VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2019 Bc. Roman Drápela

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IMPLEMENTACE A VYHODNOCENÍ KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE LTE CAT-M1 V SIMULAČNÍM PROSTŘEDÍ NETWORK SIMULATOR 3

IMPLEMENTATION OF COMMUNICATION TECHNOLOGY LTE CAT-M1 UTILIZING THE NETWORK SIMULATOR 3

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Roman Drápela**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Pavel Mašek, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Roman Drápela ***ID:*** 173639
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Implementace a vyhodnocení komunikační technologie LTE Cat-M1 v simulačním prostředí Network Simulator 3

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude studium nastupujících 3GPP bezdrátových komunikačních technologií Narrow-band IoT (NB-IoT) a LTE Cat-M1 (LTE-M). Následně bude provedena implementace komunikačních scénářů pro přenos Machine-to-Machine (M2M) dat v síťovém simulačním nástroji Network Simulator 3 (NS-3). V teoretické části práce bude provedeno porovnání dostupných LPWAN technologií, kdy bude důraz kladen zejména na detailní analýzu technologií LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT a LTE Cat-M1. Následná praktická část se bude sestávat z vytvoření M2M komunikačního scénáře s využitím modulu LENA (podpora LTE/LTE-A). Student dále navrhne a implementuje úpravy modulu LENA dle dokumentace pro možnost využití komunikační technologie LTE Cat-M1. Výstupem práce bude přehledně zpracovaný soupis změn a diskuze dosažených výsledků komunikačního scénáře využívajícího technologii LTE Cat-M1.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LIBERG, Olof, Mårten SUNDBERG, Y.-P. Eric WANG, Johan BERGMAN a Joachim SACHS, [2018]. Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance. San Diego, CA, United States: Academic Press, an imprint of Elsevier. ISBN 978-012-8124-581.

[2] Network Simulator 3: Documentation, A Discrete-Event Network Simulator [online], 2018. Dostupné z: https://www.nsnam.org/doxygen/

Termín zadání: 1.2.2019 ***Termín odevzdání:*** 16.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Pavel Mašek, Ph.D.
Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá implementací komunikační technologie LTE Cat-M1 v simulačním nástroji NS-3 (Network Simulator 3). V teoretické části práce jsou shrnuty klíčové pojmy týkající se IoT (Internet of Things), M2M (Machine-to-Machine) komunikace, mobilních sítí LTE (Long Term Evolution) a LPWA (Low-Power Wide Area) sítí. Praktická část práce shrnuje možnosti aktuálně dostupných modulů pro celulární technologie pro NS-3, tj. modul LENA a následné rozšíření LENA+ a ELENA. Následně vytvořené simulační scénáře nabízí porovnání technologií LTE/LTE-A a LTE Cat-M1 (označována také jako eMTC - enhanced Machine Type Communication) pro M2M komunikaci. Výsledky simulací jsou přehledně zpracovány formou grafů a diskutovány v závěru práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Internet věcí, IoT, LPWA, Narrowband IoT, NB–IoT, LTE, LTE Cat-M1, eMTC, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, NS–3, LENA, ELENA

ABSTRACT

Diploma thesis deals with the implementation of LTE Cat-M1 technology in simulator NS–3 (Network Simulator 3). The theoretical part of the thesis summarizes key terms concerning IoT (Internet of Things), M2M (Machine-to-Machine) communication, LTE (Long Term Evolution) and LPWA (Low-Power Wide Area) networks. The practical part summarizes the possibilities of currently available modules for cellular technologies for NS-3, ie. the LENA module and the subsequent extension of LENA+ and ELENA. Simulation scenarios offer a comparison of LTE/LTE-A and LTE Cat-M1 (also known as eMTC - enhanced Machine Type Communication) technologies for M2M communication. The results of the simulations are well-arranged in the form of graphs and discussed at the end of the thesis.

KEYWORDS

Internet of Things, IoT, LPWA, Narrowband IoT, NB–IoT, LTE, LTE Cat-M1, eMTC, Sigfox, LoRa, LoRaWAN, NS–3, LENA

DRÁPELA, Roman *Implementace a vyhodnocení komunikační technologie LTE Cat-M1 v simulačním prostředí NS-3*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2018. 95 s. Vedoucí práce byl Ing. Pavel Mašek, Ph.D.

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 2.61; `<http://latex.feec.vutbr.cz>`

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Implementace a vyhodnocení komunikační technologie LTE Cat-M1 v simulačním prostředí NS-3“ jsem vypracoval(a) 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(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Velmi rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlovi Maškovi, Ph.D. za jeho podporu, odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Velmi si cením jeho trpělivosti a motivace.

Brno ....

podpis autora(-ky)

Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
http://www.six.feec.vutbr.cz

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této 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(-ky)

Tato práce vznikla jako součást klíčové aktivity KA6 - Individuální výuka a zapojení studentů bakalářských a magisterských studijních programů do výzkumu v rámci projektu OP VVV Vytvoření double-degree doktorského studijního programu Elektronika a informační technologie a vytvoření doktorského studijního programu Informační bezpečnost, reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_018/0002575.

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Projekt je spolufinancován Evropskou unií.

OBSAH

Úvod **14**

1 Internet věcí - IoT **15**
1.1 M2M komunikace . . . 16
1.2 Sítě LPWA . . . 16

2 Bezdrátové komunikační technologie 3GPP **19**
2.1 LTE . . . 19
2.1.1 Vývoj mobilních sítí . . . 19
2.1.2 Základní architektura EPS . . . 21
2.1.3 Frekvenční pásma LTE . . . 22
2.1.4 Radiové zdroje LTE . . . 23
2.1.5 LTE frekvenční pásma . . . 25
2.1.6 Mechanismy úspory energie . . . 26
2.2 LTE Cat-M1 . . . 28
2.2.1 Technická specifikace . . . 28
2.3 Narrowband IoT . . . 33
2.3.1 Technická specifikace . . . 33

3 Bezdrátové technologie IoT v bezlicenčním pásmu **36**
3.1 Sigfox . . . 36
3.1.1 Technická specifikace . . . 36
3.2 LoRa a LoRaWAN . . . 37
3.2.1 Technická specifikace . . . 38

4 Síťový simulátor NS–3 **40**
4.1 NS–3 . . . 40
4.2 Modul LENA . . . 41
4.3 Modul ELENA . . . 45
4.4 Kanály LTE modulu v NS-3 . . . 47
4.4.1 Struktura subrámce . . . 47
4.4.2 Implementace PHY kanálů v NS-3 . . . 48
4.4.3 Kontrolní informační zprávy . . . 49

5 Simulační scénáře **51**
5.1 Úvodní scénář . . . 51
5.2 Rozšířený testovací scénář . . . 54
5.2.1 Přiřazení UE k eNodeB . . . 56

5.2.2 Zdroj datového toku 57
5.2.3 Konfigurace scénáře 60

6 Výsledky simulací **64**

7 Závěr **74**

Literatura **75**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **82**

Seznam příloh **86**

A Příloha - Zdrojové kódy **87**

B Obsah přiloženého CD **89**

C Srovnání bezdrátových LPWA technologií **90**

D Podpůrný software **92**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Vrstvy Internetu věcí. 15
1.2 Přehled bezdrátových komunikačních technologií. 17
1.3 Ukázka topologie LPWA sítí. 17
2.1 Mobilní sítě a jejich vývoj od GSM po LTE. 20
2.2 Obecná topologie EPS. 21
2.3 Rámcová struktura LTE. 23
2.4 Zdrojové bloky - zdrojové elementy. 24
2.5 LTE Nosné. 24
2.6 Příklad systému LTE o šířce frekvenčního pásma 5 MHz. 25
2.7 Úsporný režim PSM. 26
2.8 LTE Funkce eDRX. 27
2.9 Downlink kanály a signály LTE-M. 30
2.10 Uplink kanály a signály LTE-M. 30
2.11 Protokolový zásobník LTE/LTE-M. 32
2.12 Ukázky možných scénářů vysílání technologie Narrowband IoT. . . . 34
2.13 Testovací měření technologie Narrowband IoT. 35
3.1 Časově-frekvenční diverzita technologie Sigfox. 37
3.2 Architektura protokolu LoRaWAN. 38
3.3 Typická architektura sítě LoRaWAN. 39
4.1 Softwarová organizace NS3. 40
4.2 Přehled LENA simulačního modelu. 42
4.3 Architektura LTE sady protokolů pro UE v datové rovině (data plane). 43
4.4 Architektura LTE sady protokolů pro UE v řídící rovině (control plane). 44
4.5 Protokolové sady LTE v datové rovině (data plane) pro end-to-end spojení. 45
4.6 Fyzické kanály simulátoru NS-3. 47
4.7 Diagram dědičnosti třídy LteControlMessage. 48
4.8 Graf volání funkce SendControlChannels. 49
4.9 Digram tříd ns3::LteControlMessage. 49
5.1 Ukázka animace v programu NetAnim. 51
5.2 Graf vytvořený v programu Gnuplot - průměrná datová rychlost. . . . 54
5.3 Ukázka topologie rozšířeného scénáře v programu NetAnim. 55
5.4 Rozdělení času simulace. 55
5.5 Digram tříd LteUeNetDevice a LteEnbNetDevice. 60
5.6 Digram tříd LtePhy. 61
5.7 Digram třídy LteAmc. 62
6.1 Zjednodušené schéma architektury simulace. 65

6.2 Schéma hlavních tříd LTE Modulu v NS-3. 66
6.3 Datová rychlost upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB. 67
6.4 Ztrátovost upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB. 68
6.5 Zpoždění upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB. 69
6.6 Datová rychlost upload - konfigurace LTE Cat-M1. 70
6.7 Zpoždění upload - konfigurace LTE Cat-M1. 70
6.8 Ztrátovost upload - konfigurace LTE Cat-M1. 71
6.9 Datová rychlost – kritický souběh 500 UE. 72
6.10 Ztrátovost upload – kritický souběh 500 UE. 72
6.11 Zpoždění upload – kritický souběh 500 UE. 73
D.1 Ukázka vývojového prostředí Eclipse. 93
D.2 Ukázka animátoru NetAnim. 94
D.3 Ukázka analyzátoru Wireshark. 95

SEZNAM TABULEK

2.1 Přehled regionálních přiřazení LTE frekvenčních pásem. 22
2.2 Rozdělení NB a PRB v systémech LTE. 25
2.3 Přehled kanálů pro LTE-M. 29
2.4 Maximální počet opakování CE režimu A a B. 29
2.5 Přehled datových rychlostí pro kanál PDSCH (HD–FDD) pro 23 dBm LTE Cat-M1 zařízení. 31
2.6 Přehled datových rychlostí pro Uplink na fyzické vrstvě v režimu HD–FDD pro 23 dBm LTE Cat-M1 zařízení. 31
5.1 Specifikace SRS signálu 3GPP TS 36.213. 60
6.1 Hlavní parametry simulace. 64
C.1 Srovnání bezdrátových LPWA sítí. 91

SEZNAM VÝPISŮ

5.1 Definice Bulk aplikace. 52
5.2 Definice PacketSink aplikace. 52
5.3 Ukázka výstupu modulu FlowMonitor – xml soubor. 53
5.4 Ukázka výstupu modulu FlowMonitor – konzole. 53
5.5 Definice funkce přiřazení UE k eNodeB. 56
5.6 Volání funkce přiřazení. 56
5.7 Definice metody pro přijímání paketů. 57
5.8 Definice metody vysílání paketů. 57
5.9 Definice metody SendPacket pro vysílání paketů. 58
5.10 Definice metody ResetToIdle pro uvolnění prostředků. 59
5.11 Modifikace zdrojového kódu lte-end-rrc.cc. 61
5.12 Změna výchozí hodnoty – SRS periodicita. 62
5.13 Změna výchozí hodnoty – MCS a CQI. 62
5.14 Úprava parametrů vysílání. 63

ÚVOD

V dnešní době nabývají na popularitě sítě zvané LPWA (Low-Power Wide-Area). Pomocí těchto sítí lze uskutečnit odlehčenou M2M (Machine-to-Machine) komunikaci senzorických zařízení. Svoje uplatnění nacházejí například v zabezpečovací technice, oblasti chytrých měst (SmartCities), inteligentního zemědělství (SmartFarming), infrastruktury chytrých měřících zařízení se vzdáleným odečtem (SmartGrid Infrastructure) atd. LPWA sítě podporují vizi IoT (Internet of Things), která představuje propojení velkého množství zařízení s možností síťové komunikace do Internetu. Na zvyšující se počet potenciálních aplikací reagují telekomunikační společnosti, které nabízí technologie pro přenos M2M dat v licenčním či bezlicenčním pásmu.

Diplomová práce bude zahrnovat vybrané bezdrátové komunikační technologie, které do této kategorie spadají. Jsou jimi LTE (Long Term Evolution) Cat-M1 a Narrowband IoT definované organizací 3GPP (Third Generation Partnership Project), pracující v licencovaném frekvenčním pásmu. A technologie Sigfox a LoRaWAN, pracující v bezlicenčním pásmu. Následně bude provedeno srovnání jejich technických parametrů.

Zvolená technologie LTE Cat-M1 bude simulována pomocí LTE modulu v simulátoru NS–3 (Network Simulator 3) s modifikacemi dle standardu 3GPP 13. vydání. Úpravy se budou týkat především fyzické vrstvy, např. úprava vysílacího výkon UE (User Equipment) a eNodeB (eUTRAN Node Base), omezení modulačních a kódových schémat atd.

Práce bude obsahovat popis provedených úprav a konkrétní konfigurace scénáře, aby bylo možné vytvořit komunikační scénář implementující vybranou technologii a následně vyhodnotit komunikační parametry. Simulace proběhne také nad scénářem s LTE/LTE-A pro možnost srovnání obou technologií. Scénáře proběhnou s různou zátěží a budou vyhodnoceny s ohledem na datový přenos systému, zpoždění a ztrátovost paketů během přenosu. Na závěr budou všechny výsledky simulací shrnuty a vyhodnoceny.

1 INTERNET VĚCÍ - IOT

Interet věcí nebo také IoT (Internet of Things) je aktuálním trendem odvětví informačních a komunikačních technologií ICT (Information and Communication Technologies) [1]. Reprezentuje vizi budoucího komunikačního světa, kde bude díky všudypřítomné konektivitě a novým komunikačním přístupům možné připojit i dříve neuvažovaná zařízení, která budou zasílat data pro pozdější vyhodnocení a zlepšení uživatelského zážitku [2].

Typické koncové zařízení Internetu věcí je senzor nebo zařízení, které nedisponuje vysokým výkonem a má omezenou kapacitu elektrické energie (pokud je napájeno z baterie).

Velkého významu nabývají pro IoT technologie typu LPWA (Low-Power Wide-Area) v kontextu M2M (Machine-to-Machine) komunikace. Podle Cisco [3] bude v roce 2021 přeneseno 46 % veškerého datového provozu s využitím mobilních sítí 4G+ (23 % v roce 2016) a 31 % datového provozu přes sítě LPWA (nárůst ze 7 % v roce 2016). Na každou osobu připadne 3,5 zařízení připojených do IP sítí. Provoz z bezdrátových a mobilních zařízení bude v roce 2021 představovat více než 63 % celkového provozu sítě [4]. Z toho je patrné, že IoT bude v následujících letech klíčovou oblastí v komunikačních sítích.

Obr. 1.1: Vrstvy Internetu věcí [5].

Komponenty IoT lze charakterizovat čtyřmi vrstvami (zobrazeno na obr. 1.1). První vrstva zahrnuje všechny senzory, jejich uzly, RFID (Radio Frequency Identification) identifikátory atd. Nazývá se Snímací vrstva (Sensing Layer). Data generovaná Snímací vrstvou jsou shromažďována do dostupných datových úložišť ve druhé vrstvě. Proto se druhá vrstva nazývá Shromažďovací vrstva (Aggregation Layer). Třetí je Procesní vrstva (Processing Layer), zde dochází k dalšímu zpracování dat. Po dokončení procesování mohou být data přenesena do vzdáleného síťového úložiště ve vrstvě Cloud (čtvrtá vrstva), aby byla přístupná odkudkoliv z veřejné sítě [5, 6].

1.1 M2M komunikace

Komunikace M2M, někdy také nazývána MTC (Machine Type Communication), je úzce spjatá s trendem IoT. Jedná se o přímou komunikaci dvou a více zařízení bez nutnosti lidského zásahu. Převážně se jedná o zařízení s omezeným zdrojem energie a výpočetních prostředků [7]. Velmi důležitý je i energeticky účinný a škálovatelný směrovací protokol. Škálovatelnosti lze dosáhnout seskupením zařízení hierarchicky nebo v M2M uzlech [5].

Požadavky na M2M sítě pro komunikaci jsou specifikovány na [7]:

- nízkou spotřebu energie,
- maximální dosah,
- tolerovatelnou latenci (jednotky až desítky sekund),
- omezenou datovou propustnost (desítky až stovky kb/s) atd.

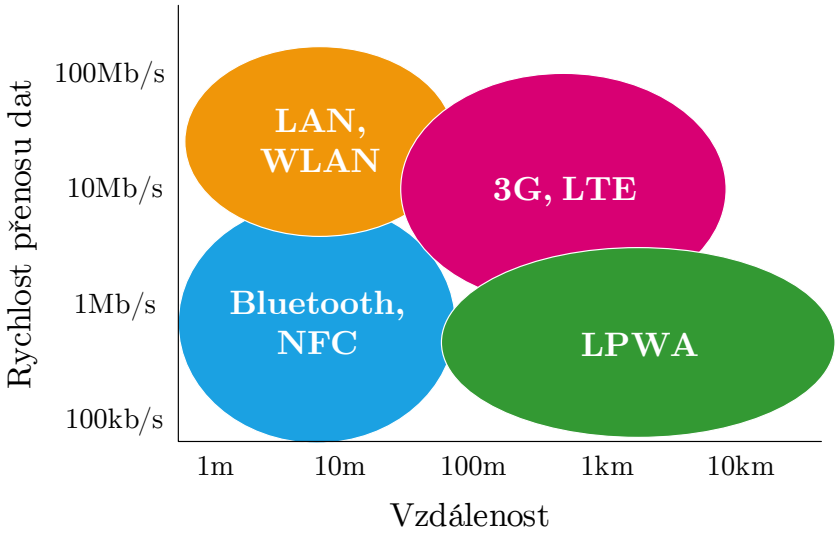
Protože jsou zařízení při M2M komunikaci v LPWA sítích většinou napájeny z baterií (teploměr, akcelerometr, snímač pohybu, vlhkosti, kvality ovzduší atd.), mohou se vyskytovat prakticky kdekoliv. Z tohoto důvodu jsou požadavky na nízkou spotřebu a prodlouženou komunikační vzdálenost (jednotky až desítky kilometrů) klíčové [7].

Bohužel potřeby na M2M komunikaci nemohou být splněny sítěmi určenými pro běžné uživatele (např. 4G). Proto vznikaly technologie, které se snažily těmto nárokům přiblížit. Skupina těchto technologií se nazývá LPWA technologie [7].

1.2 Sítě LPWA

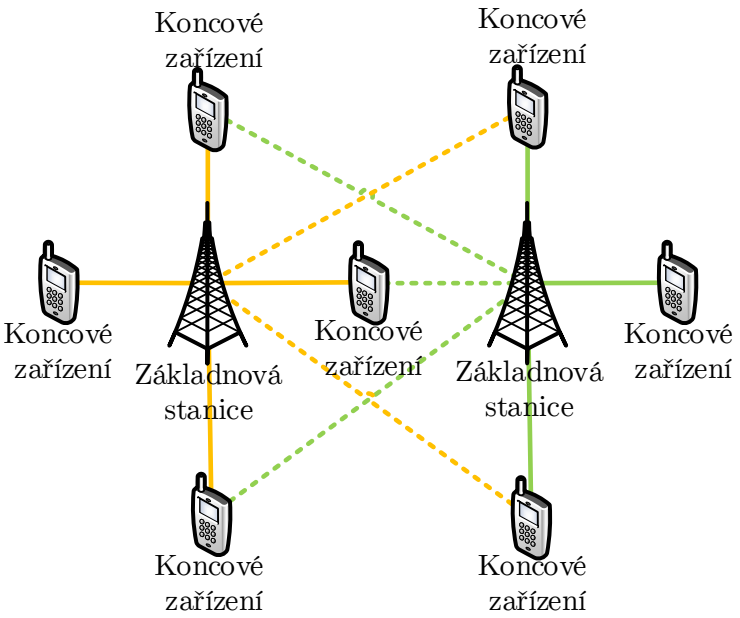
Sítě LPWA byly vytvořeny pro přenos omezeného množství dat (jednotky až desítky bajtů) na velkou vzdálenost (jednotky až desítky km) s co největší úsporou vysílacího výkonu (desítky mW/dBm) [8]. Tyto sítě jsou v dnešní době moderní a komerčně zajímavé, protože dovolují konektivitu i mimo běžný dosah pokrytí, např. pod zemí nebo v odlehlých oblastech [9].

LPWA sítě jsou velmi důležité především pro samotnou existenci vize IoT. Pro svoje unikátní vlastnosti mají důležité místo v porovnání s ostatními dostupnými technologiemi jakými jsou bezdrátové sítě krátkého dosahu např. Bluetooth, NFC, ZigBee, standardní bezdrátové sítě jako je Wi-Fi a cellulární sítě např. GSM (Global System for Mobile Communications), LTE (Long Term Evolution) atd. [10]. Srovnání LPWA s ostatními technologiemi je zobrazeno na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Přehled bezdrátových komunikačních technologií [11].

Typicky mají LPWA sítě topologii typu hvězda nebo využívají buňkový systém, ve kterém je koncové zařízení připojeno k serveru skrze základnové stanice (BTS – Base Transceiver Station, NodeB, eNodeB, gNodeB) [12]. Možnou topologii zobrazuje obr. 1.3. Většina LPWA sítí umožňuje současně přenášet data k centrálnímu síťovému serveru přes více základnových stanic (na obr. 1.3 čárkovaně) [12].



Obr. 1.3: Ukázka topologie LPWA sítí [13].

Příkladem LPWA technologií je proprietární Sigfox nebo LoRa (definuje pouze fyzickou vrstvu referenčního modelu ISO/OSI) s otevřeným zdrojovým kódem. Síť je nazývaná LoRaWAN (Long-Range Wide-Area Network) podle protokolu definujícího linkovou vrstvu ISO/OSI.

Dalšími LPWA technologiemi představenými mezinárodní standardizační organizací 3GPP (13. vydání) jsou [14]:

- LTE Cat-M1 (také eMTC - enhanced Machine Type Communication),
- NB–IoT (Narrowband IoT).

Vzhledem k tomu, že 3GPP doporučuje integraci eMTC a NB-IoT s technologií Long Term Evolution, mohou být tyto technologie podporovány upgradem softwaru nad existující infrastrukturu LTE [15].

2 BEZDRÁTOVÉ KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE 3GPP

Tato kapitola se zaměřuje na bezdrátové komunikační technologie standardizované skupinou 3GPP pracující v licencovaném frekvenčním spektru. Popsán je vývoj mobilních sítí s ohledem na paketový přenos, popsány jsou vlastnosti a funkce systému LTE. Dále jsou charakterizovány technologie LTE Cat-M1 a Narrowband IoT spadající mezi LPWA sítě.

2.1 LTE

LTE a nebo také EPS (Evolved Packet System) je komunikační standard pro celulární (buňkové) sítě definovaný mezinárodní standardizační skupinou 3GPP (8. vydání). EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network) popisuje přístupovou část sítí. LTE nabízí vysokorychlostní bezdrátové připojení do sítě, které uspokojují rostoucí poptávku po datovém provozu koncových uživatelů [16].

Hlavními požadavky na přístupovou síť eUTRAN jsou [17]:

- vysoká spektrální účinnost (2–3× vyšší než u 6. vydání standardu 3GPP [18]),
- vysoké přenosové rychlosti (desítky až stovky Mb/s),
- nízké obousměrné zpoždění – round-trip time (jednotky ms),
- flexibilita frekvence a šířky pásma.

2.1.1 Vývoj mobilních sítí

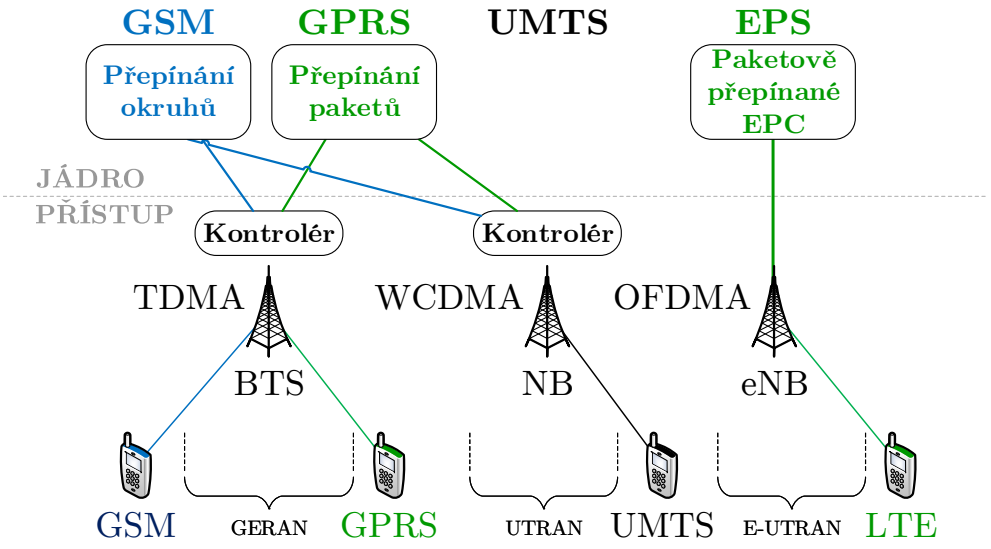
Sítě GSM (na obr. 2.1 vyznačeny modře) byly vyvinuty pro hlasové služby s možností přenosu dat pouze přes přepojování okruhů. Síť dovoluje pouze velmi malé datové přenosy (do 9,6 kb/s). V přístupové síti je použita metoda TDMA (Time Division Multiple Access) [17].

Prvními kroky k datovému přenosu založenému na IP protokolu s přepojováním paketů (na obr. 2.1 vyznačeny zeleně) bylo definování standardu GPRS (General Packet Radio Service). Ten podporuje 4 kódová schémata (CS1, CS2, CS3, CS4). V závislosti na podmínkách při přenosu (a podle použití patřičného kódového schématu) může dosáhnout datové rychlosti 9,05 – 21,4 kb/s na jeden time-slot. Teoreticky při použití všech 8 time-slotů (a při použití CS4) dosáhne rychlosti až 160 kb/s [19]. Používá stejné rozhraní přístupu a přístupové metody jako GSM [17].

