DynamicCast<Ipv4FlowClassifier>
    (flowMonHelper.GetClassifier ());
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats = monitor-> GetFlowStats ();

for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator iter =
    stats.begin (); iter != stats.end (); ++iter)
    {
Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t = classifier->FindFlow (iter-> first);

NS_LOG_UNCOND("Flow ID: " << iter->first << " Src Addr " <<
    t.sourceAddress << " Dst Addr " << t.destinationAddress);
        NS_LOG_UNCOND("Tx Packets = " << iter->second.txPackets);
        NS_LOG_UNCOND("Rx Packets = " << iter->second.rxPackets);
Throughput = (iter->second.rxBytes * 8.0 / (iter->
    second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-iter->
    second.timeFirstTxPacket.GetSeconds()) / 1024 / 1024);

        NS_LOG_UNCOND("Throughput: " << Throughput << " Mb/s");

        NS_LOG_UNCOND("Lost Packets = " << iter-> second.lostPackets);
        NS_LOG_UNCOND("-----");
        NS_LOG_UNCOND("-----");
    }

monitor->SerializeToXmlFile ("multi_radio.flowmon", true, true);
}

```

Simulace je spuštěna prostřednictvím příkazu *Simulator::Run ()*.

6.2.6 Gnuplot

Prostředí NS-3 integruje prostředky pro další zpracování naměřených výsledků. S výsledky simulace lze dále pracovat prostřednictvím nástroje Gnuplot. Gnuplot se řadí do kategorie interaktivních softwarů pro vykreslování grafů.

V této práci byly výsledky ze simulace vepsány do externího souboru, jenž je prostřednictvím nástroje Gnuplot možné převést na obrázkový formát png. Níže je uveden způsob implementace do zdrojového kódu.

```
#include "ns3/gnuplot.h"
#include "ns3/nstime.h"

//GnuPlot - začátek
//Definice proměnných pro Gnuplot (používají se dále v kódu)

std::string jmenoSouboru = "Throughput";
std::string graphicsFileName = jmenoSouboru + ".png";
std::string plotFileName = jmenoSouboru + ".plt";
std::string plotTitle = "Throughput between AP and STA";
std::string dataTitle = "Throughput [Mb/s]";

//Vytvoření instance gnuplot a názvu

Gnuplot gnuplot (graphicsFileName);
gnuplot.SetTitle (plotTitle);

//Pomocí balíčku gnuplot (který se musí doinstalovat do Ubunut) lze
    provést vytvoření png souboru
gnuplot.SetTerminal ("png");

//Popisy jednotlivých os
gnuplot.SetLegend ("Simulation time", "Throughput [Mb/s]");
gnuplot.AppendExtra("set auto x"); //nastavení rozsahu osy x
gnuplot.AppendExtra("set auto y"); //nastavení rozsahu osy y
gnuplot.AppendExtra("set grid"); //zapnutí mřížky grafu
Gnuplot2dDataset dataset;
dataset.SetTitle(dataTitle); //vytisknutí názvu grafu
dataset.SetStyle (Gnuplot2dDataset::HISTEPS); //volba typu grafu (zde
    sloupcový)
```

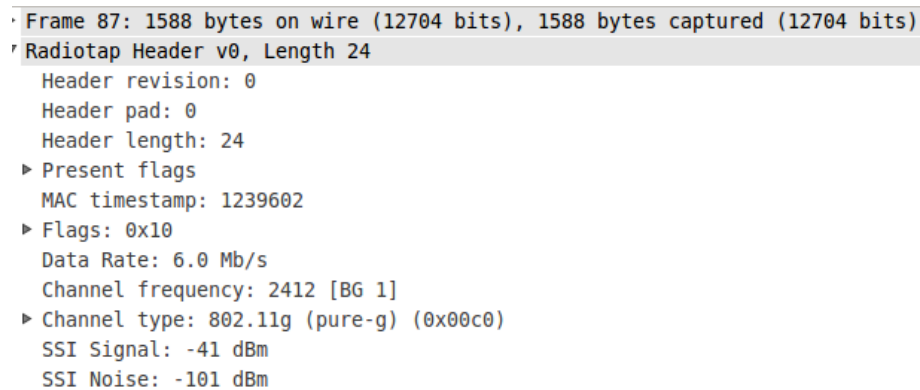
Následně je ve zdrojovém kódu část pro vytvoření exportu dat do souboru. První řádek slouží pro vytvoření souboru se jménem *throughput_new.plt* následovaným funkcí pro jeho naplnění daty. Poslední řádek kódu vygeneruje výstupní soubor a plně ho připraví pro následné použití (např. pro nástroj gnuplot). Výstupem je tedy soubor plt, jenž obsahuje data propustnosti.

```
std::ofstream outfile ("throughput_new.plt");
//Gnuplot gnuplot;
gnuplot.AddDataset (throughputCounter->GetDatafile());
gnuplot.GenerateOutput (outfile);
```

6.3 Implementace funkcí pro výpočet SNR a propustnosti

Prostředí NS-3 samo o sobě nedisponuje funkcemi nebo metodami, které by umožňovaly přímé zobrazení a vykreslení hodnot propustnosti nebo SNR. Pro výpočet propustnosti lze využít globální proměnnou `bytesTotal` pro výpočet bajtů, bylo ale nutné vytvořit metodu, která pro každou sekundu simulace tuto hodnotu uloží do výstupního souboru.

Implementace funkce pro výpočet a zobrazení SNR však bylo poněkud obtížnější. Prostředí NS-3 disponuje kódem pro výpočet úrovně signálu a pro výpočet úrovně šumu. Tento výpočet je obsažen v modelu Yans na fyzické vrstvě. Jedná se tedy o zdrojové soubory `yans-wifi-phy.cc` a `hans-wifi-phy.h`. Bylo nutné označovat datový provoz (tedy každý paket), čímž je zajištěno přenesení hodnoty SNR, která by při výchozím nastavení nebyla vidět. Byl také doplněn kód pro přenos informací o síle signálu a šumu v momentě příjmu paketu. Tyto hodnoty jsou znázorněny pomocí nástroje Wireshark na obrázku 6.5. Jedná se o hodnoty SSI Signal a SSI Noise, jež jsou zachyceny na mobilním uzlu, a ze kterých je SNR vypočten.



```
Frame 87: 1588 bytes on wire (12704 bits), 1588 bytes captured (12704 bits) on interface 0
Radiotap Header v0, Length 24
  Header revision: 0
  Header pad: 0
  Header length: 24
  ▶ Present flags
    MAC timestamp: 1239602
  ▶ Flags: 0x10
    Data Rate: 6.0 Mb/s
    Channel frequency: 2412 [BG 1]
  ▶ Channel type: 802.11g (pure-g) (0x00c0)
    SSI Signal: -41 dBm
    SSI Noise: -101 dBm
```

Obr. 6.5: Provoz zachycený pomocí Wiresharku

Ze zachyceného provozu lze mimo signálu a šumu odečíst řadu dalších informací, např. celkový počet bajtů jednoho paketu, časová razítka aj.

6.4 Rozbor zdrojového kódu pro realizaci klíčových identifikátorů

Jak již bylo řečeno, pro zjištění hodnoty SNR bylo nutné označit provoz na fyzické vrstvě. V této práci byl využit chybový model `YansErrorRate` a upraven tak musel být zdrojový kód souboru `Yans-wifi-phy.cc`. Červená část kódu níže zobrazuje vyvinutý kód, černá část kódu znázorňuje výchozí kód, do něhož byl nový algoritmus nasazen.

```
NotifyMonitorSniffRx (packet, (uint16_t)GetChannelFrequencyMhz (),
    GetChannelNumber (), dataRate500KbpsUnits, isShortPreamble, signalDbm,
    noiseDbm);

// ***** SNR TAG ***** //
    SnrTag tag;
    tag.Set(signalDbm - noiseDbm);
    if (! packet->PeekPacketTag (tag))
    {
        packet->AddPacketTag (tag);
        NS_LOG_DEBUG("Add SNR Tag with value :" << tag.Get());
    }
// ***** SNR TAG ***** //

m_state->SwitchFromRxEndOk (packet, snrPer.snr, event->GetPayloadMode (),
    event->GetPreambleType ());
```

První řádek kódu vytvoří objekt typu `SnrTag`, jenž slouží pro značkování datového provozu. Druhý řádek vloží vypočtenou hodnotu SNR (`SignalDbm - NoiseDbm`) do objektu `tag` a následná podmínka zajistí přidání značky do příchozího paketu a zobrazení jeho hodnoty.

Následně bylo nutné správně značku použít a vložit odpovídající zdrojový kód do hlavního souboru. Pro možnost využití značkování byla do záhlaví kódu vložena následující hlavička.

```
#include "ns3/yans-wifi-phy.h"
```

Poté byla změněna podoba metody pro zachycování paketů *ReceivePacket*(*Ptr*<*Socket*> *socket*) ve třídě *ThroughputCounter*, jež má následující podobu.

```
void ThroughputCounter::ReceivePacket(Ptr<Socket> socket) {
    Ptr<Packet> packet;
    SnrTag tag;
```

```

while (packet = socket->Recv()) {
    if (packet->PeekPacketTag(tag)) {
        NS_LOG_DEBUG ("SNR: " << tag.Get());
        temp_snr = tag.Get();
    }
    bytesTotal += packet->GetSize();
    m_SnrOutput.Add((Simulator::Now()).GetSeconds(),temp_snr);
}
}

```

Metoda čeká, dokud nepřijde paket na definovaný soket. Pokud přijde, přečte přidanou značku, vytiskne hodnotu SNR a uloží ji do globální proměnné *temp_snr*. Tato hodnota je následně spolu s časem přijmutí paketu uložena do objektu *m_snrOutput* typu *Gnuplot2dDataset*, jež slouží k vynesení zachycených hodnot. Následně byla vytvořena metoda *ThroughputCounter::GetSnrDataFile()*, jež vrací hodnotu *m_snrOutput*.

```

Gnuplot2dDataset ThroughputCounter::GetSnrDatafile() {
    return m_SnrOutput;
}

```

Důležitou částí celého zdrojového kódu je funkce pro zpětné volání metody pro příchozí pakety. Toto volání umožňuje zobrazení hodnoty SNR v každém momentě, kdy je přijat označený paket. Toto volání vypadá následovně.

```

ThroughputCounter* throughputCounter = new ThroughputCounter();
Ptr<Socket> sink = Socket::CreateSocket(wifiStaNodes.Get(0), tid);