Pro dosažení vyššího datové přenosu (až 2 Mb/s) byla v sítích UMTS (Universal Mobile Terrestrial System) vyvinuta nová metoda přístupu WCDMA (Wide-

band Code Division Multiple Access). Přístupová síť emuluje spojení s přepojováním okruhů pro real-time služby a spojení s přepojováním paketů pro datové služby (na obr. 2.1 vyznačeno černě). UMTS stále využívá jádro GSM/GPRS, které je založeno na přepojování okruhů [17].

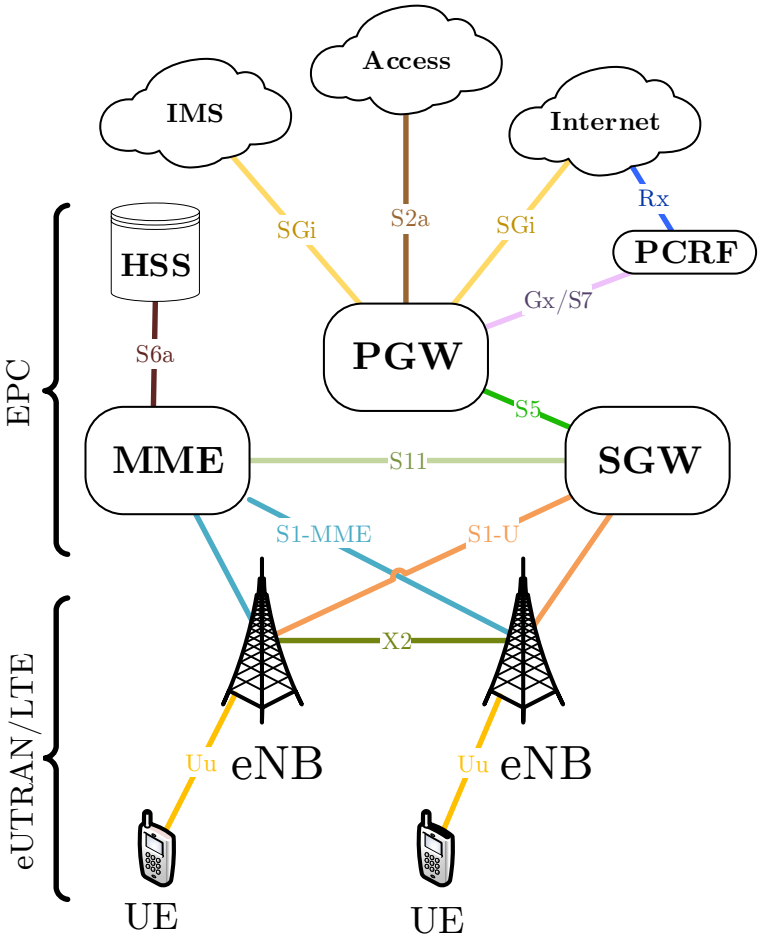
Aktuálně používané sítě EPS (na obr. 2.1 vyznačeno zeleně vpravo) jsou zcela založené na IP protokolu s přepojováním paketů (pro hlasové i datové služby). IP adresa je alokována při registraci mobilního terminálu do sítě a při vypnutí je uvolněna [17]. Nové řešení přístupu LTE je založené na OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) a je kombinováno s modulací vysokého řádu (64QAM a vyšší), šířkou pásma až 20 MHz a prostorovým multiplexem (MIMO až 4×4).



Obr. 2.1: Mobilní sítě a jejich vývoj od GSM po LTE [17].

Teoretické maximum datového přenosu na transportní vrstě je až 75 Mb/s uplink a pomocí prostorového dělení až 300 Mb/s downlink (hodnoty pro UE kategorie 5, 8. vydání) [17].

2.1.2 Základní architektura EPS



Obr. 2.2: Obecná topologie EPS [20].

Mobilní síť LTE, velmi podobně jako ostatní sítě, obsahuje přístupovou rádiovou síť označovanou jako eUTRAN a páteřní síť EPC (Evolved Packet Core). Základní architektura modelu EPS je zobrazena na obr. 2.2.

Pomocí rozhraní eUTRAN (na obr. 2.2 jako Uu) se LTE terminály (na obr. 2.2 značeny jako UE – User Equipment) připojují do sítě. To probíhá zkrze základnové stanice označované eNB nebo eNodeB (eUTRAN Node Base), což je také jediný prvek eUTRAN [20].

Páteřní síť EPC obsahuje prvky HSS (Home Subscriber Server), MME (Mobility Managment Entity), SGW (Serving Gateway) a PGW (Packet data network Gateway). Prvek PCRF (Policy control and Chargig Rules Function) byl do struktury

přidán z důvodu zavedení mechanizmů politiky k poskytování služeb a pravidel pro účtování [20].

Propojení eUTRAN k páteřní síti EPC je přes rozhraní S1-U (přenos uživatelských dat) a S1-MME (pro přenos řídících zpráv). Rozhraní X2 slouží k propojení základnových stanic z důvodu realizace rychlého handoveru. Toto rozhraní je tvořeno optickým vláknem [20].

Rozhraní páteřní sítě [20]:

- S5 – propojení SGW a PGW,
- SGi – pro napojení do externí IP sítě (Internetu),
- S6a – řídící komunikace mezi domovským serverem HSS a MME,
- S11 – řídící zprávy mezi SGW a MME,
- S7 – propojení PCRF a PGW,
- Gx – propojení PCRF a PCEF,
- Rx – propojení PCRF a IP sítě.

2.1.3 Frekvenční pásma LTE

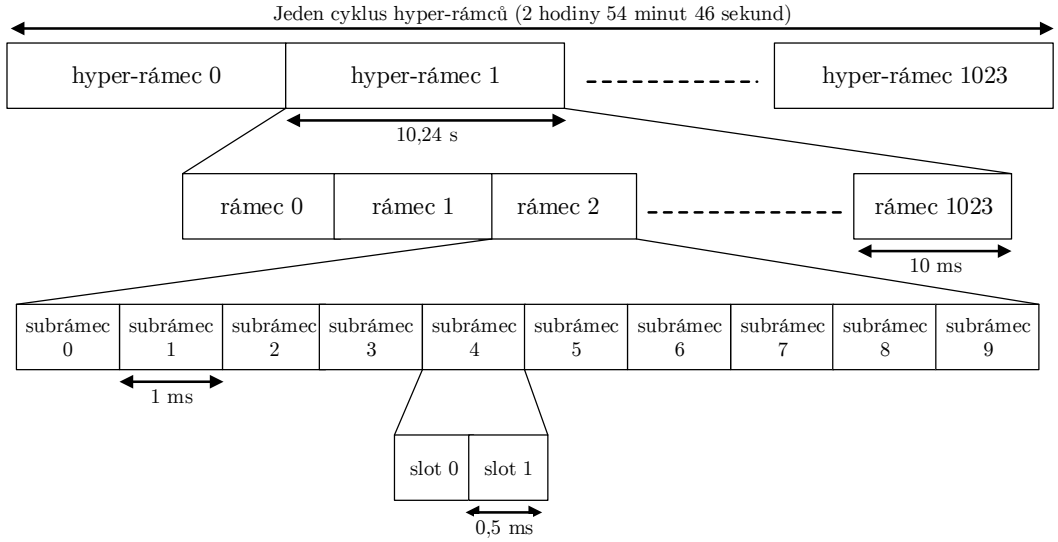
Frekvenční pásma přidělená pro LTE se v různých zemích světa liší. Existují dva typy frekvenčních pásem LTE – FDD (Frequency-Division Duplex) a TDD (Time-Division Duplex). Při použití FDD (pásma 1–32, 65–76 a 85) se každé LTE pásmo skládá z dvojice frekvencí, jedna pro uplink a druhá pro downlink. Pro TDD (pásma 33–52) dostačuje pouze jedno frekvenční pásmo, které se používá jak pro uplink, tak pro downlink [21]. Stručný výčet regionálně přidělených frekvenčních pásem a jejich frekvencí je zobrazen v tab. 2.1.

Tab. 2.1: Přehled regionálních přiřazení LTE frekvenčních pásem [22].

	Frekvenční pásmo	
Region	**Označení**	**Frekvence [MHz]**
Severní Amerika	B4, B12, B26, B66, B71	1700, 700, 850, 1700, 600
Asie a Tichomoří	B1, B3, B5, B8, B18, B20, B26, B28	2100, 1800, 850, 900, 850, 800, 850, 700
Evropa	B3, B8, B20	1800, 900, 800
Latinská Amerika	B2, B3, B5, B28	1900, 1800, 850, 700
Společenství nezávislých států	B3, B8, B20	1800, 900, 800
Subsaharská Afrika	B3, B8	1800, 900
Blízký východ a severní Afrika	B8, B20	900, 800

2.1.4 Radiové zdroje LTE

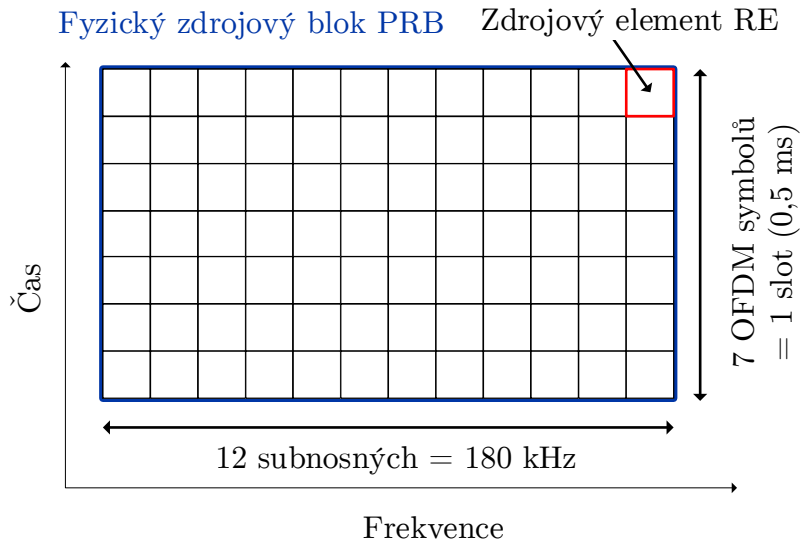
Celková rámcová struktura pro LTE a LTE-M je zobrazena na obr. 2.3. Na nejvyšší úrovni je hyper-rámcový cyklus, který trvá 2 hodiny 54 minut a 46 sekund a skládá se z 1024 hyper-rámců. Každý hyper-rámec trvá 10,24 s a skládá se z 1024 rámců, každého s délkou 10 ms. Rámec se skládá z 10 sub-rámců, který se dělí na dva sloty o délce 0,5 ms.



Obr. 2.3: Rámcová struktura LTE [1].

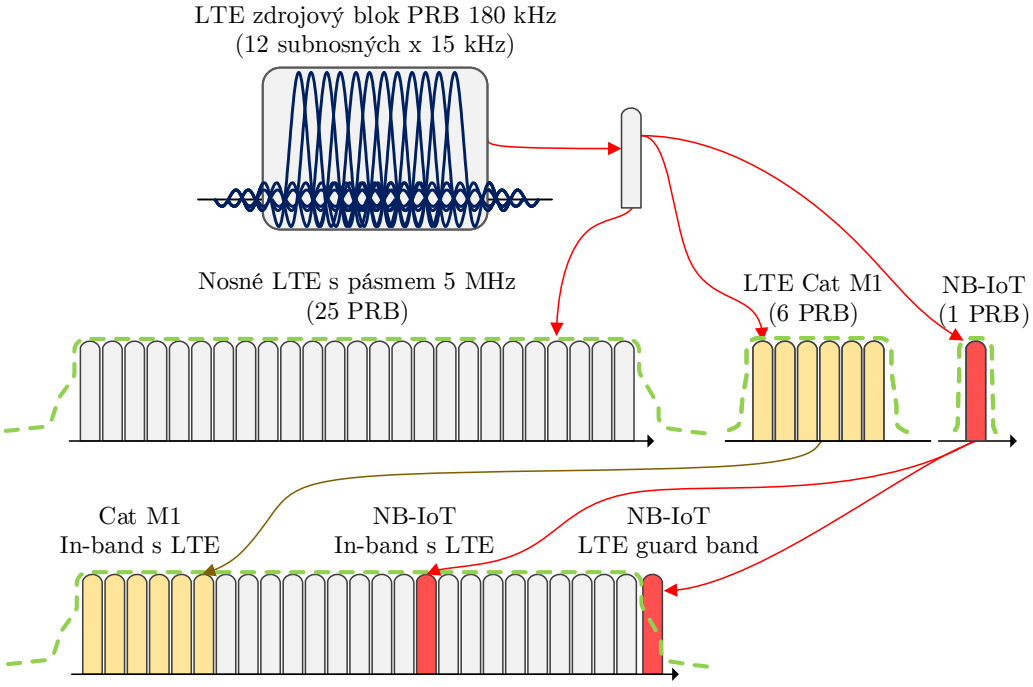
Základním a zároveň nejmenším prvkem radiových zdrojů u technologie LTE je zdrojový element RE (Resource Element). Skládá se z jednoho OFDM symbolu na jedné subnosné (zobrazeno na obr. 2.4) [23].

Tyto subnosné (subpásma) jsou seskupeny po 12 (případně 24) a tvoří tzv. fyzické zdrojové bloky PRB (Physical Resource Blocks). Při použití normálního cyklického prefixu (Normal Cyclic Prefix) je použito 7 OFDM symbolů na jednu subnosnou a při rozšířeném cyklickém prefixu (Extended Cyclic Prefix) je použito 6 OFDM symbolů a tvoří 1 slot. Fyzický zdrojový blok se tedy skládá z 84 (příp. 72) zdrojových elementů a je to nejmenší alokační jednotka, která může být uživateli přiřazena [23, 18].



Obr. 2.4: Zdrojové bloky - zdrojové elementy [23, 18].

Šířka pásma konkrétní technologie LTE určuje, kolik fyzických zdrojových bloků bude uživateli přiřazeno. Například při použití běžné LTE šířky pásma 5 MHz to je 25 PRB, u LTE Cat-M1 je to 6 PRB (1,08 MHz) a NB–IoT 1 PRB (180 kHz). Příklady přiřazení PRB jsou zobrazeny na obr. 2.5 [23].



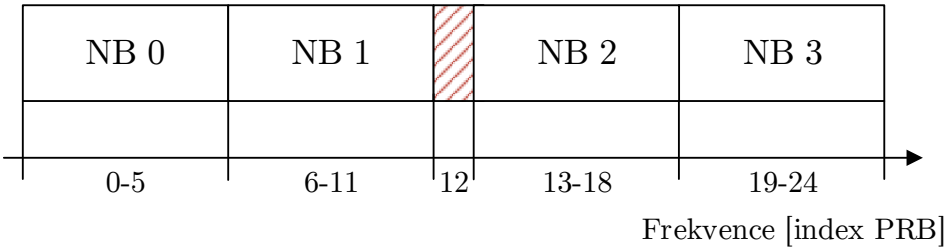
Obr. 2.5: LTE Nosné [24].

2.1.5 LTE frekvenční pásma

Podporované šířky pásma u systémů LTE jsou 1,4; 3; 5; 10; 15 a 20 MHz, včetně tzv. ochranných pásem.

Specifické fyzické kanály a signály jsou přenášeny úzkým frekvenčním pásmem tzv. narrowband (NB), který je mapován do šesti LTE PRB. Maximální počet možných alokovaných PRB je 100 (16 NB) s šířkou pásma 18 MHz [1]. Příklad systému o šířce frekvenčního pásma 5 MHz a jeho rozdělení na NB je zobrazen na obr. 2.6 [1].

Zařízení kategorie LTE-M podporují pouze omezenou šířku pásma pro odesílání i přijímání. Alokace zdrojů pro LTE-M je založená na nepřekrývajících se frekvenčních pásmech narrowband o šířce 6 PRB. Více informací o alokaci prostředků lze najít v podkapitolách LTE Cat-M1 a Narrowband IoT.



Obr. 2.6: Příklad systému LTE o šířce frekvenčního pásma 5 MHz [1].

Šířka pásma LTE systémů (kromě LTE-M) nemůže být rozdělena na pásma narrowband, aniž by nevznikly nadbytečné PRB. Z toho důvodu nejsou určené zdrojové bloky využity. Výčet počtů nevyužitých PRB a jejich umístění v systému je zobrazen v tab. 2.2.

Tab. 2.2: Rozdělení NB a PRB v systémech LTE [1].

Šířka pásma [MHz]	**Počet PRB**	**Počet NB**	**Nevyužité PRB**
1,4	6	1	Žádný
3	15	2	1 na každé straně + 1 ve středu
5	25	4	1 ve středu
10	50	8	1 na každé straně
15	75	12	1 na každé straně + 1 ve středu
20	100	16	2 na každé straně + 1 ve středu

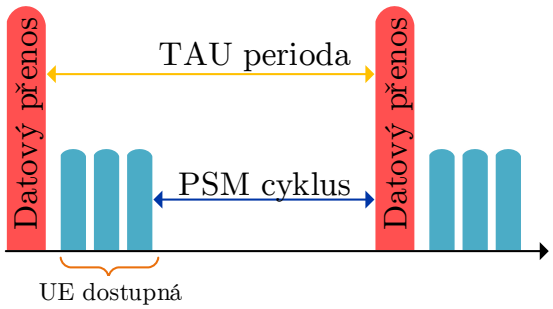
2.1.6 Mechanismy úspory energie

Pro maximální pohotovostní dobu a efektivní využití baterie existuje pro LTE zařízení (primárně pro NB–IoT a LTE Cat-M1) možnost používat funkce úsporného režimu PSM (Power Saving Mode) a funkce nesouvislého příjmu eDRX (extended Discontinuous Reception) [25].

Úsporný režim

Funkce Úsporný režim byla přidána ve 12. vydání 3GPP a je dostupná pro všechna LTE zařízení. Je navržena tak, aby pomohla zařízením IoT šetřit energii baterie a potenciálně dosáhnout až 10-leté životnosti baterie [26].

I když je možné, aby přístroj kdykoliv vypnul rádiový modul a ušetřil tak energii z baterie, zařízení se musí znovu připojit k síti po každém opětovném zapnutí modulu. Tento postup spotřebovává malé množství energie, které může být po celou dobu životnosti významné [25].



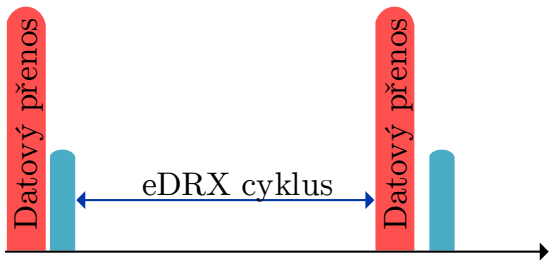
Obr. 2.7: Úsporný režim PSM [25].

Zařízení komunikuje se sítí pouze tak dlouho a tak často, aby mohlo vysílat a přijímat data. Pomocí časovačů se určí hodnota periody TAU (Tracking Area Update), která určuje, kdy je zařízení dostupné. Konečné hodnoty však určuje síť. Maximální doba PSM je 413 dnů, minimální 4 hodiny (definováno ve 13. vydání 3GPP) [25]. Úsporný režim zobrazuje obr. 2.7.

Pro síť se zařízení chová podobně jako vypnuté, ale UE zůstává v síti registrováno (uloží se obsah AS kontextu). Po obnovení rádiových prostředků (RRC Resume) se kontext opět načte a není nutné potřebná připojení obnovovat. Výhodou je také bezpečnost, protože se zařízení nemusí znovu autentizovat do sítě. Nevýhodou je, že síť nemůže zařízení během PSM módu kontaktovat, což může znemožnit použití v určitých aplikacích [25].

Mechanismus nesouvislého příjmu

Mechanismus nesouvislého příjmu je rozšíření již existující funkce LTE DRX (Discontinuous Reception), které mohou být použity IoT zařízeními ke snížení spotřeby energie. Mechanismus eDRX může být využitý v kombinaci s PSM nebo i bez něj [25].



Obr. 2.8: LTE Funkce eDRX [25].

Okamžitým vypnutím přijímací části rádiového modulu na zlomek sekundy může zařízení šetřit energii. eDRX umožňuje výrazně prodloužit časový interval, během kterého zařízení síť „nenaslouchá“ [25]. Mechanismus nesouvislého příjmu eDRX zobrazuje obr. 2.8.

U aplikací IoT je přijatelné, aby zařízení nebylo dosažitelné po dobu několika sekund nebo déle. Maximální doba eDRX cyklu je 10485,76 s ($\sim$ 175 min). I když neposkytuje stejné úrovně snížení spotřeby jako PSM, u některých aplikací eDRX poskytuje dobrý kompromis mezi dosažitelností zařízení a spotřebou energie [25].

2.2 LTE Cat-M1

Tato technologie spadá pod LTE-M, což je rozšíření LTE s ohledem na podporu M2M komunikace a IoT [1]. Byla specifikována v roce 2016 ve 13. vydání 3GPP, stejně jako NB–IoT. Ve 14. vydání byla rozšířena o další funkce, např. podpora polohování a hlasových služeb, multicast nebo navýšení datové rychlosti uplink na $\sim 1\,\mathrm{Mb/s}$ a downlink na $\sim 600\,\mathrm{kb/s}$ (pro half-duplex) [27].

Hlavní přenosová schémata pro downlink i uplink jsou shodná s LTE, tzn. pro příchozí spojení je použito OFDMA a pro odchozí SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) se stejnými charakteristickými parametry jako je kanálový rastr, odstup nosných, délka cyklického prefixu (CP), struktura rámců atd. Tyto vlastnosti dovolují koexistenci obou systémů na stejné LTE buňce a LTE nosné s možností sdílení zdrojových prostředků obou systémů [1].

Cílem standardizace dle 3GPP bylo dosáhnout u LTE-M rozšíření pokrytí o 15 dB (tj. 164 dB MCL –Maximum Coupling Loss) ve srovnání s existujícími LTE sítěmi. Protože MTC aplikacím dostačuje nižší datová rychlost (běžně desítky kb/s) a nejsou příliš citlivé na zpoždění (stovky milisekund až jednotky sekund), lze využít k posílení pokrytí opakování a techniky opakovaného přenosu (tzn. stejný přenosový blok je vysílán ve více po sobě jdoucích sub-rámcích) [1].

2.2.1 Technická specifikace

Pro LTE Cat-M1 byla stanovena šířka pásma na 1,08 MHz [27]. Alokuje se 6 PRB, tedy jedno pásmo NB. Podporuje jak FDD, tak i TDD ve FD (Full Duplex) nebo HD (Half Duplex) módu s jednou přijímací anténou [1].

UE kategorie M1 jsou navrženy tak, aby pracovaly v eUTRAN licenčních frekvenčních pásmech B1, B2, B3, B4, B5, B7, B8, B11, B12, B13, B14, B18, B19, B20, B21, B25, B26, B27, B28, B31, B66, B71, B72, B73, B74 a B85 v režimu FD–FDD i HD–FDD a pásmech B39, B40 a B41 v režimu TDD (geograficky přidělená pásma a jejich kmitočty viz tab. 2.1) [21].

Pro splnění požadavku na maximální pohotovostní dobu zařízení využívá Cat M1 mechanismy úspory energie PSM a eDRX. Pro kanálové kódování jsou pro příchozí i odchozí spojení použity tzv. Turbo-kódy [1].

Ve 13. vydání byly stanoveny 2 režimy CE (Coverage Enhancement) [1]:

- CE režim A – až 32 opakování sub-rámce datového kanálu.
- CE režim B – až 2048 opakování sub-rámce datového kanálu.

Tab. 2.3: Přehled kanálů pro LTE-M [28].

Zkratka	Fyzický kanál nebo signál
PSS/SSS	Primary/Secondary Synchronization Signal
PBCH	Physical Broadcast Channel
MPDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
CRS	Common Reference Signal
PRS	Positioning Reference Signal
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel

Počet opakování je určen na základě přijatého výkonu referenčního signálu RSRP (Reference Signal Received Power) měřeného koncovým zařízením (UE) [29]. Pro každý fyzický kanál nebo signál (podporované kanály jsou zobrazeny v tab. 2.3) je stanoven maximální počet opakování (zobrazeno v tab. 2.4). Díky CE režimu B je pomocí opakování možné dosáhnout CE až 20 dB [1].

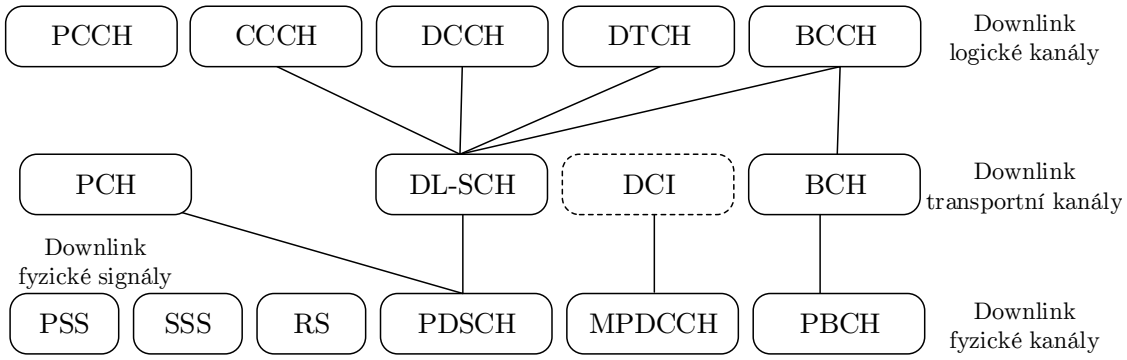
Tab. 2.4: Maximální počet opakování CE režimu A a B [28].

	Maximální počet opakování	
Kanál	**CE režim A**	**CE režim B**
MPDCCH	256	256
PDSCH	32	2048
PUSCH	32	2048
PUCCH	8	32

Zavedení LTE Cat-M1 do systému LTE přináší změnu v nahrazení původního širokopásmového kanálu PDCCH (Physical Downlink Control Channel) novým úzkopásmovým kanálem MPDCCH (Machine Type Communication Physical Downlink Control Channel). Tento kanál je nositelem DCI (Downlink Control Information). Motivace pro jeho zavedení bylo snížení spotřeby energie a také fakt, že původní PDCCH byl zaveden pro H2H (Human-to-Human) komunikaci. Může být přenášen jak jednorázově, tak s opakováním [27].