sink->SetRecvCallback(MakeCallback(&ThroughputCounter::ReceivePacket,
    throughputCounter));

```

Nejdříve je vytvořen ukazatel na třídu *ThroughputCounter* a následně soket pro příjem paketů. Následuje nejdůležitější část celého kódu, jež umožňuje volání metody *ReceivePacket* a vyobrazit tak SNR data do konzole. Na závěr byla doplněna objemná část kódu pro počáteční nastavení grafu SNR a pro vytvoření a práci s výstupním souborem. Tento kód zde není uveden z důvodu podobnosti s kódem rozebraným v kapitole 6.2.6.

7 VÝSLEDKY SIMULACE WIFI SÍTĚ A JEJÍ VÝSTUPY

V této kapitole jsou rozvedeny výsledky simulací obou scénářů. Prostředí NS-3 samo o sobě nedokáže vyobrazit výstupy simulací do obrázkových formátů. Jednotlivé výpočty a popisky grafů jsou vepisovány do tzv. plt souborů. Souborový formát plt, nazývaný také jako HPGL (Hewlett-Packard Graphics Language), je standardizovaný jazyk pro tisknutí grafických výstupů [28]. Plt byl navržen speciálně pro vykreslování grafických informací ve formátu 2D pro širokou škálu vykreslovacích nástrojů. Jedním z takových nástrojů je tzv. Gnuplot. Gnuplot je nástroj ovladatelný prostřednictvím textových příkazů [4]. Byl realizován zejména pro možnost vizualizace matematických funkcí a také dat. Jeho výhodou je asociace s řadou externích formátů, mezi něž se řadí již zmiňovaný souborový formát plt. Gnuplot je schopen přečíst datový vstup ze zdrojového souboru ve formátu plt a specifickým příkazem jej převést na obrázkový formát png.

Prostředí NS-3 v současnosti nedisponuje knihovnou pro práci s obrázkovými soubory. Existuje celá řada externích knihoven (např. LodePNG, libpng, pnglite aj.), která funkce pro práci s obrázky umožňuje. V této práci bylo rozhodnuto o využití příkazu *system()*, jenž umožňuje vykonání požadovaného příkazů prostřednictvím příkazů procesoru. Pro následné zobrazení png souboru slouží aplikace gnome.

Zdrojový kód níže vyobrazují řádky zodpovědné za vykreslení a otevření grafu propustnosti. Procesní příkaz *gnuplot* na řádce slouží k oznámení, že se bude využívat externí formát. *Throughput.plt* poté slouží jako reference na soubor, jenž obsahuje data nutná pro vykreslení a uložení do obrázkového souboru png. Druhý řádek obsahuje příkaz *gnome-open* jenž slouží k otevření obrázkového formátu png. *Throughput.png* je soubor vytvořený prostřednictvím předchozího příkazu.

7.1 Výsledky simulace

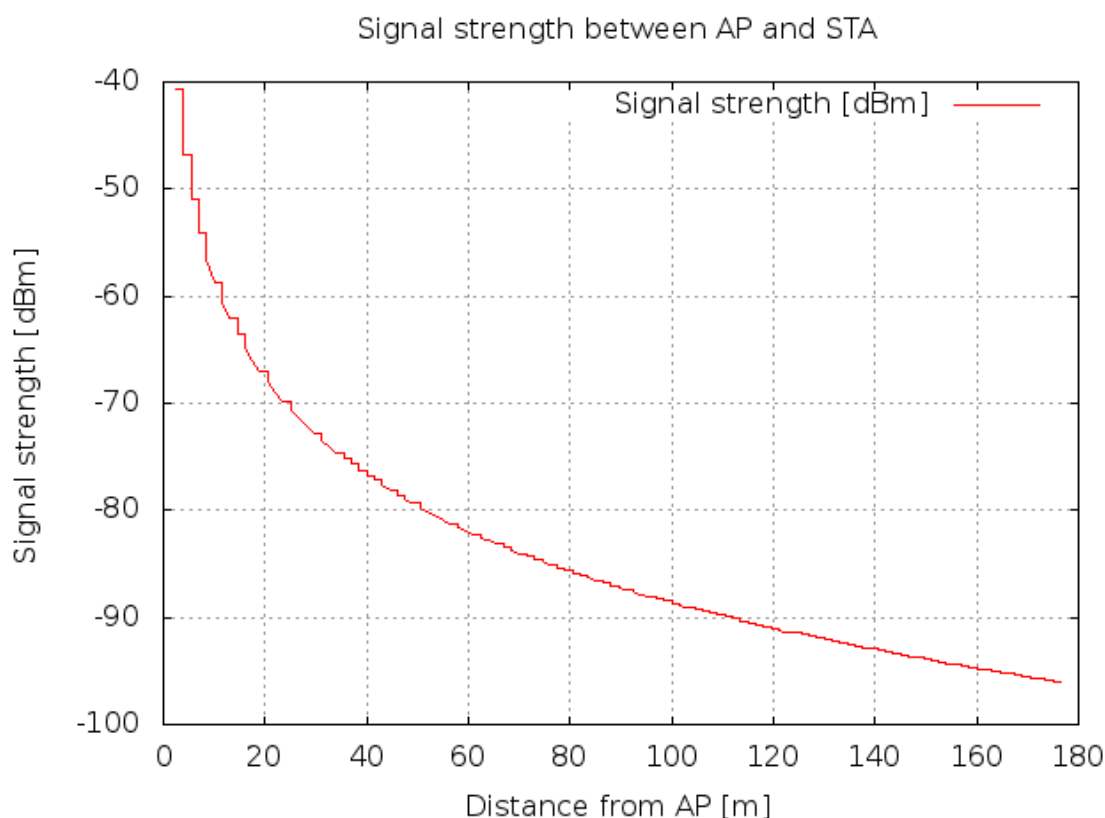
V následujících čtyřech kapitolách jsou rozebrány výsledky simulace bezdrátového prostředí. V první kapitole je rozebrána síla signálu v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu. Druhá kapitola pojednává o výsledcích získaných prostřednictvím funkce pro výpočet propustnosti a třetí kapitola se zabývá výsledky funkce SNR. Poslední kapitola uvádí zhodnocení výsledků datového provozu.

Grafy níže zobrazují výsledky na základě zvolených simulačních parametrů a také na zvoleném způsobu pohybu v kódové části mobilita. Ve vytvořené topologii se tedy vychází ze skutečnosti, že se vzdálenost uzlu od přístupového bodu v čase zvětšuje. Simulace byla nastavena na časový úsek 120 sekund a datový provoz je zahájen

v momentě spuštění simulace. Tato délka simulace byla nastavena z důvodu dosažení maximální vzdálenosti od AP, ve které je ještě možné zachycení hodnot propustnosti sítě a získat optimální a kvalitní výsledky parametrů sítě. Mobilní uzel se za tuto dobu dostane do vzdálenosti 180 metrů od přístupového bodu.

7.1.1 Síla signálu

Graf na obrázku 7.1 reprezentuje sílu signálu v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu. Schodovitý průběh je dán skutečností, že zvyšování odstupu mobilního uzlu od přístupového bodu není kontinuální, ale po každé změně vzdálenosti zůstane uzel po dobu jedné sekundy na místě.



Obr. 7.1: Síla signálu v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu

Maximální síla signálu na obrázku 7.1 je dle předpokladu v nejmenší vzdálenosti od přístupového bodu, tedy ve vzdálenosti 1,5 m. Síla signálu zde má hodnotu -40,5 dBm. Ve vzdálenosti 1,5-21 metrů od přístupového bodu dochází k výraznému poklesu síly signálu. Její hodnota ve 21 metrech dosahuje poklesu o -70 dBm. S následujícím zvýšením vzdálenosti již signál klesá téměř lineárně. V čase ukončení

simulace je hodnota signálu již natolik malá, že ji není většina zařízení schopná detekovat a dosahuje poklesu o více než -90 dBm.

7.1.2 Propustnost

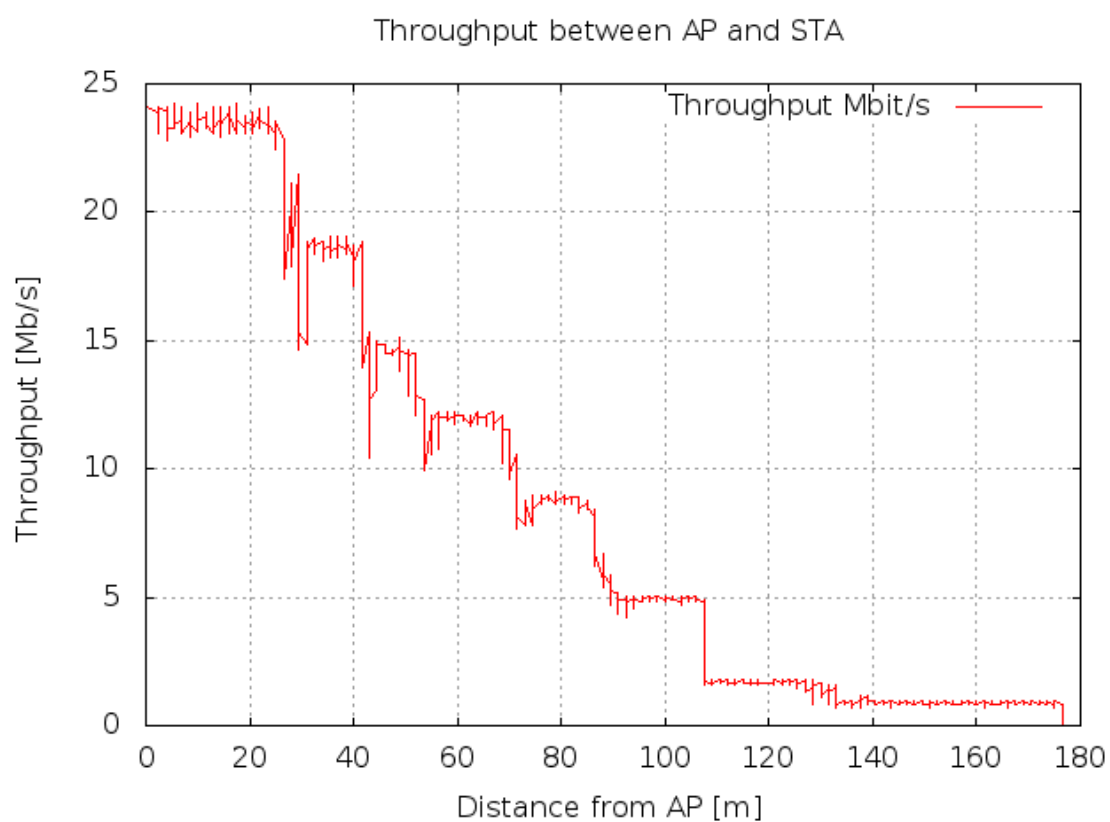
Obrázek 7.2 ilustruje závislost propustnosti na vzdálenosti od přístupového bodu. Nastavení doby simulace a vybraný typ modelu bylo totožné s nastavením uvedeným v kapitole 7.1.1. Z grafu lze vyčíst následující skutečnosti. Ve vzdálenosti 1,5 m se hodnota propustnosti pohybuje v rozmezí od 23 do 24,5 Mbit/s a zvyšující se vzdálenost rychlost datového toku neovlivní. Zlom nastává ve 26,5 metrech, kdy již vzdálenost od přístupového bodu negativně ovlivňuje hodnotu propustnosti. Ve vzdálenosti 26,5-28 m klesá propustnost na úroveň cca 18,5 Mbit/s, posléze ve 29,5 metrech dojde k jemnému zvýšení propustnosti a ta následně ve 31 metrech od přístupového bodu rapidně klesá. Důvodem je způsob výpočtů, na jejichž základě byl algoritmus Aarf vytvořen. Mobilní uzel se tak ve vzdálenosti 31 metrů od přístupového bodu dostane do takového místa a propustnost zde dosahuje hodnoty pouhých 14,5 Mbit/s. Následně se hodnota opět navýší a poté již má graf téměř schodovitý průběh. V několika dalších vzdálenostech se mobilní uzel ještě dostane do míst s nižší kvalitou signálu. Propustnosti lze dosáhnout až do vzdálenosti 175,5 m, poté už je tato hodnota nulová.

Hodnoty propustnosti přístupového bodu v grafu jsou přímo závislé na typu použitého "rate control" algoritmu. V této práci je záměrně použit "rate control" algoritmus Aarf. Jak již bylo řečeno, prostředí NS-3 implementuje 10 daných algoritmů. Algoritmus Aarf však za celou dobu simulace vykázal nejnižší ztrátovost paketů a propustnost sítě se snižuje téměř optimálně (nejblíže kontinuálnímu poklesu v porovnání s ostatními algoritmy).

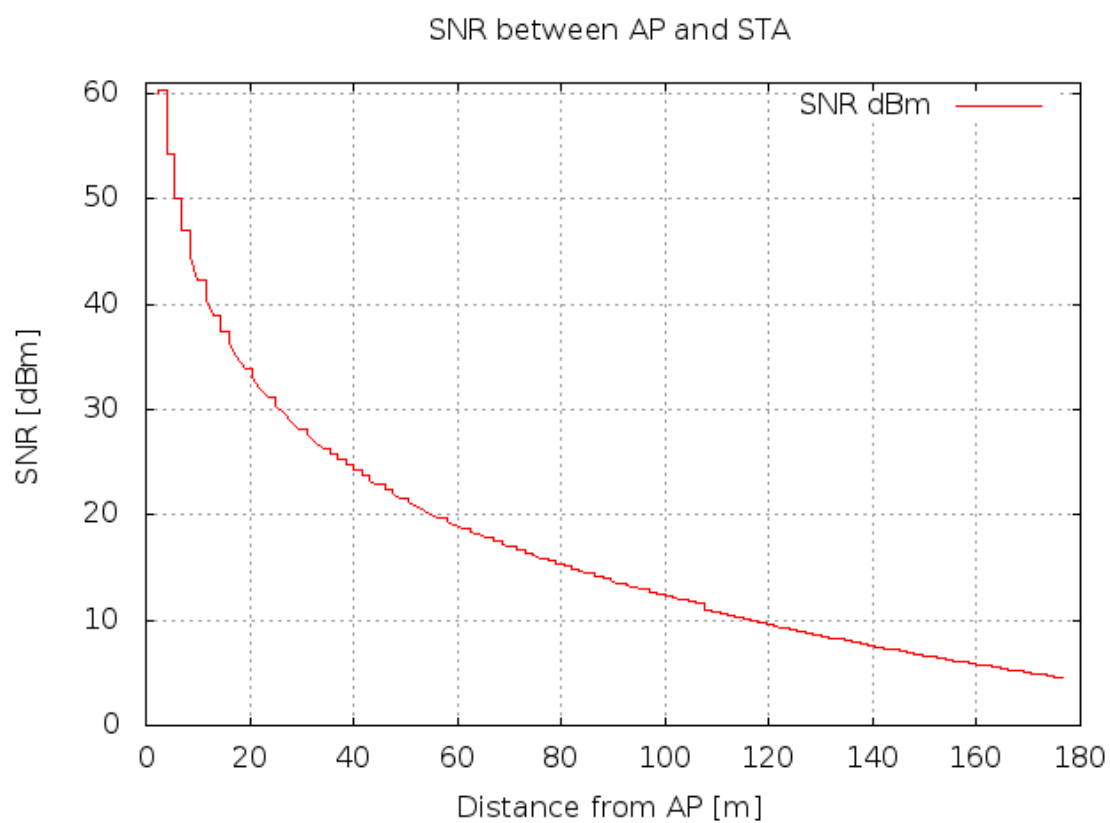
7.1.3 SNR v závislosti na zvyšující se vzdálenosti od přístupového bodu

Pro výpočet hodnoty SNR bylo využito generovaných hodnot síly signálu a také šumu. Jak už bylo dříve popsáno, pro potřeby této práce byl zvolen Error Rate Model Yans a algoritmus Aarf. Hodnota SNR je závislá na typu Error Rate modelu, avšak nezávislá na "rate control" algoritmu.

Výsledky grafu SNR v závislosti na vzdálenosti jsou zobrazeny na obrázku 7.3. Z grafu je patrné, že hodnota SNR má se zvyšující se vzdáleností klesající charakter a schodovitý průběh. Průběh grafu je velmi podobný průběhu grafu z obrázku 7.1. Tato skutečnost vychází ze vzorce pro SNR, protože hodnota SNR je přímo úměrná síle signálu.



Obr. 7.2: Propustnost přístupového bodu



Obr. 7.3: Graf SNR v závislosti na čase

Ve vzdálenosti 1,5 m má SNR maximální hodnotu, jež je rovna hodnotě 60,00 dBm (SNR je bezrozměrná jednotka) . Každý tzv. schod je dán změnou vzdálenosti o jeden a půl metru směrem od přístupového bodu. Z průběhu je patrné, že hodnota SNR se snižuje lineárně. Ve vzdálenosti 175,5 m od přístupového bodu SNR a čase simulace 117 s odpovídá hodnoty téměř 5 dBm. Po uplynutí doby 120 s je následně datový provoz vypnut a SNR je rovno nule.

7.1.4 Datový provoz

Pro účely této práce byly naprogramovány také výstupy, jež definují statistiky datového provozu celé simulace. Statistiky datového provozu jsou následující:

- Flow ID: 1 Src Addr 10.1.3.1 Dst Addr 10.1.3.2
- Tx Packets = 535 500
- Rx Packets = 84 390
- Rx Bits = 1 031 583 360
- First Rx Packet = 1,02 s
- Last Rx Packet = 117, 01 s
- Throughput = 8,48 Mbit/s
- Lost Packets = 406 227

První řádek značí směr vysílaných dat. Zdroj dat je přístupový bod s IP adresou 10.1.3.1 a cíl je mobilní uzel s IP adresou 10.1.3.2. Flow ID značí pořadí datového toku. Pro potřeby této práce byl nastaven pouze jeden datový tok.

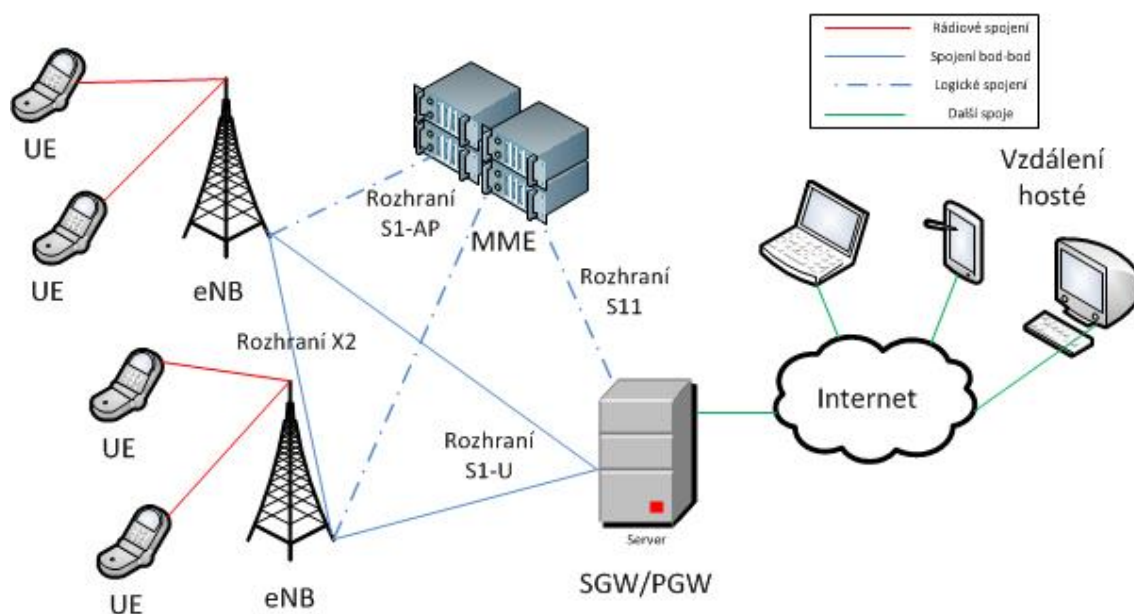
Druhý řádek značí celkový počet vyslaných paketů za celou délku simulace. Počet vyslaných paketů se zastavil na hodnotě 535 500. Třetí řádek se zabývá také kalkulací paketů, v tomto případě však kalkulací paketů přijatých mobilním uzlem. Počet přijatých paketů dosáhl po odsimulování hodnoty 84 390. Následně je uvedena hodnota celkového počtu bitů, jež byly po dobu simulace přijaty uzlem. Následující dva řádky označují čas prvního a posledního přijatého a paketu. První paket byl prostřednictvím uzlu přijat v čase 1,02 sekundy, poslední paket byl přijat v čase 117,01 sekund. Předposlední řádek značí průměrnou hodnotu propustnosti. Průměrná hodnota propustnosti dosáhla po zaokrouhlení hodnoty 8,48 Mbit/s. Poslední řádek značí celkový počet ztracených paketů. Tato položka dosáhla hodnoty 406 227 paketů. Toto číslo se může zdát příliš vysoké, vychází však z nastavené hodnoty datového toku aplikace (54 Mbit/s) a propustnosti přístupového bodu. Přístupový bod tedy nedokáže přenést data s přednastavenou rychlostí ve větších vzdálenostech od přístupového bodu a jejich část tak musí zahazovat. Toto chování přístupového bodu se nazývá jako metoda full-buffer. Byla nastavena záměrně a to z toho důvodu, aby bylo zřejmé chování sítě v případě jejího přetížení.

8 ARCHITEKTURA SÍTĚ LTE V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NS-3

Simulace sítě LTE je zajištěna prostřednictvím open source aplikace LENA, která umožňuje modelovat komunikaci v různě velkých oblastech (buňkách) sítě. Tato aplikace implementuje nástroje pro návrh a vyhodnocení informací z různých částí sítě. Mohou tak být získány informace o datových provozech z uplinku či downlinku, informace o interferenčních jevech mezi buňkami, rádiových prostředích sítě apod. Aplikace LENA je součástí nejnovějších verzí simulačního prostředí NS-3 a lze ji synchronizovat s ostatními modely prostředí – tedy například se sítí WiFi.

8.1 Aplikace LENA v simulačním prostředí NS-3

Obecný pohled na simulační model sítě LTE je ilustrován na obrázku 8.1. Tento model se skládá ze dvou hlavních částí – LTE sítě a jádra EPC (Evolved Packet Core).



Obr. 8.1: Topologie sítě LTE vytvořená prostřednictvím aplikace LENA

Model LTE sítě obsahuje definici dvou základních entit – UE (User Equipment – např. mobilní telefon) a eNB (eNode B – základnová stanice sítě LTE). Model dále obsahuje prostředky pro vytvoření rádiového spojení (např. mezi UE a eNB) a protokolů sítě, mezi které patří zejména následující:

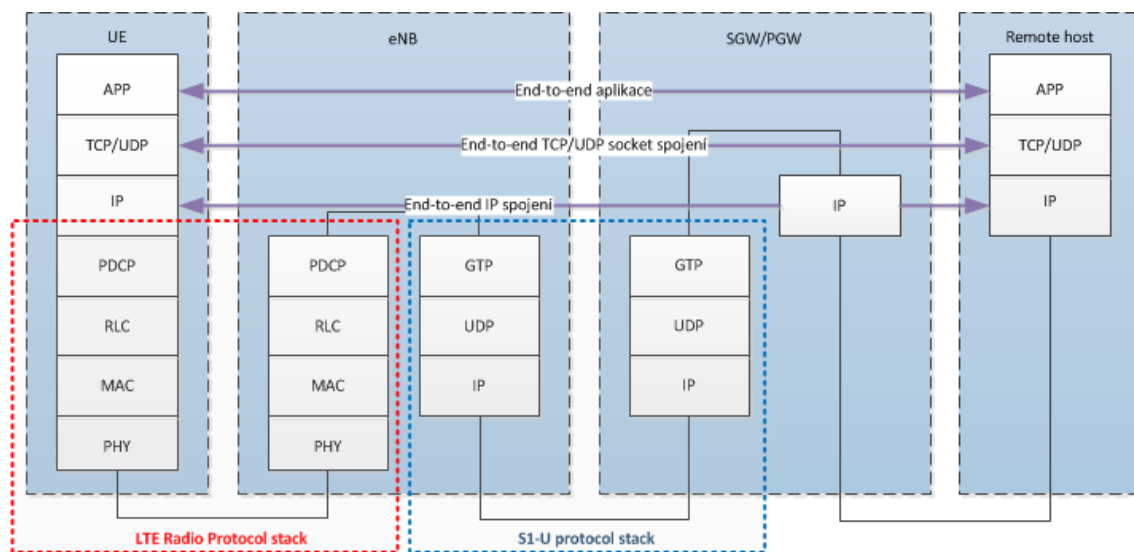
- RRC (Radio Resource Control) – je obsažen v entitách UE a eNB a přiděluje rádiové prostředky sítě. Mezi hlavní funkce patří zejména paging (stránkování), všesměrový přenos systémových informací, sestavení, údržba, zrušení RRC spojení mezi UE a rozhraním E-UTRAN aj. [21]
 - PDCP (Packet Data Convergence Protocol) – protokol je obsažen v entitách UE a eNB a mezi jeho nejdůležitější funkce patří zejména komprese a dekomprese hlavičky, přenos uživatelských dat, předávání dat vyšším vrstvám síťového modelu ve správném pořadí, šifrování a dešifrování aj. [19]
 - RLC (Radio Link Control) – neboli řízení radiového spojení je modul obsažený jak v UE, tak v eNB. Mezi jeho nejdůležitější funkce patří převod dat z vyšších vrstev síťového modelu, oprava chyb prostřednictvím algoritmu ARQ (Automatic Repeat Request – opakované zasílání dat), spojování, segmentace a opětovná montáž dat z vyšších vrstev aj. [20]
 - MAC (Mac Layer) – druhá vrstva síťového modelu, neboli spojovací vrstva.
 - PHY (Physical Layer) – první vrstva síťového modelu, neboli fyzická vrstva.
- Tyto entity jsou obsaženy uvnitř každého UE a eNB.

Model EPC obsahuje tzv. systémové jádro, tedy síťová rozhraní a protokoly obsažené uvnitř fyzických zařízení. Model EPC obsahuje 3 základní fyzická zařízení – SGW (Serving GateWay), PGW (Packet Data Network GateWay) a MME (Mobility Management Entity). Pro snadnější použití v simulačním prostředí NS-3 byla zařízení SGW a PGW spojena do jednoho a jejich výhody lze využít prostřednictvím objektu PGW. V následujícím výčtu jsou uvedeny a popsány jednotlivé části modelu EPC.

- SGW – zajišťuje vytvoření virtuálního spojení, jež je sestaveno dle směrnic a pravidel Mobility Management Entity (MME) prostřednictvím rozhraní S11. Virtuální spojení však může být sestaveno také na rozhraní S4, jež ale v simulačním prostředí NS-3 není obsaženo. Další podstatnou funkcí brány SGW je směrování datového provozu a jeho následné přeposílání k bráně PGW prostřednictvím rozhraní S5 (vzhledem ke spojení funkcí SGW a PGW není v simulačním prostředí taktéž obsaženo). SGW taktéž zajišťuje komunikaci systémových částí sítě LTE se stanicemi eNB prostřednictvím rozhraní S1-U. [22]
- PGW – slouží k propojení modelu EPC, potažmo sítě LTE, s externími IP sítěmi. Takové sítě jsou odborně nazývány zkratkou PDN (Packet Data Network – síť s přenosem dat ve formě paketů), odkud je odvozen název této brány. Brána PGW zajišťuje funkce směrování datového provozu ze sítě LTE do externích PDN sítí, ale také směrování do vnitřní sítě LTE. Zásadní funkcí brány PGW je alokace IP adres mobilním zařízením UE v průběhu vytvořeného virtuálního spojení. PGW taktéž slouží pro filtraci uživatelských dat dle QoS dělení a shromažďuje informace o zpoplatněných službách. [18]

- MME – je nejdůležitějším prvkem pro ovládání přístupu do sítě LTE. MME slouží pro sledování a paging mobilních zařízení UE, které jsou v danou chvíli ve stavu IDLE (tedy nejsou připojeny k síti LTE). Tyto informace jsou získávány v momentě aktivace/deaktivace virtuálního spojení. MME je zároveň zodpovědné za výběr nejvhodnějšího SGW pro příslušné UE, jež je vybírána ve fázi budování iniciálního připojení k síti LTE případně při handoveru uvnitř specifické LTE sítě. [12]

Na obrázku 8.2 je graficky vyobrazeno rozvržení datové roviny a protokolové sady tak, jak je implementováno v simulačním prostředí NS-3. Z obrázku je patrné, že v porovnání s reálnou implementací datové roviny v LTE síti proběhla inkluze SGW a PGW bran do jednoho SGW/PGW uzlu, což odstraňuje nutnost implementace rozhraní S5 a S8 specifikované doporučeními v projektu 3GPP. Ostatní rozhraní, jež se běžně nacházejí v reálných implementacích LTE sítí, jsou v simulačním prostředí NS-3 obsažena. Jedná se zejména o rozhraní S1-U zodpovědné za komunikaci mezi SGW/PGW a eNB či tzv. LTE Radio Protocol stack, jež zajišťuje výměnu informací mezi mobilním zařízením UE a eNB. [15]



Obr. 8.2: Rozvržení datové roviny a protokolového zásobníku LTE sítě v prostředí NS-3

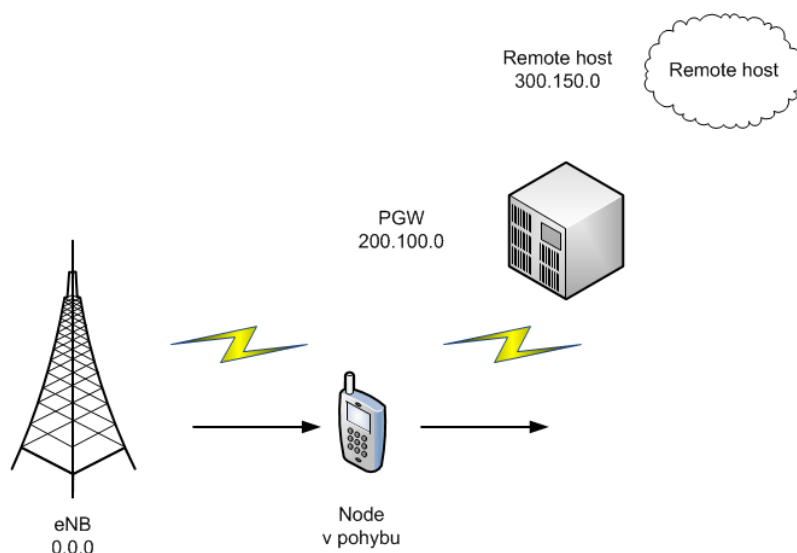
8.2 Návrh vlastní topologie sítě LTE

Pro zjištění základních parametrů sítě LTE bylo nutné vytvořit rozsáhlejší topologii, než tomu bylo v případě scénáře pro simulaci parametrů v síti WiFi. V předchozí kapitole byly rozvedeny základní modely sítě LTE a jejich funkční části, jež jsou

v simulačním prostředí NS-3 implementovány. Na základě získaných znalostí byly vytvořeny uzly UE, eNodeB, PGW a remoteHost, jímž byly následně přiřazeny potřebné vlastnosti prostřednictvím příslušných metod. V dalším textu již nebudou vytvořené zdrojové kódy vysvětleny, v případě potřeby jsou jednotlivé úseky kódů popsány prostřednictvím komentářů umístěných v příložených souborech. Je také nutné podotknout, že vytvořené uzly plní v topologii funkce dle svých názvů.

Vytvořená topologie je vyobrazena na obrázku 8.3. Topologii lze taktéž vizualizovat prostřednictvím aplikace NetAnim a tato metoda vykreslování je jednou z několika výstupů implementovaných do zdrojového kódu v souboru multi_radio_LTE. Aplikace zároveň umožňuje vyobrazení jednotlivých uzlů sítě v souřadnicovém systému, čímž si lze lépe představit pohyby v navržené topologii. Prostřednictvím této aplikace je také možné vykreslovat sestavená spojení mezi jednotlivými uzly. Lze tak pozorovat např. spojení mezi uzly remoteHost a PGW či mezi PGW a eNodeB.

Navržená topologie se skládá z fixně umístěných uzlů eNodeB, PGW a remoteHost, jež leží po celou dobu simulace na stejných souřadnicích. V síti je dále umístěn pohyblivý uzel UE, jež je na počátku simulace umístěn ve vzdálenosti 1 m od stanice eNodeB. Uzel se poté začne pohybovat směrem od základnové stanice až do maximální vzdálenosti, ve které je možné spočítat propustnost sítě (tedy do vzdálenosti, ve které ještě probíhá datový provoz mezi UE a eNB). Pro generování datového provozu byla do sítě LTE vložena Onoff aplikace a datový provoz je z pohledu UE generován ve směru downlink. Data jsou stahována ze vzdáleného uzlu remoteHost.



Obr. 8.3: Vytvořená topologie sítě LTE

Hodnoty většiny simulovaných výstupů jsou závislé na šířce pásma alokovaného přenosového kanálu konkrétnímu UE. Manipulace se spektrálními parametry sítě

LTE, včetně šířky pásma, je umožněna prostřednictvím tzv. LTE Spectrum modelu. Spektrální model je v simulačním prostředí NS-3 umístěn ve složce `src\lte\model\lte-enb-net-device.cc`. Velikost šířky pásma je uvedena prostřednictvím resource blocků (dále také jako RB), jejíž hodnotu lze měnit separátně pro směr downlink i uplink. Výchozí hodnota šířky pásma pro oba směry je 25 RB, což je ekvivalentem pro 5 MHz. Po jednoduchém odvození lze zjistit, že v simulačním prostředí je výchozí hodnota jednoho resource bloku rovna frekvenci 200 kHz. Počet resource bloků pro příslušný směr lze libovolně nastavovat v hodnotách 6, 15, 25, 50, 75 či 100. Jinými slovy lze pro oba směry datového provozu měnit frekvence šířky pásma mezi hodnotami 1,2 MHz; 3 MHz; 5 MHz; 10 MHz, 15 MHz a 20 MHz.

8.3 Funkce pro výpočet parametru SNR pro síť LTE

Při zpracovávání tohoto úkolu bylo zjištěno, že pro výpočet parametru SNR nebude možné využít metodu tagování paketů použitou v kap. 6.4. Pro jeho výpočet bylo namísto metody tagování využito metody tzv. tracingu. Rozbor této metody a dosažených výsledků je popsán v následujících kapitolách.

8.3.1 Tracing

Subsystém tracingu je v prostředí NS-3 jedním z nejdůležitějších mechanismů pro generování a vynášení potřebných výstupů vedoucích pro hlubší studium a důkladnější analýzy. Subsystém tracingu umožňuje několik funkčních možností, kterými lze získat potřebné informace ze simulovaných topologií. Nejprůchoďejší metodou je tisk informace prostřednictvím jednoduchého kódu umístěného do příslušné třídy na optimální místo (např. prostřednictvím zápisu `std::cout << "Hodnota x je: << x << std::endl`). Pro hlubší analýzu, potažmo vynesení několika odlišných parametrů současně je však nejvhodnější využít metody `trace source` – `trace sink`.

Jako `trace source` lze souhrnně označit informace, které jsou prostřednictvím systému tracingu vynášeny ze simulované topologie (v tomto případě hodnota parametru SNR). Obecně je nutné konstatovat, že lze prostřednictvím metody tracingu vynášet pouze informace integrované v systému `Attributes`. Jednotlivé atributy jsou poté vztaženy ke konkrétním objektům (nejčastěji třídám). Následující část kódu již názorně vyobrazuje vytvoření trace source pro vynášení hodnoty SNR.