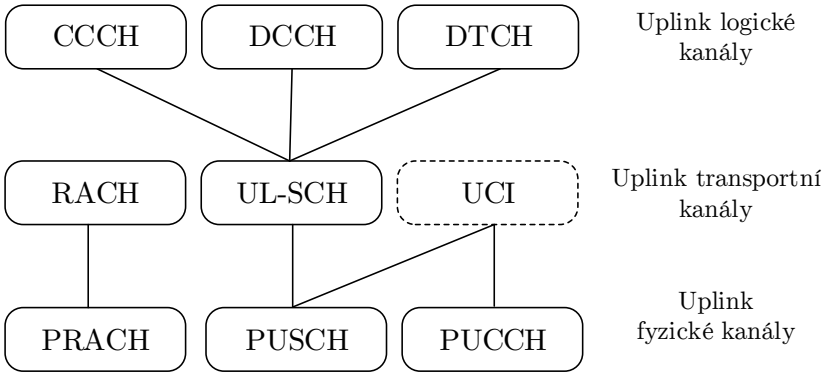
Na obr. 2.9 jsou zobrazeny kanály a signály pro downlink podporované systémem LTE-M a jeho provázání s kanály vyšších vrstev. Fyzická vrstva poskytuje transportní kanály vyšším vrstvám skrze vrstvu MAC (Medium Access Layer). Kanál

DCI je na obr. 2.9 označen přerušovaně, protože není striktně transportním kanálem [1].



Obr. 2.9: Downlink kanály a signály LTE-M [1].

LTE Cat-M1 opětovně využívá primární synchronizační signál PSS (Primary Synchronization Signal), sekundární synchronizační signál SSS (Secondary Synchronization Signal) a jádro fyzického kanálu PBCH (Physical Broadcast Channel), který nese MIB (Master Information Block) [28]. Tyto kanály se nacházejí ve středu šířky pásma LTE systému [1]. Středová frekvence je zarovnaná s kanálovým rastrem 100 kHz (tzn. kmitočtová frekvence nosné musí být celočíselný násobek této frekvence) [21].



Obr. 2.10: Uplink kanály a signály LTE-M [1].

Na obr. 2.10 jsou zobrazeny kanály a signály pro uplink podporované systémem LTE-M a jeho provázání s kanály vyšších vrstev. Referenční signál (RS) není v

obrázku zobrazen, je však přenášen společně s PUSH nebo PUCCH, případně samostatně. Kanál UCI (Uplink Control Information) není striktně transportním kanálem. Vyšším vrstvám poskytuje fyzická vrstva transportní služby opět skrze MAC vrstvu [1].

Tab. 2.5: Přehled datových rychlostí pro kanál PDSCH v režimu HD–FDD pro 23 dBm LTE Cat-M1 zařízení [1].

Pokrytí	**164 dB MCL**	**154 dB**	**144 dB**	**Max. rychlost**	**Okamžitá max. rychlost**
Dat. rychlost	0,8 kb/s	9,9 kb/s	76,6 kb/s	300 kb/s	1 Mb/s

Přehled datových rychlostí pro downlink je zobrazen v tab. 2.5. Příchozí spojení je reprezentováno fyzickým kanálem PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) obsahující maximálně 1000 bitů, který mapuje 4 PRB. Nejvyšší rychlosti je dosaženo při použití tří procesů HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) [1].

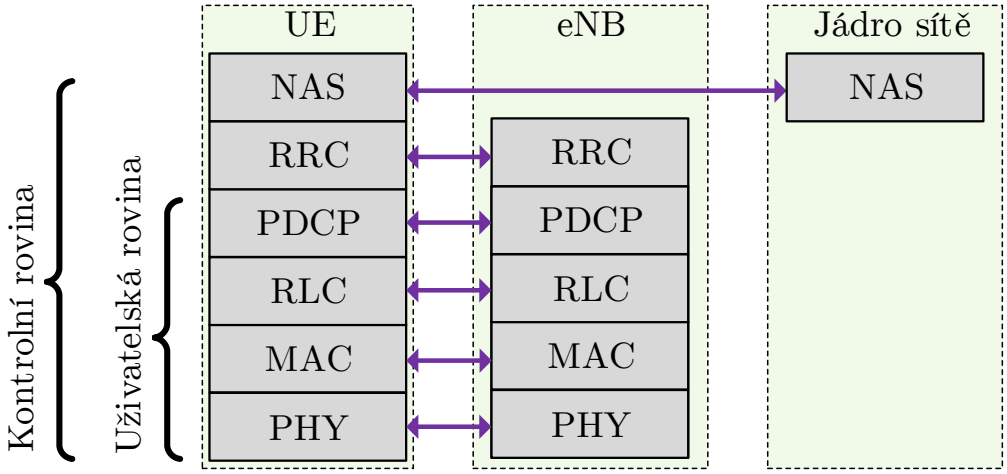
Tab. 2.6: Přehled datových rychlostí pro Uplink na fyzické vrstvě v režimu HD–FDD pro 23 dBm LTE Cat-M1 zařízení [1].

Pokrytí	**164 dB MCL**	**154 dB**	**144 dB**	**Max. rychlost**	**Okamžitá max. rychlost**
Dat. rychlost	167 b/s	3,1 kb/s	40,1 kb/s	375 kb/s	1 Mb/s

Možné datové rychlosti pro uplink jsou zobrazeny v tab. 2.6. Jestliže je uvažována pouze okamžitá maximální rychlost, lze u transportního bloku o velikosti 1000 bitů dosáhnout až 1 Mb/s.

Všechny zobrazené datové rychlosti jsou platné pouze pro HD–FDD a zařízení s podporou 13. vydání 3GPP. Pro dosažení vyšších rychlostí je nutné použít FD–FDD, případně zařízení podporující 14. vydání 3GPP [1].

Na obr. 2.11 je zobrazený protokolový zásobník LTE-M. Zásobník je z velké části shodný se zásobníkem LTE, hlavní změny jsou provedeny na fyzické vrstvě.



Obr. 2.11: Protokolový zásobník LTE/LTE-M [1].

Stejně jako NB–IoT má LTE Cat-M1 výhodu v tom, že je možné implementovat tuto technologii do stávajícího LTE systému pouze softwarovou úpravou LTE vysílačů. To výrazně snižuje čas potřebný k zavedení technologie na trh.

2.3 Narrowband IoT

Úzkopásmová technologie Narrowband IoT byla vyvinuta a představena skupinou 3GPP ve 13. vydání. Jedná se o nový radiový přístupový systém, který byl vystavěn na již existujícím standardu LTE. Standard NB-IoT byl z pohledu funkcionality značně redukován, aby zajistil co nejvyšší jednoduchost, snížil cenu koncových zařízení a minimalizoval spotřebu baterie (v případě napájení z akumulátoru) [30]. Pracuje ve frekvenčním pásmu, které je využíváno pro technologii LTE [31].

NB–IoT byl vytvořen s následujícími cíli [26]:

- Zařízení s velmi nízkou úrovní složitosti pro podporu IoT aplikací.
- Vylepšené pokrytí o 20 dB (ve srovnání s GPRS) odpovídající MCL 164 dB.
- Datový přenos alespoň 160 b/s (na aplikační vrstvě).
- Podpora velkého počtu připojených zařízení s nízkou propustností na buňku (nejméně 52 547).
- Zvýšená energetická účinnost – životnost baterie 10 let s kapacitou baterie 5 Wh.
- Maximální zpoždění 10 sekund pro 99 % zařízení.

Z toho je patrné, že se jedná o síť, kde je potřeba přenos malého množství dat při nízké přenosové rychlosti s relativně vysokým zpožděním (dle definice 3GPP až 10 s) [31].

2.3.1 Technická specifikace

Šířka pásma Narrowband IoT je pro odchozí i příchozí spojení 180 kHz. To odpovídá šířce pásma jednoho LTE fyzického zdrojového bloku a GSM nosné [12].

Z důvodu úspory výkonu zařízení je pro kanálové kódování v příchozím spojení (downlink) zavedeno prosté konvoluční kódování TBCC (Tail-Biting Convolution Code). Ze stejného důvodu nepodporuje ani modulace vyššího řádu a prostorový multiplex [1].

Ve 13. vydání je limitována podpora pouze FDD [26]. Maximální úroveň vysílacího výkonu zařízení NB–IoT je stanovena na 20 nebo 23 dBm (13. vydání 3GPP). To umožňuje integraci výkonového zesilovače přímo na čip, čímž se snižují náklady na výrobu zařízení [1].

V downlink spojení je implementována modulace QPSK (Quadrature Phase-Shift -keying) s technologií OFDMA a rozestupem sub-nosných 15 kHz. Uplink spojení využívá QPSK nebo BPSK s technologií SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) [31].

Díky tomu, že velkou většinu funkcí sdílí se systémem LTE, je jeho velkou výhodou minimální cena zavedení technologie do běžného provozu (velmi často postačuje

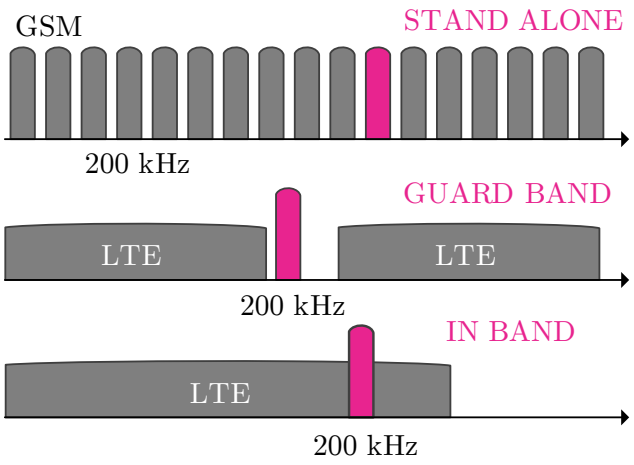
pouze softwarová úprava LTE vysílačů). Tento fakt výrazně snižuje čas uvedení NB–IoT technologie na trh.

NB–IoT podporuje vysílání ve třech scénářích (zobrazeno na obr. 2.12):

1. **Stand-alone** – část GSM spektra se nahradí buňkou NB–IoT [30]. Mezi nosiči GSM a NB–IoT je z každé strany ochranné pásmo 100 kHz. Z toho je patrné, že pro jednu buňku NB–IoT se využijí nejméně dva nosiče GSM. Přesto, že NB–IoT využívá šířku pásma 180 kHz, musí šířku využít v délce 200 kHz, aby kopíroval spektrální masku GSM [1].

2. **Guard-Band** – v tomto scénáři se používá nevyužitá šířka pásma v ochranném pásmu LTE [30].

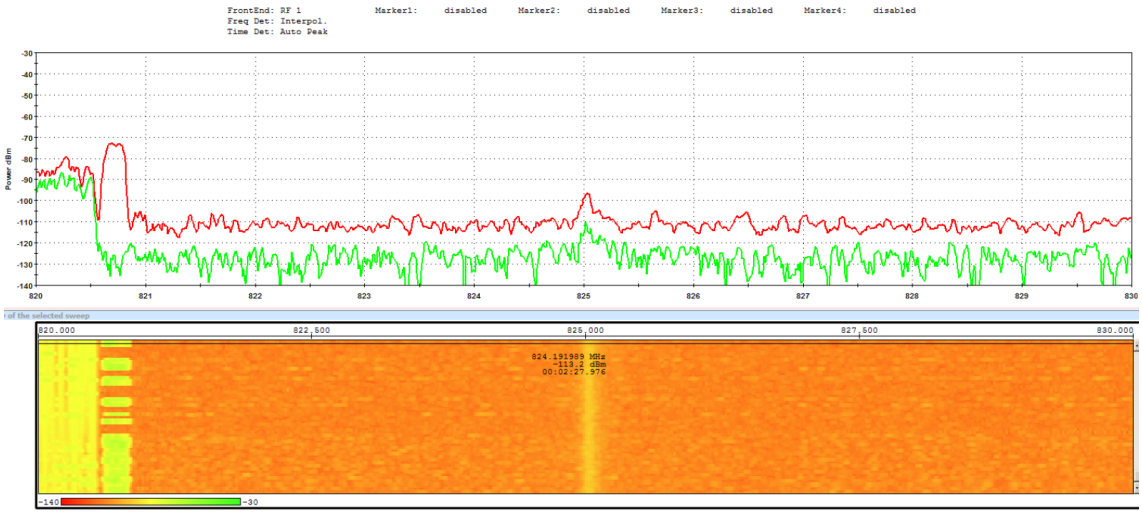
3. **In-Band** – využívá se jeden nebo více zdrojových LTE bloků PRB, které jsou rezervovány pro NB–IoT. Na rozdíl od stand-alone se nepoužívají ochranná pásma mezi LTE nosiči a NB–IoT buňkami [30].



Obr. 2.12: Ukázky možných scénářů vysílání technologie Narrowband IoT [30].

Stejně jako LTE Cat-M1 i NB-IoT může využívat mechanismy úspory energie PSM a eDRX.

Na základě doporučení 3GPP byla definována sada kmitočtových pásem, ve kterých může pracovat kategorie NB–IoT na pásma B1, B2, B3, B4, B5, B8, B11, B12, B13, B14, B17, B18, B19, B20, B21, B25, B26, B28, B31, B41, B66, B70, B71, B72, B73, B74 a B85 (regionální přiřazení pásem viz tab. 2.1). Systémy kategorie NB–IoT pracují v HD–FDD nebo v režimu TDD [21].



Obr. 2.13: Testovací měření technologie Narrowband IoT na VUT v Brně v síti telekomunikačního operátora Vodafone Česká republika a.s.

V České republice implementuje tuto technologii mobilní operátor Vodafone Česká republika a.s. od roku 2017, také s pomocí Ústavu telekomunikací VUT Brno [32]. Využívá se vysílací scénář Guard-Band. To je také patrné z testovacího měření, které bylo provedeno na území ČR a ukázka výsledků je zobrazena na obr. 2.13.

Vodafone při implementaci využívá tzv. Globální M2M platformu neboli GDSP (Global Data Service Platform). Jedná se o komplexní platformu, která zahrnuje software pro správu konektivity IoT zařízení a globální SIM (Subscriber Identity Module) karty. Tyto karty podporují roaming v ČR i v zahraničí pro docílení maximální dostupnosti služeb IoT [32].

Síť Narrowband IoT Vodafone aktuálně provozuje již v České republice, Německu, Španělsku, Řecku, Irsku, Itálii, Nizozemí, Austrálii, Jihoafrické republice a Turecku. Nově chystá spuštění i ve Spojeném království, Rumunsku a Maďarsku [33].

3 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE IOT V BEZLICENČNÍM PÁSMU

V této kapitole jsou stručně popsány LPWA technologie Sigfox a LoRa , které pracují v bezlicenčním ISM (Industrial, Scientific and Medical) pásmu 868 MHz pro Evropu a 915 MHz pro USA (United States of America).

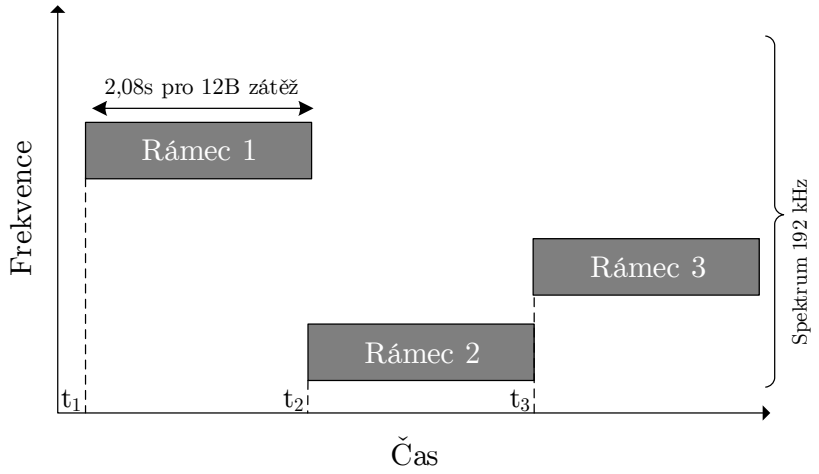
3.1 Sigfox

Sigfox je jedna z prvních technologií LPWA dostupná na trhu IoT (od roku 2009) [34]. Jedná se o proprietární technologii francouzské společnosti Sigfox S.A. Společnost vlastní celý systém od základnových stanic po síťové servery a back-end řešení poskytující end-to-end komunikaci. To může být považováno za nevýhodu (komunikace jde vždy přes servery společnosti), ale i za výhodu (uzavřenost konkrétních principů technologie – náročnější útoky) [35]. Pracuje v bezlicenčním ISM pásmu 868 MHz v Evropě, 915 MHz v Severní Americe a 433 MHz v Asii [36]. Topologie je typicky ve tvaru hvězdy [13].

3.1.1 Technická specifikace

K přenosu využívá Sigfox pásmo UNB (Ultra-Narrow Band). Šířka pásma pro přenos jedné zprávy je stanovena na 100 Hz a přenáší se rychlostí 100 nebo 600 b/s (v závislosti na regionu) [13]. Konečné stanice při komunikaci se základnovou stanicí používají DPSK (Differential Phase Shift Keying).

Šířka pásma pro technologii Sigfox je 192 kHz ve veřejném bezlicenčním ISM pásmu (868,034 – 868,226 MHz pro Evropu). Protože v tomto pásmu může vysílat prakticky jakákoliv další technologie, je provoz této technologie velmi omezen. Regulace v Evropě stanoví maximální zatížení sítě na 1 %. Počet zpráv v odchozím spojení (uplink) je limitovaný na 140 zpráv za den s maximální velikostí 12 bajtů. Zprávy v příchozím spojení (downlink) jsou omezeny na 4 zprávy za den se statickou velikostí 8 bajtů [36].



Obr. 3.1: Časově-frekvenční diverzita technologie Sigfox [13].

Při uplink spojení se využívá tzv. časově-frekvenční diverzita. Při vysílání používá koncová stanice FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), které není se základnovou stanicí synchronizované. Z toho důvodu musí přijímač naslouchat celému spektru 192 kHz a demodulovat přijaté UNB signály. Odeslání jedné zprávy při maximální zátěži 12 B trvá 2,08 s rychlostí 100 b/s a každá zpráva je vyslána třikrát. Příklad odesílání zprávy při využití časově-frekvenční diverzity je zobrazen na obr. 3.1 [13].

Sigfox využívá tzv. kooperačního příjmu (Cooperative reception). Koncové zařízení není připojeno ke specifické základnové stanici (jako u celulárních sítí), ale odeslaná zpráva je přijata více stanicemi, které jsou v blízkosti [13].

Dle společnosti Sigfox dokáže každá základnová stanice zpracovat až milion připojených zařízení s oblastí pokrytí 30 – 50 km ve venkovských oblastech a 3 – 10 km v městských oblastech [34].

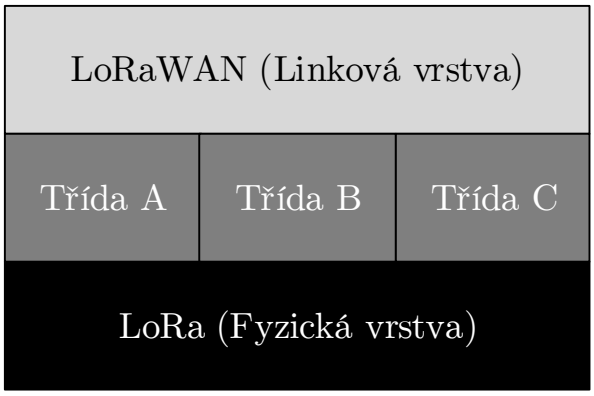
3.2 LoRa a LoRaWAN

Další významná LPWA technologie je LoRa (Long Range), resp. LoRaWAN. Lora je „pouze“ radiová modulace definující fyzickou vrstvu. Byla patentovaná v roce 2008 firmou Semtech Corporation [34].

Na této modulaci byl založen komunikační protokol LoRaWAN, který byl standardizován organizací Lora Alliance. Jedná se o otevřený standard, který poskytuje mechanismy MAC a umožňuje koncovým zařízením komunikovat s jednou nebo více radiovou stanicí [30].

3.2.1 Technická specifikace

Stejně jako Sigfox pracuje v bezlicenčním ISM pásmu a má topologii ve tvaru hvězdy. K zabezpečení radiového kanálu je relace protokolu LoRaWAN založena na symetrické kryptografii (AES 128 b). Pro modulaci se používá technika rozprostření spektra CSS (Chirp Spread Spectrum) [30].

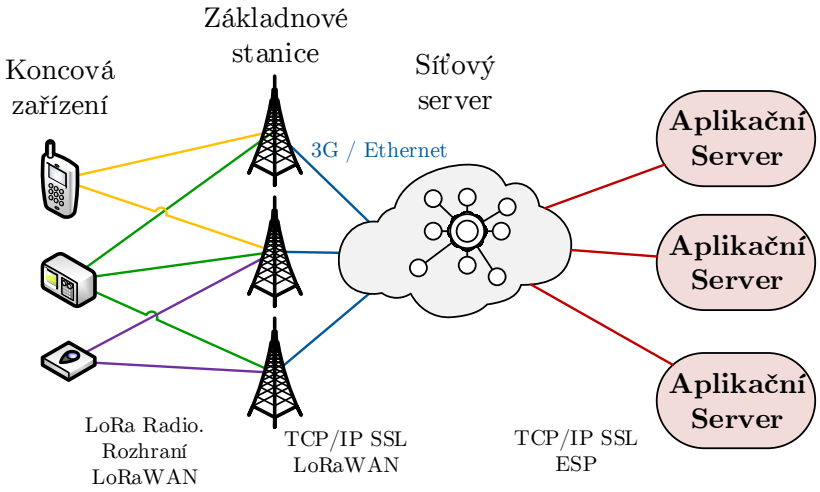


Obr. 3.2: Architektura protokolu LoRaWAN [30].

Síť LoRa rozlišuje koncové zařízení do tří tříd:

- **Třída A** (základní LoRaWAN) – zařízení má možnost obousměrně komunikovat, kdy každé odchozí spojení je následované dvěma krátkými přijímacími „okny“. V této třídě se pracuje s nejnižším energetickým zatížením zařízení, protože vyžaduje pouze příchozí komunikaci ze serveru krátce potom, co zařízení něco odešle. Komunikace probíhá náhodně (dle potřeb koncového zařízení) [37]. Příkladem energetické spotřeby ve třídě A je pro vysílání 40 mA (14 dBm) a příjem 14,2 mA v pásmu 868 MHz (hodnoty pro microchip RN2483) [38].
- **Třída B** – zařízení v této třídě umožňuje více přijímacích slotů. Kromě chování jako ve třídě A navíc otevírá zařízení v přesně stanoveném čase další „okna“ pro příjem. Proto, aby zařízení stanovilo čas kdy otevřít přijímací slot, vysílá základnová stanice pravidelně synchronizační Beacon rámce [37].
- **Třída C** – koncové zařízení třídy C má otevřené přijímací sloty téměř nepřetržitě. Zavírá je pouze, když vysílá. Ze všech tříd má nejvyšší spotřebu energie, ale nabízí nejnižší zpoždění pro komunikaci se serverem [37]

Dle specifikace musí mít všechna koncová zařízení implementovanou třídu A. Architektura protokolu LoRaWAN je zobrazena na obr. 3.2 [37].



Obr. 3.3: Typická architektura sítě LoRaWAN [37].

Typická architektura sítě LoRaWAN je demonstrována na obr. 3.3. Ve srovnání se Sigfox, který využívá pevnou přenosovou šířku pásma, upravuje síť LoRa komunikační šířku pásma pro každé jednotlivé zařízení, aby maximalizovala životnost baterie a celkovou kapacitu sítě. Minimální přenosová šířka pásma je 125 kHz, to odpovídá MCL 157 dB.

Proprietární, energeticky účinná LoRa modulace založená na rozšíření spektra se používá pro zvýšení odolnosti proti rušení bezlicenčního pásma [12]. LoRaWAN specifikace neobsahuje mezilehlé prvky (tj. opakovač), ale pouze specifikuje omezení velikosti zátěže (payload) pro snížení režijních dat v záhlaví [30, 39].

4 SÍŤOVÝ SIMULÁTOR NS–3

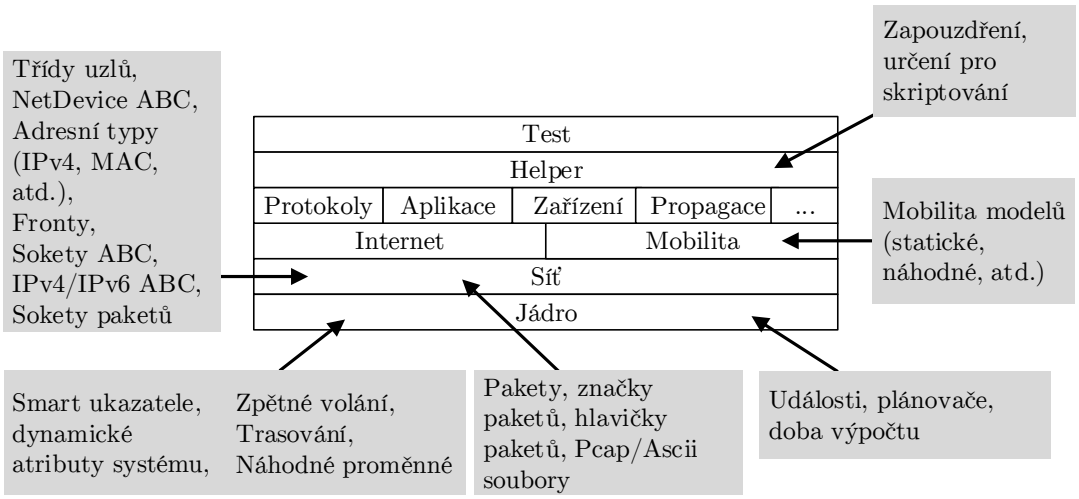
Tato kapitola popisuje základní informace o síťovém simulátoru NS–3 (Network Simulator 3) a přídavných rozšiřujících modulech LENA a ELENA, které slouží pro simulaci sítí LTE.

4.1 NS–3

NS–3 je „discrete–event“ síťový simulátor zaměřený především na využití pro vzdělání a výzkum. Je licencovaný pod GNU GPLv2 (General Public License version 2) a je veřejně dostupný pro výzkum a vývoj [40].

Simulační jádro a modely jsou implementovány v jazyce C++. NS–3 simulátor je postaven jako knihovna, která může být staticky nebo dynamicky propojena s hlavním programem C++, který definuje topologii simulace a také ji spouští.

Díky tomu, že je knihovna NS–3 zabalena do Python (NS–3 exportuje téměř všechny své API – Application Programming Interface do jazyka Python), umožňuje programům založených na Python importovat modul „ns3“ stejně, jako je možné knihovnu NS–3 propojit v jazyce C++ [40].



Obr. 4.1: Softwarová organizace NS3 [40].