```
TypeId
LteUePhy::GetTypeId (void)
{
    static TypeId tid = TypeId ("ns3::LteUePhy")
        .SetParent<LtePhy> ()
```

```

.AddConstructor<LteUePhy> ()

//moje
.AddTraceSource("SnrMoje",
                "Vypocet SNR UE",
                MakeTraceSourceAccessor(&LteUePhy::m_SnrTest))
;
return tid;
}

```

Trace source byl vytvořen v souboru lte-ue-phy.cc, jenž obsahuje algoritmy pro práci s informacemi fyzické vrstvy mobilního zařízení UE. Vlastní implementace je zahájena od komentáře `\\moje`. Zde se nachází dva důležité řádky kódu – `.AddTraceSource` a `MakeTraceSourceAccessor(&LteUePhy::m_SnrTest)`. Funkce `.AddTraceSource` poskytuje prostředky pro vynesení hodnoty trace source ze systému. Deklarace `MakeTraceSourceAccessor(&LteUePhy::m_SnrTest)` využije akcesor `m_SnrTest`, jež je plněn uvnitř příslušné metody ve třídě `LteUePhy`. Akcesor `m_SnrTest` je deklarován v hlavičkovém souboru `lte-ue-phy.h` a má následující zápis.

```
TracedCallback<double> m_SnrTest;
```

Tím je ukončena deklarace trace source a následuje deklarace trace sink, jež je provedena přímo v souboru vytvořené topologie.

```

void
NotifySnr (Ptr<OutputStreamWrapper> stream, std::string context, double
          SnrDbm)
{
    //V pripade potreby vizualizace SNR odkomentovat
    //std::cout << context << " Snr dBm: " << SnrDbm << std::endl;

    *stream->GetStream() << Simulator::Now().GetSeconds() << "\t" <<
        SnrDbm << std::endl;
    temp_snrDbm = SnrDbm;
}

```

Uvedená část kódu slouží jako funkce pro zobrazování hodnoty SNR a její ukládání do výstupního souboru. Funkce je volána v momentě změny pohybu mobilního zařízení UE. Uvedená funkce však sama o sobě zobrazení hodnoty SNR nezajistí. Trace source a trace sink je nutné propojit prostřednictvím subsystému `Config`, jehož deklarací je vytvořena cesta k realizovanému trace source. Deklarace `Configu` je uvedena v následující části zdrojového kódu.

```
Config::Connect ("/NodeList/*/DeviceList/*/LteUePhy/SnrMoje",  
                MakeBoundCallback (&NotifySnr, stream));
```

V závorce je uvedena cesta k vytvořenému akcesoru a prostřednictvím funkce `MakeBoundCallback` je daný trace source (`SnrMoje`) „spárován“ s funkcí trace sink (`NotifySnr`). Uvedeným způsobem lze ze systému vynést libovolnou informaci či parametr, který je poté možné dále zpracovávat.

8.3.2 Výsledky simulace bezdrátové sítě LTE a její výstupy

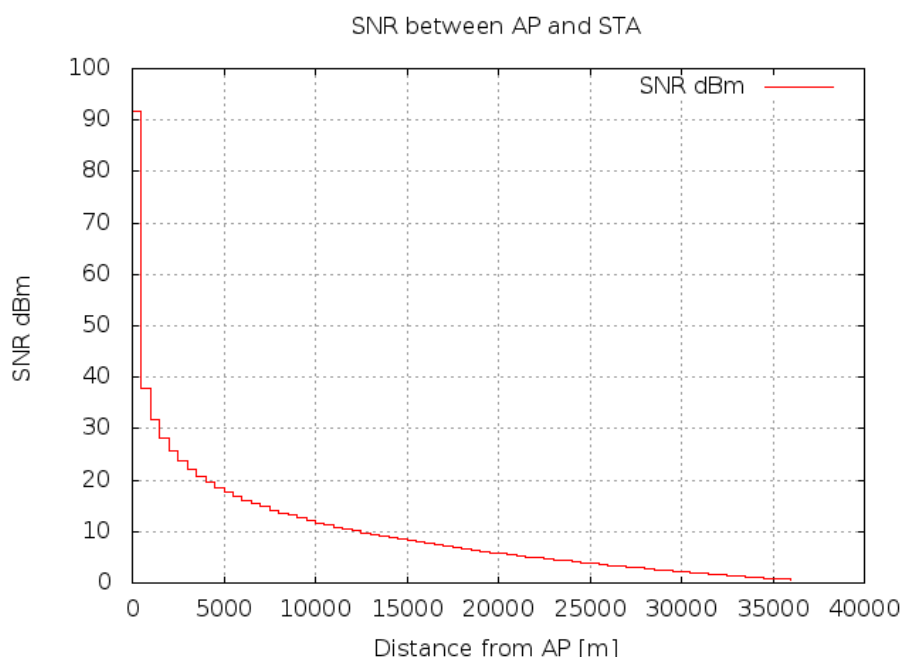
Před zhodnocením samotných výsledků je nutné střídavě zmínit způsob funkčnosti a implementace modulů LTE sítě v simulačním prostředí NS-3. Moduly pro simulace sítě LTE (projekt LENA) byly do simulačního prostředí přidány teprve počátkem roku 2013. V případě některých starších aplikací tak není zajištěna 100 % kompatibilita a přizpůsobení s moduly LTE. Některé aplikace mohou kvůli rozdílnostem ve struktuře modulů pracovat rozdílně. Příkladem může být aplikace Flow monitor. Datový provoz v LTE síti probíhá v porovnání se sítí WiFi podobným způsobem. Pro sestavení komunikace v síti LTE jsou alokovány přenosové virtuální kanály (angl. bearers), kterými jsou následně data vysílána k základnovým stanicím či mobilním zařízením. Management rádiových prostředků je zde však složitější, než v případě WiFi sítě. Přenášená data se v síti LTE zdrží delší dobu a délka simulace je tak v porovnání s délkou simulace sítě WiFi delší o několik jednotek až desítek sekund.

Jak již bylo napsáno výše, ke generování datového provozu v síti LTE byla zvolena a implementována Onoff aplikace. V momentě zastavení datového provozu však vzhledem k vyššímu zpoždění sítě nedochází k přenesení všech paketů a úplný konec simulace tak musí být nastaven s minimálně deseti sekundovým zpožděním. Teprve tak je zajištěno správné přečtení monitorovaných hodnot sítě Flow monitorem. V opačném případě by byl počet zaslaných paketů vyšší, než počet přijmutých a ztracených paketů dohromady.

Při sestavování topologie LTE sítě byla konfigurována řada parametrů. Výčet těch nejdůležitějších včetně nastavených hodnot je uveden v následujícím seznamu.

- EPS bearer: NGBR_VIDEO_TCP_DEFAULT,
- eNB antenna model: IsotropicAntennaModel,
- UE antenna model: IsotropicAntennaModel,
- nastavení Onoff aplikace: provoz UDP, velikost paketu 1 500 b, datová rychlost 54 000 kb/s,
- šířka pásma: 15/25 RB (3/5 MHz),
- směr datového provozu: downlink.

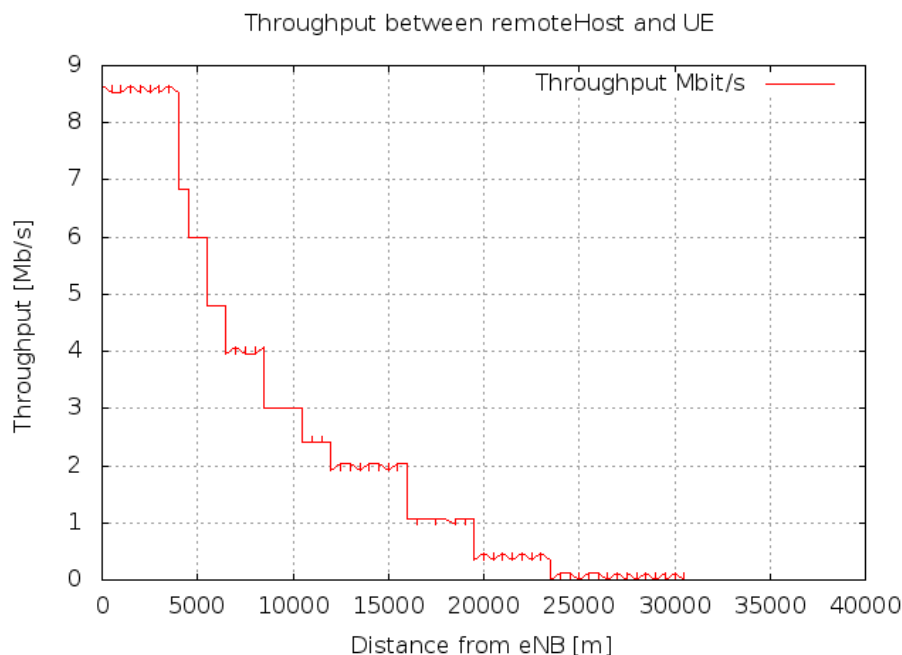
V průběhu procesu vyhodnocování parametrů sítě LTE proběhly dvě odlišné simulace lišící se šířkou pásma základnové stanice eNB. V případě první simulace byla šířka přenosového pásma nastavena na hodnotu 15 RB, tedy 3 MHz. Při simulaci byly vyhodnocovány dva parametry – poměr signál šum (SNR) a propustnost uzlu, obojí v závislosti na vzdálenosti od základnové stanice eNB. Na obrázku 8.4 lze pozorovat hodnoty SNR vztažené ke vzdálenosti, obojí vynesené do grafu. Vysílací výkon základnové stanice je mnohem vyšší, než vysílací výkon přístupového bodu a mobilní zařízení je schopno zachytit signál do výrazně větších vzdáleností v porovnání se sítí WiFi. Vysílací výkon základnové stanice je nastaven na výchozí hodnotu 30 dBm. Tuto hodnotu lze změnit v souboru `src\lte\model\lte-enb-phy.cc`. Prostřednictvím vysílacího výkonu a dalších přenosových parametrů (šum, antenna model, pathloss model, interference apod.) lze taktéž nastavit velikost buněk v síti LTE. Jednotlivé typy buněk (makro, mikro atd.), tak jak jsou implementovány v reálném systému LTE, nastavit nelze. Z grafu je možné odečíst, že až do vzdálenosti 4 500 m dochází k výraznému poklesu hodnoty parametru SNR, poté již jeho hodnota klesá velmi pozvolna. Ve vzdálenosti 36 000 m od eNB je hodnota SNR téměř nulová a dosahuje velikosti 0,59 dBm.



Obr. 8.4: Hodnoty parametru SNR se vzrůstající vzdálenosti od eNB při šířce pásma 15 RB

Obrázek 8.5 vykresluje grafickou závislost propustnosti na vzdálenosti UE od eNB. Z grafu lze vyčíst, že při šířce pásma 15 RB má maximální možná propustnost

hodnotu 8,64 Mbit/s. Daná hodnota je dosažitelná až do vzdálenosti 4000 m od eNB. Poté dochází k pozvolnému schodovitému poklesu propustnosti. Minimální propustnost sítě je dosažitelná ve vzdálenosti 30 500 m od eNB a její hodnota je 0,12 Mbit/s. Poté už je propustnost rovna nule. Z grafů 8.4 a 8.5 lze zjistit, že hodnota signál eNB dosahuje do větší vzdálenosti, než lze naměřit propustnost. Tato skutečnost je dána způsobem implementace modulu LTE do systému NS-3, kdy propustnost nižší než 0,12 Mbit/s nelze vyobrazit.



Obr. 8.5: Hodnoty propustnosti se vzrůstající vzdálenosti od eNB při šířce pásma 15 RB

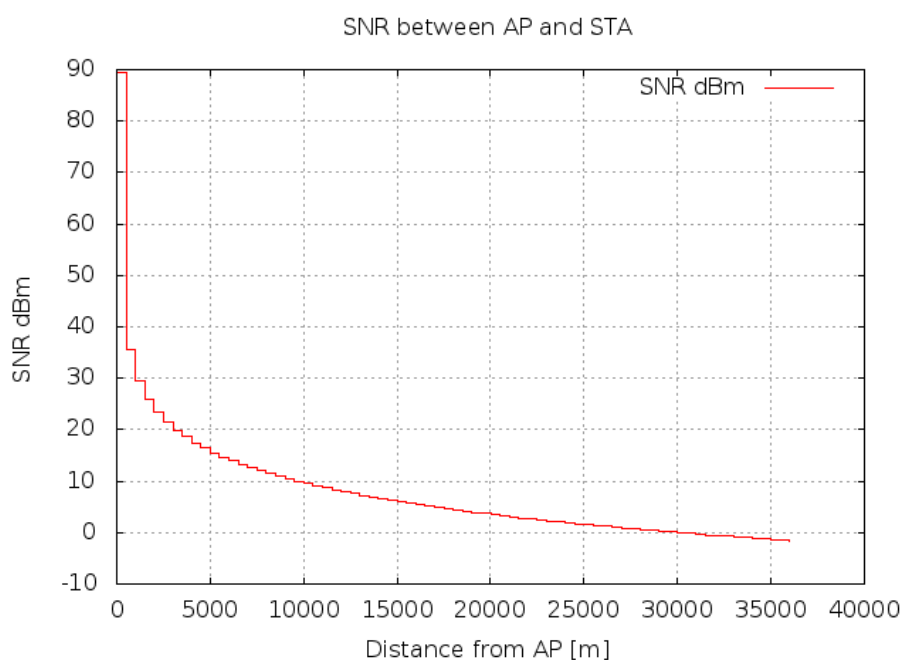
Výsledky z Flow Monitoru jsou následující:

- Flow ID: Src Address 1.0.0.1 Dst Address 7.0.0.2
- TX Packets = 283 050,
- RX Packets = 13 267,
- Throughput = 2,54 Mb/s,
- Lost Packets = 269 783.

Z výsledků je patrné, že počet celkově vyslaných paketů byl 283 050, zatímco přijatých bylo pouze 13 267. Zbývající pakety tedy byly vzhledem k dosaženým hodnotám propustností a přednastavené rychlosti Onoff aplikace (54 Mbit/s) základnovou stanicí eNB zahazovány. Rychlost Onoff aplikace byla nastavena stejně jako v předchozích kapitolách. Cílem bylo dosáhnout metody full-buffer, tedy zahazování paketů. V případě nastavení vyšší rychlosti by se propustnost sítě LTE a

WiFi zvýšila a implementace offload algoritmů by bagatelizovala konečné výsledky.

V druhé simulaci byla nastavena šířka přenosového pásma eNB 25 RB, tedy 5 MHz. Na obrázku 8.6 lze pozorovat hodnoty SNR spolu se vzdálenostmi od eNB. Grafický průběh je velmi podobný grafu 8.4, pokles hodnot parametru SNR při šířce pásma 5 MHz je však s rostoucí vzdáleností nepatrně rychlejší a od vzdálenosti 30 000 m se dokonce dostává do záporných hodnot.



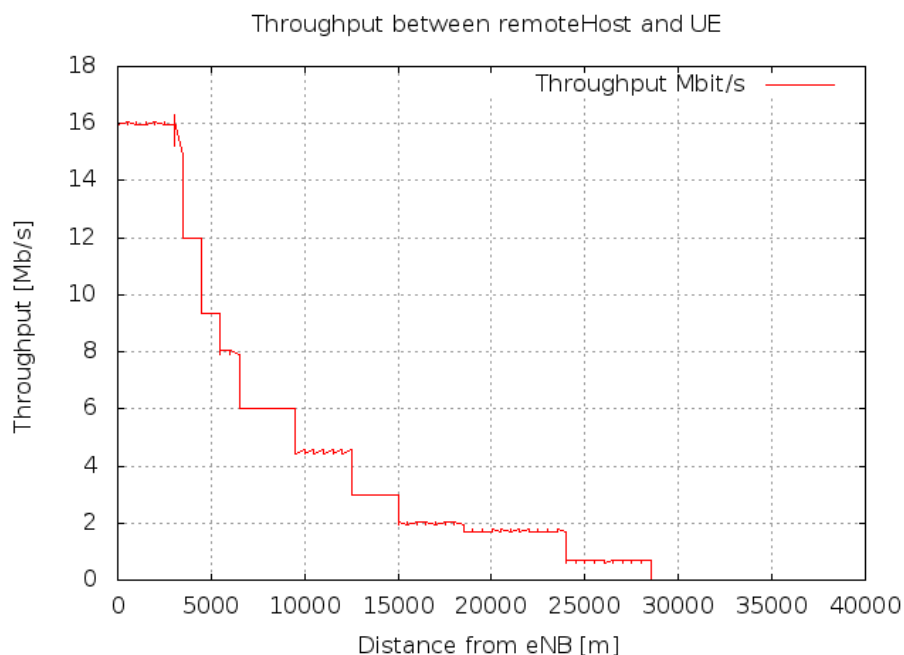
Obr. 8.6: Hodnoty parametru SNR se vzrůstající vzdálenosti od eNB při šířce pásma 25 RB

Propustnost sítě LTE při šířce pásma 25 RB je znázorněna v grafu 8.7. Do vzdálenosti 3 000 m od eNB je možné pozorovat maximální hodnotu propustnosti, jež se pohybuje kolem hodnoty 16 Mbit/s. Podobně jako v grafu 8.5 následuje schodovitý pokles. Minima daná topologie dosáhne ve vzdálenosti 28 500 m od eNB.

Maximální hodnota propustnosti je spíše teoretická a lze jí dosáhnout pouze při předpokladu připojení pouze jednoho UE (tak jak je tomu ve vytvořené topologii) a nízké vzdálenosti mobilního uzlu od eNB. V reálných sítích LTE instalovaných na území České republiky je možné teoreticky dosáhnout propustnosti až 150 Mbit/s ve směru downlink a při šířce pásma 20 MHz [26], [10], UE by se však muselo nacházet v blízkosti eNB a zároveň by se mezi eNB a UE neměly vyskytovat větší překážky. Běžně je pak ve směru downlink možné dosahovat propustnosti 15 Mbit/s.

Výsledky z Flow Monitoru při šířce pásma 5 MHz jsou následující:

- Flow ID: Src Address 1.0.0.1 Dst Address 7.0.0.2



Obr. 8.7: Hodnoty propustnosti se vzrůstající vzdálenosti od eNB při šířce pásma 25 RB

- TX Packets = 283 050,
- RX Packets = 23 822,
- Throughput = 4,87 Mb/s,
- Lost Packets = 259 228.

Počet celkově vyslaných paketů byl stejný jako v případě první simulace. Byl však navýšen počet přijatých paketů, který dosáhl čísla 23 822. Navýšení počtu přijatých paketů bylo v porovnání s první simulací očekáváno a v souladu se zvětšením hodnoty šířky přenosového pásma bylo dosaženo vyšší datové propustnosti sítě.

9 TOPOLOGIE VÍCENÁSOBNÉHO PŘÍSTUPU DO BEZDRÁTOVÝCH SÍTÍ

V této kapitole je uveden rozbor finálního bodu zadání od úvodu k offload strategiím až po vlastní návrh a vyhodnocení výsledků simulace. Simulace je uskutečněna, podobně jako v předchozích kapitolách, v prostředí NS-3 a při návrhu topologie byly zčásti využity zdrojové kódy ze scénářů WiFi a LTE.

9.1 Úvod k offload mechanismům

Rozvoj mobilních komunikačních technologií se v posledních letech rapidně zvýšil, což je dáno zejména stoupajícími nároky na přenosové rychlosti a na propracovanější a modernější služby. Počet chytrých telefonů (tzv. smartphonů), tabletů, netbooků a celulárních mobilních sítí významně narůstá ve velkých číslech. Výsledkem je poptávka po dokonalém pokrytí území (i neobydleném) a vysokých rychlostech při přenosu digitálních dat.

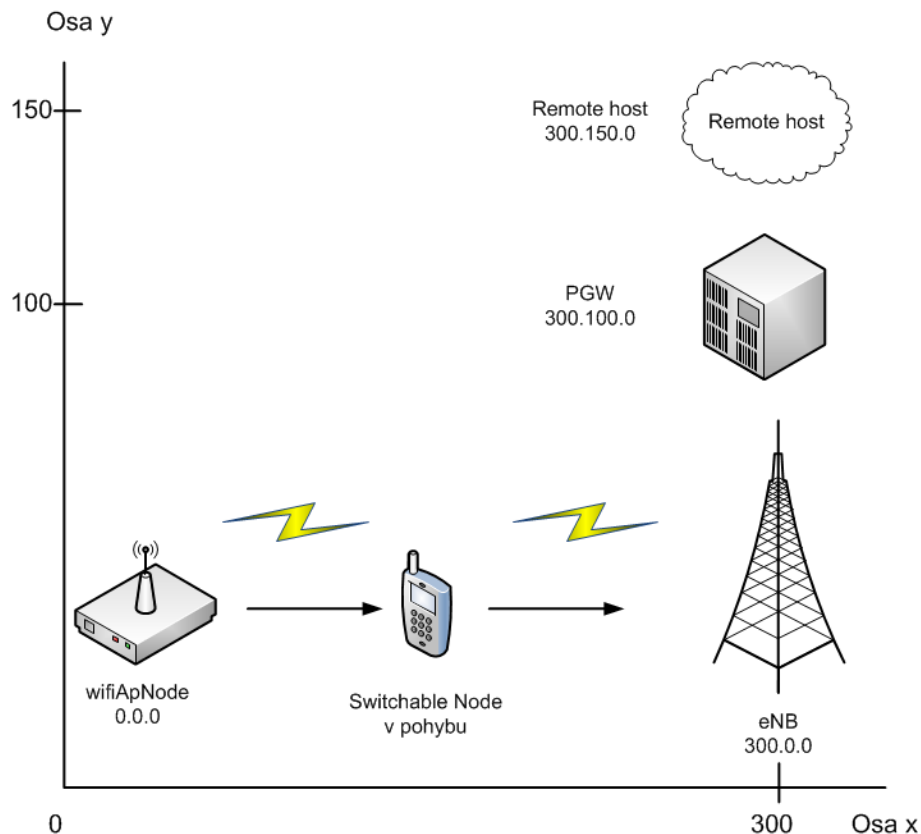