Zdrojový kód pro NS–3 je nejčastěji uložen v adresáři `src` a může být popsán diagramem, který je zobrazen na obr. 4.1. Jádro simulace je implementováno v adresáři `src/core`. Obsahuje komponenty, které jsou společné pro všechny protokololy, hardware a modely. Základními objekty v síťovém simulátoru jsou pakety, které jsou uspořádány v adresáři `src/network`. Tyto simulační moduly jsou nezávislé na

konkrétním modelu sítě, ve kterém jsou použity a tvoří obecné simulační jádro. Simulátor také obsahuje generátor náhodných čísel PRNG (Pseudo-Random Number Generator) [40].

NS–3 se skládá z pěti typů síťových komponent [41]:

- Node (uzel),
- Application (aplikace),
- Network Device (síťové zařízení),
- Channel (kanál),
- Topology generator (generátor topologie).

Uzly jsou abstrakcí základních počítačových zařízení. Třída `NodeContainer` popisuje tyto komponenty a poskytuje řadu metod pro správu výpočetních zařízení. Kanál označuje tok dat přes médium. Síťové zařízení odkazuje na Internet pro hardware a ovladač síťové karty. Aplikace je popsána třídou `Application`, která nabízí v procesu simulace různé metody pro správu aplikací na úrovni uživatelů [41].

4.2 Modul LENA

LENA modul je open-source LTE/EPC simulátor vyvinutý organizací CCTC (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya). Byl vytvořen pro možnost navrhování a testování algoritmů řízení LTE sítě, vyvažování zátěže, řešení heterogenních systémů, Multi–RAT (Multi–Radio Access Technologies) síťová řešení, kognitivní LTE systémy atd. Je založen na síťovém simulátoru NS–3 [42]. Přehled LENA simulačního modelu je zobrazen na obr. 4.2.

Modul LENA se skládá ze dvou hlavních částí [43]:

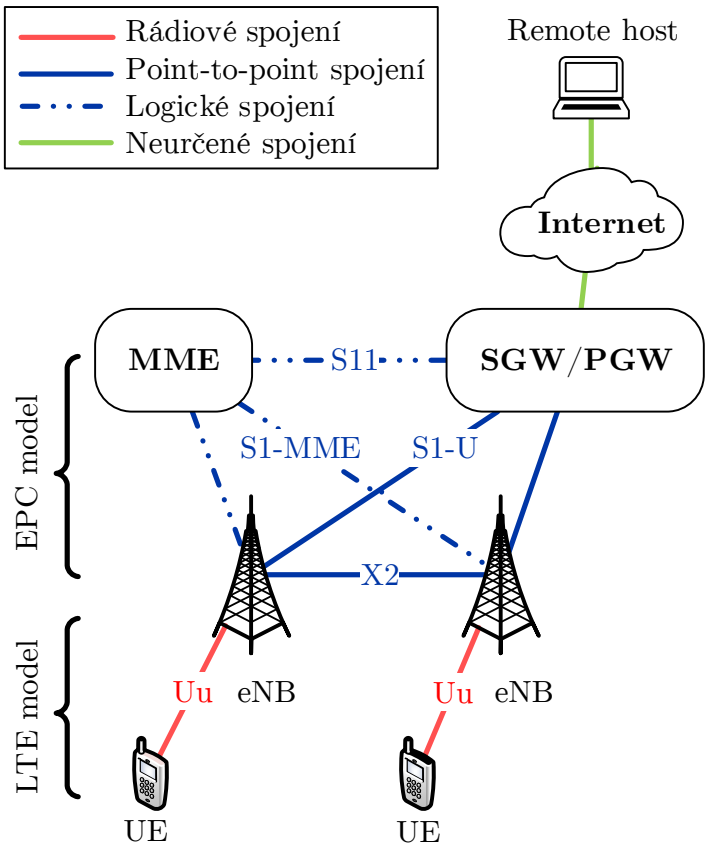
1. **LTE model** – obsahuje protokolovou sadu LTE radiového rozhraní: RLC (Radio Link Control), MAC (Medium Access Layer), RRC (Radio Resource Control), PDCP (Packet Data Convergence Control), PHY (Physical Layer).
2. **EPC model** – obsahuje rozhraní, protokoly a entity jádra sítě. Ty jsou umístěny v uzlech SGW, PGW, MME a částečně eNB.

LTE model

Požadavky LTE modelu jsou stanoveny pro podporu a hodnocení [43]:

- správy rádiových prostředků,
- plánování paketů s ohledem na QoS (Quality of Service),
- koordinace interferencí uvnitř buňky,
- dynamický přístup ke spektru DSA (Dynamic Spectrum Access).

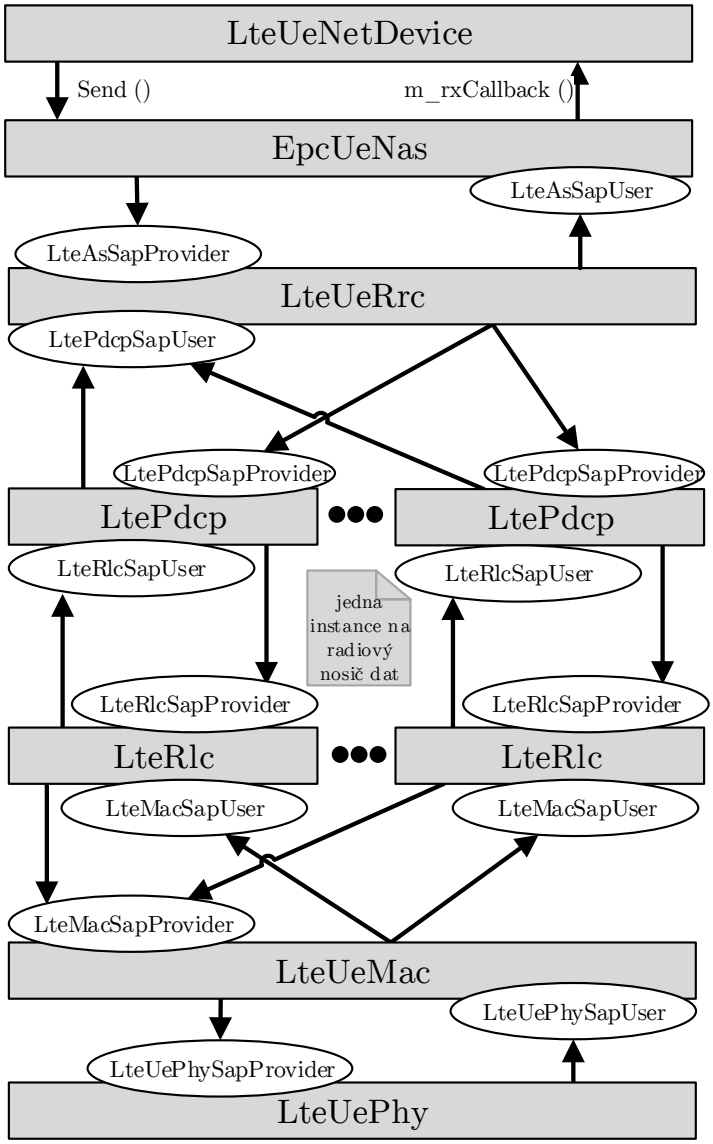
V rámci simulace je možné konfigurovat různé buňky tak, aby používaly různé frekvence nosné a šířky pásma systému. Pro zavedení podpory DSA je možné překrývání jednotlivých pásem různých buněk [43].



Obr. 4.2: Přehled LENA simulačního modelu [43].

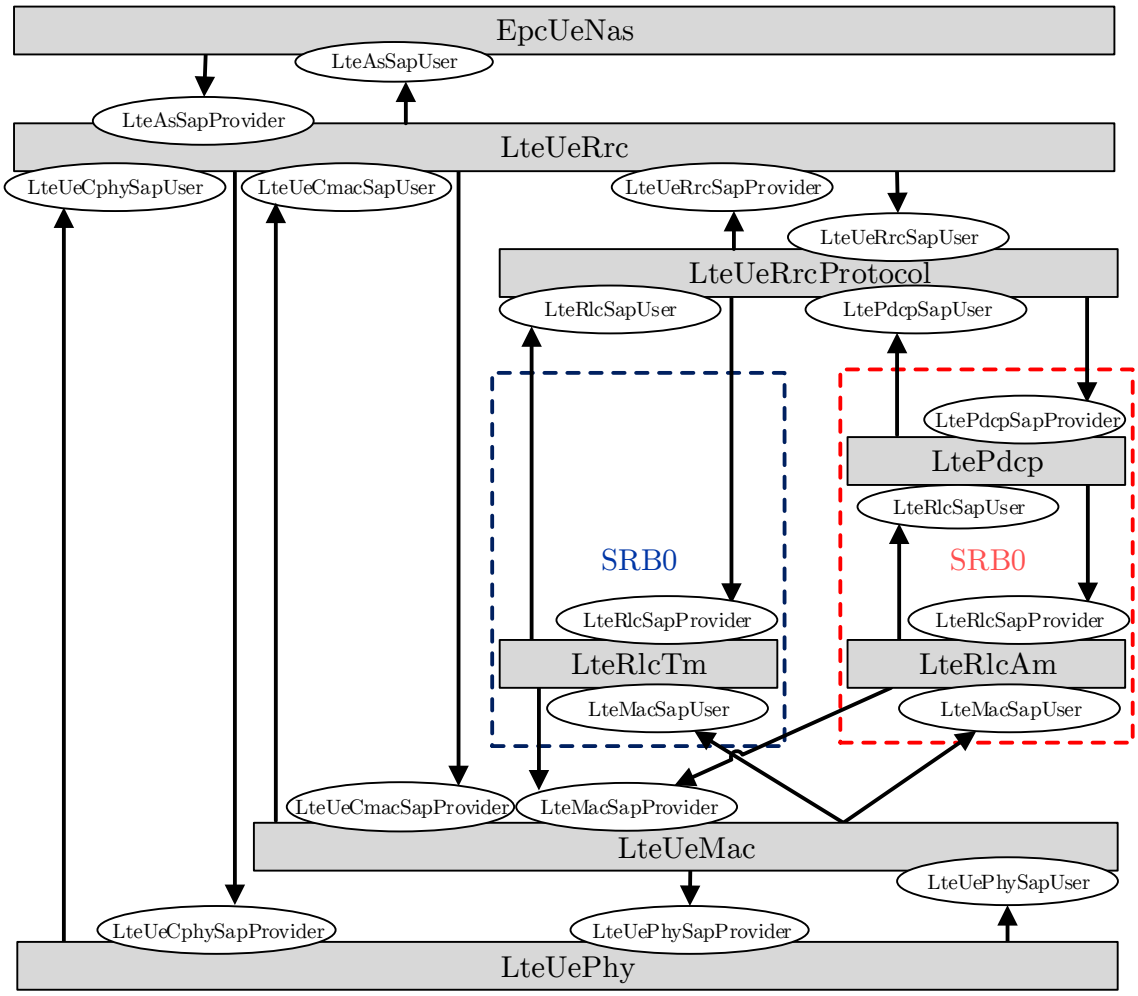
Aby byl simulátor co nejblíže reálné reprezentaci LTE standardu, implementuje rozhraní MAC Scheduler API. Zavedení tohoto rozšíření do simulátoru umožňuje testovat v simulačním prostředí stejné algoritmy, které jsou nasazeny v reálném systému [43].

Vyšší vrstvy používají model k simulaci přenosu IP paketů. Je proto třeba brát v úvahu to, že LTE plánovač a RRM (Radio Resource Management) nepracují přímo s pakety IP, ale s RLC rámci na linkové vrstvě. Proto musí být kladen důraz na správnou funkci této vrstvy [43].



Obr. 4.3: Architektura LTE sady protokolů pro UE v datové rovině (data plane) [43].

Architektura protokolové sady radiového rozhraní LTE modelu pro UE je zobrazena na obr. 4.3 a obr. 4.4, které zdůrazňují datovou (data plane) a řídící (control plane) rovinu.



Obr. 4.4: Architektura LTE sady protokolů pro UE v řídící rovině (control plane) [43].

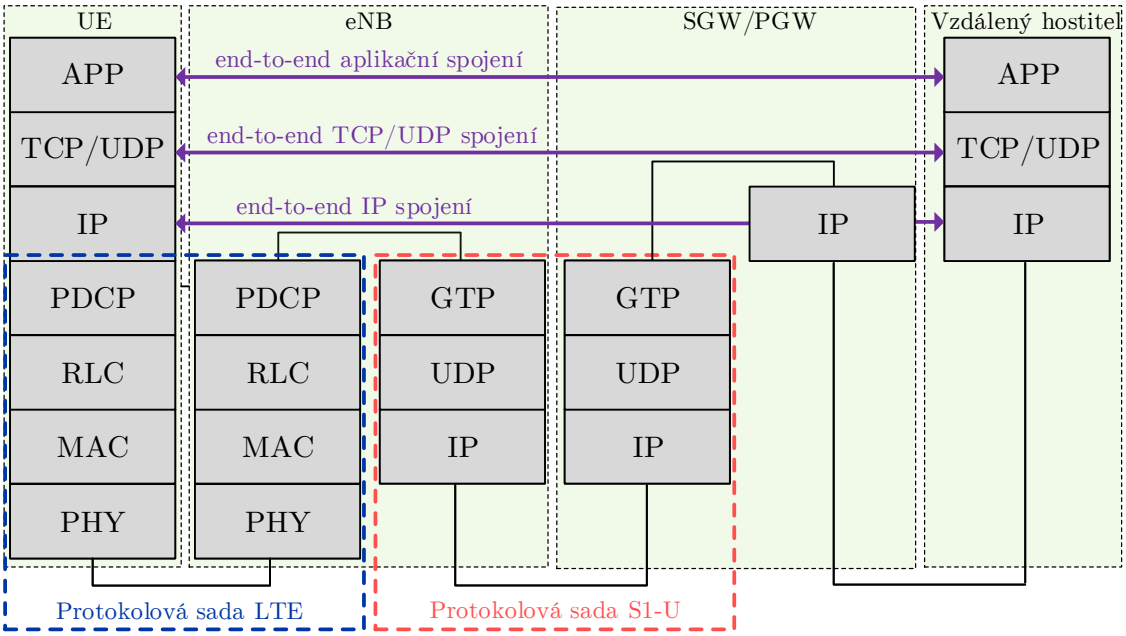
EPC model

Cílem tohoto modelu je poskytnout prostředky pro end-to-end IP spojení přes LTE model. Proto podporuje propojení více UE do Internetu přes rádiovou přístupovou síť více základnových stanic eNB. Ty jsou připojeny k uzlu SGW/PGW, který je vytvořen spojením uzlů SGW a PGW a jejich funkce jsou sdruženy. Díky zjednodušení těchto funkcionalit není nutné implementovat rozhraní S5 a S8, která jsou standardně uvedena dle 3GPP doporučení [43].

Model podporuje pouze IPv4 verzi internetového protokolu. Zároveň s EPC modelem je možné použít jakoukoliv běžnou aplikaci simulátoru NS–3 využívající TCP (Transmission Control Protocol) nebo UDP (User Datagram Protocol) transportní protokol. Pro jednotlivé UE je možné používat aplikace s rozdílnými QoS profily. To

zahrnuje nezbytnou klasifikaci přenosu TCP/UDP přes protokol IP, který se provede na UE v uplink a na PGW v downlink spojení [43].

Na obr. 4.5 je zobrazena reprezentace LTE-EPC protokolové sady tak, jak je implementována v LENA simulátoru. V EPC modelu je brán ohled především na datovou rovinu, proto jsou určité řídící interakce zjednodušeny prostřednictvím pomocných objektů [43].



Obr. 4.5: Protokolové sady LTE v datové rovině (data plane) pro end-to-end spojení [43].

Zaměření simulace je na aktivní uživatele v připojeném režimu. Veškeré funkcionality, které jsou spojené s nečinným režimem, nejsou modelovány vůbec. Model umožňuje komunikaci eNB základnových stanic přes rozhraní X2 pro pokytnutí handoveru koncovým stanicím [43].

4.3 Modul ELENA

Modul ELENA byl vyvinut v institutu Fraunhofer ESK nad již existujícím NS-3.29 LTE modulem (LENA). Stejně jako NS-3 je licencovaný pod GNU GPLv2 a je veřejně dostupný. Aktuální verze 1.0 podporuje rozšíření v oblasti RRC LTE IDLE módů. Implementace je postavena na dokumentaci standardu 3GPP a následuje strukturu kódů NS-3 LTE modulu. Obecně řeší přechody UE mezi stavy CONNECTED do IDLE a zpět [44].

Rozšiřující funkce modulu ELENA [44]:

- **Paging** – Podpora procedury Paging pro navázání spojení mezi UE a eNodeB (přechod ze stavu IDLE do CONNECTED).
- **Časové vyrovnání Uplink** – Funkce pro synchronizaci uplink UEw pomocí nově implementovaných zpráv během simulace. Vysílání zpráv je založeno na vzdálenosti mezi UE a eNodeB.
- **Radio Link Failure** – Procedura je implementovaná pro detekování slabého pokrytí nebo nízké kvality signálu. Po detekci se uvolní RRC spojení (přechod ze stavu CONNECTED do IDLE) a zařízení neprovádí obnovení spojení.
- **Handover Failure** – Základnová stanice eNodeB odešle UE zprávu pro uvolnění RRC spojení, pokud dojde k chybě při mechanismu Handover. Například při vypršení časovače předání, dosažení maximálního počtu nesouhlasných preambulí nebo jestliže došlo k chybě procedury Random Access.
- **Cell Reselection** – Tato procedura je implementována pro zajištění připojení UE k nejlepší buňce k zajištění IDLE mobility.
- **Implementace přechodů mezi stavy (IDLE do CONNECTED a zpět)**
  – Postup přechodu mezi stavy je implementován tak, aby došlo k resetování každé relevantní vrstvy protokolové sady zařízení UE.
  – Přechod je vytvořen pokud vyprší příslušný časovač připojení. Implementován je také časovač nečinnosti přenosu UE a uvolnění RRC spojení. Zařízení UE spustí požadavek pro vytvoření spojení (ze stavu IDLE do CONNECTED) mezi UE a eNodeB ve chvíli, kdy potřebuje vysílat.

LENA+

V rámci modulu ELENA je integrovaný do simulátoru NS-3.29 také realistický model náhodného přístupu LENA+. Toto rozšíření RACH (Random Access Channel) vytvořil Michele Polese z Padovské univerzity. Je založeno na NS-3 LTE modulu a je s ním také zpětně kompatibilní [45].

V současné verzi LTE modulu je preambule RACH ideální zpráva, nepodléhá tedy radiovému šíření. Kromě toho zprávy Connection Request a Connection Resolution nejsou modelovány a všechny kolize jsou detekovány a vyřešeny v prvním kroku procedury RA [46].

LENA+ poskytuje mechanismy detekcí kolize 1. (Preamble) a 3. (Connection Request) zprávy. Tyto zprávy odesílají UE směrem k eNodeB během inicializačního procesu (four-message handshake) standardizované procedury RA .

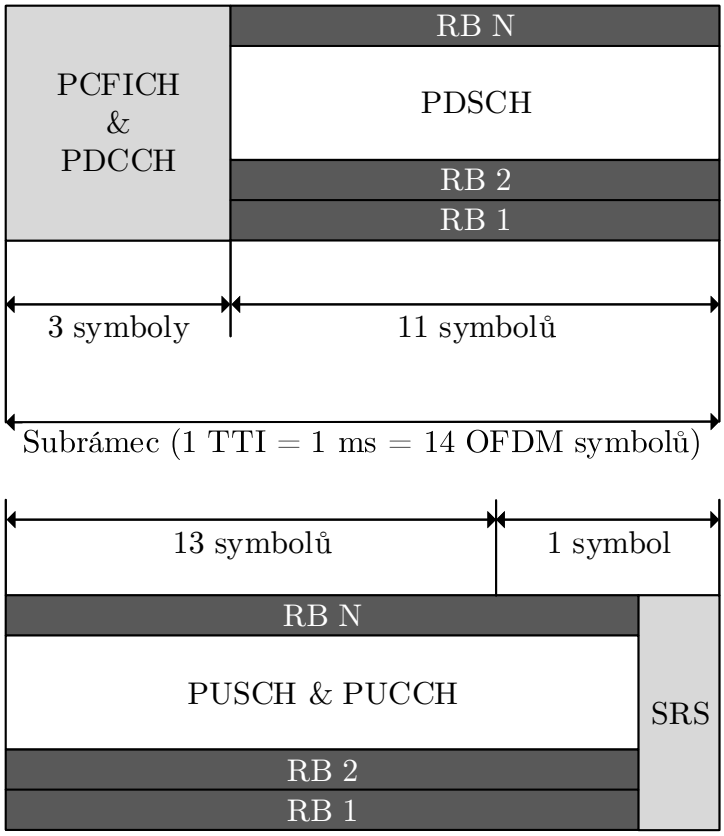
Dále implementuje například řešení sporů aj. Metoda je vytvořená tak, aby byla UE odstraněna z eNodeB a jádra sítě, pokud nastane chyba metody náhodného přístupu [44].

4.4 Kanály LTE modulu v NS-3

V této sekci je popsána struktura subrámců a ukázka implementace fyzických kanálů v LTE modulu simulátoru NS-3.

4.4.1 Struktura subrámce

Subrámec je v simulátoru NS-3 rozdělen na řídící a datovou část jak zobrazuje obr. 4.6. Referenční signály i kanály musí být simulovány s ohledem na granularitu simulátoru založenou na PRB [43].



Obr. 4.6: Fyzické kanály simulátoru NS-3 [43].

Kontrolní downlink rámec je umístěn na začátku každého rámce a jeho délka je až 3 OFDM symboly. Skutečná doba trvání je dána kanálem PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel) v souladu se standardy 3GPP.

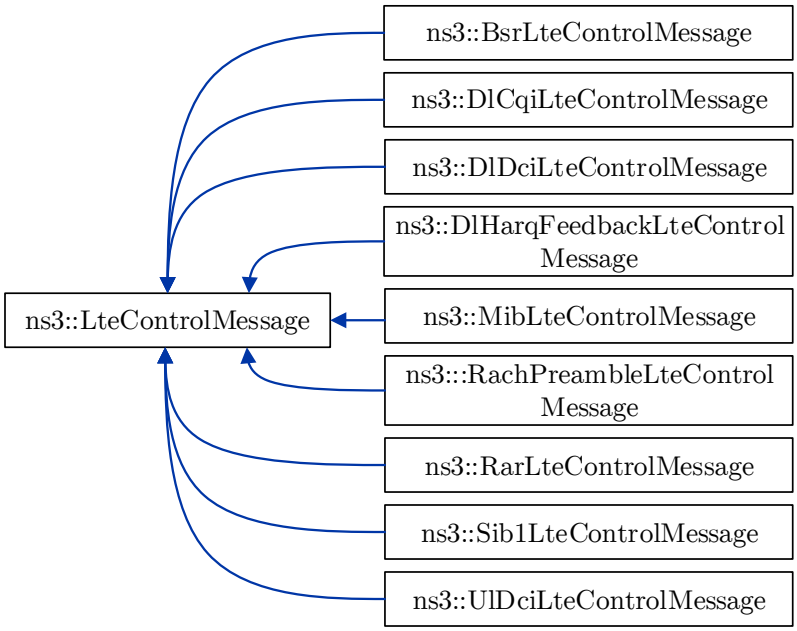
Ve specifikované době PCFICH je přenášen kontrolní kanál PDCCH. Ten přenáší důležité informace týkající se alokace zdrojů pro konkrétního uživatele ve zprávě DCI. Tato zpráva je vytvořena vrstvou MAC [43].

Fyzický kanál PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) je hlavní kanál přenášející data ve směru downlink.

Signál SRS (Sounding Reference Signal) je přenášen periodicky v posledním symbolu subrámce. Vrstva RRC vyžívá algoritmus k dynamické změně periodicity, dle připojených UE k základnové stanici [43].

4.4.2 Implementace PHY kanálů v NS-3

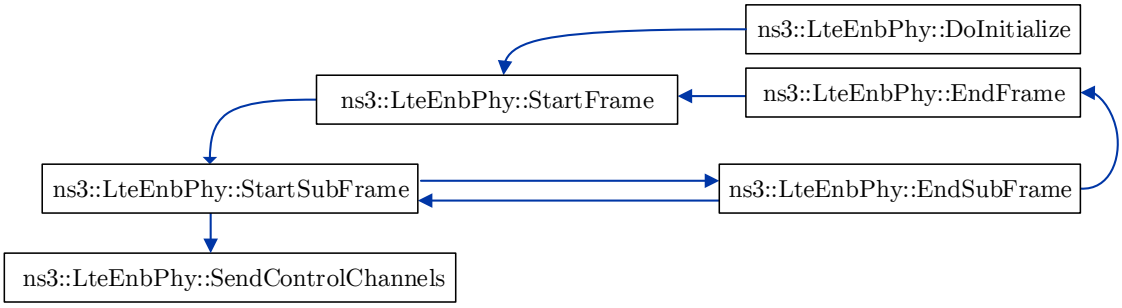
Fyzické kontrolní kanály (jako je PDCCH, CQI zpětná vazba, ...) jsou v simulátoru NS-3 reprezentovány třídou `ns3::LteControlMessage` a jejími potomky (diagram dědičnosti je zobrazen na obr. 4.7) [47].



Obr. 4.7: Diagram dědičnosti třídy LteControlMessage [47].

Základnová stanice eNodeB odešle kontrolní zprávu funkcí `SendControlChannels` z třídy `ns3::LteEnbPhy` reprezentující fyzické rozhraní eNodeB.

Protože první 3 OFDM symboly subrámce jsou alokovány právě kontrolními kanály PDCCH a PCFICH, je tato funkce volána pokaždé, kdy je vytvářen nový rámec (resp. subrámec) [47]. Graf volání funkce je zobrazen na obr. 4.8.



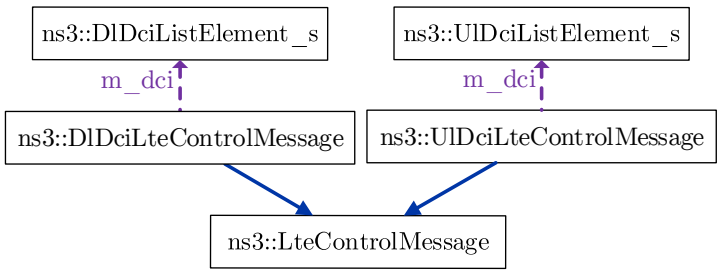
Obr. 4.8: Graf volání funkce SendControlChannel [47].

Zprávy, které odeslalo UE zařízení zpět směrem k eNodeB, jsou přijaty a filtrovány metodou `LteEnbPhy::ReceiveLteControlMessageList`. Předchází se tak opětovnému předávání již přijaté zprávy [47].