Dramatický nárůst „mobilních“ dat (zasílaných a přijímaných mobilními zařízeními) činí největší problém zejména pro mobilní operátory provozující svoje sítě na omezeném kmitočtovém spektru. Tento problém je však možné efektivně řešit prostřednictvím offload algoritmů, které zajišťují rozložení datové zátěže do alternativních datových sítí. Algoritmy pro datový offloading zajistí optimalizaci využití dostupných rádiových prostředků a v případě saturace sítě LTE přesměrují příslušné mobilní zařízení do alternativních dostupných bezdrátových sítí. V současnosti lze taktéž zaznamenat vzrůstající nároky on-line mobilních aplikací, jež pro svoji činnost potřebují připojení k datové síti. Pro nasycení daných požadavků bude do budoucna nutné neustále vyvíjet či zdokonalovat přístupové technologie pro využití různých bezdrátových sítí. Někteří světoví mobilní operátoři (např. AT&T, T-Mobile, Vodafone nebo Orange) využívají síť WiFi jako alternativu pro většinu přístupových technologií. Tyto technologie je však nutné neustále zdokonalovat. Studie provedená společností Cisco [3] odhaduje, že v roce 2015 bude 800 milionů terabytů mobilních dat odesláno či přijmuto prostřednictvím metody offloadingu, což bude přibližně 72 % celkového objemu přenesených digitálních dat.

V současnosti se k offloadingu nejčastěji využívají funkce přepojování na základě prahových hodnot SNR či propustnosti, jež jsou rozšířením pro framework 3GPP sítí – ANDSF (Access Network Discovery and Selection Function). Daný framework je obsažen uvnitř EPC a jeho účelem je asistence UE při odhalování non-3GPP přístupových sítí, jako jsou WiFi či WIMAX. Jak již bylo napsáno výše, tyto sítě jsou podle nastavených pravidel použity pro přenos původně mobilních dat. ANDSF

je tedy schopen podílet se na řízení přepojování UE a v současnosti slouží mimo jiné ke kontrole offloadingu. Sofistikovanější offload algoritmy je možné prostudovat v dokumentu [29].

9.2 Vlastní navržená topologie vícenásobného přístupu do bezdrátových sítí

Při návrhu topologie pro implementaci offload mechanismů bylo z velké části čerpáno z vytvořených scénářů z kapitol 6.1 a 8.2. Offload scénář obsahuje implementaci dvou základních bezdrátových sítí – WiFi a LTE. Vysílací body sítí jsou od sebe vzdáleny 300 m a mezi nimi se pohybuje mobilní uzel UE. Při implementaci bylo vytvořeno celkem pět funkčních uzlů – AP reprezentující přístupový bod, pohyblivé UE, eNodeB, PGW a vzdálený host p2p. Navržená topologie včetně umístění jednotlivých uzlů v souřadnicovém systému je ilustrována v obrázku 9.1. UE se pohybuje rychlostí 1,5 m/s od přístupového bodu směrem k eNB a po jejím dosažení se vrací stejnou rychlostí zase nazpět.



Obr. 9.1: Topologie a rozmístění offload scénáře

Uzly jsou v souřadnicovém systému navrženy pouze v osách x a y, nicméně je možné přidat jejich umístění i v rozměru z. Zdrojový kód scénáře je rozdělen do několika základních částí, které jsou uvedeny v následujícím výčtu.

- Globální funkce a proměnné pro nastavení mobility a práci s SNR,
- metody funkce ThroughputCounter,
- iniciální nastavení scénáře,
- definice sítě LTE,
- definice sítě WiFi,
- nastavení mobility jednotlivým uzlům,
- přidělování IP adres jednotlivým uzlům,
- vytvoření datového provozu a trasování,
- vytvoření grafických výstupů ve formě grafů.

Jednotlivé části kódu jsou specifičtěji popsány prostřednictvím komentářů přímo ve zdrojovém kódu umístěném v příloze této práce. Výsledky po implementaci algoritmů pro přepínání jsou následně výsledky vyneseny do Gnuplot grafů throughputTime.plt (vynesení propustnosti v závislosti na čase) a throughputDist.plt (vynesení propustnosti v závislosti na vzdálenosti). Po ukončení simulace jsou tyto soubory zpracovány a automaticky vyobrazeny v příslušných obrázkových png souborech prostřednictvím aplikace Gnome.

Při komunikaci jednotlivých uzlů je nutné, aby každý z nich měl přiděleny identifikační údaje – tedy IP a MAC adresu. V tabulce 9.1 lze zmíněné adresy příslušných uzlů vyhodnoceny.

Tab. 9.1: Adresy jednotlivých síťových uzlů

Název uzlu	IP adresa	MAC adresa
UE, síťová karta WiFi	10.1.3.2	00:00:00:00:00:03
UE, síťová karta LTE	7.0.0.2	00:00:00:00:00:00
Remote host p2p	1.0.0.2	00:00:00:00:00:05
PGW	7.0.0.1	00:00:00:00:00:01
AP	10.1.3.1	00:00:00:00:00:02
eNodeB	10.0.0.6	00:00:00:00:00:07

Datový provoz je vytvořen prostřednictvím Onoff aplikace. Návrh obsahuje dvě Onoff aplikace. Původní záměr byl aplikace spouštět provoz na základě kvalitativních parametrů sítě, v jednu chvíli by tedy byla spuštěna pouze **jedinná** aplikace. V průběhu procesu programování topologie však bylo zjištěno, že po spuštění simulace **nelze Onoff aplikace vypínat a zapínat**. Po počátečním načtení klíčových provozních parametrů (např. app.start, app.stop apod.) již tedy **nelze** s Onoff aplikací

manipulovat a provoz lze definovat **pouze striktním nastavením času spouštění a vypínání**. Přesné zadání této práce tedy **nemohlo** být splněno a pro zprovoznění „přepínání“ musela být vytvořena alternativní metoda. Fyzické přepínání tak vytvořeno **nebylo**.

Reálná funkčnost scénáře je následující. Na pozadí běží od první sekundy simulace dvě Onoff aplikace, jež zajišťují provoz mezi UE a eNB, potažmo UE a AP. Přenesená data se však nijak nezpracovávají a nedochází tak k žádnému výpisu. Uživatel tedy může mít při spuštění simulace pocit, že se žádná data v síti nepřenášejí. Přepínání datového provozu neběží na základě zapínání/vypínání Onoff aplikací LTE a WiFi, ale pouze mezi metodami, jež tato data zpracovávají a vypisují (viz dále).

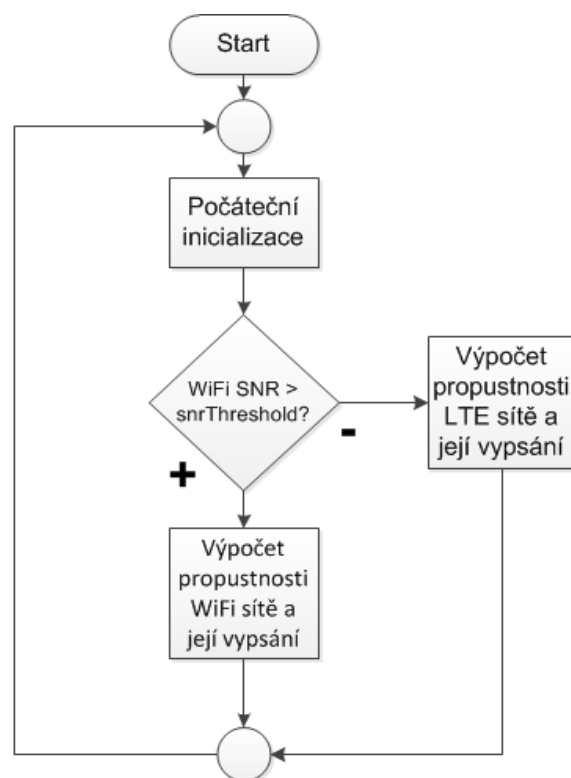
9.2.1 Přepínání komunikace na základě parametru SNR

Pro získání hodnoty parametru SNR byly vytvořeny dvě aplikace ping třídy V4PingHelper, jež slouží k zjištění odezvy na síťových kartách mobilního zařízení UE. Ping má v tomto případě tu výhodu, že je během procesu zjišťování odezvy přeneseno množství 64 kbit dat. Tato data slouží jako prostředek k vynesení hodnot SNR jak pro síťovou kartu LTE, tak pro WiFi. Samotná funkce pro výpočet a výpis hodnoty SNR je vytvořena stejným způsobem, jako v kapitole 8.3.1 – tedy způsobem trace source, trace sink. Tato metoda byla převzata i v případě vynášení hodnoty SNR u sítě WiFi a není využita metoda tagování datového provozu, jež je uvedena v kapitole 6.4.

Poté byla na základě výsledků, jež byly vyhodnoceny v kapitolách 7.1 a 8.3.2, zvolena prahová hodnota zajišťující přepínání mezi LTE a WiFi sítí. Zejména byly porovnány grafy propustnosti a hodnot SNR obou typů sítí v závislosti na vzdálenosti od eNB, respektive od přístupového bodu. Důležitým činitelem při návrhu prahové hodnoty byl poznatek, že reálné sítě LTE jsou v současnosti často přetěžovány a z tohoto důvodu by měla být významná část zátěže přesměrována na síť WiFi. Na základě daných informací byla zvolena prahová hodnota parametru SNR, jež dosahuje 10 dBm pro obě šířky pásma eNB (tedy 3 MHz a 5 MHz). V případě splnění podmínky příslušné prahové hodnoty SNR je upřednostněna síť WiFi a mobilní zařízení se v případě dosažení hodnoty SNR připojí právě k této síti.

Na obrázku 9.2 je vyobrazen vývojový diagram navržené funkce pro přepínání komunikace mezi sítí WiFi a LTE.

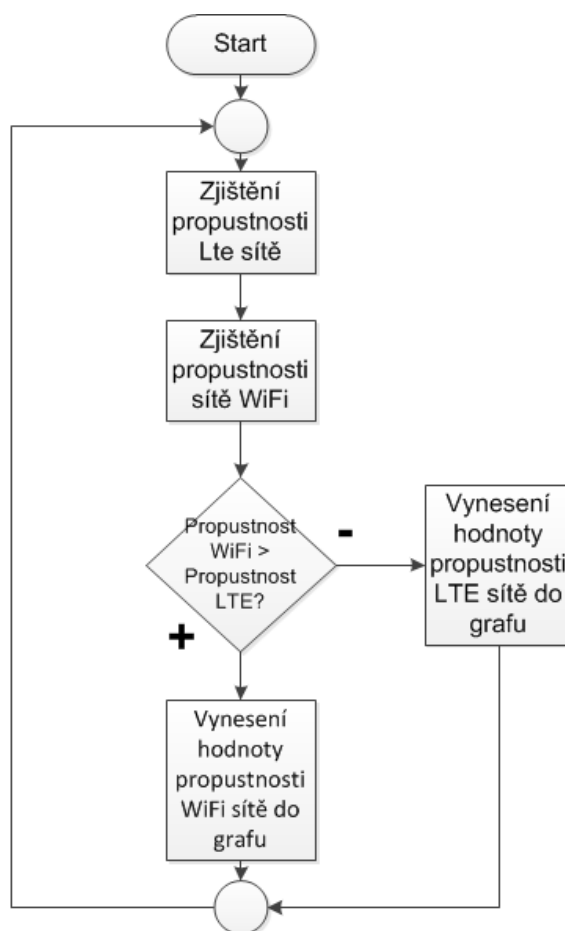
Hodnota parametru SNR je zjišťována každých 0,5 vteřin, propustnost pak každých 0,1 vteřiny.



Obr. 9.2: Vývojový diagram funkce pro přepínání mezi sítěmi Lte a WiFi na základě SNR

9.2.2 Přepínání komunikace na základě propustnosti sítí

Jak bylo zmíněno v kapitole 9.2, pro zajištění datového provozu jsou vytvořeny dvě Onoff aplikace běžící **na pozadí scénáře**. Algoritmus přepínání komunikace na základě propustnosti sítí pracuje následovně. Nejdříve jsou načteny údaje o propustnosti obou sítí, které jsou poté prostřednictvím rozhodovacího bloku srovnány. V případě vyšší hodnoty propustnosti sítě WiFi je do console aplikace Eclipse vypisována hodnota propustnosti této sítě a zároveň se uloží do Gnuplot souborů `throughputDist.plt` a `throughputTime.plt`. Pokud je vyšší propustnost evidována u sítě LTE, případně se hodnoty rovnají, je upřednostněna síť LTE. Do console je v takovém případě vypisována hodnota propustnosti LTE, jež je poté uložena, podobně jako v předchozím případě, do příslušných plt souborů. Popsaný princip je znázorněn ve vývojovém diagramu na obrázku 9.3.



Obr. 9.3: Vývojový diagram funkce pro přepínání mezi sítěmi Lte a WiFi na základě propustnosti

Hodnoty propustností jsou porovnávány každých 0,1 s.

9.3 Výsledky simulací offload scénáře

V této sekci jsou popsány konečné výsledky dvou simulací offload mechanismů – přepínání na základě hodnoty parametru SNR a přepínání na základě srovnání propustností sítí WiFi a LTE. Sekce je rozdělena do dvou kapitol na základě typu přepínání. V kapitole 9.3.1 jsou rozebrány grafické výstupy offload mechanismu přepínání na základě parametru SNR. Kapitola 9.3.2 obsahuje grafické výstupy offload mechanismu přepínání na základě srovnání hodnot propustností.

Obě simulace mají následující průběh. Mobilní zařízení UE zahajuje příslušnou simulaci na úrovni přístupového bodu WiFi sítě, tedy na souřadnicích 0,0,0. Poté se rychlostí 1,5 m/s pohybuje směrem k základnové stanici eNB až do vzdálenosti 300 m, na souřadnice 300,0,0. Pohyb UE je tedy, vzhledem k souřadnicovému systému, čistě horizontální. Po dosažení této vzdálenosti se UE stejnou rychlostí vrací zpět k přístupovému bodu AP. Délka simulací je nastavena na 410 s, což umožňuje dosažení vzdálenosti tam i zpět.

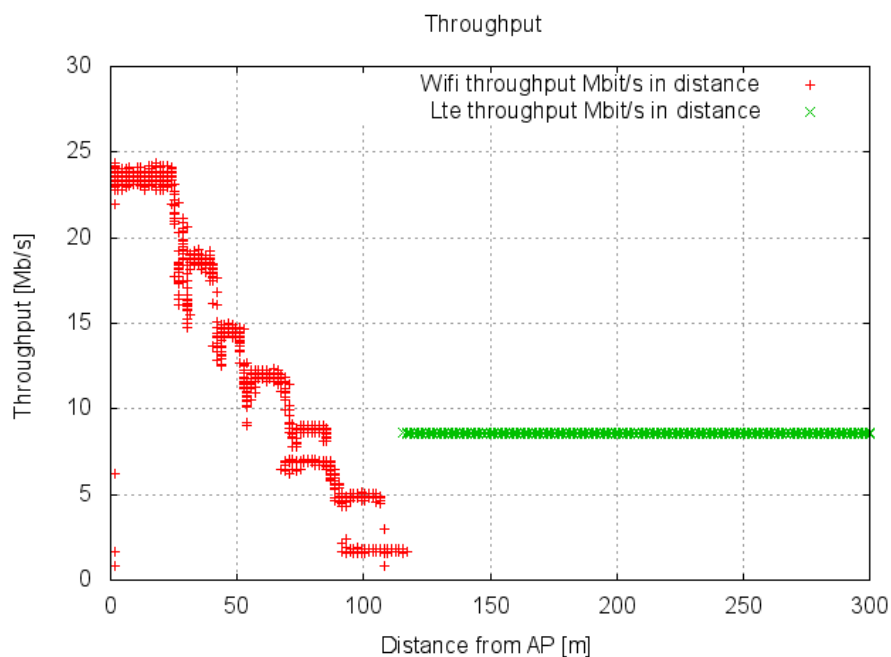
Pro grafické znázornění naměřených hodnot byl v Gnuplot souborech nastaven typ grafu na POINTS. Vynesené hodnoty tak netvoří křivku, ale jsou vyobrazeny pouze bodově. Tento princip vyobrazení byl zvolen z důvodu matoucího vzhledu grafu při nastavení typu grafu LINES, tedy vytváření úseček spojováním naměřených bodů. Problém byl evidován zejména při zobrazení propustnosti v závislosti na čase, kdy např. byly spojeny dva body propustnosti WiFi sítě, i když byla měřena a zpracovávána pouze propustnost sítě LTE. Graf poté působil, jako by byla v jeden moment vynášena propustnost obou sítí. Zaznamenáváním propustnosti bodově byl daný nedostatek odstraněn.

9.3.1 Přepínání komunikace na základě parametru SNR

Na obrázku 9.4 lze pozorovat graf přepínání propustnosti v závislosti na vzdálenosti od AP. Přepínání probíhalo při hodnotě parametru WiFi SNR nižší než 10 dBm. V reálných sítích lze při této hodnotě SNR ještě komunikovat s AP, při nižších hodnotách SNR již nikoliv. Šířka pásma stanice eNB byla nastavena na hodnotu 15 RB, tedy 3 MHz.

Z výsledků je patrné, že UE je „připojeno“ k síti WiFi až do vzdálenosti 117 m od AP a hodnota propustnosti na tomto místě dosahuje hodnoty 1,68 Mbit/s. Poté dojde na základě SNR podmínky k „přepnutí provozu“ do sítě LTE, kde se hodnota propustnosti pohybuje konstantně kolem hodnoty 8,5 Mbit/s. Po dosažení vzdálenosti 300 m se UE vrací zpět k AP a hodnoty propustnosti, včetně momentu přepnutí, jsou již stejné.

Cesta mobilního zařízení UE k eNB a zpět je lépe zachycena na obrázku 9.5.



Obr. 9.4: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 15 RB, přepínání SNR

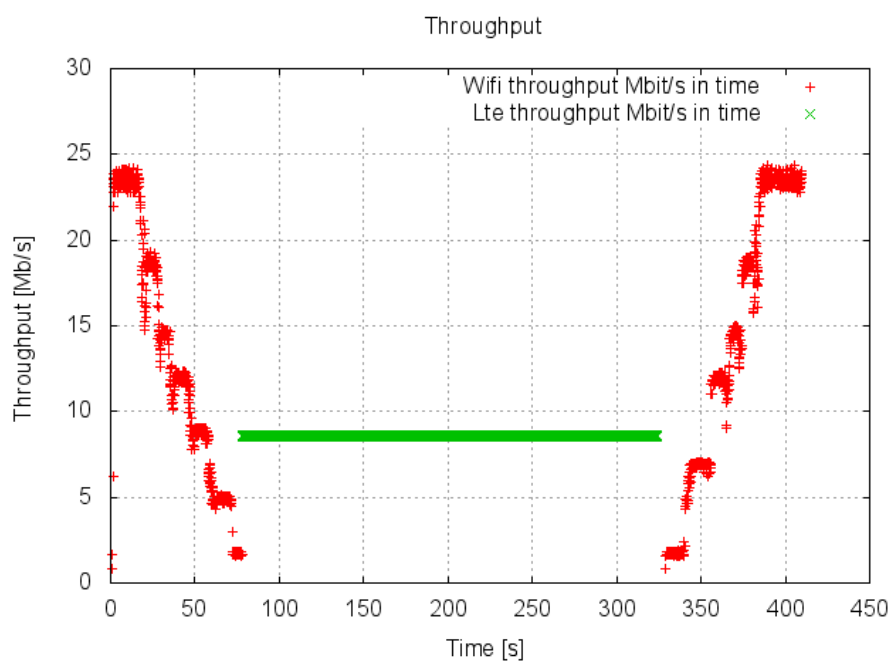
Lze zde odečíst, že přepnutí ze sítě WiFi do sítě LTE dojde v čase 78 s, hodnota propustnosti je v tuto chvíli 1,68 Mbit/s a vzdálenost od AP je po odvození z grafu 9.4 117 m. UDP provoz je poté veden prostřednictvím sítě LTE a k přepnutí zpět do sítě dojde až v čase 324 s opět ve vzdálenosti 117 m od AP.

V grafech 9.6 a 9.7 je možné pozorovat podobně výsledky, jako na předchozích dvou obrázcích. Rozdíl je však v šířce pásma stanice eNB, kdy byla její hodnota nastavena na 25 RB. V takovém případě dosahovala propustnost sítě LTE maximální hodnoty 16,08 Mbit/s. Propustnost se na této hodnotě držela stabilně po celou dobu připojení k síti LTE.

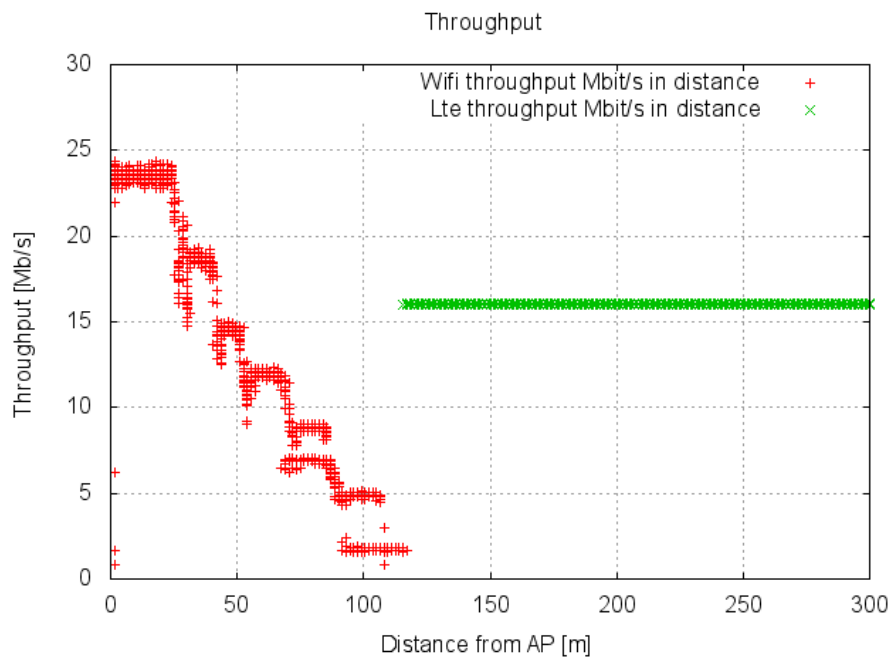
9.3.2 Přepínání komunikace na základě srovnání propustností sítí WiFi a LTE

Obrázek 9.8 je již možné vidět graf přepínání propustností na základě vzájemného porovnávání hodnot sítí WiFi a LTE. Graf znázorňuje hodnoty propustnosti vztahované ke vzdálenosti od AP. Hodnoty jsou do grafu vynášeny principem popsaným v kapitole 9.2.2. Šířka pásma je v tomto případě nastavena na hodnotu 15 RB.

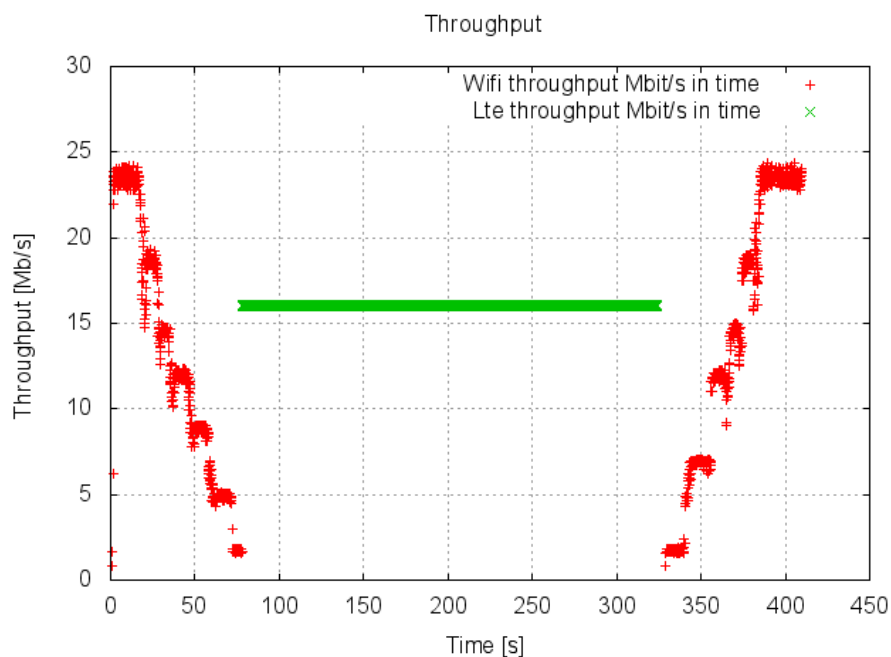
Z grafu lze odečíst, že vyšší propustností až do vzdálenosti přibližně 73 m od AP disponuje síť WiFi. Mezi vzdálenostmi 73 - 83 m od grafů jsou propustnosti sítí na



Obr. 9.5: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 15 RB, přepínání SNR



Obr. 9.6: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 25 RB, přepínání SNR



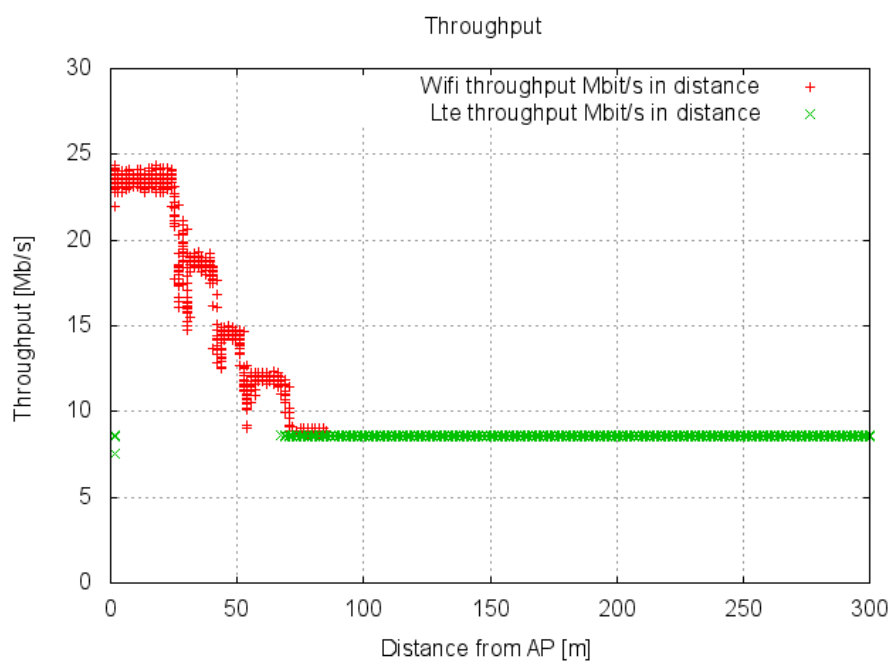
Obr. 9.7: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 25 RB, přepínání SNR

téměř totožné hodnotě a lze tak pozorovat množství „přepnutí“ mezi oběma sítěmi. Od vzdálenosti 85 m pak probíhá datový provoz výhradně sítí LTE. Zelené hodnoty na počátku simulace jsou dány nepřesnostmi výpočtu v čase startu simulace, od této doby však jsou již hodnoty propustností správné. Tato chyba se objevuje i v dále popisovaných grafech.

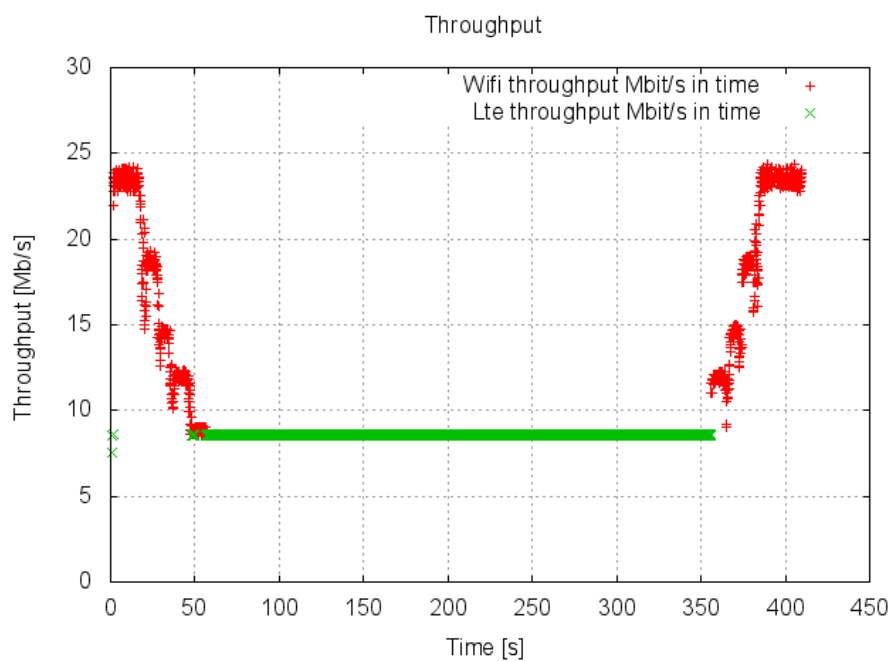
V grafu 9.9 je možné postřehnout stejné výsledky, jako na předchozím obrázku. Hodnoty propustnosti jsou však vztaženy k času, nikoli ke vzdálenosti. Šířka pásma zde byla podobně jako v předchozím případě nastavena na hodnotu 15 RB. Přepínání ze sítě WiFi do sítě LTE probíhá v časovém rozmezí od 54 - 58 s simulace a poté se sítě LTE do WiFi v čase 356 s. Tyto hodnoty reflektují vzdálenosti 73 - 83 m od AP.

Následně byla přenastavena hodnota šířky pásma eNB na hodnotu 25 RB, což zvýšilo nároky na propustnost sítě WiFi. V grafech 9.10 a 9.11 lze pozorovat zvýšení průměrné hodnoty propustnosti, při které proběhne přepnutí provozu mezi sítěmi.

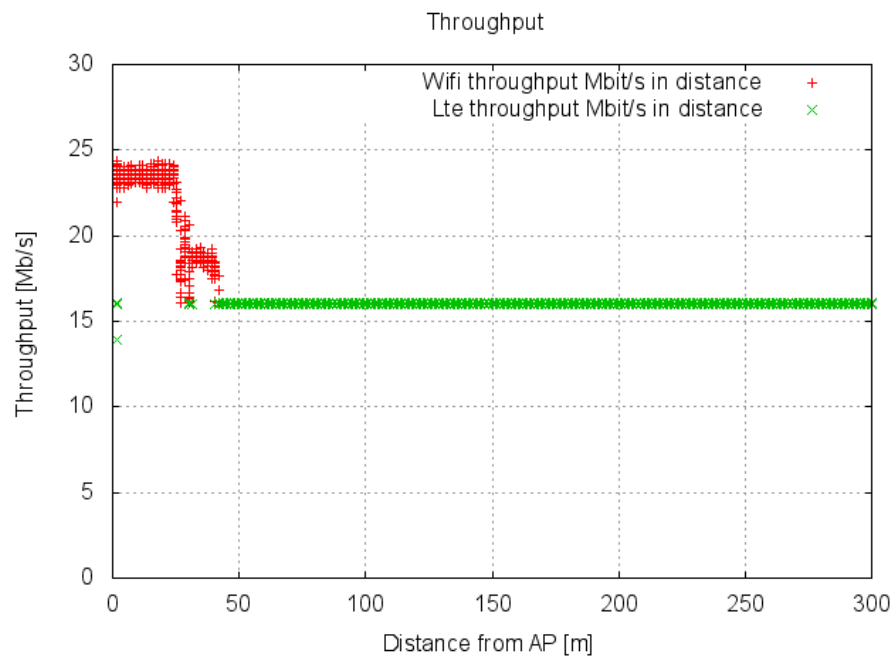
Zvětšením šířky pásma stanice eNB byla navýšena propustnost sítě LTE, jež v průběhu simulace dosahovala hodnot blízkých 16 Mbit/s. Propustnost sítě WiFi dosahovala v porovnání s propustností sítě LTE vyšších hodnot (vyjma několika úseků) až do vzdálenosti 42 m od AP. Poté již propustnost sítě LTE dosahovala vyšších úrovní.



Obr. 9.8: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 15 RB, přepínání propustnost

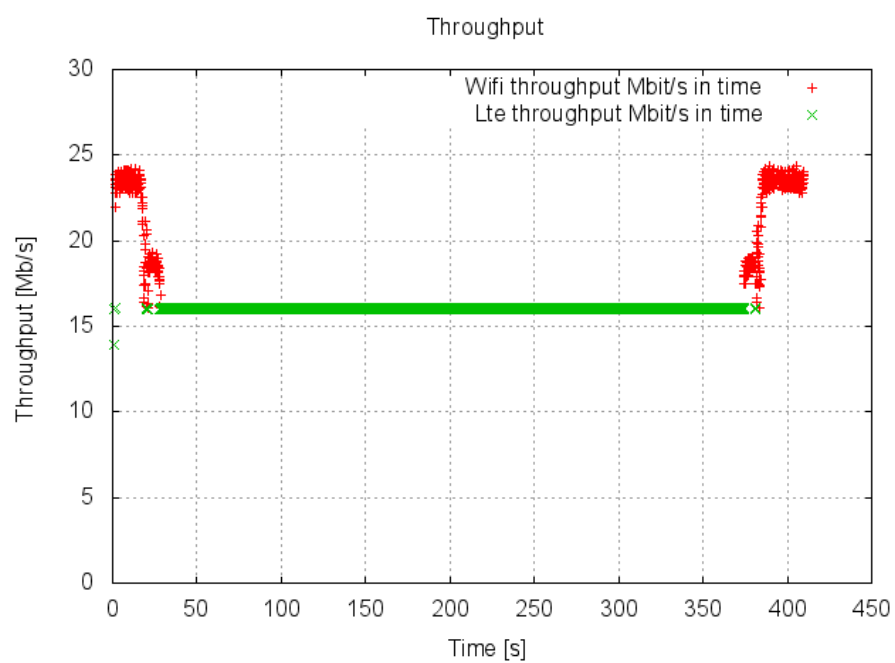


Obr. 9.9: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 15 RB, přepínání propustnost



Obr. 9.10: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na vzdálenosti a při šířce pásma 25 RB, přepínání propustnost

Podobně pak vypadá pohled na obrázek 9.11. Průběh přepínání propustnosti je však vyobrazen v závislosti na čase, čímž lze lépe zachytit přepnutí v momentě dopředného i zpětného pohybu UE. To probíhá v časovém rozmezí 28 - 29 s od počátku spuštění simulace a poté v čase 374 s.



Obr. 9.11: Graf přepínání propustností sítí v závislosti na čase a při šířce pásma 25 RB, přepínání propustnost

10 ZÁVĚR

V teoretické části této práce byl uveden popis bezdrátových a mobilních sítí a také popis identifikátorů sítě. Dále bylo popsáno prostředí Network Simulation 3.18 (NS-3).

Nejdříve bylo nutné realizovat zdrojový kód pro vytvoření základní topologie bezdrátové sítě, jenž byl napsán v prostředí NS-3. Zároveň sloužil k sestavení základní topologie a zajištění mobility uzlu a datového provozu. Poté bylo nutné vytvořit funkční zdrojový kód pro výpočet a zobrazení hodnoty SNR. Pro úspěšné dokončení této části zadání bylo nutné upravit dva soubory. Správnost kódu byla následně ověřena programem Wireshark a také funkčním zobrazením hodnot v konzoli prostředí Eclipse. Dalším krokem praktické části bylo sestavení zdrojového kódu pro zpracování nasimulovaných výsledků a jejich zobrazení do přehledných grafů. Pro tyto účely byly do operačního systému Ubuntu doinstalovány nástroje Gnuplot a Gnome, jež poskytly prostředky pro vytvoření grafu a jeho následného automatického zobrazení na displeji obrazovky.

Poté byl vytvořen zdrojový kód pro simulaci klíčových parametrů v mobilní síti LTE. Byla sestavena topologie, jež se skládala z jednoho pohyblivého UE, základnové stanice eNB a brány PGW. Následně byly prostřednictvím metody tracingu vytvořeny funkce pro zobrazování parametru SNR a výsledky simulace byly přehledně zpracovány do grafů.

V poslední části diplomové práce byla vytvořena topologie vícenásobného přístupu obsahující síť WiFi a LTE. Po analyzování hodnot získaných ze simulací předchozích scénářů byly navrženy metody implementující datový offloading do sítě WiFi. První metoda spočívala v přepínání na základě prahové hodnoty parametru SNR sítě WiFi, druhá metoda pak srovnávala současné hodnoty propustností obou sítí. Při nasazování offloadingových metod do prostředí NS-3 však bylo zjištěno, že ovládání vypínání/zapínání datového provozu onoff aplikace po spuštění simulace není možné. Jako alternativa bylo zvoleno spuštění dvou onoff aplikací na pozadí. Nedošlo tak k fyzickému přepínání datového provozu mezi sítěmi, nýbrž k přepínání metody pro zpracování a výpis propustnosti příslušné sítě. Poté byly získané výsledky vyhodnoceny do podoby grafů.

LITERATURA

- [1] BRANCH, Prepared by Stakeholder Technology. *Wireless local area networks (WLAN) best practices guide* [online]. Edmonton, AB: Alberta Education, 2007 [cit. 2013-12-28]. ISBN 978-077-8564-119. Dostupné z: <<http://education.alberta.ca/media/822010/wirelessbestpracticesguid.pdf>>
- [2] Difference between SDU and PDU. *blog.3g4g.co.uk* [online]. 2009, 25.3. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <<http://blog.3g4g.co.uk/2009/03/difference-between-sdu-and-pdu.html>>
- [3] Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010–2015. *Cisco Visual Networking Index* [online]. IEEE, 2011, s. 1-27 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://newsroom.cisco.com/dlls/ekits/Cisco_VNI_Global_Mobile_Data_Traffic_Forecast_2010_2015.pdf>
- [4] Gnuplot homepage. *Gnuplot homepage* [online]. 2013 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <<http://www.gnuplot.info/>>