4.4.3 Kontrolní informační zprávy

Plánovač NS-3 generuje struktury DCI, které jsou dále přenášeny fyzickou vrstvou eNodeB připojeným UE. Informuje je o alokaci zdrojů na subrámcové bázi [47].

Ve směru downlink vyplňuje specifická pole struktury DCI informacemi, jako jsou modulační a kódová schémata (MCS – Modulation Coding Scheme), které mají být použity, velikost MAC transportního bloku (TB – Transport Block) a alokační bitmapu, která identifikuje, které RB budou obsahovat data přenášená eNodeB konkrétnímu uživateli [47].



Obr. 4.9: Digram tříd ns3::LteControlMessage [47].

V uplink směru je formát DCI odlišný, protože z důvodu modulace SC-FDMA mohou být použity pouze sousední RB. V důsledku toho mohou být eNodeB přiděleny všechny RB bez ohledu na konfiguraci šířky pásma [47].

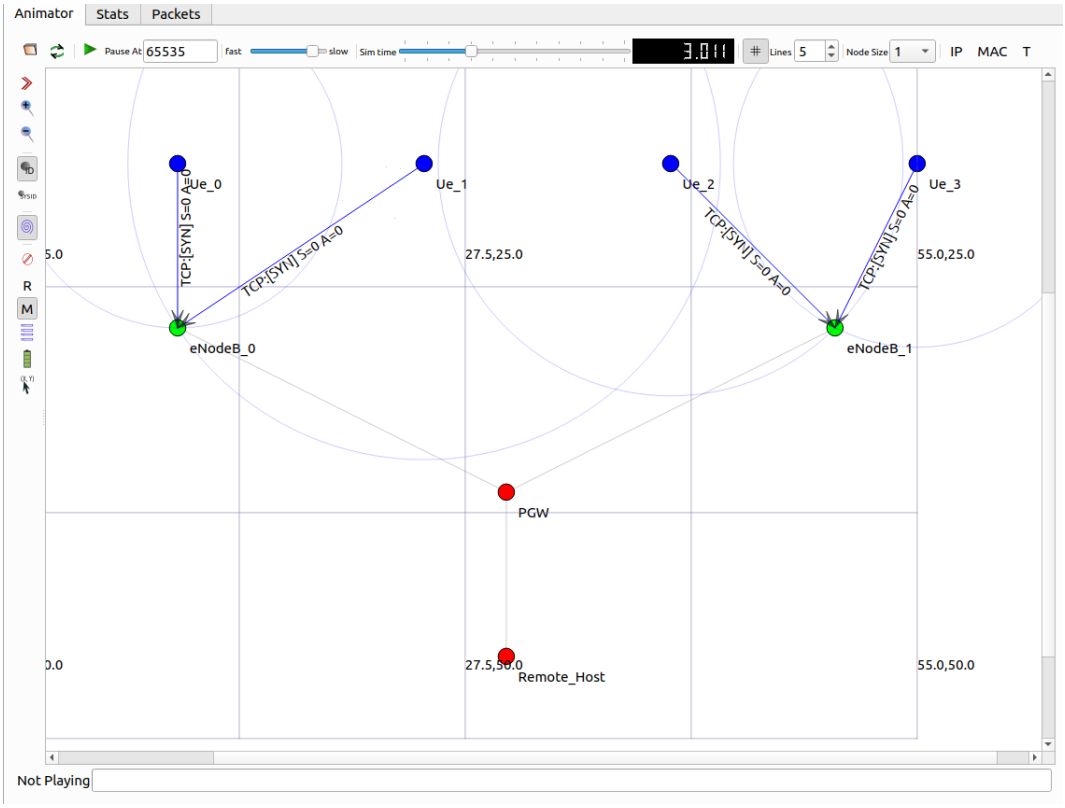
Zprávy DCI reprezentuje v simulátoru struktura `DlDciListElement_s` pro downlink a `UlDciListElement_s` reprezentuje UCI pro uplink zprávy. Obě tyto struktury jsou definovány ve třídě `ff-mac-common.cc` [47]. Digram propojení tříd NS-3 mezi PHY a MAC vrstvou je zobrazen na obr. 4.9.

5 SIMULAČNÍ SCÉNÁŘE

V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé simulační scénáře, které byly v diplomové práci vytvořeny. Nejprve je popsán Úvodní scénář se základními prvky LTE Modulu NS-3. V další části je popsán Rozšířený testovací scénář, který rozvíjí úvodní o další nastavení pro možnost pozorování chování systémů při použití technologie LTE/LTE-A a LTE Cat-M1.

5.1 Úvodní scénář

V první fázi diplomové práce byl vytvořen základní testovací scénář s implementovaným modulem LENA v simulátoru NS–3. Vychází z veřejně dostupného příkladu `lena-simple-epc.cc`. Ve scénáři byla pozměněna topologie, zdroje datového toku, implementované prvky pro možnost animace a zobrazení statistik síťového provozu. Scénář slouží pro ověření funkčnosti a byly zde použity základní aplikace.



Obr. 5.1: Ukázka animace v programu NetAnim.

Topologie scénáře je zobrazena na obr. 5.1. Skládá se ze 4 LTE koncových stanic (UE_0 – UE_3), 2 základnových stanic (eNodeB_0, eNodeB_1), uzlu PGW/SGW (PGW) a vzdáleného hostitele (Remote_Host) přistupujícího z Internetu.

Výpis 5.1: Definice Bulk aplikace.

```
1 uint16_t port = 80;  // Port protokolu http
2 BulkSendHelper source ("ns3::TcpSocketFactory",
3 InetSocketAddress (remoteHostAddr, port));
4 source.SetAttribute ("MaxBytes", UintegerValue (0));
5 ApplicationContainer sourceApps = source.Install (ueNodes.Get(0));
6 sourceApps.Start (Seconds (0.0));
7 sourceApps.Stop (Seconds (10.0));
```

Datový tok je generován aplikací typu `BulkSendApplication`. Tato aplikace slouží k odesílání dat s maximální možnou rychlostí do limitu odesílaných dat. Ten je stanoven atributem `MaxBytes` (pokud je nastaven na 0, nejsou data limitovaná a omezení je pouze během aplikace). Aplikace využívá TCP transportní protokol (protokol UDP není aplikací podporován). Rychlost přenosu dat je proto snížena o dodatečnou režii. Ukázka možné definice je zobrazena ve výpisu 5.1.

V této ukázce je aplikace implementována pomocí třídy `BulkSendHelper`. Využívá port 80 a cílová adresa je IP adresa uzlu `Remote_Host` (1. a 2. řádek výpisu 5.1). Z pohledu UE zařízení je aplikace nastavena jako uplink. Množství odesílaných dat není omezeno (4. řádek výpisu 5.1). Aplikace je nainstalovaná na potenciální zdroj dat[1] (5. řádek výpisu 5.1). Nakonec je stanoven čas zapnutí a vypnutí aplikace (řádek 6. a 7. výpisu 5.1).

Výpis 5.2: Definice PacketSink aplikace.

```
1 PacketSinkHelper sink ("ns3::TcpSocketFactory",
2 InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny(), port));
3 ApplicationContainer sinkApps = sink.Install (remoteHost);
4 sinkApps.Start (Seconds (0.0));
5 sinkApps.Stop (Seconds (10.0));
```

Aby cílový uzel mohl přijímat data a dále je zpracovávat, je nutné nainstalovat aplikaci typu `PacketSink`. Stanoví se zdrojová adresa, použitý protokol transportní vrstvy a port, na kterém má naslouchat. Možná definice aplikace tohoto typu je zobrazena ve výpisu 5.2. Opět je využit port 80, ale zdrojová adresa není blíže specifikovaná (`Ipv4Address::GetAny()`). To je výhodné při využití stejné aplikace na více zařízeních. Nainstaluje se na cílový uzel (3. řádek) a stanoví se zapnutí a vypnutí aplikace (4. a 5. řádek).

[1] V této ukázce je aplikace nainstalovaná pouze na jedno UE zařízení (`ueNodes.Get(0)`). Na potřebný počet zařízení lze nainstalovat např. přes cyklus for.

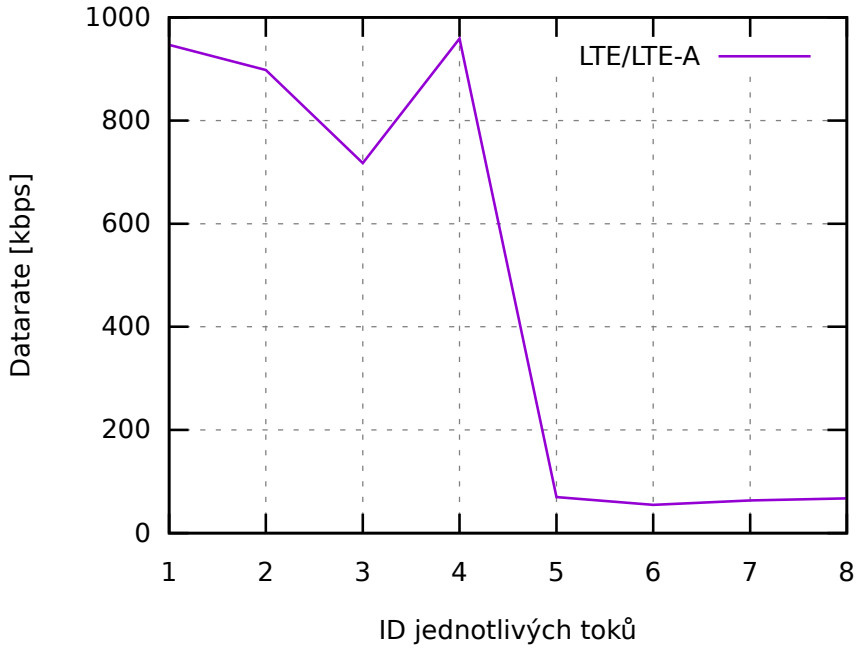
Výpis 5.3: Ukázka výstupu modulu FlowMonitor – xml soubor.

```
<?xml version="1.0" ?>
<FlowMonitor>
  <FlowStats>
    <Flow flowId="1" timeFirstTxPacket="+0.0ns"
    timeFirstRxPacket="+3021928652.0ns"
     timeLastTxPacket="+9987999999.0ns"
    timeLastRxPacket="+9994929121.0ns"
     delaySum="+62666604211.0ns"
    jitterSum="+6052094218.0ns" lastDelay="+35929122.0ns"
     txBytes="1237316"
    rxBytes="1211388" txPackets="2107" rxPackets="2062"
     lostPackets="1"
    timesForwarded="0">
      <delayHistogram nBins="69" >
        <bin index="14" start="0.014" width="0.001" count="20" />
        ...
      </delayHistogram>
      <jitterHistogram nBins="35" >
        <bin index="0" start="0" width="0.001" count="783" />
        ...
      </jitterHistogram>
      <packetSizeHistogram nBins="30" >
        <bin index="2" start="40" width="20" count="2" />
        <bin index="29" start="580" width="20" count="2060" />
      </packetSizeHistogram>
      <flowInterruptionsHistogram nBins="0" >
      </flowInterruptionsHistogram>
```

Pro možnost zobrazení výstupních síťových statistik simulace je implementován modul `FlowMonitor`. Jeho výstup je možné zaznamenat do souboru typu *.xml (zobrazeno ve výpisu 5.3) nebo pro lepší přehlednost je možné přistupovat ke konkrétním parametrům a vypsat je do konzole (zobrazeno ve výpisu 5.4).

Výpis 5.4: Ukázka výstupu modulu FlowMonitor – konzole.

```
 Flow monitor statistic
--------------------------
Flow ID:1
Src add:  7.0.0.2   ->  Dst add: 1.0.0.2
Src port: 49153     ->  Dst port: 80
Tx Packets/Bytes:   17000 / 8976000
Rx Packets/Bytes:   16936 / 8942208
Throughput:   9959.23 kb/s
Delay sum:    267813 ms
Mean delay:   15.8133 ms
Jitter sum:   6111 ms
Mean jitter:  0.360864 ms
Lost Packets: 64
Packet loss %:0.376471
```



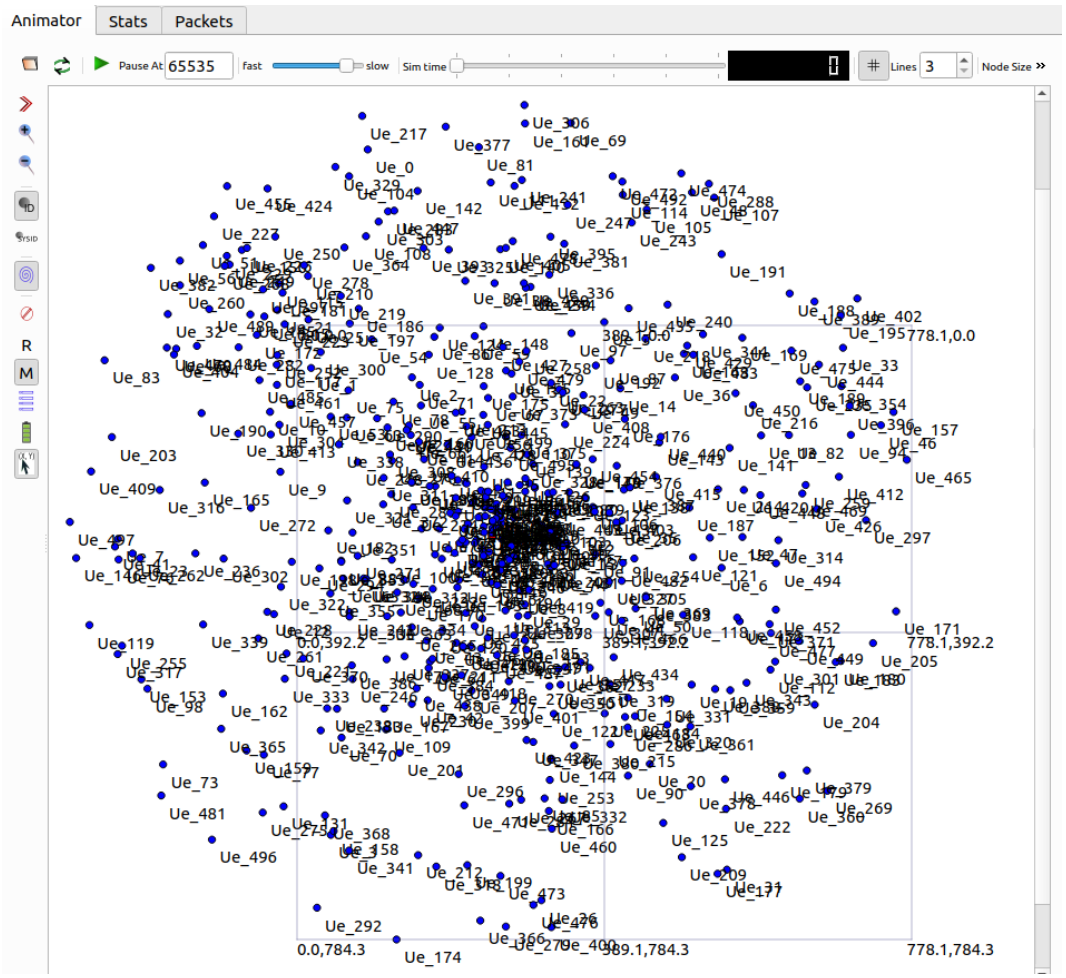
Obr. 5.2: Graf vytvořený v programu Gnuplot - průměrná datová rychlost.

Další možné zpracování výstupních dat modulu FlowMonitor je pomocí aplikace Gnuplot. Graf průměrné datové rychlosti jednotlivých datových toků je zobrazen na obr. 5.2. Tento scénář využívá modul LENA ve výchozím nastavení. Použitá šířka pásma pro UL i DL je 5 MHz (25 zdrojových bloků).

5.2 Rozšířený testovací scénář

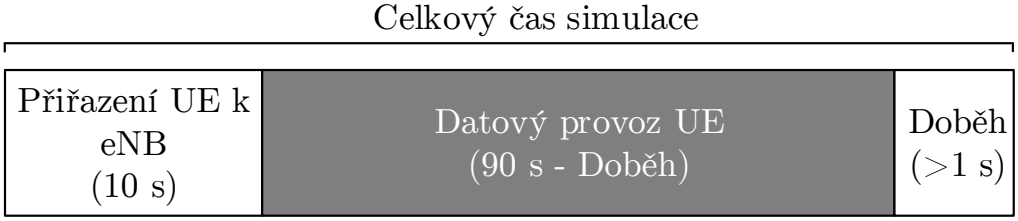
V další fázi byly vytvořeny simulační scénáře, které sloužily k testování systému při použití konkrétní konfigurace a početnějšího množství UE zařízení.

Technologie LTE Cat-M1 předpokládá použití poměrně velkého množství UE zařízení s relativně nízkou datovou propustností (<300 kb/s). Z tohoto důvodu je počet koncových zařízení ve scénáři zvýšen na 500 UE na 1 eNodeB základnovou stanici. Základní topologie scénáře je zobrazena na obr.5.3.



Obr. 5.3: Ukázka topologie rozšířeného scénáře v programu NetAnim.

Pomocí tzv. alokátoru pozice typu `RandomDiscPositionAllocator` jsou UE náhodně rozmístěny do plochy tvaru kruhu dle stanovených parametrů. Průměr je zvolen 550 m s plochou $\sim 0,9\,\mathrm{km}^2$. Hustota zařízení je tedy 555,56 UE/km^2.



Obr. 5.4: Rozdělení času simulace.

Celkový čas simulace je zvýšen na 100 s, který se dále dělí na 3 části (zobrazeno na obr. 5.4).

1. Koncová zařízení jsou v konstantním časovém kroku registrována k eNodeB. Ten odpovídá celkovému času přiřazení/počet UE (20 ms na UE při použití 500).
2. Samotná část simulace komunikace.
3. Doběh simulace o délce 1 s + doba běhu vysílání posledního zařízení.

Toto rozdělení celkového času bylo určeno na základě zkušeností z předchozích simulací. Pokud nebyly tyto části rozděleny, docházelo k výraznému zvýšení ztrátovosti paketů, zpoždění a snížení datové rychlosti přenosu s ojedinělými zákmity. Toto chování bylo odměřeno pro 500 UE přibližně do času 10 s. Tento čas znamená dobu potřebnou k incializaci spojení (registraci) všech UE a eNodeB.

Tato anomálie je spojena s modulem LENA. Při jeho použití je zařízení, které se připojí do sítě v tom okamžiku převedeno do stavu CONNECTED_NORMALLY. Jsou pro něj tedy alokovány prostředky sítě a to i v případě, že zařízení nic nevysílá. Počáteční stavy a přechody mezi nimi řeší rozšiřující modul ELENA.

5.2.1 Přiřazení UE k eNodeB

Výpis 5.5: Definice funkce přiřazení UE k eNodeB.

```
1 void Attach(Ptr<NetDevice> ue, Ptr<NetDevice> eNB,
2   Ptr<LteHelper> lte) {
3   lte->Attach (ue, eNB);}
```

Přiřazení je prováděno pomocí časovače `Simulator::Schedule` v běhu simulace funkcí `Attach` (definice zobrazena ve výpisu 5.5). Ta obsahuje stejnojmennou funkci z třídy `LteHelper`. Proto je nutné, aby byl nadřazené funkci předán ukazatel na proměnou této třídy, spolu s ukazately na zařízení UE a eNB z třídy `NetDevice`. Příklad volání funkce je zobrazen ve výpisu 5.6.

Výpis 5.6: Volání funkce přiřazení.

```
1 double attachStart=0;
2 double attachStep=startTime/numberOfNodes;
3 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++) {
4  Simulator::Schedule(Seconds (attachStart), &Attach,
5   ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0),lteHelper);
6  attachStart+=attachStep; }
```

V další části probíhá simulace komunikace koncových zařízení UE a Remote host.

5.2.2 Zdroj datového toku

Zatímco v úvodním scénáři byla jako zdroj datového toku použita aplikace typu Bulk, v rozšiřujícím scénáři byla pro generování dat použita třída `Socket`. Tato třída dává plnou kontrolu nad datovým provozem a navíc nabízí možnost využití tzv. Callback. To umožňuje například specifikovat konkrétní činnost při obdržení paketu příjemcem.

Výpis 5.7: Definice metody pro přijímání paketů.

```
1 TypeId tid = TypeId::LookupByName ("ns3::UdpSocketFactory");
2 Ptr<Socket> recvSink=Socket::CreateSocket (remoteHost,tid);
3 InetSocketAddress local=
4   InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny(),port);
5 recvSink->Bind (local);
6 recvSink->SetRecvCallback (MakeCallback (&ReceivePacket));}
```

Ve výpisu 5.7 je zobrazena ukázka definice metody pro přijímání paketů (soketů). Jako první je definován použitý protokol na transportní vrstvě, kterým je potokol UDP (1. řádek). Následuje specifikace soketu na straně příjemce a k němu přiřazení protokolu UDP (2. řádek). Na dalších řádcích (3.–4.) je specifikováno pro jaké adresy a port má být soket vytvořen a na 5. řádku je přiřazen k tomuto objektu třídy `Socket`. V této konkrétní ukázce je konfigurace provedena s cílem, aby naslouchal všem adresám pro konkrétní použitý *port*. Poslední 6. řádek je ukázka zpětného volání při obdržení paketu, konkrétně se vyvolá funkce `ReceivePacket` s automatickým argumentem přijatého soketu.

Výpis 5.8: Definice metody vysílání paketů.

```
1  uint32_t packetSize = 512;//Velikost paketu v Bytech
2  uint32_t packetCount = 17;//Celkový počet paketů k odeslání
3  double packetInterval = 0.3;//Interval mezi pakety v sekundách
4  uint16_t port= 4477;//Port soketu
5  double simTime = 100;//Celkový čas simulace
6  double finalRun = packetCount*packetInterval+1;;//Doba doběhu
7  double startTime = 10;//Čas spouštění vysílání jednotlivých UE
8  double stopTime = simTime-finalRun;//Konec vysílání všech UE
9  double step = (stopTime-startTime)/numberOfNodes;//Odstupňování UE
10
11 for (uint16_t i = 0; i < numberOfNodes; i++) {
12 ////////////////******Soket odesílatele*****//////////////////
13 Ptr<Socket> source = Socket::CreateSocket (ueNodes.Get (i), tid);
14 InetSocketAddress remote =
15  InetSocketAddress (remoteHostAddr, port);
16 source->Connect(remote);
17 ////////////////*******Náhodné číslo*****//////////////////
```

```
18 randomNumber = x->GetValue(0, 10);
19 ////////////////*******Plánování odesílání*****///////////
20 Simulator::Schedule(Seconds (startTime+(randomNumber*0.1)),
21   &SendPacket_My, source, packetSize, packetCount,
22   Seconds(packetInterval), ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0));
23 ////////////////*******Inkrementování startTime*****////////
24 startTime+=step; }
```

Ukázka ve výpisu 5.8 zobrazuje konkrétní kroky pro stanovení parametrů vysílání jednotlivých UE zařízení.

Řádky 1.-4. určují vlastnosti vytvořené „aplikace“. Konkrétně v tomto příkladu, dle uvedených hodnot, budou pakety posílány rychlostí ∼13,5 kb/s po dobu 5,1 sekund. Na 5.-9. řádku jsou stanoveny konkrétní časové proměnné, které se týkají celkového času simulace, jeho dílčích částí a času počátku a ukončení vysílání jednotlivých UE zařízení.

Ve smyčce jsou postupně procházena všechna zařízení UE a je pro ně vytvořen nový soket se stejným portem. Vytvoření soketu je zobrazeno na 13. řádku. Opět se přiřadí protokol transportní vrstvy a odesílatel. Následující řádky 14.–15. specifikují dvojici IP adresy a portu, která je na 16. řádku připojená k soketu.

Spuštěna je postupně na všech UE s konstantním časovým odstupem, ke kterému je přičteno náhodně vygenerované číslo <1 (18. řádek). Tento krok byl zvolen, protože při konstantním kroku vzniká postupný souběh vysílání UE.

Pro určení počátku vysílání je opět využitý časovač, který ve specifikovaném čase spustí metodu `SendPacket_My` s příslušnými parametry. Tato metoda zjišťuje zdali je zařízení ve stavu CONNECTED_NORMALLY a pokud ano, tak volá metodu `SendPacket`. Slouží tedy pouze pro ošetření, že se zařízení nepřipojilo k eNodeB (například vlivem vzdálenosti, interferencí, atd.) a zároveň dává možnost zaznamenávat množství zařízení, která se chovají nekorektně.

Výpis 5.9: Definice metody SendPacket pro vysílání paketů.

```
1  static void SendPacket (Ptr<Socket> socket, uint32_t pktSize,
2  uint32_t pktCount, Time pktInterval,Ptr<NetDevice> ueDev,
3  Ptr<NetDevice> enbDev) {
4    if (pktCount > 0) {
5        socket->Send (Create<Packet> (pktSize));
6        Simulator::Schedule (pktInterval,
7          &SendPacket, socket, pktSize,
8        pktCount - 1, pktInterval,ueDev, enbDev); }
9    else {
10       socket->Close ();
11       ResetToIdle(ueDev,enbDev); } }
```

Ve výpisu 5.9 je zobrazena klíčová metoda pro zdroj dat. Metoda volá rekurzivně sama sebe v čase specifikovaném inter-paket intervalem a postupně dekrementuje proměnnou `pktCount`. Pokud je tato proměnná rovna 0, byly odeslány všechny pakety, odesílání končí a soket je uzavřen.

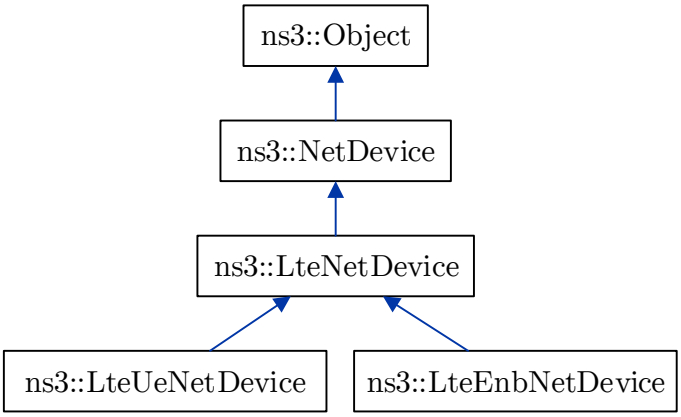
Metoda pro uvolnění radiových zdrojů

Po uzavření soketu zařízení UE stále drží prostředky sítě (k uvolnění dochází až přibližně 10 s po odvysílání posledního paketu). Vzhledem k omezené šířce pásma u technologie LTE Cat-M1 je efektivnost využití prostředků sítě důležitá. Proto byla vytvořena metoda `ResetToIdle` pro uvolnění prostředků a přechodu UE zařízení zpět do stavu Idle. Ukázka metody `ResetToIdle` je ve výpisu 5.10.