- [5] HAGOS, Desta Haileselassie a Rudiger KAPITZA. Study on performance-centric offload strategies for LTE networks. *6th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)* [online]. IEEE, 2013, s. 1-10 [cit. 2014-05-18]. DOI: 10.1109/WMNC.2013.6548999. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6548999>>
- [6] CHENG, Nan, Ning LU, Ning ZHANG, Xuemin SHEN a Jon W. MARK. Vehicular WiFi Offloading. In: *Vehicular WiFi Offloading: Challenges and Solutions* [online]. Waterloo, Ontario, Canada, 201 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <https://ece.uwaterloo.ca/~n7lu/jrnl_13_VCOM_CLZSM.pdf>
- [7] CHOI, Yongmin, Hyun JI, Jae-yoon PARK, Hyun-chul KIM a John SILVESTER. A 3W network strategy for mobile data traffic offloading. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2011, vol. 49, issue 10, s. 118-123 [cit. 2013-12-28]. DOI: 10.1109/MCOM.2011.6035825, ISSN: 0163-6804. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6035825>>
- [8] KOCUR, Zbyněk. Měření v bezdrátových sítích. *Měření v bezdrátových sítích* [online]. 2007, č. 1, s. 1-25 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2819%E2%80%8E>>
- [9] KUMAR, Amit, Dr. Yunfei LIU, Dr. Jyotsna SENGUPTA. Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G to 4G. *Evolution of Mobile Wireless*

- Communication Networks: 1G to 4G* [online]. 2010, č. 1, s. 1-5 [cit. 2013-12-28]. ISSN: 2230-9543. Dostupné z: <<http://www.iject.org/pdf/amit.pdf>>
- [10] LTE? Žádnou mobilní revoluci nečekejte.... In: KOCMAN, Rostislav. *Internetprovsechny.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.internetprovsechny.cz/lte-zadnou-revoluci-v-mobilnich-datech-neprinese/>
- [11] MAŠEK, Ing. Pavel. *QoS model pro mobilní ad hoc sítě*. Brno, 2013. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=63715>. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ing. Pavel Vajsar.
- [12] MME (Mobility Management Entity). *Goinglte.com* [online]. 2009, 18.11. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <<http://www.goinglte.com/glossary/mme-mobility-management-entity/>>
- [13] Mobile Network Evolution: UMTS. In: *Networking — Something Good to Know* [online]. 2010 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <<http://conningtech.wordpress.com/2010/07/28/mobile-network-evolution-umts/>>
- [14] NOHRBORG, Magdalena. LTE Overview. 3GPP.COM. *LTE Overview* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <<http://www.3gpp.org/LTE>>
- [15] Ns-3 Model Library: Release ns-3.19. *Ns-3 Model Library* [online]. IEEE, 2014, s. 1-405 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: www.nsnam.org/docs/models/ns-3-model-library.pdf
- [16] NSNAM. *NS-3 Network Simulator: ns-3 manual* [online]. 2013, 169 s. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <<http://www.nsnam.org/docs/release/3.18/manual/ns-3-manual.pdf>>
- [17] NUBARRÓN, Jefe. Evolution Of Mobile Technology: A Brief History of 1G, 2G, 3G and 4G Mobile Phones. BRIGHTHUB. *Brighthub.com* [online]. 1/12/2011. 2011 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <<http://www.brighthub.com/mobile/emerging-platforms/articles/30965.aspx>>
- [18] Overview of Packet Data Network Gateway Functions. *Juniper.net* [online]. 2013, 14.2. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.juniper.net/techpubs/en_US/junos-mobility12.1/topics/concept/gateways-mobility-pgw-function-overview.html>

- [19] Packet Data Convergence Protocol (PDCP). *Lteworld.org* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <<http://lteworld.org/specification/packet-data-convergence-protocol-pdcp>>
- [20] Radio Link Control (RLC). *Lteworld.org* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <<http://lteworld.org/specification/radio-link-control-rlc>>
- [21] Radio Resource Control (RRC). *Lteworld.org* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <<http://lteworld.org/specification/radio-resource-control-rrc>>
- [22] Serving Gateway Functions Overview. *Juniper.net* [online]. 2013, 14.2. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.juniper.net/techpubs/en_US/junos-mobility12.1/topics/concept/sgw-mobility-functions-overview.html>
- [23] TSIWIRELESS.COM. LTE in a Nutshell: System Overview. *LTE in a Nutshell: System Overview* [online]. 2010, č. 1, s. 1-10 [cit. 2013-12-28]. TSI 100314-002. Dostupné z: <<http://www.tsiwireless.com/docs/whitepapers/LTE%20in%20a%20Nutshell%20-%20System%20Overview.pdf>>
- [24] UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM. [online]. 2012, s. 1-10 [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://ids.nic.in/Tn1_Jces_May%202012/PDF1/pdf/8.ums.pdf>
- [25] Úvod do sítě 3. generace. MILNÁŘ, Jiří. *Umts.wz.cz* [online]. [cit. 2013-12-28]. Dostupné z: <http://www.ums.wz.cz/Mob_radio_site_3G/uvod_do_site_3G.htm>
- [26] Výrazné rozšiřování nejrychlejšího internetu. T-MOBILE CZECH REPUBLIC A.S. *T-mobile.cz* [online]. [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.t-mobile.cz/web/cz/osobni/internet/nejrychlejsi-internet/lte>
- [27] What is LAN, WLAN, WAN, MAN, SAN, CAN, PAN and GAN?. BUSINESS NEWS & EVENTS. *Wireless Network Support* [online]. 2009 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <<http://wireless-network-support.blogspot.cz/2009/08/what-is-lan-wlan-wan-man-san-can-pan.html>>
- [28] What is PLT?. *Coolutils.com* [online]. 2013 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <<http://www.coolutils.com/Formats/PLT>>
- [29] WLAN/3GPP access network selection based on maximum achievable rate metric. *3GPP TSG RAN2 Meeting 81bis* [online]. 2013 [cit. 2014-05-18].

Dostupné z: <http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg2_rl2/TSGR2_81bis/Docs/R2-131348.zip>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AARF Adaptive Auto Rate Fallback

ANDSF Access Network Discovery and Selection Function

AP Access Point

ARF Auto Rate Fallback

BER Bit Error Rate

eNB eNode B

EPC Evolved Packet Core

EPS Evolved Packet System

GSM Global System for Mobile communications

HTTP HyperText Transfer Protocol

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP Internet Protocol

ISO/OSI International Organization for Standardization / Open System
Interconnection

LTE Long Term Evolution

MAC Media Access Control

MME Mobility Management Entity

NS-3 Network Simulator - version 3

P2P Peer to Peer

PDCCP Packet Data Convergence Protocol

PER Packet Error Rate

PGW Packet Data Network GateWay

PHY Physical layer

RB Resource Block

RLC Radio Link Control

RRC Radio Resource Control

RSSI Reference Signal Received Quality

SGW Serving GateWay

SNMP Simple Network Management Protocol

SNR Signal to Noise Ratio

UDP User Data Protocol

UE User Equipment

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

WiFi Wireless Fidelity

WIMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

WLAN Wireless Local Area Network

XML eXtensible Markup Language

YANS Yet Another Network Simulator

SEZNAM PŘÍLOH

A Seznam zdrojových souborů a jejich výstupů

78

A SEZNAM ZDROJOVÝCH SOUBORŮ A JEJICH VÝSTUPŮ

Tab. A.1: Seznam souborů jednotlivých scénářů včetně jejich výstupů

Scénář	Soubor	Výstupní soubory	popis výstupu
WiFi	multi_radio3.cc	multi_radio.xml multi_radio.csv trace.tr multi_radio_ap.pcap multi_radio_sta.pcap multi_radio.flowmon throughput.plt / .png SNR.plt / .png TxPower.plt / .png	soubor NetAnim tabulkový soubor trasovací soubor trasování AP trasování mobilního zařízení serializace Flow Monitoru do XML hodnoty a graf propustnosti hodnoty a graf SNR hodnoty a graf síly signálu
		yans-wifi-phy.cc	
		yans-wifi-phy.h	
LTE	multi_radio3_LTE.cc	multi_radio_LTE.xml multi_radio_LTE.csv ueReport.cwnd throughput.plt / .png SINR.plt / .png SNR.plt / .png multi_radio_LTE.flowmon DlMacStats.txt DlPdcPStats.txt DlRlcStats.txt DlRsrpSinrStats.txt DlRxpPhyStats.txt DlTxPhyStats.txt UlPdcPStats.txt UlRlcStats.txt UlRsrpSinrStats.txt	soubor NetAnim tabulkový soubor vynesení hodnot SNR v čase hodnoty a graf propustnosti hodnoty a graf SINR hodnoty a graf SNR serializace Flow Monitoru do XML údaje Mac vrstvy v dl údaje PdcP vrstvy v dl údaje Rlc vrstvy v dl RSRP a SINR v dl počet odeslaných dat v dl počet přijatých dat v dl údaje PdcP vrstvy v ul údaje Rlc vrstvy v ul RSRP a SINR v ul
		lte-enb-net-device.cc	
		lte-ue-phy.cc	
		lte-ue-phy.h	

Tab. A.2: Seznam souborů offload scénáře včetně jejich výstupů

Scénář	Soubor	Výstupní soubory	popis výstupu
Offload	final-snr.cc / final-throughput.cc	multi_radio.xml	soubor NetAnim
		multi_radio.csv	tabulkový soubor
		trace.tr	trasovací soubor
		lteReport.cwnd	LTE SNR v čase
		wifiReport.cwnd	WiFi SNR v čase
		ThroughputDist	serial. Flow Monitoru
		.flowmon	do XML
		throughputDist.plt/png	hodnoty propustnosti
		ThroughputTime	serial. Flow Monitoru
		.flowmon	do XML
		throughputTime.plt/png	hodnoty propustnosti
		Dl a Ul stats	
		(jako u LTE)	
	lte-enb-net -device.cc		
	lte-ue-phy.cc		
	lte-ue-phy.h		
	yans-wifi-phy.cc		
	yans-wifi-phy.h		