Výpis 5.10: Definice metody ResetToIdle pro uvolnění prostředků.

```
1  void ResetToIdle(Ptr<NetDevice> ueDev, Ptr<NetDevice> enbDev) {
2    Ptr<LteUeNetDevice> ueLteDevice =
3      ueDev->GetObject<LteUeNetDevice>();
4    Ptr<LteUeRrc> ueRrc = ueLteDevice->GetRrc();
5    uint16_t rnti = ueRrc->GetRnti();
6    LteUeRrc::State state = ueRrc->GetState();
7
8    Ptr<LteEnbNetDevice> enbDevice =
9      enbDev->GetObject<LteEnbNetDevice>();
10   Ptr<LteEnbRrc> enbRrc = enbDevice->GetRrc();
11   Ptr<LteEnbMac> enbMac = enbDevice->GetMac();
12
13   if(state >= 8){ //jestliže je zařízení mimo stav Idle
14  ueRrc->DoResetToCamped();
15  enbMac-> GetLteEnbCmacSapProvider ()->ReleaseLc(rnti, 1);
16  enbMac-> GetLteEnbCmacSapProvider ()->RemoveUe(rnti);
17  }else {
18     std::cout<<"Not Reseting!!"<<std::endl;
19     NotResetingNodes++; }}
```

Řádky 2.-11. jsou inicializace proměnných a získání konkrétních potřebných objektů. Reset se provede pouze v případě, jestliže již zařízení není ve stavu Idle (znamenalo by to, že již byly prostředky uvolněny nebo se zařízení ani nepřipojilo k síti). Následuje volání funkce `DoResetToCamped`, která je implementovaná v rozšiřujícím modulu ELENA. Zařízení sice přejde to stavu IDLE_CAMPED_NORMALLY, ale prostředky zůstavají stále zarezervovány v základnové stanici eNodeB. To řeší 15. a 16. řádek, kde je na základě identifikátoru C-RNTI (Cell Radio Network Temporary Identifier) uvolněn logický kanál a zařízení je uvolněno. Diagramu tříd ns3::NetDevice je zobrazen na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Digram tříd LteUeNetDevice a LteEnbNetDevice [47].

5.2.3 Konfigurace scénáře

Navýšení připojených zařízení

Protože moduly LENA i ELENA vychází ze standardů 3GPP, je počet možných koncových zařízení omezen periodicitou signálu SRS. Jak je vidět z tabulky 5.1, maximální možná periodicita je 320 ms, což dovoluje pouze množství zařízení pod touto hranicí [48]. Fyzický signál SRS je přenášen v uplink směru a slouží k přenosu informací o kanálu, aby mohla eNodeB základnová stanice odhadnout CSI (Channel State Information) v rozsahu frekvencí systému LTE [49].

Tab. 5.1: Specifikace SRS signálu 3GPP TS 36.213 [48].

Index Konfigurace I_{SRS}	**Periodicita** T_{SRS} **[ms]**	**Offset subrámců** T_{off} **[ms]**
0 - 1	2	I_{SRS}
2 - 6	5	I_{SRS} - 2
7 - 16	10	I_{SRS} - 7
17 - 36	20	I_{SRS} - 17
37 - 76	40	I_{SRS} - 37
77 - 156	80	I_{SRS} - 77
157 - 316	160	I_{SRS} - 157
317 - 636	320	I_{SRS} - 317
637 - 1023	rezervované	rezervované

Je-li potřeba dosáhnout většího množství připojených zařízení, je nutné upravit

zdrojové kódy modulu LTE. Konkrétně jde o soubory `lte-phy.cc` (řádky 150–174) a `lte-end-rrc.cc` (řádky 2715–2732). Příklad změny je zobrazen ve výpisu 5.11

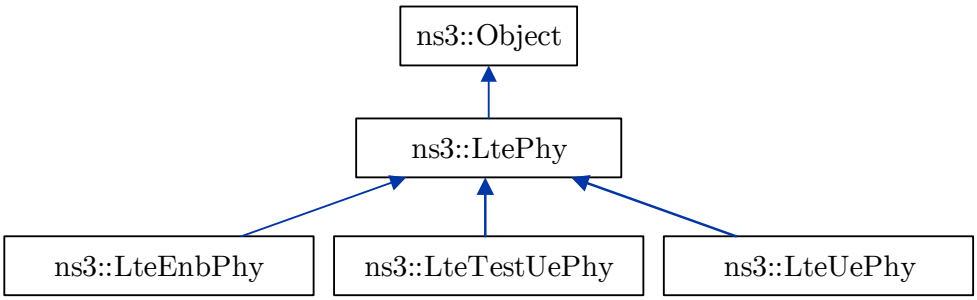
Výpis 5.11: Modifikace zdrojového kódu lte-end-rrc.cc.

```
1  static const uint8_t SRS_ENTRIES = 10;
2  ///SRS (Sounding Reference Symbol) periodicita (TSRS) v ms.
3  static const uint16_t g_srsPeriodicity[SRS_ENTRIES] =
4    {0, 2, 5, 10, 20, 40,  80, 160, 320, 640}; //přidáno 640 ms
5  /**Dolní mez (včetně) konfiguračních indexů SRS,
6  * které používají odpovídající periodicitu SRS (TSRS). */
7  static const uint16_t g_srsCiLow[SRS_ENTRIES] =
8    {0, 0, 2,  7, 17, 37,  77, 157, 317, 637}; //přidáno 637 ms
9  /**Horní mez (včetně) konfiguračních indexů SRS,
10 * které používají odpovídající periodicitu SRS (TSRS). */
11 static const uint16_t g_srsCiHigh[SRS_ENTRIES] =
12   {0, 1, 6, 16, 36, 76, 156, 316, 636, 1276};//přidáno 1276 ms
```

Hodnoty vyšší periodicity se vypočítají pomocí následujících vztahů:

$$\begin{aligned} SRSPeriodicity\,(T_{SRS}) = &\quad 10 \cdot 2^n, \\ SRSCiLow = &\quad 10 \cdot 2^n - 3, \\ SRSCiHigh = &\quad 10 \cdot 2^n - 4. \end{aligned}$$

Digram tříd a referencí třídy ns3::LtePhy je zobrazen na obr. 5.6.



Obr. 5.6: Digram tříd LtePhy [47].

V hlavním programu se následně zavede změna výchozí hodnoty SRS periodicity příkazem zobrazeným ve výpisu 5.12.

Výpis 5.12: Změna výchozí hodnoty – SRS periodicita.

```
1 Config::SetDefault("ns3::LteEnbRrc::SrsPeriodicity",
2  UintegerValue(640));
```

Pomocí těchto předpokladů je možné stanovit i hodnoty vyšší než 640 ms. Perioda je potom ale příliš vysoká a ztrácí dopad na hodnocení kvality kanálu. Proto byla zvolena maximální hodnota SRS periodicity 640 ms.

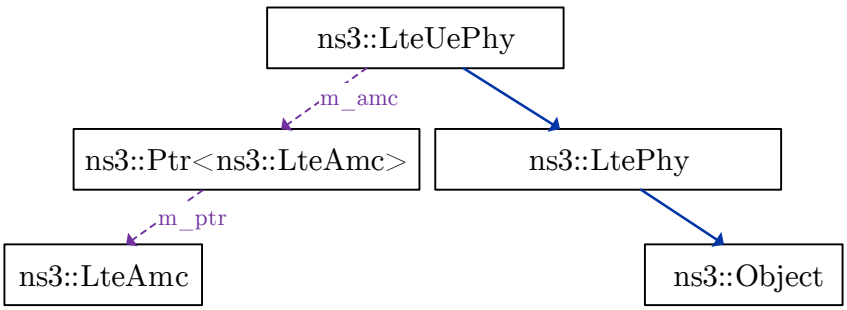
Omezení MCS a CQI

Cílem rozšířeného scénáře byla modifikace stávajícího LTE/LTE-A systému pro vytvoření představy chování systému s technologií LTE Cat-M1. Tato technologie využívá pouze omezené modulace (maximálně 16QAM) a také omezený indikátor kvality signálu CQI (účinnost do 2,4063 dle 3GPP) [48].

Tato omezení bylo nutné implementovat v jádru simulátoru, konkrétně ve třídě `lte-amc.cc` upravit funkce `SpectralEfficiencyForCqi`, `ModulationSchemeForMcs` a `SpectralEfficiencyForMcs` (řádky 48-90). Ukázka modifikace je zobrazena ve výpisu 5.13. Grafické znázornění referencí na tuto třídu je na obr. 5.7.

Výpis 5.13: Změna výchozí hodnoty – MCS a CQI.

```
1  static const double SpectralEfficiencyForCqi[10] = {
2    0.0, // mimo dosah
3    0.15, 0.23, 0.38, 0.6, 0.88, 1.18,
4    1.48, 1.91, 2.41};
5  static const int ModulationSchemeForMcs[17] = {
6    2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,
7    4, 4, 4, 4, 4, 4, 4};
8  #endif
9  static const double SpectralEfficiencyForMcs[17] = {
10   0.15, 0.19, 0.23, 0.31, 0.38, 0.49, 0.6, 0.74, 0.88, 1.03, 1.18,
11   1.33, 1.48, 1.7, 1.91, 2.16, 2.41};
```



Obr. 5.7: Digram třídy LteAmc [47].

Úprava parametrů vysílání

Simulátor NS-3 nabízí možnost změny vysílacího výkonu (jak UE, tak i eNodeB), šířky pásma, a dalších parametrů (ukázka ve výpisu 5.14). Dle parametrů LTE Cat-M1 byl nastaven vysílací výkon UE na 23 dBm (1. a 2. řádek) a základnové stanice eNodeB na 46 dBm (5. a 6. řádek) [50]. Šířka pásma byla pro UL i pro DL snížena z 5 MHz (25 PRB) na 1,4 MHz (6 PRB) (9.–12. řádek). Číslo kanálu EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number) bylo zvoleno z prvního pásma B1 (DL 100, UL 18100). Hodnoty šumu jsou pouze pro ukázku, jedná se o výchozí hodnoty simulátoru (3.–4. a 7.–8. řádek).

Výpis 5.14: Úprava parametrů vysílání.

```
1  Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::TxPower",
   StringValue("23"));
3  Config::SetDefault("ns3::LteUePhy::NoiseFigure",
   StringValue("9"));
5  Config::SetDefault ("ns3::LteEnbPhy::TxPower",
   DoubleValue(46.0));
7  Config::SetDefault("ns3::LteEnbPhy::NoiseFigure",
   StringValue("5"));
9  Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::UlBandwidth",
   StringValue("6"));
11 Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::DlBandwidth",
   StringValue("6"));
13 Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::DlEarfcn",
   StringValue("100"));
15 Config::SetDefault("ns3::LteEnbNetDevice::UlEarfcn",
   StringValue("18100"));
```

6 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Tato kapitola zobrazuje a popisuje výsledky simulovaných scénářů. Vychází z Rozšířeného testovacího scénáře se shodným přiřazením UE a zdrojem datového toku.

V první části jsou simulace provedeny bez implementovaných konfigurací scénáře. Tento scénář simuluje chování systému LTE/LTE-A.

Ve druhé části jsou simulace provedeny s již implementovanými modifikacemi scénáře. Tento scénář přibližuje odezvu systému LTE Cat-M1 na různé zatížení.

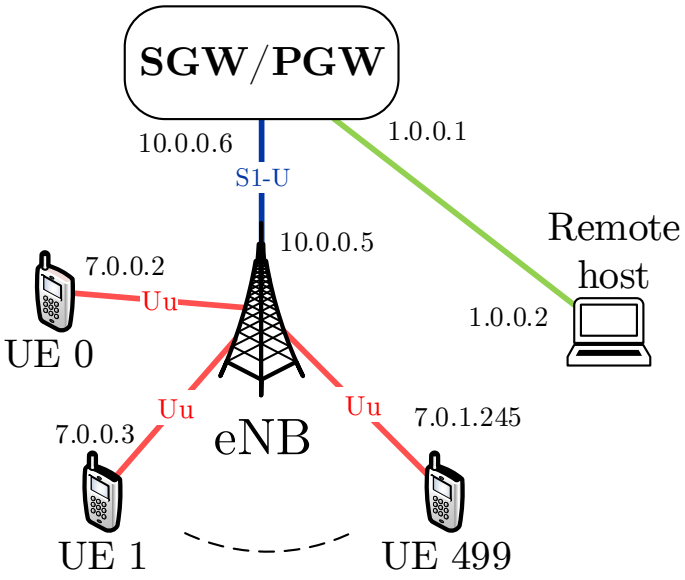
V poslední části jsou použity oba předchozí scénáře a je provedeno srovnání odezvy systémů při souběhu všech připojených UE zařízení. Simuluje tak případy kompletního výpadku spojení s eNodeB.

V tabulce 6.1 jsou zobrazeny hlavní parametry použité v simulaci technologie LTE Cat-M1. Ostatní hodnoty jsou dle výchozích hodnot modulu ELENA v NS-3.

Na obr. 6.1 je zobrazeno zjednodušené schéma architektury simulačního scénáře s adresním schématem.

Tab. 6.1: Hlavní parametry simulace.

Popis	**Hodnota**
Výchozí 3GPP vydání	13.
Počet UE	500
Počet eNodeB	1
Plocha rozmístění UE	$\sim 0,9\,\mathrm{km}^2$
Maximální vzdálenost UE a eNB	550 m
Maximální indikace CQI	2,4063
Počet PRB pro UL	6
Počet PRB pro DL	6
Šířka pásma	1,08 MHz
Vysílací výkon eNB	46 dBm
Vysílací výkon UE	23 dBm
Periodicita signálu SRS	640 ms

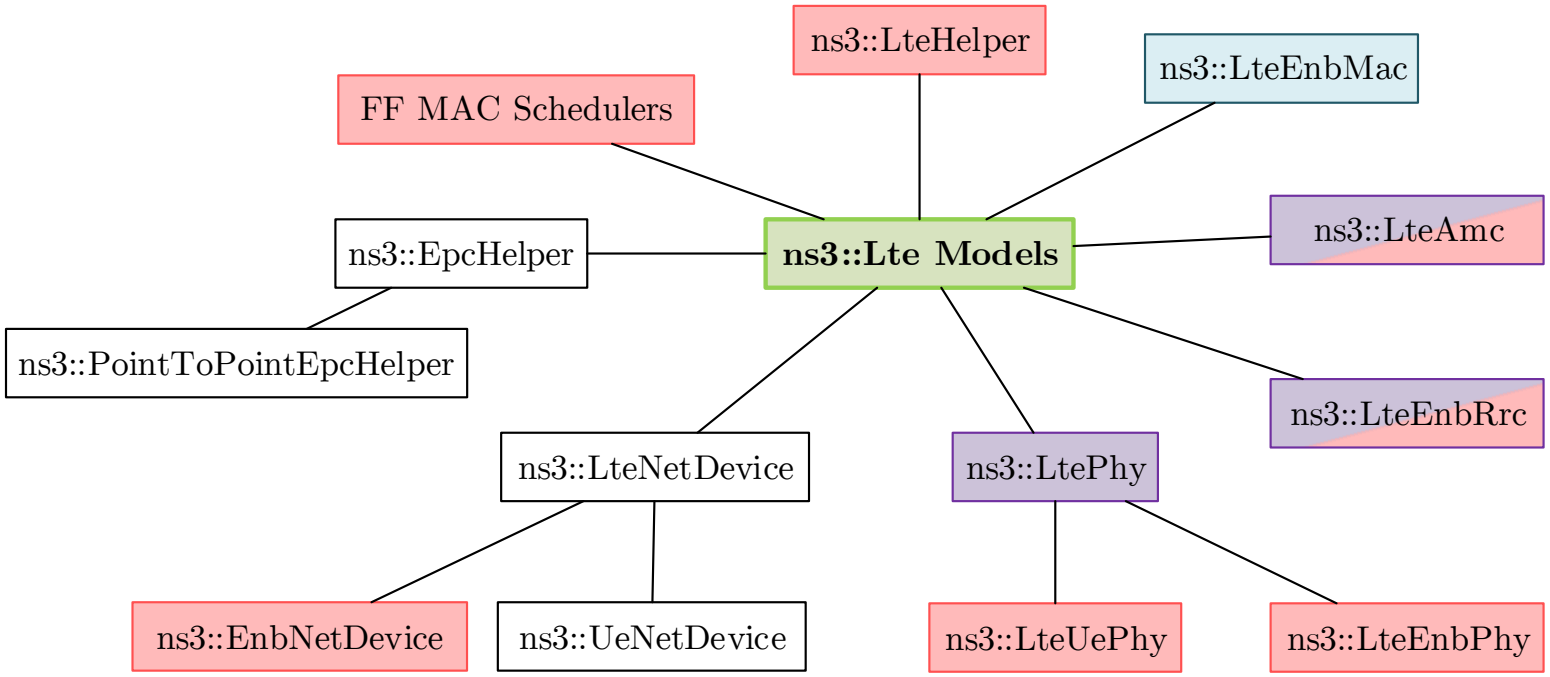


Obr. 6.1: Zjednodušené schéma architektury simulace.

Obrázek 6.2 zobrazuje schéma hlavních tříd NS-3 LTE modulu použitých při simulaci. Barevně jsou zvýrazněné třídy podle zásahu při modifikaci.

Přímý zásah byl proveden do tříd zbarvených fialově (konkrétní modifikace jsou vysvětleny v kapitole Konfigurace scénáře). Simulátor NS-3 nabízí možnost změny primárních parametrů modelů pomocí metody `Config::SetDefault()`, není tedy nutný přímý zásah do kódu a lze dynamicky měnit výchozí hodnoty (blíže specifikováno v sekci Úprava parametrů vysílání). Této vlastnosti bylo využito ve třídách, které jsou zbarveny červeně.

Modrá barva symbolizuje třídy, které obsahují metody specifikované pouze v rozšířeném modulu ELENA, nejsou tedy přímo dostupné z modulu LENA (metody jsou blíže popsané v podsekci Metoda pro uvolnění radiových zdrojů).



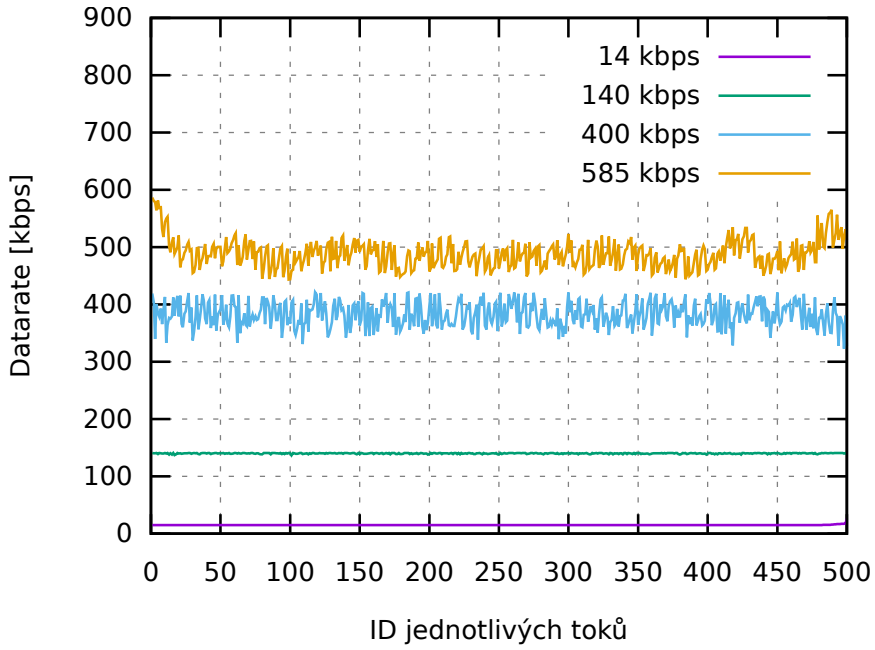
Obr. 6.2: Schéma hlavních tříd LTE Modulu v NS-3.

Scénář LTE/LTE-A

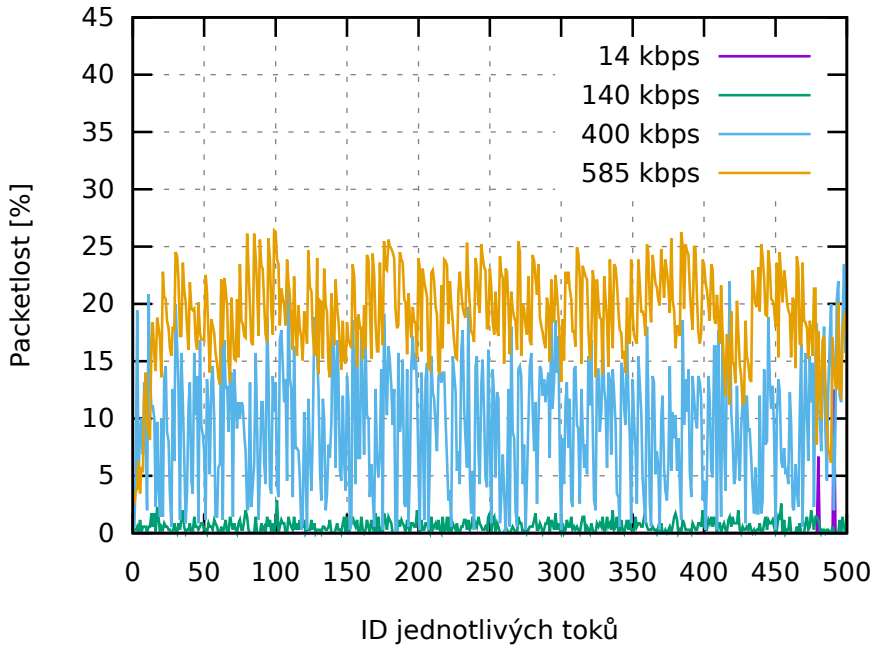
Výsledky tohoto scénáře byly získány s využitím modulu ELENA bez zmíněných konfigurací scénáře (kromě SRS periodicity, která je nutná pro možnost použití většího množství UE).

Pro ukázku byly vybrány 4 rychlosti generování dat 14, 140, 400 a 585 kb/s. Zařízení UE vysílají přibližně 6 sekund, poté přechází do stavu Idle. Postupně vysílá 500 zařízení UE. Na obr. 6.3 je zobrazen průběh průměrné rychlosti přenosu dat systémem LTE/LTE-A pro jednotlivé UE.

Pro rychlosti generování dat <200 kb/s komunikují všechna zařízení téměř stejnou průměrnou rychlostí, bez ohledu na souběh v určitých časových intervalech. Se zvyšující se rychlostí se rozdíly zvyšují a zvýhodněná jsou především zařízení na začátku a na konci simulace. Způsobeno je to především tím, že v čase vysílání těchto zařízení téměř nedochází k souběhu ostatních UE (graf průběhu je konvexního tvaru).



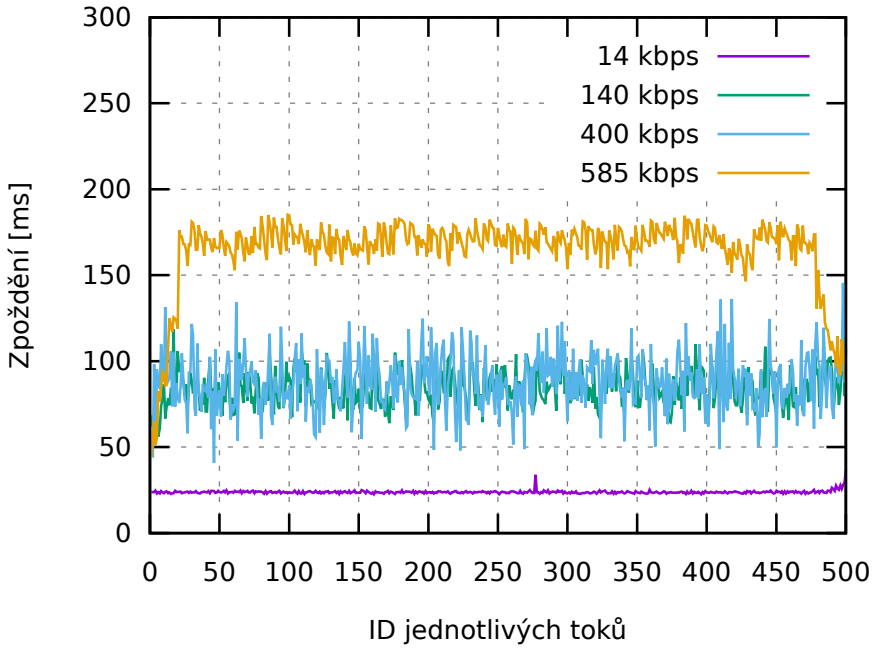
Obr. 6.3: Datová rychlost upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB.



Obr. 6.4: Ztrátovost upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB.

Obrázky 6.4 a 6.5 zobrazují průměrnou ztrátovost a zpoždění datových toků. Protože mají zařízení UE dostatečnou šířku pásma (5 MHz), jsou schopna komunikovat rychlostí <200 kb/s se ztrátovostí do 2% a zpožděním <100 ms.

Použitím rychlosti generování dat >300 kb/s výrazně zvyšuje ztrátovost paketů. Toto je také patrné z grafu na obr. 6.4, kde se u použité rychlosti 400 kb/s ztrátovost pohybuje pod hranicí 20 % a u 585 kb/s dosahuje až 25 %. Při použití transportního protokolu UDP to nemá na zpoždění vliv, avšak při použití potvrzovaného protokolu TCP by to znamenalo významný nárůst zpoždění.



Obr. 6.5: Zpoždění upload LTE/LTE-A – 500 UE, 1 eNB.

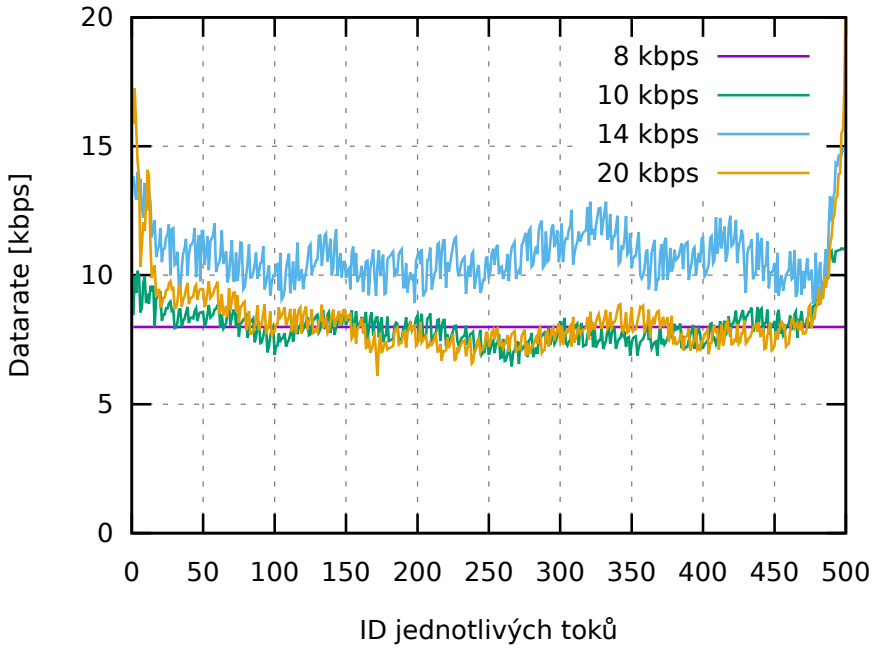
Scénář s konfigurací LTE Cat-M1

Stejně jako předchozí i tento scénář je vytvořen s použitím modulu ELENA. Použity jsou všechny zmíněné konfigurace scénáře, které ovlivňují mimo jiné vysílací výkon zařízení UE i základnových stanic eNodeB. Dále také šířku pásma, která je snížena z 5 MHz (25 PRB) na 1,08 MHz (6 PRB). Omezené jsou také modulace (maximálně 16QAM), pro zajištění co nejvyššího dosahu a maximální robustnosti vysílaní.

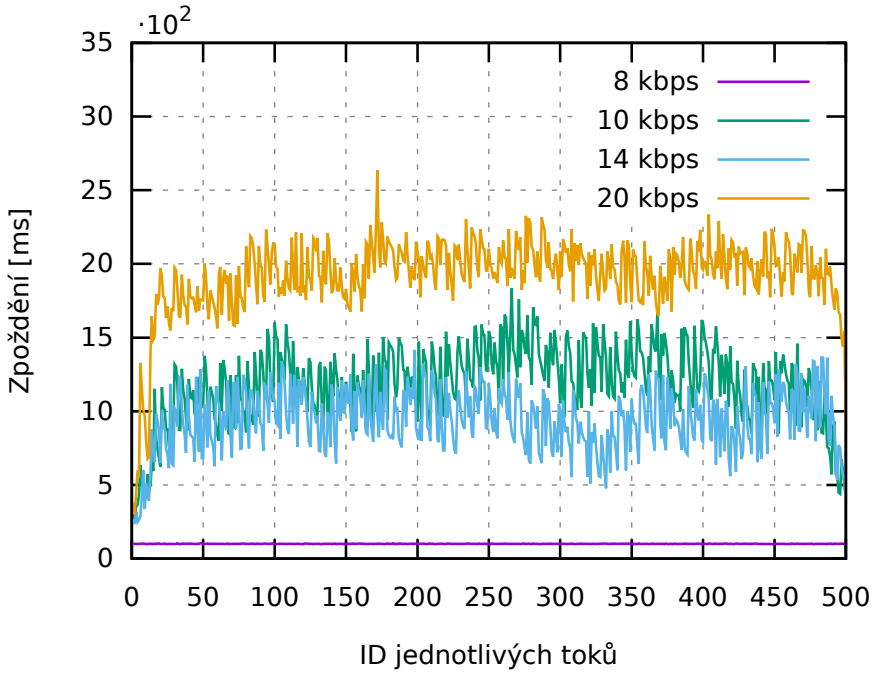
Na ukázku byly opět zvoleny 4 rychlosti generování dat. Konkrétně 8, 10, 14 a 20 kb/s. Graf průměrných rychlostí přenosu mezi zařízeními UE a Remote host je zobrazen na obr. 6.6. Remote host zde představuje koncové zařízení z internetu, které chce s tímto UE komunikovat.

Použitý je stejný koncept scénáře jako u LTE/LTE-A. Zařízení UE vysílají přibližně 6 s a po odvysílání přechází do stavu Idle. Ta, která vysílají na začátku a na konci simulace mají vlivem minoritního souběhu opět nejvyšší možné dosažitelné rychlosti přenosu.

Při použití příliš vysoké rychlosti, která přesahuje maximální hranici aktuální únosnosti, začne systém tuto rychlost uměle přibližovat právě k této hranici. Z grafu je vidět, že u tohoto typu scénáře se hranice pohybuje mezi 8 a 10 kb/s.

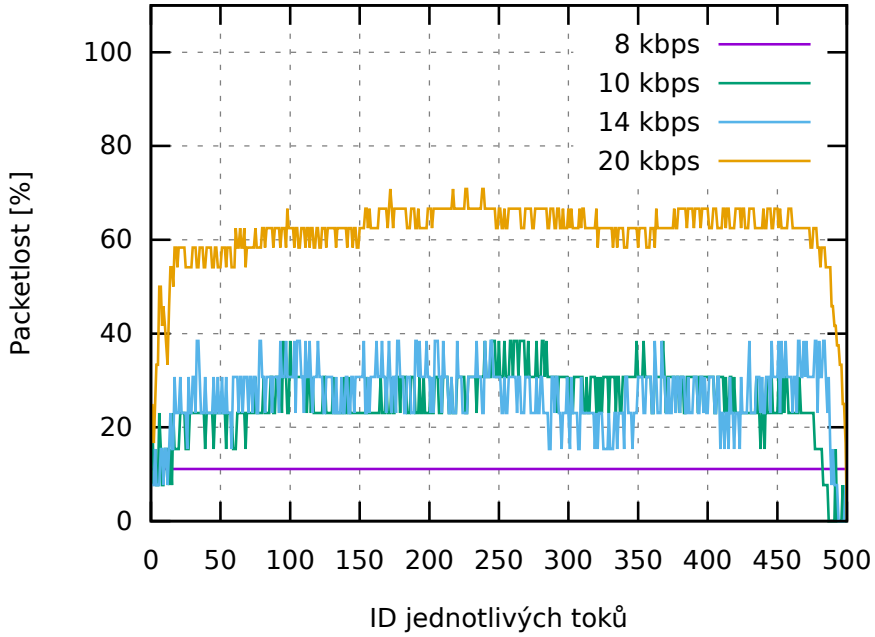


Obr. 6.6: Datová rychlost upload - konfigurace LTE Cat-M1.



Obr. 6.7: Zpoždění upload - konfigurace LTE Cat-M1.

Výrazná změna proti scénáři s použitou technologií LTE/LTE-A (obr. 6.5) je při použití této konfigurace nárůst průměrné doby zpoždění paketů (zobrazeno na obr. 6.7). Maximální zpoždění se v tomto scénáři přibližuje až k 2500 s, podle použité rychlosti generování dat.



Obr. 6.8: Ztrátovost upload - konfigurace LTE Cat-M1.

Vzhledem k tomu, že je u LPWA sítí primární, aby informace k příjemci dorazila, není citlivost na zpoždění tak významná - označují se jako tzv. „delay tolerant“ [51]. Například pro technologii NB–IoT je tolerováno zpoždění až 10 sekund, záleží ale na použité aplikaci technologie [51].

Na posledním obrázku 6.8 je zobrazen graf průměrné ztrátovosti všech toků. Rozsah hodnot je pro rychlost 10 kb/s od 5 do 38 %. Takto vysoká ztrátovost lze eliminovat použitím opakovaného vysílání, což ale zvýší zpoždění datového toku.

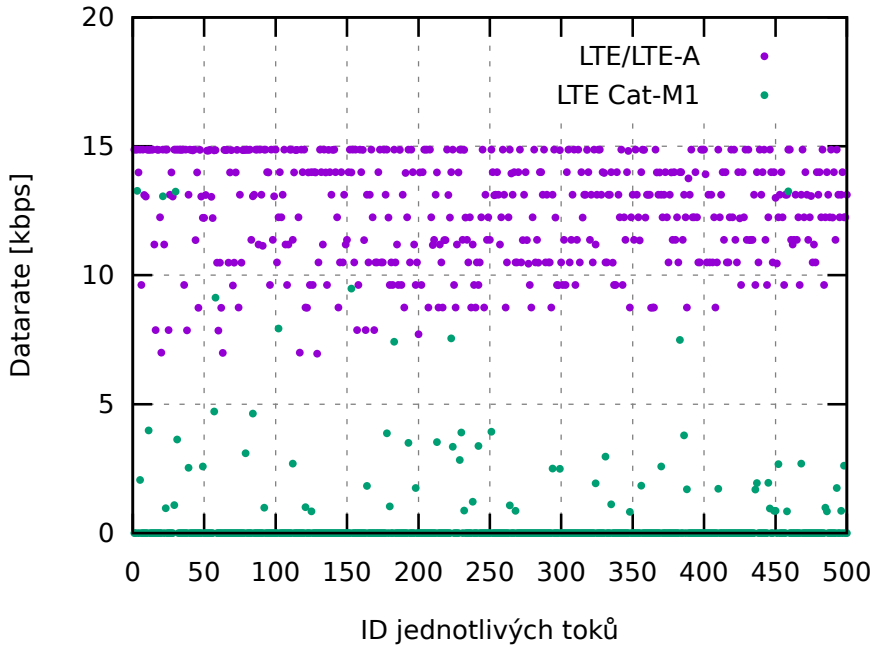
Kritický scénář souběhu

Tato simulace představuje kritický scénář, kdy dojde k okamžitému výpadku služeb a všechna zařízení se snaží komunikovat v jednom okamžiku. Pro připodobnění reálné situaci začnou všechna zařízení vysílat v náhodně nastaveném čase během 1 vteřiny.

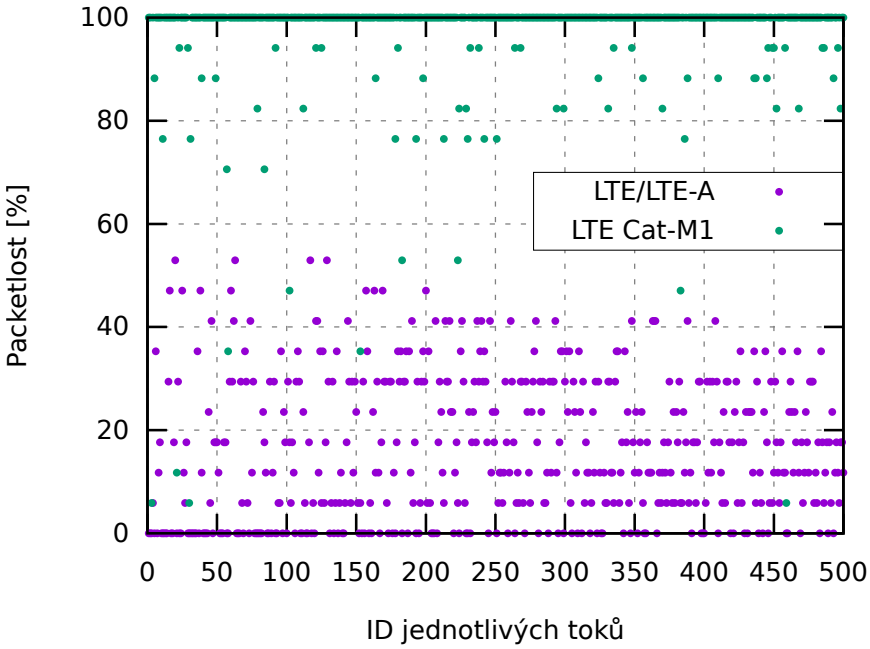
Simulace proběhla nad systémem bez úprav (LTE/LTE-A) a nad verzí s konfigurací přiblíženou technologii LTE Cat-M1. Datový tok je přibližně 15 kb/s a zařízení vysílají 5,1 sekund. Parametry jsou pro obě simulace stejné.

Jak je vidět z obr. 6.9 zařízení s LTE/LTE-A nemají se souběhem příliš velký problém. Přibližně polovina zařízení UE komunikuje bez známky potíží a minimální propustnost systému je ~ 7 kb/s.

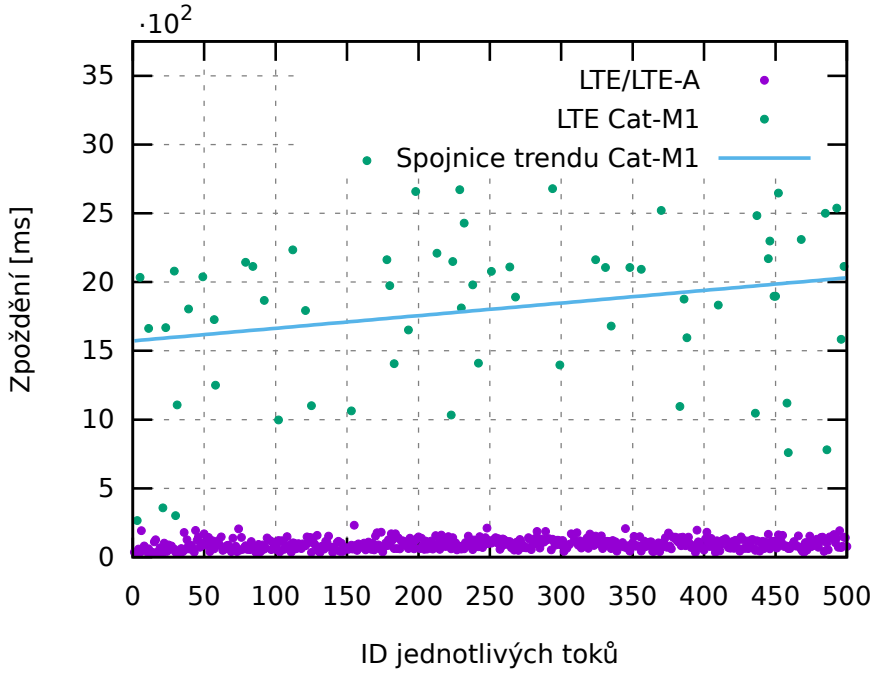
Při simulaci s konfigurací dle specifikací LTE Cat-M1 inicializovalo spojení se základnovou stanici pouze přibližně jedna pětina zařízení. Maximální průměrné datová rychlost zařízení dosahovala propustnosti do 5 kb/s, ojediněle nad tuto hranici.



Obr. 6.9: Datová rychlost – kritický souběh 500 UE.



Obr. 6.10: Ztrátovost upload – kritický souběh 500 UE.



Obr. 6.11: Zpoždění upload – kritický souběh 500 UE.

Dalším důležitým rozdílem je omezená šířka pásma. Zatímco LTE/LTE-A využívá 25 zdrojových bloků, LTE Cat-M1 jich využívá pouze 6. Ztrátovost a zpoždění je zobrazena na obr. 6.10 a 6.11. Hodnoty jsou vlivem souběhu velmi vysoké a datový tok je výrazně znehodnocen. Zpoždění dosahuje hodnot až 3000 ms a ztrátovost je minimálně 70 %. Pro větší přehlednost byla data LTE Cat-M1 proložena lineární spojnicí trendu.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala problematikou LPWA sítí. Tyto sítě se dle předpovědí předních technologických firem jako např. Cisco stanou brzy součástí našeho každodenního života.

Pro pochopení problematiky přenosu M2M dat byly v první kapitole charakterizovány pojmy Internet věcí, M2M komunikace a poskytnuty obecné informace o LPWA sítích. Dále byly popsány vlastnosti a funkce aktuálního systému LTE (8. vydání 3GPP) a postupný vývoj mobilních sítí s ohledem na paketový přenos. Následující kapitoly byly zaměřeny na detailní popis vybraných LPWA technologií. Konkrétně se jednalo o LTE Cat-M1 a NB-IoT definované organizací 3GPP ve 13. vydání jako zástupci mobilních sítí pracujících v licencovaném frekvenčním pásmu. Technologie Sigfox a LoRaWAN byly představeny jako technologie pracující v bezlicenčním pásmu. Podrobné srovnání zmíněných komunikačních technologií bylo poskytnuto v tabulce C.1.

Navazující část práce podrobně popisuje simulační nástroj NS-3 a jeho rozšiřující moduly pro možnost simulace LTE sítí. Modul ELENA, který je rozšířením modulu LENA spolu se zakomponovaným realistickým modelem LENA+, se stal základem pro tvorbu simulačních scénářů. Vytvořeny byly 3 scénáře, kdy první využíval standardní systém LTE/LTE-A, druhý byl pomocí modifikací a konfigurací přiblížen systému LTE Cat-M1. Oba scénáře proběhly s různou zátěží a vyhodnoceny byly s ohledem na datový přenos systému, zpoždění a ztrátovost paketů během přenosu. Poslední scénář představoval kritický výpadek spojení mezi UE a eNodeB a pozorování odezvy obou systémů na zpětné navazování spojení koncových zařízení.

Výstupy simulací scénáře s technologií LTE/LTE-A dokazují, že systém disponuje dostatkem fyzických rádiových bloků pro generování dat rychlostí <200 kb/s se zpožděním systému <100 ms a paketovou ztrátovostí <5% při připojení 500 UE k eNodeB základnové stanici. Při kritickém výpadku spojení se všechna koncová zařízení připojila zpět k základnové stanici se ztrátovostí <48%, zpožděním <150 ms a propustností systému ∼7 kb/s při rychlosti generování dat ∼15 kb/s. Systém LTE Cat-M1 s 500 UE a jednou eNodeB při rychlostech generování dat 8 kb/s dosahoval ztrátovosti ∼10% a zpoždění <100 ms. Při zvýšení rychlosti generování dat >10 kb/s ztrátovost vzroste nad 15% a zpoždění je >1 s. Při simulaci výpadku spojení se u technologie LTE Cat-M1 zpět připojilo pouze pětina zařízení se ztrátovosti >70%.

Současný stav implementace technologie LTE Cat-M1 je možno dále rozvíjet zejména s ohledem implementace funkcí pro umožnění přechodu koncového zařízení do tzv. režimu snížené spotřeby. Konkrétně se jedná o režimy PSM (Power Saving Mode) a eDRX (Extended Discontinuous Reception).

LITERATURA

[1] Liberg, O.; Sundberg, M.; Wang, E.; aj.: *Cellular Internet of Things: Technologies, Standards, and Performance*. Elsevier Science, 2017, ISBN 9780128124598. URL <https://books.google.cz/books?id=n9wkDwAAQBAJ>

[2] Lin, X.; Bergman, J.; Gunnarsson, F.; aj.: *Positioning for the Internet of Things: A 3GPP Perspective. IEEE Communications Magazine*, ročník 55, č. 12, prosinec 2017: str. 179–185, ISSN 0163-6804, DOI:10.1109/MCOM.2017.1700269.

[3] Cisco, White Paper: *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021.* [ONLINE] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>, březen 2017, dostupné: 11.11.2018.

[4] Cisco, White Paper: *Cisco Visual Networking Index: White Paper: Forecast and Methodology, 2016–2021.* [ONLINE] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/vni-network-traffic-forecast/infographic.html>, červen 2017, dostupné: 11.11.2018.

[5] Al-Kaseem, B. R.; Al-Raweshidyhamed, H. S.: *SD-NFV as an Energy Efficient Approach for M2M Networks Using Cloud-Based 6LoWPAN Testbed. IEEE Internet of Things Journal*, ročník 4, č. 5, říjen 2017: str. 1787–1797, ISSN 2327-4662, DOI:10.1109/JIOT.2017.2704921.

[6] Paul, C.; Ganesh, A.; Sunitha, C.: *An overview of IoT based smart homes.* In *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, leden 2018, str. 43–46, DOI:10.1109/ICISC.2018.8398858.

[7] Xiong, X.; Zheng, K.; Xu, R.; aj.: *Low power wide area machine-to-machine networks: key techniques and prototype. IEEE Communications Magazine*, ročník 53, č. 9, září 2015: str. 64–71, ISSN 0163-6804, DOI:10.1109/MCOM.2015.7263374.

[8] Robert, J.; Rauh, S.; Lieske, H.; aj.: *IEEE 802.15 Low Power Wide Area Network (LPWAN) PHY Interference Model.* In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, květen 2018, ISSN 1938-1883, str. 1–6, DOI:10.1109/ICC.2018.8422801.

[9] *Vodafone White Paper: Narrowband-IoT: pushing the boundaries of IoT.* [ONLINE] <https://www.vodafone.com/business/news-and-insights/

white-paper/narrowband-iot-pushing-the-boundaries-of-iot>, únor 2017, dostupné: 9.11.2018.

[10] Raza, U.; Kulkarni, P.; Sooriyabandara, M.: *Low Power Wide Area Networks: An Overview. IEEE Communications Surveys Tutorials*, ročník 19, č. 2, druhé čtvrtletí 2017: str. 855–873, ISSN 1553-877X, DOI:10.1109/COMST.2017.2652320.

[11] *Smart Grid: Trend nové sítě "LPWA"v době IoT.* [ONLINE] <https://sgforum.impress.co.jp/article/3458>, dostupné: 09.11.2018.

[12] Yang, W.; Wang, M.; Zhang, J.; aj.: *Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective. IEEE Wireless Communications*, ročník 24, č. 3, červen 2017: str. 138–145, ISSN 1536-1284, DOI:10.1109/MWC.2017.1600298.

[13] Sigfox: *Sigfox.* [ONLINE] <https://www.sigfox.com>, dostupné: 29.10.2018.

[14] Taneja, M.: *802.11ah - LPWA interworking.* In *2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft)*, červen 2016, str. 441–446, DOI:10.1109/NETSOFT.2016.7502482.

[15] Chung, H.; Lee, S.; Jeong, J.: *NB-IoT Optimization on Paging MCS and Coverage Level.* In *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, srpen 2018, ISSN 2154-0225, str. 1–5, DOI:10.1109/ISWCS.2018.8491101.

[16] Labib, M.; Marojevic, V.; Reed, J. H.: *Analyzing and enhancing the resilience of LTE/LTE-A systems to RF spoofing.* In *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, říjen 2015, str. 315–320, DOI:10.1109/CSCN.2015.7390464.

[17] M.Nohrborg: *LTE 3GPP.* [ONLINE] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, dostupné: 20.10.2018.

[18] Novotný, V.: *Mobilní komunikační sítě a služby v all-IP prostředí pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO.* Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno, první vydání, 2014, ISBN 978-80-214-5129-2, elektronicky.

[19] Fahmy, Y.; Kader, H. G. A.; El-Soudani, M.: *Turbo coding scheme for GPRS system.* In *Proceedings of the Nineteenth National Radio Science Conference*, březen 2002, str. 247–254, DOI:10.1109/NRSC.2002.1022629.

[20] Novotný, V.: *Komunikační služby v sítích IP pro integrovanou výuku VUT a VŠBTUO*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno, první vydání, 2014, ISBN 978-80-214-5119-3, elektronicky.

[21] ETSI: *3GPP TS 36.101 version 15.3.0 Release 15*. [ONLINE] <https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/15.03.00_60/ts_136101v150300p.pdf>, dostupné: 24.11.2018.

[22] Techplayon: *NB-IoT Frequency Bands (As per 3GPP Rel. 13, 14 and 15)*. [ONLINE] <http://www.techplayon.com/nb-iot-frequency-bands-as-per-3gpp-rel-13-14-and-15/>, srpen 2018, dostupné: 24.11.2018.

[23] Kumar, N.; Ahmad, A.; Prasad, D.: *Survey of downlink control channel resource allocation techniques in LTE*. In *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, prosinec 2015, ISSN 2325-9418, str. 1–5, DOI:10.1109/INDICON.2015.7443177.

[24] JianHuaWu: *CAT-M and NB-IoT Design and Conformance Test*. [ONLINE] <https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/20170612-A4-JianHuaWu-updated.pdf>, dostupné: 09.05.2019.

[25] *GSMA White Paper: NB-IoT Deployment Guide to Basic Feature set Requirements]*. [ONLINE] <https://www.gsma.com/iot/nb-iot-deployment-guide/>, duben 2018, dostupné: 6.11.2018.

[26] Ratasuk, R.; Mangalvedhe, N.; Zhang, Y.; aj.: *Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13*. In *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, říjen 2016, str. 1–7, DOI:10.1109/CSCN.2016.7785170.

[27] Hoglund, A.; Bergman, J.; Lin, X.; aj.: *Overview of 3GPP Release 14 Further Enhanced MTC*. *IEEE Communications Standards Magazine*, ročník 2, č. 2, červen 2018: str. 84–89, ISSN 2471-2825, DOI:10.1109/MCOMSTD.2018.1700050.

[28] Ratasuk, R.; Mangalvedhe, N.; Bhatoolaul, D.; aj.: *LTE-M Evolution Towards 5G Massive MTC*. In *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, prosinec 2017, str. 1–6, DOI:10.1109/GLOCOMW.2017.8269112.

[29] Hsieh, P.; Jia, Y.; Parra, D.; aj.: *An Experimental Study on Coverage Enhancement of LTE Cat-M1 for Machine-Type Communication*. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, březen 2018, ISSN 1938-1883, str. 1–5, DOI:10.1109/ICC.2018.8422888.

[30] Ayoub, W.; Samhat, A. E.; Nouvel, F.; aj.: *Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility. IEEE Communications Surveys Tutorials*, říjen 2018: str. 1–1, ISSN 1553-877X, DOI:10.1109/COMST.2018.2877382.

[31] Chen, M.; Miao, Y.; Hao, Y.; aj.: *Narrow Band Internet of Things. IEEE Access*, ročník 5, září 2017: str. 20557–20577, ISSN 2169-3536, DOI:10.1109/ACCESS.2017.2751586.

[32] Vodafone: *Vodafone letos rozsvítí celonárodní síť pro NB-IoT*. [ONLINE] <https://www.vodafone.cz/o-vodafonu/o-spolecnosti/pro-media/tiskove-zpravy/detail/vodafone-letos-rozsviti-celonarodni-sit-pro-nb-iot/>, červenec 2017, dostupné: 14.11.2018.

[33] Vodafone: *Vodafone zdvojnásobí evropské pokrytí sítí internetu věcí NB-IoT*. [ONLINE] <https://www.vodafone.cz/o-vodafonu/o-spolecnosti/pro-media/tiskove-zpravy/detail/vodafone-zdvojnasobi-evropske-pokryti-siti-interne/>, září 2018, dostupné: 24.11.2018.

[34] Centenaro, M.; Vangelista, L.; Zanella, A.; aj.: *Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. IEEE Wireless Communications*, ročník 23, č. 5, říjen 2016: str. 60–67, ISSN 1536-1284, DOI:10.1109/MWC.2016.7721743.

[35] LAGUSSON, P.; NORDLÖF, J.: *A Study of Low-Power Wide-Area Networks and an In-Depth Study of the LoRaWAN Standard*. Diplomová práce, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Machine Design (Dept.)., září 2017.

[36] Mekki, K.; Bajic, E.; Chaxel, F.; aj.: *Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT*. In *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, březen 2018, str. 197–202, DOI:10.1109/PERCOMW.2018.8480255.

[37] *LoRa Alliance: LoRaWAN*. [ONLINE] <https://lora-alliance.org/>, dostupné: 31.10.2018.

[38] *Microchip Data Sheet: RN2483*. [ONLINE] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483#additional-features>, dostupné: 10.11.2018.

[39] Sisinni, E.; Carvalho, D. F.; Ferrari, P.; aj.: *Enhanced flexible LoRaWAN node for industrial IoT*. In *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, červen 2018, str. 1–4, DOI:10.1109/WFCS.2018.8402367.

[40] Konsorcium NS-3: *ns-3 Manual, Release ns-3.29*. [ONLINE] <https://www.nsnam.org/documentation/>, září 2018, dostupné: 25.11.2018.

[41] Zhang, H.; Guo, J.: *Application of manet routing protocol in vehicular ad hoc network based on NS3*. In *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, červenec 2017, ISSN 2377-844X, str. 391–394, DOI:10.1109/ICEIEC.2017.8076589.

[42] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC): *LENA*. [ONLINE] <http://networks.cttc.es/mobile-networks/software-tools/lena/>, 2017, dostupné: 28.11.2018.

[43] Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC): *The LENA ns-3 LTE Module Documentation, Release v8*. [ONLINE] <http://networks.cttc.es/wp-content/uploads/sites/2/2014/01/lena-lte-module-doc.pdf>, leden 2014, dostupné: 28.11.2018.

[44] Fraunhofer ESK: *ELENA*. [ONLINE] <https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/elena-ns3-lte/elena>, 2019, dostupné: 06.04.2019.

[45] Michele Polese: *LENA+*. [ONLINE] <https://github.com/signetlabdei/lena-plus>, 2016, dostupné: 19.04. 2019.

[46] Polese, M.; Centenaro, M.; Zanella, A.; aj.: *M2M massive access in LTE: RACH performance evaluation in a Smart City scenario*. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, květen 2016, ISSN 1938-1883, str. 1–6, DOI:10.1109/ICC.2016.7511430.

[47] NSNAM: *Ns-3 Documentation*. [ONLINE] <https://www.nsnam.org/docs/release/3.29/doxygen/index.html>, 2019, dostupné: 19.04.2019.

[48] 3GPP: *TS 36.213 version 15.4.0 Release 15*. [ONLINE] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427>, dostupné: 02.03.2019.

[49] Shin, E.; Shin, J.: *Sounding reference signal measurement in LTE system*. In *2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, leden 2016, str. 755–758, DOI:10.1109/ICACT.2016.7423548.

[50] 3GPP: *TR 36.888 V12.0.0 Release 12*. [ONLINE] <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2578>, dostupné: 24.04.2019.

[51] Boisguene, R.; Tseng, S.; Huang, C.; aj.: *A survey on NB-IoT downlink scheduling: Issues and potential solutions*. In *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, červen 2017, ISSN 2376-6506, str. 547–551, DOI:10.1109/IWCMC.2017.7986344.

[52] Mroue, H.; Nasser, A.; Hamrioui, S.; aj.: *MAC layer-based evaluation of IoT technologies: LoRa, SigFox and NB-IoT*. In *2018 IEEE Middle East and North Africa Communications Conference (MENACOMM)*, duben 2018, str. 1–5, DOI:10.1109/MENACOMM.2018.8371016.

[53] Lauridsen, M.; Nguyen, H.; Vejlgaard, B.; aj.: *Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km² Area*. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, červen 2017, str. 1–5, DOI:10.1109/VTCSpring.2017.8108182.

[54] Vos, G.: *The Opportunity for LTE-M/Cat-M1*. [ONLINE] <https://www.sierrawireless.com/\~/media/IOT/Developer%20Day%202016/Presentations/3-CAT-M1_Gus_DevDay2016/>, dostupné: 26.10.2018.

[55] *Sierra Wireless et al., White paper: Coverage Analysis of LTE-M Category M1*. 2017.

[56] SimpleCell Networks a.s.: *Technologie SIGFOX*. [ONLINE] <https://simplecell.eu/technologie-sigfox/>, dostupné: 31.10.2018.

[57] GSMA: *GSMA Announces Completion of First European NB–IOT Roaming Trial*. [ONLINE] <https://www.gsma.com/newsroom/press-release/gsma-announces-completion-of-first-european-nb-iot-roaming-trial/>, červen 2018, dostupné: 19.11.2018.

[58] Ismail, N. L.; Kassim, M.; Ismail, M.; aj.: *A Review of Low Power Wide Area Technology in Licensed and Unlicensed Spectrum for IoT Use Cases. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, ročník 7, č. 2, červen 2018: str. 183–190, ISSN 2302-9285, DOI:10.11591/eei.v7i2.1174.

[59] Silva, J. C.; Rodrigues, J. J. P. C.; Alberti, A. M.; aj.: *LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities*. In *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, červen 2017, str. 1–6.

[60] Adelantado, F.; Vilajosana, X.; Tuset-Peiro, P.; aj.: *Understanding the Limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine*, ročník 55, č. 9, září 2017: str. 34–40, ISSN 0163-6804, DOI:10.1109/MCOM.2017.1600613.

[61] VMware: *Oficiální stránky VMware.* [ONLINE] <https://www.vmware.com>, dostupné: 30.11.2018.

[62] Eclipse: *Eclipse documentation – Current Release Eclipse 2018-09.* [ONLINE] <https://help.eclipse.org>, dostupné: 30.11.2018.

[63] *NetAnim 3.108.* [ONLINE] <https://www.nsnam.org/wiki/NetAnim_3.108>, dostupné: 30.11.2018.

[64] Wireshark: *About Wireshark.* [ONLINE] <https://www.wireshark.org/>, dostupné: 30.11.2018.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

IoT	Internet of Things
ICT	Information and Communication Technologies
RFID	Radio Frequency Identification
QPSK	Quadrature Phase-Shift -keying
SC-FDMA	Single-Carrier FDMA
M2M	Machine-to-Machine
MTC	Machine Type Communication
LPWA	Low-Power Wide-Area
LPWAN	Low-Power Wide-Area Network
LoRaWAN	Long-Range Wide-Area Network
3GPP	Third Generation Partnership Project
LTE	Long Term Evolution
NB–IoT	Narrowband IoT
eMTC	enhanced Machine Type Communication
GSM	Global System for Mobile Communications
eUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
TDMA	Time Division Multiple Access
GPRS	General Packet Radio Service
UMTS	Universal Mobile Terrestrial System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

eNB	eUTRAN Node Base
UE	User Equipment
HSS	Home Subscriber Server
MME	Mobility Managment Entity
SGW	Serving Gateway
PGW	Packet data network Gateway
PCRF	Policy control and Chargig Rules Function
FD	Full Duplex
HD	Half Duplex
CE	Coverage Enhancement
RSRP	Reference Signal Received Power
PSS	Primary Synchronization Signal
SSS	Secondary Synchronization Signal
PBCH	Physical Broadcast Channel
MIB	Master Information Block
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
H2H	Human-to-Human
DCI	Downlink Control Information
UCI	Uplink Control Information
MPDCCH	Machine Type Communication Physical Downlink Control Channel
FDD	Frequency-Division Duplex
TDD	Time-Division Duplex
TBCC	Tail-Biting Convolution Code

RE	Resource Element
PRB	Physical Resource Blocks
PSM	Power Saving Mode
eDRX	extended Discontinuous Reception
DRX	Discontinuous Reception
TAU	Tracking Area Update
UNB	Ultra-Narrow Band
SIM	Subscriber Identity Module
GDSP	Global Data Service Platform
USA	United States of America
DPSK	Differential Phase Shift Keying
SLA	Service-Level Agreement
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
LoRa	Long Range
MAC	Medium Access Control
API	Application Programming Interface
CSS	Chirp Spread Spectrum
MCL	Maximum Coupling Loss
MCS	Modulation Coding Scheme
TB	Transport Block
TBS	Transport Block Size
NS–3	Network Simulator 3
GPLv2	General Public License version 2
PRNG	Pseudo-Random Number Generator
CCTC	Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

HetNets	Heterogeneous Network
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technologies
DSA	Dynamic Spectrum Access
RLC	Radio Link Control
PDCP	Packet Data Convergence Control
RRC	Radio Resource Control
RACH	Random Access Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
MAC	Medium Access Layer
PHY	Physical Layer
RRM	Radio Resource Management
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol
IDE	Integrated Development Environment
CDT	C/C++ Development Toolkit
ISM	Industrial, Scientific and Medical
SRS	Sounding Reference Signal
CSI	Channel State Information
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number

SEZNAM PŘÍLOH

A Příloha - Zdrojové kódy **87**

B Obsah přiloženého CD **89**

C Srovnání bezdrátových LPWA technologií **90**

D Podpůrný software **92**

A PŘÍLOHA - ZDROJOVÉ KÓDY

Příloha obsahuje hlavní program (tzv. scratch), pro každý ze zmíněných scénářů ve složce /Scénáře/scenar_XX/scratch/ ve formátu *.cc . Složka Scénáře také obsahuje výstupy simulace,tj. soubor vygenerovaný modulem Flowmonitor formátu *.xml a výstup konzole ve formátu *.log. Dále příloha obsahuje ve složce /Grafy-/scenar_XX/ každého scénáře grafy z programu Gnuplot.

Pro možnost simulace jsou přiloženy upravené soubory modulu ELENA simulátoru NS–3 ve složce Modifikované. Složka Pomocné obsahuje pomocný skript pro automatické generování grafů pomocí Gnuplot a převod grafů z formátu *.svg do *.pdf.

Z důvodu úspory místa nejsou do systému vloženy soubory *.xml vygenerované simulátorem NS–3 pro možnost zobrazení animace pomocí programu NetAnim. Všechny dodatečné části jsou uložené na připojeném disku CD.

- `/` ..... Systémový adresář
  - `Přílohy_DP_Drápela_IS.zip` ..... Komprimované přílohy formátu ZIP
    - `DP_Rozsireny_scenar` ..... Kořenový adresář Rozšířeného scénáře
      - `Critical` ..... Přílohy scénáře Kritický scénář souběhu
        - `Grafy` ..... Adresáře s výstupy scénáře Kritický scénář souběhu
          - `Diploma_500_CAT-M1_all_in1sec` .... Výstupy scénáře Cat-M1
          - `Diploma_500_LTE-LTEA_all_in1sec` . Výstupy sc. LTE/LTE-A
          - `Diploma_graph_critical_merged` .... Spojené výstupy scénáře
        - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
          - `Diploma_500_CAT-M1_all_in1sec` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_500_LTE-LTEA_all_in1sec` ..... Zdrojové kódy scénář
      - `LTE_Cat_M1` ..... Přílohy scénáře s konfigurací LTE Cat-M1
        - `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
          - `Diploma_ELENA_CATM1_8kbps` ..... Výstupy scénáře 8kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_10kbps` ..... Výstupy scénáře 10kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_14kbps` ..... Výstupy scénáře 14kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_20kbps` ..... Výstupy scénáře 20kbps
          - `Diploma_graph_CATM1_merged` ..... Spojené výstupy scénáře
        - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
          - `Diploma_ELENA_CATM1_8kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_10kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_14kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_20kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře.
      - `LTE_LTEA` ..... Přílohy scénáře LTE/LTE-A
        - `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_14kbps` .... Výstupy scénáře 14kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_140kbps` .. Výstupy scénáře 140kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_400kbps` .. Výstupy scénáře 400kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_585kbps` .. Výstupy scénáře 585kbps

- `Diploma_graph_LTEA_merged` ..... Spojené výstupy scénáře
- `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
  - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_14kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
  - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_140kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
  - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_400kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
  - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_585kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
- `Modifikované` ..... Modifikované soubory modulu LENA NS–3
- `Pomocné` ..... Pomocný skript pro automatické generování grafů

`DP_Uvodni_scenar` ..... Kořenový adresář Úvodního scénáře

- `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
- `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů

B OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na CD jsou uloženy zdrojové kódy a soubory dle popisu Příloha - Zdrojové kód. Navíc obsahují ve složce /Scénář/scenar_XX/ výstupy pro animátor NetAnim ve formátu *.xml.

- `/` ..... Systémový adresář
  - `Přílohy_DP_Drápela_IS.zip` ..... Komprimované přílohy formátu ZIP
    - `DP_Rozsireny_scenar` ..... Kořenový adresář Rozšířeného scénáře
      - `Critical` ..... Přílohy scénáře Kritický scénář souběhu
        - `Grafy` ..... Adresáře s výstupy scénáře Kritický scénář souběhu
          - `Diploma_500_CAT-M1_all_in1sec` .... Výstupy scénáře Cat-M1
          - `Diploma_500_LTE-LTEA_all_in1sec` . Výstupy sc. LTE/LTE-A
          - `Diploma_graph_critical_merged` .... Spojené výstupy scénáře
        - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
          - `Diploma_500_CAT-M1_all_in1sec` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_500_LTE-LTEA_all_in1sec` ..... Zdrojové kódy scénář
      - `LTE_Cat_M1` ..... Přílohy scénáře s konfigurací LTE Cat-M1
        - `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
          - `Diploma_ELENA_CATM1_8kbps` ..... Výstupy scénáře 8kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_10kbps` ..... Výstupy scénáře 10kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_14kbps` ..... Výstupy scénáře 14kbps
          - `Diploma_ELENA_CATM1_20kbps` ..... Výstupy scénáře 20kbps
          - `Diploma_graph_CATM1_merged` ..... Spojené výstupy scénáře
        - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
          - `Diploma_ELENA_CATM1_8kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_10kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_14kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_CATM1_20kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře.
      - `LTE_LTEA` ..... Přílohy scénáře LTE/LTE-A
        - `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_14kbps` .... Výstupy scénáře 14kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_140kbps` .. Výstupy scénáře 140kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_400kbps` .. Výstupy scénáře 400kbps
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_585kbps` .. Výstupy scénáře 585kbps
          - `Diploma_graph_LTEA_merged` ..... Spojené výstupy scénáře
        - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_14kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_140kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_400kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
          - `Diploma_ELENA_LTE_LTEA_585kbps` ..... Zdrojové kódy scénáře
      - `Modifikované` ..... Modifikované soubory modulu LENA NS–3
      - `Pomocné` ..... Pomocný skript pro automatické generování grafů
    - `DP_Uvodni_scenar` ..... Kořenový adresář Úvodního scénáře
      - `Grafy` ..... Adresáře s výslednými grafy
      - `Scénáře` ..... Adresáře se zdrojovými kódy scénářů

C SROVNÁNÍ BEZDRÁTOVÝCH LPWA TECHNOLOGIÍ

V této příloze jsou srovnány LPWA technologie Sigfox, LoRa, NB–IoT a LTE Cat-M1. Data v tab. C.1 byla získána z [1, 36, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59].

Tab. C.1: Srovnání bezdrátových LPWA sítí.

	Sigfox	**LoRaWAN**	**NB–IoT**	**LTE Cat-M1**
Pokrytí (MCL[1])	160 dB	157 dB	164 dB	164 dB
Šířka pásma	100 Hz	125 kHz	180 kHz	1,08 MHz
Frekveční pásmo	868 (Evr.) / 915 (USA) MHz	868 (Evr.) / 915 (USA) MHz	700–900 MHz	700–900 MHz
Licence pásma	Bezlicenční	Bezlicenční	Licenční	Licenční
Modulace	DPSK	CSS	QPSK	QPSK/16-QAM
Vysílací výkon	25 mW / 14 dBm	25 mW / 14 dBm	23 dBm nebo 20 dBm	23 dBm nebo 20 dBm
Rychlost UL/DL	100/100 b/s [2]	0,3 – 50/0,3 – 50 kb/s [2]	62,5/27,2 kb/s	375/300 kb/s
Velikost zprávy UL	0 – 12 B	51 – 222 B	125 B [5]	125 B [5]
Roaming	ANO	ANO (v1.1)	NE [3]	NE [3]
Autentizace a šifrování	ANO (Symetrická šifra)	Ano (AES 128b)	Ano (LTE šifrování)	Ano (LTE šifrování)
Dosah [58]	30 – 50 km (venkov. oblasti)	10 – 15 km (venkov. oblasti)	15 Km	11 Km
Životnost baterie	8 ∼ 10 let [59]	7 ∼ 8 let [59]	11,8 let (Stand-alone) [4] 11,3 let (In-Band)	8,8 let [4]
Cena čipu [60]	2 – 5 $	2 – 5 $	8 – 12 $	8 – 12 $

[1]MCL je velmi obvyklé měření, které popisuje rozsah pokrytí systému.
[2]Data platná pro území Evropy.
[3]V této době existuje zatím pouze trial verze, představená GSMA 6/2018 [57].
[4]Data platí pro MCL, kdy zařízení odesílá 200 bytů jednou denně.
[5]TBS (Transport Block Size) platná pro 13. vydání 3GPP, pro 14. vydání je pro Cat M1 hodnota až 373 B.

D PODPŮRNÝ SOFTWARE

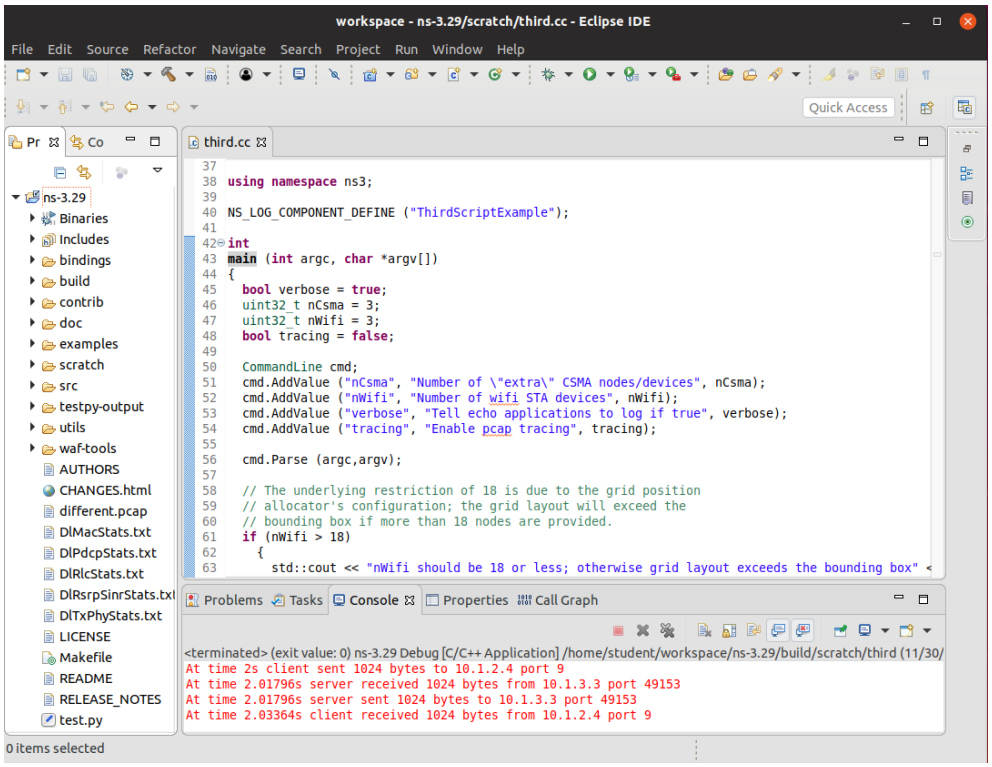
Tato příloha stručně popisuje použitý software potřebný pro simulaci a její vyhodnocení. Simulátor NS–3 s implementovaným modulem LENA je vytvářen, editován, laděn a spouštěn přes vývojové postředí Eclipse. Výstupy simulace jsou následně zpracovány pomocí programů NetAnim pro vizualizaci a Wireshark pro zobrazení paketového toku dat. Při práci s NS–3 se využívá linuxové jádro, proto je přes VMware Player spuštěn viruální obraz 64-bitové linuxové distribuce Ubuntu 18.10. Více o zmíněném softwaru je pojednáno níže.

VMware Player

VMware Player je nástroj pro možnost spuštění virtuálního stroje (VM) na počítači s operačním systémem Windows nebo Linux. Umožňuje sdílení hardwarových prostředků mezi hlavním a virtuálním prostředím. Dostupný je open-source Workstation Player s free-ware licencí nebo Workstation Pro s placenou licencí. Tato verze dovoluje navíc oproti neplacené verzi např. možnost spuštění zašifrovaných VM, více VM najednou, vytváření tzv. Snapshotů atd. [61]. Pro tuto práci je využita verze VMware Workstation 15 Pro.

Eclipse

Eclipse je open-source vývojová platforma, která slouží jako vývojové prostředí pro vytváření, editování, ladění a build projektů, příp. jejich spouštění. Je dodáván s integrovaným Java IDE (Integrated Development Environment). Pomocí tzv. toolkitů je možné rozšíření na více programovacích jazyků. Například pro jazyky C/C++ je to CDT (C/C++ Development Toolkit) [62]. V této práci je využito prostředí s názvem „Eclipse IDE for C/C++ Developers“ verze 2018-09. Ukázka vývojového prostředí Eclipse je zobrazena na obr. D.1.



Obr. D.1: Ukázka vývojového prostředí Eclipse.

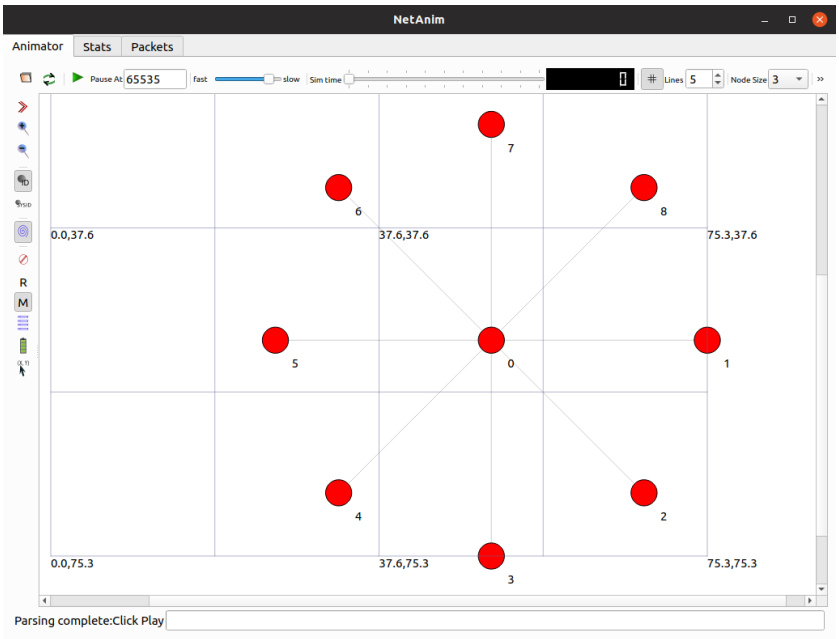
NetAnim

NetAnim je offline animátor založený na Qt toolkit. Dovoluje vytvářet animaci síťové simulace pomocí XML souboru. Tento soubor je vytvářen modulem Flow Monitor simulátoru NS–3 [63]. Ukázka programu NetAnim je zobrazena na obr. D.2.

Mimo jiné podporuje [63]:

- animaci paketů procházejících přes drátové i bezdrátové linky (omezená podpora LTE, bez podpory IPv6),
- vykreslení pozice uzlů s trajektorií jejich cesty,
- krokování simulace,
- analyzovat XML soubor a pro každý tok zobrazit statistiku,
- zobrazit a vytisknout směrovací tabulku v konkrétních uzlech ve specifikovaném čase.

V této práci je využíván NetAnim verze 3.108, který je svázán s NS–3 verzí 3.29.



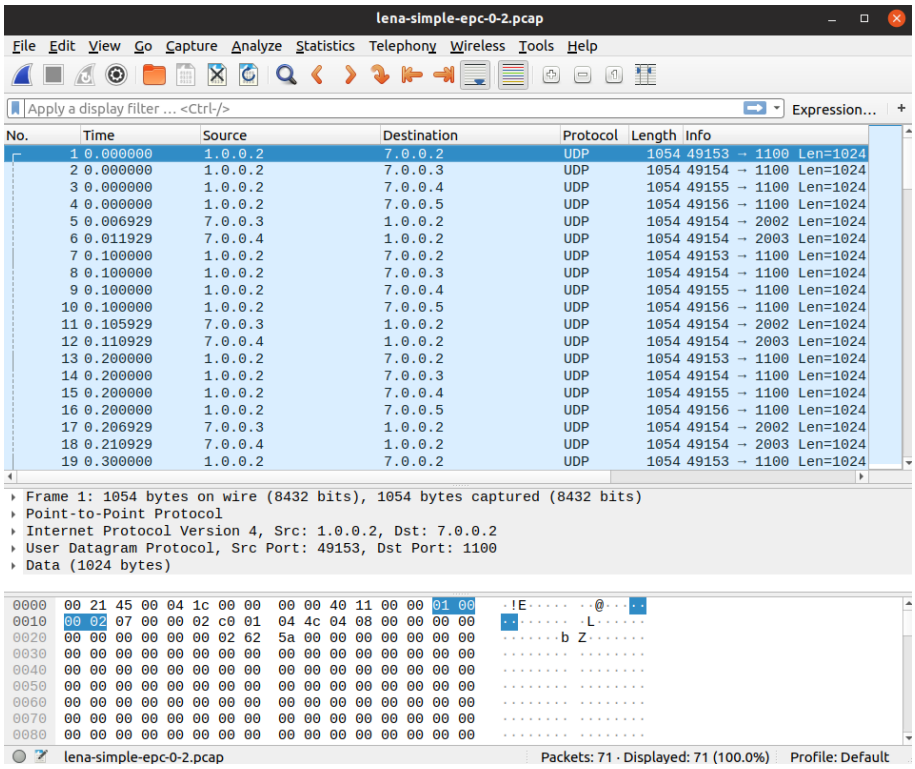
Obr. D.2: Ukázka animátoru NetAnim.

Wireshark

Wireshark je analyzátor síťových protokolů. Veřejně dostupný je pod licencní GNU GPLv2. Je multi-platformní, takže lze využít jak pro Windows, tak pro Linux, macOS, FreeBSD a další. Ukázka analyzátoru Wireshark je zobrazena na obr. D.3.

Jeho funkce jsou například [64]:

- hloubková analýza paketů,
- zachytávání a offline analýza síťového provozu,
- vizuální zobrazení toku dat mezi uzly,
- analýza VoIP telefonie,
- využití filtrů zobrazení,
- podpora dešifrování protokolů (např. IPsec, Kerberos, SNMPv3, SSL/TLS).



Obr. D.3: Ukázka analyzátoru Wireshark.